



Obemannade farkoster och autonoma system – teknik och operatör

Slutrapport

JOUNI RANTAKOKKO (REDAKTÖR), JONATAN ADOLFSSON,
ZACKARIAS ALENLJUNG, ANNA ANDERSSON,
JOHAN BERNELAND, ERIK BRANZÉN, OSSIAN ERIKSSON,
HENRIK FELIXSON, MARTIN GELIN, MOAMIA GIDESKOG,
BERTIL GRELSSON, MARTIN HAGSTRÖM, JOHAN HAMBERG,
JOHAN HENNINGSSON, OSKAR KARLSSON,
FREDRIK KULLANDER, KARL LAGERKVIST BLOMQVIST,
JACOB LANDELIUS, ELLEN LINDGREN, SALLY LONGWORTH,
JONAS NYGÅRDS, JOAKIM RYDELL, OLLE SIEVERS,
PETER STRÖMBÄCK, TIM WIIK

Jouni Rantakokko (redaktör), Jonatan Adolfsson, Zackarias Alenljung, Anna Andersson, Johan Berneland, Erik Branzén, Ossian Eriksson, Henrik Felixson, Martin Gelin, Moamia Gideskog, Bertil Grelsson, Martin Hagström, Johan Hamberg, Johan Henningsson, Oskar Karlsson, Fredrik Kullander, Karl Lagerkvist Blomqvist, Jacob Landelius, Ellen Lindgren, Sally Longworth, Jonas Nygårds, Joakim Rydell, Olle Sievers, Peter Strömbäck, Tim Wiik

Obemannade farkoster och autonoma system – teknik och operatör

Slutrapport

Titel	Obemannade farkoster och autonoma system – teknik och operatör: Slutrapport
Title	Unmanned vehicles and autonomous systems: Final report
Rapportnr/Report no	FOI-R--5716--SE
Månad/Month	Maj
Utgivningsår/Year	2025
Antal sidor/Pages	53
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Övrigt
FoT-område	Temaområde
Projektnr/Project no	E38546
Godkänd av/Approved by	Emil Hjalmarson
Ansvarig avdelning	Cyberförsvar och ledningsteknik

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

Obemannade farkoster har på ett omvälvande sätt förändrat operationsmiljön i Ukraina och de bedöms vara outhärliga i framtida väpnade konflikter. Denna slutrapport ger dels en detaljerad beskrivning av den forskning som har genomförts under 2024 i projektet *Obemannade farkoster och autonoma system – teknik och operatör*, dels en övergripande sammanfattning av forskningen som genomförts under hela projektet (2021 till 2024). Forskningsaktiviteterna har fokuserats på tre delområden: (i) kritiska förutsättningsskapande tekniker som farkost- och uppdragsautonomi, samt störsäkra kommunikations- och positioneringssystem, (ii) metoder för samverkan mellan operatör och obemannade farkoster, samt (iii) juridiska och etiska aspekter kopplade till användningen av beväpnade obemannade system.

Den kunskap som har byggts upp inom projektet har nyttiggjorts bland annat i Försvarmaktens studieverksamhet. Den har bidragit till att höja kvaliteten i direktbeställningar från Försvarmakten och FMV, samt på olika sätt stöttat Försvarmaktens förmågeutveckling inom området obemannade farkoster. Djupet i forskningen har dock ännu inte nått den önskade nivån och forskningshöjden bör förbättras i den fortsatta forskningen.

Nyckelord: Obemannade, autonoma, UAV, UGV, USV, folkrätt, etik, operatörsgrenssnitt, sensoråterkopplad styrning, farkostautonomi, uppdragsautonomi, laserkommunikation, positionering, navigering, feldetektion, hinderundvikande

Summary

Unmanned systems has transformed the operational environment in Ukraine and they are indispensable in future military conflicts. This final report provides a detailed summary of the research that has been performed within the project *Unmanned vehicles and autonomous systems – technology and operator* during 2024, as well as a shorter summary of the research and results that have been obtained during the lifespan of the project (during 2021 to 2024). The research activities have centred around three research avenues: (i) critical enabling technologies such as autonomy and robust communication and positioning systems, (ii) methods for cooperation and teaming between operator and unmanned system, and (iii) legal and ethical aspects coupled to the use of armed unmanned systems.

The generated knowledge has been utilized in different studies and projects performed by the Armed Forces and FMV, and supported the Armed Forces in their capability development within the area of unmanned systems. However, the theoretical depth of the research has not yet reached the desired level, which is an area that should be improved in the coming years.

Keywords: Unmanned, autonomous, UAV, UGV, USV, IHL, ethics, user interface, core autonomy, mission autonomy, free-space optical communications, positioning, navigation, fault detection, obstacle avoidance

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Projektbeskrivning	8
1.2	Om rapporten.....	10
1.3	Nomenklatur	10
2	Sammanfattning av genomförda aktiviteter under 2021-2024... ..	13
2.1	Omvärldsbevakning	13
2.2	Autonoma funktioner	14
2.3	Möjliggörande tekniker	16
2.4	Samverkan mellan operatör och obemannade system & värdering.....	17
2.5	Juridik och etik	19
2.6	Projektets publikationer	20
2.7	Diskussion	23
3	Genomförda aktiviteter 2024	25
3.1	Säkerhetskritiska autonoma funktioner	25
3.2	Uppdragsautonomi	29
3.3	Möjliggörande tekniker	32
3.4	Samverkan mellan operatör och obemannade system.....	40
3.5	Juridik och etik	41
3.6	Övriga kompetensuppbyggande aktiviteter	44
4	Samarbeten.....	47
4.1	Nationellt.....	47
4.2	Internationellt	47
5	Sammanfattning.....	49
	Referenser.....	51

1 Inledning

Nikola Tesla utvecklade sin *Automaton* – en enkel radiostyrd båt som styrdes via frekvensresonans – och genomförde en demonstration redan 1898 i Madison Square Garden (figur 1.1). Den kan ses som början på utvecklingen av obemannade farkoster. Utvecklingen av radiostyrda¹ obemannade farkoster för militära ändamål intensifierades under första och andra världskrigen, då flera obemannade farkoster även kom till användning. Den militära nyttan med dessa bedöms dock ha varit begränsad. Den militära utvecklingen och användningen av obemannade farkoster för mark-, sjö- och luftstriden sammanfattas i [1].

Obemannade farkoster används numera på alla nivåer och arenor i militära konflikter och de är tillgängliga för alla aktörer. Obemannade farkoster har på ett omvälvande sätt förändrat operationsmiljön i Ukraina och de har bidragit till den sensortäta stridsmiljö som benämns det *transparenta stridsfältet* [2].



Figur 1.1: Nikola Teslas Automaton. Sändaren använde separata frekvenser för att skicka styrkommandon. Denna fungerande version återfinns på Teslas tekniska museum i Zagreb (foto: FOI) [1].

¹ Benämning på styrsätt för en farkost som styrs av en operatör som hela tiden ser farkosten. En teleopererad obemannad farkost styrs istället på distans baserat på en videoström som skickas från farkosten till operatören.

Den stora mängden sensorer, som huvudsakligen bärs av stridstekniska och taktiska UAV:er (eng. Unmanned Aerial Vehicle), har medfört att det är svårt att dölja sig på stridsfältet framförallt under förflyttning. Denna utveckling har lett till att båda sidor har en mycket god förmåga till detektion, inmätning och lokalisering av fientliga mål och genom att koppla samman denna förmåga med verkanssystem har snabba bekämpningskedjor möjliggjorts. Detta har medfört att militära enheter har svårt att förflytta sig eller kraftsamla utan att bli upptäckta och bekämpade [2].

Teknikutvecklingen inom framförallt enklare obemannade lågkostnadsfarkoster i kombination med den snabba metod- och taktikutvecklingen, där metod och taktik anpassas utifrån teknikens begränsningar, utgör en av de viktigaste erfarenheterna från kriget i Ukraina som behöver omhändertas i Försvarmaktens fortsatta förmågeutveckling kopplad till obemannade farkoster [3]. Utvecklingscykeln från design och utveckling till operativ användning av exempelvis mindre UAV:er anges nu vara enstaka månader. Den snabba utvecklingscykeln omhändertar de omedelbara behoven som ofta handlar om mindre iterativa förbättringar – det finns utmaningar med att samtidigt hinna lyfta blicken och prioritera att identifiera och lösa de långsiktiga forskningsutmaningarna.

1.1 Projektbeskrivning

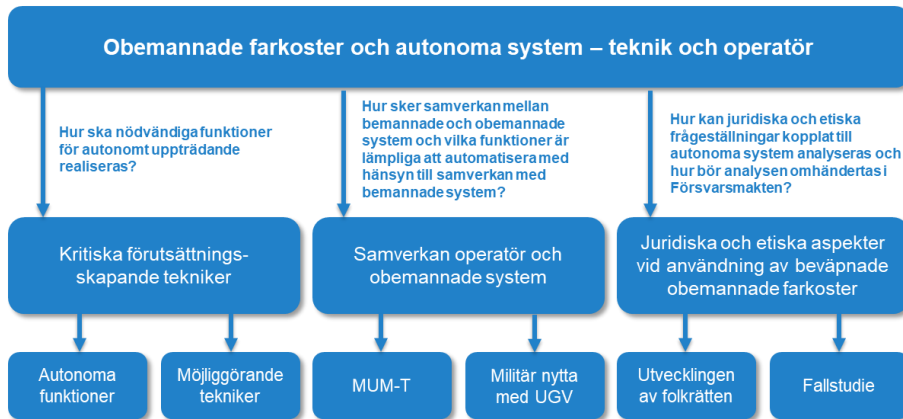
Målet i FoT-projektet *Obemannade farkoster och autonoma system – teknik och operatör*² har varit att utveckla kunskap, metoder och verktyg för att stödja Försvarmaktens förmågeutveckling kopplad till framtidens (fjärrstyrda och autonoma) obemannade farkoster inom mark-, sjö- och luftarenorna.

Projektets övergripande frågeställningar har varit:

- Hur ska nödvändiga funktioner för autonomt uppträdande realiseras?
- Hur sker samverkan mellan bemannade och obemannade system och vilka funktioner är lämpliga att automatisera med hänsyn till samverkan med bemannade system?
- Hur kan juridiska och etiska frågeställningar kopplat till autonoma system analyseras och hur bör analysen omhändertas i Försvarmakten?

Exempel på nödvändiga funktioner för autonomt uppträdande är robust och störtlång navigering och kommunikation, feldetektion, hantering av nödsituationer, rutt- och uppdragsplanering samt metoder för hur grupper av obemannade system ska styras som en enhet (ofta kallat svärmar).

² Försvarmaktens FoT-plan för projektet AT.9226007, Autonomi/Obemannat FOI 24.



Figur 1.2: Projektets struktur med de primära forskningsinriktningarna, baserat på projektets övergripande frågeställningar.

Projektets fokus har, baserat på ovanstående frågeställningar, riktats mot att bygga kunskap inom tre huvudområden: (i) kritiska förutsättningsskapande tekniker, (ii) funktionen för samverkan mellan operatör och obemannade system samt (iii) juridiska och etiska aspekter kopplat till användningen av beväpnade obemannade farkoster. En övergripande beskrivning av projektets forskningsinriktningar ges i figur 1.2.

Den tekniskt inriktade forskningen delas vidare in i säkerhetskritiska autonoma funktioner, autonoma funktioner som möjliggör uppdragsautonomi och möjliggörande tekniker. De möjliggörande tekniker som studerats inom projektet är robusta multisensorbaserade PNT³-system och robusta laserkommunikations-system. Fokus är på tekniker som kan möjliggöra ett effektivt genomförande av operationer även i kraftigt telestörda miljöer där GNSS⁴-mottagare och radiobaserade styr- och datalänkar för obemannade farkoster löper stor risk att störas ut.

Arbetet inom området samverkan mellan operatör och obemannade system har bedrivits i två spår, dels med målet att öka förståelsen kring hur MUM-T (eng. Manned-Unmanned Teaming) kan realiseras, dels studier av vilken militär nytta obemannade markfarkoster (eng. Unmanned Ground Vehicle, UGV) potentiellt skulle kunna ge. I arbetet har en bred tolkning av begreppet MUM-T tagits där samverkan både mellan ett obemannat system och en operatör ("man"), eller med en bemannad farkost ("manned"), har ingått. Ambitionen är att den militära nyttan ska utvärderas genom iterativa försök med egenutvecklade experiment-

³ Position, navigering och tid.

⁴ Global Navigation Satellite System. Det finns idag fyra globala satellitnavigeringssystem: GPS (USA), Galileo (EU), GLONASS (Ryssland) och Beidou-3 (Kina).

system med stegvis ökande komplexitet hos de autonoma funktionerna, vilket medför behov av förändrade lednings- och interaktionsgränssnitt.

Etiska frågeställningar är intressanta att studera och förstå eftersom de påverkar den pågående utvecklingen av internationell humanitär rätt (IHR) kopplad till autonoma vapensystem. De utgör samtidigt även grunden för eventuella framtida nationella styrningar av användningen av vapensystem med automatiserade och autonoma funktioner. De juridiska frågeställningarna kopplade till användningen av beväpnade obemannade farkoster⁵ är dock viktigare att förstå då Försvarsmakten redan idag är bundna till att följa dessa. IHR har även implikationer på hur forskning och utveckling av automatiserade och autonoma funktioner inom bekämpningskedjan bör bedrivas för att säkerställa att de senare ska kunna användas i enlighet med folkrätten.

1.2 Om rapporten

Föreliggande rapport utgör slutleveransen inom FoT-projektet *Obemannade farkoster och autonoma system – teknik och operatör*. Syftet med rapporten är tudelat: rapporten ger dels en översiktlig sammanfattning av det arbete som genomförts inom ramen för projektet under perioden 2021-2024, dels en mer detaljerad beskrivning av de aktiviteter som genomförts under 2024.

Flertalet av de aktiviteter som har studerats är fortfarande i en uppstartsfas, samtidigt som Försvarsmaktens behov primärt har varit inriktat mot en bred kunskap inom området obemannade och autonoma farkoster. Projektet har därmed huvudsakligen fokuserat på att generera en bred kunskap när det gäller operativ användning och operationell experimentering, användarbehov, vad industri kan erbjuda idag, möjligheter och begränsningar för olika autonoma funktioner, hur robusta positionerings- och kommunikationssystem kan realiseras och centrala juridiska och etiska aspekter kopplat främst till användningen av beväpnade obemannade farkoster. Forskningen fortsätter med liknande inriktning inom det nyinrättade FoT-området *Autonomi och obemannade system*.

1.3 Nomenklatur

Entydiga förankrade definitioner saknas för flera centrala begrepp som ofta används i litteraturen som beskriver obemannade farkoster. Det gäller begrepp såsom autonomi, autonom farkost, farkostautonomi, uppdragsautonomi och artificiell intelligens (AI). Vi följer i denna rapport den nomenklatur som

⁵ Beslut om vapenverkan kan för en beväpnad obemannad farkost ske på olika sätt, med olika nivå av mänsklig inblandning. Den kan vara teleopererad där en operatör baserat på sensordata (typiskt realtidsvideo) väljer mål och fattar beslut om bekämpning. Detektion och klassificering av mål kan även utföras med hjälp av AI-baserade metoder och systemet kan därefter föreslå mål för operatören som, efter analys, kan fatta beslut om bekämpning mot något eller några av målen.

beskrivs i [4]-[6]. Tolkningen av de olika begreppen har även förändrats till del under projektets gång. Det finns ett behov av en samlad taxonomi (åtminstone nationellt bland försvarsmyndigheterna), men att ta fram en konsistent och detaljerad sådan utgör en stor utmaning.

Autonom	Används ofta för att beskriva komplex automation medan automatisk är ett begrepp som används för att beskriva mer välkända automatiska funktioner och vad som ofta uppfattas som enkla system.
Autonom farkost	En obemannad farkost beskrivs ofta som autonom då den har flera automatiserade funktioner implementerade, däribland en självkörande förmåga och artificiell intelligens (AI) som möjliggör att den utan påverkan av en operatör kan utföra sitt tilldelade uppdrag.
Farkostautonomi	Syftar till att realisera de säkerhetskritiska autonoma förmågor som kopplar till ett säkert framförande av en obemannad farkost. Innefattar bland annat tekniker som feldetektion och felhantering, hinderupptäckt och hinderundvikande och självkörande funktioner.
Uppdragsautonomi	Syftar till att realisera de taktiska förmågorna vid genomförandet av tilldelade uppgifter eller deluppdrag.

En konsekvens av ovanstående tolkning av autonom farkost är att det är svårt att på ett meningsfullt sätt diskutera en autonom farkost i termer av autonominivåer. De separata funktionerna kan beskrivas utifrån de individuella funktionernas autonominivåer, men de olika funktionerna kan ha stora skillnader i autonominivå.⁶

⁶ Spaningsfunktionen i en teleopererad obemannad spaningsfarkost kan exempelvis vara autonom så att detektion, klassificering, lokalisering och målföljning genomförs automatiskt. Teleoperation genomförs i detta fall för att de autonoma funktionerna kopplat till uppdragsautonomi inte är tillräckligt mogna.

2 Sammanfattning av genomförda aktiviteter under 2021-2024

I detta kapitel ges en kort sammanfattning av de aktiviteter som har genomförts i projektet under perioden 2021 till 2024. Aktiviteterna kan grupperas i sju delområden: omvärldsbevakning, farkostautonomi (inklusive säkerhetskritiska autonoma funktioner), uppdragsautonomi, möjliggörande tekniker, juridiska och etiska aspekter (framförallt kopplat till användningen av beväpnade obemannade farkoster), metoder för samverkan mellan operatör och obemannade system och värdering av militär nytta (figur 2.1). Mer detaljerade sammanfattningar av den verksamhet som genomfördes under 2021-2023 återfinns i [6]-[8].

2.1 Omvärldsbevakning

Omfattande analyser och beskrivningar av den internationella utvecklingen har genomförts [1], [3]-[5], [9]-[11]. Arbetet har genomförts genom inläsning och analyser av öppna källor, kombinerat med deltagande på militära övningar, demonstrationer och vetenskapliga samt användarcentrerade konferenser.

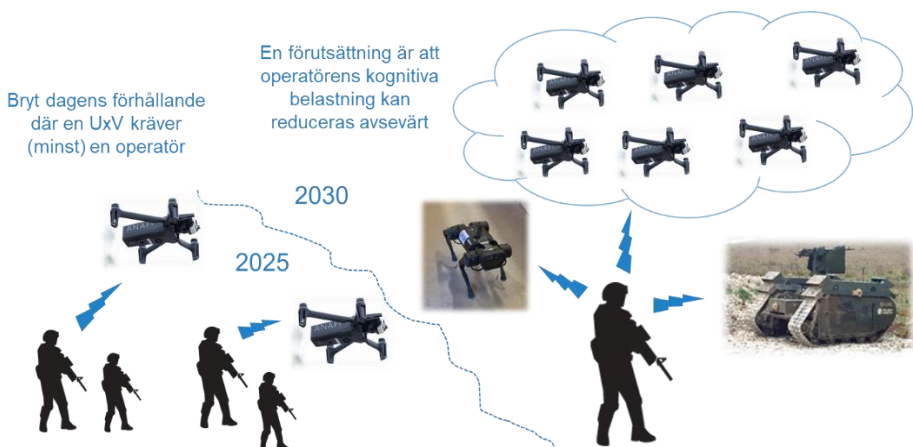


Figur 2.1: De huvudsakliga forskningsinriktningarna under åren 2021 till 2024.

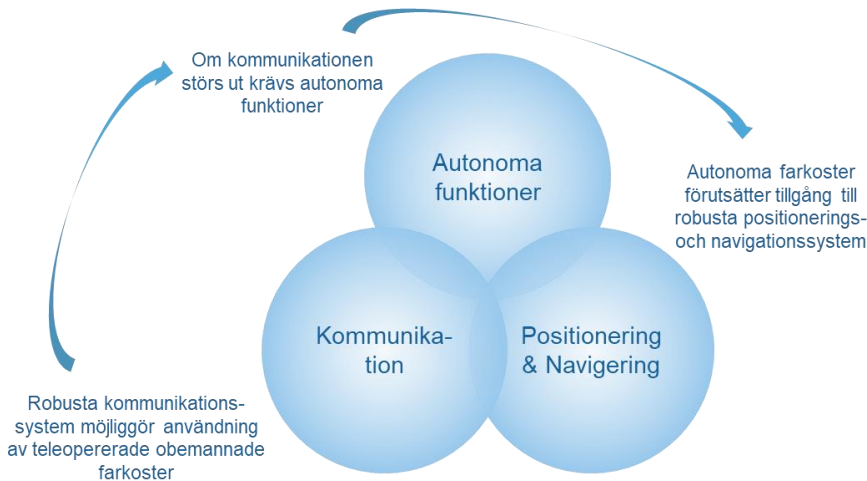
Stora mängder information från exempelvis kriget i Ukraina återfinns i öppna källor. En god kunskap inom de ingående teknikområdena är dock en förutsättning för att pussla ihop en större bild av delvis fragmenterade beskrivningar, samt filtrera bort felaktigheter. Den bild av utvecklingen som erhållits via öppna källor och en djup förkunskap om olika teknikers möjligheter och begränsningar har visat sig stämma relativt väl men den bedöms ha en eftersläpning på i storleksordningen två till sex månader. Anledningen till eftersläpningen är att informationen bör aggregeras från flera källor för att öka trovärdigheten i informationen, kopplat till de omfattande informationsoperationer som pågår. Den snabba utvecklingscykeln och metodanpassningen medför även att informationen i många fall inte längre bedöms vara känslig efter denna period och informationen tillåts spridas öppet.

2.2 Autonoma funktioner

Utvecklingen av autonoma farkoster har ett stort antal potentiella fördelar men den motiveras främst av tre militära behov: (i) genomföra operationer i kraftigt telesterörda miljöer, (ii) reducera operatörens kognitiva belastning, för att möjliggöra att ledning kan utföras som en tillikauppgift eller att en operatör samtidigt kan leda flera obemannade farkoster, och (iii) en snabbare beslutscykel, framförallt kopplat till bekämpningskedjan (figur 2.2 och 2.3).



Figur 2.2: Ett syfte med att utveckla autonoma farkoster är att komma ifrån dagens personalkrävande situation där exempelvis en stridsteknisk UAV i Ukraina har två operatörer, en som flyger den och en som navigerar genom att jämföra videoströmmen mot en karta. En ytterligare operatör kan flyga en UAV försedd med reläfunktionalitet. Målet är att en operatör ska kunna operera en UAV som en tillikauppgift och även att en operatör effektivt ska kunna leda flera samverkande autonoma farkoster. Foto/illustration: FOI.



Figur 2.3: I situationer då kommunikationen till eller från en obemannad farkost störs ut behövs autonoma funktioner. Autonoma farkoster ställer dock krav på att farkosten kan estimerar sin position och orientering.

2.2.1 Farkostautonomi

Verksamheten inom farkostautonomi har främst utgjorts av kunskapsuppbyggnad inom säkerhetskritiska autonoma funktioner. Förstudier har genomförts inom områdena feldetektion och felhantering samt hinderupptäckt och hinderundvikande. Syftet har varit att bygga grundläggande kompetens inom delområdena och föreslå inriktningar för kommande fördjupade forskningsaktiviteter.

En grundläggande självkörande förmåga för två UGV:er har även implementerats, i form av brytpunktsnavigering med automatisk hinderundvikning samt ”följ mig”-funktionalitet. Detta arbete har även inkluderat kunskapsuppbyggnad kopplad till hårdvara, ROS (eng. Robotic Operating System) och utveckling och implementationer av autonoma funktioner. En handfull medarbetare har byggt upp en god kunskap inom dessa områden under de senaste två åren. Syftet med detta arbete är att dels ha experimentplattformar för prov och försök med egenutvecklade autonoma funktioner och robusta positioneringstekniker, dels användas som ett verktyg för att studera metoder och strategier för samverkan mellan operatör och obemannade farkoster.

2.2.2 Uppdragsautonomi

Det övergripande målet med utvecklingen av uppdragsautonomi är att realisera det önskade taktiska beteendet hos en autonom farkost. Uppdragsautonomi kommer att realiseras i olika lager [7]. Genom att använda regelbaserade AI-tekniker (ett exempel är användningen av s.k. Playbooks), som har ett antal fördefinierade åtgärder, är det möjligt att uppfylla existerande regelverk kopplat

till exempelvis bekämpning. Användningen av Playbooks kan ses som det översta lagret i uppdragsautonomi. Denna metod har även en tydlig koppling till hur operatörerna leder de autonoma farkosterna (Human-Autonomy Teaming, HAT).

I nästa lager finns andra typer av algoritmer, såsom beteendeträd eller finita tillståndsmaskiner. Dessa använder i sin tur olika algoritmer som detaljstyr farkostens uppträdande där exempelvis sensoråterkopplad styrning, modellprediktiv reglering och förstärkningsinlärning (eng. Reinforcement Learning, RL) utgör tre möjliga alternativ. Uppdragsautonomi för militära obemannade farkoster beskrivs exempelvis i [12].

Inom området uppdragsautonomi har bland annat deltekniker som kan användas för att realisera uppdragsautonomi studerats. Sensoråterkopplad styrning är en delteknik (av flera) som kan möjliggöra införandet av uppdragsautonomi [13].

Forskning kopplat till hur uppdragsautonomi kan realiseras med beteendeträd har även påbörjats. En autonom stridsteknisk UAV som genomför ett spanings-uppdrag inom ramen för mekaniserad strid är under utveckling och ambitionen är att den ska användas vid operationell experimentering tillsammans med Försvarmakten under 2026.

2.3 Möjliggörande tekniker

På det framtida stridsfältet kommer fientliga telekrigsinsatser i form av störning, vilseledning och signalspaning utgöra ett ständigt närvarande hot mot användningen av obemannade farkoster. Robusta kommunikations- och positioneringssystem som kan hantera dessa situationer är oundgängliga för att möjliggöra en effektiv användning av obemannade farkoster.

2.3.1 Robusta PNT-system

Ett flertal aktiviteter har under projektets gång genomförts där syftet har varit att öka kunskapen om olika PNT-tekniker som kan användas för att ge ett tillförlitligt PNT-system i GNSS-störda miljöer. Fokus har framförallt varit mot PNT-tekniker för obemannade markfarkoster (UGV:er) och obemannade ytfarkoster (eng. Unmanned Surface Vehicle, USV). De tekniker som studerats är främst batymetristödd positionering för USV:er samt LiDAR- och odometristödd tröghetsnavigering för UGV:er. Begränsade kunskapsuppbyggande aktiviteter har även genomförts inom modellprediktiv reglering för informationsbaserad styrning, där ruten väljs så att osäkerheten för positioneringssystemet kan hållas på en önskad nivå [6], samt standardiserade modulära PNT-system med öppna gränssnitt [8]. Forskningen kommer framöver inriktas mot bildalstrande PNT-tekniker avsedda för stridstekniska UAV:er.

2.3.2 Robust kommunikation

Forskningen som är inriktad mot robusta kommunikationssystem har hittills genomförts inom en aktivitet, där ett experimentsystem för fri optisk kommunikation mellan en markstation och en stridsteknisk UAV utvecklas. De primära fördelarna med denna teknik, jämfört med befintliga radiobaserade alternativ, är att dessa kommunikationslänkar är svårare att upptäcka och störa ut, samt att de inte konkurrerar om radiofrekvenserna med andra militära och civila system. Ambitionen är att under 2025 genomföra demonstrationer av ett laserkommunikationssystem för en stridsteknisk UAV.

Forskningen behöver även breddas kommande år för att inkludera kunskapsuppbyggnad rörande radiobaserade kommunikationstekniker, såsom radiosystem på höga frekvenser (30 till 60 GHz) och satellitkommunikationssystem.

2.4 Samverkan mellan operatör och obemannade system & värdering

Metoder för hur operatörer ska samverka med obemannade farkoster kommer att ha en avgörande påverkan på deras militära nytta. I takt med att graden av automatisering på obemannade farkoster ökar blir deras potentiella påverkan på stridsteknik och det taktiska uppträdandet mer påtaglig. Metoderna för hur operatören bör interagera med de obemannade farkosterna förändras även.

Studier har under projektets gång genomförts riktats mot användargränssnitt för UGV:er, lämpliga militära användningsområden för UGV:er och metodik för genomförande av användarstudier på distans ([6]-[8], [14]). Fokus har varit på användningen av mindre obemannade farkoster vid strid i urbana miljöer.

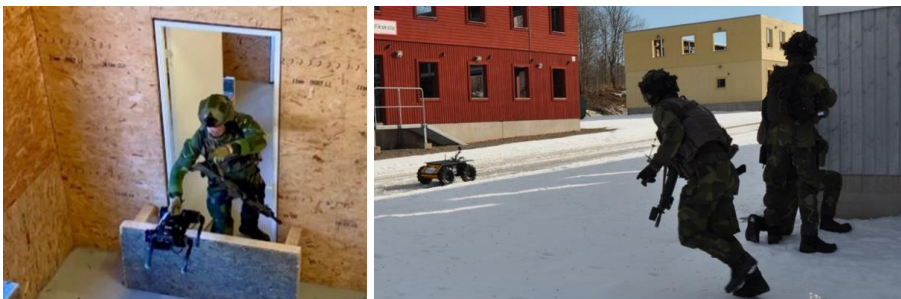
Användargränssnittet är en viktig komponent för att effektivisera nyttjandet av UGV:er, de har en potentiellt stor påverkan på operatörens kognitiva belastning [8]. Ett väl designat gränssnitt kan för teleopererade system öka den operativa effekten och även uthålligheten med systemet som helhet. Användargränssnittets utformning påverkar även utbildningsbehoven samt operatörens förmåga att bilda sig en god lägesuppfattning [8].

Erfarenheterna och resultaten från tidigare genomförda studier pekar mot att medeltunga UGV:n, med dagens begränsningar kopplat till framkomlighet i terräng och hastighet, lämpar sig bäst i ett scenario som utspelar sig på en kompani- alternativt bataljonsnivå. Det finns ett fortsatt behov av att ta fram scenarier där en medeltung UGV leds av en operatör för att utföra typuppgifter inom användningsområden såsom eldunderstöd ([15], [16]), logistikplattform ([14], [15]) eller vid spaningsuppdrag ([15], [17]).



Figur 2.4: Den planerade årliga arbetscykeln för forskningen inom MUM-T [14].

Ett förslag till en iterativ arbetsmetodik för att genom experimentering tillsammans med militär personal utvärdera metoder för ledning av obemannade farkoster har utvecklats [14]. Den potentiella militära nyttan kan även utvärderas med denna metod (figur 2.4). De experimentsystem som har använts vid de inledande försöken som genomfördes 2022 och 2023, se figur 2.5, hade inte tillräckligt avancerade autonoma funktioner för att möjliggöra fullt ut relevanta utvärderingar. Experimenteringen la dock grunden för den metodik som kommer att användas i forskningen. Den föreslagna arbetsmetodiken har fyra faser som genomförs i en årlig utvecklingscykel: (i) experimentering, (ii) återkoppling från användarna, (iii) prioritering av förbättringar och (iv) utveckla och implementera de efterfrågade funktionerna (figur 2.4). Den är anpassad för utveckling och utvärderingar av framförallt mindre UAV:er och UGV:er.



Figur 2.5: Inledande experimentering med små obemannade markfarkoster vid strid i bebyggelse.

2.5 Juridik och etik

Forskningen kring juridiska och etiska frågeställningar har fokuserat på de rättsliga ramverk som omgärdar användningen av vapensystem på obemannade farkoster.

2.5.1 Översikt

Följande aktiviteter har genomförts:

- En översikt av rättskällor, rättsutveckling och forskning om användning och ansvar [18].
- En beskrivning av rättsutvecklingen inom autonoma vapensystem [19].
- En exempelstudie av gällande rätt kopplad till markmålsbekämpning med beväpnad UAV [20].
- Påbörjat studie av det folkrättsliga ramverket för användning av obemannade beväpnade ytfarkoster (USV) vid sjöstrid.
- Kunskapsuppbyggnad kopplat till hur juridiska och etiska aspekter kan omhändertas under utvecklingsfasen av militär AI och autonoma system.
- En mindre kunskapsuppbyggande aktivitet rörande regelverk för obemannade farkoster på sjö- och luftarenorna [8].

2.5.2 Hur bör internationell humanitär rätt påverka forskning och utveckling av autonoma funktioner i en bekämpningskedja?

Det står klart att beväpnade autonoma vapensystem och farkoster omfattas av IHR. IHR baseras till stor del på tre fundamentala rättsprinciper: distinktionsprincipen, proportionalitetsprincipen och försiktighetsprincipen [18]. Enligt distinktionsprincipen ska krigförande parter ”göra åtskillnad mellan civilbefolkning och kombattanter samt mellan civil egendom och militära mål samt följaktligen rikta sina operationer enbart mot militära mål”. Detta innebär exempelvis att militära sjuktransportfordon som är märkta med röda kors, sjukvårdspersonal och skadade soldater som är satta ur stridbart skick och de som ger upp inte får bekämpas.

Ett rimligt antagande är därför att ett autonomt vapensystem som fattar ett beslut om bekämpning utifrån AI-baserade metoder för klassificering av mål även behöver tränas för att detektera situationer då bekämpning enligt IHR *inte* får genomföras. Denna aspekt bör påverka inriktningen för den forskning och utveckling som pågår riktat mot AI-baserade metoder för klassificering.

Proportionalitetsprincipen förbjuder anfall mot militära mål i fall då konsekvenserna för civila och civil egendom kan förväntas bli överdrivna i förhållande till den förväntade militära nyttan med anfallet [18]. Proportionalitetsprincipen innebär ofta att komplexa bedömningar och

sammanvägningar behöver göras av olika faktorer såsom militär nödvändighet, risk för skador på civila och civil egendom m.m.

Existerande AI-algoritmer som baseras på djupinlärning har visat potential för tillämpningar som detektion och klassificering av mål. De har dock fortfarande svårt att förstå kontext i komplexa situationer. Dagens AI-metoder kan inte förväntas att på ett tillförlitligt sätt genomföra bedömningar enligt proportionalitetsprincipen. Det är därmed troligt att proportionalitetsbedömningar inför bekämpning fortsatt bör genomföras av utbildade soldater/operatörer.

Då AI-baserade metoder inte är tillräckligt mogna så blir det viktigt med metodanpassning vid användning av vapensystem med integrerade AI-baserade klassificeringsmetoder. Genom anpassning av metod är det sannolikt möjligt att i specifika scenarion använda sådana vapensystem utan att överträda IHR.

2.6 Projektets publikationer

Inom projektet har ett antal rapporter, memo och vetenskapliga publikationer tagits fram: elva rapporter, två interna rapporter, fyra memo, ett konferensbidrag, en observatörsrapport och ett bokkapitel. Utöver detta har även åtta examensarbeten handletts.

2.6.1 FOI Rapporter

D. Saleh, K. Bengtsson, S. Aronsson, R. Woltjer och A. Fredriksson Häägg, *Obemannade markgående farkoster - Koncept för nyttjande och interaktion – Användarstudier på distans*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5236--SE, december 2021.

J. Rantakokko, J. Appelgren, K. Bengtsson, E. Branzén, M. Hagström, K. Kraft, T. Melin, P. Winther och D. Saleh, *Obemannade farkoster och autonoma system – Årsrapport 2021*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5276--SE, januari 2022.

J. Rantakokko, F. Näsström, R. Woltjer, T. Mårtensson, M. Hagström och A. Foyer, *Tekniköversikt autonoma och obemannade system – Del 4: Luftstriden*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5167--SE, januari 2022.

P. Winther, *Folkrättslig reglering av autonoma vapensystem: En översikt av rättskällor, rättsutveckling och forskning om användning och ansvar*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5343--SE, december 2022.

E. Branzén och K. Kraft, *Felsäkerhet för obemannade farkoster: Domänöversikt*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5357--SE, januari 2023.

E. Branzén och K. Kraft, *Felsäkerhet för obemannade farkoster: Metodintroduktion*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5358--SE, januari 2023.

J. Rantakokko m.fl., *Obemannade farkoster och autonoma system – Årsrapport 2022*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5397--SE, februari 2023.

A. Andersson, *Utveckling av den folkrättsliga regleringen av autonoma vapensystem – En vändpunkt efter tio år av mellanstatliga diskussioner?*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5551--SE, mars 2024.

A. Andersson, *Fallstudie: IHR och UCAV*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5703--SE (under slutförande).

J. Rantakokko, *Obemannade farkoster för markstriden – Erfarenheter från Ukraina*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5723--SE (under slutförande).

2.6.2 FOI-interna rapporter

K. Blomqvist och J. Hamberg, *Sensoråterkopplad styrning*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-D--1394--SE, maj 2025.

Alexander Samimi Johansson, Ellen Lindgren, Joakim Rydell och Michael Tulldahl, *An overview of obstacle avoidance methods for small low-flying unmanned aerial vehicles*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-D--1395--SE, maj 2025.

2.6.3 FOI Memo

J. Appelgren, T. Beran, A. Musco Eklund och M. Hagström, *Autonoma vapensystem – dagens debatt och en väg framåt: Tekniska, legala och etiska aspekter*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 6953, maj 2022.

J. Rantakokko, A. Andersson, E. Branzén, M. Gelin, J. Hamberg, F. Kullander, K. Lagerkvist Blomqvist, E. Lindgren, J. Nygårds, P. Strömbäck och Tim Wiik, *Obemannade farkoster och autonoma system – Årsrapport 2023*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 8332, december 2023.

J. Rantakokko, A. Andersson, P. Winther och M. Hagström, *Redovisning av genomfört seminarium*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 8328, december 2023.

V. Lindholm, A. Melbi och M. Gideskog, *UGV som logistik – användarnytta och metodutveckling*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 8338, december 2023.

2.6.4 Konferensbidrag

D. Saleh, K. Bengtsson, S. Aronsson och R. Woltjer, "Exploring unmanned systems with virtual prototypes in augmented reality video: Remote evaluation of Unmanned Ground Vehicle interaction," *Proc. of ECCE 2022: 33rd European Conference on Cognitive Ergonomics*, Kaiserslautern, Tyskland, oktober 2022. (FOI-S--6569--SE)

2.6.5 Externa publikationer

Projektet har även deltagit i arbetet med en bok och en gemensam observatörsrapport.

Stig Rydell (red.) och Mats Olofsson (red.), *Drönare/UAS – teknik och förmågor*, Kungliga Krigsvetenskapsakademien, ISBN 978-91-88581-36-5, 2023.

Estonian Military Academy & European Defence Industrial Development Program (EDIDP), *Unmanned Ground Vehicles Autonomy Trials – Final Report*, 2023 (utrikessekretess unclassified).

2.6.6 Examensarbeten

D. Jacobson, *Learning to Fly: Upgraded Aerodynamics and Control Surfaces*, KTH Kungliga Tekniska Högskolan, 2021.

D. Saleh, *Interaction Design for Remote Control of Military Unmanned Ground Vehicles*, Linköpings Universitet, LIU-IDA/LITH-EX-A--2021/005--SE, 2021.

V. Lindholm, *Unmanned Ground Vehicles in Urban Military Operations – A case study exploring what the potential end users want*, Linköpings Universitet, LIU-IDA/LITH-EX-A--22/045--SE, 2022.

T. Wiik, *A positioning system for landing a UAV on a UGV in a GNSS-denied scenario*, Linköpings Universitet, LiTH-ISK-EX--22/5522--SE, 2022.

E. Boström and E. Börjesson, *Autonomous Landing of an Unmanned Aerial Vehicle on an Unmanned Ground Vehicle using Model Predictive Control*, M.Sc. Thesis, Linköpings Universitet, LiTH-ISK-EX--22/5493--SE, 2022.

J. Henningsson, *Local planning for unmanned ground vehicles using imitation learning*, Lunds Universitet, 2023.

M. Westberg, *Exogenous Fault Detection in Aerial Swarms of UAVs*, KTH Kungliga Tekniska Högskolan, 2023.

M. Gideskog och A. Wide, *En explorativ studie om framtida armburna gränssnitt inom militären för avsuttan spaning i högrisksituationer för markförband*, Linköpings Universitet, LIU-IEI-TEK-A--23/04688--SE, 2023.

2.7 Diskussion

Projektets verksamhet har medvetet haft en stor bredd då det har funnits ett stort behov av information och stöd i ett stort antal projekt såsom direktbeställningar från FMV och Försvarmakten samt i Försvarmaktens studieverksamhet. Då omvärldsläget medför ett behov av en snabb förmågetillväxt är det exempelvis viktigt att erfarenheter från andra länders användning och experimentering med obemannade farkoster omhändertas inom Försvarmaktens förmågeutveckling. Motsvarande gäller även kunskap kopplat till olika teknikers möjligheter och begränsningar, samt hur folkrätten påverkar forskning, utveckling och användning av obemannade farkoster som används för exempelvis målinmätning eller bekämpning.

Den militära forskningen kopplad till obemannade farkoster befinner sig även i en snabb tillväxt samtidigt som det finns ett stort behov av att använda de mer erfarna medarbetarna i direktbeställningar från Försvarmakten och FMV som på kort sikt kan göra nytta. Dessa högprioriterade projekt konkurrerar om samma medarbetare vilket, tillsammans med de nyrekryteringar som krävts för att hantera tillväxten, har medfört att verksamheten inte kunnat bedrivas med ett önskvärt tekniskt djup då det funnits begränsad handledarkapacitet till den proportionellt stora andelen nyrekryterade. En ytterligare utmaning har varit att forskningen inom huvuddelen av aktiviteterna har startas upp under projektets gång.

Detta har, i kombination med de personella och kompetensmässiga begränsningarna, påverkat resultaten. En bred kunskap har byggts upp när det gäller operativ användning, operationell experimentering som genomförs internationellt, användarbehov, vad industri kan erbjuda idag, möjligheter och begränsningar för olika autonoma funktioner, hur robusta positionerings- och kommunikationssystem kan realiseras som möjliggör genomförandet av operationer i telestörda miljöer samt viktiga juridiska och etiska aspekter kopplat till användningen av beväpnade obemannade farkoster. Kunskapsnivån rörande effektiva metoder för samverkan mellan operatör och obemannade system behöver dock förbättras, specifikt hur operatörer ska interagera med autonoma farkoster.

Den kunskap som har byggts upp inom projektet har nyttiggjorts i ett antal Försvarmaktsstudier och höjt kvaliteten i direktbeställningar från Försvarmakten och FMV. Djupet i forskningen har dock, på grund av ovan beskrivna orsaker, inte nått den önskade nivån och forskningshöjden behöver förbättras. Det är av denna anledning som det nyligen inrättade forskningsprogrammet för autonomi inom anslagspost 6 (Bevakning och hantering av nya tekniker) är viktigt. De projekt som genomförs där kommer att generera algoritmer och verktyg som kan omhändertas inom FoT-verksamheten, samtidigt som de även kommer att generera medarbetare med hög kompetens inom

relevanta teknikområden som kan användas både i FoT-projektens forskningsaktiviteter och för att höja kvaliteten i de avtappande projekt som genomförs.

Forskningen fortsätter även 2025 med liknande frågeställningar och inriktning inom det nyinrättade FoT-området Autonomi och obemannade system. Två projekt påbörjas under 2025: *Autonomi och samverkan med bemannade system* och *Juridik, etik och autonomi*.

3 Genomförda aktiviteter 2024

I detta kapitel ges mer detaljerade sammanfattningar av de huvudsakliga aktiviteter som genomfördes inom projektet under 2024, vilka framförallt utgjordes av: (i) säkerhetskritiska autonoma funktioner, (ii) uppdragsautonomi, (iii) möjliggörande tekniker, (iv) metoder för samverkan mellan operatör och obemannade system samt (v) juridiska och etiska frågeställningar för beväpnade obemannade farkoster. Inriktningen för den forskning som planeras genomföras 2025 i respektive aktivitet beskrivs även kortfattat.

3.1 Säkerhetskritiska autonoma funktioner

Säkerhetskritiska autonoma funktioner och farkostautonomi (även benämnt kärnautonomi) för obemannade farkoster utgör ett viktigt område vid realiseringen av autonoma farkoster. Arbetet har under 2024 fokuserat på feldetektion och att fortsätta arbetet med att implementera en grundläggande självkörande förmåga hos UGV:er. En mindre insats har under året även genomförts inom hinderupptäckt och hinderundvikande för små UAV:er.

3.1.1 Grundläggande självkörande funktioner för UGV

Arbetet med att implementera en grundläggande självkörande funktionalitet på UGV:er (av typen Husky A200) påbörjades, i begränsad omfattning, under 2022. Under 2023 implementerades de första versionerna av brytpunktsnavigering med automatiskt hinderundvikande och en "följ mig"-funktionalitet. Under 2024 har arbetet fokuserat på att vidareutveckla de självkörande funktionerna, reducera mängden fel i hård- och mjukvara samt utveckla ny funktionalitet.

3.1.1.1 Vidareutveckling av autonoma funktioner

Förbättringen av de autonoma funktionerna som genomförts har fokuserat på tre huvudområden: "följ mig", hinderupptäckt samt positionering. "Följ mig"-funktionen utökades med förmågan att följa flera personer samtidigt vilket ger operatören möjligheten att byta vilken person som UGV:n ska följa. Brytpunktsnavigeringen utökades med en ny gränsyta gentemot operatören så att möjligheten finns att skicka in en färdig rutt till farkosten, men även att spela in en rutt under färd och sedan få farkosten att köra tillbaka samma väg. En utvärdering av denna funktionalitet kan ses i figur 3.1. Tillsammans med en robust "följ mig"-funktion kan då UGV:n få en detaljerad rutt inspelad i terräng genom att följa en soldat och sedan köra genom denna terräng autonomt baserat på positionerna för den inspelade ruten. Farkosten gör sig på så sätt mindre beroende av en bra hinderundvikning men mer beroende av ett noggrant positioneringssystem.



Figur 3.1: Test av framryckning med inspelad rutt i Roxtuna, Linköping (foto: FOI).

Utökad funktionalitet för hinderundvikning har även implementerats under året. Den största skillnaden består i att samtliga LiDAR-lager (eng. Light Detection and Ranging) nyttjas vid hinderundvikande, och en estimering av markplanet görs för att särskilja detektioner som härstammar från hinder från dem som kommer från markreflektioner. Dessutom filtreras rörliga objekt bort från hinderkartan genom att en glömskefaktor har implementerats. Operatören har även möjlighet att rensa hinderkartan lokalt kring UGV:n via handkontrollen.

En av de felkällor som identifierades under föregående år var positioneringssystemets pålitlighet. På grund av begränsningar i datorernas beräkningskapacitet slutade positioneringssystemet relativt ofta att fungera. Därför har ett filter för fusionering av olika positioneringslösningar implementerats med flera nivåer av redundans. Vid normal funktion används LiDAR-baserad positionering fusionerat med accelerometer och odometri.⁷ Om den LiDAR-baserade positioneringen faller bort på grund av begränsningar i beräkningskapacitet kan systemet fortsätta estimerar sin position. UGV:ns position och orientering kan även korrigeras manuellt av operatören genom ett grafiskt gränssnitt. Fusioneringsalgoritmen har även viss förmåga att detektera och förkasta felaktiga sensorvärden.

3.1.1.2 Modifikationer kopplat till hårdvara och driftsäkerhet

För att avhjälpa problemen med beräkningskapacitet har ytterligare en dator installerats på UGV:erna, vilket ökat LiDAR-positioneringssystemets pålitlighet. Det har även gett möjlighet att övergå till en mer avancerad lokal ruttplanerings-algoritm (eng. Time Elastic Band, TEB) som ger en förbättrad förmåga att undvika hinder. Vidare så har även den andra UGV:n försetts med LiDAR och

⁷ I denna första implementation av LiDAR-baserad positionering användes Cartographer – som är en beprövad algoritm som finns som öppen källkod. github.com/cartographer-project/cartographer (besökt 2025-02-15).

GNSS-mottagare och strömförsörjningen har gjorts om för att kunna försörja två datorer på varje UGV. I figur 3.2 visas de två UGV:ernas sensorkonfigurationer.

Under föregående år provades en mjukvarustruktur där autonomistacken delades upp i komponenter som exekverades i isolerade miljöer (s.k. dockerbilder) med strikta krav på gränssnittet mellan dessa. Vår erfarenhet var dock att en för fin uppdelning av mjukvaran försvårade utvecklingsarbetet. Därför har exekveringsmiljön konsoliderats till en dockerbild, men där modulariteten i programkoden bibehållits. Miljön för basautonomin kommer även att isoleras från de som används i den fortsatta forskningen av mer avancerade autonomialgoritmer. Autonomistacken behöver även på sikt migreras till ROS2 då supporten för ROS1 upphör under 2025.

3.1.1.3 Användargränssnitt

Syftet med arbetet kopplat till användargränssnitt är att implementera ett förenklat gränssnitt som förenklar de prov och försök som genomförs med UGV:erna. Det grafiska gränssnittet har under året 2024 uppdaterats med fokus på grundfunktionernas robusthet och att ta fram en enkel och snabböverskådlig layout. Punkt- och linjeuppdrag har uppdaterats för att göra interaktionen med kartan mer intuitiv när punkter eller linjer läggs till. Uppdrag som har skapats sparas på disk och laddas automatiskt in nästa gång mjukvaran startas.



Figur 3.2: De två UGV:erna, av typen Husky A200, med olika sensorkonfigurationer. Vänster: LiDAR och kamera. Höger: LiDAR, 360-kamera och Pan-Tilt-Zoom – PTZ – kamera (foto: FOI).

När en UGV:s position blir tillgänglig för första gången, zoomas kartan till automatiskt dess position. Latitud, longitud, höjd, heading och UGV:ns status visas alltid i gränssnittet. En ny funktion har lagts till där det går att byta vy mellan karta och video.

3.1.2 Feldetektion och felhantering

Under 2024 har arbetet med feldetektion och felhantering främst fokuserat på kunskapsuppbyggnad, i form av en inledande litteraturstudie, som förberedelse inför nästa års deltagande inom Garteaurprojektet FM-AG20: *Artificial Intelligence for Fault Detection*.⁸ Detta treåriga forskningsprojekt syftar till att undersöka oövervakade och delvis övervakade metoder för felupptäckt i styrnings-, navigations- och kontrollsystem för flygplan och större UAV:er. Efter en initial litteraturstudie och datainsamling kommer de mest lovande metoderna att utvärderas, med fokus på deras effektivitet samt möjligheter till industriell certifiering och implementering. Målet är att undersöka om de föreslagna metoderna kan övervinna brister i dagens industripraxis, med särskilt fokus på kritiska sensorer i flygplan och UAV:er. FOI:s bidrag till FM-AG20 kommer främst bestå av implementering och utvärdering av utvalda algoritmer, som ska utvärderas enligt de riktlinjer som tas fram inom projektet.

En mindre insats har även lagts på att följa upp tidigare genomfört arbete. Detta har genomförts i form av ett möte med medarbetare på FMV som jobbar med obemannade undervattensfarkoster, en domän där arbetet med felsäkerhet bedöms ha kommit långt. Syftet var att utvärdera relevansen hos två tidigare publicerade rapporter ([21] och [22]) och öka kunskapen om hur FMV arbetar med dessa frågor.

En av slutsatserna är att det finns en samsyn i begreppsanvändningen relaterat till felsäkerhet. Rapporterna har tagit ett akademiskt perspektiv, med kartläggning av området, uppdelning av olika metoder och analys av vilka aspekter som är särskilt relevanta för olika domäner (mark, sjö och luft). FMV fokuserar i sitt arbete på förmågekrav snarare än tekniska lösningar. Deras krav på systemen handlar om systemens uthållighet under olika förhållanden och vilka situationer systemen ska kunna hantera, medan valet och implementationen av specifika tekniska lösningar och algoritmer, som exempelvis metoder för feldetektion, är leverantörens ansvar.

Det finns specifika utmaningar som följer av införandet av en högre grad av automation. Ökad autonomi minskar risken för fel vid människa-system-interaktion och minskar behovet av operatörsövervakning. Samtidigt ställer detta högre krav på systemens förmåga att själva detektera och hantera fel, vilket i sin tur påverkar kravspecifikationerna.

⁸ Group for Aeronautical Research and Technology in Europe (garteur.org/, besökt 2024-12-08).

Ett annat område som identifierades var kontext- och riskmedvetet beslutsfattande hos autonoma farkoster vid händelse av systemkritiska fel. Frågeställningarna omfattar exempelvis avvägningar mellan att kommunicera (och riskera att exponera farkosten) för att kunna räddas i händelse av ett kritiskt fel, mot att undvika kommunikation (och öka sannolikheten att förbli dold) med risk för att farkosten då går förlorad.

3.1.3 Hinderupptäckt och hinderundvikande för UAV

Hinderupptäckt och hinderundvikande är en säkerhetskritisk funktion för obemannade, autonoma farkoster. Kunskapsuppbyggnaden har hittills fokuserat på små, lågt flygande kvadrokoptrar. Dessa farkoster opererar ofta i miljöer där statiska hinder såsom byggnader och träd förekommer, vilket medför att farkosterna behöver kunna läsa av omgivningen, upptäcka och identifiera hinder och manövrera för att undvika kollisioner.

Under 2024 har det tidigare genomförda arbetet med en litteraturoversikt över metoder för hinderundvikande fortsatt. Litteraturstudien har kompletterats med en översikt över sensorer som kan användas för upptäckt av hinder, där fokus har varit på sensorer som kan integreras i små kvadrokoptrar [23]. Rapporten tar upp exempel på passiva och aktiva sensorer som kan användas för hinderupptäckt.

3.2 Uppdragsautonomi

Inom delområdet uppdragsautonomi har två aktiviteter genomförts under 2024, dels har arbetet inom sensoråterkopplad styrning avrapporterats [13], dels har utvecklingen av ett beteendeträd för ett spaningsuppdrag påbörjats. Sensoråterkopplad styrning är en metod som potentiellt skulle kunna användas som en del av en implementation av uppdragsautonomi.

3.2.1 Realisering av spaningsuppdrag med beteendeträd

Målet med denna forskningsaktivitet är att under de kommande två åren utveckla ett fysiskt experimentsystem för en autonom spanings-UAV som kan användas vid prov och försök med militär personal. Syftet med dessa försök är att få återkoppling från potentiella användargrupper rörande vilka autonoma funktioner de har behov av samt ge möjlighet att utvärdera olika metoder för hur människor och autonoma farkoster ska utföra uppdrag gemensamt som ett lag (HAT).

Ett enkelt scenario för UAV-spaning har beskrivits och implementerats i syfte att ge möjlighet att utvärdera befintliga metoder och verktyg för att implementera uppdragsautonomi. Detta scenario valdes baserat på slutsatserna i [24], som beskriver hur militär personal valde att använda sig av autonoma system vid mekaniserad strid. Studien använde ett egenutvecklat brädspel som ett verktyg vid ett resonemangsspel med användarrepresentanter. I scenariot genomför en

stridsteknisk UAV⁹ spaning inom ett område framför de egna markstyrkorna. Ett förenklat beteende för UAV:n har implementerats och inom det fortsatta arbetet kommer dessa förenklingar gradvis att ersättas av verklig funktionalitet, med målet att kunna använda en autonom UAV vid fysiska experiment tillsammans med Försvarmakten.

En kombination av ROS och ArduPilot¹⁰ används för att styra UAV:n, vilket sedan simuleras i Gazebo¹¹. Styrningen blir därmed i det närmaste identisk med den som används för många verkliga UAV:er. Beteendeträd används för att implementera UAV:ns beteende (se till exempel [12] och [25]). Träden sätts samman av noder, som styr beteendet genom olika kontrollstrukturer, villkor, och handlingar. I den förenklade implementationen av spaningsuppdraget användes biblioteket BehaviorTree.CPP¹² för att hantera beteendeträdet, och ett tillhörande verktyg, Groot2¹³, för att skapa trädet utifrån noder och kopplingar mellan dessa. Groot2 kan även användas för att visualisera hur en uppgift utförs, genom att indikera när olika noder aktiveras, antingen i realtid under exekvering eller i efterhand baserat på inspelade data.

I figur 3.3 visas ett enkelt exempel för att illustrera designval vid en implementation av uppdragsautonomi, där beteendet *ta en bild och skicka den till en mottagare* bryts ner i enklare beståndsdelar. Noden med en pil benämns *sequence*, och utför sina underliggande noder, från vänster till höger, men avbryter så snart någon av dem returnerar att den misslyckats. Noden med ett frågetecken benämns *fallback*, och utför också sina underliggande noder från vänster till höger, men avbryter istället så snart någon av dem returnerar att den lyckats. Trädet i figuren ska alltså läsas enligt följande: 1) Om ingen bild har tagits, försök ta en bild. 2) Om det finns en bild, skicka den.

En utmaning vid designen av beteendeträd är att välja en lämplig abstraktionsnivå, dvs. avgöra vilka delar av logiken som ska representeras av trädet och vad som ska ske inuti noderna. En alternativ realisering av ett beteendeträd, som utför samma uppgift, visas även i figur 3.3. Här ligger en större del av logiken i trädet, medan noderna representerar mer avgränsade uppgifter. En viktig aspekt i valet mellan olika abstraktionsnivåer är överskådlighet – att det ska vara enkelt att förstå både trädet och implementationen av noderna. En annan viktig aspekt är modularitet, där noderna bör göras så generella att de kan återanvändas i utvecklingen av beteendeträd för andra uppdrag.

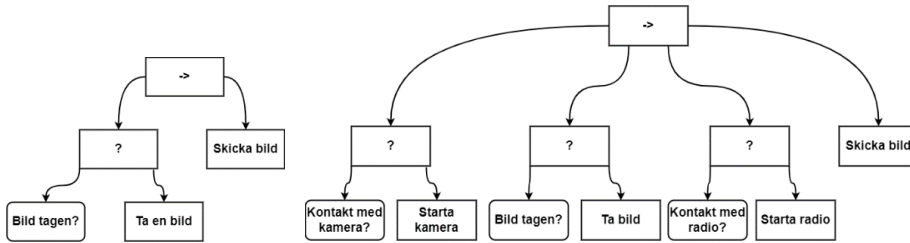
⁹ En kvadrokopter av liknande typ som UAV06.

¹⁰ "Open source"-autopilot för UAV (såväl multirotorplattformar som flygplan), markgående robotar, etc. (ardupilot.org/, besökt 2024-12-08).

¹¹ Simuleringsverktyg för sensorer och interaktion mellan exempelvis en UAV och dess omgivning. (gazebo.org/home, besökt 2024-12-08)

¹² www.behaviortree.dev/docs/intro (besökt 2024-12-08).

¹³ www.behaviortree.dev/groot/ (besökt 2024-12-08).



Figur 3.3: Ett enkelt och ett mer detaljerat beteendeträd som löser samma uppgift (ta och skicka en bild). I det högra exemplet ligger mer av logiken i trädet medan mer begränsade uppgifter löses i noderna.

Utöver beteendeträd finns flera andra sätt att implementera uppdragsautonomi och ett urval av dessa beskrivs i [12].

3.2.2 Sensoråterkopplad styrning

En viktig förmåga hos obemannade farkoster är att inhämta och värdera information. Informationsinhämtningen kan utgöra själva uppdraget, alternativt utgöra en förutsättning för att utföra andra typer av uppdrag. Sensoråterkopplad styrning är en generell metod för att realisera denna förmåga i de fall där den sökta informationen består av ett antal mätbara parametrar. Mätningarna antas behäftade med mätfel enligt en given felmodell som även omfattar ett antal ”kalibreringsparametrar” (hos den mätande enheten), vilka efterhand kan justeras så att önskad precision¹⁴ erhålls.

Under 2024 har arbetet inom sensoråterkopplad styrning fortsatt och fokus har varit på att detaljerat dokumentera forskningen [13]. Rapporten beskriver hur dessa grundläggande teorier fungerar som en generell metod för autonom informationsinhämtning och den omfattar följande delar:

- klarläggande av bakomliggande informationsgeometri,
- studier av informationsfilter och relationen till konventionella kalmanfilter (eng. Extended Kalman Filter, EKF),
- felmodellering och
- formuleringen av optimalstyrningsproblemet.

I [13] implementeras algoritmerna och det resulterande optimeringsproblemet löses numeriskt för ett standardscenario. I detta standardscenario rör sig ett autonomt markgående fordon fritt i markplanet och mäter siktlinjevinklar till ett eller flera mål ovanför markplanet. De sökta parametrarna är målets koordinater och kalibreringsvariablerna är fordonets position i markplanet. Simuleringarna indikerar att sensoråterkopplad styrning har potential att fungera i detta

¹⁴ Med ”precision” menas i denna rapport den observerade Fisherinformationen och kalibreringen görs så att den framtida förväntade Fisherinformationen maximeras.

standardscenario. Metoden bör utan genomgripande förändringar även kunna hantera andra scenarier och geometrier.

3.3 Möjliggörande tekniker

Kriget i Ukraina har tydligt visat på behovet av robusta positionerings- och kommunikationssystem som möjliggör ett effektivt genomförande av operationer även i kraftigt telestörda miljöer [2].

3.3.1 Robusta PNT-system för UGV:er

Inom ramen för Nordefco COPA CAPA (eng. Cooperation Area Capability) pågår ett forskningssamarbete med Norge (Forsvarets forskningsinstitut, FFI) inom robusta PNT-system. Samarbetet är centrerat kring gemensamma mätningar där referensdataset samlas in med olika sensorer som är aktuella för användning på UGV:er. Fordonens position och orientering estimeras under dessa försök även med tröghetssensorer av hög kvalitet, där stöd av inmätta landmärken även inkluderas, vilket kommer att användas som referenspositioner med hög noggrannhet. Därefter utvärderas multisensorbaserade positioneringstekniker genom s.k. benchmarking där resultaten från olika algoritmer jämförs mot de insamlade referenspositionerna för fordonen. Enklare sensorer utvärderas mot noggranna estimat av farkosternas positioner för att bygga kunskap om olika PNT-teknikers styrkor och svagheter för farkoster som opererar i telestörda miljöer där GNSS inte är tillgängligt. Detta samarbete avslutas under 2025 och resultaten kommer att avrapporteras i en gemensam rapport med FFI.

3.3.1.1 Referensdataset

En första mätkampanj genomfördes i Västervik 2022 [6]. De fordon som användes var en Toyota Landcruiser och en mindre UGV av modellen Husky A200. Även flygningar med en UAV genomfördes som stöd till de två markfordonen. Under 2024 genomfördes i FFI:s regi en andra mätkampanj på Sessvollmoen där sensordata från en THEMIS UGV samlades in tillsammans med kameramätningar på inmätta markörer/landmärken (figur 3.4). De sensorer som användes på UGV:n var en stereokamera, LiDAR och tröghetssensorer.

3.3.1.2 Utvärderingar

Analysen av det referensdataset som samlades in i Västervik har genomförts i två spår, där den första i detalj studerat odometristöttad tröghetsnavigering och den andra delen inkluderat stöd från mätningar med en LiDAR-sensor. Olika ”smoother”-lösningar har utvecklats, baserat på algoritmen GTSAM (eng. Georgia Tech Smoothing and Mapping).



Figur 3.4: FOI-forskare radiostyr TheMIS UGV vid insamling av referensdataset i Sessvollmoen (foto: FOI, med tillstånd).

GTSAM är en sensorfusionsmetod som bearbetar både historisk och, då det finns tillgängligt, även inkluderar framtida data för varje tillståndsestimat. I fallet med odometristöttad tröghetsnavigering har flera aspekter av GTSAM-algoritmen analyserats. Effekter som studerats inkluderar skillnader mellan att ha all framtida data mot att köra algoritmen i realtid, filtrets förmåga att konsekvent ge bra resultat mellan olika instanser av datainsamling och hur prestanda för tröghetssensorerna påverkar resultaten. Dessutom studerades effekterna av att kalibrera hjuldiametrarna i syfte att förbättra odometrin, fördröjningar i tröghetssensordata, samt fel som uppstår om tröghetssensorernas position och orientering är felaktigt uppmätta.

I fallet med LiDAR-stöttad tröghetsnavigering har LiDAR-sensorn använts till två olika, separata funktioner. Till att börja med lokaliserades särdrag från omgivningen, vilka användes till att förbättra positioneringen genom att matcha särdrag sedda från olika vinklar vid olika tidpunkter. Detta gav en viss förbättring då kombinationen av tröghetsnavigering och hjulodometri redan gav ganska bra resultat. Arbete pågår med att utveckla algoritmer för att matcha större kluster av särdrag (t.ex. husväggar) mot motsvarande särdrag i en karta, för att på så sätt få en noggrannare inmätning av den globala positionen.

3.3.2 Bildstöttad navigering av UAV med termisk IR-sensor

För bildstöttad navigering av UAV:er med visuell kamera under goda visuella förhållanden finns väletablerade metoder där visuell odometri används för skattning av plattformens egenrörelse, dvs. relativ positionering av UAV:n längs

flygbanan. För absolut positionering av UAV:n kan exempelvis texturmatchning av visuell sensorbild mot visuell kartbild (från satellit- eller flygfoton) användas.

För att möjliggöra förmågan bildstöttad navigering av UAV:er även i mörker är en termisk IR-sensor ett tänkbart alternativ. Generellt ger termiska IR-sensorer bilder med lägre kontrast och högre brusnivå än en visuell sensor, speciellt över homogen terräng som öppna fält och skogsområden. Det finns ytterst begränsat med information om prestanda för visuell odometri med en IR-sensor nattetid och det är oklart om etablerade metoder för att detektera och följa särdrag i bildströmmen längs flygbanan kan användas eller om nya metoder behöver utvecklas.

För absolut positionering genom matchning av IR-sensorbild mot visuell kartbild kommer konventionella metoder troligen inte att fungera speciellt bra. Möjligen kan träningsbaserade metoder lära sig att överbrygga domänskillnaden mellan IR-sensorbild och visuell karta i snöfri terräng. I ett snötäckt vinterlandskap kommer texturmatchning inte vara möjlig, men tänkbara alternativ för absolut positionering är matchning av höjdinformation från en 3D-rekonstruktion av överflugen terräng mot en höjdkarta, eller terrängklassificering och efterföljande matchning av sensorbild och kartbild.

Denna aktivitet påbörjades i begränsad omfattning under 2024 och fortsätter i större omfattning under de kommande två åren. En detaljerad genomförandeplan har tagits fram. Forskningen kommer bland annat stödja den verksamhet som kommer att genomföras i projektet Demonstrator UCAV där prestanda för bildbaserade positioneringstekniker i Nordkalotten ska utvärderas.

3.3.3 Batymetristödd navigering för ytfarkoster

Terrängstödd navigering (eng. Terrain Referenced Navigation, TRN) är en positioneringsmetod som använder sig av uppmätt terränghöjd för att skatta plattformens position. Detta kan användas för att stötta ett tröghetsnavigeringssystem (TNS) då GNSS-mottagare är utstörda eller vilseledda. TRN resulterar i ett starkt olinjärt estimeringsproblem och ofta används därför ett partikelfilter för skattningen av position.

Inom denna aktivitet studeras hur mätningar av avstånd till botten och jämförelser mot en batymetrikarta kan förbättra positionsnoggrannheten för en obemannad ytfarkost (eng. Unmanned Surface Vehicle, USV). Omfattande studier av batymetristödd navigering har genomförts för obemannade undervattensfarkoster (eng. Unmanned Underwater Vehicle, UUV) men endast ett begränsat antal publikationer har publicerats kopplat till positionering av ytfarkoster [26].

Under 2024 har alternativa filterlösningar undersökts för att lösa problemet med en önskad informationsloop som identifierats i en systemstruktur från tidigare arbete, se [7]. Den tidigare strukturen använde sig av ett Extended Kalman Filter

(EKF) för att skatta osäkerheten i estimaten från tröghetsnavigeringen, och använde partikelfiltrets positionsskattning som en positionsmätning. Denna återkoppling skapar en informationsloop som innebär att observationerna från partikelfiltret inte är oberoende, vilket leder till problem i skattningen.

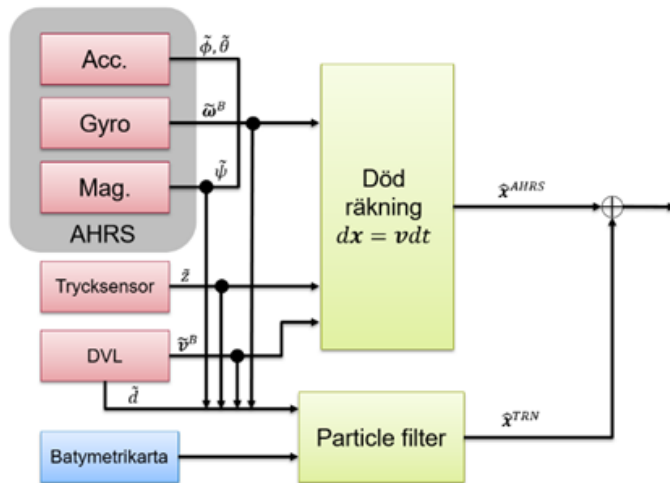
En möjlig lösning på problemet med oönskade återkopplingar är att låta samtliga tillstånd (position, hastighet samt attityd) estimeras av ett partikelfilter. En nackdel med denna metod är att ett partikelfilter kräver stora mängder partiklar för att kunna representera sannolikhetsfördelningen när mängden dimensioner ökar. Med en ökande mängd partiklar blir beräkningskomplexiteten snabbt för hög för att metoden ska vara praktiskt användbar.

Ett annat sensorfusionsfilter som inte lider av samma höga beräkningskomplexitet som den rena partikelfilterlösningen är ett marginaliserat partikelfilter (MPF). Ett MPF baseras på att systemmodellen kan delas upp i ett linjärt och icke-linjärt delsystem, där linjära tillstånd kan estimeras via t.ex. ett EKF och resterande tillstånd via ett partikelfilter. På så sätt kan beräkningskomplexiteten reduceras jämfört med ett partikelfilter som skattar samtliga tillstånd. Problem med MPF kan uppstå om många tillstånd ingår icke-linjärt i mätmodellen, vilket är fallet för nuvarande implementation av TRN där både position och attityd används. Då behöver dessa tillstånd skattas som icke-linjära för att inte få för stora linjäriseringsfel, vilket minskar nyttan med MPF då partikelfiltret fortfarande har relativt många tillstånd att estimeras.

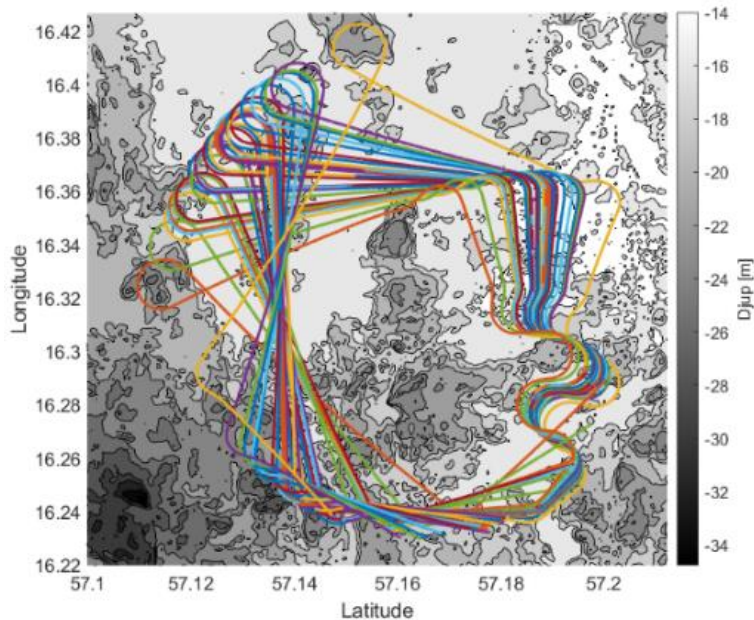
Ytterligare en sensorfusionsfilterstruktur som undersökts och implementerats baseras på [27], där ett AHRS (eng. Attitude Heading Reference System) tillsammans med en DVL (eng. Doppler Velocity Log) och en trycksensor utgör ett dödräknande system som stöttas med batymetrimätningar via ett partikelfilter, se figur 3.5.

I figur 3.6 visas en simulerad bana för ett ytfartyg för att påvisa effekten av batymetristöttad positionsestimering. Ytfartygen färdas i 8 m/s (cirka 15 knop) under 1,5 h timmar.¹⁵ I figur 3.6 visas skattad position för 30 realisationer när endast dödräkning med hjälp av AHRS, DVL och trycksensor används. Det ostöttade systemet vars positionsestimat driver upp till 4,000 m efter 90 minuter. I figur 3.7 visas motsvarande resultat när batymetristöttning inkluderas, vilket ger ett positionsfel på omkring 10 m.

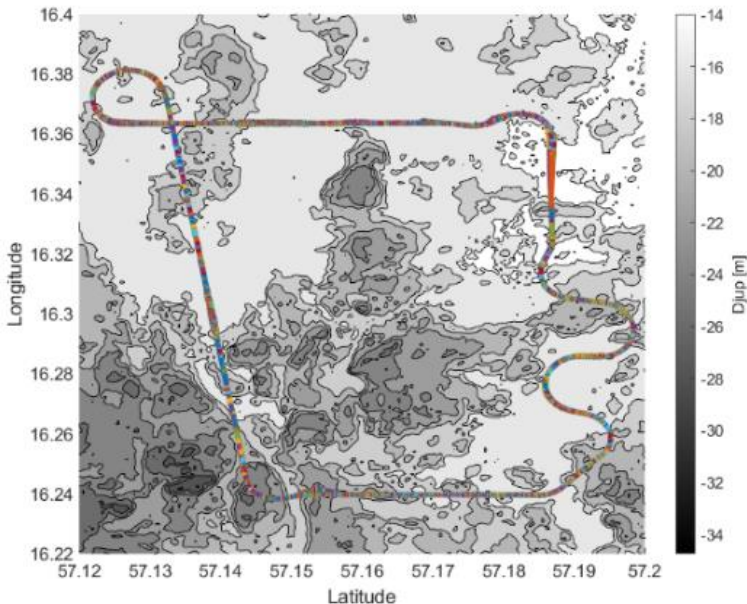
¹⁵ Felen i mätningar från DVL och trycksensor modelleras som additivt brus vars storlek varierar med det sanna värdet. För DVL:en är detta 0,4 % (3 sigma), och för trycksensorn 0,01 % (3 sigma). Felen i attitydestimering av AHRS:en modelleras som additivt vitt brus med standardavvikelse på 1,0 grad (3 sigma). Felen i vinkelhastighet modelleras som additivt vitt brus på 3 deg/sqrt(hr) (ARW, angular random walk) samt ett konstant bias som slumpas fram med standardavvikelse på 0,01 deg/s (3 sigma). För avståndsmätningen mot botten modelleras felet som additivt vitt brus med standardavvikelse 1.0 m (3 sigma).



Figur 3.5: Blockdiagram över det batymetrisktöddade positioneringssystemet som baseras på [26].



Figur 3.6: Skattade positioner för 30 realiseringar där endast dödräkning baserat på AHRS, DVL och trycksensor används. De olika trajektorierna har olika färg.



Figur 3.7: Skattade positioner för 30 realiseringar för det batymetristöddade positioneringssystemet. Positionsfelet begränsas kraftigt och trajektorierna för de olika realiseringarna överlappar.

Ambitionen är att genomföra simuleringsbaserade utvärderingar av effekterna på batymetristödd positionering för olika bottenprofiler under 2025. Arbetet inom denna aktivitet kommer att dokumenteras och avslutas under 2025.

3.3.4 Robust kommunikation för stridstekniska UAV:er

Fri optisk kommunikation är en kommunikationsteknik som använder en modulerad laserstråle för att överföra information trådlöst till en mottagare. Tekniken har utvecklats snabbt under de senaste åren, framförallt på grund av ett stort intresse från rymdindustrin för kommunikation med mycket hög dataakt mellan satelliter.

Fri optisk kommunikation har flera egenskaper som gör det till en intressant teknik för kommunikation på korta avstånd i telestörda miljöer, såsom för data- och styrlänkar till stridstekniska UAV:er. De viktigaste egenskaperna är att lasersignalen är förhållandevis svår att upptäcka och störa ut och att ingen frekvenstilldelning behövs. Fri optisk kommunikation möjliggör höga dataakt (hundratals Mbit/s). Tekniken har dock fundamentala begränsningar, framför allt att den förutsätter fri sikt mellan sändare och mottagare och att räckvidden begränsas av atmosfärs effekter. Räckvidden är väderberoende och den är kraftigt begränsad vid tät dimma eller kraftigt regn. Egenskaperna hos ett laserkommunikationssystem liknar till stora delar vad som kan förväntas för ett

radiosystem som använder höga frekvenser (t.ex. 55 eller 60 GHz) och nyttjar gruppantennor som kan realisera smala antennlobor.

Ett intressant användningsområde för fri optisk kommunikation är länkar mellan en markstation och UAV eller mellan UAV:er. Små UAV:er som UAV06 flygs normalt inte under de väderförhållanden då en optisk länk är som mest begränsad. Erfarenheterna från Ukraina visar tydligt att denna typ av UAV:er i stor utsträckning flygs i telestörda miljöer och det finns ett akut behov av mer robusta kommunikationssystem för dessa. För denna tillämpning är dock kraven på storlek, vikt och kostnad stringenta.

Målet med denna aktivitet är att undersöka möjligheterna att med en liten och lätt terminal för fri optisk kommunikation, baserat på kommersiella komponenter för att nå en låg kostnad, skapa ett robust kommunikationssystem för små UAV:er. Den stora utmaningen för en sådan kommunikationslänk är att rikta laserstrålen mot mottagaren när UAV:n, och ibland även markstationen, rör sig.

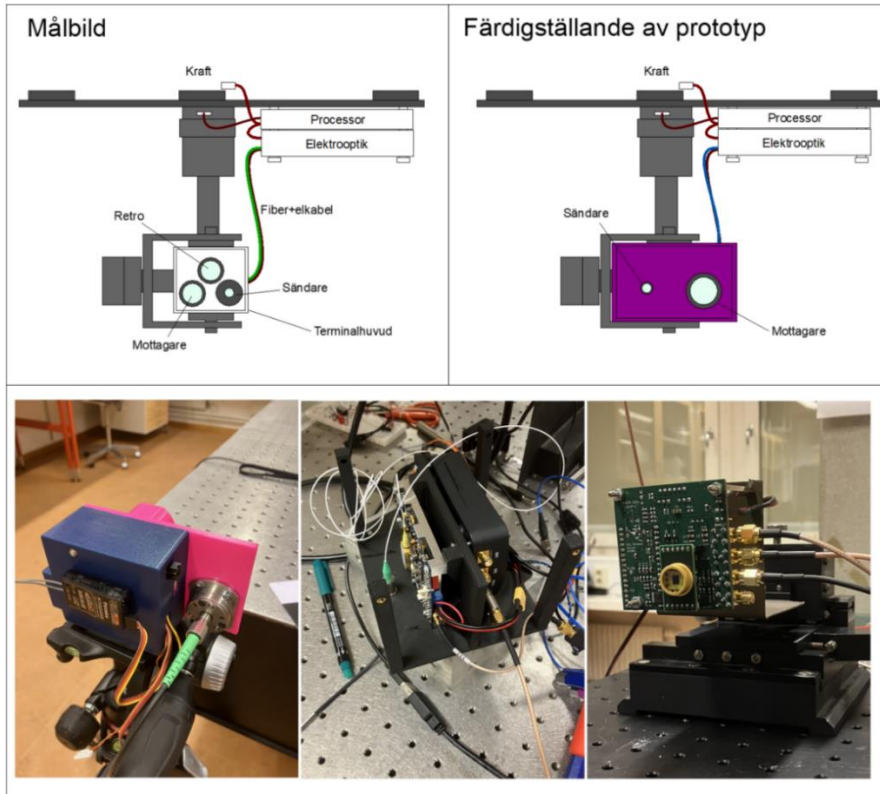
Figur 3.8 och 3.9 beskriver målbilden och status för arbetet. Hårdvara och mjukvara finns huvudsakligen på plats men ett visst integrationsarbete återstår innan systemprov kan genomföras.

Inför årets arbete hade en kommersiell bildstabiliserande gimbal av typen *Gremys Pixy u* (med en kostnad under 20 tkr) testats och resultaten visade att det via en mikroprocessor går att kontrollera den från en riktningsvisande optisk detektor. Proven genomfördes med en relativt okänslig positionsgivande detektor för synligt ljus och en del av årets arbete har varit att istället realisera motsvarande funktion med en positionsgivande detektor för en laservåglängd kring 1550 nm (figur 3.9).

Tyngdpunkten för årets arbete har varit riktat mot att simulera och utveckla elektronik för inkoppling av en kvadrantdetektor samt programmering av en FPGA (eng. Field Programmable Gate Array) för hantering av kommunikationsdata. Den analoga mottagarelektroniken har utgångar både för styrning av pekhuvud och för mottagning av kommunikationssignalen.

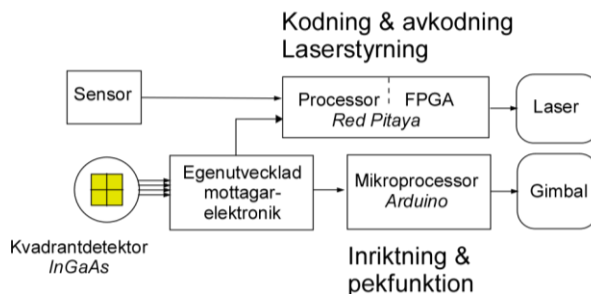
En enkortsdator med integrerad FPGA har anskaffats och programmerats med funktioner för styrning av lasern, omkodning av en digital dataström från t.ex. en sensor till ett format anpassat för lasermoduleringen samt för att kunna ta emot och avkoda en mottagen optisk dataström. Kodningen och avkodningen av den optiska länken har testats och den har skickat och tagit emot data i 8 Mbit/s.

Demonstrationer av detta koncept – laserkommunikation för att kommunicera med stridstekniska UAV:er – kommer att genomföras under 2025.



Figur 3.8: Målbild för arbetet samt skiss och fotografier av den prototyp som är under färdigställande. Målbilden är en laserterminal monterad på en kommersiellt tillgänglig gimbal avsedd för kamerastabilisering. Terminalhuvudet omfattar en sändare i form av en laser kopplad till en fiberoptisk kollimator, en mottagare i form av en vinkelkänslig detektor, samt en retroreflektor för tillbakaspjeling av strålen från den andra terminalen i samband med upprättande och låsning av kommunikationslänken. (Foto: FOI)

Utvecklas för laserkom vid 1550 nm våglängd



Figur 3.9: Schematisk beskrivning av den laserterminal som är under utveckling.

3.4 Samverkan mellan operatör och obemannade system

Forskningen har under 2024 fokuserat på förberedande arbete inför kommande utvärderingar av hur, var och när UGV:er kan skapa militär nytta. Det innebär att undersöka i vilka användningsområden, typuppgifter och på vilken ledningsnivå dessa system skapar militär effekt. Arbetet har under 2024 varit fokuserat mot att beskriva olika användningsområden. Exempel på användningsområden för UGV:er som utvärderas internationellt genom operationell experimentering är logistik, evakuering av skadade, eldunderstöd, flankskydd, spaning och kommunikation [15].

3.4.1 VBS4

För att undersöka olika användningsområden och tillämpningar för UGV:er har scenarier utvecklats i VBS4 (eng. Virtual Battle Space 4). Ett delmål har även varit att bygga kompetens runt simuleringsverktyget för framtida forskningsaktiviteter. Ambitionen har varit att dessa under 2025 ska användas i de workshops som genomförs med Försvarsmaktspersonal inom ramen för projektet DAMM (Demonstrator Autonom mångfunktionell markplattform) [28].

VBS4 är en datorsimulerad värld som tillhandahåller möjligheten att skapa militära tränings- och utbildningsscenarion. I VBS4 går det att skapa s.k. ”Battlespaces” vilket är en samling av anpassade terrängdata, uppdragsplaner, scenariofiler och som även ger möjlighet till strukturerade reflektioner efter insats (eng. after-action reviews). VBS4 ger även möjligt att skapa demonstrationsvideor för olika användningsområden.

3.4.2 Exempelscenario flankskydd

En demonstrationsvideo har tagits fram med VBS4 för att demonstrera ett specifikt användningsområde för UGV:er inom ramen för ett flankskydds-uppdrag. Scenariot inleds med att en pluton erhåller information om att ett fientligt mekaniserat kompani framrycker mot dess position. Plutonen skickar ut en medelstor UGV lastad med en mindre spanings-UGV som flankskydd. Den större UGV:n stannar i en tillbakadragen (dold) position och lastar av den mindre UGV:n, som upprättar en framskjuten observationsplats med god sikt över fiendens troliga framryckningsväg. I scenariot observerar den mindre UGV:n framryckande fientliga stridsvagnar. UGV:n skickar måldata och video, där den större UGV:n agerar som kommunikationsrelänod, till operatören som fattar beslut om bekämpning medelst indirekt eld. Stridsvagnarna bekämpas och operatören genomför en verkansbedömning baserat på videon från den mindre UGV:n som fortsätter att observera från sin observationsplats.

3.4.3 Framtida studier

Under de kommande åren kommer forskningen inom samverkan mellan operatör och obemannade system ha ett tudelat fokus, där forskningen inriktas mot att utvärdera potentiell militär nytta med mindre obemannade farkoster samt studera möjligheterna med generativ AI såsom stora språkmodeller (eng. Large Language Models, LLM) som ett verktyg för HAT.

Utvärderingarna av militär nytta kommer att genomföras tillsammans med militär personal som får genomföra prov och försök med experimentsystem som utvecklas inom projektet. Två typer av system är under utveckling:

- Mindre UGV:er utrustas med självkörande autonoma funktioner och prov och försök kommer att genomföras där den i urban miljö kan stödja avsutten trupp och genomföra uppgifter som att titta runt hörn, logistik eller agera som kommunikationsrelä.
- En autonom stridsteknisk UAV är under utveckling som ska genomföra ett spaningsuppdrag där den framrycker framför ett stridsfordon och har som uppgift att detektera och klassificera mål. Föraren eller vagnschef ska kunna leda UAV:n som en tillikauppgift, exempelvis genom röstkommandon, och endast behöva titta på videoströmmen från UAV:n när den har upptäckt mål.

En teoretiskt inriktad kunskapsuppbyggande aktivitet påbörjas 2025 som avser studera huruvida stora språkmodeller kan användas som ett verktyg för att realisera HAT. Fokus är mot ledning av autonoma obemannade farkoster med avancerade autonoma funktioner vilket ställer nya krav på hur en operatör ska interagera med farkosten.

3.5 Juridik och etik

Arbetet inom området juridik och etik har under 2024 genomförts inom tre relaterade aktiviteter: (i) analysera den internationella humanitära rättens (IHR) reglering av användning av en (fiktiv) obemannad, beväpnad luftfarkost (Unmanned Combat Aerial Vehicle, UCAV) med autonoma funktioner vid markmålsbekämpning, (ii) följa och analysera rättsutvecklingen inom dödliga autonoma vapensystem (eng. Lethal Autonomous Weapon Systems, LAWS) och (iii) studera det folkrättsliga ramverket för användning av obemannade, beväpnade ytfarkoster (USV) vid sjöstrid.

3.5.1 Tillämpad IHR-analys av UCAV

Under året genomfördes arbete med en s.k. fallstudie av en UCAV utifrån IHR som är bindande för Sverige i händelse av internationell väpnad konflikt, det vill säga en mellanstatlig konflikt. Syftet är att konkretisera de ibland ganska abstrakta diskussionerna om hur IHR reglerar bekämpning som genomförs med

vapensystem som har olika autonoma funktioner implementerade. Genom detta ämnar studien bidra till en diskussion om hur IHR lämpligen omhändertas inom Försvarsmakten när vapensystem med integrerade autonoma funktioner används. Målet är att säkerställa en rättsenlig användning av sådana vapensystem med bibehållen möjlighet att nyttja hela det rättsliga handlingsutrymmet.

Studien genomförs som en tillämpad analys av hur IHR reglerar användning av en (fiktiv) UCAV som har möjlighet till olika typer av autonomi i kritiska stridsfunktioner vid ett konkret (fiktivt) scenario där markmål ska bekämpas. Arbetet sätter därmed IHR:s förbud, begränsningar och skyldigheter att vidta åtgärder vid planering och genomförande av anfall i relation till ett konkret (fiktivt) tekniskt system och en konkret (fiktiv) situation med utvalda (fiktiva) mål [20].

3.5.2 Följa och analysera rättsutvecklingen för LAWS

Diskussionerna om ny folkrätt för autonoma vapensystem gick 2024 in i ett nytt skede, utifrån den vändpunkt som skedde 2023 [19]. CCW GGE LAWS¹⁶ är fortsatt det huvudsakliga internationella forumet i denna fråga men under 2024 togs de första formella stegen till vad som kan utmynna i en parallell process. Förenta Nationernas (FN) generalsekreterare presenterade i 2024 en rapport om staters och andra aktörers syn på vägen mot ny folkrätt för LAWS, vilket generalförsamlingen i 2023 uppdrog åt honom att undersöka. Rapporten visar inte att dessa aktörer ger uttryck för en gemensam entydig väg framåt men att många ser på frågan som brådskande. Generalsekreteraren understryker brådskan i frågan i sina slutsatser, och rekommenderar att stater antar ett bindande rättsligt instrument om LAWS och fullt ut implementerar redan gällande IHR. Generalförsamlingen beslutade med resolution 79/62 (2024) att genomföra informella konsultationer under 2025 och vidhålla LAWS på sin agenda. Sverige röstade för resolutionen men angav i sin röstförklaring att CCW är det föredragna forumet för LAWS. Det internationella samfundet uttryckte även i 2024 års *UN Pact for the future* en ambition att intensifiera arbetet i CCW.

CCW GGE LAWS har ägnat 2024 års arbete åt att formulera element till ett framtida instrument (av ännu obestämd status). Andra möjliga åtgärder har endast berörts kortfattat. Diskussionsklimatet har varit påfallande konstruktivt, även mellan stormakter som normalt står långt ifrån varandra, men viss obstruktion har förekommit. Diskussionerna har förts utifrån en s.k. ”rolling text” som författats av GGE LAWS ordförande och har formen av ett internationellt instrument. Denna innehåller utkast till karaktärisering av LAWS samt bestämmelser om IHR:s tillämplighet, förbud, reglering och ansvar satta i ett tydligt LAWS-sammanhang. Strukturen följer den s.k. ”two-tier” ansatsen [10],

¹⁶ Convention on Certain Conventional Weapons Group of Governmental Experts on Lethal Autonomous Weapon Systems.

som bl.a. Sverige förordar. I stort verkar samsyn råda kring majoriteten av texten, undantagen är framförallt hur LAWS ska karaktäriseras och hur människans roll ska regleras, där det finns motstående synsätt. När det gäller hur människans roll ska regleras finns en tendens att röra sig bort från begreppet meningsfull mänsklig kontroll. I den senaste versionen, som syftar till att reflektera årets diskussioner, används begreppet ”context-appropriate human control and judgment”. Det bör dock understrykas att eftersom CCW baseras på konsensus så är inget överenskommet förrän allt är överenskommet och antaget som helhet av gruppen vid utgången för mandatet. En fråga där tydliga skiljelinjer kvarstår har genom mandatet också skjutits på framtiden – instrumentets rättsliga status.

Sammantaget talar utvecklingen för en ökande sannolikhet att ny folkrätt för autonoma vapensystem kommer antas inom de kommande åren (eller över – längre – tid bildas genom internationell sedvanerätt). Alternativet med någon form av instrument som inte är folkrättsligt bindande kvarstår, vilket skulle kunna komma att förstås som ”soft law”.

Kortfattat har rättsutvecklingen under 2024 lett till följande resultat:

- En ny resolution om LAWS har antagits av FN:s generalförsamling. Under 2025 kommer informella konsultationer om LAWS att hållas i FN i New York.
- Arbetet i CCW GGE LAWS har intensifierats, i linje med det rådande mandatet. Ett utkast till ett framtida instrument, av ännu obestämd status, diskuteras. Gruppen måste nå konsensus i arbetet.

Årets verksamhet har inkluderat observationer vid CCW GGE LAWS formella och informella sessioner, deltaganden vid sidoeven, konferenser och konsultationer med internationella organ, möten med representanter för Försvarsmakten och Regeringskansliet samt litteraturstudier.

3.5.3 Folkrättsligt ramverk för användning av USV

Under året inleddes ett kunskapsuppbyggande arbete med att undersöka det folkrättsliga ramverket för användning av USV:er i sjöstridstillämpningar. Inom denna aktivitet har användningen av USV:er i Ukraina studerats och det är tydligt att den tekniska utvecklingen fått en märkbar påverkan på sjökriget i Svarta havet. Arbetet med att genomföra en folkrättslig analys har påbörjats. I kartläggningen av de folkrättsliga regelverk som är tillämpliga för dessa farkoster, och analysen av dessa, har skillnader (inkluderat potentiella normkonflikter) identifierats. Dessa återfinns framförallt mellan havsrätten och sjörätten, men även i hur IHR äger tillämplighet i marina militära operationer jämfört med i operationer i luft- och markdomänen. Dessa frågor kommer utgöra fokus för kommande års arbete inom denna aktivitet.

3.5.4 Workshop och presentationer

I november arrangerade FOI inom ramen för projektet en akademisk workshop om AI och autonomi i militära system och vapen på Stockholms universitet. Workshopen anordnades i anslutning till den årliga folkrättsdagen som juridiska fakulteten vid Stockholms universitet i år stod värd för. Både rättsliga och etiska aspekter diskuterades. Reflektioner och preliminära resultat från projektets forskning presenterades vid denna workshop.

I juni gav en av projektets medarbetare en presentation om den pågående folkrättsliga rättsutvecklingen kring AWS vid iCourts, på Köpenhamns universitet.

Medarbetare deltog vid konferensen Military Innovation Studies Summit som genomfördes av Försvarshögskolan den 16-17 oktober. Den behandlade bland annat autonoma farkoster och folkrättslig reglering av LAWS.

Projektets medarbetare deltog i januari vid ett halvdagssymposium vid Försvarshögskolan om boken *Honest Errors? Combat Decision-Making 75 Years After the Hostage Case*.

3.6 Övriga kompetensuppbyggande aktiviteter

Ett flertal kunskapsuppbyggande aktiviteter har genomförts under 2024. Dessa aktiviteter utgör en del av den omvärldsbevakning som genomförs inom projektet. Framförallt yngre medarbetare har getts möjlighet att delta på vetenskapliga konferenser för att bredda och fördjupa sin kompetens inom specifika områden. Medarbetare har även deltagit som observatörer vid militära övningar och försöksverksamhet som genomförts med obemannade farkoster vilket har gett värdefull kunskap om teknikernas mognadsgrad, metodik som används vid försök samt förståelse för hur obemannade farkoster kan användas i militära sammanhang.

3.6.1 Konferenser

Den europeiska försvarsbyrån arrangerade i november 2024, som en del av arbetet med den nyligen framtagna handlingsplanen för autonoma system, en tvådagarskonferens i Bryssel (1st ASCI Conference).¹⁷

ROSCon samlar varje år industri, universitet och entusiaster som arbetar med ROS (eng. Robot Operating System). I år genomfördes den under tre dagar i

¹⁷ Eng. Action Plan for Autonomous Systems (APAS) och Autonomous Systems Community of Interest (ASCI).

oktober i Odense. Ett av syftena med deltagandet på ROSCon var att få en bättre förståelse hur ROS2 fungerar och erfarenheter inför den kommande övergången till denna version.

Military RAS (eng. Robotics & Autonomous Systems) är en konferens som samlar militär, industri och akademi för att diskutera frågor relaterade till obemannade farkoster, framförallt för markstriden, och deras roll i framtidens strid. Konferensen genomfördes i London under tre dagar i april 2024. Totalt hölls 40 presentationer och ca 100 personer deltog, huvudsakligen från Storbritannien och Europa.

ION GNSS+ är en vetenskaplig konferens som genomförs i USA i september varje år. Fokus är på GNSS, där robusthet mot störning och vilseledning är ett viktigt område, men ett stort antal sessioner fokuserar på stöttande tekniker som kan användas för positionering i telestörda miljöer.

Fusion är en vetenskaplig konferens inom området informations- och sensorfusion. Från att främst ha drivits av flyg- och rymdtillämpningar har forskningen på senare år i större utsträckning finansierats av fordonsindustrin i och med utvecklingen av autonoma funktioner för förarstöd och för självkörande fordon. Även om ämnet nämndes flera gånger handlade få bidrag om högnivåfusion, att skatta taktiker och intentioner bakom data. Dock skulle denna typ av teknik kunna vara tillämplig i autonoma systems omvärldsuppfattning och samordning.

3.6.2 Workshops och seminarier

En översiktspresentation av den forskning som genomförs på FOI inom PNT-området gavs vid Nordic Navigation Workshop. Denna workshop genomfördes i anslutning till de demonstrationer som genomförs på Gränsö inom ramen för WASP WARA PS¹⁸. Under WARA PS demonstrerades samverkande obemannade farkoster i olika mikrosценarion.

Under seminariet Teknisk prognos, *Tema Deep Tech*, som anordnades av FMV i september genomfördes en presentation tillsammans med FHS inom området autonoma undervattensfarkoster.

3.6.3 Militära övningar och försök

Medarbetare från projektet deltog vid ICE WORX Summer experiments. Första veckan i juni arrangerade norska FFI tillsammans med *Morgendagens kampenhet* ur norska armén (Hæren) en experimentvecka på Blåtind skjutfält norr om

¹⁸ Wallenberg AI, Autonomous Systems and Software Program WASP Research Arena for Public Safety.

Bardufoss i syfte att utvärdera två medeltunga UGV:er (Rheinmetalls Mission Master XT och IDV Robotics Viking).

LandX anordnas årligen i oktober av FFI på Camp Rena i Norge. Under LandX genomförs först omfattande prov och försök där nya teknologier inom framförallt spaning, övervakning, detektion och målinmätning testas tillsammans med militär personal. Obemannade farkoster i form av stridstekniska UAV:er och medeltunga UGV:er utgör en viktig del av dessa försök. I slutet av denna period genomförs även en demonstration.¹⁹

Den finska Försvarshögskolan (Maanpuolustuskorkeakoulu) genomförde i maj 2024 ett stort virtuellt simuleringsexperiment som syftade till att utvärdera den militära nyttan med mindre UGV:er [29]. VBS4 användes för att genomföra försöken där scenariot utgjordes av försvarsstrid mot ett mekaniserat infanteri. UGV:erna var utrustade med exempelvis enkla pansarskott och stridsvagnsminor. Denna typ av simuleringbaserad experimentering med militär personal utgör ett värdefullt komplement till mer resurskrävande fysiska experiment.

3.6.4 Eurosatory

Eurosatory är en mässa som samlar stora delar av världens försvarsindustri och den genomförs vartannat år i Paris. Mässan pågår i fem dagar och 2024 deltog över 2,000 utställare från 62 länder. Totalt 62,000 besökare från 150 länder besökte mässan. Under veckan genomfördes även presentationer, paneldiskussioner och demonstrationer. Mässan gav en god överblick över utvecklingen av obemannade farkoster och möjlighet att ställa frågor till industrirepresentanter.

¹⁹ www.ffi.no/aktuelt/nyheter/ffi-har-utviklet-en-sverm-med-angrepsdroner (besökt 2025-01-30).

4 Samarbeten

Forskning som bedrivs inom obemannade farkoster är av nödvändighet multidisciplinär och omfattar ett stort antal forskningsområden. FOI är med sin breda kompetens en av få aktörer som har förmåga att utveckla, utvärdera, förstå och kravställa alla kritiska aspekter av obemannade farkoster inom mark-, sjö- och luftarenorna. Det förutsätter dock en god samverkan både internt på myndigheten, med övriga försvarsmyndigheter och med akademi, samt med ledande internationella aktörer inom försvarsforskning.

4.1 Nationellt

Projektet arbetar inom forskningsområden som gränsar till flera andra FoT-områden såsom Vapen och skydd, Sensorer och signaturanpassning, Ledning och MSI, Marksystem och Försvarsrelaterad medicin. Projektet har ett omfattande informationsutbyte och samarbete internt med andra FoT-projekt i syfte att identifiera och undvika potentiellt överlappande verksamhet och identifiera möjligheter till synergier.

FOI erhöll under 2024 även anslagsmedel inom anslagspost 6 (Bevakning och hantering av nya tekniker) där bland annat ett forskningsprogram inom autonomi för användning i militära tillämpningar genomförs. De ledord som ska inrikta forskningen är långsiktig försvarsnytta, forskningshöjd, nytänkande och vetenskaplig kvalitet. Ett av målen är att resultaten ska leda till försvarsnytta i form av asymmetriska fördelar. Då finansieringen inom FoT-verksamheten hittills endast möjliggjort begränsade forskningsinsatser för utveckling av autonoma funktioner så utgör detta forskningsprogram ett välbehövligt tillskott som kompletterar den forskning som genomförs i FoT-projekt. De resultat som tas fram, och den kunskap som byggs upp, kommer att omhändertas inom FoT-verksamheten och på ett väsentligt sätt öka kvaliteten i forskningen. FoT-projekten kommer i sin tur ge underlag för att inrikta och prioritera anslagsprojektens forskningsaktiviteter för att säkerställa den långsiktiga försvarsnyttan.

4.2 Internationellt

Syftet med de internationella samarbetena är att uppnå en effektivare kompetensuppbyggnad inom delområden där sådana samarbeten kan ge en större utväxling av satsade resurser. Projektet har deltagit i följande internationella samarbetsprojekt:

- Nordefco Robust Navigation WG och Swarming WG.
- NATO SET ET-120 NATO PNT Open System Architecture & Standards to Ensure PNT in NAVWAR Environments.

- NATO HFM RTG-330 Human Systems Integration for Meaningful Human Control over AI-based systems.
- NATO HFM IST-366 Research Workshop (RWS) Stakeholder involvement methods for Ethical, Legal and Societal Aspects and military AI.
- EDA HEDI (Hub for EU Defence Innovation) Autonomous Systems for Cross-domain Logistics.
- EDA ASCI Autonomy working group.

Under hösten 2024 har projektet även berett deltagande i:

- NATO STO AVT-RTG-408 Cooperative Demonstration of Technology: Autonomous Mobility Assessment for Military Ground Systems.
- GARTEUR FM-AG20 Artificial Intelligence for Fault Detection.

Projektet deltar även i olika multilaterala forum som behandlar autonoma vapensystem:

- Två medarbetare deltog i den svenska delegationen till CCW GGE LAWS session I och II i mars respektive augusti (2024), samt i informella intersessionella möten. Detta deltagande är en förutsättning för att med kvalitet kunna följa och analysera rättsutvecklingen för autonoma vapensystem.
- Två medarbetare deltog i den svenska delegationen till REAIM 2024 (eng. Responsible AI in the Military Domain Summit) som genomfördes i september i Sydkorea med nästan 2,000 deltagare. Fokus för detta event var juridiska och etiska aspekter för militär AI och autonomi.
- Projektet delfinansierade medverkandet vid UNIDIR:s (eng. United Nations Institute for Disarmaments Research) första regionala konsultation om IHR och autonoma vapensystem som genomfördes i november 2024.

5 Sammanfattning

Projektet har genererat en bred kunskap inom tekniker och metoder som är viktiga för utveckling, anskaffning och införande av obemannade farkoster, såsom farkost- och uppdragsautonomi, robusta kommunikations- och positioneringssystem och metoder för samverkan mellan operatör och obemannade system. Forskning inom framförallt juridiska aspekter kopplat till användningen av beväpnade obemannade farkoster har studerats, med målet att säkerställa en rättsenlig användning men med bibehållen möjlighet att nyttja hela det rättsliga handlingsutrymmet. Omvärldsbevakning har genomförts kontinuerligt under projektets gång för att förstå olika teknikers möjligheter och begränsningar, samt förstå hur obemannade farkoster kan användas operativt för att generera betydande militär nytta. Inledande aktiviteter har även genomförts som syftar till att, genom experimentering tillsammans med Försvarmaktens personal, värdera den militära nyttan med mindre obemannade farkoster.

Den kunskap som har byggts upp inom projektet har nyttiggjorts i ett antal Försvarmaktsstudier och höjt kvaliteten i direktbeställningar från Försvarmakten och FMV. Den militära forskningen kopplad till obemannade farkoster befinner sig i en snabb tillväxt vilket har medfört att projektet har haft en stor andel oerfaren personal. Forskningen inom huvuddelen av aktiviteterna har även startats upp under projektets gång, vilket har medfört ett stort behov av grundläggande kunskapsuppbyggnad. Detta har åstadkommit delvis på bekostnad av möjligheterna att bedriva djupare forskning och vetenskaplig publicering.

Forskningen fortsätter även 2025 med liknande frågeställningar och inriktning inom det nyinrättade FoT-området Autonomi och obemannat. Två projekt påbörjas under 2025: *Autonomi och samverkan med bemannade system* och *Juridik, etik och autonomi*.

Referenser

- [1] J. Rantakokko, *Tekniköversikt autonoma och obemannade system – Del 1: Historik*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R-- 4680--SE, december 2018.
- [2] Försvarmakten, *Fördjupade lärdomar och erfarenheter från kriget i Ukraina*, FM2023-2379:18, 2024-05-31.
- [3] J. Rantakokko och J. Nygårds, *Obemannade farkoster för markstriden – Erfarenheter från Ukraina*, Totalförsvarets forskningsinstitut (under slutförande).
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] J. Rantakokko (red.), *Obemannade farkoster och autonoma system – Årsrapport 2022*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5397--SE, februari 2023.
- [7] J. Rantakokko (red.), *Obemannade farkoster och autonoma system - Årsrapport 2023*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 8332, 2023.
- [8] J. Rantakokko, J. Appelgren, K. Bengtsson, E. Branzén, M. Hagström, K. Kraft, T. Melin, P. Winther och D. Saleh, *Obemannade farkoster och autonoma system - Årsrapport 2021*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5276--SE, januari 2022.
- [9] J. Rantakokko, F. Näsström, R. Woltjer, T. Mårtensson, M. Hagström och A. Foyer, *Tekniköversikt autonoma och obemannade system – Del 4: Luftstriden*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5167--SE, januari 2022.
- [10] S. Rydell (red.) och M. Olofsson (red.), *Drönare/UAS – teknik och förmågor*, Kungliga Krigsvetenskapsakademien, ISBN 978-91-88581-36-5, 2023.
- [11] Estonian Military Academy & European Defence Industrial Development Program (EDIDP), *Unmanned Ground Vehicles Autonomy Trials – Final Report*, 2023 (utrikessekretess unclassified).
- [12] A. Samimi Johansson (red.), J. Markdahl (red.), H. Nilsson, M. Norgren, D. Wiman, M. Råsander, A. Andersson, M. Gideskog, V. Deleskog och K. Lagerkvist Blomqvist, *En introduktion till uppdragsautonomi*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-D--1392--SE, maj 2025.
- [13] K. Blomqvist och J. Hamberg, *Sensoråterkopplad styrning*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-D--1394--SE, maj 2025.

- [14] V. Lindholm, A. Melbi och M. Gideskog, *UGV som logistik – användarnytta och metodutveckling*, FOI Memo 8338, december 2023.
- [15] P. Hinton, *Uncrewed Ground Systems Organisational and Tactical Realities for Integration*, Royal United Services Institute (RUSI) for Defence and Security Studies, 2023.
- [16] K. Bengtsson, P. Svenmarck, P.-A. Oskarsson, B.E.J. Johansson, A. Pestrea och A. Melbi, *Ledning av autonoma samverkande system – Inledande studier*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5301--SE, 2022.
- [17] B.J.E. Johansson, P.-A. Oskarsson, P.-A., K. Bengtsson, P. Svenmarck och A. Fredriksson-Hägg, *Ledning av autonoma och sammansatta system för mekaniserad strid*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5086--SE, 2020.
- [18] P. Winther, *Folkrättslig reglering av autonoma vapensystem: En översikt av rättskällor, rättsutveckling och forskning om användning och ansvar*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5343--SE, december 2022.
- [19] A. Andersson, *Utveckling av den folkrättsliga regleringen av autonoma vapensystem - En vändpunkt efter tio år av mellanstatliga diskussioner?*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5551--SE, mars 2024.
- [20] A. Andersson, *Fallstudie: IHR och UCAV*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5703--SE (under slutförande).
- [21] E. Branzén och K. Kraft, *Felsäkerhet för obemannade farkoster: Domänöversikt*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5357--SE, januari 2023.
- [22] E. Branzén och K. Kraft, *Felsäkerhet för obemannade farkoster: Metodintroduktion*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5358--SE, januari 2023.
- [23] A. Samimi Johansson, E. Lindgren, J. Rydell och M. Tulldahl, *An overview of obstacle avoidance methods for small low-flying unmanned aerial vehicles*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-D--1395--SE, maj 2025.
- [24] P. Svenmarck, A. Melbi, A. Pestrea, P.-A. Oskarsson, A. Andersson och Pontus Winther, *Konsekvenser för ledning av autonoma samverkande system*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5525--SE, december 2023.
- [25] M. Colledanchise och P. Ögren, "Behavior Trees in Robotics and AI: An Introduction," *CRC Press*, oktober 2022. (arxiv.org/abs/1709.00084, besökt 2024-12-08).
- [26] J. Rantakokko, P. Strömbäck och M. Linné, *GNSS-oberoende navigering – Omvärldsanalys*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5328--SE, augusti 2022.
- [27] D. K. Meduna, S. M. Rock and R. S. McEwen, "Closed-loop terrain relative navigation for AUVs with non-inertial grade navigation sensors", *Proc. of IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles*, Monterey, CA, USA, 2010.

- [28] J. Rantakokko, V. Lindholm och J. Henningsson, *DAMM – beskrivning av genomfört arbete under 2024*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 8679, december 2024.
- [29] C.A. Andersson, K. Halme, M. Laine, V. Hulkko och K. Virtanen, “Effectiveness of an Expendable Unmanned Ground Vehicle Stalling a Mechanized Infantry Company's Primary Combat Units—A Virtual Simulation Experiment,” *Journal of Field Robotics*, 2024.



FOI
Swedish Defence Research Agency
SE-164 90 Stockholm

Phone: +46 8 555 030 00
Fax: +46 8 555 031 00

www.foi.se