



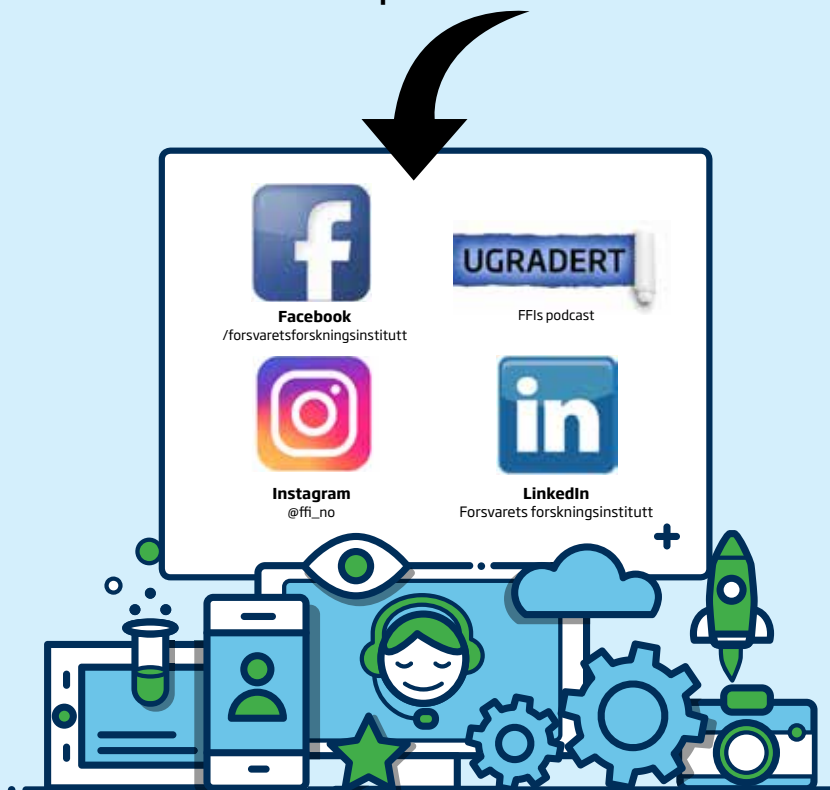
# VITEN

FORSKNINGSFAGLIG RAPPORT 1. 2019 FORSVARETS FORSKNINGSinSTITUTT

## DEN AUTONOME FRAMTID

# Følger du med?

Nyheter og oppdateringer om  
FFI hver uke på sosiale medier.



## OM VITEN

VITEN er en annerledes rapport fra Forsvarets forskningsinstitutt (FFI). Den er rettet mot et bredere publikum og er laget i et oversiktlig tidsskriftformat. VITEN er et ledd i FFIs satsing på god forskningsformidling og -kommunikasjon.

Med VITEN ønsker vi å bidra til en mer opplyst offentlig debatt, med mer forskningsbasert kompetanse, kunnskap og nettopp viten. Temaer for disse rapportene kommer fra hele bredden av FFIs forskning – fra militærtekniske forhold til forsvarsplanlegging, sikkerhetspolitikk og samfunnsikkerhet. I særlig grad vil vi belyse temaer som har betydning for de utfordringene Forsvaret og sivilsamfunnet står overfor. Vi håper at VITEN vil bidra til å vekke interesse for FFIs mange forskningsområder, og vise at forskningen vår bidrar til et bedre forsvar og et tryggere samfunn.

En elektronisk utgave av VITEN ligger på [ffi.no](http://ffi.no), ofte sammen med utfyllende rapporter og annet materiale.

Har du spørsmål om VITEN? Ta kontakt med oss: [VITEN@ffi.no](mailto:VITEN@ffi.no)

## FRAMTIDEN ER UBEMANNET

Autonom betyr uavhengig. Med autonome systemer mener vi maskiner som løser oppgaver på egen hånd. Det investeres store summer i slik teknologi både sivilt og militært. Grensene for hva autonome systemer er i stand til å gjøre flytter seg stadig.

Datamaskiner kan i dag samle og analysere store mengder informasjon for å gi oss bedre situasjonsforståelse og forslag til løsninger. Kjørerassistanse i dagens biler og fremtidens selvkjørende biler er bare to eksempler på teknologiens nytteverdi. For at Forsvaret best kan dra nytte av utviklingen, er det nødvendig å forstå teknologien. Først når vi kjenner teknologiens begrensninger og muligheter, blir vi i stand til å vurdere hvordan og hvorvidt teknologien bør inngå i fremtidens forsvarssystemer.

Utviklingen av ny teknologi i våpensystemer må skje innenfor rammene av internasjonale lover og regler. Det er i militær og sivil interesse at den nye teknologien er trygg, sikker og under tilstrekkelig menneskelig kontroll. På dette feltet kan forsvarssektoren bidra med kompetanse og løsninger til samfunnet.

Denne utgaven av VITEN gir en populærvitenskapelig innføring i hva autonomi er, og hvordan kunstig intelligens og ny teknologi brukes for å gjøre farkoster autonome. For å bygge kunnskap og erfaring har FFI utviklet autonome forskningsfarkoster som kan tolke sine egne omgivelser, planlegge hvor de skal kjøre, samarbeide med andre og ta egne beslutninger når de skal løse oppgaver. De grunnleggende teknologiene og behovene er like på sivil og militær side. For samfunnet, Forsvaret og verdiskapning i norsk industri er det hensiktsmessig å utnytte disse synergiene.

Fremdeles er autonome systemer for lite robuste til de mange militære operasjoner. Omgivelsene er rett og slett for kompliserte og ugjestmilde. Men for de enkleste oppgavene og miljøene er autonomi høyst relevant allerede nå. FFI, Forsvaret og industrien samarbeider blant annet for å utvikle et ubemannet konsept som kan lete etter sjøminer uten at personell trenger å være tilstede i minefeltene.

Vi ser allerede i dag avanserte automatiserte systemer i missiler, missilforsvar og i vårt nye kampfly F35. For eksempel i norske Joint Strike Missile, der algoritmer hjelper missilet til å finne fram til riktig mål basert på kriterier operatøren har definert.

Målet med å utvikle og ta i bruk autonome systemer er ikke å erstatte menneskene, men å sette sammen teknologi og mennesker slik at de samspiller og utfyller hverandre. Vi forventer at teknologiutviklingen vil gi operativ nytte på stadig nye områder i årene som kommer.



**André Pettersen**

Forskningsjef autonomi ved FFI

UTGIVER:  
Forsvarets forskningsinstitutt

FORSIDE/ILLUSTRASJON:  
FFI / AdobeStock

REDAKTØR:  
Espen Hofoss

DESIGN:  
Grete Alvestad

viten@ffi.no

BIDRAGSYTERE:  
Solveig Bruvoll  
Marc Geilhufe  
Trym Haavardsholm  
Jonas Moen  
André Pettersen  
Rikke Amilde Seehuus  
Lars Aarønæs  
Espen Hofoss

FOTO/ILLUSTRASJON:  
Yara/Kongsberg Maritime,  
Eelume, NDMA, AdobeStock,  
Oleg Yakimenko, Kongsberg  
Defence & Aerospace AS,  
Ole Jacob Lorentzen, UIB,  
Christian Tandberg, FFI

Trykk: Fladby as

Opplag: 1500  
P ISBN: 978-82-464-3210-6  
E ISBN: 978-82-464-3211-3  
P ISSN: 2535-2679  
E ISSN: 2535-2687

ABONNER PÅ  
VÅRT NYHETSBRV:  
ffi.no/nyhetsbrev

FØLG OSS PÅ:  
Facebook  
Instagram  
ffi.no

Forsvarets forskningsinstitutt  
Besøksadresse:  
Instituttveien 20  
2027 Kjeller

Postadresse:  
Postboks 25  
2027 Kjeller

Telefon:  
63807130







# INNHold

- 06**      UTVIKLING I RASENDE FART
- 08**      HVA ER AUTONOMI?
- 12**      FORSKNING OG UTVIKLING VED FFI
- 14**      HVORDAN FUNGERER EN AUTONOM FARKOST?
- 24**      SMÅ MASKINER STORE OPPGAVER
- 28**      SONDRER TRENER FRAMTIDENS DRONER
- 30**      SLI KAN NATO-ROBOTENE SAMARBEIDE
- 32**      NORGES NYE UBEMANNEDE MINEJEGER
- 36**      ETIKK, TAKK!
- 38**      OPPSUMMERING
- 39**      REFERANSER



01 Verdens første autonome skip skal være i drift fra 2020. Det skal gå mellom Yaras fabrikk på Herøya og havnene i Brevik og Larvik og vil erstatte 40.000 vogntogturer i året.

02 Det norske undervannsselskapet Eelume har bygd og testet verdens første slangeliknende robot, laget for offshoreoperasjoner.



01



02



# UTVIKLING I RASENDE FART

Over hele verden utvikles det autonome systemer som skal klare å løse ulike oppgaver alene, uten menneskelig inngripen.

Robotstøvsugere er godt etablert i markedet, og selvkjørende biler forventes å bli en naturlig del av trafikkbildet i løpet av få år. Den teknologiske utviklingen går raskt, og slike systemer er i stand til å utføre stadig mer komplekse oppgaver i stadig mer utfordrende omgivelser.

For å oppnå denne uavhengigheten, autonomien, bruker systemene sensorer for å forstå sine omgivelser og kunstig intelligens til å løse sine oppgaver på best mulig måte.

## Nyttig for samfunnet

Teknologien muliggjør autonome systemer, men drivkraften ligger i nytteverdien. Det er store kommersielle muligheter for autonome systemer. I Norge snakker vi om et teknologisk skifte i maritim sektor. Forurensende og kostbar transport på vei skal flyttes til sjøtransport med autonome elektriske skip. Store støttefartøy for inspeksjon i offshorenæringen blir vurdert å byttes ut med ubemannede farkoster som overvåkes fra land. På land ser vi økende interesse for autonome systemer til transport av gods og post. Oslo får sine første selvkjørende busser i år.

Autonomi gir en samfunnsøkonomisk gevinst. Vi ser at ulykkestallene går kraftig ned for biler som er utstyrt med

systemer som støtter sjåførene. Maskiner blir ikke slitne eller ukonsentrerte, og de hjelper sjåførene til å oppfatte og unngå farlige situasjoner.

## Gjør det umulige mulig

Interessen for de teknologiske mulighetene autonomi gir, er også stor i militære sammenhenger, og for små land som Norge kan gevinsten ved å ta teknologien i bruk være stor.

Norge har få innbyggere, og sjø- og landområdene vi har suverenitet over er enorme til sammenlikning med folketallet. Spørsmålet er hvordan vi best kan ta i bruk teknologien for å gjøre få folk i stand til å ta vare på store områder.

I krise og krig er rask og god situasjonsforståelse avgjørende for å ta riktige avgjørelser på kort tid. Autonome systemer kan bidra til tilstedeværelse og kan hente inn data i et omfang som ville være uoverkommelig for bemannede systemer alene.

Mange oppgaver ved innhenting og analyse er dessuten rutineoppgaver som utfordrer menneskelig utholdenhet. Militær transport kan også dra nytte av støtte fra autonome systemer.

## FFI tester teknologien

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI) har

som oppgave å gi råd til Forsvaret i spørsmål omkring hvordan framtidens forsvarssystemer bør være. For å gi oppdaterte og godt fundamenterte råd, må FFI ha god kjennskap til den teknologiske utviklingen.

FFI har derfor satset sterkt på å følge med i utviklingen innen teknologi som er relevant for autonome og ubemannede systemer, slik at vi kan gi råd om hvorvidt og hvordan slik teknologi kan utnyttes i framtidige anskaffelser for Forsvaret.

For å bygge kunnskap og erfaring med denne teknologien har vi ved FFI utviklet ulike autonome farkoster med moduler for blant annet beslutningstaking, tolkning av omgivelser, ruteplanlegging og samhandling.

Noen oppgaver kan være vanskelige for én enkelt autonom farkost å utføre alene, mens de er enklere å løse for grupper av autonome farkoster. Samarbeidende autonome farkoster som utfører en oppgave i fellesskap ved selv å fordele arbeidet mellom seg åpner nye muligheter for effektivisering. I dag kreves ofte én operatør per ubemannet farkost.

Ved å gjøre det mulig for en operatør å gi oppgaver til en hel gruppe, reduseres antallet operatører betraktelig. ■

# HVA ER AUTONOMI?

Autonomi er et systems evne til å tolke sine omgivelser, planlegge, ta beslutninger og handle slik at det kan utføre oppgavene sine.

Graden av autonomi kan beskrives ut fra tre faktorer:

1) *menneskelig kontroll*, 2) *kompleksitet i beslutningstaking* og 3) *kompleksitet i omgivelsene fra systemets synspunkt*<sup>1, 2</sup>. Det gir ingen mening å snakke om et fullt autonomt system uten å si hva systemet kan gjøre på egenhånd. Det er ingen krav til hvor komplekse oppgavene må være eller hva systemet må være i stand til å forstå om sine omgivelser for å kunne kalle systemet autonomt og ikke bare automatisk. Typisk bruker vi begrepet autonomi når det et system får til er på grensen av hva dagens teknologi kan gjøre.

## Menneskelig kontroll

*Menneskelig kontroll* deles gjerne inn i kategoriene *fjernstyrt*, *fjernoperert*, *fjernovervåket* og *helt autonom*.

- *Et fjernstyrt system* styres med en fjernkontroll og har kun enkle innebygde funksjoner, for eksempel for å sikre stabilitet.
- *Et fjernoperert system* kan styre selv, for eksempel kjøre fra A til B, men operatøren må ta hensyn til hindringer.
- *Et fjernovervåket system* kan utføre mer komplekse oppgaver på egenhånd, men må overvåkes hele tiden, enten av sikkerhetsmessige årsaker eller fordi det kan komme til å trenge hjelp.
- At et system er *helt autonomt* betyr ikke at det er utenfor menneskelig kontroll. I programmeringen kan vi sette klare begrensninger for hvordan det oppfører seg på egenhånd. Eksempler på helt autonome systemer er robotgressklippere og robotstøvsugere.

For autonome, ubemannede farkoster til bruk i Forsvaret, mener vi det vil være hensiktsmessig om disse støtter alle nivåene av menneskelig kontroll og at graden av uavhengighet kan varieres. Det vil gjøre systemet fleksibelt til å kunne brukes i mange oppgaver og situasjoner. Enklere oppgaver i oversiktlige omgivelser kan utføres helt autonomt, mens operatører kan støtte systemene i mer avanserte oppgaver og situasjoner.

## Kompleksitet i beslutninger

Med *kompleksitet i beslutningstaking* menes hvor vanskelig det er å avgjøre hva som er best å gjøre. Maskiner som spiller strategispill som sjakk skårer høyt her. For autonome ubemannede kjøretøy, er det for eksempel vanskeligere å følge trafikkregler enn bare å unngå hindringer.

## Kompleksitet i omgivelser

Faktoren *kompleksitet i omgivelsene* innebærer hva maskinen må være i stand til å forstå om sine omgivelser for å kunne utføre sine oppgaver. Et autonomt ubemannet system som bare følger en oppgitt liste med GPS-posisjoner, som "dronefyrverkeri", har veldig lav kompleksitet i denne faktoren.

For å kunne følge en forhåndsoppsatt plan for hvordan oppgaven skal gjennomføres, må omgivelsene være kontrollerte for å minske faren for at uventede hendelser oppstår. Kompleksiteten øker dersom maskinen må kunne oppfatte ulike typer hindringer, skille vei fra annet terreng eller skille mellom seilbåter og motorbåter.

Ved å tolke informasjon fra flere sensorer og sammenstille informasjonen, blir det mulig å lage et bedre bilde av omgivelsene. Til å tolke sensordata og for beslutningstaking brukes ofte metoder fra kunstig intelligens. Kunstig intelligens har fått mye omtale i det siste, og media rapporterer om store framskritt.





“Teknologifirmaer som Google, Amazon og Facebook investerer betydelige summer i forskning på dyp læring. Siden disse firmaene har tilgang til enorme mengder data og datakraft, har de gode muligheter til å utnytte potensialet i denne teknologien.



## Kunstig intelligens

Kunstig intelligens handler om å få maskiner til å utføre oppgaver som normalt krever menneskelig intelligens, det vil si oppgaver som er vanskelige for maskiner. Maskiner er veldig gode til å regne og løse logikkoppgaver, men noen problemer er utfordrende å beskrive som logiske regnestykker, for eksempel tolkning av tale, oversettelse mellom språk eller gjenkjenning av objekter i bilder. Kunstig intelligens er en samling metoder som brukes for å få maskinene til å løse slike oppgaver best mulig.

Maskinlæring er et samlebegrep for metoder innen kunstig intelligens der en i stedet for å programmere en løsning, beskriver problemet og lar datamaskinen søke etter løsningen. Mange av metodene gjør dette ved å finne mønstre i store mengder treningsdata. Forståelsen av disse mønstrene brukes deretter for å finne svaret en er på jakt etter. Gjenkjenning av objekter i bilder er et eksempel på en oppgave som enkelt kan løses med maskinlæringsmetoder, men som det er vanskelig å løse ved å gi datamaskinen konkrete regler for hvordan et objekt skal klassifiseres.

## Dyp læring

De siste årene har konseptet dyp læring revolusjonert fagfeltet kunstig intelligens. Dyp læring er en type maskinlæring som lar maskinene selv finne ut hvilke egenskaper som er avgjørende for å skille objekter fra hverandre. La oss si vi skal lære en maskin forskjellen på en fregatt og en stridsvogn. I tradisjonell

maskinlæring ville vi fortalt maskinen hva den skulle se etter, for eksempel farge, form og tekstur. Det å bestemme hvilke egenskaper det er best å bruke er imidlertid ofte veldig utfordrende. Med dyp læring lar vi maskinen selv finne ut hvilke egenskaper den vil bruke for å skille disse to farkostene.

De første eksemplene på dyp læring kom allerede på 90-tallet, men siden metodene krevde svært mye datakraft og store mengder treningsdata, var de ikke et reelt alternativ i de fleste anvendelser. Det er først etter at vi har fått kraftige nok maskiner og enklere tilgang på treningsdata at disse metodene har fått stor utbredelse.

Teknologifirmaer som Google, Amazon og Facebook investerer betydelige summer i forskning på dyp læring. Siden disse firmaene har tilgang til enorme mengder data og datakraft, har de gode muligheter til å utnytte potensialet i denne teknologien.

## Maskinen er sin egen lærer

Dyp læring er et kraftig verktøy, men som med alt annet er det viktig å forstå når det bør brukes og hvordan det brukes riktig. I oppgaver der forhåndskunnskap er viktig for å ta riktige beslutninger, kan andre maskinlæringsteknikker være bedre egnet.

Dyp læring krever treningsdata som dekker alle mulige variasjoner av situasjoner som kan oppstå. Dersom en bil for eksempel skal kunne kjøre om vinteren, må treningsdataene inneholde bilder med snø og is. Det at treningsdataene dekker





FOTO: ADOBESTOCK

alle mulige variasjoner er enda viktigere når en bruker dyp læring enn når en bruker tradisjonell maskinlæring. Dette er fordi vi med dyp læring ikke har kontroll på hvilke egenskaper maskinen velger, og det kan derfor lettere oppstå uforutsette sammenhenger om en har dårlige treningsdata.

For eksempel hvis alle bilder av hunder er tatt i en park, kan det fort ende med at bilder av en park alltid gir kategorien hund, selv om det ikke er noen hunder der. Innsamling av gode treningsdata er kanskje det viktigste en gjør når en skal bruke dyp læring.

Dyp læring blir ofte omtalt som en svart boks. Dette stemmer ikke i betydningen «ingen vet hvordan dette fungerer». Dyp læring er imidlertid en svart boks i betydningen at det er vanskelig å få en fullstendig oversikt over hva maskinen egentlig har lært og hvilke egenskaper den har valgt å bruke til klassifisering.

Mange metoder har blitt utviklet for å studere hva algoritmer innen dyp læring egentlig lærer, men grundig testing er likevel nødvendig for å validere ytelsen. En trenger et variert datasett med realistiske situasjoner til validering. Dette datasettet er på mange måter likt datasettet som blir brukt til trening, men det er viktig at disse ikke blandes. Dersom en metode valideres med samme datasett som det ble trent opp med, vil metoden enkelt valideres, men valideringen vil ikke ha noen verdi.

### Vanskelig å validere

Validering av ytelse er et problem som strekker seg langt utenfor dyp læring, og typisk reduseres problemet til å få en ytelse som er god nok. En kan ikke garantere at en sjåfør aldri vil forårsake en kollisjon, men sannsynligheten for at det skjer kan sies å være så liten at sjåføren får lov til å kjøre i trafikken.

For tolkning av sensordata er det relativt enkelt å evaluere ytelsen av en metode ved å ha et stort sett av data med tilhørende fasit. Problemet blir vanskeligere hvis omgivelsene påvirkes av systemets beslutninger, siden fasiten forandrer seg basert på systemets beslutninger. Derfor er det vanskelig å validere metoder for dyp læring som styrer biler, robotarmer og andre enheter som interagerer med og påvirker sine omgivelser. Dyp læring brukes derfor sjeldnere til slike formål.

Mange steder gis det inntrykk av at maskinlæringsalgoritmer lærer underveis i en oppgave, men det er sjelden tilfelle. Mens oppgaven løses, samles det ofte inn data, for eksempel om omgivelsene. Disse innsamlede dataene brukes for å løse oppgaven best mulig, men de brukes normalt ikke til å trene maskinlæringsalgoritmene underveis. Når en slik algoritme blir trent på nye data, endres den og må valideres på nytt. De innsamlede dataene må også oftest bearbejdes før de kan brukes som treningsdata. Selv om trening underveis i oppgaveløsningen ikke gjøres nå, vil det kanskje bli aktuelt i fremtiden. ■

# FORSKNING OG UTVIKLING VED FFI

## HUGIN

---

Arbeidet med den autonome undervannsfarkosten HUGIN startet tidlig på 90-tallet. Farkosten er utviklet i samarbeid med Kongsberg Maritime og er verdensledende i sitt slag. Den brukes blant annet til kartlegging og inspeksjon i offshore-industrien, og av marinen til søk etter miner. Det er begrensede muligheter til kommunikasjon under vann. HUGIN ble derfor tidlig utviklet for å klare oppgavene alene.



FOTO: FFI

## SENSORER

---

Sensorer og analyse av sensordata er avgjørende for at autonome systemer skal forstå sine omgivelser. FFI har ledende forskning på IR-sensorer, som blant annet benyttes i Joint Strike Missile. NASAs neste rover på Mars har en radar som er utviklet ved FFI og sonarene på HUGIN gir bilder i verdens-toppen. Under ser vi et sonarbilde tatt fra HUGIN. Bildet viser et område på ca. 560 meters dyp ved den midtatlantiske ryggen.

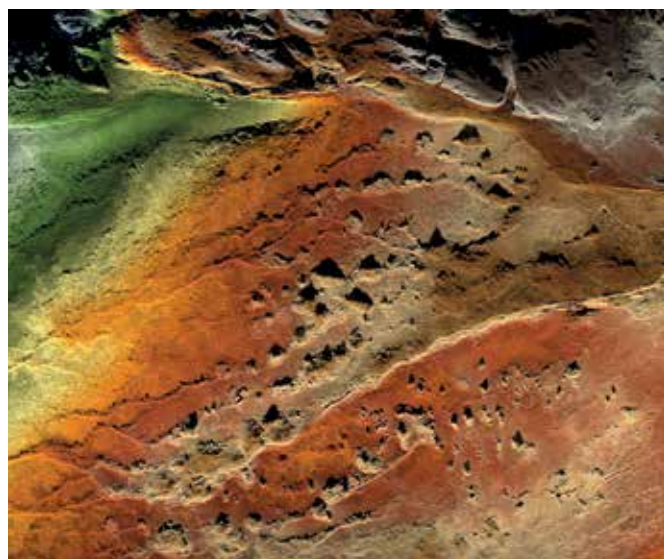


FOTO: OLE JACOB LORENTZEN, FFI / UIB



## MISSILER

Naval Strike Missile og Joint Strike Missile er de siste nyvinningene på en utviklingslinje ved FFI som strekker seg tilbake til 60-tallet. Missilene inneholder en autonom komponent som gir økt presisjon, slik at målet operatøren har valgt blir truffet på riktig sted.



ILLUSTRASJON: KONGSBERG DEFENCE & AEROSPACE AS

## TESTPLATTFORMER

FFI skal gi råd om mulighetene og truslene i ny teknologi. Derfor har vi laget forskningsplattformer som kan utvikles videre til prototyper til Forsvaret eller sivil bruk. Vi har også utviklet et autonomirammeverk som gjør at de kan forstå omgivelsene og ta beslutninger på egen hånd.

01 Olav kan kjøre autonomt på skogsbilveier og i terrenng, både vinter og sommer.

02 Tor, Olavs mer robuste etterkommer, egner seg bedre til oppdrag i felten.

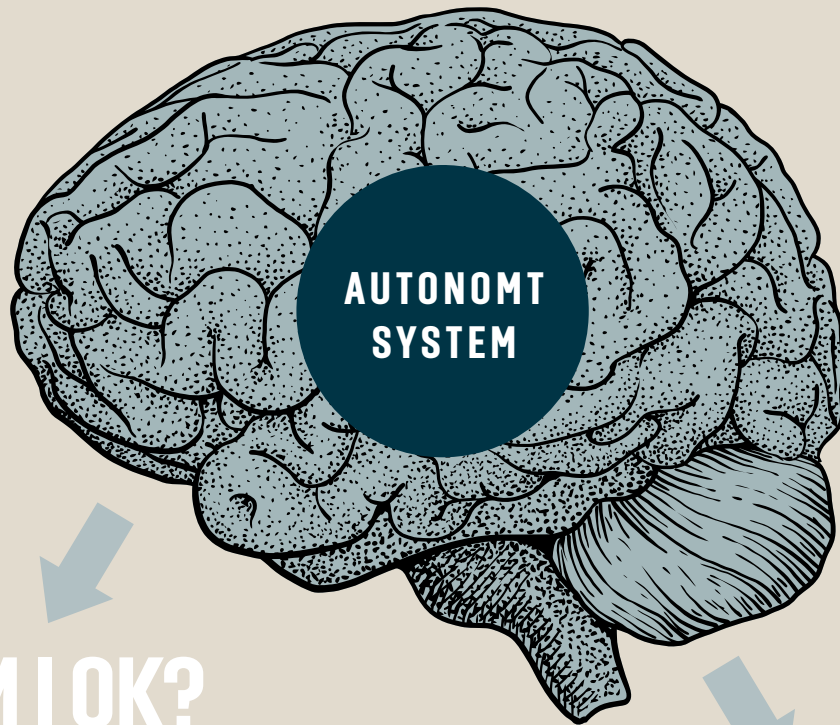
03 Odin kan søke i områder, unngå hindringer og følge trafikkreglene på sjøen. Er sammen med HUGIN tiltenkt en rolle i Norges nye maritime minemottiltakskonsept. (Se side 32-35)

04 Rammeverket for autonomi fra FFI er også brukt i dronesvermer som samarbeider om å løse oppgaver. (Se side 24-29)



FOTO: FFI

# WHERE AM I?



# AM I OK?



# WHAT TO DO?



## FORMÅLET MED EN AUTONOM FARKOST ER AT DEN ER I STAND TIL Å UTFØRE SINE OPPGAVER SELVSTENDIG

1

Farkosten må kunne ta beslutninger og finne ut hva som bør gjøres når og hvordan den bør forflytte seg. Dette forutsetter at farkosten kan oppfatte og tolke sine omgivelser slik at den forstår situasjonen den befinner seg i.

2

Den må ha oversikt over sin egen tilstand og sette i gang tiltak eller endre sine planer dersom den for eksempel skulle få motorproblemer eller mangle drivstoff.

3

Farkosten må også kunne motta kommandoer og relevant informasjon, i tillegg til å formidle og ta vare på informasjonen den selv samler.

# HVORDAN FUNKERER EN AUTONOM FARKOST?

Det er visse evner alle autonome farkoster må ha.

- De må kunne tolke omgivelsene.
- De må overvåke og vurdere sin egen tilstand og hvordan de løser oppgavene sine.
- De må bruke informasjon til å ta egne beslutninger.
- De må kunne kommunisere med omverdenen.
- De må kunne planlegge sin egen rute, og endre denne hvis omgivelsene krever det.

FFI har studert hvordan en autonom farkost kan få disse evnene. I denne artikkelen kan du lese mer om hvordan vi har valgt å løse utfordringene. Dette er selvsagt ikke den eneste løsningen, men ett eksempel på hvordan det kan gjøres.

## Teknologien kan brukes på mange måter

En autonom farkost kan utformes på ulike måter, både farkosten rent fysisk og autonomien om bord. Farkostens oppbygning og egenskaper vil i stor grad være tilpasset miljøet den skal operere i. En båt har andre egenskaper og behov enn en drone.

Ubemannede autonome farkoster er bare ett av mange ulike autonome systemer. Autonome systemer kan også inngå som deler av bemannede farkoster, i beslutningsstøtteverktøy eller i planleggingsverktøy.

Noe av autonomien som utvikles for autonome farkoster kan gjenbrukes direkte i andre typer autonome systemer. For eksempel kan deteksjon av mennesker i bilder brukes i fastmonterte systemer for kameraovervåkning av et område. Autonom beslutningstaking og ruteplanlegging kan brukes i simuleringstøtøytøy for å gi de simulerte enhetene mer realistisk oppførsel. →

## HVA SKAL JEG GJØRE NÅ?



Autonome systemer tar beslutninger selv. Det betyr ikke at de har fri vilje, men at de er i stand til å løse et sett med oppgaver på egenhånd ved å planlegge og ta beslutninger på bakgrunn av situasjonen de er i.

Maskiner blir stadig i bedre stand til å ta mer komplekse beslutninger. De siste årene har vi sett at maskiner har slått verdensmestere i sjakk og at selvkjørende biler kan følge trafikkreglene.

Beslutningstaking kan være komplekst fordi oppgaven som skal løses er vanskelig eller fordi maskinen skal kunne gjøre mange forskjellige oppgaver. Når vi bruker maskiner til å spille sjakk, er oppgaven til maskinen å bestemme neste trekk. Situasjonen den skal ta denne avgjørelsen i varierer, men det er én type avgjørelse.

De siste årene har vi sett et gjennombrudd innen metoder for kunstig intelligens, spesielt dyp læring. Dyp læring har vist gode resultater innen løsning av kompliserte, spesifikke oppgaver, som neste trekk i et strategispill eller tolkning av et bilde. Autonome ubemannede systemer skal gjerne løse mange forskjellige oppgaver. Det å kunne tilpasse oppgaveløsningen til situasjonen for å kunne oppfylle det overordnede målet med oppgaven er viktig.

Ofte deles en stor oppgave inn i flere ulike deloppgaver. Noen deloppgaver kan brytes ned og løses ved hjelp av relativt enkle regler, mens andre kan løses best ved hjelp av de nyeste teknikkene innen

maskinæring, for eksempel dyp læring. Mye av utfordringen ligger i hvordan vi bør representere og organisere alle disse mulige oppgavene og underoppgavene.

### Som i dataspill

Hva en autonom ubemannet farkost er i stand til å gjøre selv, er i stor grad avhengig av hvor godt farkosten klarer å tolke sine omgivelser og hva vi klarer å få farkosten til å gjøre rent fysisk. I virkelige robotsystemer er det ofte evnen til å tolke omgivelsene som setter begrensninger på hvor kompleks systemets beslutningstaking er. Både situasjonsforståelse og det å utføre handlinger er mye enklere i en simulert verden enn i den virkelige verden. De mest sofistikerte eksemplene på autonom beslutningstaking og oppførsel finner vi derfor i dataspill. Såkalte «non player characters» (NPC), karakterer i et dataspill som blir styrt av spillet selv og ikke av noen menneskelige spillere, skal gjerne kunne utføre mange forskjellige oppgaver. Skalerbare beslutningstakersystemer som skal kunne håndtere stadig flere oppgaver for autonome ubemannede farkoster kan derfor med fordel lære av metoder brukt i dataspill.

### Et felles system

Ved FFI har vi undersøkt hvordan autonom oppgaveløsning kan struktureres slik at beslutningsprosessen er lik for ulike oppgaver, selv om innholdet i hvert steg i prosessen vil variere. Ved å etablere en felles beslutningsprosess, har vi kunnet utvikle en modul for beslutningstaking og oppgaveløsning som kan gjenbrukes på ulike autonome systemer. Denne modulen brukes ved FFI til å styre både undervannsfarkosten HUGIN, båten Odin, kjøretøyet Olav, dronene Spurvene og er tatt i bruk på en båt kalt SeaKit. Modulen kalles Hybrid Autonomy Layer (HAL). HAL er modulær og fleksibel slik at den skal kunne støtte ulike grader av menneskelig kontroll og kunne brukes på flere typer farkoster.

Når den autonome farkosten får en oppgave den skal utføre, er det HAL som mottar og tolker oppgaven. HAL planlegger hvordan oppgaven skal utføres og sender kommandoer til styringssystemet. Oppgaven utføres basert på løpende oppdateringer om situasjonen rundt farkosten, og ruteplanleggingsmodulen brukes til å finne ruter med passende egenskaper. HAL kombinerer kontinuerlige prosesser med hierarkisk





FOTO: ADOBESTOCK/LIGHTFIELD STUDIOS

“ De mest sofistikerte eksemplene på autonom beslutningstaking og oppførsel finner vi i dataspill.

nedbryting av oppgaver til en sekvens av deloppgaver.

Nedbrytingen av en oppgave til deloppgaver skjer først når utførelsen av oppgaven skal påbegynnes, slik at hvordan en oppgave skal løses kan tilpasses situasjonen i øyeblikket.

Situasjonsendringer som påvirker nedbrytingen av en oppgave, vil føre til replanlegging. Dette oppgavehierarkiet samspiller tett med kontinuerlige prosesser som hele tiden lytter etter meldinger fra andre moduler eller sender kommandoer til fartøyets styringssystem. Denne kombinasjonen av kontinuerlige prosesser og sekvenser av deloppgaver gjør det mulig å teste ut ulike metoder for å modellere oppførsel. ■

## HVA SKJER?



For at en autonom farkost skal kunne operere i et komplekst og uforutsigbart miljø, må den være i stand til å skape sin egen forståelse av situasjonen. Dette krever både en forståelse av omgivelsene rundt farkosten og hvordan farkosten skal forholde seg til disse omgivelsene.

Sceneanalyse handler om å utnytte sensorer og annen tilgjengelig informasjon til å bygge et slikt situasjonsbilde. Med et kamera kan vi for eksempel lage et 3D-kart av omgivelsene, samtidig som vi kan måle vår egen posisjon og retning i dette kartet. Vi kan også kjenne igjen steder vi har vært før, kjenne igjen objekter vi må ta hensyn til og vurdere hvilke deler av området som er vei, terreng, luft og vann.

Dette kan vi gjerne kombinere med informasjon fra andre sensorer, slik som 3D-målinger fra en laserskanner og geografisk posisjon fra GPS. Det er også nyttig å ta hensyn til informasjon som er kjent på forhånd, slik som et terrengkart fra en kartleverandør.

### Lager 3D-modell av 2D-bilder

Sensormålinger må vanligvis behandles for å gi oss den informasjonen vi trenger til å bygge et godt situasjonsbilde. Som illustrert i *figur 1*, er for eksempel bilder i utgangspunktet bare et rutenett med tall fra lysmålinger i hver pikselretning. Sceneanalyse innebærer å bruke fagkunnskaper om sensorer, fysikk, geometri og annen matematikk til å tolke omgivelsene ut fra disse tallene.

Målegeometrien til et kamera har en relativt enkel matematisk beskrivelse, der hver piksel måler lys fra en bestemt

retning. Når vi har flere bilder fra ulike posisjoner, kan vi krysspeile piksler på samme måte som vi krysspeiler med kompass ved orientering i skogen eller ved navigasjon til sjøs. Dette lar oss beregne både 3D-strukturen til det observerte området og kameraets posisjon og orientering. Dette ser vi et eksempel på i *figur 2*.

I stedet for å programmere en datamaskin til å estimere egenskaper direkte, er det nå vanlig å trene datamaskinen til selv å lære hvordan den best kan lete etter mønstre i data. Denne teknologien har kommet så langt at datamaskiner er blitt nesten like gode som mennesker til å finne og klassifisere objekter i bilder. Dette har ført til at vi kan få mer ut av automatisk sensorprosessering nå enn for bare noen få år siden. *Figur 3* viser et eksempel der vi har brukt maskinlæring til å gjenkjenne hvor i bildet det er vei.

Sensormålinger vil i praksis alltid være utsatt for en god del feil og støy fra ulike kilder. Effekten av dette kan reduseres ved å bruke flere sensorer som observerer de samme områdene og ved å gjøre flere målinger over tid. En kan også trekke inn forhåndskunnskap om omgivelsene når dette er tilgjengelig. Å kombinere flere sensorer og andre kilder på denne måten kalles gjerne sensorfusjon. Sensorfusjon øker kvaliteten på

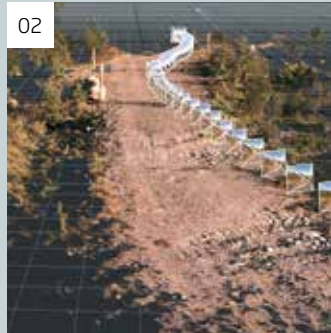
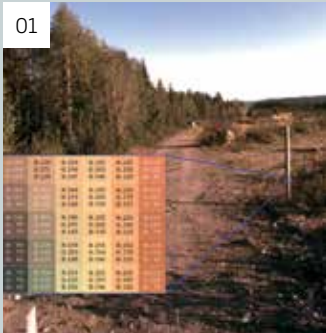
sceneanalysen og er viktig for å oppnå et robust situasjonsbilde vi kan ha tiltro til.

For at en autonom farkost skal få nytte av sceneanalysen, må det resulterende situasjonsbildet både dekke informasjonsbehovet og være representert på en konsis og lett tilgjengelig måte.

### Finner sin egen vei

Tolkningen av omgivelsene om bord i en farkost vil derfor variere basert på hva sensorene kan observere og hvilken informasjon farkosten trenger for å utføre oppdraget sitt. En farkost som må ta seg frem autonomt på en vei, vil for eksempel åpenbart være interessert i veianalysen fra *figur 3*. Men å vite hvilke piksler som inneholder vei kan ikke brukes direkte av en metode som skal planlegge hvordan farkosten bør styre for å holde seg på veien. I stedet kan veianalysen kombineres med 3D-informasjonen fra *figur 2* til å lage et farbarhetskart rundt farkosten. Det vil også være nyttig å legge til deteksjoner av objekter som må unngås. På denne måten kan det bygges opp et situasjonsbilde som vist i *figur 4*, som farkosten kan bruke til å planlegge en trygg og farbar rute.

En viktig del av arbeidet med autonome systemer ved FFI har vært å bygge et programvarerammeverk vi har kalt Warpath, som lar oss implementere



01 Et bilde er i realiteten et rutenett med tall, der tallverdiene typisk angir lysintensiteten som er målt i hvert bildeelement (piksel). I et fargebilde som her, måles lysintensiteten i de tre primærfargene rød, grønn og blå. Det er ikke enkelt å programmere regler som datamaskinen kan bruke for å forstå hvilke kombinasjoner av tall som betyr «vei».

02 Fra en bildeserie kan vi finne både en 3D-modell av terrenget og hvordan kameraet beveget seg i forhold til denne 3D-modellen. Vi kan dermed også regne ut 3D-posisjonen til objekter som er detektert i bildene.

03 Ved å bruke datamaskinen til å lære hva slags farger og mønstre som for eksempel kjennetegner vei, er det mulig å hente ut denne type informasjon fra bildet. Vi ser her et slikt resultat basert på dyp læring, der alle områder med overveiende sannsynlighet for vei er markert i grønt.

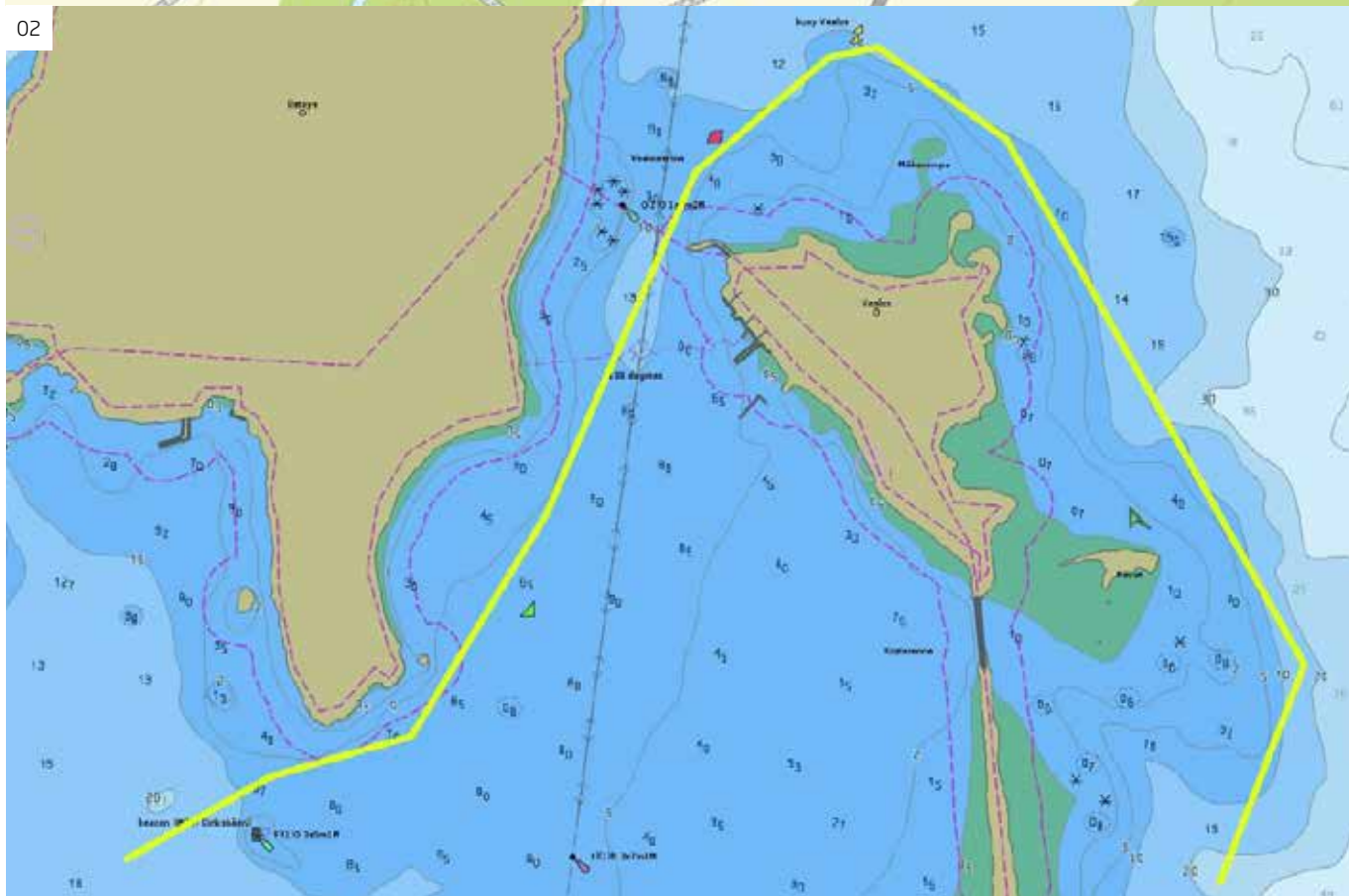
04 Et farbarhetskart for et autonomt kjøretøy lagt på et bilde. Farbarhetskartet er en fusjon av hindringer, veianalyse og egenskaper ved terrenget. Farbare områder er vist i grønt og ikke-farbare områder i rødt. Planlagt rute er blå og styringen i gult er regnet ut basert på dette situasjonsbildet.

05 Et farbarhetskart for en autonom båt. Kartet er en fusjon mellom målinger fra radar og en laser, og forhåndsinformasjon fra et sjøkart. Høy tiltro til sjø er svart, mens høy tiltro til land vises i hvitt. Den mørkeste regionen i midten viser høy tiltro til sjø fordi området er observert mange ganger av både radar og laser.

06 En objektoversikt for en autonom båt. Detekterte objekter beskrives med egenskaper som posisjon, fart, klassetilhørighet og bevegelsesmodell. Her er statiske objekter markert med rødt, mens bevegelige objekter er markert med blått. Den grå markøren er et nylig oppdaget objekt med for lav tiltro til å bli inkludert.

scenenanalyse for ulike autonome plattformformer på en fleksibel og effektiv måte. Med Warpath kan vi ta imot sensordata, definere hvordan disse skal prosesseres og fusjoneres og representere resultatene som kart eller objekter. Disse representasjonene lar oss på en naturlig måte beskrive både områdeegenskaper og egenskaper ved individuelle objekter i omgivelsene. Figur 4, 5 og 6 viser tre eksempler på situasjonsbilder produsert av Warpath for FFIs ubemannede farkoster.

Hensikten med sceneanalyse er å fusjonere informasjon fra sensorer og andre kilder og representere dette på en slik måte at farkosten får et godt nok situasjonsbilde til å løse oppdraget sitt på en god og effektiv måte. Den samme fremgangsmåten kan brukes til å bygge situasjonsbilder for mennesker. ■



Eksempler på bruk av ruteplanleggeren Magellan.

01 Ruteplanlegging i et forhåndsdefinert nettverk av ruter. Rutene er kjørt opp av FFIs autonome bil Olav.

02 En planlagt rute for FFIs USV Odin. Ruten går rundt Vealøys i Horten og holder trygg avstand til land og grunner.



## HVOR SKAL JEG KJØRE NÅ?



En sentral egenskap for både autonome og ubemannede farkoster er evnen til å forflytte seg til en ønsket posisjon. Farkostene bør da følge en rute som utnytter omgivelsene slik at forflytningen skjer trygt og effektivt. Hva som utgjør en god rute, er avhengig av farkostens oppgave og egenskaper.

Under noen oppdrag prioriteres det å bevege seg i skjul høyere enn tidsbruk, og små farkoster kan komme fram på steder der store farkoster må kjøre rundt. Ruten må tilpasses både terreng og farkost, og all tilgjengelig relevant informasjon om farkostens omgivelser bør utnyttes i planleggingen. Ruteplanlegging kan gjøres både i planleggingsfasen før en oppgave utføres og underveis dersom situasjonen endrer seg slik at den forhåndsplanlagte ruten ikke lenger er egnet. Valget av rute vil typisk tilpasses ulike typer enheter og oppgaver.

Evnen til ruteplanlegging gjør en autonom farkost i stand til å planlegge gode og gjennomførbare ruter på egenhånd. For en autonom farkost som opererer med begrenset eller ingen kommunikasjon med en operatør, er dette essensiell funksjonalitet for robust gjennomføring av en oppgave. I oppgaver der farkosten er mer direkte styrt av en operatør, vil evnen til ruteplanlegging om bord kunne redusere arbeidsmengden til operatøren slik at det er lettere å styre farkosten hensiktsmessig også i komplekse og stressende situasjoner. Det vil da også være mindre kritisk dersom kommunikasjonen med farkosten faller bort.

### Henter data fra flere kilder

Ved FFI har vi utviklet en ruteplanleggingstjeneste kalt Magellan. Kjernen i Magellan er en verdensmodell med relevant informasjon om omgivelsene. For å planlegge situasjonsavhengige og terrengtilpassede ruter, er det nødvendig at verdensmodellen gir en god beskrivelse av omverdenen som effek-

tivt kan nyttiggjøres i beslutningsprosessen. Denne modellen bruker data fra en rekke forskjellige kilder, slik som sjøkart, terrenkart og værmeldingstjenester. Det er mulig å oppdatere verdensmodellen med kunnskap som farkosten selv har erfart underveis i oppgaven, eller på tidligere oppdrag. Når Magellan mottar en forespørsel om en rute, beregnes optimal rute for enheten gitt situasjonsbilde og formålet med forflytningen. I tillegg til ruteplanlegging kan Magellan brukes til å hente ut annen informasjon fra verdensmodellen. Eksempler på dette er kystlinjer, havdybder, veinett og vinddata. Selv om kjernen i Magellan er lik for alle typer enheter, vil rutene som lages være forskjellige for ulike farkosttyper. Magellan er laget for å være enkel å utvide, både til nye typer oppgaver og til andre farkosttyper.

### Kan gi råd til operatøren

I tillegg til at automatisk ruteplanlegging kan brukes autonomt av farkosten selv, kan tjenesten også brukes som et støtteverktøy for farkostens operatør. Operatøren kan be om å få beregnet flere mulige ruter med ulike egenskaper eller legge inn egne rutealternativer og få analysert rutenes egenskaper.

Til treningsformål kan autonom ruteplanlegging brukes til å styre datagenererte enheter i et simulert miljø, for å oppnå en mer realistisk øvelse. En autonom ruteplanleggingstjeneste er dermed et egnet verktøy både for autonome og bemannede plattformer, så vel som til trening av personell. ■

## HVORDAN HAR JEG DET, EGENTLIG?



Når autonome farkoster skal operere på egen hånd, må de kjenne sine egne evner og status. Dette er viktigere jo lenger de autonome farkostene skal operere uten menneskelig inngripen.

For at autonome farkoster skal fungere selvstendig over tid, må de være i stand til å forstå sin egen tilstand og tilpasse seg deretter. Dette vil øke farkostens funksjonsevne når alvorlige feil oppstår og truer dens sikkerhet. En operatør kan ha begrensede muligheter til å sette i gang tiltak, særlig over større avstand.

Tiltak som er tilgjengelige for en operatør, vil kunne være omstart av ett eller flere systemer om bord, muligheten til å kommandere en nødstopp eller retur til et trygt sted. I oppgaver som gjennomføres med høy grad av autonomi, muligens uten tilgjengelige kommunikasjonskanaler, må farkosten selv registrere feil og sette i gang tiltak for å håndtere situasjonen.

### Leverer egenmelding

Tilstander som farkosten bør være i stand til å registrere og håndtere, vil være feil og avvik i sentrale komponenter som styring, sensorer eller beslut-

ningstaking. Ved å registrere feiltilstandene og tilpasse seg ved å kompensere for de endrede forholdene, kan det være mulig å gjennomføre oppgaven på tross av problemene, mens det i andre tilfeller vil være riktig av enheten å avbryte oppgaven og returnere hjem. Hva som er riktig beslutning, vil avhenge av feilen som oppstår. For eksempel vil mangel på drivstoff ha konsekvenser for hvorvidt farkosten kan returnere hjem etter oppgaven. Det kan da være mulig å gjennomføre oppgaven ved å tilpasse hastigheten eller velge en alternativ rute, mens det kan være riktig å avbryte oppgaven om dette ikke er mulig.

Et annet eksempel kan være at et dekk på et autonomt kjøretøy punkterer, og det må avgjøres om kjøretøyet likevel skal kjøre videre. I slike situasjoner må farkosten ta en beslutning om hva som er mest hensiktsmessig i den aktuelle situasjonen, avhengig av omgivelsene, oppgaven og feiltilstanden.

### Selvkritisk farkost

I tillegg til å overvåke sin egen interne tilstand, bør en autonom farkost fortløpende evaluere hvor godt den gjennomfører oppgaven sin, slik at oppførselen autonomt kan tilpasses forholdene. Dette kan innebære å vurdere kvaliteten på innsamlede bildedata eller andre sensordata som påvirkes av for eksempel lysforhold eller vær.

Feildeteksjon er ikke bare relevant for fullt autonome farkoster, men også som operatørstøtte for delvis autonome eller fjernstyrte farkoster. For at operatøren kan styre farkosten på best mulig måte gjennom oppdraget, må feil detekteres om bord i farkosten og formidles til operatøren. Da kan operatøren tilpasse den videre gjennomføringen av oppgaven eller avbryte dersom det er nødvendig. ■

HALLO! ER DET  
NOEN DER UTE?



Gode kommunikasjonsløsninger er nødvendige for at vi skal kunne utnytte autonome farkoster effektivt. Autonome farkoster kan brukes til å få bedre oversikt over situasjonen ved å kommunisere sine observasjoner til andre.

Farkostene kan gis oppdatert informasjon eller nye oppgaver underveis i et oppdrag, og det kan være ønskelig med menneskelig oversikt over farkostenes planlagte handlinger. En fungerende kommunikasjonskanal er nødvendig for å få dette til. I vår moderne hverdag kan vi ta det for gitt at en slik kommunikasjonskanal eksisterer, men det er ikke selvsagt for autonome farkoster. De kan måtte bevege seg i områder der det i liten grad eksisterer infrastruktur for kommunikasjon, og de risikerer å måtte benytte ustabile trådløse kommunikasjonsnettverk. Dette stiller krav til kommunikasjonsløsningene.

#### Oppretter kommunikasjonskanal

En fjernstyrt farkost vil ha behov for kontinuerlig overføring av bilder og styringskommandoer underveis i en oppgave. Med avansert autonomi om bord er det mindre nødvendig å kunne garantere en uavbrutt kommunikasjonskanal til den autonome

farkosten, siden farkosten kan programmeres til å finne posisjoner den kan kommunisere fra jevnlig eller ved spesifikke situasjoner. Det vil altså være nødvendig at farkosten kan opprette en kommunikasjonskanal ved behov, for eksempel ved autonomt å forflytte seg til et egnet sted. Deler av handlings-spekteret til en autonom farkost vil kunne kreve meningsfull menneskelig kontroll, og i mange tilfeller er en viktig del av farkostens oppgave å spre sitt situasjonsbilde til bemannede enheter.

Framtidens behov for samhandling med og mellom autonome farkoster vil tvinge fram økt bruk av ustabile kommunikasjonsnettverk, og antallet autonome farkoster vil i seg selv også forsterke ustabiliteten i disse nettverkene. En mulighet for å imøtekomme det økte behovet for kommunikasjon, er å bruke autonome farkoster også til å sette opp nettverk i områdene de opererer i. ■





# SMÅ MASKINER STORE OPPGAVER

Store grupper med mange like farkoster kalles ofte svermer. Ordet sverm er inspirert av hvordan insektsvermer, fiskestimer og fugleflokker samarbeider i store grupper.

## AUTONOMT SAMARBEID

Se for deg at en gruppe selvgående gressklippere får i oppgave å klippe en stor gresslette.

Oppgaven kan løses ved at hver gressklipper får tildelt sin egen del av sletten. Dette krever lite avanserte algoritmer for samarbeid, kun kollisjonsunngåelse.

Dersom alle gressklipperne i stedet skal dele på den store oppgaven å klippe hele sletten, krever det mer samhandling og koordinasjon underveis. Hver gressklipper må finne ut hvor den bør klippe ut fra hvor de andre klipper, og hvor det gjenstår å klippe.

Fordelen med en slik løsning er at hele sletten til slutt blir klippet, selv om en eller flere gressklippere slutter å virke.

Det er denne typen avansert autonomt samarbeid svermforskerne jobber med.

Farkostene i en autonom sverm er ofte relativt enkle hver for seg, og de tilpasser sin oppførsel til sine naboers handlinger. Som helhet kan svermen løse store oppgaver, også hvis kommunikasjonsmulighetene er begrensede, siden hver farkost først og fremst lar seg påvirke av naboene.

Svermintelligens er en type algoritmer innen kunstig intelligens for autonomt samarbeid. Disse algoritmene gir hver farkost oppførsel og beslutningstaking som ligner oppførselen til de biologiske individene i svermer. Ideen er at hvert individ i en sverm tar enkle beslutninger, og den kunstige intelligensen om bord har enkle handlingsregler.

Vi tror at det vil være relativt enkelt å øke størrelsen til slike svermer og at de vil kunne organisere seg selv slik at de fortsetter å fungere som helhet selv om enkelte farkoster skulle slutte å fungere.

## Spillteori

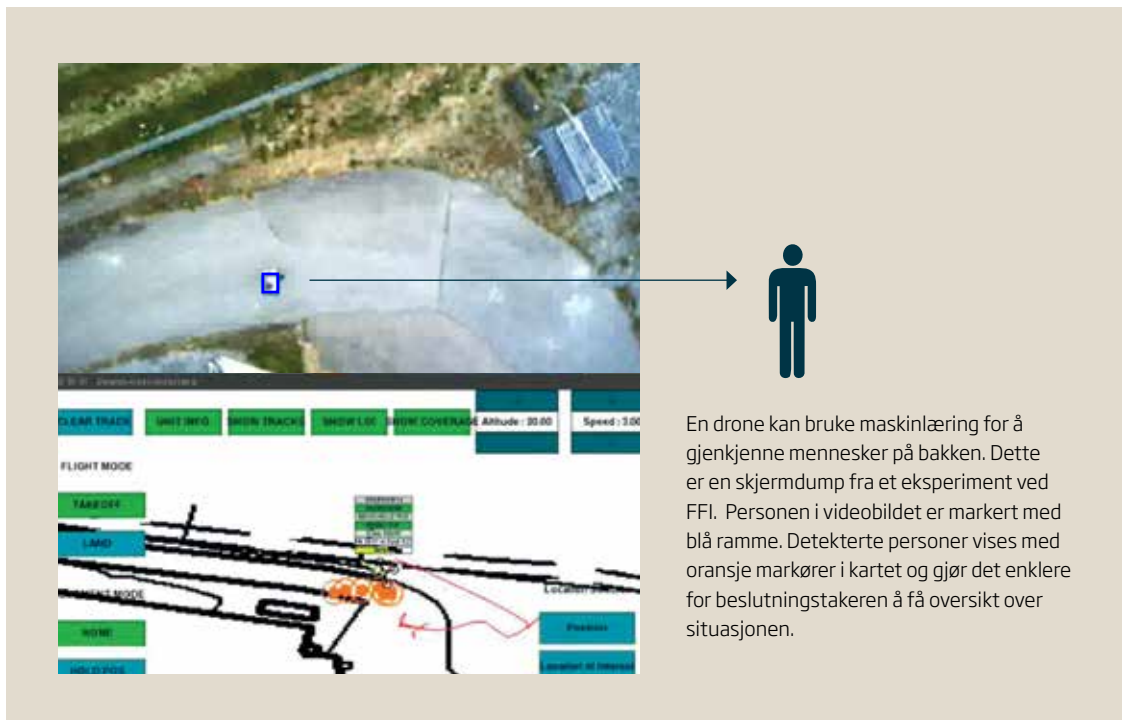
Autonomt samarbeid i en sverm er ikke alltid basert på svermintelligens og enkle

individer. Algoritmer fra spillteori kan brukes for at hver farkost skal ta mer strategiske beslutninger i sin interaksjon med gruppen. Hver farkost må oppfatte og tolke oppførselen til andre farkoster og kunne beregne utfallet av sine beslutningsalternativer.

Den kunstige intelligensen om bord i farkoster med algoritmer basert på spillteori er ofte smartere og mer komplisert enn i de reaktive algoritmene for svermintelligens. Hver farkost beregner sitt beste neste trekk i den oppfattede situasjonen, i motsetning til innen svermintelligens, der hver farkost har enkle reaksjoner på sine naboers handlinger.

## Dekning og metning

En sverm av samarbeidende farkoster har mange bruksområder. Flere oppgaver som er vanskelige eller tidkrevende for en enkelt farkost alene, kan effektivt utføres av en sverm med relativt enkle farkoster. →



En drone kan bruke maskinlæring for å gjenkjenne mennesker på bakken. Dette er en skjermdump fra et eksperiment ved FFI. Personen i videobildet er markert med blå ramme. Detekterte personer vises med oransje markører i kartet og gjør det enklere for beslutningstakeren å få oversikt over situasjonen.

Vi kan dele oppgavene i to hovedkategorier. Den ene kategorien er anvendelser der en stor oppgave fordeles mellom mange farkoster, som gressklipping av en stor slette. Det er enklere for mange enheter å rekke over et stort område effektivt enn for én enkelt farkost, selv uten avansert planlegging. Denne kategorien kalles dekningsapplikasjoner og innebærer ofte oppgaver av lengre varighet i store områder.

Den andre kategorien er oppgaver der vi sender ut mange farkoster i håp om at noen farkoster får utført oppgaven. For eksempel dersom vi har behov for å samle informasjon om et område under fremmed kontroll, kan vi sende inn mange droner for å øke sannsynligheten for at noen kommer helt fram, da det blir vanskelig for motstanderen å ta ut alle dronene. Denne kategorien kalles metningsapplikasjoner og er vanligvis kortvarige, lokale og intense.

Områdeovervåking er et typisk eksempel på en dekningsapplikasjon. Oppgaven er å holde et område under oppsyn

over tid med en sverm av små droner utstyrt med kamera. Ved å bruke en sverm av droner til områdeovervåking, får vi mer oppdatert informasjon, siden mange droner raskere kan av søke hele området. Det blir dermed kortere tid mellom hver gang hver del av området blir besøkt.

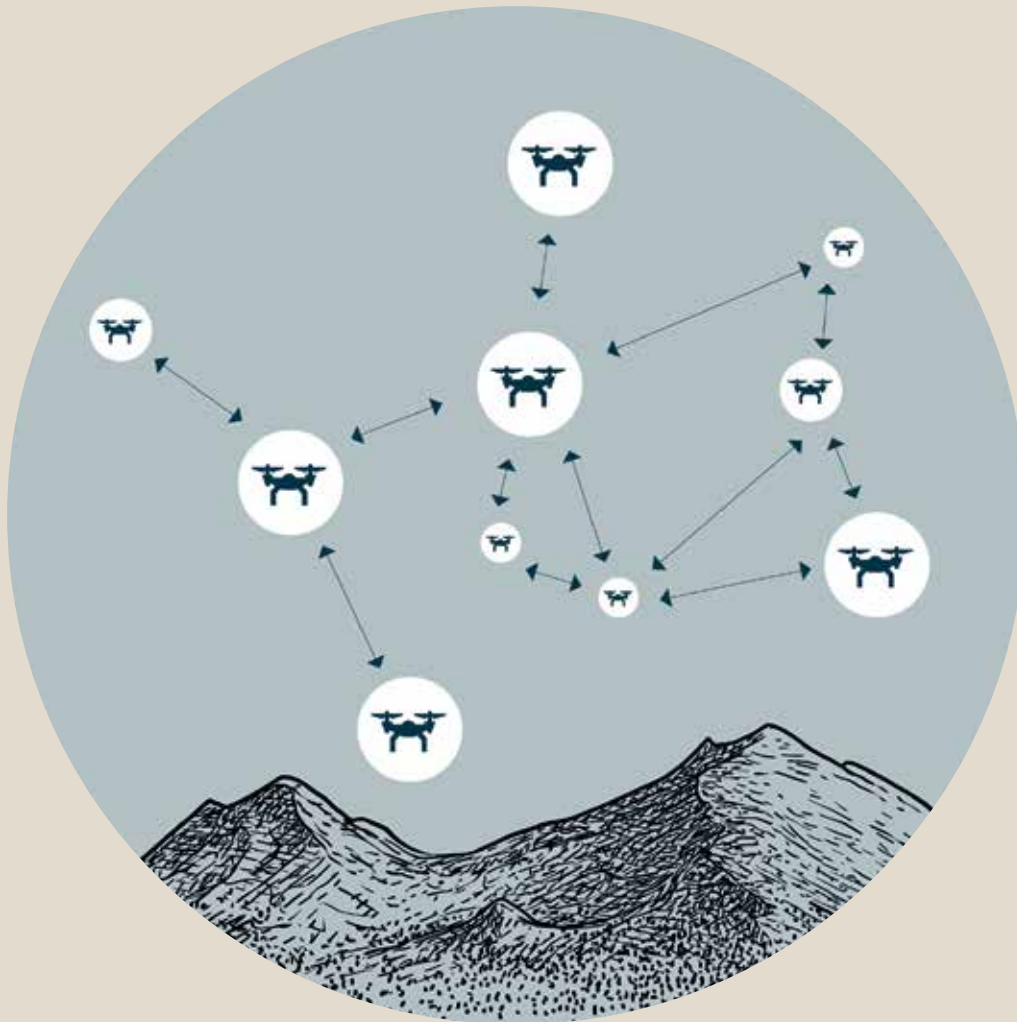
Vi kan også la droner som ser noe interessant gå nærmere inn på objektet, uten å miste oversikten over resten av området, siden de resterende dronene kan fortsette overvåkingen. Observasjoner fra mange droner fra ulike vinkler kan gi mer pålitelighet til informasjonen som hentes inn, og større områder kan overvåkes kontinuerlig.

### Bevegelige nettverk

Kommunikasjon er ofte en utfordring for autonome farkoster, siden de kan operere i områder med lite eller mangelfull infrastruktur for kommunikasjon. Utfordringen blir ikke mindre dersom vi vil operere en hel sverm med farkoster som må dele på de begrensede kommunikasjonsmulighetene.

En interessant oppgave for en sverm av autonome farkoster er derfor å sette opp et kommunikasjonsnettverk i et område. Dette nettverket kan brukes til kommunikasjon for svermen selv og av andre autonome farkoster eller mennesker i området.

Opgaven til en slik sverm vil være å holde seg nær nok sine naboer til å være innenfor kommunikasjonsrekkevidde samtidig som svermen sprer seg så godt som mulig ut over området. Et slikt nettverk vil da organisere seg selv og sørge for å gjenopprette kontakt dersom noen naboer skulle komme for langt unna hverandre. ■



**EN SVERM KAN FÅ I OPPDRAG Å LØSE FLERE  
OPPGAVER SAMTIDIG, FOR EKSEMPEL Å OVERVÅKE  
ET OMRÅDE SAMTIDIG SOM DEN OPPRETTHOLDER  
ET KOMMUNIKASJONSNETTVERK I OMRÅDET.**

## SONDRE TRENER

# FRAMTIDENS DRONER

Å sende hundrevis av droner opp i lufta er ikke noe problem, skal du få dem til å samarbeide og snakke sammen blir det langt mer komplisert.



På en flystripe i en paddeflat, øde del av California står Sondre Engebråten og klør seg i hodet. På asfalten står 20 droner linet opp. En minivan, en koffert med ladere, et par laptopper, et provisorisk telt og et campingbord - lite vitner om at et av verdens hittil mest avanserte droneforsøk er i ferd med å finne sted.

Engebråten jobber med en doktorgrad om såkalt «multifunksjon dronesverm». I dag skal han forsøke å sette ny rekord. 20 droner skal opp i luften samtidig, og de skal løse to oppgaver mens de er i luften.

### Hvorfor droner?

For Forsvaret er det aktuelt å bruke dronesvermer til overvåking og kommunikasjon. Det er dette Sondre forsøker å få sin sverm til å gjøre. Svermen skal løse oppgaven selv, uten detaljstyring fra operatører på bakken.

– I veldig mange situasjoner trenger vi «framskutte øyne». En dronesverm kan sendes ut for å hente inn informasjon om hva som befinner seg i et bestemt område. En sverm kan også fungere som et kommunikasjonsnettverk når andre nettverk er slått ut, sier Sondre

Å få 20 droner til å fungere som en sverm er det få eller ingen som har gjort før, mener han.

– For at vi skal kunne kalle det en sverm, må det være flere enn tre droner, og de må kunne kommunisere og samarbeide.

Fordelen med å eksperimentere i California er at været er mer dronevennlig.

Foto: Oleg Yakimenko

Intel sender jo opp dronefyrverkeri med hundrevis av droner – men den ene dronen vet ikke at den har hundre andre rundt seg. Det ser kult ut, men det er jo egentlig helt ubrukelig til noe annet enn underholdning, mener Sondre.

– Vi ser på hvordan svermer kan bli et praktisk, nyttig og selvorganiserende verktøy ute i skog og mark.

### Tetter «virkelighetsgapet»

For å få dronene til å snakke sammen og fungere som ett nettverk har Sondre blant annet montert en prototyperadio på undersiden. Dronene er standard butikkvare, kjøpt på nett.

– Tradisjonelle nettverk er bygget opp med en sentral node/ruter. Hvis hovednoden mister strøm eller kobles ut, faller hele nettverket ned. Det fungerer dårlig i sverm. For svermen må vi ha en desentralisert struktur hvor hver enkelt agent (drone) er like viktig. Alle kan snakke med alle. Selv om en eller to droner faller ut, fungerer nettverket fortsatt og svermen kan fortsatt kartlegge området.

Doktorgraden følger to løp. Sondre jobber med datasimuleringer for å lage kontrollalgoritmene til dronesvermen – det vil si kommandoene som ligger til grunn for hvordan dronene oppfører seg og snakker sammen. I tillegg er det et praktisk løp der han lager en prototypesverm som kan brukes i demonstrasjon.

– FFI er alltid interessert i en fysisk demonstrasjon av det vi gjør, noe som kan vises fram. Når du gjør simuleringer vil det alltid være en «reality gap» - uforutsette problemer som kan oppstå når du tar et forsøk fra laben og ut i virkeligheten. Jeg tetter det gapet, sier Sondre og ler.

### Har laget regnfrakk til droner

For selv om en algoritme fungerer i simulator finnes det 1000 ting som kan få det til å svikte i praksis. For eksempel når batteriene svikter i varmt vær. Og hvordan skal vi lage vanntette droner som kan fly i regn? Eller hvordan skal dronene få byttet batterier underveis? Jo ved å lage et vanntett droneskall, og en batterirobot på bakken som dronene i svermen bytter på å besøke ved behov. (De to sistnevnte har faktisk vært prosjekter for studenter med sommerjobb ved FFI.)

– Det kreves mye ingeniørarbeid for å løse alle praktiske problemer. Vi må kombinere mange fagområder. Målet må være å lage et system som er enkelt å operere, sier Sondre.

Så hvordan gikk det med eksperimentet denne dagen? Det ble ny «pers», som de sier på idrettsbanen. 13 fløy og fungerte som en sverm, seks ble stående på bakken på grunn av nettverksproblemer, en ble stående fordi den var feilkalibrert. Sondre gir seg ikke før han har fått alle 20 til å fly i flokk. ■

## FAKTA

### Sondre Engebråten (29)

- Mastergrad fra NTNU i Datateknikk.
- Har jobbet ved FFI siden 2015.
- Studerer distribuert autonomi (svemer) og samhandling for autonome enheter.
- Var på Naval Postgraduate School 2017-2018 som Fulbright Visiting Student Researcher.
- Jobber for tiden med doktorgradsavhandling om hvordan dronesvermer kan løse flere oppgaver samtidig.



Sondre i felten med forskerkollega Olav Rune Nummedal. Foto: Oleg Yakimenko



# SLIK KAN NATO-ROBOTENE SAMARBEIDE

For at Nato-samarbeidet skal fungere, må autonome systemer fra ulike land lære seg å snakke samme språk. Et eksperiment på Rena viser at det er mulig.



Inne i brakka på Rena. Forskerne har laget et felles system for alle kjøretøyene, og ser UGV-enes innbyrdes posisjoner på skjermen. De har videooverføring fra enhetenes kameraer, og styrer det hele fra et par kontrollenheter. Foto: FFI

Fjorten mann sitter i en brakke, i to rekker og omgitt av ledninger, skjermer og annet teknisk utstyr. Det summer av stemmer på radiosambandet. Utenfor kjører fire ubemannede kjøretøyer. Fire skjermer viser hva kjøretøy ser akkurat nå.

## Elektroniske øyne

Vi er i et glissent skogsområde ovenfor Rena leir i Hedmark. Her, i 350 meters høyde, er det bygd opp et lite kvartal: Solide byhus uten innmat, beregnet på krigsøvelser av alle slag.

Kjøretøyene kommer fra Norge, USA og Tyskland. Personell fra Polen og Italia deltar også. De fire kjøretøyene beveger seg omkring i det forlatte området. De holder vakt, de klarer hus og gater, de speider etter alt som kan være mistenkelig.

Plutselig fanger en av kjøretøyene opp en uidentifisert mann som bærer på en mistenkelig gjenstand utenfor en av bygningene. Så løper mannen i full fart vekk fra stedet. Hva satte han fra seg?

Den tyske UGV-en kjører nærmere. Den strekker hals. Mange vil gjenkjenne den som en bomberobot, av det slaget som politiet bruker i tilsvarende situasjoner. Den har skråstilte



De fire kjøretøyene som ble brukt under eksperimentet på Rena, var alle hyllevare i utgangspunktet, men er blitt utstyrt med en rekke spesialtilpasninger.

Foto: FFI

belter, som gjør at den kan gå i trapper om nødvendig. Via kameraet ser operatørene i brakka at de står overfor en mulig terrorbombe.

### De må snakke med hverandre

Teknisk krever slike operasjoner mye båndbredde og høy frekvens. Men det kreves mer enn som så:

- Interoperabilitet blir stadig viktigere. Ulike systemer fra ulike nasjoner må samarbeide på flere plan. Kommunikasjonen med, og mellom, enhetene er det interessante for oss under denne øvelsen, sier forsker Kim Mathiassen på FFI.

- Det krever at vi utvikler det felles språket som plattformene kan kommunisere med. Det krever standardisering. På dette området har Nato fortsatt et langt stykke å gå, fastslår forskeren. Sann sett blir erfaringene fra Rena nyttige å ha med.

Mathiassen er ekspert på blant annet robotikk og kybernetikk, og er ikke alene om å mene at dette feltet er en viktig del av Forsvarets framtid. Han peker på kontrollstasjonene:

- Måten enhetene styres på er ganske intuitiv. Ungdom med spillmaskiner vil øyeblikkelig forstå hvordan dette fungerer.

Det er muligheten for å operere uavhengig av plattformene som vil være selve magien for oss. Da slipper vi en hel tilhenger med eget utstyr til hver UGV.

### USA ser på pris, plass og tid

Paul Bunker fra USA er kommet hit for å følge eksperimentet. Han har arbeidet med disse utfordringene i årevis, i Tank Automotive Research, Development and Engineering Center (TARDEC). Han følger nøye med det som skjer på skjermene og ute i gata. For amerikanerne dreier det seg ikke bare om teknologien.

- Når mange enheter fra ulike land deltar under samme protokoll, handler det også om å utføre oppgavene billigere. En lærdom fra bruken av roboter i operasjonene våre i Irak og Afghanistan var at det er uheldig å skaffe utstyr fra bare én leverandør. Det fører til to ting: Høye kostnader, og at det er vanskelig å slutte å bruke den leverandøren. Vi skal betale ikke bare selve enhetene de leverer, men også alt som følger av selve bruken, sier Bunker. ■





# NORGES NYE UBEMANNENDE MINEJEGERE

Norges minerydderfartøy går snart ut på dato. Innen 2028 er målet å ha på plass et nytt og ubemannet system for å oppdage og uskadeliggjøre miner.

- Dette vil være både billigere og mer fleksibelt en dagens løsning, og det flytter mannskapene ut av minefeltene, sier forskningsleder Morten Nakjem.

Marinen bruker allerede den autonome ubemannede undervannsfarkosten (AUV) HUGIN for å finne og identifisere miner, og de bruker et fjernstyrt engangsvåpen for å ødelegge minen.

Det nye systemet vil i sin helhet styres av et moderskip som ligger på trygg avstand fra det minefarlige området. AUVene og engangsvåpnene som skal finne og ødelegge minene, fraktes inn med raske, autonome ubemannede båter, som også fungerer som et kommunikasjonsledd mellom AUV og moderskip.

Slik fungerer systemet →

Utviklingen av det autonome ubemannede systemet har kommet et godt stykke på vei. Slik så det ut da FFI og H Henriksen AS testet å sjøsette og hente inn HUGIN fra den ubemannede båten Odin sommeren 2019. Foto: FFI



## MINESVEIP



1

To autonome ubemannede båter trekker et influensminesveip mellom seg. Dette skal simulere et passerende skip og få miner til å gå av.

## OMRÅDESØK OG KLASSIFISERING



2

HUGIN sendes inn for å kartlegge havbunnen i et område autonomt. Bildegjenkjenningsskemaer gjør at HUGIN finner minelignende gjenstander på havbunnen som den undersøker nærmere. AUVen gir operatørene i moderskipet beskjed om hvor det er miner, og hva slags miner det er.

## NØYTRALISERING



3

En ubemannet båt sendes inn med et engangsvåpen for å uskadeliggjøre minene. Engangsvåpenet er koblet til den ubemannede båten med en optisk kabel. En operatør på moderskipet styrer og fyrer av våpenet. Ved kompliserte tilfeller må minedykkere sendes inn for å løse problemet.





FIGUR: NDMA



# ETIKK, TAKK!

Hvordan kan vi sørge for at ny teknologi ikke bryter med humanitærretten i krig?

## FAKTA

- **Genèvekonvensjonen** ble tatt fram etter andre verdenskrig og har som formål å beskytte sivile og bidra til en mest mulig human krig. Den gir regler som skal beskytte individet.
- Den har blant annet **prinsipper** som distinksjon, proporsjonalitet, militær nødvendighet og humanitære hensyn.
- I stort handler disse om **å kunne skille sivile fra militære mål**, at angrep på militære mål ikke er tillatt hvis det fører til stor skade på sivile, **unngå unødvendig skade og lidelse** for å nå et militært mål og at konsekvensene av et militært angrep alltid vurderes opp mot disse prinsippene.
- Mange land, inkludert Norge, har forpliktet seg til konvensjonen.

I flere tiår har det med ujevne mellomrom dukket opp innspill i media rundt farene ved kunstig intelligens. Lenge var teknologien så umoden at scenarioene ble betraktet som framtidstvisjoner vi ikke trengte å ta alvorlig. De siste årene har framstående vitenskapsmenn og teknologer kastet seg inn i debatten og påpekt at dette ikke lenger handler om en fjern framtid, men noe vi må ta inn over oss og ta stilling til nå.

Innspillene i debatten er enten veldig for eller veldig imot kunstig intelligens. Det er få nyanserte innspill. Det kan virke som stemmene er redde for å ikke bli hørt om de nyanserer.

## Skrekkvisjoner

Alan Turing, datamaskinenes far, var allerede i 1950 inne på spørsmålet om maskiner kan tenke. Siden har temaet kunstig intelligens jevnlig dukket opp i filmer og bøker, for eksempel 2001: En romodysse (1968), Colossus – the Forbin project (1970), Westworld (1973 og 2016) og Terminator-filmene. Et felles trekk ved handlingen i disse, er å problematisere det å delegere ansvar til maskiner.

I samfunnet ser vi at stadig mer ansvar delegeres til maskiner, både for å redusere tidsbruk og kostnader og for økt nøyaktighet. Utviklingen bringer med seg utfordringer innen lover, forsikring og fordeling av ansvar.

I tillegg til frykten for at kunstig intelligens kan bli smartere enn mennesker, kan programmeringsfeil og begrensninger i algoritmene eller maskinvare føre til feil. Maskiner kan også tas kontroll over av uvedkommende og brukes til ondsinnede formål.

## Hva er meningsfull menneskelig kontroll?

I 2015 blusset debatten opp igjen om farene ved kunstig intelligens. Flere ledende forskere innen robotikk og kunstig intelligens gikk sammen om å utforme et brev som advarte mot autonome våpen<sup>3</sup>. Det handler ikke om autonome systemer generelt, men om autonome systemer som kan ta liv med våpen. Her er det viktig å få fram at et ubemannet system med våpen, der et menneske godkjenner et mål og et engasjement, ikke er et autonomt våpen. Mennesker har da kontrollen.

I brevet advares det mot et våpenkappløp med stadig mer avanserte autonome våpen. Siden da har debatten gått i mediene, men også blant nasjonene i FN.

Genèvekonvensjonen stadfester at det skal være meningsfull menneskelig kontroll over våpensystemer når liv tas. Hvis ikke kan de forbys ifølge humanitærretten. Motstanderne mot autonome våpen mener at slike systemer ikke oppfyller humanitærretten og må forbys, mens andre mener at humanitærretten



er god nok til å regulere bruk også av slike systemer. De store spørsmålene er da;

“

### Hva er et autonomt våpen og hva er tilstrekkelig eller meningsfull menneskelig kontroll?

#### Et definisjonsspørsmål

Det er ikke enighet om disse definisjonene i FN. En definisjon er at dette er systemer som velger målene sine selv og velger selv å engasjere disse. Bruker vi denne definisjonen, hva er da tilstrekkelig meningsfull menneskelig kontroll over et slikt system?

De som ønsker et forbud mener at et autonomt system ikke kan gjøre vurderinger som kreves av Genèvekonvensjonen, og hvis de klarer det så er det likevel ikke etisk rett å gi et autonomt våpen slik myndighet. Andre mener at det finnes mangescenarioer der et autonomt våpen-system kan bidra til bedre presisjon i et angrep og dermed spare liv. De mener at bruk av slike våpen i mange scenarioer, eksempelvis et angrep mot et krigsskip på havet uten sivile i nærheten, ikke strider mot prinsippene. Disse mener dermed at Genèvekonvensjonen er tilstrekkelig og at et forbud ikke er nødvendig eller hensiktsmessig.

#### Hårfin grense

I en slik debatt er det mange teknologiske spørsmål. FFI støtter forsvarsektoren med kunnskap om hva et autonomt våpen er, og hvilke muligheter og begrensninger teknologien gir for operativ menneskelig kontroll.

Menneskelig kontroll kan foregå på mange måter. Våpenets handlinger og grenser styres gjennom programvaren. Det kan være å gjenkjenne riktig mål eller å avbryte ved feil. Programvaren må testes og valideres slik at systemet fungerer som det skal. Det er en form for menneskelig kontroll.

Hvordan et oppdrag blir gitt og hvilke frihetsgrader som gis den autonome farkosten er en annen måte å utøve kontroll på. Oppdraget kan inneholde operative begrensninger i tid og rom. Du kan for eksempel si at et våpen kun skal virke innenfor et bestemt geografisk område for et gitt, korttidsrom der det kan garanteres at det finnes godkjente militære mål, men ikke sivile mål.

For å sikre menneskelig kontroll, er trening og opplæring av personell sentralt, slik at de er kjent med teknologiens begrensninger, kan monitorere og avbryte angrep og at personellet er trent til å ta operative vurderinger opp mot humanitærretten i krig. Mennesker vil alltid måtte være ansvarlig for bruk av autonome systemer i krig. Spørsmålet er

hvordan disse systemene påvirker global sikkerhet og hvordan nasjoner forholder seg til et eventuelt forbud.

Teknologien er lett tilgjengelig, det er svært vanskelig å følge opp når teknologien er autonom og ikke menneskestyrt. Det kan være bare noen få kodelinjer forskjell, og samme systemer kan benyttes både som autonomt og menneskestyrt. Teknologien kan komme til å utgjøre en stor forskjell i militær makt.

En utfordring med debatten slik den framstår i media er at den mangler både teknologisk og militær innsikt. Det brukes ord som «drapsroboter» og det males bilder av en apokalyptisk fremtid. Debatten må jordes og konkretiseres til hvilke teknologi det faktisk er snakk om og teknologien må settes inn i en militær kontekst. Først da kan vi komme frem til en faktabasert vurdering og løsning som ivaretar både nasjonal sikkerhet og humanitærretten.

Den videre debatten vil forhåpentligvis klargjøre hvordan autonome våpen skal tolkes mot Genèvekonvensjonen og hvilken menneskelig kontroll som eventuelt kreves.

Kontroll over systemer er uansett noe alle ønsker, både militæret og det sivile. Det gjelder også autonome systemer uten våpen som har stor nytteverdi i overvåking, logistikk og minerydding. ■

# OPPSUMMERING

1

## Den teknologiske utviklingen innen autonome systemer går raskt.

Det investeres store summer i denne teknologien både i det sivile og det militære. Teknologien produserer data, behandler denne til informasjon og benytter informasjonen til å foreslå eller utføre oppgaver. Utviklingen av smarttelefoner hos Apple og Huawei, søkealgoritmer hos Google, pakketransport i Amazon og bildegjenkjenning på Facebook bidrar alle til nye teknologiske fremskritt som kan benyttes i autonome systemer, for eksempel selvkjørende biler.

2

## Autonome farkoster må ha evnen til å tolke sine omgivelser, ta beslutninger og kjenne sine egne evner og begrensninger.

De må kunne ta beslutninger og forflytte seg trygt for best mulig å løse oppgavene de er gitt. Når uforutsette situasjoner oppstår, må det håndteres. Noen oppgaver vil løses av den autonome farkosten uten at det kommuniseres med operatøren underveis, mens andre oppgaver vil kunne ha som formål å formidle informasjon tilbake til operatøren. Kompliserte oppgaver og situasjoner kan kreve mer detaljstyring enn rutineoppgaver. Noen oppgaver løses best i fellesskap av flere farkoster. Graden av selvstendighet og mengden kommunikasjon med operatør eller andre enheter vil dermed kunne variere, avhengig av både farkoster og oppgavekompleksitet.

3

## Utviklingen åpner opp for konsepter der autonome systemer og mennesker utfyller hverandre. Autonome systemer kan spare mennesker for farlige oppdrag og rutinepregede jobber, og de kan hjelpe oss å håndtere store mengder informasjon.

Mer og bedre informasjon gir oss bedre situasjonsforståelse, mer pålitelige systemer og bedre beslutningsstøtte. Ett eksempel på farlige oppdrag i skarpe situasjoner kan være rekognosering ved frontlinjer eller å gi måldata til langtrekkende våpen. Undersøkelser av eksplosiver eller områder med giftige gasser er andre oppgaver det er hensiktsmessig å overlate til ubemannede systemer. FFI arbeider sammen med Forsvaret og industrien for å utvikle et ubemannet konsept som kan lete etter sjøminer uten at personell trenger å være til stede i minefeltene.

4

## Den raske utviklingen av autonome systemer vil gjøre det mulig å løse stadig mer komplekse oppgaver i mer komplekse omgivelser.

Fremdeles er slike systemer for lite robuste til mange militære operasjoner, men for de enkleste oppgavene og miljøene er de allerede høyst relevante. Vi forventer at utviklingen raskt muliggjør operativ nytte på nye områder. Målet med å utvikle og ta i bruk autonome systemer er ikke å erstatte menneskene, men å sette sammen teknologi og mennesker slik at de utfyller hverandre. På denne måten kan menneskene frigjøres til de viktigste og mest avanserte oppgavene.

Les mer på [ffi.no](http://ffi.no)



<sup>1</sup> "Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework, Volume I: Terminology", National Institute of Standards og Technology, USA, NIST Special Publication 1011-I-2.0, 2008.

<sup>2</sup> "Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework, Volume II: Framework Models", National Institute of Standards og Technology, USA, NIST Special Publication 1011-II-1.0, 2007.

<sup>3</sup> "Autonomous weapons: An open letter from AI and robotics researchers", <https://futureoflife.org/open-letter-autonomous-weapons/>, Aksessert: 15. januar 2018.

