

Felsäkerhet för obemannade farkoster: Domänöversikt

ERIK BRANZÉN OCH KARIN KRAFT



Erik Branzén och Karin Kraft

Felsäkerhet för obemannade farkoster: Domänöversikt

Framsida: Två officerare från US Army utför teknisk diagnostik och reparation på RQ-7B Shadow UAS. (Foto: Staff Sgt. Richard Andrade, US Army, Public domain)

Titel	Felsäkerhet för obemannade farkoster: Domänöversikt
Title	Fail-safety for unmanned vehicles: Domains
Rapportnummer	FOI-R--5357--SE
Månad	Januari
Utgivningsår	2023
Antal sidor	52
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare	Försvarsmakten
Forskningsområde	Övrigt
FoT-område	Temaområde
Projektnummer	E716571
Godkänd av	Linda Sjödin
Ansvarig avdelning	Cyberförsvar och Ledningsteknik
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen.

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

Denna rapport behandlar felsäkerhet för obemannade farkoster med autonoma delfunktioner med utgångspunkt i teknikområdena feldetektion, feldiagnostik och felhantering. En farkosts möjlighet att utföra sitt uppdrag är begränsat av dess förmåga att förhindra, undvika, tolerera och återhämta sig från fel. Felen kan leda till olyckor vars konsekvenser måste vägas mot varandra vid design och hantering av farkosten. Rapporten ger exempel på vanliga riskkällor för farkoster i de olika domänerna luft, mark, sjö, på respektive under ytan. För högnivåfunktioner som perception, ruttplanering och styrning finns många likheter mellan domänerna. Fel i perceptions- och styrsystem är de mest säkerhetskritiska och orsakerna kan ofta vara svåridentifierade, i synnerhet om datadrivna metoder används. Utöver dessa fel är det vanligt med fel i ställdon, sensorer, drivlina, elfel eller länkbortfall. En viktig slutsats från rapporten är att uthållighet, kostnad och de tilldelade uppgifternas komplexitet är egenskaper som ökar behovet av feldetektion, feldiagnostik och felhantering.

Nyckelord: UAV, AUV, UGV, USV, feltolerans, felhantering, feldiagnostik, autonoma farkoster

Summary

This report investigates fail-safety for unmanned vehicles with autonomous functions, through the lens of fault detection, diagnostics and handling. A vehicle's ability to perform during a mission is limited by its fault prevention, avoidance, safety tolerance and recovery capabilities. These faults can lead to accidents with consequences that needs to be handled in the design and use of the vehicle. A risk analysis is vital in finding critical faults and solutions often take the form of on-board diagnostic systems. The report also exemplifies common hazards for systems in the domains ground, air and sea, above and below the surface. For high level functions, many similarities exist among the domains. Perception and control system faults are the most safety-critical and the causes are often hard to identify, especially if data-driven methods are involved. Aside from these faults, among the most common hazards are actuator, sensor and drive train failures, electrical failures and loss of communication. An important conclusion from the report is that endurance, cost and the complexity of assigned tasks increase the need for fault diagnostics.

Keywords: UAV, AUV, UGV, USV, fault tolerance, fault handling, fault diagnosis, autonomous vehicles

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Historik	8
1.2	Kontext och problemformulering	9
1.3	Avgränsningar	10
2	Obemannade luftfarkoster	11
2.1	Domänöversikt: Status, exempel och nyckelegenskaper	11
2.2	Identifiering av riskkällor	13
2.3	Metodöversikt	15
2.3.1	Modellbaserade metoder för icke-linjär styrning	15
2.3.2	Datadrivna metoder	16
2.3.3	Banföljning	17
2.3.4	Felsäkra svärmar	17
2.4	Slutsatser	18
3	Obemannade undervattensfarkoster	19
3.1	Domänöversikt: Status, exempel och nyckelegenskaper	19
3.2	Identifiering av riskkällor	22
3.3	Metodöversikt	22
3.3.1	Fellokalisering med felträd och sökmetoder	24
3.3.2	Arkitektur för autonom hantering av globala fel	24
3.3.3	Felhanteringsmetoder för roder- och framdrivningsfel	25
3.3.4	Datadriven metod för övervakning av systemhälsa	25
3.4	Slutsatser	25
4	Obemannade ytfarkoster	27
4.1	Domänöversikt: Status, Exempel och nyckelegenskaper	27
4.2	Identifiering av riskkällor	29
4.3	Metodöversikt	29
4.3.1	Datadriven metod för feldetektion	30
4.3.2	Kollisionsundvikning och ruttplanering	30
4.3.3	Reglermetod för fel i ställdon och kommunikationsfel	30
4.4	Slutsatser	30
5	Obemannade markgående farkoster	33
5.1	Domänöversikt: Status, exempel och nyckelegenskaper	33
5.2	Identifiering av riskkällor	35
5.3	Metodöversikt	39

5.3.1	Övergripande arkitekturer för detektion, diagnostik och hantering av fel i UGV	40
5.3.2	Realtidsprediktion av fel för UGV	40
5.3.3	Övertag av UGV i händelse av fel eller randhändelse . .	41
5.4	Slutsatser	41
6	Diskussion och slutsatser	43
	Litteraturförteckning	45

1 Inledning

I denna rapport kartläggs behovet av och metoder för felsäkerhet för obemannade farkoster med varierande grad av autonomi och automation av delfunktioner inom de domäner där Försvarsmakten har verksamhet det vill säga i luft, land och sjö, på och under ytan.¹ Farkosterna varierar i storlek, uppgift och komplexitet vilket resulterar i en stor bredd av kravställningar. För att kunna formulera kraven korrekt vid anskaffning och utveckling av farkoster (där graden av automation ökas) behövs kunskap inom automationsfrågor. Totalförsvarets forskningsinstitut har arbetat länge med sådana frågor, men ser ett behov av ökad forskning inom området felsäkerhet för obemannade farkoster. Syftet med denna rapport, tillsammans med rapporten "Felsäkerhet för obemannade farkoster: Metodintroduktion" [1], är att etablera en kunskapsbas för det fortsatta forskningsarbetet där målet är att bygga upp teoretisk och praktisk kunskap inom området. Mer specifikt försöker denna rapport klargöra vad som dimensionerar behovet av felhantering inom domänerna genom att ge exempel på olika farkosters nyckelegenskaper i relation till vanliga riskkällor.

En stor del av de fel som inträffar för obemannade farkoster uppstår i interaktionen mellan människa och farkost. Andra vanliga fel är mekanisk utnötning av komponenter och kommunikationsbortfall. När fler funktioner automatiseras kan fel som uppstår i interaktion med människan elimineras, men det uppstår samtidigt nya riskkällor och människans insyn i farkosterna förändras om inte åtgärder vidtas. Farkosterna behöver då utrustas med system som kan erbjuda beslutstöd om farkostens hälsa och förmågor i uppdragskontexten. Vissa funktioner är både säkerhets- och förmågekritiska och de fel som kan äventyra dem bör hanteras. Rapporten behandlar denna problematik där felsäkerhet delas upp i begreppen feldetektion, feldiagnostik och felhantering.

Målet med integrering av hälsounderhållande funktioner är att ge farkosten följande egenskaper:

- **Robusthet:** Farkosten fungerar som det ska i oförutsedda situationer som uppstår i miljön där den är aktiv (plötsligt hinder, förändrade ljusförhållande som påverkar optiska sensorer etc.).
- **Felsäkerhet:** Fel hanteras innan de påverkar farkostens funktion eller att farkosten levererar en korrekt funktionalitet trots närvaro av fel som påverkar den (exempelvis fel på sensor, punktering).

Felsäkerhet kan erhållas genom konstruktionen men även med automatisk felhantering där farkosten själv ges förmågan att minimera konsekvenser av, undvika eller återhämta sig från fel. Robusthet hanterar yttre faktorer som inte kan ses som fel men skiljelinjen är svår att dra och egenskaperna är sammankopplade. I den här rapporten används inte ordet robusthet även om de berörda ämnena ofta beskrivs med den termen i litteraturen.

De tre begreppen detektion, diagnostik och hantering av fel kan kort förklaras med:

- **Feldetektion:** att upptäcka fel, bristande funktionalitet i farkosten eller händelseförlopp som inte faller under "normalt".
- **Feldiagnostik:** process för att kartlägga var och när felet inträffat samt dess påverkan på farkosten.

¹Rymddomänen har inte betraktats i detta arbete.

- **Felhantering:** vidta åtgärder för att undvika, tolerera eller återhämta sig från fel.

I rapportens ges en överblick över forskningsområdet och en presentation av svårigheter och gemensamma frågeställningar för de olika domänerna samt en domänvis litteraturöversikt.

1.1 Historik

Mycket av det tidiga arbetet inom utveckling av felsäkra system gjordes inom flygindustrin och processindustrin efter andra världskriget. Den tekniska utvecklingen gjorde det möjligt att automatisera processer, men samtidigt växte komplexiteten hos systemen. Detta medförde också ökad komplexitet i interaktionen med människan. Kommunikation av relevant information blev mer kritisk då människan i mindre grad kunde förlita sig på intuition och sina egna sensororgan för att få en överblick över systemet och dess olika funktioner. Mer komplexa system medförde större ekonomiska konsekvenser vid ett haveri. Att kunna detektera fel innan de orsakade ett haveri blev därför viktigt och forskningen för framtagning av hälsosystem som detekterade, diagnostiserade och hanterade fel tog fart. Det började med hårdvarufel men kom med tiden även att inkorporera systematiska fel och interaktionsfel med människa och andra system.

Det finns en stor mängd historiska haverier och incidenter som bottnat i tekniska fel. Tekniska fel som, enligt haveriutredningarna, orsakats av mänskligt agerande men där djupare systematiska problem egentligen legat bakom. Enligt Leveson m.fl. [2] beror detta ofta på naiva modeller av händelseförlopp i kombination med kulturer där operatörsansvaret placerats över det ansvar som utvecklarna har. Bakgrundsfaktorer som designval och -avvägningar, träning av operatörer, organisationskultur och bristande kommunikation mellan viktiga aktörer beaktades inte och iterationen bakåt genom händelsekedjan stannade ofta vid människor som agerat "felaktigt" i handhavandet av systemet. Leveson hävdar att ett sådant tänkande inte leder till ökad felsäkerhet i längden eftersom många fel har sitt ursprung i designen.

Ytterligare exempel lyfts av Venkatasubramanian m.fl. [3] för att exemplifiera samma typ av problem som Leveson beskriver. I flera av exemplen på incidenter användes mycket modern teknik för övervakning av processer och system. Venkatasubramanian betonar den mänskliga faktorn som nyckel till att förstå dessa incidenter, nämligen att komplexa system är svåra för människor att övervaka och det är en orsak till att felaktiga beslut fattas. Systemdesignen bör ta hänsyn till sådana faktorer. Enligt Venkatasubramanian visar statistik att ca 70 % av alla incidenter inom processindustrin är ett resultat av felaktigt mänskligt agerande. En slutsats som vid första anblick motsäger Levesons, men som också kan ses som en följd av hennes argumentation om missvisande utredningar. Oavsett är det tydligt att mänskligt agerande är en faktor som kan vägas in i designen av ett system om syftet är att minska risken för haveri.

Några viktiga slutsatser som upprepas av Leveson och Venkatasubramanian är:

- Många incidenter orsakas som resultat av friktion i interaktionen mellan människa och tekniskt system.
- Tilliten till säkerhetskritiska tekniska system är ofta låg hos de som använder systemen och människor litar ofta mer på sin egen intuition i svåra situationer.
- För säkerhetskritiska system är det extremt viktigt att ha transparens gentemot alla involverade aktörer.

- Att modellera felförlopp är mycket svårt, men genom att studera historiska haverier och modellernas begränsningar kan fel undvikas i framtiden.

Hälsöövervakande system har funnits länge, men har alltid och kommer under lång tid framåt att behöva interagera med människor. Diagnostiken kan endast överblicka det inre livet hos det undersökta systemet och i en total haveriundersökning vägs även yttre faktorer in. Syftet med diagnostik, både proaktiv och reaktiv, är enligt Leveson att minimera framtida fel och risker och inte att hitta syndabockar.

1.2 Kontext och problemformulering

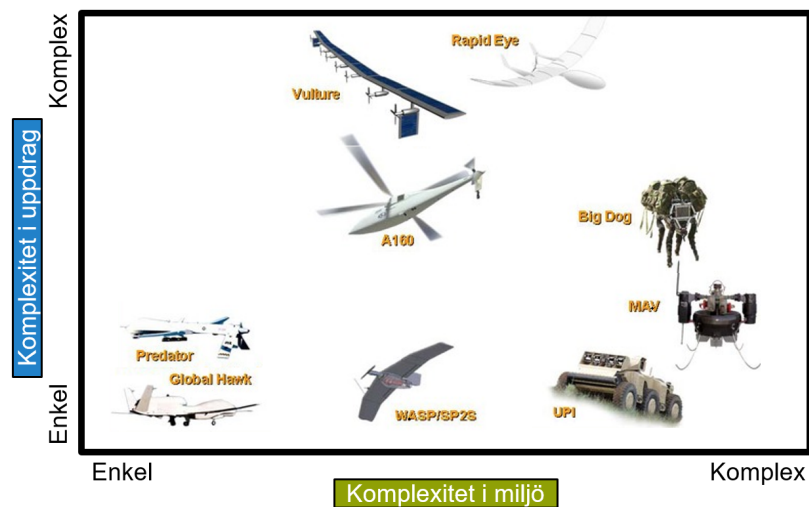
Försvarsmakten har under en längre tid använt obemannade farkoster i sin verksamhet. Med en växande användning av större och mer komplexa obemannade farkoster i militär luftfart, mark- och sjöverksamhet samt att dessa i ökande grad kommer utrustas med mer autonoma delfunktioner kommer behovet av avancerade metoder för detektion, diagnostik och hantering av fel i dessa farkoster att växa.

Begreppet autonomi förknippas i den tekniska litteraturen ofta med artificiell intelligens (AI), men begreppet saknar en vedertagen, allmänt accepterad, definition. En definition för autonomi eller autonom farkost finns i Paul Scharres bok *Army of None* [4] och enligt den kan en obemannad farkost beskrivas som autonom då den har en övervägande andel automatiserade funktioner, funktioner som inte kräver en operatör.² Exempel på förmågor som hos flera farkoster kan fungera autonomt är styrning, banplanering och navigering. Ju fler av en farkosts förmågor som är automatiserade desto högre är autonomigraden. En autonom farkost är inte nödvändigtvis informationsberoende utan kan i olika grad och situationer förlita sig på satellitbaserad positionering eller radiokommunikation med andra farkoster. Det är inte alltid önskvärt eller möjligt att göra dem autonoma i denna aspekt. Dock behöver varje nödvändig funktion som fräntas en människa kopplat till omvårdnad, styrning och underrättelse implementeras felsäkert i systemet. Felsäkerheten står i relation till en definierad säkerhetsnivå för farkosten som ofta erhållits från en riskanalys. Ju felsäkrare systemet är desto mindre mänsklig inblandning krävs, men desto mer komplext blir troligtvis systemet. Samtidigt ska systemet verka i en miljö och utföra ett uppdrag där komplexiteten i miljön och uppdraget skapar utmaningar och gör automatisering svårare. De obemannade farkosterna som används och har använts militärt är ofta operativa i mindre komplexa miljöer och ges (eller genomför) relativt enkla uppgifter vilket illustreras med några exempel i figur 1.1.

En egenskap som är viktig för systemhälsa är feltolerans. Begreppet beskriver ett systems egenskap att kunna fortsätta vara operativt trots närvaro av fel i systemet. Feltolerans används ofta bara för att beskriva en reaktiv egenskap, det vill säga systemets förmåga att stå emot akuta fel i hårdvara. Det är även viktigt att systemet kan undvika samt återhämta sig från fel. Det är därför lämpligt att använda felsäkerhet som övergripande begrepp där dessa tre förmågor ingår.

Felsäkerhet har utvecklats från att fokusera på hårdvarufel i form av sensorer, motorer med mera, till att oftare beröra fel som inte kan kopplas direkt till en fysisk komponent. Exempel på detta kan vara fel i objektigenkänning, styrning eller ruttplanering men även rena mjukvarufel. För autonoma farkoster, oavsett domän, kan fel i dessa processer resultera i ett haveri av en säkerhets- eller förmågekritisk funktion. Det är därför viktigt att ha hög tillförlitlighet i dessa system och att förstå under vilka förhållanden de betar sig som förväntat samt vilka riskkällor som finns [5]. Metoder för detektion av avvikelser i systemen samt redundans är viktigt.

²Hädanefter kommer "obemannad autonom farkost" att betyda just detta.



Figur 1.1: Obemannade farkoster placerade enligt miljö- och uppdragskomplexitet. Notera att den idag verksam obemannade farkosten som också är beväpnad, Predator, verkar i relativt enkla miljöer och uppdrag. Bild: Defence Advanced Research Project Agency, DARPA (modifierad), Wikimedia, Public domain

Systemsäkerhetskrav och noggrann evaluering av säkerhet för tekniska system och vapensystem är viktigt inom försvarsindustrin och försvarsorganisationer. Försvarsmakten lyfter den ökade rollen av systemsäkerhetsarbete i sin Handbok för systemsäkerhet, H SystSäk [6], och bedriver verksamhet med syftet att "... minska risker hos tekniska system så att de inte orsakar skada på person, egendom eller yttre miljö." Det lyfts även att "Låga olycksrisker uppnås genom konstruktion och andra aktiva åtgärder ... Under vidmakthållandefasen säkerställs uppföljning och hantering såväl av kvarvarande som av nytillkomna risker". Handboken erbjuder metoder för riskidentifiering, riskvärdering och riskhantering samt beskriver hur arbetet däromkring kan se ut.

Rapporten är uppdelat utefter domänerna luft, mark och sjö, på och under ytan. Det finns gemensamma tekniker och frågeställningar mellan dessa fysiska operationsmiljöer, men även egenskaper och användningsområden hos farkosterna som skiljer dem åt. Regelverken för de olika fysiska miljöerna gör att kraven på felhantering är olika.

1.3 Avgränsningar

Endast exempel på metoder för feldetektion, feldiagnostik och felhantering berörs i kapitlen. För en generell översikt över metoder och för vilka fel de ger god effekt hänvisas till rapporten [1].

Farkosterna som betraktas i denna rapport antas vara obemannade och ha flertalet autonoma funktioner. Felsäker uppdragsstyrning är en viktig fråga, men fokus i arbetet ligger på felsäkerhet för tekniska basförmågor. Uppdragspåverkan av inträffat eller predikterat fel är ett viktigt område men ryms inte i denna rapport. Det finns dock en avsikt att arbeta med den frågan i framtiden.

Eftersom syftet med rapporten är att ge en översikt över en stor mängd tekniska områden inom obemannade och autonoma farkoster i olika domäner kan den inte sägas vara heltäckande och vissa områden berörs endast ytligt, till exempel säkerhet i mjukvara. För en översikt över autonoma farkoster och djupare teknisk beskrivning av områden som till exempel robust navigering av obemannade farkoster och artificiell intelligens rekommenderas läsaren till annan tidigare forskning på FOI, exempelvis [7–10].

2 Obemannade luftfarkoster

Flygande farkoster verkar i ett tredimensionellt rum och utsätts för störningar i form av andra flygande farkoster, väder och fåglar samt, beroende på flyghöjd, förändringar i topografi. Det är olika förutsättningar beroende på typ och storlek på systemet. Det finns inget nödstopp, utan vid fel och påverkan måste minst en kontrollerad landning kunna utföras för att undvika att systemet skadas eller förstörs. Förlusten av en liten farkost medför ingen större ekonomisk skada, men för större eller bestyckade farkoster riskerar krascher att få stora effekter på marken. På grund av den katastrofala konsekvensen fel kan få finns många regelverk som måste uppfyllas och luftfart lyder under luftfartslagen. Den militära luftfarten ska följa Regler för militär luftfart. De procedurer som piloten utför i nödsituationer och som leder till att farkosten uppfyller lagar och regler behöver i autonoma farkoster automatiseras. I en artikel från 2021 påtalar Nazarudeen [11] m.fl. vikten av att tänka på säkerhet och robusthet redan i designen av en UAV (Unmanned Aerial Vehicle) och påvisar att det finns en brist på ett helhetstänkande vad gäller säkerhetsfrågor i litteraturen. De pekar på vilka problemställningar forskning måste ta med för att hitta effektiva designar av UAV:er för säkerhetskritiska tillämpningar.

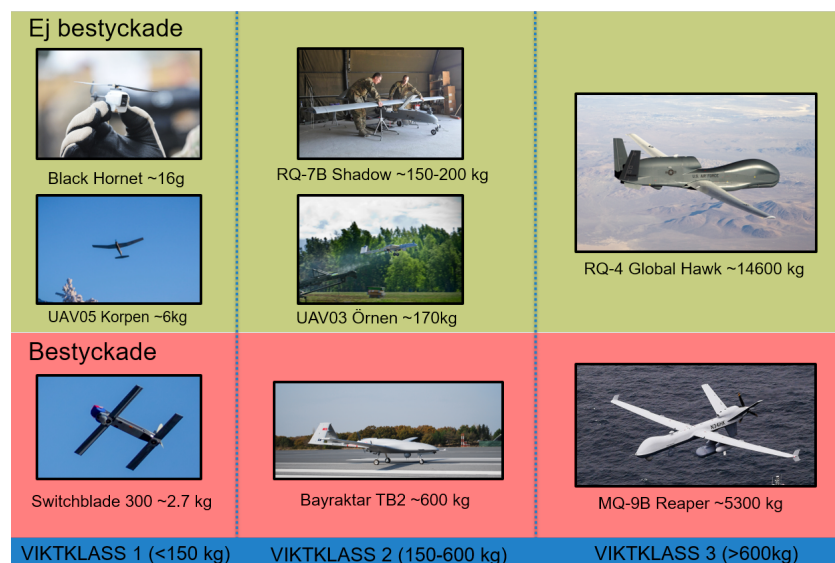
I detta kapitel ges en introduktion och översikt till specifika riskkällor och farliga situationer som kan orsaka fel och haveri hos flygande obemannade farkoster. Det följs av exempel på olika metoder som har implementerats för felhantering och robusthet hos olika flygande farkoster. Mest fokus har lagts på små UAV:er eftersom det anses vara det område där autonoma förmågor kommer att införas tidigast i ett svenskt sammanhang och för att en stor del av den öppet tillgängliga forskningen berör sådana system.

2.1 Domänöversikt: Status, exempel och nyckelegenskaper

Obemannade luftfarkoster brukar benämnas UAV (Unmanned Aerial Vehicle), UAS (Unmanned Aerial System), eller RPAS (Remotely Piloted Aerial System). Farkosterna sköts av en operatör/pilot på marken. NATO delar in UAV:er i tre klasser, med underklasser, beroende på storlek vilket kan ses i figur 2.1.

Försvarmakten har två operativa UAV-system: Korpen och Örnen som är av flygplanstyp och används för spaning. Korpen väger 6 kg och Örnen 170 kg. Båda används för spaning och är inte vapenbärande. Räckvidderna är 14 km respektive 125 km och flygtiderna varierar från 45 minuter till 7 timmar. Örnen är en amerikansk UAV av typ RQ-7B Shadow. I Hemvärnet pågår arbete med att införa UAV 06 under 2022, en så kallad multikopter, men även andra grenar i Försvarmakten utför försök med plattformen [12, 13].

U.S. Air Force har bland annat de operativa UAV:erna MQ-9 Reaper och RQ-4 Global Hawk. De är stora och tillhör klass 3 och faller även under klasserna MALE (Medium Altitude Long Endurance) respektive HALE (High Altitude Long Endurance) vilket innebär att de är operativa under långa tidsperioder (10-tals timmar och mer) [14]. UAV:n MQ-1 Predator och MQ-9 Reaper användes under kriget i Afghanistan och Irak och led länge av krascher på grund av tekniska fel och mänskliga faktorer, enligt Zucchini m.fl. [16]. Många av problemen hanterades genom omdesign och träning av operatörer, men innan förändringarna gjordes uppstod flera situationer där stridsflyg var tvungna att skjuta ner en UAV innan den kraschade i områden med potentiellt stora konsekvenser. Storleken på farkosten och bestyckningen var viktiga faktorer som



Figur 2.1: Översiktsskarta över obemannade luftfarkoster med varierande grad av autonomi. Obemannade luftfarkoster används i många olika typer av uppgifter däribland spaning, informationsinhämtning, målinvisning av artilleri och direktverkan. Data hämtad från [14, 15]. (Foton: **Black Hornet** - Richard Watt/MOD, **UAV05** - Jesper Sundström/Försvarsmakten, **Switchblade 300** - U.S. Marine Corps/Lance Cpl. Tyler Forti, **RQ-7B shadow** - U.S. Army by Staff Sgt. Richard Andrade, **Bayraktar TB2** - Bayhauluk, **UAV03** - Niklas Ehlén/Försvarsmakten, **RQ-4 Global Hawk** - U.S. Air Force by Bobbi Zapka, **MQ-9B Reaper** - U.S. Navy by Mass communication specialist Shannon Renfroe)



Figur 2.2: Figuren visar luftfarkosters behov av felhantering med några exempelsystem som är i drift idag. Data hämtad från [14]. (Foton: **Black Hornet** - Richard Watt/MOD, **UAV05** - Jesper Sundström/Försvarsmakten, **Switchblade 300** - U.S. Marine Corps/Lance Cpl. Tyler Forti, **RQ-4 Global Hawk** - U.S. Air Force by Bobbi Zapka, **MQ-9B Reaper** - U.S. Navy by Mass communication specialist Shannon Renfroe)

ledde till den åtgärden. Predator och Reaper är beväpnade och Global Hawk används för spaning. Även mindre UAV:er finns och två exempel är RQ-7B Shadow och Black Hornet Nano som är operativa i US Army [17].

I militära tillämpningar har små multikoptrar blivit vanligare de senaste åren eftersom de är förhållandevis billiga och kan bidra till nya förmågor. En framtida användning av små UAV:er är så kallade svärmar där många farkoster agerar i grupp. Tekniken är tänkt att ge ökad redundans och nya förmågor. En svärm av många farkoster utgör en ny typ av system som består av fysiskt åtskilda farkoster som samverkar vilket kräver ett annorlunda angreppssätt på felhantering och robusthet. Svärmen bör vara tolerant mot bortfall av individer samt kunna dela med sig av information för en gemensam lägesbild. Det finns exempel på patrullrobotar där flera aktörer påstår sig ha svärmande förmåga hos sina system, enligt Voskuijl m.fl. [18]. Juridiskt gäller idag att varje enskild luftfarkost kräver en pilot så större svärmar är ett framtida koncept.

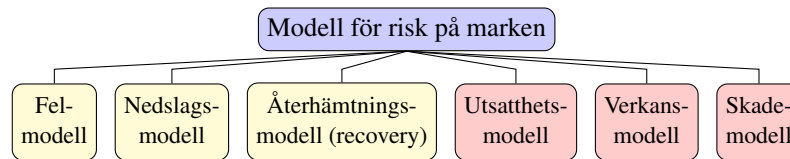
Ett annat exempel på hur obemannade farkoster kan samverka med andra aktörer är konceptet loyal wingman där en bemannad farkost och flera obemannade farkoster utför ett uppdrag tillsammans. Idén är att den autonoma farkosten kan agera som en sensorförlängning eller vapenbärare till huvudfarkosten eller stödja piloten i andra roller. I detta fall tillkommer komplexiteten i interaktionen mellan pilot och autonom farkost och vilka beslut som fattas av vem, vilket system och när.

De olika obemannade farkosterna i luftdomänen varierar i storlek och operationsområde. De kan vara beväpnade och samverka med system i samma domän och i de andra domänerna. Eftersom farkosterna skiljer sig åt mycket måste felsäkerhetsperspektivet utgå ifrån den specifika farkosten, dess användning och scenarier där den ska vara verksam. För mer beskrivning av luftdomänen och den framtida luftstriden hänvisas till Rantakokko m.fl. [14].

Behovet av automatisk felhantering hos obemannade luftfarkoster är svårt att koppla till en enskild parameter utan är en funktion av farkostens vikt och storlek, komplexitet i uppgift, typ av nyttolast och krav på uthållighet samt kommunikationslänk. En riskanalys informerar behovet för en enskild farkost och behöver ta hänsyn till dessa parametrar. Exempelvis är konsekvenserna större om en MQ-9 Reaper kraschar i ett bostadsområde än för en Black Hornet av nano-klass. Kraven på motståndskraft mot fel som äventyrar farkostens flygförmåga blir således högre för en Reaper. Med ett liknande resonemang bör algoritmer som håller kvar en Reaper i luften vid kommunikationslänksbortfall prioriteras. Även farkostens hastighet ökar behovet av snabb detektion av fel.

2.2 Identifiering av riskkällor

Som tidigare har beskrivits bör en riskanalys utföras då ett nytt system införs eller befintligt system utökas eller tillämpas annorlunda. Det finns olika metoder och ramverk för att utföra riskanalyser. Washington m.fl. [19] redogör för en översikt över modeller för riskanalysmetoder där människor och byggnader på marken finns i anknytning till obemannade luftfarkoster av alla slag i en civil kontext. Artikelnen behandlar direkt påverkan från UAV:n eller delar från UAV:n, men inte sekundära risker såsom brand, explosion, spridning av farliga ämnen med mera. Detta är en förenkling som inte går att göra i en riskanalys för beväpnade UAV:er. I figur 2.3 finns en schematisk bild över de modeller som behövs för att kunna sätta ihop en riskmodell och bedöma sannolikheter för skador på marken från en olycka med en UAV. Denna figur visar komplexiteten i att modellera och göra riskbedömningar för skador när en UAV kraschar på marken. Figuren behöver utvecklas och parametersättas med hjälp av data från verkliga olyckor för att rimliga värden på risk och sannolikhet ska kunna beräknas. Detta för att den ska kunna ligga till grund för vilka krav som ska ställas på systemet och



Figur 2.3: En översikt över de modeller som måste finnas för att göra en modell över risken för skada på marken som en UAV som kraschar medför, Washington m.fl. [19].

vilka metoder som behövs för felhantering.

Washington m.fl. [19] identifierar två huvudsakliga risker med obemannade luftfarkoster:

- Kollision med annan flygande farkost.
- Skada på människor och byggnader på marken av UAV:n eller delar från den.

Artikeln behandlar och ger en översikt över 33 olika modeller för den senare risken. Ingen modell behandlar sekundära risker utan endast de risker som är en konsekvens av direkt träff med UAV:n eller delar från den.

Cole [20] gör en analys av 254 olyckor med UAV:er som skett med Klass II och Klass III UAV mellan 2009 och 2018. Analysen är gjord som underlag till beslut om man ska tillåta större autonoma UAV:er i Storbritanniens luftrum. Av de förolyckade UAV:erna var 70% militära amerikanska UAV:er. Olycksstatistiken visar att fler länder har börjat använda UAV:er under dessa år. Det framgår att de flesta olyckor sker under flygningen (64%), 19% under landning och 9% under start. Det finns även information om olyckor för bemannade militära flygplan och där bemannade har 88 olyckor jämfört med 118 för obemannade. Slutsatsen vid analys av orsaken till olyckor och krascher, vilken finns registrerad i 56% av fallen, är att det inte finns någon tydlig orsak utan att många olyckor är en kombination av komplexa händelser. De vanligaste orsakerna är mekaniskt fel som utgör 22% av olyckorna, elektriska fel utgör 13% samt motorfel 27%. Vid motorfel är det vanligen läckage av olja eller kylarvätska som är orsaken.

Williams [21] presenterar en analys av orsaken till olyckor med äldre obemannade militära luftfarkoster. Fokus är att analysera orsaken till olyckor som orsakas av den mänskliga faktorn. Dock görs en analys baserad på olycksstatistik om obemannade farkoster och vilken orsak som ligger bakom krascherna. Där framgår att 42% av olyckorna med U.S. Army RQ-7B Shadow orsakas av fel på UAV:ns hårdvara. För U.S. Army Hunter är det 50%, för U.S. Navy Pioneer är det 65% samt för Air Force Predator 42%. Alla de analyserade UAV:erna är av flygplanstyp och manövrerade av personal på marken. Farkosterna Hunter och Pioneer används inte längre idag och olycksanalysen från [21] sträcker sig fram till 2004. Artikeln är gammal men eftersom det krävs att ett system är i drift för att kunna samla information kan detta ligga till grund för att identifiera riskkällor för nyare farkoster där statistik saknas. Riskkällorna som anses ha orsakat olyckorna och som inte är fel av piloten eller nedskjutning är elfel, mekaniskt fel, motorfel, förlorad kommunikationslänk, elektronikfel, väder och slutligen kollision med fågel. De första fyra är fel som uppstår i systemet, medan de två sista är påverkan utifrån. Förutom dessa fel nämns även fel på navigationssystemet. Beroende på situation och användning kan dessa riskkällor orsaka olyckor av olika allvarlighetsgrad. Utöver dessa lyfter Barr m.fl. [22] sju viktiga riskkällor för UAV:er som kan ha allvarliga påföljder:

- Förlust av kontroll över UAV:n.

- UAV:n flyger utanför tillåtet luftrum.
- Förlust av kommunikationslänk/kontrolllänk.
- Förlust av navigeringsförmåga.
- Misslyckad landning.
- Misslyckad eller oavsiktligt avslut av flygning.
- Kollision med föremål i luft eller med terräng.

Dessa riskkällor visar att det är viktigt att luftfarkosten har en fungerande metod för kollisionsundvikande, vilket är ett stort forskningsområde, och en fungerande kommunikationslänk när farkosten manövreras av en operatör. För farkoster som opererar i telestörda miljöer kommer kommunikationsbortfall att vara en realitet.

2.3 Metodöversikt

I detta avsnitt presenteras metoder för att hantera flertalet av de tidigare nämnda riskkällorna kopplat till UAV:er och fokus är små farkoster. Metoderna är både modellbaserade och datadrivna, samt hanterar arkitektur och felhantering i svärmar. Metodöversikten riktar sig främst till tekniskt intresserade läsare.

2.3.1 Modellbaserade metoder för icke-linjär styrning

Små UAV:er är lätta och det är enbart analytisk redundans¹ som är aktuell. En multikopter är ett icke-linjärt system med multipel input och output som utsätts för externa störningar och stora osäkerheter. Det finns många metoder som hanterar styrning av en linjär modell eller en linjäriserad icke-linjär modell av en multikopter. För att ta hänsyn till externa störningar såsom vind krävs att multikoptern modelleras icke-linjärt. Där har olika metoder som baseras på neuronnät visat sig vara effektiva [23].

I Guo m.fl. [24] presenteras en metod för robust feldiagnostik och feltolerant styrning av ett obemannat multikoptersystem som har okända fel på ställdon. Artikeln behandlar fall med fel hos ställdon i kombination med externa störningar. Felen delas upp i två delsystem, enbart fel i ställdonen och fel i ställdon samt yttre störningar. En adaptiv observatör används för systemet där både yttre störningar och ställdonsfel hanteras. Detta gör att den icke-linjära termen finns i det ena systemet och att fel i ställdon som kan hanteras linjärt stabiliseras separat och sedan tas hänsyn till störningar med en icke-linjär del. Detta bidrar till en mer robust och stabil metod.

Även Wang m.fl. [25] presenterar en metod som tar hänsyn till externa störningar och fel i ställdonen. Helikoptern modelleras med sex frihetsgrader och är en icke-linjär modell och bygger på en icke-linjär observerare och en bakåstegande SMC (Sliding Mode Control).

Chen m.fl. [26] presenterar ytterligare en metod för feltolerans för en helikopter när det finns osäkerheter i systemet, fel på ställdon samt okända yttre störningar. Helikoptern modelleras med en icke-linjär modell med tre frihetsgrader. Metoden använder sig av neuronnät för att spåra önskad output från systemet i närvaro av osäkerhet, yttre störningar och fel på ställdon. Metoden simuleras och testas på en testhelikopter med två propellermotorer, två sensorer för position och ett balansblock.

¹analytisk redundans skiljer sig från fysisk redundans där flera komponenter av samma eller olika typer är integrerade i systemet för att hantera bortfall. Istället används flera oberoende analysverktyg för att reducera effekten av felkällor i enskilda metoder samt för att utnyttja olika informationskällor. Läs mer i [1].

Nguyen [27] har utvecklat en metod där feldiagnostik och ett feltolerant reglerschema som kan hantera en fullständig förlust av en rotor. I artikeln refereras till flera olika metoder som hanterar partiell förlust av prestanda från ett ställdon utöver de arbeten som är presenterade ovan. Målet är att få multikopterna att landa horisontellt och för att uppnå det offras styrningen av gir. Skillnaden mellan ett tillstånd med och ett utan fel är att vid ett felaktigt tillstånd så bidrar den felaktiga rotorn enbart till rörelsen i höjddled. Metoden testas i simuleringar med ett par olika scenarier.

Att öka antalet rotorerna är ett sätt att enkelt skapa hårdvaruredundans. Men vid bortfall av rotorverkan kommer systemets fundamentala beteende ändras och för att systemet ska behålla sin funktion behövs metoder för felidentifiering följt av ändrad styrning av de återstående rotorerna.

Wen m.fl. [28] presenterar en analys av både ickelinjära och linjära metoder för styrning av en hexakopter som hovrar och har en eller flera motorer som har fallerat.

Saied m.fl. [29] identifierar fel hos en oktokopter genom att uppskatta systemets tillstånd med en andra ordningens sliding mode-observatör.

2.3.2 Datadrivna metoder

Abbaspour m.fl. [23] ger en översikt över olika styrmetoder och deras för- och nackdelar. För en multikopter är det enbart fel där ställdon delvis fallerar som kan kompenseras. För att möjliggöra slutförande av uppdrag behöver mindre fel och bortfall av funktionalitet hittas tidigt för att kunna kompenseras.

En datadriven metod för feltolerant styrning av en UAV med två rotorerna finns i Singh och Bhushan [30]. Metoden baseras på att en algoritm tränas att klassificera ett systemtillstånd som felaktigt eller fungerande genom att observera tillstånden.

Ytterligare en datadriven metod för feltolerant styrning, men här av en multikopter, presenteras av Jun och Tian [31] och den består av en stödvektormaskin (SVM)² som klassificerar fel i ställdon och ett reglerschema som kompenserar för felet.

Ett reglersystem för att detektera fel i både sensorer i ställdon och sensorer presenteras av Abbaspour m.fl. [23]. Metoden som används är ett neuronnät vars vikter uppdateras med ett utökat Kalmanfilter (EKF) och det kan detektera abrupta fel i både sensorer och ställdon. Tan m.fl. [32] presenterar ett reglersystem baserat på SMC³ kombinerat med ett neuronnät för att parametersätta SMC:n. När metoden testas med simuleringar i Simulink antas samtidiga fel på accelerometer, gyro och ställdon.

Park m.fl. [33] presenterar ett feltolerant reglerschema för fel på ställdon och sensorer för en UAV med en fällbar rotor (tilt-rotor). Ställdonsfel detekteras och systemet omkonfigureras för att skapa en stabil framdrift. Sensorfelen identifieras med ett Kalmanfilter.

Napolitano m.fl. [34] presenterar ett feltolerant reglersystem för fel på sensorer och ställdon som baseras på neuronnät (NN). Man kan välja mellan inläring on-line och off-line. I inläring off-line tar man inte tillvara den ytterligare fördel som tillgången till data on-line kan ge men kraven på beräkningskraft i farkosten minskar samtidigt. Med onlineinläring finns olika saker att beakta, exempelvis tiden som krävs för att nå en acceptabel inlärningsnivå, skillnaden mellan lokal och global inläring samt komplexiteten hos NN-arkitekturen. Detta är en datadriven metod för att bestämma ett normalt beteende hos ett system för att man därmed ska kunna detektera när ett fel uppstår.

²En typ av statistisk klassificerare, framtagen under 1990-talet.

³Sliding Mode Control

I [35] görs en feldetektion och en systemåterställning av en obemannad multikopter. Det simuleras att en rotor tappar en propeller eller att motorfel inträffar. Dessa två är de förklarande variablerna som används i träningen av en klassificerare med data från givare i motsvarande delsystem. Metoden som används för att klassificera felen är en stödvektormaskin och träningsdata samlas in genom experiment med en testhelikopter. Motorfel simuleras genom att en motor stoppas från marken via fjärrstyrning. Propellerförlust simuleras genom att en propeller lossas innan flygningen. Metoden testas på en experimentell oktokopter och stödvektormaskinen implementeras ombord. Initieringen görs precis innan start och tar några sekunder.

2.3.3 Banföljning

Att få en UAV att följa en förutbestämd bana är ett utmanande problem eftersom det är ett icke-linjärt, starkt kopplat och understyrt problem. En UAV utsätts också för svåra externa störningar som kraftiga vindar, varierande last och strålning.

Li m.fl. [36] använder i sin artikel en modellfri metod för att följa en bana när det finns externa störningar. Här simuleras störningar i form av vindbyar och UAV:ns reglersystem ska få farkosten att följa sin bana. Två reglerslingor, en yttre och en inre, reglerar position respektive vinklar och är baserad på en adaptiv SMC-metod för icke-linjär styrning. Chen m.fl. [37] presenterar en liknande metod med tillägg att farkosten är understyrd. Metoden baseras på bakåttäckning samt SMC.

2.3.4 Felsäkra svärmar

Svärmar är i sig en konfiguration för ökad redundans. En någorlunda homogen, självkonfigurerande samling samverkande system kan med statisk eller dynamisk redundans öka sannolikheten för ett uppfyllt uppdrag trots bortfall av individer i gruppen. Enligt Harrou m.fl. [38] kan feldetektion för svärmar delas in i endogena och exogena metoder och flera exempel på metoder ges. I endogena metoder mäter UAV:n själv sitt inre liv och detekterar därigenom fel. Exogena metoder används av svärmar av farkoster och där bestämmer svärmen med konsensus om fel i en specifik UAV. Ett exempel på exogen feldetektion ges i Tarapore m.fl. [39]. Genom detektion av extremvärden (outlier) kan misstänkt beteende hos en granne detekteras och en röstning etablera konsensus om fel. Styrkan med metoden är att brister i den egna UAV:ns felbedömningsfunktioner kompenseras genom redundans. Metoden som presenteras i [39] och [40] är beteendebaserad vilket innebär att varje UAV kartlägger och delar sin grannes beteendemönster. En slutsats som dras är att metoden är feloberoende, vilket innebär att den kan detektera alla tänkbara fel som påverkar de uppmätta beteendena. Eftersom ingen felmodell finns närvarande kan svärmen endast detektera fel och inte diagnostisera fel.

Svärmen har även en möjlighet att fusionera mätdata och med en kombination av röstning och medelvärdesbildning kan den erbjuda en robust och felsäker sensorfusion. Nivån av redundans i en svärm står i relation till antal fel som avses kunna tolereras samtidigt. Enligt Perez m.fl. [41] behövs det som mest $(3n + 1)$ redundanta enheter i svärmen för att kunna detektera och tolerera n disjunkta fel samtidigt. Det är även viktigt att felaktig information inte sprids och förstärks i svärmen. Röstning och detektion av outlier är metoder för att undvika detta. Om en UAV exempelvis felaktigt ser en bandvagn och säger till sin granne är det inte bra om den informationen sedan sprids i svärmen för att sedan återkomma till ursprungs-UAV:n. Detta kan ses som en typ av positiv återkoppling som genererar felaktig kunskap i svärmen och kan förhindras genom att felaktiga mätningar motverkas med röstning, extremvärdesdetektion och viktade informationsunderlag.

Tahir m.fl. [42] utvecklar en feltolerant formationsbevarande svärmalgorithm där en

hierarkisk organisation av UAV:er anpassar sig för bortfall genom en successionsordning. Varje UAV har koll på ett fåtal andra UAV:er och fyller platser i formationen när en UAV av högre rang får ett fel. Den hierarkiska strukturen är både abstrakt och fysisk i den meningen att en UAV med högre rang alltid flyger framför i formationen och det finns även en hårdkodad successionsordning i händelse av att en UAV faller bort av någon anledning. Metoden är skalbar eftersom premisserna för omkonfiguration är hårdkodade och varje UAV inte behöver ha koll på hela svärmen. Den centrala ledaren bär ansvar för svärmen, men i och med successionsordningen erhålls robusthet och feltolerans.

Chen m.fl. [43] lyfter feltoleranta styrlagar för svärmar som en av de viktigaste möjliggörarna av teknologin. I händelse av aktuatorfel kan en UAV snabbt tappa förmågan att hålla position och kan krocka med andra individer om problemet inte hanteras i tid. En styrlag presenteras därför för distribuerad styrning av en svärm i händelse av fel. Metoden består av en feldetektionsdel där varje UAV har koll på sina grannar. En styrlag presenteras som utgår från ett synkroniseringsproblem där två storheter minimeras: Varje UAV:s avvikelse från önskad bana och integralen av avvikelsen mellan två UAV:ers avvikelser från önskad bana.

2.4 Slutsatser

I litteraturöversikten över metoder för flygande farkoster har företrädesvis metoder, både datadrivna och modellbaserade, för små UAV:er med rotor tagits upp. Mycket av den öppna forskningen görs på dessa då det är relativt enkla system att modellera och de är praktiskt enkla att experimentera med och att få ut data ifrån. För att forska och få fram resultat om stora farkoster och flygplan krävs samarbeten med industrin och dyr infrastruktur. Resultaten av utvecklingen är inte heller öppet tillgängliga. För stora system finns certifiering och regelverk.

Många metoder för små multikoptrar fokuserar på att stabilisera en farkost med olika störningar på rotorerna. Det saknas dock metoder och arkitekturer för att hantera fel som uppstår i olika delsystem på ett globalt sätt i farkosten. De datadrivna metoderna är baserade på experimentdata och inte på data från verklig drift. De modellbaserade metoderna baseras ofta på SMC som kombinerad med data från systemet verkar vara en bra styrmetod för att hantera påverkan på framdrift.

3 Obemannade undervattensfarkoster

Detta kapitel innehåller en översikt över marina obemannade farkoster som verkar under ytan och även en diskussion kring vanliga riskkällor och fel. Farkosterna benämns UUV (Unmanned Underwater Vehicle) och delas upp i ROV:ar (Remotely Operated Vehicle) och AUV:er (Autonomous Underwater Vehicle). En ROV är obemannad och energiförsörjs och fjärrstyrs av en operatör via en kabel. En AUV agerar autonomt (utan direkt styrning av operatör) utan kontakt med en operatör och med egen energiförsörjning. Det finns även kombinationer av de två där en ROV kan koppla bort sig från kabel och agera autonomt som en AUV under vissa perioder. Sabertooth från SAAB är ett exempel på en sådan farkost [44]. Obemannade undervattensfarkoster är verksamma i svårtillgängliga, riskfyllda och krävande miljöer och uppdragen pågår ofta under lång tid. Ur ett ekonomiskt och säkerhetsperspektiv är användningen av autonoma farkoster intressant för till exempel underhåll av ledningar och installationer på havsbotten, forskningsändamål och militära tillämpningar.

Undervattensmiljön påminner om luftdomänen vad gäller felsäkerhet då farkosten rör sig i ett tredimensionellt medium där havsströmmar ger en liknande effekt som vind har på luftfarkoster. En undervattensfarkost behöver kunna genomföra en säker uppstigning till ytan för att rädda sig i en nödsituation, vilket motsvarar säker landning hos en luftfarkost.

3.1 Domänöversikt: Status, exempel och nyckelegenskaper

I dagsläget finns operativa ROV:ar i Försvarsmakten som används för minröjning och en sådan syns på bild i figur 3.1a. I figur 3.1b visas en liten ROV, SeaOwl, som har använts för övervakning och inspektion av oljeledningar i Norge. Den utvecklades för militära tillämpningar av SAAB, men visade sig även ha stor nytta i civilt bruk. Farkosten laddar batterier och överför data vid en dockningsstation under ytan. Figur 3.1c visar ett exempel på en ROV för installationer och reparationer ned till djup på 1 000 m och som utvecklades för U.S. Navy. Farkosten på bilden användes i Norge under nästan 30 år och ersatte djupdykare på oljefälten. En stor drivkraft inom autonomi för undervattensfarkoster har varit faran som är associerad med undervattensarbete, men även kommunikationsbegränsningarna. För fler exempel på ROV:ar hänvisas till Rantakokko m.fl. [45].

AUV:erna varierar från små bärbara farkoster till stora farkoster som väger flera ton och de delas in i fyra klasser (bärbara, lätta, tunga och stora enligt figur 3.2). AUV:er skiljer sig från ROV:ar i och med att de kan agera autonomt utan att en operatör styr dem. Farkosterna drivs av el- eller dieselmotorer men det finns också farkoster som utnyttjar hydrodynamik för framdrivningen, så kallade glidfarkoster. I nuläget har Försvarsmakten operativa AUV-system i träningssammanhang, men de används i många andra länder och har bland annat använts för minröjning och kartering av hamnområden. Ett exempel på en liten, bärbar UUV är Remus 100 som väger 37 kg. Den har flera sensorer för bland annat havsbottenkartering. Ett exempel på en större UUV är Hugin 1000 och väger uppemot ett och ett halvt ton och kan dyka upp till 6000 m. Den kan användas för ISR, minsökning med mera. En översikt över militära tillämpningar av obemannade undervattensfarkoster finns i Rantakokko m.fl. [45].

De amerikanska benämningarna LDUUV (Large Displacement Unmanned Underwater Vehicle) eller XLUUV (Extra Large Unmanned Underwater Vehicle) är benämningar på undervattensfarkoster i den största klassen och uppåt. Ett exempel på en



(a) Bilden visar en ROV/AUV som används av Försvarsmakten för minröjning. (Foto: Okänd fotograf, Fjärde sjöstridsflottiljen/Försvarsmakten.)



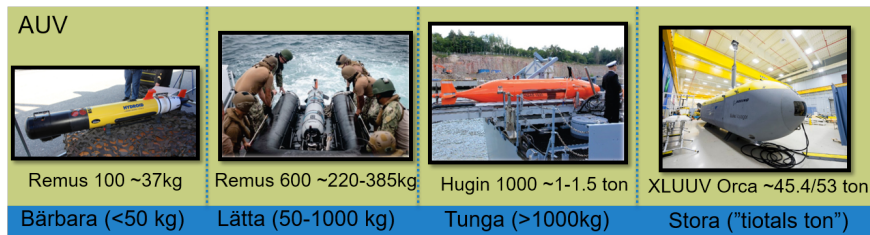
(b) Bilden visar en ROV som har använts för inspektion av installationer på havsbotten vid de norska oljefälten i Nordsjön. Foto: Karin Kraft (FOI)



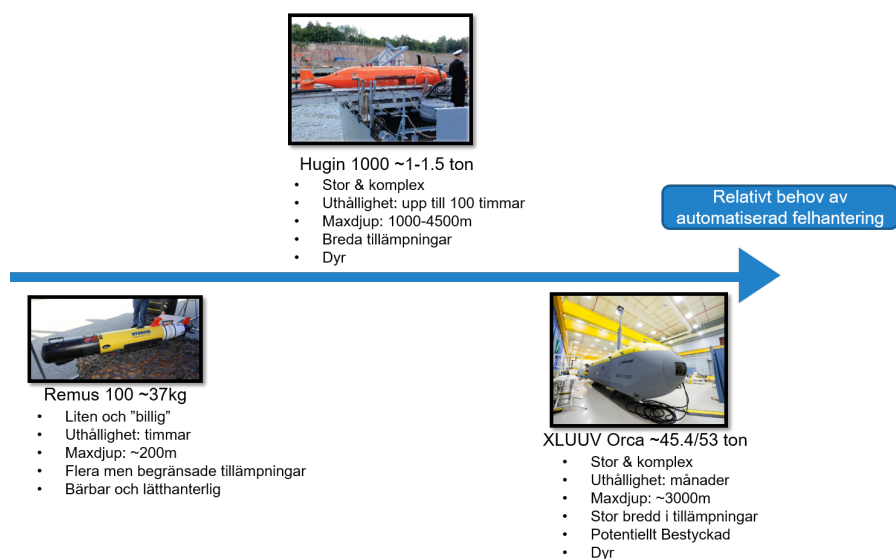
(c) Bilden visar en ROV som har använts för att utföra installationer och underhållsarbeten på ned till 1 000 m djup på de norska oljefälten i Nordsjön. Foto: Karin Kraft

Figur 3.1: På bilderna finns exempel på olika typer av ROV, för både militärt och civilt bruk.

XLUUV är Orca som planeras kunna utföra minläggning, ubåtsjakt, telekrig, bekämpning av ytfartyg, spaning med mera. Den har en längd på 15,5 m utan verkansdel och 26 m med [46,47].



Figur 3.2: Exempel på ROV:er och UAV:er som används militärt eller civilt i de olika viktklasserna. Tillämpningarna är många däribland kartering av havsbotten, minröjning och verkan mot ytfarkoster och andra ubåtar. Alternativ kategoriindelning kan göras utifrån diameter på skrovet. Data hämtad från [45, 48–50]. (Foton: **Remus 100** - Public domain, **Remus 600** - Mass Communication Specialist 2nd Class Cole C. Pielop, US Navy, public domain, **Hugin 1000** - MKFI, public domain, **XLUV Orca** - Boeing, public domain)



Figur 3.3: Bilden visar behov av automatiserad felhantering för AUV:er. Data hämtad från [45, 48, 49]. (Foton: **Remus 100** - Public domain, **Remus 600** - Mass Communication Specialist 2nd Class Cole C. Pielop, US Navy, public domain, **Hugin 1000** - MKFI, public domain, **XLUV Orca** - Boeing, public domain)

De militära tillämpningar där AUV:er används idag är

- kartering av havsbotten,
- mätningar av hydroakustiska förhållanden,
- målfarkost,
- minröjning (klassificering och neutralisering).

Områden där AUV:er är och kommer att vara verksamma i framtiden är

- informationsinhämtning, spaning och övervakning,
- minröjning och -fällning,
- ubåtsjakt,
- vilseledning,

- skydd av hamnar.

Detta kräver en utveckling av tekniken avseende autonomi, energisystem med mera. Kraven på sensorer och kommunikationsutrustning är speciella eftersom undervattensmiljöer är svåra att jobba i. För att uppnå önskad perceptions- och kommunikationsförmåga krävs speciellutvecklad hårdvara samt avancerad signalbehandling. En aktuell översikt över AUV:er för militära tillämpningar som övervakning och minröjning från 2020 finns i [51].

Undervattensfarkoster har stor variation i uthållighet från enstaka timmar till flera månader. Navigationssystemen är ofta komplexa och fel i dem kan leda till förlust av farkosten. Med högre uthållighet, ökad vikt, mängd uppgifter och eventuell bestyckning ökar behovet av automatiserad felhantering. I figur 3.3 illustreras detta resonemang med några exempelfarkoster i drift eller snart i drift.

3.2 Identifiering av riskkällor

Det kan uppstå fel i alla sensorer som finns på undervattensfarkosten. Vilka sensorer som finns på en specifik farkost varierar, men de tekniska specifikationerna för specifika AUV:er ger mer information, exempelvis för HUGIN[®] eller mer generellt från FMV [48, 50]. Utöver sensorfel kan fel även uppstå på roder, framdrivningen, på fenor och i annan hårdvara eller existera i mjukvara ombord. I tabell 3.1 finns en sammanställning av olika fel, både sådana som inträffat hos AUV:er under uppdrag och tänkbara fel. Felen är av sådan natur att om de inte hanteras och lindras kan det leda till att farkosten förloras eller åtminstone inte kan slutföra sitt uppdrag.

Enligt [52] kan framdrivningsfel kategoriseras i två klasser, interna fel eller externa fel. De externa är de vanligaste, exempelvis en propeller som blockerats av ett föremål till exempel fisknät eller tång, och för att klassificeras som både felsäkert och robust måste båda dessa typer av fel hanteras proaktivt eller reaktivt.

Brito m.fl. [53] listar 63 fel och incidenter i sitt förslag på metod för riskanalys. Dessa har uppträtt under drift av den obemannade undervattensfarkosten Autosub3 i extrema miljöer [53]. Felen inkluderar bland annat nätverksfel, fel på "Return Home"-funktion, fel i framdrivning och kraftförsörjning och fel på GPS.

3.3 Metodöversikt

I följande kapitel redogörs för exempel på olika metoder inom detektion, diagnostik samt hantering av fel för obemannade undervattensfarkoster.

Tabell 3.1: En lista över fel hos en AUV sammanställd från Antonelli och Wang m.fl. [54, 55].

Fel	beskrivning
Sensorfel	För alla sensorer ombord på AUV:n kan felet bestå av output 0 eller extern störning av signal.
Kommunikationsfel (failure)	Ställdonet för styrning kan inte kommunicera normalt med mjukvaran ombord.
Rodret fastnat	Rodret fastnar i en fix position vilket påverkar manövrerbarheten.
Skada på regleryta	Mekanisk påverkan på rodrets reglerytor vilket påverkar styreffekten.
Felinriktning	Rodrets neutralposition påverkad på grund av glapp eller strukturförändring.
Översvämmad motor	Översvämmad motor ger elfel som kan ge högre bladrotation och därför högre framdrivning än den önskade. Det kan även leda till kortslutning och stopp i framdriften.
Rotorfel	Kombination av fel gör att propellern slutar rotera och framdrivningen slutar fungera.
Fena som förlorats eller fastnat	Påverkan på fena ger en minskad styrförmåga.
Hårdvaru-/mjukvarufel	Fel i mjukvara eller hårdvara ombord.
Propellerfel	Fysisk påverkan på propeller vilket minskar framdrivningen.

Antonelli m.fl. [56] ger en introduktion till undervattensrobotik inkluderande feldektion och feldiagnostik från ett AUV-perspektiv och vilka utmaningar som finns, vilka sensorer som finns ombord varierar mellan olika farkoster och hur avancerade de är. Antonelli presenterar en lista över olika variabler som sensorer på en AUV kan tänkas mäta:

- Linjär acceleration och vinkelhastighet.
- Djup.
- Avstånd från hinder.
- Avstånd från botten.
- Hastighet relativt botten.
- Havsströmmar.
- Position på ytan.
- Orientering.
- Absolut position i känt område.
- Vattenströmning i flera mätpunkter.

I en annan artikel av Antonelli [57] ges en översikt över vid tidpunkten aktuella strategier för feltolerans, feldetektion och feldiagnostik för autonoma undervattensfarkoster. Enligt [58] är de system som finns implementerade på AUV:er för att skydda mot fel på systemnivå i form av regelbaserade stoppsystem som sätter in vid förutbestämda händelser, exempelvis då vissa delsystem slutar att svara. Metoderna kräver generellt god kännedom om miljön och uppdraget för att kunna förutse allt som kan inträffa. Sådana system fungerar till viss del, men fallerar ofta vid oförutsedda händelser.

3.3.1 Fellokalisering med felträd och sökmetoder

En fellokaliseringsmetod för ställdon, propellrar och roder, för en torpedformad AUV presenteras av Liu m.fl. [59]. Felträdsanalys (FTA) används för att lokalisera var felet har uppstått. Genom att sätta upp modellen för farkostens dynamik och hur fel på propeller, roder och andra fel på utsidan av skrovet påverkar farkosten kan felträdet användas till att hitta det ställdon eller kombination av ställdon som uppvisar fel. När området för felet har lokaliserats skickas specifika signaler till de berörda ställdonen för att identifiera exakt vilket av dem det är fel på. Metoden motiveras med att fel-signaler är oklara och att fel uppstår i flera komponenter samtidigt. Metoden testas även med simuleringar, men det stora arbetet som presenteras är uppställningen av felträden och deras logik.

Även Xiang m.fl. [60] använder sig av felträdsanalys (FTA) för att deduktivt göra en felanalys där ett felaktigt systemtillstånd analyseras med boolsk logik för att kombinera olika lågnivåhändelser som tillsammans kan orsaka ett fel. Sedan används ett neuronät för att göra en riskanalys och en riskvärdering med hänsyn till hela systemet. Detta ligger sedan till grund för beslut om åtgärder som baseras på expertkunskaper hos en operatör. Metoden har testats på en verklig farkost. En översikt över analys med hjälp av felträd finns i Kabirs artikel från 2017 [61].

Ernits m.fl. [62] beskriver en metod för feldetektion på en AUV och det uppdrag den utför. Det är en modellbaserad diagnosmetod som bygger på tillgång till AUV:ns beteende under tidigare uppdrag. Ett befintligt diagnosystem som ursprungligen är utvecklat för rymdtillämpningar används för AUV:n. När systemet fungerar som det ska använder metoden alla kommandon som sänds till systemet för att uppdatera modellen och jämför dem med observationerna från det verkliga systemet. Modellen är en digital tvilling av det fysiska systemet. Om de skiljer sig söker metoden igenom kommandon i modellen för att hitta alternativa vägar som systemet kan ha tagit för att komma till det nuvarande tillståndet. De komponenter som orsakat vägen till det felaktiga tillståndet kan därmed klassificeras som felaktiga. Ingen felhantering gjordes och testfarkosten hade heller ingen redundans. Ernits m.fl. hävdar dock att det går att ta sig till ett tillstånd som lindrar felet eftersom metoder för detta har använts i rymdtillämpningarna. Den felindring som är möjlig på den verkliga testfarkosten är att låta den gå upp i ytläge, för att inte förlora farkosten. Systemet är testat på Autosub 6000 som är en AUV avsedd för att samla vetenskapliga data från djuphavet i upp till 48 timmar på djup ned till 6000 m. Under tidigare uppdrag av Autosub 6000 och dess föregångare har det uppstått fel i olika delsystem som till exempel ställdon och roder, navigeringssensorer, batterier, mät- och analysinstrument med mera.

3.3.2 Arkitektur för autonom hantering av globala fel

Seto m.fl. [63] ger en beskrivning av övervägningar som behöver göras för att implementera feltolerans för autonoma undervattensfarkoster som ska vara ute på långa uppdrag. I artikeln beskrivs en arkitektur som kan behövas ombord på dessa farkoster. Specifikt bör en modul för övervakning och diagnos finnas som gör modeller av sensorer och delsystem så att tillståndet och prestandan kan uppskattas i realtid men

även predikteras. Denna information behövs sedan i modulen för planering och beslut. Specifikt ska modulen för övervakning och diagnos kunna skicka rekommendationer till planerings- och beslutssystemet i händelse av fel så att system och sensorer kan rekonfigureras korrekt för att säkerställa att uppdraget fullföljs, eller att haveri undviks. Det hävdas också att AUV:er levereras med grundläggande klassisk feldetektion och feldiagnostik för händelser som långsamma läckor och fel i enstaka sensorer, men att globala fel inte kan hanteras. Nya system, med förmåga att fatta egna beslut och förstå farkostens hälsa på en övergripande nivå, behöver implementeras för att lösa dessa fel. På en generell nivå föreslås ett dynamiskt bayesianskt nätverk (DBN) som metod för detta, men inga detaljer presenteras.

3.3.3 Felhanteringsmetoder för roder- och framdrivningsfel

Zhu m.fl. [52] presenterar en aktiv feltolerant metod för plötsliga framdrivningsfel och svåridentifierade fel. I feldiagnosystemet används ett neuronnät för att identifiera felet. Metoden beskrivs allmänt men enligt den arkitektur som visas används en modell för den normala framdrivningen och nätet tränas på att identifiera avvikelser från denna. När felet är identifierat görs en omallokering av framdrivningen för att AUV:n ska fungera på ett önskvärt sätt. Wang m.fl. [64] presenterar en liknande metod, baserad på ett neuronnät, för feltolerant styrning av undervattensfarkoster med framdrivningsfel.

Freddi m.fl. [65] har utvecklat en metod för feldetektion i ett delsystem på en ROV som styrs av en operatör. Metoden är en residualmetod som genom att använda en s.k. Thau-observatör genererar residualer mellan uppmätt och skattat tillstånd utifrån modellen av farkosten med avseende på hastighet, gungning, girning och svallning. Med metoden identifieras fel på propellrarna i en implementering i Matlab och Simulink.

Wang m.fl. [55] presenterar en feltolerant metod för styrning av en AUV med X-konfigurerat roder. Sådana roder har enligt författarna visat sig mer robusta och ge bättre manövringsförmåga jämfört med korskonfigurerade roder. Feldiagnosen i metoden görs med ett optimerat partikelfilter som uppskattar rodereffekten i kombination med ett Kalmanfilter. Sedan bestäms feltypen med deduktion och feltolerant reglering sker med en optimeringsmetod som minimerar allokeringsfel och styrsignaler. Metoden testas i en släpränna.

3.3.4 Datadriven metod för övervakning av systemhälsa

Raanan m.fl. [58] har utvecklat en feldetektionsmetod för en AUV, kallad Bayesiansk icke-parametrisk "topic modelling technique". Metoden är datadriven och effektiv på ostrukturerade dataset. Den bygger en modell av farkostens beteende utifrån data från tidigare uppdrag, inklusive feldata d.v.s. data om när och var fel inträffar samt påföljder. Modellen används sedan online för att klassificera fel som uppstår med en närmsta grannarmetod. En fördel är att metoden inkluderar data från olika domäner och automatiskt inför de klasser som är tillgängliga i datat utan något införande av etiketter. Det gör att det kontinuerligt kan införas data från nya uppdrag i modellen. Den kan även användas på data från hela systemet utan att inkludera modeller för delsystem. Detta skiljer metoden från andra datadrivna metoder som SVM, neuronnät och bayesianska nätverk. Författarna hävdar att metoden fungerar bättre på oförutsedda fel än andra metoder.

3.4 Slutsatser

Obemannade undervattensfarkoster har varit operativa sedan 1960-talet och utvecklingen med att göra dem felsäkra och effektivare har kommit långt. Litteraturöversikten indikerar att grundläggande feldetektion och felsäkerhetssystem ofta finns im-

plementerade för fel i enstaka delsystem, men inte för den övergripande farkosten. Med utvecklingen av LDUUV- och XLUUV:er med nettovikter på uppemot 54 ton, uthållighetskrav på månader och som ska kunna vara bestyckade kommer behovet synliggöras än tydligare. Det finns utvecklade och implementerade felsäkerhetssystem avsedda för specifika uppdrag som bygger på felträdsmetoder där farkosten har programmerats i förväg att bete sig på ett visst sätt i bestämda situationer. Problemet med dem är att de inte är generella vilket begränsar farkostens tillämpningar i nya situationer. Hanteringen av oförutsedda situationer och samtidiga fel i olika delsystem är inte implementerat i kommersiella system.

4 Obemannade ytfarkoster

Obemannade ytfarkoster benämns vanligtvis USV, men även ibland ASV, och står för Unmanned Surface Vehicles/Vessels respektive Autonomous Surface Vehicles/Vessels. Uppdelningen mellan farkoster som styrs av en operatör och de som agerar autonomt är inte lika tydlig som för undervattensfarkoster. Det finns flera användningsområden för obemannade farkoster och utvecklingen sker inom områden som oceangrafi och väderobservationer, frakt av varor, passagerartrafik och för militära ändamål. Obemannade ytfartyg har använts militärt sedan andra världskriget, men under 1990-talet tog utvecklingen fart dels tack vare teknikutvecklingen, dels eftersom inriktningen på krigföring gick mot antiterrorism och kustnära uppdrag. Den militära tänkta användningen av USV:er och ASV:er är bland annat inom logistik, spaning, datainsamling, minröjning, men även som framskjutna sensorer och som rörliga mål för verkanstest och liknande. Lyckade insatser med USV under det andra Gulfkriget ökade intresset för utveckling av USV i den amerikanska marinen [66] och det pågår mycket teknik- och metodutveckling inom militärmakter världen över, däribland i USA, Kina, Israel med mera.

4.1 Domänöversikt: Status, Exempel och nyckelegenskaper

De senaste åren har utvecklingen avancerat både inom den civila sektorn och den militära. Civilt drivs utvecklingen av elektrifiering och effektivisering av både frakt- och persontransporter. Dessa sker ofta i kustnära miljöer med mycket trafik av varierande storlek. Ett exempel på detta är ett autonomt fraktfartyg i Oslofjorden som har testats på rutten Horten-Oslo, se figur 4.1a.



(a) Yara Birkeland



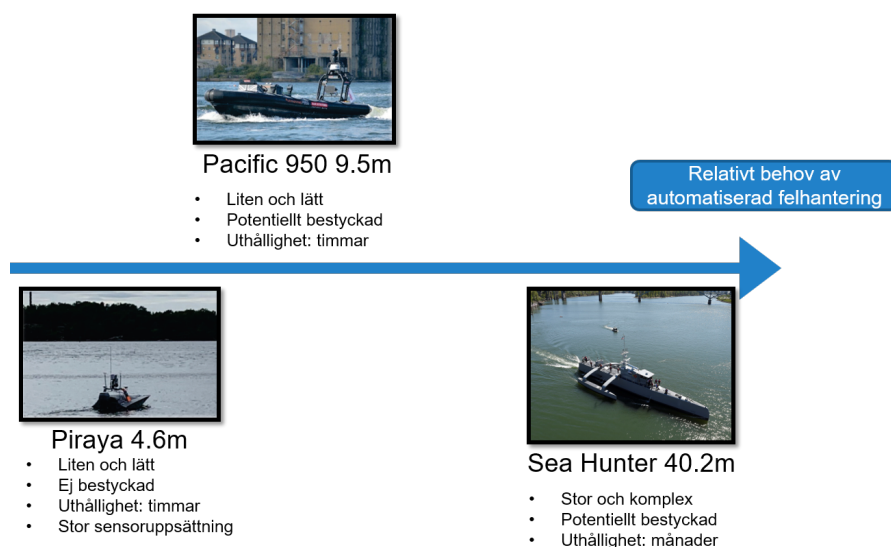
(b) Saildrone.

Figur 4.1: I den vänstra bilden finns ett autonomt lastfartyg som testas i Oslofjorden för att frakta containrar mellan Horten och Oslo. Till höger finns en segeldrönare som används i Röda havet av den amerikanska marinen. (Foton: **Norskt lastfartyg** - Knut Brevik Andersen, **segeldrönare** - Wilhelmsen Ship Service/Cpl Deandre Dawkins/US Navy)

För militära tillämpningar finns det program och testverksamhet för att införa operativa autonoma farkoster av olika storlekar och typer, till exempel det brittiska programmet NavyX [67]. En storleksindelning ses i figur 4.2. USA har operativa minröjningsfartyg i klassen SUSV och under de närmaste åren finns planer för att bygga stora bestyckade USV:er med plats för upp till 32 robotar för land- och sjömål [68]. Hittills har tester på den klassen utförts för två ombyggda handelsfartyg, den så kallade Ghost Fleet Overlord [69]. Fartyget, som finns på bild i figur 4.2 längst till höger har genomfört nästan helt autonoma färder mellan Stilla havet och Atlanten genom



Figur 4.2: Exempel på obemannade ytfarkoster från den minsta klassen till den största. Viktklasser hämtade från [70]. (Foto: **Piraya** - FOI, **Pacific 950** - Alamy Stock Photo, **Seahunter**, **Ghost Fleet Overlord ship** - U.S. Navy, U.S. Navy/John F. Williams, Public Domain)



Figur 4.3: Figuren visar behov av automatiserad felhantering i USV:er. Data om farkosterna taget från [45]. (Foto: **Piraya** - FOI, **Pacific 950** - Alamy Stock Photo, **Seahunter** - U.S. Navy, U.S. Navy/John F. Williams, Public Domain)

Panamakanalen.

Sedan 2016 finns Sea Hunter som är en medelstor USV framtagen av DARPA och ONR (Office of Naval Research) för ubåtsjakt. Fartyget är framtaget för att testa tekniker och för att överföra teknik till operationella förmågor.

Det finns även en typ av USV:er som kallas segeldrönare, figur 4.1b. Den testas både civilt och militärt för datainsamling och patrullering och är utrustad med AI-teknik och solceller för energiförsörjning av datorer och sensorer. Farkosten kan vara ute på upp till ett år långa uppdrag [71] och det kräver att delsystemen är felsäkra och kan hantera oförutsedda situationer.

För ytfarkoster är det viktigt att uppfylla de internationella sjövägsreglerna vilket bl.a. innebär att undvika kollision [72]. En viktig del för en autonom ytfarkost är därför att identifiera hinder i banan och planera om ruten utifrån dessa hinder och deras rörelse. Sjövägsreglerna är formulerade för att tolkas av människor och är inte anpassade för att översättas direkt till regler som en maskin kan förstå. Liu m.fl., Savitz m.fl. och Patterson m.fl. presenterar översikter över användningen och utvecklingen av, och utmaningar inom obemannade ytfarkoster samt mognadsgrad och fördelar med USV:er i förhållande till andra plattformar för olika uppdrag [73–75].

Elkins m.fl. [76] beskriver ett projekt för att ta fram sensorer, hårdvara och mjukvara som möjliggör autonomi på ett obemannat ytfartyg. Utvecklingen av sensorer för ytfartyget inkluderade kameror, radar, lidar, kompass och GPS. När systemet utvecklades och testades skedde det iterativt och i verklig miljö med en tekniker och en nödbemannning ombord. Systemet använder multipla sensorer för att få redundans i hur farkosten uppfattar den omgivande miljön. Systemet fusionerar data från de olika sensorerna ombord och korrelerar den med data från exempelvis digitala sjökort och AIS-system. Systemet är paketerat så att det är farkostoberoende och kan flyttas mellan fartyg och kopplas in till befintliga sensorer. Artikelns beskriver flera test av autonoma uppdrag. Projektet Mayflower 400 [77] har utvecklat en farkost för att helt autonomt kunna korsa Atlanten. Farkosten drivs av solenergi och är utrustad med en AI-kapten som självständigt fattar beslut om hur olika situationer ska hanteras. Fartyget är utrustad med radar som detekterar farkoster och hinder under färdvägen och en algoritm som är tränad att känna igen olika farkoster och hinder. Utifrån AIS-data om korsande fartygs rutt och hastighet, samt väderdata och elektroniska sjökort görs automatiska omplaneringar av rutt för att undvika kollision.

Dynamiken hos en USV kan approximeras med rörelse i två riktningar samt en rotationsvinkel. Vanligtvis har farkosten enbart två styrdon, propeller och roder, eller två propellrar. Farkosten är därför ofta understyrd och har fler frihetsgrader än styrdon. Rörelserna i havet med vågor och vind är icke-linjära och SMC används ofta i regelalgoritmer för att följa en bana i lugnt vatten och de modifieras för att hantera störningar vid hårt väder. Inom det marina området är det betydligt vanligare att använda modellbaserade metoder för felsäkerhet än datadrivna [78].

Obemannade ytfarkoster har lång uthållighet och de är ofta försedda med ett stort antal sensorer. De tänkta uppdragen är många och börjar inkludera ytstrid i allt högre grad. Behovet av automatiserad feldetektion, feldiagnostik och felhantering ökar med ökade krav på uthållighet, mängd uppgifter och om farkosten är bestyckad. En illustration av detta resonemang kan ses i figur 4.3.

4.2 Identifiering av riskkällor

I Naeem m.fl. [79] anges att 60% av de olyckor som skedde till sjöss med USV:er fram till 2012 orsakades av kollisioner med olika hinder som exempelvis grund, fiskeredskap och andra farkoster. Det är därför viktigt att det finns väl fungerande anti-kollisionssystem och system för att omplanera rutten då ett hinder har detekterats. Enligt Liu m.fl. [73] har den mesta forskningen fokuserat på att undvika hinder på ytan till skillnad från under ytan. En äldre studie från 1972 visade att orsaken till 56% av kollisionerna var brott mot sjövägsreglerna [72] genom den mänskliga faktorn. För att alternativa manövrar som undviker kollision ska kunna föreslås bör reglerna och de vanligaste kollisionsscenarierna, som frontal och korsande omkörning, vara implementerade. Författarna presenterar strategier för att undvika kollision och planera om rutten baserat på sjövägsreglerna. För övrigt kan fel kan uppstå i sensorer, ställdon och framdrivning precis som för farkoster i de andra domänerna. För en mer utförlig beskrivning av dessa hänvisas till övriga kapitel.

4.3 Metodöversikt

I följande text ges några exempel på metoder som kollisionsundvikning, ruttplanering samt samtidiga fel i ställdon och intern kommunikation. Metoderna är både datadrivna och modellbaserade. Modellbaserade metoder har haft stort inflytande historiskt. Detta kan även ses i de andra domänerna och beror sannolikt på att tekniken är äldre och mer beprövad. Datadrivna metoder blir vanligare.

4.3.1 Datadriven metod för feldetektion

Även om det finns en matematisk modell av en farkost är det svårt att parametersätta den, resonerar Zanolini m.fl. [78] och de anser att mer fokus borde läggas på modellfria och datadrivna metoder. Zanolini m.fl. presenterar en PCA-metod (Principal Component Analysis) för feldetektion och felisolering av vanliga fel som orsakas av den omgivande miljön. Felen uppstår under fältuppdrag och påverkar farkostens manövrerbarhet. Metoden testas på data från en experimentell USV. Alla beräkningar kopplat till styrning utförs ombord och kommunikationslänken till land används enbart för att ta emot nya uppdrag. I en simulering identifieras fel genom att jämföra residualer från ett normalfall med residualer från simuleringen och se vilka som överstiger tillåtna tröskelvärden. Metoden testas på data från en manöver där farkosten krockar med ett undervattenshinder.

4.3.2 Kollisionsundvikning och ruttplanering

Författarna i [80] respektive [81] presenterar metoder för planering av rutt för ett autonomt ytfartyg. Kim K m.fl. i [81] använder sig av en genetisk algoritm för att bestämma de optimala banorna som undviker fasta hinder med hänsyn till omgivningen, det vill säga vågor och strömmar i havet. Banorna är tidsoptimala. Kim H m.fl. i [80] föreslår en snabbare algoritm som går att använda i realtid och som tar hänsyn till farkostens prestanda.

Mahini m.fl. [82] presenterar experiment och resultat för en autonom farkost. Experimentet har utförts i en bassäng där farkosten utsätts för både starka vågor och vindar för att simulera en verklig miljö och den ska nå ett specifikt mål, både fast och rörligt, och samtidigt undvika hinder på vägen. Farkostens och hindrets position detekteras med en kamera. Metoden för att undvika kollision finns beskriven i [83] och är baserad på en iterativ lösning av en differentialekvation där lösningar med hindren på banan ej är tillåtna.

Qin m.fl. [84] presenterar ett reglerramverk för autonom navigation av en understyrd USV-svärm. Algoritmen har automatisk målföljning, undvikande av hinder och kollision mellan svärmmedlemmar. Ruttplaneringen använder sig av potentialmetoden och styrsignalerna designas med SMC.

4.3.3 Reglermetod för fel i ställdon och kommunikationsfel

Zhou m.fl. [85] presenterar en reglermetod för att uppskatta ställdonsfel och observera tillstånden samtidigt som det antas finnas fel i nätverkskommunikation. Uppskattningen av felen används sedan för att analytisk kompensera fel i ställdonen med en feltolerant reglermetod som stabiliserar rullning, stampning och girning.

4.4 Slutsatser

Huvudfokus i felhanteringen för ytfartyg är att undvika kollision för att uppfylla sjölagar. Fokus i forskningen har därför varit på att identifiera hinder och att planera om rutten i realtid. I och med tillgång till AIS-data för fartyg inom närområdet kan hinder undvikas men kompletterande system som radar kan vara viktiga om AIS inte är aktivt i en krigssituation. Det finns även möjlighet att väga in väderprognoser i ruttplaneringen men hänsyn behöver då tas till prognosens osäkerhet. Militära ytfarkoster ska även kunna operera i en telestörd miljö vilket ställer höga krav på feltolerant navigation med flera verktyg för positionering.

Då flera tillämpningar, både civila och militära, har inkluderat varierande grad av AI-funktioner och inte bara regelstyrt och hårdkodat agerande i uppdrag behövs ett gediget arbete med att felsäkra dessa samt analysera risker på en högre, operativ nivå, där

farkosterna kan tänkas verka. Systemen bör även skyddas från antagonister som avser att förstöra eller påverka beslutssystemen.

Mer om trender för militära USV kan läsas om i [86] där en trend är att mindre USV:er utan bestyckning får mer uppmärksamhet. Andra intressanta trender är att AI med kontinuerlig inlärning kommer att inkluderas i allt högre grad i antikollisions-system, koncept som marina svärmar och moderskepp kommer forskas mer om, samt att USV:ers omvärldsperception tros utökas genom utvecklingen på sensorsidan. Det anges att många ytfartyg använder sig av någon sorts AI. När sådana system införs i militära operativa farkoster behöver metoderna vara förklarbara och transparenta för att göra det möjligt att säkerställa att systemet är felsäkert i den miljö, och med de uppgifter det är utformat för.

5 Obemannade markgående farkoster

Markdomänen består av en stor bredd av fysiska miljöer, operationella scenarier och tekniska system. Den fysiska miljön varierar stort och innehåller allt från snö, lera och tät växtlighet, till sandöken, stenrösen och träsk. Både väder och ljusförhållanden ökar komplexiteten ytterligare. Enligt Pementel m.fl., Sinha m.fl. och Reyes m.fl. [5,87,88] gör detta att utformningen av generella marksystem är oerhört svårt och det ställer höga krav på redundans av metoder för olika uppgifter. I markdomänen sker spaning, logistik, direktverkan, indirekt verkan, telekrig med mera, och farkosterna som kan utföra dessa uppgifter ser ofta olika ut men det finns även farkoster med modulära/utbytbara nyttolaster. Konsekvenserna vid ett haveri, det vill säga förlust av säkerhets- eller förmågekritisk funktion, är olika beroende på storlek på farkosten, om farkosten är bestyckad eller inte och hur närmiljön ser ut. Ett nödstopp är ibland mycket olämpligt och kan förvärra en situation, exempelvis spärra en väg för reträtt. Det gör att kraven på integration av felsäkerhet varierar.

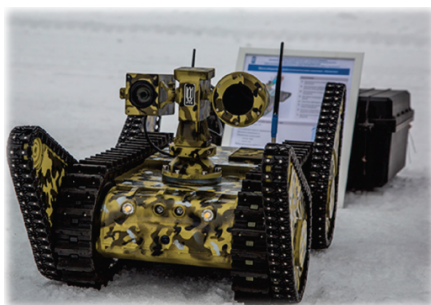
5.1 Domänöversikt: Status, exempel och nyckelegenskaper

I figur 5.1 och 5.2 visas exempel på några typer av obemannade farkoster som är operativa i markdomänen med skilda förutsättningar och uppgifter. De har olika riskkällor och konsekvenser av fel och har därför helt skilda krav på säkerhetssystemen. Detta kapitel är avgränsat till att endast redogöra för fel som inträffar i basförmågorna hos ett obemannat markgående fordon med delvis autonoma tekniker. I denna avgränsning ingår förflyttning, navigering, perception, kommunikation och planering.

En ytfarkost till sjöss bör kunna skilja land från andra farkoster och planera rutter

Tabell 5.1: Exempel på klassificering av UGV:er baserat på vikt [89].

Klass	vikt
Lätt	<100 kg
Medeltung	100 kg - 10 t
Tung	>10 t



(a) Kapitan UGV



(b) Packbot UGV

Figur 5.1: Bilderna visar exempel på lätta UGV:er det vill säga sådana som väger mindre än 100 kg. Till vänster visas en rysk Kapitan UGV och till höger en Packbot UGV. Foto: Mil.ru / Wikimedia Commons; Anna Norén, Försvarsmakten.



(a) Uran-9 UGV

(b) VIKHR UGV

Figur 5.2: Exempel på tunga UGV:er d.v.s. tyngre än 10 ton. Vanliga uppgifter är minröjning, minbrytning, fältarbete och verkan [89]. Till vänster visas en rysk Uran-9, och till höger visas en rysk VIKHR UGV. Foto: Vitaly Kuzmin / Wikimedia Commons



Packbot ~24kg



Kapitan ~35kg

- Små och lätta
- Helelektriska
- Uthållighet: timmar
- Billiga
- Inte bestyckade

Relativt behov av
automatiserad felhantering



Uran-9 ~12 ton

- Stor och tung
- Uthållighet: timmar
- dyr
- Tungt beväpnad

Figur 5.3: Bilden visar markfarkosters behov av felhantering med några exempelsystem som är i drift idag. Data är hämtad från [89]. (Foto: **Kapitan** - Mil.ru / Wikimedia Commons, **Packbot** - Anna Norén, Försvarsmakten, **Uran-9** - Vitaly Kuzmin / Wikimedia Commons)

för att undvika kollision. Ett obemannat autonomt markgående fordon behöver kunna skilja på människa, fordon, vegetation, sten, hus, vattendrag, väg med mera. Då dessa hinder ofta uppkommer närmare marksystemet än de gör i luft- och sjödomänen är tidshorisonterna kortare och säkerhetsmarginalerna mindre. Detta begränsar hastigheten för UGV:er vid körning i terräng. Perceptionssystemen i markfarkoster ställs därför inför andra krav än hos system i de andra domänerna. Konsekvenserna för en missad detektion av hinder kan ha allvarliga konsekvenser [5]. Enligt [87] är tillförlitligheten för satellitbaserade positioneringssystemet även sämre för marksystem vilket ställer högre krav på systemets tröghetsnavigering och andra stödjande navigeringssystem som lidar- eller kamerabaserad positionering och kartering [88]. Mycket forskning inom perception för autonoma markfordon görs inom den civila sektorn med stora aktörer som Tesla, Volvo Cars, Waymo, Toyota och GM, enligt Singh m.fl. [90] och nya metoder inom maskininlärning tillämpas för att öka tillförlitligheten hos systemen. En starkt drivande faktor bakom automatiseringen av markfordon inom det civila är de förutspådda förbättringarna i trafiken vad gäller säkerhet och belastning på vägarna. Smartare ruttplanering och nyckelteknologier som platooning där trådlöst anslutna lastbilar kör i tågliknande kolonner tros var viktigt i utvecklingen. Syftet är att minimera luftmotstånd och således minska energiåtgången för fordonen. Ett annat syfte är att minska avtrycket på infrastrukturen genom att utnyttja mindre totalyta på vägen. [90–92]

Inom den militära sektorn hävdar Roth m.fl. [93] att de huvudsakliga vinsterna från automatisering av markfordon är ökad tillgänglighet, minskade utgifter från träning av personal samt minskad risk för förlust av människoliv. UGV:er har låg mognadsgrad och det finns många problem kvar att lösa inom exempelvis robust navigering, framkomlighetsbedömning i komplexa miljöer med varierande terräng och felsäkerhet. Det pågår en internationell kapprustning av tunga UGV:er för markstrid mellan främst USA, Ryssland och Kina och teknikutvecklingen går snabbt. Ett ökat behov har identifierats för detektion, diagnostik och hantering av fel när de autonoma systemen växer i komplexitet och människor har en mindre roll [8, 89].

5.2 Identifiering av riskkällor

Den korta reaktionstiden som krävs för autonoma markfordon ökar risken för att vissa fel får allvarliga påföljder. Många fel som inträffar i ett markfordon är dock ofta predikterbara. Med stokastiska modeller kan modeller för felpropagering användas för att förutspå situationer där fel får allvarliga konsekvenser. Syftet är ofta att minimera kostnader associerade med underhåll genom att utnyttja fordonet maximalt [94–96]. Mekaniska komponenter och kopplingar nöts ut med tiden och står för de flesta av felen i bilar och lastbilar. I elektriska fordon förekommer sådana fel mer sällan eftersom elmotorer har färre rörliga delar och växling regleras kontinuerligt till skillnad från i förbränningsmotorer där det regleras i diskreta steg. Mekaniska komponenter nöts ut snabbare i elbilar än i exempelvis industrirobotar eller små UGV:er. Detta beror framförallt på att elbilar har en högre driftstemperatur i motorn [94]. Utöver detta förekommer elfel i helelektriska fordon och fordon med förbränningsmotor. Elfel som påverkar kritiska autonoma funktioner i autonoma fordon som kör fort kan ha katastrofala effekter. Isolerade elfel, som en trasig kabel i ett delsystem, påverkar endast lokalt men fel i den centrala elförsörjningen eller transmission påverkar hela fordonet. Mycket forskning bedrivs därför för att öka tillförlitligheten i bland annat batterier avsedda för höga uteffekter.

I en metastudie sammanställer Carlson m.fl. [97] slutsatserna från tio fältstudier där fel i UGV:er studerades. Syftet var att kartlägga varför UGV:er havererar ute i fält. Fordonen hade en låg grad av autonomi och de fel som studerades var därför främst hårdvarufel, samt systemfel och inte fel i autonoma funktioner. En viktig slutsats från

studien var att det saknades ett gemensamt ramverk för utvärdering av felsäkerhet och gemensamma mätstorheter kopplade till fel. I flera av studierna definierades fel som det tillstånd då en händelse förhindrar uppdraget att fullföljas. Till exempel ansågs inte en havererande sensor som ett fel om uppdraget inte äventyrades av det. I andra studier definierades ett fel som ett degraderat tillstånd i ett system eller en funktion. Denna brist på överlapp mellan studiernas metoder försvårade arbetet med att dra gemensamma slutsatser från studierna. En annan viktig slutsats var att fel oftare förekom i egentillverkade komponenter än i massproducerade, inköpta komponenter. Fordonen som var designade från grunden hade en överrepresentation av hårdvarufel i form av ställdonsfel och andra elektromekaniska fel men färre fel i sensorerna och reglersystemen. Det motsatta var fallet hos fordonen som var utökade med obemannad funktionalitet exempelvis stridsvagn M1 Abrams. Anledningen till denna skillnad tros vara den höga mognadsgrad för hårdvaran i de senare fordonen vilket har uppnåtts genom den stora mängd iterationer som hårdvaran har genomgått. Ett annat anmärkningsvärt resultat var att 96% av ställdonsfelen förekom hos UGV:er med larvband. Ett ytterligare resultat var att en kraftig majoritet av felen föll under kategorin kritiska men reparerbara fel. Ett kritiskt fel förhindrade uppdragets fortlöpande men i och med att felen var snabbt reparerbara var påverkan relativt låg sett ur uppdragets perspektiv. Reparerbarheten är dock en funktion av uppdragets natur och är inte en generell egenskap hos systemet. I ett uppdrag där fordonet är otillgängligt kan det vara omöjligt att komma åt och reparera den.

Carlson m.fl. presenterar även de vanligaste riskkällorna i varje kategori av fysiska fel, d.v.s. ställdon, sensor, reglersystem, kraftförsörjning och kommunikation. Dessa utökas med vanliga fel som beskrivs i [5, 88, 94]. Dessa finns beskrivna i tabell 5.2.

Tabell 5.2: Vanliga riskkällor för UGV:er indelat i kategorierna ställdon, sensor, reglersystem, kraftförsörjning, kommunikation.

Felkategori	Fel/Riskkälla	Beskrivning
Ställdon		Framdrivning av markfordon. Elektronik och mekaniska komponenter som verkar i drivlinan samt system som interagerar med mark eller objekt t.ex. hjul och robotarm
	Fel i larvband	Larvband lossnar från hjul eller trasiga länkar. Många olika anledningar t.ex. uppsamling av material i systemet.
	Trasig mekanisk koppling	Stora moment och uppsamling av material i mekaniska komponenter genererar utnötning snabbt. Mekaniska växlar, kuggar och andra kopplingar går sönder snabbare om de är exponerade för väder, vind och främmande material.
Sensorer		Komponenter och system som samlar in data från omgivning eller internt i UGV:n.

	Trasig eller nedsatt kamera	Vibrationer försämrar bildkvaliteten, elektriska fel eller interaktioner med miljön kan förstöra kameran, nöta ut linsen eller blockera sikten.
	Trasig eller nedsatt lidar	Roterande lidar nöts ut efter lång användning och är känslig för stötar och vibrationer. Störningar i form av variation av kraftförsörjning eller störning kan ge upphov till asynkron mätning vilket försämrar prestandan i datan
	Fel i interna sensorer	IMU driver med tiden och hjulodometri kan ge feldata om hjul eller larvband slirar. GPS har lägre tillförlitlighet inomhus och vissa utomhusmiljöer.
Reglersystem		Kontroll av ställdon och processer men även fjärrstyrning av fordon.
	Fel i autonom styrning	Dåligt kalibrerade reglersystem, positiv återkoppling, wind-up, signalfel.
	Fel i manuell fjärrstyrning	Uteblivna styrinput, fördröjning i styrinput, överstyrning
Kraftförsörjning		System som genererar och överför kraft till och mellan system i fordonet.
	Energibrist	Slut på bränsle eller el. Resultat av normal användning av systemet eller oförutsedd läckage och bristande övervakning av nivåer.
	Transmissionfel	Utebliven leverans av energi i elsystem eller kraft, exempelvis frysta komponenter, igentäppt bränslefilter eller kraftigt försämrad verkningsgrad p.g.a friktion och utnötning i olika kopplingar.
Kommunikation		System i UGV:n som kommunicerar utåt och inåt.
	Tappad länk	Radiokommunikation försvagas eller tappas helt p.g.a. miljöfaktorer eller störning.
	Utebliven data	För låg bandbredd eller tillfälligt försvagad länk orsakar att information distorderas eller uteblir. Instabila signaler samt internt brus och dåliga kalibreringar kan även orsaka detta.

Metastudien Carlson m.fl. [97] behandlar främst ”klassiska” fel för fordon. Fel och riskkällor för autonoma och halvautonoma fordon är fel i högnivåfunktioner och klassificeras som perceptions- och navigeringsfel, uppdrags- och ruttplaneringsfel, säkerhetssystemfel eller reglerfel på högnivå. Enligt Pementel m.fl. [5] är perceptionsfel och reglerfel de mest säkerhetskritiska i autonoma fordon och framförallt i fordon avsedda för höghastighetskörning. I tabell 5.3 finns en sammanställning av vanliga fel i högnivåfunktioner för autonoma markfordon, sammanställda från [5, 87, 88, 94].

Tabell 5.3: Vanliga riskkällor för UGV:er indelat i kategorierna perception, uppdrag- och ruttplanering, styrsystem och felsäkerhetssystem. Felen är hämtade från litteratur om markfordon. Rotorsaker till högnivåfelen kan vara resultatet av fel på låg nivå till exempel sensorfel och kommunikationsfel. Orsaken till fel i högnivåfunktion är ofta svåra att bedöma och kan ibland uppstå från systematiska problem och ickebehandlade systeminteraktioner.

Felkategori	Fel/Riskkälla	Beskrivning
Perception		Länken mellan beslut och rå sensordata. Består av sensorfusion, objektingekänning och följning samt miljö- och hotvärdering.
	Fel i objektingekänning	Falskt positiva detektioner och missade detektioner. Dåligt tränat neuronät, icke hanterade miljöfaktorer eller dålig bildbehandling resulterar i felklassificering av objekt.
	Felbedömt hot eller risk	Dåligt dataunderlag eller dåliga modeller skapar missvisande bedömning i risk av t.ex. annalkande fordon eller främmande objekt.
	Navigeringsfel	Fel i positionering. Sensorfel, dålig fusionering av data, utdaterade kartor och drift i IMU är exempel på orsaker.
Uppdrag och rutt		Fel kopplade till beslutsfattande, rutt- och uppdragsplanering.
	Icke önskat risktagande	Ett beslut fattas i systemet som ökar risk för skada på omgivning och människor. Kan grunda sig i perceptionsfel, men även i felaktigt designade målfunktioner eller kommunikationsfel med mänsklig aktör.
	Uteblivet beslut	Kravställningar på beslutsfattande i kombination med svårbedömda situationer kan leda till att ett beslut inte fattas i systemet. En sådan händelse kan medföra konsekvenser beroende på strategi för överlämning av beslutsfattande.
	Icke optimal körning eller rutt	Icke optimalt beteende uppvisas med hänsyn till t.ex. energianvändning, riskminimering eller verkan. Perceptionsfel eller feldesignad målfunktion kan ge upphov till detta.

Styrssystem	Styrning av fordon på hög nivå till exempel hinderundvikning och filbyte.
Fel i autonom styrning	Utöver att planera en rutt behöver ett fordon kunna undvika oförutsedda hinder. Fel kan leda till haveri eller skada på omgivning.
Fel i säkerhetsåtgärder	Beslut som hanterar säkerheten för fordonet, men som inte faller direkt under felhantering måste ibland fattas snabbt, t.ex. val av plats för nödstopp och inbromsning för skademinimering vid kollision.
Felsäkerhetssystem	System som detekterar, diagnostiserar och hanterar fel.
Detektionsfel	Fel detekteras som typ I eller typ II. Ett fel som inte detekteras kan leda till haveri och även ett icke-fel som detekteras felaktigt kan leda till att systemet stängs av eller tas ur bruk.
Feldiagnostisering	Felbedömning av fel. Kan leda till felaktiga beslut vilket i värsta fall kan leda till haveri.
Felaktig hantering av fel	Felhanteringen kan leda till att felet förvärras eller att omgivning tar skada, t.ex. nödstopp vid tryckfall i däck på motorväg vid körning i höga hastigheter.

Inom transportsektorn sker mycket forskning inom teknologin platooning. Denna förmåga är starkt beroende av tillförlitlig kommunikation mellan fordonen samt god, gärna överlappande sensortäckning. Enligt Lopes m.fl. [98] är felsäkerhet extremt viktigt för just dessa system i kolonnkörning. Utöver detta är fel i ställdonen viktiga att förhindra [91] då minskad eller ökad fart snabbt kan leda till krock. Om tätt körande autonoma fordon förekommer i högre grad i framtiden kommer dessa riskkällor att bli än mer kritiska att hantera.

5.3 Metodöversikt

Att kunna prediktera fel och generella riskkällor i god tid innan konsekvenserna blir allvarliga är kritiskt för obemannade och autonoma markgående fordon. Nyttan blir större ju snabbare fordonet rör sig. Redundanta sensorsystem som täcker in för varandras svagheter lyfts som viktigt av [5,87,88,99–101]. Vikten av datadrivna metoder för feldetektion och feldiagnostik lyfts av [100] i och med att analytiskt framtagna modeller ofta inte är heltäckande och stärks av att kompletteras med driftdata. Datadrivna metoder kan även anpassa sig i och med att systemet förändras över tid. Redundanta system för perception och styrning är av stor vikt då dessa är säkerhetskritiska. Enligt Zhao m.fl. [102] och Tao m.fl. [103] bör det även finnas metoder för beslutsstöd

i händelse av oförutsedda fel eller svårhanterade situationer i form av ett operatörscentrum¹ eller annan typ av operatör som kan koordinera flera obemannade autonoma markfordon. Det autonoma markfordonet fråntas därmed sin autonomi under en kort tid till händelsen eller felet är åtgärdat.

5.3.1 Övergripande arkitekturer för detektion, diagnostik och hantering av fel i UGV

Park m.fl. [104] presenterar en arkitektur för förmågebedömning, felpåverkan och autonomt beslutsfattande. En UGV med redundanta sensorer och ställdon utökas med ett system baserat på arkitekturen för att kunna fatta beslut om nödstopp eller sänkt hastighet i händelse av försämrad förmåga. Felens effekt klassificeras i tre nivåer utifrån allvarlighetsgrad och felåtgärden är direkt kopplad till denna. Allvarlighetsgraden av ett fel är en funktion av kombinationer av fel på låg nivå. Till exempel ses fel i båda framåtblickande LIDAR-system som fel på högsta nivån. Denna kartläggning görs för alla lågnivåfel som kan inträffa. Ett lokalt fel kommuniceras till en central enhet varpå en felbedömning görs utifrån den tidigare beskrivna metoden. Åtgärden väljs sedan efter allvarlighetsgraden.

Fang m.fl. [105] beskriver ett system för feldetektion och feldiagnos för autonoma fordon som är baserat på hybridmetoder. Arkitekturen består av distribuerade detektionsmetoder för delsystem och komponenter samt ett maskininlärningsbaserat diagnos-system som klassificerar felen. Felen detekteras med en SVM som har tränats på att skilja mellan det säkra och det osäkra området för tillstånden. Ett tillstånd klassificeras alltså som fel eller inte. Samtidigt används en Kalmanfilterobservatör för att förutsäga fordonets position utifrån en linjäriserad modell av en cykel och sedan beräknas residualerna mellan den uppmätta positionen och den predikterade. Ett Jarque-Bera-test används för att se om banan avviker från den förväntade. På detta sätt detekteras tillståndsfel och avvikelser från banan. Diagnostiken består av att ett neuronät används för att klassificera felen som fel i det longitudinella tillståndet (rörelsealarm) eller det laterala tillståndet (styrningsalarm). Metoden testas på data från ett testfordon som kör autonomt på en testbana.

5.3.2 Realtidsprediktion av fel för UGV

Prediktion av fel är svårt och modeller för felpropagering och felpåverkan är ofta svårframtagna och osäkra. Så kallade livstidsmodeller (på engelska remaining useful life, RUL) används bland annat inom transportsektorn för att prediktera fel på lång sikt. De ofta stokastiska modellerna som används har hög tillförlitlighet på lång sikt men låg på kort sikt. De används därför främst för prediktivt underhåll. En betingad sannolikhet kan då hjälpa en mänsklig förare eller autonomt fordon att boka in underhåll för maximal tillgänglighet av fordonet [94–96]. Det finns exempel på arkitekturer där felprediktion görs på kort sikt med syftet att minimera risktagande och maximera tillgänglighet. Tao m.fl. [103] presenterar en arkitektur där en livstidsmodell associerar möjliga beslut med en risk för fel. Felets påverkan genererar en förlust av tillgänglighet och således en ekonomisk förlust. Till exempel kan systemet väga ett verkstadsbesök mot att slutföra uppdraget med normal fartprofil eller sänkt. Verkstadsbesöket minskar risken för fel men leder till en nedsatt tillgänglighet under tiden fordonet undersöks och underhålls. Att slutföra uppdraget utan verkstadsbesök ökar risken för ett allvarligt fel men har också potential att ge en hög tillgänglighet om felet inte inträffar. Eftersom autonoma markfordon förutspås spendera mycket mer tid på vägarna än vad fordon med förare gör menar Tao m.fl. att kortsiktig felprediktion och hantering är viktigt framöver.

¹kontrolltorn

5.3.3 Övertag av UGV i händelse av fel eller randhändelse

Helautonoma markfordon har ingen mänsklig operatör under uppdraget. Organisationen Society of Automotive Engineers (SAE) definierar fem nivåer av automation för framförallt kommersiella fordon [106]. I den högsta nivån styrs fordonet autonomt. En förare eller operatör har endast uppgiften att stödja fordonet i situationer där exempelvis handlingsrummet är begränsat eller systemet bedömer sig sakna beslutsunderlag. Att gå från nivå fyra till nivå fem är det svåraste steget enligt Orf m.fl. [107] eftersom det ställer höga krav på självperception i form diagnostik och beslutsfattande i dynamiska miljöer. Koncept har därför tagits fram där ett bemannat operatörscentrum styr en flotta av autonoma fordon och kan stödja i situationer där deras förmågor brister. Lösningar på effektiv överlämning av kontroll behövs då och HMI-frågor kommer till ytan. I en militär kontext kan ett sådant operatörscentrum vara en sårbarhet och om farkosten ska operera utanför kommunikationsavstånd eller i en telestörd miljö är det inte möjligt.

Pernestål m.fl. [102] lyfter frågan i ett svenskt sammanhang. De ställer tre viktiga frågor kopplade till användandet av operatörscentrum som stöd för autonoma markfordon:

- Vad finns att lära från användningen av kontrolltorn inom luftfarts- och tågindustrin kopplat till stöd av flottor av autonoma markfordon?
- Vilken roll ska ett operatörscentrum spela samt vilka funktionaliteter måste finnas?
- Vilka möjligheter och svårigheter finns med att stödja en flotta av autonoma markfordon från ett operatörscentrum kopplat till säkerhet och tillgänglighet?

Den stora nyttan av operatörscentrum inom luftfartsindustrin är att koordinera trafiken för ett säkert och tillförlitligt flöde in och ut från flygplatser. Avvikelser i trafiken som resultat av anomalier har stora effekter eftersom trafikflödena är intensiva och buffertenarna i schemalagningen är små. Ett operatörscentrum ger stor nytta i att minimera förseningar och öka säkerheten. På järnvägarna består den stora nyttan i att skapa regularitet i trafiken. Köer, incidenter och andra anomalier skapar tidsfördröjningar som propagerar. Den stora nyttan ett operatörscentrum kan ha för autonoma markfordon är att effektivisera feldiagnostik och felhantering genom att en operatör observerar realtidsdata från kameror och händelseförlopp. Ett operatörscentrum kan även öka tilliten för det autonoma markfordonet samt ha potential att förenkla interaktionen mellan system och människa. Några viktiga problemområden formuleras; belastningen på operatören, effektivt gränssnitt, samt stabil och robust uppkoppling till fordonet. Ett operatörscentrum med svensk design implementeras och evalueras i en simulerad värld för att testa möjligheterna och svårigheterna. Huruvida resultaten Pernestål m.fl. presenterar är relevanta för en militär kontext är något som framtida forskning skulle kunna utvärdera.

5.4 Slutsatser

Variationen i miljöerna som markfarkoster opererar i är mycket större än i de andra domänerna. Det går därför inte att dra alltför många generella slutsatser om riskkällor för farkoster och heller inte ge förslag på generella metoder. Precis som för alla typer av system bör riskanalysen och metodvalen utgå från varje enskild miljö, uppdrag och tekniska begränsningar. En markgående farkost har ett starkt behov av robust perception och navigering och även om ställdonsfel är kritiska kommer de ofta inte att leda till förlust av farkosten, till skillnad från i luft- och undervattensdomänen.

UGV:er opererar också oftare i direkt anknytning till människor och under kortare uppdrag vilket i högre grad möjliggör reparationer i fält än för farkoster i de andra domänerna.

Mycket av forskning och utveckling för civila fordon görs av kommersiella aktörer och insynen är därför begränsad. I fordonsindustrin är det hög konkurrens mellan många aktörer och utvecklingen sker snabbt. Av affärsmässiga skäl är det viktigt att ny teknik inte sprids till konkurrenter. Även i den militära sektorn råder hög sekretess och det är därför svårt att veta hur långt utvecklingen har kommit. För en mer komplett bild av den militära utvecklingen av obemannade markfarkoster hänvisas till Rantakokko m.fl. [89].

6 Diskussion och slutsatser

Metodöversikten för domänerna visar på många gemensamma problem och metoder. Fel i högnivåfunktionerna det vill säga perception, planering och styrning, samt feldetektion, feldiagnostik och felhantering skiljer sig primärt i konsekvenserna givet miljön där farkosterna är operativa. För markfarkoster är variationen i den omgivande miljön stor och kraven på perception och navigering är stor. Flygande farkoster och farkoster under ytan utsätts för stark yttre påverkan som vind och strömmar och har inga möjligheter till nödstopp. För mindre UAV:er är trenden att stabilisera farkoster med störningar på rotorerna eller sensorerna. För undervattensfarkoster fokuserar metoderna på att hantera fel i enskilda ställdon och sensorer och implementerade metoder är baserade på deterministiska felträdsanalys. Obemannade yt- och (större) undervattensfarkoster har typiskt en lång uthållighet. För ytfarkoster har utvecklingen drivits av lagstiftningens krav på kollisionssundvikning till att undvika situationer där kollisioner kan inträffa. Gemensamt för alla domäner är att storleken på farkosten, komplexiteten i den omgivande miljön och tiden som farkosten ska vara i drift är kritiska parametrar för hur felsäker farkosten behöver vara samt frånvaron av generella arkitekturer och metoder för att hantera fel i olika delsystem.

Gemensamt för domänerna är även att uppdraget ställer olika krav på farkosternas felsäkerhet, men överlag är perception och styrning de mest kritiska funktionerna. De felsäkra funktionerna lyfter potentialen för farkosten ytterligare och möjliggör längre uthållighet och ökar tilliten till systemet. Planering av uppdrag, som är en mer långsiktig funktion, kan kompletteras offline eller med aktivt stöd från en människa. Sådana lösningar kan vara viktiga i synnerhet för samverkande system, exempelvis svärmar av UAV:er, flottor av UGV:er eller stim av USV:er och AUV:er.

I litteraturen finns en tendens att helt separera fel och deras orsaker. Riskkällan är det felaktiga tillståndet och orsaken bortses ifrån. Många fel kan orsakas av en yttre påverkan, en antagonist eller en miljöfaktor. Det finns med andra ord en snittyta där robusthet mot extern påverkan och felsäkerhet lever tillsammans. Många fel uppstår till synes slumpmässigt, men är normalt ett resultat av utnötning, systematiska fel, avbrott i kommunikation och dylikt. Miljöfaktorer kan även påskynda, utlösa eller direkt orsaka sådana fel. En total riskanalys är därför lämplig där den totala mängden risker hanteras. Riskhanteringen kan då ta formen av felhantering, men även motmedel för yttre hot och miljöfaktorer som störande väder, ljus och hinder.

Framtida forskning presenteras i Branzén och Kraft [1], och inkluderar felsäkerhet för svärmar av UAV:er, tillämpning av befintlig forskning på fysiska farkoster samt matematisk modellering av farkoster under feltillstånd. På kort sikt fokuseras arbetet på feldetektion, och -diagnostik för att uppnå analytisk redundans i små UAV:er gällande effektförlust i motor och propellerfel.

Litteraturförteckning

- [1] E. Branzén och K. Kraft. Felsäkerhet för obemannade farkoster: Metodintroduktion, 2023. Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5358--SE.
- [2] N. Leveson. *System Safety Engineering: Back To The Future*. Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [3] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin och K. N. Kavuri. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis Part I: Quantitative Model-Based Methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27:293–311, 2003.
- [4] P. Scharre. *Army of None: Autonomous Weapons and the Future of War*. W. W. Norton and Company, 2018.
- [5] J. Pimentel och J. Bastiaan. Characterizing the Safety of Self-Driving Vehicles: A Fault Containment Protocol for Functionality Involving Vehicle Detection. *2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, 2018.
- [6] Försvarmakten. Försvarmaktens handbok Systemsäkerhet 2011 Del 1 Gemensam. Teknisk rapport, Försvarmaktens Säkerhetsinspektion och FMV , 2011.
- [7] L. Forssell. Sammanställning av tidigare studier på RPAS, 2022. Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 7583.
- [8] J. Rantakokko, J. Appelgren, K. Bengtsson, M. Hagström, O. Jansson, K. Kraft, F. Näsström, F. Kullander, J. Nygård, M. Pettersson, J. Rydell och R. Woltjer. Gemensamma teknikbehov inom obemannade och autonoma system - Slutrapport, 2021. Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5096--SE.
- [9] J. Rantakokko, E. Axell, J. Nygård, J. Rydell och N. Stenberg. Tekniker för navigering i urbana och störda GNSS-miljöer, 2019. Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4907--SE.
- [10] L. Luotsinen, D. Oskarsson, P. Svenmarck och U. Wickenberg Bolin. Explainable Artificial Intelligence: Exploring XAI Techniques in Military Deep Learning Applications, 2020. Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4849--SE.
- [11] S. B. Nazarudeen och J. Liscouët. State-Of-The-Art And Directions For The Conceptual Design Of Safety-Critical Unmanned And Autonomous Aerial Vehicles. *2021 IEEE International Conference on Autonomous Systems (ICAS)*, 2021.
- [12] Försvarmakten. UAV-system Svalan/Korpen, 2018.
- [13] Försvarmakten. UAV-system Örnen, 2021.
- [14] J. Rantakokko, F. Näsström, R. Woltjer, T. Mårtensson, M. Hagström och A. Foyer. Tekniköversikt autonoma och obemannade system del 4: Luftstriden, 2022. Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5167--SE.
- [15] R. Szabolcsi. Beyond Training Minimums – A New Concept of the UAV Operator Training Program. *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, 22, 2016.

- [16] D. Zucchini. War Zone Drone Crashes Add Up, 2014. Los Angeles Times. <https://www.latimes.com/la-fg-drone-crashes-20100706-story.html>. hämtad: 2022-09-07.
- [17] PD-100 Black Hornet Nano Unmanned Air Vehicle - Army Technology, 2019. <https://www.army-technology.com/projects/pd100-black-hornet-nano/>. hämtad: 2022-09-07.
- [18] M. Voskuijl. Performance Analysis and Design of Loitering Munitions: A Comprehensive Technical Survey of Recent Developments. *Defence Technology*, 18(3):325–343, 2022.
- [19] A. Washington, Clothier R. A. och Silva. J. A Review of Unmanned Aircraft System Ground Risk models. *Progress in Aerospace Sciences*, 95:24–44, 2017.
- [20] C. Cole. ACCIDENTS WILL HAPPEN: A review of military drone crash data as the UK considers allowing large military drone flights in its airspace, 2019. <https://dronewars.net/wp-content/uploads/2019/06/DW-Accidents-WEB.pdf>. Hämtad: 2022-07-14.
- [21] K. Williams. A Summary of Unmanned Aircraft Accident/Incident Data: Human Factors Implications, 2004. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA460102.pdf>. Hämtad: 2022-07-14.
- [22] L. Barr, R. Newman, E. Ancel, C. Belcastro, J. Foster, J. Evans och D. Klyde. Preliminary Risk Assessment for Small Unmanned Aircraft Systems. *17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 2017.
- [23] A. Abbaspour, P. Aboutalebi, K. K. Yen och A. Sargolzaei. Neural Adaptive Observer-Based Sensor and Actuator Fault Detection in Nonlinear Systems: Application in UAV. *ISA Transactions*, 67:317–329, 2017.
- [24] J. Guo, J. Qi och C. Wu. Robust Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control for Nonlinear Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle System with Unknown Actuator Faults. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 18(2):17298814211002734, 2021.
- [25] X. Wang, J. Zhao, J. Qian, F. Xie och J. Fu. Adaptive Fault Tolerant Control for a Quadrotor Under Actuator Faults. *2019 Chinese Control Conference (CCC)*, ss 5079–5084, 2019.
- [26] M. Chen, P. Shi och C.-C. Lim. Adaptive Neural Fault-Tolerant Control of a 3-DOF Model Helicopter System. *Institute for Electrical and Electronics Engineers Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 46(2):260–270, 2016.
- [27] N. P. Nguyen och S. K. Hong. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Scheme for Quadcopter UAVs with a Total Loss of Actuator. *Energies*, 12(6), 2019.
- [28] F.-H. Wen, F.-Y. Hsiao och J.-K. Shiau. Analysis and Management of Motor Failures of Hexacopter in Hover. *Actuators*, 10(3), 2021.
- [29] M. Saied, H. Shraim, C. Francis, I. Fantoni och B. Lussier. Actuator Fault Diagnosis in an Octorotor UAV using Sliding Modes Technique: Theory and Experimentation. *2015 European Control Conference (ECC)*, ss 1639–1644, 2015.

- [30] R. Singh och B. Bhushan. Data-Driven Technique-Based Fault-Tolerant Control for Pitch and Yaw Motion in Unmanned Helicopters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70:1–11, 2021.
- [31] W. Jun och Y. Tian. Fault Tolerant Control of Quadrotor UAV Based on Support Vector Machine. *2019 5th International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)*, ss 10–13, 2019.
- [32] J. Tan, Y. Fan, P. Yan, C. Wang och H. Feng. Sliding Mode Fault Tolerant Control for Unmanned Aerial Vehicle with Sensor and Actuator Faults. *Sensors*, 19(3), 2019.
- [33] S. Park, J. Bae, Y. Kim och S. Kim. Fault Tolerant Flight Control System for the Tilt-Rotor UAV. *Journal of the Franklin Institute*, 350(9):2535–2559, 2013.
- [34] M. R. Napolitano, Y. An och B. A. Seanor. A Fault Tolerant Flight Control System for Sensor and Actuator Failures Using Neural Networks. *Aircraft Design*, 3(23):103–128, 2000.
- [35] M. Saied, B. Lussier, I. Fantoni, H. Shraim och C. Francis. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of an Octorotor UAV using Motors Speeds Measurements. *IFAC PapersOnLine*, 50(1):5263–5368, 2017.
- [36] Z. Li, X. Ma och Y. Li. Model-free Control of a Quadrotor using Adaptive Proportional Derivative-Sliding Mode Control and Robust Integral of the Signum of the Error. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15(5), 2018.
- [37] F. Chen, R. Jiang, K. Zhang, B. Jiang och G. Tao. Robust Backstepping Sliding-Mode Control and Observer-Based Fault Estimation for a Quadrotor UAV. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(8):5044–5056, 2016.
- [38] F. Harrou, B. Khaldi, Y. Sun och F. Cherif. Statistical Detection of Faults in Swarm Robots under Noisy Conditions. *2018 6th International Conference on Control Engineering Information Technology (CEIT)*, 2018.
- [39] J. O’Keeffe, D. Tarapore, A. G. Millard och J. Timmis. Fault Diagnosis in Robot Swarms: An Adaptive Online Behaviour Characterisation Approach. *2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 2017.
- [40] D. Tarapore, J. Timmis och A. L. Christensen. Fault Detection in a Swarm of Physical Robots Based on Behavioral Outlier Detection. *IEEE Transactions on Robotics*, 35(6):1516–1522, 2019.
- [41] I. Perez, A. Goodloe och W. Edmonson. Fault-Tolerant Swarms. *2019 IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT)*, ss 47–54, 2019.
- [42] A. Tahir, J. Böling, M.-H. Haghbayan och J. Plosila. Development of a Fault-Tolerant Control System for a Swarm of Drones. *2020 International Symposium ELMAR*, ss 79–82, 2020.
- [43] G. Chen och Y.-D. Song. Robust Fault-Tolerant Cooperative Control of Multi-Agent Systems: A Constructive Design Method. *Journal of the Franklin Institute*, 352(10):4045–4066, 2015.
- [44] Sabertooth | SAAB. <https://www.saab.com/products/sabertooth>. Hämtad: 2022-09-07.

- [45] J. Rantakokko, K. Bengtsson, C. Svensson, R. Lennartsson och M. Skarstind. Tekniköversikt autonoma och obemannade system Del 3: Sjöstriden, 2022. Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5088--SE.
- [46] X. Vavasseur. Here is our First Look at the US Navy's Orca XLUV, 2022. <https://www.navalnews.com/naval-news/2022/05/here-is-our-first-look-at-the-us-navys-orca-xluuv/>. Hämtad: 2022-09-07.
- [47] Orca XLUV, 2020. Naval Technology. <https://www.naval-technology.com/projects/orca-xluuv/>. Hämtad: 2022-09-07.
- [48] HUGIN®. <https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/hugin-product-specification>. Hämtad: 2022-07-05.
- [49] Naval AUV product range: The HUGIN and REMUS family. <https://tinyurl.com/2p8bjbmd>. Hämtad: 2022-07-06.
- [50] TEKNISK UND ORIENTERAR: Ryska AUV-system, 2018. Försvarets materielverk, FMV.
- [51] D. S. Terracciano, L. Bazzarello, A. Caiti, R. Costanzi och V. Manzari. Marine Robots for Underwater Surveillance. *Current Robotic Reports*, 1, 2020.
- [52] D. Zhu, Q. Qian Liu och Y. Yang. An Active Fault-Tolerant Control Method Ofunmanned Underwater Vehicles with Continuous and Uncertain Faults. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5(4):37, 2008.
- [53] M. P. Brito, G. Griffiths och P. Challenor. Risk Analysis for Autonomous Underwater Vehicle Operations in Extreme Environments. *Risk Anal.*, 30:1771–88, 2010.
- [54] G. Antonelli. *A Survey of Fault Detection/Tolerance Strategies for AUVs and ROVs*, ss 109–127. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2003.
- [55] W. Wang, Y. Chen, Y. Xia, G. Xu, W. Zhang och H. Wu. A Fault-Tolerant Steering Prototype for X-Rudder Underwater Vehicles. *Sensors*, 20(7), 2020.
- [56] G. Antonelli, T. Fossen och D. Yoerger. *Underwater Robotics*, band 1, ss 987–1008. Springer, 01 2008.
- [57] G. Antonelli. 4. Fault Detection/Tolerance Strategies for AUVs and ROVs. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 96, 2006.
- [58] B.-Y. Raanan, J. Bellingham, Y. Zhang, M. Kemp, B. Kieft, H. Singh och Y. Girdhar. Detection of Unanticipated Faults for Autonomous Underwater Vehicles Using Online Topic Models. *Journal of Field Robotics*, 35(5):705–716, 2018.
- [59] F. Liu, Y. Long, J. Luo, H. Pu, C. Duan och S. Zhang. Active Fault Localization of Actuators on Torpedo-Shaped Autonomous Underwater Vehicles. *Sensors*, 21(21), 2021.
- [60] X. Xiang, C. Yu och Q. Zhang. On Intelligent Risk Analysis and Critical Decision of Underwater Robotic Vehicle. *Ocean Engineering*, 140:453–465, 2017.
- [61] S. Kabir. An Overview of Fault Tree Analysis and its Application in Model Based Dependability Analysis. *Expert Systems with Applications*, 77:114–135, 2017.

- [62] J. Ernits, R. Dearden och M. Pebody. Automatic Fault Detection and Execution Monitoring for AUV Missions. *2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles*, 2010.
- [63] M. L. Seto och A. Z. Bashir. Fault Tolerance Considerations for Long Endurance AUVs. *2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2017.
- [64] Y. Wang, M. Zhang, Wilson P. A. och X. . Adaptive Neural Network-Based Backstepping Fault Tolerant Control for Underwater Vehicles with Thruster Fault. *Ocean Engineering*, 110:15–24, 2015.
- [65] A. Freddi, S. Longhi och A. Moneriù. Actuator Fault Detection System for a Remotely Operated Vehicle. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(33):356–361, 2013. 9th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems.
- [66] R.-J. Yan, S. Pang, H.-B. Sun och Y.-j. Pang. Development and Missions of Unmanned Surface Vehicle. *J. Marine. Sci. Appl.*, 9:451–457, 2010.
- [67] Navy X . <https://www.royalnavy.mod.uk/news-and-latest-activity/operations/united-kingdom/navy-x>. Hämtad: 2022-07-07.
- [68] R. Rourke. Navy Large Unmanned Surface and Undersea Vehicles: Background and Issues for Congress. Teknisk rapport R45757, United states congressional research service, 2022. Hämtad: 2022-07-07.
- [69] Ghost Fleet Overlord Unmanned Surface Vessel Program Completes Second Autonomous Transit to the Pacific . <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/2647818/ghost-fleet-overlord-unmanned-surface-vessel-program-completes-second-autonomou/>. Hämtad: 2022-07-07.
- [70] Unmanned maritime systems update. <https://tinyurl.com/4k9dfwsd>. Hämtad: 2022-07-07.
- [71] US Navy Tests Unmanned Saildrone Explorer. <https://www.thedefensepost.com/2021/12/15/us-navy-unmanned-saildrone/>. Hämtad: 2022-07-07.
- [72] Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972 . <https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/COLREG.aspx>. Hämtad: 2021-07-19.
- [73] Z. Liu, Y. Zhang, X. Yu och C. Yuan. Unmanned Surface Vehicles: An Overview of Developments and Challenges. *Annual Reviews in Control*, 41, 2016.
- [74] S. Savitz, I. Blickstein, P. Buryk, R. W. Button, P. DeLuca, J. Dryden, J. Mastbaum, J Osburg, P. Padilla, A. Potter, C. C. Price, L. Thrall, S. K. Woodward, R. J. Yardley och J. M. Yurchak. *Developing and Evaluating USV Concepts of Employment*, ss 17–30. RAND Corporation, 2013.
- [75] R. G. Patterson, E. Lawson, V. Udyawer, G. B. Brassington, R. A. Groom och H. A. Campbell. Uncrewed Surface Vessel Technological Diffusion Depends on Cross-Sectoral Investment in Open-Ocean Archetypes: A Systematic Review of USV Applications and Drivers. *Frontiers in Marine Science*, 8, 2022.
- [76] L. Elkins, D. Sellers och W. R. Monach. The Autonomous Maritime Navigation (AMN) project: Field tests, autonomous and cooperative behaviors, data fusion, sensors, and vehicles. *Journal of Field Robotics*, 27(6):790–818, 2010.

- [77] Mayflower400. <https://mas400.com>. Hämtad: 2021-05-18.
- [78] S. M. Zanolì, G. Astolfi, G. Bruzzone, M. Bibuli och M. Caccia. Application of Fault Detection and Isolation Techniques on an Unmanned Surface Vehicle (USV). *IFAC Proceedings Volumes*, 45(27):287–292, 2012. 9th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft.
- [79] Naeem. W., G. W. Irwin och A. Yang. COLREGs-based Collision Avoidance Strategies for Unmanned Surface Vehicles. *Mechatronics*, 22(6):669–678, 2012. Special Issue on Intelligent Mechatronics (LSMS2010 & ICSEE2010).
- [80] H. Kim, D. Kim, J-U. Shin, H. Kim och H. Myung. Angular Rate-Constrained Path Planning Algorithm for Unmanned Surface Vehicles. *Ocean Engineering*, 84:37–44, 2014.
- [81] K. Kim, S. H. Kim, Jeon. M., J. Kim, S. Song och K-J. Paik. A Study on Path Optimization Method of an Unmanned Surface Vehicle under Environmental Loads using Genetic Algorithm. *Ocean Engineering*, 142:616–624, 2017.
- [82] F. Mahini, L. DiWilliams, K. Burke och H. Ashrafiuon. An Experimental Setup for Autonomous Operation of Surface Vessels in Rough Seas. *Robotica*, 31(5):703–715, 2013.
- [83] R. A. Soltan, H. Ashrafiuon och K. R. Muske. ODE-Based Obstacle Avoidance and Trajectory Planning for Unmanned Surface Vessels. *Robotica*, 29(5):691–703, 2011.
- [84] Z. Qin, Z. Lin, D. Yang och P. Li. A task-based hierarchical control strategy for autonomous motion of an unmanned surface vehicle swarm. *Applied Ocean Research*, 65:251–261, 2017.
- [85] Z. Zhou, M. Zhong och Y. Wang. Fault Diagnosis Observer and Fault-Tolerant Control Design for Unmanned Surface Vehicles in Network Environments. *Institute for Electrical and Electronics Engineers*, PP, 2019.
- [86] Unmanned Surface Vehicles (USVs): Defence and Technology Trends. <https://www.naval-technology.com/comment/unmanned-surface-vehicles-usvs-defence-technology-trends/>. Hämtad: 2022-07-08.
- [87] A. Sinha, A. Mukherjee, X. Liu, S. Monckton och G. Broten. A Fault Tolerant State Estimation Framework with Application to UGV Navigation in Complex Terrain. *14th International Conference on Information Fusion*, 2011.
- [88] D. Reyes Duran, E. Robinson, A. J. Kornecki och J. Zalewski. Safety Analysis of Autonomous Ground Vehicle Optical Systems: Bayesian Belief Networks Approach. *2013 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, ss 1419–1425, 2013.
- [89] J. Rantakokko, K. Bengtsson, J. Nygård, F. Näsström och R. Woltjer. Teknisköversikt autonoma och obemannade system - Del 2: Markstriden, 2020. Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--4901--SE.
- [90] A. Singh och S. Mutreja. Allied Market Research, 2019. <https://www.alliedmarketresearch.com/autonomous-vehicle-market>. Hämtad: 2022-05-04.
- [91] C. Pan, Y. Chen och I. Ali. Adaptive Fault-Tolerant Control for Autonomous Vehicle Platoon against Fault. *2021 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision, and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS)*, 2021.

- [92] B. Canis. Issues in autonomous vehicle testing and deployment. Teknisk rapport, United States Congressional Research Service, 2019. Hämtad: 2022-05-03.
- [93] M. Roth. Autonomous Vehicles in the Military - Lockheed Martin, Northrop Grumman, and BAE Systems, 2019. Emerj. <https://emerj.com/ai-sector-overviews/autonomous-vehicles-in-the-military-lockheed-martin-northrop-grumman-and-bae-systems/>.
- [94] A. R. Ruddle, A. Galarza, B. Sedano, I. Unanue, I. Ibarra och L. Low. Safety and Failure Analysis of Electrical Powertrain for Fully Electric Vehicles and the Development of a Prognostic Health Monitoring System. *IET Hybrid and Electric Vehicles Conference 2013 (HEVC 2013)*, 2013.
- [95] U. Shafi, A. Safi, A. Shahid, S. Ziaddin och M. Q. Saleem. Vehicle remote health monitoring and prognostic maintenance system. *Journal of Advanced transportation*, 2018.
- [96] S. Škerlič. Analysis of Heavy Truck Maintenance Issues. *Pomorstvo*, 34:24–31, 2020.
- [97] J. Carlson och R. R. Murphy. How UGVs Physically Fail in the Field. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(3):423–437, 2005.
- [98] A. Lopes och R. E. Araújo. Active Fault Diagnosis Method for Vehicles in Platoon Formation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(4):3590–3603, 2020.
- [99] What Happens When Autonomous Vehicle Technology Fails?, 2019. Mineta Transportation Institute. <https://transweb.sjsu.edu/press/What-Happens-When-Autonomous-Vehicle-Technology-Fails>. Hämtad: 2022-05-12.
- [100] Y. Fang, H. Min, W. Wang, Z. Xu och X. Zhao. A Fault Detection and Diagnosis System for Autonomous Vehicles Based on Hybrid Approaches. *IEEE Sensors Journal*, 20(16):9359–9371, 2020.
- [101] J. Lee, K. Oh, Y. Yoon, T. Song, T. Lee och K. Yi. Adaptive Fault Detection and Emergency Control of Autonomous Vehicles for Fail-Safe Systems Using a Sliding Mode Approach. *IEEE Access*, 10:27863–27880, 2022.
- [102] X. Zhao, R. Darwish och A. Pernestål. Automated Vehicle Traffic Control Tower: A Solution to Support the Next Level Automation. *International Journal of Transport and Vehicle Engineering*, 14(7):332 – 342, 2020.
- [103] X. Tao, J. Mårtensson, Warnquist. H och A. Pernestål. Short-term Maintenance Planning of Autonomous Trucks for Minimizing Economic Risk. *Reliability Engineering and System Safety*, 220:108251–108251, 2021.
- [104] J.-U. Park, B.-H. Bae, J.-W. Lee och J.-H. Kim. Design of Failsafe Architecture for Unmanned Ground Vehicle. *Proceedings of ICCAS 2010*, 2010.
- [105] Y. Fang, H. Min, W. Wang, Z. Xu och X. Zhao. A Fault Detection and Diagnosis System for Autonomous Vehicles Based on Hybrid Approaches. *IEEE Sensors Journal*, 20:9359 – 9371, 2020.
- [106] SAE Levels of Driving Automation™ Refined for Clarity and International Audience, 2021. Society of Automotive Engineers. <https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update>. Hämtad: 11-07-2022.

- [107] S. Orf, M. R. Zofka och J. M. Zöllner. From Level Four to Five: Getting rid of the Safety Driver with Diagnostics in Autonomous Driving. *2020 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, ss 19–25, 2020.

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se