

Jonas Halle

Design og implementering av et UUV-system for detaljert kartlegging av havbunnen

Masteroppgave i Kybernetikk og robotikk

Veileder: Thor Hukkelås

Medveileder: Trygve Olav Fossum

Juni 2023

Jonas Halle

Design og implementering av et UUV-system for detaljert kartlegging av havbunnen

Masteroppgave i Kybernetikk og robotikk
Veileder: Thor Hukkelås
Medveileder: Trygve Olav Fossum
Juni 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk
Institutt for teknisk kybernetikk



Kunnskap for en bedre verden

Abstract

As the focus on sustainable industry and utilization of marine resources grows, the need for more effective methods for detailed seafloor mapping has increased. This is particularly important for the location of fish farms and subsequent monitoring, especially with respect to identifying and protecting vulnerable species. The Directorate of Fisheries, in collaboration with the Institute of Marine Research, has put forward a proposal for methods to achieve satisfactory quality in mapping. This study presents a proposal for an Unmanned Underwater Vehicle (UUV) system that, through the use of adaptive seafloor tracking and image quality estimation, ensures high-quality data collection regardless of visibility and topography.

The methodology involves a review of regulatory requirements for seafloor mapping and a description of use cases and design choices. Based on this, a specification of a UUV system was described. A literature study of suitable methods for meeting the specification requirements was then carried out. Based on previously applied methods, a proposal with some modifications was developed into a complete UUV system, designed for high-quality video collection under various visibility conditions, adaptable to different seafloor areas. To test the effectiveness of the implemented UUV system, a simulation study was conducted. The main contributions in this work are the development of a model for estimating image quality and an adaptive control system that adjusts the distance and follows the seabed based on changes in visibility and topography.

Results from the simulation study suggest that by increasing the adaptability of the system, the quality of the mapping is substantially improved, especially under demanding visibility conditions as the median error in desired distance to the seafloor is reduced by up to 80%. The adaptive seafloor tracking also proved to be effective under various topographical conditions.

This study demonstrates the potential of using adaptive methods for improved and efficient seafloor mapping, with potential significant implications for future industrial utilization and conservation of the marine environment.

Sammendrag

I takt med økende fokus på bærekraftig industri og utnyttelse av havressurser, har behovet for mer effektive metoder for detaljert kartlegging av havbunnen økt. Dette har særlig betydning for lokalisering av fiskeoppdrett og påfølgende overvåking, spesielt med hensyn til identifikasjon og beskyttelse av sårbare arter. Fiskeridirektoratet i samarbeid med Havforskningsinstituttet har utarbeidet et forslag til metoder for å oppnå tilfredstillende kvalitet på kartleggingen. Denne studien presenterer et forslag til et UUV-system (Ubemannet undervannsfartøy) som ved bruk av adaptiv havbunnfølging og estimering av bildekvalitet sørger for høykvalitets datainnhenting uavhengig av siktforhold og topografi.

Metodikken omfatter en gjennomgang av myndighetskrav til havbunnkartlegging og en beskrivelse av bruksområder og designvalg. På grunnlag av dette ble en spesifisering av et UUV-system beskrevet. En litteraturstudie av egnede metoder for å oppnå spesifisjonskravene ble så utført. Basert på tidligere anvendte metoder, ble et forslag med noen tilpasninger utviklet til et komplett UUV-system, designet for høykvalitets videoinnhenting under ulike siktforhold, tilpasningsdyktig til ulike havbunnsområder. For å teste effekten av det implementerte UUV-systemet ble en simuleringsstudie utført. De viktigste bidragene i denne avhandlingen er utvikling av en modell for estimering av bildekvalitet, og et adaptivt kontrollsystem som tilpasser avstanden og følger havbunnen basert på endringer i siktforhold og topografi.

Resultatene fra simuleringsstudien antyder at ved å øke adaptjonsgraden til systemet, blir kvaliteten på kartleggingen betydelig forbedret, og da spesielt under krevende siktforhold, ettersom medianavviket blir redusert med opp til 80%. Den adaptive havbunnfølgingen viste seg videre å være effektiv under ulike topografiske forhold.

Vår studie demonstrerer potensialet i bruk av adaptive metoder for forbedret og effektiv kartlegging av havbunnen, med betydelige implikasjoner for fremtidig industriell utnyttelse og bevaring av havmiljøet.

Forord

Denne avhandlingen markerer fullføringen av min mastergrad i teknisk kybernetikk. Arbeidet som presenteres er et forsøk på å adressere en dagsaktuell og praktisk problemstilling knyttet til miljøovervåkning i akvakultur.

Hovedmålet med oppgaven er å identifisere kravene som stilles til kartlegging av sårbare arter i tilknytning til fiskeoppdrett. Basert på disse kravene, er hensikten å foreslå et system med et autonomt undervannsfartøy (UUV) som kan legge til rette for høykvalitets kartlegging. Videre har oppgaven som mål å foreslå metoder for å effektivisere denne prosessen, for eksempel gjennom adaptiv avstandstilpasning til havbunnen basert på topografi og evaluering av bildekvalitet.

Jeg ønsker å uttrykke stor takknemlighet til mine veiledere, Thor Hukkelås og Trygve Olav Fossum. Deres tilbakemeldinger, råd og oppmuntring har vært uvurderlige for gjennomføringen av dette arbeidet

Innholdsfortegnelse

Abstract	i
Sammendrag	ii
Forord	iii
Innholdsfortegnelse	iv
Tabelliste	v
Figurliste	vi
1 Introduksjon	1
1.1 Motivasjon	1
1.2 Tidligere relevant arbeid	3
1.3 Forskningsspørsmål og metode	4
1.4 Bidrag og disposisjon for avhandlingen	5
2 Krav, bruksområder og designvalg	6
2.1 Myndighetskrav	6
2.1.1 Kartleggingsmetoder	6
2.1.2 Krav til dekningsgrad og kartleggingsområde	7
2.1.3 Kompetansekrav og tilstedeværelse av personell	7
2.1.4 Bildekvalitet, lys og avstand til havbunn	8
2.1.5 Forslag til alternative metoder	8
2.2 Bruksområder og designvalg	9
2.3 Oppsummering av krav, bruksområder og designvalg	11
3 Spesifikasjon UUV	12
3.1 Adapsonsgrad	12
3.2 Navigasjon- og kontrollsystem	13
3.3 Oppsummering av funksjonelle krav og spesifikasjoner	14
4 Modellering av farkost og kontrollsystem	15
4.1 Modellering av UUV	15
4.1.1 Kinematikk	16
4.1.2 Kinetikk	16

4.2 Navigasjon	17
4.3 Guiding	19
4.3.1 Horisontal guiding lov	19
4.3.2 Vertikal guiding lov	20
4.4 Kontrollsystem	22
5 Simuleringsstudie	24
5.1 Scenarier	24
5.1.1 Siktforhold og modellering av bildekvalitet	24
5.1.2 Topografi	28
5.1.3 Adapsjonsgrad og kartleggingsmetodikk	29
5.2 Testplan simuleringsstudie	29
5.2.1 Dynamisk posisjonering og kompensasjon av havstrøm	29
5.2.2 Kartleggingsoppdrag	30
6 Resultater	32
6.1 Navigasjon og kontroll under påvirkning av havstrøm	32
6.2 Simuleringsstudie av kartleggingsoppdrag	37
6.2.1 Kartleggingsområde 1	37
6.2.2 Kartleggingsområde 2	40
6.2.3 Kartleggingsområde 3	43
6.2.4 Adaptiv avstandstilpasning	47
7 Diskusjon	49
8 Konklusjon og forslag til videre arbeid	51
8.1 Forslag til videre arbeid	52
9 Bibliography	53

Tabelliste

4.1 Sensorer brukt til navigasjon	17
5.1 Scenarier for simuleringsstudiet	31

Figurliste

2.1 Skrog: (a)AROV (Kilde: Skarv Technologies AS, 2023)(b) Hugin (Kilde: Kongsberg Maritime) .	10
4.1 Blokkdiagram som beskriver det komplette navigasjon, guiding og kontrollsystemet	15
4.2 Referanserammen for NED og Body (kilde: Abduraxman (2018))	16
4.3 Illustrasjon for horisontal guiding	20
4.4 Illustrasjon for vertikal guiding	21
5.5 En representasjon av hvordan lysattenuasjon påvirker bildet. a) er det originale bildet, b) At- tenuert bildet med god lyseksposering c) Attenuert bilde overeksponert for lys, d) Attenuert bilde	28
6.1 Sammenligning av kjøring under ulike strømforhold, hvor den ikke-lineære modellen er kjent. Strømhastighet fra venstre til høyre i NED([0,0,0],[0.4,0.6,0],[1.4,1.2,0])	33
6.2 Sammenligning av kjøring under ulike strømforhold hvor den ikke-lineære modellen er uk- jent. Strømhastighet fra venstre til høyre i NED([0,0,0],[0.4,0.6,0],[1.4,1.2,0])	34
6.3 Hastighets og akselerasjonsdata når det ulineære dempningsleddet er kjent. Strømhastighet i NED er [0.4,0.6,0]	35
6.4 Hastighets og akselerasjonsdata når det ulineære dempningsleddet ikke er kjent. Strømhastighet i NED er [0.4,0.6,0]	36
6.5 Kjørelinjen for simuleringene	37
6.6 Den tredimensjonale representasjonen viser både havbunnens topografi og bevegelsen til UUVen. Kvaliteten på bildet er indikert ved fargekoding, der en verdi på 1 representerer optimal bildekvalitet.	38
6.7 Avvik fra ønsket avstand til havbunnen for utvalgte scenarier	39
6.8 Stolpediagram som viser kvaliteten av videofilen relativ til tid.	39
6.9 Hastighet i jag for utvalgte scenarier	40
6.10 Den tredimensjonale representasjonen viser både havbunnen og UUVens bevegelser. Kvaliteten på bildet er indikert ved fargekoding, hvor en verdi på 1 representerer optimal bildekvalitet.	41
6.11 a) Viser hastighet i jag, b) viser avvik fra ønsket avstand for utvalgte scenarier.	42
6.12 Stolpediagram som viser kvaliteten av videofilen relativ til tid.	43

6.13 Den tredimensjonale representasjonen viser både havbunnen og UUVens bevegelser. Kvaliteten på bildet er indikert ved fargekoding, hvor en verdi på 1 representerer optimal bildekvalitet.	44
6.14 a) Viser hastighet i jag, b) viser avvik fra ønsket avstand for utvalgte scenarioer.	45
6.15 Stolpediagram som viser kvaliteten av videofilen relativ til tid.	46
6.16 Stolpediagram som viser medianen og standardavviket mellom ønsket og faktisk avstand.	47
6.17 Linjediagram som viser den estimerte bildekvaliteten under ulike siktforhold for adaptiv sgrad 2	47
6.18	48
6.19 Endring av bildekvalitet og adaptiv avstandsregulering gitt endringer i siktforhold.	48

Chapter 1

Introduksjon

Målet er å designe et system som skal kartlegge og overvåke havbunnen i et område med en dybde på opp til flere hundre meter. I dette miljøet er det problematisk å bruke dykkere på grunn av risiko og kostnad. Videre vil den begrensede sikten under vann gjøre kamerainspeksjon fra overflaten lite egnet. Akustiske metoder har en betydelig større rekkevidde, men samler kun informasjon om avstander basert på lydets hastighet. Denne metoden er godt egnet til å beskrive terreng eller søke etter objekter av en viss størrelse på havbunnen, men er ikke tilstrekkelig til å kartlegge sårbare arter og naturtyper. Det vil derfor være nødvendig å benytte undervannsfartøyer om man ønsker å benytte kamera for dokumentasjon og kartlegging. Videre kan automatiserte løsninger bidra til redusert kostnad ved datainnsamling, bedre beslutningstaking og støtte til analysearbeidet i ettertid. I dette kapittelet blir motivasjon og bakgrunn for oppgaven introdusert, sammen med de spesifikke forskningsspørsmålene og metodene.

1.1 Motivasjon

Offshoreaktivitet har i mange tiår vært en viktig del av norsk industri, hovedsakelig innen olje- og gassvirksomhet. I løpet av de siste årene har det vært økende fokus på å utnytte havområdene for vindkraft og akvakultur [Regjeringen \(2022\)](#), [Fiskeridirektoratet \(2022\)](#). Kraftbehovet i verden øker konstant, og det blir stadig mer avgjørende å effektivt utnytte ulike områder for fornybar kraftproduksjon. På samme tid vil befolkningsveksten drive behovet for økt matproduksjon. Mange av kystområdene benyttes allerede til fiskeoppdrett og fangstmetodene er naturlig begrenset av forekomst. Dette innebærer at havbasert fiskeoppdrett er nødvendig for å betraktelig øke produksjonsnivået av fisk i Norge.

Selv om økt bruk av havet som ressurs innebærer mange fordeler, vil det uunngåelig medføre inngrep i naturen. Menneskeskapte miljøpåvirkninger får stadig større oppmerksomhet, og det er en generell enighet om at inngrep bør minimeres så mye som mulig, hvor et eksempel på dette er bærekraftsmålene til FN [FN \(2023\)](#). Det blir på bakgrunn av dette stadig økt fokus på krav om utredning før inngrep foretas, for å identifisere områder som er best egnet for formålet. Videre er det viktig å dokumentere hvordan inngrepet påvirker naturen over tid. Et eksempel på denne typen dokumentasjon er sedimentprøver fra

havbunnen nær oppdrettsanlegg. Det forventes at det vil komme flere statlige krav for inngrep i sjønatur i fremtiden. Havforskningsinstituttet (HI) har på oppdrag fra Fiskeridirektoratet utarbeidet forslag til nye metoder for kartlegging av sårbare arter [Kutti and Husa \(2021\)](#), [Husa and Kutti \(2022\)](#).

For å tilrettelegge for økt dokumentasjon er det nødvendig at det blir utviklet verktøy som kan utføre jobben på en god og trygg måte. Videre vil kostnadseffektivitet være viktig for å øke tilgjengeligheten. I dag er mesteparten av inspeksjons og dokumentasjonsarbeid utført på havet skipsbasert. Dette fører til at operasjoner generelt blir kostbare. Det kan derfor være en fordel å ha verktøy lokalt tilgjengelig for å utføre deler av arbeidet.

Som nevnt stilles det krav om sedimentprøver av havbunn tilknyttet oppdrettsanlegg, hvor kravene er gitt av [NS 9410:2016 \(2016\)](#). Dette blir gjort for å dokumentere at organisk materialer blir spist opp av bunndyr. Om bunnen blir tilført mer avfall enn det som blir fortært, dør bunndyrene og mengden avfall vil vokse. Prøvene blir utført ved å slippe ned en grabb nært merkantene som henter opp bunnprøver som videre blir analysert. For å øke informasjonsmengden ved bunnprøver kan visuell inspeksjon ved bruk av kamera eller hyperspektralt kamera være gunstig. Et hyperspektralt kamera fanger opp lysbølger utenfor det synlige spekteret, og kan på denne måten hente ut informasjon fra et bilde som ikke er mulig med et normalt fargekamera. Det tillater å dekke en betydelig større del av havbunnen, og bilder kan lagres over tid for sammenligning.

Forslagene til nye metoder utarbeidet av HI baserer seg på bruk av en UUV som skal utføre visuell datainnsamling. Teknologien som kreves for å utføre et slikt oppdrag eksisterer allerede [Fossum \(2021\)](#). Det vil likevel bli viktig å utvikle en løsning som garanterer at alle myndighetskrav blir fulgt, og at systemet blir optimalisert for havbunnskartlegging. Videre må systemet være egnet og tilpasset brukere og operatører. Det vil også være viktig og utvikle en UUV som er kostnadseffektiv i bruk. Årsaken til dette er behovet for å gjøre teknologien lett tilgjengelig, slik at bransjen kan utføre de pålagte kravene uten for høye kostnader. Et lavkost system vil også tilrettelegge for mer kontinuerlig oppfølging, samt gjøre teknologien tilgjengelig for forskning og generell kartlegging av natur.

Generell kartlegging av natur er interessant av flere årsaker. For det første har vi i dag svært lite informasjon om livet på dypt hav inkludert havbunnen. Ved å øke kunnskapgrunnlaget vil det derfor kunne bli oppdaget nye habitater og arter. Videre finnes det mange korallrev på kontinentalsokkelen langs norskekysten. Svært mange arter er tilknyttet korallrev samtidig som de produserer mye oksygen. Det vil derfor være av stor verdi å kunne monitorer endringer i disse økosystemene. Det kan også være langsiktige kommersielle årsaker til å ha god kartlegging av havbunnen. Undersjøisk gruvedrift har blitt sett på som en mulighet til å hente ut sjeldne mineraler etterspurt av industrien i hele verden. Gitt det lave kunnskapsgrunnlaget har denne muligheten fått sterk kritikk fra miljøorganisasjoner og forskere, da risikoen for å skade miljøet blir sett på som høy.

Når eventuelt kartleggingsarbeid er utført og det blir vurdert som trygt å bygge en installasjon, vil det være viktig og dokumentere endringer over tid. Hyppigheten vil avhenge av behov, men også tid og kostnad. Ved å ha en UUV tilgjengelig ved installasjonene til havs vil det være en mye lavere terskel for å gjennomføre kartleggingsarbeid. Om dronen kan utføre annet inspeksjonsarbeid vil behovet for å anskaffe et slikt

verktøy være enda mer naturlig.

På bakgrunn av dette vil det være behov for å utvikle en UUV som tilfredstiller dagens myndighetskrav. Videre kan det være ønskelig å ta i bruk andre metoder enn de som er foreslått for å øke beslutningstøtten til operatører. Det vil være viktig å sørge for at disse metodene vil forsterke kartleggingsarbeidet, samtidig som det vil være en fordel om de samme metodene vil redusere kostnadene knyttet til kartlegging.

For å sørge for en praktisk tilnærming vil arbeidet benytte metoder og utstyr som er kjent og testet. Oppgavens ambisjon ligger heller i å undersøke den praktiske problemstillingen basert på gjeldende krav. Arbeidet vil ta utgangspunkt i krav tilknyttet oppdrettsindustrien, men kan som nevnt i stor grad benyttes til andre lignende formål.

1.2 Tidligere relevant arbeid

Undervannsrobotikk har vært kommersielt tilgjengelig over en lengre tidsperiode, med manuelt styrte droner (ROV) som det mest utbredte alternativet. På grunn av fremskritt innen forskning og teknologisk utvikling, har det nå blitt mulig å utvikle mer autonome løsninger. Disse kan fungere som beslutningsstøtte og, i noen tilfeller, som fullstendig autonome undervannsdroner (AUV).

Navigasjon, guiding og kontroll av undervannsfartøy er et felt som stadig utvikler seg. Implementasjonen som er valgt for denne oppgaven er i stor grad basert på arbeidet til [Dukan and Sørensen \(2014\)](#), som foreslår et system for guiding og kontroll for å følge havbunnen. I dette arbeidet ble en Doppler Velocity Log (DVL) brukt til å estimere endringer i terrenget, mens systemet i denne avhandlingen er basert på to akustiske avstandsmålere. Valget av sensorer og implementeringen av navigasjonssystemet er i stor grad inspirert av "Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control" [Fossen \(2021a\)](#), samt en undersøkelse av undervannsnavigasjon for fartøy [Kinsey et al. \(2006\)](#).

Videre blir det utviklet en matematisk modell for å måle bilde kvalitetsmetrikk, basert på arbeidet til [Akkaynak and Treibitz \(2019\)](#). De brukte transferfunksjonen for radiens som utgangspunkt for å filtrere ut uønskede elementer fra undervannsbilder. Denne metoden er benyttet i dette arbeidet, men med et spesielt fokus på fotografier av havbunnen tatt med ekstern belysning, hvor målet er å tilpasse avstanden til havbunnen for å øke kvaliteten på videobildene.

Denne oppgaven tar for seg problemet med detaljert kartlegging av havbunnen på en helhetlig måte, og kombinerer flere løsninger for å utvikle et system spesialtilpasset denne oppgaven. Det gjenstår imidlertid fortsatt mange utfordringer og kunnskapshull innen dette feltet, som dette arbeidet søker å bidra til å løse.

1.3 Forskningsspørsmål og metode

De sentrale forskningsspørsmålene som dette arbeidet søker å svare på er som følger:

- Hvilken type informasjon skal produseres og hvilke bruker- og myndighetskrav stilles til et system som skal utføre detaljert havbunnskartlegging?
- Hvilke tekniske og funksjonelle krav må tas i betraktning ved utvikling av et UUV-system spesifikt for havbunnskartlegging, og hvordan kan disse kravene oppfylles?
- Hvordan kan vi teste og verifisere de ulike kravene til et UUV-system ved hjelp av en simulator, og hvordan kan resultatene fra simuleringene bidra til optimalisering og evaluering av systemets ytelse?

For å adressere de foreslåtte forskningsspørsmålene er det utformet en metodikk i flere trinn. Først utføres det en gjennomgang av myndighetskrav som gjelder for detaljert kartlegging av havbunnen. Dette vil innebære en studie av eksisterende forskrifter og retningslinjer som setter standarder for nøyaktigheten og omfanget av slike kartlegginger.

Samtidig utføres en litteraturgjennomgang av aktuelle metoder som for øyeblikket brukes for å oppfylle disse kravene. Formålet med denne delen er å få en forståelse av de nåværende teknikkene og deres begrensninger.

På grunnlag av disse kravene og forståelsen av nåværende metoder, utformes det spesifikasjoner for et foreslått system. Dette systemet skal være i stand til å utføre en detaljert kartlegging av havbunnen på en optimal måte, med hensyn til nøyaktighet, omfang og kostnadseffektivitet.

Videre utvikles det et system basert på disse spesifikasjonene. Dette involverer en studie av eksisterende metoder som kan tilpasses for bruk i det foreslåtte UUV-systemet, samt utviklingen av nye metoder som er spesielt designet for denne typen kartlegging.

For å evaluere effektiviteten av de valgte metodene, utføres det en simuleringsstudie. En modell av den foreslåtte UUV-en med de valgte metodene implementert, testes i en rekke forskjellige scenarier. Disse scenariene vil variere i forhold til forhold som sikt, havbunnens topologi, havstrømmer, og graden av tilpasning til endrede forhold. Gjennom disse simuleringene vil det være mulig å fastslå hvor godt de valgte metodene presterer under ulike forhold, og i hvilken grad systemet oppfyller de utformete spesifikasjonene og kravene.

1.4 Bidrag og disposisjon for avhandlingen

Denne avhandlingen fokuserer på utviklingen av en undervannsdronne spesifikt designet for detaljert kartlegging av havbunnen. Avhandlingen bidrar med følgende punkter:

- Beskrivelse av de tekniske og funksjonelle kravene, og implementasjon av de mest sentrale egenskapene for et UUV-system for optisk kartlegging og artsbestemmelse.
- Utvikling av en modell for å estimere kvaliteten på undervannsbilder av havbunnen, basert på attenuasjons- og spredningskoeffisienter, tilgang på lys og avstand til havbunnen.
- Utvikling av et guidingsystem for presis følgning av ønskede undersøkelseslinjer.
- Utvikling av et navigasjons- og kontrollsystem som håndterer kartlegging i områder med betydelige havstrømmer.
- Utvikling av en adaptiv avstandsregulering til havbunnen basert på topografi og estimert bildekvalitet.

Kapittel 2 tar for seg krav, bruksområder og design av en UUV som skal benyttes til detaljert kartlegging av havbunnen. Kapittel 3 fortsetter med å beskrive nødvendige spesifikasjoner som UUVen burde inneha for å sørge for et vellykket kartleggingsoppdrag i henhold til kravene. I kapittel 4 blir forslaget til implementasjon av kontrollsystemet, samt modellering av fartøyet for bruk i simuleringen presentert. Kapittel 5 gir en oversikt over relevante scenarier som skal testes ved bruk av simulering, en modell som beskriver bildekvalitet basert på siktforhold og avstand til bunn blir også presentert. Kapittel 6 presenterer resultatene fra simuleringsstudien, hvor resultatene drøftes i kapittel 7. Tilslutt i kapittel 8 blir arbeidet konkludert, samt forslag til videre arbeid.

Chapter 2

Krav, bruksområder og designvalg

Dette kapittelet redegjør for kravene som stilles fra myndigheter under kartlegging av sårbare arter for utredning av oppdrettsanlegg. Videre vil de ulike bruksområdene som kan være aktuelle beskrives. På bakgrunn av dette blir et forslag til utforming av UUVen presentert.

2.1 Myndighetskrav

Det har blitt et økt fokus på metoder for miljøundersøkelser knyttet til akvakultur og annen maritim virksomhet. Fiskeridirektoratet og Miljødirektoratet har skrevet en rapport som omhandler forslag til nye metoder basert på arbeid utført av havforskningsinstituttet. Oppdraget tar utgangspunkt i kartleggingsarbeid under planleggingsfasen av nye anlegg. Det er likevel forventet at det kommer krav til miljøovervåking i driftsperioden. Metodene er utarbeidet på en måte som forsikrer tilstrekkelig bildekvalitet. Det kan derfor antas at tilsvarende metoder vil ligge til grunn ved etterkontroll.

2.1.1 Kartleggingsmetoder

Havforskningsinstituttet åpner for at kartlegging av korallrev på fjordbunn kan kartlegges fra overflatefartøy med hjelp av flerstråle-ekkolodd. Denne metoden kan kartlegge større områder relativt raskt da flerstrålede-ekkolodd har god spredning. Denne prosessen avdekker også topografien i området, som kan være gunstig om området skal visuelt inspiseres med en UUV. Korallrev på loddrette fjellvegger eller overheng kan ikke detekteres med denne metoden. En UUV vil derfor være nødvendig.

Korallskog, sjøfjærbunn og svampområder kan ikke oppdages ved bruk av akustiske metoder og det vil derfor være nødvendig å bruke undervannsvideo for å detektere disse områdene. Det er mulig å snevre inn søkeområdet ved å benytte prediktiv naturtypemodellering, miljø-DNA prøvetaking og informasjon fra fiskere. Kartlegging med slike metoder må likevel verifiseres ved bruk av visuelle metoder.

Dette betyr at data samlet ved bruk av akustiske metoder kan være godt egnet til å få en oversikt over hvilke områder som kan være aktuelle, men at dette ikke vil være tilstrekkelig utredning. En UUV med

kamera vil derfor være nødvendig i gjennomføringen av et kartleggingsoppdrag. Data samlet inn med bruk av akustiske metoder kan likevel være behjelpelige for å planlegge hvilke deler av et område som er mest aktuell for visuell inspeksjon.

2.1.2 Krav til dekningsgrad og kartleggingsområde

Summen av areal for undersøkelseslinjene skal utgjøre minimum 3-4% av kartleggingsområdet og beregnes utfra synsfeltets areal på bunnen og linjens lengde sett fra overflaten. I rapporten blir det henvist til to kartleggingsdesign.

- 1 Systematisk kartlegging betyr å kartlegge linjetransekt som enten går på tvers over dybdekontene, eller parallellt med dybdekontene. Avstanden mellom linjetransektene skal ikke overstige 50 meter.
- 2 Måltrettet kartlegging vil i større grad fokusere innsatsen på områder hvor man forventer eller har kjennskap til forekomster av sårbar natur. En måltrettet kartlegging kan være spesielt aktuelt som kunnskapsgrunnlag ved utvidelser av lokaliteter hvor man tidligere har funnet sårbar natur i nærområdet, både for avgrensning av kartleggingsområdet, men også for å kunne se etter effekter som kan tilskrives driften på det etablerte anlegget.

Det nevnes også at overgangssonen mellom en bratt fjellvegg og myk sedimentbunn burde undersøkes ved å filme i en horisontal linje, videre burde det kjøres to horisontale undersøkelseslinjer lenger oppe på fjellveggen. Andre områder som krever nøyere granskning er strømrike nes og forhøyninger på bløtbunn. Videre vil det for anlegg plassert på sokkelen eller nært sokkelen være hensiktsmessig med måltrettet undersøkelse i områder hvor flerstrålede-ekkolodd data indikerer at det finnes korallrev.

2.1.3 Kompetansekrav og tilstedeværelse av personell

Havforskningsinstituttet (HI) anbefaler at kartleggingsarbeidet skal utføres av personer med minst mastergrad i marin biologi eller miljøvitenskap, samt dokumentert erfaring fra tilsvarende arbeid. Personell med erfaring i artsidentifikasjon bør være til stede under toktet for å kvalitetssikre datainnsamlingen, og det bør også være en person med minst bachelorgrad i biologi og dokumentert erfaring til å analysere videoopptakene og bildene i etterkant.

Fiskeridirektoratet, som er oppdragsgiver for HI, har imidlertid moderert kravene til personell. De understreker at kartleggingsaktøren skal være uavhengig av oppdragsgiver, men legger mindre vekt på formalkompetanse og mer vekt på relevant erfaring. Likevel er det viktig for dem at dataene som fremkommer fra kartleggingen er av høy kvalitet, etterprøvbare og kan deles og gjenbrukes.

Ettersom det kreves høy faglig kompetanse under datainnsamlingen og analysen, kan det være hensiktsmessig å tilrettelegge for høy grad av automatisert beslutningsstøtte. Bruk av undervanns hyperspektral kamera (UHI) kan muliggjøre autonom artsgjenkjenning. Kombinert med et stereokamera kan man også utføre geometrisk analyse for artsklassifisering. Hvis de autonome deteksjonsmetodene blir tilstrekkelig gode, vil ikke menneskelig overvakt datainnsamling være nødvendig. Et viktig element i implementeringen av autonom kartlegging er kvalitetsvurdering av bildene i sanntid.

2.1.4 Bildekvalitet, lys og avstand til havbunn

Det må benyttes fargekamera med god oppløsning på minimum 1080 vertikale piksler. Videre må lyskildene gi tilstrekkelig opplysning slik at hele videobildet blir opplyst når farkosten befinner seg 1-2 meter fra havbunnen. Det stilles også krav til at hastigheten til farkosten i utgangspunktet skal begrenses til 0.5 knop, med en avstand på maksimalt 2 meter fra bunn. Det blir også opplyst at kameraet alltid må være i fokus. Ved filming i stortareskog må man gjerne med jevne mellomrom dykke ned i vegetasjonslaget for å registrere substrat. For å estimere tettheter av organismer må man vite arealet som blir dekket av videobildet, hvor bruk av to laserstråler med kjent avstand er en tilfredstillende metode.

På bakgrunn av dette er det viktig og ha god styring og navigasjon for å opprettholde kravene til avstand og hastighet. Om kartleggingen skal foregå på større dybder, anbefales det å benytte akustisk posisjonering. Videre kan laserpunkter benyttes for å estimere arealet i videobildet.

Kravene er basert på praktiske erfaringer ved tidligere kartleggingsarbeid, og er anbefalt som metode for å sikre høy bildekvalitet. I et møte med Tina Kutti og Vivian Husa som er forfatterne av rapporten som omhandler forslag til metoder, 24. Februar 2023, stiller HI seg positiv til å benytte autonome metoder. Dette forutsetter at det autonome systemet sørger for at bildekvaliteten er høy. Det vil derfor være naturlig i en overgangsperiode å ha kvalifisert personell om bord som kvalitetsikrer at de autonome metodene er tilstrekkelige.

2.1.5 Forslag til alternative metoder

UHI skiller seg fra vanlige RGB kamera med å fange opp farger over hele spekteret. Et hyperspektralt bilde består av en tredimensjonal datakube der to parameter beskriver den romlige dimensjonen og det tredje parameteret beskriver den spektrale dimensjonen [Bioucas-Dias et al. \(2013\)](#). Ved å benytte et UHI vil det være mulig å detektere objekter som ikke er synlig med bruk av menneskelig inspeksjon av HD videobilder [Dumke I \(2018\)](#). Det kan derfor være en fordel å benytte et UHI som en støttefunksjon ved datainnhenting og analyse. På sikt kan det også tenkes at UHI muliggjør inspeksjon med opplært personell som ikke behøver den formelle utdannelsen som kreves i forslaget fra Fiskeri direktoratet. Når dataen er hentet inn kan et videoopptak utført med HD kamera bli gjennomgått av fagpersonell på land. Om dette blir mulig åpner det opp for muligheten til å benytte mer automatiserte UUVer.

Forslaget fra HI innebærer bruk av et overflatefartøy. Ved kartleggings arbeid på nye områder vil dette mest sannsynlig være nødvendig ved bruk av både ROV (fjernsyrt undervanns-drone) og AUV(Autonom undervanns drone). Når installasjonen først er på plass vil det derimot være betydelig mere kostbart og sende ut et skip, sammenlignet med å benytte en lokal løsning. Ved å ha en UUV tilknyttet installasjonen som benytter et UHI til analyse i sanntid, kan potensielt kartleggingsarbeidet utføres av operatører om bord. Denne løsningen vil være svært kostnadseffektiv og kan legge til rette for hyppigere inspeksjoner og en større dekning av areal. UUVen kan også med små modifikasjoner utføre annet inspeksjonsarbeid koblet til drift av anlegget.

En annen fordel ved å benytte automatisk kartlegging av arter er at det ikke vil være nødvendig og ha

konstant overvåkning av videostrømmen. Dette vil tillate at UUVen i stor grad kan utføre oppdraget autonomt. Ettersom dekningsområdet bestemmes på forhånd, vil koordinatene som UUVen skal besøke være kjent. Videre vil det være god informasjon om hvordan landskapet er utformet fra tidligere undersøkelser. Dette er en faktor som gjør at ruten kan forhåndsprogrammeres uten nevneverdig risiko for kollisjoner og andre uheldige hendelser.

2.2 Bruksområder og designvalg

Designet av en UUV må tilpasses etter bruksområdet. Når vi vurderer et kartleggingsoppdrag, er kvaliteten på bildene som produseres av største betydning. For å sikre høy bildekvalitet, kreves det at UUVen er i stand til å bevege seg i lave hastigheter tett på havbunnen.

Det er også ønskelig at UUVen har mulighet til å nærmere inspisere områder utenfor den planlagte undersøkelseslinjen om det oppdages funn av interesse. Under kartleggingen vil det være nyttig å opprettholde en relativt konstant avstand til havbunnen for å sikre konsistente bilder. Dette skyldes at mye bevegelse av kameraet kan føre til uskarpe bilder og endring i fokus når avstanden varierer mye.

Ut fra disse kravene vil et eskeformet skrog, tilsvarende figur 2.1a være et naturlig valg. Fordelen med dette skrogvalget er at det kan designes for å oppnå naturlig stabilitet i rull og stamp, samt plassering av thrustere som muliggjør bevegelser i 6 frihetsgrader. I tillegg legger et eskeformet skrog til rette for et modulært design. Dette åpner opp for konfigurasjonsendringer, som for eksempel forskjellige sensorpakker, UHI eller gripearmer [Song and Arshad \(2015\)](#), [Gomes et al. \(2005\)](#). Med et modulært design kan ulike payloads velges avhengig av kartleggingsområdet. Eksempler på dette kan være bruk av stereokamera og hyperspektrale kamera for å skape et visuelt 3D-kart og deteksjon av arter som er vanskelig å identifisere innenfor det synlige fargespekteret. Imidlertid er det viktig å merke seg at et slikt designvalg kan ha begrenset effektivitet når det gjelder energiforbruk, da alle bevegelser er avhengig av thrustere og skroget ikke er like hydrodynamisk som et torpedoformet skrog.

En alternativ skrogtype er det torpedoformede skroget, som vist i figur 2.1b, og er godt egnet for lengre distanser og brukes ofte sammen med multistråle ekkolodd og LIDAR for havbunnsundersøkelser. Dette skroget kan brukes til kartlegging av sårbare arter ved bruk av kamera, men det vil kreve god kjennskap til topografien på forhånd, lite topografisk variasjon, samt svært nøyaktig navigasjon. Det er også verdt å merke seg at kostnaden for en slik UUV vil være betydelig høyere, og den har et mer begrenset bruksområde

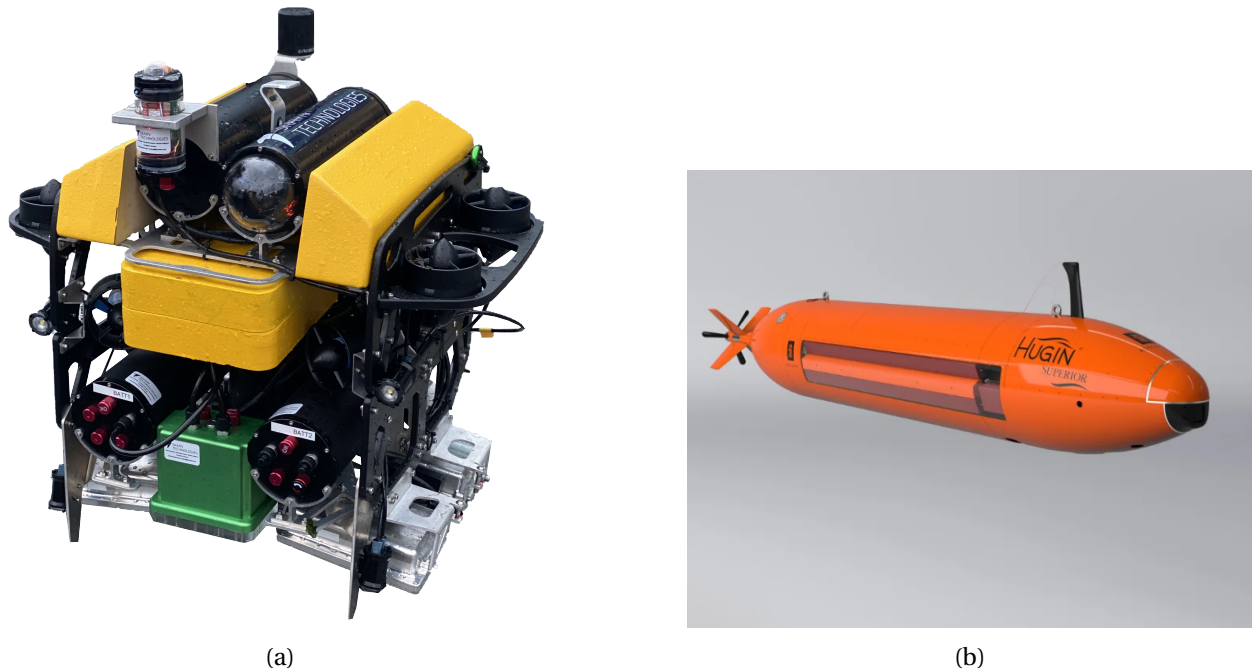


Figure 2.1: Skrog: (a) AROV (Kilde: Skarv Technologies AS, 2023) (b) Hugin (Kilde: Kongsberg Maritime)

Dersom UUVen skal overføre en live videostrøm til overflaten, vil den være avhengig av trådbasert dataoverføring. I denne situasjonen vil energibruken til UUVen ikke være et problem, da kraftoverføring kan leveres gjennom den samme kabelen. Ved lave hastigheter vil de hydrodynamiske egenskapene ha mindre betydning, da dragkraften avhenger av kvadratet til hastigheten.

I et maritimt miljø er driftssikkerhet avgjørende. Det er flere strategier for å sikre dette. En av dem er å velge komponenter med høy driftssikkerhet og redundans for kritiske systemer. En annen strategi er å legge til rette for rask og enkel utskiftning av komponenter. En tredje mulighet er å ha flere UUVer tilgjengelig på tokt. Alle disse strategiene har sine fordeler og ulemper, og valget mellom dem vil i stor grad avhenge av de spesifikke kravene til det gitte bruksområdet.

I konteksten av oppdrettsanlegg er det å foretrekke at UUVen kan brukes til flere forskjellige oppgaver. For eksempel kan den benyttes for inspeksjoner i nærheten av konstruksjoner over lengre perioder. Siden det er flere aktører som produserer sensorer og aktuatorer i en rimelig priskategori, kan det være fornuftig å ha et lager ombord, slik at operatørene kan utføre vedlikehold. Modulbasert plattform tillater også skift av sensorpakker, noe som kan være en betydelig fordel for en UUV med varierte oppdrag. En kostnadseffektiv UUV vil også tillate flere UUVer tilgjengelig, noe som kan være fordelaktig for effektiviteten.

Basert på de nevnte aspektene, betraktes et eskeformet skrog som mest egnet til kartleggingsarbeidet spesifikt, samtidig som det legger til rette for andre relevante inspeksjonsoppdrag.

2.3 Oppsummering av krav, bruksområder og designvalg

- **Kartleggingsmetoder** Ved utforsking av områder hvor det er lite kjennskap er det naturlig å benytte systematisk kartlegging, hvor kartleggningslinjene har en maksimal avstand på 50 meter. Om det eksisterer et kunnskapsgrunnlag over området kan det være naturlig å benytte målrettet kartlegging. Dekningsgraden skal dekke 4% av kartleggingsområdet uavhengig av metode.
- **Krav ved innhenting av videobilder** For å forsikre god kvalitet på bildematerialet er det basert på erfaringer fra HI at en hastighet på 0.5 knop og en avstand på 1.2-2 meter gir gode resultater, og er derfor veiledene for kartlegging av sårbare arter. HI åpner likevel for at dette kan unnvikes såfremt bildekvaliteten opprettholdes på tilsvarende nivå.
- **Designvalg** Et eskeformet skrog er vurdert som mest egnet for å tilfredstille kravene fra myndigheter og tenkte bruksområder.
- **Krav til personell** Det stilles i dag et krav om at videostrømmen skal overvåkes av kvalifisert personell med mastergrad i marin biologi eller tilsvarende. HI åpner for bruk av autonome metoder for overvåkning om metodene blir gode nok til å sørge for høy kvalitet på kartleggingsarbeidet.

Chapter 3

Spesifikasjon UUV

Dette kapitlet beskriver spesifikasjoner og funksjonelle krav for å sikre høy kvalitet på kartleggingsarbeidet. Kapitlet tar utgangspunkt i forslaget til metoder utarbeidet av HI og foreslår spesifikasjoner som kan håndtere de kravene som stilles.

3.1 Adapsjonsgrad

En høyere tilpasningsgrad kan være til hjelp for ROV-piloter og operatører som utfører kartlegging av havbunnen med UUV. Kameraet er det viktigste navigasjonsverktøyet for menneskelige piloter, og det har vist seg å påvirke videokvaliteten under kartleggingsarbeidet. En autopilot som følger kartleggingslinjen og justerer dybden ved hjelp av avstandsmålere kan forbedre kvaliteten på videoen, sammenlignet med manuell kontroll. Operatørens oppgave vil i større grad være å ta over styringen i situasjoner som ikke blir håndtert korrekt av det autonome systemet.

Hastighetstilpasning kan legge til rette for bedre avstandsregulering og minimere distansen med lav kvalitet ved å sette hastigheten mot null når avviket blir for stort. Optimalisert dybderegulering, ved hjelp av fremoverkoblet dybdejustering, kan tilpasse hastigheten i henhold til endringer i topografi og hastighet i jag. Dette vil være nødvendig hvis autopiloten skal operere selvstendig.

En programvareløsning som kan vurdere bildekvaliteten, kan åpne for en autonom løsning. Selv om sanntidsmonitorering av videostrømmen er nødvendig i HI sin foreslåtte metode, kan det være gunstig å ha en programvareløsning som kan gjøre adaptive valg for å forbedre bildekvaliteten når det er nødvendig. HI åpner også for å utføre datainnsamling uten biolog til stede hvis autonome metoder blir gode nok til å garantere at bildene blir av tilstrekkelig kvalitet til å analyseres i ettertid. Dette kan være av interesse hvis kartleggingsoppdraget skal utføres under drift for å overvåke utviklingen over tid. En autonom farkost kan da settes ut fra anlegget, gjennomføre kartleggingsoppdraget og overføre datainnhentingen når oppdraget er fullført. Videokvaliteten vil være en risiko hvis den ikke verifiseres av en person i sanntid. Samtidig vil terskelen for å gjøre en ny kartlegging være betydelig mindre, da kostnaden for å sende ut en AUV lokalt er svært lav.

En forhåndsprogrammert rute kan sendes til en UUV som er til stede på anlegget, og oppdraget kan gjennomføres uten behov for mannskap, ROV-piloter og biologer. Dette vil være en kostnadseffektiv løsning for kartleggingsoppdrag som er tilknyttet drift av anlegget. Autonome metoder for datainnsamling kan redusere terskelen for å utføre hyppige kartlegginger og gi bedre overvåking av utviklingen over tid. Videokvaliteten vil imidlertid fortsatt være en risiko, og det vil være nødvendig å verifisere kvaliteten på videomaterialet før dataene kan analyseres.

Følgende adaptasjonsnivå vil derfor kunne være ønskelig å implementere for å øke kvaliteten på bilder og på sikt kunne utføre kartleggingsoppdrag autonomt.

- Autopilot for å holde ønsket kurs i horisontalplanet.
- Avansert dybdekontroller for følging av havbunnen.
- Adaptiv avstandstilpasning basert på målt metrikk av videobilder.

3.2 Navigasjon- og kontrollsystem

For å oppfylle myndighetenes krav om dokumentert posisjon langs undersøkelseslinjer, og for å sikre at den nødvendige hastigheten og avstanden til havbunnen opprettholdes, er det avgjørende å implementere et omfattende Inertial Navigation System (INS). INS for undervannsfarkoster inneholder typisk følgende komponenter: en Inertial Measurement Unit (IMU), et hydroakustisk posisjoneringssystem (HAP), en Doppler Velocity Logger (DVL) og en trykkmåler [Kinsey et al. \(2006\)](#).

En IMU er en enhet som inneholder sensorer for å måle akselerasjon, vinkelhastighet og orientering, og er sentral i treghetsnavigasjon. Ved å måle disse parametrene, kan farkostens orientering og posisjonssendring estimeres. Imidlertid forventes det drift i systemet over tid. Omfanget av denne driften avhenger av hvilken type IMU som benyttes. Optiske gyroskop som RLG (ring-laser gyroskop) og FOG (fiber-optic gyroskop) blir brukt når høy nøyaktighet er nødvendig og GNSS (Global Navigation Satellite System) oppdateringer ikke er tilgjengelig over lengre tid. Disse sensorene er kostbare og bruker mer energi enn MEMS (Micro electrical mechanical system) sensorer [Fossen \(2021a\)](#), [Bao et al. \(2020\)](#). Uansett hvilken type sensor som velges, vil posisjonsestimater basert utelukkende på IMU data drifte over tid, derfor er det nødvendig å oppdatere estimatene med data fra andre sensorer, en prosess kjent som aiding.

HAP bruker GNSS (satellittbaserte systemer for navigasjon og posisjonering) og/eller sensorer plassert på kjente posisjoner, samt et akustisk signal for å estimere avstand og vinkel mellom sender og transponder. Systemer som kan benyttes inkluderer LBL (Long baseline) og USBL (Ultra-short baseline). LBL består av flere transpondere plassert med kjent posisjon. Ved å måle avstanden mellom transponderne og UUVen kan posisjonen estimeres ved hjelp av trigonometriske metoder. USBL benyttes oftest ved bruk av et overflatefartøy der flere transducere brukes for å måle avstand og faseforskjell på innkommende lydimpuls for å beregne posisjonen [Kebkal and Mashoshin \(2017\)](#).

DVL er en viktig komponent for å måle hastighet og kompensere for potensiell drift i systemet. DVL virker ved å sende ut akustiske pulser i minst tre forskjellige retninger. Ved å måle den returnerte pulsen,

kan DVL beregne hastigheten relativ til havbunnen basert på endringen i frekvensen av det returnerte signalet, en effekt kjent som Doppler-effekten. Dette er særlig viktig fordi akselerometere er svært utsatt for støy og dataene fra dem må integreres for å beregne hastighet. DVL kan også bidra til å opprettholde god navigasjon ved mangel på oppdateringer fra HAP-systemet, og kan gi mer nøyaktig sanntidsdata. Videre er DVL en god egnet om systemet skal opprettholde en stasjonær posisjon, også kjent som station keeping. Om de hydrodynamiske egenskapene til UUVen er kjent, vil det også være mulig å estimere havstrømmen [Hegrenæs and Hallingstad \(2011\)](#).

Et avgjørende aspekt i implementeringen av navigasjonssystemet er integrasjonen av sensordata for å forbedre kvaliteten og nøyaktigheten av posisjonsestimering. Her vil et Kalman-filter være sentralt. Ved å veie informasjonen fra ulike sensorer mot hverandre, basert på estimater av usikkerhet, vil et Kalman-filter være i stand til å gi en optimal estimering av UUVens tilstand. Kalman-filteret vil være spesielt viktig for å håndtere usikkerheter i sensoravlesningene og bidra til å filtrere ut støy. Dette vil forbedre nøyaktigheten av hastighets- og posisjonsestimeringene, som er avgjørende for navigasjon og kontroll.

Det er viktig å merke seg utfordringene som sterke havstrømmer kan utgjøre, spesielt i områder med bratte fjellvegger eller der det lever fastsittende dyrearter som trives i sterke strømmer. Dynamisk posisjonering, en metode for å holde UUVen på en bestemt posisjon ved å kun benytte thrusterne, kan være et effektivt verktøy for å håndtere disse utfordringene. Videre vil det være nødvendig å kompensere for havstrømmen om ønsket kurs skal opprettholdes om UUVen skal operere autonomt.

Å implementere et robust navigasjon- og kontrollsystem med bruk av HAP, IMU, DVL og trykkmåler, samt en thrusterplassering som tillater bevegelser i 6 DOF (frihetsgrader), vil være avgjørende for å sikre at kvaliteten på kartleggingsarbeidet tilfredsstiller myndighetskravene og de tenkte bruksområdene.

3.3 Oppsummering av funksjonelle krav og spesifikasjoner

- Navigasjon med de nevnte sensorer og et kalmanfilter vil bidra til å sikre god posisjonsestimering.
- Kompensasjon for havstrøm vil være nødvendig for å sikre god videoinnhenting, både ved manuell og autonom kontroll over fartøyet.
- Ved å introdusere flere adaptjonsnivåer kan bruksområdet for UUVen utvides. Ved høy nok adaptjonsgrad vil det være mulig å gjennomføre kartlegging autonomt.

Chapter 4

Modellering av farkost og kontrollsystem

I dette kapittelet presenteres en dynamisk modell som representerer det tenkte ubemannede under vannsfartøyet (UUV). Videre vil det bli foreslått en implementasjon av et navigasjons, guiding og kontrollsystem. Designvalgene for de nevnte systemene baserer seg på kravspesifikasjonene presentert i foregående kapittel. Et blokkdiagram som representerer navigasjons, guiding og kontroll er illustrert i Figur 4.1

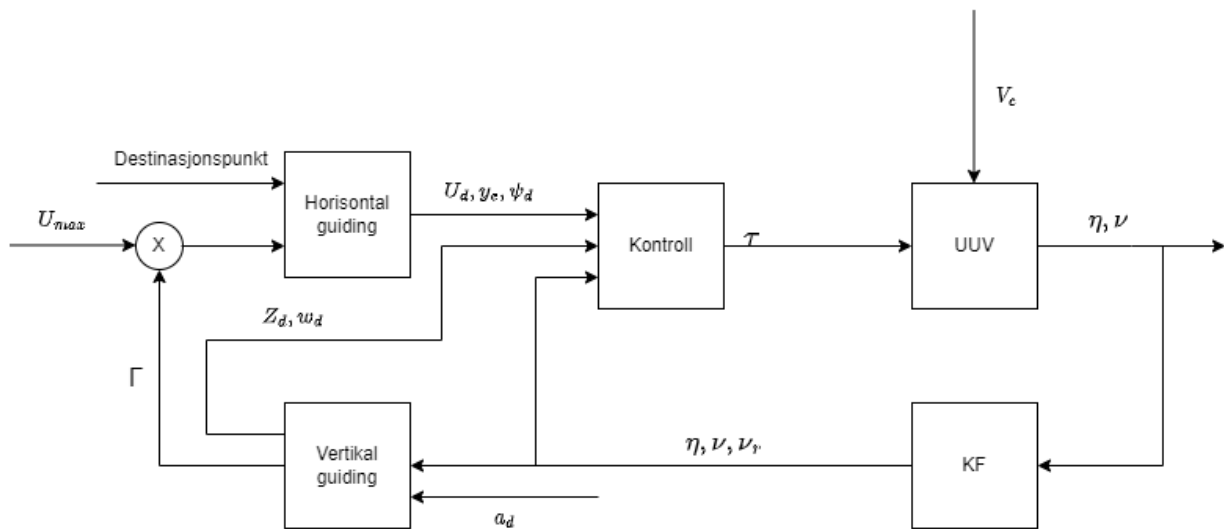


Figure 4.1: Blokkdiagram som beskriver det komplette navigasjon, guiding og kontrollsystemet

4.1 Modellering av UUV

For å utføre en mest mulig realistisk simulering er det nødvendig å anvende en modell som beskriver UUVens dynamikk. Denne seksjonen vil beskrivelse hvordan systemets kinematikk og kinetikk er implementert.

UUVen behandles som en masse med geometrisk utstrekning. Denne modelleringen tar utgangspunkt i at UUVen hovedsakelig opererer i lineære bevegelser. Unntaket er rotasjon om gir-aksen, som skjer når UUVen har kommet til enden av en kartleggingslinje. På bakgrunn av dette er det valgt å kun betrakte bevegelsesdynamikken i langsgående retning (jag), tverrgående retning (svai) og vertikal retning (hev). Rotasjon i gir har en fastsatt vinkelhastighet, uten kobling til kraftvektorene i de lineære aksene.

4.1.1 Kinematikk

Det benyttes to koordinatsystemer for å beskrive UUVens bevegelse og posisjon. Ettersom operasjonssområde er begrenset i et søkefelt anvendes NED (Nord, Øst, Ned) koordinater for å beskrive posisjoner og bevegelser relativ til havbunnen. Videre benyttes body koordinatsystem for å beskrive posisjon, retning og bevegelse i forhold til UUVens egne referansesystem.

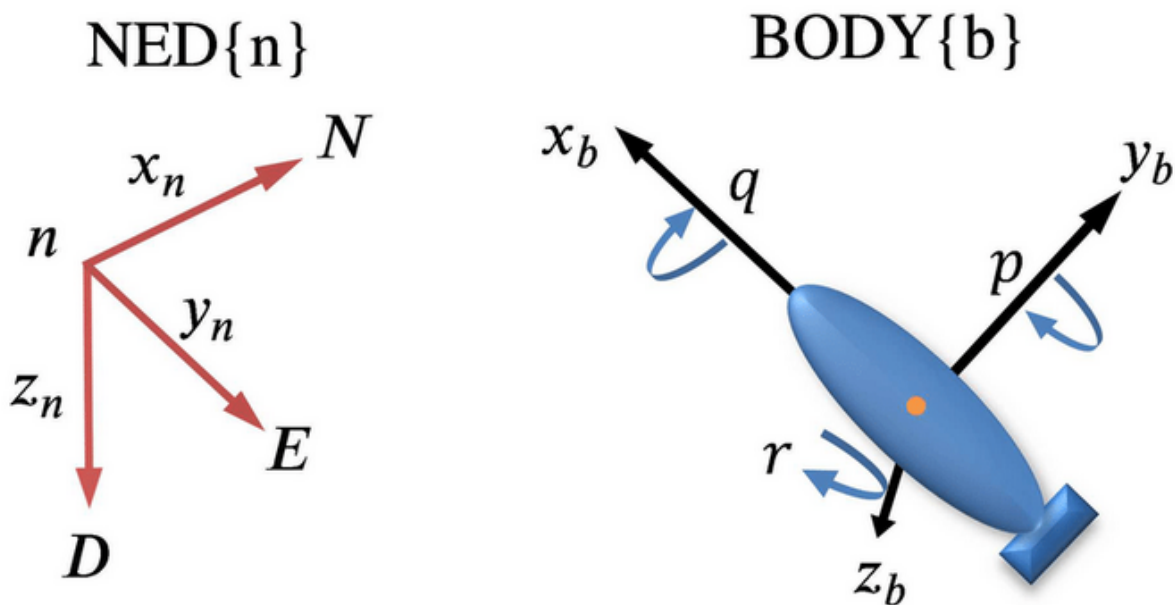


Figure 4.2: Referanserammen for NED og Body (kilde: [Abduraxman \(2018\)](#))

4.1.2 Kinetikk

For å modellere disse bevegelsene, anvendes en forenklet versjon av Fossens bevegelsesligning for undervannsfartøy, hvor det antas at UUVens bevegelser ikke er koblet [Fossen \(2021b\)](#). Denne forenklete versjonen ble valgt på grunn av dens evne til å tilstrekkelig representere UUVens dynamikk som skal anvendes i simuleringen. Den første ligningen beskriver endringen i posisjon og er gitt av ligning

$$\dot{\eta} = R(\psi)v, \quad (4.1)$$

hvor $\eta = [x, y, z]$ er posisjonen til UUVen i NED, og $v = [u, v, w]$ representerer hastigheten i body koordinater. Videre blir akselerasjonen i body-koordinater gitt av ligning

$$\dot{v} = M^{-1}(\tau - D(v_r) \cdot v_r), \quad (4.2)$$

hvor τ er kraften påført av thrustere, M er massematrisen, som består av massen til systemet og tillegsmassen som tilføres når systemet beveger seg gjennom en omkringliggende væske. Dempematriksen kalkuleres for hvert tidssteg og er gitt av følgende ligning: og matrisen D som representerer den lineære og ulineære dempingen i systemet. D matrisen består av D_L , den lineære dempematriksen, og D_{NL} , konstantene for den ulineære dempingen i systemet. Dempematriksen blir regnet ut for hvert tidssteg som gitt av følgende ligning

$$D(v_r) = D_L + D_{NL}v_r, \quad (4.3)$$

hvor D_L er den lineære dempningsmatrisen, D_{NL} er den ulineære dempningsmatrisen, og v, u, w som er henholdsvis hastighetene i jag, svai og hev. Videre er v_r den relative hastigheten gitt at UUVen er utsatt for havstrøm, og er gitt av ligning

$$v_r = v - R(\psi)v_c, \quad (4.4)$$

hvor v_c er hastighetsvektoren til havstrømmen i NED, og det blir utgangspunkt i en saktevarierende havstrøm som gir $\dot{v}_c = 0$. Rotasjonsmatrisen $R(\psi)$ benyttes for rotasjon fra NED til body med hensyn på girvinkel.

4.2 Navigasjon

Sensorene som benyttes til navigasjon er i henhold til kravspesifikasjonen beskrevet i avsnitt 3.2. Sensormålinger simuleres ved å legge til Gaussisk hvit støy på den faktiske tilstanden. Sensorene benyttet i simuleringen er beskrevet i tabell 4.1. IMUen er ikke benyttet i denne implementasjonen, ettersom det antas at gir vinkelen måles nøyaktig og at rull og stamp har en ubetydelig variasjon omkring null grader.

Sensor	Støy std	Målefrekvens
Akustisk posisjonering	0.1 m	1 Hz
DVL hastighet	0.01 m/s	10 Hz
Ekkolodd	0.05 m	10 Hz
Akselerometer	0.1 m/s ²	100 Hz
Trykkmåler	0.02 m ²	10 Hz

Table 4.1: Sensorer brukt til navigasjon

For å estimere tilstandene til UUVen, hvor målingene er utsatt for støy og den ukjente havstrømmen påfører UUVen en ukjent kraft, benyttes et Extended Kalman-filter for å estimere tilstandene for akselerasjon, hastighet relativ til havbunnen og posisjon. Hvor hastigheten og posisjonen blir korrigert med målinger. EKF algoritmen består i hovedsak av to komponenter, prediksjon og korreksjon. I predikasjonssteget beregnes akselerasjonen ved å benytte en matematisk modell som beskriver akselerasjon gitt kreftene som virker på fartøyet. Akselerasjonen blir så integrert opp til hastighet og posisjon. Når en sensormåling blir tilgjengelig blir det gjort et kall til korrektorsteg, som oppdaterer den målte tilstanden. Det benyttes to vektmatriser Q og R for tuning, hvor de representerer henholdsvis kovarians for prosessstøy og målestøy. Disse matrisene avgjør vekten i estimatet mellom prediksjon og korrigering ved måling.

Predictor Step:

Ligningene for prediksjon av endringer i tilstandsvariabelen $x = [\eta, v, \dot{v}]$ og prediksjons kovarians matrisen P er gitt av følgende ligninger

$$\hat{x}^- [k+1] = A[k]\hat{x}[k] + Bu[k] \quad (4.5)$$

$$\hat{P}^- [k] = A[k]\hat{P}[k]A[k]^T + Q_k, \quad (4.6)$$

hvor $A[k]_d$ er den oppdaterte tilstandsmatrisen, B er kontrollmatrisen, Q er kovariansmatrisen for prosessstøy og $u[k]$ er den beregnede akselerasjonen gitt av

$$u[k] = M^{-1}(\tau[k] - Dv_e). \quad (4.7)$$

Her er M massematrisen, $\tau[k]$ er kraften fra thrustere, D er den lineære dempematrisen, og v_e er den estimerte hastigheten.

Corrector Step:

Ligningene for korrigering av den estimerte tilstanden basert på målinger består av tre steg, hvor det første steget er kalkulering av kalman forsterkningen gitt av ligning

$$K[k] = \hat{P}[k]C_d[k]^T (C_d[k]P^- [k]C_d[k]^T + R[k])^{-1}, \quad (4.8)$$

Kalman forsterkningen brukes så til å vekte bidraget fra målingen, som så blir lagt til i estimatet

$$\hat{x}[k] = \hat{x}^- [k] + K[k](y[k] - C_d[k]\hat{x}^- [k]). \quad (4.9)$$

Tilslutt blir korreksjons kovariansmatrisen oppdatert, med følgende ligning

$$\hat{P}[k] = (I - K[k]C_d[k])\hat{P}^- [k](I - K[k]C_d[k])^T + K[k]R_d[k]K^T [k]. \quad (4.10)$$

Målematrisen C , kovariansmatrisen for målestøy R og målevektoren y oppdateres basert på hvilken måling som er utført.

Estimering av havstrøm:

Ettersom det kan forventes å være en betydelig havstrøm, spesielt i nærheten av korallrev, og at det er et behov for å kunne holde en stasjonær posisjon, vil det være fordelaktig å kunne estimere havstrømmen. Videre vil ytre krefter og feil i modellen føre til feil i predikasjonen. Siden den relative hastigheten til havbunnen blir målt ved å benytte en DVL, kan tilstandsvektoren utvides med en tilstand som beskriver den umodellerte hastigheten gitt av v_u . Dette fører til at den nye modellen for beregning av akselerasjon blir,

$$u[k] = M^{-1}(\tau[k] - D(v_e[k] - v_u[k])) \quad (4.11)$$

Hvor $u[k]$ integreres for å oppdatere $v_u[k]$. Dette sørger for at hastigheten $v_e[k] - v_u[k]$ konvergerer mot den relative hastigheten v_r . Ved stationkeeping eller konstant hastighet vil akselerasjonen være tilnærmet null. Som en konsekvens av dette, kan hastighetsvektoren for strømmen beregnes ved å benytte ligning 4.2, under forutsetning av at strømningskoeffisientene til UUVen er kjent. Den omskrevne ligningen blir da

$$v_c = R^{-1}(\psi)(v + D^{-1}\tau). \quad (4.12)$$

4.3 Guiding

Det er valgt å separere guiding loven for den horisontale bevegelsen og den vertikale bevegelsen. Årsaken til dette er at kartleggingslinjene i det horisontale planet er forhåndsbestemt, mens den vertikale ruten beregnes ut fra målinger utført under kartleggingsoppdraget.

4.3.1 Horisontal guiding lov

Kravet om å samle data i rette linjer, samt UUVens evne til å bevege seg uavhengig i alle frihetsgrader, har ledet til utformingen av følgende designvalg for guiding i horisontalplanet. Destinasjonspunktene som markerer starten og slutten på en kartleggingslinje blir gitt som to koordinater i det horisontale planet. Girvinkelen ψ_d settes slik at UUVen står parallelt med linjen mellom destinasjonspunktene (se figur 4.3). Resultatet er at avstanden y_e mellom UUVens posisjon og destinasjonslinjen må kompenseres med pådrag i svai, gitt at rull og stamp er tilnærmet null. Den ønskede vinkelen ψ_d og crosstrack-feilen y_e kan beregnes ved å bruke formel 4.13 og 4.14. Når UUVen befinner seg innenfor en gitt radius fra destinasjonspunktet, settes hastigheten i jag og svai til null, mens UUVen roteres til en vinkel slik at den står parallelt med linjen til neste destinasjonspunkt.

$$\psi_d = \text{atan2}(x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i) \quad (4.13)$$

$$y_e = \cos \psi_d \cdot (y - y_i) - \sin \psi_d \cdot (x - x_i) \quad (4.14)$$

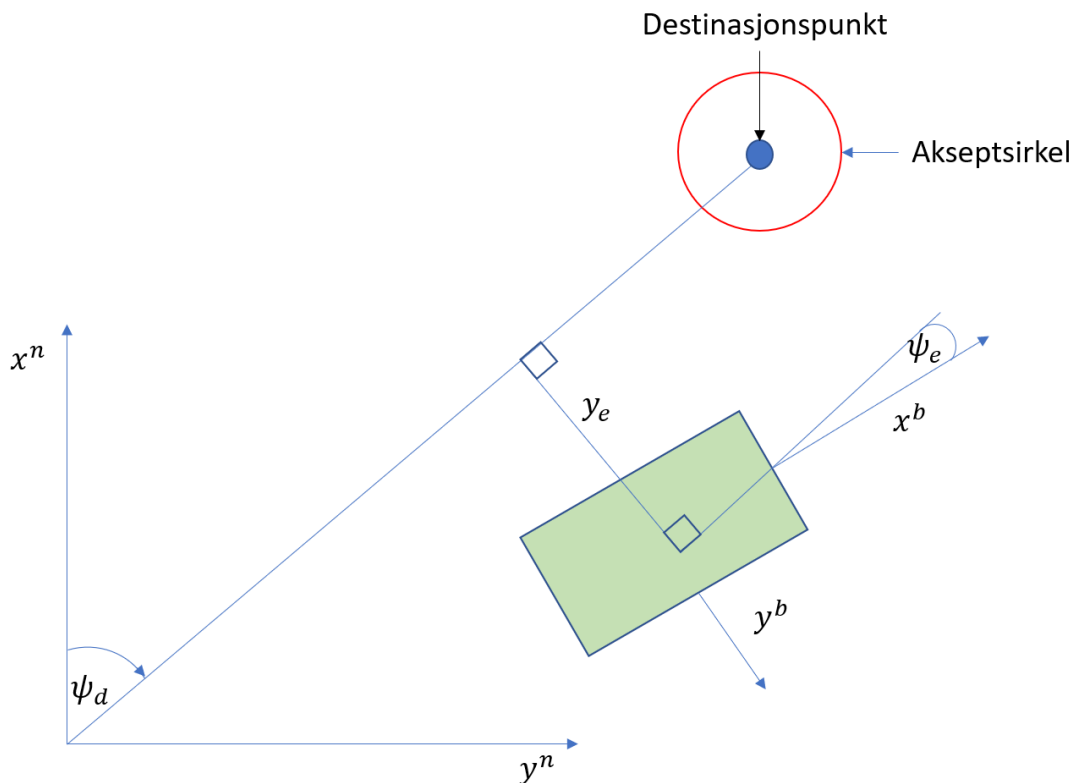


Figure 4.3: Illustrasjon for horisontal guiding

4.3.2 Vertikal guiding lov

For det vertikale planet benyttes et separat guidingsystem, der målet er å opprettholde en ønsket avstand til havbunnen. Med konstant girvinkel og minimal bevegelse i svai, kan et single beam ekkolodd brukes til å måle avstanden til havbunnen. Det benyttes en avstandsmåler for å måle avstanden mellom UUVen og havbunnen rett under, samt en fremoverrettet avstandsmåler montert i en vinkel på 45 grader. Den fremoverrettede avstandsmåleren brukes til å beregne gradienten mellom UUVens nåværende posisjon og dens fremtidige ønskede posisjon, som vist i figur 4.4. De målte avstandene benyttes til å angi ønsket hastighet i heiv, som deretter blir integrert for å angi ønsket dybde. Årsaken til at det velges å styre i henhold til dybde og ikke avstanden direkte skyldes høyere presisjon i målinger samtidig som dybden kan betraktes som et kontinuerlig signal i motsetning til avstanden til havbunnen.

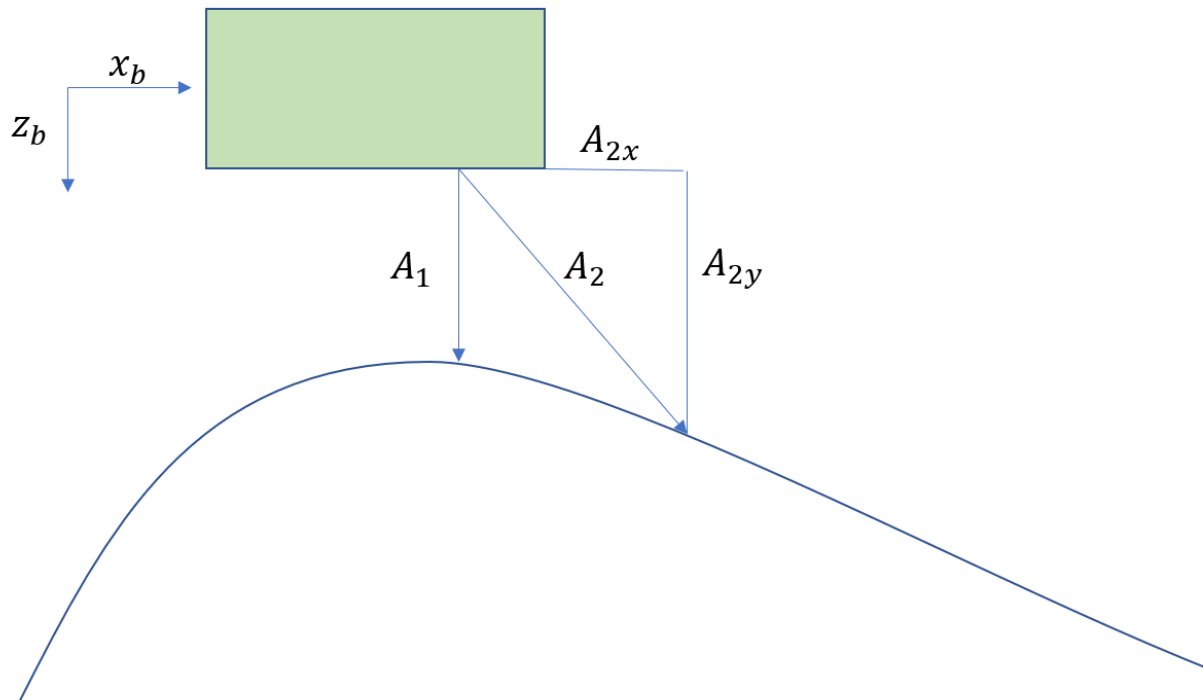


Figure 4.4: Illustrasjon for vertikal guiding

Det er videre ønsket å benytte en hastighetskontroller i hev for å beregne ønsket dybde. Den første delen baserer seg på avstanden målt direkte under farkosten, representert som vektoren A_1 i figur 4.4. Ved å benytte en PI regulator kan den ønskede endringen i dybde beregnes med følgende formel

$$w_d = k_p(a - a_d) + k_i \int (a - a_d) dt, \quad (4.15)$$

hvor w_d er den ønskede hastigheten i hev, $a - a_d$ er avviket for ønsket avstand til havbunnen og konstantene $[k_p, k_i]$ er designparameter. En enkel forklaring på hvordan en PID kontroller fungerer blir gitt i seksjonen som omhandler kontroll av UUVen senere i kapittelet.

Problemet med å kun benytte avstanden til havbunnen er at endringen i hastighet alltid vil komme på etterskudd når topografien til havbunnen varierer. På bakgrunn av dette er det valgt å benytte et feed forward signal som baserer seg på den fremoverrettede målingen. Ved å kjenne vinkelen til avstandsmåleren kan målevektoren A_2 dekomponeres. Den dekomponerte vektoren benyttes til å finne gradienten mellom UUVens nåværende posisjon og den ønskede posisjonen lenger fremme

$$F = \frac{A_2^y - a_d}{A_2^x}, \quad (4.16)$$

hvor F er gradienten, A_{2y} og A_{2x} er retningsvektorene til målingen A_2 , og a_d er den ønskede avstanden til havbunnen. Ettersom dybden hvor UUVen befinner seg avhenger av den horisontale bevegelsen, og hastigheten i svai er tilnærmet null, vil den ønskede hastigheten i hev være avhengig av hastigheten i jag. feed forward bidraget blir på bakgrunn av dette beregnet som

$$w_{d_{ff}} = F \cdot u_d. \quad (4.17)$$

Ved å implementere begge avstandsmålerne i guiding loven får vi følgende ligning for ønsket hastighet

$$W_d = F \cdot u_d + k_p(a - a_d) + k_i \int (a - a_d) dt. \quad (4.18)$$

Ved å integrere opp hastigheten får vi den ønskede dybden:

$$z_d = \int w_d dt + z_i \quad (4.19)$$

Hvor z_i er den initielle dybden. Disse ligningene tar forbehold om at rull og stamp er tilnærmet null, og baserer seg på arbeid utført av [Dukan and Sørensen \(2014\)](#) og [Caccia et al. \(2003\)](#). Det som skiller seg ut i denne implementasjonen er bruken av ekkolodd og ikke DVL for å beregne havbunnens gradient. Dette er fordi UUVen er planlagt å bevege seg i rette linjer, med neglisjerbar hastighet i svai og rotasjon i gir. Den ønskede avstanden vil påvirke målepunktet fra den fremoverrettede sensoren, og det kan derfor være nødvendig å justere vinkelen sensoren er montert basert på planlagt avstand.

4.4 Kontrollsystem

Basert på designet av guiding systemet, er det ønskelig å ha hastighetskontroll i jag, regulering rundt null i avstand fra kjørelinjen gitt av y_e i svai, og dybdekontroll i hev. Det blir benyttet en PID kontroller for å kalkulere nødvendig kraft fra thrustere. Kort forklart er en PID kontroller en kontrollalgoritme som baserer seg på tre ledd. Proporsjonalleddet gir et bestemt pådrag ut fra avviket, Integrasjonsleddet gir et pådrag basert på avviket over tid, og derivasjonsleddet gir et pådrag basert på endringsratioen i avviket. En matematisk representasjon er gitt av ligning,

$$\tau(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.20)$$

Hvor $\tau(t)$ er utgangssignalet som i denne implementasjonen er ønsket kraft, k_p, k_i, k_d er designparameter som vektet bidraget til Proporsjonal, Integral og Derivasjons delen av kontrolleren, mens avviket e beregnes ut fra

$$e = r(t) - y(t), \quad (4.21)$$

hvor $r(t)$ er referansen som gir ønsket tilstand og $y(t)$ er den estimerte tilstanden.

Simuleringen tar ikke hensyn til thruster-allokasjon, men det blir som tidligere nevnt antatt at UUVen kan bevege seg uavhengig i alle frihetsgradene. En reduksjonsfunksjon blir videre brukt for å justere den ønskede hastigheten i jag basert på feilen mellom den ønskede dybden og hastigheten i hev. Implementasjonen er tilsvarende som utviklet av [Dukan and Sørensen \(2014\)](#). Hvor reduksjonsfaktoren Γ multipliseres med den maksimalt tillate hastigheten. Kalkulasjonen av ønsket hastighet kommer frem av følgende ligninger:

$$\Gamma = \begin{cases} 1 & \text{if } e < e_{tol}, \\ \frac{1}{e_{max} - e_{tol}} (e_{max} - e) & \text{if } e_{tol} \leq e \leq e_{max}, \\ 0 & \text{if } e > e_{max} \end{cases} \quad (4.22)$$

Her er $\mathbf{e} = [w - W_d, z - z_d]$, hvor w og z representerer aktuelle hastighet og dybde, og W_d og z_d representerer ønskede hastighet og dybde. Videre er $e = \mathbf{e}Q\mathbf{e}^T$, hvor Q er en vektmatrise som endrer betydningen av påvirkningen til hvert avvik. $e_{maximum}$ og $e_{tolerance}$ representerer henholdsvis grensen for tillatt avvik og en nedre grense som beskriver toleransen i avvik som skal til for at hastigheten reduseres. Den ønskede hastigheten u_d blir derfor gitt av følgende ligning

$$u_d = u_{max}\Gamma, \quad (4.23)$$

hvor u_{max} er den ønskede maksimale hastigheten. Ved å bruke denne metoden kan vi dynamisk justere hastigheten basert på hvor stor feilen mellom ønsket og faktisk tilstand er. Dette gir en mer robust og effektiv kontroll over UUVens bevegelser relativt til havbunnen.

4.4.0.1 Station keeping

Under stationkeeping benyttes de samme PID kontrollerne for svai og hev, mens for surge som i utgangspunktet er hastighetskontrollert, byttes det til en PID kontroller for posisjonskontroll. Videre blir feed forward leddet i dybdereguleringen koblet ut. Et integralledd vil kompensere for ukjente krefter som kommer av feil i den matematiske modellen for predikasjon i kalmanfilteret.

Chapter 5

Simuleringsstudie

I dette kapittelet vil den forslåtte UUVen basert på kravspesifikasjonene simuleres i et tenkt kartleggingsoppdrag. Modellen og metodene beskrevet i kapittel 3 beskriver implementasjonen i simuleringen. Målet med simuleringsstudien er å teste hvordan de forslåtte metodene egner seg for gjennomføring av detaljert kartlegging av havbunnen i ulike scenarier. Hovedmålet ved et kartleggingsoppdrag er å samle data av god kvalitet som kan analyseres i ettertid. For at dette skal være mulig er det viktig at UUVen følger den planlagte ruten og holder en ønsket avstand til havbunnen.

5.1 Scenarier

Fysiske faktorer kan ha stor påvirkning på kvaliteten av videofilen fra et kartleggingsoppdrag. Sikten i vannet har direkte innvirkning på bildekvaliteten og vil sette premisset for hvilken avstand kameraet kan ha. Videre vil topografien avgjøre kjøremønsteret og kan være en utfordring med tanke på å holde ønsket hastighet og avstand til bunn. Gitt disse utfordringene er det ønskelig å finne ut hvordan ulike adaptasjonsgrader kan påvirke kvaliteten på kartleggingen.

5.1.1 Siktforhold og modellering av bildekvalitet

Bildekvaliteten under vann påvirkes av flere faktorer som absorpsjons og attenuasjonskonstanter, spredningskoeffisienter, lysforhold, og kameraets spektrale respons [Akkaynak et al. \(2017a\)](#). For å filtrere ut uønskede elementer i undervannsbilder, har forskere utviklet en modell som beskriver hvordan vannet påvirker bildekvaliteten [Akkaynak and Treibitz \(2018\)](#), [Akkaynak and Treibitz \(2019\)](#). Denne modellen antar imidlertid at bildet er tatt horisontalt på en bestemt dybde under vann, med et konstant bakgrunnslysnivå. I dette arbeidet utvikles en tilsvarende modell, men med utgangspunkt i at kameraet peker vertikalt nedover med ekstern belysning.

Lysene montert på den ubemannede undervannsfartøyet (UUV) er hovedkilden til lys i denne sammenhengen. Derfor er det hensiktsmessig å vurdere både irradians fra lysene til objektet som skal fotograferes, videre referert til som E og radiansen som er lysstrålene fra objektet til observasjonspunktet L . Irradians

i vann kan beregnes ved hjelp av Beer's lov, som beskriver lysattenuasjon i et medium [Mobley \(1994\)](#). Denne formelen tar hensyn til avstanden fra lyskilden, attenuasjonskoeffisienten og intensiteten av det utstrålte lyset og er gitt som,

$$E(z, \lambda) = E(0, \lambda) \cdot e^{-\beta(\lambda) \cdot z} \quad (5.1)$$

Hvor $E(0, \lambda)$ er lysintensiteten fra kilden i en bestemt bølgelengde λ , β er attenuasjonskonstanten og z er avstand. Dette gir lysintensiteten $E(z, \lambda)$ gitt en bestemt avstand fra lyskilden. Beer's lov overser imidlertid det lyset som blir reflektert tilbake på grunn av tilbakespredning (backscatter). En mer sofistikert modell for radiansen av lys i havet, er en transferfunksjon som tar hensyn til både tilbakespredning og økningen i radians langs retningen ξ fra fotoner som kommer fra alle retninger [Mobley \(1994\)](#). Hvordan radiansen sprer seg er dermed gitt av ligning,

$$L(d; \xi; \lambda) = L_0(d_0; \xi; \lambda) e^{-\beta(\lambda)z} + \frac{L_*(d; \xi; \lambda) e^{-K_d(\lambda)z \cos \theta}}{\beta(\lambda) - K_d(\lambda) \cos \theta} \left[1 - e^{-[\beta(\lambda) - K_d(\lambda) \cos \theta]z} \right] \quad (5.2)$$

hvor $L(d_0; \xi; \lambda)$ er den totale radiansen som forlater objektet, $L(d; \xi; \lambda)$ er den totale radiansen som når kameraet, ξ er en retning i 3D-rommet, λ er bølgelengde, θ er vinkelen målt fra nadir-retningen (positiv nedover), og z er den geometriske avstanden langs ξ . L_* er banefunksjonen som beskriver radiansen som økes langs retningen ξ fra fotoner som kommer fra alle retninger. Ved å ta utgangspunkt i at kameraet peker direkte nedover, settes $\theta = 0^\circ$, videre vil lyset som treffer partikkelet være lysintensiteten fra lampene utsatt for attenuasjon om vi neglisjerer det naturlige lyset. Dette gir følgende ligning for radiansen som når kameraet gitt distansen z fra havbunnen,

$$L(z; \xi; \lambda) = E(z; \xi; \lambda) e^{-\beta(\lambda)z} + \frac{L_*(d; \xi; \lambda) e^{-k_d z}}{\beta(\lambda) - k_d(\lambda)} \left(1 - e^{-(\beta(\lambda) - k_d)z} \right) \quad (5.3)$$

Ligningen kan videre deles opp i to ledd,

$$L = D + B \quad (5.4)$$

hvor D er det direkte signalet gitt av Beer's lov og B er signalet fra tilbakespredningen.

Hvilken retning et foton beveger seg etter å ha truffet en partikkel er høyst komplekst og blir gitt av volumspredningsfunksjonen (VSF). Integralet av VSF i alle retninger gir spredningskoeffisienten i vannet $b(\lambda)$ som er det viktigste parameteret når det kommer til backscattering av signalet.

Om man så ser for seg en uendelig liten disk med tykkelse dz som ikke er i den direkte siktlinjen til objektet som skal fotograferes, kan radiansen som spres fra disken beregnes som,

$$dL(z, \lambda) = b(\lambda)E(z, \lambda)dz \quad (5.5)$$

mens den motatte radiensen fra observasjonspunktet blir gitt av følgende ligning,

$$dB(z, \lambda) = dL(z, \lambda) e^{-(\beta(\lambda) - k_d)z} \quad (5.6)$$

Ved å sette ligning 5.5 inn i 5.6 og integrerer det fra $z_1=0$ til $z_2=z$ kan vi beregne signalet som kommer tilbake fra backscatter,

$$B(z, \lambda) = \frac{b(\lambda)E(z, \lambda)}{\beta(\lambda) - k_d} e^{-\beta(\lambda)z}. \quad (5.7)$$

Det totale signalet T som treffer observasjonspunktet kan da skrives som,

$$T = E(0, \lambda) e^{-\beta(\lambda)z} + \frac{b(\lambda)E(z, \lambda)}{\beta(\lambda)} e^{-\beta(\lambda)z}. \quad (5.8)$$

Hvordan lyset fanges opp vil avhenge av spektralresponsen til kameraet $S_c(\lambda)$ hvor c representerer fargekanalene R,G,B. Intensiteten i bildet blir da

$$I_c = \frac{1}{\kappa} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_c(\lambda) \rho(\lambda) E(d, \lambda) e^{-\beta(\lambda)z} d\lambda + \frac{1}{\kappa} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_c(\lambda) B^z(\lambda) (1 - e^{-\beta(\lambda)z}) d\lambda \quad (5.9)$$

hvor $\rho(\lambda)$ er reflektansspektrumet til objektene i bildet, og κ er en skalar som angir bildeeksponering og pikselstørrelse til kameraet [Akkaynak et al. \(2017b\)](#). Gitt denne modellen, vil intensiteten i et bilde uten attenuasjon bli

$$J_c = \frac{1}{\kappa} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_c(\lambda) \rho(\lambda) E(d, \lambda) d\lambda \quad (5.10)$$

mens lyset reflektert fra partikler innenfor distanse z kan skrives som

$$B_c^z = \frac{1}{\kappa} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_c(\lambda) \frac{b_c E_c}{\beta_c} d\lambda. \quad (5.11)$$

Man kan ytterligere forenkle modellen ved å anta at variasjonene i attenuasjon for ulike bølgelengder kan ignoreres. Dette resulterer i at ligning 5.9 kan omskrives til

$$I_c = J \cdot e^{-\beta_c \cdot z} + B_c^z (1 - e^{-\beta_c}). \quad (5.12)$$

Det vises til i artikkelen [Akkaynak and Treibitz \(2018\)](#) at β kan være ulik for det direkte attenuasjonsleddet

og spredningsleddet. Ettersom modellen i denne oppgaven kun ønsker å gi en representasjon på hvordan ulike grader av urenheter i vann påvirker bildekvaliteten med hensyn på avstand velges det å ikke ta hensyn til dette. Videre vil AUVen være utstyrt med lyskastere da tilstedeværelsen av naturlig lys er lav på større dybder. Dette kan føre til overeksponerte bilder om farkosten kommer for nærme havbunnen. På bakgrunn av dette legges et ekstra ledd til på modellen. Ettersom det i denne oppgaven ønskes å få en skalar som representerer bildekvalitet, settes J til 1, dette er bildet tatt uten påvirkning av attenuasjon og med en lyseksposering tilpasset innstillingene på kameraet. Ved verdier høyere enn 1 vil bildet oppleves som gradvis mer overeksponert for lys, og verdier mindre enn 1 er tilsvarende for undereksposering. Det siste leddet som legges til i modellen er,

$$F = e^{-(\beta+kd)z} \quad (5.13)$$

hvor attenuasjon av lys og avstand fra havbunnen er de gjeldende parametrene. Dette gir den endelige modellen

$$I = J \cdot e^{-\beta \cdot z} + B^z(1 - e^\beta) + F. \quad (5.14)$$

Figur 5.5 viser en implementasjon av ligningen på et eksisterende bilde. Figuren viser det originale og attenuerte bildet, samt forskjellen med lyssetting fra to forskjellige distanser på henholdsvis 2 og 0.5 meter.

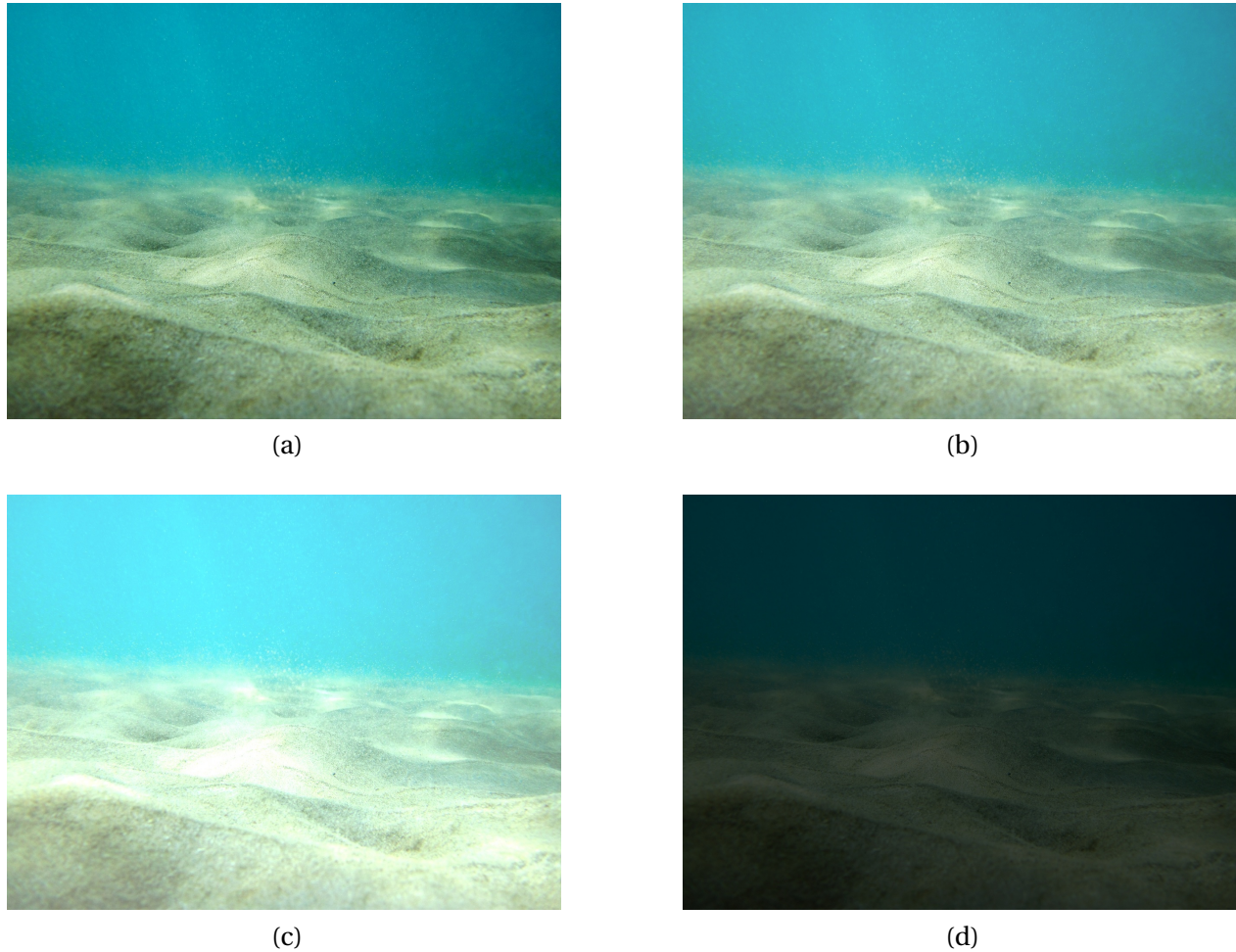


Figure 5.5: En representasjon av hvordan lysattenuasjon påvirker bildet. a) er det originale bildet, b) Attenuert bildet med god lyseksposering c) Attenuert bilde overeksponert for lys, d) Attenuert bilde

5.1.2 Topografi

For å teste hvordan topografien til havbunnen kan påvirke et kartleggingsoppdrag blir tre havbunner modelert med forskjellige karakteristikker. Det er valgt å kjøre et kartleggingsoppdrag med en undersøkelseslinje på 720 meter for alle kartleggingsområdene.

- **Kartleggingsområde 1:** Har en lite varierende topografi, med en høydeforskjell mellom høyeste og laveste punkt på 8 meter.
- **Kartleggingsområde 2:** Har en veldig variert topografi, med høydeforskjell mellom høyeste og laveste punkt på 5 meter.
- **Kartleggingsområde 3:** Har en middels varierende topografi, med en høydeforskjell på høyeste og laveste punkt på 28 meter.

5.1.3 Adapsjonsgrad og kartleggingsmetodikk

For å se hvordan ulike adapsjonsgrader på UUVen påvirker resultatet blir 4 forskjellige stadier inkludert i simuleringsstudien, hvor de tre første omhandler guidance og kontroll av dybderegulering, mens den siste tar høyde for endring i siktforhold og kan kjøre deler av linjen på nytt om det er nødvendig.

- **Adapsjonsgrad 1:** En UUV som holder konstant hastighet og regulerer avstanden til havbunnen med en vertikal akustisk avstandsmåler. Benyttes som sammenligningsgrunnlag til de mer avanserte implementasjonene
- **Adapsjonsgrad 2:** Regulerer hastigheten i jag med hensyn på avvik i ønsket avstand fra havbunnen.
- **Adapsjonsgrad 3:** En mer avansert avstandsregulering er implementert. En ekstra avstandsmåler vinklet med kjøreretning benyttes til å beregne et feed forward signal til dybdekontrolleren.
- **Adapsjonsgrad 4:** Ved å estimere kvaliteten på bildet kan avstanden til havbunnen tilpasses autonomt under kjøring. Dette er helt nødvendig om kartleggingsoppdraget skal gjennomføres autonomt.

Ved å benytte modellen for estimering av bilde kvalitet implementeres algoritme 1 for å justere den ønskede avstanden til havbunnen.

Algorithm 1 Algoritme for å justere ønsket avstand basert på bilde kvalitetsmåling

```

image_metric = get_image_metric()
image_metric_error = J - image_metric
altitude_error = abs(distance_to_seabed - desired_distance)
if altitude_error < 0.05 and abs(image_metric_error) > 0.02 then
    desired_distance = error_image_metric * gain
end if

```

Hvor J er referanseverdien til et bilde uten forstyrrelser, og $gain$ er et justerbart parameter satt til 0.1. Videre er verdiene for threshold i if-betingelsen justerbare, og vil påvirke sensitiviteten for endring av ønsket avstand.

5.2 Testplan simuleringsstudie

En plan for gjennomføring av simuleringsstudien og en oversikt over scenarioer blir presentert i denne seksjonen.

5.2.1 Dynamisk posisjonering og kompensasjon av havstrøm

Studien vår har som mål å undersøke systemets kapabilitet til å kompensere for havstrømmer og opprettholde en stabil posisjon, gitt nøyaktigheten av estimatet for havstrømmen. Vi vil benytte to ulike modeller i kalman filteret i denne prosessen. Hovedforskjellen mellom disse systemene er dempematrissen i prediksjonssteget: det første systemet har en kjent, ulineær dempematrix, mens det andre kun

har en kjent, lineær dempematrise.

Vi vil simulere hvert system under tre forskjellige strømningshastigheter: $[0,0,0]$ m/s, $[0.4,0.6,0]$ m/s, og $[1.4,1.2,0]$ m/s. Dette gjør det mulig for oss å forstå graden av påvirkning fra ukjente krefter på systemene, samt effektiviteten av implementeringen vår når det gjelder å kompensere for slike forstyrrelser.

5.2.2 Kartleggingsoppdrag

Testplanen for utførelse av kartleggingsoppdrag er utformet rundt de nevnte scenarioene. Planen er delt inn i fire deler, hvor de første tre delene omhandler de tre første adaptasjonsgradene, sikt og ulik topografi på kartleggingsområdet. Basert på sikten vil det bli valgt en ønsket avstand til havbunnen som fører til høy bildekvalitet om den overholdes. Til slutt blir en konfigurasjon hvor UUVen selv må bestemme avstand basert på siktforhold. I denne simuleringen blir siktforholdene endret ved bestemte tidspunkt for å se i hvilken grad UUVen tilpasser avstanden.

Hovedformålet med disse simuleringene er å avdekke hvordan ulike grader av adaptasjon kan påvirke kvaliteten på datainnsamling. Vi ønsker også å vurdere den praktiske ytelsen av dronens tekniske utforming. En rekke simuleringsoppdrag vil bli utført for å oppnå dette. Tabell 5.1 gir en detaljert oversikt over scenarioene som skal testes.

Alle scenarioene i kartleggingsoppdraget blir gjennomført med en hastighet på havstrømmen tilsvarende $[0.4,0.6,0]$ m/s. Videre blir ønsket hastighet satt til 0.5 m/s, da implementasjonen av hastighetsreduksjon vil tilpasse hastigheten når avviket fra ønsket avstand blir for stort.

Scenario	Sikt	Kartleggingsområde	Adapsjonsnivå
1.1	God	Kartleggingsområde 1	Nivå 1
1.2	God	Kartleggingsområde 1	Nivå 2
1.3	God	Kartleggingsområde 1	Nivå 3
1.4	Middels	Kartleggingsområde 1	Nivå 1
1.5	Middels	Kartleggingsområde 1	Nivå 2
1.6	Middels	Kartleggingsområde 1	Nivå 3
1.7	Dårlig	Kartleggingsområde 1	Nivå 1
1.8	Dårlig	Kartleggingsområde 1	Nivå 2
1.9	Dårlig	Kartleggingsområde 1	Nivå 3
2.1	God	Kartleggingsområde 2	Nivå 1
2.2	God	Kartleggingsområde 2	Nivå 2
2.3	God	Kartleggingsområde 2	Nivå 3
2.4	Middels	Kartleggingsområde 2	Nivå 1
2.5	Middels	Kartleggingsområde 2	Nivå 2
2.6	Middels	Kartleggingsområde 2	Nivå 3
2.7	Dårlig	Kartleggingsområde 2	Nivå 1
2.8	Dårlig	Kartleggingsområde 2	Nivå 2
2.9	Dårlig	Kartleggingsområde 2	Nivå 3
3.1	God	Kartleggingsområde 3	Nivå 1
3.2	God	Kartleggingsområde 3	Nivå 2
3.3	God	Kartleggingsområde 3	Nivå 3
3.4	Middels	Kartleggingsområde 3	Nivå 1
3.5	Middels	Kartleggingsområde 3	Nivå 2
3.6	Middels	Kartleggingsområde 3	Nivå 3
3.7	Dårlig	Kartleggingsområde 3	Nivå 1
3.8	Dårlig	Kartleggingsområde 3	Nivå 2
3.9	Dårlig	Kartleggingsområde 3	Nivå 3
4.1	Variierende	Kartleggingsområde 1	Nivå 4

Table 5.1: Scenarier for simuleringsstudiet

Chapter 6

Resultater

Resultatene fra både implementasjonen av metodene brukt for navigasjon, guidance og kontrol samt simuleringstudien blir presentert i dette kapittelet.

6.1 Navigasjon og kontroll under påvirkning av havstrøm

Denne seksjonen presenterer resultatene fra modellering og implementering i det horisontale planet under forskjellige hastigheter på havstrømmen. To forskjellige navigasjons- og kontrollsystemer ble benyttet. Den første simuleringen ble gjort med kjente parametre for den ulineære dempingen til systemet under forskjellige strømforhold, mens den neste simuleringen ble gjort med et system hvor kun den lineære dempematriksen er kjent. Alle simuleringene følger den samme kartleggingsruten, og UUVen skal oppretholde stasjonær posisjon fra aksept sirkelen den kommer inn i aksept sirkelen, til 30 sekunder etter rotasjon. kartleggingsruten blir vist i figur 6.5.

Figur 6.1 illustrerer simuleringens resultater i endringen av posisjon i NED og avviket i crosstrack-error, hvor den ulineære dempematriksen er kjent. Systemet kan effektivt kompensere for havstrømmen, uavhengig av dens hastighet, ved å estimere den nødvendige kraften for å motvirke de strøm-induserte kreftene, som varierer med girvinkelen. Det er også verdt å merke seg at ulike hastigheter på havstrømmen fører til betydelige variasjoner i tid og avvik før systemet stabiliserer seg og holder ønsket posisjon. Dette kommer spesielt tydelig fram når havstrømmen er $[1.4, 1.2, 0]$ m/s.

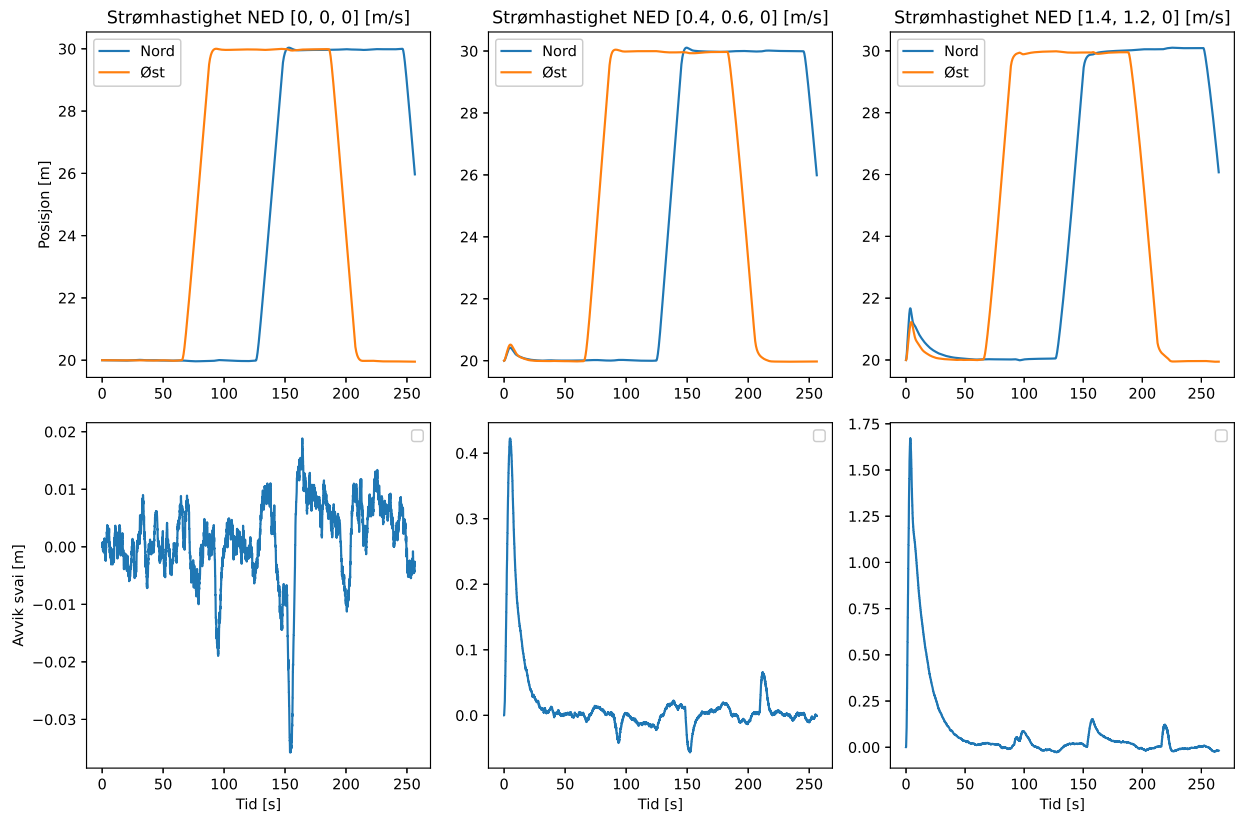


Figure 6.1: Sammenligning av kjøring under ulike strømforhold, hvor den ikke-lineære modellen er kjent. Strømhastighet fra venstre til høyre i NED $([0,0,0],[0.4,0.6,0],[1.4,1.2,0])$

Figur 6.2 viser at presisjonen i posisjoneringen reduseres når det kun benyttes en lineær modell i predikasjonen av havstrømmen. Økt hastighet i havstrømmen påvirker UUVens presisjon betydelig, og i sterk strøm vil systemet ha en tydelig overshoot før det korrigerer. PID kontrolleren for dette systemet ble tunet med hensyn på strømhastighet $[0.4, 0.5, 0]$ m/s, noe som gikk på bekostning av presisjon i manøvrering når UUVen er påvirket av betydelig kraftigere strøm. Dette tyder på at et mer avansert kontrollsystem kan være nødvendig for å forbedre presisjonen under varierende strømforhold. Likevel vil integraleffekten i kontrolleren kompensere for den umodellerte kraften over tid. Som resulterer i at undersøkelseslinjen blir fulgt presist.

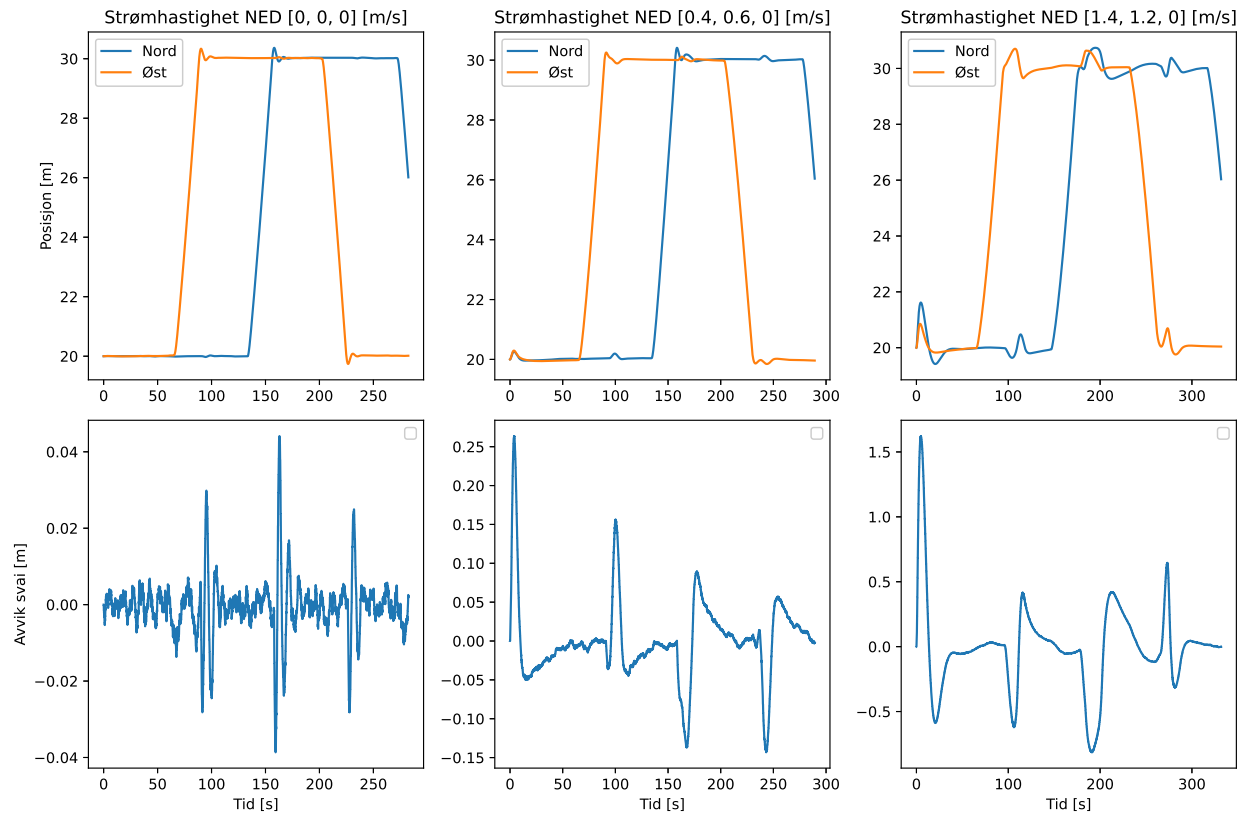


Figure 6.2: Sammenligning av kjøring under ulike strømforhold hvor den ikke-lineære modellen er ukjent. Strømhastighet fra venstre til høyre i NED $([0,0,0],[0.4,0.6,0],[1.4,1.2,0])$

Figur 6.3 illustrerer den målte, estimerte og faktiske akselerasjonen og hastigheten til UUVens tre lineære frihetsgrader for operasjon under en havstrøm på $[0.4,0.6,0]$ m/s, fra simuleringen med kjent ikke-lineær dempematrix. Den predikerte akselerasjonen følger den faktiske akselerasjonen fint. Det er likevel noe avvik når systemet går over i stationkeeping. Noe av årsaken til dette kan skyldes at kontrolleren under stationkeeping gir et kraftig pådrag for å nå ønsket destinasjon når UUVen kommer inn i akseptirsirkelen.

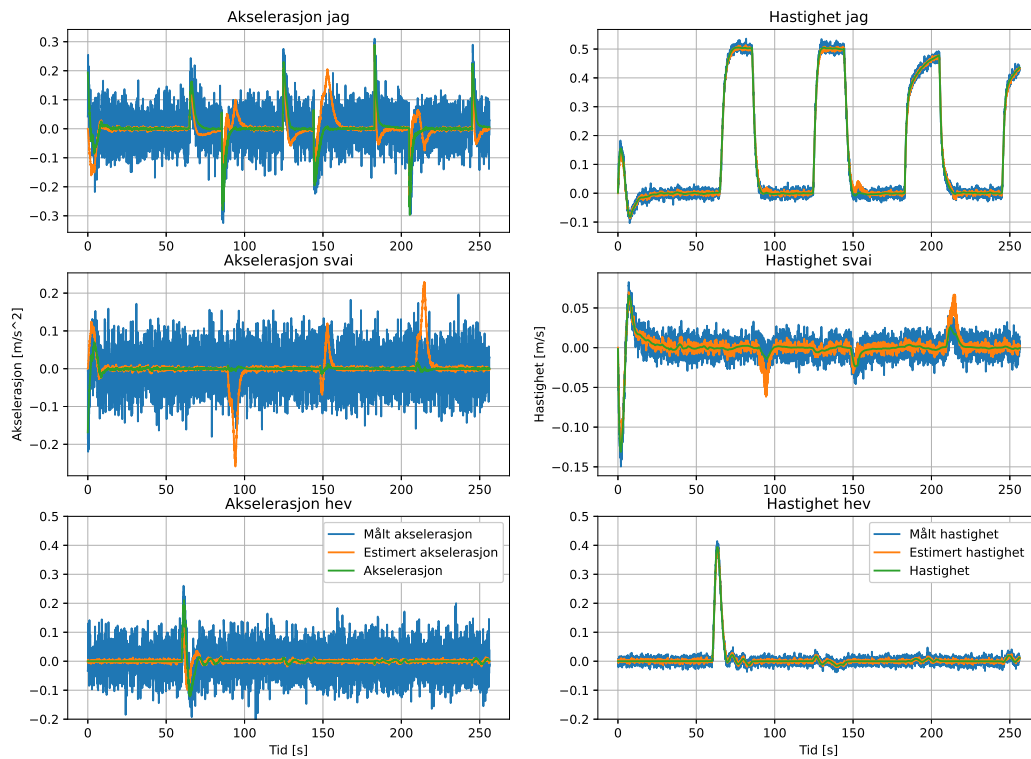


Figure 6.3: Hastighets og akselerasjonsdata når det ulineære dempningsleddet er kjent. Strømhastighet i NED er $[0.4, 0.6, 0]$

Tilsvarene illustreres akselerasjonene og hastighetene for systemet som har ukjent ikke-lineær demping i figur 6.4. Her er avviket i prediksjon av akselerasjon større under de samme tilstandene. Dette er naturlig ettersom en større del av kraften som virker på UUVen er ukjent. Under følgning av kjørelinjen bruker navigasjonssystemet betydelig lengre tid på å konvergere til riktig akselerasjon, årsaken til dette er at den ulineære dempingen spiller en mer betydelig rolle i dynamikken når hastigheten øker. Selv om det tidvis er avvik i akselerasjonsberegningen kompenserer målingene fra DVL'en i estimeringen av hastighet.

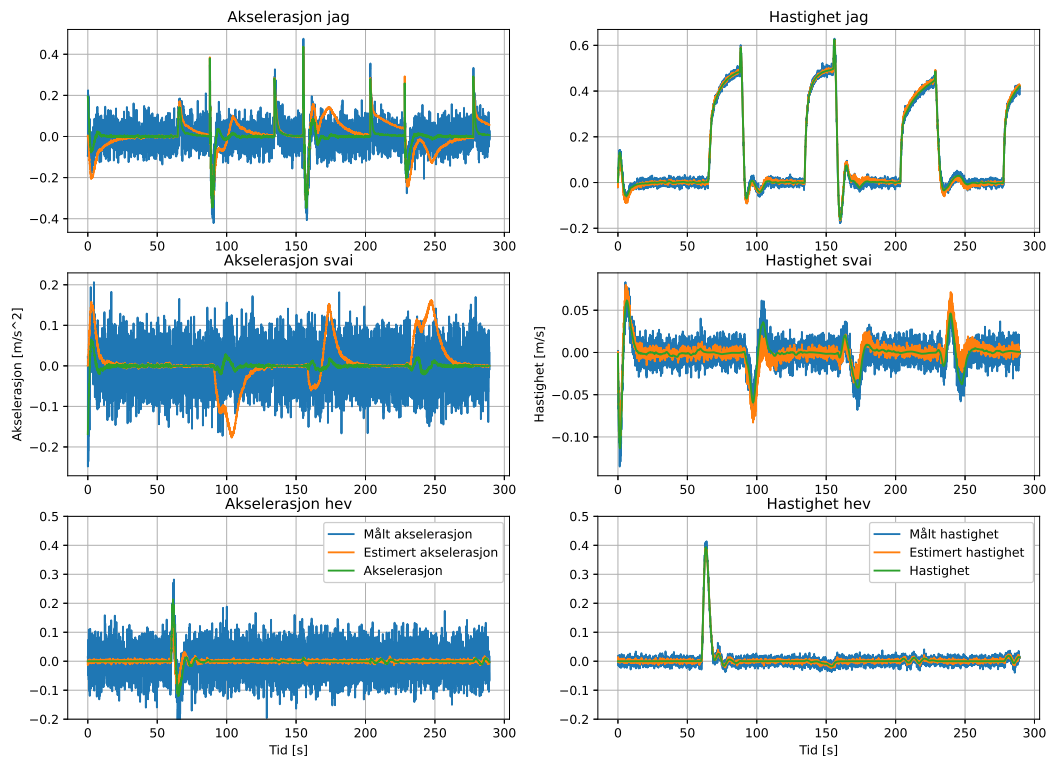


Figure 6.4: Hastighets og akselerasjonsdata når det ulineære dempningsleddet ikke er kjent. Strømhastighet i NED er $[0.4, 0.6, 0]$

En sammenligning av kjørelinjene med strømhastighet $[0.4, 0.6, 0]$ er vist i figur 6.5. Selv om konfigurasjonen med ukjent ikke-lineær systemmatrise bruker lengre tid på å oppnå station keeping ved destinasjonspunktene, følger den kjørelinjen som ønsket. Dette illustrerer effektiviteten av kontrollsystemet selv under utfordrende forhold. En viktig årsak til dette er at systemet får korrigert girvinkel, og kompensert for havstrøm og ukjent dynamikk før den beveger seg langs undersøkelseslinjen.

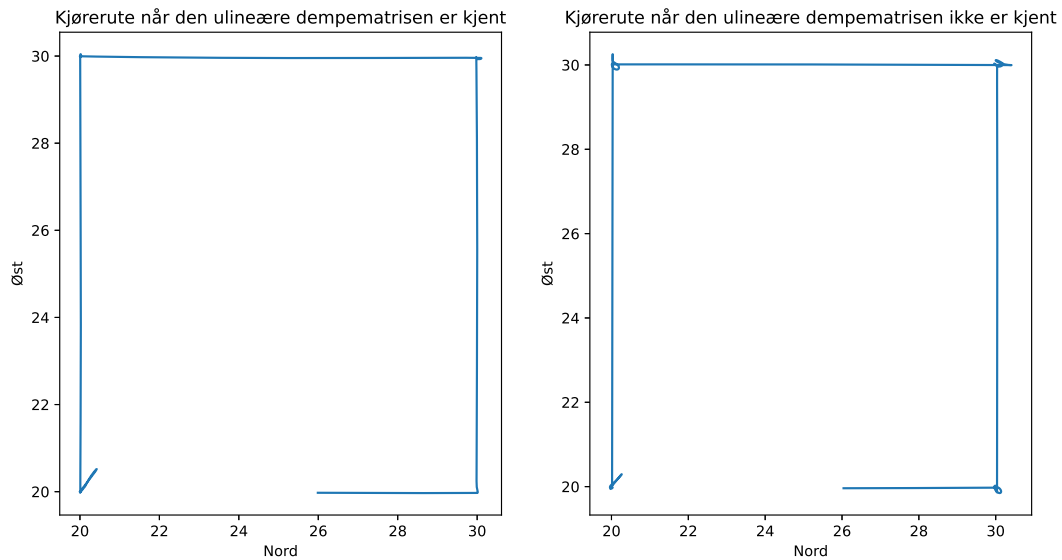


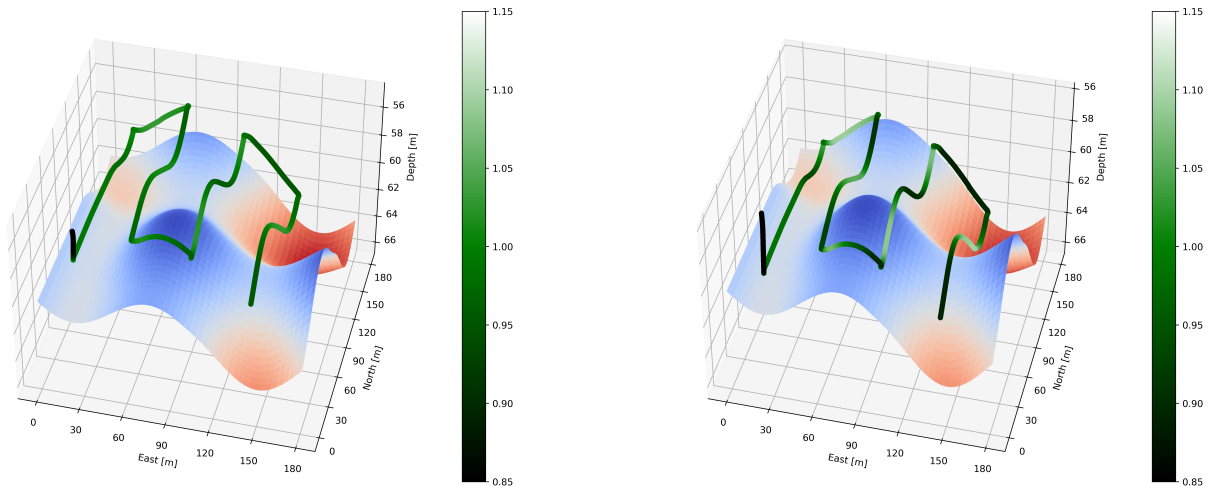
Figure 6.5: Kjørelinjen for simuleringene

6.2 Simuleringsstudie av kartleggingsoppdrag

Resultatene fra kartleggingsoppdragene, under de ulike scenariene, blir presentert i denne seksjonen. Resultatene fra hvert kartleggingsområde blir presentert hver for seg. Hvert kartleggingsområde blir simulert med varierende siktforhold, hvor den ønskede avstanden er tilpasset siktforholdene og er konstant gjennom hele kartleggingen. Avstanden blir satt til [3.15, 2.05, 1.5] m for henholdsvis god, middels og dårlig siktforhold. Til slutt blir resultatene for adaptiv avstandstilpasning basert på siktmodellen presentert, hvor systemet selv tilpasser avstanden basert på den estimerte bildekvaliteten.

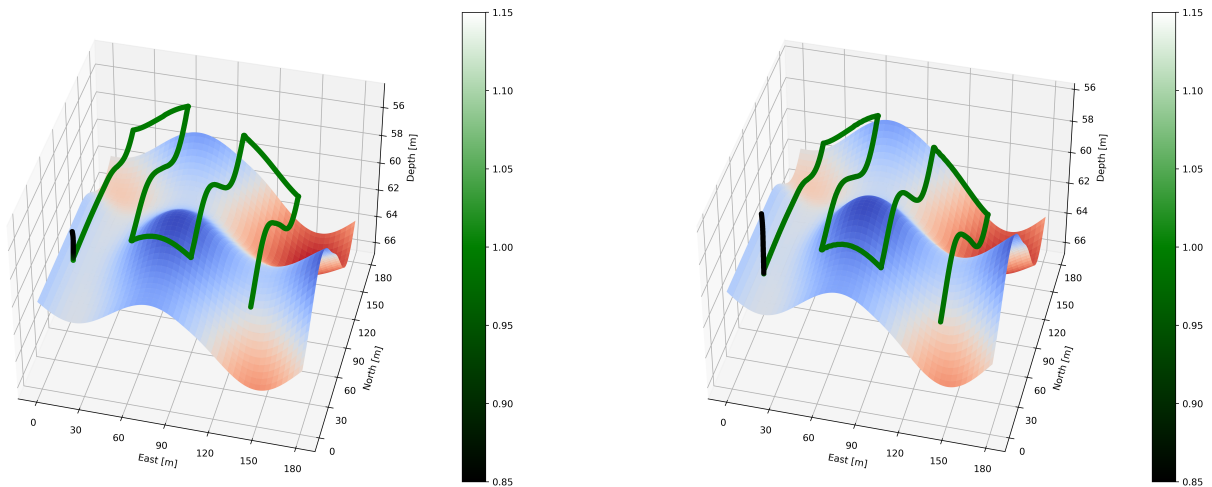
6.2.1 Kartleggingsområde 1

Figur 6.6 sammenligner kjøring under gode og dårlige siktforhold med adaptjonsnivå 2 og 3, med den minst komplekse topografien. Det kommer frem av figuren at det planlagte undersøkelseslinjen blir fulgt om ønsket i horisontalplanet. Kvaliteten på kartleggingen er også god for adaptjonsnivå 2 under god sikt, mens det er tydelig at kvaliteten blir betydelig lavere når sikt kvaliteten reduseres.



(a) Adapsjonsnivå 2, god sikt (scenario 1.2)

(b) Adapsjonsnivå 2, dårlig sikt (scenario 1.8)



(c) Adapsjonsnivå 3, god sikt (scenario 1.3)

(d) Adapsjonsnivå 3, dårlig sikt (scenario 1.9)

Figure 6.6: Den tredimensjonale representasjonen viser både havbunnens topografi og bevegelsen til UUVen. Kvaliteten på bildet er indikert ved fargekoding, der en verdi på 1 representerer optimal bildekvalitet.

Årsaken til at kvaliteten på kartleggingen blir betydelig dårligere ved dårlig sikt for adapsjonsnivå 2 har med toleransen for å oppnå gode bilder når sikt kvaliteten reduseres. Dette kommer tydelig fram i figur 6.7, der det er tydelig at avviket er tilsvarende for adapsjonsnivåene uavhengig av sikt.

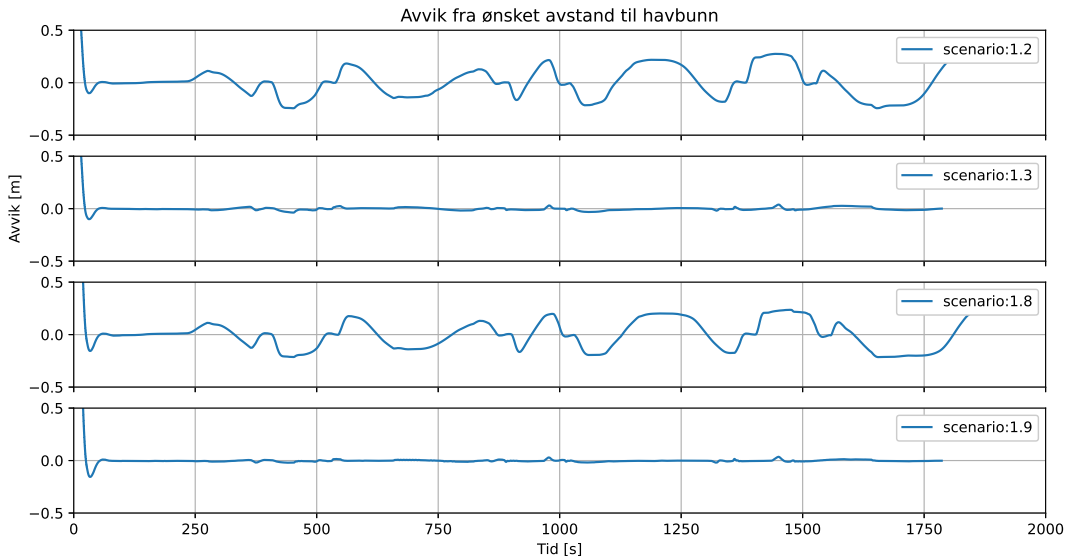


Figure 6.7: Avvik fra ønsket avstand til havbunnen for utvalgte scenarier

En representasjon av fordelingen av kvaliteten på videoinnhenting gitt av tid vises i figur 6.8. Kvaliteten går gradvis ned når bildekvaliteten blir dårlige for de to første adaptjonsnivåene, mens adaptjonsnivå 3 holder høy bildekvalitet under alle siktforhold. Ved å sammenligne adaptjonsnivå 1 og 2 er kvaliteten på kartleggingen noe høyere når hastighetsreduksjon blir anvendt, dette kommer best frem når siktforholdene er dårlige.

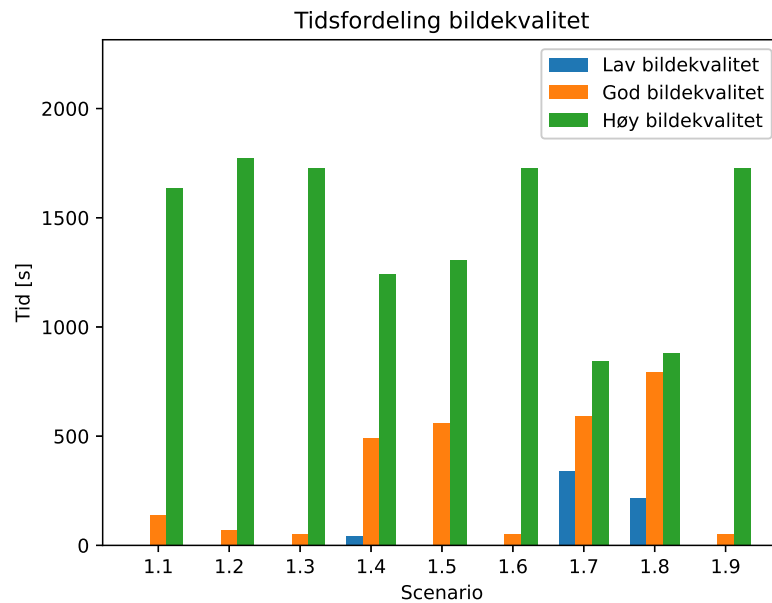


Figure 6.8: Stolpediagram som viser kvaliteten av videofilen relativ til tid.

Figur 6.9 viser hastigheten i jag for de fire scenarioene vist i det tredimensjonale plottet. Hvor hastigheten blir redusert for adaptjonsnivå 2 når avviket blir for høyt.

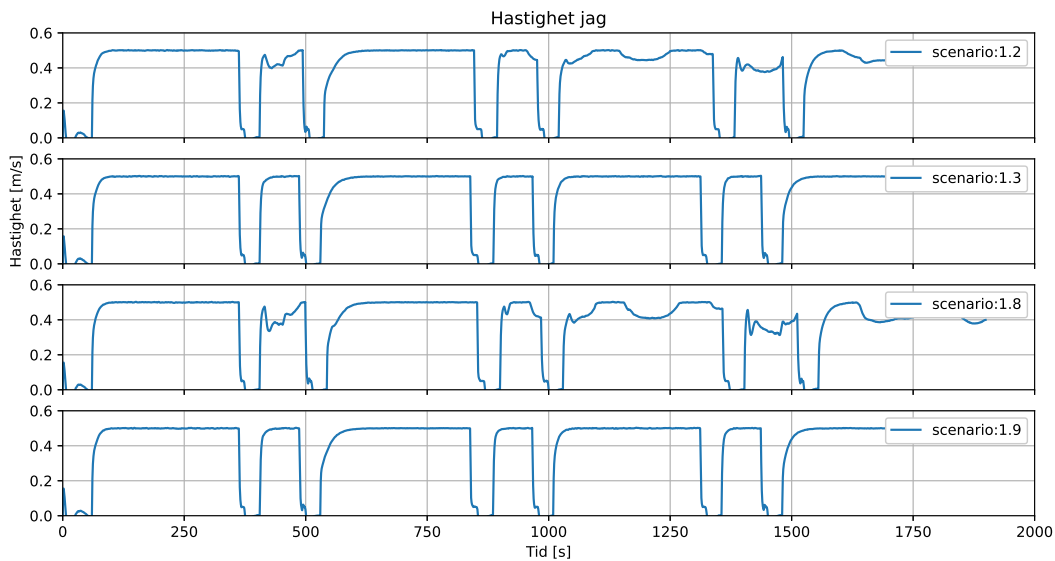
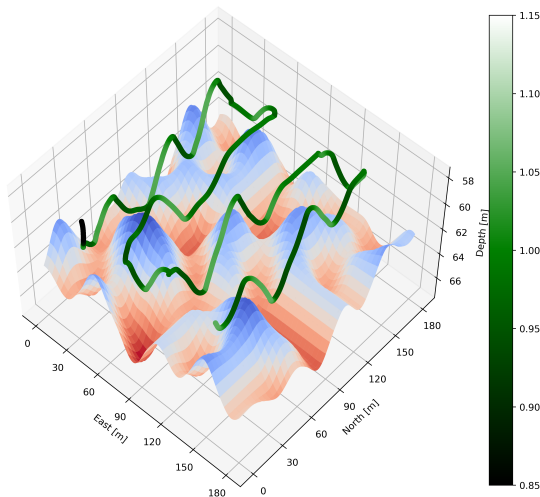


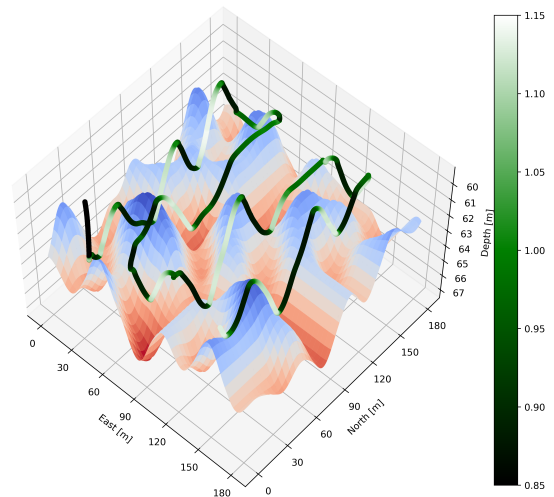
Figure 6.9: Hastighet i jag for utvalgte scenarier

6.2.2 Kartleggingsområde 2

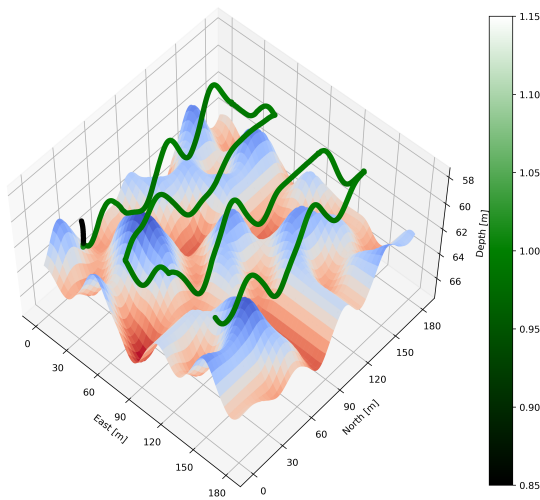
Simuleringen av kartlegging i mer varierende terreng, illustrert i Figur 6.10, viser mer tydelige forskjeller på betydningen av adaptjonsnivå og siktforhold. Under gode siktforhold blir kvaliteten på bildene gode med kun hastighetsreduksjon. Ved dårlige siktforhold blir handlingsrommet mindre, noe som påvirker kvaliteten betraktelig, siden mesteparten av kjøringen da gir bilder av lav kvalitet. Ved å observere Figur 6.10b er det tydelig at avstanden blir for liten når UUVen kjører oppover og for stor når den følger havbunnen nedover. Der terrenget er flatt øker bildekvaliteten betydelig, og det er kun i de områdene av den planlagte ruten at bildekvaliteten er tilfredstillende. Under gode siktforhold er toleransen i avvik høy nok til at videokvaliteten er på et tilfredstillende nivå. For simuleringene med adaptjonsnivå 3 er resultatet betydelig bedre, og til tross for det krevende terrenget blir kartleggingsoppdraget gjennomført på en tilfredstillende måte uavhengig av siktforhold ettersom UUVen holder den ønskede avstanden.



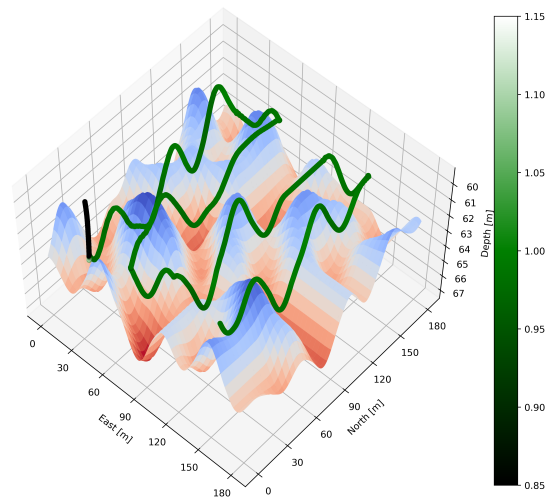
(a) Adapsjonsnivå 2, god sikt (scenario 2.2)



(b) Adapsjonsnivå 2, dårlig sikt (scenario 2.8)



(c) Adapsjonsnivå 3, god sikt (scenario 2.3)

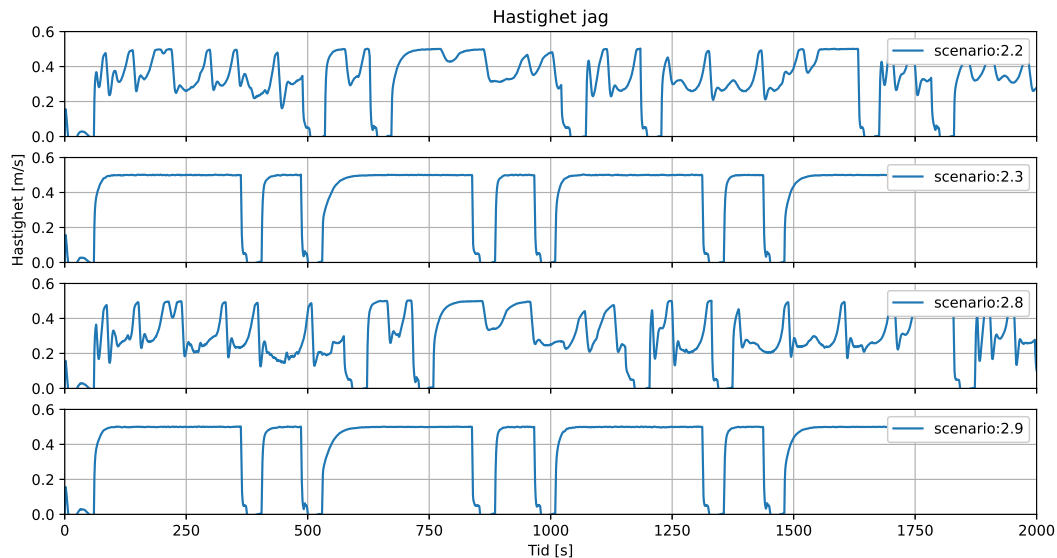


(d) Adapsjonsnivå 3, dårlig sikt (scenario 2.9)

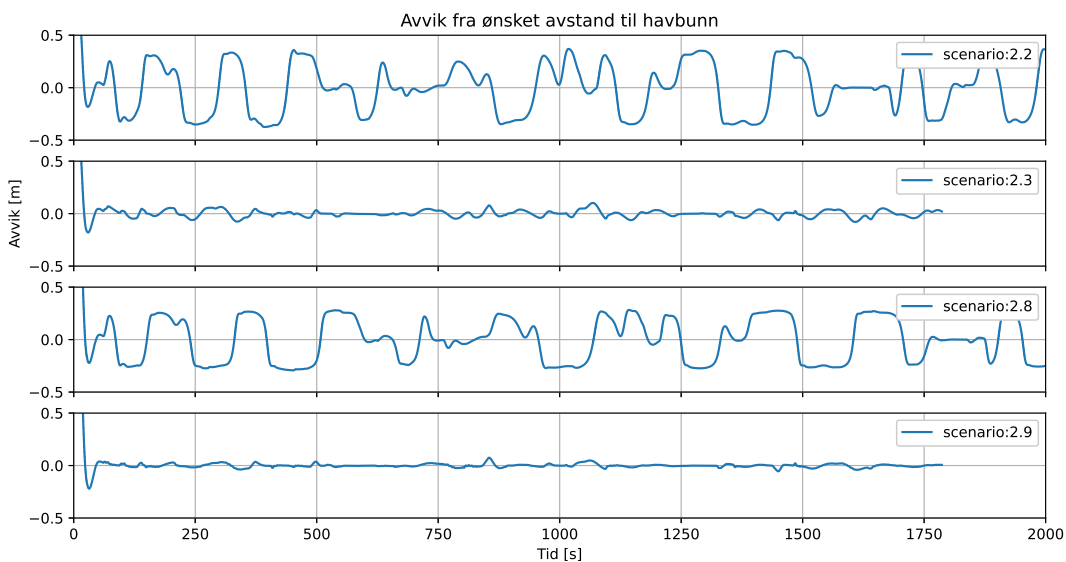
Figure 6.10: Den tredimensjonale representasjonen viser både havbunnen og UUVens bevegelser. Kvaliteten på bildet er indikert ved fargekoding, hvor en verdi på 1 representerer optimal bildekvalitet.

Ved å observere figur 6.11 er det tydelig at hastighetstilpasningen slår betydelig ut når terrenget blir krevende og det kun benyttes vertikal avstandsmåler. For adapsjonsnivå 3 holdes hastigheten på maksimalt ønsket nivå, som gjør at tidsbesparelsen kan bli signifikant for lengre kartleggingsoppdrag. Videre er det tydelig at hastighetsreduksjonen har begrenset effekt, ettersom reguleringsystemet alltid blir på etterskudd uten informasjon om topografien fremfor UUVen. For adapsjonsnivå 3 er det noe avvik i avstand når et destinasjonspunkt er nådd. Årsaken til dette er mest sannsynlig den brå endringen i hastighet i jag, som gjør det krevende å umiddelbart tilpasse den vertikale hastigheten. Avviket er likevel forholdsvis lavt, og systemet regulerer seg fort inn. Videre er det fremtidsrettet at det er noe forskjell i avviket når scenario 2.3 og 2.9 som begge er adapsjonsnivå 3 blir sammenlignet. Dette kommer av at den fremoverrettede avstandssensoren har samme vinkel for alle kjøringene, noe som har vist seg å ha en liten påvirkning for

den vertikale styringen.



(a)



(b)

Figure 6.11: a) Viser hastighet i jag, b) viser avvik fra ønsket avstand for utvalgte scenarier.

Tidsfordelingen av bildekvalitet er gitt av Figur 6.12. Resultatene tyder på at ved å kun anvende hastighetsreduksjon påvirkes bildekvaliteten i betydelig grad når siktforholdene er middels, og i noe grad under gode siktforhold. Når siktforholdene er dårlige har hastighetsreduksjonen derimot liten effekt. For adap-

sjonsnivå 3 er kvaliteten på videoen høy, uavhengig av siktforhold.

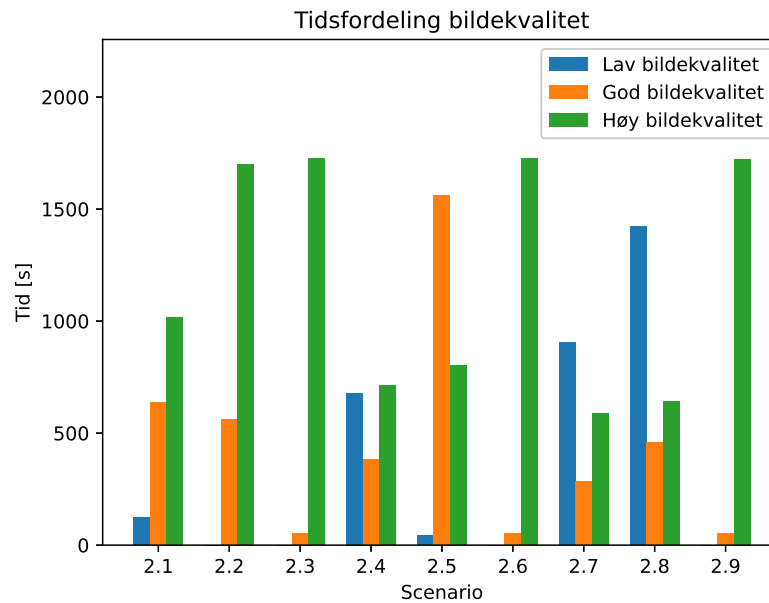
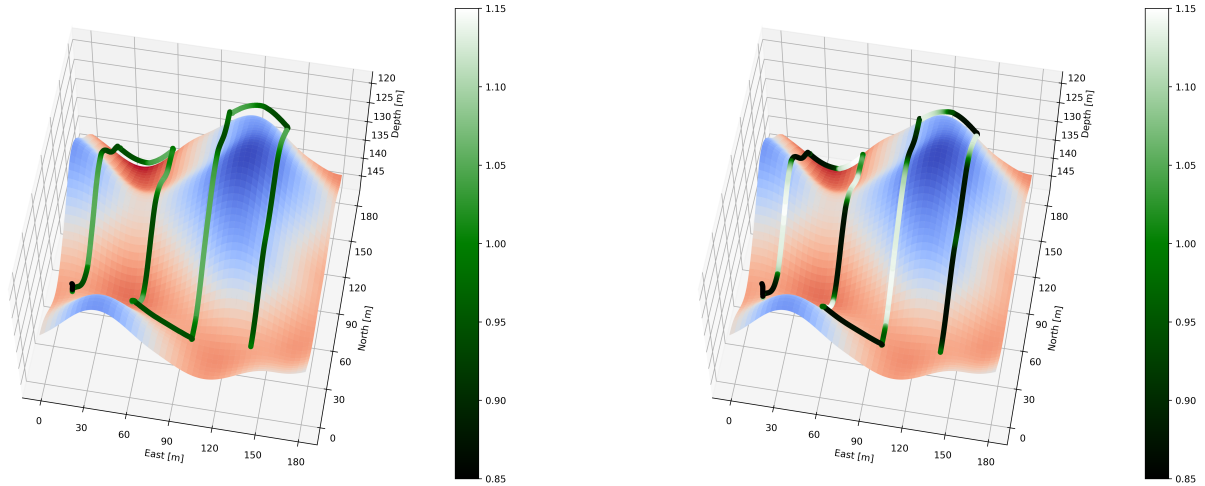


Figure 6.12: Stolpediagram som viser kvaliteten av videofilen relativ til tid.

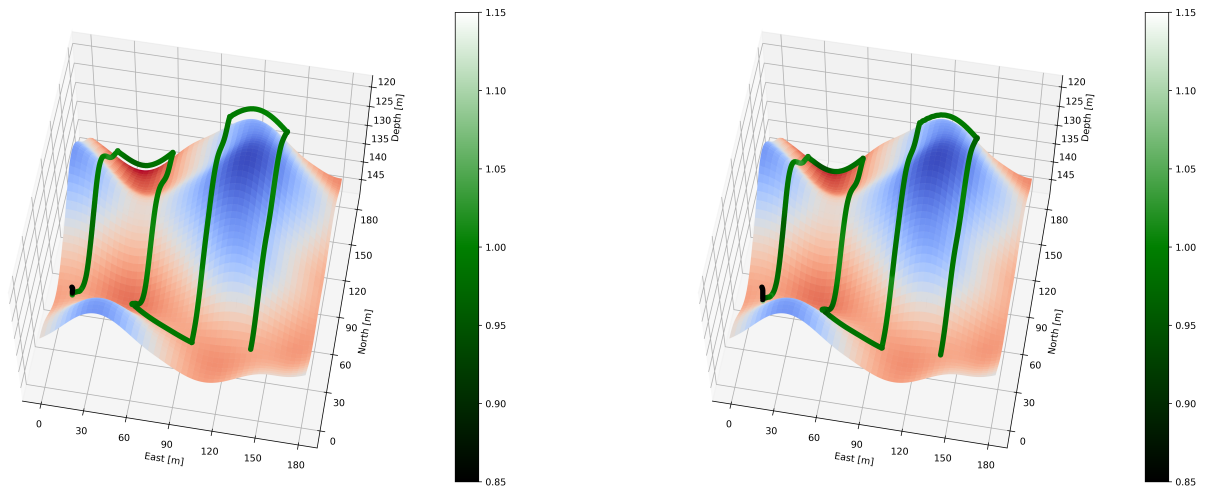
6.2.3 Kartleggingsområde 3

Ved det siste kartleggingsområdet er høydeforskjellen i terrenget vesentlig større. I figur 6.13 er det tydelig foroverkoblingen i avstandsreguleringen er nødvendig for å holde en jevn avstand og hvordan dette påvirker resultatet av datainnsamlingen. Ved dårlig sikt er mesteparten av videoopptaket av lav kvalitet når kun hastighetstilpasning benyttes. Ved god sikt er resultatet bedre, men store deler av undersøkelseslinjen er av for lav kvalitet. For adaptasjonsnivå 3 er resultatet også for dette kartleggingsområdet tilfredsstillende.



(a) Adapsjonsnivå 2, god sikt (scenario 3.2)

(b) Adapsjonsnivå 2, dårlig sikt (scenario 3.8)

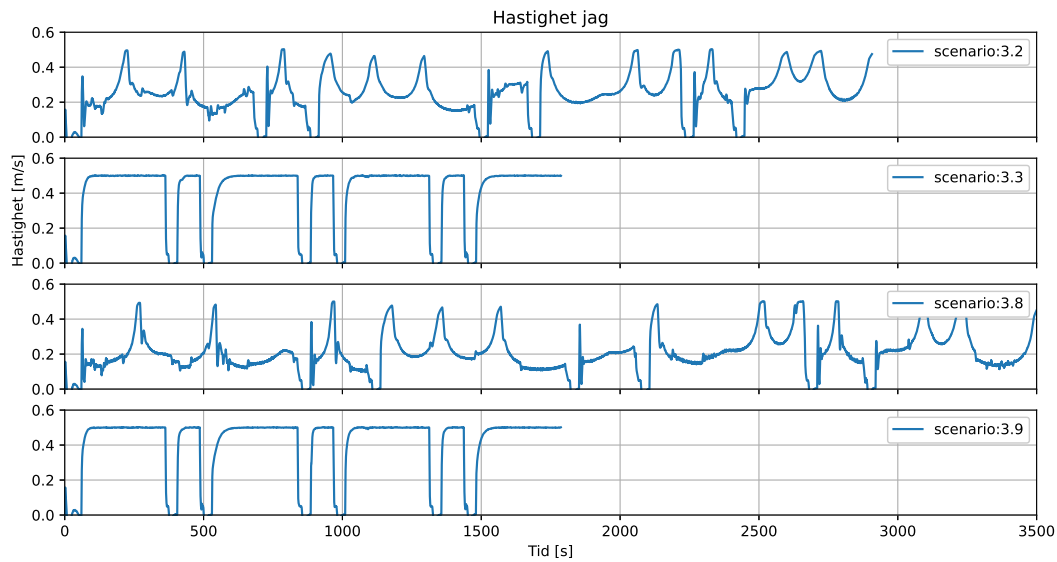


(c) Adapsjonsnivå 3, god sikt (scenario 3.3)

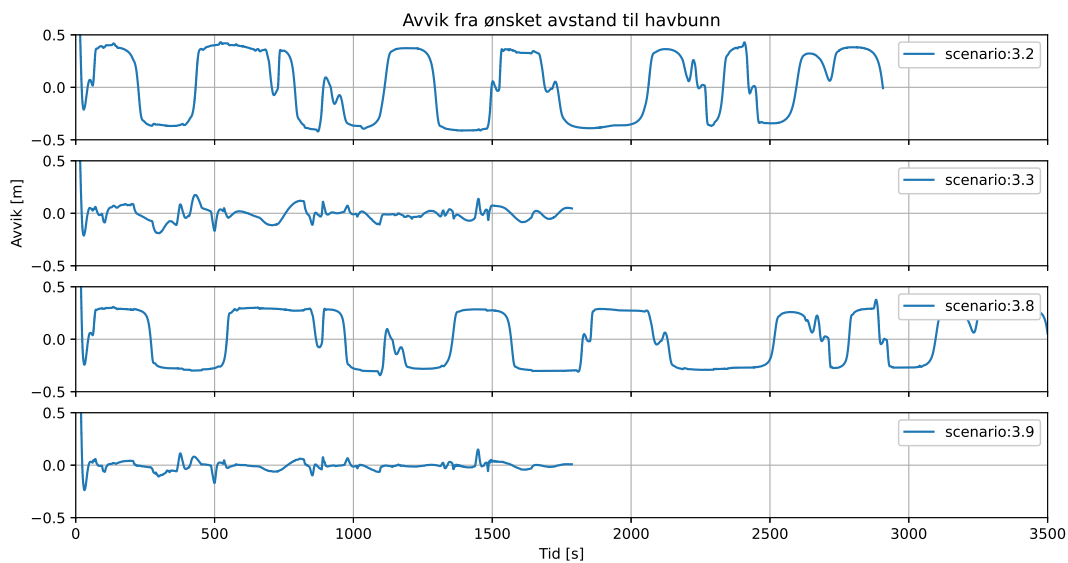
(d) Adapsjonsnivå 3, dårlig sikt (scenario 3.9)

Figure 6.13: Den tredimensjonale representasjonen viser både havbunnen og UUVens bevegelser. Kvaliteten på bildet er indikert ved fargekoding, hvor en verdi på 1 representerer optimal bildekvalitet.

Figur 6.14 viser at selv om hastigheten begrenses i høy grad for adapsjonsnivå 2, vil avviket fortsatt være betydelig. Selv under lengre stigninger blir ikke hastigheten redusert for adapsjonsnivå 3, da avviket fra ønsket avstand til havbunnen holdes lavt nok. Det som kommer frem av figuren er at avviket holdes noe lavere når siktforholdene er dårlige. Dette kommer av at akseptert avvik er 15% av den ønskede avstanden. Det kan derfor være nødvendig å ha en direktekobling mellom estimert bildekvalitet og hastighetsreduksjon i jag.



(a)



(b)

Figure 6.14: a) Viser hastighet i jag, b) viser avvik fra ønsket avstand for utvalgte scenarier.

Figur 6.15 viser en forskjell mellom adaptjonsnivå 1 og 2 ved god og middels siktforhold. Under dårlige siktforhold bruker adaptjonsnivå 2 betydelig mere tid uten at kvaliteten på kartleggingen blir vesentlig bedre sammenlignet med adaptjonsnivå 1.

Årsaken kommer godt frem av figur 6.16, hvor det viser seg at hastighetskontroll reduserer median og standardavviket. Videre er det tydelig ut fra figurene at siktforhold har mye å si for toleransen i avvik

relativt til bildekvalitet.

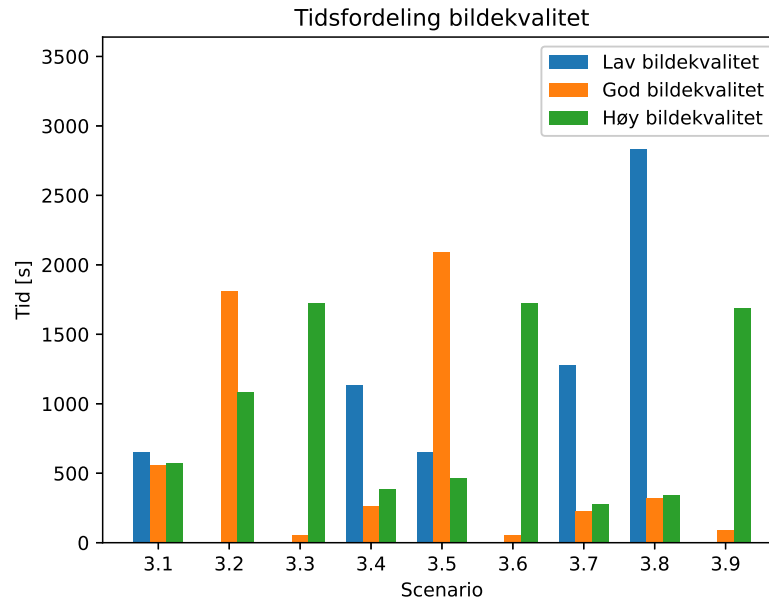


Figure 6.15: Stolpediagram som viser kvaliteten av videofilen relativ til tid.

Figur 6.16 gir en analyse av medianavvik og standardavvik for de forskjellige scenarioene, noe som bidrar til en bedre forståelse av effektene forskjellige adaptjonsnivåer har på UUVens kapasitet til å opprettholde optimal avstand. Det er observerbart at adaptjonsnivå 3 viser en betydelig bedre ytelse i forhold til de andre nivåene. Selv om implementeringen av hastighetsreduksjon har en positiv effekt og forbedrer UUVens evne til å følge ønsket avstand mer effektivt enn uten, er det en tydelig forskjell ved sammenligning med adaptjonsnivå 3. Dette viser betydningen av en adaptiv avstandstilpasning for bildekvaliteten.

Figur 6.16 presenterer sammenligninger av standardavvik og median avvik for alle scenariene for kartleggingsområde 3. Det er tydelig at en fremoverrettet avstandsmåler både minimerer avviket og reduserer variasjonen i avstand til havbunnen, noe som er spesielt relevant ettersom variasjon i avstand til havbunnen ofte er et problem ved manuell operasjon og kan ha betydning for etterfølgende analysearbeid.

Disse resultatene er konsistente over alle kjøring, noe som understreker effektiviteten av den fremoverrettede avstandsmåleren. Samtidig gir Figur 6.16 innsikt i hvordan forskjellige adaptjonsnivåer påvirker UUVens kapasitet til å opprettholde optimal avstand. Det er observerbart at adaptjonsnivå 3 viser en betydelig bedre ytelse i forhold til de andre nivåene. Selv om implementeringen av hastighetsreduksjon har en positiv effekt og forbedrer UUVens evne til å følge ønsket avstand mer effektivt enn uten, er det en tydelig forskjell ved sammenligning med adaptjonsnivå 3. Dette viser betydningen av en adaptiv avstandstilpasning for bildekvaliteten.

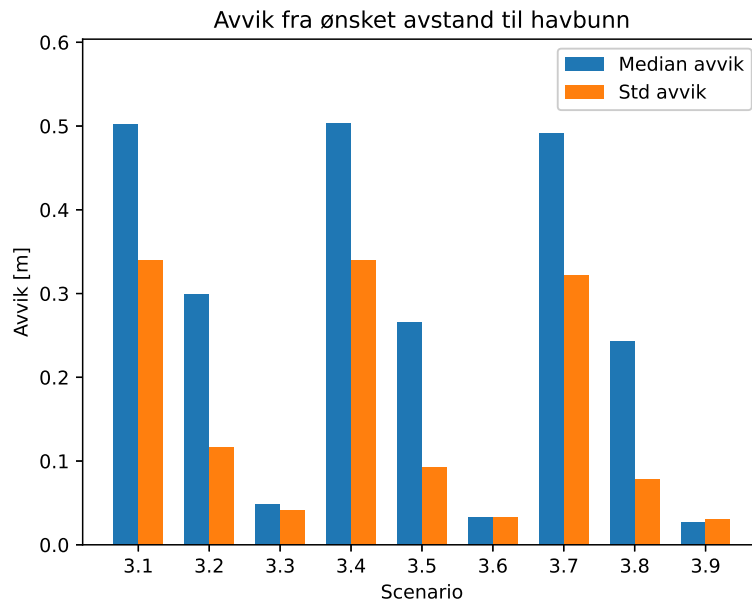


Figure 6.16: Stolpediagram som viser medianen og standardavviket mellom ønsket og faktisk avstand.

Figur 6.17 viser hvordan ulike siktforhold påvirker den estimerte bildekvaliteten. Selv om medianavviket og standardavviket er noe lavere for kartlegging under dårlige siktforhold, viser den nevnte figuren en betydelig forskjell i bildekvaliteten.

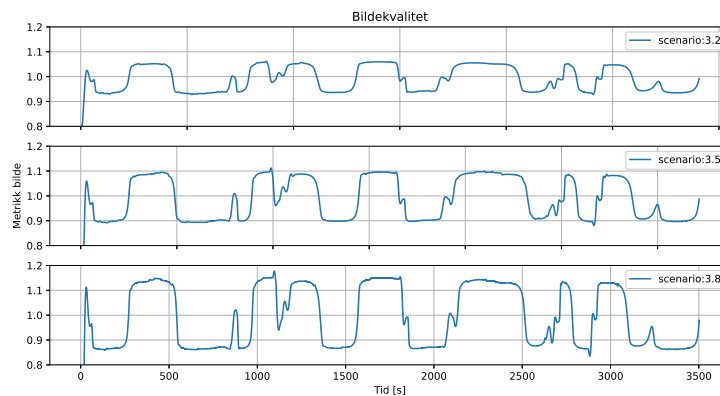


Figure 6.17: Linjediagram som viser den estimerte bildekvaliteten under ulike siktforhold for adaptjonsgrad 2

6.2.4 Adaptiv avstandstilpasning

Figur 6.18 viser resultatet av kartleggingsoppdraget med adaptiv avstandstilpasning i kartleggingsområde 1. Atenuasjonskonstanten β ble endret på bestemte tidspunkt, hvor verdiene på β [0.2,0.4,0.7,0.2] ble satt på tidspunktene [0,300,600,900,1200]s. Figuren viser tydelige endringer i bildekvalitet under endringene

av forhold.

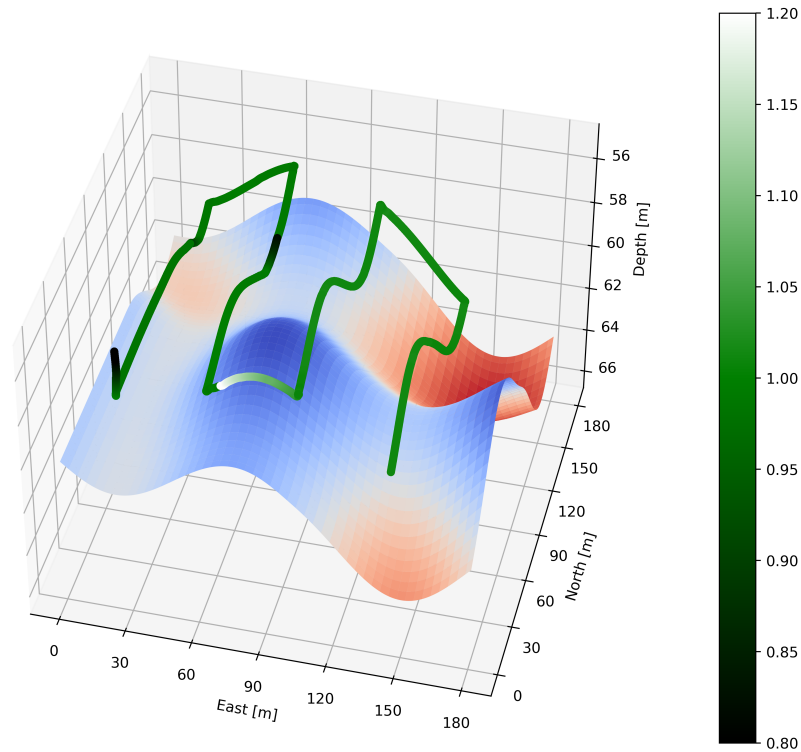


Figure 6.18

Endringene av setpunkt for ønsket avstand i henhold til målt bilde kvalitet kommer frem av figur 6.19. Når siktforholdene endrer seg får det et betydelig utslag på bildekvaliteten. Dette gir et utslag på den adaptive avstandstilpasningen som raskt endrer den ønskede avstanden. Det er verdt og merke seg at den ønskede avstanden avviker med 15 cm mellom de to periodene med $\beta = 0.2$. Årsaken til dette er at en justering kun blir gjort om den målte metrikken er større en den forhåndsbestemte toleransen.

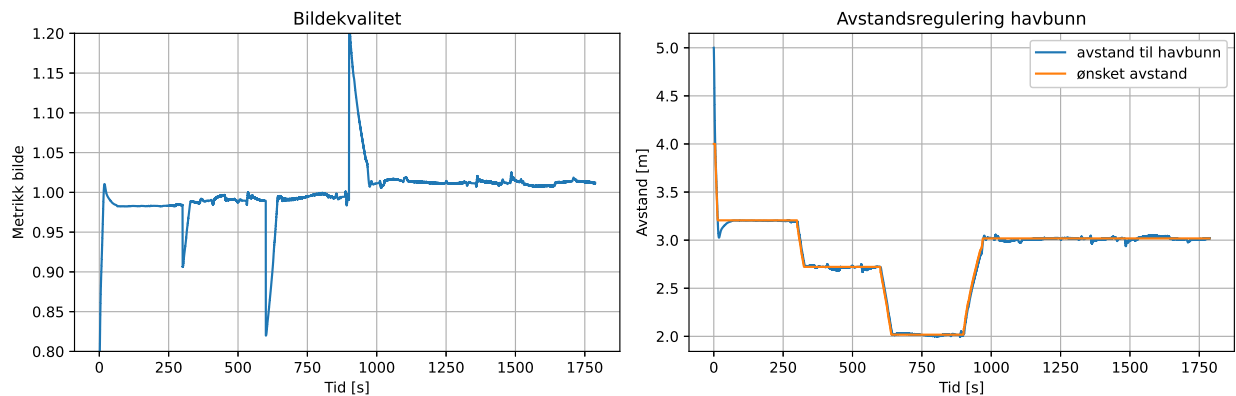


Figure 6.19: Endring av bildekvalitet og adaptiv avstandsregulering gitt endringer i siktforhold.

Chapter 7

Diskusjon

I denne studien har jeg analysert effekten som ulike siktforhold, adaptjonsnivå og topografien til havbunnen har på kvaliteten for detaljert kartleggingsarbeid. Det ble tydelig observert at videokvaliteten i stor grad avhenger av siktforholdene og adaptjonsnivået på UUVen, og da spesielt ved kartleggingsområder med betydelig variasjon i topografi.

En vesentlig observasjon i denne studien har vært å vurdere ytelsen til systemer med forskjellige adaptjonsnivåer, og hvordan disse håndterer variasjoner i terrenget. Det ble tydelig at systemet med adaptjonsnivå 1 hadde problemer med å takle større terrengvariasjoner, noe som fremhever viktigheten av adaptiv kontroll for effektiv undervannskartlegging, særlig under utfordrende siktforhold og variert topografi.

Med innføring av hastighetstilpasning på adaptjonsnivå 2 ble det observert en betydelig forbedring i ytelse, spesielt under gode siktforhold. Dette poengterer behovet for dynamisk tilpasning av UUVens hastighet, basert på siktforholdene og topografiens varians.

Adaptjonsnivå 3, som benyttet en fremoverrettet avstandsmåler og et feed forward-ledd i regulatoren, bidro til betydelig forbedring av kartleggingskvaliteten. Disse resultatene fremhever potensialet for videre forskning og utvikling av avanserte kontrollsystemer for å forbedre undervannskartlegging under ulike siktforhold og varierte topografier.

Erfaringer fra HI indikerer at det har vært utfordringer med analyse av videoopptak når UUVens avstand til havbunnen varierer for mye. Denne innsikten understreker betydningen av å opprettholde en jevn avstand for å sikre høy kvalitet på videomaterialet og effektivitet i den påfølgende analysen.

Resultatene fra navigasjon og kontroll under påvirkning av havstrøm viser at presisjonen i dynamisk posisjonering blir mer nøyaktig når estimeringen av havstrømmen er mer presis. Det er likevel tydelig at ved å anvende det valgte guidingsystemet, så vil kompensasjon med integraleffekt være effektivt etter som farkosten skal holde konstant girvinkel mellom destinasjonspunktene.

Det horisontale navigasjons- og kontrollsystemet gir muligheter for autonom eller delvis autonom ut-

føring av kartleggingsarbeidet. Ved å benytte dynamisk posisjonering for å kompensere for ukjente krefter i begynnelsen av hver undersøkelseslinje, viser resultatene at den planlagte kartleggingsruten blir fulgt med høy presisjon.

Selv om det er observert forbedringer i kartleggingskvalitet, er det viktig å bemerke at systemet som ble benyttet i denne studien har visse begrensninger. For eksempel tar det ikke høyde for rotasjoner, noe som kan påvirke ytelsen betydelig i en reell UUV-implementasjon. I tillegg tar ikke siktmodellen vår hensyn til endringer i kameraets fokus som følge av variabel avstand til havbunnen. Dette kan resultere i misvisende bildekvalitet i et reelt kartleggingsoppdrag. I tillegg vil de faktiske konstantene for attenuasjon og spredning være ukjente under en reell kartlegging. Dette fremhever behovet for å utvikle en robust metode for estimering av bildekvalitet hvis dette arbeidet skal videreføres. Det er tenkelig at maskinlæring, anvendt på et stort sett med klassifiserte bilder, kan være et effektivt verktøy i utviklingen av en slik estimeringsmetode

Til sammen gir dette studiet viktig innsikt i hvordan ulike faktorer kan påvirke effektiviteten og kvaliteten på undervannskartlegging, som kan benyttes i utvikling av UUV -systemer designet for detaljert kartlegging av havbunnen. Vi har vist at dynamisk tilpasning og avanserte kontrollsystemer er avgjørende for å oppnå høy kvalitet på kartlegging under ulike siktforhold og topografier. Dette bidrar til å forme fremtidig forskning og utvikling av UUV-systemer, med mål om å forbedre robusthet og effektivitet i varierte havbunnsforhold.

Chapter 8

Konklusjon og forslag til videre arbeid

Dette arbeidet har bidratt til utviklingen av et detaljert kartleggings- og overvåkingssystem for havbunnen ved bruk av undervannsfartøy (UUV). Utgangspunktet har vært krav fra myndighetene og bruksområder. Basert på dette har det blitt utarbeidet spesifikasjonskrav som har dannet grunnlaget for design og valg av metoder. Gjennom simuleringsstudiet har vi observert at innføringen av en høy adaptivetsgrad er avgjørende for å oppnå kvalitetskartlegging uavhengig av topografi og siktforhold. Implementering av avansert dybdekontroll og muligheten til å estimere bilde kvalitet under kjøring fremhever seg som viktige bidrag.

Selv om disse funnene er oppmuntrende, gjenstår det betydelig arbeid i videre utvikling av et slikt system. Flere forenklinger har blitt gjort, og disse må adresseres i fremtidig forskning og implementering.

Samlet sett indikerer funnene i denne avhandlingen på at videre utvikling av et UUV-system som effektivt håndterer kartleggingsoppdrag av havbunnen, vil være nødvendig for å tilfredsstille kravene fra myndigheter og brukere på en god måte. Videre vil utvikling av et autonomt system bidra til en mer kostnadseffektiv løsning, noe som kan føre til økt kunnskap om livet på havbunnen og påvirkningen menneskelig aktivitet har på dette økosystemet.

8.1 Forslag til videre arbeid

Utviklingen av et UUV for detaljert kartlegging av havbunnen vil kreve ytterligere arbeid, en liste med de viktigste punktene er som følger:

- Implementering av navigasjons-, kontroll- og guidingsystemene på en komplett UUV-modell. Dette bør gjøres før de foreslåtte metodene implementeres på et fysisk system for å sikre funksjonalitet og sikkerhet.
- Videreutvikling av modellen for estimering av bildekvalitet. En tilnærming kan være å samle et stort antall bilder under forskjellige forhold, for deretter å benytte maskinlæringsmodeller for å klassifisere kvaliteten. Dette ville tillate mer nøyaktige og automatiserte vurderinger.
- Integrering av et kamera i navigasjons- og guidingsystemene. Dette er nødvendig for pålitelig autonom situasjonsforståelse og beslutningstaking.
- Implementering av autonom klassifisering og deteksjon av objekter for mer effektivt analysearbeid. Dette vil i stor grad forbedre systemets evne til artsidentifisering.
- Videre utvikling av hastighetstilpasning, hvor målt bildekvalitet kan inkluderes for en mer optimal tilpasning av hastigheten i jag.

Chapter 9

Bibliography

- Abduraxman, B. (2018). State Relativity and Speed-Allocated Line-Of-Sight Course Control for Path-Following of Underwater Vehicles. PhD thesis.
- Akkaynak, D. and Treibitz, T. (2018). A revised underwater image formation model. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).
- Akkaynak, D. and Treibitz, T. (2019). Sea-thru: A method for removing water from underwater images. Proceedings / CVPR, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
- Akkaynak, D., Treibitz, T., Shlesinger, T., Loya, Y., Tamir, R., and Iluz, D. (2017a). What is the space of attenuation coefficients in underwater computer vision? In 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pages 568–577.
- Akkaynak, D., Treibitz, T., Shlesinger, T., Loya, Y., Tamir, R., and Iluz, D. (2017b). What is the space of attenuation coefficients in underwater computer vision? In 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pages 568–577.
- Bao, J., Li, D., Qiao, X., and Rauschenbach, T. (2020). Integrated navigation for autonomous underwater vehicles in aquaculture: A review. Information Processing in Agriculture, 7(1):139–151.
- Bioucas-Dias, J. M., Plaza, A., Camps-Valls, G., Scheunders, P., Nasrabadi, N., and Chanussot, J. (2013). Hyperspectral remote sensing data analysis and future challenges. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 1(2):6–36.
- Caccia, M., Bono, R., Bruzzone, G., and Veruggio, G. (2003). Bottom-following for remotely operated vehicles. Control Engineering Practice, 11(4):461–470. MCMC00.
- Dukan, F. and Sørensen, A. J. (2014). Sea floor geometry approximation and altitude control of rovs. Control Engineering Practice, 29:135–146.

- Dumke I, Purser A., M. Y. (2018). Underwater hyperspectral imaging as an in situ taxonomic tool for deep-sea megafauna. Scientific Reports, 8.
- Fiskeridirektoratet (2022). Havbruk til havs.
- FN (2023). Fns bærekraftsmål.
- Fossen, T. I. (2021a). Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, pages 443–480. John Wiley & Sons, 2 edition.
- Fossen, T. I. (2021b). Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, pages 195–208. John Wiley & Sons, 2 edition.
- Fossum, T. O. (2021). Optisk kartlegging av store lungegÅrdsvann.
- Gomes, R., Martins, A., Sousa, A., Sousa, J., Fraga, S., and Pereira, F. (2005). A new rov design: issues on low drag and mechanical symmetry. pages 957 – 962 Vol. 2.
- Hegrenæs, Ø. and Hallingstad, O. (2011). Model-aided ins with sea current estimation for robust underwater navigation. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 36(2):316–337.
- Husa, V. and Kutti, T. (2022). Forslag til metode for kartlegging av sårbare arter og naturtyper på grunt vann (0-50 meters dyp) til søknader om akvakultur i sjø.
- Kebkal, K. and Mashoshin, A. (2017). Auv acoustic positioning methods. Gyroscopy Navig. 8, pages 80–89.
- Kinsey, J., Eustice, R., and Whitcomb, L. (2006). A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges.
- Kutti, T. and Husa, V. (2021). Forslag til metode for kartlegging av sårbare arter og naturtyper på dypt vann til søknader om akvakultur i sjø.
- Mobley, C. (1994). Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters.
- NS 9410:2016 (2016). Miljøovervåking av bunnpåvirkning fra marine akvakulturanlegg. Standard, Standard Norge.
- Regjeringen (2022). Storstilt satsing på havvind. <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/storstilt-satsing-pa-havvind/id2900436/> besøkt: 2023-05-27.
- Song, Y. and Arshad, M. (2015). Passive hydrostatic stability design of a box-shaped autonomous underwater vehicle. Procedia Computer Science, 76:180–185. 2015 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IEEE IRIS2015).

