

Autonomna navigacija u pomorskoj industriji: tehnologije, izazovi i pravilna implementacija

Vadnov, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:187:709042>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



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](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

LUKA VADNOV

**AUTONOMNA NAVIGACIJA U POMORSKOJ INDUSTRIJI:
TEHNOLOGIJE, IZAZOVI I PRAVILNA
IMPLEMENTACIJA**

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**AUTONOMNA NAVIGACIJA U POMORSKOJ INDUSTRIJI:
TEHNOLOGIJE, IZAZOVI I PRAVILNA
IMPLEMENTACIJA**

**AUTONOMOUS NAVIGATION IN MARITIME INDUSTRY:
TECHNOLOGIES, CHALLENGES AND PROPER
IMPLEMENTATION**

ZAVRŠNI RAD

Kolegij: Elektronička navigacija

Mentor: izv. prof. dr. sc. David Brčić

Student: Luka Vadnov

Studijski smjer: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112079312

Rijeka, rujan 2023.

Student: Luka Vadnov

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112079312

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom *Autonomna navigacija u pomorskoj industriji: tehnologije, izazovi i pravilna implementacija* izradio samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Davida Brčića.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezo s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Luka Vadnov', written in a cursive style.

Luka Vadnov

Student: Luka Vadnov

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112079312

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima Creative Commons licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student - autor

Handwritten signature of Luka Vadnov in black ink.

SAŽETAK

Završni rad temelji se na istraživanju autonomne navigacije na brodovima s posebnim fokusom na senzorske sustave koji omogućuju prikupljanje ključnih informacija za precizno orijentiranje i sigurnu navigaciju. Rad analizira različite senzore primjenjive na autonomnim brodovima, opisujući njihove funkcije i mogućnosti. Također istražuje metode obrade prikupljenih podataka prema navigacijskim funkcijama. Uz to, rad se bavi tehnološkim i pravnim izazovima koji prate proces implementacije autonomnih brodova u promet, uključujući pravne, regulativne i sigurnosne aspekte, te prihvaćanje tehnologije u pomorskom sektoru i društvu. Na kraju rada predložene su i neke promjene pravila za izbjegavanje sudara na moru za autonomne brodove kako bi se što lakše integrirali u globalni pomorski promet.

Ključne riječi: autonomna navigacija, autonomni brodovi, umjetna inteligencija, fuzija senzora, pravila za izbjegavanje sudara na moru, strojno učenje za navigaciju.

SUMMARY

The thesis explores the topic of autonomous navigation on autonomous ships, with a focus on sensor systems required for collecting information necessary for ship orientation and navigation. Then there are methods of processing the collected data and the challenges of integrating such ships into navigation. The paper analyses sensors that could be used on autonomous ships, describing their functions and capabilities. It also examines methods for processing sensor data according to navigation functions. Additionally, the paper addresses the technological and legal challenges associated with the implementation of autonomous ships in traffic. The thesis covers various challenges faced by autonomous ships in navigation, including legal, regulatory, and safety aspects, as well as the acceptance of such technology by the maritime sector and the public.

Keywords; autonomous navigation, mass, artificial intelligence, sensor fusion, colregs, machine learning for navigation.

SADRŽAJ	
SAŽETAK.....	I
SUMMARY.....	I
1. UVOD.....	1
2. POMORSKA INDUSTRIJA 4.0.....	2
2.1. POJAM AUTONOMIJE U NAVIGACIJI.....	4
2.2. DOSADAŠNJA POSTIGNUĆA.....	7
3. SUSTAVI ZA PRIMANJE INFORMACIJA.....	11
3.1. POVRŠINSKI SENZORI.....	13
3.1.1. Inercijalni navigacijski sustav.....	13
3.1.2. Laserski radar.....	14
3.1.3. Milimetarski radar (mmRADAR).....	16
3.1.4. Video i infracrvene kamere.....	17
3.2. PODVODNI SENZORI.....	18
3.3. SATELITSKI SUSTAVI.....	19
3.3.1. Satelitsko pozicioniranje.....	20
3.3.2. Satelitska komunikacija.....	21
3.3.3. Satelitski nadzor.....	22
4. METODE OBRADJE PODATAKA PREMA NAVIGACIJSKIM	
FUNKCIJAMA.....	24
4.1. ALGORITMI PLANIRANJA KRETANJA BRODA.....	26
4.1.1. Izrada plana puta.....	26
4.1.2. Algoritam za izračun potrošnje goriva i smanjenje pogrešaka u predviđanju putanje broda.....	30
4.2. ALGORITMI ZA IZBJEGAVANJE PREPREKA TIJEKOM PLOVIDBE.....	31
4.2.1. Izbjegavanje prepreka.....	31
4.2.2. Podrška kod donošenja odluke.....	33

4.3. ALGORITMI ZA LOKALIZACIJU I MAPIRANJE	35
4.3.1. Klasifikacija objekata.....	35
4.3.2. Učenje značajki	38
5. TEHNOLOŠKI IZAZOVI KOJI OGRANIČAVAJU ŠIRU UPOTREBU AUTONOMNIH BRODOVA	40
5.1. INFRASTRUKTURA	40
5.2. KIBERNETIČKA SIGURNOST	43
6. PRAVNI IZAZOVI KOJI OGRANIČAVAJU ŠIRU UPOTREBU AUTONOMNIH BRODOVA	49
6.1. DEFINIRANJE POJMA AUTONOMNOG BRODA.....	49
6.2. PREDSTAVLJANJE PROBLEMA IMPLEMENTACIJE PRAVILA ZA IZVJEGAVANJE SUDARA NA MORU NA AUTONOMNE BRODOVE	51
6.2.1. Primjena pravila za izbjegavanje sudara na moru	52
6.2.2. Moguća rješenja	53
6. ZAKLJUČAK	57
LITERATURA	58
POPIS SLIKA.....	62
POPIS TABLICA.....	62
POPIS SHEMA	62

1. UVOD

Zadnjih nekoliko godina, pojam autonomne navigacije, postao je vrlo popularan. Dolaskom 4. industrijske revolucije, načini na koji se obavljaju određeni poslovi mijenjaju se, isto kao što se i javljaju potrebe za obavljanjem novih poslova. Kako se automatizacija pojavljuje u skoro svim aspektima prometa, tako se vidi i njen napredak u pomorstvu. Postupna integracija autonomije u pomorstvo omogućuje industriji pomorskog prometa da iskoristi potencijal novih tehnologija u svrhu povećanja sigurnosti, smanjenja troškova i povećanja operativne učinkovitosti. Autonomija brodova razlikuje se od broda do broda, te ovisi o stupnju razvijenosti sustava. Hoće li brod biti potpuno ili djelomično autonoman ili upravljati sa obale ovisi o stupnju opremljenosti i razvoju sofisticiranih senzora, umjetne inteligencije i sustava autonomne navigacije.

Dalje, kako bi autonomni brod mogao sam donositi zaključke u vezi plovidbe, zahtjeva napredne metode obrade podataka kako bi se osigurala sigurna i učinkovita navigacija bez ljudske intervencije. Takve metode uključuju prikupljanje podataka putem različitih senzora te njihovu obradu kroz algoritme strojnog i dubokog učenja. Upravo takva obrada omogućuje autonomnom sustavu da interpretira okolinu, prepozna prepreke te donese odluke u realnom vremenu. Kao takav, sustav bi trebao znati poštivati i ponašati se u skladu s pravilima za izbjegavanje sudara na moru kako bi mogao neometano ploviti. Postavlja se pitanje postoji li uopće takav sustav koji posjeduje sposobnosti razmišljanja i donošenja odluka u situacijama koje se ne mogu riješiti shematskim putem, nego zahtijevaju korištenje procjene, pretpostavke, zaključivanja i intuicije. Također uvođenje autonomije u pomorstvo suočava se s nizom pravnih problema koji zahtijevaju razmatranje, regulativne intervencije te donošenje novih pravila.

Rad je podijeljen na pet poglavlja, prvo poglavlje bavi se pojmom autonomije i razinama autonomije u pomorskoj navigaciji te daje uvid u dosadašnja postignuća autonomnih brodova. Drugi dio zasniva se na sustavima i sensorima koji su odgovorni za primanje i razmjenu informacija iz okoliša, a potrebni su za uspješnu navigaciju. Središnji dio bavi se metodama i algoritmima obrade podataka za uspješno vođenje navigacije. Algoritmi i metode podijeljene su prema navigacijskim funkcijama, planiranje puta, izbjegavanje prepreka te lokalizacija i mapiranje. Zadnji dio proučava problematiku implementacije autonomnih brodova, počevši od same infrastrukture pa sve do pravnih izazova poput primjene COLREGs pravila na autonomne brodove.

2. POMORSKA INDUSTRIJA 4.0

Pomorska industrija 4.0 promatrat će se kao logičan nastavak prethodne tri industrijske revolucije. Prva promjena u pomorstvu dogodila se tijekom prve industrijske revolucije u 19. stoljeću kada je uvedena mehanička snaga, a brodovi su se počeli pokretati parnim motorima na ugljen. Druga industrijska revolucija započela je početkom 20. stoljeća kada su se pojavili dizelski motori koji su poboljšali učinkovitost i pouzdanost brodova koristeći naftu kao novo gorivo. Internet-digitalna revolucija, koja predstavlja treću industrijsku revoluciju, uvela je računalno upravljanje brodom sedamdesetih godina. S uvođenjem plina kao goriva, poput ukapljenog prirodnog plina (engl. *Liquefied natural gas* - LNG), sve smo bliže novoj paradigmi povezanoj s kibernetičko-fizičkim sustavima i autonomijom koja dolazi kao dio "Pomorske industrije 4.0"¹.

Industrija 4.0, odnosi se na brzu digitalnu transformaciju procesa unutar neke industrije. Transformacija se temelji na inteligentnom umrežavanju strojeva (i drugih uređaja) pomoću naprednih informacijsko – komunikacijskih tehnologija, s ciljem da se omogući autonomno komuniciranje među uređajima, analiziranje i prikupljanje velike količine podataka, autonomno donošenje odluka te praćenje imovine i procesa u stvarnom vremenu.

Osnova je integracija informacijskih tehnologija s operativnim aktivnostima, što dovodi do jače proizvodne organizacije.

S obzirom na brojne interpretacije industrije 4.0, ovdje će se četvrta etapa industrije razmatrati kao proces socio-tehničke integracije. Ova promjena ima za cilj povećati dostupnost podataka za lakše obavljanje posla i donošenja odluka na sljedeće načine:

- Internet podatci (engl. *Internet of Things* - IoT) – odnosi se na globalnu mrežu koja povezuje sve identificirane fizičke i virtualne objekte u svrhu što bolje komunikacije i lakšeg obavljanja rada. To uključuje autonomiju i privatnost za upravljanje i prikupljanje podataka.
- Inteligentni roboti i automatizacija (engl. *Intelligence & Robotics* - IR) – obavljaju planirane i nepredvidljive operacije dok integriraju s ljudima ili drugim sustavima.
- Računalstvo u oblaku (engl. *Cloud Computing* - CC) – je tehnika u računalstvu koja omogućuje pohranu i obradu podataka ili resursa putem računalnih jedinica

¹ Issa, M., *Maritime Autonomous Surface Ships: Problems and Challenges Facing the Regulatory Process*; Kanada, 2022.

međusobno povezanih IP adresama. Ovakve usluge omogućuju pristup podacima izvan poslovnog objekta.

- Aditivna proizvodnja (engl. *Additive Manufacturing* - AM) – je proces spajanja materijala u slojevima prema podacima o 3D modelima, za što se koriste razni računalni programi. Prednosti su jednostavnija proizvodnja i smanjeni troškovi u vidu prijevoza i materijala.
- Analiza velikih podataka (engl. *Big Data Analytics* - BDA) – omogućuje prikupljanje i evaluaciju podataka iz različitih izvora kako bi se podržalo donošenje odluka u stvarnom vremenu, optimizirala proizvodnja i poboljšao servis opreme. U ovom slučaju svatko tko za to ima ovlaštenje, ima i pristup pravim informacijama u pravo vrijeme i na pravom mjestu.
- Inteligentna simulacija (engl. *Intelligent Simulations* - IS) – koristi podatke u stvarnom vremenu, iz informacija pohranjenim u mrežu, o virtualnom modelu kako bi inženjeri, operatori i menadžeri testirali i optimizirali sustave prije bilo kakvih fizičkih promjena. To smanjuje vrijeme zaustavljanja i postavljanja strojeva, dok istovremeno povećava kvalitetu proizvodnje.
- Proširena stvarnost (engl. *Augmented Reality* - AR) – tehnologija koja omogućuje korisniku da pravilno i pravovremeno odgovara na brzo mijenjajuće radno okruženje. Na taj način, smanjuju se pogreške radnika i povećava se produktivnost jer imaju pristup uputama kako nešto obaviti kroz umreženi i povezani sustav².

Ciljevi ovih tehnologija su omogućiti masovnu prilagodbu proizvoda, proširiti upotrebu automatskih i fleksibilnih sustava te olakšati komunikaciju između dijelova sustava i ljudi.

Tehnološki razvoj poboljšat će mogućnosti kontrole brodova i komunikaciju koristeći najnoviju tehnologiju informacijskih i komunikacijskih sustava. Kao rezultat toga, brodovi će se upravljati daljinskim uslugama sa kopna. Brodovi bez posade već se koriste u vojne, zrakoplovne i istraživačke svrhe. Za istraživanje dubokog mora također se koriste podmornice bez posade, poput autonomnih podvodnih vozila (engl. *Autonomous Underwater Vehicle* - AUV) i daljinski upravljanih vozila (engl. *Remotely Operated Vehicle* - ROV), koja se još uvijek razvijaju. Međutim, s obzirom na sigurnost,

² Sullivan P., B.: *Maritime 4.0 – Opportunities in Digitalization and Advanced Manufacturing for Vessel Development*, Italija, Milano, 2020.

učinkovitost i zaštitu okoliša, tehnologija koja bi trebala zamijeniti čovjeka mora biti naprednija, odnosno superiornija u odnosu na njega.

Gledano sa industrijske strane, autonomna vozila već se razvijaju u različitim vrstama prijevoza, poput aviona, vlakova i automobila. Stoga se očekuje da će autonomni brodovi značajno utjecati na brodogradnju, opremu i uređaje, kao i na prijevoz robe i infrastrukturu luke u pomorskoj industriji. Osim toga, autonomija, automatizacija, rad bez posade, velike baze podataka, poslovna povezanost i analitika postupno će se razvijati u pomorskoj industriji.

2.1. POJAM AUTONOMIJE U NAVIGACIJI

Autonomija u navigaciji znači sposobnost samostalnog manevriranja u prostoru, bez intervencije čovjeka. Ako se malo šire gleda na pojam autonomije, ona ne predstavlja samo manevriranje, nego i zaključivanje i samostalno donošenje odluka. Ona se može primijeniti u širokom rasponu djelatnosti, pa tako i u prometu, odnosno pomorskom prometu.

Autonomna navigacija postala je moguća zbog značajnog napretka u području umjetne inteligencije, strojnog učenja i senzorskih tehnologija. Senzori poput kamera, radara, globalnog sustava za određivanje položaja (engl. *Global Positioning System* - GPS) i LiDAR-a (engl. *Light Detection and Ranging*) omogućuju vozilima da stvaraju trodimenzionalnu kartu okoline u kojoj se kreću, a algoritmi strojnog učenja omogućuju vozilima da analiziraju podatke kako bi mogli odlučiti kako se trebaju kretati i reagirati na promjene u okolini.

Primjena autonomne navigacije u pomorskom prometu može imati značajan utjecaj na sigurnost. Uvođenje autonomne navigacije u pomorsku industriju može donijeti mnoge prednosti, a evo nekoliko bitnih:

1. Povećana sigurnost: Neovisnost autonomnih brodova o čovjeku može smanjiti rizik od ljudske pogreške i time povećati sigurnost na moru. Osim toga razvijene su tehnologije koje omogućuju brodovima dodatne senzore i sustave koji bi mogli brzo i učinkovito prepoznati druge brodove, prepreke i opasnosti u okolini.
2. Smanjenje troškova: Autonomni sustavi na brodu mogu se programirati da putuju najkraćim i najefikasnijim rutama te se na taj način smanjuje potrošnja goriva.

Uklanjanjem posade, smanjuju se troškovi vezani za plaće posade, osiguranja, zdravstvenih pregleda i obuke.

3. Povećana efikasnost: Autonomni brodovi mogli bi ploviti neprekidno, bez potrebe za stajanjem zbog zamjene posade ili odmorom.
4. Povećana točnost i pouzdanost: Takvi brodovi programirani su da slijede precizno određene rute i brzine, što bi moglo smanjiti vrijeme putovanja i povećati točnost dostave. Isto tako mogu imati sposobnost praćenja uvjeta na moru, poput valova i vjetera te automatsko prilagođavanje brzine i putanje broda, čime se smanjuje rizik od oštećenja tereta i broda, ali i gubitka vremena zbog loših vremenskih uvjeta.

Sigurnost autonomnih brodova i sve nabrojane prednosti uvelike ovisi o stupnju autonomije takvih brodova. Stoga je ključno razmotriti stupnjeve autonomije koje je odredila Međunarodna pomorska organizacija (engl. *International Maritime Organization* - IMO).

IMO koristi termin MASS (engl. *Maritime Autonomous Surface Ship*) za brodove koji spadaju pod odredbe IMO-a te koji posjeduju razinu automatizacije koja već prije nije prepoznata prema definiciji klasičnog broda. Takvi brodovi definirani su na način da mogu samostalno djelovati ovisi o različitom stupnju interakcije s čovjekom. Izraz „autonomni brod“ koristi se za brod koji posjeduje bilo kakvu razinu samostalnog rada bez intervencije čovjeka, počevši od automatske integracije senzora i podrške kod odlučivanja do samostalnog donošenja odluka sustava pomoću umjetne inteligencije.

Na 99. sjednici Odbora za pomorsku sigurnost (engl. *Maritime Safety Committee* - MSC) predložena su 4 stupnja razlikovanja autonomije na brodu, kako je prikazano u Tablici 1, te koja ovise o razini ljudske prisutnosti i upravljanja.³

Prvi stupanj je brod s posadom na brodu, gdje se posada nalazi kako bi upravljala i kontrolirala brodske sustave i funkcije. U ovom slučaju, neke operacije mogu biti automatizirane radi povećanja učinkovitosti i smanjenja ljudske pogreške.

Drugi stupanj je daljinski upravljani brod s posadom na brodu. U ovoj situaciji, brod se može upravljati s druge lokacije, ali posada je i dalje prisutna na brodu kako bi nadzirala i osigurala sigurnost operacija. Ova kombinacija daljinskog upravljanja i prisutnosti posade omogućuje fleksibilnost i povećanu kontrolu nad brodom.

³ IMO takes first steps to address autonomous ships, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/08-MSC-99-MASS-scoping.aspx>, 2018.

Treći stupanj je daljinski upravljani brod bez posade na brodu. U ovom slučaju, brod se upravlja s druge lokacije, a nema posade koja je fizički prisutna na brodu. Ovaj model omogućuje daljinsko upravljanje brodom bez potrebe za stalnom ljudskom prisutnošću. To može biti korisno u situacijama gdje je pristup brodu otežan ili rizičan za ljude.

Konačno, potpuno autonomni brod predstavlja najvišu razinu autonomije. U ovom slučaju, operativni sustav broda je sposoban samostalno donositi odluke i određivati radnje bez ljudske intervencije. Tako tehnološki napredan brod koristi senzore, algoritme i umjetnu inteligenciju kako bi samostalno obavljala zadatke, navigaciju i upravljanje.

Tablica 1. Razine autonomije

MASS 1.0	MASS 2.0	MASS 3.0	MASS 4.0
Brod s automatiziranim procesima i podrškom za odlučivanje	Daljinski upravljani brod s posadom na brodu	Daljinski upravljani brod bez posade na brodu	Potpuno autonomni brod
Posada je na brodu kako bi upravljali i kontrolirali brodske sustave i funkcije. Neke operacije mogu biti automatizirane	Brod se upravlja s druge lokacije, ali pomorci su na brodu	Brod se upravlja s druge lokacije, bez posade na njemu	Operativni sustav broda sposoban je samostalno donositi odluke i određivati radnje

Izvor: pripremio student prema: IMO takes first steps to address autonomous ships, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/08-MS-C-99-MASS-scoping.aspx>, 2018.

Danas je razina automatizacije na mnogim brodovima s posadom prilično visoka. Posebno zbog autopilota koji je postavljen da prati rutu tako da brod može sam izvršavati promjene kursa bez potvrde dežurnog časnika, pod uvjetom da je plan puta ispravan. Međutim posada i dalje mora biti prisutna na mostu kako bi nadgledala i upravljala manevrima izbjegavanja sudara s drugim brodovima. Kada se ne bi uzelo u obzir pravne aspekte i infrastrukturu luke te se usredotočili samo na tehnološki aspekt navigacije, za uklanjanje posade s broda bili bi potrebni različiti senzori koji mogu vidjeti i identificirati

bilo kakvu prepreku označenu ili neoznačenu na karti te autopilot povezan s inteligentnim sustavom za izbjegavanje sudara koji je programiran prema pravilima za izbjegavanja sudara na moru.

Međutim, takav potpuno autonomni brod ne mora biti u potpunosti bez posade, može sadržavati posadu za održavanje ili smanjeni broj osoba na mostu koji preuzimaju ručno dežurstvo tijekom zahtjevnijih operacija. Također, može se razmotriti koncept „*Operational Design Domain*“ (ODD) koji se koristi u industriji autonomnih automobila⁴. To bi značilo da će postojati određene pomorske rute na kojima su autonomni sustavi posebno programirani te koje su posebno označene. Na tim područjima brod može ploviti autonomno i po posebnim pravilima.

2.2. DOSADAŠNJA POSTIGNUĆA

Nekoliko autonomnih plovila uspješno je provelo svoje prve probne vožnje, a plovili su iz Norveške, Kine i Japana. Vodeće kompanije poput Rolls-Royce-a, Kongsberga, Wärtsilä-e i ABB-a natječu se u proizvodnji autonomnih brodova kroz inovativne tehnologije i napredne sustave upravljanja. Svaka od ovih tvrtki nastoji razviti sofisticirane autonomne sustave koji omogućuju brodovima da se samostalno kreću, obavljaju zadatke i prilagođavaju se promjenjivim uvjetima na moru. Međutim, kao prvo plovilo u svijetu koje je dobilo autonomnu oznaku od Američkog društva za klasifikaciju (engl. *American Bureau of Shipping* - ABS), je lučki tegljač Maju 510, koji koristi autonomne sustave razvijene od strane Švedsko-Švicarske korporacije ABB⁵.

U međuvremenu, postiže se i napredak na nacionalnoj i međunarodnoj razini u identificiranju problema koji sprječavaju i ograničavaju operacije s MASS-ovima. Prema zapisnicima s prošlogodišnjeg sastanka IMO-a (MSC 105), IMO ima za cilj razviti neobvezujući ciljno usmjereni pravilnik za MASS plovila koji će biti spreman za usvajanje u drugom dijelu 2024. godine. Početna namjena je da se neobvezujući kod primjenjuje samo

⁴ Porathe T., Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) and the COLREGS: Do We Need Quantified Rules Or Is “the Ordinary Practice of Seamen” Specific Enough?, Trondheim, Norway, 2019.

⁵ MaritimeMagazine, <https://maritimemag.com/en/tugboat-performs-first-autonomous-collision-avoidance-performance-at-port-of-singapore/>, 2022.

na teretne brodove, a IMO istražuje izvedivost primjene pravilnika i na putničke brodove primjenjive u skorjoj budućnosti⁶.

Ovdje je izdvojeno nekoliko važnijih i poznatijih brodova i događaja koji su obilježili napredak u razvijanju autonomnih brodova i navigacije.

Singapore Maju 510 - tegljač koji je proglašen kao prvo autonomno plovilo kojim se upravlja iz daljinskog operativnog centra na obali. Plovilo je dugačko 32 metra te je sposobno za automatizirana navigacijska promatranja, obradu višestrukih izvora podataka, procjenu rizika, donošenje odluka i upravljanje plovilom na daljinu. Ispitivanja provedena u Singapuru, u periodu od travnja 2021. godine do ožujka 2022. godine, potvrdila su nove razine autonomije, koristeći automatiziranu situacijsku svijest za izbjegavanje sudara i upravljanje manevrom. Tegljač Maju 510 opremljen je naprednim sustavima i tehnologijama koje je osmislio Keppel O&M, kao što su ABB Ability Marine Pilot Vision i Marine Pilot Control, koji koriste umjetnu inteligenciju za automatizaciju navigacijskih promatranja, spajanje podataka iz različitih izvora, procjenu rizika, donošenje odluka i upravljanje plovilom. Tegljač je također opremljen različitim tehnologijama koje je KMDTech razvio u suradnji s MPA-om i Tehnološkim centrom „Technology Centre for Offshore and Marine, Singapore“ (TCOMS), kao što je Digitalni Blizanac koji simulira ponašanje plovila u različitim scenarijima.⁷ Izvršni direktor tvrtke Keppel Smit Towage, Romi Kaushal za medije je izjavio: „Imao sam zadovoljstvo biti na brodu Maju 510 tijekom ispitivanja izbjegavanja sudara i doživjeti kako se tegljač glatko ponašao u autonomnom načinu rada. Ono što me impresioniralo je, kako je digitalni sustav identificirao nekoliko rizika na planiranom putu tegljača i reagirao tako da postavi plovilo na novi, sigurniji kurs. Plovilo se ponašalo kao da njime upravlja iskusni kapetan tegljača.“ (Magazine, 2022)

Yara Birkeland – nakon kašnjenja u periodu od dvije godine uzrokovanog Covid-19 situacijom, Yara Birkeland, autonomni brod namijenjen za prijevoz kontejnera, dug 80 metara, započeo je svoje prvo redovito putovanje u travnju 2022. godine iz luke Brevik u Norveškoj. Prvi električni autonomni kontejnerski brod na svijetu ulazi u dvogodišnje razdoblje probnog rada kako bi stekao certifikaciju nakon opremanja i testiranja njezinih sustava. Brod je opremljen unutarnjim i vanjskim kamerama, senzorima, noćnom vidnom

⁶ Maritime Safety Committee (MSC 105), 20-29 April 2022.

<https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-105th-session.aspx>

⁷ Maju 510 Tug: Singapore's First Autonomous Vessel Project Complete,

<https://www.marinelink.com/news/maju-tug-singapores-first-autonomous-495637>, 2023.

optikom, radarom i umjetnom inteligencijom koja omogućuje brodu da reagira na prepreke. Krećući se brzinom od otprilike 6-7 čvorova, brod pogone dva Azipull 900 kW potisnika i dva bočna potisnika od 700 kW, prevozi i autonomno ukrcava/iskrcava teret od 120 kontejnera. Procijenjeno je da će zamijeniti više od 40 000 putovanja dizelovim kamionima godišnje i bit će postavljen na kursu dugom 7 nm prevozeći gnojivo od Yara's Porsgrunn tvornice do Brevik luke⁸. Brod se promovira kao prvi svjetski autonomni kontejnerski brod s nultom emisijom stakleničkih plinova.

Zhi Fei – upravo ovom brodu dodijeljena je titula prvog autonomnog plovila u komercijalnoj uporabi. Potpuno autonomni brod za kontejnere duljine 117 metara poslan je na svoju redovnu rutu u prometu 22. travnja 2022. godine, nakon značajnog perioda testiranja koji je započeo u lipnju 2021. Tvrtka za morsku tehnologiju Bestway blisko je surađivala s Jiahao Ship Design Institutom i Dalian Maritime sveučilištem od 2019. godine kako bi izgradili multimodalni brod koji se može upravljati u bilo kojem od tri moda (sa posadom, daljinskim upravljanjem i autonomno). Ploveći brzinom od 8-12 čvorova između luka Qingdao u provinciji Shandong i Dongjiakou (Kina), upravljački sustav broda, BRINAV predstavlja sustav električnog pogona izravne struje. Brod ima 5G, satelite i višemrežni IT sustav s daljinskim upravljanjem i sposobnostima koje uključuju planiranje inteligentnog upravljanja rutom i otkrivanje/izbjegavanje sudara⁹.

Zanimljivo je to što je za brod *Zhi Fei* osmišljen algoritam sustava dvostrukog rizika. Na temelju stvarnih podataka automatskog identifikacijskog sustava (engl. *Automatic Identification System* - AIS), sustav bilježi i izračunava putanju drugih brodova u sigurnosnom polju autonomnih brodova i analizira koeficijent rizika autonomnih brodova prema brzini i kursu drugih brodova.¹⁰ Sustav je također povezan s meteorološkim sustavom i sustavom primanja informacija o pomorskoj sigurnosti istovremeno. Putem podataka AIS-a i ova dva tipa podataka, informacije o navigaciji uz asistenciju mogu se pružiti autonomnom brodu u stvarnom vremenu, kako bi se promatrala pouzdanost strategije donošenja odluka autonomnog sustava za navigaciju brodova. Detalji o riziku mogu se

⁸ Dean, P., <https://www.hfw.com/Autonomous-ships-MASS-for-the-MASSes>, 2022.

⁹ Dean, P., op. cit.

¹⁰ Jianan, L., Study on the Risk Model of the Intelligent Ship Navigation, 2022.

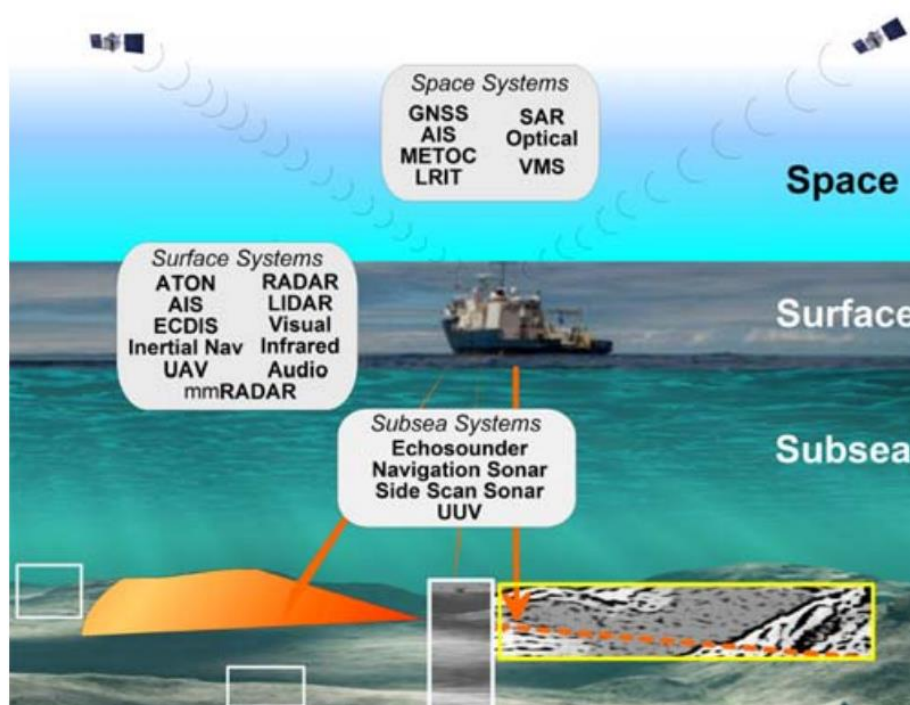
vidjeti putem konverzije u 2D i 3D. Prikaz 3D-a duplicira navigacijsku scenu u stvarnom vremenu i prikazuje relevantne vrijednosti.

Avikus Prism Courage – obavio je prvu transatlantsku autonomnu plovidbu. LNG brod Prism Courage koristio je autonomne navigacijske sustave tijekom polovice svoje plovidbe od Meksičkog zaljeva u SAD-u do Južne Koreje, tvrdeći da je obavio „prvu transatlantsku plovidbu velikog trgovačkog broda koristeći autonomne navigacijske tehnologije“. Brod je izgrađen od strane Hyundai Heavy Industries za SK Shipping Južne Koreje i isporučen je 2021. godine. Avikus, podružnica HD Hyundai, razvila je autonomni navigacijski sustav broda. To je poluautonomni navigacijski sustav HiNAS 2.0 koji generira optimalne rute i brzine na temelju integriranih rješenja tvrtke Hyundai Global Service. Osim upravljanja brodom, sustav navodno smanjuje potrošnju goriva za 7 % i emisije stakleničkih plinova za 5%. Napredne navigacijske tehnologije omogućile su brodu izbjegavanje preko 100 potencijalnih sudara i samostalnu plovidbu ukupnog puta od otprilike 20 000 kilometara, dok je posada broda upravljala preostalim dijelom plovidbe¹¹.

¹¹ Dean, P., op. cit.

3. SUSTAVI ZA PRIMANJE INFORMACIJA

Sustavi senzora posvećeni praćenju pomorskog okruženja razmatrat će se iz tri perspektive kako je prikazano na Slici 1: s površine mora, ispod razine mora i iz svemira. Sustavi za pregled na površini mora i podmorja obično pružaju podatke i slike u realnom vremenu, dok sustavi bazirani na podacima iz svemira omogućuju pristup informacijama i slikama dostupnim diljem svijeta iz različitih izvora izvan broda.



Slika 1. Prikaz podjele senzora

Izvor: R. Glenn Wright, Intelligent Autonomous Ship Navigation using MultiSensor Modalities, TransNav, 2019.

Tekst se usredotočuje na senzore koji nisu već korišteni na brodovima, a bili bi neophodni za korištenje kod autonomne navigacije i autonomnih brodova. Senzori i uređaji kao što su: AIS, Informacijski sustav i prikaz elektroničkih karata (engl. *Electronic Chart Display and Information System* - ECDIS), autopilot, x-band i s-band radari, globalni navigacijski satelitski sustavi (*Global Navigation Satellite System* - GNSS), meteorološki i oceanografski vremenski podatci (*Meteorology and Oceanography* - METOC), sustav nadzora brodova (*Vessel Monitoring System* - VMS) i sonar neće se u tekstu posebno obrađivati. Senzori i sustavi za navigaciju koji se danas nalaze na brodu neće u potpunosti

nestati, već će se i dalje koristiti u kombinaciji s novim naprednim sensorima u autonomnoj navigaciji.

Senzorske sposobnosti potrebne na brodovima koji se upravljaju daljinski ili su autonomni, ne smiju samo replicirati vid i sluh pomoraca, već moraju nadmašiti njihove sposobnosti omogućujući stalni pregled od 360° oko broda u četiri dimenzije (x, y, z i vrijeme), gdje x, y i z predstavljaju trodimenzionalni prikaz okoline i to u realnom vremenu. Senzorske sposobnosti uključivale bi i sposobnost vidjeti u mraku pri svim vremenskim uvjetima, uključujući jaku kišu, snijeg i maglu na površini vode. Potrebna je i sposobnost vidjeti ispod vode, ispred i oko broda kako bi se otkrile prijetnje koje nisu označene na kartama i kako bi se izbjeglo nasukavanje ili sudar. Prema zahtjevima IMO-a, senzori koji su potrebni na brodu uključuju ljudski vid i sluh, koji se nadopunjuju radarom koji pomaže u otkrivanju i izbjegavanju drugih plovila, pomorskih signala i kopna. Potreban je i dubinomjer kako bi se održavao nadzor nad dubinom vode ispod kobilice. ECDIS na kojemu su prikazane elektroničke navigacijske karte koje bi trebale biti ažurirane te koje prikazuje područje plovidbe, položaje kanala i pomorskih signala te poznate opasnosti za navigaciju na koja se može naići na unesenoj ruti. GNSS pruža bazu za sve informacije koje se odnose na položaj, brzinu, kurs te precizno univerzalno i lokalno vrijeme. AIS pruža puno informacija o susjednim plovilima koje su podijeljene u više skupina podataka, kako je prikazano u Tablici 2.

Tablica 2. Podjela AIS podataka

Statički podatci	Identifikacijski broj pomorske mobilne postaje (engl. <i>Maritime Mobile Service Identity</i> - MMSI), pozivni znak i ime broda, identifikacijski broj (IMO broj), dužina i širina, vrsta broda i položaj antene.
Dinamički podatci	Položaj broda, vrijeme u UT, kurs preko dna, brzina preko dna, kurs kroz vodu i navigacijski status
Podatci o plovidbi	Gaz broda, opasan teret, luka odredišta i očekivano vrijeme dolaska (engl. <i>Estimated Time of Arrival</i> - ETA) i plan putovanja
Sigurnosni podatci	Kratke poruke slobodnog sadržaja

Izvor: pripremio student prema osobnim bilješkama sa predavanja

Pojavom autonomne navigacije, senzori koji obavljaju funkciju proširivanja vidokruga pomoraca kako bi se uspješno obavile tradicionalne navigacijske funkcije nisu više dovoljni. Integracija podataka senzora na brodu s vanjskim podacima i informacijama dostupnim iz svemirskih senzora i komunikacijskih kanala pružaju temelje za donošenje bilo kakvih odluka.

3.1. POVRŠINSKI SENZORI

Senzori koji proširuju postojeće mogućnosti, ali i oni koji pružaju nove sposobnosti te njihova kombinacija pruža dosad neviđenu razinu situacijske svijesti na brodu. Primjeri takvih sustava za određivanje položaja i promatranje morske površine su:

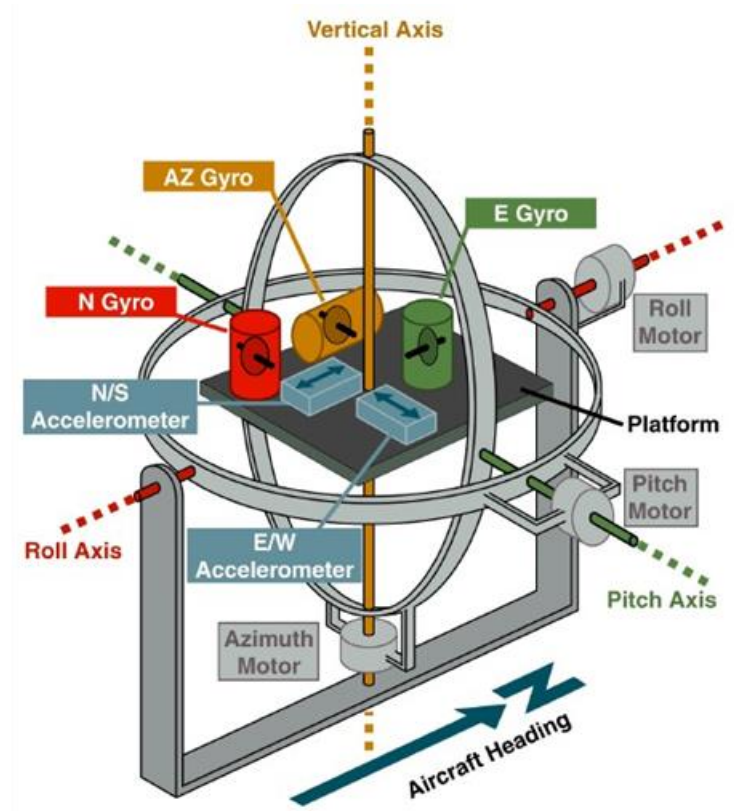
- Inercijalni navigacijski sustav (engl. *Inertial Navigational System* - INS)
- Laserski radar (engl. *Light Detection and Ranging* - LiDAR)
- Milimetarski radar (mmRADAR)
- Video i infracrvene kamere¹²

3.1.1. Inercijalni navigacijski sustav

Inercijalni navigacijski sustav je elektronički navigacijski sustav koji neprekidnim praćenjem promjena brzine plovila proračunava podatke o preavljenom putu, što mu omogućuje i određivanje njegova trenutnog položaja. Za pravilno funkcioniranje takvog sustava potrebni su senzori koji mjere promjene brzine (akceleraciju) u dva odnosno tri smjera kretanja. Takvi senzori zovu se akcelerometri, koji su na slici prikazani sivom bojom (Slika 2.). Za određivanje orijentacije akcelerometara u smjerovima sjever – jug i istok – zapad koriste se tri žiroskopa priključena na sustav, koji su na slici prikazani crvenom, žutom i zelenom bojom. Kako bi sustav bio stabilan koristi se stabilizirana platforma horizonta, koja treba što točnije održavati pravilan smjer osi geografskog sustava koordinata. Važan dio sustava je i računalni dio koji na osnovu izmjerenih ubrzanja i poznatih polaznih koordinata izračunava trenutni položaj. I zadnji sklop, ali ni malo manje bitan je sklop ili

¹² Wright, G., R., Intelligent Autonomous Ship Navigation using MultiSensor Modalities, 2019.

sustav za uklanjanje centripetalnog i Coriolisovog ubrzanja koje akcelerometar registrira, a ne ulaze u kretanje broda u smislu promjene koordinata položaja.



Slika 2. Inercijalni navigacijski sustav

Izvor: A.Kaviyarasu, Dead Reckoning Navigation,

https://mitindia.edu/images/pdf/avionics_ppt/Deadreckoning%20navigation.pdf

Prednost ovakvog sustava je što je potpuno neovisan i što neprekidno prati položaj, orijentaciju i brzinu bez da se koristi bilo kakvim vanjskim referentnim točkama ili sustavima, odnosno funkcionira bez potrebe kontakta sa okolinom. Najčešće se koristi za navigaciju podmornica, raketa, svemirskih letjelica i vojnih aviona.

3.1.2. Laserski radar

Laserski radar (LiDAR) opisuje optički instrument koji odašilje laserske zrake koje se mogu odbijati čak i od jako sitnih čestica raspršenih u atmosferi te se zatim registriraju u

optičkom prijammiku. LiDAR ima više funkcija. Jedna od njih je izračunavanje udaljenosti na temelju vremena potrebnom da zrake svjetlosti pogode objekt ili površinu te se reflektiraju natrag u laserski skener. Princip rada je sličan kao i kod radara i sonara samo što se koriste zrake svjetlosti umjesto radio zraka i zvuka. Razlika je i u tome što se svaki laserski signal može obraditi u 3D vizualizaciji pri čemu korisnik ima pristup 3D pregledu okoline koja ga okružuje u stvarnom vremenu. Osim što služi kao osnova za procjenu okoliša, LiDAR ima mogućnost praćenja vremenskih i morskih uvjeta, što mu je ujedno i mana zbog pre velike osjetljivosti. To je bitno za izračun najbolje putanje, smanjenja rizika prilikom plovidbe, ali i za pružanje podataka za modele vremenske prognoze u planiranju budućeg putovanja. Razni atmosferski uvjeti koji se približavaju brodu, mogu se otkriti i mjeriti zajedno s izračunatim vremenom dolaska. Pod atmosferske uvjete misli se na parametre vidljivosti, prisustvo magle, jačina vjetra i valova, mjerenje vlažnosti kao i brzina strujanja mora. Još jedno područje u pomorskoj industriji u kojoj se može implementirati korištenje LiDAR-a je zagađenje koje brodovi stvaraju. Uređaj se može dodati blizu ispušnih cijevi brodova gdje se stvara aerosol iz motora te precizno mjeriti onečišćenje i učinkovitost tih motora u različitim uvjetima¹³.

Dva nedavna primjera brodskih senzora koji primjenjuju ove principe su OPAL 3D LiDAR i LADAR. OPAL se proizvodi u Kanadi od strane tvrtke NEPTEC Technologies, a LADAR u Velikoj Britaniji kao rezultat programa SMARTER¹⁴. OPAL radi na valnoj duljini od 1550 nm i dolazi u dvije verzije s maksimalnim dometom od 500, odnosno 1000 metara. Kompatibilan je sa softverom 3DRI, odnosno knjižnicom algoritama za razvoj aplikacija za detekciju, praćenje i klasifikaciju ciljeva. Podatci se pružaju u 3D prikazu uz komponentu vremena i intenziteta. Senzor se lako integrira u ECDIS ili bilo koji drugi elektronički sustav karata. LADAR, odnosno europski senzor posebno dizajniran za brodove, koristi zraku valne duljine od 520 nm koja istražuje površinski sloj mora s djelomičnim prodorom ispod vodene linije. Može otkriti i klasificirati objekte na udaljenosti od jednog jarda (približno 90 cm) do jedne nautičke milje. Važna dodatna mogućnost je praćenje potopljenih ili djelomično potopljenih objekata do dubine od 10 m. Podatci se isto

¹³ Pantazis A., LIDARs Usage in Maritime Operations and ECO, Grčka, 2019.

¹⁴ Lippay, V., Laser focus world, Eyes of a ship: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/14223396/eyes-of-a-ship-laser-detection-at-sea>, 2022.

prikazuju u 3D prikazu te se mogu reproducirati u cijelosti ili djelomično ovisi kakav „sustav svjesnosti o situaciji“ se koristi na brodu, a najčešće je to ECDIS¹⁵.

3.1.3. Milimetarski radar (mmRADAR)

Milimetarski radar odnosi se na radar koji radi u milimetarskom valnom pojasu, u frekvencijskom području od 30 – 300 GHz (valna duljina od 1 do 10 mm). Valna duljina milimetarskog vala nalazi se između vala u centimetarskom području i svjetlosnog vala te ima širok raspon primjena u komunikacijama 5G mreže, satelitskom daljinskom upravljanju, navigaciji i suprotstavljanju elektroničkim i radio smetnjama. Milimetarski radari mogu se svrstati u dva tipa: radare dugog dometa (LRR) i radare kratkog dometa (SRR) koji se upotrebljavaju ovisno o potrebi¹⁶.

Uspoređujući s ultrazvučnim radarom, milimetarski radar ima karakteristike malih dimenzija, lakoće i visoke rezolucije. Općenito, radarski senzori jedan su od poznatijih senzora u autonomnim sustavima i često se koriste u ostalim autonomnim vozilima kako bi pružili pouzdanu i preciznu percepciju prepreka tijekom dana i noći, zbog svoje sposobnosti da funkcioniraju neovisno o osvjetljenju i nepovoljnim vremenskim uvjetima. Pružaju dodatne informacije, poput brzine detektiranih pokretnih prepreka i mogu obavljati mapiranje u kratkom, srednjem ili dugom rasponu, ovisno o načinu konfiguracije. Međutim, radarski senzori općenito nisu prikladni za aplikacije prepoznavanja objekata zbog svoje grublje rezolucije u usporedbi s kamerama. Stoga se informacije s radarskih senzora, često kombiniraju s drugim senzorskim podacima, poput kamera i LiDAR senzora, kako bi nadoknadili ograničenja radarskih senzora. Zato je neophodan u kombinaciji sa navedenim sensorima kod autonomne navigacije.

¹⁵ Lippay, V., op. cit.

¹⁶ Yeong, D., J., Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles, 2021.

3.1.4. Video i infracrvene kamere

Video i infracrvene kamere koriste se kako bi sustav dobio jasniju sliku o okolini koja ga okružuje, kao naprimjer, definiranje jasne linije horizonta i detektiranje objekata. Obje vrste kamera koriste se u kombinaciji kako bi preglednost bila dobra u različitim uvjetima osvjetljenja, uključujući dnevne i noćne scenarije. Elektro – optičke odnosno video kamere oslanjaju se na izvor svjetla za stvaranje cjelokupne slike na temelju refleksije i apsorpcije svjetla od strane objekta. Što znači da su takve kamere ograničene te ovise o prisustvu svjetla i vremenskim uvjetima. Infracrvene, poznate kao i termalne kamere, detektiraju i hvataju infracrveno zračenje koje emitiraju objekti. Takvo zračenje ima veće valne duljine od vidljive svjetlosti te nije vidljivo ljudskom oku. Prednost takvih kamera je što mogu snimati slike u potpunom mraku ili u teškim uvjetima osvjetljenja gdje je vidljivost ograničena.

Kombinacijom informacija dobivenih iz elektro-optičkih i infracrvenih kamera, autonomni navigacijski sustavi mogu postići sveobuhvatnije razumijevanje okoliša. Integracija ovih senzora te korištenje njihovih podataka zahtjeva algoritme za obradu slika. Ti algoritmi variraju od klasičnih pristupa do pristupa temeljenih na dubokom učenju o čemu će biti riječ u poglavlju 4.

3.2. PODVODNI SENZORI

Senzori kod autonomno upravljanih brodova moraju nadoknaditi nedostatak ljudskog znanja i stručnosti kao i nedostatke u kartama, pružajući izravnu procjenu stanja morskog dna u stvarnom vremenu. Primjeri sustava za detekciju podmorskog prostora na brodu koji pružaju precizne informacije o dubini su dubinomjeri i sonari koji se i danas koriste.

Trenutno postoje dvije vrste navigacijskih sonara, pri čemu svaka koristi različite pristupe kako bi postigla iste ciljeve. Jedna vrsta sonara koristi pristup svjetlosne kružnice, usmjeravajući sonarni snop naprijed od broda te neprekidno prikazuje nova očitavanja. Druga vrsta koristi jedan zvučni impuls za registriranje akustičnih podataka koji se zatim analiziraju te pružaju podatke očitavanja, a niz očitavanja dobiva se korištenjem odaslanih zvučnih impulsa. Broj snopova koji izlaze iz jednog ili dva sonarna pretvarača, ovise o proizvođaču. Isto vrijedi i za tehničke specifikacije s dubinama koje variraju od 50 do 200 metara i daljinama ispred broda koje dosežu od 200 do 2.000 metara.¹⁷

Navigacijski sonar s mogućnostima pregleda ispred broda može pružiti vrlo bitne podatke kojima se može voditi plovidbom te koji se mogu usporediti s podacima na elektroničkim navigacijskim kartama prikazanim na ECDIS-u kao rezervna navigacija. To uključuje usporedbu stvarnih, uživo prikazanih morskih značajki i elevacija s onima prikazanim unutar ENC-a.

¹⁷ International Hydrographic Review: https://ihr.iho.int/wp-content/uploads/2021/10/IHR_May2017.pdf, 2017.

3.3. SATELITSKI SUSTAVI

Do 2018. godine bilo je otprilike 4.600 satelita u orbiti oko Zemlje, od kojih je gotovo 2.000 bilo operativno¹⁸. U časopisu „Satnews“ navedeno je da će se broj lansiranja satelita povećati trostruko u idućem desetljeću, s 3.323 satelita težine preko 50 kg koji su lansirani ili će biti lansirani između 2018. i 2027. godine, u usporedbi s 1.019 satelita koji su lansirani između 2008. i 2017. godine¹⁹. Trenutno se u orbiti nalazi 8.261 satelit od kojih je otprilike samo polovica operativna.²⁰

Mnogi od ovih satelita mogu pružiti vrlo precizne informacije o pozicioniranju kao dio GNSS sustava. Mnogi drugi sateliti koriste se u pomorskim operacijama za prikupljanje meteoroloških i oceanografskih (METOC) te terestričkih slika. Međutim, veći dio povećanja broja lansiranja satelita predstavlja novu generaciju malih satelita poslanih u nisku Zemljinu orbitu kako bi se stvorile konstelacije tisuća satelita koji će omogućiti sveprisutan globalni širokopojasni pristup. Ovaj trend već je primijećen s objavom od strane Inmarsata da je njihova svjetska usluga Fleet Xpress, pokrenuta u ožujku 2016. godine, do početka 2017. godine premašila 10.000 brodova.²¹

Ovdje će sateliti biti podijeljeni prema funkcijama koje pružaju brodu. Tako su podijeljeni na satelite koji pružaju podatke o poziciji, satelite potrebne za komunikaciju i satelite za nadzor odnosno promatranje Zemlje. Koji autonomnim brodovima omogućuju pristup vizualnim podacima o okolišu, uključujući vremenske uvjete, morsku navigaciju, i druge informacije koje su važne za sigurnu plovidbu.

¹⁸ Wright, R., G., Intelligent Autonomous Ship Navigation Using Multi-Sensor Modalities, TransNav, USA, 2019.

¹⁹ Satnews 2018. Euroconsult Report Focuses on Satellites to be Built and Launched by 2027. Satnews Daily, <http://satnews.com/story.php?number=2091711277>, 2019.

²⁰ Frady, L. <https://history-computer.com/how-many-satellites-are-in-space-right-now/> 2023.

²¹ Inmarsat passes 10,000-Vessel Fleet Xpress installation milestone as data demand accelerates Maritime Digitalisation, <https://www.inmarsat.com/en/news/latest-news/maritime/2021/inmarsat-passes-10-000-vessel-fleet-xpress-installation-mileston.html>, 2021.

3.3.1. Satelitsko pozicioniranje

Trenutačno je glavno sredstvo za elektroničko određivanje položaja, na većini suvremenih trgovačkih brodova, brodski GPS prijemnici ili DGPS (diferencijski GPS) i prijemnici međunarodnog udruženja lučkih vlasti (engl. *International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities* – IALA). Sateliti za određivanje položaja većinom orbitiraju u srednjoj orbiti (engl. *Medium Earth Orbit* - MEO) negdje između 2.000 i 35.786 kilometara iznad površine Zemlje s orbitalnim ciklusom od dva do osam sati.

Napredniji GNSS prijamnici koji su sposobni obraditi signale s GPS-a, ruskog GLONASS-a, kineskog Beidou-a, europskog Galilea, indijskog IRNSS-a, japanskog QZSS-a i satelitskih sustava za poboljšanje navigacije (engl. *Satellite Based Augmentation System* - SBAS), još uvijek su relativno rijetki u pomorskom sektoru.²²

SBAS sateliti mogu poboljšati točnost i pouzdanost GNSS informacija ispravkom pogreška u mjerenju signala. Točnost se poboljšava putem prijenosa ispravaka za opseg pogrešaka GNSS-a na širem području, integritet se poboljšava tako da SBAS mreža brzo otkriva pogreške signala satelita i šalje upozorenja prijemnicima ako prate pogrešan satelit, a dostupnost signala može se poboljšati ako SBAS šalje raspon signala sa svojih satelita. SBAS koristi GNSS mjerenja dobivena od precizno lociranih referentnih stanica raspoređenih širom kontinenta. Sve izmjerene pogreške GNSS-a prenose se u računalno središte, gdje se izračunavaju diferencijalne ispravke i poruke o integritetu. Ovi izračuni emitiraju se onda preko pokrivenog područja pomoću geostacionarnih satelita koji služe kao poboljšanje ili preklapanje izvornih GNSS poruka.²³

Međutim, očekuje se da će navedeni kombinirani ili višesistemski prijemnici uskoro postati uobičajeniji u pomorskom transportu i imati mogućnost integracije s žirokompasom, inercijalnim navigacijskim sustavom, radarom, laserskim i optičkim senzorima.

²² Paweł Zalewski, Integrity Concept for Maritime Autonomous Surface Ships' Position Sensors, 2020.

²³ European Union Agency for the Space Programme, What is SBAS?, <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-sbas>, 2022.

3.3.2. Satelitska komunikacija

Povezanost između broda i obale ključna je za omogućavanje daljinskih operacija i komunikacije brod - kopno. Komunikacija će biti potrebna kako na nižim tako i na višim stupnjevima autonomije broda. Brodovi na kratkim relacijama obično su u dometu 3G/4G pokrivenosti te mogu koristiti rješenja s dosadašnjim bežičnim prijenosom podataka visokog kapaciteta. Bit će potrebno puno prijenosa podataka za sigurne i učinkovite operacije, s stotinama, potencijalno tisućama senzora koji šalju povratne informacije u kontrolne centre. Pravi opseg satelitskih komunikacija u kontekstu autonomnih brodova dolazi tek kad počnemo razmatrati međunarodnu sliku.

Komunikacije putem satelita koriste kombinaciju orbitirajućih satelita iznad Zemlje i zemaljskih stanica kako bi prenosile informacije koristeći mikrovalove s jedne do druge točke na Zemlji. Svrhu i namjenu određenog komunikacijskog satelita određuje nekoliko čimbenika, od tehnologije i opreme na brodu do orbitalnih putanja. Na temelju orbite, komunikacijski sateliti orbitiraju u geostacionarnoj i niskoj Zemljinoj orbiti.

Sateliti u geostacionarnoj orbiti (engl. *Geostationary Earth Orbit* – GEO) na visini 35 780 kilometara iznad ekvatora i s vremenom ophoda 24 sata vrte se istom brzinom kao i Zemlja pa se, gledajući sa Zemlje, nalaze uvijek na istome mjestu. Satelitske mreže poput Inmarsatove ORCHESTRA mreže, ELERIA i Global Xpress mreže namjeravaju služiti tržištima komunikacija gdje je potreban prijenos velikih količina podataka.²⁴

Sateliti u niskoj Zemljinoj orbiti (engl. *Low Earth Orbit* - LEO) u usporedbi s GEO satelitima, puno su manji i kruže mnogo bliže Zemlji, u rasponu od otprilike 160 do 2.000 kilometara s vremenom orbite od otprilike 90 minuta. Za razliku od GEO orbite, gdje su potrebna samo tri satelita za globalnu pokrivenost, LEO orbita zahtijeva mnogo veću konstelaciju satelita. Na mnogo nižoj visini u usporedbi s drugim orbitama, LEO sateliti imaju koristi od manjeg vidokruga i niske latencije kako bi točno prenosili veće količine podataka, s mnogo jačim signalima pri većim brzinama.

Puno komunikacijskih tvrtki nudi svoja rješenja pa tako i Starlink, satelitski internetski sustav razvijen od strane Space X-a, tvrtke Elon Muska. Starlink je svemirski internetski

²⁴ Inmarsat, A straightforward introduction to satellite communications, <https://www.inmarsat.com/en/insights/corporate/2023/a-straightforward-introduction-to-satellite-communications.html>, 2023.

sustav koji koristi velik broj satelita u niskoj orbiti, omogućujući korisnicima pristup brzim internetskim vezama u udaljenim i ruralnim područjima. Trenutno Starlink posjeduje 4.519 satelita u niskoj Zemljinoj orbiti kako bi pružio bežični pristup internetu visoke brzine.²⁵

3.3.3. Satelitski nadzor

Satelitske snimke i promatranja oceana pružaju globalni pregled planeta, kao i detaljniju sliku obalnih i morskih okoliša. Sustavi za praćenje vremena putem satelita pružaju stvarne meteorološke podatke poput brzine vjetera, smjera vjetera, atmosferskog tlaka, vlage i temperature, ali i praćenje oluja i visine valova. Ovi podaci mogu uvelike pomoći autonomnim brodovima tako što će prema tim podacima planirati rute, potrošnju goriva, osigurati sigurnost broda na moru i poboljšati operativnu učinkovitost.

Podatci s satelita, s globalnim pogledom, nadopunjuju kopnene sustave poput radiosondi (služe za mjerenje vjetrova), vremenskih radara i površinskih opservacijskih sustava. Postoje dvije vrste vremenskih satelita: polarno orbitirajući i geostacionarni. Oba satelitska sustava imaju jedinstvene karakteristike i dolaze do vrlo različitih informacija. Dva polarno orbitirajuća satelita, u njihovim sjeverno-južnim orbitama, promatraju isto mjesto na Zemlji dva puta dnevno, jednom tijekom dana i jednom noću. Polarno orbitirajući sateliti pružaju snimke i atmosferske zapise temperatura i vlage nad cijelom Zemljom. Geostacionarni sateliti nalaze se u orbiti na otprilike 35.000 kilometara iznad ekvatora, vrte se istom brzinom kao Zemlja i neprestano se usmjeravaju na isto područje. To omogućava satelitu da snimi sliku Zemlje, na istoj lokaciji, svakih 30 minuta.²⁶ Računalna obrada takvih podataka stvara "pokretnu sliku" podataka koje meteorolozi koriste kao svoj ptičji pregled iz svemira.

U studenom 2016. godine lansiran je najnoviji geostacionarni satelit, GOES-R. Nakon godinu dana testiranja, nazvan je GOES-16 i stavljen u operaciju iznad dužine od 70°W. Poznat i kao GOES-East, ovaj satelit označava značajan napredak u odnosu na prethodne stare GOES satelite. Slijedeći satelit serije GOES-R lansiran je 1. ožujka 2018. godine.

²⁵ Starlink satellites: Everything you need to know about the controversial internet megaconstellation, <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>, 2023.

²⁶ National weather service, Satellites, <https://www.weather.gov/about/satellites>,

Nakon testiranja, dobio je oznaku GOES-17 (GOES West) i trenutno operira iznad dužine od 137°W.

Oba satelita, GOES-16 i GOES-17, pokrivat će vremensku hemisferu od zapadne obale Afrike do Novog Zelanda. Još dva dodatna satelita serije GOES-R bit će lansirana do 2036. godine kako bi pružili još bolje i detaljnije informacije o vremenu.²⁷

Prikupljeni podaci o vremenskim i morskim uvjetima ulaze u proces planiranja optimalne rute broda prema slijedećim komponentama. Sustavi za planiranje sastoje se od četiri povezane komponente: meteorološka i oceanografska komponenta (METOC) koja daje informacije za određeno područje interesa u određenom vremenskom okviru, a podatke prikuplja od udaljenih pružatelja ili lokalnih baza podataka. Zatim postoje još komponente modeliranja statičkog i dinamičkog ponašanja broda, s ciljem predviđanja njegovog ponašanja u različitim uvjetima navigacije. Komponenta planiranja koja koristi podatke iz prethodnih komponentata kako bi izračunao optimalnu rutu za brod. Također može razmotriti više mogućih ruta i kompromise kako bi pronašao najbolje rješenje temeljeno na scenariju. I zadnja komponenta odlučivanja odnosno donošenja odluke o optimalnoj ruti.²⁸

Širokopojasna satelitska povezanost ključna je za komunikaciju koja pomaže u praćenju operacija autonomnih plovila, dijeljenju velike količine slikovnih i podatkovnih rezultata odlučivanja na brodu te za pomoć u implementaciji tehnologije pohranjivanja i korištenje velike količine podataka na dva ili više udaljena mjesta. To isto uključuje svemirsko nadziranje AIS sustava, meteoroloških i oceanografskih slika i numeričkih skupova podataka te drugih senzora, kao i podataka o identifikaciji i praćenju plovila na velikim udaljenostima.

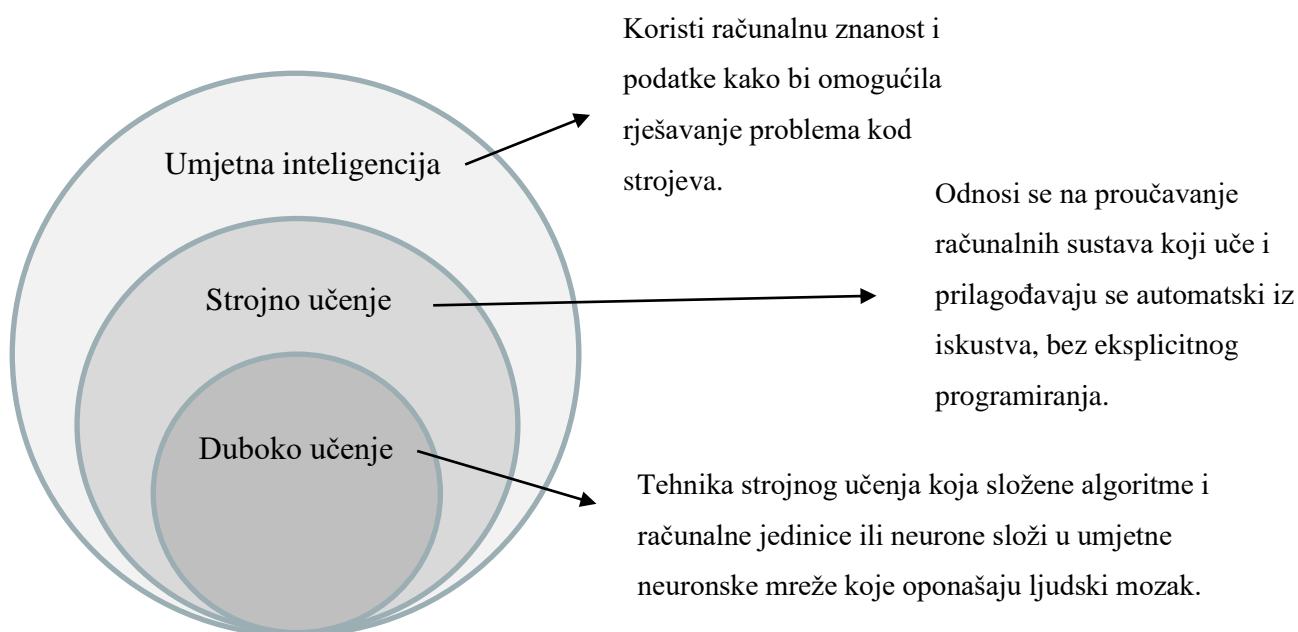
²⁷ NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration, Weather Satellites, <https://www.noaa.gov/jetstream/weather-satellites>, 2023.

²⁸ Fabbri, T., Weather-Routing System Based on METOC Navigation Risk Assessment, 2019.

4. METODE OBRADE PODATAKA PREMA NAVIGACIJSKIM FUNKCIJAMA

Da bi brod mogao vršiti navigaciju bez pomoći posade stroju su potrebni određeni algoritmi učenja kako bi se na relativno brz i učinkovit način stiglo do pravog rješenja. Takvi algoritmi trebali bi donositi odluke umjesto čovjeka, što znači da trebaju „razmišljati“ isto ili donekle slično kao čovjek.

Za bolje razumijevanje funkcioniranja ovih algoritama potrebno je objasniti nekoliko pojmova poput umjetne inteligencije te algoritama strojnog (engl. *Machine learning algorithms*) i dubokog učenja (engl. *Deep learning algorithms*).



Shema 1. Slojevi umjetne inteligencije

Izvor: pripremio student prema: Deep Learning vs. Machine Learning: Beginner's Guide, <https://www.coursera.org/articles/ai-vs-deep-learning-vs-machine-learning-beginners-guide>, 2023.

Kako je prikazano u Shemi 1, duboko učenje je podskup strojnog učenja, a strojno učenje je podskup umjetne inteligencije.

Duboko učenje razlikuje se od klasičnog strojnog učenja prema vrsti podataka s kojima radi i prema metodama učenja. Algoritmi strojnog učenja koriste strukturirane, označene podatke

za donošenje zaključaka, što znači da se određene značajke definiraju iz ulaznih podataka za model i organiziraju u tablice. Duboko učenje eliminira neke korake prethodnog postupka obrade podataka koji su obično uključeni u strojno učenje.

Ovi algoritmi također mogu obrađivati i nestrukturirane podatke, kao što su tekst i slike. Na primjer, imamo skup fotografija različitih plovila i želimo ih kategorizirati kao „jedrilica“, „kruzer“, „kontejneraš“, „jahta“ i tako dalje. Algoritmi dubokog učenja mogu odrediti koje značajke (npr. izgled palube ili tereta, ili odsustvo jedra itd.) su najvažnije za razlikovanje jednog plovila od drugog. U strojnom učenju, ova hijerarhija značajki obično se postavlja ručno od strane ljudskog stručnjaka.

Postoji još jedna metoda strojnog učenja koja je posebna iz razloga što ima mogućnost interakcije sa korisnikom ili vanjskim izvorom informacija te koja se koristi za poboljšanje performansi modela koji se koristi za donošenje odluka. Umjesto da se model trenira samo na velikom skupu podataka, koji možda nije reprezentativan za sve moguće scenarije u stvarnom svijetu, aktivno učenje omogućava modelu da uči izravno od stručnjaka (npr. ljudskih operatera brodova) tijekom operativne upotrebe.

Ideja je da se kroz ovaj proces model obučava brže i s manje podataka nego što bi bilo potrebno kod tradicionalnih metoda učenja.

U ovome poglavlju naglasak će biti na autonomnom obavljanju osnovnih navigacijskih funkcija, upravo pomoću algoritama umjetne inteligencije, strojnog i dubokog učenja. Funkcije obuhvaćaju planiranje kretanja broda, održavanje putanje broda i izbjegavanje prepreka tijekom plovidbe.

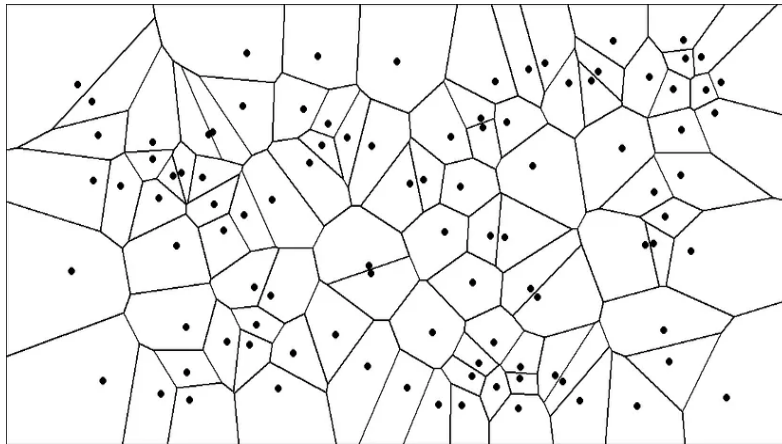
4.1. ALGORITMI PLANIRANJA KRETANJA BRODA

Planiranje puta ključni je dio razvoja autonomnih brodova, s ciljem korištenja algoritama za određivanje optimalnih putanja, kako bi se usmjerila vožnja plovila. Može se definirati kao problem pronalaženja rute između dviju pozicija u prostoru, uzimajući u obzir da ruta treba biti slobodna od prepreka, fizički izvediva unutar prostornih ograničenja i zadovoljavati određene kriterije optimizacije. Često korišteni kriteriji optimizacije puta uključuju minimalnu duljinu puta, vremena i potrošnje energije, kao i mjere sigurnosti ili rizika.

4.1.1. Izrada plana puta

Klasičan pristup izradi plana puta (engl. *Road map building*) sastoji se od dva procesa: modeliranja okoline kako bi se pripremilo za pretragu i izvođenje pretrage optimalnog puta u toj okolini. Nakon što su podatci o karti učitani i skenirane prepreke pomoću uređaja na brodu koji se odluči koristiti za skeniranje zadanog puta (LiDAR, kamere ili radar) te se prikupe svi potrebni navigacijski podatci koji služe kao ulazni podatci, algoritam za planiranje puta može se pokrenuti. Planiranje puta odvija se pomoću dva pristupa prikupljenim podacima, prvo prema grafikonu vidljivosti, a zatim prema Voronoi metodi²⁹. Da bi se shvatila Voronoi metoda, treba se pretpostaviti da na određenoj ravnini ima određen broj n točaka, kako je prikazano na slici (Slika 4.). Voronojev dijagram tih točaka razdjeljuje ravninu na točno n ćelija koje obuhvaćaju dio ravnine koji je najbliži svakoj točki i jednako od nje udaljen. Na slici (Slika 3.) prikazano je 100 nasumičnih točaka i njihov odgovarajući Voronojev dijagram. Kao što se može primijetiti, svaka točka je zatvorena u ćeliju čije su granice točno jednako udaljene između dviju ili više točaka.

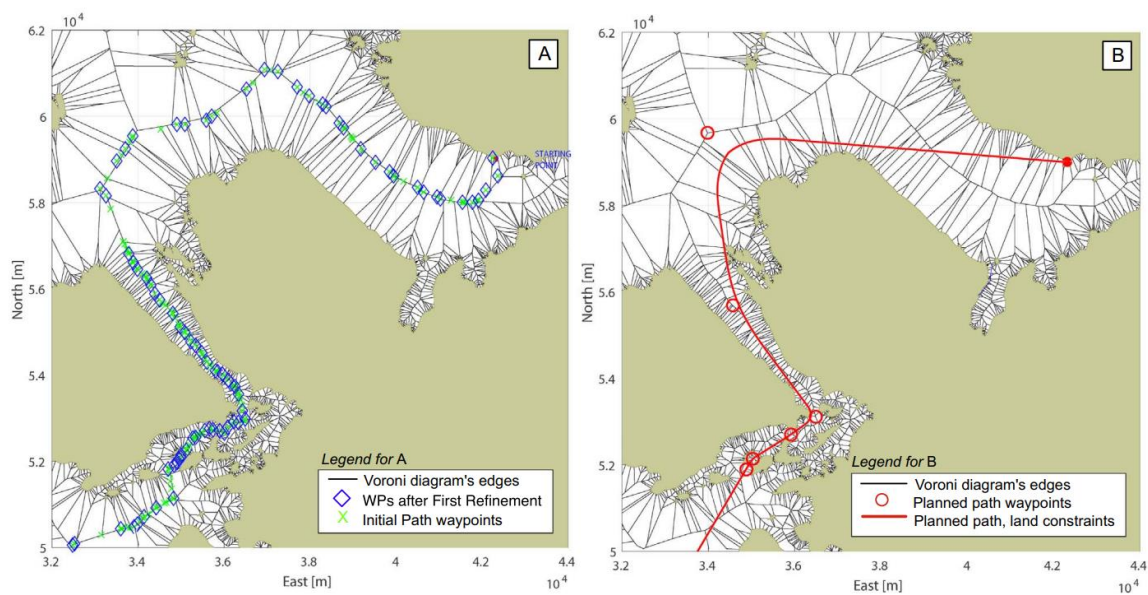
²⁹ Noel, A., *Autonomous Ship Navigation Methods*, India, 2019.



Slika 3. Voronoi dijagram

Izvor: <https://towardsdatascience.com/the-fascinating-world-of-voronoi-diagrams-da8fc700fa1b>, 2022.

Kada bi se takva metoda primijenila na primjer u navigaciji to bi izgledalo kao na prikazanoj slici (Slika 4.). Slika A prikazuje kopnene prepreke modelirane kao poligoni. Njihovi vrhovi koriste se kao točke polaznice za generiranje Voronojevog dijagrama (crne linije). Na slici B dobiva se konačan put kontinuirane krivulje.



Slika 4. Izrada plana puta prema Voronoi metodi

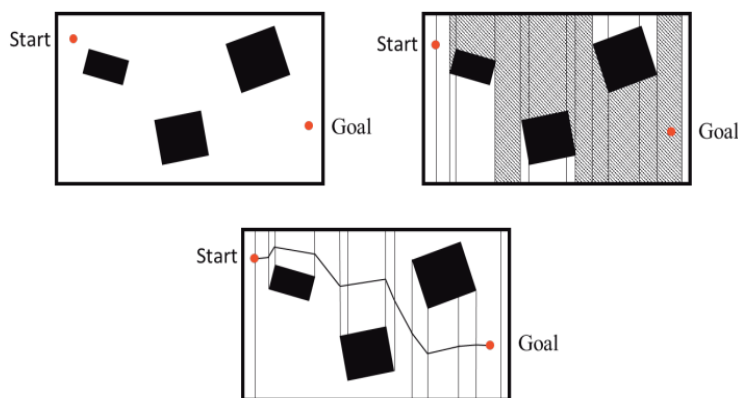
Izvor: Candeloroa, M., Anastasios M. Lekkasa , Asgeir J., A Voronoi-diagram-based dynamic path-planning system for underactuated marine vessels, 2017.

Zanimljivo je što pri zadanoj polazišnoj i završnoj lokaciji, algoritam prvo planira početni put na globalnoj razini (razmatrajući cijelu dostupnu kartu) te jedan od novih elemenata je

da se osim kopnenih ograničenja, iskorištavaju i podaci o dubini mora dostupni u nautičkim kartama kako bi se izbjegla plovidba u plitkim vodama.³⁰

Također je razvijena metoda za praćenje puta tijekom plovidbe. Kada se otkrije prepreka bila ona statička ili dinamička, prati se njeno kretanje pomoću ugrađenog sonara, a algoritam ulazi u fazu ponovnog planiranja i generira odstupanje puta na lokalnoj razini koje osigurava izbjegavanje sudara uz poštivanje pravila o izbjegavanju sudara na moru. Osim predviđene buduće putanje same prepreke, faza ponovnog planiranja također uzima u obzir vremenske intervale potrebne za ponovno planiranje algoritma i promjenu kursa vozila, kako bi se stvorilo korisno odstupanje. Postupak je vrlo sličan početnoj fazi planiranja, ali razvijeni su dodatni algoritmi kako bi se odabrala smisljena veličina područja karte u kojem će se tražiti odstupanja puta i kako bi se to lokalno odstupanje lako povezalo s izvornim putem nakon što se izbjegne sudar.³¹

Algoritam dekompozicije (engl. *Cell Decomposition*) skenirani prostor dijeli u nekoliko blokova koji se nazivaju ćelije i svaka ćelija se može smatrati nekom vrstom pojednostavljenog prostora. Na Slici 5. može se jasno vidjeti proces dekompozicije prostora. Ćelije se analiziraju kako bi se dobio mogući put uz pomoć susjednih ćelija. Tada se linija crta kroz središte svake geometrije, što otkriva dobro definiran put koji objekt može slijediti i doći do odredišta. Kao što se može primijetiti na slici, u svakoj sljedećoj ćeliji se priprema nova putanja koja odgovara obrisima blokova, odnosno prepreka koje slijedi.



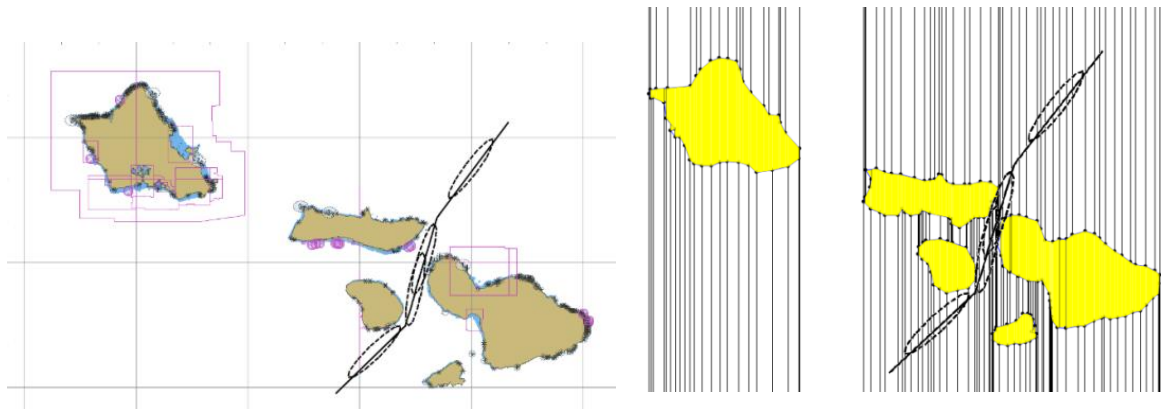
Slika 5. Prikaz metode dekompozicije

Izvor: Autonomous Ship Navigation Methods: A Review; Abraham Noel, Shreyanka K, Kaja Gowtham Satya Kumar; Chennai, India, 2019.

³⁰ Candeloroa, M., Anastasios M. Lekkasa , Asgeir J., A Voronoi-diagram-based dynamic path-planning system for underactuated marine vessels, 2017.

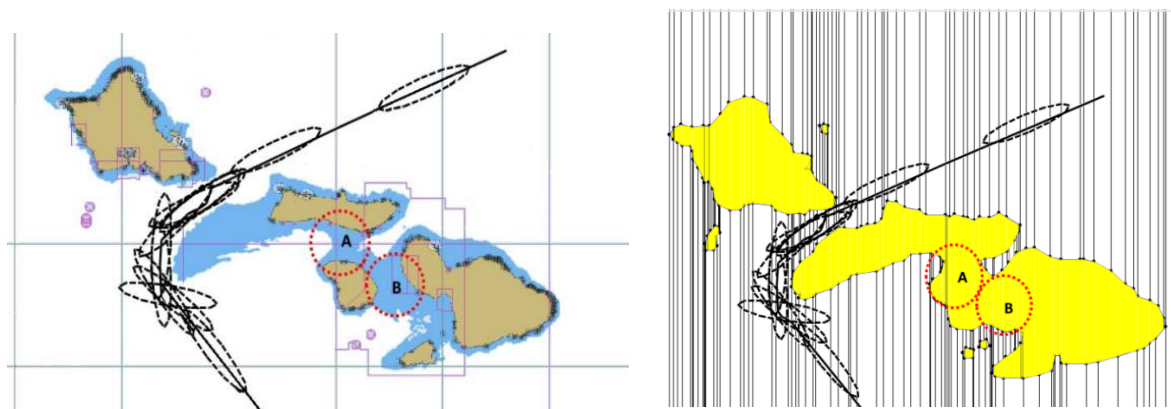
³¹ Candeloroa, M., Op. cit.

Jedna od ključnih značajki ove metode je mogućnost lokalne modifikacije „mreže“, odnosno ćelija na temelju položaja pokretnih objekata, što je važno za dinamičke situacije tijekom navigacije brodova. To osigurava da se cijeli postupak planiranja rute može izvesti unutar očekivanog vremenskog okvira. Isto tako može poslužiti kod promjene sigurnosne konture (engl. *Safety contour*) u nedovoljno istraženim područjima kako je prikazano na Slikama 6. i 7.³²



Slika 6. Grafički prikaz plovidbe i dekompozicije sa sigurnosnom konturom od 10 metara

Izvor: M. Wielgosz & M. Mąka, Route Optimization in the Restricted Area Taking into Account Ship Safety Zones, 2017.



Slika 7. Grafički prikaz plovidbe i dekompozicije sa sigurnosnom konturom od 20 metara

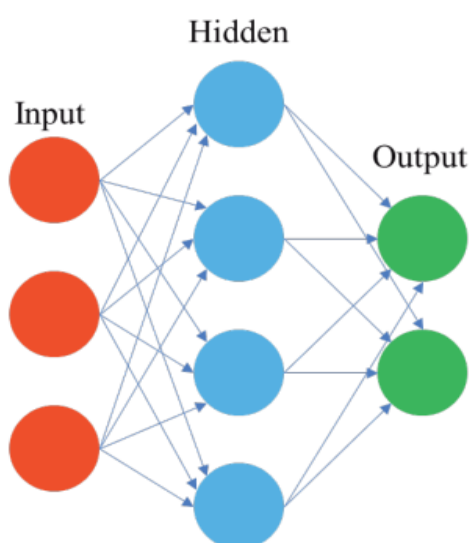
Izvor: M. Wielgosz & M. Mąka, Route Optimization in the Restricted Area Taking into Account Ship Safety Zones, 2017.

³² . Wielgosz & M. Mąka, Route Optimization in the Restricted Area Taking into Account Ship Safety Zones, 2017.

4.1.2. Algoritam za izračun potrošnje goriva i smanjenje pogrešaka u predviđanju putanje broda

Umjetna neuronska mreža (engl. *Artificial Neural Network* - ANN) je metoda koja je inspirirana biološkim neuronskim mrežama u mozgu. Sastoji se od više umjetnih neurona koji su međusobno povezani i koji rade zajedno na obradi informacija. Glavna primjena umjetnih mreža je kod traženja zavisnosti između podataka koji nisu u isključivo linearnoj vezi, a opet mogu se ujediniti u jedan složeni ulazni skup.

Metoda umjetne neuronske mreže radi na principu slojeva neurona koji su podijeljeni na tri glavna sloja, a to su ulazni, skriveni (radni) i izlazni što se može vidjeti na slici (Slika 8.).



Slika 8. Shematski prikaz umjetne neuronske mreže

Izvor: Autonomous Ship Navigation Methods: A Review; Abraham Noel, Shreyanka K, Kaja Gowtham Satya Kumar; Chennai, India, 2019.

U autonomnoj navigaciji koristi se za minimiziranje pogrešaka u predviđanju putanje broda, prognozirajući vremena te ono najbitnije, za predviđanje potrošnje goriva broda za različite operativne uvjete. Cilj je razviti sustav za potporu odlučivanja koji koristi ovu metodu kako bi predvidio optimalno korištenje goriva u stvarnom vremenu na brodu za energetske učinkovito upravljanje. Model predviđanja goriva „obučava“ se pomoću podataka prikupljenih tijekom plovidbe, uključujući podatke o: brzini broda, broj okretaja motora, srednji gaz, poravnanje, količina tereta na brodu te utjecaji vjetera i mora³³.

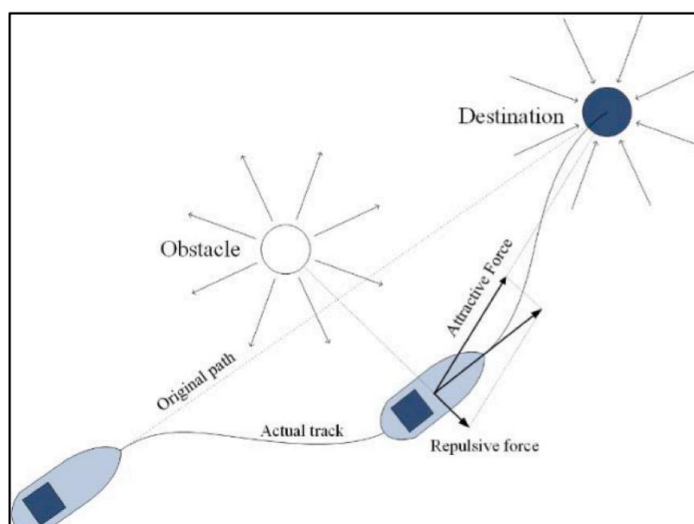
³³ Beşikçi, B., An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations

4.2. ALGORITMI ZA IZBJEGAVANJE PREPREKA TIJEKOM PLOVIDBE

Algoritmi za izbjegavanje sudara na moru vrlo su kompleksni zbog toga što u situacijama izbjegavanja sudara ili ostalih objekata koji se nađu na putu trebaju donositi odluke u skladu s COLREGs pravilima. Postoji više algoritama koji su predviđeni za izbjegavanje prepreka tijekom plovidbe, poput metode umjetnog potencijalnog polja, algoritma optimizacije kolonije mrava te genetskog algoritma za potporu kod donošenja odluka.

4.2.1. Izbjegavanje prepreka

Algoritam umjetnog potencijalnog polja (engl. *Artificial Potential Field*), generira odbijajuće potencijalno polje oko prepreka i privlačno potencijalno polje prema odredištu (Slika 9.). Zbroj ovih potencijalnih polja određuje virtualnu silu za vođenje kretanja vozila. Ovaj algoritam ne pruža izravno trajektoriju bez sudara, već smjer kretanja, što nije prvotno dizajnirano za dinamično okruženje. Kako bi se izbjegli sudari u dinamičnom okruženju, postoji poboljšani algoritam razmatranjem dva faktora: brzinu prepreke i maksimalnog usporavanja. Odbijajući potencijal prepreke povećava se razmatranjem ovih faktora, zato se ova tehnika počela primjenjivati pri izbjegavanju sudara brodova. Glavna mana ovog pristupa je ta da bi brod mogao ostati zarobljen u lokalnom minimumu.³⁴



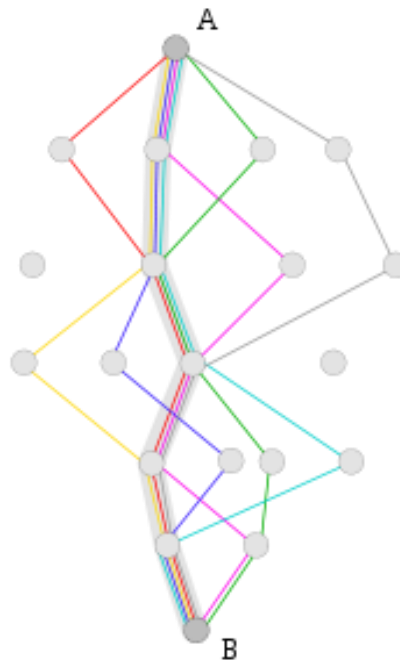
Slika 9. Prikaz metode umjetnog potencijalnog polja

Izvor: Yamin H., Linying C., Pengfei C., Ship collision avoidance methods: State-of-the-ar, 2019.

³⁴ Yamin H., Linying C., Pengfei C., Ship collision avoidance methods: State-of-the-ar, 2019.

Vrlo zanimljiv, optimizacijski algoritam koji se temelji na ponašanju kolonija mrava u prirodi i koristi se za pronalazak najboljeg puta do cilja. Algoritam započinje označavanjem puteva feromonskim tragovima, nakon čega se mravi kreću od početne točke i biraju sljedeći čvor na temelju vjerojatnosti koju računaju na temelju duljine puta i količine feromona na tom putu. U algoritmu mravi pojačavaju tragove feromona na putevima koje su prošli kako bi povećali vjerojatnost da će drugi mravi slijediti taj put ako je to bio uspješan put do izvora hrane.

Feromonski tragovi su tragovi kemikalija koje mravi ostavljaju na svom putu kada se kreću između mravinjaka i hrane. Tragovi služe kao komunikacijsko sredstvo između mrava u koloniji te im pomažu da pronađu najbolji put do hrane (Slika 10.)³⁵.

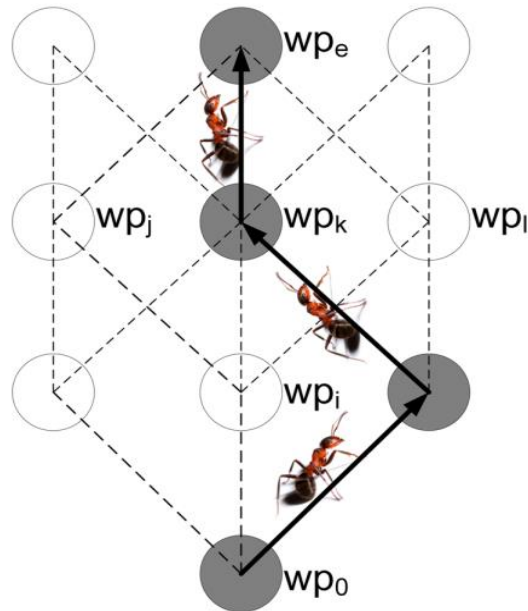


Slika 10. Pronalazak optimalnog puta

Izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/Ant_colony_optimization_algorithms, 2018.

³⁵ Lazarowska, A., Research on algorithms for autonomous navigation of ships, 2019.

Na taj način, simulacijski agenti (nazvani umjetnim mravima) označavaju sva moguća rješenja i biraju optimalni put. U slučaju susreta s preprekom, mravi se kreću duž konture prepreke. Na slici (Slika 11.) prikazano je kako mravi kada naiđu na prepreku, jednostavno ju zaobiđu te se ponovno vrate na najbliži put do cilja upravo pomoću velike koncentracije feromonskih tragova na toj putanji.



Slika 11. Prikaz algoritma optimizacije kolonije mrava

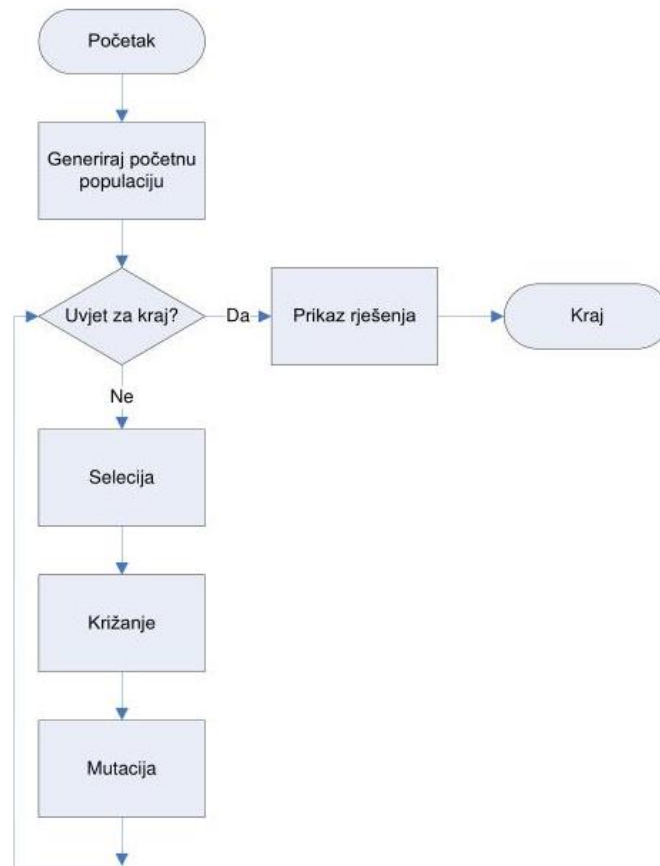
Izvor: Lazarowska, A., Research on algorithms for autonomous navigation of ships, 2019.

Algoritam optimizacije kolonije mrava pokazao je visoku učinkovitost u rješavanju problema pronalaska najboljeg puta u grafu i izbjegavanja prepreka na tom putu.

4.2.2. Podrška kod donošenja odluke

Genetski algoritam vrsta je optimizacijskog algoritma, inspiriran procesom prirodne selekcije. Djeluje na način da stvara populaciju potencijalnih rješenja te koristi niz matematičkih operacija za evoluciju najboljih rješenja u sljedećim generacijama. Primjenom načela križanja, mutacije, selekcije i reprodukcije, genetski algoritam generira potpuno novu populaciju iz najboljih rješenja. Taj postupak se ponavlja sve dok ne postigne uvjet zaustavljanja, a to je dostizanje zadovoljavajuće razine prilagođenosti (Slika 12.). Na kraju postupka najbolja jedinka se bira kao konačno rješenje problema.

Za autonomnu navigaciju broda, genetski algoritam mogao bi predložiti odgovarajuću odluku za izbjegavanje prepreka. Odluke mogu uključivati određene manevre ili zaustavljanje s odgovarajućom brzinom. Algoritam se može implementirati kroz rezultate dobivene iz različitih eksperimenata kako bi se postigao optimalni izlaz.



Slika 12. Shema funkcioniranja genetičkog algoritma

Izvor: Primjena genetskih algoritama za optimiranje pogonskih stanja razdjelnih mreža, <https://www.slideserve.com/morna/primjena-genetskih-algoritama-za-optimiranje-pogonskih-stanja-razdjelnih-mre-a>, 2014.

4.3. ALGORITMI ZA LOKALIZACIJU I MAPIRANJE

Lokalizacija i mapiranje bitne su komponente kada je riječ o autonomnoj navigaciji brodova, omogućavajući im siguran i učinkovit rad. Lokalizacija uključuje određivanje točne pozicije broda i njegove orijentacije u odnosu na okolinu, često se oslanjajući na GPS, senzore i ostale napredne algoritme za dobivanje pozicije. Mapiranje podrazumijeva stvaranje detaljnih digitalnih prikaza okoline broda, uključujući prepreke i druge brodove, kako bi se olakšalo planiranje puta i izbjegavanje sudara. Kombiniranjem lokalizacije i mapiranja, autonomni brodovi mogu neprestano ažurirati svoj položaj na digitalnim kartama, omogućavajući im donošenje stvarnih odluka i prilagodbi svoje putanje u stvarnom vremenu.

Ova tema djelomično je već obrađena u Poglavlju 3, na taj način da se saznaje koji senzori su sve potrebni za prikupljanje podataka potrebnih za lokalizaciju i mapiranje. Pojam „data fusion“ koristi se kada sustav umjetne inteligencije, dobivene informacije iz svih senzora zajedno koristi i obrađuje na sljedeći način. Prvi korak je snimanje „sirovih“ podataka pomoću senzora. Podaci se zatim filtriraju dok se primjenjuje odgovarajuća tehnologija fuzije, koja se zatim koristi u lokalizacijskim i kartografskim tehnikama poput SLAM-a (engl. *Simultaneous localization and mapping*). Tehnika omogućuje izgradnju karte i lokalizaciju vozila na toj istoj karti. Isti podaci mogu se koristiti za identifikaciju statičkih ili pokretnih objekata u okolini, a ti podatci mogu se koristiti i za klasifikaciju objekata. Informacije o klasifikaciji koriste se za stvaranje modela okoline, pomoću kojeg se algoritam orijentira i upravlja.

U ovom potpoglavlju naglasak će biti na algoritmima potrebnima za prepoznavanje, odnosno klasifikaciju skeniranih objekata.

4.3.1. Klasifikacija objekata

Prema Međunarodnoj pomorskoj organizaciji, svi brodovi s bruto tonažom od 500 i više i svi brodovi s bruto tonažom od 300 i više koji obavljaju međunarodna putovanja, kao i svi putnički brodovi, obavezni su biti opremljeni AIS-om³⁶. Dizajniran je da Pomorske prometne službe (engl. *Vessel Traffic Service* - VTS) i brodovi međusobno razmjenjuju

³⁶ IMO, AIS transponders, <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/AIS.aspx>, 2004.

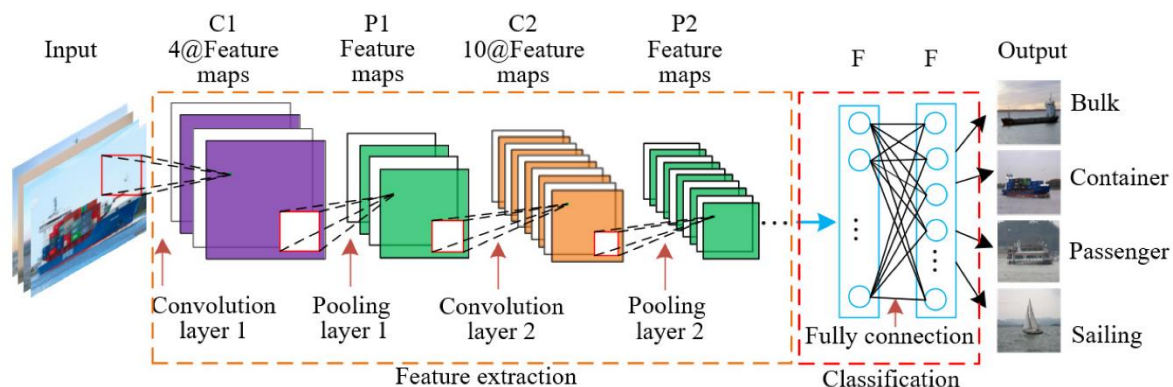
podatke o vrsti, zastavi, statusu, brzini, smjeru, dužini, širini, gazu i destinaciji broda. Sva plovila koja plove bez AIS-a mogu predstavljati potencijalnu opasnost za plovidbu autonomnog broda. U takvim situacijama autonomni sustav ne bi pronalazio razliku između broda ili nekog drugog objekta. Zato danas, kamere igraju važnu ulogu u detekciji morskog okruženja oko plovila. Upravo radi ovakvih problema, metoda konvolucijskih neuronskih mreža (engl. Convolutional Neural Network - CNN) koristi se u brodarskoj industriji za identifikaciju i klasifikaciju različitih brodova na temelju njihovih karakteristika, kao što su oblik, veličina, brzina, što im se nalazi na palubi (cjevovodi, kontejneri, otvori skladišta, tankovi plina...). To može biti korisno u situacijama kada se brod mora kretati kroz gusto naseljena područja ili kada se susreće s drugim brodovima u pokretu. Konvolucijska neuronska mreža može se koristiti za praćenje drugih brodova i predviđanje njihovih kretanja, što omogućava autonomnom plovilu da donese bolje navigacijske odluke i izbjegne potencijalne sudare.³⁷

Ono što je ključno za razumijevanje funkcioniranja CNN-a su tri osnovna koncepta: lokalna područja osjetljiva na podražaj, dijeljene težine i pristranosti te aktivacijske funkcije i grupiranje.

Na priloženoj slici (Slika 13.) prikazana je shema funkcioniranja konvolucijske neuronske mreže. Prvi korak je taj da se na ulaz prosljeđuje slika koja se treba analizirati. CNN koristi male matrice, tzv. konvolucijske filtre, za ekstrakciju relevantnih značajki iz ulaznih podataka. Ovi filtri se primjenjuju na preklapajućim regijama ulaznih podataka, izvode točkasti produkt između filtra i ulaznih vrijednosti u svakoj regiji, te kao rezultat stvara mapu koja ističe prisutnost određene značajke, poput ruba ili boje.

³⁷ Yongmei R., Jie Y., Qingnian Z., Multi-Feature Fusion with Convolutional Neural Network for Ship Classification in Optical Images, 2019.

CNN obično ima više slojeva konvolucijskih filtara, slijedeći slojeve grupiranja koje smanjuju dimenzionalnost mapa, čine mrežu robusnijom u odnosu na ulazne podatke. Konačni slojevi mreže obično su potpuno povezani slojevi koji obavljaju klasifikacijske zadatke na temelju naučenih značajki.



Slika 13. Shema konvolucijske neuronske mreže

Izvor: Yongmei R., Jie Y., Qingnian Z., Multi-Feature Fusion with Convolutional Neural Network for Ship Classification in Optical Images, 2019.

Ukratko, konvolucijske neuronske mreže moćna su tehnologija koja omogućava autonomnim plovilima da vide, identificiraju i reagiraju na svoju okolinu. One su ključne za razvoj potpuno autonomnih brodova u pomorskoj industriji.

Osim konvolucijskih neuronskih mreža postoji algoritam umjetne imunološke mreže (engl. *Artificial Immune Network*) koja radi na malo drugačijem principu. Imunološke mreže su računalni model koji simulira prirodni, ljudski imunološki sustav, a koristi se isto radi prepoznavanja i izbjegavanja opasnih predmeta u okolini plovila. Radi na principu interakcije između antitijela i antigena u prirodnom imunološkom sustavu. Pomoću senzora se identificiraju objekti u okolini broda i pretvara ih se u antigene. Zatim umjetni imunološki sustav generira antitijela koja se „bore“ protiv antigena, što pomaže u identifikaciji i klasifikaciji objekata. Tako se povećava količina već unaprijed poznatih antitijela za određene antigene, što bi značilo da umjetni imunološki sustav uči iz prethodno naiđenih prepreka i anomalija, kao što u ljudskom tijelu imunološki sustav štiti od različitih infekcija i virusa s kojima se već susreo.

Koristeći se ovom metodom, brod može izgraditi model okoline u stvarnom vremenu, što omogućuje brzo i precizno reagiranje na promjene u okolini.

4.3.2. Učenje značajki

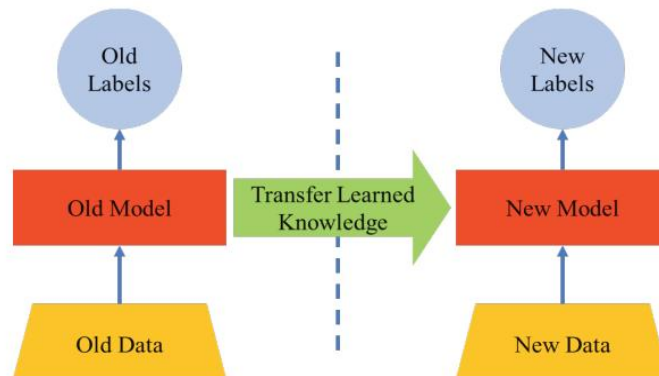
Učenje značajki su skup tehnika koje mogu automatski razlikovati karakteristike poželjne za detekciju ili klasifikaciju iz postojećih podataka. Umjesto da ručno definiramo značajke, stroj ih uči samostalno iz podataka i koristi ih za obavljanje zadataka. Ova tehnika se koristi u autonomnoj navigaciji brodova kako bi se iz AIS podataka klasificirali objekti. Primjerice, algoritam za učenje značajki može automatski naučiti prepoznavati različite vrste brodova, bova ili drugih objekata na temelju karakteristika njihovog AIS signala. To može pomoći autonomnom brodu da donese bolje navigacijske odluke prepoznajući moguće opasnosti ili prepreke na svom putu.

Jedna od metoda je i inkrementalno učenje kao proces strojnog učenja, u kojem se sustavu postupno dodaju novi skupovi podataka bez potrebe za ponovnim učenjem cijelog sustava. Ovaj proces omogućuje sustavu da se prilagođava novim situacijama i okruženjima te da poboljšava svoje performanse vremenom, bez potrebe za ponovnim treniranjem na cjelokupnom skupu podataka. Inkrementalno učenje je korisno u situacijama u kojima je skup podataka neprestano u porastu ili se mijenja, a sustav treba brzo prilagoditi nove podatke.

Metoda se najčešće koristi u procesu ekstrakcije prometnih ruta zbog svoje sposobnosti prilagodbe promjenjivim situacijama. Primjena inkrementalnog učenja na velike skupove podataka ima za cilj proizvesti brže vrijeme predviđanja i klasifikacije, stoga se koristi za automatsku klasifikaciju objekata i složenih okruženja kako bi pomogla autonomnoj navigaciji.

Metoda transfernog učenja (engl. Transfer Learning) radi na principu poboljšanja performansi modela u novom području primjene, korištenjem znanja koje je prethodno naučeno. Ideja je prenijeti znanje naučeno iz jednog problema na drugi sličan problem. Tada se model prilagođava novom problemu s manje „truda“ i manjim brojem etapa nego što bi bilo potrebno da se model tretira iz nule. Na slici (Slika 14.) shematski je prikazano kako se

znanje naučeno rješavanjem jednog problema primjenjuje na rješavanje novog sličnog problema.



Slika 14. Prikaz metode transfernog učenja

Izvor: Autonomous Ship Navigation Methods: A Review; Abraham Noel, Shreyanka K, Kaja Gowtham Satya Kumar; Cohena, India, 2019.

5. TEHNOLOŠKI IZAZOVI KOJI OGRANIČAVAJU ŠIRU UPOTREBU AUTONOMNIH BRODOVA

Osim već obrađenih senzorskih izazova te izazova obrade senzorskih podataka postoje i ostali tehnološki i pravni izazovi koji ograničavaju širu upotrebu autonomnih brodova.

Pomorska industrija suočava se s definiranjem i razumijevanjem koncepta autonomnih brodova, kao i razvoja pravnog okvira međunarodnih i nacionalnih propisa. Cilj je definirati autonomiju broda, način na koji autonomni brod funkcionira, pravni režim, način upravljanja autonomnim brodom, infrastrukturu luke, operativne postupke priveza i odveza u luci, operativne postupke pri prekrcaju tereta te kibernetičku sigurnost.

5.1. INFRASTRUKTURA

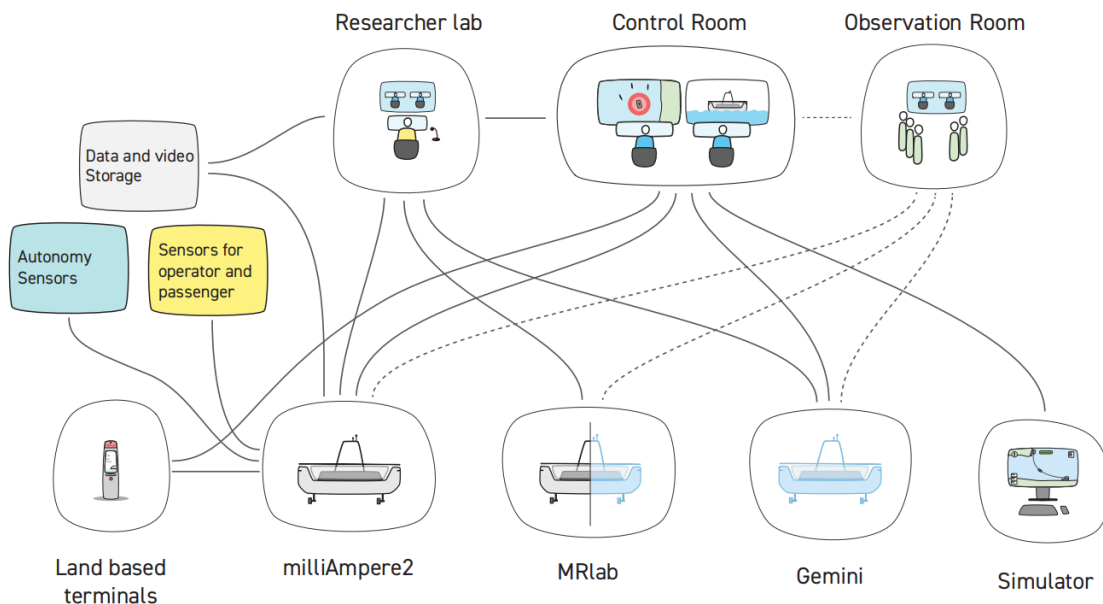
S obzirom na to da se visoko automatizirani brodovi pretvaraju u autonomne, očekuje se da će njihova posada, odnosno operateri preći u kontrolne centre na kopnu. U tim centrima, tim operatera obučenih za navigaciju može nadgledati stanje flote autonomnih brodova i preuzeti njihovu kontrolu kada je intervencija potrebna. Postoji mnogo ideja o tome kako dizajnirati kontrolne sobe za daljinsko upravljanje brodovima i bespilotnim letjelicama.

2020. godine, NTNU Shore Control Lab, započeo je izgradnju kontrolne jedinice na kopnu.³⁸ To je fleksibilna istraživačka infrastruktura za razvoj i testiranje daljinskog nadgledanja i upravljanja autonomnim brodovima, uključujući različite fizičke postavke i sučelja za kontrolne centre. Infrastruktura se sastoji od sljedeće navedenih jedinica kako je prikazano na Slici 15:

- milliAmpere i njezinog srodnika milliAmpere2 - dva potpuno električna autonomna putnička trajekta opremljena naprednim senzorima i opremom za autonomnu navigaciju

³⁸ Ole Andreas, NTNU Shore Control Lab: Designing shore control centres in the age of autonomous ships, 2022.

- fleksibilnog kontrolnog centra na obali gdje brojni operatori mogu nadzirati i upravljati flotom autonomnih brodova, uključujući milliAmpere1 i 2
- laboratorijskog odjeljka za istraživače koji daju upute operatorima u kontrolnom centru i bilježe, promatraju i analiziraju njihove akcije i ponašanje
- Opservacijske sobe za programere, vlasnike proizvoda, menadžere proizvoda i druge zainteresirane strane kako bi promatrali eksperimente, terenske testove i ocjene upotrebljivosti različitih postavki kontrolnih soba
- Autoferry Gemini - simulator broda temeljen na platformi Gemini koji nam omogućava stvaranje izazovnih ili visokorizičnih scenarija gdje se operatori testiraju pod stresom, a nova korisnička sučelja testiraju bez ugrožavanja broda, putnika ili opreme
- Laboratorij proširene stvarnosti, gdje se fizički dizajni autonomnih putničkih trajekata, kao i iskustvo putnika, mogu testirati i procijeniti u sigurnom virtualnom okruženju
- Trajektna pristaništa s indukcijskim punjenjem i kopnenim terminalima za putnike.



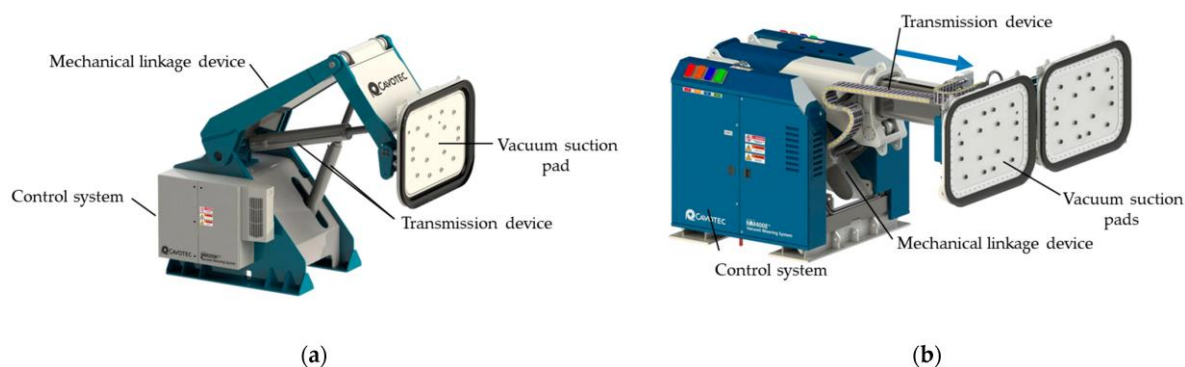
Slika 15. Shematski prikaz NTNU Shore Control Lab-a

Izvor: Ole Andreas, NTNU Shore Control Lab: Designing shore control centre in the age of autonomous ships, 2022.

Glavna razlika između Shore Control Laba i drugih centara za daljinsko upravljanje je mogućnost provođenja kontroliranih eksperimenata s snimcima senzorskih podataka s

autonomnih brodova i laboratorijske opreme. Također omogućava detaljne zvučne i video snimke operatora i njihovih interakcija s sustavima i međusobno, kao i prikupljanje biometrijskih podataka o pažnji i razini stresa operatora.

Što se tiče sustava priveza i odveza broda, pored konvencionalnih sustava priveza koji se oslanjaju na užad i vitlove, razvili su se i alternativni sustavi priveza poput magnetskih i vakuumskih priveza. Sustav vakuumskog priveza složeniji je i inovativniji sustav koji koristi vakuumsku podlogu umjesto užadi. Vakuumske podloge imaju mjerljivo radno opterećenje koje omogućuje sigurne veze između broda i obale. U slučaju kvara sustava, sustav ne gubi vakuum tijekom sljedeća dva sata, tako da postoji dovoljno vremena za rješavanje problema u sustavu.³⁹ Na Slici 16. prikazani su dijelovi Vakuumskog sustava, a to su: vakuumska crpka, vakuumski jastučići, hidraulička ruka, čelik te kontrolni monitori. Sustav ima senzore i monitore koji pokazuju vakuumsku silu, pokrete broda i javljaju alarme.



Slika 16. Vakuumski privezni sustav

Izvor: Kaicheng J., A Review of Progress and Applications of Automated Vacuum Mooring Systems, 2022.

Princip rada sustava je sljedeći: kada brod plovi blizu obale, obično nekoliko metara, uključuje se vakuum crpka automatiziranog sustava priveza. Brod se polako povlači prema obali vakuumskom podlogom, tada je brod izložen konstantnoj usisnoj sili vakumske podloge. Nakon što se brod priveže, sigurnosni sustav automatiziranog sustava vakuumskog priveza može osigurati konstantnu usisnu silu između broda i automatiziranog sustava vakuumskog priveza. Automatizirani sustav vakuumskog priveza može kompenzirati kretanje broda u stvarnom vremenu i automatski prilagoditi položaj broda. Senzori su integrirani u vakumsku podlogu i hidraulički sustav kako bi pružili informacije sustavu. Među njima, senzori u vakumskoj podlozi pružaju postotak vakuuma i usisnu silu koja

³⁹Terziev, V., Kanev, D., Specific Aspects of Motivation of Seafarers, 2017.

djeluje na brod, dok senzori u hidrauličkom sustavu pružaju informacije o kretanju broda. Sve navedene informacije prikazuju se na računalu.⁴⁰

Magnetski sustav priveza izgleda skoro pa slično kao i vakuumski samo što se na vrhu umjesto vakuumskih jastučića nalazi elektromagnetska usisna čašica. Ta čašica uključuje se kako bi generirala elektromagnetsku silu koja čvrsto privlači i fiksira brod. Pritisna opruga i tlak u sustavu za ublažavanje tlaka mogu ublažiti udarnu silu koja nastaje pokretom trupa u svih 6 stupnjeva slobode pomaka te osigurati sigurnost elektromagnetskog priveznog uređaja i stjenke broskog trupa.

5.2. KIBERNETIČKA SIGURNOST

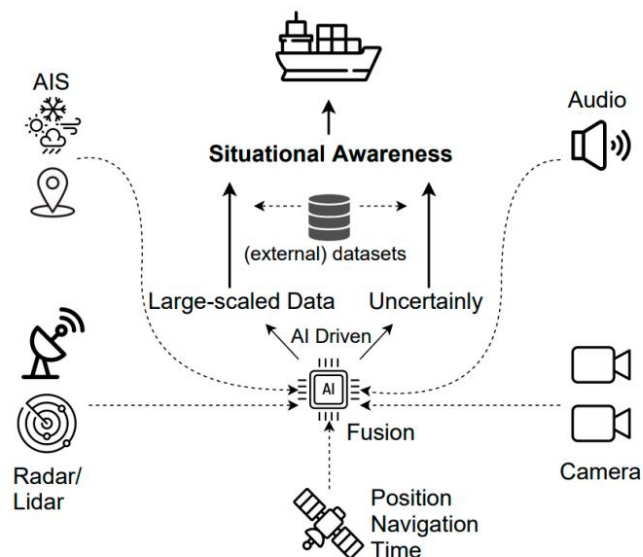
Od kolovoza 2022. do ožujka 2023. analizirano je ukupno 55 pomorskih kibernetičkih incidenata, uključujući 28 grupa za ucjenu, 19 nepoznatih grupa napada i 8 grupa napada s naprednim ugrožavanjem (engl. *Advanced Persistent Threat* - APT).⁴¹

Primarne vrste štete uključuju ucjenu i prekide usluge, što čini više od polovine svih vrsta štete. Evidentirani učinci i procjene za autonomne brodove ne uzimaju u obzir potencijalne prijetnje povezane s kibernetičkim i kibernetičko-fizičkim napadima. To je zato što neispitane kombinacije postojećih pomorskih sustava s novim tehnologijama autonomne navigacije čine nemogućim sveobuhvatnu procjenu njihovih rizika i ranjivosti. Ipak, kako se povećava povezanost između brodova (i između brodova i obalne infrastrukture), tako raste i potencijalna prijetnja iz kibernetičkog prostora.

⁴⁰ Kaicheng J., A Review of Progress and Applications of Automated Vacuum Mooring Systems, 2022.

⁴¹ Yiwoon, Y., Formulating Cybersecurity Requirements for Autonomous Ships Using the SQUARE Methodology, 2023

Senzor autonomnih brodova identificira položaj broda i prepreke izvana i iznutra i prenosi ih modelu umjetne inteligencije. Model umjetne inteligencije zatim analizira podatke u stvarnom vremenu kako bi odredio načine na koje brod može sigurno operirati. Kao rezultat analize i procjene, brod plovi pod kontrolom umjetne inteligencije putem upravljačkog sustava. Drugim riječima, prikuplja podatke u stvarnom vremenu iz senzora poput AIS-a, GNSS-a, kamera, LiDARA i ostalih senzora, kako je prikazano na slici (Slika 17), te prenosi odgovarajuće ocjene (na temelju rezultata analize) navigacijskom ili upravljačkom sustavu kako bi upravljao brodom. U ovom procesu, ako se uoči nepravilnost u bilo kojem dijelu podataka, dolazi do niza pogrešnih operacija. U toku podataka za autonomnu navigaciju, korištenjem ranjivosti u brodskim sustavima i tehnologijama umjetne inteligencije, prikazati će se različiti scenariji napada.



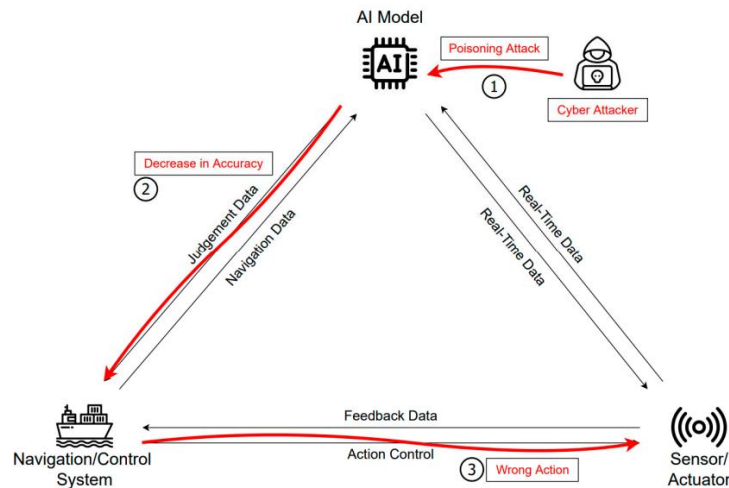
Slika 17. Pregled sustava svijesnosti pokretanim umjetnom inteligencijom

Izvor: Formulating Cybersecurity Requirements for Autonomous Ships Using the SQUARE Methodology, Yiwoon, Y., 2023

Napad na faze učenja umjetne inteligencije

Ako napadač napadne ranjive točke pronađene tijekom faze učenja umjetne inteligencije, to može rezultirati krivim zaključcima zbog pogrešnog učenja. U takvim slučajevima, može se predvidjeti scenarij napada u kojem se prijetnja tijekom putovanja broda krivo smatra sigurnim elementom, čime se omogućava pristup brodu.

Slika 18. prikazuje mogući scenarij kada napadač pokušava izvesti trovanje napadom na podatke za učenje modela umjetne inteligencije. Tijekom obalne navigacije, sustav broda uči o okolini, kao što su mostovi, okolni otoci i vremenski uvjeti. U ovom procesu može doći do trovanja napadom ako se sustavu namjerno inducira pogrešno učenje u vezi s mostovima, otocima ili kopnom u zlonamjerne svrhe.



Slika 18. Shematski prikaz napada na fazu učenja umjetne inteligencije

Izvor: Formulating Cybersecurity Requirements for Autonomous Ships Using the SQUARE Methodology, Yiwoon, Y., 2023.

Model umjetne inteligencije koji uči iz netočnih podataka napadača prima podatke senzora u stvarnom vremenu i donosi odluke s nižom točnošću. Takvi krivi zaključci mogu dovesti do sudara jer brod skreće s optimalne ili normalne putanje i ne uspijeva prepoznati prijetnje. Kao rezultat toga, upravljački sustav može izdati krive naredbe, što čini normalno djelovanje nemogućim i može čak zahtijevati ponovnu instalaciju autonomnog sustava za navigaciju.

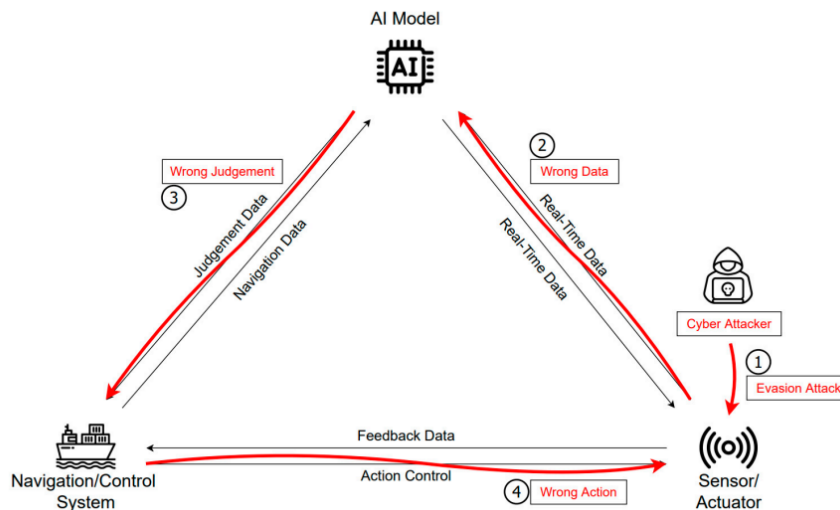
Napad na senzorske podatke

Napadi na senzorske podatke ne uključuju samo metodu falsificiranja objekata prepoznatih raznim sensorima, već i mogućnost napada poput prijevare i ometanja iskorištavanjem ranjivosti u sustavu broda. Moguće je napasti sustav broda i uzrokovati kvar umjetne inteligencije manipulacijom podacima i ometanjem. Ako senzorski podaci koji se koriste kao ulazni podaci za umjetnu inteligenciju budu napadnuti, ne može se jamčiti

sigurna autonomna navigacija. Na primjer, AIS je obavezan na mnogim velikim brodovima, ali AIS standard ne uzima u obzir sigurnost. AIS poruke nisu šifrirane i stoga su izložene riziku zloupotrebe i manipulacije od strane napadača. Napadi koji koriste ranjivosti AIS-a pokazali su se mogućima u nizu scenarija, uključujući manipulaciju vremenskim informacijama, lažna upozorenja o sudarima i napade na uskraćivanje usluge.⁴²

Ako se napad koristi za ometanje kamere ili vođenje senzorskih podataka u sustavu za automatsko pristajanje kako bi se krivo izračunala udaljenost do luke, postoji mogućnost da brod udari u luku. Autonomni brodovi koriste mnogo senzora, uključujući AIS, radar, kameru, sonar i LiDAR. Putem ovih višestrukih podataka o oceanima, brod prepoznaje situaciju i otkriva objekte kako bi donio odgovarajuće odluke, poput korekcije kursa i izbjegavanja sudara. Napadi koji ometaju senzorske podatke mogu se pojaviti na sensorima koji se koriste za identifikaciju položaja broda i prepreka, poput AIS-a, GNSS-a, kamere, radara itd. Na primjer, prijevarena GNSS-a šalje lažne signale anteni prijemnika. Napadi prijevare senzora mogu uzrokovati pogreške u percepciji situacije i otkrivanju, što dovodi do toga da autonomni brodovi odstupaju od svojeg normalnog puta ili se ponašaju nenormalno.

Kako je prikazano na Slici 19, pogreške uzrokovane oštećenim senzorskim podacima dovode do pogrešnog upravljanja brodom putem umjetne inteligencije i kontrolnih sustava.



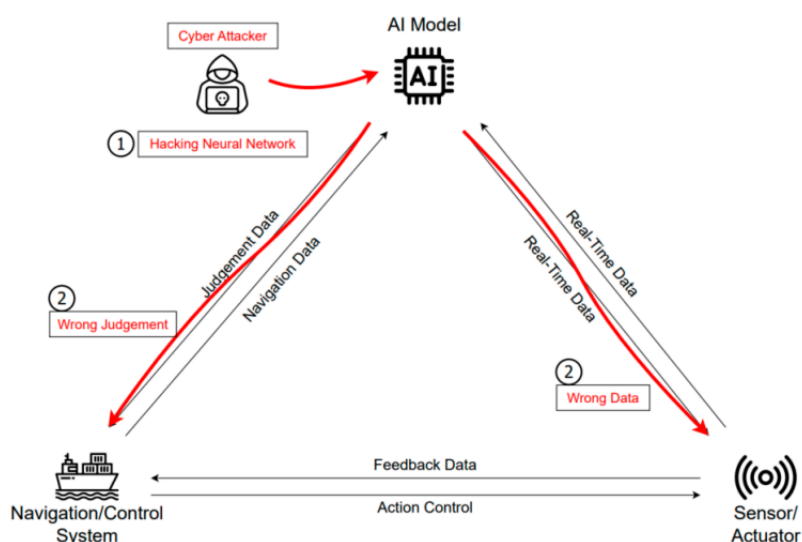
Slika 19. Shematski prikaz napada na senzorske podatke

Izvor: Formulating Cybersecurity Requirements for Autonomous Ships Using the SQUARE Methodology, Yiwoon, Y., 2023.

⁴² Formulating Cybersecurity Requirements for Autonomous Ships Using the SQUARE Methodology, Yiwoon, Y., 2023.

Napad na umjetnu neuronsku mrežu

Kao što je prikazano na Slici 20, osim napada na skup podataka modela umjetne inteligencije, napad neuronske mreže koji napada proces algoritma umjetne inteligencije može ugroziti stabilnost cijelog sustava. Dopuštanje neuronskim mrežama da krivo percipiraju i prosuđuju stvarni svijet može predstavljati veliki problem u postupcima kritičnim za sigurnost, poput autonomne navigacije. Takav napad predstavlja napad na sustave za automatiziranu navigaciju i pristajanje, ključnu tehnologiju za autonomne brodove. Ako je proces prikupljanja senzorskih podataka kao ulaznih podataka i izračunavanja izlaznih vrijednosti kompromitiran zbog napadača, autonomni brodovi neće moći nastaviti normalnu navigaciju.



Slika 20. Shematski prikaz napada na umjetnu neuronsku mrežu

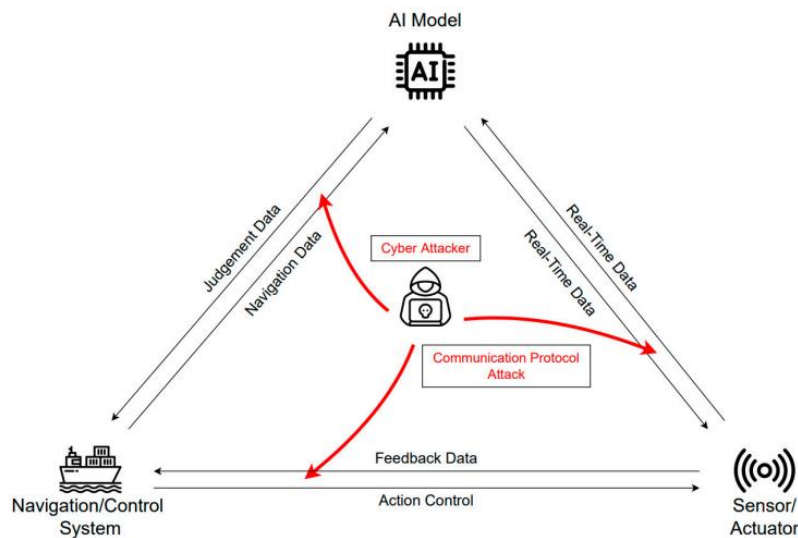
Izvor: Formulating Cybersecurity Requirements for Autonomous Ships Using the SQUARE Methodology, Yiwoon, Y., 2023.

Napad u komunikacijskom kanalu

Napad na komunikacijski protokol je napad usmjeren na komunikaciju koju koristi autonomni brod, a koriste se različiti protokoli unutar i izvan broda, uključujući Ethernet, bežične mreže 4G/5G, ModBus i CAN protokole te NMEA protokol za prijenos i primanje podataka senzora na brodovima. NMEA je komunikacijski standard koji se koristi u pomorskoj industriji za povezivanje, primjerice, motora, instrumenata i senzora na brodovima. Temelji se na Controller Area Network (CAN) i omogućuje slanje i primanje

podataka između uređaja. CAN i NMEA protokoli unutar brodova nisu sigurni jer ne koriste šifriranje ili autentifikaciju, omogućujući napadačima krađu podataka i manipulaciju. Slične ranjivosti primijećene su i u satelitskim komunikacijama brodova.⁴³

Dok se sigurnost mreža autonomnih automobila razvija, istraživanje sigurnosti mreža autonomnih brodova je još uvijek ograničeno. Nadalje, industrija se prebacuje s CAN busa na Ethernet, što će promijeniti dinamiku komunikacije na brodovima. Stoga je potrebno daljnje istraživanje sigurnosti mreža u kontekstu Ethernet-a za brodsku navigaciju i komunikaciju.



Slika 21. Shematski prikaz napada na komunikacijski kanal

Izvor: Formulating Cybersecurity Requirements for Autonomous Ships Using the SQUARE Methodology, Yiwoon, Y., 2023.

Međusobna povezanost ovih sustava ističe potencijalne rizike i izazove, jer kibernetički napad na jednu komponentu može utjecati na cijeli autonomni brod. Iako se određene sigurnosne mjere mogu primijeniti, jedinstvena priroda brodova može zahtijevati znatan napor i resurse kako bi se riješili sigurnosni nedostaci.

⁴³ Yiwoon, Y., Formulating Cybersecurity Requirements for Autonomous Ships Using the SQUARE Methodology, 2023.

6. PRAVNI IZAZOVI KOJI OGRANIČAVAJU ŠIRU UPOTREBU AUTONOMNIH BRODOVA

6.1. DEFINIRANJE POJMA AUTONOMNOG BRODA

Nema jedinstvene definicije pojma broda na međunarodnoj razini. Međunarodne konvencije koje utvrđuju standarde sigurnosti navigacije, zaštitu ljudskih života na moru, sprječavanje onečišćenja mora, kao i niz konvencija o pomorskom pravu, ovisno o pitanjima koja reguliraju i svrsi koju žele postići, koriste odvojene definicije pojma broda ili plovila. Prema tome, konvencije koje normaliziraju standarde sigurnosti plovidbe često određuju pojam broda ili plovila uključivanjem velikog broja plovnih objekata koji se koriste na moru, iako je očito da se ne radi o plovilima.⁴⁴

Prema tim definicijama, može se utvrditi da su oni u osnovi povezani s autonomnim brodovima. Može se primijetiti da bespilotni brodovi ne gube karakteristike i odrednice broda. Hoće li imati i posjedovati pravni status broda ili drugog plovila ovisi o uvjetima reguliranim nacionalnim zakonodavstvom države čije državljanstvo takav objekt želi postići. Postizanjem pravnog statusa broda i državljanstva određene zastave, autonomni brod će imati pravo plovidbe kao i ostali konvencionalni brodovi, ali će također biti izložen nizu međunarodnih standarda i pravila od strane IMO-a i drugih radnih skupina posvećenih pitanju autonomnih brodova i pravnih prepreka njihovom uključivanju u međunarodni pomorski promet. Moguće je da će se različiti pravni propisi usvojiti za one daljinski upravljane brodove i one potpuno autonomne. Tijekom posljednjih godina, IMO je završio regulatornu analizu kako bi utvrdio koji će budući koraci biti u stvaranju pravnog okvira za autonomno plovidbu.

Stvoren je kodeks (MASS Code of Practice) koji se trenutno koristi kao probni vodič za ispitivanje autonomnih brodova u Ujedinjenom Kraljevstvu i Europi⁴⁵. Ovaj kodeks smišljen je od strane UK Maritime Autonomous Systems Regulatory Working Group (MASRWG), koji surađuje s IMO-om u sklopu „IMO MSC Scoping Exercise“ te ima za cilj

⁴⁴ Maritime Autonomous Surface Ships – International and National Legal Framework, Vio, I., 2022.

⁴⁵ Hannaford, E., Autonomous ships and the collision avoidance regulations: a licensed deck officer survey, 2022.

pružanje dokumenata za eventualno međunarodno prilagođavanje. Ovaj kodeks preporučuje da kontrolni sustavi MASS-a trebaju biti sposobni za usklađivanje te da trebaju moći manevrirati unutar odgovarajućeg tumačenja COLREG-a.

IMO je 2018. godine odlučio preuzeti ulogu u razvoju i regulaciji autonomnih brodova (MASS-a), te rade na predstavljanju strateškog plana koji uključuje integraciju novih i naprednih tehnologija u svoj regulatorni okvir. Na 106. sjednici MSC-a u studenom 2022. godine ostvaren je daljnji napredak u razvoju rješenja usmjerenog prema ciljevima koji regulira rad autonomnih brodova⁴⁶. Cilj je usvojiti neobvezujući kod za autonomne brodove koji će stupiti na snagu 2025. godine, a koji će poslužiti kao osnova za obvezujući kod usmjeren prema ciljevima za autonomne brodove, koji se očekuje da će stupiti na snagu 1. siječnja 2028. godine.

Međunarodna konvencija o standardima izobrazbe, izdavanju svjedodžbi i držanju straže (STCW – The International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers) danas se primjenjuje na pomorce na brodu, ali ne i na osoblje odgovorno za upravljanje autonomnim brodom iz kontrolnog centra udaljenog na kopnu, niti na računalne inženjere koji stvaraju autonomni sustav. Takvi stručnjaci preuzimaju ulogu kapetana i časnika na brodu u kontroli navigacije, ali nisu podložni STCW pravilima. U cilju postizanja sporazuma kako bi osobe koje rade na pozicijama daljinskog upravljanja brodom iz obalnih centara dobile pravni status konvencionalnih članova posade (kapetana ili časnika palube), zakonodavna intervencija trebala bi biti manje komplicirana. Međutim, ako osoblje kontrolnog centra ne bi bilo smatrano konvencionalnim pomorcima, postavilo bi se niz pitanja i problema, a zakonodavna intervencija bila bi puno zahtjevnija.

Jasno je da u skladu s značenjem i razumijevanjem pojma broda u većini nacionalnih zakonodavstava, ali i u okviru međunarodnih propisa, nema prepreke da se autonomni brodovi smatraju brodovima kako bi mogli obavljati plovidbu. Međutim, oni bi trebali imati državno pripadništvo određene države kao i konvencionalni brodovi. Državljanstvo broda podrazumijeva prvi korak individualizacije broda i označava njegovu izloženost pravnom režimu zastave, ali i nadležnosti obalne ili luke države.

⁴⁶ Maritime Safety Committee (MSC 106), 2-11 November 2022, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-106.aspx>,

6.2. PREDSTAVLJANJE PROBLEMA IMPLEMENTACIJE PRAVILA ZA IZVJEGAVANJE SUDARA NA MORU NA AUTONOMNE BRODOVE

Brzi razvoj umjetne inteligencije u pomorskoj industriji značajno djeluje na sve aspekte u navigaciji brodova, pa tako i na plovidbu bez sudara, što znači da se dovodi u pitanje uspješna integracija i primjena COLREGs pravila od strane autonomnog brodskog sustava. Realizacija takvog sustava pruža nezamislive mogućnosti i usluge u pomorskim djelatnostima te povećava mogućnosti za koordinirane i povezane operacije. Međutim, potpuna autonomija navigacije bez sudara autonomnih brodova, u složenim okruženjima i dalje se suočava sa velikim izazovima i stalno zahtijeva inovacije. Važno je osigurati da svi autonomni brodovi i dalje poštuju pravila izbjegavanja sudara u skladu s Konvencijom o međunarodnim pravilima za sprječavanje sudara na moru (COLREGs).

Za autonomne brodove, implementacija COLREGs pravila u navigacijski sustav može se postići pomoću različitih tehnologija i algoritama koji koriste senzore, umjetnu inteligenciju i strojno učenje kako bi donijeli odluke o navigaciji u skladu s pravilima izbjegavanja sudara. Uz pomoć senzora i metoda dubokog učenja spomenutih u poglavlju 4, autonomni brodovi mogu pratiti okolinu, prepoznati druge brodove, procijeniti brzinu i smjer kretanja, a zatim primijeniti odgovarajuća pravila za izbjegavanje sudara.

U ovom djelu razmatrat će se implementacija COLREGs pravila u autonomnu navigaciju brodova, počevši od problematike koja nastupa kada se pravila pokušavaju prevesti na jezik razumljiv stroju, pa sve do mogućih rješenja tih problema. Da bude jasno, ovi problemi još uvijek nisu riješeni zbog puno nesuglasica i nedostatka mogućih rješenja. Rješenja koja su predložena, predstavljena su od strane IMO i njihovog novog regulatornog preglednog postupka (engl. *Regulatory scoping exercise*).

6.2.1. Primjena pravila za izbjegavanje sudara na moru

COLREGs pravila pisana su na način da ih razumiju ljudi te da ih mogu primijeniti u praksi na najefikasniji mogući način. Prevođenje originalnih pravila o izbjegavanju sudara na moru u upute razumljive stroju mogla bi biti teška za razumijevanje i izvedbu. Na primjer, Pravilo 6, koje govori da brod mora ploviti odgovarajućom brzinom kako bi mogao pravovremeno reagirati u slučaju izbjegavanja sudara, definiranje „odgovarajuće brzine“ autonomnom sustavu može biti dosta problematično jer se sustav oslanja na senzorske podatke. Često se u pravilima koristi i pojam „kako bi to učinio dobar pomorac“, što znači da se manevriranje broda treba prilagoditi okolnostima kako bi se izbjegao sudar, a pritom ne dovoditi sigurnost broda i posade u opasnost. Međutim, izraz „kao dobar pomorac“ ostavlja puno interpretativnog prostora, što može biti izazovno autonomnim sustavima koji trebaju pratiti programirana pravila bez ljudskog tumačenja. Dalje, spominju se pojmovi kao „rano“, „znatno“, „čim postane očito“, „ako okolnosti to dopuštaju“ te radnje koje se trebaju poduzeti kada se plovilo „nađe tako blizu da sudar ne može biti izbjegnuto samo akcijom plovila koji ustupa put“, često su nejasni ovisno o situacijama. Algoritmi za izvršenje COLREG-a potrebni su kako bi se riješila neka od tih pitanja i nejasnoća, ali predložena rješenja još uvijek variraju i još su u istraživačkoj fazi. Mnogi od tih početnih algoritama za izbjegavanje sudara primjenjivi su samo na pojedinačne susrete brodova, što može ograničiti njihovu primjenu⁴⁷.

⁴⁷ Mudrić, M., Autonomous Surface Vessels and COLREGs: considering the amendments. 2021.

6.2.2. Moguća rješenja

Pravila 2a i 2b

Ova pravila odnose se na odgovornosti kapetana, posade i vlasnika plovila u vezi sa nepoštivanjem COLREG-a ili zanemarivanjem mjera opreza koje zahtjeva uobičajena praksa pomoraca. Glavni problem pri implementaciji MASS-a je preuzimanje odgovornosti za radnje koje se na brodu poduzimaju od strane kapetana i posade. Ako se plovilo upravlja ili nadzire od strane osobe na kopnu, odgovornosti se mogu prenijeti na RCC gdje se nalazi operater daljinskog upravljanja. Ova izmjena pruži mogućnost zadržavanja odgovornosti kod kapetana i posade bez obzira na njihovu lokaciju.

Sljedeća situacija koja može biti problematična po pitanju odgovornosti je kada treba odstupiti od pravila kako bi se izbjegla neposredna opasnost. Problem je što postoji nejasnoća u tome kada se može odstupiti od pravila, a kada ne. Jedan od prijedloga je bio da se odrede vrijednosti najbliže točke susreta (engl. *Closest Point of Approach* - CPA) i vremena do najbliže točke susreta (engl. *Time to Closest Point of Approach* - TCPA) na 0,5 nm i 6 minuta kao granica kada bi se pravno moglo odstupiti od pravila. Ova udaljenost i vrijeme odabrani su nakon rasprave sa stručnjacima iz industrije, imajući na umu normalnu CPA plovila tijekom plovidbe u otvorenim vodama i prometnijim područjima. Međutim, prijedlog je naišao na mnoga protivljenja te protivljenja prema bilo kakvom definiranju granica koje variraju ovisno o situaciji. To uključuje lokaciju, brzinu, vrstu plovila, kao i druge faktore poput vremenskih uvjeta, vidljivosti i gužve. Definiranje takvih pojmova može dovesti do većeg broja sudara te bi pravila trebala biti neodređena jer svaka situacija može biti različita.

Pravilo 5

Pravilo 5 odnosi se na pravilan nadzor, a glasi: „Svaki brod mora stalno izviđati promatranjem, slušanjem i svim raspoloživim sredstvima prikladnim prevladavajućim okolnostima i stanju, a u svrhu potpune procjene situacije i rizika sudara.“ (COLREGs, n.d.) Postavlja se pitanje je li moguće pratiti cijelu situaciju svim dostupnim sredstvima poput kamera, LiDARA, AIS-a, radara, sonara, infracrvenih senzora i ostalih bez ljudskog nadzora. Projekt MUNIN (engl. *Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks*), koji predstavlja konceptualni teretni brod, dokazao je da upotreba senzora može pružiti

sigurniji nadzor od ljudskog⁴⁸. Predloženo je da se pravilo 5 izmijeni kako bi se omogućilo tehničkim sredstvima da obavljaju ulogu nadzora.

Pravilo 6

Ovo pravilo odnosi se na sigurnu brzinu, a COLREG definicija sigurne brzine je kada plovilo može poduzeti pravilne i učinkovite mjere kako bi izbjeglo sudar. Također to obuhvaća da se plovilo mora moći zaustaviti na sigurnoj udaljenosti. Problem kod primjene ovog pravila na autonomni sustav je kako ono određuje sigurnu brzinu. Jedno moguće rješenje je da se pravilo izmjeni te da pruža karakteristike za brodove koji plove određenim morskim uvjetima i koji plove na određenoj udaljenosti od ostalih brodova te pri određenoj brzini. Druga sugestija je da se konkretne brzine za svaku situaciju, mogu implementirati zajedno s lokacijom, vremenskim uvjetima, specifičnostima manevriranja broda i prometom, u algoritme sustava⁴⁹. Na taj način bi se odredila brzina plovila za točno određenu situaciju na točno određenom mjestu.

Pravilo 7a

Ovo pravilo odnosi se na rizik od sudara te navodi da svako plovilo treba koristiti sva dostupna sredstva kako bi utvrdilo postoji li rizik od sudara. Utvrdi li se da postoji bilo kakva sumnja da rizik postoji, smatra se da taj rizik postoji. Problem s ovim pravilom je što ne postoji precizna definicija rizika od sudara. Moguće rješenje je bolje definiranje rizika od sudara za autonomna plovila. Na taj način faktori poput brzine plovila, udaljenosti i crossing situacija mogu odrediti postoji li rizik od sudara, a to se može odrediti pomoću spomenutih naprednih senzora. Tada bi opet bilo potrebno kvantificirati određene dijelove COLREG-a, te postaviti granice kao na primjer za CPA i TCPA u pravilu 2. Nekakav protuargument ovom prijedlogu je da bi bilo teško softveru za izbjegavanje sudara pokriti sve situacije, jer bi i dalje postojali nepredvidljivi događaji. Drugo moguće rješenje je da rizik od sudara

⁴⁸ Final Report Summary - MUNIN (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks) <https://cordis.europa.eu/project/id/314286/reporting>, 2016.

⁴⁹ Hannaford, E., Autonomous ships and the collision avoidance regulations: a licensed deck officer survey, 2022.

određuju osobe na kopnu, što je slično rješenju za pravilo 2, gdje se odgovornost opet prenosi na RCC na kopnu⁵⁰.

Pravila 15 – 17

Pravilo 15 glasi: „Kada se kursovi dvaju brodova na mehanički pogon križaju tako da prijete rizik sudara, uklonit će se s puta brod koji vidi drugi brod na svojoj desnoj strani i, ako okolnosti slučaja dopuštaju, on pri tome treba izbjegavati presijecanje kursa ispred pramca drugog broda.“

Pravilo 16 glasi: „Svaki brod koji je dužan ukloniti se s puta drugom brodu mora, koliko je god to moguće, poduzeti pravodobnu i dovoljnu radnju da bi se potpuno uklonio.“

Pravilo 17 glasi:

„a) i. Kad se jedan od dvaju brodova mora ukloniti s puta, drugi brod mora zadržati kurs i brzinu.

ii. Drugi brod može ipak poduzeti radnju za izbjegavanje sudara vlastitim manevrom čim mu postane očito da brod koji se mora ukloniti s puta ne poduzima odgovarajuću radnju u skladu s ovim Pravilima.

b) Kada se brod koji treba zadržati kurs i brzinu, iz bilo kojeg razloga, nađe tako blizu da se sudar ne može izbjeći samo radnjom broda koji je dužan ukloniti se s puta, tada on mora poduzeti takvu radnju koja će najbolje pridonijeti da se sudar izbjegne.

c) Brod na mehanički pogon koji poduzima radnju u položaju križanja kursova u skladu s pododredbom (a)(ii) ovog Pravila radi izbjegavanja sudara s drugim brodom na mehanički pogon koji mu je s lijeve strane ne smije, ako to okolnosti slučaja dopuštaju, promijeniti kurs na lijevo.

d) Ovo Pravilo ne oslobađa brod koji ustupa put njegove obveze da se ukloni s puta.“
(COLREGs, n.d.)

⁵⁰ Hannaford, E., Autonomous ships and the collision avoidance regulations: a licensed deck officer survey, 2022.

Svi podcrtani pojmovi, kod ovih pravila, predstavljaju problem pri integraciji COLREG-s pravila na autonomni sustav. Problem nije samo u procjeni koje radnje poduzeti, nego kada i u kojim okolnostima ih poduzeti. Moguća strategija kao rješenje moglo bi biti proučavanje velike količine AIS podataka za specifično područje te na temelju tih podataka odrediti granice „pravodobne“ i „dovoljne radnje“. Kao koristan koncept, za rješavanje problematičnog pojma „ako okolnosti to dopuštaju“, mogao bi se uvesti koncept „sigurnosne zone“ brodova, koja predstavlja zonu oko broda u koju se ne dopušta ulazak drugih brodova te koja signalizira kada nije sigurna. Zona je obično veća na otvorenom moru nego u uskim prolazima ili u luci. Korištenjem takvih analiza AIS podataka, mogla bi se pokušati uspostaviti zona izvan koje se akcija može smatrati „ranom“. Međutim, važan je kontekst, ne samo statički geografski kontekst, već i onaj ovisan o vremenu i gustoći prometa⁵¹.

Ostaje pitanje kako i u kojoj mjeri će algoritam strojnog učenja djelovati kada prepozna potrebu za odstupanjem od pravila radi izbjegavanja neposredne opasnosti. Postavlja se pitanje može li algoritam uopće prepoznati potrebu za odstupanjem od pravila i može li odabrati najbolju moguću radnju u skladu s onim što bi razuman pomorac učinio. Do trenutka kada takav algoritam bude osmišljen, testiran i certificiran, dvojbeno je hoće li sigurnosni zahtjevi omogućiti potpuno autonomno upravljanje plovilima izvan ograničenih, kontroliranih područja, ruta i staza.

⁵¹ Porathe, T., Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) and the COLREGS: Do We Need Quantified Rules Or Is “the Ordinary Practice of Seamen” Specific Enough?, 2019.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu cilj je bio približiti i zaokružiti pojam autonomne navigacije. Počevši od potpuno jedne nove industrijske ere u pomorstvu, gdje su se jasno prikazali razlozi, ciljevi i očekivanja uvođenja autonomije u navigaciji. Preko mnogih načina na koji bi se sustav mogao implementirati na brod, pa sve do problematike koja stoji na putu između ostvarivanja tih ciljeva.

Može se zaključiti da je sadašnja tehnologija vrlo mnogo doprinijela u razvijanju samostalnih sustava na brodovima. Takvi brodovi vrlo su značajni za daljnji napredak u industriji, a pokazuju da je implementacija naprednih tehnologija poput umjetne inteligencije, senzorskih sustava i strojnog učenja omogućila napraviti veliki napredak u samostalnoj navigaciji. Prvi korak u zamjeni čovjeka sa autonomnim sustavom je ugradnja odgovarajuće alternative ljudskim osjetilima. Drugi korak postavlja pitanje, na koji način se od takvih sirovih ulaznih podataka može stvoriti svojevrsna percepcija u prostoru i vremenu na temelju koje autonomni sustav sam donosi zaključke. Predstavljeno je mnogo metoda kojima se omogućuje i olakšava: pronalazak optimalnog puta, klasifikacija objekata u okolini, mogućnost samostalnog odlučivanja, razlučivanje potrebnih od nepotrebnih podataka te obučavanje stroja na prijašnjim primjerima o izvođenju raznih manevara. Što se tiče COLREGs pravila u autonomnoj navigaciji, dolazi do izazova vezanih za razlike u tumačenju ovih pravila između čovjeka i stroja. Jedno od mogućih rješenja je razvoj posebnih smjernica i regulativa koje će prilagoditi pravila kako bi bila kompatibilna autonomnom sustavu. Ovo bi uključivalo definiranje jasnih kriterija i standarda za autonomnu navigaciju, uzimajući u obzir mogućnosti senzora, algoritama za donošenje odluka i sposobnost autonomnih brodova da reagiraju i funkcioniraju s drugim sudionicima u pomorskom prometu. Važno je provoditi nova istraživanja i testiranja kako bi se omogućilo otkrivanje potencijalnih problema i razvoj inovativnih rješenja za daljnji napredak u razvijanju sigurne i efikasne primjene COLREGs pravila na autonomne brodove.

Ukupno gledano, daljnji razvoj u autonomnoj navigaciji zahtijeva razumijevanje specifičnosti autonomnih sustava i pronalaženje ravnoteže između sigurnosti, zakonodavstva i tehnološkog napretka. Zahtijeva suradnju između industrije, regulatornih tijela i stručnjaka kako bi se osiguralo stvaranje sigurnog i održivog okruženja za autonomnu navigaciju u pomorstvu.

LITERATURA

1. Abraham N., Shreyanka k., Kaja Gowtham S., 2019. *Autonomous Ship Navigation Methods: A Review*, Chennai, India
2. Mudrić M., Ferreira F., 2021., *Autonomous surface vessels and colregs: considering the amendments*
3. Hannafor E., Maes P., Van Hassel E., 2022., *Autonomous ships and the collision avoidance regulations: a licensed deck ofcer survey*, Belgija
4. Sang-Min L., Kyung-Yub K., Joongseon J., 2004., *A fuzzy logic for autonomous navigation of marine vehicles satisfying COLREG guidelines*, *International Journal of Control, Automation*, Vol 2., No2
5. Wasif N., Sable C., Liang Hu, 2016., *A Reactive COLREGs-Compliant Navigation Strategy for Autonomous Maritime Navigation*, Energy, UK
6. Bal B. E., Arslan O., Turan, O., Ölçer, A.I., *An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations*, Turkey
7. Ryohei S., Keiji S., Tahakiro M., 2020. *Automatic ship collision avoidance using deep reinforcement learning with LSTM in continuous action spaces*
8. Murray B., Prased Perera L., 2021., *ScienceDirect, Proactive Collision Avoidance for Autonomous Ships: Leveraging Machine Learning to Emulate Situation Awareness*, Norway
9. Prased Perera L., *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Deep Learning towards Autonomous Ship Navigation and Possible COLREGs Failures*, Norway
10. Chanjei V., Dong T. Nguyen, 2021., *Combining Supervised Learning and Digital Twin for Autonomous Path-planning*, Department of Marine Technology, Norway
11. Wright Glenn R., 2019., *Intelligent Autonomous Ship Navigation using MultiSensor Modalities*, Vol 13., Nr. 3., USA
12. Le Wang, Qing Wu, Jialun L., Shijie L., Negenborn R., 2019., *State-of-the-Art Research on Motion Control of Maritime Autonomous Surface Ships*, China
13. Sullivan P. B., Shantanoo D., Jordi S., Rossi M., Ramundo L., Trezi S., 2020., *Maritime 4.0 – Opportunities in Digitalization and Advanced Manufacturing for Vessel Development*, Italy

14. *Porathe T., 2019., Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) and the COLREGS: Do We Need Quantified Rules Or Is “the Ordinary Practice of Seamen” Specific Enough?, Vol 13, Nr. 3., Norway*
15. *Issa M., Ilinca A., Ibrahim H., Rizk P., 2022., Maritime Autonomous Surface Ships: Problems and Challenges Facing the Regulatory Process, Canada*
16. *Rodseth Ornulf J., 2018., Defining ship autonomy by characteristic factors, Norway*
17. *Thombre S., Zhao Z., Ramm-Schmidt H., Vallet Garcia J., 2022., Sensors and AI Techniques for Situational Awareness in Autonomous Ships: A Review, IEEE Transaction on intelligent transportation systems, Vol. 23., No. 1*
18. *Kolar P., Benavidez P., Jamshidi M., 2020., Survey of Datafusion Techniques for Laser and Vision Based Sensor Integration for Autonomous Navigation, USA*
19. *Pantazis A., 2019., LIDARs Usage in Maritime Operations and ECO, Grčka*
20. *Yiwoon, Y., Yonghiun, Y., 2023., Formulating Cybersecurity Requirements for Autonomous Ships Using the SQUARE Methodology*
21. *Jianan, L., Xiongfei, G., Yabin L., Qiaochan Y., 2022., Study on the Risk Model of the Intelligent Ship Navigation, Kina*
22. *Vio, I., Brdar, M., 2022. Maritime Autonomous Surface Ships – International*
23. *and National Legal Framework, Hrvatska*
24. *Paweł Zalewski, Integrity Concept for Maritime Autonomous Surface Ships’ Position Sensors, 2020.*
25. *Jianan, L., Study on the Risk Model of the Intelligent Ship Navigation, 2022.*
26. *Ole Andreas, NTNU Shore Control Lab: Designing shore control centres in the age of autonomous ships, 2022.*
27. *Kaicheng J., A Review of Progress and Applications of Automated Vacuum Mooring Systems, 2022.*
28. *Terziev, V., Kanev, D., Specific Aspects of Motivation of Seafarers, 2017.*
29. *Yiwoon, Y., Formulating Cybersecurity Requirements for Autonomous Ships Using the SQUARE Methodology, 2023*
30. *Yamin H., Linying C., Pengfei C., Ship collision avoidance methods: State-of-the-art, 2019.*
31. *Wielgosz & M. Mąka, Route Optimization in the Restricted Area Taking into Account Ship Safety Zones, 2017.*
32. *Yongmei R., Jie Y., Qingnian Z., Multi-Feature Fusion with Convolutional Neural Network for Ship Classification in Optical Images, 2019.*

33. Hannaford, E., *Autonomous ships and the collision avoidance regulations: a licensed deck officer survey*, 2022.
34. Candeloroa, M., Anastasios M. Lekkasa , Asgeir J., *A Voronoi-diagram-based dynamic path-planning system for underactuated marine vessels*, 2017.
35. Yongmei R., Jie Y., Qingnian Z., *Multi-Feature Fusion with Convolutional Neural Network for Ship Classification in Optical Images*, 2019.
36. Fabbri, T., *Weather-Routing System Based on METOC Navigation Risk Assessment*, 2019.
37. COLREGs, t. (n.d.). *ecolregs.com*. Dohvaćeno iz https://ecolregs.com/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=48&Itemid=380&lang=hr
38. IMO. (2022). *Autonomous Shipping*. Dohvaćeno iz <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>
39. Lippay, V. (9. 2 2022). *Laser focus world*. Dohvaćeno iz *Eyes of a ship: Laser detection at sea*: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/14223396/eyes-of-a-ship-laser-detection-at-sea>
40. Magazine, M. (2022). *Tugboat performs first autonomous collision avoidance performance at Port of Singapore*. Dohvaćeno iz *Maritime Magazine*: <https://maritimemag.com/en/tugboat-performs-first-autonomous-collision-avoidance-performance-at-port-of-singapore/>
41. Cordis, European Commission, <https://cordis.europa.eu/project/id/314286/reporting>, 2016.
42. Awati R., 2023., *Convolutional neural network (CNN)*, Dohvaćeno iz *Tech Target*: <https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/definition/convolutional-neural-network>
43. IMO takes first steps to adress autonomous ships, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/08-MS-C-99-MASS-scoping.aspx>, 2018.
44. MaritimeMagazine, <https://maritimemag.com/en/tugboat-performs-first-autonomous-collision-avoidance-performance-at-port-of-singapore/>, 2022.
45. Maritime Safety Committee (MSC 105), 20-29 April 2022. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-105th-session.aspx>

46. *Maju 510 Tug: Singapore's First Autonomous Vessel Project Complete*, <https://www.marinelink.com/news/maju-tug-singapores-first-autonomous-495637> , 2023.
47. Dean, P., <https://www.hfw.com/Autonomous-ships-MASS-for-the-MASSes>, 2022.
48. *Maritime Safety Committee (MSC 106)*, 2-11 November 2022, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-106.aspx>,
49. *Final Report Summary - MUNIN (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks)* <https://cordis.europa.eu/project/id/314286/reporting>, 2016.
50. Candeloroa, M., Anastasios M. Lekkasa , Asgeir J., *A Voronoi-diagram-based dynamic path-planning system for underactuated marine vessels*, 2017.
51. IMO, *AIS transponders*, <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/AIS.aspx>, 2004.
52. Yongmei R., Jie Y., Qingnian Z., *Multi-Feature Fusion with Convolutional Neural Network for Ship Classification in Optical Images*, 2019.
53. *Inmarsat passes 10,000-Vessel Fleet Xpress installation milestone as data demand accelerates Maritime Digitalisation*, <https://www.inmarsat.com/en/news/latest-news/maritime/2021/inmarsat-passes-10-000-vessel-fleet-xpress-installation-mileston.html>, 2021.
54. *European Union Agency for the Space Programme, What is SBAS?*, <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-sbas>, 2022.
55. *NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration, Weather Satellites*, <https://www.noaa.gov/jetstream/weather-satellites>, 2023.
56. *Starlink satellites: Everything you need to know about the controversial internet megaconstellation*, <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>, 2023.
57. *Inmarsat, A straightforward introduction to satellite communications*, <https://www.inmarsat.com/en/insights/corporate/2023/a-straightforward-introduction-to-satellite-communications.html>, 2023.

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz podjele senzora.....	11
Slika 2. Inercijalni navigacijski sustav	14
Slika 3. Voronoi dijagram.....	27
Slika 4. Izrada plana puta prema Voronoj metodi.....	27
Slika 5. Prikaz metode dekompozicije	28
Slika 6. Grafički prikaz plovidbe i dekompozicije sa sigurnosnom konturom od 10 metara.....	29
Slika 7. Grafički prikaz plovidbe i dekompozicije sa sigurnosnom konturom od 20 metara.....	29
Slika 8. Shematski prikaz umjetne neuronske mreže	30
Slika 9. Prikaz metode umjetnog potencijalnog polja.....	31
Slika 10. Pronalazak optimalnog puta.....	32
Slika 11. Prikaz algoritma optimizacije kolonije mrava.....	33
Slika 12. Shema funkcioniranja genetičkog algoritma	34
Slika 13. Shema konvolucijske neuronske mreže	37
Slika 14. Prikaz metode transfernog učenja	39
Slika 15. Shematski prikaz NTNU Shore Controle Lab-a.....	41
Slika 16. Vakuumski privezni sustav	42
Slika 17. Pregled sustava svijesnosti pokretanim umjetnom inteligencijom	44
Slika 18. Shematski prikaz napada na fazu učenja umjetne inteligencije	45
Slika 19. Shematski prikaz napada na senzorske podatke	46
Slika 20. Shematski prikaz napada na umjetnu neuronsku mrežu	47
Slika 21. Shematski prikaz napada na komunikacijski kanal.....	48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razine autonomije	6
Tablica 2. Podjela AIS podataka.....	12

POPIS SHEMA

Shema 1. Slojevi umjetne inteligencije	24
--	----