



Obemannade farkoster och autonoma system

Årsrapport 2022

JOUNI RANTAKOKKO

Jouni Rantakokko (redaktör)

Obemannade farkoster och autonoma system

Årsrapport 2022

Titel	Obemannade farkoster och autonoma system – Årsrapport 2022
Title	Unmanned vehicles and autonomous systems – Annual report 2022
Rapportnr/Report no	FOI-R--5397--SE
Månad/Month	Februari
Utgivningsår/Year	2023
Antal sidor/Pages	58
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Övrigt
FoT-område	Temaområde
Projektnr/Project no	E38506
Godkänd av/Approved by	Linda Sjödin
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

I denna årsrapport sammanfattas det arbete som genomförts under det gångna året inom FoT-projektet *Obemannade farkoster och autonoma system - teknik och operatör*. Kunskapen ska användas för att stödja Försvarmaktens förmågeutveckling inom området obemannade farkoster och autonoma system.

Rapporten beskriver de tekniskt inriktade arbetspaket som syftar till att bygga kunskap inom: (i) möjliggörande grundtekniker såsom robusta positionering-, navigerings- och kommunikationssystem, (ii) säkerhetskritiska autonoma funktioner med fokus mot feldetektion och felhantering samt självkörande funktioner, inklusive hinderundvikande, samt (iii) taktisk autonomi i form av uppdragsplanering, sensoråterkopplad styrning, autonom utforskning och automatlandning av UAV på UGV. Forskning bedrivs även inom området folkrättslig reglering av autonoma vapensystem, samt utveckling av metoder för hur bemannade och obemannade system ska kunna samverka effektiva (framför allt på markarenan).

Projektet fortsätter under 2023 och forskningsresultaten redovisas löpande inom respektive arbetspaket.

Nyckelord: Obemannade farkoster, UAV, UGV, juridik, etik, autonoma vapensystem, operatörsgränssnitt, uppdragsplanering, sensoråterkopplad styrning, säkerhetskritiska autonoma funktioner, taktiska autonomi, positionering, navigering, laserkommunikation, feldetektion, felhantering

Summary

The research that was conducted during 2022 within the project *Unmanned vehicles and autonomous systems – technology and operator* is summarized in this annual report. The aim is to generate knowledge that can be used to support the Swedish Armed Forces in their capability development within the area of unmanned and autonomous systems.

The project has technically centred research activities that aims to build knowledge within areas such as: (i) safety critical autonomous functions (i.e. *vehicle-centred autonomy*) focused on error detection and handling, and basic self-driving functionality, including obstacle-avoidance, (ii) tactical autonomous functions (i.e. *mission autonomy*) including mission planning, reactive control based on sensor input, autonomous exploration and automatic landing of an UAV on a UGV, and (iii) enabling basic technologies such as robust position, navigation and communication systems. Research is also conducted on international law applicable to autonomous weapon systems, as well as development of concepts for the efficient collaboration between manned and unmanned assets (focused on the ground domain).

The project continues during 2023 and the results will be continuously reported within each research activity.

Keywords: Unmanned, uncrewed, UAV, UGV, autonomous weapon systems, international human rights law, ethics, user interface, mission planning, vehicle autonomy, tactical autonomy, positioning, navigation, laser communication, error detection and handling

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Projektbeskrivning	7
1.1.1	Tilläggsbeställningar	8
1.2	Om rapporten.....	9
1.3	Nomenklatur.....	9
1.4	Rapportens disposition och författare.....	9
1.5	Projektets publikationer	10
2	Säkerhetskritiska autonoma funktioner	11
2.1	Feldetektion och felhantering	11
2.1.1	Översiktsstudie.....	11
2.1.2	Robust styrning av kvadrokopter vid propellerfel och vindstörning	13
2.2	Grundläggande självkörande förmåga	15
2.2.1	Metodval och arbetsgång	15
2.2.2	Resultat	16
2.2.3	Slutsatser	19
2.3	PNT för UGV.....	19
2.4	Autonom utforskning och robust och noggrann positionering för liten UAV	20
2.4.1	Autonom utforskning	20
2.4.2	Multisensorbaserad positionering och navigering	21
3	Taktiska autonoma funktioner	23
3.1	Uppdragsplanering	23
3.2	Sensoråterkopplad styrning.....	23
3.2.1	Angreppsätt.....	24
3.2.2	Exempel	24
3.2.3	Fortsatt arbete.....	25
3.3	Autonom landning av UAV på UGV	25
3.3.1	Modellprediktiv reglering för autonom landning.....	25
3.3.2	Tillståndsestimering i GNSS-störd miljö	28
4	Möjliggörande grundtekniker	31
4.1	Referensdataset och benchmarking.....	31
4.1.1	Sensorer och fordon	31
4.1.2	Exempel på framtida och pågående analyser	33
4.2	Kompetensuppbyggnad inom modellprediktiv kontroll för PNT-tillämpningar.....	35
4.3	Terrängnavigering.....	36
4.3.1	Generaliserad mjukvara för terrängnavigering	36
4.3.2	Exempel	36
4.3.3	Fortsatt arbete.....	39

4.4	Laserkommunikation med UAV	39
4.4.1	Bakgrund	39
4.4.2	Exempel.....	40
4.4.3	Datalänk	40
4.4.4	Inriktningsteknik.....	42
4.4.5	Slutsatser.....	42
5	Experimentsystem.....	43
5.1	UGV.....	43
5.2	UAV	45
5.3	Quadruped A1.....	46
5.4	Uppgradering av experimentell förmåga	47
5.4.1	Utökad förmåga i GNSS-simulator.....	47
5.4.2	Uppgradering av förmåga i signalgenerator	48
6	Samverkan mellan operatör och obemannade system.....	49
6.1	Fältförsök med UGV:er i militära operationer i urban terräng.....	49
6.2	Studier av användargränssnitt	50
6.3	Slutsatser och rekommendationer för fortsatt arbete	52
7	Folkrättslig reglering av autonoma vapensystem	53
7.1	Sammanfattning	53
7.2	Rekommendationer.....	53
7.3	Fortsatt arbete.....	54
7.3.1	Exempelstudie av beväpnad UAV (UCAV).....	54
8	Internationella samarbeten.....	55
8.1	Nordefco.....	55
8.1.1	Robust Navigation WG.....	55
8.1.2	Swarming WG	55
8.2	Nato Science & Technology Organization.....	55
8.2.1	Nato SET-309 Nato PNT Open System Architecture & Standards to Ensure PNT in NAVWAR Environments	55
8.2.2	HFM-RTG-330 Human Systems Integration for Meaningful Human Control over AI-based systems.....	56
	Referenser	57

1 Inledning

Obemannade farkoster har under det senaste decenniet blivit närmast oundgängliga i militära konflikter. De används numera på alla nivåer och alla arenor. Användningen är inte begränsad till högteknologiska stater utan tekniken är tillgänglig för alla aktörer i väpnade konflikter. Militära tillämpningar skiljer sig i flera avseenden avsevärt från civila och för att kunna nyttiggöra den civila utvecklingen inom obemannade farkoster krävs en djup förståelse för de specifika militära krav som ställs på systemen.

Mer än 100 länder bedöms använda obemannade luftfarkoster militärt (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) [1]. Den senaste femårsperioden har framför allt användningen av beväpnade taktiska, och i viss utsträckning även stridstekniska, obemannade luftfarkoster ökat snabbt. Denna utveckling exemplifieras av den beväpnade turkiska TB2 som exporteras till 28 länder.¹ Även användningen av patrullrobotar ökar snabbt [1].

Utvecklingen av obemannade markfarkoster (Unmanned Ground Vehicle, UGV) pågår med oförminskad takt. Även på marksidan är det utvecklingen av beväpnade obemannade farkoster som röner störst uppmärksamhet internationellt och ett antal länder genomför experimentering med sådana system [2]. Det gäller tyngre UGV:er som stöd till mekaniserade förband (exempelvis US Army Robotic Combat Vehicle och Type-X från MILREM) men även mindre UGV:er som utrustas med pansarvärnsrobotar och patrullrobotar (såsom MILREM THeMIS och Rheinmetall Mission Master) [2]. Dessa används dock inte ännu operativt utan experimentering pågår (i mindre omfattning även i väpnade konflikter) för att utveckla metoder och tekniker som kan ge en ökad operativ effekt.

Även inom sjöarenan pågår omfattande utveckling och experimentering med obemannade farkoster, både när det gäller ytfarkoster (Unmanned Surface Vehicles, USV) och undervattensfarkoster (Unmanned Underwater Vehicle, UUV). Forskning och utveckling av stora tunga UUV:er (XLUUV) kan ge en delvis disruptiv förmåga då dessa med sin långa uthållighet och lastförmåga ger möjlighet att utföra nya typer av uppdrag (exempelvis utläggning av minor, uthållig spaning, ubåtsjakt osv) [3]. Sådana system bedöms dock vara komplexa och dyra. Utvecklingen av modulära medelstora USV:er med lång uthållighet (flera dygn), lastförmåga (flera ton) och hög fart har kommit relativt långt. Säkerhetskritiska autonoma funktioner som ger möjlighet att navigera i enlighet med de internationella sjövägsreglerna till förhindrande av kollisioner till sjöss har demonstrerats även omkring andra fartyg [3].² Utvecklingen av uppdragsautonomi, som syftar till att realisera de taktiska förmågorna, befinner sig dock ännu i sin linda.

1.1 Projektbeskrivning

Projektets mål är att utveckla kunskap, metoder och verktyg för att stödja Försvarmaktens förmågeutveckling kopplad till framtidens (fjärrstyrda och autonoma) obemannade farkoster inom mark-, sjö- och luftarenorna. Projektet fokuserar på kunskapsuppbyggnad inom tre huvudområden: (i) kritiska förutsättningsskapande tekniker, (ii) funktioner för samverkan mellan operatör och obemannade system samt (iii) juridiska och etiska aspekter vid användningen av obemannade system (framför allt beväpnade sådana).

Projektets övergripande frågeställningar är:

- 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?

¹ baykartech.com/en/press/turkish-drone-maker-baykar-exports-bayraktar-tb2-to-28-countries/ (besökt 2023-01-30)

² Convention of the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs).

- Hur kan juridiska och etiska frågeställningar kopplat till autonoma system analyseras och hur bör analysen omhändertas i Försvarsmakten?

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).

1.1.1 Tilläggsbeställningar

Under hösten erhöles två separata tilläggsbeställningar för 2022. Arbetet med de aktiviteter som initierades inom den första tilläggsbeställningen kommer fortsätta under 2023. De aktiviteter som tillkom, samt status i arbetet, beskrivs kort i tabell 1.1.

Tabell 1.1: Beskrivning av status för de olika aktiviteter som initierades vid den första tilläggsbeställningen.

Aktivitet	Status (november)	Beskrivning
Fördjupade studier av användarbehov rörande mindre markrobotar vid militära operationer i urbana miljöer.	Planering av genomförandet har påbörjats men arbetet genomförs under 2023. Arbetet innebär en fördjupning av forskning som påbörjades under 2022.	Bakgrunden till arbetet ges i avsnitt 6.1.
Utvecklade juridiska analysmetoder genom studier av en beväpnad obemannad flygfarkost (UCAV).	Planering av genomförandet har påbörjats men arbetet genomförs under 2023.	Bakgrunden till arbetet ges i kapitel 7.
Experimentsystem för svärmar.	Två UAV:er av typen kvadrokopter (VOXL2) har anskaffats från Modal AI. Dessa kommer att utvärderas i syfte att bedöma deras lämplighet för utveckling och utvärdering av algoritmer för samverkande UAV:er och för demonstrationer. Därefter genomförs inköp av ytterligare UAV:er.	Status för denna aktivitet beskrivs närmare i avsnitt 5.2.
Fördjupad forskning av självkörande autonom förmåga i urbana miljöer och enklare terräng hos mindre UGV:er.	Arbetet utgör en fortsättning av arbetet med att implementera en grundläggande självkörande förmåga för en UGV. De rekommendationer om fortsatt arbete som beskrivs kommer att adresseras under december 2022 och första halvåret 2023. Under kv4 2022 studeras primärt ett av de prioriterade förbättringsområdena, utvecklingen av ett mer robust och noggrant positionerings- och navigeringssystem.	Beskrivs i avsnitt 2.2.
Fördjupat arbete med robust navigering genom studier av generell mjukvara för terrängnavigering i olika domäner.	Denna aktivitet utgör en fortsättning på ett examensarbete som genomfördes under våren 2022. I arbetet utvecklas en mer generell mjukvara för terrängnavigering som ska möjliggöra enklare utvärderingar av terrängstöttade navigeringstekniker i kombination med andra positioneringstekniker (såsom hastighetsstöttad tröghetsnavigering).	Status för arbetet inom denna aktivitet beskrivs i avsnitt 4.3.
Fördjupat arbete med feltolerant styrning.	Aktiviteten utgör en fortsättning på den översiktsstudie rörande feldetektion och felhantering som genomförts inom projektet under 2021 och 2022.	Aktiviteten beskrivs närmare i avsnitt 2.1.2.
Autonom sensoråterkopplad styrning.	Tilläggsbeställningen gav möjlighet att påbörja forskning inom området uppdragsautonomi där målet är att realisera nödvändiga taktiska förmågor hos obemannade farkoster. Ett av forskningsområden som studeras är sensoråterkopplad styrning, vilket kan beskrivas som en kombination av statistisk beslutsteori och styr-/reglerteori.	Forskningen beskrivs i avsnitt 3.2.
Uppdragsplanering	Inriktningen på forskningen är uppdragsplanering där styrning av UAV:er genomförs exempelvis med hjälp av neurala nätverk och beteendeträd. Aktiviteten utgör en fortsättning på den forskning som genomförts inom det egeninitierade anslagsprojektet Zerg [4].	Forskningen beskrivs i avsnitt 3.1.

Den andra tilläggsbeställningen består av tre delar: (i) inköp av mjukvaror, (ii) multisensorfusion för positionering och autonom utforskning i urbana miljöer och i underjordiska komplex och (iii) en utökning av forskningen rörande autonom sensoråterkopplad styrning (se delkapitel 3.1). Del (i) och (ii) redovisas i avsnitt 5.4 respektive 2.4.

1.2 Om rapporten

Denna rapport utgör en leverans inom FoT-projektet *Obemannade och autonoma system – teknik och operatör* som bedrivs inom ramen för Temaområde Autonomi och obemannat.³ Leveransen är kopplad till en tilläggsbeställning som projektet erhöll under hösten. Rapporten sammanfattar dock allt arbete som genomförts inom ramen för projektet under 2022, både inom den ursprungliga beställningen och inom de två tilläggsbeställningarna.

1.3 Nomenklatur

Det saknas entydiga och förankrade definitioner av begreppen autonom och autonomi. Autonom är ett ord som ofta används för att beskriva komplex automation medan automatisk är ett begrepp som används för mer välkända automatiska funktioner och vad som uppfattas som enkla system [3]. På motsvarande sätt saknas en entydig definition av begreppet 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 direkt styrning av en operatör kan utföra sitt tilldelade uppdrag [3].

De autonoma funktionerna kan även delas in i *farkostautonomi* och *uppdraagsautonomi*. Farkostautonomi ska bland annat realisera de säkerhetskritiska autonoma förmågorna som kopplar till ett säkert framförande av en obemannad farkost (t.ex. feldetektion och felhantering, självkörande funktioner samt hinderdetektion och hinderundvikande). Uppdragsautonomi syftar till att realisera de taktiska förmågorna, exempelvis kopplat till autonomt beslutsfattande vid genomförandet av tilldelade uppgifter eller deluppdrag. Vissa funktioner rör dock både farkostautonomi och uppdraagsautonomi och det är svårt att dra en tydlig gräns mellan dessa.

1.4 Rapportens disposition och författare

I kapitel 2 beskrivs de projektaktiviteter som kopplar direkt till säkerhetskritiska autonoma funktioner (farkostautonomi). Forskningen har fokuserat på områdena feldetektion och felhantering och att implementera en grundläggande självkörande förmåga hos UGV:er. Författare: Erik Branzén, Ellen Lindgren, Karin Kraft, Jonas Nordlöf och Gustav Tolt.

De aktiviteter som pågår riktade mot utvecklingen av taktiska autonoma delförmågor beskrivs därefter i kapitel 3. Där studeras bland annat autonom sensoråterkopplad styrning samt uppdraagsplanering. Forskningen som syftar till att utveckla förmågan att autonomt starta och landa på en UGV beskrivs även i detta kapitel. Den kan ses som ett exempel på sensoråterkopplad styrning men även beskrivas som farkostautonomi. Författare: Erik Branzén, Jacob Eek, Johan Hamberg, Karl Lagerkvist Blomqvist, Jonas Nordlöf, Marcus Norgren, Jonas Nygårds, Joakim Rydell och Tim Wiik.

I kapitel 4 redovisas därefter den forskning som är riktad mot att utveckla möjliggörande grundtekniker där fokus under året har varit riktat mot robusta multisensorbaserade positionerings- och navigeringssystem avsedda för operationer i telestörda miljöer. En aktivitet har även genomförts avseende möjligheterna att realisera ett robust laserkommunikationssystem för små UAV:er. Författare: Jonatan Adolfsson, Martin

³ Beställningsnummer och -namn: AT.9226005, Autonomi & obemannat FOI 22

Gelin, Fredrik Kullander, Jonas Nordlöf, Jonas Nygårds, Jouni Rantakokko, Joakim Rydell, Lars Sjökvist, Peter Strömbäck och Tim Wiik.

Därefter beskrivs i kapitel 5 de olika experimentsystem som anskaffats och på olika sätt används i forskningen. Författare: Mikael Alexandersson, Jonas Nordlöf, Jouni Rantakokko och Mattias Vikgren.

I kapitel 6 beskrivs den forskning som genomförts med den långsiktiga inriktningen att utveckla effektiva metoder för MUM-T (Manned-Unmanned Teaming). Tre delaktiviteter har genomförts: (i) fältförsök syftande till att utreda möjligheter och begränsningar med lätta UGV:er i urban miljö, (ii) gränssnittsutveckling för UGV:er och (iii) en begränsad omvärldsbevakning. Författare: Kristofer Bengtsson, Victor Lindholm och Diana Saleh.

I kapitel 7 ges en översiktlig beskrivning av det arbete den folkrättsliga regleringen av autonoma vapensystem. Författare: Pontus Winther.

Projektet har under året deltagit i Nato-grupper och forskningssamarbeten som genomförs inom ramen för det nordiska samarbetet Nordefco (Nordic Defence Cooperation). Syftet har varit att uppnå en effektivare kompetensuppbyggnad inom utvalda forskningsområden. Dessa samarbeten beskrivs i kapitel 8. Författare: Jouni Rantakokko och Rogier Woltjer.

1.5 Projektets publikationer

Utöver denna årsrapport så har fyra FOI-rapporter tagits fram under 2022:

- Jouni Rantakokko, Fredrik Näsström, Rogier Woltjer, Tomas Mårtensson, Martin Hagström och Anders Foyer, *Tekniköversikt autonoma och obemannade system - Del 4: Luftstriden*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5167--SE, februari 2022.
- Pontus 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.
- Erik Branzén och Karin Kraft, *Felsäkerhet för obemannade farkoster: Metodintroduktion*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5358--SE, januari 2023.
- Erik Branzén och Karin Kraft, *Felsäkerhet för obemannade farkoster: Domänöversikt*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5357--SE, januari 2023.

Ett konferensbidrag har publicerats:

- 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," *Proceedings of the 33rd European Conference on Cognitive Ergonomics*, Kaiserslautern, Tyskland, 2022.

Projektet bidrar även med ett kapitel i en bok om UAV:er, rörande den internationella utvecklingen, som sammanställs och publiceras av Kungliga Krigsvetenskapsakademien (KKrVA). Boken har titeln *Drönare/UAS – Teknik och förmågor* och den kommer att publiceras i mars 2023.

2 Säkerhetskritiska autonoma funktioner

Forskning riktad mot utveckling av säkerhetskritiska autonoma funktioner (farkostautonomi) för obemannade farkoster genomförs som ett viktigt delområde för projektet. Arbetet har fokuserat på områdena feldetektion och felhantering och att implementera en grundläggande självkörande förmåga hos UGV:er, med möjlighet att detektera och undvika hinder.

2.1 Feldetektion och felhantering

En stor del av de fel som inträffar för obemannade farkoster uppstår i interaktionen mellan människa och farkost. När fler funktioner automatiseras kan sådana fel elimineras, men då uppstår nya riskkällor och människans insyn i farkosternas funktionalitet förändras om inte åtgärder vidtas. Vissa funktioner i farkosterna är både säkerhets- och förmågekritiska och de fel som kan äventyra dem bör hanteras. En vanlig lösning är att implementera feldetektion, feldiagnostik och felhantering som innebär att upptäcka anomalier i farkoster, lokalisera, uppskatta och värdera fel samt att hantera dem proaktivt eller reaktivt.

Försvarsmakten har under en längre tid använt obemannade farkoster i sin verksamhet. Med växande användning av större och mer komplexa obemannade farkoster i militär luftfart, mark- och sjöverksamhet, samt med en ökande grad av autonomi i dessa, växer även behovet av avancerade metoder för automatisk detektion, diagnostik och hantering av fel i dessa farkoster. Dessa metoder implementeras i tekniska system och bidrar till en ökad felsäkerhet. Ju mer felsäkert systemet är, desto mindre mänsklig inblandning krävs. Detta resulterar dock typiskt i en mer komplex farkost. Samtidigt ska systemet verka i en miljö och utföra ett uppdrag där komplexiteten i miljön och uppdraget skapar utmaningar och gör automatisering svårare.

Två delaktiviteter riktade mot feldetektion och felhantering har genomförts under 2022. En översiktsstudie initierades 2021 och den har avslutats under 2022. Inom ramen för årets tilläggsbeställning har även en mer praktiskt inriktad forskning påbörjats som fokuserar på styrning av en multirotorbaserad UAV vid externa störningar orsakade av exempelvis propellerfel eller kraftig vind.

2.1.1 Översiktsstudie

Under 2021 påbörjades en förstudie med målet att förstå och beskriva de mest kritiska aspekterna gällande feldetektion, feldiagnostik, samt hantering av nödsituationer för olika typer av obemannade farkoster. Under 2022 har arbetet fortsatt och metoder för feldiagnostik inom de operationsmiljöer som Försvarsmakten verkar i (land, hav och luft) har beskrivits i två rapporter. I [5] presenteras det generella problemet med felsäkerhet för obemannade farkoster. Där ges även en domänöversikt där de olika behoven i olika domäner sammanfattas. I [6] ges därefter en teknisk metodöversikt samt förslag på arbetssätt för att nå en ökad felsäkerhet i obemannade farkoster. Syftet med rapporterna är att de ska utgöra basdokument för vidare forskning inom projektet samt att beskriva det inledande arbetet kopplat till kunskapsuppbyggnad inom området felsäkerhet för obemannade farkoster som försetts med autonoma funktioner.

2.1.1.1 Domänöversikt

Luftdomänen är komplex och flygande farkoster utsätts för störningar i form av andra flygande farkoster, väder och fåglar samt, beroende på flyghöjd, förändringar i topografi. Vid fel och påverkan behöver (åtminstone) en kontrollerad landning kunna utföras för att undvika att systemet skadas eller förstörs. En vådahändelse kan leda till stora materiella skador eller personskador. Felsäkerhet är därför ett kritiskt område och detta reflekteras

starkt i den mängd forskning och teknikutveckling som skett historiskt inom denna domän. Obemannade luftfarkoster kan vara bestyckade, ha lång uthållighet och vara dyra. Dessa faktorer ökar behovet av feldetektion, feldiagnostik och felhantering i farkosterna. Syftet är dels att eliminera riskkällor, dels att påverka utlösande faktorer som kan leda till haveri. Olyckor orsakas ofta av en kombination av motorfel, elektriska fel, navigeringsfel och kommunikationsfel och riskkällorna är ofta farkostens kinetiska energi, nyttolast eller farliga ämnen från exempelvis batterier.

Undervattensdomänen präglas av liknande förutsättningar som luftdomänen genom att en vådahändelse kan leda till en förlust av farkosten. Riskkällan är miljön i sig eftersom elektronik och motorer är känsliga för vatten men olyckor leder sällan till personskador. De vanliga felen är elektriska fel (som ett resultat av läckage), motorfel eller kommunikationsfel. Eftersom undervattensfarkoster i en militär kontext kan vara bestyckade eller ha en minröjningsroll tillkommer även en risk för större skada på omgivningen. Moderna undervattensfarkoster förväntas få en lång uthållighet (uppmot flera månader för den största klassen) och kraven på felsäkra och tillförlitliga system för navigering, framdrivning och kommunikation förväntas därmed att öka.

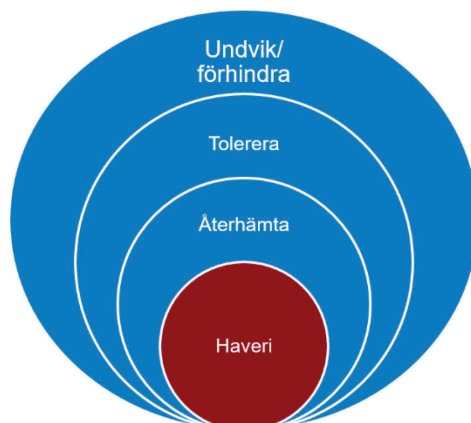
Obemannade farkoster på ytan skiljer sig något från dem under ytan avseende säkerhetsaspekten av flera anledningar. Ytfarkoster flyter ofta oberoende av sin framdrivning och tar endast in vatten vid direkt skada på skrovet. Felsäkerhet är fortfarande viktigt i och med de ofta höga kraven på uthållighet men i och med att konsekvenserna vid vådahändelser är lindrigare kan behovet av system för feldetektion, feldiagnostik och felhantering argumenteras vara mindre än för de andra domänerna. Den vanligaste källan till olyckor är kollision med andra fartyg eller fasta objekt och tillförlitlig kollisionsundvikning och noggranna navigationssystem är därför viktigt.

Markdomänen präglas av snabba förlopp i och med att sensortäckningen ofta är begränsad till ett lokalt område nära farkosten. Beroende på miljö och farkost varierar behovet av feldetektion, feldiagnostik och felhantering. Teknikutvecklingen är snabb och farkosterna är bestyckade i allt större utsträckning. Allt från stora och dyra till små och billiga obemannade markfarkoster förekommer och kraven på uthållighet kan vara höga. De vanligaste felen är motorfel, ställdonsfel, kommunikationsfel och sensorfel. Markdomänen innefattar en stor mängd miljöer och uppdrag och det är därför svårt att generalisera kring behovet av felsäkerhet.

2.1.1.2 Metodöversikt

En farkosts motståndskraft mot fel är ett resultat både av designen och av handhavandet. Tekniska system som ökar motståndskraften kan stödja handhavandet genom att erbjuda bättre insyn i farkosten, och även i viss mån automatisera hela eller delar av felhanteringen. Med prediktionsmodeller och bearbetning av tidigare driftdata kan fel undvikas med prediktivt underhåll eller andra åtgärder tas för att minimera sannolikheten för vådahändelser. Feldetektion och feldiagnostik kan delas in i datadrivna och modelldrivna metoder och de kan användas *offline*, det vill säga mellan uppdrag, eller *online*, det vill säga i realtid under uppdrag. Metoder för felhantering görs lämpligast enligt en lagerprincip där ett fel måste penetrera varje lager av åtgärd för att kunna orsaka ett haveri (se figur 2.1). Till exempel är det viktigt att skapa observerbarhet för fel tidigt i en händelsekedja för att kunna agera preventivt. Genom att ha metoder för felundvikning, feltolerans och felåterhämtning kan farkostens felsäkerhet stärkas.

En farkosts önskade felsäkerhetsnivå utgår från en tolerabel risknivå och omsätts efter ett iterativt arbete i metoder, tekniska som icketekniska, för ökad felsäkerhet. Först bör fel kartläggas, deras relationer med varandra och farkostens förmågor, deras betingade sannolikheter samt deras observerbarhet. Arbetet som leder fram till en ny implementation av farkosten bör även vara iterativ eftersom de systemförändringar som görs förändrar systemet och därigenom riskerar att göra riskanalysen till viss del utdaterad.



Figur 2.1: Lökdigram för felsäkerhet hos system. Ett fel som penetrerar alla lager av felhantering kommer att leda till haveri (en permanent förlust av en kritisk funktion). Ju fler metoder varje lager består av, desto högre grad av felsäkerhet erhålls. Möjligheten att åtgärda ett fel är beroende av observerbarheten hos det.

2.1.1.3 Fortsatt arbete

För att kunskapen ska kunna användas av Försvarmakten och FMV behövs både bredd och djup i forskningsverksamheten. Detta innebär bland annat behov av analys och syntes av felsäkerhetssystem på helhetsnivå, det vill säga på systemarkitekturnivå, men även på låg nivå i enskilda delsystem och komponenter. Den experimentella verksamheten kommer att utökas inom projektet under kommande år, där metoder för feltolerant styrning och felestimering kommer att testas på fysiska UAV:er. Det kommer även att ske en fortsatt kunskapsuppbyggnad inom teori och metodik kring feldetektion och feldiagnostik som bland annat innefattar maskininläring och modellbaserade metoder för felisolering och felträdsanalys.

2.1.2 Robust styrning av kvadrokopter vid propellerfel och vindstörning

Med den ökande användningen av obemannade farkoster med hög grad av autonoma funktioner tillkommer utmaningar gällande säkerhet och tillförlitlighet. När allt fler av farkostens förmågor automatiseras behöver även feldetektion, feldiagnostik och felhantering automatiseras för att farkosten ska kunna ta säkerhetsmedvetna beslut under uppdraget. Denna förmåga innebär att kunna övervaka interna system och processer, detektera anomalier och ha redundans i funktioner, både i mjukvara och hårdvara. Farkostens "inre liv" i form av driftdata kan även dokumenteras och bearbetas mellan uppdrag. Utökningen av systemet med denna förmåga leder till en ökad komplexitet som kan leda till ytterligare riskkällor vilket bör tas hänsyn till vid en riskanalys.

2.1.2.1 Tidigare arbete

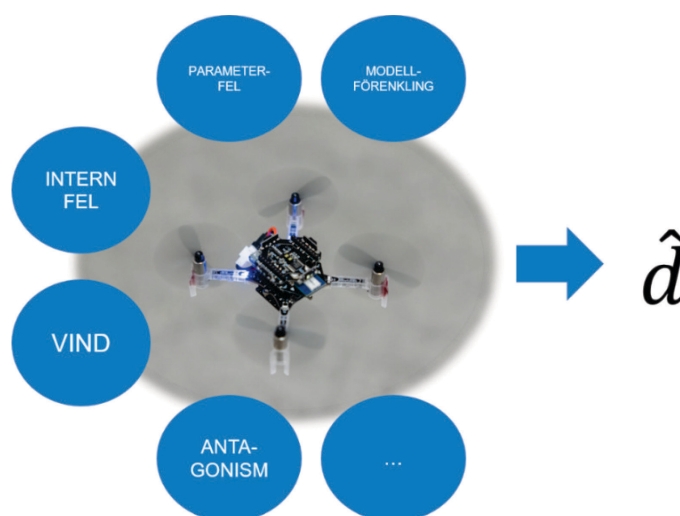
Under 2021 påbörjades ett arbete med att utveckla och utvärdera metoder för feldetektion och feltolerant styrning för små UAV:er, specifikt kvadrokoptrar (som styrs med fyra propellrar). En metod har tidigare implementerats som kan detektera då en eller flera av motorerna som driver propellrarna hos en kvadrokopter degraderas, vilket representeras med en procentuell förlust i faktisk lyftkraft gentemot begärd lyftkraft. Felets påverkan på kvadrokoptern är matematiskt modellerad och visar sig orsaka en kraftig påverkan på dess rörelse. Bedömningen är därför att en aktiv kompensering är nödvändig för att bevara en stabil framfart i ett sådant fall. Den implementerade metoden utgår från att en residual mellan modell och verklighet observeras och därefter används i en regressionsanalys för att uppskatta graden av degradering i de olika motorerna. Denna uppskattning återkopplas sedan till kvadrokopterns styrsystem som består av en PI-regulator för translationsrörelse samt en s.k. glidande ytskiktsreglering (Sliding Mode Control, SMC) för rotationsrörelse.

Metoden analyserades både med och utan extern stimuli för att undersöka dess robusthet i en mer verklighetstrogen miljö. Med våra antaganden uppvisade metoden goda resultat för att uppskatta motorfel både med och utan närvaro av extern påverkan i form av vind. Vid stora motorfel begränsas dock kvadrokopterns styrförmåga, vilket resulterar i små marginaler för bibehållen stabilitet.

2.1.2.2 Beskrivning av genomfört arbete under 2022

Under 2022 har arbetet fortsatt med den feldetektionsmetod som implementerades under hösten 2021. En realtidssimulator har tagits fram i Matlab, som har stöd för att ställa in degraderingsgrad av motorer samt extern stimuli i form av vindstyrka under en flygning. Utöver detta har ytterligare oberoende metoder för detektion av motorfel testats genom simuleringar, med målet att uppnå redundans. Till exempel har en modellfri metod testats, där antaganden om farkostens lyftkraft vid stillastående läge används för att approximerar varje motors degraderingsnivå. Ett arbete med att samla in och analysera driftdata från olika kvadrokoptersystem har även påbörjats. Ambitionen är att under 2023 fortsätta med mer avancerade försök för olika typer av farkoster.

En utmaning med att utvärdera modellbaserade feldetektionsmetoder har varit parametersättningen av modellerna som beskriver kvadrokopterns dynamik eftersom residualmetoden är beroende av små modellfel. Residualen är en funktion av skillnaden mellan faktisk mätdata och predikterad mätdata från modellen. Modellfel som härstammar från förenklingar samt parameterfel i aerodynamik, mekanik och elektronik leder till en residual som beror på mer än bara motorfelet och feluppskattningen försvåras därför avsevärt. Denna slutsats var en viktig input i det fortsatta arbetet och har påverkat den fortsatta planeringen av arbetet.



Figur 1.2: Uppskattningen av påverkan av en felande motor är svår i praktiken eftersom den storhet som kan mätas är summan av alla störnings- och modelleringsfel. Utan separata metoder för att observera de enskilda storheterna är det svårt att uppskatta påverkan av motorfel.

2.1.2.3 Fortsatt arbete

Under 2023 är ambitionen att fortsätta arbetet med att utvärdera olika metoder för feldetektion utifrån driftdata från flera olika UAV-plattformar, samt att testa metoderna på en fysisk plattform i realtid genom att injicera fel i plattformen under säkra förhållanden. För att säkerställa tillförlitligheten för de modellbaserade metoderna planeras tester för systemidentifikation. Tanken är att förbättra modeller för existerande fysiska system för att bättre kunna utvärdera modellbaserade metoder utifrån driftdata. Rent datadrivna feluppskattningsmetoder kommer även undersökas, vilka inte kräver en modell av systemet. Exempelvis kommer maskininlärning och klassiska metoder för statistisk

inlärning tillämpas på motorfeluppskattningsproblemet. Bakgrunden är de högst ickelinjära fysikaliska ekvationerna som beskriver dynamiken hos motorerna och hela farkosten samt de många parametrarna som påverkar farkostens framfart.

2.2 Grundläggande självkörande förmåga

Arbetet bestod av att undersöka och implementera autonoma basfunktioner för en Clearpath Robotics Husky UGV (se avsnitt 5.1).⁴ Dessa funktioner var: nödstopp, brytpunktsnavigering med hinderundvikning och personföljning. Målet var dels att bygga kunskap kring autonoma funktioner för markfarkoster och etablera en kunskapsbas för vidare forskning, dels implementera autonoma funktioner som möjliggör genomförandet av prov och försök inom MUM-T (Manned-Unmanned Teaming) på markarenan. Aktiviteten är än så länge förhållandevis liten men bedöms öka i omfång under de närmaste åren.

2.2.1 Metodval och arbetsgång

Här presenteras problem som uppkom och diskuterades under arbetets gång, samt hur de mynnade ut i de metoder som sedan presenteras i avsnitt 2.2.2.

2.2.1.1 Utvecklingsmiljö och utvärderingsverktyg

För att kunna utveckla och utvärdera metoder som tas fram för global ruttplanering och lokal hinderundvikning behövs en simuleringsmjukvara som stämmer bra överens med verkligheten i termer av fysik och miljö. Mjukvaran som används vid simuleringar bör vara densamma som för den fysiska Husky UGV. Genom att bygga mjukvaran i ROS kunde denna egenskap erhållas i hög grad. Målet var att använda robotiksimulatorn Gazebo där en modell av Husky kunde köra runt och alla sensorer var modellerade. Detta förenklar överföringen av de utvecklade autonomifunktionerna från simuleringsmiljön till den fysiska UGV:n.

2.2.1.2 Global ruttplanering

För att ge Husky möjlighet att planera en rutt utanför sin egen perceptionsrymd behövs en karta som täcker en större yta än vad LiDAR-sensorn kan kartera. Kartan kan ha en relativt låg upplösning då det i detta steg räcker att erhålla en överblick över områden med hög respektive låg framkomlighet. Därefter kan den lokala algoritmen som bedömer framkomligheten finjustera ruten när olika hinder upptäcks. Öppen laserdata från Lantmäteriet sågs som en god kandidat för detta ändamål då dessa kartor är heltäckande samt beskriver en koordinats höjd över havet.

2.2.1.3 Lokal hinderundvikning

En viktig funktion är att en UGV baserat på data från sina sensorer ges förmågan att uppskatta framkomligheten inom sin perceptionsrymd (dvs. sensorernas räckvidd). Denna uppskattade framkomlighet ligger till grund för en mer sofistikerad banföljning, där målfunktionen baseras på att färdas genom en så lättframkomlig terräng som möjligt. Ett konkret exempel skulle kunna vara att tillåta UGV:n att avvika ett givet avstånd från den planerade ruten, vilket exempelvis skulle ge den möjlighet att åka med en högre hastighet på en grusväg istället för över ett fält.

ROS-paketet *Elevation Mapping*⁵ samt *Traversability Estimation*⁶ undersöktes för Huskys framkomlighetsskattning.

⁴ clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/ (besökt 2022-11-21).

⁵ github.com/ANYbotics/elevation_mapping (besökt 2022-11-21).

⁶ github.com/leggedrobotics/traversability_estimation (besökt 2022-11-21).

- Givet en UGV utrustad med en LiDAR och/eller djupmätande kamera (exempelvis Intel RealSense), samt en tillståndsskattning för UGV, försöker *Elevation Mapping* att generera en robotcentrerad och lokal höjdkarta. Höjdkartan består av en tvådimensionell grid, där varje cell tilldelas en höjdschattning samt varians [7].
- Funktionen *Traversability Estimation* tar sedan den producerade höjdkartan och beräknar ett framkomlighetsvärde för varje cell i en tvådimensionell grid. Framkomlighetsberäkningen baseras på tre egenskaper hos terrängen: lutning, ojämnheter samt steghöjd [8].

Algoritmens parametrar kan justeras efter vilken UGV som används. Till exempel kan en hjuldriven UGV tänkas kunna färdas upp för en brant backe, men där diskreta höjdsteg såsom trappor bör bestraffas (förses med en hög kostnad) ur en framkomlighetssynpunkt.

2.2.1.4 Positionering

Husky har inbyggda tröghetssensorer (Inertial Measurement Unit, IMU), hjulodometri och magnetometer. Den har även en satellitnavigeringsmottagare (Global Navigation Satellite System, GNSS). Andra sensorer såsom LiDAR och kamera har även integrerats på UGV:n men dessa användes inte i den första implementationen av självkörande funktionalitet.

2.2.1.5 Integration på hårdvara

En viss anpassning har behövt göras för att de i Gazebo utvecklade ROS-noderna skulle bli kompatibla med UGV:ns installation av ROS. Utvecklingsmiljön är byggd på den senaste versionen av ROS1, Noetic, som bland annat har stöd för Python 3, medan ROS Melodic (som endast stödjer Python 2) är installerat på den fysiska UGV:n.

2.2.2 Resultat

Den mjukvara som integrerades på Husky UGV tog formen av öppna paket för navigering, matrisberäkningar, LiDAR-baserad terrängkartering, framkomlighetsbedömning, simuleringsvärldar i Gazebo, ruttplanering, sensorfusion med mera. Egen mjukvara utvecklades även för hantering av punktmolnsfiler, navigering och generering av kostnadskarta för ruttplanering, brytpunktsgenerering, publicering av transformer mellan lokal kostnadskarta och Husky samt ett perceptionsbaserat nödstopp.

2.2.2.1 Nödstopp

En viktig säkerhetsfunktion är ett automatiskt nödstopp. I implementationen tar det formen av två funktioner. En avståndsbedömning till objekt från LiDAR och en tillståndsmaskin som sänker hastigheten på Husky när något föremål mäts upp närmare än ett visst angivet avstånd samt stannar Husky när något föremål detekteras på ett avstånd som är närmare än ett fördefinierat säkerhetsavstånd.

2.2.2.2 Hinderundvikande brytpunktsnavigering

Framförandet av Husky består av flertalet processer som ger informationsunderlag, ruttplanerar lokalt och globalt eller driver fordonet framåt. Nyckelfunktionerna som utgör den hinderundvikande brytpunktsnavigeringen är:

- en framkomlighetsbedömning med radie 5 m runt Husky som uppdaterar en statisk karta med uppmätta hinder,
- en algoritm som väljer rätt statisk karta och transform mellan statisk karta och Husky beroende på dess position i longitud och latitud,
- en ruttplanerare som använder en dynamisk s.k. *occupancy grid* för att planera ruten mellan två koordinater,
- en rutföljare som även kan upptäcka och undvika hinder,

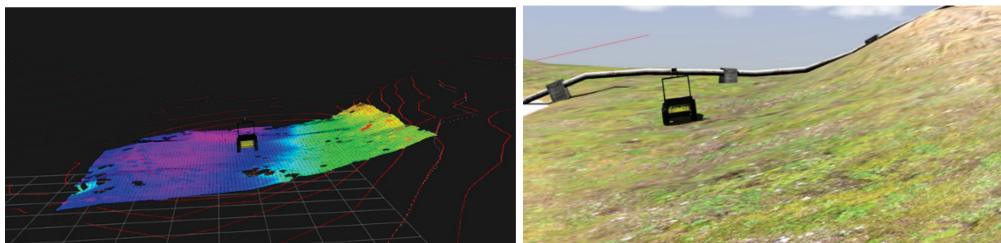
- en algoritm som uppdaterar aktuell målkoordinat för ruttplaneringen beroende på var UGV:n befinner sig,
- en positioneringsalgoritm som fusionerar data från IMU, hjulodometri och GPS.

Framkomlighetsbedömningen producerad av *Traversability Mapping* fungerade relativt bra vid simuleringar i Gazebo. Ett krav för att bedömningen skulle konvergera omkring roboten var att den körde runt och samlade in överlappande data. Parametersättningen fungerade relativt väl i sin utgångskonfiguration och vid körning på gräs uppkom inga oförväntade hinder. Ett exempel på framkomlighetsbedömning ges i figur 2.3.

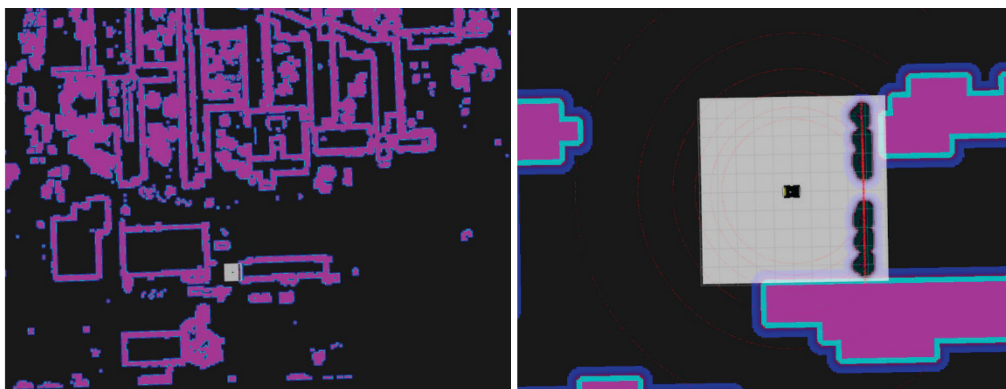
En potentiell flaskhals är beräkningskomplexiteten i framkomlighetsbedömningen. För närvarande produceras en uppdaterad framkomlighetsbedömning varje sekund under simuleringen. En ökad beräkningsfrekvens alternativt större bedömningsarea skulle vara önskvärt. Detta för att öka möjligheterna för Husky att upptäcka hinder i dess färdväg med god marginal, och planera sin körning därefter. Huruvida frekvensen för framkomlighetsbedömningen kan öka via en bättre trimmad parametersättning har inte undersökts än.

En statisk karta genererades från lantmäteriets underlag av laserdata. Punktmoln över en stor yta delas upp i segment på hundratals meter i bredd och höjd och omvandlades till s.k. rasterfiler som sedan vektoriserades. Kartorna som då tar formen av matriser med associerade origo i longitud/latitud samt upplösning selekteras dynamiskt genom att jämföra positionen för UGV:n med det område kartan täcker. På så sätt används minimalt med minne under körning.

Lutningen och ojämnheten i kartan extraheras och ställs mot ett gränsvärde för att generera en uppskattning på framkomlighet. Det är samma gränsvärde som i den lokala framkomlighetsbedömningen. Karthanteraren synkar sedan denna karta med den lokala framkomlighetsbedömningen för att skapa kostnadskartan som används vid navigering. Hinder läggs då till eller tas bort från den statiska kartan. I nuläget är denna synkronisering minneslös vilket innebär att den statiska kartan återgår till original när Husky lämnat närområdet. I en framtida version bör tilläggen vara permanenta.



Figur 2.3: Framkomlighetsbedömning runt simulerad Husky samt sann position.



Figur 2.4: Vänster: Global karta över FOI Linköping, samt lokal karta runt UGV (vit kvadrat). Rosa färg indikerar byggnad. Höger: Inzoomad variant av den lokala kartan runt Husky. Vitt indikerar fri cell, svart indikerar ockuperad cell. Punktmoln från LiDAR ses även i rött.

Ruttplaneraren *navfn*⁷ utnyttjar transformen mellan Husky och den dynamiska framkomlighetskartan, samt de angivna brytpunkterna, och kartan för att planera en rutt från punkt A till punkt B som undviker hinder. Dijkstra's algoritmen används för att hitta den kortaste vägen.

ROS-paketet *dwa_local_planner*⁸ ansvarar för rutföljningen samt hinderupptäckt och hinderundvikning lokalt. Flertalet parametrar finns att tillgå för att trimma rutföljningen, t.ex. kan maximal hastighet samt rotationshastighet sättas. Dessutom kan algoritmens kostnadsfunktion trimmas genom att vikta avståndet till planerad rutt, benägenhet att avvika från planerad rutt för hinderundvikning med mera.

En lista av brytpunkter genereras *offline*. En algoritmen uppdaterar sedan aktuell målkoordinat under körning utifrån ett känslighetsavstånd på tre meter. När alla brytpunkter besökts finns valet att läsa in koordinaterna i omvänd ordning, med effekten att Husky åker tillbaka samma rutt som den kom.

UGV:ns position bestäms med fusionering av IMU, hjulodometri och GPS-mätning med ROS-paketet *robot_localization*⁹, vilken ingår i den fysiska UGV:ns kodbas. Husky uppvisar drift i positionsestimatet när endast hjulodometri och IMU används men även GPS:en har en varians på ca 3 m runt byggnaderna vid FOI Linköping. Detta medförde att positionsestimaten hade varierande noggrannhet vilket fick som effekt att hinder som uppmäts läggs till på fel ställe i kartan. Även orienteringsestimatet för Husky driver med tiden. Ett resultat av det är att uppmätta väggar ibland läggs till felvidrna i kartan.

2.2.2.3 Personföljare

Personföljarfunktionen implementerades inte under arbetets gång men funktionen definierades. Genom att följa efter en människa och kartlägga den åkta ruten kan samma rutt återanvändas vid nästa autonoma körning. Det är även bra att ha en personföljarfunktion i situationer där Husky inte tror sig kunna köra själv. Två förslag på arkitekturer togs fram som ansågs vara rimliga som första metod att implementera under 2023.

2.2.2.4 Simuleringsvärld

En Gazebovärld utvecklades för att simulera den miljö som skulle experimenteras med. Denna togs fram i programmet BLENDER med utökningen GIS för inläsningen av höjdkartor och husobjekt. Detta gjorde det möjligt att generera en skalenlig Gazebovärld med hus och andra objekt, i korrekt storlek och där marken stämde överens med verkligheten bortsett från vegetation och små föremål som bilar. För att minska diskrepansen mellan simulerad och riktig värld bör den simulerade världen utökas och detaljeras med objekt och hinder. Detta skulle tillåta mer ingående testning av funktioner för autonom navigering.

2.2.2.5 Resultat från fysiska experiment

Antalet tester som genomförts med Husky UGV under året har varit begränsat. Under de tester som genomfördes framkom att positioneringsnoggrannheten var otillräcklig. Eftersom positionen drev med tiden placerades hinder på fel plats i kartan och felet växte över tiden. Typen av underlag samt körstilen tros påverka noggrannheten hos hjulodometrin. Rotationer på stället tenderade att påverka orienteringsestimatet påtagligt.

Resultatet blev att hinder togs bort felaktigt eller lades till felaktigt, men eftersom hindren alltid inmättes korrekt relativt den fysiska roboten körde den aldrig in i dem. Däremot blev ruttplaneringen felaktig och Huskyn körde ibland inte i områden den faktiskt kunde köra i.

⁷ wiki.ros.org/navfn (besökt 2022-11-21).

⁸ wiki.ros.org/dwa_local_planner (besökt 2022-11-21).

⁹ wiki.ros.org/robot_localization (besökt 2022-11-21).

Fusion av IMU, hjulodometri samt GNSS är inte tillräckligt för att i denna miljö ge en tillräckligt hög noggrannhet i position och orientering.

Med en högupplöst hinderkarta hade Huskyn ibland svårt att genomföra beräkningarna i realtid. Detta resulterade i att fel uppstod i kartan som fanns kvar under en längre tid.

Huskyn uppvisade en god förmåga att planera sin rutt runt hinder, både sådana som fanns i den statiska kartan samt de som uppstod dynamiskt. Algoritmerna för ruttplanering och rutföljning behöver dock justeras och anpassas ytterligare för att nå önskad nivå på funktionalitet. Ibland planerades inte rutten om trots att dynamiska hinder placerades över rutten och vid andra tillfällen fungerade inte rutföljaren som önskat.

2.2.3 Slutsatser

Systemet överlag visade goda egenskaper att navigera, ruttplanera och undvika hinder. Att använda lantmäteriets laserdata som underlag för hinderkartor visade sig vara ett kraftfullt verktyg. Endast en enkel filtrering och omformatering av underlaget gjordes och kartorna kan göras ännu mer detaljrika samt sammanfogas med andra källor av geografisk data.

I nuläget finns tre kritiska begränsningar som bör åtgärdas för att öka tillförlitligheten:

- ett tillförlitligt estimat av UGV:ns position och orientering,
- en reducerad beräkningskomplexitet för karthanteraren,
- finjustering av parametrar för ruttplanerare och rutföljare.

2.2.3.1 Fortsatt arbete

Arbete pågår med att integrera visuell och LiDAR-baserad SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) i form av *Google Cartographer*¹⁰ eller med ett internt utvecklat positioneringssystem (se exempelvis [9]) för att uppnå ett mer tillförlitligt och noggrant positioneringssystem (se avsnitt 2.3).

Då en del av mjukvaran inte är egenutvecklad saknas en del kunskap om detaljfunktioner. Det är fallet för framkomlighetsbedömningen, ruttplaneraren och rutföljaren. För att kunna finjustera dess parametrar behövs mer kunskap om hur de fungerar på detaljnivå. Genom iterativ testning kan funktionernas parametrar förbättras med tiden men det kan vara enklare att försöka förstå matematiken bakom algoritmerna.

Den egenutvecklade koden behöver optimeras. Den önskade funktionaliteten finns integrerad i UGV:n men en del beräkningar kan effektiviseras ytterligare. Exempelvis synkroniseras den statiska kartan med den lokala varje gång den lokala kartan uppdateras. Genom att istället synkronisera dessa med en viss frekvens kan processen effektiviseras. I den implementerade koden skickas hela hinderkartan till ruttplaneraren varje gång vilket är beräkningstungt.

Som tidigare nämnts använder den fysiska Husky ROS-versionen Melodic vilket har flera nackdelar. ROS Noetic rekommenderas användas på kort sikt men en övergång till ROS2 bör även övervägas på något års sikt.

2.3 PNT för UGV

Som nämndes tidigare så förutsätter införandet av autonoma funktioner på Husky UGV att ett noggrannare realtidspositioneringssystem implementeras. Flertalet av dagens autonoma system, framförallt mindre UAV:er, använder sig huvudsakligen av GNSS-baserade positioneringssystem. Nackdelen med dessa är att de kan bli störda eller utsatta för vilseledning [10]. För att uppnå önskad robusthet i telestörda miljöer, samt i urbana miljöer, används på UGV:er ofta en kombination av avbildande sensorer (visuella och

¹⁰ google-cartographer.readthedocs.io/en/latest/ (besökt 2022-11-21).

termiska sensorer och LiDAR), odometri och tröghetssensorer (treaxliga gyron och accelerometrar).

Inom projektet har arbetet inletts för att anpassa kod som FOI har utvecklat i Horizon2020-projekten INTREPID och INGENIOUS till Husky-plattformen [9]. Mjukvaran gör lokal positionering mot landmärken som plana ytor och kanter som identifierats med en LiDAR-sensor. Avsikten är att i framtiden kombinera detta med globala landmärken från kartdata och motsvarande digitala terrängmodeller, både från laser och optiska sensorer. Arbetet utgår från det referensdataset som samlades in i Västervik (se avsnitt 4.1). Arbetet har även påbörjats med att samla in data och analysera positioneringsnoggrannheten hos öppet tillgänglig källkod för multisensorfusion, såsom Google Cartographer [11].

2.4 Autonom utforskning och robust och noggrann positionering för liten UAV

Två typer av autonoma funktioner som bedöms vara centrala för ett framtida effektivt, robust och säkert nyttjande av obemannade farkoster är *autonom utforskning* och *multisensorbaserad positionering*. I den andra tilläggsbeställningen ingick en aktivitet riktad mot att förbättra kunskapen avseende hur små UAV:er skulle kunna användas vid militära operationer i urbana miljöer och i underjordiska komplex.

Projektet har därför omhändertagit och vidareutvecklat resultat från andra projekt, däribland främst EU H2020-projekten INGENIOUS och INTREPID som fokuserat på att utveckla och demonstrera teknikens möjligheter och mognadsgrad för räddningstjänstillämpningar. Konkret så har verksamheten handlat om att förfina algoritmer i en existerande egentillverkad autonom UAV och genomföra försök med denna i en inomhusmiljö. Därigenom har bättre förutsättningar skapats för att genomföra mer utmanande försök anpassade till militära tillämpningar. Målet är att genom demonstrationer visa på möjligheter med framtida tekniker samt erhålla feedback om behovet av, och krav på, den här typen av autonoma funktioner i en militär kontext. De praktiska försöken har hittills genomförts i enklare inomhusmiljöer som erbjudit tillräcklig komplexitet för att testa och utvärdera tekniken och samtidigt utrymmen stora nog att tillåta fel i navigeringen och ”vingelmån” för UAV:n.

2.4.1 Autonom utforskning

Med *autonom utforskning* avses här förmågan hos en självkörande farkost (UAV eller UGV) att självständigt lösa uppgiften att söka igenom ett visst geografiskt område vars geometri på förhand är okänd. För att lyckas med detta måste farkosten självständigt vidta lämpliga åtgärder för att kunna uppnå bästa möjliga datainsamlingsresultat utifrån givna bivillkor, såsom begränsningar i flygtid, specifika krav på insamlade sensordata eller önskat uppträdande hos farkosten. Farkosten måste själv ha förmåga att identifiera lämpliga delmål som leder till lösandet av uppgiften, såsom att bestämma målpunkter i terrängen, hitta lämplig färdväg dit, och sedan genomföra nödvändiga manövrar för att exekvera sin plan, alternativt upptäcka att ett delmål inte är nåbart och planera om därefter.

Flera argument pekar mot att den här typen av autonomifunktion kommer att vara önskvärd – eller rent av nödvändig – i framtida militära obemannade farkoster. För det första gör den att farkoster inte behöver styras manuellt i alla lägen, vilket i sin tur frigör resurser, minskar den kognitiva belastningen hos operatörer och underlättar användningen av fler obemannade farkoster samtidigt. För det andra är det en utmaning för människor att i en komplex miljö styra en flygande farkost på ett säkert sätt och samtidigt ha kontroll över vilka delar av området som redan spanats av och vilka som fortfarande är okända. Ju större område och ju mer komplex geometri, desto större är risken att områden missas eller oavsiktligt avsöks igen. För det tredje ökar den autonoma förmågan robusthet mot

sambandsbortfall. Med alla nödvändiga algoritmer och beräkningsresurser ombord kan farkosten genomföra sitt uppdrag även om kommunikationen med andra enheter störs ut.

2.4.2 Multisensorbaserad positionering och navigering

Multisensorbaserad positionering är en viktig komponent för att realisera autonom förmåga i exempelvis urban miljö. Det är inget självändamål att använda flera sensorer, men varje enskild sensor har fördelar och begränsningar (upplösning, räckvidd, synfält, ljuskänslighet, störningskänslighet, etc) varför en kombination av flera sensorer i praktiken ofta är nödvändigt för att få tillräcklig noggrannhet och robusthet över längre tidsperioder. Detta gäller särskilt för mindre farkoster där små och enkla sensorer, med lägre precision, behöver användas. Detta är t.ex. viktigt i sammanhang där en farkost kan behöva sättas in i olika typer av miljöer, eller i scenarier där enskilda sensorers tillförlitlighet varierar inom ett och samma uppdrag, såsom vid övergång mellan inom- och utomhusmiljö. Den stora utmaningen ligger i att konstruera algoritmer med inbyggd förmåga att skatta olika sensorers aktuella tillförlitlighet och vikta ihop information från dem på ett sätt som gör att positionsnoggrannhet kan upprätthållas under varierande förutsättningar.

3 Taktiska autonoma funktioner

Tre aktiviteter pågår riktade mot utvecklingen av taktiska autonoma delförmågor, bland annat autonom sensoråterkopplad styrning samt uppdragsplanering. En aktivitet fokuserar på att utveckla förmågan att med en UAV autonomt starta och landa på en UGV.

3.1 Uppdragsplanering

Olika koncept för högnivåstyrning och uppdragsplanering av samverkande UAV:er som genomför spaningsuppdrag har under året studerats inom ramen för det egeninitierade anslagsprojektet Zerg.¹¹ Arbetet i Zerg har fokuserat på områdena Human-Autonomy Teaming (HAT), dynamisk uppgiftsallokering samt koncept för kommunikation och styrning. Arbetet beskrivs mer detaljerat i [4].

Den första tilläggsbeställningen till projektet *Obemannade farkoster och autonoma system – teknik och operatör* innehöll en aktivitet riktad mot uppdragsplanering. Den forskning som genomförts utgör ett komplement till det arbete som genomförts inom Zerg. Forskningen fortsätter under 2023.

Koncept för ledning och styrning av grupper av samverkande UAV:er utvecklas och utvärderas inom tilläggsbeställningen. Utvecklingen grundas delvis på de identifierade önskemål och krav som ställs på en autonom drönarsvärmen som identifierats i [12]. Givet önskemål om särskilda funktioner, exempelvis inmatning av vissa parametrar, krav på begränsad kommunikation eller särskilda beteenden, har dessa kopplats till val av kommunikationsarkitektur och styrning. Arbetet med att utveckla en algoritm för uppdragsfördelning inom svärmen har påbörjats. Litteraturstudier angående centraliserad kontra decentraliserad styrning har genomförts och mynnat ut i ett preliminärt koncept för en hierarkisk modell, där svärmen kan delas in i flera delsvärmar med varsin lokal ledare, med en successionsordning vid förluster för att minska sårbarheter för systemet.

En optimeringsalgoritm för uppgiftsfördelning under ett spaningsuppdrag med spaning av ett fixt antal zoner har tagits fram och utvärderats genom simuleringar. Problemet formulerades som ett MILP-problem (Mixed-Integer Linear Programming) med målet att maximera areatäckning givet krav på areatäckning, med minimal uppdragstid. Problemet löses både *offline* och *online* under uppdragets gång för att kunna ta hänsyn till en dynamiskt förändrad lägesbild. Optimala lösningar, där svärmen har förmåga att omfördela sig under uppdragets gång, hittas för de relativt enkla problem som modelleras. Den relativt låga beräkningskomplexiteten gör MILP-modeller lovande även för realtids-algoritmer. Det fortsatta arbetet kommer fokusera på alternativa implementationer, samt påbyggnad med mer komplexa modeller för att kunna modellera ett större omfång av beteenden och scenarier.

Vid ett tidigare examensarbete på FOI studerades beteendeträd för högnivåstyrning av UAV-svärmar [13]. Beteendeträd bedöms vara lämpliga för modellering av högnivå-beteende tack vare dess modulära och begripliga struktur. Fortsatt utveckling av detta koncept pågår.

3.2 Sensoråterkopplad styrning

Arbetet inom sensoråterkopplad styrning är en ny delaktivitet som tillkom i samband med höstens tilläggsbeställning. Tidigare verksamhet som genomförts på FOI inom detta område beskrivs i rapporten [14] som också ger detaljer om den teoretiska bakgrunden (se även [15]). Begreppet sensoråterkopplad styrning kan i grova drag beskrivas som en kombination av statistisk beslutsteori och styr-/reglerteori. I en lite snävare kontext syftar

¹¹ Zerg är ett egeninitierat forskningsprojekt som syftar till att studera algoritmer för styrning och beslutsfattande av enskilda farkoster så att de i samverkan uppnår ett emergent beteende, dvs det som populärt kallas för svärmar.

det på successiv inställning av styrparametrar till ett sensorsystem så att dess mätdata förväntas få optimal kvalitet. Såväl mätdata som styrparametrar kan vara av mycket allmänt slag. Nedan specialiserar vi till följande typ av problem:

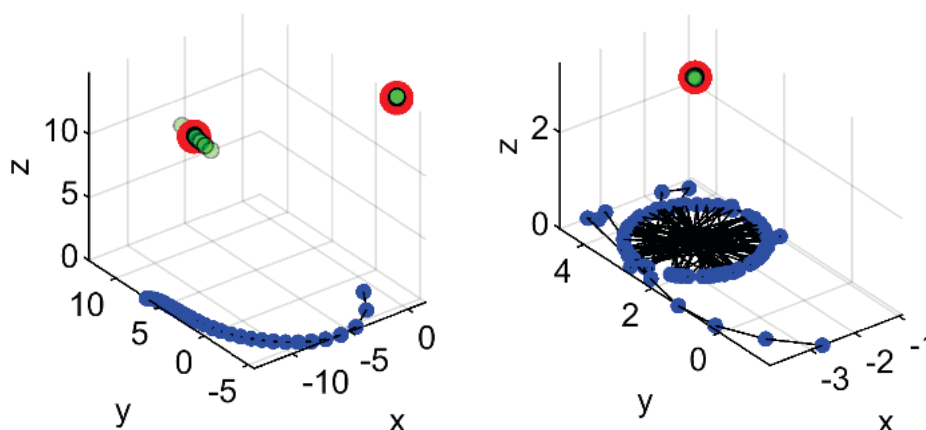
”En observatör skall mäta in koordinaterna för ett antal stationära målpunkter med hjälp av vinkelmätningar (‘bearings-only’). Observatören kan välja sina egna positioner under givna geometriska och kinematiska bivillkor och till viss kostnad. De olika vinkelmätningarna är behäftade med slumpmässiga fel enligt en känd felmodell, enligt vilken felen vid olika mättillfällen är statistiskt oberoende. Hur bör observatören förflytta sig för att få så bra uppskattning som möjligt av målpositionerna?”

3.2.1 Angreppsätt

Observatörens förflyttningar baseras på utfallet av tidigare mätningar. Dessa ger en osäker uppfattning om de sökta parametrarna, dels en skattning och dels ett mått (den s.k. ”Fisherinformationen”) på denna skattnings kvalitet. Nästa observatörsposition väljs utifrån den framtida förväntade informationskvaliteten. För att lösa denna uppgift på ett optimalt sätt väljs framtida observatörspositioner baserat på den förväntade Fisherinformationen. Metoden innebär således att man efter varje mätning uppdaterar sannolikhetsfunktionen (eller åtminstone skattningen och Fisherinformationen), samt utifrån dess storheter skattar den framtida förväntade Fisherinformationen för olika rörelser och väljer den bästa (med hänsyn tagen till bivillkor och kostnader). Båda dessa steg innebär att ett optimeringsproblem behöver lösas.

3.2.2 Exempel

I figur 3.1 illustreras ett utfall från ett simulerat försök där en observatör planerar sin bana i markplanet, med en kostnad proportionell mot steglängdens kvadrat (vilket motsvarar marschhastigheten i kvadrat), för att mäta in positionerna för en målpunkt. Figuren visar hur observatören, i varje iteration, väger den med steglängden förknippade kostnaden mot det förväntade informationsvärdet för att skapa en bana med varierande steglängd. I fallet då det inte finns någon kostnad förknippad med steglängden är det typiska utfallet att observatören väljer att röra sig mellan punkter i en cirkel som är koncentrisk kring målets projektion i planet. Figur 3.1 illustrerar ett sådant utfall. Notera att avsaknaden av en steglängdskostnad gör att observatören förflyttar sig oregelbundet mellan punkterna på cirkeln.



Figur 3.1: Vänster: Ett exempel på ett resultat från en implementering av Sensoråterkopplad styrning med två mål och steglängdskostnad. De röda cirkelarna markerar målets position och de gröna cirkelarna markerar observatörens estimeringar av målet. De blå cirkelarna markerar observatörens bana. Höger: Ett exempel på ett resultat från en implementering av Sensoråterkopplad styrning med ett mål och utan steglängdskostnad. De röda cirkelarna markerar målets position och de gröna cirkelarna markerar observatörens estimeringar av målet. De blå cirkelarna markerar observatörens bana.

3.2.3 Fortsatt arbete

Under 2023 kommer arbetet att fortsätta med att förfinas och generalisera ovan beskrivna metoder. Detta kan innebära modifikationer av de optimeringsproblem som behöver lösas i varje iteration av banplaneringen eller att införa möjligheten att planera flera steg i varje iteration. En annan uppgift är att utveckla och testa angreppssättet på mer komplicerade fall där olika modeller för observatörens dynamik tas i beaktning, andra kostnader och risker införs (exempelvis att geografiska områden förknippade med fara) eller att andra typer av mätningar används.

3.3 Autonom landning av UAV på UGV

En viktig aspekt av autonomi för obemannade farkoster är förmågan att samverka och gemensamt utföra olika uppdrag eller deluppgifter. Detta möjliggör att de unika fördelarna hos respektive farkosttyp kan tas tillvara. Ett exempel är spaning och övervakning där en UAV snabbt kan nå det intressanta spaningsområdet och även ge en överlägsen överblick över området. Små UAV:er har dock en begränsad uthållighet medan en UGV kan spana över ett område under lång tid. Väderförhållandena kan även begränsa användningen av framförallt små UAV:er medan en UGV inte är känslig mot exempelvis kraftig vind. Ett annat exempel av samverkan är om en UAV flyger i förväg och samlar in information om terrängens framkomlighet vilket möjliggör för en efterföljande UGV att öka hastigheten vid autonom körning (exempelvis över krön). För att möjliggöra denna typ av samverkan bör UAV:n använda UGV:n som moderplattform där den kan ladda batterier. Den behöver dessutom autonomt kunna starta från, och landa på, denna UGV.

I ett tidigare examensarbete [16] undersöktes hur en UAV autonomt kan landa på en UGV. Möjliga lösningar presenterades både för estimering av den relativa positionen mellan plattformarna, utan användning av satellitnavigeringsmottagare (GNSS) och för styrning (reglering) av UAV:n för att landa på UGV:n. I simulerade försök uppnåddes goda resultat, men vid verklig flygning var det svårt att uppnå motsvarande stabilitet. Skillnaden tros till stor del orsakas av vind och av högfrekventa vibrationer som påverkade mätningarna av accelerationer och vinkelhastigheter vid de verkliga flygningarna.

Under 2022 har två nya examensarbeten genomförts i syfte att vidareutveckla metoderna för estimering och styrning. Det ena arbetet har fokuserat på estimering, dvs relativ positionering mellan UAV och UGV i telestörda miljöer och i mörker, medan det andra har fokuserat på styrning av UAV. Detaljerna beskrivs i respektive rapport [17, 18]. Examensarbetena bygger på ett koncept där den dynamiska rörelsemodellen linjäriserats för att sedan delas upp i två delar, en vertikal och en horisontell del, som kan lösas parallellt. Teorin bakom detta koncept presenteras i en doktorsavhandling [19]. Under året har även studier påbörjats med målet att applicera moderna icke-linjära metoder för att lösa det icke-linjäriserade problemet.

3.3.1 Modellprediktiv reglering för autonom landning

I det ursprungliga examensarbetet beräknades styrkommandon till UAV:n av en så kallad PID-regulator [16]. I en sådan betraktas avvikelsen mellan det faktiska och det önskade tillståndet hos UAV:n (i tillståndet ingår position, hastighet och orientering). Styrutslagen bestäms utifrån en *proportionell* del (P) som beror direkt på avvikelsen, en *integrerande* del (I) som beror på integralen av avvikelsen, och en *deriverande* del (D) som beror på derivatan av avvikelsen. Genom noggrann justering av parametrarna för de tre delarna är det ofta möjligt att uppnå en bra styrning. Detta arbete är dock tidskrävande och det är ofta svårt att hitta en konfiguration som fungerar bra i många olika fall (olika vindstyrka, olika inflygningshastighet, etc.)

I årets examensarbete undersöktes därför modellprediktiv reglering (Model Predictive Control, MPC) som ett alternativ. I en MPC-regulator används en modell av det reglerade systemet (i detta fall UAV:n) för att prediktera dess beteende givet en sekvens av styrsignaler. Modellen beskriver hur UAV:n förväntas reagera på en styrsignal och den

kan prediktera UAV:ns tillstånd en kort tid framåt. För att generera en styrsignal vid tiden t_0 , används modellen för att beräkna en optimal sekvens av styrsignaler för ett tidsintervall från t_0 till $t_0 + T$, där T är regulatorns prediktionshorisont. Endast den första styrsignalen från sekvensen används. När nästa styrsignal ska genereras görs optimeringen om inom det nya tidsintervallet t_1 till $t_1 + T$.

En fördel med MPC är att systemets beteende lätt kan anpassas genom att modifiera modellen eller optimeringskriterierna. För att till exempel undvika stora styrutslag nära landningsplatsen kan bivillkor eller extra kostnadsfunktioner i optimeringen enkelt läggas till. Även anflygningsbanan kan styras på förhand genom att göra det ”dyrt” att närma sig UGV:n från fel håll. Detta kan vara viktigt eftersom en UGV kan vara utrustad med exempelvis antenner, sensorer eller annan nyttolast som en UAV vid landning annars riskerar att kollidera med.

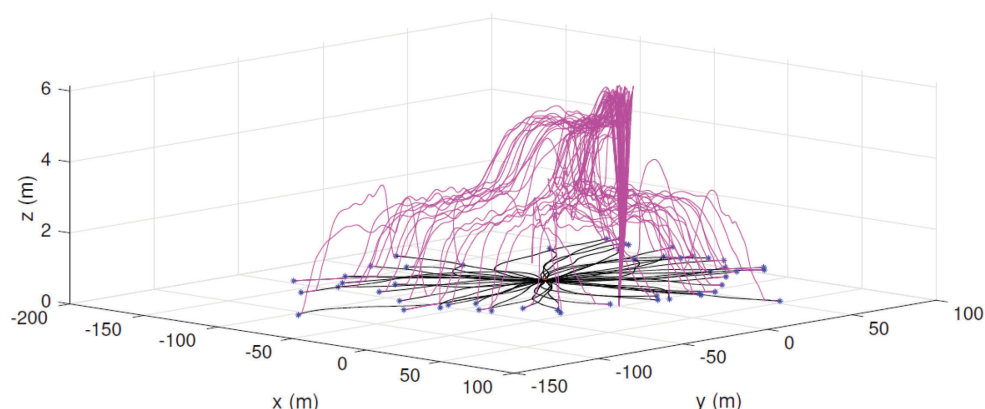
De huvudsakliga nackdelarna med MPC jämfört med en PID-regulator är att MPC kräver en någorlunda noggrann modell. MPC-metoden är även mer beräkningskrävande. Tester har dock visat att det är betydligt mer beräknings effektivt att lösa det linjäriserade och uppdelade MPC-problemet än det kompletta icke-linjära MPC-problemet.

3.3.1.1 Resultat vid simuleringar

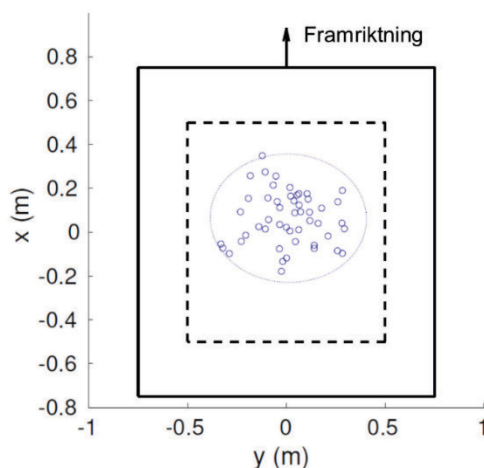
En simulerad värld har använts för utveckling och under delar av utvärderingen. Simuleringsverktyget Gazebo användes tillsammans med en *software in the loop*-simulering av ArduCopter, som är den flygkontrollmjukvara som används i våra fysiska UAV:er. Kombinationen av Gazebo och ArduCopter fungerar bra tillsammans med ROS, som även används ombord på de fysiska UAV:erna. Detta minskar skillnaderna mellan att utvärdera den utvecklade MPC-regulatorn i simulering och i verkliga experiment.

I simuleringen körde UGV:n i konstant hastighet men med slumpmässiga styrutslag, medan UAV:ns uppgift var att flyga till UGV:n och landa på den. Exempel på banor för de båda plattformarna visas i figur 3.2. UAV:n lyckas landa på UGV:n i samtliga fall, men några gånger avbryter den landningen, stiger och gör ett nytt landningsförsök. I dessa fall har den kommit för nära den säkerhetszon som definierats runt delar av UGV:n för att förhindra att UAV:n krockar med landningsplattan och dess sensorer.

I figur 3.3 visas landningspositioner för ett antal simulerade landningar, i förhållande till landningsplattan (heldragen svart linje) och säkert område (streckad svart linje). Det säkra området är definierat så att alla landningsben får plats inom landningsplattan om centrum av UAV:n landar där. Ellipsen visar det område inom vilket 95 % av landningarna sker.



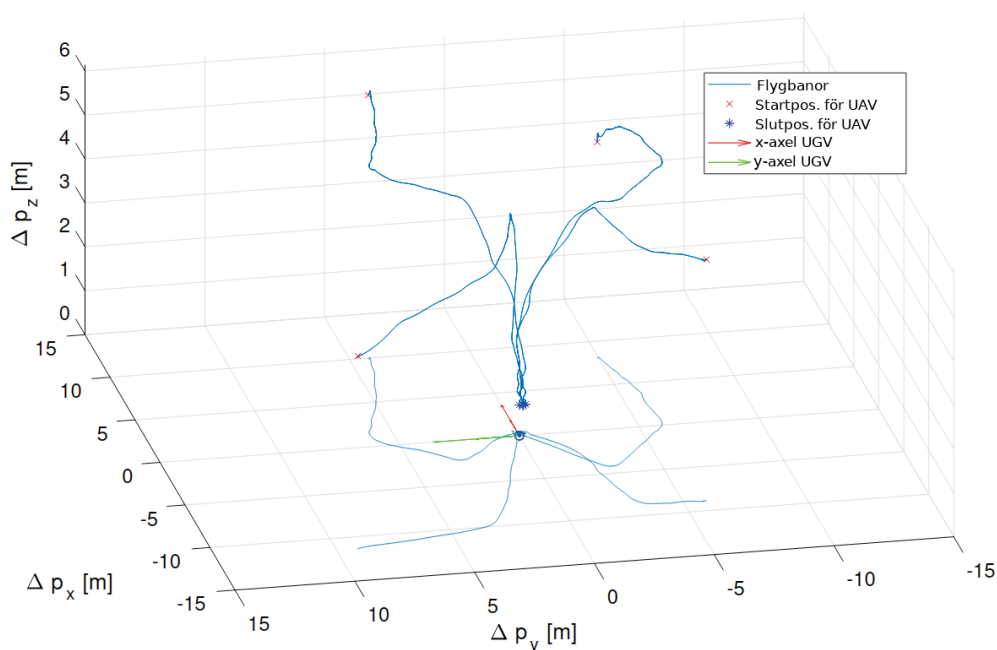
Figur 3.2: UGV:ns banor i svart, UAV:ns banor i lila. UAV:n landar på UGV:n i samtliga fall. Svarta linjer representerar de olika trajektorier som UGV:n körde i simuleringarna. Lila linjer representerar UAV:ns trajektorier.



Figur 3.3: Landningspositioner i förhållande till landningsplatta och säker landningszon (innanför det streckade området). Små blå cirkelar representerar enskilda landningspositioner.

3.3.1.2 Verkliga försök

Ett mindre antal verkliga experiment med MPC-styrning har genomförts för att verifiera att metoden fungerar. Under dessa första försök användes en stillastående UGV. På grund av hårdvaruproblem användes GNSS för positionsbestämning, istället för någon av de estimeringsmetoder som utvecklats under projektet. I figur 3.4 visas flygbanor från fyra olika försök, där UAV:n startar på olika positioner relativt UGV:n. I samtliga fall flyger den först mot UGV:n, för att sedan sjunka mot landningsplattan samtidigt som positionen finjusteras. Av säkerhetsskäl avbröts landningsförsöken ca 0,5 meter över landningsplattan för att undvika att ett fel i positionering eller styrning skulle leda till en kollision med uppstickande delar. Ytterligare försök kommer att genomföras för att utvärdera hur systemet påverkas av bland annat olika vindstyrkor och för att verifiera att den MPC-baserade metoden för styrning fungerar tillsammans med de metoder som utvecklats för att estimerar den relativa positionen mellan UAV och UGV.



Figur 3.4: Flygbanor vid verkliga försök (kurvorna i xy-planet visar flygbanans projektioner på marken). Alla flygningar slutar strax ovanför UGV:n.

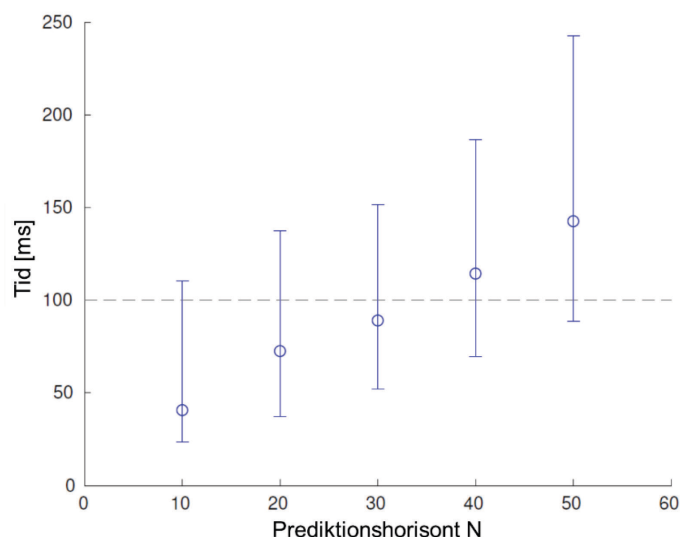
På grund av begränsningar i lyftkraft och plats ombord på UAV:n körs MPC-algoritmen på en liten omborrdator (Nvidia Jetson Nano). Detta innebär att prediktionshorisonten i algoritmen måste vara tillräckligt kort för att optimeringsproblemet ska gå att lösa på kort tid på en enkel dator med relativt begränsad beräkningskapacitet. Eftersom styrkommandon genereras i 10 Hz får lösningen av ett optimeringsproblem ta maximalt 100 ms. Figur 3.5 visar förhållandet mellan prediktionshorisont (uttryckt i antal steg som beräknas) och beräkningstid när algoritmen exekveras på omborrdatorn. I figur 3.6 visas simulerade flygningar med olika prediktionshorisont. De olika exemplen är ganska lika varandra, vilket tyder på att även korta prediktionshorisonter fungerar bra.

3.3.2 Tillståndsestimering i GNSS-störd miljö

För att regleringen ska fungera krävs att de autonoma farkosterna har kännedom om olika tillstånd, bland annat sin position. Ursprungligen estimerades den relativa positionen och hastigheten mellan fordonen med hjälp av mätningar från accelerometrar, barometrar och UWB-sändtagare (Ultra Wide-Band) monterade på båda farkosterna. Dessutom var UAV:n utrustad med en kamera och kapabel att uppfatta UGV:ns position i bilden med hjälp av en visuell markör (en så kallad *AprilTag*¹²). Dessa mätningar vägdes sedan samman genom ett utökat Kalmanfilter, som är en sensorfusionsalgoritm som först linjäriserar problemet och sedan använder en optimal lösning för linjära fall med normalfördelade fel.

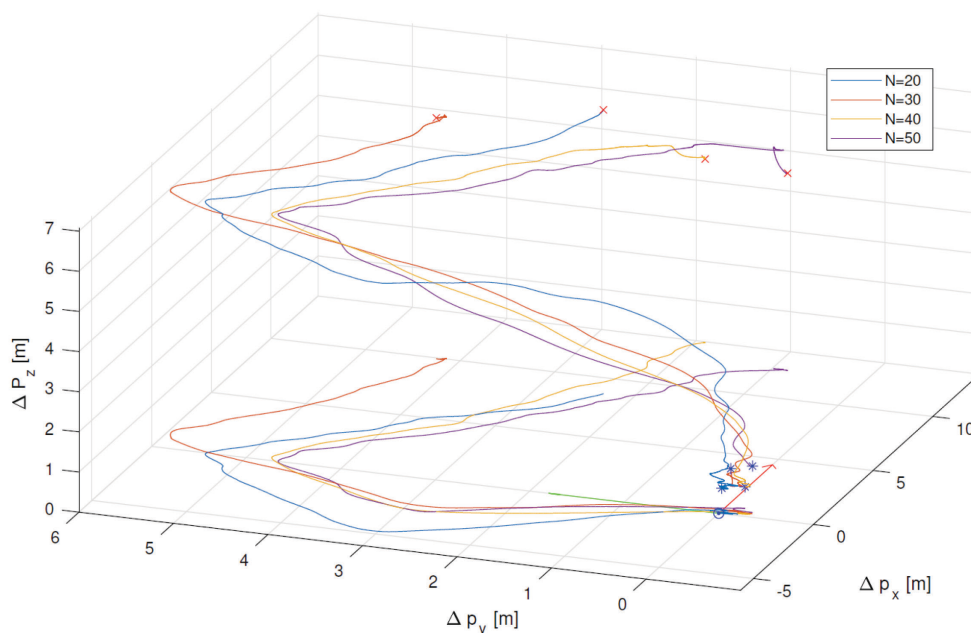
För att förbättra prestandan undersöktes ett par modifikationer av estimeringssystemet. Ett antal NIR-LED:ar (Near-Infrared Light Emitting Diode) placerades på UGV:n som ett komplement eller ersättare till den visuella markören. Fördelar med denna lösning inkluderar att en högre känslighet kan uppnås i mätningarna om dioderna placeras i ett tredimensionellt mönster, samtidigt som en förbättrad synlighet erhålls under dåliga siktförhållanden. Påverkan på prestandan från diodernas placering undersöktes för att identifiera lämpliga konfigurationer.

Förutom dioderna utökades algoritmen med mätningar från UAV:ns gyrosensorer för att, utöver relativ position och hastighet, även uppskatta UAV:ns orientering. Förhoppningen är att förbättra hela filtrets prestanda då hastighet (och därigenom även positionen) är beroende av en precis orienteringsskattning. En annan fördel är Kalmanfiltrets förmåga att

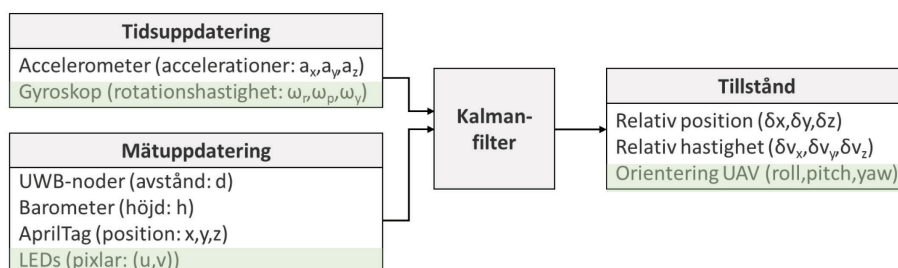


Figur 3.5: Beräkningstid (på omborrdatorn) för olika prediktionshorisonter.

¹² april.eecs.umich.edu/software/apriltag



Figur 3.6: Simulerade flygbanor med olika prediktionshorisonter.



Figur 3.7: Struktur för det modifierade estimeringsfiltret, med de utökade delarna markerade i grönt.

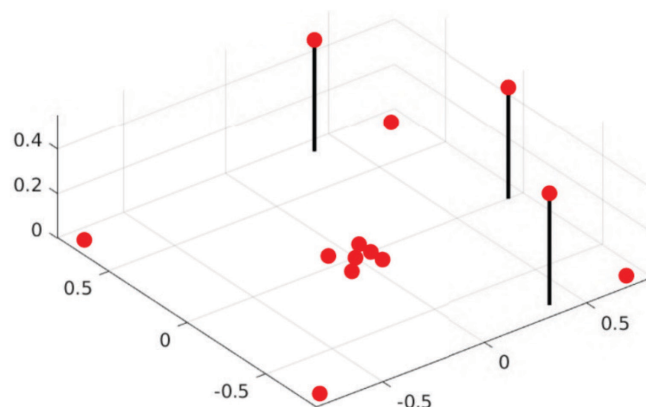
kompensera för brus och fel i mätningar med stöd av resterande sensorer. Mätningar av UGV:ns dioder bidrar också med en absolut orienteringsskattning som kan användas för att begränsa driften i tröghetssensorerna. Det nya filtrets struktur illustreras i figur 3.7.

3.3.2.1 Resultat vid simulering

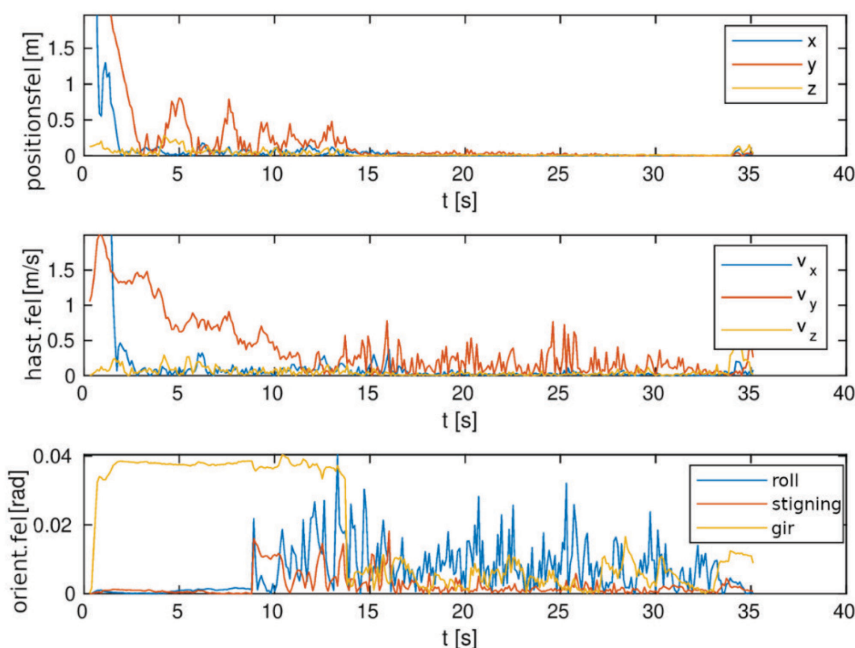
Simuleringarna bestod av två delar där den första undersökte inverkan på estimeringsnoggrannheten från införandet av dioderna och den andra genomfördes på samma sätt som beskrivs ovan för att testa systemet i sin helhet.

Olika diodmönster utvärderades teoretiskt med hjälp av Cramér-Raos sats (CRLB av eng. *Cramér-Rao Lower Bound*), vilket ger en teoretisk undre gräns på variansen av en väntevärdesriktig mätning. Ett antal mönster med NIR-LED:ar utformades och testades [17]. Figur 3.8 visar den konfiguration som implementerades. Den består av två mönster, med olika storlek, med totalt 13 ljusdioder. Det valda mönstret gav en avvägning mellan låga CRLB-värden, synlighet på både längre och kortare avstånd samt utrymme för UAV:n att landa.

Gazebo-simuleringarna för estimeringssystemet syftar främst till att jämföra de nya och gamla estimeringsfiltren. Estimeringsfelet vid en sådan simulering syns i figur 3.9 där landningsplattan blir synlig från UAV:n efter cirka tio sekunder, vilket syns främst från orienteringsskattningens mer ojämna karaktär. Ojämnheten beror på att mätningar av dioderna börjar vägas in i skattningen och det genomsnittliga felet blir då lägre.



Figur 3.8: Vald konfiguration för NIR-LED.



Figur 3.9: Tillståndfel under en simulerad landning.

För att noggrannare jämföra de två estimeringsfiltren gjordes ett större antal simuleringar, 100 stycken, och medelfelet för varje tillstånd beräknades. Resultaten presenteras i tabell 3.1 och de är uppdelade i mätningar som är genomförda på avstånd större respektive mindre än elva meter mellan farkosterna. Uppdelningen är gjord för att skilja på estimat som är genomförda med respektive utan mätningar från kameran. Elva meter är det genomsnittliga avstånd där landningsplattan i simuleringarna först syns i UAV:ns kamera. Resultaten tyder på det nya filtret ger bättre precision i position och hastighet, samt ger ett noggrant estimat av UAV:ns orientering.

3.3.2.2 Verkliga försök

Det kompletta modifierade estimeringsfiltret har ännu inte utvärderades genom fysiska experiment. Experiment har dock genomförts i syfte att experimentellt utvärdera de delar av estimeringsfiltret som nyttjar NIR-LED [17].

Tabell 3.1: genomsnittliga fel för 100 simuleringar med de olika filtren.

Tillstånd	Medelfel med ursprungligt filter		Medelfel med nytt filter	
	Avstånd > 11m	Avstånd < 11m	Avstånd > 11m	Avstånd < 11m
Position (m)	1,1	0,068	0,68	0,013
Hastighet (m/s)	0,38	0,10	0,31	0,080
Orientering (°)	-	-	0,60	0,31

4 Möjliggörande grundtekniker

Robusta positionerings- och kommunikationssystem som kan fungera även i telestörda miljöer utgör kritiska tekniker för alla typer av obemannade farkoster. Under 2022 har fyra aktiviteter genomförts riktat mot olika aspekter av robusta PNT-system och en aktivitet som är kopplad till robust kommunikation.

För fjärrstyrda obemannade farkoster utgör kommunikationsbegränsningarna, samt sårbarheten mot fiendliga telekrigsinsatser, den kanske största sårbarheten som gör det svårt att använda dessa i en konflikt mot en högteknologisk motståndare. En förstudie har genomförts i syfte att undersöka huruvida ett laserbaserat kommunikationssystem kan utgöra ett alternativ för små UAV:er (t.ex. UAV06). Dessa är idag i hög grad fjärrstyrda och de befintliga radiosystemen förutsätter frisiktsförhållanden. Under dessa förhållanden kan fri optisk kommunikation potentiellt utgöra ett störsäkert och svårupptäckt kommunikationssystem som kan leverera mycket höga datatakt. Små spanings-UAV:er flyger typiskt inte under dåliga visuella förhållanden, orsakat av tjock dimma eller kraftig nederbörd (då även räckvidden för fri optisk kommunikation kan vara starkt begränsad).

Begränsningar i kommunikationssystemet kan, till stor del, kompenseras genom att föra in autonoma funktioner kopplade till självkörande förmåga och taktiska autonoma funktioner. En obemannad farkost med sådana autonoma funktioner är dock kritiskt beroende av att den kan estimerar sin position och orientering med hög noggrannhet och tillförlitlighet. Idag är de vanligast förekommande navigeringsmetoderna satellitbaserad navigering (GNSS-mottagare) och tröghetsnavigering. Ofta integreras dessa två navigeringsmetoder med varandra för att få en kombination av egenskaper där det satellitbaserade navigeringssystemet håller nere feltillväxten i tröghetsnavigeringssystemet och tröghetsnavigeringssystemet kan brygga korta bortfall från satellitnavigeringen. Men satellitnavigeringssystem är känsliga för medveten och omedveten störning och ytterligare stöttande tekniker behöver integreras för att erhålla ett robust PNT-system (Position, Navigation, Time).

4.1 Referensdataset och benchmarking

En mätkampanj genomfördes i september i nära samverkan med FFI i Norge. Mätningarna genomfördes på, och i anslutning till, Västerviks flygplats.¹³ Forskningssamarbetet genomförs inom ramen för Robust Navigation Working Group som ingår i Nordic Defence Cooperation (NORDEFCO) och dess delområde Cooperation Area Capability (COPA CAPA). Uppgiften är att skapa ett referensdataset och genomföra utvärderingar av möjligheter och utmaningar med olika positioneringssensorer och algoritmer (benchmarking) avsedda för obemannade farkoster som opererar i telestörda miljöer. Minst två gemensamma mätkampanjer kommer att genomföras för att generera ett gemensamt referensdataset. En viktig del i utvärderingen är att ha noggranna estimat av farkosternas sanna positioner, dvs. oberoende mätningar av högre kvalitet än vad som kommer att nås med de sensorer och algoritmer som ska utvärderas. Målet är att utvärdera olika PNT-teknikers styrkor och svagheter genom prestandajämförelser och skapa ett underlag inför beslut om design av framtida experimentsystem för ett robust PNT-system avsett för obemannade farkoster som opererar i telestörda miljöer.

4.1.1 Sensorer och fordon

Vid mätningarna användes en UGV (Husky) och ett fordon (Toyota Land Cruiser), samt en mindre UAV. Dessa farkoster var utrustade med olika uppsättningar av positionerings-sensorer vars prestanda kommer att utvärderas.

¹³ Västerviks flygplats utgör en del av Drone Center Sweden. www.dronecentersweden.se/ (besökt 2022-11-29).



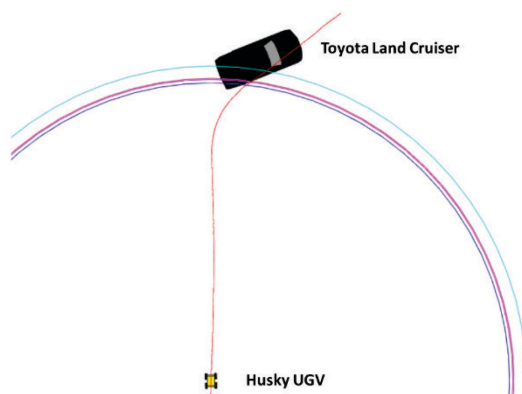
Figur 4.1: Övre/vänster: Husky UGV. Övre/höger: UAV. Nedre: UAV på väg att lyfta för att ta sin position ovanför UGV och Land Cruiser under en mätning. (Fotografier: FOI)

Vid mätningarna i Västervik bidrog FFI med ett positionsreferenssystem bestående av ett avancerat tröghetsnavigeringssystem (HG9900) kombinerat med mätningar från en GNSS-mottagare. Detta positionsreferenssystem placerades på en Husky UGV (figur 4.1).

På Land Cruisern användes en radiomottagare som lagrar mätningarna från multipla GNSS-frekvenser (Spirent GSS6425 Record & Replay) vilket gör att de kan spelas upp i efterhand och analyseras med valfri GNSS-mottagare. Dessa mätningar kompletterades med en KVH 1725 IMU som dock har en sämre prestanda på dess accelerometrar och gyron än i FFI:s referenssystem.

Toyota Land Cruisern var bestyckad med odometri som hämtas direkt från dess interna CAN-buss (Controller Area Network), tre enklare MEMS-baserade (Micro-Electro Mechanical Systems) IMU:er av olika prisklass, ett stereokamerasystem, en LiDAR, en enklare infraröd kamera och en neuromorfisk kamera (som har den enklaste IMU:n integrerad). En neuromorfisk kamera, även kallad eventkamera, efterliknar ögats funktion och genererar stimuli (tidssatta händelser, "events") när en förändring i ljusintensiteten registreras. Den kan därför följa snabbare förlopp och kan hantera större ljusvariationer och mörkare miljöer.

På Husky UGV fanns en LiDAR (med en mycket enkel IMU), ytterligare två relativt enkla IMU:er, en kommersiell GNSS-mottagare samt hjulodometri. På UAV:n fanns en GNSS-mottagare och styrautomatens tröghetssensorer samt en kamera med ett internt utvecklat realtidssystem för detektion av fordon och personer genom rörelsebaserade detektionsmetoder.



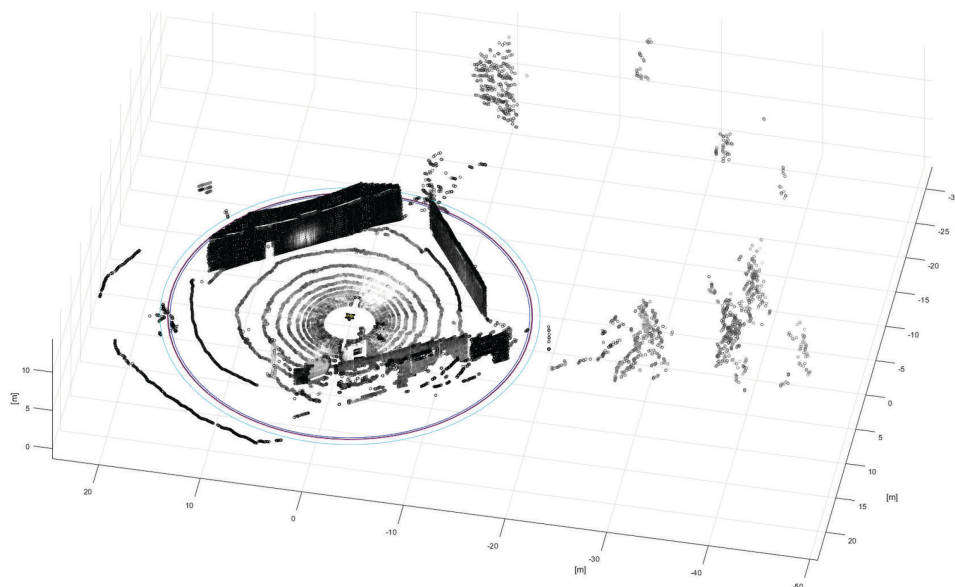
Figur 4.2: En illustration av data planerat för analys av samverkande navigering. De tre cirklarna är mätningar från tre UWB sändare på Land Cruisern mätta från den gula Huskyn på dess färd längs den röda banan. För tillfället står Land Cruisern still och representerar alltså en fast punkt i världen för UGV:n.

UAV:n kan estimerar sin egen position, samt positioner för de detekterade objekten, genom kartstöttad positionering som använder sig av kartmatchningsmetoder.

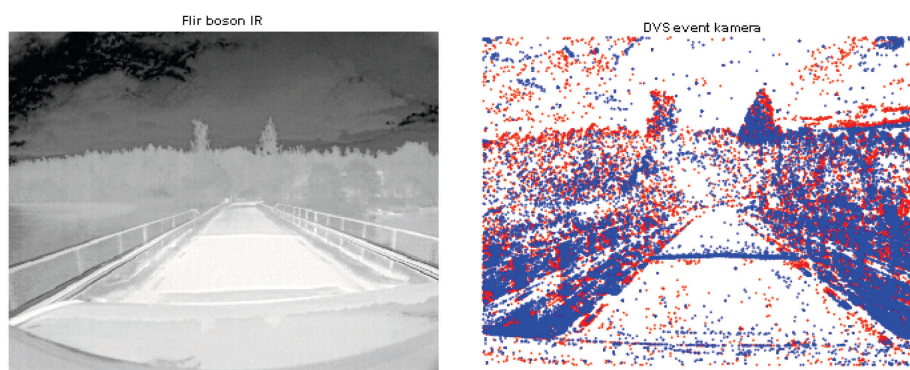
För att möjliggöra utvärderingar av samverkande navigeringsmetoder placerades UWB-sändare på Land Cruisern på takracket och vid dragkroken och en mottagare på Huskyn, se figur 4.2. UWB-sensorerna mäter avstånd genom att mäta tiden för en fråga-svar-sekvens som sänds med en mycket bredbandig radio. Även bilder insamlade från UAV:n kan utvärderas för samverkande navigering som i [20].

4.1.2 Exempel på framtida och pågående analyser

Med de ingående sensorerna kan ett antal olika fall och kombinationer analyseras. Förutom algoritmer för samverkan kommer befintliga positioneringsalgoritmer baserade på LiDAR- och stereomätningar utvärderas. LiDAR-mätningar mäter direkt på terrängens geometri, se figur 4.3. Dessutom planeras utvärdering av nya algoritmer för terrängmatchning med data från passiva sensorer som i figur 4.4.

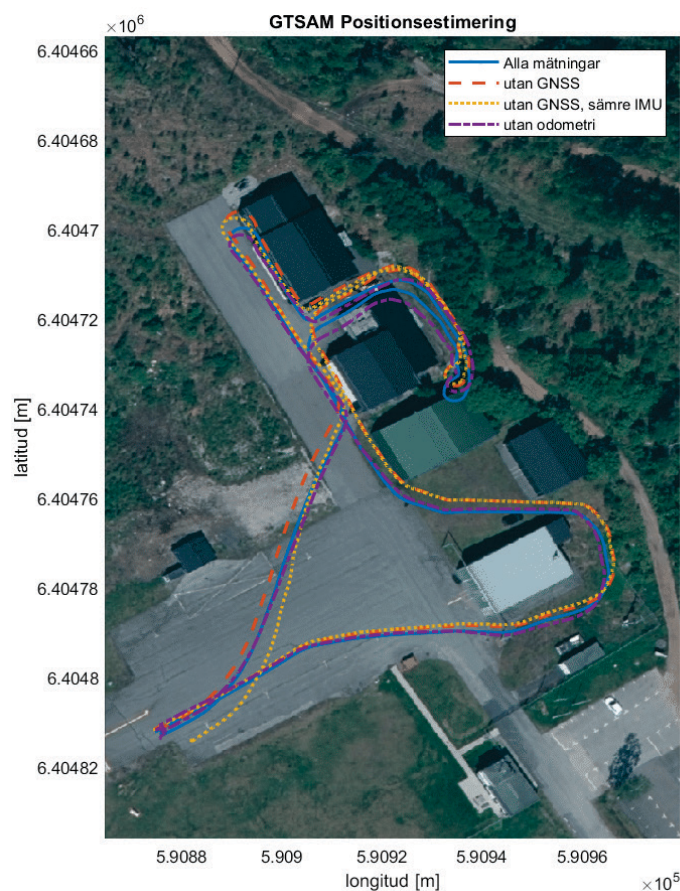


Figur 4.3: Exempel av 3D-mätningar från Huskyns LiDAR som kan matchas mot byggnader i karta. Överlagrat är även avstånden uppmätta med UWB-sensorerna.

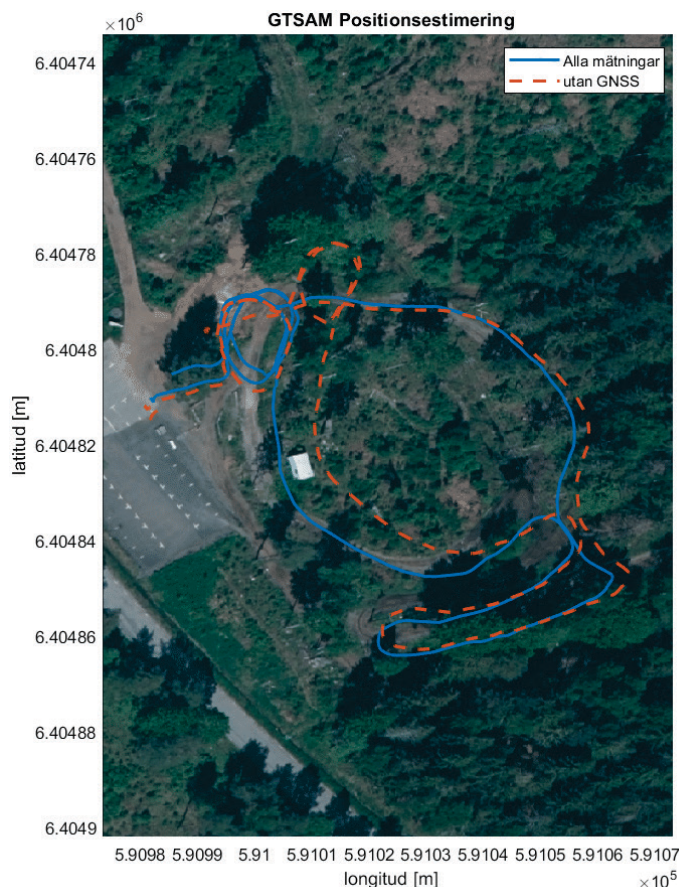


Figur 4.4: Exempel bilder från körning i blandad terräng med IR kamera (vänster) och neuromorfisk (event-)kamera (höger). I eventkameran är det alla event inom 0.03 s som visas med blå prickar för positiva event (ökad ljusstyrka) och rött för negativa event (minskad ljusstyrka). Notera t.ex. det blå på väglinjernas framkant.

Som en första genomgång av mätningarna har utvärdering av stöttning av tröghetssensorer med odometri och GNSS påbörjats. I förlängningen kan denna analys göras för flertalet av kombinationer med tröghetssensorer på fordonen. I figur 4.5 illustreras resultaten från fyra olika kombinationer. Ett estimat baserat på alla sensorer används i dessa initiala exempel som ett estimat av den sanna positionen. Två olika typer av tröghetssensorer (IMU:er) utvärderas samt fusion med GNSS utan stöd från odometrin.



Figur 4.5: Jämförelse av fyra kombinationer av mätningar för ett scenario med Husky UGV. När inte GNSS-mätningarna används sker en drift i skatningen vars storlek beror på kvaliteten på tröghetssensorn. (Bakgrundsbild från Google med enbart grovt inpassade GPS-koordinater ©2022 CNES Airbus, Lantmäteriet/Metria, Maxar Technologies).



Figur 4.6: Jämförelse av två kombinationer av mätningar för ett scenario med Husky UGV då den kör i svårare terräng. När inte GNSS-mätningarna används uppstår i detta exempel en drift i positionsestimatet som är större eftersom odometrin är sämre eftersom robotens hjul slirar mer. (Bakgrundsbild från Google med enbart grovt inpassade GPS-koordinater ©2022 CNES Airbus, Lantmäteriet/Metria, Maxar Technologies)

Sekvensen avslutas med två stillastående positioner med en rotation av 180 grader mellan vilket ger bättre förutsättningar att skatta tröghetssensorernas bias. Metoden som används är en metod för efterbehandling av data som tar hänsyn till hela sekvensen av mätningar. Det innebär att mätningar av stillastående kan påverka estimatet längs hela banan och drastiskt minska driften.

Slutligen illustreras i figur 4.6 hur försämringar i odometrin på grund av slirande hjul (roboten styr som en bandvagn genom att slira på alla fyra hjul vid svängar) i svårare terräng ökar driften då tröghetsnavigeringssystemet stöttas med odometri.

4.2 Kompetensuppbyggnad inom modell-prediktiv kontroll för PNT-tillämpningar

En kompetensuppbyggnad inom området modellprediktiv kontroll (MPC) har påbörjats. Kunskapen har använts vid handledningen av ett examensarbete [18]. Målet är att öka kunskapen inom detta område i ett samarbete med Linköpings Universitet rörande användningen av MPC för att öka noggrannheten vid estimering av en obemannad farkosts position och orientering. Vid universitetet kommer det att bedrivas forskning inom detta område de närmaste två åren på uppdrag från AFOSR (Air Force Office of Scientific Research) som är en del av AFRL (Air Force Research Lab). FOI erhöi i somras extern forskningsfinansiering för att genomföra samarbetet vilket medför att projektet även kan nyttja den kunskap som byggs upp inom det projektet.

4.3 Terrängnavigering

Ett alternativ till satellitbaserade navigeringssystem är att utnyttja omgivande terräng genom att mäta höjden från en flygande plattform till marken och jämföra med en given terrängdatabas. Höjden mäts typiskt med en radarhöjdmätare eller laseravståndsmätare. Under våren 2022 genomfördes ett examensarbete på FOI där fem olika estimeringsalgoritmer implementerades och jämfördes över en enkel flygbana. Terrängnavigering är ett starkt olinjärt problem vilket påverkar valet av sensorfusionsalgoritm. Prestandajämförelserna beskrivs i mer detalj i [21].

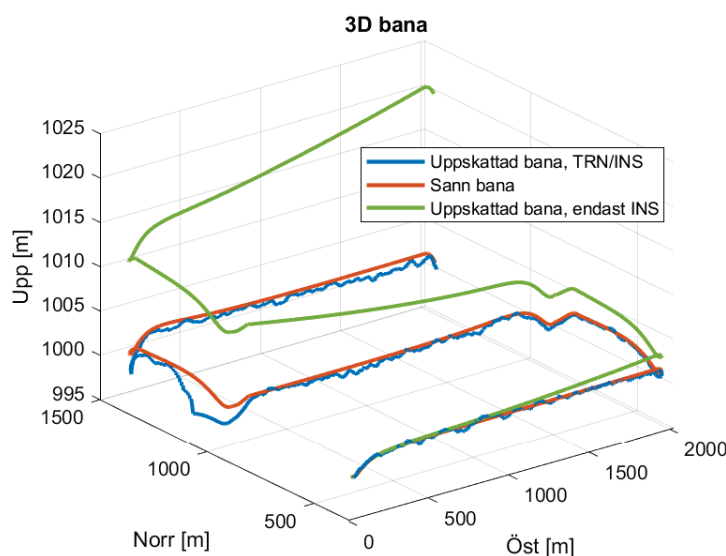
4.3.1 Generaliserad mjukvara för terrängnavigering

Under hösten har arbetet med algoritmerna fortsatt inom ramen för tilläggsbeställningen där den framtagna mjukvarans struktur och dokumentation har förbättrats. Detta görs främst med syftet att förenkla för fler forskare att kunna utnyttja simuleringsmjukvaran som är skriven i Matlab. En av algoritmerna integreras också i FOI:s NavToolbox som möjliggör snabbare exekvering än Matlab och ger ökad möjlighet att integrera utvalda tekniker direkt i experimentsystem. I de tidigare algoritmerna förutsattes även att den höjdmätande sensorn alltid pekade rakt ner. Detta har uppdaterats i mjukvaran så att sensorn istället följer farkostens orientering.

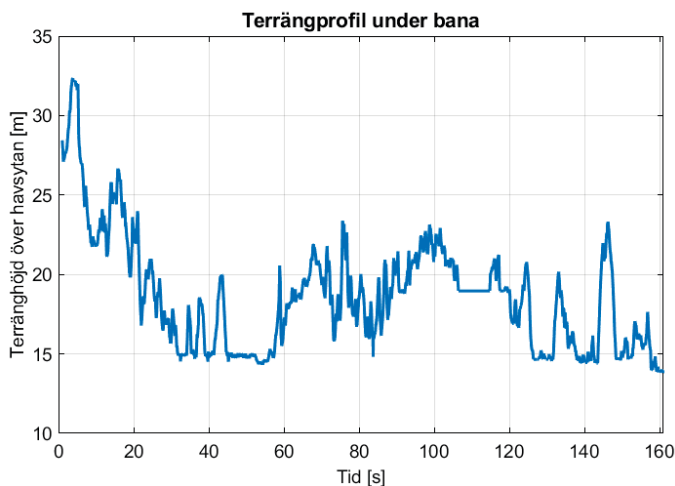
Av de fem filtren som undersöktes i exjobbet bedöms tre stycken vara lämpliga kandidater att vidareutveckla: Partikelfilter, UKF och Rao-Blackwelliserat Partikelfilter. Lösningen med partikelfilter har valts att lyftas över till C++ och integreras i ovan nämnda NavToolbox för att öka både prestanda och användbarhet.

4.3.2 Exempel

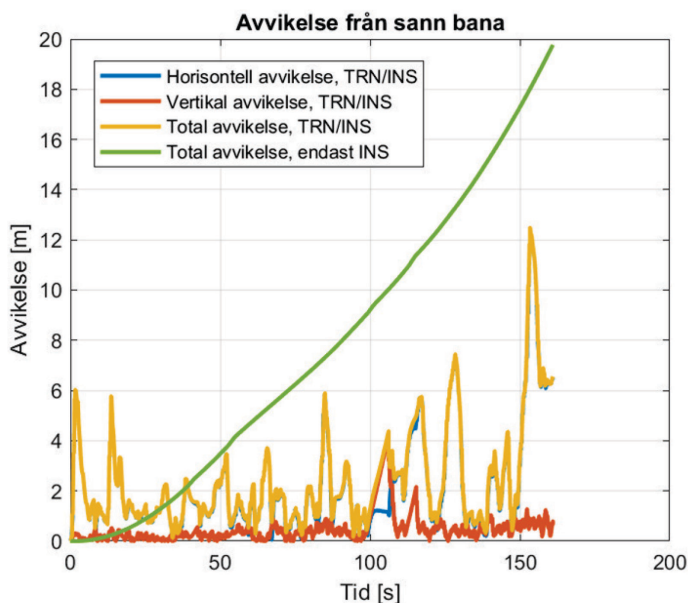
I figur 4.7 visas ett exempel på en simulering där mjukvaran har använts för en långsamt flygande farkost. Farkosten färdas i detta exempel på ca 1 000 m höjd och bankar kraftigt i svängarna. Detta innebär att den höjdmätande sensorn ger oanvändbara mätningar i svängarna. I figuren visas den sanna positionen i rött, beräknad position med enbart tröghetsnavigering i grönt och den terrängstöttade positionen i blått. Driften från tröghetsnavigeringssystemet syns tydligt även under denna förhållandevis korta flygtid (ca 3 minuter) och genom att stötta tröghetsnavigeringssystemet med terrängnavigering förbättras positionsnoggrannheten avsevärt.



Figur 4.7: I figuren visas resultat från en simulering av en långsamt flygande plattform där sann bana ges i rött, skattad bana från ren tröghetsnavigering (här benämnd INS) i grönt och terrängstöttad tröghetsnavigering (Terrain-Referenced Navigation, TRN) i blått.



Figur 4.8: Höjdprofil för exempelbana som funktion av tiden.

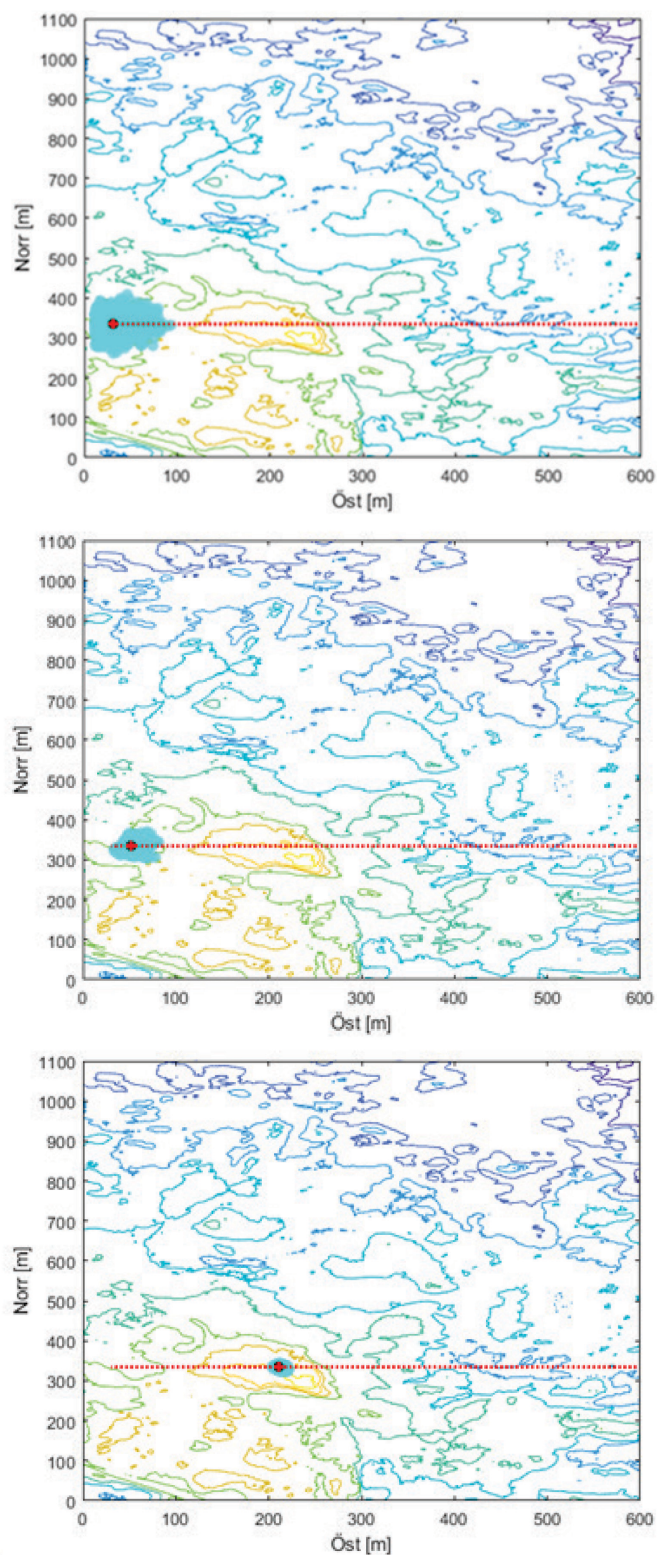


Figur 4.9: Positionsfel för ren tröghetsnavigering (grön) och terrängstöttad navigering (gul). Horisontell (blå) och vertikal (röd) komponent av positionsfelet visas också för den terrängstöttade navigeringen.

Tröghetsnavigeringssystemet, som nyttjar mätningar från accelerometrar och gyron, uppdateras med 1 kHz. Prestanda för det simulerade tröghetsnavigeringssystemet motsvarar ungefär en tröghetssensor av liknande kvalitet som KVH 1775.^{14,15} Höjdmätningarna modelleras som sant avstånd mellan farkosten och marken, mätt längst nedåtriktningen (z-axeln) i farkostens referenssystem, med ett additivt vitt brus på 0,3 m (3 sigma) och uppdateras med 10 Hz. I figur 4.8 visas markens höjdprofil som funktion av tiden. I figur 4.9 visas positionsfelet för ren tröghetsnavigering som grön heldragen linje och som gul heldragen linje för det terrängstöttade navigeringssystemet. Horisontella och vertikala komponenter av avvikelsen för terrängstöttade positionering visas också separat. Initial orientering, hastighet och position har antagits vara kända och bidrar därför inte till feltillväxten för tröghetsnavigeringen.

¹⁴ www.canalgeomatrics.com/wp-content/uploads/2019/11/kvh-1775-imu-datasheet.pdf (besökt 2022-11-04).

¹⁵ Felen i acceleration och vinkelhastighet modelleras med en konstant bias och ett additivt vitt brus. Bias för gyron och accelerometrar slumpas fram med en standardavvikelse på 0,5 grader per timme (3 sigma) respektive 0,5 mg (3 sigma). Det additiva vita bruset är 0,012 deg/sqrt(hr) (ARW, Angular Random Walk) och 0,12 mg/sqrt(Hz) (Velocity Random Walk, VRW). Några felkällor hos tröghetssensorerna har dock ignorerats (t.ex. skalfaktorfel, temperaturberoende bias och bias instabilitet) vilket gör att simulerad prestanda för tröghetsnavigeringen är avsevärt bättre än vad som kan förväntas i verkligheten.



Figur 4.10: De tre figurerna visar utveckling av partiklar (turkos) från partikelfiltret vid tre olika tidpunkter och den sanna positionen i rött. Bana (röd streckad) och partiklar är utritade i en konturplott som representerar olika höjdnivåer i kartdatabasen.

I figur 4.10 visas utvecklingen av partikelfiltret vid tre tidpunkter i början av simuleringen. Figuren högst upp visar initiala partikelmolnet, vilket sprids ut för att täcka eventuella fel i initiala positionen. Partikelmolnet krymper sedan successivt när fler och fler mätningar görs, vilket indikerar ett säkrare estimat.

4.3.3 Fortsatt arbete

De implementerade algoritmerna bör i ett nästa steg utvärderas på riktigt data antingen från flygförsök mot terrängdatabaser eller från ytfartyg mot batymetridata.

I dagsläget sker ingen återkoppling till tröghetsnavigeringen och på så sätt kan inte sensorfel kompenseras bort, vilket leder till drift i första hand i orienteringsestimatet. I det fortsatta arbetet bör tröghetsnavigeringssystemet stöttas med andra typer av mätningar (t.ex. hastighetstötning eller magnetometrar) alternativt kan partikelfiltret utökas med fler tillstånd vilket ger möjlighet att skatta sensorfelen. Med ett ökat antal tillstånd i partikelfiltret är det även intressant att undersöka hur beräkningarna för partikelfiltret kan parallelliseras eftersom beräkningskomplexiteten för ett utökat filter bedöms öka kraftigt.

4.4 Laserkommunikation med UAV

En studie har initierats rörande möjligheterna att använda en laserbaserad kommunikationslänk (fri optisk kommunikation) på korta avstånd till en UAV (typ UAV06). Den stora utmaningen är att lösa inriktningen av laserstrålarna, där denna initiala studie ser över möjligheten att upprätthålla dessa med pekhuvuden som normalt används för att rikta och stabilisera kameror från mindre UAV:er.

4.4.1 Bakgrund

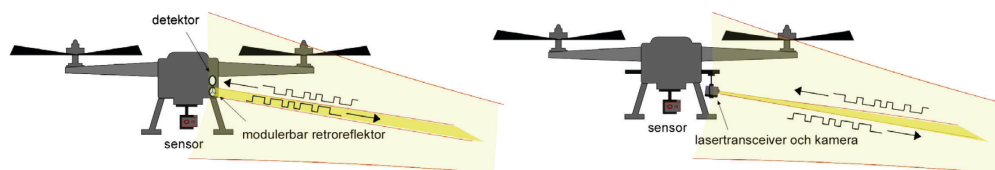
Laserkommunikation är en alternativ sambandsmetod i militära scenarion [22]. För taktiska tillämpningar motiveras tekniken framförallt av att en hög datatakt är möjlig. Det är också generellt sett svårt att störa, avlyssna eller upptäcka den här typen av länkar. Radiospektrum är dessutom en trång resurs och uppgiften att säkerställa att radiofrekvenserna finns tillgängliga då ett större antal UAV:er opererar inom samma geografiska område kan komma att utgöra en betydande utmaning.

En optisk tvåvägslänk består av två så kallade lasersändtagare (sändare och mottagare) som är inriktade mot varandra. Det finns idag flera produkter för detta som kan användas för fast montering och de kan ge höga datatakt under frisiktsförhållanden på avstånd upp till 5 km (mellan stationära noder).

Typiskt har laserloben en divergensvinkel (halvvärdesvinkel) på upp till cirka $0,1^\circ$ (2 mrad) vilket medför att en noggrann inriktning krävs. Inriktningen mellan fasta stationer kan göras manuellt tack vare bland annat hög laseruteffekt och genom att använda flera samverkande lasrar. Inriktningskravet utgör det huvudsakliga problemet om optisk kommunikation skall användas till och från mobila plattformar. De nuvarande systemens formfaktor och vikt kan också utgöra ett problem då tekniken idag ofta förutsätter relativt avancerade pekhuvuden. Linser på upp till 10 cm i diameter (ibland krävs även flera) kan behöva användas beroende på den prestanda som skall uppnås.

Det finns ännu inga operativa optiska kommunikationslänkar avsedda för mobila system, med undantag för satelliter [23], där de i viss mån redan ingår i nätverksinfrastrukturen, samt för marina plattformar där de finns (åtminstone på prototypstadiet) [24]. För mindre flygande farkoster handlar det alltså om utveckling av tekniken med ökat fokus på att med pekhuvud noggrant kunna hålla laserstrålarnas inriktning.

En speciell nisch där även FOI varit delaktig i utveckling av teknik benämns retrokommunikation [25,26]. För att eliminera, eller åtminstone radikalt minska kravet på inriktning i den ena sidan av den optiska kommunikationslänken, ersätts lasersändtagaren med en modulerbar retroreflektor och en detektor med ett stort synfält. Retrokommunikation passar speciellt bra för frisiktskommunikation mellan en markstation och en liten UAV, då endast markkontrollstationen behöver peka mot UAV:n med sin laser. Räckvidden vid retrokommunikation begränsas dock av ett kraftigt avståndsberoende framför allt för nedlänken från UAV:n. Det finns ännu inte heller färdiga produkter (retromodulatorer) som kan ge datatakt på flera hundra Megabit per sekund (Mbps). Dessa två koncept illustreras i figur 4.11.



Figur 4.11: Vänster: UAV försedd med en modulerbar retroreflektor som hanterar kommunikationslänken från UAV:n. Fininriktning krävs inte eftersom den reflekterade strålningen från en hörnkub-reflektor riktar rakt tillbaka mot den sändande lasern. Höger: Lasersändtagare som är ensad med en kamera tar emot och sänder tillbaka i riktning mot den inkommande laserstrålen. Inriktningen upprätthålls med ett pekhuvud som automatiskt regleras utifrån t.ex. kamerabilden.

4.4.2 Exempel

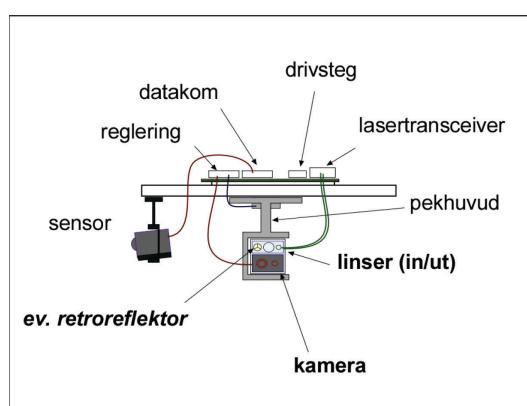
Mot ovanstående bakgrund, och delvis för att kunna jämföra med ett retrokommunikationssystem, så har en laserlänk studerats som riktar in och upprätthålls med den typ av pekhuvuden som användes till kameror i kommersiella mindre UAV:er. Räckvidden har beräknats utifrån en avvägning mellan lasereffekt och strålens divergens.

En utgångspunkt var vilken lastkapacitet och vilken peknoggrannhet som kan erhållas. Pekhuvuden som säljs för under 5 000 kronor anger en lastkapacitet på runt 400 gram och en tämligen imponerande vinkelstabilitet på under $\pm 0,02^\circ$ ($\pm 0,35$ mrad) i vindfria förhållanden.^{16,17} Utifrån det antogs att en laserlob med en divergensvinkel i spannet 1-5 mrad är rimlig att använda. Figur 4.12 illustrerar schematiskt en installation på en UAV. Pekhuvudets lastkapacitet begränsar storleken på linserna. För sändningen krävs endast ett par millimeters aperturdiameter, medan för mottagningen bedöms en apertur på 10 mm vara rimligt. Via enkla linser kopplas strålningen in respektive ut till fibrer som leder till en lasersändtagare monterad på UAV:n.

På motsvarande sätt finns i exemplet en markstation som även den kräver inriktning och ett följesystem för att låsa på UAV:n. I exemplet har samma laseruteffekt och divergensvinkel använts i båda stationerna men en dubbelt så stor mottagarapertur i markstationen.

4.4.3 Datalänk

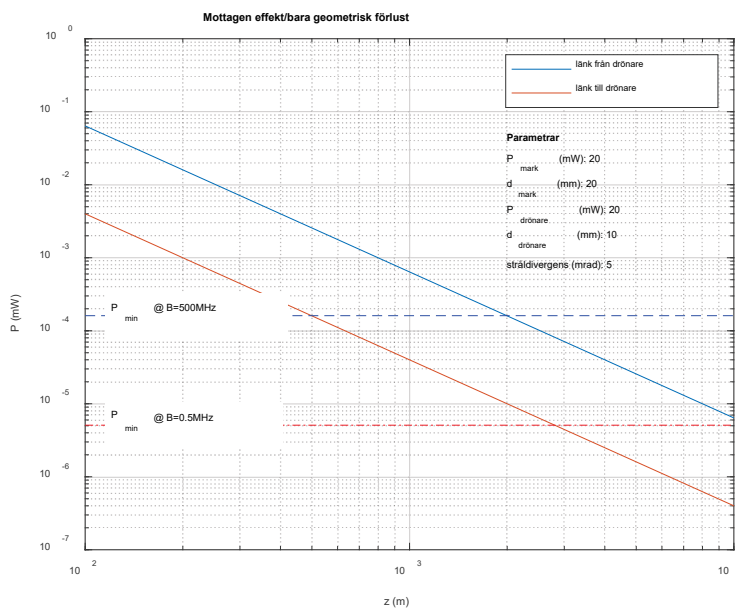
Ur diagrammet i figur 4.13 går det att utläsa vilken marginal som återstår för den mottagna effekten som funktion av avstånd i förhållande till ett minimikrav beroende på bandbredd.



Figur 4.12: Schematisk illustration av komponenter i en möjlig installation på UAV för laserkommunikation till markkontrollstationen. Sensorn, typiskt en kamera, strömmar via en processor för datakom och ett drivsteg data till utgående kanal på lasersändtagaren. Inriktningen av pekhuvudet styrs från kameran ensad med linser för laserlänken. En retroreflektor används eventuellt för att spegla tillbaka utsänd strålning från markstationen och markera position.

¹⁶ m.dji.com/se/product/dji-x-port (besökt 2022-11-20).

¹⁷ gremsy.com/pixy-u-spec alternativt (besökt 2022-11-20).



Figur 4.13: Mottagen optisk effekt som funktion av avstånd för ett idealt fall med endast geometrisk utbredningsförlust. Den mottagna effekten jämförs med minimumkravet för en signalbandbredd på 500 MHz (vilket medger en binär dataakt på 1 Gbps) för länken från drönaren samt 0,5 MHz för länken till UAV:n. Beräkningsexemplet är gjort med val av laseruteffekter, aperturdiametrar och stråldivergens som bedöms rimliga för denna tillämpning och enkelt realiserbara.

Minimikravet är baserat på en bitfelshalt (*Bit Error Rate*, BER) på max 10^{-9} . Diagrammet återspeglar en idealiserad bild där inga förluster förutom den geometriska utbredningsförlusten tagits med. Den angivna lasereffekten avser den andel som effektivt strålar ut och bär information. I praktiken behöver hänsyn också tas till optiska förluster i mottagarna och atmosfären.

På de relativt korta avstånd som är aktuella för små UAV:er såsom UAV06, dvs enstaka kilometer, är en rimlig marginal för dämpning i mottagarna och på grund av dåligt väder (bortsett från dimma) en faktor tre. Ytterligare en faktor tre är en rimlig första ansats för att hantera scintillationer på grund av turbulens som dock naturligtvis också kommer att bero på väderförhållanden. Inverkan av turbulens ökar med avstånd men minskar med höjd över marken och beror kraftigt av tid på dygnet. I de flesta scenarion bör inverkan från turbulens vara marginell upp till ett par hundra meters avstånd och i många fall hanterbar med en marginal på en faktor tre upp till cirka en kilometer.

I beaktande av tillkommande förlustfaktorer enligt ovan ansätts en marginal på en faktor 10 för den mottagna effekten. Ur diagrammet för exemplet kan då utläsas en räckvidd för 1 Gbps-länken från en UAV på cirka 600 m och för 1 Mbps-länken från marken till UAV på nära en kilometer. Det beräknade resultatet är med en laserlob på 5 mrad vilket ligger i det övre spannet för vad som antas vara hanterbart med pekhuvuden för en liten UAV. En relativt låg laseruteffekt på 20 mW har ansatts vilket nästan motsvarar standardmässiga komponenter som existerar idag. Räckvidden ökar med laseruteffekten och en uteffekt på 200 mW (vilket inte bedöms vara orimligt att nå i närtid) skulle ge en räckvidd på ett par kilometer. Det är möjligt att sändarlasrar med väsentligt högre uteffekter kan integreras på UAV:n och detta bör utredas.

Räckvidden minskar med ökad bandbredd och de dataakter som valdes för länkarna bedöms i dagsläget vara högre än vad som krävs för att skicka styrkommandon och sända högupplöst sensordata från UAV:n. En längre räckvidd kan erhållas genom att reducera kravet på dataakt. En längre räckvidd kan även erhållas genom att minska divergensvinkeln. De fem milliradianer som ansatts här ger dock en viss marginal för linjeringsfel som kan förväntas uppstå i dynamiska situationer.

4.4.4 Inriktningsteknik

Etablering och upprätthållande av laserinriktningen från båda ändarna är centralt för funktionen och krävs för att länken skall fungera. Det finns flera tänkbara alternativ för hur pekfunktionen skall fungera, där bivillkoret även är att det ska fungera i telestörda miljöer, och sannolikt kommer mycket stöd att finnas i den teknik som redan används för stabilisering på pek huvuden för mindre UAV:er. För en helt automatisk funktion behöver först pek huvudet på UAV:n få vinkelangivelser för inriktningen. Ett alternativ är att dessa är baserade på UAV:ernas uppfattning om sin egen och mottagarens position. Sen ligger det ligger nära till hands att använda en ensad kamera för att mäta den relativa riktningen mot den andra sidan av länken. För att förstärka kontrasten mot bakgrunden kan det krävas en helt separat strålkälla (fyr) monterad vid den andra sidan av länken. Om källan strålar med en relativt bred divergenslob i riktning mot UAV:n kommer den initiala etableringen av länken att underlättas. Om källan strålar i ett avgränsat spektralt intervall anpassat till ett filter på kameran kan kontrasten förbättras och funktionen blir mindre känslig för bakgrunden. Efter att en riktning fastställts från UAV:n kan den troligen upprätthållas under en tid via pek huvudets stabiliseringsfunktion.

Pek huvudet i andra änden kan fungera på nästan samma sätt och eventuellt få den förstärkta kontrasten via en retroreflektor på UAV:n. För att följa UAV:n när den rör sig behöver positionsåterkopplingen till pek huvudet ske i motsvarande takt.

4.4.5 Slutsatser

En räckvidd på uppåt en kilometer bedöms vara rimligt att åstadkomma vid laserkommunikation som ger datatakt på upp till en Gbps från en UAV där den senaste tekniken för kommersiellt tillgängliga pek huvuden används för att styra laserinriktningen. Prestanda kan komma att förbättras i snabb takt om exempelvis den kommersiella marknaden börjar utveckla de ingående delteknikerna. Räckvidder på flera kilometer bedöms kunna nås på några års sikt, under gynnsamma väderförhållanden. Optiska atmosfärs effekter utgör dock ett problem som tilltar med avståndet och det blir begränsande för den här relativt sett enkla lösningen. Snabba intensitetsvariationer orsakade av turbulens kan i viss utsträckning hanteras genom felrättande kodning.

I jämförelse med en optisk länk baserad på modulerbara retroreflektorer har den här lösningen nackdelen av att kräva ett separat pek huvud på UAV:n. Fördelen är dock att längre avstånd är möjliga. Inledande försök bör genomföras för att ge ett underlag för att bedöma förutsättningarna för den här typen av laserlänk.

5 Experimentsystem

Moderna experimentplattformar i form av UGV:er och UAV:er anskaffas för att öka relevansen i den forskning som bedrivs inom områden som säkerhetskritiska autonoma funktioner (farkostautonomi), taktiska autonoma funktioner (uppdragsautonomi), samverkan mellan människa och obemannade system, användargränssnittsutveckling, svärmlgoritmer och robusta PNT-system.

5.1 UGV

Nedan ges en översiktlig beskrivning av den UGV av modellen Husky från Clearpath Robotics som används i projektet.

Husky är ca 100 cm lång, 67 cm bred och 40 cm hög. I dess nuvarande utförande har den en totalvikt på 59 kg med en maximal nyttolast på 75 kg och den kan färdas i en hastighet upp till en meter per sekund. Detta gör att den potentiellt skulle kunna genomföra olika uppdrag såsom en framskjuten spaningsplattform vid strid i bebyggelse (se figur 5.1), plattform för mindetektion och för inspektion av trånga utrymmen.

I dess nuvarande konfiguration används UGV:n som forskningsplattform för att utveckla autonomi och självkörande funktioner, såsom ruttplanering, automatiskt undvikande av hinder och positionering. Då UGV:n har samma styrsystem som större och mer kapabla UGV:er gör dess storlek och utformning att den lämpar sig väl som prototypfarkost vid utveckling av nya funktioner som sedan kan föras över till och utvärderas på andra större farkoster. Därutöver används UGV:n även för utvärdering av användargränssnitt för fjärrstyrda och autonoma obemannade farkoster. I framtiden kommer Husky UGV även att användas för metodförsök för att utvärdera potentiell operationell nytta med små UGV:er i urbana miljöer.

I UGV:n finns två datorer för styrning och bearbetning av data. Den första datorn installerades av tillverkaren och den används primärt till att styra framdrivning av UGV:n samt andra kritiska system. Den andra datorn är en Jetson AGX Xavier. Den används till att samla in och logga data samt genomföra databearbetning. Datorn är också ansvarig för tidssynkronisering med det övriga nätverket. Genom specialiserad hårdvara går det även att köra beräkningstunga AI-algoritmer för t.ex. automatisk detektion av objekt, miljöer och personer eller hinderundvikande algoritmer i realtid.



Figur 5.1: Husky UGV som framskjuten spaningsplattform under övningsmoment i Strid i bebyggelse (Foto: FOI).



Figur 5.2: Husky UGV med monterade sensorer: (1) GNSS-antenn, (2) stereomikrofon, (3) OS1-32 LiDAR, (4) trådlös nödstoppsknapp, (5) visuell 360°-kamera, (6) fäste för laptop, (7) visuell kamera, (8) joystick för fjärrstyrning (Foto: FOI).

I syfte att mäta in omgivningen och sina rörelser är UGV:n utrustad med ett flertal olika sensorer (se figur 5.2):

- OS1-32: LiDAR-sensor med 32 linjer, 360°-synfält och en maximal avståndsmätning på 200 meter. Sensorn har även en enkel inbyggd IMU med treaxliga accelerometrar och gyron.
- FLIR Blackfly S: En visuell kamera som kan användas för fjärrstyrning, objekt-detektion och identifikation av hinder.
- INSTA360 One R: En visuell 360°-kamera med möjlighet att spela in direkt på ett minneskort eller via anslutning till en extern dator. Den kan även användas vid fjärrstyrning då den ger möjlighet till en god omvärldsuppfattning.
- SAMSON go Connect: En stereomikrofon som är planerad att användas för röststyrning av UGV:n, akustisk spaning och för ljudåterkoppling till förare vid fjärrstyrning.
- Microstrain 3DMGX5-AHRS: En IMU med treaxlig accelerometer, gyro samt magnetometer.
- Xsens Mti-670: En IMU med treaxlig accelerometer, gyro, barometer, magnetometer samt sensorfusionsmjukvara för integration med en extern GNSS-mottagare.
- Ublox GNSS-mottagare: En GNSS-mottagare ansluten till Xavier-datorn via USB-kabel.
- Sensoror STIM320: En IMU med högre prestanda än övriga IMU:er.

Utöver de externa sensorerna tillhandahåller UGV:n även den interna hjulodometrin vilket ofta är nödvändigt för att kunna erhålla en god dödräkningsnoggrannhet.

UGV:n är även utrustad med en trådlös nödstoppsknapp. Denna funktion gör det möjligt att på ett säkert sätt bedriva experiment med autonoma funktioner i en dynamisk miljö bland rörliga hinder och människor. Vid manuell styrning används en trådlös joystick.

För överföring av sensordata mellan olika applikationer och datorer används ROS (Robot Operating System)¹⁸, vilket gör det möjligt att bygga en modulär sensorkedja med standardiserade meddelanden. Då god tidssynkroniseringen krävs för att erhålla en tillräcklig beräkningsnoggrannhet används PTP (Precision Time Protocol) för att synkronisera datorerna i nätverket samt LiDAR-sensorn.

Fjärrstyrning sker idag genom ett WLAN-baserat radiosystem. Detta bör bytas ut mot ett radiosystem som är mer robust mot störningar och klarar längre avstånd mellan sändare och mottagare än dagens lösning. En begränsande faktor vid val av radiosystem är dock den relativt stora bandbredden som behövs för att överföra videodata i realtid från UGV:n till operatören.

Ytterligare en Husky kommer att anskaffas för att bland annat möjliggöra prov och försök med samverkande UGV:er. Ambitionen är även att under 2023 anskaffa en större UGV, exempelvis Warthog från Clearpath Robotics. Den kan utföra delvis andra uppdrag då den kan bära upp till 270 kg nyttolast samtidigt som den kan förflytta sig i upp till 18 km/h.¹⁹

5.2 UAV

Ett arbete har inletts med att införskaffa en hårdvaruplattform för experiment med samverkande (svärm) UAV:er. För dessa applikationer är beräkningsprestandan ombord viktig och valet av beräkningsdator är ett centralt beslut. Det relativt nystartade företaget MODAL AI är ett dotterbolag till Qualcomm. MODAL AI har fokuserat på att använda produktutbudet som Qualcomm tillhandahåller och integrera denna teknik. Produktserien VOXL är företagets huvudsakliga produkt och det är en kombinerad flight controller och kraftfull beräkningsprocessor.²⁰ VOXL 2 har signifikant bättre prestanda vad gäller beräknings- och minnesresurser samt använder en desktopversion av Linux istället för den nerskalade version som används i VOXL.²¹

Produkten existerar i två versioner, VOXL 2 och dess föregångare VOXL. VOXL2 ingår i det amerikanska försvarsdepartementets program rörande utveckling av inhemska komponenter avsedda för små UAV:er (sUAS) som benämns Blue UAS Framework program. Programmet leds av DIU (Defense Innovation Unit).²² VOXL 2 saluförs dels separat som utvecklingskort men även som en del i ett utvecklingskit bestående av en komplett kvadrokopter UAV. Den produkten kallas Sentinel, se figur 5.3.²³

I grundutförandet har följande sensorer monterats:

- Nedåtriktad kamera (s.k. *global shutter*) med VGA-upplösning
- Framåtriktad 4k 30 FPS kamera
- Framåtriktad stereokamera VGA-upplösning
- Bakåtriktad stereokamera VGA-upplösning
- Holybro GPS/magnetometer.

Eftersom både beräkningsenheten och sensorerna är monterade direkt i chassit fås ett modulärt system som kan fästas på olika typer av farkoster och det blir inte beroende av en viss ram eller drivlina. Den totala kostnaden för en komplett farkost med vald flygradio, batteri, transportlåda samt strömadapter är ca 60 000 SEK.

¹⁸ www.ros.org (besökt 2022-11-20).

¹⁹ clearpathrobotics.com/warthog-unmanned-ground-vehicle-robot/ (besökt 2022-11-28).

²⁰ www.modalai.com/pages/voxl (besökt 2022-11-20).

²¹ VOXL2 har 8 GB internminne av typen LPDDR5 och använder sig av processorn QRB5165 som är framtagen för robotikapplikationer. Den har en inbyggd neural processing unit (NPU) med en kapacitet på 15 Tera FLOPS (dvs 10¹² flyttalsoperationer per sekund).

²² www.modalai.com/pages/blue-uas-framework (besökt 2022-11-20).

²³ Motorerna är av modellen Sunnysky 2216-880kv och electronic speed controller (ESC) ModalAI VOXL 4in1 ESC V2. Ramen som UAV:erna är byggda på är av modellen Holybro S500 V2 som har ett diagonalavstånd på 480 mm mellan motorfästena. På ramen har ett 3D-printat chassi monterats som skyddar beräkningsdatorn och kylfläkten.



Figur 5.3: Två Sentinel UAV som är baserade på ModalAI VOXL2 (Foto: FOI).

Två Sentinel UAV:er har initialt köpts in för att utvärdera om den är en lämplig experimentplattform för den fortsatta forskningen. Därefter är ambitionen att, om Sentinel bedöms kunna uppfylla forskningens behov, anskaffa ytterligare två till fyra exemplar. Inledande försök kommer att genomföras för att utvärdera flyg- och sensorprestanda. Data från de inledande försöken kommer att nyttjas för algoritmutveckling där beräkningsprestandan kommer att evalueras. Dessutom är experiment för utvärdering av metoder för feldetektering, feldiagnostik och felhantering planerade.

5.3 Quadruped A1

En Quadruped A1²⁴ har även anskaffats. A1 är en fyrbent robot som kan ses som ett något mindre, enklare och avsevärt billigare alternativ till Boston Dynamics Spot²⁵ eller Ghost Robotics Vision 60 Q-UGV²⁶ (Quadrupedal UGV). Spot och A1 visas i figur 5.4. A1 har en sämre framkomlighet än de två (något större) alternativen men den kan användas för initiala utvärderingar, där scenariot anpassas utifrån dess begränsningar, av den potentiella operativa nyttan med fyrbenta markrobotar.

Quadruped A1 tillverkas av det kinesiska företaget Unitree Robotics²⁷ men den anskaffades från ett litet tyskt företag Quadruped Robotics som har ersatt delar av mjukvaran med egenutvecklad sådan. A1 har ROS installerad. A1 kan bära 5 kg nyttolast och förflytta sig i upp till 3,3 m/s. Dess inbyggda batteri räcker till mellan en och två timmars användning. A1 är 62 cm lång, 40 cm hög och 30 cm bred och den väger 12,7 kg.

Quadruped A1 är primärt avsedd för forskning och utveckling inom autonomi. Den är utrustad med en Intel RealSense djupmätande (stereoskopisk-) kamera vilket ger den möjlighet att upptäcka och väja för hinder. Enkel hinderundvikande funktion, personföljning samt gestbaserad styrning är implementerad i A1 vid leverans.

²⁴ www.trossenrobotics.com/a1-quadruped (besökt 2022-11-22).

²⁵ www.bostondynamics.com/products/spot (besökt 2022-11-22).

²⁶ www.ghostrobotics.io/vision-60 (besökt 2022-11-22).

²⁷ www.m.unitree.com/products/a1/ (besökt 2022-11-22).



Figur 5.4: Vänster: Boston Dynamic Spot med robotarm och LiDAR, vid demonstration som genomfördes i Gränsö inom ramen för WASP WARA (Foto: FOI). Mitten/Höger: Quadruped A1 vid experimentering på Markstridsskolan i Spång (Foto: FOI).

Den här typen av robot kan vara av intresse vid urbana operationer, där den i situationer då en UAV inte kan användas (t.ex. inomhus eller vid kraftig vind) kan användas för att ge en bild av situationen på andra sidan av en byggnad eller inomhus (figur 5.5). Den kan även utrustas med en radio som kan reläa trafik, alternativt enkla signalspanings- eller stör-system. Det finns även exempel där de utrustas med beväpning och en demonstration har även genomförts i Kina där en beväpnad robohund släpps ned på ett hustak från en logistik-UAV.^{28,29}

5.4 Uppgradering av experimentell förmåga

I den andra tilläggsbeställningen ingick anskaffning av mjukvaror i syfte att uppgradera FOI:s generella experimentella förmåga. Uppgraderingen består av två delar, dels en uppgradering av förmågorna i GNSS-simulator (Spirent GSS9000), dels uppgraderingar av mjukvara till signalgenerator (Rohde&Schwarz SMCV100B).

5.4.1 Utökad förmåga i GNSS-simulator

GNSS-simulatore Spirent GSS9000 uppgraderas i syfte att möjliggöra effektivare utvärderingar av vilseledningsattacker, samt genom att anskaffa tillägg som medger simulering av den kinesiska signalen Beidou B1C.



Figur 5.5: En soldat lyfter en fyrbent markrobot förbi ett hinder (Foto: FOI).

²⁸ www.newscientist.com/article/2293908-us-military-may-get-a-dog-like-robot-armed-with-a-sniper-rifle/ (besökt 2022-11-22).

²⁹ www.futurism.com/the-byte/china-drone-robodog-huge-gun (besökt 2022-11-22).

5.4.1.1 Effektivare utvärderingar av vilseledningsattacker

Förmågan att generera vilseledningssignaler finns implementerad i befintlig simulator. Med hjälp av den mjukvaruoption som nu anskaffas kan ytterligare 16 GNSS-signaler genereras samtidigt. Simuleringsmöjligheterna var tidigare begränsade på så sätt att antalet GNSS-signaler behövde reduceras då vilseledningssignaler samtidigt genererades. Genom att öka antalet simultana signaler som kan genereras erhålls en avsevärd förstärkning av förmågan att utvärdera vilseledningsattacker.

5.4.1.2 Tillägg för att kunna generera BeiDou B1C

Sedan tidigare finns förmågan att generera GPS L1/L2/L5, Galileo E1/E5 och GLONASS G1. Genom anskaffningen av optionen att även generera BeiDou B1C kan simulatoren användas för att testa multikonstellationsmottagare som använder alla de öppna GNSS-signaler som är synliga på våra breddgrader.

5.4.2 Uppgradering av förmåga i signalgenerator

Genom att uppgradera befintlig signalgenerator erhålls en utökad förmåga att generera exempelvis egna störsignaler mot radiosystem och mot GNSS-signaler. Genom att utveckla effektivare störsignaler i exempelvis Matlab så kan dessa implementeras och spelas upp med en signalgenerator för att utvärdera påverkan på radiosystem och GNSS-mottagare.

Följande uppgraderingar har genomförts för signalgenerator Rohde&Schwarz SMCV100B:

- Utökad minnesdjup, som finns tillgängligt för att generera egna radiosignaler, från befintliga 64 Msampel till 1 Gsampel.
- Ökad bandbredd vid generering av egna radiosignaler, från 60 MHz till 120 MHz
- Möjlighet att generera flera simultana bärvågssignaler.
- Möjlighet att förbättra signalegenskaper vid egen signalgenerering.

6 Samverkan mellan operatör och obemannade system

Arbetspaketet *Samverkan mellan operatör och obemannade system* har under året bedrivit verksamhet huvudsakligen i två parallella riktningar: (i) fältförsök syftande till att utreda möjligheter och begränsningar med lätta obemannade markgående fordon (UGV:er) för militära operationer i urban terräng (MOUT), samt (ii) fortsatt arbete med gränssnittsutveckling för UGV:er.

Detta kapitel beskriver inledningsvis de genomförda fältförsöken och gränssnittsstudierna, varefter resultaten från en genomförd omvärldsbevakning sammanfattas. Därefter sammanfattas resultaten och slutsatserna från de två huvudaktiviteterna och arbetspaketets omvärldsbevakning. Slutligen beskrivs de studier som planeras att genomföras under 2023.

6.1 Fältförsök med UGV:er i militära operationer i urban terräng

Examensarbetet utforskade behov, krav och begränsningar kopplat till UGV:er, utifrån de uppgifter och förutsättningar som finns vid 31. Jägarbataljonen. Detta förband bistod med försökstrupp vid de genomförda fältförsöken. Specifikt studerades MOUT inom grupp och plutons ram. För examensarbetet utformades en övergripande frågeställning, vilken sedan bröts ned i fyra delfrågeställningar [27]:

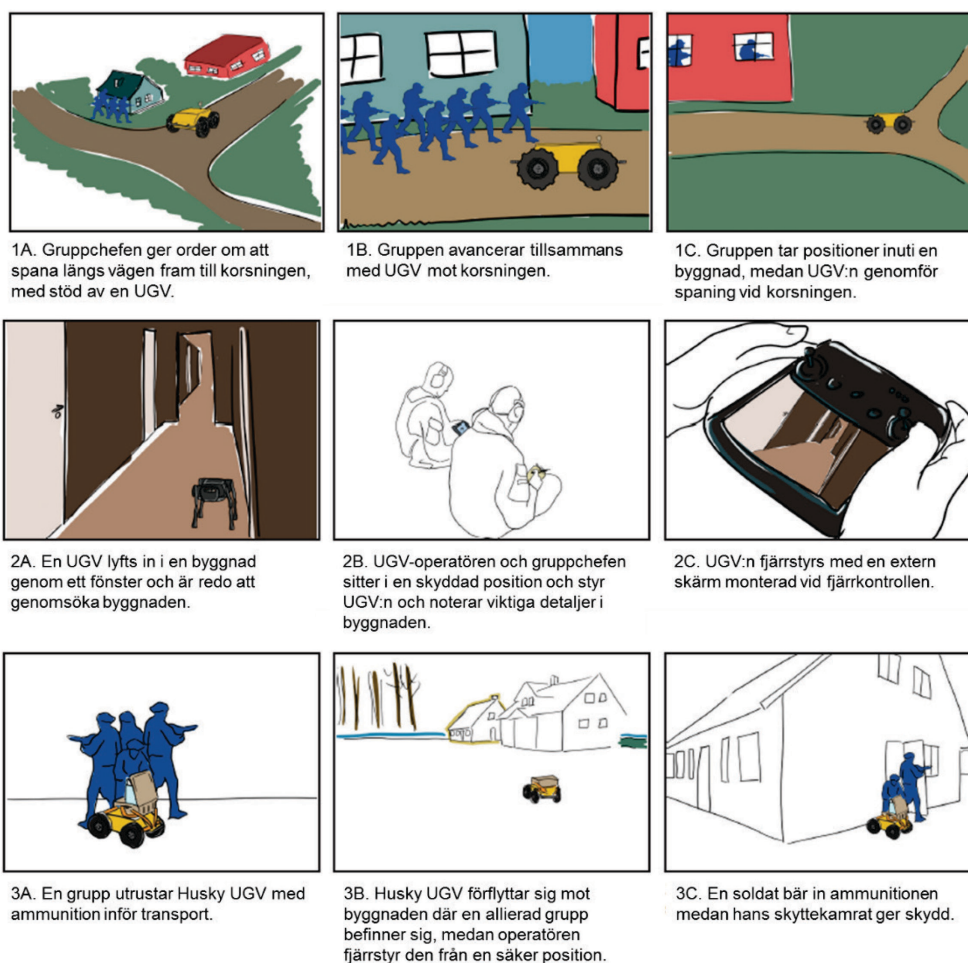
”Vilka funktioner hos en UGV vid militära operationer i urban terräng, så att UGV:n är användbar och inte en begränsning, efterfrågar ett jägarförband?”

1. Vilken framryckningshastighet anser ett jägarförband att en UGV måste kunna nå?
2. Vilka hårdvarufunktioner, kopplat till användningsområden, anser ett jägarförband att en UGV ska ha?
3. Vilka typer av bildgenererande sensorer anser ett jägarförband att en UGV ska ha?
4. Vilka autonoma funktioner anser ett jägarförband att en UGV ska ha?

Examensarbetet var en explorativ fallstudie, där data samlades in genom observationer och ljudinspelade, semistrukturerade diskussioner med fokusgrupper. Databearbetningen genomfördes sedan genom en tematisk analys där olika behov och krav kategoriserades inom gemensamma teman, vilka sedan redovisades som resultatet av studien.

Vid genomförandet av fallstudien nyttjades både UGV Husky och den fyrbenta markroboten Quadruped A1. Totalt deltog 20 soldater och två yrkesofficerare ur bataljonen. Fallstudien innefattade tre scenarier: 1) i bebyggelse, spana med en UGV längs gata, 2) genomsöka en byggnad med en UGV, samt 3) använda en UGV för att transportera ammunition och ersätta en skyttegrupp i stridsställning. De tre scenariona illustreras i figur 6.1.

Vid utformningen av scenariona utgick författaren från Handbok Markstrid Grupp [28] samt en arbetsutgåva för Handbok MOUT [29], vilket kombinerades med författarens militära bakgrund som reservofficer och plutonchef vid 31. jägarbataljonen. De tre scenariona syftade till att demonstrera teknikens potential och hur den kan användas, för att skapa ett gemensamt diskussionsunderlag för fokusgrupperna att utgå ifrån. Respektive scenario genomfördes med olika deltagare och varje scenario genomfördes flera gånger med olika förutsättningar. Förutsättningarna styrde dels vilka funktioner UGV:n hade implementerade och dels vilka möjligheter gruppchefen hade för att använda UGV:n. Exempelvis reglerades UGV:ns autonominivå genom att låta FOI-personal ”spela autonomin”, givet olika förutsättningar såsom att UGV:n hade stöd för röststyrning eller stöd för att motta kommandon genom en tablet. Datainsamlingen vid scenariona bestod av videoinspelning samt noteringar med papper och penna.



Figur 6.1: Storyboard som illustrerar de tre olika scenarierna.

Efter att samtliga delscenarion var genomförda hölls en modererad gruppdiskussion med syftet att ge deltagarna möjlighet att vidareutveckla åsikter och tankar, där moderatorn även styrde diskussionen så att gruppen höll sig inom den övergripande frågeställningens rammar.

Frågeställningarna besvaras i form av tolv systemkrav, som beskrivs närmare i [27], vilka bidrar till att ge FOI en inriktning avseende funktioner som kan implementeras på nuvarande och framtida utvecklingsplattformar. I [27] diskuteras även funktioner som fokusgrupperna anser kan undvikas/förkastas. Vidare har arbetet resulterat i tre konkreta och detaljerade scenarier, vilka kan återanvändas i framtida fältförsök som ämnar till att studera en realistisk tillämpning av UGV:er hos stridande markförband. I framtiden planeras uppföljande studier där implementering av funktioner kan utvärderas genom de tre scenarierna.

6.2 Studier av användargränssnitt

Ett konferensbidrag presenterades på European Conference on Cognitive Ergonomics (ECCE) [30]. Arbetet som låg till grund för bidraget baseras i huvudsak på forskning som genomfördes i projektet under pandemin [31-33]. Konferensbidraget handlade framför allt om att undersöka användargränssnitt för kontroll av UGV:er.

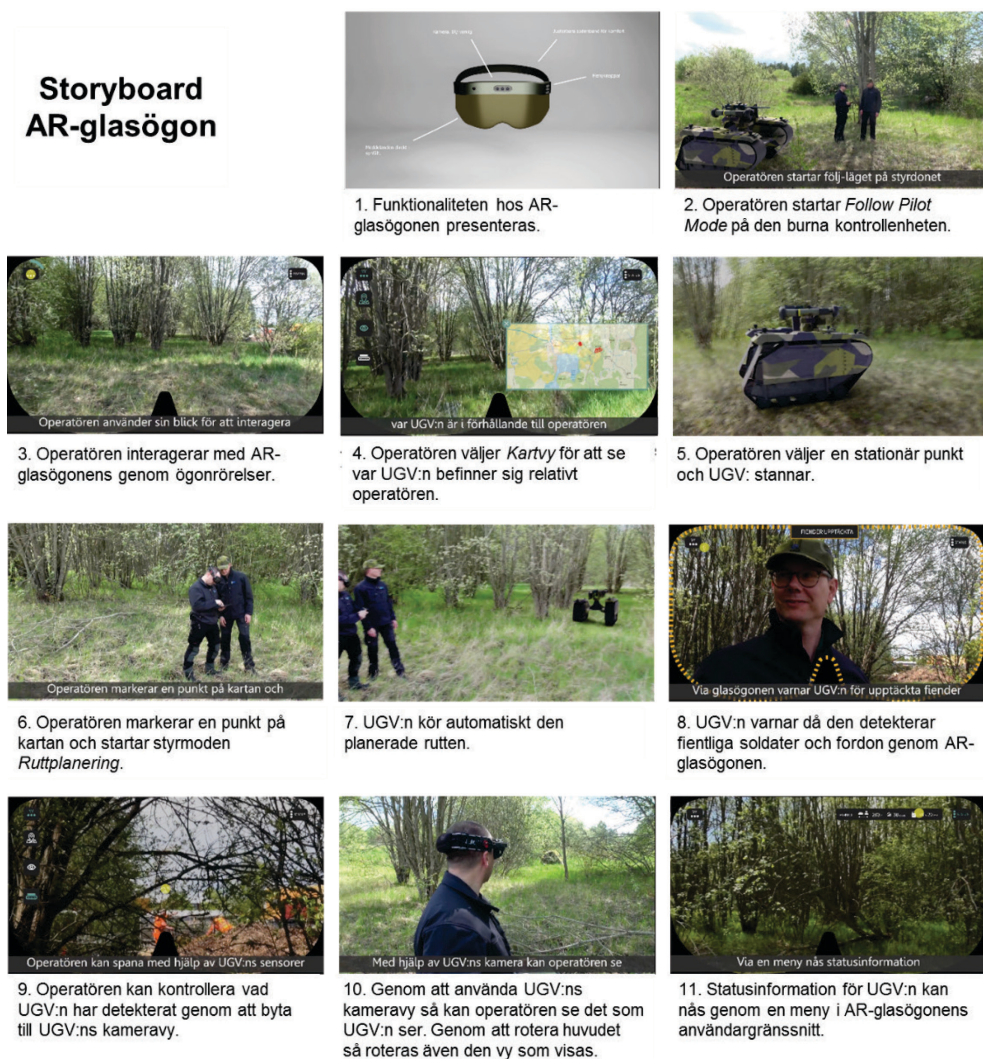
Den globala pandemin COVID-19 ledde till att förutsättningarna för att genomföra fysiska användarstudier ändrades och en ny metodik togs därmed fram för att kunna möta de begränsningar som pandemin medförde. Den nya metodik som tagits fram inom ramen för projektet anses vara användbar även efter pandemin och bedöms bidra till den metodiska verktygslåda som den tillämpade människocentrerade datorforskningssamfundet kan använda för att undersöka framtida användning av obemannade system. För att vetenskapligt värdera den nya metodiken utformades konferensbidraget, som utforskar potentiell användning

av, och interaktion med, UGV:er för infanterisoldater med hjälp av nya metoder för användarstudier på distans.

Metodiken som presenteras i konferensbidraget kombinerar verkliga scenariovideor med överliggande virtuella prototyper, med en efterföljande interaktion med en gränssnittsprototyp och med användning av frågeformulär, fokusgrupper och intervjuer i olika stadier av utvärderingen. De överliggande virtuella prototyperna visar dels det tekniska systemet (UGV:n), dels dess gränssnitt (i form av handhållen kontroll, smart klocka alternativt AR-glasögon). Ett exempel på dessa videor kan ses i figur 6.2.

Metodiken ger förutsättningarna för att kunna bedriva användarstudier på distans. Det är därmed möjligt att bedriva användarstudier med användargrupper som är spridda över ett stort geografiskt område. Även materialen och underlagen som skapats till användarstudierna på distans kan återanvändas. Att materialet både är återanvändbart och går att bedriva på distans ökar studiens möjligheter till distribution och genomförande.

En jämförande studie av denna metodik tillsammans med andra metoder såsom in-situ användarstudier rekommenderas i framtida forskning. Det rekommenderas även att kombinationen mellan asynkrona och synkrona metoder utvärderas vid genomförandet av användarstudier på distans.



Figur 6.2: En storyboard av en av scenariovideorna med överliggande virtuella prototyper som demonstrerar användningen av gränssnittsprototypen "AR-glasögon".

6.3 Slutsatser och rekommendationer för fortsatt arbete

Sammantaget visar de genomförda studierna på en potential för UGV:er hos stridande förband. Dock finns det ett antal plattformsberoende samt sociotekniska krav som behöver tillgodoses (se [27]). De plattformsberoende kraven framkom i det avgränsade fallet lätt UGV i MOUT inom ramen för plutonens strid. De sociotekniska kraven framkom genom utformningen av operatörsgränssnitt. Gränssnittsfrågorna bedöms vara av vikt för att öka den operativa effekten vid ett eventuellt framtida nyttjande av UGV:er vid lätta förband.

Under 2023 är avsikten att fortsatt bedriva fältförsök för att ytterligare fördjupa kunskaperna om möjlig operationell nytta med lätta UGV:er i MOUT. Skillnader mot de i denna rapport beskrivna försöken kommer exempelvis vara ökade autonoma förmågor, exempelvis kopplat till UGV:ernas förmåga till självständig manövrering och navigering. Ytterligare möjligheter som undersöks är att simulera beväpning på plattformarna för att då undersöka hur UGV:er skulle kunna nyttjas som understödsplattform inom ramen för plutonens strid.

Ambitionen är även att fortsätta forskning riktad mot användargränssnitt, exempelvis genom att koppla prototypgränssnitt till virtuella UGV:er i VBS³⁰ och på så sätt även möjliggöra undersökningar av potentiell nytta med medeltunga UGV:er för lätta förband. Uppgifterna för UGV:erna vid dessa försök avses vara såväl spaningsuppgifter som att agera logistik- eller understödsplattformar.

³⁰*Virtual Battle Space*, ett datorspel vilket nyttjas av Försvarsmakten för datorstödd utbildning i, bland annat, stridsteknik och stridslednings-/sambandstjänst lägre förband.

7 Folkrättslig reglering av autonoma vapensystem

I [34] ges en översiktlig beskrivning av den folkrättsliga regleringen av autonoma vapensystem. Med begreppet ”autonoma vapensystem” avses i rapporten sådana vapensystem som agerar helt eller delvis utan påverkan av en operatör. Begreppet omfattar autonomi i en eller flera delfunktioner i systemet eller i systemets alla funktioner.

7.1 Sammanfattning

Rapporten består av tre delar. Den första delen innehåller en beskrivning av den internationella humanitära rätten och de grundläggande mänskliga fri- och rättigheter som är tillämpliga på autonoma vapensystem i väpnad konflikt och i fredstid. I rapporten redogörs för såväl handlingsregler som regler om rättsligt ansvar. Dessutom diskuteras den juridiska metod som bör användas för att fastställa gällande rätt på området. I rapporten poängteras att en rättslig analys av det folkrättsliga handlingsutrymmet för användning av autonoma vapensystem behöver genomföras strukturerat för att inte riskera att ge felaktiga eller missvisande resultat. Det första steget i den föreslagna metoden är att fastställa vilka av folkrättens primära rättskällor som är tillämpliga i situationen. Det andra steget består av att fastställa vilka av dessa rättskällor som är folkrättsligt bindande för svensk del. Det tredje steget består av en analys av hur de tillämpliga rättskällorna reglerar autonoma vapensystem i form av såväl förbud, begränsningar som skyldigheter att vidta åtgärder. I rapporten har denna metod använts på ett generellt plan för att beskriva hur den internationella humanitära rätten reglerar Sveriges och Försvarmaktens användning av autonoma vapensystem i väpnad konflikt och i fredstid. Indirekt ger denna analys också underlag för att bedöma vilka folkrättsliga krav som ställs vid utveckling eller anskaffning av sådana system. I rapporten beskrivs vidare de viktigaste av dessa rättskällor och en (icke uttömmande) förteckning över de folkrättsliga traktater som aktualiseras i sammanhanget ges även.

I rapportens andra del beskrivs arbetet i ett antal olika statliga och icke-statliga forum och initiativ för att utveckla ny folkrätt på området. Fokus ligger framför allt på det arbete som bedrivs inom FN:s expertgrupp CCW GGE LAWS.³¹ Även arbetet inom EU och Nato berörs. Det råder enighet bland stater och internationella organisationer om att den internationella humanitära rätten (och i förekommande fall mänskliga rättigheter) är tillämplig även på framtida autonoma vapensystem. Sverige har gett officiellt uttryck för denna uppfattning vid flera tillfällen. Det råder emellertid inte enighet kring frågan huruvida detta innebär att vissa typer av framtida autonoma vapensystem är folkrättsligt tillåtna eller förbjudna, eller eventuellt bör förbjudas. Det råder inte heller enighet i frågan om regleringen av eventuellt tillåtna autonoma vapensystem är tillräcklig eller om ytterligare reglering av utformning och användning av sådana vapensystem är nödvändig eller önskvärd.

Den tredje delen av rapporten består av en översikt och analys av en del av den rättsvetenskapliga forskning som genomförts på området sedan 2015.

7.2 Rekommendationer

De slutsatser som dras i rapporten pekar på ett behov av fortsatt rättsvetenskaplig forskning på området. Skälen till att det finns ett sådant behov kan sammanfattas i tre punkter:

³¹Convention on the use of Certain Conventional Weapons Group of Governmental Experts on Lethal Autonomous Weapon Systems.

- teknikutvecklingen på området gör att de rättsliga frågorna är många; det finns en pågående rättsutveckling på området, men det är oklart om denna kommer att leda till någon annan reglering än den nu gällande,
- det går inte att utan vidare förlita sig på att forskning från andra stater eller internationella forskningsinstitut är tillämpliga för svensk del,
- folkrättsliga och etiska argument blandas inte sällan i både forskning och rättsutveckling.

Dessa skäl för fortsatt forskning ska ses mot bakgrund av att Sverige har ett folkrättsligt ansvar att utveckla och använda autonoma vapensystem i enlighet med gällande och kommande folkrätt. Det finns också ett ansvar att säkerställa att de som utvecklar eller använder autonoma vapensystem känner till de rättsliga gränserna relaterade till dessa system.

I ljuset av rapportens slutsatser ges följande övergripande rekommendationer:

- 1) Fokusera den rättsvetenskapliga forskningen på gällande rätt.
- 2) Följ och analysera processen för rättsutveckling inom framför allt CCW GGE LAWS. Detta bör ske i syfte att vid behov kunna stödja regeringens arbete på området samt för att ha beredskap för förändringar i rättsläget.
- 3) Tydliggör relationen mellan folkrätt och etik. Detta bör ske i syfte att kunna renodla rättsliga analyser så att det rättsliga handlingsutrymmet varken överskrids eller suboptimeras.

I [34] ges fördjupade, prioriterade förslag på forskningsinriktningar för dessa tre områden.

Oavsett vilken forskning som genomförs är det viktigt att den utgår från svensk folkrättslig bundenhet och övriga svenska förhållanden, samt att den sker med en robust rättsvetenskaplig metod. Detta lägger grunden för kvalitativa forskningsresultat som är användbara för utvecklingen och användningen av autonoma vapensystem.

7.3 Fortsatt arbete

Den fortsatta forskningen avser behandla ovanstående rekommendationer. Huvudfokus under 2023 kommer vara att genomföra en exempelstudie riktad mot användningen av beväpnade UAV:er (Unmanned Combat Aerial Vehicle, UCAV).

7.3.1 Exempelstudie av beväpnad UAV (UCAV)

En folkrättslig analys av befintlig eller (delvis) fiktiv UCAV genomförs under 2023. Analysen sker utifrån den internationella humanitära rätt som Sverige är bundet av. Analysen sker i syfte att utveckla en metod för att identifiera och beskriva folkrättsliga förbud, begränsningar och skyldigheter i samband med användning av autonoma vapensystem. Analysen ska ge förslag på såväl krav på det tekniska systemet som vägledning för handhavande.

8 Internationella samarbeten

Projektet har under året deltagit i ett flertal internationella samarbeten, bland annat i Nato-grupper och forskningssamarbeten som genomförs inom ramen för det nordiska samarbetet Nordefco (Nordic Defence Cooperation). Syftet med de internationella samarbetena är att uppnå en effektivare kompetensuppbyggnad inom delområden där sådana samarbeten kan ge en större utväxling av satsade resurser.

8.1 Nordefco

Projektet deltar på uppdrag från LEDS i forskningssamarbeten som genomförs inom Nordefco COPA CAPA (Cooperation Area Capability). Projektet samarbetar med Norge och Finland inom områdena robusta navigeringssystem för obemannade och autonoma system samt svärmar av samverkande obemannade farkoster.

8.1.1 Robust Navigation WG

FOI och FFI deltar i Robust Navigation Working Group där den pågående uppgiften utgörs av att skapa ett referensdataset som möjliggör utvärderingar av PNT-delsystem och algoritmer. Tre deluppgifter ingår i den pågående fasen av samarbetet.

- Planera och genomföra fältförsök i syfte att skapa ett gemensamt högkvalitativt referensdataset med utvalda positionerings- och navigeringssensorer för obemannade farkoster (primärt UGV). Detta dataset ska inkludera referenspositioner som har en hög noggrannhet.
- Utveckla associerade metoder för utvärderingar och prestandajämförelser (benchmarking) av navigationsalgoritmer och multisensorfusionsfilter.
- Föreslå mål med, och former för, ett fortsatt samarbete med ökad omfattning inom området robust navigering för obemannade farkoster.

Genomförandet av fältförsök har försenats på grund av pandemin men ett första fältförsök genomfördes i september i Västervik på Drone Center Sweden. Dessa mätningar beskrivs i avsnitt 4.1.

8.1.2 Swarming WG

Sverige deltar även i Swarming WG. Gruppen har dock varit inaktiv under året i avvaktan på att Finland, som leder gruppens arbete, ska tillsätta personal för att genomföra arbetet.

8.2 Nato Science & Technology Organization

Projektet har under 2022 finansierat deltagande i två forskningsgrupper inom Nato STO, en under områdena Sensors & Electronics Technology (SET) och en inom Human Factors and Medicine (HFM). På grund av pandemin har arbetet pausats inom Nato SCI-331 *Robotics and Autonomous Systems Operational Impact on Land Warfare (RASOIL) Wargame*. Det är i nuläget oklart om den kommer att genomföras som planerat.

8.2.1 Nato SET-309 Nato PNT Open System Architecture & Standards to Ensure PNT in NAVWAR Environments

Inom ramen för Nato SET-309 *Nato PNT Open System Architecture & Standards to Ensure PNT in NAVWAR Environments* studeras framtida multisensorfusionsarkitekturer med öppen arkitektur och standardiserade gränssnitt, som även kan möjliggöra modularitet och enkel integration av nya sensorer ("plug-and-play").

Fokus är att utveckla och nå konsensus kring utformningen av dylika PNT-system, där utgångspunkten är det arbete som genomförts i USA exempelvis inom DARPA ASPN

(All-Source Positioning Navigation). En demonstration av ett modulärt PNT-system kommer även genomföras där fokus är på bibehållen PNT-förmåga i telestörda miljöer. De olika deltagande organisationerna kommer att bidra med olika sensorer eller delsystem, samt bidra i utvecklingen och definitionen av framförallt gränssnitt. Syftet med deltagandet i detta samarbete är att öka vår förståelse rörande möjligheter och begränsningar med öppen standardiserad arkitektur som en del av framtidens PNT-system.

Natogruppen har genomfört två fysiska möten, ett i Slovenien i maj och ett i Nederländerna i november. Två virtuella möten har även genomförts, där de till stor del har syftat till att förbereda arbetet för de fysiska arbetsmötena.

8.2.2 HFM-RTG-330 Human Systems Integration for Meaningful Human Control over AI-based systems

Arbetsgruppen HFM-RTG-330 har titeln *Human Systems Integration for Meaningful Human Control over AI-based systems*. Sju länder deltar i detta arbete: USA, Nederländerna, Sverige, Finland, Storbritannien, Tyskland och Frankrike. Årets arbete har genomförts inom ramen för projektets verksamhet.

Föregående *exploratory team* HFM-ET-178 formulerade en beskrivning av meningsfull mänsklig kontroll (Meaningful Human Control, MHC) som (fritt översatt) ”Människor har förmågan att göra informerade val i tillräcklig god tid för att påverka AI-baserade system i syfte att möjliggöra en önskad effekt eller förhindra en oönskad omedelbar eller framtida effekt på omgivningen”. Den globala diskussionen om MHC förs i olika forum.

Exempelvis riktar sig diskussionen inom FN mest mot det som kallas ”autonoma vapensystem” och dess lagar. Arbetsgruppen HFM-330 har ett bredare fokus mot militära system som använder sig av mjukvara som kan kallas för AI (artificiell intelligens). Dessa system inkluderar obeväpnade obemannade farkoster och informationssystem som har AI inbyggda och som inte är kopplade till en specifik plattform, d.v.s. även ledningssystem, logistiksystem och beslutsstödssystem.

De vetenskapliga målen för gruppen är: (i) utveckling av riktlinjer inom människa-system-integration (MSI) för mänsklig kontroll, (ii) mätning och värdering av mänsklig kontroll och (iii) integration med andra, och utveckling av nya, Nato-aktiviteter.

Kick-off mötet för denna arbetsgrupp genomfördes i februari 2020. Under våren 2021 genomfördes ett större antal virtuella arbetsmöten i scenarioarbetsgruppen som arbetade fram ett antal scenarier. Under 2022 genomfördes förutom virtuella möten även två fysiska möten, ett i maj vid Nasa Ames Research Center i San José, och ett i oktober vid Universitetet i Cagliari. Utöver fortsatt utforskning av konceptet MHC togs även en plan fram för framtagning av riktlinjerna och innehållet i slutrapporten under dessa möten. Slutdatum för gruppen har förlängts till 2024 p.g.a. reserestriktioner under Covid-19-pandemin.

Som en spin-off och som input till arbetet i HFM-RTG-330 genomfördes även en forskningsworkshop i oktober 2021 inom området *Meaningful Human Control (MHC) of AI-based Systems - Key Characteristics, Influencing Factors, and Design Considerations* (HFM-RWS-322). Utforskning av ämnet MHC i termer av egenskaper, påverkansfaktorer och designprinciper var centrala i denna WS. Rapporten från denna workshop har färdigställts och den publiceras offentligt runt årsskiftet.

Referenser

- [1] J. Rantakokko, m.fl. *Tekniköversikt autonoma och obemannade system - Del 4: Luftstriden*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5167--SE, januari 2022.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] J. Markdahl, V. Deleskog, R. Lilja, L. Forssell, K. Kraft, K. Lagerkvist Blomqvist och J. Hamberg, *UAV-svärmar (projekt Zerg) - Årsrapport 2022*, Totalförsvarets forskningsinstitut. (under slutförande)
- [5] Erik Branzén och Karin Kraft, *Felsäkerhet för obemannade farkoster: Domänöversikt*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5357--SE, januari 2023.
- [6] Erik Branzén och Karin Kraft, *Felsäkerhet för obemannade farkoster: Metodintroduktion*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5358--SE, januari 2023.
- [7] P. Fankhauser, M. Bloesch och M. Hutter, "Probabilistic Terrain Mapping for Mobile Robots With Uncertain Localization," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 4, oktober 2018, pp. 3019-3026.
- [8] M. Wermelinger m.fl., "Navigation planning for legged robots in challenging terrain," in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016, pp. 1184-1189.
- [9] M. Holmberg, O. Karlsson och M. Tulldahl, "Lidar Positioning for Indoor Precision Navigation," in *2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2022, pp. 358-367.
- [10] J. Rantakokko, E. Axell, N. Stenberg, J. Nygårds och J. Rydell, *Tekniker för navigering i urbana och störda GNSS-miljöer – Slutrapport*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4907--SE, mars 2020.
- [11] W. Hess, D. Kohler, H. Rapp och D. Andor, "Real-Time Loop Closure in 2D LIDAR SLAM," *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1271-1278, 2016.
- [12] G. Andreasson, *Drönarsvärmar inom ramen för spaningsuppdrag*, Försvarshögskolan, april 2022.
- [13] I. Maxstad, *Taktisk styrning av autonom och obemannad luftfarkostssvärmar*, M.Sc. Thesis, KTH, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, 2002.
- [14] P. Skoglar, J. Nygårds, R. Björström, P. Ögren, J. Hamberg, P. Hermansson och Morgan Ulvklo, *Path and sensor planning framework applicable to UAV surveillance with EO/IR sensors*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--1741--SE, september 2005.
- [15] S. S. Ponda, R. M. Kolacinski, och E. Frazzoli, "Trajectory optimization for target localization using small unmanned aerial vehicles," *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, 2009.
- [16] A. Andersson Jagesten och A. Källström, *Autonomous landing of an unmanned aerial vehicle on an unmanned ground vehicle in a GNSS-denied scenario*, M.Sc. Thesis, Linköping University, LiTH-ISY-EX-20/5327--SE, juni 2020.
- [17] T. Wiik, *A positioning system for landing a UAV on a UGV in a GNSS-denied scenario*, M.Sc. Thesis, Linköping University, LiTH-ISY-EX--22/5522--SE, 2022.
- [18] E. Boström and E. Börjesson, *Autonomous Landing of an Unmanned Aerial Vehicle on an Unmanned Ground Vehicle using Model Predictive Control*, M.Sc. Thesis, Linköping University, LiTH-ISY-EX--22/5493--SE, 2022.
- [19] L. Persson, *Model Predictive Control for Cooperative Rendezvous of Autonomous Unmanned Vehicles*, Ph.D. Thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2021.

- [20] J. Nygård och J. Rydell, "Cooperative navigation for UAV and ground units," *Proceedings of SET-275 Symposium on Cooperative Navigation in GNSS Degraded and Denied Environments*, STO-RSY-SET-275, Split, Kroatien, april 2021.
- [21] M. Gelin, *Terrain Referenced Navigation with Path Optimization: Optimizing Navigation Accuracy by Path Planning*, M.Sc. Thesis, KTH, Kungliga Tekniska Högskolan, TRITA-EECS-EX; 2022:411, 2022.
- [22] A. K. Majumdar, *Advanced free space optics (FSO): a systems approach*. Springer, 2014.
- [23] D. Giggenbach, et al. "Downlink communication experiments with OSIRISv1 laser terminal onboard Flying Laptop satellite," *Applied Optics*, vol. 61, 2022.
- [24] S. F. Alqurashi, m.fl. "Maritime Communications: A Survey on Enabling Technologies, Opportunities, and Challenges," *arXiv preprint arXiv:2204.12824*, 2022.
- [25] F. Kullander, L. Allard, F. Gustafsson, O. Gustafsson, L. Sjöqvist och O. Steinvall, *Evaluation of a Tactical Free-Space Optical Communication Link 2012*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-D--0503--SE, 2013.
- [26] W. S. Rabinovich m.fl. "Free-space optical communications research and demonstrations at the US Naval Research Laboratory," *Applied Optics* 54.31 (2015): F189-F200.
- [27] V. Lindholm, *Unmanned Ground Vehicles in Urban Military Operations : A case study exploring what the potential end users want*, M.Sc. Thesis, LIU-IDA/LITH-EX-A--22/045--SE, Linköpings universitet, 2022.
- [28] Försvarmakten, *Handbok Markstrid – Grupp 2016 (MSH Grupp 2016)*, 2016.
- [29] Försvarmakten, *Handbok Militära Operationer Urban Terräng Grupp (H MOUT)*, Arbetsutgåva, 2021.
- [30] 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," *Proceedings of the 33rd European Conference on Cognitive Ergonomics*, Kaiserslautern, Tyskland, 2022.
- [31] D. Saleh, *Interaction Design for Remote Control of Military Unmanned Ground Vehicles*, LIU-IDA/LITH-EX-A--2021/005--SE, Linköpings universitet, 2021.
- [32] D. Saleh, K. Bengtsson, A. Fredriksson Häagg, S. Aronsson och R. Woltjer, *Obemannade markgående farkoster – Koncept för nyttjande och interaktion*, Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5236--SE, december 2021.
- [33] 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, februari 2022.
- [34] Pontus 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.

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se