

# Bespilotne ronilice i njihov način rada

---

**Pešut, Melita**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:253494>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-24**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**MELITA PEŠUT**

**BESPILOTNE RONILICE I NJIHOV NAČIN RADA**

**DIPLOMSKI RAD**

Rijeka, 2020.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**BESPILOTNE RONILICE I NJIHOV NAČIN RADA  
UNMANNED UNDERWATER VEHICLES AND THEIR METHOD OF  
WORK**

**DIPLOMSKI RAD**

Kolegij: Upravljanje tehničkim sustavima

Mentor: prof. dr. sc. Vinko Tomas

Studentica: Melita Pešut

Studijski smjer: Brodostrojarstvo i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112056426

Rijeka, rujan 2020.

Studentica: Melita Pešut

Studijski program: Brodostrojarstvo i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112056426

## **IZJAVA**

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom *Bespilotne ronilice i njihov način rada* izradila samostalno pod mentorstvom prof. dr. sc. Vinka Tomasa.

U radu sam primijenila metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristila literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući navela u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirala sam i povezala s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Suglasna sam s objavom diplomskog rada na službenim stranicama Fakulteta.

Studentica

Melita pešut

## **SAŽETAK**

Ovaj rad bavi se bespilotnim ronilicama i njihovim načinom rada. Sadrži općenito o bespilotnim ronilicama, njihovu podjelu, u kojim područjima se ronilice koriste te neki suvremeni modeli. Prikazani su dijelovi ronilica te je pojašnjen njihov način rada. Također u radu je objašnjena suvremena komunikacija u podmorju između podmornica ili ronilica. Na kraju rada prikazane su vrste kontrolera koje se koriste kod AUV-a.

Ključne riječi: AUV, ROV, navigacija i lokalizacija, kontrolori

## **SUMMARY**

This paper deals with underwater vehicles and their mode of operation. It contains in general about unmanned submarines, their division, in which areas the submarines are used and some modern models. Parts of the divers are shown and their mode of operation is explained. The paper also explains modern submarine communication between submarines or submarines. At the end of the paper, the types of controllers used in AUV are presented.

Key words: AUV, ROV, navigation and localization, controllers

## Sadržaj

SAŽETAK .....	3
SUMMARY .....	3
1. UVOD .....	3
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA .....	3
1.2. RADNA HIPOTEZA.....	4
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA .....	4
1.4. ZNANSTVENE METODE .....	4
1.5. STRUKTURA RADA .....	4
2. OPĆENITO O PODVODNIM VOZILIMA .....	6
3. OPĆENITO O RONILICAMA I VRSTE.....	7
3.1. DALJINSKI UPRAVLJIVE RONILICE – ROV .....	10
3.1.1. Radna klasa ROV-ova .....	10
3.1.2. Istraživačka klasa ROV-ova .....	12
3.1.3. Ronilice posebne namjene .....	13
3.2. AUTONOMNE PODVODNE RONILICE (AUV).....	13
3.2.1. Krstareće ronilice ( <i>Cruising vehicles</i> ) .....	15
3.2.2. Lebdeće ronilice (Hovering vehicles).....	15
3.2.3. Univerzalne i specijalizirane autonomne ronilice .....	16
4. PRIMJENA AUTONOMNIH RONILICA.....	18
4.1. PRIMJENA AUTONOMNIH RONILICA U VOJNE SVRHE.....	18
4.2. PRIMJENA AUTONOMNIH RONILICA U OCEANOGRFIJI.....	18
4.3. PRIMJENA AUTONOMNIH RONILICA U GOSPODARSTVU .....	19
4.4. PRIMJENA RONILICA U ISTRAŽIVANJU HAVARIJA .....	19
5. RAZVOJ AUTONOMNIH RONILICA KROZ POVIJEST .....	21
6. MODELI AUV RONILICA.....	23
6.1. AUV SEAGLIDER M6 (KONGSBERG, NORVEŠKA, 2017.) .....	23
6.2. AUV REMUS 6000 (KONGSBERG, NORVEŠKA, 2017. ) .....	24
6.3. AUV SENTRY (USA, WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION, 2010.) .....	26
7. DIJELOVI AUTONOMNIH RONILICA.....	28
8. NAČIN RADA AUTONOMNIH RONILICA .....	30

8.1.	NAVIGACIJA I LOKALIZACIJA .....	33
8.1.1.	Mrtvo računanje i inercijska navigacija.....	33
8.1.2.	Akustična navigacija.....	35
8.1.3.	Geofizička navigacija .....	38
8.1.4.	Optička navigacija .....	40
8.2.	FUZIJA SENZORA.....	43
9.	PODvodna LASERSKA MREŽA SENZORA: NOVI PRISTUP ŠIROKOPOJASNOJ KOMUNIKACIJI U PODMORJU .....	44
9.1.	PODvodna MREŽA AKUSTIČKIH SENZORA .....	44
9.2.	PODvodna MREŽA LASERSKIH SENZORA.....	46
9.2.1.	Plavo-zeleni laser u podvodnoj komunikaciji .....	46
9.2.2.	Arhitektura podvodnog laserskog senzora .....	47
9.3.	OPĆI KOMUNIKACIJSKI SUSTAV I NJEGOV PROTOKOL .....	48
9.3.1.	Opis sistema.....	49
9.3.2.	Način rada.....	50
10.	AUV KONTROLERI.....	53
10.1.	TRADICIONALNI KONTROLERI.....	53
10.1.1.	PID (engl. Proportional-Integral-Derivative) tip kontrolera.....	53
10.1.2.	Kontrola kliznog načina rada (SMC, engl. Sliding mode control) .....	54
10.1.3.	Robusna / optimalna kontrola .....	54
10.1.4.	Adaptivno upravljanje.....	55
10.1.5.	Upravljanje neuronskim mrežama (NN).....	55
10.1.6.	Nejasna logička kontrola .....	56
10.2.	HIBRIDNI KONTROLERI .....	56
10.2.1.	Prilagodljivo upravljanje kliznim načinom rada.....	56
10.2.2.	Nejasna kontrola kliznog načina (FSMC).....	57
10.2.3.	Klizni način rada nejasne kontrole (SMFC) .....	57
10.2.4.	Neuronsko upravljanje kliznim načinom rada .....	57
10.2.5.	Neuronska nejasna kontrola.....	58
11.	ZAKLJUČAK .....	59
	LITERATURA .....	60
	POPIS SLIKA .....	62
	POPIS TABLICA.....	62

## **1. UVOD**

Ocean igra integralnu ulogu u svemu što radimo: od zraka koji udišemo, vode koju pijemo, klime i vremenskih obrazaca koji diktiraju naš život i egzistenciju. Ipak, istražili smo samo 5% Zemljine oceanske vode, oceana koji obuhvaća više od 70% našeg planeta. Znanstvena istraživanja oceana pružaju informacije i alate za jasnije razumijevanje zemaljskog oceana i atmosfere.

Sve veća potreba za istraživanjem mora i morskog dna zahtjeva potrebu za razvojem tehničkog sustava koji će moći obavljati istraživanje dijelova mora koje su čovjeku fizički nedostupne. U drugoj polovici dvadesetog stoljeća razvojem elektronike, telekomunikacija te računarstva počinju se proizvoditi prve bespilotne ronilice. Zahvaljujući današnjoj tehnologiji, provode se razna istraživanja i mjerenja u oceanima.

Prvo znanje o oceanima proizašlo je iz promatranja na površinskim plovilima i iz instrumenata stavljenih u more. Kasnije su ljudi počeli istraživati oceane iz zrakoplova i satelita sensorima na brodu. Međutim, ta sredstva mogu djelovati samo u površinskom opsegu, koji su daleko od zadovoljavanja potreba za istraživanjem i eksploatacijom oceana. Podvodna vozila omogućuju da se ode daleko ispod površine oceana, prikupe informacije iz prve ruke o ponašanju oceana i rade interventni poslovi.

### **1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA**

U ovom radu objekt istraživanja su bespilotne ronilice i njihov način rada. Predmet istraživanja je prikupljanje podataka i informacija o ronilicama, njihovim dijelovima te načinu rada. Problem istraživanja je upoznavanje sa bespilotnim ronilicama i njihovom primjenom koja je sve šira te je prikazan napredak u upravljanju, navigaciji, umjetnoj inteligenciji, računalu, sensorima i komunikaciji koji omogućuje izvedivost podvodnih vozila bez posade.

## **1.2. RADNA HIPOTEZA**

Radna hipoteza u ovom radu je analiza tehničkih karakteristika zbog kojih se ronilice koriste u određenim područjima. Dakle, prikazane su karakteristike najpoznatijih suvremenih modela ronilica te komparacija AUV I ROV ronilica.

## **1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA**

Svrha i cilj istraživanja u ovom radu je istraživanje i analiza tehničkih obilježja bespilotnih ronilica, njihove podjele te načina rada. Cilj je upoznati se sa tehnologijom sadašnjosti i budućnosti u podmorju.

## **1.4. ZNANSTVENE METODE**

Znanstvena metoda komparacije korištena je kod uspoređivanja karakteristika AUV i ROV ronilica, metoda deskripcije korištena je kod općenitog upoznavanja sa podvodnim ronilicama bilo koje vrste. Pri obradi poglavlja u radu korištena je metoda analize, a metoda sinteze u zaključku gdje se iznosi vlastito mišljenje autora stečeno tijekom istraživanja. Nadalje, u radu je korištena i metoda klasifikacije kod podjele ronilica na više vrsta te podjele kontrolera. U razvoju ronilica kroz povijest korištena je povijesna metoda. Metodom kompilacije je izabran sadržaj raznih izvora u svrhu istraživanja.

## **1.5. STRUKTURA RADA**

Rad se sastoji od 10 poglavlja. U prvom poglavlju rada prikazano je sve općenito o podvodnim vozilima, a u drugom poglavlju općenito o ronilicama te vrstama ronilica. Treći dio rada odnosi se na autonomne ronilice te njihovu podjelu, te komparaciju AUV i ROV ronilica.

U četvrtom dijelu su navedena sva područja i kojima se koriste ronilice te koju primjenu imaju u kojem području. U petom dijelu opisan je razvoj modela ronilica kroz povijest. Više vrsta najsuvremenijih modela ronilica je prikazano u šestom dijelu rada.

Sedmo poglavlje se odnosi na dijelove autonomnih ronilice, te u osmom način rada ronilica i njihova lokalizacija i navigacija. Najsuvremenija komunikacija laserom prikazana je u devetom dijelu te u desetom dijelu su objašnjeni kontroleri koji se u koriste kod AUV-a.

## 2. OPĆENITO O PODVODNIM VOZILIMA

Ocean posjeduje ogromne resurse koji mogu obogatiti i profitirati čovječanstvo. Podržava esencijalni prehrambeni lanac i također sadrži visoko vrijedne minerale koji održavaju rad industrije, gospodarstava i ekonomije. Ali ti su resursi iscrpni i ekosustav je krhak. Ocean treba stalno proučavati da se stekne razumijevanje njegovog dinamičkog ponašanja. To može dovesti do boljeg upravljanja oceanskim resursima, što je potrebno za dugoročno održavanje. Ocean također ima strateški značaj za sigurnost nacije. Ljudi moraju učinkovito i djelotvorno nadzirati svoje teritorijalne vode i dobro poznavati okoliš u kojem koriste svoje pomorske resurse.

Proučavanje oceana obično uključuje podvodnu pretragu i kartografiju, procjenu klimatskih promjena ili praćenje morskog staništa. Razvoj boljih sustava za praćenje oceana i sposobnijih strojeva za istraživanje dubina oceana pomoći će korisnicima oceana da pronađu rješenja koja ispunjavaju njihove potrebe. Međutim, zadaće istraživanja i praćenja su svojstveno naporne, dugotrajne, a dubine oceana često opasne. Podvodna vozila su razvijena za obavljanje istraživačkih i nadzornih funkcija sa ciljem prevladavanja problema vremena i rizika.

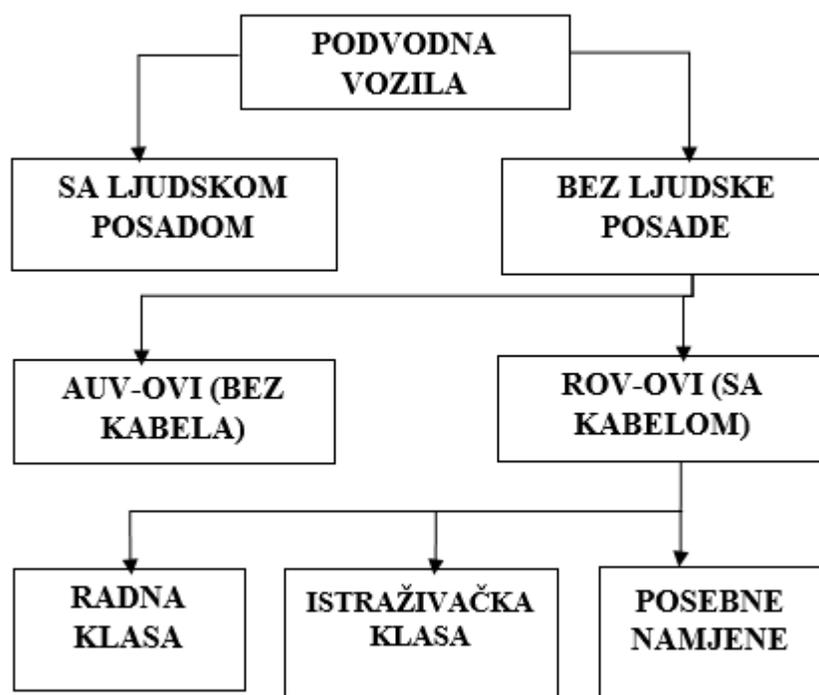
Čovjekova sklonost istraživanju vodenih površina stara je vjerojatno koliko i povijest ljudskog društva. Razlozi tome su uglavnom bili znatiželja, potraga za hranom i raznim sirovinama, te namjera da se iznenadi neprijatelj. Podvodna robotika je područje koje tijekom godina sve više zaokuplja istraživačku zajednicu. Glavni razlog za to je vjerojatno sve veći broj primjena ovih tehnologija u stvarnom životu. Podvodna vozila (UV) široko se koriste u biologiji mora, podvodnoj arheologiji, mornarici, hidrografiji, oceanografiji, ribarstvu itd.

Podvodna vozila općenito se mogu svrstati u sljedeće kategorije [2]:

- upravljano vozilo,
- vezano vozilo,
- vezano bespilotno vozilo i
- nevezano bespilotno vozilo ili autonomno podvodno vozilo (AUV).

### 3. OPĆENITO O RONILICAMA I VRSTE

Podvodni roboti ili, kako se obično te uređaje naziva, bespilotne ronilice (Unmanned Underwater Vehicles, UUVs) tradicionalno se dijele na dvije jasno odvojene klase: daljinski upravljane ronilice (Remotely Operated Vehicles, ROVs) i autonomne ronilice (Autonomous Underwater Vehicles, AUVs). Podjela je prikazana na slici 1.



Slika 1. Podjela podvodnih plovila

Daljinski upravljane ronilice (ROVs) u upotrebu su ušle 1970ih godina, a autonomne ronilice (AUVs) su se počele koristiti nedavno, 1990ih godina.

Daljinski upravljane ronilice karakteristične su po veznom kabelu koji spaja ROV i matičnu platformu, najčešće brod, sa koje operateri upravljaju ronilicom. Vozila na daljinsko upravljanje (ROV-ovi) ostaju vezana za brod domaćina i, iako im to omogućuje da privuku više snage i komuniciraju podatke u stvarnom vremenu, njihova brzina, pokretljivost i prostorni raspon vrlo su ograničeni u usporedbi s AUV-om.

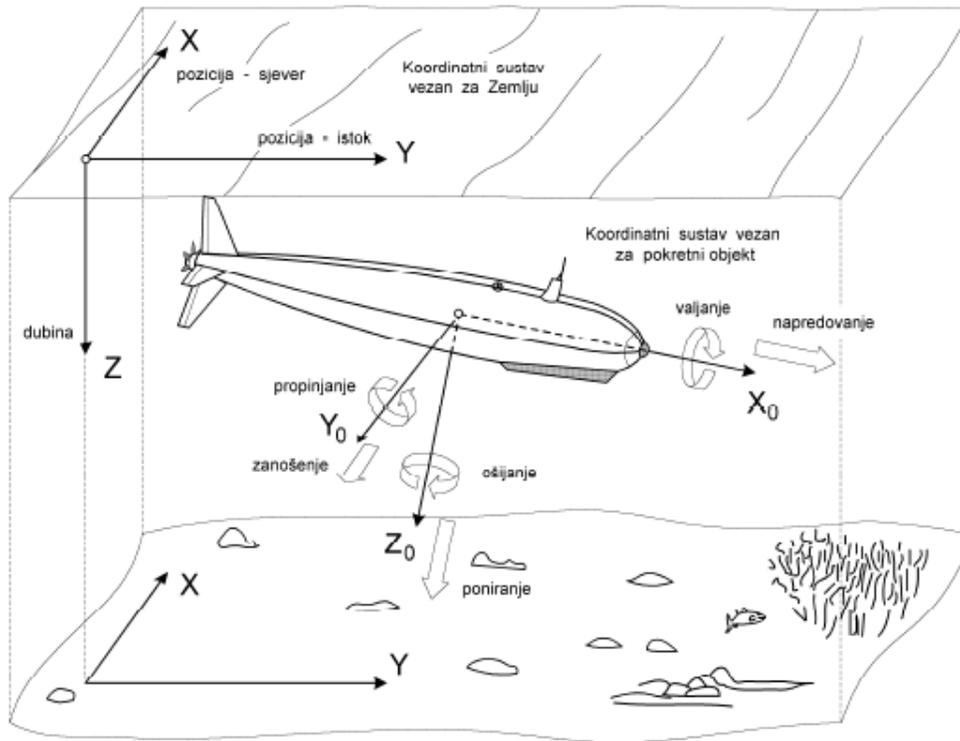
Autonomna podvodna vozila (AUV-ovi), za razliku od ROV-ova, su bespilotna, samohodna vozila koja se obično postavljaju s površinskog broda i mogu neovisno o tom plovilu raditi kroz razdoblja od nekoliko sati do nekoliko dana. One moraju imati vlastiti izvor energije te neku vrstu umjetne inteligencije.

Većina imaju oblik torpeda, ali neki imaju složeniju konfiguraciju koja im omogućuje sporije kretanje po složenijem terenu. AUV-ovi slijede unaprijed programirani tečaj i mogu se kretati pomoću:

- i) nizova akustičnih farova na morskome dnu ili
- ii) kombinacijom akustičke komunikacije ultra kratke osnovne linije, GPS pozicioniranjem i inercijalnom navigacijom (kada je ispod površine - na temelju mrtvog računanja pomoću kombinacije senzora dubine, inercijalnih senzora i Doplerovih senzora brzine).

Za razliku od podvodnih jedrilica, koje se pokreću pomoću plovnog motora i imaju valovitu putanju, AUV-ovi su u stanju održavati izravnu (linearnu) putanju kroz vodu i stoga su dobro prilagođeni geološkim aplikacijama koje zahtijevaju stalnu nadmorsku visinu, kao što su mapiranje i profiliranje morskog dna.

Općenito robotsko vozilo ima šest stupnjeva slobode gibanja: translacija u tri međusobno okomita smjera i rotacija oko tri međusobno okomite tjelesne osi [5]. Nazivi sastavnica gibanja razvijeni za plovila – ali prihvaćeni i za ostale klase robotskih vozila – dani su u tablici 1, a prikaz koordinatnog sustava plovila na slici 2.



Slika 2. Koordinatni sustavi plovila

(Izvor: Automatsko upravljanje plovnim objektima, dr.sc. Sadko Mandžuka)

Table 1. Stupnjevi slobode gibanja

Sastavnica gibanja (stupanj slobode gibanja)	Ime sastavnice gibanja	Pozicija / orijentacija	Brzina / kutna brzina	Sila / moment
gibanje duž X-osi	napredovanje (surge)	x	u	X
gibanje duž Y-osi	zanošenje (sway)	y	v	Y
gibanje duž Z-osi	poniranje (heave)	z	w	Z
rotacija oko X-osi	valjanje, ljuljanje (roll)	$\varphi$	p	K
rotacija oko Y-osi	posrtanje, propinjanje (pitch)	$\theta$	q	M
rotacija oko Z-osi	ošijanje, zaošijanje (yaw)	$\psi$	r	N

(Izvor: Automatsko upravljanje plovnim objektima, dr.sc. Sadko Mandžuka)

### **3.1. DALJINSKI UPRAVLJIVE RONILICE – ROV**

Daljinski upravljive ronilice ROV (engl. *Remotely Operated Underwater Vehicle*) su se počele koristiti u 70im godinama prošlog stoljeća. Ronilica je povezana veznim kablom, takozvanom pupkovinom (engl. *Umbilical*), s matičnim brodom na kojem se nalazi uređaj za upravljanje ronilicom. Preko veznog kabla priključeno je napajanje za potrebe kretanja (rad propulzora) i za funkcioniranje alata koje ronilica koristi te za primanje naredbi od strane operatera. Tim istim kabelom se vraća i povratna informacija, npr. Slika sa video kamere ili očitavanje nekog senzora. Jedan od nedostataka ovakve ronilice je ograničenost kretanja zbog kabla. Također, ako je kabel duži, onda je potrebno imati uređaj koji zateže kabel da bi se spriječilo zapetljavanje kabla. Ako dođe do puknuća kabla, gubi se signal i upravljačka sposobnost nad ronilicom te se može lako izgubiti. Danas je tehnologija toliko razvijena da su takve ronilice pouzdane i sposobne za istraživanje, nadzor i inspekciju (npr. brana, morskog dna, cjevovoda). Takav model male ronilice se naziva motrilačka ronilica (engl. *Observation Class ROVs - OCROVs*). ROV skupina vozila ima najveću manevarsku sposobnost zbog velikog broja porivnika što omogućuje kretanje u svim stupnjevima slobode te je omogućeno stalno dovođenje energije putem kabla.

#### **3.1.1. Radna klasa ROV-ova**

Ronilice ovog tipa uglavnom su najveće od svih klasa. Za upravljanje ovakvim ronilicama potrebna je mnogobrojnija posada nego kod ostalih, sastoji se od nadglednika, pilota (operatera) te ponekad i kopilota. Radna klasa ronilica se uglavnom koriste za kopanje i polaganje kablova na velikim dubinama, popravcima pod vodom ili izvlačenje nekih većih objekata sa morskog dna. Zbog velike mase ovakvih ronilica, za njihovo polaganje u vodu i iz nje je potrebna dizalica. Prosječna težina im je 3 tone, i više. Veće dimenzije su potrebne da bi se na ronilice mogao ugraditi potreban alat za izvršavanje zadataka. Zbog velikih masa sa kojima radi, ronilica treba imati čvrstu mehaničku konstrukciju, električne i hidraulične podsustave. Primjer jedne radne ronilice prikazan je na slici 3.



Slika 3. Radna ROV ronilica

(Izvor: <https://www.oceaneering.com/rov-services/rov-systems/>)



Slika 4. Pridnena ROV ronilica

(Izvor: <http://okeanos-engineers.com/images/3m%20Pipeline%20Jetter%20Conversion.jpg>)

Fizički najveće radne ronilice su pridnene ronilice ili tzv. kopači kanala. One se kreću pod nu pomoću gusjenica ili pomoćnih kotača. Sa prednje ili stražnje strane im se nalazi alat za kopanje pijeska. Dubina na koju kopaju je oko 3 m. Veličina ovakve ronilice u odnosu na čovjeka prikazana je na slici 4 .

### 3.1.2. Istraživačka klasa ROV-ova

Ronilice za istraživačke svrhe su veličinom manje od radnih da bi lakše obavile svoju zadaću, tj. da bi bilo lakše manevrirati njima. Uglavnom se koriste za pregledavanje cjevovoda, brodova, istraživanja te često i za akcije traganja i spašavanja na moru. Također, za manevriranje ovakvim tipom ronilica potreban je manji broj operatera nego kod radne klase i zbog toga su isplativije za korištenje.

Najrasprostranjeniji tip ronilica u ovoj klasi su motrilački ROV-ovi (engl. *Observation ROVs*). Njima se pregledavaju brane, podvodni tuneli i sl. te su zbog toga manje mase i manjih dimenzija. Dužine su oko 0.5 m te težine 10-ak kilograma. Jedan od primjera takve ronilice prikazan je na slici 5.



Slika 5. Motrilački ROV

(Izvor: <https://www.nauticexpo.com/boat-manufacturer/observation-rov-44807.html>)

### 3.1.3. Ronilice posebne namjene

Ronilice posebne namjene su veličinom najmanje, zato se zovu još i Mini/Micro. Micro ROV-ovi teže do 3 kilograma, a Mini ROV-ovi do 15 kilograma. Zbog male težine su praktični pa ih može jedan operater ponijeti na more i upravljati njima. Zato su pogodne za mnoge primjene, uglavnom roniocima.

## 3.2. AUTONOMNE PODVODNE RONILICE (AUV)

Autonomna podvodna vozila (engl. *Autonomus underwater vehicle*) su potpuno neovisne ronilice. Nemaju vezni kabel između ronilice i operatera. Ovakav tip ronilica ima neku vrstu umjetne inteligencije, rade na principu računala. Ronilica se isprogramira za obavljanje nekog zadatka, pusti se u more i ona sama izvršava zadatak za koji je zadužena te prikuplja i memorira podatke. Autonomne ronilice se koriste za mapiranje podmorja, otkrivanje novih naftnih izvora, detekciju podvodnih mina i olupina.

Najveća razlika između AUV ronilica i ROV ronilica su stupnjevi slobode koje može postići, AUV ronilice nisu vezane za operatera i ograničene u kretanju kao ROV ronilice.

AUV-ovi nude sljedeće prednosti u odnosu na ostale kategorije vozila:

- nema potrebe za specijaliziranim operaterima, dok upravljana vozila zahtjevaju specijalizirano osoblje.
- nema potrebe za postavljanjem operatera na površini oceana, kao što bi bilo potrebno za vezano vozilo. To može smanjiti ukupni trošak rada za dugotrajnu misiju.
- AUV se može programirati tako da djeluje na području od interesa bez daljnje ljudske intervencije. Upravljačka stanica može biti na obali, daleko od oštrog i nepredvidivog oceana.

Može se vidjeti da postavljanje AUV-a za oceanografsko istraživanje i praćenje može biti isplativo. Ukupni operativni troškovi mogu se značajno smanjiti jer se ljudska intervencija na mjestu istraživanja može eliminirati. To je posebno atraktivno jer je istraživački rad intenzivan

i dugotrajan. Nadalje, AUV ne pate od umora, za razliku od ljudi koji im omogućuju da rade non-stop. Međutim, energija je ozbiljan problem kod trenutnih AUV modela. Dodatna prednost autonomne metode za oceanografsko istraživanje je da je AUV duboko ispod površine oceana, prema tome, AUV nije podvrgnut nikakvim nepovoljnim vremenskim uvjetima na površini.

Neki od kritičnih izazova s kojima se suočavaju trenutni dizajni AUV-a su;

- energetska učinkovitost i upravljanje napajanjem,
- komunikacije,
- plovidba,
- kontrola.

Izazov dizajneru AUV-a je dizajnirati vozilo koje ima dovoljno energije i senzibilnosti za ispunjavanje proširene misije po prihvatljivoj cijeni. Tijekom godina razvili su se mnogo različitih vrsta AUV-a. Nažalost, dizajn i razvoj AUV-a složen je i skup. Uključuje razvoj vozila, podvrgavanje testovima, poboljšavanje dizajna, a zatim ponovno podvrgavanje daljnjim testovima. Vozilo je neophodno za istraživača tijekom postupka ispitivanja i istraživanja. Alternativa intenzivnom ispitivanju tijekom faze dizajniranja i razvoja je kreiranje simulacijskog alata za predviđanje reakcije vozila na način izmjene. Alat za simulaciju može skratiti vrijeme razvoja koje je dostupno u obrazovne svrhe.

Sa stajališta kontrole, AUV-ovi zahtijevaju mnogo više truda u dizajnu kontrole. Općenito, strategije upravljanja brodskim vozilima mogu se podijeliti u tri razine. Niska razina odgovorna je za kontrolu brzine vozila (napredovanje, zaošijanje itd.), pozicije (dubina, dinamičko pozicioniranje itd.) i orijentacije (smjer, kut nagiba itd.). Srednja razina kontrole odgovorna je za praćenje puta, praćenje putanje i daje naredbe niskoj razini. Visoka razina kontrole posvećena je upravljanju misijama, planiranju misija (planiranje putanje i putanje) i sigurnosnim pitanjima (izbjegavanje sudara, tolerancija kvara, itd.). Da bi viša razina pravilno funkcionirala, niske razine moraju biti pravilno dizajnirane i pouzdano raditi. Da bi se dizajnirala upravljačka struktura niske razine, moraju se identificirati parametri UV matematičkog modela.

Autonomne ronilice se mogu podijeliti u dvije skupine: krstareće ronilice (engl. *cruising vehicles*) i lebdeće ronilice (engl. *hovering vehicles*) te univerzalne i specijalizirane.

### 3.2.1. Krstareće ronilice ( *Cruising vehicles* )

Krstareće ronilice (cruising vehicles) uglavnom imaju oblik torpeda zbog hidrodinamike da bi otpor tijekom kretanja bio što manji. Putanje ovakve vrste ronilica su uglavnom pravocrtne i njihov cilj je kretanje bez zaustavljanja i promjene smjera te zbog toga za manevriranje koriste krilca, a ne propulzore. Glavna namjena ovih ronilica je prikupljanje podataka raznih mjerenja preko senzora te neke grube inspekcije. Na slici 6. je prikazan oblik krstareće ronilice.



Slika 6. Krstareća AUV ronilica  
(Izvor: <http://ekamar.com/images/static/auv.jpg>)

### 3.2.2. Lebdeće ronilice ( *Hovering vehicles* )

Nasuprot krstarećima, lebdeće ronilice moraju imati dobru moć manevriranja, sidrenja te održavanja pozicije (tzv. "lebdjenja"). Zbog tih karakteristika koriste se za podvodne inspekcije i radove. Poziciju održava preko snažnih propulzora koji troše puno energije. Na ronilicu se mogu montirati razni alati i instrumenti za obavljanje puno kompleksnijih zadataka od krstarećih ronilica. Ronilice ovog tipa su još u razvoju, razvijeno je tek nekoliko prototipova te eksperimenata. Slika 7. prikazuje lebdeću AUV.



Slika 7. Lebdeća AUV ronilica  
(Izvor: [www.perronerobotics.se/Images/Alive1.jpg](http://www.perronerobotics.se/Images/Alive1.jpg))

### 3.2.3. Univerzalne i specijalizirane autonomne ronilice

Druga skupina autonomnih ronilica se dijeli na univerzalne i specijalizirane. Univerzalne (kao što samo ime govori) su ronilice koje se mogu prilagođavati ovisno o misiji koju izvršavaju. Izvedene su tako da se na ronilicu mogu lako instalirati alati i instrumenti potrebni za izvršavanje misije.

Druga vrsta ronilica su specijalizirane. One su unaprijed projektirane za neku vrstu zadatka koji je jasno određen. Takve se ronilice izrađuju po narudžbi i jeftinije su od univerzalnih jer se unaprijed zna koji su alati i instrumenti potrebni. Pri narudžbi ovakve vrste ronilica treba se unaprijed znati koje zadatke će ronilica izvršavati i ti zadaci se trebaju dovoljno puta ponavljati i biti specifični. Primjer jedne specijalizirane ronilice prikazan je na slici 8.



Slika 8. Specijalizirana AUV ronilica  
(Izvor: [www.mbari.org/news/homepage/2005/mapping%20auv%20at%20sea\\_350.jpg](http://www.mbari.org/news/homepage/2005/mapping%20auv%20at%20sea_350.jpg))

## **4. PRIMJENA AUTONOMNIH RONILICA**

Ronilice se koriste najčešće u tri područja: znanstvena (oceanografska) područja, privredna (komercijalna) te za vojne aktivnosti. Ronilice se uglavnom koriste za potrage, inspekcije i mjerenja. Mnoge, jednostavnije, ali uz današnju tehnologiju, i one malo kompleksnije poslove mogu obavljati ronilice, no one složenije, izazovnije, sa nepredviđenim preprekama obavlja ljudska inteligencija, uglavnom ronionici. Današnjom tehnologijom se ostvaruje velik korak unaprijed u istraživanju i pretraživanju mora i podmorja. Što je više pretraživanja i mjerenja, to će nam prirodni svijet i okoliš biti poznatiji. Primjena ronilica je vrlo važna da bi se pratilo stanje okoliša u morima i oceanima, primarno zbog ljudskog utjecaja i klimatskih promjena.

### **4.1. PRIMJENA AUTONOMNIH RONILICA U VOJNE SVRHE**

Najrasprostranjeniju upotrebu autonomnih ronilica u vojne svrhe ima vojni sektor SAD-a. Naime, sve do potkraj 1990-ih godina koristili su ih za protuminsku borbu, smatrali su da je to najbolje rješenje. Protuminska borba se odnosi na otkrivanje i uništavanje morskih mina i ostalih eksplozivnih uređaja pod vodom. Naime, ronilica pored eksplozivne naprave postavi postavi eksplozivno punjenje da uništi napravu kad se udalji. Postoje i one ronilice koje samo pretražuju i izvide gdje se nalaze naprave. Bitno područje za razvoj na kojem SAD radi je izviđanje i špijunaža ispod površine vode. Također, i detektiranje i praćenje neprijateljskih podmornica pomoću brzih autonomnih ronilica

### **4.2. PRIMJENA AUTONOMNIH RONILICA U OCEANOGRAFIJI**

U hidrografiji i oceanografiji ronilice se koriste za istraživanje, mjerenje i mapiranje morskog dna. Izmjereni podaci se koriste za praćenje životinjskog svijeta, ekologije, promjena ili poremećaja u okolišu, potragu za naftnim i ostalim rudnim blagom, određivanje ribolovnih

zona te granica. U području hidrografije je veća potreba za robotikom ovakve vrste nego što je današnji kapacitet u tom području.

#### **4.3. PRIMJENA AUTONOMNIH RONILICA U GOSPODARSTVU**

Najbitniji korisnik u ovom području je naftna industrija. Ekonomska situacija naftnog tržišta je usko povezana sa prodajom bespilotnih ronilica. Koriste se u svim fazama razvoja naftnih bušotina. Nakon što se otkrije izvor nafte, potrebno je odrediti lokaciju cijevi i putanje cjevovoda. Radne ronilice se koriste i za postavljanje naftnih platformi, adekvatne su za korištenje teških alata i naprava tijekom postavljanja. Što se tiče gospodarstva, bespilotne ronilice se još koriste i za gradnju, održavanje i projektiranje brana, nasipa, mostova. Također, koriste se i za čišćenje i inspekciju podvodnih objekata. Uz naftnu i plinsku infrastrukturu, na moru postoje i drugi razni obnovljivi izvori energije koji zahtjevaju projektiranje i održavanje cjevovoda i kablova.

#### **4.4. PRIMJENA RONILICA U ISTRAŽIVANJU HAVARIJA**

U prošlosti, potapanje brodova je bila veća mogućnost nego što je to danas te su putovanja na moru bila vrlo opasna. Da bi se otkrio razlog havarije potopa, šalju se ronilice da bi se istražile i pregledale olupine na dnu mora, a ponekad i sanirale ili izvukle neke skupocjene umjetnine iz davnina. Također, ronilice služe i za istraživanje povijesti i razjašnjavanje mnogih događaja. Najbolji primjer je “Titanic”, najpoznatija svjetska havarija. Prvo istraživanje “Titanica” se dogodio pomoću ROV ronilice “Jason Junior” koja je prikazana na slici 9.



Slika 9. ROV ronilica "Jason Junior"

(Izvor: <https://www.whoi.edu/learn-your-ocean/ocean-topics/underwater-archaeology/rms-titanic/ships-technology-used-during-the-titanic-expeditions/>)

## 5. RAZVOJ AUTONOMNIH RONILICA KROZ POVIJEST

Prema podacima, prva bespilotna ronilica proizvedena je u Austriji 1866. godine. Robert Whitehead ju je isprojektirao, izgradio i demonstrirao prvu vožnju. Prva ronilica imala je oblik torpeda. Torpeda su dobili ime po torpedu ribi, koja svojim elektricitetom koji pušta paralizira svoj plijen. Whiteheadov prvi torpedo postigao je brzinu veću od 3,0 m/s i putovao čak 700 m. Vozilo je pokretao komprimirani zrak i imao je eksplozivno punjenje. Ako se zanemari činjenica da je nosio eksplozivni naboj, mogao bi se smatrati prvim AUV-om [6].

Prve “prave” AUV ronilice razvijene su u kasnim 50-im godinama prošlog stoljeća u Laboratoriju za primijenjenu fiziku Sveučilišta u Washingtonu. Njihov rad doveo je do razvoja i rada samohodnih podvodnih istraživačkih vozila (*SPURV*). *SPURV I*, počeo je s radom početkom 60-ih i koristio se za istraživačke poduhvate do sredine 70-ih. *SPURV I* težio je 480 kg i mogao je djelovati brzinom od 2,2 m/s 5,5 sati na dubinama do 3 km. Vozilo se akustički kontroliralo s površine i moglo se autonomno kretati pod konstantnim pritiskom, vidjeti more između dviju dubina, ili se penjati i roniti do 50 stupnjeva. Vozilo je korišteno kasnije u 70-ima za potporu promatranja vodoravne i okomite difuzije pomoću traga boje na dubinama do 1 km. Vozilo je moglo pratiti pramen boje 66 sati nakon puštanja boje. Bilo je preko 400 implementacija *SPURV*-a.

Tijekom 90-ih došlo je do povećanog interesa za AUV za akademska istraživanja. Laboratorij AUV-a Sea Grant institute za tehnologije iz Massachusetts-a projektirao je šest vozila *Odyssey* tijekom ranih 90-ih. Ta vozila su težila oko 160 kg, mogla su ići brzinom do 1,5 m/s do šest sati, na udaljenost do 6 km. Vozila *Odyssey* djelovala su pod ledom 1994. godine i na dubini od 1,4 km tijekom vremena od 3 sata na otvorenom oceanu 1995. godine.

WHOI-jevo vozilo *REMUS* razvijeno je krajem 90-ih kao podrška znanstvenim ciljevima u zvjezdarnici *LEO-15* u Tuckertonu. *REMUS* je svoju prvu znanstvenu misiju dovršio 1967. Vozilo je imalo težinu od 36 kg i moglo je raditi do 20 sati pri 1,5 m/s i na dubini od 100 m. Trenutno postoji preko 50 *REMUS*-ovih vozila u 20 različitih konfiguracija kojima neovisno upravlja devet sveučilišta, tri laboratorija američke mornarice, jedan britanski laboratorij za

obranu i tri ogranka američke mornarice. Stotine ljudi uspješno je obučeno za upotrebu vozila REMUS. Najduža REMUS misija trajala je 17 sati.

## 6. MODELI AUV RONILICA

Da bi razumjeli ocean, znanstvenici često moraju dovesti sebe ili svoje instrumente u specifične dijelove oceana. Tradicionalno, istraživači su koristili brodove kako bi fotografirali dubine, bacali plutače u struje, i prikupljali uzorke vode, stijena i morskog života.

U posljednjih nekoliko godina, spektar raspoloživih alata za promatranje narastao je i uključuje podmornice kojima upravljaju ljudi, vozila na daljinsko upravljanje, autonomna i vučena robota. U nastavku rada prikazano je nekoliko nasuvremenijih modela autonomnih ronilica.

### 6.1. AUV SEAGLIDER M6 (KONGSBERG, NORVEŠKA, 2017.)

M6 se sama kreće kroz vodu pomoću uređaja s promjenjivom uzgonom kako bi postigao vertikalnu brzinu. Krila vozila pretvaraju tu vertikalnu brzinu u kretanje prema naprijed. To rezultira putanjom u obliku zubca pile (saw-tooth) kroz vodu. Seaglider M6, međutim, predstavlja ogroman skok naprijed u dubinskim ronilačkim sposobnostima oceana. Maksimalna radna dubina od 6000 metara omogućuje mu izvođenje profila pune dubine u preko 98% svjetskih oceana čime se otvaraju nova područja za prikupljanje oceanografskih podataka. Također omogućuje da jedrilica generira do 1 čvora brzine prema naprijed, što olakšava rad u područjima s relativno velikom strujom. Patentirana, pasivna shema kompenzacije uzgona smanjuje količinu ulja koja se mora pretočiti, čime se štedi značajna energija. Na jednom kompletu baterija vozilo može prelaziti cijele oceanske bazene u misijama koje traju više od godinu dana. Tipični senzori uključuju vodljivost / temperaturu, kisikovu optodu i uređaje za fluorometar / optički povratni uređaj. Model je prikazan na slici 10.

#### ZNAČAJKE:

- Na temelju provjerene tehnologije Seaglider,
- Mala težina trupa od ugljičnih vlakana,

- Nema vanjskih pokretnih dijelova, što ga čini vrlo robusnim,
- Može se porinuti i oporaviti ručno s malih čamaca sa dva člana posade,
- Automatski daje procjene prosjeka dubine i površinske struje
- Operacija košta samo nekoliko dolara po prijeđenom kilometru,
- Dobiva profile visoke razlučivosti fizikalnih, kemijskih i bio-optičkih varijabli oceana,
- Može se upravljati bilo gdje u svijetu putem internetske veze i satelitske telemetrije
- Svi podaci s jednostavnih serijskih uređaja prenose se na baze na obali.



Slika 10. AUV Seaglider M6

(Izvor: <https://pdf.nauticexpo.com/pdf/kongsberg-maritime/seaglider-m6/31233-105711.html>)

## 6.2. AUV REMUS 6000 (KONGSBERG, NORVEŠKA, 2017. )

REMUS 6000 AUV osmišljen je u okviru suradničkog programa koji uključuje Pomorski oceanografski ured, Ured za pomorska istraživanja i Oceanografsku instituciju Woods Hole - WHOI, kao potporu autonomnim operacijama na dubokim vodama. REMUS 6000 AUV može se pohvaliti provjerenim softverskim i elektroničkim podsustavima s dubinskom ocjenom, izdržljivošću i korisnim opterećenjem koji omogućuju autonomni rad na do 6000 metara vode.

REMUS 6000 dizajniran je da omogući rad na dubinama od čak 6000 metara. Kompaktni dizajn zahtijeva minimalan prostor na palubi. Izmjenjive baterije na terenu pružaju dugo trajanje misije uz fleksibilnost u obavljanju kontinuiranih operacija.

REMUS 6000 se može konfigurirati tako da uključuje širok raspon senzora koje je odredio kupac. Njegov senzorski paket može se čak i konfigurirati na terenu kako bi ispunio specifične i raznolike zahtjeve misije.

Sustav za lansiranje i oporavak REMUS 6000 (LARS) dizajniran je za funkcioniranje s krme broda, ali ima mogućnost bočnog lansiranja kada se koristi s Kongsbergovim rotacijskim stolom. To je velika prednost za brodove za prilike i plovila na kojima se krma već koristi s drugim sustavima.

#### ZNAČAJKE:

- Maksimalna dubina rada 6000 metara (dostupna je i konfiguracija 4000 metara),
- Može izdržati misiju od 22 sata, ovisno o konfiguraciji brzine i senzora,
- Pogon-izravni pogon istosmjernog motora bez četkica na otvoreni propeler s 2 lopatice
- Raspon brzine-do 2,3 m/s (4,5 čvora) promjenjiva u dometu,
- 2 priključka, jedan za obalnu struju i jedan za kopnene podatke, bežična mreža pruža se preko antene leđne peraje,
- Softver-sučelje prijenosnog računala zasnovano na VIP-u za programiranje, obuku, analizu nakon misije, dokumentaciju, održavanje i rješavanje problema.

Standardne konfiguracije sustava

- Akustični doplerski strujni profiler / zapis brzine doplera (ADCP / DVL),
- Akustični modem (niska frekvencija),
- Inercijski navigacijski sustav (INS),
- Sonar za bočno skeniranje,
- Senzor dubine,
- Senzor vodljivosti i temperature,
- GPS / Wi-Fi / Iridium.

Operateri mogu pratiti napredak i status AUV-a putem zvučne veze. To također omogućuje slanje izmjena i dopuna plana misije u vozilo zajedno s ažuriranjem položaja ako je potrebno. Kad su AUV-ovi na površini, mogu komunicirati s Wi-Fi-jem ili radiom s operatorom. Opremljeni su i GPS prijammnicima za ažuriranje položaja IMU najtočnijim dostupnim informacijama. Model je prikazan na slici 11.



Slika 11. AUV Remus 6000

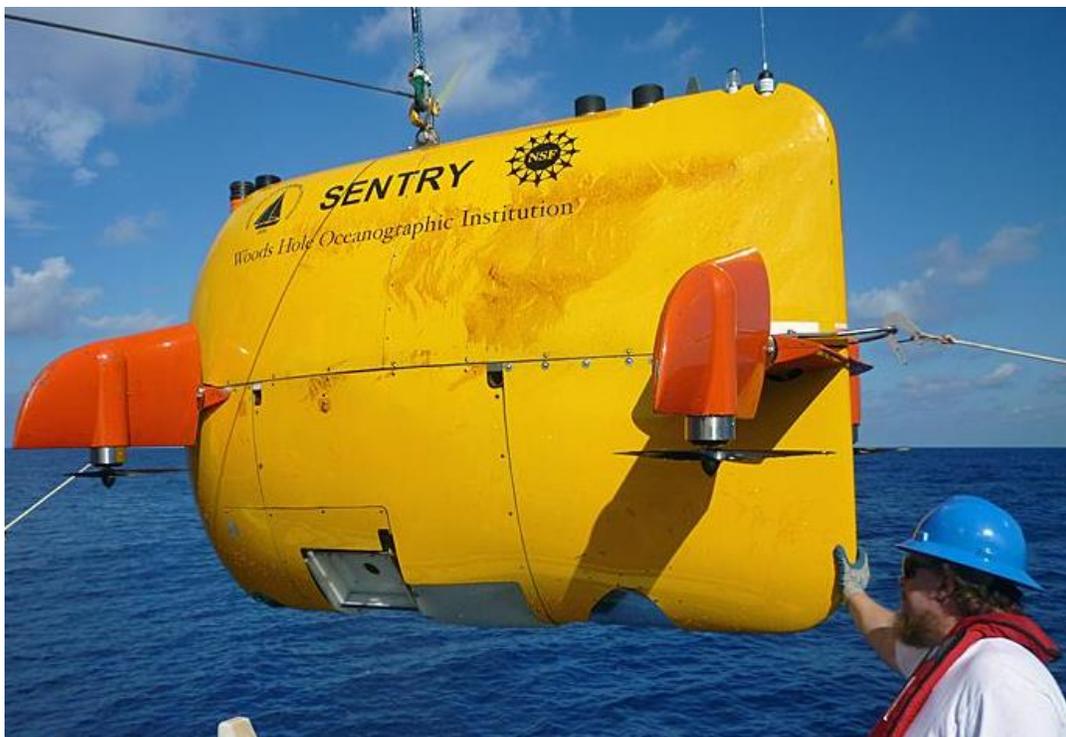
(Izvor: <https://www.hydroid.com/remus-6000-commercial-applications#auxiliary-equipment-tab>)

### 6.3. AUV SENTRY (USA, WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION, 2010.)

Sentry je dizajniran za operacije do dubine od 6 000 metara (19 685 stopa), s dizajnom koji naglašava ekstremnu upravljivost, praćenje dna, veliko i inovativno korisno opterećenje te brz tranzit do i od morskog dna. Sentry se može lako mobilizirati za upotrebu kao samostalno

vozilo na širokom spektru istraživačkih brodova. Sentry izrađuje batimetrijske, bočne, kemijske i magnetske karte morskog dna i sposoban je snimati visokokvalitetne digitalne fotografije u boji na raznim dubokim terenima, uključujući duž srednjeoceanskih grebena i na oceanskim rubovima, te u složenim postavkama kao što su hidrotermalni ekosustavi ventilacije i hladnog prodora.

Navigacijski sustav Sentryja koristi doplerski zapis brzine i inercijalni navigacijski sustav, potpomognut akustičkim navigacijskim sustavima (USBL). USBL sustav također pruža zvučne komunikacije, koje se mogu koristiti za dobivanje stanja vozila i status senzora, kao i za ponovno postavljanje vozila. Model je prikazan na slici 12.



Slika 12. AUV Sentry

(Izvor: <https://ocean.si.edu/ocean-life/auv-sentry>)

## 7. DIJELOVI AUTONOMNIH RONILICA

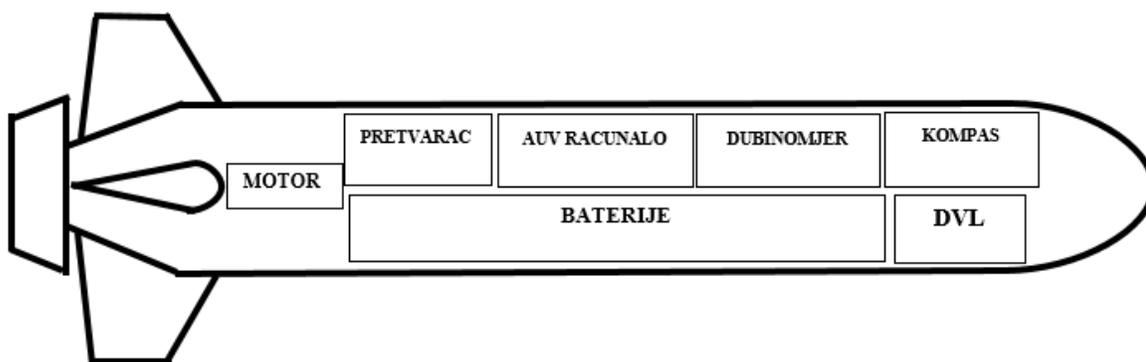
Misija za ronilicu se isplanira unaprijed na korisničkom računalu. Ta misija se šalje dalje na računalo na vozilo preko WiFi mreže, zatim se šalje komanda za pokretanje vozila.

**AUV računalo** se brine za sve elemente potrebne za upravljanje aktuatorima i regulacijom potrebnih veličina za izvršavanje zadatka. Računalo to izvodi pomoću ugrađenih senzora čija mjerenja služe za reguliranje veličina koje su bitne za dolaska do cilja, tj. slijedenje određene putanje.

**Dubinomjer** je senzor tlaka, uglavnom sa digitalnim izlazom, da bi se što više smanjio šum u mjerenju. Veličina koju daje dubinomjer bi se mogla zamijeniti akustičkim mjerenjem visine od dna iz DVL-a.

**DVL (eng. Doppler Velocity Log)** je sonarni sustav koji mjeri kretanje pod vodom. DVL emitira ultrazvučne snopove usmjerene prema dnu u raznim smjerovima. Vraćaju se odbijene zrake sa morskog dna. Budući da se DVL sonar nalazi u vozilu u pokretu, povratni odjeci nose promjenu visine tona; ovo je Dopplerov efekt. Kombinacija ovih očitavanja govori koliko se brzo vozilo kreće i u kojem smjeru.

**Baterije** su zaštićene od prenapunjenosti, prekomjernog pražnjenja i prekomjerne struje kroz sigurnosni, redundantni sklop. Nadzor punjenja i kontrole je integriran u bateriju, pa je punjenje relativno jednostavno. Primjerice, model Autosub 6000 je trenutno opremljen s četiri tlačno uravnotežene baterije koje daju autonomiju od 36 sati i dolet od 180 km. U vozilu postoji kapacitet da se to poveća na 12 baterija, s proporcionalnim povećanjem dometa i izdržljivosti (duži doleti mogući su pri manjim radnim brzinama). Autosub pokreću motor istosmjerne struje s istosmjernim pogonom (DC) i propeler s dvije oštrice. Na slici 12. su prikazani dijelovi autonomne ronilice.



Slika 13. Dijelovi autonomne ronilice

Obzirom na veličine koje vozilo prima, regulaciju možemo podijeliti u četiri skupine:

- Dubina ( horizontalni hidroplani),
- Kurs (vertikalni hidroplani, kormilo)
- Unaprijedna brzina ( stražnji propulzor),
- Odstupanje od zadane putanje.

Naime, u regulator dubine ulazi prva ulazna veličina, zadana dubina iz zadane misije, druga ulazna veličina, stvarna dubina iz dubinomjera te regulator utječe na položaj horizontalne hydroplane. U regulator kursa ulazi zadani kurs iz misije te stvarni kurs iz kompasa, te regulator utječe na vertikalne hydroplane. U regulator brzine ulazi zadana brzina iz misije, te stvarna brzina napredovanja iz DVL-a, nakon toga, regulator utječe na motor, ako je to potrebno. Kod odstupanja od zadane putanje, odgovorni su DVL te mjerenje brzine okomite na trajektoriju. Na odstupanje uglavnom djeluju vanjski poremećaji kao što su morske struje i na odstupanje se može djelovati preko vertikalnih hidroplana.

## 8. NAČIN RADA AUTONOMNIH RONILICA

Tijekom godina dizajniran je veliki broj AUV-ova za postizanje širokog spektra primjene na znanstvenim, trgovačkim i vojnim područjima. Za oceanografske studije, AUV-ovi su postali vrlo popularni za istraživanje, prikupljanje podataka i izradu 3D rekonstrukcija ili karata. U naftnoj i plinskoj industriji, AUV-ovi pregledavaju i popravljaju potopljenu infrastrukturu i također imaju veliki potencijal u zadacima pretraživanja, prepoznavanja i lokalizacije poput misija za oporavak crnih kutija zrakoplova. AUV-ovi se također koriste za sigurnosne zadatke kao što su inspekcija zaštite okoliša, nadzor, otkrivanje i odlaganje eksploziva i lov mina.

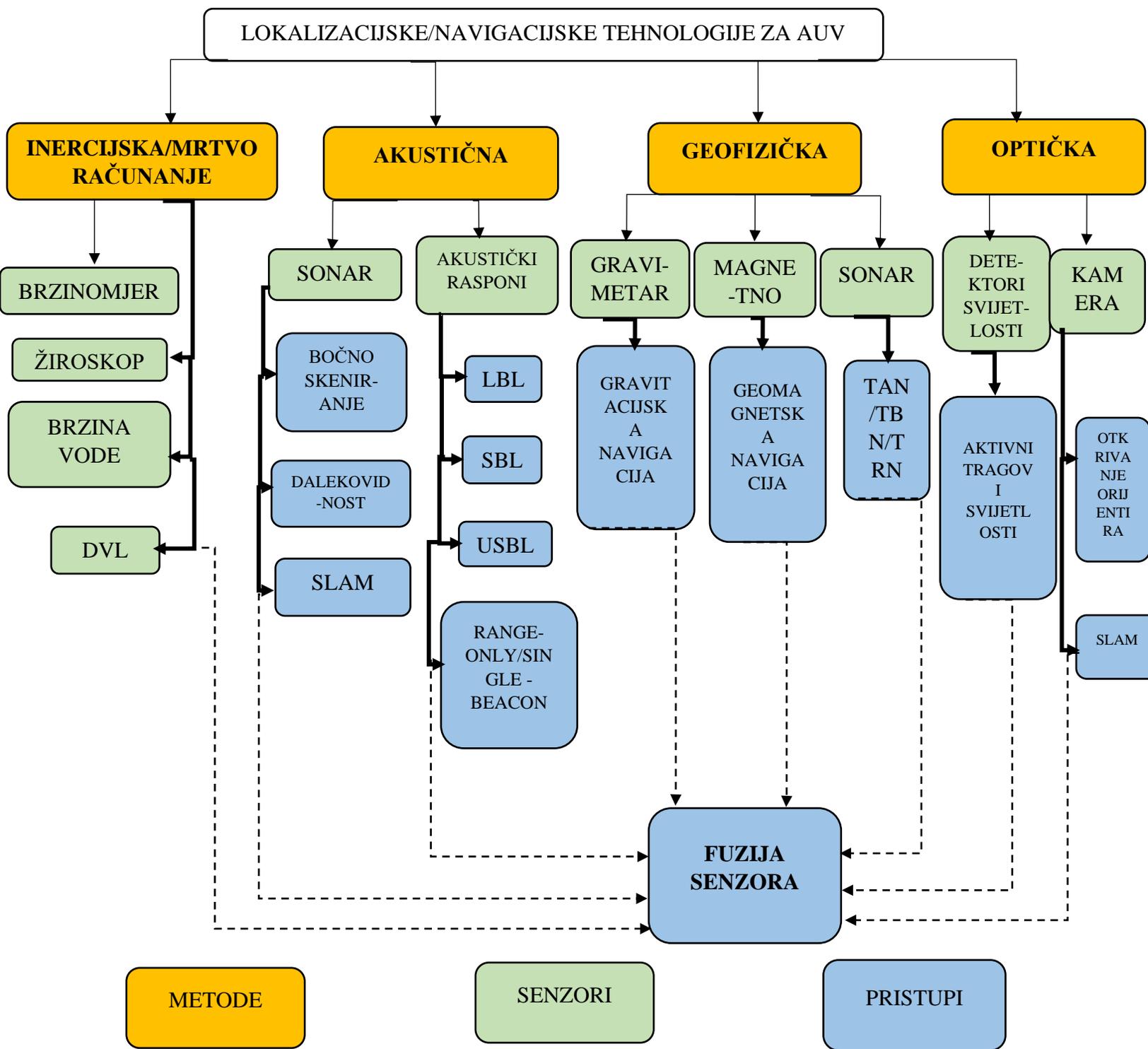
Dizajn, konstrukcija i kontrola AUV-a predstavljaju tako izazovan posao za inženjere koji se moraju suočiti s ograničenjima s kojima se ne susreću u drugim okruženjima. Iznad vode, većina autonomnih sustava oslanja se na radio ili komunikaciju sa širokim spektrom uz globalno pozicioniranje. U podvodnom okruženju, AUV se moraju oslanjati na akustičke senzore i komunikaciju. Dizajn i primjena novih tehnologija i algoritama za navigaciju i lokalizaciju AUV-a - posebno za suradnički rad - izvrsna je prilika za istraživanje.

Prije uspostave sheme suradnje za AUV-e, problem lokalizacije i navigacije mora se riješiti za svako vozilo u timu. Tradicionalne metode uključuju mrtvo računanje ( Dead-Reckoning ) i inercijalne navigacijske sustave (Inertial Navigation Systems). DR i INS neke su od najranijih utvrđenih metoda lociranja AUV-a. Ovi se sustavi oslanjaju na mjerenja brzine vode, brzine i ubrzanja vozila koja, nakon integracije, dovode do položaja AUV-a. Prikladni su za misije dugog dometa, a prednost im je što su pasivne metode, ne trebaju ni slati ni primati signale iz vanjskih sustava, što rezultira rješenjem imunim na smetnje. Bez obzira na to, njihov glavni problem je što se pozicija povećava tijekom vremena, što je obično poznato kao odstupanje od točnosti, kao rezultat različitih čimbenika, poput oceanskih struja i točnosti samih senzora, koji nisu sposobni osjetiti pomake nastale vanjskim silama ili učincima Zemljine gravitacije. Korištenje geofizičkih karata za usklađivanje mjerenja senzora alternativa je rješavanju pomaka točnosti inercijskih sustava. Ova metoda poznata je pod nazivom Geofizička navigacija (GN) i omogućuje izvršavanje dužih misija održavajući relativno malu pogrešku u položaju.

Posljednjih godina istraživači rade na novim alternativama za AUV lokalizaciju i navigaciju. Optičke tehnologije postale su vrlo popularne za robote i vozila u kopnenom ili zračnom okruženju, ali se suočavaju s teškim uvjetima u podvodnom okruženju koji su odgodili razvoj takvih tehnologija za AUV-ove. Kada podvodni uvjeti omogućuju pravilno širenje i otkrivanje svjetlosti, vizualno temeljeni sustavi mogu značajno poboljšati točnost procjene položaja i postići veću brzinu podataka od akustičkih sustava. Nedavni napredak u pogledu shema fuzije senzora i algoritama pridonosi razvoju hibridnih navigacijskih sustava, koji koristi prednosti različitih rješenja kako bi nadvladao svoje slabosti. Senzorski fuzijski modul poboljšava procjenu stanja AUV-a obradom i spajanjem dostupnih podataka senzora. Neki od uobičajenih senzora koji se koriste za njega su inercijski senzori INS-a, Doppler Velocity Loggers (DVL) i senzori dubine. U posljednje vrijeme mjerenja INS-a također se integriraju sa sustavima zasnovanima na zvuku / vidu kako bi se stvorilo rješenje koje će, osim smanjenja pomaka točnosti INS-a, u kratkim dometima imati visoku točnost pozicioniranja.

Nakon rješavanja problema samolokalizacije i navigacije, moraju se riješiti drugi izazovi kako bi se implementirao suradnički tim AUV-a. Budući da postoji potreba za razmjenom informacija između vozila, komunikacija je važno pitanje. Količina i veličina poruka ovisit će o korištenoj shemi suradnje, broju vozila i mogućnostima komunikacijskog sustava. Akustična izvedba ima bolju izvedbu od svjetlosne komunikacije u smislu dometa, ali ne i brzine prijenosa podataka. Također pati od mnogih drugih nedostataka kao što su mala propusnost, velika latencija i nepouzdanost.

Unatoč svojim zapaženim zaslugama na polju bežične mreže, radiokomunikacija je do danas imala vrlo malo praktičnih podvodnih aplikacija. Shema suradničke navigacije također je izvanredno pitanje koje treba razmotriti. Podvodno okruženje samo je po sebi složeno za navigaciju, a sada se veći broj vozila mora međusobno kretati. Ispravna formacija mora osigurati sigurnu plovidbu za svako pojedino vozilo. Budući da nema potrebe za interakcijom s okolinom, misije istraživanja jednostavnije su za provedbu i uspješno su izvedene za različite aplikacije, poput mapiranja ili pretraživanja i praćenja objekata. Intervencijske misije obično su teže zbog složenosti potrebnih manipulatora ili aktuatora. U oba slučaja, budući da je eksperimentalno postavljanje teško postići, mnogi se napori testiraju u simulacijskim okruženjima.



Shema 1. Lokalizacijske i navigacijske tehnologije za AUV

## **8.1. NAVIGACIJA I LOKALIZACIJA**

Navigacija i lokalizacija dva su najvažnija izazova za podvodnu robotiku. To su i dalje problemi za rješavanje mnogih aplikacija, poput suradničkih misija. DR i INS su tradicionalne metode za AUV lokalizaciju i navigaciju, ali imaju problema s smanjenjem točnosti poze tijekom vremena. Uz tradicionalne tehnologije, ovaj se problem u prošlosti rješavao akustičkim tehnologijama kao što su Long Baseline (LBL), Short Baseline (SBL) ili Ultra Short Short Baseline (USBL). Sustavi akustičkog pozicioniranja, međutim, zahtijevaju pažljivo umjeravanje brzine zvuka, jer oni pate od višesatnih dopler efekata i osjetljivosti na termokline; također imaju ograničen domet i točnost [1].

Geofizička navigacija (GN) također je rješenje za lokalizaciju vozila. Algoritmi podudarnosti poput TERrain COntour-Matching (TERCOM) i Sandia Inertial Terrain Aided Navigation (SITAN) relativno su novi, no trenutno se predlažu novi algoritmi. Glavno ograničenje GN sustava je potreba za geofizičkom mapom za usporedbu mjerenja sa senzora. Vizualni sustavi su trend za navigaciju vozila u kopnenim i zračnim okruženjima, ali postoji nekoliko problema povezanih sa širenjem i detekcijom svjetlosti u podvodnim okruženjima. Uz to, većina metoda zasnivanja vizualne autonomne navigacije ovisi o prisutnosti značajki na snimljenim slikama, koje je, čak i ako postoje, teško izvući zbog ograničenih uvjeta osvjetljenja. Posljednjih godina područje lokalizacije AUV prelazi sa starih tehnologija na dinamičnije pristupe koji zahtijevaju manje infrastrukture i nude bolje performanse. Ovaj odjeljak predstavlja istraživanje o tehnologijama lokalizacije i navigacije za jedno vozilo - uključujući različite metode, senzore i pristupe - u razumijevanju da se one mogu primijeniti u kolaborativnim shemama za više vozila.

### **8.1.1. Mrtvo računanje i inercijska navigacija**

Najjednostavnija metoda dobivanja položaja vozila u pokretu je integracijom njegove brzine u vremenu. Ova metoda je poznata kao mrtvo računanje. DR mora znati brzinu i smjer vozila, što se obično postiže kompasom i senzorom brzine vode. Glavni problem povezan je s

prisutnošću oceanske struje, jer će vozilu dodati komponentu brzine koju senzor brzine ne prepoznaje. Tada će na točnost metode jako utjecati, posebno kada vozilo plovi malom brzinom.

Inercijski senzori mogu se koristiti za poboljšanje točnosti navigacije i pouzdanosti metoda DR. INS se sastoji od tri međusobno ortogonalna akcelerometra poredana u žiroskopski referentni okvir.

Izmjerena ubrzanja integrirana su kako bi se dobili željeni podaci o brzini, položaju i položaju vozila. Činjenica da je inercijalna navigacija samostalna - niti emitira niti prima nikakav vanjski signal - jedna je od njenih najznačajnijih prednosti, čineći je krutim navigacijskim rješenjem neosjetljivim na smetnje ili zastoj. Međutim, poznato je da se pogreška u procjenama položaja povećava s vremenom i ovisi o točnosti korištenih senzora.

Budući da akcelerometri ne osjećaju gravitaciju, položaj vozila dobiven integriranjem mjerenja ubrzanja rezultirat će pogreškom. Žiroskopska pomicanja su također izvor grešaka koji mogu rezultirati značajnim neusklađenjima između okvira senzora i zemljopisno fiksnog referentnog okvira, uzrokujući navigacijske pogreške koje također s vremenom rastu. Korištenje sustava globalnog pozicioniranja (GPS) uobičajena je metoda koja se koristi za ispravljanje ovih pogrešaka. Međutim, da bi ispravio pogrešku nakupljenu od strane INS-a, vozilo mora izlaziti na površinu kako bi redovito dobivalo novo GPS mjesto, što može rezultirati gubitkom vremena i resursa. Integracija INS-a i GPS podataka također može biti složen proces, jer se ti sustavi temelje na potpuno različitim načelima.

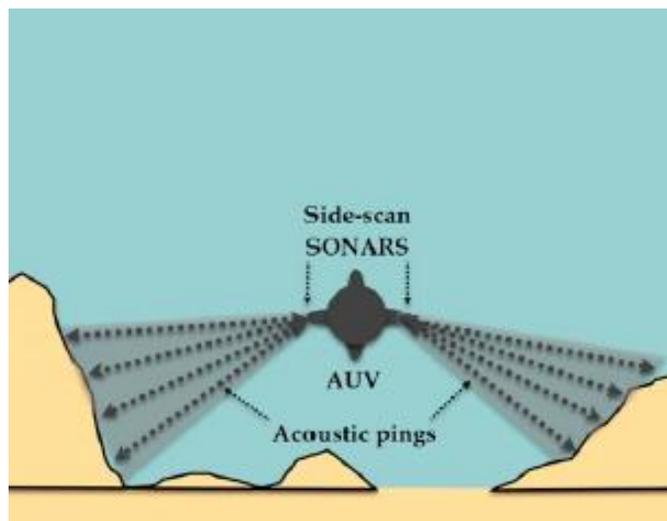
Čak i kad bi instrumenti bili savršeni, procjene INS-a rezultirale bi pogreškom. Žiroskopski referentni okvir poravnan je s referentnim elipsoidnim modelom zemlje. Referentni elipsoid približno odgovara obliku zemlje, a posebno srednjoj razini mora. Ako bi se masa Zemlje homogeno raspodijelila unutar elipsoida, gravitacijski vektor bio bi normalan u odnosu na referentnu površinu elipsoida. Međutim, zbog nehomogene raspodjele zemljine mase, gravitacijski vektor može imati značajne komponente tangencijalne na referentnu površinu elipsoida (poznate kao vertikalni otkloni). Budući da INS ne može razlikovati tangencijalne komponente zemljine gravitacije i horizontalno ubrzanje vozila, ovi gravitacijski poremećaji uzrokuju pogreške u procjeni brzine i položaja INS-a.

### 8.1.2. Akustična navigacija

U usporedbi s drugim signalima, poput radio i elektromagnetskih, akustički se signali šire u vodi i mogu dostići znatne udaljenosti. To omogućuje upotrebu zvučnih transpondera za navigaciju AUV-om. Neke od navigacijskih metoda temeljenih na zvučnim signalima su zvučna navigacija i raspon (SONAR) i zvučni opseg.

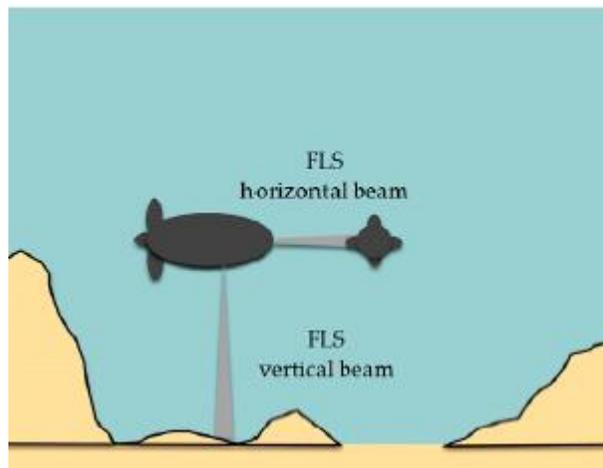
#### SONAR

Postoje različite metode za korištenje SONAR za AUV navigaciju. Dvije osnovne konfiguracije su bočno skeniranje SONAR i SONAR koji gleda prema naprijed (FLS). Obje se koriste za otkrivanje objekata koji mogu biti: promjene morskog dna, stijene, druga vozila, pa čak i morske vrste. Kada AUV radi, on mora biti u stanju otkriti te objekte kako bi ažurirao svoju navigacijsku putanju i izbjegao sudare, što je poznato kao izbjegavanje prepreka. Za SONAR bočno skeniranje, pretvarač skenira bočno kad je priključen na AUV, kao što je prikazano na slici 14. Niz akustičnih zvukova (Acoustic pings) se prenosi i prima, vrijeme povratka i brzina zvuka u vodi koriste se za utvrditi postojanje obilježja smještenih okomito na smjer kretanja.



Slika 14. AUV opremljen sa dva bočna skeniranja zvučne navigacije (SONAR)  
(Izvor: "Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions")

FLS koristi pristup reflektoru, upravljajući sonarnim snopom skenirajući okolinu ispred broda i kontinuirano strujeći sondiranje. FLS se mogu postaviti na različita mjesta u vozilu, kao što je prikazano na slici 15, kako bi se osiguralo da AUV može otkriti prepreke iz različitih smjerova.



Slika 15. SONAR usmjeren prema naprijed (FLS) postavljen u vertikalnoj i vodoravnoj orijentaciji

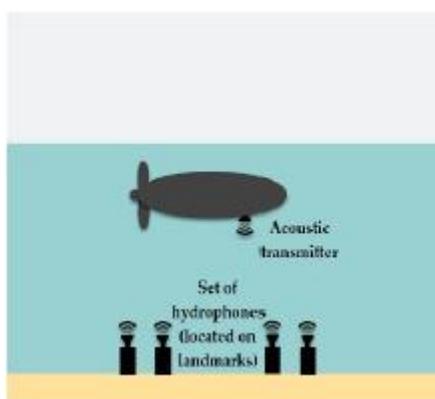
(Izvor: "Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions")

Mogu se izraditi dvodimenzionalne slike koje promatraju ocean i značajke na njemu. Te slike, iako pokazuju što postoji na oceanu ili morskom dnu, ne sadrže informacije o lokalizaciji ni relativne ni globalne.

### Akustični raspon

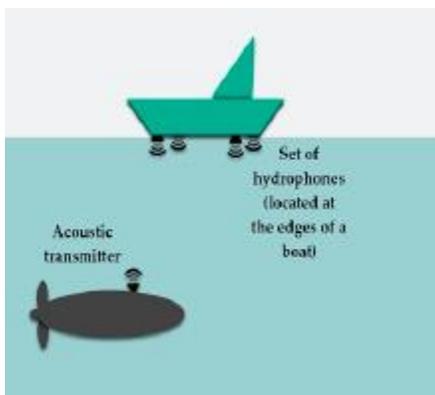
U sustavima pozicioniranja s akustičkim rasponom, AUV-ovi su opremljeni zvučnim odašiljačem koji uspostavlja komunikaciju s nizom hidrofona. Znajući brzinu širenja zvuka u podmorju, udaljenost između AUV i hidrofona može se izračunati kroz vrijeme širenja akustičkog signala. Zatim se geometrijskim metodama može dobiti mjesto za AUV u odnosu na skup hidrofona. Jedna od razlika između akustičnih sustava je raspored hidrofona. U LBL sustavima hidrofoni su fiksni unutar strukture ili bilo koje druge poznate podvodne točke - poznate kao orijentir. Duljina osnovne crte može biti do stotinu metara. U SBL i USBL

sustavima hidrofoni se postavljaju na plutače ili drugo vozilo na površini, čak i na drugi AUV. Za SBL sustave osnovna duljina mjeri se u metrima i djeluje mjerenjem relativnog položaja između referentnog izvora zvuka i prijemnog niza; u međuvremenu je početna vrijednost za USBL sustave u decimetrima, a relativno mjesto od hidrofona do pokretnog cilja izračunava se mjerenjem faznih razlika između akustičkih elemenata. U oba aranžmana, hidrofone uglavnom lociraju Globalni navigacijski satelitski sustavi. Na slikama 16, 17 i 18, sve tri konfiguracije za akustičku lokalizaciju.



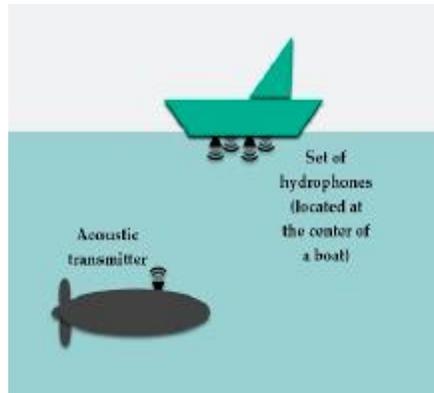
Slika 16. Duga osnovna linija

Sustavi akustičke lokalizacije:



Slika 17. Kratka osnovna linija

Izvor: "Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions")



Slika 18. Ultra kratka osnovna linija

Range-only također poznata kao Single-beacon lokalizacija je još jedna alternativa tradicionalnim sustavima akustičke lokalizacije koja je posljednjih godina privukla pažnju. Koncept pozicioniranja samo s dometom/s jednim svjetlom može se podijeliti u dvije skupine ovisno o načinu na koji se koristi: (i) kao navigacijsko pomagalo za vozilo u pokretu ili (ii) lokalizacija nepokretnog ili pokretnog cilja. Sve ove metode koriste skup raspona između cilja i različitih statičkih čvorova, poznatih kao sidreni čvorovi. Ti se rasponi obično mogu dobiti upotrebom vremena leta s obzirom na brzinu zvuka u vodi. Zatim se nepoznati problem pozicije podvodnog cilja može riješiti pomoću trilatacije, gdje su općenito potrebne tri ili više točaka u 2D dimenzijama i najmanje četiri točke u 3D scenarijima.

### 8.1.3. Geofizička navigacija

Kako bi se izbjegao problem nanosa INS-a i troškovi infrastrukture za podvodne akustičke sustave, povoljna je alternativa geofizička plovidba (GN). Ovi pristupi uspoređuju mjerenja senzora sa geofizičkim parametrima poput batimetrije, magnetskog polja i gravitacijske anomalije sadržane na karti. Navigacijska tehnologija temeljena na GN-u može ispraviti INS pogrešku u odnosu na duže vrijeme, bez potrebe da se AUV iznese na površinu [1]. Navigacijski algoritam procjenjuje pogreške u navigaciji koje se šalju navigacijskom sustavu vozila da ispravi svoj položaj. Pružanjem neprekidne korekcije, ova metoda omogućuje vozilu da održava potrebnu točnost položaja bez potrebe za vanjskim sensorima, poput GPS-a. Glavna ograničenja

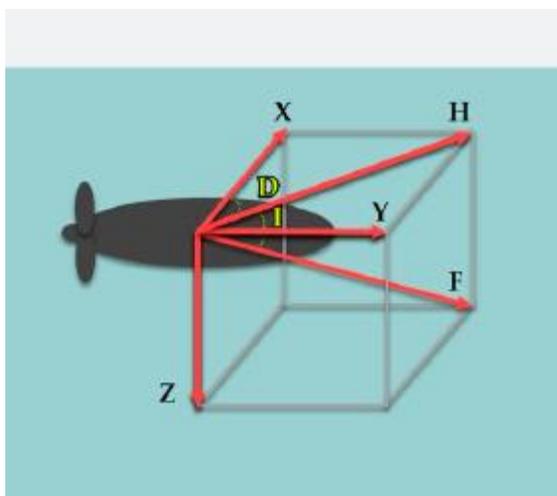
GN-a su potreba za mapom dostupnom prije misije i računaska složenost traženja korelacije unutar karte i procjena senzora. S druge strane, ključna prednost GN-a u odnosu na druge tehnologije je veliko radno područje kada se koristi. S obzirom na kartu, GN pruža ograničenu pogrešku lokalizacije s točnostima ovisnim o navigaciji DR, rezoluciji karte i osjetljivosti geofizičkog parametra za promjenu stanja vozila.

### Gravitacijska navigacija

Zemljino gravitacijsko polje daleko je od toga da je jednoliko i, za INS, učinci promjene lokalnog gravitacijskog polja ne mogu se razlikovati od ubrzanja vozila. Jedna od alternativa je nadopunjavanje INS-a gravitacijskom navigacijom. Istodobno kada INS procjenjuje položaj vozila, gravimetar gravitacijskog senzora ili gradiometar - mjeri gravitaciju i gravitacijski gradijent tamo gdje se nalazi AUV. Gravimetar mjeri gravitacijsku anomaliju ili odstupanje u veličini vektora gravitacije u odnosu na nominalni model zemlje. Gradiometar je par akcelerometara s paralelnim ulaznim osima na fiksnoj osnovnoj liniji koji mjere gravitacijske gradijente ili brzinu promjene gravitacije s obzirom na linearni pomak. Razlika u izlazu akcelerometra isključuje linearno ubrzanje vozila, ali sadrži gradijent gravitacije preko osnovne linije. Na temelju položaja i mjerenja iz senzora, baza podataka traži najbolje priljezanje gravitacije i gravitacijskog gradijenta, a zatim će se upotrijebiti optimalni odgovarajući položaj za ispravljanje pogreške položaja INS-a.

### Geomagnetska navigacija

Geomagnetska navigacija oslanja se na magnetske senzore, a njena suština je postupak postavljanja skupova dviju točaka (FTPS), gdje se za podudaranje koristi morska geomagnetska karta. Podržani geomagnetski elementi imaju mnoštvo značajki koje se mogu primijeniti za podudaranje, poput intenziteta ukupnog polja  $F$ , horizontalne komponente  $H$ , sjeverne komponente  $X$ , istočne komponente  $Y$ , vertikalne komponente  $Z$ , deklinacije  $D$ , nagiba  $I$ , geomagnetski gradijent, i tako dalje. Te su značajke prikazane na slici 19.



Slika 19. Značajke geomagnetske karte

(Izvor: "Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions")

### Batimetrijska navigacija

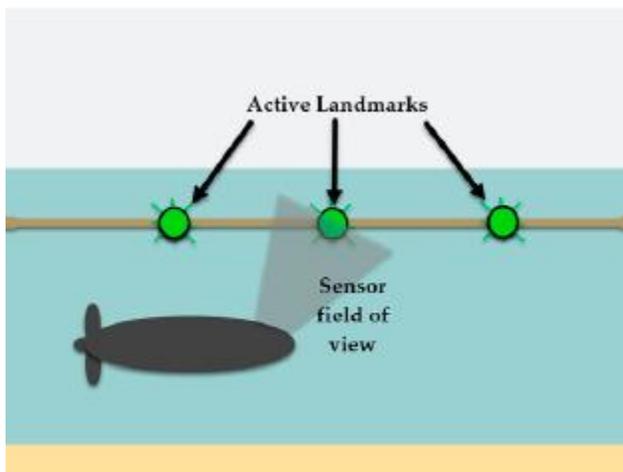
Jednostavna upotreba batimetrijskih karata za AUV navigaciju je upotreba izobata. Izobata je zamišljena krivulja koja povezuje sve točke koje imaju istu dubinu ispod površine. Kontroler može biti dizajniran za AUV da prati izobatu sa samo lokalizacijskom opremom niske razine - kao što je echosounder - i osigurava da nikada ne napusti unaprijed definirano područje. Terrain-Referenced Navigation (TRN), Terrain-Aided Navigation (TAN), i Terrain-Based Navigation (TBN) slični su pristupi za GN. Ovi sustavi procjenjuju pogreške i u glavnom navigacijskom sustavu - poput INS-a - i u bazi podataka o terenu, pružajući vrlo preciznu procjenu položaja u odnosu na digitalnu bazu terena. TBN djeluje korelirajući stvarno preljevanje profila terena s podacima o terenu pohranjenim u bazi podataka terena.

#### **8.1.4. Optička navigacija**

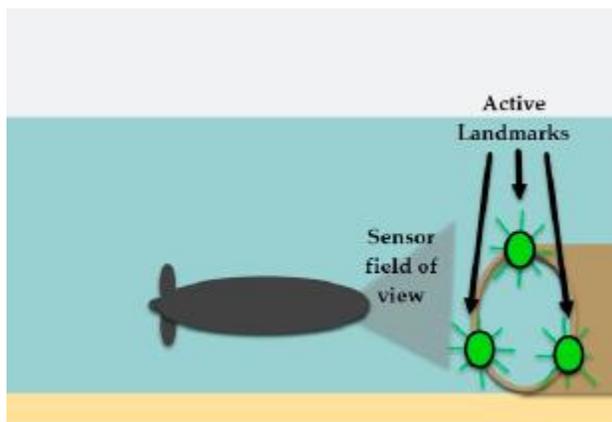
Optičke tehnologije su relevantna opcija za pružanje informacija o okolišu. Ti se sustavi mogu implementirati ili s kamerom ili s nizom optičkih senzora. Unatoč lošem propuštanju

svjetlosti kroz vodu, što rezultira ograničenim rasponom za sustave za snimanje, u tu se svrhu proučavaju različiti algoritmi i tehnike. Na slikama 20.i 21. prikazana su dva primjera optičkih sustava; pri čemu AUV mora otkriti i pratiti aktivne orijentire unutar strukture (a) ili identificirati uzorak napravljen s aktivnim oznakama da bi se kretao kroz njega (b).

Optički sustavi za lokalizaciju na temelju aktivnih orijentira:



Slika 21. AUV slijedi niz aktivnih orijentira



Slika 20. AUV locira ulaz pomoću rasporeda aktivnih markera

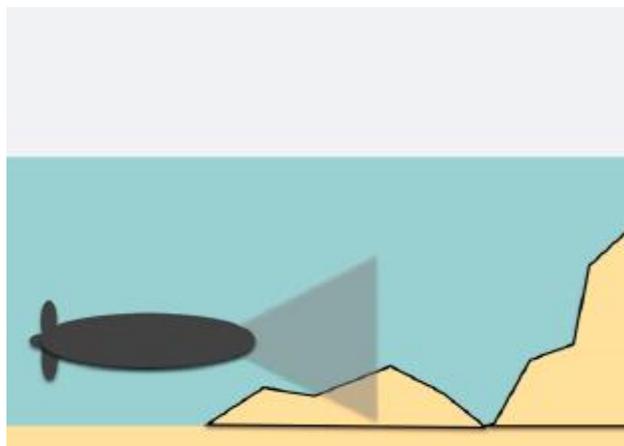
Izvor: "Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions"

Iako su ovi sustavi pokazali visok odziv, za njihovo provođenje potrebna je unaprijed instalirana infrastruktura. Alternativni pristup je uporaba kamere ili seta kamera za prepoznavanje značajki u okolini ili ciljeva za misiju AUV.

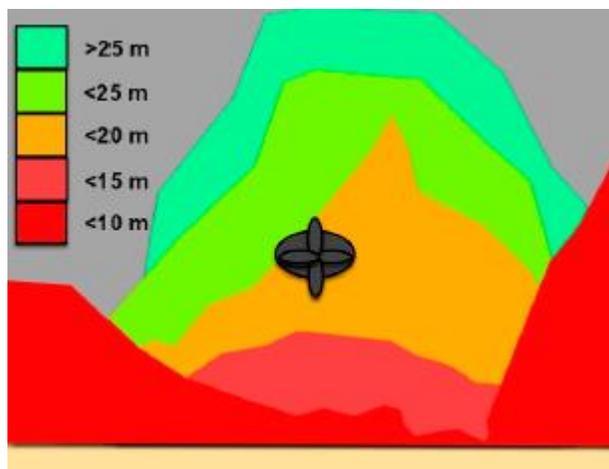
### Istovremeno lociranje i mapiranje (SLAM)

Simultano lociranje i mapiranje (SLAM) tehnika je koja se sastoji od toga da se mobilni robot, kao što je AUV, smjesti na nepoznato mjesto u nepoznatom okruženju i omogući izradu dosljedne karte okoliša i određivanje njegovog položaja unutar karte. Na slikama 21.i 22. predstavljeno je SLAM rješenje gdje je AUV opremljen senzorom za istraživanje okoliša radi stvaranja njegove digitalne rekonstrukcije. Kodovi u boji mogu se koristiti za prikaz informacija poput udaljenosti između vozila i prepreka.

Istovremena lokacija i mapiranje (SLAM):



Slika 22. AUV opremljen senzorom za mapiranje njegove okoline



Slika 23. Digitalna rekonstrukcija okoliša

(Izvor: “Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions”)

## 8.2. FUZIJA SENZORA

Postoje dvije glavne sheme za fuziju senzora: lagano spojeni (LC) i čvrsto povezani (TC). Osnovna razlika su podaci koje dijele senzori. U LC shemi, rješenje za položaj ili orijentaciju AUV dobiva se za svaki senzor pojedinačno, a zatim se miješa pomoću filtra - kao što je Kalmanov filter (KF) - da bi se dobilo preciznije i pouzdanije rješenje. U TC shemi, sirova mjerenja senzora obrađuju se izravno na filtru kako bi se prevladali problemi kao što su loša kvaliteta signala ili ograničena pokrivenost zahvaljujući mogućnostima filtra da predvidi pozu vozila. U ovom je slučaju potreban robusniji filter pa se obično koriste inačice KF-a, poput EKF-a ili UKF-a. Odabir filtra neophodan je za postizanje boljeg rješenja za pozu vozila, a osim usvojenog pristupa fuziji senzora, moraju se uzeti u obzir i točnost, numerička učinkovitost i računaska složenost.

## **9. PODVODNA LASERSKA MREŽA SENZORA: NOVI PRISTUP ŠIROKOPOJASNOJ KOMUNIKACIJI U PODMORJU**

Danas su zemaljske bežične senzorske mreže već u velikom napretku, međutim podvodna senzorska mreža i dalje ima neke poteškoće. U početku se podmorsko istraživanje temeljilo na pojedinačnom podmorskom robotu. Učinkovitost istraživanja u takvom pristupu vrlo je niska i pojedinom robotu je teško istražiti dano more. Da bi se poboljšala učinkovitost istraživanja u podmorskom okruženju, multi-roboti moraju surađivati u istraživanju mora. Kada više robota međusobno surađuju u istraživanju podmorja, senzori u prvom robotu komunicirat će sa sensorima u drugom robotu. Svi ti senzori zajedno sastavit će podvodnu mrežu senzora. Smatra se da ova mreža podvodnih senzora omogućuje korištenje u prikupljanju oceanografskih podataka, praćenju onečišćenja, istraživanju mora i taktičkom nadzoru.

U nastavku je predstavljena nova širokopojasna podvodna senzorska mreža koja se temelji na plavo-zelenom laseru, sa kojom se može komunicirati u velikom rasponu [12].

### **9.1. PODVODNA MREŽA AKUSTIČKIH SENZORA**

Akustična komunikacija je razvijena za podvodnu mrežu od Drugog svjetskog rata. Na primjer, Georgia Institute of Technology, Massachusetts Institute of Technology, University of Princeton i mnoga druga sveučilišta već su razvili neke podvodne mreže akustičkih senzora. Međutim, na podvodni zvučni signal utječu gubici puta, buka, višestruki put, doplerovsko širenje i promjenjivo i zakašnjelo širenje. A smjer podvodne akustične komunikacije također utječe na akustičnu vezu, što znači da različiti smjer širenja ima različite karakteristike širenja, posebno s obzirom na vremensku disperziju, širenje više staza i varijaciju kašnjenja. Stoga je podvodni akustični kanal privremeni i prostorni varijabilni sustav, koji raspoloživu širinu pojasa čini ograničenom i ovisnom o opsegu i frekvenciji.

U nastavku su navedeni neki nedostatni faktori koji utječu na akustičnu komunikaciju kako bi se utvrdili izazovi koje podvodni kanal predstavlja za podvodne senzorske mreže [12].

- Veliko kašnjenje

Brzina širenja signala u podvodnom akustičnom kanalu je oko  $1,5 \times 10^3$  m / sec, što je pet reda veličine niže od brzine radio širenja ( $3 \times 10^8$  m / sec). Veliko kašnjenje širenja ozbiljno smanjuje propusnost sustava, a također određuje nestabilnost u sustavu podvodne upravljačke mreže.

- Ograničena širina pojasa

Zvučni opseg pod vodom je vrlo mali zbog apsorpcije, tako da većina akustičnih komunikacijskih sustava radi ispod 30KHz. Kao rezultat, širina pojasa podvodnih akustičnih kanala koji rade na nekoliko kilometara iznosi oko nekoliko desetaka kilobita po sekundi, dok sustav kratkog dometa preko nekoliko desetaka metara može doseći stotine kbps.

- Velika brzina pogrešaka u bitovima

Zbog gubitka putanje, blijeđenja višestrukih staza, širenja Dopplera i buke (od čovjeka i okoline) u podvodnom akustičnom kanalu, velika je brzina pogrešaka u podvodnom akustičnom kanalu, koji je reda veličine  $10^{-2}$ -  $10^{-5}$ . Kako bi se spriječile ozbiljne pogreške u komunikaciji, moraju se usvojiti posebne tehnike ARQ (Automatic Repeat Request) i FEC (Forward Error Correction), koje poboljšavaju složenost mreže podvodnih akustičkih senzora.

- Velika potrošnja energije

Snaga koja se troši u podvodnoj akustičnoj komunikaciji veća je nego u kopненоj radio komunikaciji, jer se u složenoj obradi signala na prijamnicima troši više snage kako bi se nadoknadila oštećenja kanala.

Pod utjecajem gore navedenih čimbenika, trenutna mreža podvodnih akustičkih senzora pruža samo ograničenu komunikaciju za različite primjene, koja može ostvariti informacijsku komunikaciju između različitih čvorova senzora bez ikakve kvalitete usluga. Istodobno, gore navedeni čimbenici uzrokuju da je učinkovitost podvodne mreže akustičkih senzora vrlo mala, a složenost protokola visoka.

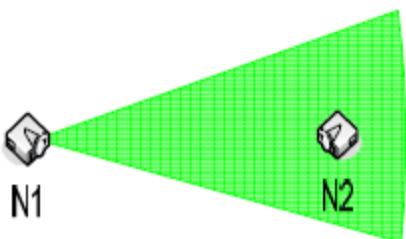
## **9.2. PODVODNA MREŽA LASERSKIH SENZORA**

Kako bi se prevladali nedostaci podvodne mreže akustičkih senzora, predstavljen je novi pristup mreži podvodnih senzora. Nedavno su podvodne bežične senzorske mreže (UWSN) bile svjedoci značajne pozornosti kako akademske zajednice tako i industrije u istraživanju i razvoju, zbog sve većeg broja aplikacija za širok spektar svrha, uključujući komercijalne, znanstvene, ekološke i vojne. Neke od glavnih primjena uključuju praćenje onečišćenja, taktički nadzor, upozorenja na tsunami i istraživanje na moru.

### **9.2.1. Plavo-zeleni laser u podvodnoj komunikaciji**

Većina lasera ne može prodrijeti kroz more jer ga mora apsorbirati, ali plavo-zeleni laser (duljina vala je oko 470 ~ 570nm) ima minimalnu energiju koja blijedi u moru, čija brzina blijedenja iznosi oko 0,155 ~ 0,5db / m. Stoga se plavo-zeleni laser može širiti od nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara u moru, a za ovu značajku plavo-zelenog lasera u moru kaže se da ima efekt prozora. Na temelju efekta prozora plavo-zelenog lasera razvijeni su neki sustavi za podmornicu. U tim komunikacijskim sustavima plavo-zeleni laser je kolimatizirana laserska zraka koja bi trebala biti usmjerena na podmornicu kada pošiljatelj pokušava komunicirati sa podmornicom.

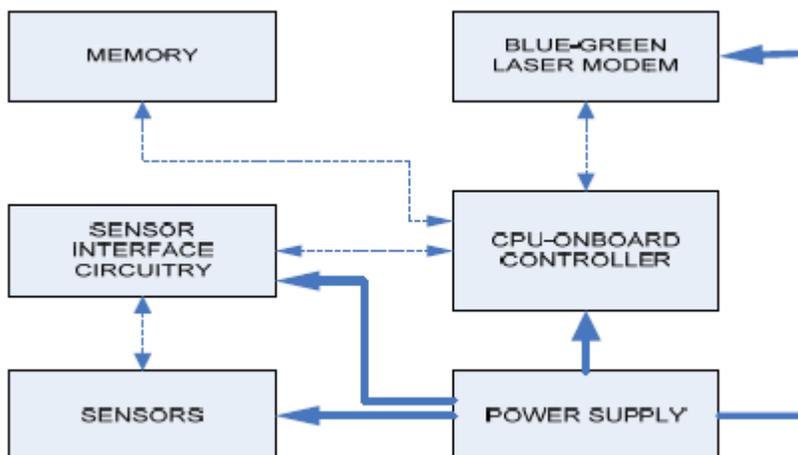
Upotreba plavo-zelenog lasera predstavljena je kao novi komunikacijski pristup za podvodnu senzorsku mrežu. Budući da su čvorovi senzora u moru uvijek u dinamici, teško mogu ciljati jedni druge. Predloženo je da se ne koriste kolimatizirane laserske zrake, nego difuzne laserske zrake za podvodnu komunikaciju. Na primjer, kada je difuzni kut 30°, difuzna laserska zraka može pokriti veliko područje. Čak i kada čvor prijemnog senzora prolazi malu udaljenost, i dalje može primiti komunikacijski signal. Proces slanja i primanja podvodne mreže plavo-zelenog laserskog senzora može se vidjeti na slici 24.



Slika 24. Proces slanja i primanja podvodne mreže plavo-zelenog laserskog senzora  
 (Izvor: Xiaohu Ge, *Underwater Laser sensor network: A New Approach for Broadband Communication in the Underwater*, January 2006.)

### 9.2.2. Arhitektura podvodnog laserskog senzora

Tipična unutarnja arhitektura čvorova u podvodnoj mreži akustičkih senzora koristi se za referencu, a zatim na slici 25 prikazujemo unutarnju arhitekturu čvora u podvodnoj mreži plavo-zelenih laserskih senzora. Sastoji se od senzora (Sensors), sklopa sučelja senzora (the sensor interface circuitry), memorije (memory), napajanja (power supply), CPU-a i plavo-zelenog laserskog modema (blue-green laser modem). CPU podatke dobiva u senzoru putem sklopa sučelja senzora, a zatim CPU može pohraniti podatke u memoriji, obrađivati podatke unutar CPU-a i slati / primiti podatke upravljajući plavo-zelenim laserskim modemom.



Slika 25. Interna arhitektura čvorova u podvodnoj mreži plavo-zelenih laserskih senzora  
 (Izvor: Xiaohu Ge, *Underwater Laser sensor network: A New Approach for Broadband Communication in the Underwater*, January 2006.)

### Sklop protokola za podvodnu mrežu laserskih senzora

Skup protokola za podvodnu mrežu laserskog senzora trebao bi se sastojati od funkcionalnosti fizičkog sloja, sloja podatkovne veze, sloja mreže, transportnog sloja i aplikacijskog sloja. S obzirom na kritično podvodno okruženje, mreža podvodnih laserskih senzora razlikuje se od kopnene mreže senzora. Skup protokola također treba uključivati ravninu upravljanja energijom, ravninu upravljanja 3D topologijom, ravninu upravljanja QoS-om i mobilno upravljanje.

U ovoj je arhitekturi ravnina upravljanja energijom odgovorna za mrežne funkcionalnosti usmjerene na minimiziranje potrošnje energije. Ravnina za upravljanje 3D topologijom odgovorna je za upravljanje i podešavanje topologije podvodne mreže prema zahtjevima iz podvodnog istraživanja. Uprava QoS-a odgovorna je za kvalitetu prijenosa podataka, što bi trebalo osigurati da su prenesene informacije zadovoljene za zahtjev aplikacije. Mobilno upravljanje odgovorno je za pomicanje čvora senzora, što bi trebalo osigurati razumno kretanje podvodnog čvora senzora. Drugim riječima, čvor senzora može se automatski pomicati kako bi prevladao izlet uzrokovan strujom, a čvor senzora osigurat će da laserska komunikacija ne može biti prekinuta zbog pokretljivosti. S eksploatacijom u podmorju i razvojem komunikacijskih tehnika, podvodna senzorska mreža postupno postaje žarišna točka u bežičnoj komunikaciji. Predložen je novi pristup mreži podvodnih senzora koji se temelji na plavo-zelenom laseru [12].

### **9.3. OPĆI KOMUNIKACIJSKI SUSTAV I NJEGOV PROTOKOL**

Općeniti dvostruki komunikacijski sustav sastoji se od tri dijela: primopredajničke jedinice, korisničkog sučelja i komunikacijskog kanala. Prijemnik je kombinacija odašiljača i prijemnika. U slučaju RF komunikacijskog sustava, osnovni opseg signala modulira visokofrekventni nosač kako bi se ugradile informacije za prijenos, a na kraju prijemnika signal nosača se demodulira da bi se obnovili ugrađeni podaci.

Svjetlost je također sastavni dio EM spektra poput radio vala, ali ima frekvenciju u opsegu THz (1 Terahertz = 1 bilijun ciklusa u sekundi) i također djeluje kao nosač sa ugrađenim informacijama, ali se trenutno ne može modulirati poput RF nosača vala jer ne postoji optički

prijemnik za obradu signala frekvencije THz. Modulacija svjetlosti može se izvesti na mnogo načina poput fazne modulacije pomoću interferometra, modulacije intenziteta impulsne pozicije (engl. Pulse position modulation , PPM) itd; ali modulacija intenziteta je najistaknutija modulacijska shema koja se koristi u laserskoj komunikaciji za slobodni prostor i podvodnu komunikaciju. Ponekad se sinusoidni nosač sa ugrađenim podacima izravno koristi za moduliranje intenziteta lasera, a na detektoru informacija opterećeni nosač može se reproducirati i dalje demodulirati ili obraditi kao uobičajena RF operacija. No signal osnovnog opsega nakon digitalizacije može se koristiti izravno za modulaciju lasera bez postavljanja na sinusoidni nosač, poznat kao OOK (tipka za isključivanje). Način komunikacije (asinkroni ili sinkroni) također igra vrlo važnu ulogu u digitalnoj komunikaciji . Sinkrona komunikacija je brža i potrebni su impulsi sinkronizacijskog sata za sinkronizaciju odašiljača i prijemnika, a uglavnom se koristi za žičnu komunikaciju.

Asinkrona komunikacija je malo sporija od sinkrone, ali pojednostavljuje probleme složene sinkronizacije između odašiljača i prijamnika, stoga je prikladna za bežičnu i žičnu komunikaciju. Najčešći protokol za asinkronu komunikaciju je RS 232. RS 232 je standardno sučelje koje je odobrilo EIA (Electronic Industries Association) za povezivanje serijskih uređaja, određuje napone signala, vrijeme signala, funkciju signala, protokol za razmjenu informacija i mehaničke priključke. Kako bi se osigurala pouzdana komunikacija i omogućilo međusobno povezivanje opreme različitih proizvođača, EIA je 1960. godine postavila standard povezivanja RS-232.

### **9.3.1. Opis sistema**

Optički primopredajni sustav sastoji se od lasera frekvencijski udvostručene diode (DPSSL) koji emitira na 532 nm s procesorskom elektroničkom jedinicom kao optičkim odašiljačem i poluvodičkim detektorom s procesorskom jedinicom kao što je prijemnik. Laserska zraka se prenosi nakon refleksije od dva zrcala za podešavanje postavljena neposredno nakon lasera, a konačni je napravljen da prolazi kroz kolimator snopa (5X) za kontrolu divergencije laserskog zraka i veličine mrlje na prijemniku. Da bi se simulirala podvodna komunikacija u laboratoriju, izrađuje se staklena vodena ćelija W X H X L. Duljina puta od 10

m između dva primopredajnika postiže se nakon preklapanja više zraka u vodenoj ćeliji. Dio za stvaranje turbulencije se sastoji od motora za usitnjavanje vode.

### Jedinica za obradu elektronike

Elektronički modul odašiljača sastoji se od pretvarača razine praćenog međuspremnikom kako bi razina RS 232 signala bila kompatibilna s TTL signalom kojim laser upravlja. Na prijammniku izlaz detektora prolazi kroz komparator kako bi se nadoknadilo slabljenje laserskog snopa, a nakon toga slijedi pretvarač razine kako bi invertirani TTL signal bio usklađen s razinom RS 232.

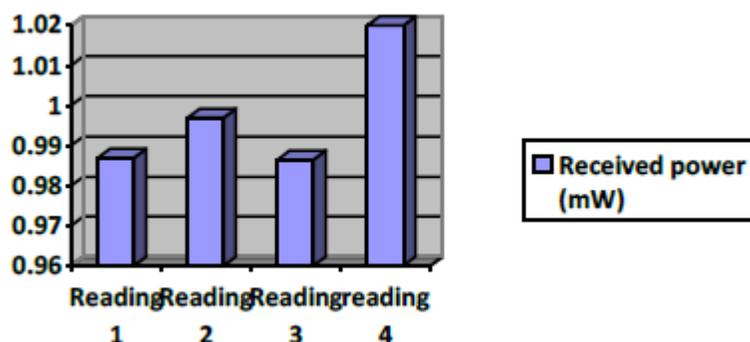
### **9.3.2. Način rada**

Kako dizajnirani sustav radi u načinu dvostranog ručnog drmanja, oba sučelja primopredajnika (računala) postavljena su na istu brzinu prijenosa podataka i uobičajene formate paketa. Odabir brzine prijenosa ovisi isključivo o stabiliziranoj brzini uključivanja i isključivanja lasera. Stabilizirana brzina laserskog uključivanja i isključivanja označava broj nedostajućih / izobličenih impulsa u sekundi pri određenoj brzini i dodaje stopi pogrešaka bitova (BER). Uobičajeno je primijetiti da laser općenito podržava nižu stabiliziranu brzinu uključivanja i isključivanja u odnosu na zadanu brzinu. Dizajnirani sustav može podržavati brzine prijenosa podataka do 100 kbps, ali ograničavajući faktor je stabilizirana brzina uključivanja i isključivanja lasera i treba ga provjeriti prije integracije lasera u sustav. Nakon podudaranja brzina prijenosa podataka i formata podataka, u načinu chata provjerava se poravnanje oba primopredajnog sustava. Slijed znakova prenosi se s jednog kraja, a s drugog kraja primljeni slijed znakova ponovno se prenosi na prvi kraj. Ako je slijed isti, sustav je poravnat i spreman za prijenos datoteke.

Određeni formati datoteka kao što su notepad ili word pad mogu se prenositi većom brzinom prijenosa podataka u usporedbi s drugim formatima. Brzina podataka također ovisi o protokolu i može se vidjeti da Z modemski protokol podržava veće brzine prijenosa u usporedbi s Kermitom, ali vjerojatnost pogreške prijenosa manja je u Kermitu u odnosu na Z modem.

Učinak ambijentalne svjetlosti na detektor u određenoj se mjeri zadovoljava obrnutim komparatorom. Sustav je također opremljen neovisnim ispitivanjem primopredajnika bez uključivanja lasera.

Mjerenja razrjeđenosti vode: Pokusi mjerenja razrjeđenosti vode provedeni su za stvarnu morsku i normalnu vodu iz slavine u laboratoriju. Eksperimentalni uređaj za mjerenje razrjeđenosti sastoji se od tri komponente: vodene ćelije, lasera poznate snage i mjerača snage. Laser prolazi kroz ćeliju napunjenu vodom, a na drugom kraju se sakuplja snaga i pada na mjerac snage. Eksperiment se ponavlja nekoliko puta i na kraju se izračunava R.M.S vrijednost. U ovom se slučaju koristi izvor od 200 mW pri 532 nm. Razdaljina između izvora i mjerača snage (smještene s druge strane) je približno 3 metra. Eksperimentalne vrijednosti naznačene su u stupčastom grafikonu na slici 26.



Slika 26. R.M.S vrijednost faktora prigušenja

( Izvor: Vikrant, Anjesh Kumar, Dr. R.S.Jha, "Comparison of Underwater Laser Communication System with Underwater Acoustic Sensor Network", October-2012)

Rezultat eksperimenta: Podvodni komunikacijski sustav razvijen je i testiran na vodenom kanalu duljine 10 m pri brzini prijenosa podataka od 10 kbps. Sustav je sposoban za prijenos različitih formata video, audio, slikovnih i tekstualnih datoteka s jedne platforme na drugu. Ovaj je sustav također opremljen neovisnom opcijom ispitivanja primopredajnika [13].

Zaključak je da je podvodni laserski komunikacijski sustav sposoban za prijenos različitih formata datoteka video, audio, slika i tekstualnih datoteka te podržava brzine prijenosa podataka do 80-100 kbps. U sadašnjoj postavci ograničavajući faktor je brzina laserske TTL modulacije. Korištenje lavinske foto diode (APD) i korisnog invertiranog TTL komparatora mogu pomoći u povećanju dometa (duljine puta) sustava.

## 10. AUV KONTROLERI

Da bi AUV postigao autonomiju, upravljački sustav mora imati prilagodljivost i robusnost nelinearnosti i vremenske varijacije dinamike AUV-a, nepredvidive neizvjesnosti okoline poput fluktuacije morske struje i reakcijske sile od intervencije manipulatora, modeliranje poteškoća hidrodinamičkih sila i konfiguracija AUV-a mijenja se u skladu s različitim misijama. Uobičajeni kontroleri s fiksnim dobicima ne garantiraju visoku kvalitetu odziva cjelokupnog sustava kada se dogode značajne promjene u dinamici vozila i njegovom okruženju. Predložene su različite sheme kontrole koje su sažete u nastavku. Grupirani su u 2 kategorije: tradicionalni kontroleri i hibridni kontroleri.

### 10.1. TRADICIONALNI KONTROLERI

#### 10.1.1. PID (engl. Proportional-Integral-Derivative) tip kontrolera

Dobro je poznato da tradicionalni regulator tipa PID s fiksnim pojačanjima ne može udovoljiti zahtjevima podvodne kontrole vozila. U ovom regulatoru, AUV dinamika je linearizirana i razdvojena u 6 SISO podsustava drugog reda, a linearni PD kontroler u kombinaciji s optimalnim kontrolerom koji koristi LQR tehniku koristi se za upravljanje svakim podsustavom. Fjellstad i Fossen [14] definirali su virtualni referentni signal brzine koji je linearna kombinacija željene brzine, pogreške praćenja i njegove integracije i formulirali kontroler koji se sastoji od dva dijela: prvi dio je pomicanje prema naprijed, što je množenje AUV dinamičkog modela i virtualne brzine, a drugi dio je PID regulator. Njegova globalna konvergencija dokazana je Barbalatovom lemom. Metoda I / O linearizacije koristi Lieov derivat za dobivanje linearizirane dinamike sustava, a zatim koristi zakon o upravljanju povratnim informacijama stanja kako bi se postigla asimptotska pogreška regulacije ili praćenja. Budući da zahtijeva precizan opis sustava koji se mora kontrolirati, općenito govoreći, ima malo praktične upotrebe u slučaju AUV-a. Predložen je kontroler povratne sprege u punom stanju koji ima vrlo klasičan oblik promatrača i kontrolera. Opet ova shema zahtijeva točan opis sustava AUV, što je teško moguće.

### **10.1.2. Kontrola kliznog načina rada (SMC, engl. Sliding mode control)**

SMC tehnika je nelinearna shema upravljanja povratnim informacijama. Zahtijeva sirovu procjenu parametra sustava i procjenu nesigurnosti sustava za dizajn sklopne površine i dizajn zakona promjenjive strukture. Budući da klizni način ograničava kretanje sustava u određenom podprostoru prostora stanja i čini ga asimptotski konvergirajući u ravnotežnu točku, ova je upravljačka shema vrlo robusna u odnosu na varijacije parametara i vanjske smetnje. Nedostaci upotrebe ovog regulatora su njegova prebrza razmjena informacija jer trag faze sustava prelazi komutacijsku površinu u vrlo visokoj frekvenciji i njegov zahtjev za povratnim informacijama u punom stanju. Međutim, budući da je AUV sustav vremenski varijantan i nelinearan, SMC pokazuje velik potencijal u postizanju stabilnosti i performansi u odnosu na parametarsku nesigurnost i vanjske smetnje. To SMC kontrolere čini jednom od najčešće korištenih shema upravljanja u podvodnim vozilima. Glavni napor korištenja ove metode je smanjiti prebrzu razmjenu informacija. U ovoj shemi klizna površina projektirana je postavljanjem stupa ili razmatranjem LQR optimalnog rješenja upravljanja kako bi se osigurala globalna asimptotska konvergencija.

### **10.1.3. Robusna / optimalna kontrola**

Na temelju teorije optimalnog upravljanja razvijene su brojne robusne sheme upravljanja, poput linearnog kvadratnog oporavka prijenosa Gaussian / Loop Transfer (LQG / LTR), Hinfinity, J1 metodologije i tako dalje. Predložena je shema upravljanja koja se temelji na Smith kontroli i LQG / LTR metodologiji. Ovdje se koristi Smith kontrola za kompenzaciju kašnjenja prijenosa signala kroz dugi remen (za slučaj ROV) ili kroz zvučnu vezu (za slučaj AUV). LQG / LTR koristi se za dizajn pojačanja kompenzatora u unutarnjoj povratnoj petlji, odnosno smanjenoj petlji. Bošković [15] uveo je funkciju Lyapunova koja se sastoji od kvadratnog člana u brzini, kvadratnog člana u položaju i logaritamskog pojma u stavu, a na temelju toga je dizajnirao kontroler koji može postići globalnu asimptotsku konvergenciju zadanom položaju / stavu postavljanje.

Kao tradicionalna moderna strategija upravljanja, optimalna kontrola zahtijeva točan model sustava koji se mora kontrolirati. Prediktivna metoda, bilo fizički daljinski senzor ili matematička metoda, obično se koristi za predviđanje smetnji koje generira val kako bi se matematički modelirala AUV dinamika s odgovarajućim stupnjem točnosti.

#### **10.1.4. Adaptivno upravljanje**

Postoje parametarske nesigurnosti i nepoznati poremećaji u hidrodinamici podvodnog vozila. Mnogi su istraživači pribjegli prilagodljivom upravljanju kako bi procijenili parametre sustava, a zatim konstruirali kontrolere. Cristi [16] je predložio prilagodljivi kontroler zasnovan na modelu. Pretpostavlja se da je vozilo gotovo linearno u rasponu radnih uvjeta, procjenjuje parametre sustava metodom Rekurzivnih najmanjih kvadrata i razvija regulator s tehnikom postavljanja stupova.

#### **10.1.5. Upravljanje neuronskim mrežama (NN)**

Neuronske mreže privukle su puno istraživača jer mogu postići nelinearno mapiranje. Korištenje neuronskih mreža u konstrukciji kontrolera ima tu prednost što dinamika upravljanog sustava ne mora biti u potpunosti poznata. To čini NNs prikladnim za upravljanje podvodnim vozilom, a zapravo je još jedan od najčešće korištenih upravljačkih programa u podvodnom vozilu. Neuronske mreže također imaju i druge prednosti kao što su prilagodba na varijaciju parametara i imaju izrazito paralelnu prirodu računanja. Nedostatak je što ne postoji formalna matematička karakterizacija ponašanja zatvorenog kruga. Potvrda konačnog projekta može se dokazati samo eksperimentalno, a ne može se zajamčiti strukturno. Postoje uglavnom dvije kategorije kontrolera kada se NN koriste u svrhu upravljanja: učenje s naprednim modelom i izravno učenje. U prvom se slučaju model prosljeđivanja općenito uvježbava prema izlaznoj pogrešci ili pogrešci stanja, a zatim koristi za izvođenje pojačanja, dok se u drugom slučaju greška stanja ili izlaza koristi izravno za mapiranje željenog upravljačkog ulaza [17].

### **10.1.6. Nejasna logička kontrola**

Teoretska osnova upravljanja neizrakom logikom je da se sustavom nejasnog zaključivanja bilo koja stvarna kontinuirana funkcija u kompaktnom skupu može približiti bilo kojem stupnju točnosti. U primjeni upravljačkog inženjerstva, ljudi koriste nejasnu logiku kako bi oblikovali glatku aproksimaciju nelinearnog mapiranja od ulaza u sustav do izlaznog prostora sustava, što je pogodno za nelinearno upravljanje sustavom. S odgovarajućim jezičnim pravilima i funkcijama članstva može postići zadovoljavajuće performanse. Štoviše, nejasne logičke kontrole trebaju samo kvalitativni opis ponašanja sustava, stoga je prikladno za sustave čija dinamika nije lako razumljiva ili izvedena. Mane upotrebe neizrakite logičke kontrole su: određivanje jezičnih pravila i funkcija članstva zahtijeva eksperimentalne podatke i stoga vrlo dugotrajno; struktura nejasne logike zasnovana na pravilima otežava karakterizaciju ponašanja zatvorenog kruga kako bi se utvrdilo vrijeme odziva i stabilnost; isto kao i upravljanje neuronskim mrežama, potvrđivanje konačnog dizajna može se pokazati samo eksperimentiranjem.

## **10.2. HIBRIDNI KONTROLERI**

Uz gore navedene kontrolere, za AUV je predloženo nekoliko hibridnih kontrolera. Cilj im je riješiti vlastite nedostatke pomoću nekih kompenzacijskih sredstava. Hibridni upravljački sustavi mogu nadmašiti pojedinačne upravljačke sustave i mogu riješiti probleme s kojima se ne može riješiti konvencionalno upravljanje, kao na primjer kada postoji više ciljeva dizajna koji se ne mogu ispuniti jednim kontrolerom, a može se postići korištenjem nekoliko kontrolera.

### **10.2.1. Prilagodljivo upravljanje kliznim načinom rada**

Kao što je ranije rečeno, za primjenu upravljanja kliznim načinom rada potrebna je procjena granice nesigurnosti. Stoga su neki istraživači predložili brojne prilagodljive mehanizme za podešavanje vezane procjene na mreži. Fossen [88] predložio je prilagodljivi regulator kliznog načina rada koji nadoknađuje nesigurnost u ulaznoj matrici, koja se generira vremenski promjenjivim ponašanjem upravljačkog ulaza zbog hidrodinamike potiskivača, dodavanjem diskontinuiranog termina (klizni način rada) postojeći prilagodljivi kontroler.

### **10.2.2. Nejasna kontrola kliznog načina (FSMC)**

Kao što je navedeno u SMC kontroleru, preklopni sloj umjesto preklopne površine obično se koristi za smanjenje prebrze razmjene informacija regulatora kliznog načina rada. Ovdje se u FSMC-u nejasna logika koristi za generiranje upravljačke naredbe kao nelinearne funkcije unutar graničnog sloja. Prednost ove sheme je što joj je granica nelinearna. Budući da širina granice, a ne oblik granice izuzetno utječe na performanse regulatora, kaže se da ova shema ima malu praktičnu vrijednost, ako ne i potpuno beskorisnu.

### **10.2.3. Klizni način rada nejasne kontrole (SMFC)**

Ova shema koristi sposobnost nejasne logike da neometano poveže različite strategije upravljanja u jedan sustav. Zadržava svojstvo interpolacije nejasne logičke kontrole i svojstvo robusnosti upravljanja kliznim načinom rada. Stoga se takve vrste kontrolera mogu koristiti za različiti dizajn optimizacije: nejasna logika može postići vrlo sofisticirane funkcije preklopne površine.

### **10.2.4. Neuronsko upravljanje kliznim načinom rada**

Slično kao i prilagodljiva shema upravljanja kliznim načinom rada, u ovoj shemi se neuronske mreže koriste za postavljanje novih parametara upravljanja kliznim načinom rada. Predložena je upravljačka shema koja koristi višeslojnu neuronsku mrežu osposobljenu za

algoritam povratnog širenja kako bi nadoknabila odstupanje stanja od klizne površine uzrokovane neočekivanom velikom nesigurnošću.

#### **10.2.5. Neuronska nejasna kontrola**

Ova shema treba nadoknaditi nedostatke nejasnog logičkog regulatora. Za nejasne logičke kontrolere postoje mnoge poteškoće u određivanju funkcija članstva za svaki ulaz i izlaz. Za neke sustave to se može utvrditi stručnim znanjem ili izvanmrežnim podešavanjem pomoću dinamičkog modela. Međutim, dinamika podvodnog vozila nastavlja se mijenjati i podložna je neizvjesnim poremećajima okoline, a teško je dobiti točan model za izvanmrežnu obuku. Stoga bi funkcije članova trebalo biti u mogućnosti mijenjati pravovremeno putem interneta. U shemi neuro-nejasne kontrole upravljanja, neuronske mreže kombiniraju se s nejasnim logičkim kontrolerom zbog njegove sposobnosti učenja i optimizacije. Neuronske mreže smanjuju napore u određivanju funkcije članstva i odgovarajućih sila. Uz sposobnost učenja NN-a, shema kontrolera može imati prilagodljivost i robusnost.

## 11. ZAKLJUČAK

Autonomna podvodna vozila (AUV) su robotske podmornice. Dio su novonastalog polja autonomnih i bespilotnih vozila i prvenstveno se koriste kao jeftini izviđački alati. AUV-i se vrednuju zbog njihove sposobnosti proširenja i zamjene; mogu se rasporediti u opasnim okruženjima bez riskiranja ronilaca.

Ekonomski, potencijal za jeftinu skalabilnost čini AUV idealnim za velike i dugoročne zadatke prikupljanja podataka. Cilj svakog dizajnera je dizajnirati i razviti AUV kao ispitnu platformu za različita istraživanja podvodnih tehnologija, posebno onu koja uključuju male i jeftine podvodne robote.

U posljednjih 15 godina, AUV su se brzo postale vitalnim alatom za morske geoznanstvenike, posebno one koji su uključeni u mapiranje i praćenje morskog dna. Kontinuirani razvoj novih vozila i senzora povećat će spektar primjena morske geoznanosti, dok će napredak u umjetnoj inteligenciji povećati pouzdanost i fleksibilnost. AUV-ovi su već sposobni donositi odluke koje im omogućuju izbjegavanje sudara na morskom dnu ili pod ledom, a sve su više ta vozila razvijena s dovoljno inteligencije da svoja istraživanja mogu prilagoditi promjenama u okruženju koje nadziru, npr. otkrivanje hidrotermalne izvore. U kombinaciji sa novim istraživačima, npr. oni koji istražuju lokacije u moru sa obnovljivim izvorima ili istraživači zaštićenog morskog područja, jasno je da će AUV i dalje igrati sve značajniju ulogu u istraživanju i praćenju oceana.

## LITERATURA

1. Josué González-García, Alfonso Gómez-Espinosa , Enrique Cuan-Urquizo, Luis Govinda García-Valdovinos, Tomás Salgado-Jiménez and Jesús Arturo Escobedo Cabello, “Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions”, February 2020,
2. Sia Chuan, Tang, “Modeling and Simulation of the Autonomous Underwater Vehicles, Autolytus”
3. Ivana Mikolić, “Sea bed following controller”,
4. Dario Matika, Ivan Liović, “ SUVREMENE BESPILOTNE RONILICE (PODVODNA VOZILA)”, 2014.
5. Sadko Mandžuka, “Automatsko upravljanje plovnim objektima”, 2009;
6. Christopher von Alt, Woods Hole Oceanographic Institution, “Autonomous Underwater Vehicles”, 2003.
7. S McPhail, M Furlong, V Huvenne, J Perrett, M Pebody and P Stevenson, National Oceanography Centre, Southampton, UK, “Autosub6000: its first deepwater trials and science Missions”, 2009.
8. Russell B.Wynn, Veerle A.I.Huvenne, Timothy P.Le Bas, Bramley J.Murton, Douglas P.Connelly, Brian J.Bett, Henry A.Ruhl, Kirsty J.Morris, Jeffrey Peakall, Daniel R.Parsons, Esther J.Sumner, Stephen E.Darby, Robert M.Dorrell, James E.Hunt, “Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience”, 2014.
9. Gwyn Griffiths, “Technology and applications of autonomous underwater vehicles”, 2003,
10. Alexander V. Inzarstev, “Underwater vehicles”, 2009.
11. M. Shahrieel, M. Aras, H. A. Kasdirin, M. Herman Jamaluddin, M. Farriz Basar, “Design and Development of an Autonomous Underwater Vehicle”.

12. Xiaohu Ge, „Underwater Laser sensor network: A New Approach for Broadband Communication in the Underwater”, January 2006.
13. Vikrant, Anjesh Kumar, Dr. R.S.Jha, “Comparison of Underwater Laser Communication System with Underwater Acoustic Sensor Network”, October-2012.
14. Ola-Erik Fjellstad and Thor I. Fossen, "Position and Attitude Tracking of AUV's: A Quaternion Feedback Approach", Journal of Oceanic Engineering, Vol. 19, No.4, October 1994.
15. D. Boskovic and M. Krstic, "Global Attitude/Position Regulation for Underwater Vehicles", International Journal of Systems Science, 1999, volume 30, number 9, pages 939-946.
16. R. Cristi, A. Healey, "Adaptive Identification and Control of an Autonomous Underwater Vehicle" Proceedings of the 6th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, pp. 563-572, 1989.
17. T. Fujii, "Neural Networks for Ocean Engineering", 1995 Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 27 Nov.-1 Dec. 1995, pp. 216 -219 vol. 1.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela podvodnih plovila.....	7
Slika 2. Koordinatni sustavi plovila .....	9
Slika 3. Radna ROV ronilica .....	11
Slika 4. Pridnena ROV ronilica .....	11
Slika 5. Motrilački ROV.....	12
Slika 6. Krstareća AUV ronilica.....	15
Slika 7. Lebdeća AUV ronilica.....	16
Slika 8. Specijalizirana AUV ronilica .....	17
Slika 9. ROV ronilica "Jason Junior" .....	20
Slika 10. AUV Seaglider M6.....	24
Slika 11. AUV Remus 6000 .....	26
Slika 12. AUV Sentry.....	27
Slika 13. Dijelovi autonomne ronilice.....	29
Slika 14. AUV opremljen sa dva bočna skeniranja zvučne navigacije (SONAR).....	35
Slika 15. SONAR usmjeren prema naprijed (FLS) postavljen u vertikalnoj i vodoravnoj orijentaciji.....	36
Slika 16. Duga osnovna linija.....	37
Slika 17. Kratka osnovna linija .....	37
Slika 18. Ultra kratka osnovna linija .....	38
Slika 19. Značajke geomagnetske karte .....	40
Slika 21. AUV locira ulaz pomoću rasporeda aktivnih markera .....	41
Slika 20. AUV slijedi niz aktivnih orijentira.....	41
Slika 22. AUV opremljen senzorom za mapiranje njegove okoline .....	42
Slika 23. Digitalna rekonstrukcija okoliša.....	43
Slika 24. Proces slanja i primanja podvodne mreže plavo-zelenog laserskog senzora .....	47
Slika 25. Interna arhitektura čvorova u podvodnoj mreži plavo-zelenih laserskih senzora .....	47
Slika 26. R.M.S vrijednost faktora prigušenja.....	51

## POPIS TABLICA

Table 1. Stupnjevi slobode gibanja .....	9
------------------------------------------	---