

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

SCUOLA DI SCIENZE  
Corso di Laurea in Informatica per il Management

# Analisi di simulatori per Unmanned Underwater Vehicles

Relatore:  
Chiar.mo Prof.  
ANDREA MELIS

Presentata da:  
MARCO MORELLI

Sessione III  
Anno Accademico 2022/2023

*“Il problema non è la tecnologia, ma l’uso che se ne fa. Ogni cosa comporta dei rischi, l’importante è esserne consapevoli e valutare se il prezzo che paghiamo (meno privacy) è adeguato a quanto riceviamo in cambio”*

*Stefano Nasetti*



Negli ultimi decenni, gli Unmanned Underwater Vehicles (UUV), anche detti veicoli sommergibili senza equipaggio, hanno rivoluzionato il monitoraggio dell'ambiente marino. Grazie ai progressi della robotica, dell'elettronica e della tecnologia dei sensori, gli UUV si stanno dimostrando sempre più versatili in diverse applicazioni, ad esempio per l'esplorazione oceanica, la ricerca scientifica, il monitoraggio ambientale, la sorveglianza militare e il supporto all'industria offshore. A differenza dei veicoli abitati o delle sonde fisse, gli UUV operano autonomamente per lunghi periodi di tempo. Sono in grado di raggiungere profondità estreme e navigare in ambienti difficili, consentendo l'acquisizione di dati dettagliati e l'esecuzione di compiti complessi senza richiedere un intervento umano diretto. Nonostante i progressi raggiunti finora, restano ancora sfide significative da affrontare nel campo degli UUV. Queste sfide spaziano sia dal punto di vista tecnologico che operativo. Tra i principali obiettivi tecnologici da perseguire vi è la progettazione di sistemi d'alimentazione efficienti e affidabili, in grado di supportare le lunghe missioni subacquee. Inoltre, si pongono come priorità la gestione in tempo reale dei dati raccolti durante le operazioni subacquee e lo sviluppo di algoritmi avanzati per la pianificazione intelligente delle missioni. Queste, sono solo alcune delle aree di ricerca attive che potrebbero portare a ulteriori miglioramenti delle prestazioni degli UUV. Questa tesi ha l'obiettivo di illustrare cosa siano gli UUV; in che contesti possano essere utilizzati e come essi siano strutturati internamente. Nella tesi verrà introdotto un ambiente di simulazione per replicare le funzionalità e le dinamiche dei veicoli subacquei, esaminando come il sistema traduce i segnali provenienti da un controller e come questi attivino gli attuatori per il movimento del veicolo.



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>i</b>
<b>1 Unmanned underwater vehicles</b>	<b>1</b>
1.1 ROUVs . . . . .	3
1.2 AUVs . . . . .	6
<b>2 Applicazioni dei UUV</b>	<b>9</b>
2.1 Intelligenza, Sorveglianza e Ricognizione (ISR) . . . . .	9
2.2 Contromisure contro le mine (MCM) . . . . .	10
2.3 Anti-sommergibili da guerra (ASW) . . . . .	10
2.4 Oceanografia e idrografia . . . . .	11
<b>3 Design e Tecnologie degli AUV</b>	<b>15</b>
3.1 Architettura di sistema . . . . .	15
3.1.1 Hardware . . . . .	15
3.1.2 Software . . . . .	18
3.2 Navigazione e Localizzazione . . . . .	20
3.2.1 Navigazione stimata/inerziale . . . . .	22
3.2.2 Transponder e modem acustici . . . . .	22
3.2.3 Geofisica . . . . .	24
3.3 Comunicazione . . . . .	25
3.4 Potenza . . . . .	25
3.5 Sensori . . . . .	26

---

<b>4</b>	<b>DAVE</b>	<b>29</b>
4.1	Simulazione . . . . .	29
4.2	Ambiente e strumenti . . . . .	31
4.2.1	Batimetrie dinamiche . . . . .	31
4.2.2	Correnti oceaniche . . . . .	32
4.2.3	Modelli . . . . .	32
4.2.4	Distorsione degli oggetti . . . . .	34
4.3	Sensori di DAVE . . . . .	36
4.3.1	Doppler velocity logger (DVL) . . . . .	36
4.3.2	Lidar subacquei . . . . .	37
4.3.3	Sonar lungimirante multi-raggio . . . . .	38
4.4	Scenari . . . . .	38
4.4.1	Collegamento cavi elettrici . . . . .	39
4.4.2	Manipolazione bi-manuale . . . . .	39
4.4.3	Navigazione assistita del terreno . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Applicazione di DAVE</b>	<b>43</b>
5.1	RexROV movimento . . . . .	44
5.1.1	Movimento tramite uso di Joystick . . . . .	46
5.1.2	Movimento automatico . . . . .	49
5.2	AUV e Cybersecurity . . . . .	53
5.2.1	Attacchi hacker su un AUV . . . . .	53
5.2.2	Tecniche difensive ed azioni di mitigazione . . . . .	54
	<b>Conclusioni</b>	<b>57</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>59</b>

# Elenco delle figure

1.1	UUV al lavoro . . . . .	2
1.2	Remote Operate Underwater Vehicle . . . . .	5
1.3	Autonomus Underwater Vehicle . . . . .	7
2.1	Oceanografia . . . . .	13
3.1	Architettura Hardware . . . . .	16
3.2	DsPIC . . . . .	17
3.3	PC-103 . . . . .	18
3.4	Architettura Software . . . . .	19
3.5	Tecniche di navigazione . . . . .	21
3.6	SBL, USBL, LBL . . . . .	23
3.7	Struttura sensore . . . . .	27
4.1	Batimetria . . . . .	32
4.2	Veicoli di DAVE . . . . .	33
4.3	Aliante ibrido . . . . .	33
4.4	Modello oggetti . . . . .	34
4.5	Distorsione geometrica 1 . . . . .	35
4.6	Distorsione geometrica 2 . . . . .	35
4.7	Distorsione geometrica 3 . . . . .	35
4.8	Distorsione geometrica 4 . . . . .	36
4.9	Doppler velocity logger . . . . .	37
4.10	Lidar subacqueo . . . . .	38



4.11 Esempio collegamento cavi elettrici . . . . .	39
4.12 Esempio Manipolazione bi-manuale . . . . .	40
5.1 RexROV . . . . .	46

# Capitolo 1

## Unmanned underwater vehicles

Gli oceani ricoprono il 71% della superficie terrestre e influenzano le condizioni meteorologiche, le variazioni di temperatura e l'umidità. Essi forniscono un habitat per molte specie e rappresentano una fonte di energia utilizzabile dall'uomo. Tuttavia, solamente l'8% degli oceani della Terra è stato esplorato, principalmente a causa della mancanza di tecnologie adatte all'esplorazione. I veicoli subacquei senza equipaggio [1] (UUV) sono dispositivi il cui funzionamento è completamente autonomo (controllo missione pre-programmato o adattivo in tempo reale) o sotto una supervisione minima. Essi operano sott'acqua senza la presenza di personale a bordo, trovando impiego nella ricerca militare, nel settore del petrolio e del gas e in altri settori. L'esplorazione dell'oceano ha avuto inizio negli anni '60 quando la Marina Americana sviluppò i primi UUV, come il SPURV (Special Purpose Underwater Research Vehicle) e il SPURV II per il salvataggio e il recupero di ordigni militari. Dagli anni '80 l'industria del petrolio e del gas ha investito nella ricerca e nello sviluppo di questa tecnologia. Verso la fine degli anni '80 gli UUV sono stati utilizzati per localizzare numerosi relitti storici naufragati, come il Titanic e la SS Central America. Recentemente le società commerciali hanno iniziato a sviluppare UUV a prezzi accessibili, riducendo così i costi tecnologici. Oggi questi veicoli trovano impiego principalmente nelle piattaforme offshore (per lavori di manutenzione di infrastrutture sommer-

se), nel campo militare (per la detonazione di mine) e nel settore scientifico (per l'esplorazione e la mappatura dei fondali oceanici)[2].

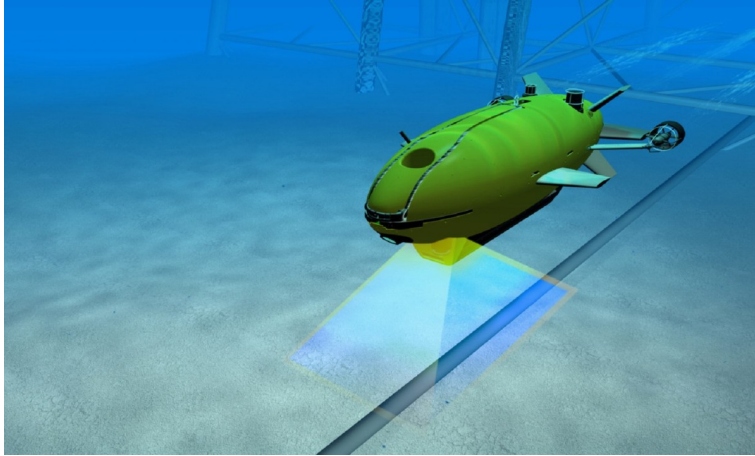


Figura 1.1: UUV al lavoro

La Marina degli Stati Uniti, nel contesto marittimo, identifica cinque principali vantaggi sull'utilizzo di veicoli senza pilota [5]:

1. UUV sono economicamente più sostenibili rispetto ai veicoli con equipaggio, sia dal punto di vista del utilizzo che del mantenimento.
2. I sensori automatizzati permettono un'alta copertura e consapevolezza dell'ambiente.
3. Una raccolta dati continua, garantisce una sorveglianza dell'ambiente, consentendo di migliorare la comprensione dei modelli e delle loro tendenze comportamentali a lungo termine.
4. Grazie alla presenza congiunta degli UUV, i veicoli equipaggiati possono essere impiegati in compiti dove è necessaria la presenza di personale con minori rischi per l'incolumità del personale di bordo.
5. UUV svolge mansioni che potrebbero essere pericolose per l'equipaggio.

UUV sono divisi in due classi principali: ROVs e AUVs; la differenza principale tra i due è che AUV opera in modo indipendente, mentre ROUV è un veicolo gestito da un operatore.

## 1.1 ROUVs

Il ROUV [3] (remotely operated underwater vehicle) o ROV (remotely operated vehicle) è un veicolo sottomarino pilotato da una postazione remota. Di solito ad un ROV viene associato un sistema di lancio e di recupero chiamato LARS (Launch And Recovery System) e un TMS (Tether Management System) che serve a gestire il tether (ossia l'ombelicale del ROV) in profondità. I ROV sono solitamente usati in pozzi petroliferi e acque molto profonde, dove un veicolo pilotato non potrebbe arrivare a causa dell'elevata pressione, insostenibile per la vita. Le principali caratteristiche di questi veicoli includono il mantenimento del contatto con la stazione per la ricezione del segnale e la stabilità della posizione, entrambi essenziali per il corretto funzionamento. La pressione crescente, con l'aumentare della profondità dell'acqua, può influire negativamente sulla stabilità del veicolo; il sistema di controllo deve essere in grado di gestire tali tipi di disturbi, oltre ad altri effetti come il trascinarsi delle correnti oceaniche e la presenza di ostacoli lungo il percorso. L'allocazione precisa degli attuatori sul veicolo è essenziale per consentire movimenti precisi, permettendo un efficiente utilizzo delle risorse energetiche e contribuendo all'alta autonomia dei sistemi di controllo che operano con questi vincoli. I ROV sono manovrati in superficie terrestre, generalmente attraverso una connessione cablata, tuttavia questa limita la manovrabilità e l'accessibilità ai luoghi remoti. Alcuni veicoli richiedono precisione nella posizione e capacità di navigazione che ottengono tramite giroscopi a fibra ottica basati su sistemi di navigazione inerziale (INS). L'International Marine Contractors Association (IMCA) riconosce cinque classi ROV:

1. Classe I: ROV da ispezione chiamati anche EYEBALL. Sono ROV di

piccole dimensioni completamente elettrici, spesso equipaggiati con una telecamera, un piccolo manipolatore elettrico e una sonda per rilevare la protezione catodica nelle strutture delle piattaforme. Come già detto, l'uso a cui viene spesso destinata questa classe ROV è l'ispezione visiva delle piattaforme grazie alle sue dimensioni ridotte e la semplicità di pilotaggio all'interno delle strutture. Negli ultimi anni sono stati anche adoperati per l'ispezione di condutture, tubazioni e anche nelle fish farm. Questi ROV possono arrivare ad una profondità massima di 300 m e hanno un potenziale di sollevamento che può arrivare a 10 kg.

2. Classe II: ROV da ispezione e da lavori leggeri. Sono ROV di medie dimensioni che possono arrivare a pesare anche 500kg. Possono essere equipaggiati con vari generi di sensori tra cui una o più telecamere, sensori di navigazione per il rilevamento e la scansione del fondale marino, manipolatori idraulici usati per lavori semplici. Per il suo modesto peso questa classe ROV viene spesso associata ad un sistema di lancio (LARS) che serve per mettere in acqua il ROV e recuperarlo quando termina il lavoro. L'uso a cui viene destinato questa classe ROV è l'ispezione di piattaforme petrolifere, assistenza ai sommozzatori, scansione del fondale marino e piccoli lavori di costruzione, come ad esempio l'apertura o chiusura di valvole marine. La profondità massima a cui possono arrivare questi veicoli è di 3.000 m.
3. Classe III: ROV da lavoro o Work Class. Sono ROV di notevoli dimensioni e il più delle volte sono completamente idraulici; la parte elettronica, invece, è chiusa in pod (recipienti) riempiti di olio per compensare la pressione esterna della profondità marina. Questi ROV possono arrivare fino a 10.000 m di profondità. Le compagnie petrolifere sfruttano la loro potenza idraulica per la costruzione o il mantenimento di campi petroliferi ad elevate profondità. Un layout standard di un Work Class è composto da tre o quattro telecamere (spesso camere HD), un motore da 3 KW di potenza, una pompa idraulica da 200 Hp che alimenta i

propulsori di direzione (motori con eliche) e manipolatori. Per il loro elevato payload vengono spesso equipaggiati con molteplici sensori per la scansione del fondale marino.

4. Classe IV: I trencher sono una classe di ROV scavatori. Sono mezzi molto voluminosi, equipaggiati spesso con cingoli, sistemi sonar e telecamere. Questi ROV hanno un ombelicale molto rigido, ed è per questo che solitamente si poggia sul fondale marino e poi viene trainato dalla nave. Il principale uso a cui è destinato questo ROV è l'interramento di tubazioni marine.
5. Classe V: La classe V è destinata ai ROV che sono in via di sviluppo e agli AUV, acronimo di Autonomous Underwater Vehicle; sono veicoli senza ombelicale che non vengono pilotati da un uomo ma vengono programmati e poi messi in acqua; una volta in azione questi veicoli seguono delle rotte programmate. Il loro utilizzo principale è la scansione del fondale marino.

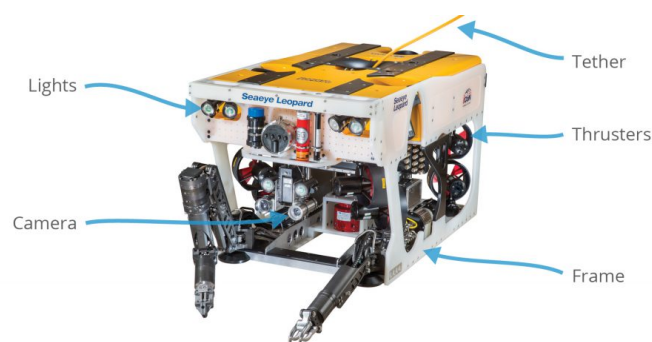


Figura 1.2: Remote Operate Underwater Vehicle

## 1.2 AUVs

Come suggerisce il loro nome (autonomo), gli AUV [4] (Veicoli Subacquei Autonomi) operano in maniera indipendente dagli esseri umani; sono veicoli che navigano autonomamente tramite algoritmi di navigazione che elaborano le informazioni ambientali circostanti. A differenza dei veicoli telecomandati (ROV), gli AUV non hanno alcun collegamento fisico con il proprio operatore. Gli AUV sono programmati o controllati da operatori che possono trovarsi su una nave o anche a terra, i quali dicono all'AUV dove, quando e cosa deve essere campionato. Gli AUV trasportano una varietà di apparecchiature per il campionamento e il rilevamento come fotocamere, sonar e sensori di profondità. A differenza dei ROV, che trasmettono video tramite i loro cavi ad una sala di controllo su una nave, l' AUV memorizza tutti i dati, tra cui immagini e altri dati dei sensori, sui computer di bordo fino a quando il veicolo non viene recuperato. L'attuale generazione di AUV varia in lunghezza da 1,5 a 5,5 metri e pesa da 20 ad oltre 1.400 chilogrammi; la maggior parte sono a forma di siluro per ridurre la resistenza dell'acqua. Gli AUV sono alimentati a batteria, i più piccoli hanno un'autonomia di diverse ore, mentre i veicoli di grandi dimensioni possono navigare per diversi giorni. Molti veicoli sono in grado di effettuare rilevamenti fino alle profondità della piattaforma continentale, mentre alcuni sono in grado di raggiungere l'intera profondità oceanica. Gli AUV sono anche scalabili o modulari, il che significa che gli scienziati possono scegliere quali sensori collegarvi a seconda dei loro obiettivi di ricerca. Essi sono meno costosi delle navi da ricerca ma riescono a completare gli stessi compiti. I sottomarini autonomi sono in grado di far risparmiare sul costo totale di una missione non avendo bisogno di una nave attrezzata e di personale qualificato per la guida a distanza del robot. Gli AUV trasportano, oltre ai sensori precedentemente elencati, anche fluorimetri, sensori di torbidità e turbolenza, magnetometri e sensori di qualità dell'acqua. La posizione subacquea di un AUV può essere determinata nei seguenti modi: utilizzando il posizionamento acustico rispetto a una nave di superficie, attraverso transponder sottomarini oppure mediante navigazione

inerziale. Gli scienziati utilizzano questi veicoli per creare mappe del fondale oceanico, registrare informazioni ambientali, rilevare ciò che gli esseri umani hanno lasciato dietro di sé, identificare i pericoli per la navigazione, esplorare formazioni geologiche, documentare i naufragi.

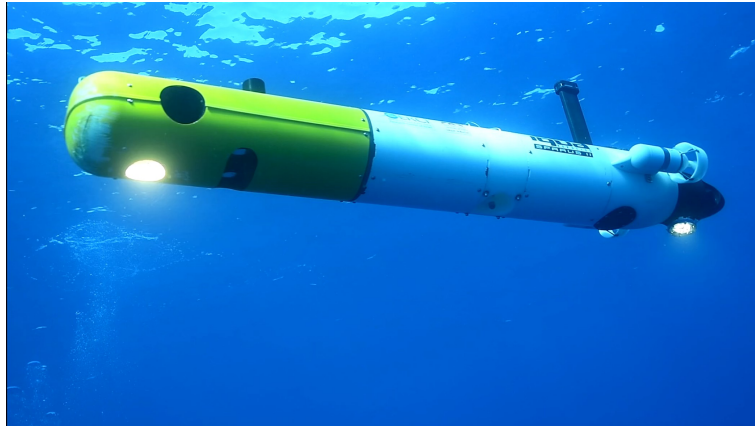


Figura 1.3: Autonomus Underwater Vehicle





# Capitolo 2

## Applicazioni dei UUV

Gli UUV possono svolgere diversi tipi di missioni, tra le più importanti possiamo trovare le seguenti[6]:

1. Intelligenza, Sorveglianza e Ricognizione (ISR)
2. Contromisure Contro le Mine (MCM)
3. Anti-Sommergibili da Guerra (ASW)
4. Oceanografia/Idrografia

### 2.1 Intelligenza, Sorveglianza e Ricognizione (ISR)

ISR ha lo scopo di raccogliere dati di intelligence sopra e sotto la superficie dell'oceano, inclusi i campionamenti elettromagnetici, ottici, atmosferici, segnali acustici, campionamento dell'acqua, monitoraggio delle attrezzature del fondale oceanico e localizzazione degli oggetti. Il sistema non deve essere rilevato dal nemico. L'ISR sugli UUV ha capacità specifiche: l'ISR litorale persistente, il monitoraggio dei porti, il rilevamento chimico, biologico, nucleare, radiologico ed esplosivo (CBRNE), la localizzazione, il posizionamento dei sensori di sorveglianza, la valutazione dei danni in battaglia, la

designazione del bersaglio attivo; sono in grado di operare a lunghe distanze anche in acque poco profonde, in modo autonomo.

In un contesto operativo, un UUV viene lanciato da una piattaforma che può essere un sottomarino, una nave o talvolta un aereo, dopo aver terminato la sua missione si riposiziona in modo autonomo alla base. Le informazioni raccolte vengono trasmesse a una stazione su richiesta, ma se il veicolo registra delle minacce intorno a se invia direttamente le informazioni alla stazione base.

## 2.2 Contromisure contro le mine (MCM)

La missione MCM (Mine Countermeasures) necessita di stabilire rapidamente aree operative ampie e sicure, nonché vie e corsi di transito, creando aree operative libere da mine senza impiegare piattaforme con equipaggio.

Il modo di operare può essere suddiviso in fasi: rilevare, classificare, identificare e neutralizzare.

Gli UUV raccolgono i dati oceanografici prima di eseguire missioni MCM, acquisendo informazioni su venti, batimetria, visibilità dell'acqua, correnti, onde, parametri geofisici del fondale, concentrazioni di alghe, e banchi di sabbia. I banchi di sabbia sono importanti per determinare aree di estrazione e per il confronto delle indagini passate con quelle attuali del fondale, individuando così, possibili cambiamenti.

Gli UUV di piccola dimensione sono più consoni a compiere operazioni MCM.

## 2.3 Anti-sommergibili da guerra (ASW)

ASW (Anti-Submarine Warfare) ha il compito di pattugliare, rilevare, tracciare e neutralizzare i sottomarini avversari utilizzando gli UUV. In tempi passati, ASW era considerata una disciplina che si serviva di un'elevata quantità di personale per raccogliere un'alta quantità di dati, utilizzati per valutare il target e il rischio associato.

Recentemente l'ASW tradizionale è stata modificata grazie ad approcci alternativi che hanno iniziato a coinvolgere la telefonia mobile e sensori distribuiti stazionari, come boe sonore e gli stessi UUV.

Esistono tre categorie di operazioni ASW:

1. "Hold at Risk": rappresenta il monitoraggio di tutti i sottomarini che escono da un porto o transitano in un punto di strozzatura.
2. "Scudo marittimo": consiste nel mantenere libera da minacce marittime un'area operativa.
3. "Passaggio protetto": permette di liberare una rotta da sottomarini nemici per il passaggio di una nave da guerra da un'area operativa ad un'altra.

Gli UUVs non offrono un contributo sostanziale alla categoria di "Hold at Risk" nelle operazioni ASW (anti-sottomarino). UUV, appoggiato da segnalazioni di terze parti, monitora e traccia il traffico dei sottomarini che escono da un porto avversario o altri punti di strozzatura, ma a causa della loro mobilità limitata e per questioni di visibilità, non sono candidati ideali per svolgere funzioni "Hold at Risk". UUVs sono molto più vantaggiosi nelle altre due categorie ("Scudo marittimo" e "Passaggio protetto").

## 2.4 Oceanografia e idrografia

Attualmente gli UUVs stanno rivoluzionando l'oceanografia. Sono stati impiegati per compiere misurazioni in quadri complessi, costosi e, in alcuni casi, impossibili da ottenere applicando tecniche tradizionali di campionamento, a bordo delle navi. Nello scenario oceanografico e idrografico, gli UUVs hanno diverse missioni[7]:

1. Batimetria
2. Immagini acustiche

3. Immagini ottiche
4. Profilatura del sottofondo marittimo
5. Caratterizzazione della colonna d'acqua
6. Profili delle correnti oceaniche (con maree)
7. Profili di temperatura
8. Profili di salinità
9. Chiarezza dell'acqua
10. Bioluminescenza

Queste missioni garantiscono la sicurezza nelle aree marine, in particolare quelle soggette a guerra navale. Hanno svariati scopi, dalla ricognizione delle aree dei fondali, alla rappresentazione dettagliata di specifiche zone di battaglia.

La tecnologia UUV è fondamentale per le piattaforme con equipaggio per identificare i requisiti oceanografici critici. L'indagine sulla regione del litorale in acque poco profonde è utile per facilitare la navigazione. Questo tipo di missione potrebbe essere realizzata meglio utilizzando piccoli UUV o alianti.

Gli alianti (AUV), UUV di forma allungata, utilizzano il bilanciamento del peso interno e le variazioni di temperatura dell'acqua per muoversi autonomamente anche per mesi. I miglioramenti di progettazione sugli AUV stanno consentendo un maggiore volume di carico utile e una maggiore velocità, grazie ai sensori che possono essere sufficientemente piccoli e richiedere una quantità minima di energia.

Gli alianti utilizzati oggi per l'oceanografia costano qualche decina di migliaia di dollari, possono raccogliere dati oceanografici ininterrottamente per lungo tempo e possono essere riforniti a un costo minimo.

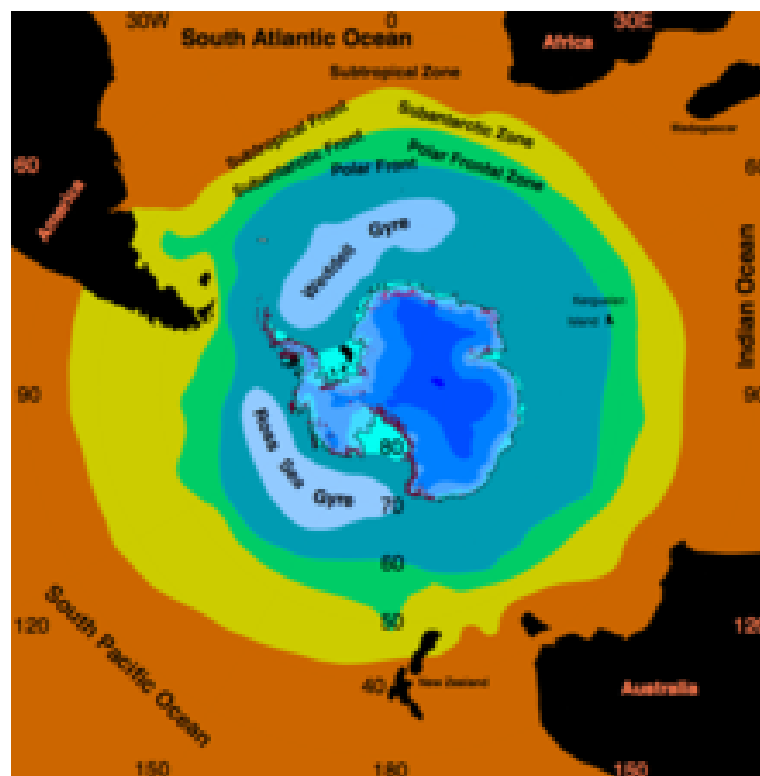


Figura 2.1: Oceanografia



# Capitolo 3

## Design e Tecnologie degli AUV

### 3.1 Architettura di sistema

L'architettura di UUV è divisa in due parti:

1. Architettura hardware
2. Architettura software

#### 3.1.1 Hardware

Una panoramica generale del sistema è mostrata nella figura successiva, il sistema di riferimento è un HRC-AUV.



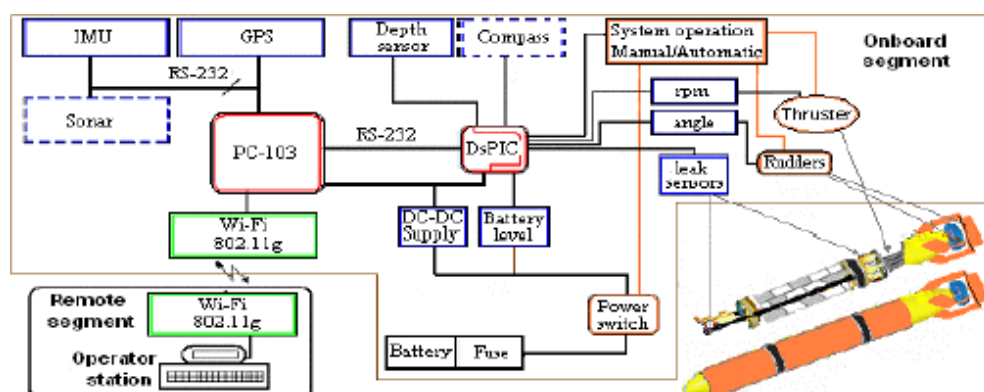


Figura 3.1: Architettura Hardware

L'architettura hardware è composta da due unità computazionali e un'unità di potenza. Le unità informatiche sono: un PC-103 industriale e un sistema embedded basato su Microchip DsPIC 30F4013. Queste due unità condividono i compiti di acquisizione dei dati dai sensori e quelli di controllo/navigazione, determinando la seguente assegnazione dei compiti[14]:

1. Unità DsPIC: Si occupa di tutte le misurazioni analogiche relative a profondità, rotta, angolo del timone, parametri di propulsione, livelli di batteria e sensori di perdite. A questa unità è affidato anche il controllo della direzione e della profondità dell'AUV.
2. Unità PC-103: Si occupa di tutte le misurazioni digitali relative alla stima della posizione e dell'assetto attraverso la relazione INS/GPS. Questa unità gestisce anche il software di navigazione e comunicazione.
3. L'unità di potenza: Composta da una piattaforma DC-DC. Un driver PWM gestisce l'angolo dei timoni mentre l'elica di propulsione è direttamente collegata alle batterie. La sezione remoto è un laptop che esegue il software di alto livello e dispone di un collegamento wireless. I requisiti minimi del software sono: processore P-IV e almeno 256 GB di RAM.

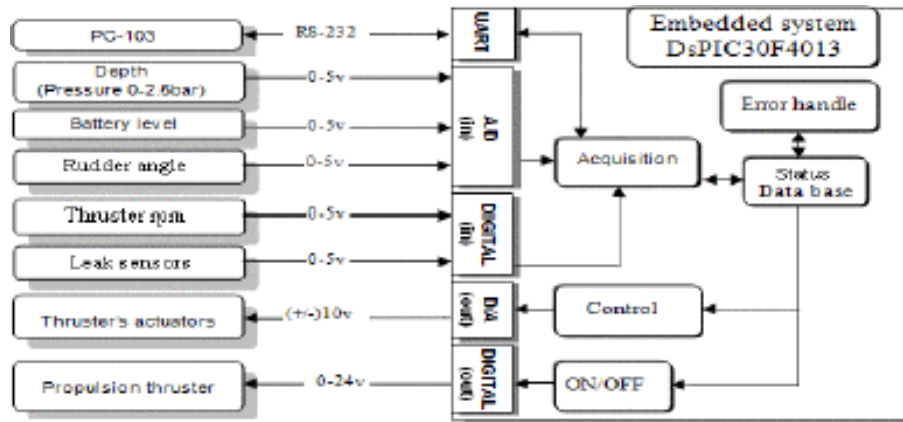


Figura 3.2: DsPIC

L'unità DsPIC acquisisce i dati dai sensori e li elabora per aggiornare il database. Prima di questo processo, alle misurazioni vengono applicati una serie di filtri analogici e digitali. A tutte le misurazioni viene applicato un filtro di rete RC semplice, con una frequenza di taglio di 1 rad/sec, al fine di eliminare l'effetto aliasing.

Il canale di comunicazione con il PC-103 è impiegato per ottenere il set-point dei regolatori e per registrare uno storico del funzionamento del sistema.

L'unità PC-103 è responsabile della navigazione e dell'acquisizione dei dati dall'IMU e dal GPS. L'IMU fornisce l'assetto e la velocità di virata del veicolo, che sono variabili essenziali per il circuito di controllo. I dati di questo sensore vengono utilizzati anche per implementare una soluzione di navigazione inerziale (INS) in grado di operare con o senza il supporto del GPS e di altri sensori.

A questa unità è affidata anche la manipolazione dei log del sistema e la generazione di uno storico, inoltre, fornisce al operatore informazioni sul veicolo come il suo stato, il suo assetto, la sua posizione e la sua velocità. Questo avviene tramite un collegamento Internet, attraverso il quale vengono anche ricevuti i comandi di regolazione del controllo e le istruzioni per le operazioni tele-assistite.

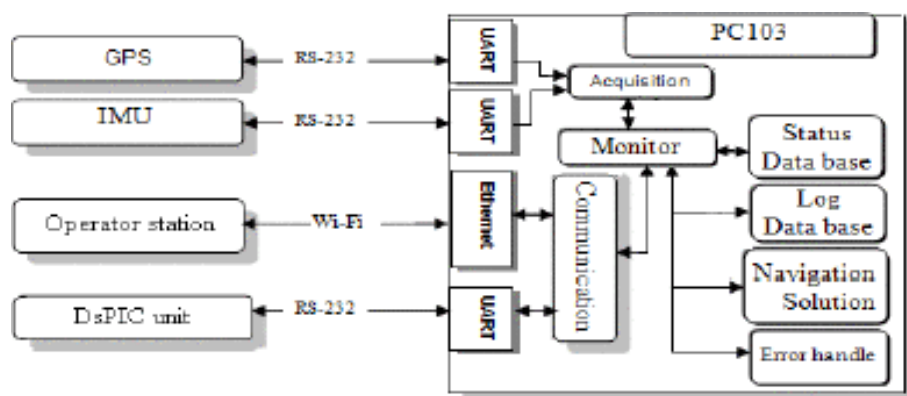


Figura 3.3: PC-103

Le attività in esecuzione sull'unità PC-103, fanno affidamento su canali di comunicazione per il trasferimento di informazioni. I canali di comunicazione sono divisi in due gruppi:

1. Comunicazione seriale basata sul protocollo RS-232.
2. Comunicazione seriale basata su Ethernet TCP/IP.

La comunicazione seriale RS-232 viene utilizzata per acquisire i valori dei sensori IMU e GPS; inoltre, viene utilizzata anche per lo scambio di dati con l'unità DsPIC. La comunicazione seriale TCP/IP utilizza come mezzo di connessione fisica un canale Ethernet wireless.

### 3.1.2 Software

Il sistema software è diviso in due parti: quella di bordo e quella remoto. Alla parte onboard è affidato il controllo del veicolo, la navigazione e la gestione degli errori/allarmi. La parte remota si occupa di pianificazione, programmazione e monitoraggio.

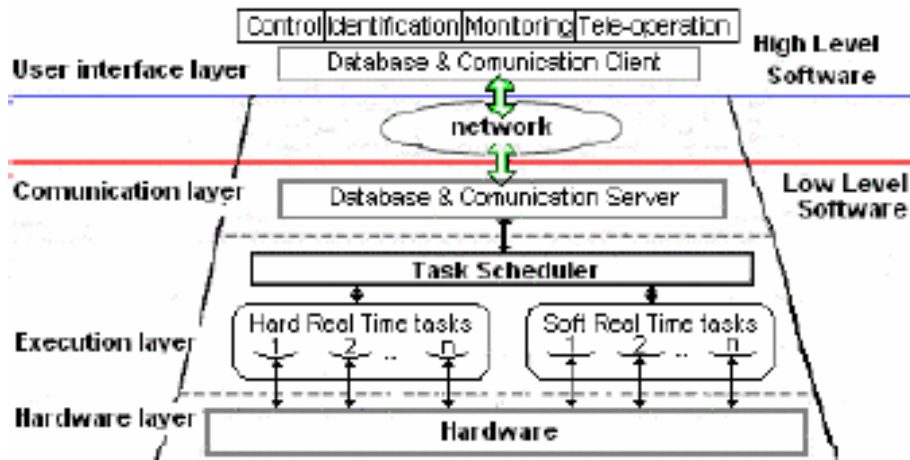


Figura 3.4: Architettura Software

L'unità DsPIC gestisce l'algoritmo di controllo del sistema e fornisce i comandi all'attuatore che regola l'angolo del timone.

La postazione dell'operatore e l'unità PC-103 implementano un'architettura client-server. La postazione dell'operatore, con il software di monitoraggio, funge da cliente mentre l'unità PC-103 funge da server perché raccoglie e memorizza tutti i dati dai sensori.

Il software utilizzato dalla stazione dell'operatore ha tre interfacce:

1. Servizio di monitoraggio: attraverso questo servizio, l'utente può visualizzare le diverse variabili che rappresentano lo stato del veicolo e monitorano il dispositivo. Le variabili visualizzate nella schermata di monitoraggio sono relative alla posizione e al percorso seguito dal veicolo, all'assetto, alla direzione rispetto al nord magnetico e a diverse variabili di stato e di avviso relative al funzionamento sicuro.
2. Servizio di controllo: Questo servizio fornisce un'interfaccia per visualizzare graficamente lo stato delle variabili misurate e confrontarle con quelle desiderate; permette inoltre di visualizzare i valori delle costanti dei regolatori. L'interfaccia è divisa in due parti: una dedicata alle variabili di controllo della rotta e l'altra al controllo della profondità.

3. Servizio di tele-operazione e identificazione: Il servizio di tele-operazione fornisce un'interfaccia per pilotare manualmente il sistema, modificando la profondità del timone e gli angoli di rotta. Può anche fornire parametri di controllo come tempo di reazione e indici di prestazione, come i gradi di rotazione attorno alla percentuale di deflessione del timone. Il servizio di identificazione si compone di due parti: una che offre strumenti per l'identificazione della prua e l'altra per l'identificazione della profondità. Entrambe sono dotate di uno slider che può essere utilizzato per variare gli angoli di deflessione dei rispettivi timoni.

## 3.2 Navigazione e Localizzazione

La navigazione e la localizzazione degli AUV rappresentano una sfida impegnativa, principalmente a causa della rapida attenuazione dei segnali a frequenza più elevata e della natura non strutturata dell'ambiente sottomarino. Sopra l'acqua, la maggior parte dei sistemi autonomi si basa su comunicazioni radio o ad ampio spettro e sul posizionamento globale, tuttavia, sott'acqua, tali segnali si propagano solo per brevi distanze e i sensori e le comunicazioni basati sull'acustica risultano meno efficaci. Le comunicazioni acustiche presentano numerose carenze come[8]:

1. Larghezza di banda ridotta.
2. Bassa velocità di trasmissione dati, che generalmente limita la quantità di dati che possono essere trasmessi.
3. Elevata latenza poiché la velocità del suono. nell'acqua è di soli 1500 m/s. (lenta rispetto alla velocità della luce)
4. Velocità del suono variabile a causa della fluttuazione della temperatura dell'acqua e della salinità.

5. Trasmissioni multi-percorso dovute alla presenza di un confine superiore (superficie libera) e inferiore (fondo marino) accoppiate con velocità del suono altamente variabile.
6. Inaffidabilità, con conseguente necessità di un sistema di comunicazione progettato per gestire frequenti perdite di dati nelle trasmissioni.

Nonostante queste sfide significative, la ricerca sulla navigazione e localizzazione degli AUV è esplosa negli ultimi dieci anni. Il settore sta affrontando un cambiamento di paradigma, passando dalle vecchie tecnologie, come la linea di base lunga (LBL) e la linea di base ultracorta (USBL), che richiedono infrastrutture pre-distribuite e localizzate, verso approcci di sistema multi-agente dinamici che consentono una rapida implementazione e flessibilità con un'infrastruttura minima. Inoltre, le tecniche di localizzazione e mappatura simultanea (SLAM) sviluppate per applicazioni di robotica in superficie vengono sempre più applicate ai sistemi sottomarini. Il risultato è che l'errore limitato e la navigazione accurata per gli AUV stanno diventando possibili con costi e spese generali minori. Le tecniche di navigazione e localizzazione AUV possono essere classificate in base a questo schema.

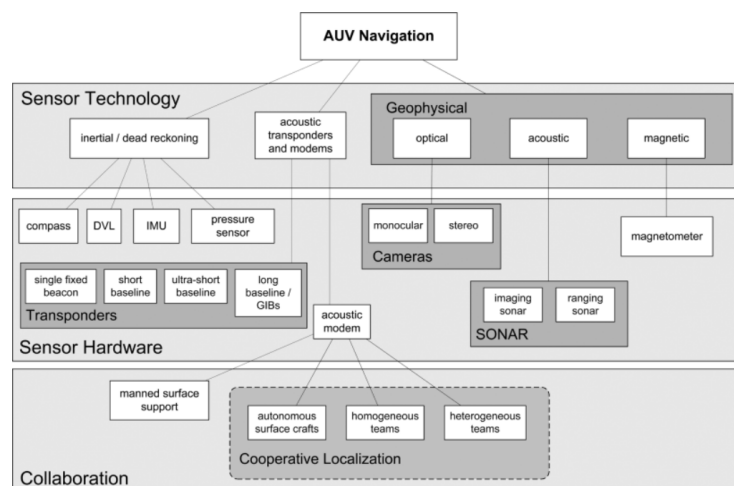


Figura 3.5: Tecniche di navigazione

In generale, queste tecniche rientrano in una delle tre categorie principali.

1. Navigazione stimata/inerziale
2. Transponder e modem acustici
3. Geofisica

### 3.2.1 Navigazione stimata/inerziale

Il posizionamento autonomo dell'AUV, senza il supporto acustico di posizionamento da parte di una nave o di transponder acustici, viene effettuato tramite la navigazione stimata (DR). Con la navigazione stimata (DR), l'AUV avanza la sua posizione in base alla conoscenza del suo orientamento e del vettore di velocità o accelerazione. Il DR tradizionale non è considerato un mezzo di navigazione primario, ma i moderni sistemi di navigazione, che dipendono dal DR, sono ampiamente utilizzati negli AUV. Lo svantaggio del DR è che gli errori sono cumulativi, di conseguenza l'errore nella posizione dell'AUV cresce senza limiti con la distanza percorsa. Un sistema inerziale mira a migliorare la stima della posizione del DR integrando misurazioni da accelerometri e giroscopi. I sensori propriocettivi inerziali sono in grado di fornire misurazioni a una frequenza molto più elevata rispetto ai sensori acustici che si basano sul TOF dei segnali acustici. Questi sensori possono ridurre il tasso di crescita dell'errore stimato sulla posizione, sebbene continuerà a crescere senza limiti.

### 3.2.2 Transponder e modem acustici

Nelle tecniche di navigazione acustica, la localizzazione si ottiene misurando le portate dal Time of Flight (TOF) dei segnali acustici. I metodi comuni sono i seguenti[9]:

1. USBL (Ultra-Short Baseline): Le portate vengono calcolate in base al TOF, e il rilevamento viene calcolato in base alla differenza di fase del segnale che arriva ai ricetrasmittitori.

2. Short Baseline (SBL): I ricetrasmittitori sono posizionati alle estremità opposte dello scafo di una nave. La linea di base si basa sulle dimensioni della nave di supporto.
3. Boe intelligenti LBL e GPS (GIB): I ricetrasmittitori sono posizionati su un'ampia area di missione e la localizzazione si basa sulla triangolazione dei segnali acustici. Nel caso dei GIB, le boe sono in superficie, mentre per le LBL sono installate sul fondo del mare.
4. Singolo ricetrasmittitore fisso : La localizzazione viene eseguita da un singolo ricetrasmittitore fisso.
5. Modem acustico: I recenti progressi con i modem acustici hanno consentito lo sviluppo di nuove tecniche. I ricetrasmittitori non devono più essere fissi e la piena autonomia degli AUV può essere raggiunta con il supporto di veicoli di superficie autonomi dotati di modem acustici.

A causa della latenza degli aggiornamenti acustici, vengono implementati stimatori di stato nei quali i sensori propriocettivi DR forniscono le previsioni e le misurazioni acustiche forniscono gli aggiornamenti.

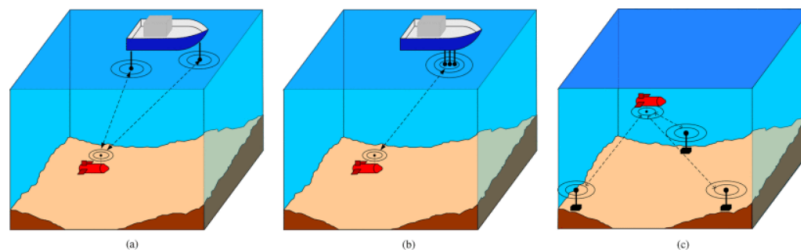


Figura 3.6: SBL, USBL, LBL



### 3.2.3 Geofisica

La navigazione geofisica si riferisce a qualsiasi metodo che utilizza caratteristiche ambientali esterne per la localizzazione. Le categorie sono le seguenti:

1. Magnetico: Utilizzo di mappe del campo magnetico per la localizzazione.
2. Ottico: Utilizzo di una fotocamera monoculare o stereo per catturare immagini del fondale marino e successivamente sfruttare queste immagini per la navigazione.
3. Sonar: Viene utilizzato per rilevare, identificare e classificare acusticamente le caratteristiche dell'ambiente che potrebbero essere utilizzate come punti di riferimento per la navigazione. Con il sonar batimetrico, le caratteristiche possono essere estratte quasi direttamente dai risultati assemblati. Con il sonar a scansione laterale (imaging), l'estrazione delle caratteristiche viene ottenuta attraverso l'elaborazione delle immagini.

#### **Sonar**

I sensori sonar si basano su segnali acustici, tuttavia la navigazione con imaging o sonar batimetrici si fonda sul rilevamento, identificazione e classificazione delle caratteristiche dell'ambiente. La navigazione basata sul sonar rientra sia nella categoria acustica che in quella geofisica. Si fa una distinzione tra il sonar e altri schemi di navigazione basati sull'acustica che si basano su segnali acustici generati esternamente.

Il tipo di sistema di navigazione utilizzato dipende fortemente dal tipo di operazione o missione e in molti casi, è possibile combinare sistemi diversi per ottenere prestazioni migliori. Le considerazioni più importanti da fare per la navigazione sono la dimensione della regione di interesse e la precisione di localizzazione desiderata.

### 3.3 Comunicazione

Sebbene le operazioni AUV in generale comportino comunicazioni minime o assenti, è auspicabile una certa comunicazione per il download dei dati, gli aggiornamenti della missione o il monitoraggio dello stato del veicolo. L'ambiente sottomarino impone molti vincoli elettromagnetici alle comunicazioni, di conseguenza nella maggior parte dei casi, le opzioni di comunicazione per le istanze AUV sono limitate all'uso intermittente di metodi radio, disponibili solo quando la superficie dell'AUV espone un'antenna, o a metodi acustici che hanno una portata e una velocità dati limitata. Le tecnologie ottiche per le comunicazioni subacquee sono state sviluppate utilizzando tipicamente diodi laser o LED per la comunicazione LOS (line-of-sight). La comunicazione ottica offre un tasso di trasferimento dati molto più elevato e una latenza inferiore rispetto alle comunicazioni acustiche, ma la portata è limitata. Può essere utilizzata per consentire a UUV e AUV di recuperare dati in modalità wireless da sensori che sono stati dispiegati sott'acqua. Le comunicazioni tramite induzione magnetica subacquea utilizzano bobine magnetiche per generare segnali; questo metodo di comunicazione presenta un ritardo di propagazione nullo ma la sua portata è altamente limitata. Nel caso siano necessarie comunicazioni più continue o l'AUV deve essere contattato in immersione, vengono generalmente impiegati mezzi acustici. I modem acustici modulano i dati come energia acustica da trasmettere attraverso l'acqua[13].

### 3.4 Potenza

Operando sott'acqua, isolati dall'atmosfera, la vasta maggioranza degli AUV utilizza delle batterie come fonte di alimentazione. La capacità della batteria limita l'autonomia dell'AUV. Le batterie al litio, ampiamente utilizzate nei telefoni cellulari e nei computer portatili, sono comuni negli AUV. Batterie ricaricabili agli ioni di litio, o "secondarie", sono utilizzate nei veicoli REMUS e Gavia, mentre batterie simili ai polimeri di litio sono impiegate nei veicoli Bluefin. I sistemi di alimentazione forniscono una durata della

missione nell'ordine dei giorni.

Una caratteristica del design che mitiga la breve durata della batteria in alcuni veicoli REMUS e Bluefin è l'uso di batterie sostituibili, consentendo una rapida sostituzione della batteria invece di procedere con la ricarica. Un altro mezzo per estendere la durata della missione è l'uso di batterie al litio "primarie" non ricaricabili, che consentono una maggiore durata della missione, a costo di smaltirle e sostituirle una volta scariche[13].

### 3.5 Sensori

Gli AUV sono particolarmente adatti come piattaforme sensoriali a causa della loro mobilità ed autonomia. Alcuni dei sensori trasportati più diffusi sono: il sonar, già descritto in un precedente paragrafo, le fotocamere, il cui uso è limitato dalla limpidezza dell'acqua e che è generalmente nell'ordine di pochi piedi, ma possono anche essere montate su un AUV per osservare le condizioni sopra la superficie a lunghe distanze. Altri sensori trasportati da AUV includono magnetometri o sensori chimici. In generale la maggior parte dei sensori è compatibile con un AUV a meno che i requisiti di alimentazione o il periodo di distribuzione desiderato superino quelli dell'AUV ospitante [10][11][12]. I sensori si possono suddividere in 3 gruppi: sistema, missione e navigazione.

1. Unità di misura inerziale (IMU): Per un accurato assetto e orientamento del veicolo in tempo reale.
2. Profondità: Cerabar T PMP 131 di Endress+Hauser, sensore analogico utilizzato per determinare la profondità operativa dell'AUV.
3. Livello batteria: sensore analogico utilizzato per stimare lo stato della batteria basandosi sulla tensione e sul livello di corrente.
4. Perdita: sensore digitale posizionato all'interno della parte inferiore dello scafo per rilevare eventuali perdite d'acqua.

5. Angolo del timone: sensore analogico che fornisce la posizione reale dei timoni.
6. Giri propulsore: sensore digitale che fornisce i giri del propulsore di propulsione principale.
7. IMU: Questo sensore viene utilizzato anche per generare una soluzione di navigazione inerziale (INS).
8. GPS XL12 di Garmin: sensore digitale che fornisce la posizione assoluta precisa del veicolo (utilizzato solo per la navigazione di superficie).
9. Sensore di profondità: utilizzato per migliorare l'INS.

La CPU raccoglie i dati del sensore, li archivia in memoria, li analizza e li invia tramite un modem acustico ad altri sensori.

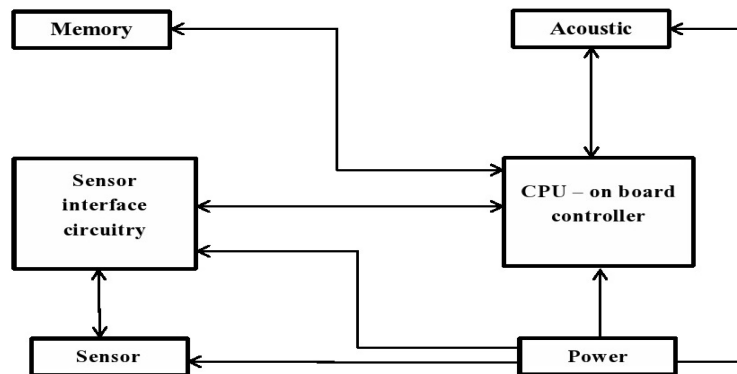


Figura 3.7: Struttura sensore



# Capitolo 4

## DAVE

DAVE Aquatic Virtual Environment (DAVE), è uno stack di simulazione "open source" per robot, sensori e ambienti sottomarini. La maggior parte di simulatori di robotica non sono progettati per affrontare sfide nel contesto marino [23]. DAVE, che si basa su simulatori esistenti, fornisce un framework per accelerare lo sviluppo e la valutazione di algoritmi, riducendo i costi e i tempi necessari per realizzare operazioni in mare. La struttura ha elementi costitutivi di base (veicoli, registratore di velocità Doppler, sonar multi-raggio). DAVE fornisce batimetrie dinamiche e simulazioni di correnti oceaniche che consentono all'utente di concentrarsi sulla metodologia e non sull'infrastruttura software.

### 4.1 Simulazione

La simulazione è fondamentale per lo sviluppo e per la valutazione di applicazioni robotiche; fornisce un'approssimazione parametrizzata di scenari complessi. I simulatori consentono, a basso costo, di testare in modo rapido nuove soluzioni robotiche in condizioni ambientali ripetibili e al contempo portano a una riduzione dei tempi, dei costi e dei rischi dell'implementazione fisica. La simulazione non ricrea un ambiente preciso, nonostante ciò i test del sistema in questo contesto permettono agli sviluppatori di identificare i

problemi senza dover fare affidamento esclusivamente su test fisici.

I test fisici e la valutazione del modello robotico, in determinate condizioni ambientali, risultano impraticabili. Il software interno al drone deve essere progettato per una vasta gamma di condizioni oceanografiche, queste non sono facilmente replicabili per gli sviluppatori e portano di conseguenza ad errori.

L'ambiente virtuale è costituito da modelli che ricreano scenari operativi e oggetti comuni, con la capacità di emulare come l'ambiente influisce sui sensori e sulla fisica del veicolo [15]. DAVE viene implementato all'interno di Gazebo. Gazebo è un simulatore "open-source" utilizzato per la simulazione di robot in un ambiente virtuale[16][17]; viene impiegato nel campo della robotica per lo sviluppo e per il test sui comportamenti robotici all'interno di scenari simulati. Gazebo offre diverse funzionalità: motori fisici per simulare la dinamica dei robot e capacità di rendering per creare ambienti virtuali realistici. Gazebo è supportato da un Robot Operating System (ROS) che permette la comunicazione e il controllo dei robot simulati. ROS è un framework "open source" usato per lo sviluppo di applicazioni robotiche, fornisce servizi tipici dei comuni sistemi operativi come ad esempio astrazioni hardware, controllo di device, scambio di messaggi tra processi.

I simulatori subacquei forniscono idrodinamica, galleggiabilità, sensori e attuatori, necessari ma non sufficienti per una simulazione completa. Per una simulazione subacquea completa bisogna basarsi sulle grandi dimensioni della scala dei chilometri, mentre le tipiche applicazioni della robotica sono sulla scala dei metri. DAVE fornisce funzionalità per caricare mappe di grandi dimensioni. DAVE simula dati realistici per sensori e algoritmi, importando batimetrie ad alta risoluzione e dati reali sulle correnti oceaniche.

## 4.2 Ambiente e strumenti

L'ambiente è un elemento costitutivo della simulazione subacquea. L'ambiente subacqueo è definito dai fondali marini e dalle loro caratteristiche. Esistono mappe di altezza batimetriche che definiscono i fondali. All'interno dell'ambiente vengono create correnti costanti, correnti oceaniche stratificate 3D e oscillazioni delle maree che influenzano la dinamica e il rilevamento del veicolo. In questi ambienti sono presenti oggetti comuni soggetti al degrado ambientale.

### 4.2.1 Batimetrie dinamiche

La batimetria descrive la profondità del fondale marino; è un componente essenziale dell'ambiente subacqueo. Le aree di operazione spesso si estendono per decine di chilometri, con una risoluzione fino a pochi centimetri. In DAVE le tessere della griglia del fondale marino, prodotte dai dati delle mappe di altezza batimetrica ad alta risoluzione, vengono generate dinamicamente ed eliminate quando non sono più necessarie, consentendo un uso efficiente della memoria. Il caricamento dinamico è implementato come un plug-in di Gazebo, che ispeziona le coordinate geodetiche di ciascun veicolo e inserisce la tessera necessaria. Le regioni sono sovrapposte per garantire la continuità delle letture. Le coordinate geodetiche sono calcolate utilizzando la libreria GDAL [22], mentre le coordinate cartesiane sono descritte con Pseudo-Mercator (EPSG 3857), per supportare qualsiasi formato e posizione batimetrica.



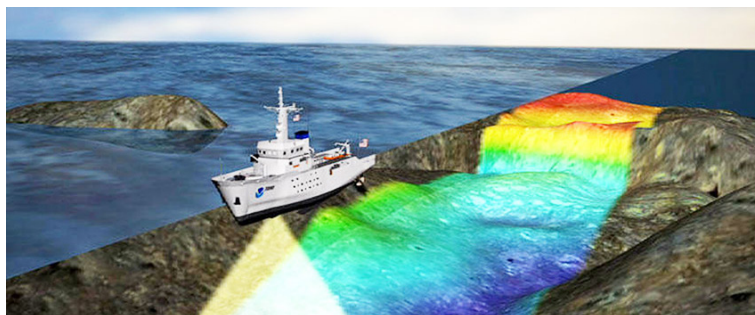


Figura 4.1: Batimetria

### 4.2.2 Correnti oceaniche

Le correnti oceaniche hanno condizioni ambientali critiche per la pianificazione e la manipolazione autonoma dei veicoli marini. Le correnti variano nello spazio, in termini di flusso d'acqua e maree. In DAVE possiamo definire le correnti oceaniche stratificate in base a direzioni e profondità (costanti o periodiche nel tempo). Il ciclo delle maree è descritto da un set di dati e da componenti armoniche. Le correnti vengono calcolate utilizzando il modello Gauss-Markov di primo ordine basato sulla profondità di ciascun veicolo [21]:

$$V_{\text{currents}} + \mu V_{\text{currents}} = \omega$$

$V_{\text{currents}}$  è la velocità della corrente oceanica,  $\omega$  è il rumore gaussiano, e  $\mu$  (tipicamente zero per il rumore bianco) è una costante.

### 4.2.3 Modelli

DAVE estende la libreria che contiene modelli di veicoli, manipolatori e oggetti di UUV Simulator, per la creazione di scenari di valutazione.

#### Veicoli

Nella prima figura sono mostrati i modelli di UUV Simulator di DAVE. La collezione mostrata è l'insieme di veicoli per l'ispezione e l'intervento utilizzati all'interno di DAVE. Ciascun UUV include la configurazione dei

propulsori, dei plugin idrodinamici e idrostatici.

In DAVE sono presenti tre tipi di alianti: alianti di superficie [18], alianti guidati dalla galleggiabilità subacquea [19] e alianti ibridi subacquei [20].

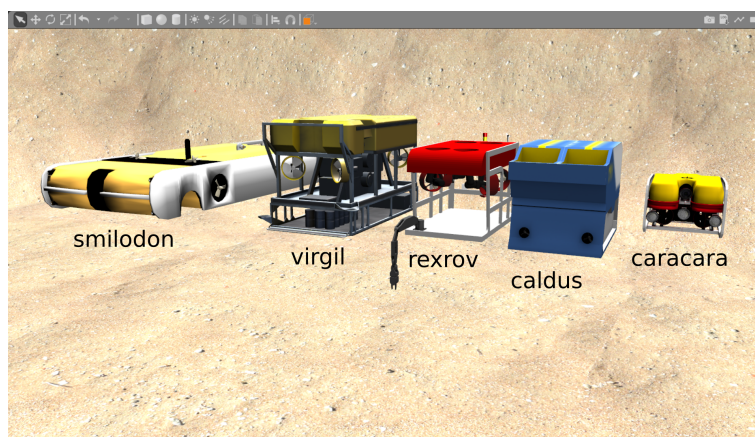


Figura 4.2: Veicoli di DAVE

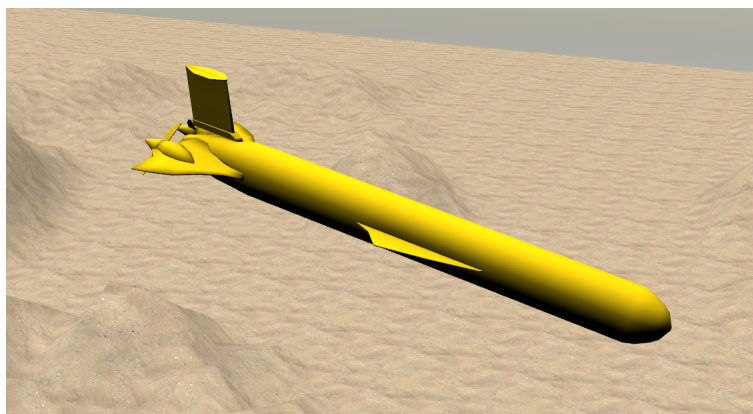


Figura 4.3: Aliante ibrido

### Modello oggetti

DAVE contiene una libreria di oggetti rappresentativi, comunemente associati alle attività di rilevamento, identificazione e manipolazione dei fondali.

Un sottoinsieme di modelli è disponibile su Gazebo Fuel2, un database online di modelli 3D. Ogni modello è composto da una mesh di geometria visiva per il rendering, un'immagine di texture sovrapposta alla mesh, una mesh di collisione (utilizzata dal motore fisico per interazioni come la presa e la manipolazione) e da proprietà inerziali per la dinamica di ciascun elemento.

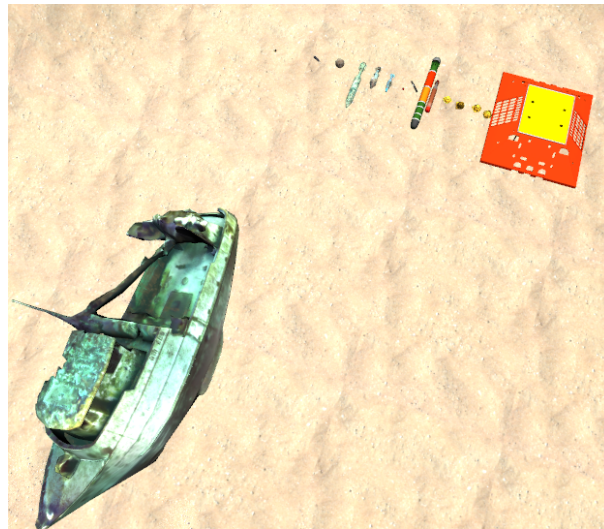


Figura 4.4: Modello oggetti

#### 4.2.4 Distorsione degli oggetti

Tra i fenomeni naturali tipici dell'ambiente marino abbiamo il degrado fisico che colpisce oggetti sommersi per periodi prolungati; il deterioramento di tali oggetti si evince nelle sue proprietà (visive, geometriche e superficiali).

##### Distorsione Geometrica

Per accelerare la distorsione manuale ripetitiva della mesh, si utilizzano modifiche programmate che permettono permutazioni ripetute in modo rapido.

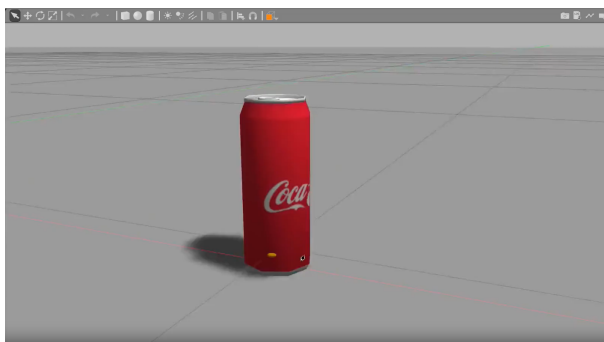


Figura 4.5: Distorsione geometrica 1

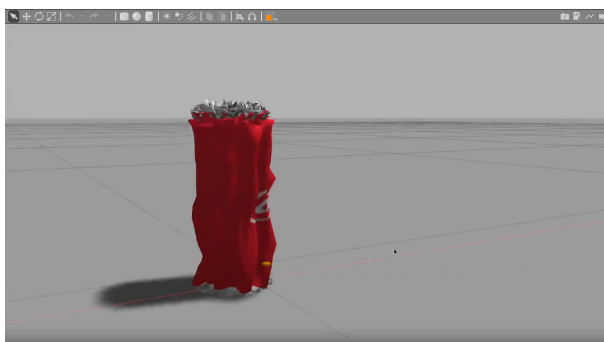


Figura 4.6: Distorsione geometrica 2

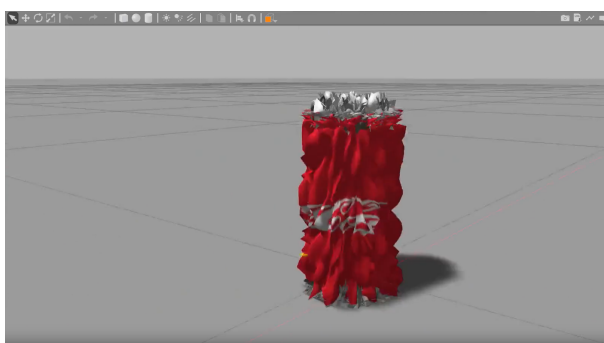


Figura 4.7: Distorsione geometrica 3

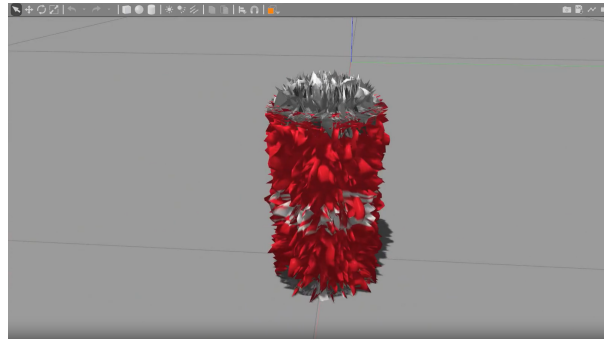


Figura 4.8: Distorsione geometrica 4

## 4.3 Sensori di DAVE

I robot subacquei hanno modalità di rilevamento differenti da quelli terrestri. La visione è compromessa dalle proprietà dell'acqua (diffusione, rifrazione e riflessione). Queste peculiarità non sono prese in considerazione dagli algoritmi che agiscono sulla terra. Il rilevamento subacqueo è definito da elementi costitutivi: l'acustica, la trasmissione dei raggi e la localizzazione [23][24].

### 4.3.1 Doppler velocity logger (DVL)

Il sensore Doppler Velocity Logger (DVL) è un dispositivo utilizzato nei sistemi di navigazione subacquea; questo strumento sfrutta l'effetto Doppler per misurare la velocità relativa di un veicolo rispetto al fondo marino o alla colonna d'acqua circostante. In DAVE, il sensore DVL è fondamentale per il controllo della traiettoria e per il monitoraggio della posizione durante le missioni subacquee. Il DVL può misurare la velocità sia lungo l'asse verticale che orizzontale, consentendo una navigazione accurata in diverse dimensioni. Le informazioni fornite dal sensore DVL vengono integrate con altri dati di navigazione, come ad esempio quelli provenienti da strumenti di navigazione inerziale (IMU), sonar, GPS subacqueo e altri sensori, per ottenere una stima precisa della posizione e dell'orientamento del veicolo in ambiente subacqueo.

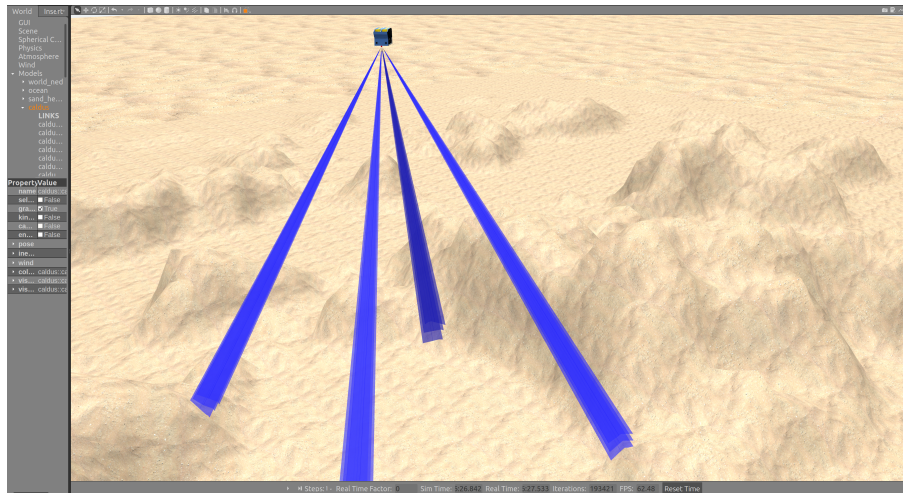


Figura 4.9: Doppler velocity logger

### 4.3.2 Lidar subacquei

I sensori lidar subacquei forniscono alle piattaforme UUV la capacità di ottenere immagini 3D ad alta risoluzione.

DAVE adatta GPURaySensor di Gazebo per fornire un'approssimazione di primo ordine di un sensore lidar subacqueo a impulsi 3D, modellato sugli attributi dei dispositivi lidar subacquei commerciali. La risoluzione può essere regolata in base alle capacità dell'hardware del sistema. La distanza visiva predefinita è di 20 metri, corrispondente a condizioni di acqua relativamente limpida, ma può anche essere regolato secondo necessità in base alle condizioni di torbidità e luce.

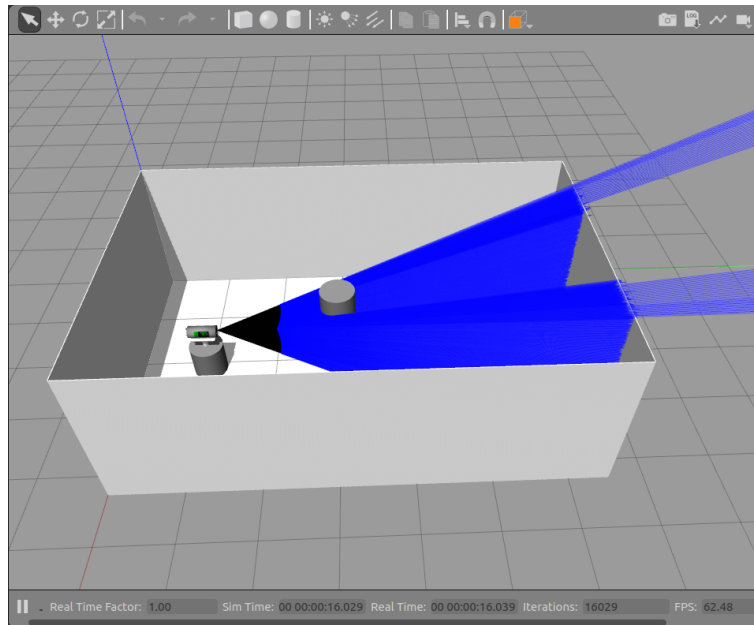


Figura 4.10: Lidar subacqueo

### 4.3.3 Sonar lungimirante multi-raggio

Il sonar lungimirante calcola l'intensità restituita di ciascun raggio e l'interferenza tra più raggi. Le caratteristiche acustiche catturano le ambiguità temporali, angolari e il rumore sporco, somigliando a un sensore reale. Inoltre, i dati grezzi del sonar vengono prodotti e pubblicati come messaggio ROS.

## 4.4 Scenari

Per fornire un ambiente utile per lo sviluppo della manipolazione subacquea vengono forniti scenari di esempio comuni. In secondo luogo, gli scenari iniziano ad affrontare diverse sfide, tra cui far fronte all'instabilità in presenza di correnti, utilizzare sensori acustici e batimetria per la navigazione assistita, pilotare l'occlusione visiva di oggetti sepolti e operare in grandi aree di mondi in scala.

### 4.4.1 Collegamento cavi elettrici

Gli esempi includono la manutenzione o la riparazione di macchinari subacquei e il lavoro con cavi sottomarini. In molti casi, queste missioni richiedono che il robot colleghi o disconnetti le spine da o verso le prese. Il meccanismo spina-presa è stato sviluppato come plugin del modello associato a un modello di presa. Parametri come le tolleranze di allineamento e le forze di inserimento ed estrazione richieste sono specificati nel Simulation Description Format (SDF) del plugin. SDF viene utilizzato anche per specificare il modello e i nomi dei collegamenti della spina da collegare alla presa.

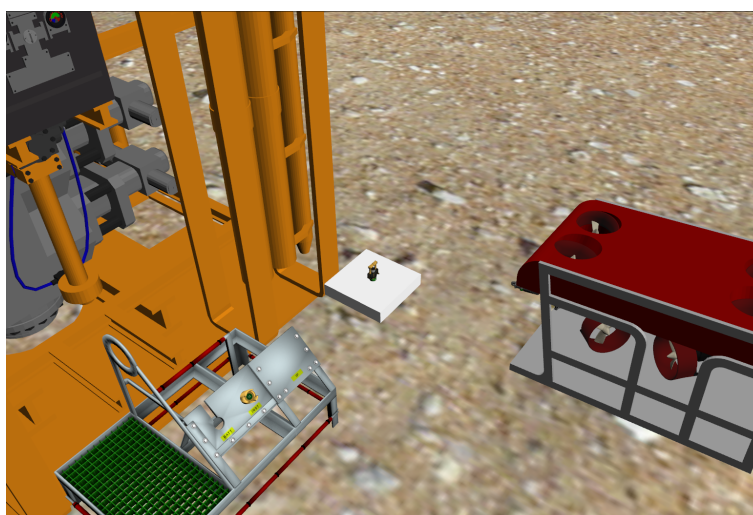


Figura 4.11: Esempio collegamento cavi elettrici

### 4.4.2 Manipolazione bi-manuale

La manipolazione a braccio singolo è utilizzata su scenari come la raccolta di campioni, la pulizia dei detriti e la stabilizzazione del veicolo. La combinazione di questi compiti può essere impegnativo con un braccio singolo pertanto le capacità del robot possono essere notevolmente ampliate con due bracci. Il secondo braccio viene configurato con il framework MoveIt. MoveIt è una piattaforma di manipolazione open source che integra più librerie



di pianificazione del movimento ed è basata su ROS. Per ciascun braccio il robot viene configurato utilizzando l'assistente MoveIt e viene creato un controller di presa e un braccio. Sono stati implementati due tipi di controller per i due bracci. Per i movimenti semplici è stato definito un controller di posizione per ciascuna pinza e braccio. Per scenari dipendenti dallo sforzo e dal feedback sulla forza è stato creato un controller dello sforzo per ciascuna pinza e braccio.



Figura 4.12: Esempio Manipolazione bi-manuale

### 4.4.3 Navigazione assistita del terreno

La navigazione assistita del terreno (TAN) è un metodo di localizzazione subacquea che confronta i dati dei sensori con una mappa del terreno. La posizione di un veicolo si basa su misurazioni batimetriche. Il metodo TAN viene diviso in tre parti: navigazione basata sulle funzionalità, navigazione stimata e correzione dell'errore di posizione.

1. La navigazione basata sulle funzionalità sfrutta due sensori simulati. Il sonar multi-raggio può essere utilizzato per identificare le caratteristiche del fondale marino ad alta frequenza. L'utilizzo del sensore DVL serve per stimare una mappa del gradiente del fondale marino. Questi due sensori combinano il rilevamento ad alta e bassa frequenza, che può essere utilizzato per identificare una serie di caratteristiche del fondale marino per la navigazione.
2. In assenza di mappe dettagliate del terreno o durante la navigazione in condizioni sfavorevoli al riconoscimento del terreno, la navigazione stimata può essere utilizzata con i sensori in DAVE, in particolare l'Inertial Navigation System (INS), il DVL e l'USBL. L'INS consente misurazioni inerziali e di pressione, con l'obiettivo di ridurre al minimo l'errore tra i valori del sensore previsti e quelli riportati mentre si segue un percorso pianificato. Il tracciamento del fondale del DVL è comunemente utilizzato in TAN per ridurre al minimo le deviazioni da una rotta impostata. Questi valori possono essere fusi con i valori INS in scenari privi di GPS o di mappa. In scenari più controllati, l'USBL può essere utilizzato per tracciare la posizione relativa del veicolo indipendentemente dalla disponibilità della mappa o del GPS.
3. Sia per la navigazione basata su funzionalità che per la navigazione stimata, la correzione dell'errore di posizione si basa in genere su un GPS. L'utilizzo del plugin GPS in DAVE consente due opzioni: il primo è la convalida del sistema, utilizzando il GPS per misurare gli errori del percorso posizionale; il secondo è la ricalibrazione della posizione. Il GPS solitamente non è disponibile negli scenari che richiedono TAN, ma può essere utilizzato durante una breve riemersione per determinare l'errore di posizione punto a punto.



# Capitolo 5

## Applicazione di DAVE

La riproduzione di un veicolo subacqueo all'interno di DAVE può essere realizzata seguendo una serie di passaggi su una macchina Linux:

1. Installazione degli ambienti ROS e Gazebo per poter simulare l'ambiente marino.
2. Setup di ROS Noetic.
3. Clonare la repository Field-Robotics-Lab in GitHub.
4. Installare del tool VCS per installare le dipendenze delle risorse di Gazebo. Tipicamente occorre creare una coppia di chiavi pubblica-privata e collegarla al proprio account di GitHub per evitare l'errore: "Could not determine ref type of version: git@github.com: Permission denied (publickey)".
5. Installare il multi-beam sonar; è necessaria la presenza di una scheda grafica NVIDIA altrimenti l'applicazione segnalerà una serie di errori.
6. Installare lo strumento di creazione catkintool.
7. Eseguire la build di catkin.
8. Creare un file setup.bash.

9. Lanciare il codice per l'apertura e la simulazione del drone all'interno di Gazebo.

Codice di lancio: `roslaunch nome della cartella dove si trova il drone nome del drone.`

## 5.1 RexROV movimento

Successivamente al lancio del simulatore viene presentato uno scenario di un fondale marino nella quale è presente un Rov, precisamente il RexROV. Il movimento del dispositivo può essere realizzato in due modi differenti:

1. Movimento tramite uso di Joystick
2. Movimento automatico

### Problematiche d'installazione NVIDIA - Joystick riscontrate

Nel mio caso specifico la mancanza della scheda grafica NVIDIA installata sul PC mi ha costretto ad operare utilizzando VNC su un server remoto. Non potendo di conseguenza interagire attraverso il Joystick direttamente con il server sono state tentate alcune soluzioni per ovviare il problema:

1. Xboxdrv: Il primo metodo è stato di scaricare un driver del Xbox 360. Si è cercato di mappare la tastiera del PC con il controller virtuale del Xbox tramite l'utilizzo di file con estensione .ini. Il problema riscontrato è stato relativo alla mappatura delle leve analogiche del joystick con i tasti della tastiera che non venivano riconosciuti dal driver del Xbox.
2. MoltenPad: MoltenPad è una repository su GitHub nata per mappare le tastiere e i controller al joystick del xbox. Il problema in questo caso è dovuto all'installazione di alcuni package di componenti molten che non riuscivano a trovare un pacchetto python nonostante questo fosse installato.
3. Antimicrox: Piattaforma per mappare un joystick qualsiasi al joystick del Xbox; tuttavia necessita che il controller sia direttamente collegato alla macchina.

Pertanto alla fine è stato necessario collegare direttamente il joystick al server ospitante DAVE in modo da poter manovrare il dispositivo.

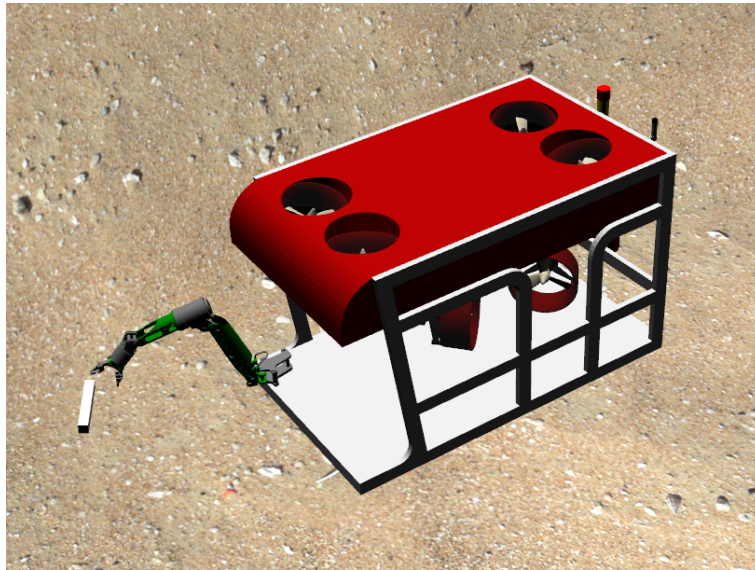


Figura 5.1: RexROV

### 5.1.1 Movimento tramite uso di Joystick

L'utente premendo un bottone o muovendo una leva del joystick interagisce col drone. L'interfacciamento tra drone e joystick è il seguente:

1. Driver di Input del Joystick: Il driver è responsabile dell'interfacciamento con l'hardware fisico del joystick. Il driver legge lo stato dei pulsanti, degli assi e altri controlli sul joystick e traduce queste informazioni in un formato comprensibile da ROS (tipicamente messaggi ROS, cioè un'unità di dati standardizzata utilizzata per la comunicazione tra nodi in un sistema ROS). Successivamente, il driver pubblica questi messaggi su un topic ROS specifico (un topic ROS è un canale di comunicazione asincrono utilizzato per la trasmissione di messaggi tra i nodi) dove altri nodi (un nodo in ROS è un'unità di esecuzione autonoma) possono sottoscrivere per ricevere i dati di input del joystick.

2. Elaborazione dei Messaggi: Questi nodi sono responsabili di interpretare i dati di input del joystick e associarli alle funzioni corrispondenti. Segnali tipici sono lo stato dei pulsanti, i valori degli assi e altri controlli. L'azione corrispondente all'input potrebbe comportare la pubblicazione di altri messaggi su altri topic ROS.

Un caso di studio potrebbe essere l'utente che decide di manovrare il drone muovendolo in avanti:

1. In questo caso il joystick traduce il movimento della levetta in un valore numerico che rappresenta la direzione e l'intensità dello spostamento.
2. Il nodo elabora il messaggio per estrarre il valore corrispondente alla direzione del movimento della levetta analogica.
3. Una volta ottenuto il valore corrispondente al movimento in avanti, il nodo può utilizzarlo per generare un comando di controllo che contiene le istruzioni di movimento per il drone, come ad esempio una velocità lineare da applicare lungo l'asse di avanzamento.

```
1 import rospy
2 from sensor_msgs.msg import Joy
3 from geometry_msgs.msg import Twist
4
5 class JoystickController:
6     def __init__(self):
7         rospy.init_node('joystick_controller')
8         rospy.Subscriber('joy', Joy, self.joy_callback)
9         self.cmd_pub = rospy.Publisher('cmd_vel', Twist,
10 queue_size=10)
11         self.max_linear_speed = 1.0
12
13     def joy_callback(self, data): #(1.a)
14         linear_speed #(1.c) = data.axes[1] #(1.b)
15
16         cmd = Twist() #(2.a)
```



```
16         cmd.linear.x = linear_speed * self.max_linear_speed #
(2.b)
17         cmd.angular.z = 0.0 #(2.c)
18
19         self.cmd_pub.publish(cmd) #(3.a)
20
21     def run(self):
22         rospy.spin()
23
24 if __name__ == '__main__':
25     try:
26         joystick_controller = JoystickController()
27         joystick_controller.run()
28     except rospy.ROSInterruptException:
29         pass
```

Listing 5.1: Esempio joystick controller con ROV

La classe `JoystickController` gestisce la comunicazione con il joystick e la pubblicazione dei comandi al drone. Nel metodo "init", vengono inizializzati il nodo ROS, i subscriber per l'input del joystick e il publisher per i comandi del drone. Il metodo `joystick_callback` è composto nel seguente modo:

1. Lettura del joystick:

- (a) "data" è il parametro che rappresenta i dati ricevuti dall'input del joystick.
- (b) "data.axes" è una lista che contiene i valori delle diverse leve del joystick. Il valore "data.axes[1]" è il valore dell'asse y del joystick, che rappresenta tipicamente il movimento avanti/indietro.
- (c) "linearspeed" contiene il valore dell'asse y del joystick, che rappresenta la velocità desiderata del movimento in avanti o all'indietro.

2. Conversione dell'input in un comando per il drone:

- (a) L'oggetto "Twist()" rappresenta il comando di movimento del drone.

- (b) `"cmd.linear.x"` viene impostato uguale a `"linearspeed * self.maxlinearspeed"`, dove `"self.maxlinearspeed"` rappresenta la massima velocità lineare del drone. Questo valore viene moltiplicato per il valore letto dall'asse y del joystick per ottenere la velocità desiderata del movimento in avanti o all'indietro.
- (c) `"cmd.angular.z"` viene impostato a 0.0, indicando che non c'è rotazione per questo comando.

### 3. Pubblicazione del comando:

- (a) Il comando `"cmd"` viene pubblicato sul topic `"cmdvel"` utilizzando il publisher `"self.cmdpub.publish(cmd)"`. Questo fa sì che il comando venga trasmesso al sistema di controllo del drone tramite ROS, che poi eseguirà il movimento corrispondente in base al comando ricevuto.

Nel metodo `run`, il nodo continua ad ascoltare gli eventi finché non viene interrotto. Il blocco `"if name == 'main'"`: è una convenzione di Python per controllare se lo script è eseguito direttamente come programma principale o se è importato come modulo in un altro script.

## 5.1.2 Movimento automatico

Per permettere ad un AUV di muoversi autonomamente devono essere implementati diversi passaggi:

1. Definizione del percorso: Il percorso può essere fatto attraverso una serie di waypoint (punti di passaggio) espressi come coordinate (x, y, z). Ogni waypoint rappresenta un punto che l'AUV deve raggiungere durante il suo movimento.
2. Inizializzazione del nodo ROS: Creare un nodo ROS che permetterà di comunicare con il sistema di controllo dell'AUV. Si può utilizzare il

pacchetto "movebase" di ROS che gestisce la pianificazione del percorso e il controllo dei movimenti e il pacchetto "geopy" per calcolare la distanza e l'orientamento tra le coordinate geografiche.

3. Sottoscrizione al Topic dei sensori: La sottoscrizione ai topic dei sensori consente al nodo di ricevere dati dai sensori di navigazione dell'AUV come la posizione corrente e l'orientamento che saranno utilizzati per i comandi di movimento necessari per raggiungere il prossimo waypoint.
4. Pubblicazione dei Comandi di Movimento: La pubblicazione dei comandi di movimento consente al nodo di inviare comandi ai propulsori dell'AUV per controllare la sua velocità e direzione. Questi comandi saranno basati sulla posizione corrente dell'AUV e sul waypoint successivo da raggiungere.
5. Logica di Navigazione: La logica di navigazione implementa un algoritmo di controllo che determina la direzione e la velocità dell'AUV in base alla differenza tra la sua posizione corrente e il prossimo waypoint.
6. Sviluppo algoritmo di navigazione: Per navigare da un waypoint all'altro si possono utilizzare tecniche di controllo come il controllo proporzionale o algoritmi di pianificazione del percorso come A\*, Dijkstra e Rapidly-exploring Random Tree (RRT) per ambienti con ostacoli.

Una possibile implementazione della procedura potrebbe essere la seguente:

```
1 import rospy
2 from geometry_msgs.msg import Twist
3 from nav_msgs.msg import Odometry
4 from math import atan2, sqrt
5
6 class AUVController:
7     def __init__(self):
8         rospy.init_node('auv_controller', anonymous=True) #
9         (2.a)
10        rospy.Subscriber('/auv/odom', Odometry, self.
11        odom_callback) #(2.b)
```

```
10     self.cmd_vel_pub = rospy.Publisher('/auv/cmd_vel',
Twist, queue_size=10) #(2.c)
11     self.rate = rospy.Rate(10) #(2.d)
12     self.target_position = (5.0, 5.0) #(2.e)
13     self.threshold = 0.1 #(2.f)
14     self.k_linear = 0.1 #(2.g)
15     self.k_angular = 0.5 #(2.g)
16
17     def odom_callback(self, msg):
18         current_position = (msg.pose.pose.position.x, msg.
pose.pose.position.y) #(3.a)
19         distance = sqrt((self.target_position[0] -
current_position[0])*2 +
20                         (self.target_position[1] -
current_position[1])*2) #(3.b)
21         if distance > self.threshold:
22
23             desired_angle = atan2(self.target_position[1] -
current_position[1],
24                                   self.target_position[0] -
current_position[0]) #(3.c)
25
26             angular_error = desired_angle - msg.pose.pose.
orientation.z #(3.d)
27
28             angular_velocity = self.k_angular * angular_error
#(3.d)
29
30             cmd_vel = Twist() #(3.e)
31             cmd_vel.linear.x = self.k_linear * distance
32             cmd_vel.angular.z = angular_velocity
33             self.cmd_vel_pub.publish(cmd_vel)
34         else:
35             rospy.loginfo("Reached target position") #(3.f)
36
37     def run(self):
38         while not rospy.is_shutdown():
39             self.rate.sleep()
```

```
40
41 if __name__ == '__main__':
42     try:
43         auv_controller = AUVController()
44         auv_controller.run()
45     except rospy.ROSInterruptException:
46         pass
```

Listing 5.2: Esempio AUV controller

La classe AUVController è un nodo ROS che implementa un controller per un AUV. La classe è strutturata nel seguente modo:

1. Vengono importate una serie di librerie come ad esempio librerie matematiche, Odometry (per ottenere informazioni sulla posizione e sull'orientamento), ecc...
2. Viene definito un metodo di inizializzazione "init", il metodo è composto nel seguente modo:
  - (a) Il nodo AUVController si inizializza con un nodo ROS denominato 'auvcontroller'.
  - (b) Il nodo si iscrive al topic /auv/odom per ricevere informazioni sulla posizione e l'orientamento del veicolo.
  - (c) Si crea un publisher per inviare i comandi di velocità al veicolo.
  - (d) Viene definita la frequenza di aggiornamento del nodo.
  - (e) Viene definita la posizione di arrivo del veicolo.
  - (f) Viene definita la distanza soglia per considerare il veicolo in posizione desiderata.
  - (g) Vengono definiti il guadagno di velocità lineare e il guadagno di velocità angolare.
3. Il metodo "odomCallback" è definito nella seguente maniera:
  - (a) Viene estratta la posizione corrente dal messaggio di odometria.

- (b) Viene calcolata la distanza lineare dalla distanza posizionale.
  - (c) Se la distanza è maggiore di una soglia prefissata si calcola l'angolo rispetto alla posizione di destinazione e l'errore angolare.
  - (d) Calcola la velocità angolare desiderata.
  - (e) Pubblica i comandi di velocità lineare e angolare per far muovere il veicolo verso quella direzione.
  - (f) Se la distanza non è maggiore della soglia prefissata viene stampato un messaggio informativo quando il veicolo raggiunge la posizione desiderata.
4. Nel metodo "run" il nodo continua ad ascoltare gli eventi finché non viene interrotto.
  5. Il metodo main prevede l'istanziamento del controller del veicolo AUV e l'avviamento del nodo di controller.

## 5.2 AUV e Cybersecurity

Uno degli obiettivi della tesi è l'analisi dei possibili tipi di attacchi informatici nei confronti di un AUV, nonché delle strategie difensive che potrebbero essere implementate per mitigare il rischio.

### 5.2.1 Attacchi hacker su un AUV

Il primo punto sulla quale ci soffermeremo è la comprensione dei tipi di attacchi di sicurezza che potrebbero essere realizzati; come ad esempio:

1. Spoofing GPS: Un attacco di spoofing può ingannare il sistema di navigazione del drone, facendogli credere di trovarsi in una posizione diversa da quella reale, deviandolo così dal suo percorso programmato. Ad esempio, un attaccante potrebbe simulare falsi segnali acustici per ingannare i sensori sonar di un AUV, influenzando la sua navigazione e mappatura sottomarina.

2. Man in the Middle (MitM): Durante un attacco MitM, un aggressore intercetta la comunicazione tra il drone e il suo operatore potendo così modificare i messaggi o inserirne di falsi.
3. Denial of Service (DoS): Un attacco DoS può sovraccaricare i sistemi di comunicazione del drone con richieste inutili, rendendo impossibile per gli operatori legittimi comunicare con esso per raccogliere dati o impartire comandi.
4. Attacchi ai software/firmware: Gli aggressori possono sfruttare vulnerabilità del software o del firmware dei droni per installare malware o effettuare altre modifiche dannose. Questo può consentire loro di prendere il controllo del veicolo o di rubare dati sensibili.
5. Jamming delle comunicazioni e dei segnali: Questo attacco consiste nel disturbare o bloccare le comunicazioni radio tra il drone e la stazione di controllo creando un'interferenza da parte dell'attaccante, arrivando, in casi estremi, alla perdita di controllo del drone.
6. Attacchi di crittografia: Se un drone utilizza crittografia debole per la trasmissione, questa potrebbe essere decifrata.
7. Attacchi fisici ai sensori: Gli attacchi fisici, come l'esposizione a campi magnetici intensi, possono danneggiare i sensori o alterarne il funzionamento.

### 5.2.2 Tecniche difensive ed azioni di mitigazione

Le tecniche difensive che si possono applicare sui veicoli sono le seguenti:

1. Crittografia robusta: Utilizzare algoritmi di crittografia avanzati per proteggere le comunicazioni tra l'AUV e la stazione di controllo. Questo aiuta a prevenire intercettazioni e modifiche non autorizzate dei dati trasmessi.

2. Autenticazione forte: Implementare sistemi di autenticazione multi-fattore per garantire che solo gli operatori autorizzati possano accedere e controllare l'AUV. Questo include l'uso di certificati digitali, password complesse e, se possibile, autenticazione biometrica.
3. Aggiornamenti regolari del software e del firmware: Mantenere aggiornato il software e il firmware dell'AUV per correggere eventuali vulnerabilità di sicurezza note. Questo richiede una procedura sicura di aggiornamento che impedisca agli aggressori di introdurre malware attraverso falsi aggiornamenti.
4. Monitoraggio e rilevamento delle intrusioni: Implementare sistemi di monitoraggio e di rilevamento delle intrusioni (IDS) per identificare e rispondere rapidamente agli attacchi. Questi sistemi possono analizzare i modelli di traffico e segnalare attività sospette.
5. Pianificazione della risposta agli incidenti: Avere un piano di risposta agli incidenti di sicurezza informatica che includa procedure dettagliate per portare il drone in una condizione di "sicurezza" fino a rendere lo stesso non operativo per evitare potenziali danni.





# Conclusioni

Nella tesi sono stati presentati i veicoli UUV, descrivendone la classificazione e i loro utilizzo nel contesto marino. E' inoltre stato introdotto il sistema di simulazione DAVE, che consente la creazione e la riproduzione dei veicoli subacquei nel loro contesto operativo. E' stato inoltre valutato l'aspetto implementativo di un algoritmo che consente al veicolo di muoversi autonomamente.

Le attività successive da compiere includono:

1. Il testing dell'algoritmo sulla piattaforma DAVE.
2. La verifica dell'esecuzione corretta del percorso con l'aggiunta di piccole modifiche direzionali.
3. La creazione di ostacoli da inserire lungo il percorso.
4. Lo sviluppo di un algoritmo per il superamento degli ostacoli.
5. Implementare tecniche di attacco e difesa relative alle problematiche di sicurezza precedentemente citate.

Rimettiamo in evidenza quanto sia particolarmente critica la questione della sicurezza informatica, specialmente quando tali dispositivi vengono impiegati in contesti bellici o in missioni critiche. Anche in questo ambito, così come nel panorama generale dell'IoT, la maturità e la consapevolezza delle problematiche di sicurezza sono nettamente inferiori rispetto a quelle maturate nei contesti informatici più tradizionali. Ancora meno evidente è la presenza di una letteratura specifica per questo tipo di contesto, il che mette in luce la

fase emergente di questo settore. È probabile che emergano problematiche di sicurezza specifiche per questo contesto, alcune delle quali attualmente inimmaginabili.

# Bibliografia

- [1] Hyakudome T. Design of Autonomous Underwater Vehicle. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2011;8(1). doi:10.5772/10536
- [2] He Y, Wang DB, Ali ZA. A review of different designs and control models of remotely operated underwater vehicle. Measurement and Control. 2020;53(9-10):1561-1570. doi:10.1177/0020294020952483
- [3] Cohan, Steve. (2008). Trends in ROV development. Marine Technology Society Journal. 42. 38-43. 10.4031/002533208786861335.
- [4] Avilash Sahoo, Santosha K. Dwivedy, P.S. Robi, Advancements in the field of autonomous underwater vehicle, Ocean Engineering, Volume 181, 2019, Pages 145-160, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.011>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801819301623>)
- [5] US Navy. The navy unmanned undersea vehicle (uuv) master plan. Technical report, US NAVY, 2004.
- [6] Combined Joint Operations from the Sea Centre of Excellence. Guidance for developing maritime unmanned systems (mus) capability. Technical report, NATO, July 2012. [Online; accessed November-2014]
- [7] C. Deutsch, L. Moratelli, S. Thuné, J. Kutteneuler and F. Söderling, "Design of an AUV Research Platform for Demonstration of Novel Technologies," 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV), Porto, Portugal, 2018,

- pp. 1-8, doi: 10.1109/AUV.2018.8729729. keywords: Propellers;Payloads;Robots;Reliability;Hydrodynamics;Sensors;Energy storage;SMaRC;underwater robotics;AUV;design;research;buoyancy system;long range;versatility,
- [8] L. Paull, S. Saeedi, M. Seto and H. Li, "AUV Navigation and Localization: A Review," in *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 131-149, Jan. 2014, doi: 10.1109/JOE.2013.2278891. keywords: Simultaneous localization and mapping;Acoustics;Sonar navigation;Autonomous underwater vehicles (AUVs);marine navigation;simultaneous localization and mapping,
- [9] R. Su, D. Zhang, C. Li, Z. Gong, R. Venkatesan and F. Jiang, "Localization and Data Collection in AUV-Aided Underwater Sensor Networks: Challenges and Opportunities," in *IEEE Network*, vol. 33, no. 6, pp. 86-93, Nov.-Dec. 2019, doi: 10.1109/MNET.2019.1800425. keywords: Magnetoacoustic effects;Optical sensors;Energy consumption;Acoustics;Optical attenuators;Optical scattering;Integrated optics;Underwater vehicles,
- [10] MDPI and ACS Style Sathish, K.; Venkata, R.C.; Anbazhagan, R.; Pau, G. Review of Localization and Clustering in USV and AUV for Underwater Wireless Sensor Networks. *Telecom* 2023, 4, 43-64. <https://doi.org/10.3390/telecom4010004>
- [11] AMA Style Sathish K, Venkata RC, Anbazhagan R, Pau G. Review of Localization and Clustering in USV and AUV for Underwater Wireless Sensor Networks. *Telecom*. 2023; 4(1):43-64. <https://doi.org/10.3390/telecom4010004>
- [12] Chicago/Turabian Style Sathish, Kaveripakam, Ravikumar Chinthajjala Venkata, Rajesh Anbazhagan, and Giovanni Pau. 2023. "Review of Localization and Clustering in USV and AUV for Un-

- derwater Wireless Sensor Networks” *Telecom* 4, no. 1: 43-64.  
<https://doi.org/10.3390/telecom4010004>
- [13] Cohan, Steve. (2008). Trends in ROV development. *Marine Technology Society Journal*. 42. 38-43. 10.4031/002533208786861335.
- [14] A. Martínez, Y. Rodríguez, L. Hernández, C. Guerra and H. Sahli, "Hardware and software architecture for AUV based on low-cost sensors," 2010 11th International Conference on Control Automation Robotics and Vision, Singapore, 2010, pp. 1428-1433, doi: 10.1109/ICARCV.2010.5707340.
- [15] M. M. Zhang et al., "DAVE Aquatic Virtual Environment: Toward a General Underwater Robotics Simulator," 2022 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), Singapore, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/AUV53081.2022.9965808. keywords: Autonomous underwater vehicles;Software algorithms;Virtual environments;Wheels;Sonar;Resists;Robot sensing systems;underwater simulation;marine simulation;sensor simulation,
- [16] N. Koenig and A. Howard, "Design and use paradigms for Gazebo an open-source multi-robot simulator", *IROS*, 2004
- [17] M. M. M. Manhães, S. A. Scherer, M. Voss, L. R. Douat and T. Rauschenbach, "UUV simulator: A gazebo-based package for underwater intervention and multi-robot simulation", *OCEANS*, 2016.
- [18] R. Hine, S. Willcox, G. Hine and T. Richardson, "The Wave Glider: A wave-powered autonomous marine vehicle", *OCEANS*, 2009.
- [19] D. Webb, P. Simonetti and C. Jones, "SLOCUM: an underwater glider propelled by environmental energy", *J. of Oceanic Engineering*, 2001.
- [20] B. Claus, R. Bachmayer and C. D. Williams, "Experimental flight stability tests for the horizontal flight mode of a hybrid glider", *AUV*, 2010.

- [21] T. I. Fossen, Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, John Wiley and Sons, 2011.
- [22] GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library Open Source Geospatial Foundation, 2022.
- [23] C. S. Timperley, A. Afzal, D. S. Katz, J. M. Hernandez and C. Le Goues, "Crashing Simulated Planes is Cheap: Can Simulation Detect Robotics Bugs Early?", IEEE International Conference on Software Testing Verification and Validation (ICST), 2018.
- [24] I. Vaughn and S. Suman, Deep Submergence dssim , [online] Available: [https://bitbucket.org/whoidsl/ds\\_sim/src/master/](https://bitbucket.org/whoidsl/ds_sim/src/master/).
- [25] <https://wiki.ros.org/ROS/Tutorials>

# Ringraziamenti

Innanzitutto, vorrei ringraziare il Professor Melis per avermi aiutato a portare a termine la stesura di questa tesi. Grazie per i preziosi consigli dati e per avermi introdotto al mondo degli UUV e dei simulatori subacquei. Desidero ringraziare la mia famiglia per il sostegno, l'incoraggiamento e l'aiuto che mi hanno fornito lungo il mio percorso accademico. Grazie per essere stati sempre vicini a me durante le difficoltà.

Un ringraziamento speciale va a Benny, che è stato al mio fianco non solo nei momenti felici, ma soprattutto nei momenti bui e di sconforto. Ti ringrazio per tutto quello che fai per me ogni giorno, anche se non te lo dico esplicitamente. Mi dai sempre una forza e una carica incredibile per perseguire i miei obiettivi. Grazie per essere sempre la mia "crocerossina".

Ringrazio Andre, Mazzo e Ronto per questi tre fantastici anni passati insieme a programmare fino alle 4 di notte. Non sembra vero che abbiamo completato tutti quei progetti.

Voglio ringraziare sia gli amici che ho conosciuto durante tutto questo percorso, sia gli amici che avevo già prima di intraprenderlo. Grazie a tutti per avermi sempre fatto ridere, scherzare e per avermi tenuto sempre in buona compagnia.