

Tehnologija autonomnih vozila i njihovo korištenje u lukama

Tomljanović, Roko

Master's thesis / Diplomski 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:187:415958>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**



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



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

ROKO TOMLJANOVIĆ

**TEHNOLOGIJA AUTONOMNIH VOZILA I NJIHOVO
KORIŠTENJE U LUKAMA**

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2023.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

TEHNOLOGIJA AUTONOMNIH VOZILA I NJIHOVO
KORIŠTENJE U LUKAMA
TECHNOLOGY OF AUTONOMOUS VEHICLES AND
THEIR USE IN PORTS
DIPLOMSKI RAD

Kolegij: Nove tehnologije u dijagnostici i upravljanju

Mentor: prof. dr. sc. Vinko Tomas

Student: Roko Tomljanović

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112073511

Rijeka, kolovoz 2023.

Student: Roko Tomljanović

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112073511

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom „Tehnologija autonomnih vozila i njihovo korištenje u lukama“ izradio samostalno pod mentorstvom *prof. dr. sc. Vinka Tomasa*.

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

Student

Roko T.

Roko Tomljanović

Student: Roko Tomljanović

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112073511

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog 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 diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student – autor

Roko T.

(potpis)

SAŽETAK

Luke su lokacije na obali gdje brod može pristati i iskrcati ili ukrcati svoj teret, a služe kao ključni čvorovi u globalnoj trgovačkoj mreži te njihov strateški položaj duž obale olakšava kretanje robe povezujući proizvođače i potrošače s različitim kontinenta. Autonomna vozila su nova primjena automobilske tehnologije te uključuju svako vozilo koje ima mogućnost navigirati prometnicama i interpretirati prometne znakove bez aktivnog sudjelovanja vozača. Tehnologije koje koriste autonomna vozila su senzori, kamere, LIDAR, radar, GNSS i druge. Kako bi se osigurao manji broj pogrešaka, oštećenja i kašnjenja isporuke, ali i nesreća i ozljeda radnika, koriste se autonomna vozila i strojevi cestovnog i željezničkog prometa te bespilotne letjelice.

Ključne riječi: autonomna vozila, luke, senzori

SUMMARY

Ports are locations on the coast where a ship can dock and load or unload its cargo. They serve as key nodes in the global trade network and their strategic location along the coast facilitates the movement of goods, connecting producers and consumers from different continents. Autonomous vehicles are a new application of automotive technology and include any vehicle that has ability to navigate roads and interpret road signs without active participation of the driver. The technologies used by autonomous vehicles are sensors, cameras, LIDAR, radar, GNSS and others. To ensure a smaller number of errors, damages and delivery delays, as well as accidents and injuries of workers, autonomous vehicles and machines for road and rail transport and unmanned aerial vehicles are being used.

Keywords: autonomous vehicles, ports, sensors

SADRŽAJ

| | |
|---|------------|
| SAŽETAK | II |
| SUMMARY | II |
| SADRŽAJ | III |
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA | 2 |
| 1.2. RADNA HIPOTEZA | 2 |
| 1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA | 3 |
| 1.4. ZNANSTVENE METODE | 3 |
| 1.5. STRUKTURA RADA | 3 |
| 2. OSNOVNE ZNAČAJKE LUKA | 5 |
| 2.1. POVIJEST..... | 5 |
| 2.2. KOMPONENTE LUKA | 6 |
| 2.3. NAJVEĆE SVJETSKE LUKE | 10 |
| 3. AUTONOMNA VOZILA | 12 |
| 3.1. POVIJEST AUTONOMNIH VOZILA | 13 |
| 3.2. RAZINE AUTONOMIJE | 14 |
| 3.3. SENZORI..... | 17 |
| 3.3.1. Kamere | 18 |
| 3.3.2. LIDAR..... | 20 |
| 3.3.2.1. Princip rada, prednosti i nedostaci TOF | 22 |
| 3.3.2.2. Princip rada, prednosti i nedostaci AMCW | 24 |
| 3.3.2.2. Princip rada, prednosti i nedostaci FMCW | 25 |
| 3.3.3. Radar..... | 27 |
| 3.3.4. GNSS | 32 |
| 3.3.5. Lokalizacija | 36 |
| 4. AUTONOMNA VOZILA U LUKAMA | 43 |
| 4.1. CESTOVNA VOZILA | 45 |
| 4.1.1. Primjeri | 46 |
| 4.1.1.1. Autostrad kontejnerski prijenosnik | 46 |
| 4.1.1.2. AGV | 47 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1.1.3. Automatska skladišna kontejnerska dizalica (ASC)..... | 50 |
| 4.1.1.4. Kamioni i platoing..... | 50 |
| 4.2. ŽELJEZNIČKI PROMET | 53 |
| 4.3. BESPILOTNE LETJELICE | 56 |
| 4.4. PREDNOSTI KORIŠTENJA AUTONOMNIH VOZILA U LUKAMA | 58 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 61 |
| LITERATURA | 63 |
| KAZALO KRATICA..... | 69 |
| POPIS SLIKA | 71 |

1. UVOD

Obale ili brodske luke mjesto je gdje brodovi pristaju kako bi ukrcali i/ili iskrcali teret i/ili putnike te se sastoji od jednog ili više pristaništa odnosno utovarnih područja. Sustav pomorskog prometa odnosno obalnih luka ključan je za gospodarstvo zemlje te omogućuje procvat povezanih industrija. Kao takve, bilo kakve smetnje, ali i napreci u radu luka mogu imati golem gospodarski učinak, što pozitivni što negativni. Upravo zbog njene ključne uloge u transportu sirovina, važno je unaprjeđivati njen rad.

Autonomna vozila sve se brže razvijaju, a općenito razvoj novih tržišta i svjetski razvoj tehnologije reakcija je na društveni razvoj i nadolazeće specifične potrebe [1]. Potpuno autonomna vozila mogu osigurati sigurnu vožnju te učinkovitu potrošnju energije. Razvoj autonomnih vozila možemo pripisati i svjetskom trendu prema velikim gradovima koji dovode do dramatičnog povećanja gustoće prometa, a samim time i stopa nesreća. Navedeni događaji rezultiraju potrebom za povećanje sigurnosti i više pomoći vozaču [2].

Autonomna vozila oslanjaju se na razne senzore i sustave za opažanje okoline, stoga je senzorska tehnologija fuzije informacija s više senzora postala žarište mnogih istraživanja. Važno je imati na umu prednosti i nedostatke koje ima svaka tehnologija koja se koristi. Primjerice, kamera ima nisku cijenu, ali vrlo slabu prilagodljivost prilikom lošeg osvjetljenja.

Nadalje, LIDAR može detektirati objekte s veće udaljenosti te se dobije točna trodimenzionalna slika objekta dok je nedostatak što sitne čestice mogu utjecati na njega. Radar ima dobru prilagodljivost vremenskim uvjetima, ne degradira noću no ne može razlikovati vozila koja miruju od prometnih znakova.

U autonomnoj vožnji, odnosno u autonomnim vozilima, često se koriste višestruki senzori upravo zbog poboljšanja otpornosti na pogreške sustava te povećanje

vjerodostojnosti. Korištenje autonomnih vozila u lukama može dovesti do velikih prednosti o kojima će biti detaljnije u tekstu.

1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

S obzirom da je sustav obalnih luka ključan za razvoj gospodarstva zemlje te omogućuje procvat povezanih industrija, od izuzetne je važnosti njen rast i razvoj.

Relevantne činjenice o problematici istraživanja predstavljaju osnovu za formuliranje problema istraživanja:

Govoreći o autonomnim vozilima, vežu se uz cestovni promet i korištenjem vozila u široj javnosti, te nedovoljno u druge svrhe poput korištenja u lukama, što negativno utječe na razvoj tehnologija u tom smjeru te češćem korištenju istih.

Predmet istraživanja definira se na osnovi važnijih spoznaja o problematici i problemu istraživanja, i to:

Primjenom znanstvenih metoda istražuje se predmet istraživanja: istraživanje načina i mogućnosti primjene autonomnih vozila/tehnologija u lučkoj infrastrukturi s naglaskom na prednostima njenog korištenja.

Iz navedenog proizlazi i objekt istraživanja koji predstavlja luke te autonomna vozila.

1.2. RADNA HIPOTEZA

U skladu s postavljenim problemom, predmetom i objektom istraživanja, oblikovana je sljedeća radna hipoteza:

Autonomna vozila predstavljaju neophodan preduvjet u razvoju luka te poboljšanju njihove učinkovitosti i sigurnosti.

1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

U skladu s problemom, predmetom i objektom istraživanja te radnom hipotezom postavljeni su svrha i cilj ovog diplomskog rada: istražiti i formulirati rezultate istraživanja važnosti korištenja autonomnih vozila u lučkoj infrastrukturi te njihovoj prednosti, analiziranje tehnologija, prikazivanje principa rada tehnologija te njihove svrhe.

Sukladno s postavljenim ciljem istraživanja, oblikovana su sljedeća pitanja:

1. Koja se autonomna vozila/tehnologije mogu koristiti u lukama?
2. Koja se autonomna vozila cestovnog prometa mogu koristiti u lukama?
3. Kako željeznički promet može koristiti autonomne tehnologije, u lukama?
4. Na koji način korištenje autonomnih vozila utječe na razvoj luka?

1.4. ZNANSTVENE METODE

Prilikom istraživanja, formuliranja i predstavljanja rezultata istraživanja primijenjene su odgovarajuće znanstvene metode te njihove kombinacije, točnije: metoda indukcije i dedukcije, metoda analize i sinteze, komparativna metoda, metoda klasifikacije, metoda deskripcije.

1.5. STRUKTURA RADA

Prvi dio diplomskog rada predstavlja njegov Uvod u kojem su definirani i problem, predmet i objekt istraživanja, radna hipoteza, svrha i ciljevi istraživanja te

istraživačka pitanja. Također su navedene znanstvene metode korištene tijekom izrade rada te sama struktura rada.

Drugi dio rada predstavlja poglavlje pod nazivom Osnovne značajke luka. U ovom poglavlju opisuje se razvoj luka tijekom povijesti, glavne komponente luka (pristup luci, pomorsko sučelje, infrastruktura i oprema, pristup luke industrijskim kompleksima i tržištima) te svjetske luke od velike važnosti.

Treći dio pod naslovom Autonomna vozila. U poglavlju je opisano što su autonomna vozila, njihov razvoj tijekom povijesti te razine autonomnije. Zatim se navode i pojašnjavaju tehnologije koja koriste autonomna vozila: senzori, kamere, LIDAR, radar, GNSS.

U četvrtom dijelu rada pod naslovom Autonomna vozila u lukama opisani su primjeri cestovnog i željezničkog prometa. U poglavlju Cestovni vozila opisane su četiri funkcije za postizanje potpune automatizacije te konkretni primjeri. U četvrtom dijelu rada također su opisane i bespilotne letjelice. Naposljetku su navedene prednosti korištenja autonomnih vozila u lukama.

U posljednjem dijelu, Zaključku, dana je sinteza rezultata istraživanja kojima je dokazana postavljena radna hipoteza.

2. OSNOVNE ZNAČAJKE LUKA

U narednim poglavljima biti će opisana razvoj luka tijekom povijesti do danas, glavne komponentne luka te svjetski poznate luke.

2.1. POVIJEST

Planeta zemlja u svom sastavu sadrži oko 71% vode što je kroz povijest ljudima predstavljao problem prilikom razmjene dobara odnosno trgovine. Razvijanjem moreplovstva otvarali su se novi putevi u nepoznate dijelove svijeta, a time je počela i izgradnja luka na obalama oceana, mora, jezera i rijeka. Gradnja luka seže u daleku prošlost što potvrđuje i činjenica da je najstarija poznata lučka struktura pronađena 2019. godine lukobran wadi al-Jarf koji se nalazi u Sueskom zaljevu, dužine 325m i 6m širine, a procjenjuje se da je izgrađena oko 2570. g. pr. Kr. [3].

Pojam luka dolazi od latinske riječi portus, što znači vrata ili prolaz. Povijesno gledano, luke su se pojavljivale kao sigurna mjesta za ribare dok su one s pogodnim položajima postale trgovačka središta te su kao takve postale i središte urbanizacije. Neke od navedenih luka postale su i prvi lučki lučki gradovi koji su igrali važnu ulogu u gospodarskom razvoju svojih regija [4]. Luka po definiciji je lokacija na obali gdje brod može pristati i iskrcati ili ukrcati svoj teret [5]. Lokacije luka odabrane su kako bi se dobio optimizirani pristup kopnu i plovnoj vodi u komercijalne svrhe te kako bi se osigurao zaklon od vjetrova, valova i nevremena. Luke mogu biti prirodne i umjetne.

Umjetne luke imaju namjerno izgrađene lukobrane, morske zidove ili molove. Luke služe kao ključni čvorovi u globalnoj trgovačkoj mreži te njihov strateški položaj duž obale olakšava kretanje robe povezujući proizvođače i potrošače s različitih kontinenata. Pomorski prijevoz najjeftiniji je način prijevoza s obzirom na potrošnju goriva i ulaganja. U usporedbi s drugim prometnim sustavima, željeznički promet

zahtijeva dvostruko veću potrošnju energije dok cestovni promet zahtijeva deset puta više od pomorskog prijevoza.

Tijekom proteklih nekoliko desetljeća svijet je postao sve više ekološki osviješten te, s nižom potrošnjom energije, pomorski prijevoz ekološki je prihvatljiviji od ostalih načina prijevoza tereta [6]. Opseg pomorske trgovine pokazuje trend rasta od 1990. godine. Između 1990. i 2020. obujam tereta prevezenog brodovima više se nego udvostručio, s 4 milijardi na gotovo 10,7 milijardi tona. S porastom pomorske trgovine dolazi do sve većeg kapaciteta globalne trgovačke flote.

Između 2013. i 2020. kapacitet svjetske trgovačke flote porastao je za oko 37%, dosegnuvši gotovo dva milijuna tona nosivosti u 2020. godini. Unatoč ovom razvoju, pandemija COVID-19 ostavila je ozbiljne posljedice u pomorskoj industriji koji su imali utjecaj na svaku kariku u globalnom lancu opskrbe zbog čega se količina tereta prevezenog brodovima u 2020. godini smanjila za oko četiri posto u odnosu na 2019. godinu [7].

2.2. KOMPONENTE LUKA

U mnogim dijelovima svijeta luke su točke konvergencije iz kojih kreću kopneni prometni sustavi, posebice željeznice, a većina luka koji su danas važne u svijetu su upravo to zahvaljujući izvrsnom pozicijom na način da koriste prednosti prirodnih obala mora ili rijeka. Postoje četiri glavne komponente luke.

Prva od četiri komponente je pristup luci. Raspon odnosno razlika između plime i oseke jedna je bitnih stavki za pristup i korištenje luke jer uobičajene brodske operacije ne mogu podnijeti odstupanja veća od 3 metra. Dubine kanala i veza također su vrlo važne za primanje modernih teretnih brodova. Standardni panamax brod od 65.000 tona nosivosti zahtijeva gaz veći od 12 metara. Međutim, oko 70% svjetskih luka ima dubine manje od 10 metara te ne mogu primiti brodove dužine veće od 200 metara.

Na mnoge luke utječe i sedimentacija, osobito na luke u deltamama rijeka. To zahtijeva kontinuirano jaružanje što pridonosi povećanim troškovima lučkih djelatnosti. Neke riječne luke mogu biti pogođene razdobljima poplava ili suša dok druge luke mogu biti spriječene ili zatvorene zimi zbog nepovoljnih vremenskih uvjeta. Luke unutarnjih plovnih putova (npr. na kraju zaljeva ili uz rijeku) općenito imaju prednost blizine krajnjem tržištu, one podrazumijevaju duža odstupanja od pomorskih plovnih putova.

Druga bitna komponenta je pomorsko sučelje i ono ukazuje na količinu raspoloživog prostora za podršku pomorskim operacijama odnosno količinu obale s dobrim morskim pristupom. Čak i ako lučko područje ima odličan pomorski pristup odnosno dubokomorske plovne putove, možda nema dovoljno zemljišta za osiguranje budućeg razvoja i širenja.



Slika 1. Kontejnerska obalna dizalica

Izvor: <https://pacecorp.com/sts-cranes/>

Razvojem kontejnerskih brodova i sve većim tržištem dolazi i do potrebe za većim slobodnim zemljištima te novim lučkim objektima kako bi se luke mogle dalje širiti i razvijati, a to zahtjeva velika kapitalna ulaganja.

Treća komponenta su infrastruktura i oprema poput molova, prostora za slaganje i skladištenje, dizalica i drugih. Suočavanje s investicijskim zahtjevima modernog lučkog poslovanja postalo je izazov posebice s obzirom na kontejnerizaciju za čije je funkcioniranje potrebna znatna količina terminalnog prostora. Moderni kontejnerski terminali koriste raznu specijaliziranu opremu poput kontejnerske dizalice (slika 1.), okvirne dizalice (slika 2.) i kontejnerske prijenosnike (slika 3.).



Slika 2. Okvirna dizalica

Izvor: <https://www.indiamart.com/proddetail/rail-mounted-container-gantry-crane-2850945630130.html>

Četvrta i posljednja komponenta je pristup luke industrijskim kompleksima i tržištima. Ova komponenta vrlo je važna za osiguravanje rasta i važnosti luke, a za nju su potrebni učinkoviti sustavi distribucije poput riječnih teglenica, vlakova i ceste koje mogu podnijeti intenzivan promet kamiona.



Slika 3. Kontejnerski prijenosnici

Izvor: <https://ctbgroupp.es/en/equipment/heavy-loads-and-ports/straddle-carrier/>

Pristup s kopna lukama koje se nalaze u gusto naseljenim područjima sve češće je prometno zagušen. Luke Los Angeles i Long Beach su primjerice uložile znatno velika sredstva u razvoj željezničkog koridora Alameda kako bi rasteretile cestovni promet i olakšale distribuciju tereta prema kopnu. Sličan trend zabilježen je i u Europi gdje su luke kao što su Rotterdam i Antwerpen uključene u uspostavu usluga kopnenog tegljenja i željezničkog prijevoza [4].

2.3. NAJVEĆE SVJETSKE LUKE

Prema pisanjima Lloyd's List-a i UNCTAD-a (engl. United Nations Conference On Trade And Development) postoje 2916 luka u svijetu od kojih su 939 kontejnerskih luka s redovitom linijskih prijevozom i većim značajem za globalnu ekonomiju. Kada bi sve spomenute luke imale direktnu povezanost jedna s drugom postojalo bi 440391 izravnih linijskih veza no u stvarnosti postoji 12748 takvih direktnih poveznica između parova luka što čini tek 2.9% od teoretskog maksimuma.

Za trgovinu između preostalih 97.1% parova luka, kontejneri se moraju prekrcati u drugim lukama, a najmanje povezani parovi luka zahtijevaju do čak šest prekrcaja. Prema mjerenjima iz 2020. godine luka Shanghai je najbolje povezana luka s 288 direktnih veza nakon koje slijede Busan (274 direktnih veza), Antwerp (268 direktnih veza) i Rotterdam (264 direktnih veza). U Africi najbolje povezana luka je Tanger Med sa 137 direktnih veza, a Cartagena u južnoj Americi sa 130 direktnih veza između luka [8].

Važnost odnosno veličina kontejnerskih luka također se može mjeriti na temelju količine primljenog tereta. Za procjenu količine tereta koristi se mjerna jedinica ekvivalent dvadeset stopa TEU (engl. twenty-foot equivalent unit) gdje jedna jedinična mjera TEU predstavlja kontejner dug 20 stopa odnosno 6.1 metara. Prema mjerenjima provedenim od 2016. do 2020. godine korištenjem TEU dobiveno je deset najvećih svjetskih luka.

Na čelu je luka Shanghai (Kina) nakon koje slijede Singapore (Singapore), Ningbo-Zhoushan (Kina), Shenzhen (Kina), Guangzhou (Kina), Busan (Južna Koreja), Qingdao (Kina), Hong Kong, Tianjin (Kina) te Rotterdam (Nizozemska).

Shanghai kao najveća svjetska luka (prikazana na slici 4.) nalazi se na delti rijeke Yangtze na sredini Kineske obale duge 18000 kilometara. Zbog svog specifičnog položaja Shangajska luka nalazi se u središtu Tihog oceana koji se sastoji od Japana,

Južne Koreje, Sjeverne Koreje, Dalekog istoka Rusije, Hong Konga, Macaa i Tajvana. Gotovo je ista udaljenost od važnih luka gore navedenih zemalja i regija.

Šangaj se nalazi na sredini kineske obale, a vremenska udaljenost je gotovo ista za kontejnerske brodove koji plove prema Guangdongu na jugu i Tianjinu, Dalianu, Qingdaou, Yantaiju i Yingkouu na sjeveru. Također, Kini omogućava dobru povezanost s gradovima iz unutrašnjosti zemlje duž rijeke Yangtze poput Chongqing, Chengdu i ostalih gradova [12]. U Shanghajskoj luci 2019. godine pretovareno 43,6 milijuna kontejnera od dvadeset stopa ekvivalenta (TEU) i 542,46 milijuna tona tereta.



Slika 4. Luka Shanghai

Online izvor: <https://edition.cnn.com/2022/04/01/business/shanghai-covid-port-delays-global-impact-intl-hnk/index.html>

3. AUTONOMNA VOZILA

Autonomna vozila su nova primjena automobilske tehnologije. Svako vozilo koje ima mogućnost navigirati prometnicama i interpretirati prometne znakove i uređaje bez aktivnog sudjelovanja vozača smatra se autonomnim vozilom. Ova vozila razvijena su s ciljem štednje energije te smanjenja broja nesreća, a samim time i smrtnih slučajeva koji su uzrokovani pogreškom vozača odnosno operatera [9]. U Sjedinjenim Američkim Državama više od 35000 smrtnih slučajeva te 2.4 milijuna slučajeva ozljeda nastalih posljedicom automobilskih nesreća, od kojih se čak 94% pripisuje isključivo pogrešci vozača odnosno ljudskoj pogrešci.

Nadalje, broj smrtnih slučajeva uzrokovanih prometnim nesrećama konstantno raste, a vodeći razlog trenutno su upotreba mobilnih uređaja i ometana vožnja. Eliminacijom vozača odnosno čovjeka kao operatera vozilom smanjuje se mogućnost nastajanja prometnih nesreća što je pokazatelj koliko su autonomna vozila uistinu revolucionarni napredak te budućnost u tehnologiji i u svijetu [9].

Tehnologija koju koriste autonomna vozila uključuje nekoliko komponenti. Ultrazvučni senzori su među prvim komponentama te oni prepoznaju prepreke prilikom parkiranja vozila no ne mogu se koristiti tijekom same vožnje zbog svog kratkog dometa [10]. Kamere su najčešće korištena tehnologija jer su ujedno i među jeftinima te one vrlo jasno prikazuju okruženje vozila no ne mogu mjeriti udaljenost i brzinu.

S druge strane, mikrovalni radar ima mogućnost mjerenja udaljenosti i brzine no ima vrlo ograničenu rezoluciju. Posljednja komponenta autonomnih vozila je LIDAR koji određuje udaljenost te stvara oblak točaka lokalnog okruženja. Sve navedeno potrebno je za procesuiranje i integraciju informacija i podataka iz okoline [9, 11, 12].

3.1. POVIJEST AUTONOMNIH VOZILA

Sama riječ autonomija dolazi iz antičke grčke riječi “autonomos“ koja je sastavljena od dvije riječi: “auto“ što znači “sebe“ i “nomos“ što znači “zakon“. Kombinacijom tih riječi dobiva se značenje da je autonomija pravo na samoregulaciju ili neovisnost [17]. Određeni autori smatraju da su začeci stvaranja autonomnih vozila bili 1977. godine u Japanu no začetnikom te tehnologije smatraju Ernstom Dickmannsom koji je bio njemački profesor aeronautike, a upravo on je sa svojim timom na Mercedesov kombi dodao senzore koji su omogućili korištenjem kompjuterskih naredbi daljinsko upravljanje kočnica, mjenjača te samoga upravljača [14].

Povijest autonomnih vozila međutim, Anderson i Rang Corporation dijele na tri različite faze od kojih prva faza traje od 1980 do 2003. godine. Tijekom navedenih godina su istraživački centri na sveučilištima u suradnji s kompanijama vezanim za automobilsku industriju pokrenula istraživanja o autonomnom prijevozu i vozilima. Prva od dvije važne spoznaje do koje su došli uslijed istraživanja je da takva vozila ovise o infrastrukturi autocesta i automatiziranim sustavima autocesta, a druga jednako važna spoznaja bila je razvoj autonomnih i poluautonomnih koja će minimalno ili neće uopće ovisiti o infrastrukturi autocesta [15].

Od 2003. do 2007. godine traje druga faza razvoja kojeg je obilježio izazov nazvan DARPA (engl. Defence Advanced Research Projects Agency). DARPA-u organizira Agencija Sjedinjenih američkih država za zaštitu naprednih istraživačkih projekata u tri izazova koji za cilj ima daljnje razvijanje autonomnih vozila. Rezultati ovog izazova su veliki napredak u razvoju tehnologije autonomije i znatno veći interes raznih tvrtki i opće javnosti. Za uspješno izvršenje izazova svaki tim koji je sudjelovao u DARPA izazovu morao je razviti potpuno autonomno vozilo koje je moralo prijeći udaljenost od cca. 241 kilometar (150 milja).

Do velikog pomaka dolazi 2007. godine kada je šest različitih timova u natjecanju nazvanom Urban Challenge uspješno prešlo rutu od cca 96 kilometara (60

milja) pritom poštujući prometne znakove i pravila, te vozeći jedni uz druge. U razvitku senzora potrebnih za autonomna vozila kao i sami algoritmi DARPA izazov se pokazala kao ključna stavka. Komercijalni autonomnih vozila razvoj u suradnji s proizvođačima vozila označio je treću fazu razvitka. Veliki doprinos razvitku autonomnih vozila daje Google koji potiče brojna komercijalna istraživanja kao i demonstracije ove tehnologije [15]. Prema pisanjima mnogih istraživača diljem svijeta biti će preko 8 milijuna potpuno autonomnih vozila i poluautonomnih vozila do 2025. godine, a Azija će biti najveće tržište [16].

3.2. RAZINE AUTONOMIJE

Danas je sve veći broj vozila opremljen naprednim sustavima za pomoć vozaču (ADAS, engl. advanced driver assistance systems) čime se povećava autonomija automobila u pogledu određenih vozačkih funkcija. Oni se kreću od sustava koji pomažu ljudskom vozaču (npr. automatski prijenos) do sustava koji već imaju određenu razinu autonomije (npr. aktivna kontrola krstarenja), a predstavljeni su čak i automobili koji mogu samostalno upravljati ograničenim udaljenostima (npr. Googleov automobil) [17].

Za strukturiranje stupanja automatizacije vozila koristi se SAE J3016 norma koja definira 6 različitih razina autonomije od potpuno manualnih vozila do potpuno autonomnih vozila. Razina 0 označava neautonomnu razinu. Drugim riječima, vozilo nulte razine ne sadrži nikakvu vrstu automatizacije te vozač u svakom trenutku u potpunosti upravlja vozilom [18]. Vozač pritom skreće, ubrzava, koči, parkira i obavlja sve ostale manevre koji su potrebni za sigurno korištenje vozila [17].

Vozila razine 0 mogu sadržavati funkcije upozorenja koji će olakšati vozaču vožnju poput automatskog kočenja u slučaju opasnosti, upozorenja od frontalnog sudar i upozorenja o napuštanju prometne trake, no takve funkcije se ne smatraju autonomnim. Vozila koja koristi većina populacija ima razinu 0 te samostalno određuje rutu, upravlja vozilom, stiže na odredište i uparkirava vozilo [19].

Kod razine 1 sustavi vozila pružaju stalnu pomoć vozaču pri ubrzavanju, usporavanju odnosno kočenju ili upravljanju. Posebni primjeri tehnologija pomoći

vozaču razine 1 uključuju prilagodljivu kontrolu krstarenja, pomoć pri održavanju smjera unutar prometne trake te održavanje stalne brzine ili smanjenja brzine.

Takvi i slični sustavi u određenim situacijama mogu vozaču oduzeti kontrolu nad vozilom, ali generalno gledajući vozač donosi odluku sam primjerice prilagođavajući tempomat. Vozač nadzire sustav automatizacije vožnje, po potrebi intervenira te određuje je li i kada uključivanje ili isključivanje sustava automatizacije vožnje prikladno [19]. Većina modernih vozila pripada upravo ovoj kategoriji [20].






















Razina 2 autonomije naziva se i djelomična automatizacija vožnje te označava zajednički rad dviju ili više funkcija čime se smanjuje kontrola vozača koju je imao u usporedni s nižim razinama autonomije. Primjer sustava koji pripada razini 2 je sustav s prilagodljivim tempomatom te automatskim kočenjem u nuždi [20]. Prekoračenje brzine na ovaj je način spriječeno, dok vozač u tom slučaju obavlja ostale zadatke dinamične vožnje (eng. Dynamic driving task, DDT) te, kao i u slučaju razine 1, nadzire sustav automatizacije vožnje te intervenira po potrebi uključujući ili isključujući sustav automatizacije [19].

Razina 3 je uvjetna automatizacija vožnje te označava veliki napredak u odnosu na razinu 2. Vozila upravljaju, ubrzavaju ili usporavaju te prate okolinu tijekom vožnje. U pojedinim okolnostima, primjerice tijekom vožnje autocestom, vozilo može obavljati sve aspekte vožnje te samostalno upravljati. Važno je naglasiti da vozač i dalje mora biti prisutan te spreman preuzeti upravljanje nad vozilom u bilo kojem trenutku vožnje [17]. Od treće do pete razine autonomije kvalificiraju se kao automatizirani sustavi vožnje (eng. automated driving systems, ADS) ili kao visoko automatizirana vozila (eng. highly automated vehicle, HAV) [20].

Na četvrtoj razini govorimo o visokoj automatizaciji vožnje. Vozač na ovoj razini nije potreban te vozilo može samo obavljati sve zadatke tijekom vožnje te pratiti stanja na cesti tijekom cijelog putovanja, ionako vozač po potrebi intervenira i preuzima kontrolu [18]. Drugim riječima, vozilo može obavljati sve funkcije vožnje pod određenim uvjetima.

Razina 5 označava potpuno automatiziranu vožnju. Vozilo ove razine može upravljati vozilom te obavljati sve funkcije vožnje u svim uvjetima vožnje. Vozač

nema funkciju te je on samo putnik. Drugim riječima, vozač mora samo unijeti željenu rutu te sve ostale funkcije i zadatke s maksimalnom pouzdanosti obavlja vozilo [18]. Trenutno ne postoje automatizirani automobili, no postoje automatizirani prijevozi [20]. Primjer automatiziranih prijevoza su zračne luke koje prevoze putnike od jednog do drugog terminala te svakako morske luke o kojima će biti detaljnije u daljnjem tekstu.

| | |  LJUDSKI VOZAČ |  AUTOMATIZIRANI SUSTAV | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|---|---|---|---|
| | | upravljanje i ubrzanje/ usporavanje | nadzor okoline u kojoj se vozi | rezervna radnja kada automatika prestane raditi | |
| | | | | automatizirani sustav je u kontroli | |
| vozač nadzire cestu | 0 NEMA AUTOMATIZACIJE |  |  |  | nedostupno |
| | 1 POMOĆ VOZAČU |  |  |  | NEKI NAČINI VOŽNJE |
| | 2 DJELOMIČNA AUTOMATIZACIJA |  |  |  | NEKI NAČINI VOŽNJE |
| automatizirani sustav nadzire cestu | 3 UVJETNA AUTOMATIZACIJA |  |  |  | NEKI NAČINI VOŽNJE |
| | 4 VISOKA AUTOMATIZACIJA |  |  |  | NEKI NAČINI VOŽNJE |
| | 5 POTPUNA AUTOMATIZACIJA |  |  |  |  |

Slika 5. Razine automatizacije

Izvor: izradio student

Zanimljivo je usporediti razine autonomije u sustavima s obzirom na sigurnost i skup ciljeva. Uspoređujući dva sustava, ukoliko jedan može postići iste ciljeve pod većim skupom nesigurnosti, tada možemo reći da drugi ima veću razinu autonomije. Također, ukoliko sustav može postići više ciljeva pod istim skupom nesigurnosti, tada možemo reći da taj sustav ima veću razinu autonomije. Stupanj autonomije može se tumačiti kao veličina operativnog područja ili sfere definirane skupom parametara unutar kojih sustav samostalno djeluje na siguran način prema cilju [13].

3.3. SENZORI

Autonomno vozilo je vozilo koje može percipirati okolinu i raditi bez potrebe za ljudskom intervencijom. Ni u jednom trenutku ljudski putnik ne mora preuzeti kontrolu nad automobilom niti se putnik uopće mora nalaziti u automobilu [21]. Jedan je od glavnih aspekata bilo kojeg autonomnog sustava je odabir odgovarajućeg niza senzora i njihovih optimalnih konfiguracija koji će se koristiti za imitaciju ljudske sposobnosti percipiranja i stvaranja pouzdane slike okoliša.

Senzori su dakle uređaji koji percipiraju i mapiraju događaje ili promjene u okolini i šalju ih na daljnju obradu kako bi sustav mogao planirati put i donositi kritične odluke. Autonomna vozila primarno koriste kamere, radarske senzore, LIDAR senzore i ultrazvučne senzore za percipiranje svojeg okruženja. Osim toga, drugi senzori, uključujući globalni navigacijski satelitski sustav (GNSS), IMU i senzore odometrije vozila, koriste se za određivanje relativnih i apsolutnih položaja vozila.

Relativni položaj vozila odnosi se na referenciranje koordinata u odnosu na okolne znamenitosti, dok se apsolutni položaj odnosi na referenciranje položaja u odnosu na globalni referentni okvir odnosno svijet. Pojedinačni i relativni položaj senzora kao i korištenje više različitih vrsta senzora na vozilu bitni su za precizno i točno otkrivanje predmeta i percepciju okoline [22].

3.3.1. Kamere

Kamere su jedni od najkorištenijih senzora za percipiranje okoline te ujedno ključni senzori za autonomna vozila razine 5. Kamere su generalno lako dostupne i jeftine stoga su i najviše prihvaćene u svijetu. Uzimajući u obzir da su oznake na kolniku, prometni znakovi, semafori i druga navigacijska pomagala osmišljena primarno za naš vizualni sustav, prirodan izbor primarnih senzora autonomnih vozila su kamere [23].

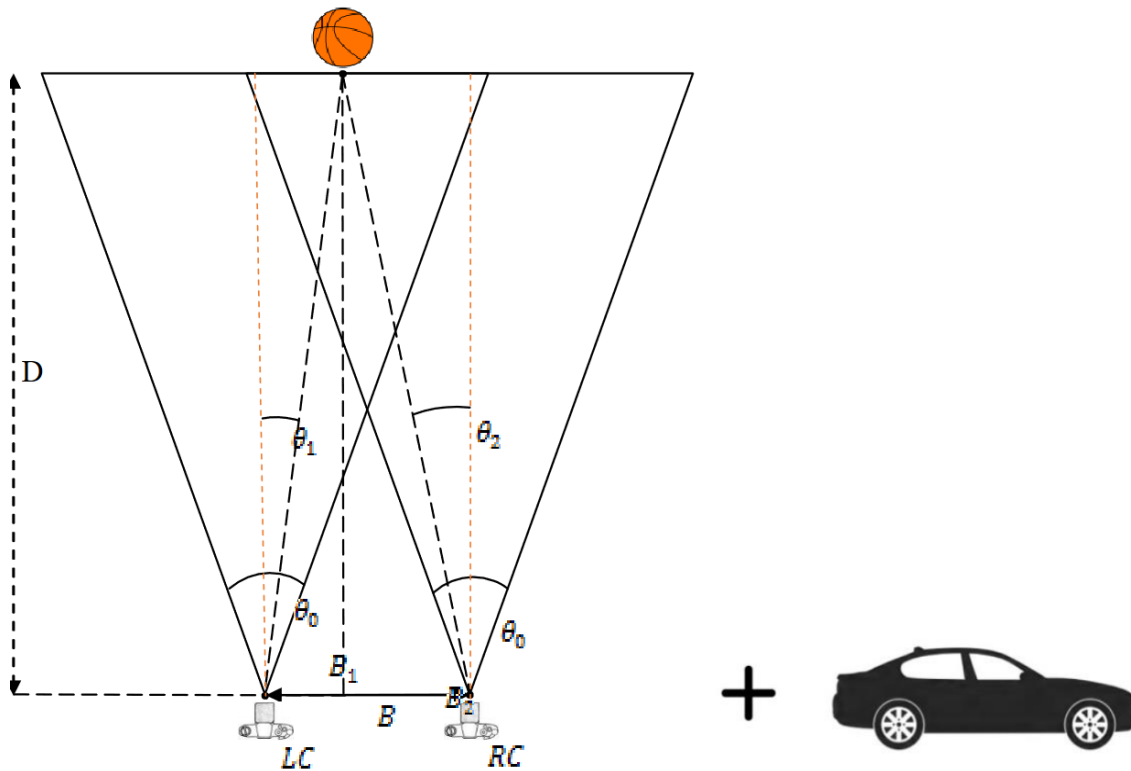
One proizvode oštre slike okoline i u spoju s odgovarajućim softverom mogu identificirati pokretne i statične objekte i prepreke unutar vidnog polja [21]. Kamere rade na principu detektiranja svjetla emitiranih iz okoline na fotoosjetljivu površinu kroz objektiv kamere koji se nalazi ispred senzora. Na ovaj način kamere proizvode jasne slike okoline odnosno slike okoline visoke rezolucije te rade u različitim vremenskim uvjetima [22, 23].

Kamere prepoznaju prometne znakove, semafore, oznake prometnih traka te barijere u slučaju kada je vozilo u cestovnom prometu. Sustav kamera u autonomnim vozilima može koristiti monokularne kamere, stereo kamere ili kombinaciju oba [22]. Kao što naziv implicira, sustav monokularnih kamera koristi jednu kameru za stvaranje niza slika. Veliko ograničenje monokularnih kamera u odnosu je nedostatak informacije o dubini, iako u nekim aplikacijama ili naprednijim monokularnim kamerama koje koriste hardver za autofokus s dva piksela, informacije o dubini mogu se izračunati pomoću složenih algoritama [22].

Osim monokularne kamere postoje, kao što je već spomenuto, stereo kamere (Slika 6). Ove vrste kamere također su poznate i kao binokularne kamere te koriste stereoviziju kao tehniku za snimanje i predstavljanje slike [22]. Točnije, stereo kamere koriste dvije kamere koje se postavljaju jedna uz drugu kako bi formirale binokularni sustav kamera u autonomnim vozilima. Na taj način stvara se iluzija dubine koristeći dvije slike snimljene u malo različitim položajima [24].

Rad stereo kamere možemo usporediti s korištenjem vida i stvaranje percepcije dubine, pri čemu se "nerazmjernost" između blago različitih slika formiranih u svakom oku koristimo za pružanje osjećaja dubine. Stereo kamere sadrže dva senzora slike koji su

odvojeni osnovnom linijom. Osnovna linija je udaljenost između dva senzora slike te se razlikuje ovisno o modelu kamere.



Slika 6: Područje vidljivosti stereo kamere

Izvor: <https://core.ac.uk/download/pdf/85134276.pdf>

Kamere općenito su sveprisutna tehnologija te se sve češće možemo susreti s njome. Autonomna vozila trebala bi moći uočiti objekte i prepreke stoga je korištenje kamera, točnije stereo kamera vrlo važno [24]. Kamere pružaju visoku razlučivost slike uključujući informacije o boji i teksturi percipiranog okruženja. S druge strane, stvaranje slika visoke razlučivosti ovisi o uvjetima okoline (primjerice osvjetljenje), slikovni podaci često se spajaju s drugim podacima senzora kao što su LIDAR i radar. Na taj način stvara se pouzdana i točna percepcija okruženja [22].

Na vozilima možemo upotrijebiti surround sustav na način da koristimo više kamera kako bi se pokrilo cijelo vidno polje od 360 stupnjeva oko automobila odnosno

vozila. Kamere pružaju širok raspon informacija i zadataka koje zahtijevanju autonomna vozila uključujući vizualnu lokalizaciju, 3D mapiranje i 3D otkrivanje prepreka tijekom rada u unutarnjim i vanjskim okruženjima. Za potpunu autonomiju važno je da vozilo uočava objekte oko sebe, a upravo koristeći surround sustav izbjegavamo mrtve točke koje inače mogu dovesti do nezgoda.

Kako bismo smanjili broj kamera potrebnih za surround percepciju, koristimo kamere sa širokim vidnim poljem kao što su kamere riblje oko. Smanjujući broj kamera, smanjujemo i ukupnu cijenu sustava dok pritom kvaliteta ostaje jednaka. Kalibracija je bitan preduvjet za korištenje sustava s više kamera u autonomnoj vožnji. Neprecizna kalibracija utječe na vizualnu percepciju što dovodi do netočnih rezultata mapiranja, lokalizacije i otkrivanja prepreka. Nadalje, promjene okoline i vibracije uzrokuju lagana odstupanja kalibracijskih parametara polako tijekom vremena zbog čega je važna ponovna kalibracija [23].

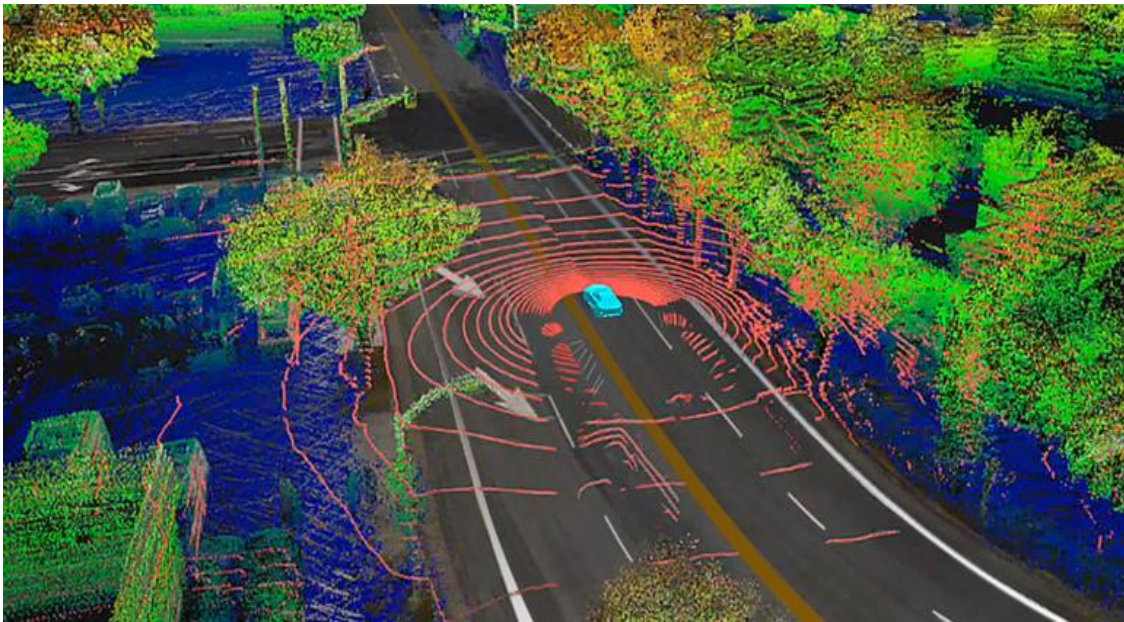
3.3.2. LIDAR

LIDAR (engl. light detection and ranging) prvi se put koristio 1960-ih godina u mapiranju terena iz zraka. Sredinom 1990-ih proizvođači laserskih skenera proizveli su i isporučili prve komercijalne LIDAR-e s 2000 do 25 000 impulsa u sekundi za topografsko kartiranje. Razvoj LIDAR tehnologija kontinuirano se razvijao značajnom brzinom tijekom posljednjih nekoliko desetljeća i trenutno je jedna od ključnih tehnologija percepcije za napredni sustav pomoći vozaču i autonomna vozila.

Upravo zbog tog brzog rasta istraživačkih i komercijalnih poduzeća povezanih s autonomnim robotima, bespilotnim letjelicama i autonomnim vozilima dolazi do velike potražnje za LIDAR sensorima zbog svojih atributa poput raspona mjerenja, točnosti, otpornosti na okolinu i velike brzine mjerenja. LIDAR je senzor koji ima sposobnost uočavanja, određivanja i mapiranja objekata iz okoliša.

U usporedbi s duže poznatom radar (engl. radio detection and ranging) tehnologijom radi na kraćem režimu valne duljine zbog čega postiže veću preciznost u 3D mapiranju. Optički impulsi odnosno laserske zrake koje odašilje LIDAR odbijaju

se od objekata iz okoline i vraćaju se natrag u senzor te se stvara 3D oblak točaka koje vjerno predstavljaju snimanu okolinu [30]. Primjer takvog prikaza oblaka točaka je vidljiv na slici 7. Rezolucija mape odnosno gustoća točaka u oblaku ovisi o vidnom polju senzora i udaljenosti od objekta.

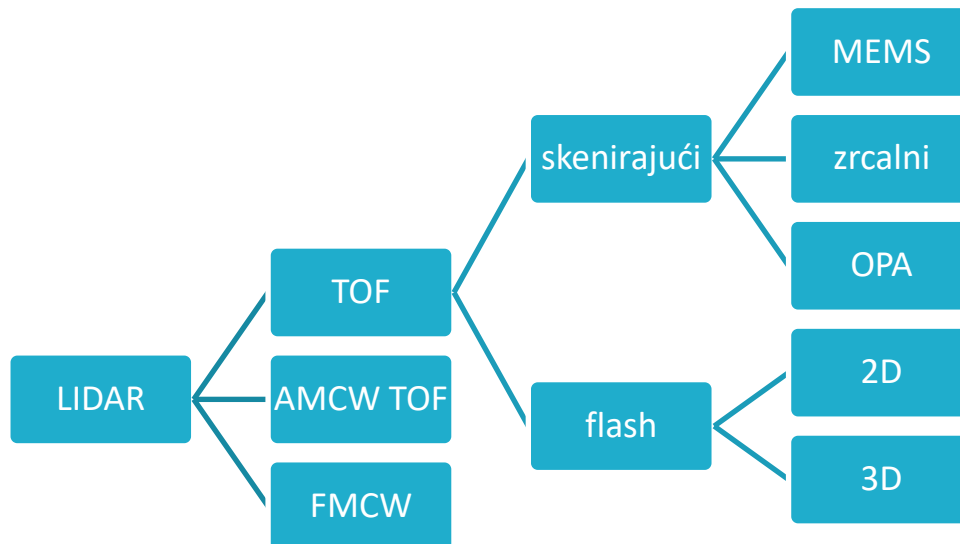


Slika 7. Oblak točaka nastao mjerenjem LIDAR-a

Izvor: <https://intellias.com/solving-the-challenges-of-hd-mapping-for-smart-navigation-in-autonomous-cars/>

LIDAR se primjenjuje u brojnim granama ljudske djelatnosti poput geodezije, arheologije, praćenju okoliša, robotici i kod autonomnih vozila. Većinu LIDAR senzora možemo smjestiti u jednu od tri najzastupljenije vrste s obzirom na princip rada: princip vremena leta (engl. time of flight, TOF), amplitudno modulirano kontinuirani val (engl. amplitude-modulated continuous wave, AMCW TOF) i frekvencijski modulirano kontinuirani val (frequency-modulated continuous wave). LIDAR koji radi na principu vremena leta (TOF) se dalje dijeli na dvije podvrste: skenirajući i flash LIDAR.

Skenirajući se nadalje dijeli na MEMS (engl. microelectromechanical), zrcalni i OPA (engl. optical phase array); dok se flash dijeli još na 2D i 3D linijski flash LIDAR. Podjela LIDAR senzora na vrste i podvrste vidljiva je na prikazu 1 [25].



Prikaz 1. Podjela LIDAR-a

Izvor: izradio student

U nastavku će biti objašnjeni principi rada TOF (vrijeme leta), AMCW TOF (amplitudno modulirano kontinuirani val), i FMCW (frekvencijski modulirano kontinuirani val) LIDAR-a.

3.3.2.1. Princip rada, prednosti i nedostaci TOF

TOF vrsta radi na principu vremenske odgode odnosno kašnjenja optičkog impulsa. Ova vrsta mjeri vrijeme i odašilje optički impuls (laser) koji nakon što napusti senzor odbija se od objekta i zatim se vraća nazad u senzor. Pomoću izmjerenog vremena koje je potrebno za prijeđeni optički impuls izračunava se udaljenost od objekta po formuli:

$$R = \frac{v * \Delta t}{2}$$

gdje je:

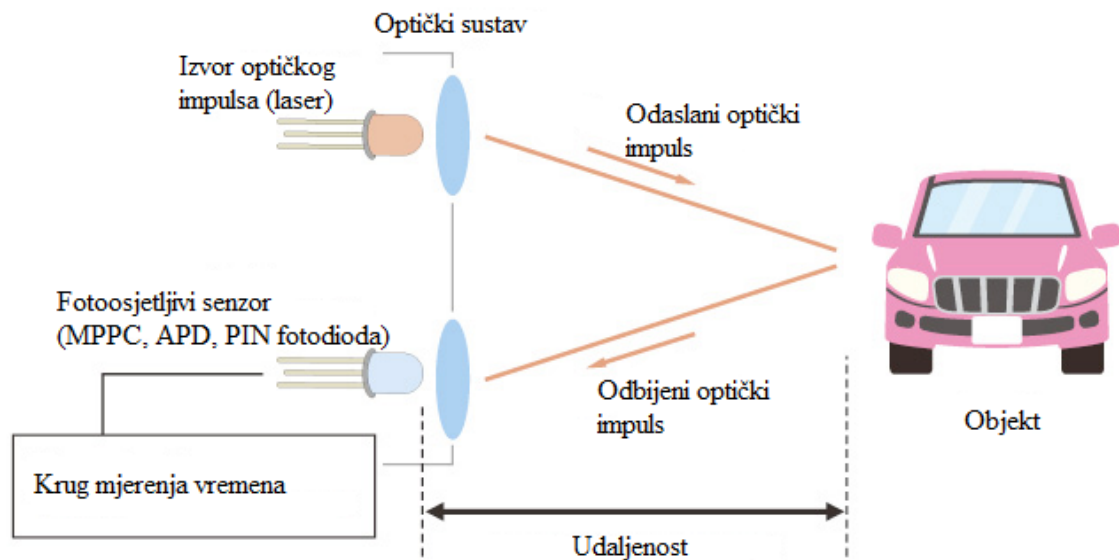
R = udaljenost od objekta

v = brzina odaslanog optičkog impulsa

t = vrijeme puta

Na slici 8. prikazan je jednostavan princip rada TOF lidar senzora. Ova izvedba nudi prednosti poput jednostavnosti implementacije, niska složenost odašiljačkih i prijemnih sustava, jeftino rješenje male veličine zbog manjka složenih optičkih sustava. Međutim ova jednostavna arhitektura suočava se s problemima treperenja koji rezultiraju niskom preciznošću mjerenja, a zbog vanjskog izvora svjetlosti uzorkovanih međusobnim smetnjama, omjer signala i šuma često je nizak.

Kako bi se povećao omjer signala i šuma potrebne su složene i hardverski skupe metode koje su diktirane propisima zaštite ljudskog oka koji ograničavaju snagu odašiljanja lasera. Kratke širine impulsa mogu postići veću vršnu snagu uz održavanje sigurnosti očiju, međutim, to uvelike utječe na dizajn hardvera prijemnika [25].

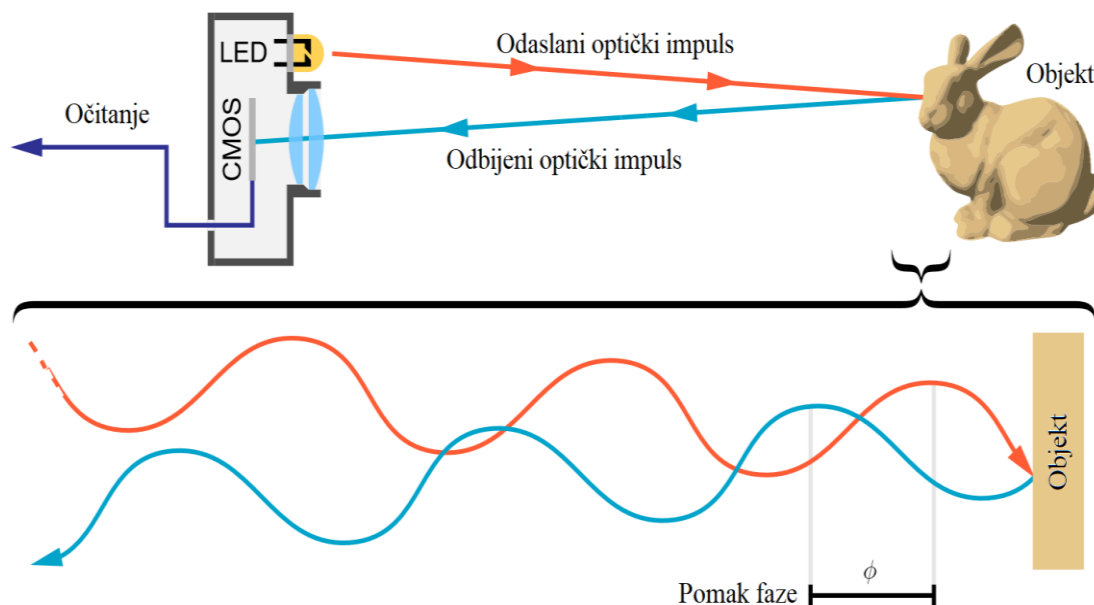


Slika 8. Princip rada TOF LIDAR-a

Online izvor: <https://www.microcontrollertips.com/lidar-and-time-of-flight-part-2-operation/>

3.3.2.2. Princip rada, prednosti i nedostaci AMCW

AMCW princip rada je sličan TOF-ovom kod kojeg umjesto da se odašalje jedan "oštar" impuls kontinuirano se odašilje optički impuls kojem se modulira intenzitet svjetla [25]. Mjerenjem faznog pomaka u moduliranom osvjetljenju scene određuje se vrijeme leta čime se izračuna udaljenost od objekta [26]. Udaljenost se izračunava podjelom reflektiranog signala preko niza integriranih prozora. Prvo, senzor emitira svjetlosni impuls sinkroniziran s prvim prozorom koji će se reflektirati natrag na senzor i biti fazno pomaknuto, a nakon što je impuls odaslan drugi integrirani prozor će biti omogućen. Oba prozora sadrže frakciju odbijenog impulsa koji je fazno pomaknut u odnosu na odaslani impuls te na temelju njihovog omjera izračunava se vrijeme leta. Kod kraćih udaljenosti većina primljene svjetlosti se detektira u prvom prozoru dok kod većih udaljenosti odbijeno svjetlo je prisutnije u drugom prozoru [27]. Princip rada i fazni pomak između odaslaniog i odbijenog impulsa prikazan je na slici 9.



Slika 9. Princip rada AMCW

Izvor: [27]

Budući da AMCW senzori mjere optičku energiju zanemarujući valnu duljinu koja se koristi, potrebni su jednostavni laserski sustavi, što čini ukupnu veličinu senzora malom. Međutim, budući da se udaljenost mjeri na temelju odbijenog impulsa odnosno njegove snage, otkrivanje više od jedne mete postaje težak zadatak. Kao i kod prethodno opisane TOF arhitekture sigurnosni propisi ograničavaju snagu odašiljanja pa se ova arhitektura koristi kod srednjih i malih udaljenosti [25].

3.3.2.2. Princip rada, prednosti i nedostaci FMCW

Ova vrsta arhitekture je složenija od prethodne dvije zbog mogućnosti detekcije i mjerenja udaljenosti od promatranog objekta, ali i brzine kretanja tog istog objekta. Svjetlosni impuls s frekvencijskim prelamanjem ili tzv. cvrkutanjem odašilje se iz lasera i dijeli se na dva dijela. Jedan dio (Tx) prenosi se do objekta dok se drugi (LO) zadržava lokalno odnosno ne odašilje se. Svjetlosni impuls koji se vraća nakon odbijanja od objekta (Rx) ponovo se spaja s LO i detektira. Rx impuls ima isti valni oblik kao i LO ali sa vremenskom odgodom. Vremensko kašnjenje povezano je s udaljenošću od objekta kroz relaciju:

$$\tau_D = \frac{2R}{c}$$

gdje je:

c = brzina svjetlosti

τ_D = vremensko kašnjenje

R = udaljenost od objekta

Detektor mjeri heterodinski otkucaj (razliku frekvencija) između dva optička polja, a ona je dana izrazom:

$$f_{otkucaja} = k\tau_D$$

gdje je:

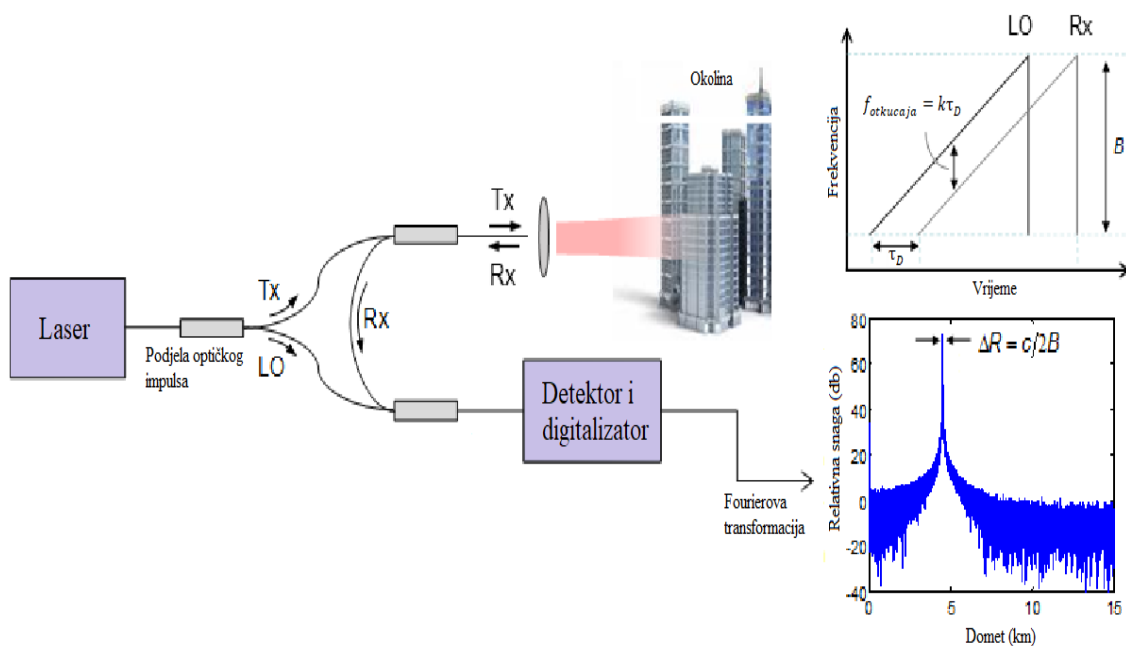
$f_{otkucaja}$ = frekvencija heterodinskog otkucanja

k = brzina cvrkutanja

τ_D = vremensko kašnjenje

Za dobivanje udaljenosti od objekta spoje se dvije prethodno navedene jednačbe

$$R = f_{otkucaja} * \frac{c}{2k}$$



Slika 10. Princip rada FMCW

Izvor: [28]

Slika 8. prikazuje princip rada FCMW LIDAR-a i donjem desnom kutu prikazuje Fourierovu transformaciju heterodinskog otkucanja na vertikalnoj osi

logaritamske skale, dok je vodoravna frekvencijska osa pretvorenom u domet. Ovaj prikaz se naziva profilom dometa punog valnog oblika.

Ovaj pristup predstavlja nekoliko prednosti kao što su: LO omogućava veće pojačanje sustava čime se postiže veći omjer signala i šuma; fazna i frekvencijska koherencija primljene svjetlosti i LO osigurava veću otpornost na interferenciju sunčeve svjetlosti i drugih vanjskih izvora svjetlosti; omogućeno je izravno mjerenje brzine ciljeva zbog Dopplerovog pomaka vidljivog u povratnom signalu; i s obzirom da radi u kontinuiranom valu izbjegava visoke vršne emisije snage koje mogu uzrokovati oštećenja očiju.

Najveći nedostatak ove arhitekture je što laser mora čuvati integritet faze dovoljno dugo da bi mogao izmjeriti udaljenost bez značajne pogreške. Što dulje zadržava integritet, mogu se izmjeriti veće udaljenosti jer čak i male varijacije faza tijekom procesa utječu na omjer signala i šuma. Posljedično, povećava se složenost arhitekture zbog toga što je skupo stvarati laserska rješenja koja moraju sužavati spektar, ali imati mogućnost podešavanja frekvencije [25].

3.3.3. Radar

Radarski senzori neizostavan su dio sustava za autonomnu vožnju, omogućujući vozilu da detektira okolinu i prepreke u njoj [29]. Radar koristi tehnologiju radio valova za određivanje udaljenosti, kuta i brzine okolnih objekata [12]. Prošlo je više od 50 godina otkako su započeli prvi pokušaji implementacije radarskih senzora u automobile [2]. Početkom 1972. u Njemačkoj je započeo istraživački program kojem je predmet istraživanja bio automobilski sustavi protiv sudara temeljeni na radaru (pod nazivom NTÖ 49).

Unutar istraživačkog projekta razrađene su strategije dizajna radara za automobile te se razvio prvi radarski sustav koji radi na 35 GHz u rasponu frekvencija milimetarskih valova [2]. Od ranih 1980-ih počelo je uvođenje radarskog senzora od 77 GHz kao svjetskog standarda za automobilski radar dugog dometa (eng. Long range radar, LRR) [2].

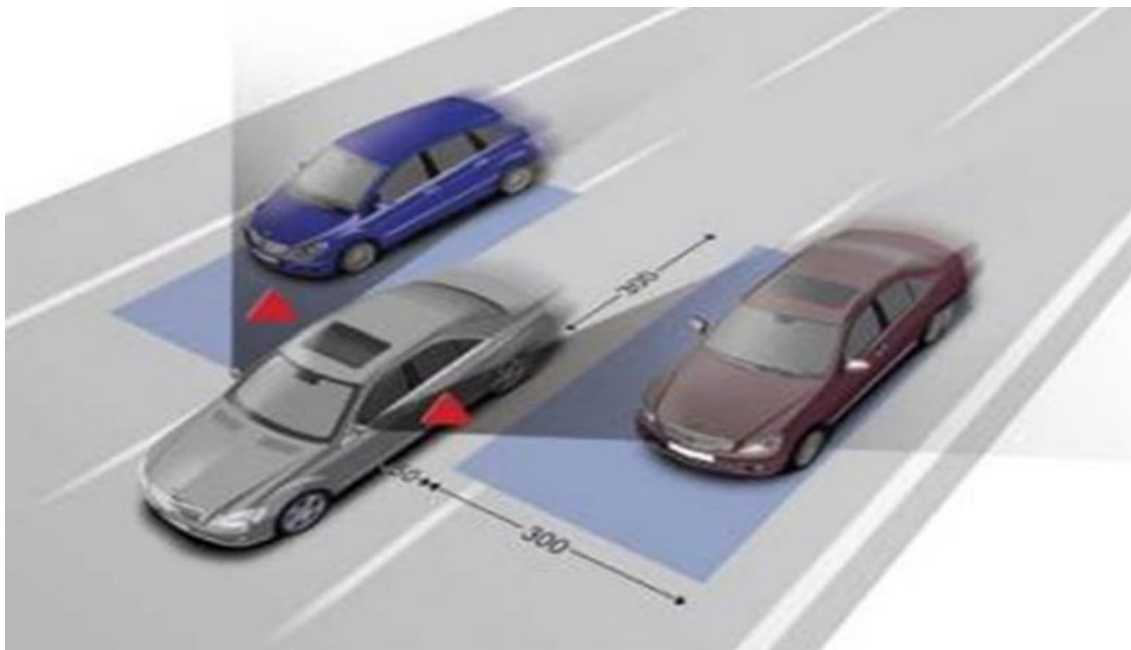


Slika 11. Primjer korištenja radara dugog i kratkog dometa

Online izvor: <https://mercedes-benz-publicarchive.com/marsClassic/en/instance/picture/DISTRONIC-Plus.xhtml?oid=199537>

Nadalje, prvi senzor za otkrivanje mrtvog kuta (eng. Blind spot detection, BSD) odnosno radarski senzor kratkog dometa (eng. Short range radar, SSR) za prepoznavanje vozila koja se nalaze u optičkom mrtvom kutu standardnog retrovizora, predstavili u ranim 1970-ima Dunlop and Assoc. i Bendix u Sjedinjenim Američkim Državama. Senzor je koristio raspon od 16 GHz te je osvijetlio područja mrtvih kutova (prikazano na slici 12.) i upozorio na prisutnost vozila koji se približavaju svjetlosnim ili zvučnim signalom [2]. Danas je raspon od 24 GHz opći frekvencijski pristup koji se koristi za očitavanje mrtvog kuta vozila.

Zbog svoje jedinstvene izvedbe, automobilske radarske senzore okosnica su modernih sustava za sigurnost vozila kao i pomoć vozaču općenito [2]. Za istraživače i proizvođače, radarski senzori i sustavi nedvojbeno su jedno od ključnih pitanja u tehnologiji autonomne vožnje s obzirom na to da mogu pružiti sigurno iskustvo za potrošače i zauzeti udio na tržištu pametnih automobila [30].



Slika 12. Senzor detekcije mrtvog kuta

Online izvor: <https://www.motortrend.com/features/mercedes-launches-blind-spot-warning-system-1148/>

Postoje različite vrste radarskih senzora, a trenutno je najpopularniji tradicionalni ultrazvučni radar [30]. Ultrazvučni radar putem odašiljača emitira mehaničke valove s frekvencijom višom od raspona zvučnih valova ljudskih ušiju. Nakon refleksije, valove prima prijammnik, a udaljenost između vozila i objekta dobiva se izračunavanjem vremenske razlike između prijema i slanja. Najčešće korištene frekvencije su 40kHz, 48kHz i 58kHz, a općenito, viša frekvencija dovodi do veće točnosti senzora. Ultrazvučni senzor ima malu difrakciju i dobru usmjerenost što mu omogućuje širenje signala u obliku zraka.

Uglavnom se koristi tijekom vožnje pri malim brzinama kao što su sustavi za automatsko parkiranje i radari za vožnju unatrag [29]. Međutim, s razvojem tehnologije, tradicionalni ultrazvučni radarski sustavi više ne zadovoljavaju potrebe vozača te kao rezultat toga, na tržište su ušli napredniji radar milimetarskih valova te LIDAR.

U usporedbi s ultrazvučnim radarom, radar milimetarskih valova manje je veličine, manje težine te visoke prostorne rezolucije [30]. Radar milimetarskih valova posebna je klasa radarske tehnologije koja koristi elektromagnetske valove kratke valne duljine.

Radarski sustavi odašilju elektromagnetske valove koje objekti na njihovom putu reflektiraju. Hvatanjem reflektiranog signala radarski sustav određuje daljinu, brzinu i kut objekta. Ovaj radar odašilje signale s valnom duljinom koja je u milimetarskom rasponu što se smatra kratkom valnom duljinom u elektromagnetskom spektru i upravo to je jedna od prednosti ove tehnologije.

Sustav milimetarskog radara koji radi na 76 – 81 GHz s valnom duljinom od 4 mm ima sposobnost otkrivanja kretanja veličine dijela milimetra i može prodrijeti kroz materijale poput plastike, suhozida, odjeće i otporan je na uvjete okoline poput kiše, magle, prašine i snijega. Potpuni milimetarski radarski sustav uključuje radiofrekvencijske (RF) komponente za odašiljanje (TX) i primanje (RX); analogne komponente kao što je takt; i digitalne komponente kao što su analogno-digitalni pretvarači (ADC, engl. analog to digital converters), mikrokontroleri (MCU, engl. microcontrollers) i procesori digitalnih signala (DSP, engl. digital signal processors).

Nadalje, često je korištenje kombinacije kamera i radara, točnije radara milimetarskih valova, kao senzori za okolinu. Radar milimetarskih valova je superiorniji od bilo kojeg drugog senzora u pogledu vertikalnog položaja, vertikalne brzine, vertikalnog dometa detekcije, kišnog i snježnog vremena, izravne sunčeve svjetlosti te noćne izvedbe. S druge strane, kamera ima dobre performanse u horizontalnom položaju, horizontalnom rasponu detekcije te sposobnosti klasifikacije ciljeva.

Radar i kamera upotpunjuju rad jedno drugog te stvaraju vjerniju sliku okoline [30]. Praćenje okoline vozila pomoću senzora rezultira prikupljanjem korisnih informacija za sigurnosne primjene. S obzirom na teškoće koje mogu imati druge tehnologije (poput kamera) tijekom loših vremenskih uvjeta, radar se pokazao najbolji [31]. Radarski sustavi osim primjene na vanjskom dijelu vozila, moguće je primijeniti i u unutrašnjosti.

Jedan od takvih primjera je korištenje radar sustava za detekciju prisutnosti osoba u vozilu kako bi se smanjio broj smrtnosti djece od toplinskog udara. Dok kamere primjerice zadiru u privatnost osoba koje posjeduju vozilo, radar pruža jednostavno rješenje poštujući privatnost. Iako bi korištenje ovog sustava uveliko doprinijelo smanjenju broja ovakvih nezgoda, nažalost nisu široko rasprostranjeni [32].

Osim, spomenutog radara milimetarskih valova, razlikujemo i radare dugog, srednjeg i kratkog dometa. Radar dugog dometa (eng. Long range radar, LLR) ima domet do 250 metara no uskog je vidnog polja i srednje do niske rezolucije. Radar srednjeg dometa (eng. Mid-range radar) ima domet do 100 metara te je srednjeg vidnog polja, dok radar kratkog dometa (eng. Short range radar, SRR) ima domet do 50 metara no ima veliko vidno polje i visoku rezoluciju [31].

Radar kratkog dometa je radarski sustav koji radi oko vozila dok je ono u pokretu kako bi detektirao moguće prepreke i sudare s istima. Prepreke mogu biti druga vozila, zidovi ili pješaci. Nakon uočavanja prepreke, automatski se aktiviraju sigurnosne mjere kao što je primjerice usporavanje vozila [31]. Sustavi radara kratkog dometa sastoje se od niza radara koji se mogu koristiti za niz različitih funkcija kao što su: pomoć pri parkiranju unaprijed kao i unatrag, upozorenje na sudar, ublažavanje sudara, adaptivni tempomat odnosno prilagodljiva regulacija brzine s funkcijom stani i kreni (engl. stop and go), upozorenje na sudar straga, nadzor mrtvog kuta te pomoć za promjenu prometne trake.

Automobilskim radarima kratkog dometa dopušteno je koristiti dva usklađena frekvencijska pojasa u Europskoj uniji: 24 GHz i 79 GHz. Prijelaz s 24 GHz na 79 GHz uzrokuje povećanje frekvencije i smanjenje valne duljine. Radarski senzorski sustavi 79 GHz imaju niže troškove čipova, niže troškove montaže, poboljšane performanse, smanjenu potrošnju energije, poboljšano elektrostatičko pražnjenje/elektromagnetske smetnje te visoke stope ažuriranja [31].



Slika 13. Razne primjene radara kratkog dometa

Online izvor: <https://www.telecomabc.com/s/srr.html>

3.3.4. GNSS

Globalni navigacijski satelitski sustav (eng. Global navigation satellite system, GNSS) opći je pojam za međunarodni satelitski sustav koji pruža usluge pozicioniranja i navigacije na globalnoj ili regionalnoj osnovi. U povijesti, rani GNSS imao je nisku točnost, ograničenu dostupnost te nedostatak integriteta. U periodu od 2005. do 2007. godine, GNSS doživio je veliku promjenu u performansama i mogućnostima zahvaljujući razvoju ekosustava [33].

U posljednjih 20 godina, razvoj modernog GNSS-a doveo je do izrazito velikih stopa sigurnosti od samo jednog kvara ili propusta lokalizacije na milijardu milja po vozilu. GNSS uključuje razne globalne sustave na kojima se temelje senzori koji se koriste kao izvor lokalizacije vozila u ruralnom području kao i urbanom [33, 34]. GPS

je najrasprostranjeniji te se on odnosi na sjevernoamerički sustav globalnog pozicioniranja ili satelitski sustav pozicioniranja.

Američki GPS proglašen je potpuno operativnim 1995. godine s 24 satelita, a 2000. godine bio je otvoren za civilnu upotrebu. Od tada su druge države pustile u opticaj tri nova globalna navigacijska satelitska sustava s više od 125 satelita. Nadalje, ruski GLONASS je bila druga GNSS konstelacija koja je postigla operativni status, stekavši kontinuiranu globalnu uslugu. Kineski BeiDou-3 operacionalizirao je 19 satelita počevši od 2012. godine s ciljem da cijela konstelacija od 24 satelita bude spremna za rad do kraja 2020. godine.

Sustav Galileo Europske unije stavio je u pogon 22 satelita počevši od 2013. godine s predviđena četiri satelita zajedno sa šest rezervnih za koje se očekuje da će biti dovršeni do kraja 2020. godine. Uz četiri globalna sustava, postoji više regionalnih sustava koji dolaze na mrežu uključujući japanski Quazi-Zenith satelitski sustav (QZSS) te indijski 7-satelitski navigacijski sustav s indijskom konstelacijom (NAVIC).

QZSS je posebno zanimljiv zbog toga što je dizajniran za pružanje pokrivenosti u gusto naseljenim urbanim područjima te zbog mogućnosti prenošenja informacija o korekciji radi poboljšanja točnosti i pružanja osnovnog nadzora integriteta za GNSS [33]. Kao što je vidljivo, GNSS je međunarodni te samim time ima pristup raznim informacijama koje temelje svoje podatke na više od satelita.

Autonomno vozilo kao takvo treba imati snažan sustav percepcije kako bi moglo donositi odluke u stvarnom vremenu. Pozicioniranje i navigacija ključne su funkcije automatiziranog vozila koje omogućuju određivanje svog apsolutnog i relativnog položaja u okruženju u kojem se nalaze [35]. Drugim riječima, percepcija, lokalizacija i mapiranje, planiranje putanje, donošenje odluka te kontrola vozila glavne su komponente tehnologije autonomnih vozila [34, 36].

Autonomna vozila moraju imati napredne senzorske sposobnosti i tehnologije za kontinuirano promatranje i percepciju okoline odnosno izdvajanje i praćenje objekata, kao i za točan izračun svoje lokacije na globalnoj razini te u odnosu na druge statičke ili dinamičke prepreke [36]. Za dobivanje dosljednih i preciznijih podataka kao pomoć u lokalizaciji može pružiti korištenje algoritama za usklađivanje karata.

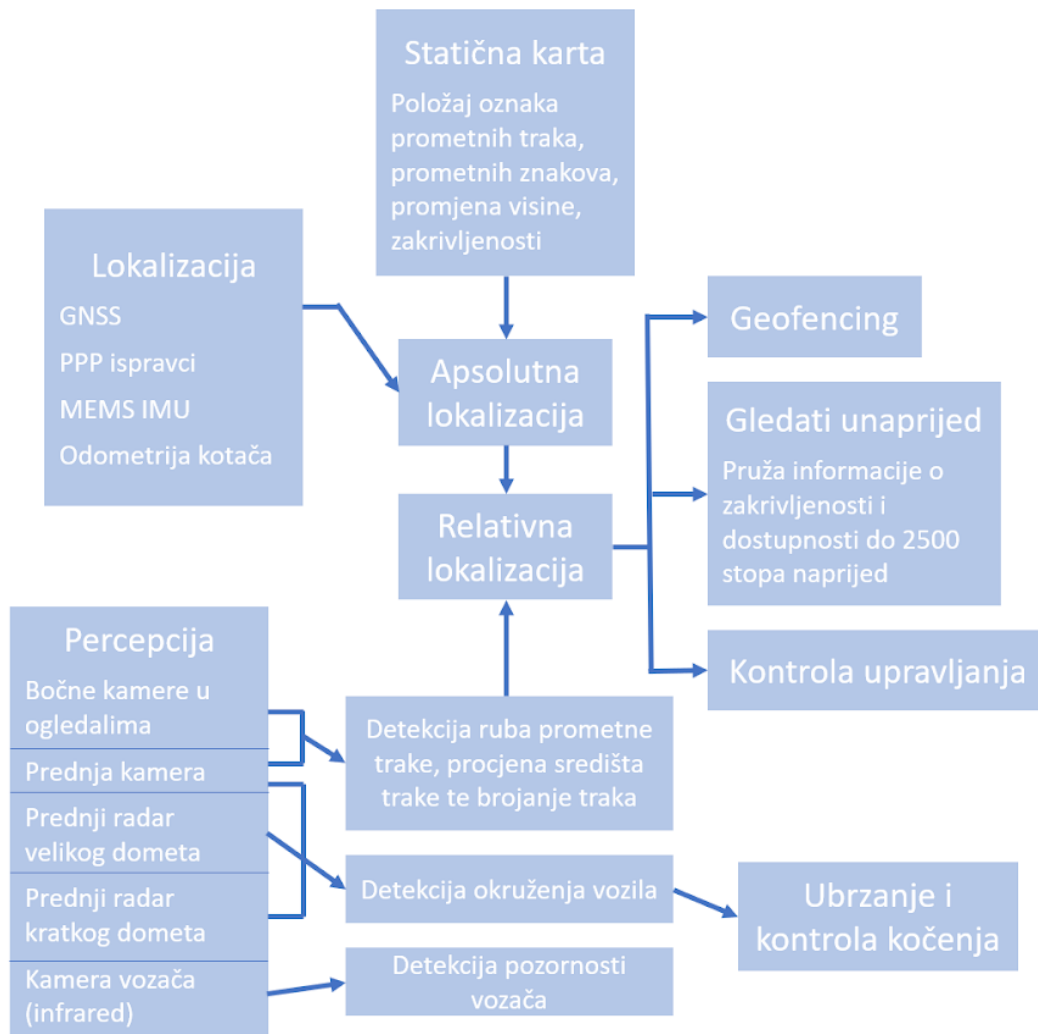
U autonomnim sustavima, informacije o položaju pokretne platforme moraju biti poznate što je točnije moguće kako bi bila moguća sigurna kontrola vožnje. Tradicionalno se autonomna vozila oslanjaju na globalni navigacijski satelitski sustav te inercijalni navigacijski sustav (INS) za lokalizaciju, u kojem GNSS osigurava položaj bez zanošenja i zatim se kombinira s visokofrekventnim relativnim položajem procijenjenim iz INS-a za točnu lokalizaciju.

Međutim, važno je imati na umu da se diferencijalni signal ne može primiti u svakom trenutku te da su informacije o položaju GNSS-a sklone skokovima zbog blokade signala, učinaka više staza i magnetskog šuma. GNSS će imati ograničenu lokalizaciju u zatvorenim okruženjima, urbanim sredinama i tunelima. S druge strane kod INS se mogu pojaviti kumulativne akumulirane greške [34, 37].

Drugim riječima, vrsta senzora koja koristi GNSS sustave može dovesti do pogrešaka u lokalizaciji te je zbog važno spajanje različitih senzora koji će doprinijeti točnijem pozicioniranju te proizvoditi ispravan položaj odnosno lokaciju čak i kada jedan od senzora pokazuje pogrešna mjerenja. Svako autonomno vozilo ima skup osnovnih senzora za procjenu položaja u vanjskim okruženjima kao što su GNSS, odometrija kotača (enkoderni kotača), LIDAR, kamere, inercijalna mjerna jedinica (IMU) [34, 38]. Elementi arhitekture autonomnih vozila razine autonomnije 2 za praćenje prometne trake su percepcija i lokalizacija.

Percepcija se koristi za kontrolu unutar prometne trake kako bi se vozilo zadržalo između linija trake bez pomoći karata i lokalizacije. Drugim riječima, sustav percepcije omogućuje bočnu i uzdužnu lokalizaciju unutar trake i detektira okolna vozila. Cilj sustava zahtijeva i odabir i prestrojavanje u ispravnu prometnu traku za prelaženje čvorova i spajanja te odabir ili izbjegavanje izlaznih traka.

Namjenski sustav lokalizacije i mapiranja osigurava nadzor nad sustavom percepcije i omogućuje planiranje izvan granica percepcije, kao što je usporavanje za nadolazeće zavoje. Želja za izvođenjem složenijih manevara kao što su promjene voznih traka razvija ovu arhitekturu prema objedinjavanju preciznog GNSS-a za lokalizaciju na razini traka i lokalizaciju na traci temeljenu na kameri za planiranje i izvođenje staza [33, 38].



Slika 14. Elementi arhitekture automatizirane vožnje razine 2

Izvor: Izradio student

GNSS može osigurati određivanje prometne trake na HD karti što omogućuje pouzdano planiranje manevara unutar prometne trake pružajući ključni dio za sigurnu navigaciju od početne točke do cilja. Nadalje, optički sustavi mogu imati grešku otkrivanja nepostojeće prometne trake što može dovesti iznimno opasnog ponašanja. GNSS određuje prometnu traku te pruža neovisni signal za provjeru valjanosti rezultata optičkih sustava. Velik izazov s kojim se suočavaju proizvođači vozila je

postizanje pouzdanosti veće 10 do 8 opasnih kvarova ili propusta na sat. Dopuštena stopa kvarova ili propusta procijenjena je na manje od jednog kvara u milijardu milja.

Metoda za postizanje ove razine pouzdanosti upravo je kombiniranje neovisnih sustava za redundantno lokaliziranje vozila, a jedan od njih može biti GNSS. Još jedna prednost GNSS sustava je zamjena tijekom prekida rada. Naime, i LIDAR i optički sustavi imaju prekide. Sustavi razine 4 oslanjaju se na skup inercijskih mjernih jedinica (IMU) za sigurno zaustavljanje u ovakvim okolnostima, a sustavi razine 2 ovise o intervenciji vozača.

Precizni GNSS sustav mogao bi biti održiva zamjena odnosno pomoćni sustav tijekom prekida rada. Na taj način omogućio bi rad u degradiranom načinu za vozila razine 4 te pomažući u naprednom upozorenju o potrebnoj intervenciji vozača za transformaciju vozila razine 2 u vozila razine 3. Još jedna velika prednost GNSS sustava je omogućavanje interoperabilnosti za prevladavanje okluzije te omogućavanje suradnje.

Naime, veliki izazov za autonomna vozila je dijeljenje informacija između vozila i statičke infrastrukture te je to snažan pristup prevladavanju okluzije perceptivnih senzora. Interoperabilnost između autonomnih sustava omogućuje stratešku i taktičku suradnju, proširujući osnovnu vožnju zbog omogućavanja koordinacije između vozila. Interoperabilnost zahtijeva dijeljenje zajedničkih prostornih referentnih okvira i vremena.

GNSS nudi jedini izvor globalno dosljedne precizne pozicije i vremena koji služi kao standardna referenca za sve autonomne sustave [33]. Unatoč svim prednostima GNSS sustava važno je naglasiti da njegova točnost ovisi o brojnim faktorima poput kvalitete signala, broju dostupnih satelita, izobličenju atmosferskog signala te refleksiji signala [34].

3.3.5. Lokalizacija

Točne informacije o položaju i položaju vozila kao i sposobnost detekcije statičke i dinamičke prepreke oko njega među ključnim su zahtjevima tehnologije

autonomnih vozila koja je posebno izazovna u urbanim područjima. Nadalje, tehnologije autonomnih vozila te informacije zahtijevaju u stvarnom vremenu što predstavlja problem implementacije zbog trenutnih ograničenja poput kapaciteta računala, složenosti obrade, mogućnosti prijenosa u oblak i drugih.

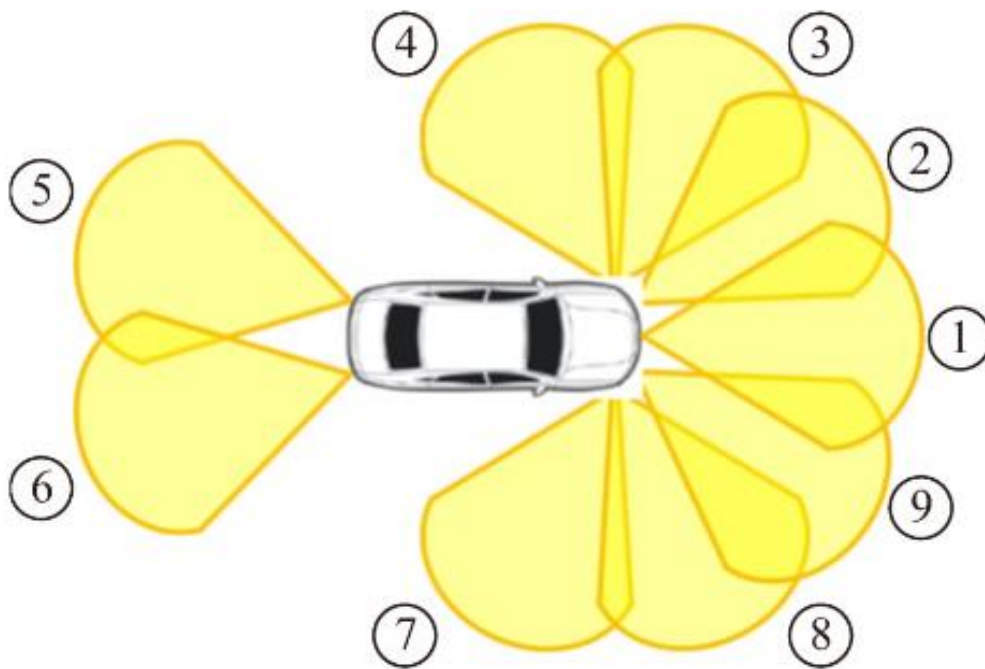
Najčešće se koriste dvije tehnike za navigaciju i lokalizaciju dostupne za autonomna vozila, a to su simultana lokalizacija i mapiranje (SLAM, engl. Simultaneous Localization and Mapping), usklađivanje karata visoke rezolucije (HD, engl. High Definition) uz satelitsko pozicioniranje pomoću globalnog satelitskog navigacijskog sustava (GNSS, engl. Global Navigation Satellite System) [39].

SLAM je algoritam koji kombinira skup senzora za izradu karte autonomnog vozila i njegove okoline dok istovremeno prati trenutni položaj vozila u odnosu na stvorenu kartu. Iako su SLAM algoritmi isprva primijenjeni u području mobilnih robota, istraživači su uložili zamjetan trud kako bi prilagodili algoritam za autonomna vozila. To je učinjeno uzimajući u obzir različite izazove kao što su potreba za bržom obradom, uvjeti vanjske rasvjete te dinamične prepreke na cesti. Ova tehnika zahtijevaju računalno intenzivnije algoritme i mogu biti podložne većoj nesigurnosti što ovisi o korištenim sensorima i okolini u kojoj se vozilo nalazi.

Zbog ograničenja senzora poput raspona percepcije i performansi prepoznavanja, autonomna vozila ne mogu otkriti udaljene objekte ili objekte blokirane preprekama u stvarnom vremenu. Upotrebom HD karata ta ograničenja se uklanjaju i nudi se detaljan prikaz okoline što znatno olakšava percepciju okoline kao i otkrivanje i identifikaciju objekata u okolini na način da se podaci senzora o percepciji okoline uspoređuju s kartama. HD karte daju vrlo precizne informacije i omogućujući vozilima da se precizno lokaliziraju u odnosu na te karte.

Nekoliko vodećih tvrtki kao što je HERE oslanjaju se na korištenje najnovije LIDAR tehnologije za snimanje 3D podataka o oblaku točaka različitih elemenata na cesti, kao što su oznake prometnih traka, zakrivljenosti ceste, prepreke na cesti i prometni znakovi. U isto vrijeme, prilagođavaju se promjenama u stvarnom vremenu kontinuiranim ažuriranjem tih karata.

U posljednjem desetljeću lokalizacija temeljena na usklađivanju karte dobila je značajnu pažnju. HD karte su korisne ukoliko se okolina ne mijenja često, međutim, ako se dogode značajne promjene u okolini može doći do neočekivanih problema za autonomnu vožnju, te se karte stoga moraju ažurirati kako bi se osigurala održiva razina performansi za percepciju u stvarnom vremenu [40, 41].



Slika 15. Raspored milimetarskog radara na vozilu

Izvor: [39]

Za daljnje pojašnjenje načina lokalizacije vozila korištenjem tehnika GNSS i usklađivanja mapa za primjer je dano vozilo koje je opremljeno Applanix POS-LV220 GNSS/INS senzorom koji dobiva položaj (geografsku širinu, dužinu i nadmorsku visinu) i kutni položaj na frekvenciji od 100 Hz. Vozilo ima i kameru koja je postavljena na prednje staklo te koja služi za prepoznavanje prometnih znakova. Treći senzor kojeg koristi je LIDAR senzor Velodyne VLS-128 Alpha Prime koji ima 128 laserskih senzora za odašiljanje i prijem.

Ovaj LIDAR može mjeriti trodimenzionalnu udaljenost u svim smjerovima i prikuplja podatke na frekvenciji od 10 Hz. Vozilo također ima devet milimetarskih radara od 77 GHz koji su postavljeni na prednji i stražnji branik a položaj ugradnje je prikazan na slici 15. Svaki radar dobiva udaljenost, kut i relativnu brzinu objekta na frekvencija od 20 Hz [39].

U ovom primjeru koristi se metoda sastoji se od dvije tehnike: zbrojeni položaj i podudaranja HD karte s podacima senzora. Prvo se procjenjuje grubi položaj zbrojenom pozicijom podacima od GNSS/INS. Zbrojeni položaj može se izračunati integracijom vektora brzine tijekom vremena. Vektor brzine u vremenu t-1 je v_{t-1} , vremensko razdoblje Δt i zbrojena pozicija u vremenu t-1 je x_{t-1}^{DR} . Zbrojena pozicija x_t^{DR} u vremenu t može se izračunati po sljedećoj formuli:

$$x_t^{DR} = x_{t-1}^{DR} + v_{t-1}\Delta t$$

Pogreška zbrojene pozicije (pomak) povećava se proporcionalno prijedenoj udaljenosti od početne pozicije zbog akumulacije pogreške. Pomak Δx_t^{DR} se procjenjuje kako bi se mogao izračunati stvarna pozicija vozila x_t^v sa sljedećom formulom:

$$x_t^v = x_t^{DR} + \Delta x_t^{DR}$$

Usklađivanje karata visoke rezolucije se provodi u tri koraka: projekcija podataka senzora na dvodimenzionalnu ravninu i stvaranje slike (slika promatranja), rezanje slike koja odgovara položaju vozila i računanje distribucije korelacije podudaranjem predloška.

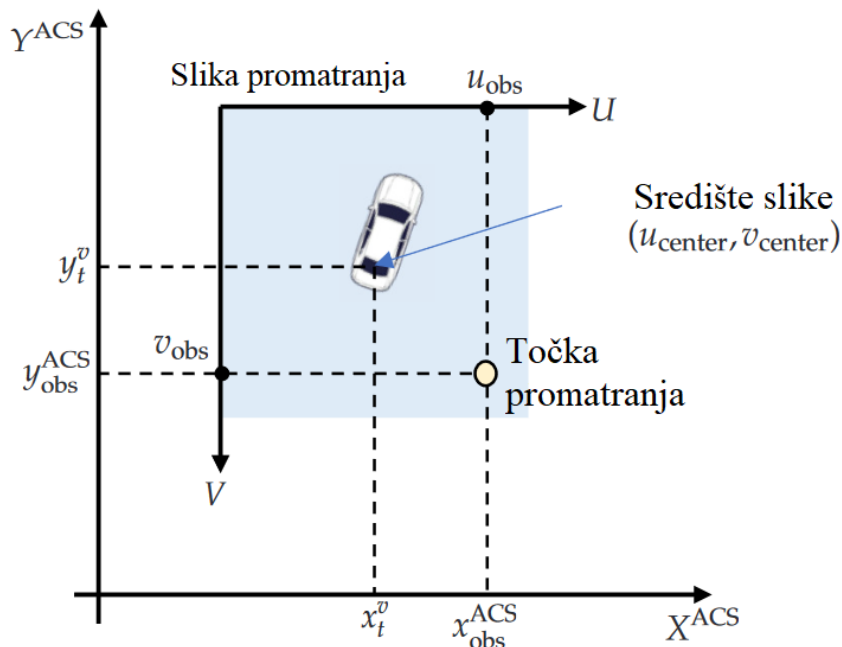
Slika promatranja korištenjem LIDAR-a dobiva se preslikavanjem laserske refleksije površine ceste na dvodimenzionalnu sliku. Središnji piksel slike promatranja

uvijek je položaj vozila procijenjen računanjem mrtve točke jer se procjena položaja može izvesti bez velikog povećanja pogreške ako je računanje mrtve točke ograničeno na kratke intervale od nekoliko sekundi.

Uzme li se da je položaj vozila u apsolutnom koordinatnom sustavu $x_t^v = [x_t^v \ y_t^v]^T$, a rotacijska matrica koja predstavlja kutni položaj R i položaj točke promatranja LIDAR-a u koordinatnom sustavu vozila je x_{obs}^{VCS} , položaj opažanja x_{obs}^{ACS} u apsolutnom koordinatnom sustavu izračunava se jednadžbom:

$$x_{obs}^{ACS} = R x_{obs}^{VCS} + x_t^v$$

Kako bi se uzele u obzir pogreške kvantizacije u mapiranju, položaj središnjeg piksela u apsolutnom koordinatnom sustavu izračunava se i oblak točaka površine ceste projicira se na sliku. Proizvoljna LIDAR točka promatranja preslikana je u piksel prema odnosu na prikazanom na slici 16.



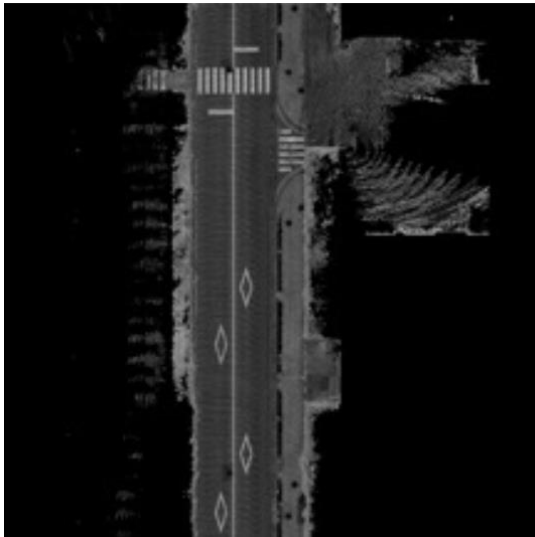
Slika 16. Mapiranje LIDAR promatranja u apsolutnom koordinatnom sustavu

Izvor: [39]

Budući da radar milimetarskih valova ima nižu točnost dometa i kutnu točnost od LIDAR-a, kod mapiranja treba uzeti u obzir karakteristike senzora. Vjerojatnost postojanja stacionarne prepreke, uključujući pogrešku opažanja, projicira se na sliku promatranja kao što je prikazano na slici 16. Projicirani piksel promatranog objekta može se izračunati na isti način kao za LIDAR.

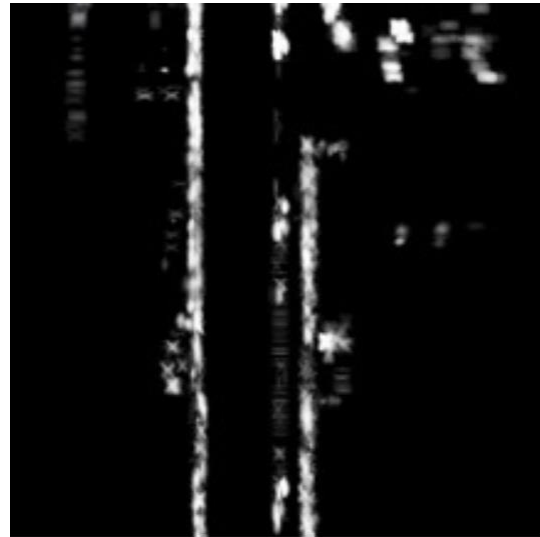
Karta koja se koristi za usklađivanje izrađuje se izvanmrežno prolaskom kroz ciljno područje i prikupljanjem podataka iz senzora. Na temelju GNSS/INS položaja, podaci LIDAR-a i radara mogu se preslikati na sliku koristeći gore opisanu metodu za izradu karte za svaki senzor. Područje oko procijenjene pozicije x_t^p vozila se izrezuje i koristi u procesu usklađivanja.

Primjeri LiDAR i slika radarske karte prikazani su na slikama 17. i 18. Kod LIDAR mape svaki piksel predstavlja reflektirani impuls. Uzorci na površini ceste, poput bijelih linija, mapiraju se bijelom bojom zbog svoje visoke refleksije. Kod radar mape svaki piksel predstavlja vjerojatnost postojanja stacionarnog objekta u toj točki, bijeli pikseli predstavljaju veću vjerojatnost, tj. postojanje objekta.



Slika 18. LIDAR karta

Izvor: [39]

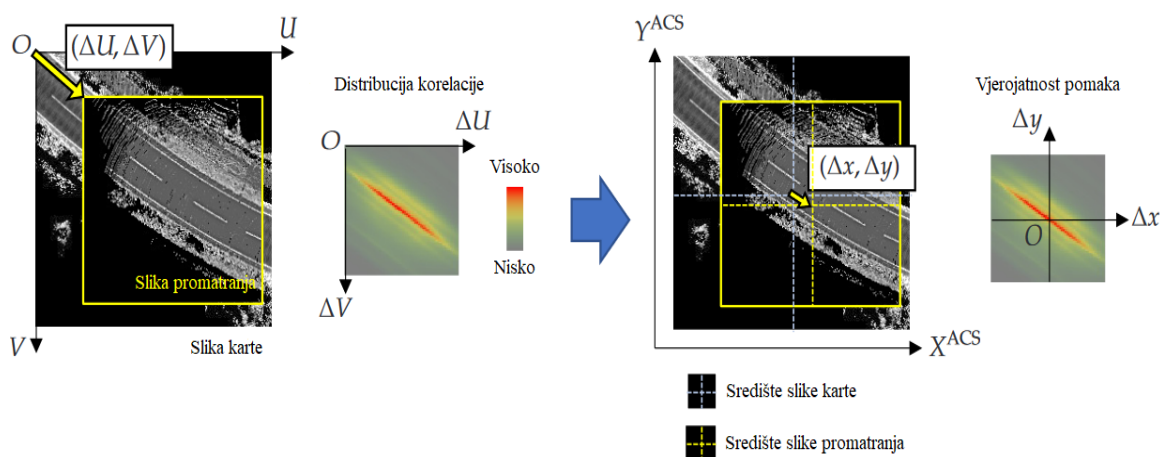


Slika 17. Radar karta

Izvor: [39]

Za svaki senzor, distribucija korelacije izračunava se usklađivanjem predloška između promatrane slike i slike karte. Kao što je prikazano na slici 19, distribucija korelacije je distribucija sličnosti kada se dvije slike preklapaju pomakom od $(\Delta U, \Delta V)$. Ova metoda koristi nultu srednju vrijednost normalizirane unakrsne korelacije (ZNCC, engl. Zero-means Normalized Cross-Correlation) kao sličnost.

Vrijednost korelacije najveća je na poziciji koja odgovara lokaciji vozila na karti i može se smatrati distribucijom vrijednosti pomaka. Budući da je slika promatranja nastala u ishodištu vozila i da je slika karte obrezana oko predviđenog položaja vozila, pomak $(\Delta x, \Delta y)$ je pomak u sredini između dvije slike [39].



Slika 19. Distribucija korelacije i vjerojatnost pomaka

Izvor:[39]

4. AUTONOMNA VOZILA U LUKAMA

Tradicionalne operacije u lukama uključuju radnike koji izravno kontroliraju strojeve što može biti dugotrajno i opasno za ljude zbog podložnosti greškama. Pogreške, oštećenja i kašnjenja imaju negativan utjecaj na lanac opskrbe [42]. Primjerice, godišnje se proizvede 79 milijuna automobila, a globalna trgovina automobilima postaje sve značajnija. Proces ukrcaja i iskrcaja automobila s terminala na brodove i obrnuto u potpunosti ovisi o vozačima koji pomiču vozilo jedno po jedno. Taj proces je dugotrajan i zamoran što povećava vjerojatnosti i prilike za pogreške [43].

Korištenjem autonomnih vozila i strojeva optimizira se izvršenje određenih zadataka i smanjuje se rizik od grešaka, nesreća, ozljeda i kašnjenja. Optimizacijom zadataka mogu se ostvariti i uštede koje su povezane sa smanjenjem vremena potrebnog za obavljanje zadataka, smanjenjem štete na opremi i teretu i smanjenjem ozljeda radne snage. Također mogu stvoriti manje stresna, udobnija i ergonomska okruženja za radnike koji će nadgledati operacije [42].

Mogućnosti i izazovi autonomnih vozila u putničkom i teretnom prometu postali su glavno pitanje u raspravama o budućim prometnim sustavima. Autonomna vožnja opisuje autonomno kretanje vozila i daljnji je razvoj sustava za pomoć u vožnji. Autonomno znači da se odgovornost za kretanje vozila prebacuje s čovjeka na sustav, a prethodno u radu je opisano kako stupanj autonomije može biti prilično različit za različite vrste vozila.

Mnoge tvrtke uključene u proizvodnju vozila i njihovih kontrolnih sustava rade na novim rješenjima za povećanje razine automatizacije vožnje [44]. U posljednjih nekoliko godina proizvođači uvode sve naprednije funkcije i sustave pomoći vozaču kako bi se povećala razina sigurnosti i udobnosti. Osim podizanja razine sigurnosti nastoji se postići i veća razina produktivnosti [45].

Veliki broj luka radi neovisno i u zajedničkom razvoju pripremajući se za autonomna vozila koja dolaze. Međutim, to se uglavnom odnosi samo na velike i tehnološki napredne luke što je djelomično obrazloženo ciljem održavanja vlastite konkurentske pozicije kako bi luke bile spremne na implementaciju autonomnih vozila.

Mnoge luke i gradovi provode eksperimente na ispitnim područjima, a razine sigurnosti moraju ostati visoke kako bi se spriječile eventualne opasne situacija koje bi mogli ozlijediti ili usmrtniti ljude. Primjerice, projektom HEAT u Hamburgu osigurava se sigurnost putnika i pješaka dodatnim senzorima na ulicama i kamerama u vozilu te nadzorom upravitelja. Isto je i sa samovoznim autobusima u Helsinkiju, u Finskoj, takozvani RobobusLine koji je u proljeće 2019. godine pušten u redovni prijevoz. Ove prve aplikacije potrebne su za testiranje, prikupljanje iskustava, a samim time i za daljnji razvoj [44].

Za postizanjem sigurnije infrastrukture i povećanje njegovih kapaciteta ključnim se smatraju inteligentni transportni sustavi (ITS, engl. intelligent transport systems). Luke kao točke čvorišta u prometnom sustavu vrlo često se susreću sa zakrčenom infrastrukturom, a često i s nemogućnosti proširenja infrastrukturnog kapaciteta. Inteligentni transportni sustavi kao alat za cilj ima povećanje infrastrukturnog kapaciteta i smanjenje utjecaja na okoliš što može poslužiti kao dobar izbor za luke. Dakle, glavna je funkcija ITS-a povećati učinkovitost prometnog sustava, s posebnim naglaskom na pružanje usluga i informacija za čitav spektar korisnika [46].

Također bitna stavka koja se veže za ITS je internet stvari (IoT, engl. Internet of things). IoT uređaji postali su rasprostranjeni i obuhvaćaju širok raspon tehnologija i standarda, a bežična tehnologija ključna je za povezivanje tih uređaja sa sustavom u oblaku. Nakon što se ovi uređaji povežu, počinju prijavljivati očitane ili izmjerene podatke te šalju sustavu informacije o prometu, cestama, navigaciji i ostalih potrebnih informacija za samostalnu vožnju vozila. Drugim riječima, IoT je velika mreža međusobno povezanih stvari te ljudi koji skupljaju i dijele podatke o načinu na koji se koriste i o okolišu u kojem se nalaze [46, 47].

4.1. CESTOVNA VOZILA

Za postizanje mogućnosti da je vozilo potpuno autonomno potrebne su četiri funkcije:

1. Prva od četiri funkcije je navigacija odnosno planiranje rute pomoću digitalne karte koja uključuje informacije poput lokacije vozila, vrijeme i vrsta ceste dok se za određivanje položaja oslanja na GPS.
2. Druga funkcija odnosi se na praćenje okoline i analizu situacije koristeći se sensorima koji su u radu prethodno navedeni, a dodatni podaci o pozicioniranju mogu se dobiti pomoću markera ugrađenih u samu infrastrukturu.
3. Planiranje pokreta treća je potrebna funkcija za postizanje autonomnosti. Praćenjem kretanja vozila korištenjem senzora vozilo izbjegava sve otkrivene statične i dinamične objekte koji predstavljaju prepreku nakon čega mora donijeti odluku o prilagodbi brzine i smjera. Kako bi se poboljšala sposobnost predviđanja mogu se koristiti pokazatelji poput pokreta rukama ili čak izraza lica.
4. Četvrta i posljednja funkcija je kontrola putanje u kojoj je sadržano upravljanje izvođenja unaprijed planiranim promjenama brzine i smjera, promatranje i održavanje stabilnosti vožnje i radnje pri ubrzavanju, kočenju te prilagodbama upravljačkog sustava koje provodi autonomno vozilo.

Kao što je već spomenuto jedan od ključnih aspekata percepcije okoliša je detekciju ceste, a najvažniji elementi ceste su rubne i središnje oznake traka za čiju se detekciju se ponajviše koriste LIDAR i kamere. Kako bi detekcija tih oznaka bila što jednostavnija cestovne oznake moraju biti stalno i dobro vidljive. Promjenjive teksture i boje kolnika kao i loše osvjetljenje koje uzrokuje sjene može ometati senzore

prilikom detekcije oznaka stoga je poželjan ujednačen kolnik na svim cestama u luci i dobro postavljena rasvjeta [44].

4.1.1. Primjeri

U narednim poglavljima bit će navedeni i opisani primjeri autonomnih vozila u lukama: Autostrad kontejnerski prijenosnik, automatizirano vođena vozila (AGV, engl. Automatic Guided Vehicle), dvije vrste automatskih skladišnih kontejnerskih dizalica (ASC, engl. automatic stacking cranes) te autonomna vožnja kamiona.

4.1.1.1. Autostrad kontejnerski prijenosnik

Primjer autonomnog vozila na kontejnerskom terminalu je AutoStrad automatiziranog kontejnerskog prijenosnika prikazanog na slici 20. Razvoj tehnologije AutoStrad, tj. automatizacija standardnog kontejnerskog prijenosnika u luci Brisbane započeo je kao Patrickov projekt u suradnji s Australskim centrom za terensku robotiku (ACFR) na Sveučilištu u Sydneyu 1995. godine.

Glavni cilj projekta bio je upotrijebiti postojeći kontejnerski prijenosnik proizvođača Kalmar kao osnovu za automatizaciju tog vozila kako bi se izbjegla potreba za stvaranjem i izgradnjom vozila po narudžbi. Ovaj sustav koristi radarski sustav milimetarskih valova umjesto GPS-a što ga čini autonomnim u smislu navigacijskog integriteta s točnosti unutar 2 cm. Sustav se kalibrira pomoću enkodera na kotačima i virtualnih markera koji prekrivaju površinu ceste.

Varijanta ove tehnologije se koristi i u DP World London Gateway-u i TraPac u Los Angelesu. Projekt je prvu put uspješno rukovao brodom 2002. godine, a 2005. godine AutoStrad terminal počinje sa radom. U to je vrijeme bio jedan od samo tri kontejnerska terminala na globalnoj razini koji su bili automatizirani, druga dva su ECT terminal u Rotterdamu i HHLA Altenwerder terminal u Hamburgu.

Posljednje dvije koristile su automatske skladišne kontejnerske dizalice (ASC, engl. automatic stacking crane) i automatizirano vođena vozila (AGV) umjesto

AutoStrads. Od 2005. terminal Brisbane AutoStradTM osvojio je nagrade za arhitekturu, sigurnost i inženjering, uključujući Lloyds Listov DCN terminal godine u Australiji 2010. godine [48].



Slika 20. AutoStrad automatizirani kontejnerski prijenosnici

Izvor: <https://www.heavyliftnews.com/patrick-terminals-in-australia-order-12-kalmar-autostrad-units/>

4.1.1.2. AGV

Drugi primjer korištenja autonomnih vozila u lukama su automatizirano vođena vozila (AGV, engl. Automatic Guided Vehicle). Kao što ime sugerira, to su vozila koje se kontrolira i upravlja uz pomoć automatiziranih tehnoloških sustava i opreme umjesto tradicionalnijeg ručnog upravljanja. AGV je prvotno uveden kako bi se omogućila brža isporuka proizvoda u skladištima i proizvodnim jedinicama.

Prvo automatizirano vođeno vozilo predstavila je 1950. godine američka tvrtka Barrett Electronics sa sjedištem u Illinoisu. Tijekom godina, s obzirom na korisnost i izvedivost AGV-a, njegova se uporaba proširila na velik broj područja od kojih se njegova uloga u pomorskim operacijama smatra iznimno plodonosnom i

produktivnom. AGV funkcioniraju kao horizontalni transportni sustav koji je ključan za automatizaciju operacija u luci.

Moderni AGV-ovi su dobili veliku pozornost industrije i podržavaju samostalnu vožnju (bez vozača), automatsku navigaciju, optimizaciju putanje te proaktivnu prevenciju grešaka. Osim toga, dizajnirani su sa samodijagnostikom i funkcijama praćenja procesa s vlastitim napajanjem. Putem opreme za bežičnu komunikaciju i automatskog dispečerskog sustava, AGV-ovi se mogu slobodno kretati s preciznim pozicioniranjem kako bi točno i sustavno izvršili upute iz sustava [49, 50]. AGV-mogu koristiti više načina navigacije u prostoru.

Prvi mogući način su postavljene metalne trake unutar ili na površinu ceste, a senzori za prepoznavanje istih se nalaze na prednjem i stražnjem dijelu vozila. Njihova zadaća je prepoznavanje utjecaja magnetskog polja metalnih traka kako bi se odredio smjer kretanja. Signali koje senzori primaju su međutim vrlo slabi i na njih utječu metalni objekti koji se nalaze u blizini. Jači signal se može generirati korištenjem žica kroz koje protječe izmjenična struja od otprilike 10 kHz i 100 m.

Vozila koja su opremljena enkoderima kotača i potenciometrima upravljanja i/ili inercijskim sensorima ne trebaju kontinuirano navođenje kao u prethodnom načinu. U ovom slučaju dovoljno je postaviti elektromagnetske referentne oznake na definirane razmake (npr. 3 metra). Kao referentne oznake mogu se koristiti magneti ili induktivni transponderi. Nakon što antena prijeđe preko referentne oznake može utvrditi odstupanje od centra i ispraviti svoj smjer kretanja.

Optički sustavi treći su način navigacije i posebno su prikladni za čista okruženja sa slobodnom vezom između senzora i referentnih uzoraka. Laserski skener postali su izuzetno važni za navigaciju. Laserski skener okreće se oko svoje okomite osi (približno 8 puta u sekundi) i odašilje optičke impulse koji se reflektiraju od referentnih oznaka te se vraćaju u senzor. Zatim sustav određuje kut između referentnih točaka i uzdužne osi vozila koji se koristi za trigonometrijski izračun pozicije.

Posljednji način navigacije je satelitska navigacija. Iako postoji od sredine 1990-ih godina i dalje dolazi do raznih pogrešaka u prijenosu signal što rezultira netočnim

podatkom o poziciji. Međutim, korištenjem referentne stanice se može eliminirati ovaj problem. U slučaju korištenja referentne stanice AGV prima podatke o korekciji putem RF prijenosa s nje što poboljšava točnost na oko 3 do 5 metara.

Integracijom vanjskih senzora na vozilo dolazi do točnijih podataka pozicioniranja, što je dovelo do općeg prihvaćanja satelitske navigacije u odgovarajućim okruženjima. AGV mora imati stalnu vezu sa satelitom, a u slučaju prekida iste bitno je da AGV ima vanjske senzore.



Slika 21. Primjer korištenja AGV-a na kontejnerskom terminalu

Online izvor: <https://www.konecranes.com/en-sa/port-equipment-services/container-handling-equipment/automated-guided-vehicles/agy>

4.1.1.3. Automatska skladišna kontejnerska dizalica (ASC)

Na kontejnerskim terminalima koriste se dvije vrste automatskih skladišnih kontejnerskih dizalica (ASC, engl. automatic stacking cranes) koje se mogu nalaziti u kontejnerskom dvorištu ili na kopnenoj strani pretovarnog područja. Prva vrsta dizalica služi za slaganje i kretanje kontejnera u blokovima kontejnerskog dvorišta koji su okomiti na пристаниште. Također vrše prekrcaje kontejnera između AGV-ova i blokova kontejnerskog dvorišta ili između blokova kontejnerskog dvorišta i kamiona.

Druga vrsta dizalica koristi se pri prijemu i isporuci na kopnenoj strani pretovarnog područja. Obično imaju velike raspone i mogu slagati kontejnere do 6 razina. Oni vrše pretovare između kamiona i vagona [51].

Automatske skladišne kontejnerske dizalice obično su visoke oko 24 metra (80 stopa) i široke 33,5 metara (110 stopa) i razvijene su za rukovanje do 10 redova kontejnera. Dva ASC-a dijele jedan par tračnica i kreću se gore-dolje po tračnicama noseći kontejnere i neprekidno ih slažu. Svaka dizalica obično ima više od 20 trofaznih motora od 460 V svaki sa svojim pretvaračem frekvencije koji se koriste za promjenu brzine u oba smjera.

Ove dizalice oslanjaju se na različite senzore kako bi osigurale siguran i precizan rad. Konkretni senzori koji se koriste mogu varirati ovisno o proizvođaču i implementiranoj tehnologiji, ali najčešći senzori su LIDAR, radar, kamere, GNSS i enkodere. Navedeni senzori su postavljeni na dizalici kako bi otkrili ciljnu i trenutnu poziciju, položaj pokretnih dijelova i teret [52].

4.1.1.4. Kamioni i platoing

Hafen und Logistik AG zajedno s proizvođačem kamiona MAN Truck & Bus testirali su autonomnu vožnju kamiona u stvarnim aplikacijama nekoliko godina. HHLA kontejnerski terminal Altenwerder i 70 kilometara duga dionica autoceste služila je kao testno okruženje. Cilj ovog partnerstva i testa je realna analiza i potvrda zahtjeva za specifičnu upotrebu i integraciju autonomnih kamiona u proces automatskog rukovanja kontejnerima.

Projekt je završen 2021. godine i uspješno se dokazalo da se autonomni kamioni mogu učinkovito integrirati u logističke procese. U probnim vožnjama od ukupno 5.000 kilometara, takav se kamion sigurno kretao po tlu HHLA kontejnerskog terminala Altenwerder (CTA) i precizno je stigao do ciljanog položaja za parkiranje - samo pod nadzorom sigurnosnog djelatnika na vozačevom sjedalu. Utovar i istovar također je bio potpuno automatiziran, a nakon rukovanja kontejnerom, kamion se sam vraćao do kontrolnih vrata odnosno izlaza [53].

Tehnologije automatizirane vožnje naširoko se koriste u kontejnerskim terminalima velikih luka i uvođenje konvoja (engl. platooning) kao "načina prijenosa" u kontekstu operacija odvoza tereta je relativno nova značajka. Ovakav konvoj je niz virtualno povezanih vozila (u ovom slučaju kamiona) koji se kreću jedan iza drugog na kratkoj udaljenosti pomoću tehnologija autonomne vožnje.

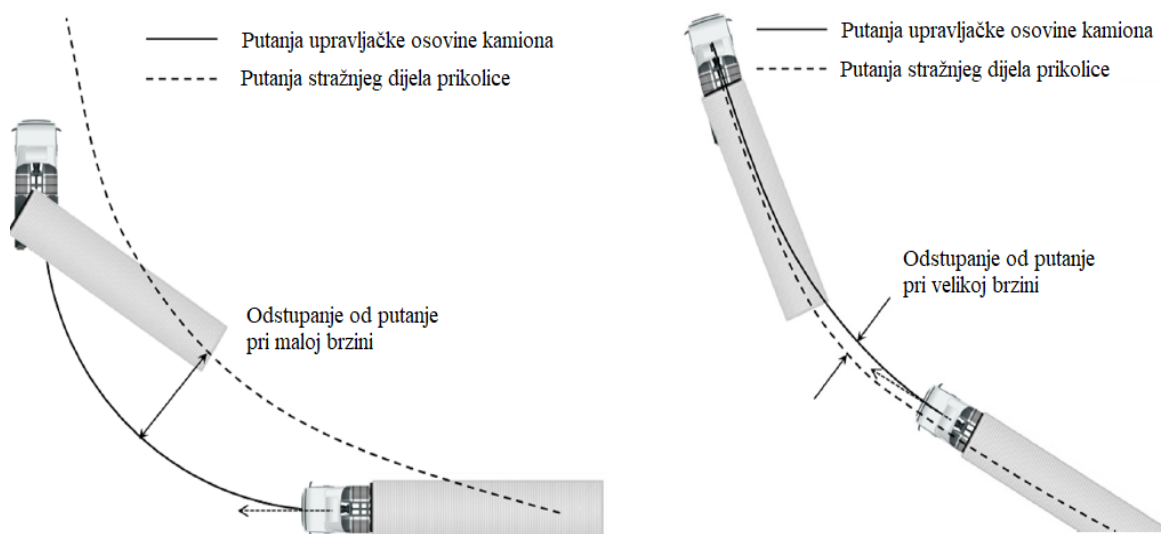
Vodećim vozilom konvoja upravlja čovjek, a ostala vozila planiraju svoje kretanje i manevre na temelju djelovanja vodećeg vozila. Ova tehnologija omogućava drugim vozilima u konvoju autonomnost i ima potencijal premještanja autonomnih vozila van ograničenih kontrolnih područja. Platooning može donijeti različite dobitke u sektoru teretnog prijevoza, uključujući smanjenje troškova goriva, sigurnost na cestama i povećanje kapaciteta cesta.

Vozila pripadaju različitim prijevoznicima a svaki zadatak isporuke se može obaviti ili kamionom ili autonomnim vozilom. Kamion putuje izravno od kontejnera prema zadanom mjestu kako bi isporučio kontejner. S druge strane, AV se mora pridružiti konvoju na kontejnerskom terminalu, otputovati u zonu, odvojiti se od voda u zoni okupljanja voda u zoni, a zatim otputovati do zadanog mjesta. Slično tome, na povratku u luku, treba se pridružiti prvotnom konvoju u zoni okupljanja. Da bi se formirao konvoj treba mu dodijeliti vodeće vozilo kojim upravlja čovjek [54].

Longitudinalna kontrola pratećih vozila za cilj ima održavanje kratke udaljenosti od vozila ispred što se postiže usvajanjem algoritma za adaptivni tempomat (ACC, engl. adaptive cruise control) koji se oslanja na radar. Kratka udaljenost između vozila pogotovo je važna ako su vozila u konvoju kamioni zbog smanjenja aerodinamičke otpornosti čime se dobiva bolja smanjena potrošnja goriva.

Vozila u konvoju također koriste komunikaciju između vozila (V2V, engl. vehicle to vehicle) kako bi imali mogućnost brze reakcije na kritične situacije kao što je primjerice naglo kočenje. Lateralna kontrola ima za cilj praćenje putanje vožnje uz ostajanje u vlastitoj prometnoj traci. Dvije glavne metode za lateralnu kontrolu takvog konvoja su izravno praćenje vozila i praćenje putanje vozila. U metodi izravnog praćenja vozila prateće vozilo slijedi vodeće vozilo izračunavanjem kuta upravljanja ili korištenjem relativnog položaja i kuta.

Ova metoda dakle koristi podatke o relativnom položaju vozila koje se nalazi ispred njega, a ne putanju upravljača volana što može dovesti do greške u praćenju putanje. Putanja vozila koje se nalazi ispred može se dobiti korištenjem parametara kretanja promatranog vozila i pohranjivanjem koordinata položaja stražnjeg dijela vozila ispred koje je ispred. Budući da se udaljenost gledanja unaprijed unutar putanje vozila ispred može kontrolirati, performanse praćenja putanje mogu se poboljšati.



Slika 22. Prikaz odstupanja od putanje pri maloj i velikoj brzini

Izvor: [55]

Međutim, postoji problem da se dovoljna udaljenost za pogled naprijed ne može postići pri velikim brzinama zbog kratke udaljenosti između vozila tijekom vožnje u konvoju. U slučaju kamiona s prikolicom, odstupanje od putanje (engl. off-tracking) je razlika u putanji između upravljačke osovine tegljača i stražnjeg branika prikolice odnosno tendencija zadnjih guma vozila koje se okreću da prate kraću putanju od prednjih guma, a javlja se tijekom skretanja, uzrokujući pogrešku u praćenju vozila ispred.

Slika 22. prikazuje fenomen odstupanja od putanje koji se događa kada kamion s prikolicom vozi zavojitom cestom pri maloj i velikoj brzini za isti kamion. Pri maloj brzini, putanja stražnjeg dijela prikolice formira se unutar putanje, dok pri velikoj brzini, putanja prikolice ide prema vanjskom dijelu putanje zbog povećanja bočnog ubrzanja. Skretanje s putanje je glavni čimbenik koji šteti stabilnosti bočne dinamike konvoja, a stabilnost se pogoršava kako se širi prema kraju konvoja.

Za rješavanje ovog problema razvijen je algoritam planiranja putanje za bočnu kontrolu pratećih kamiona, a algoritam koristi podatke od kamere, radara, IVN (mreža unutar vozila, engl. In-Vehicle Network) signala šasije i V2V komunikacije. Ovaj algoritam može se proširiti generiranjem putanje u čvorištu i spoju autoceste gdje su mali radijusi skretanja te se može primijeniti na različita posebno opremljena vozila.

Nadalje, budući da se putanja generira na temelju putanje vodećeg (prvog) vozila pomoću V2V komunikacije, može se primijeniti čak i na neasfaltiranoj cesti bez trake. Kao rezultat toga, očekuje se da će se korištenjem ovog algoritma poboljšati stabilnost i smanjiti potrošnja goriva kroz vožnju u konvoju primjenom na različita posebno opremljena vozila u različitim cestovnim okruženjima, kao i na velike teretne kamione [55].

4.2. ŽELJEZNIČKI PROMET

Željeznički promet je važan način prijevoza tereta u i izvan luke. Mnoge strane utječu na željeznički sektor, kao što su željezničke kompanije i mrežni operateri, posebno u zemljama u kojima nalazimo odvojenost mreže i operacija. To rezultira

visokim zahtjevima za interoperabilnost. Implementacija rješenja za autonomnu vožnju može se ostvariti samo korištenjem strategije od vrha prema dolje koja uključuje sve strane i jamči dosljednu interoperabilnost.

Današnji autonomni željeznički sustavi funkcioniraju kao metroi, podzemne željeznice ili lake željeznice, a proizvode ih Siemens, Alstom, Bombardier, Conductix i drugi. Razvijeni sustavi u zatvorenim okruženjima uopće ne moraju biti kompatibilni s bilo kojim standardom osim s nacionalnim sigurnosnim pravilima. Primjerice, autonomni metro u Parizu ne mora dijeliti nikakav sistemski pristup s novoizgrađenim vlakom u Pisi jer neće nikada biti potrebe za interoperabilnosti.

Isto se može reći i za otočna rješenja automatiziranih vlakova koji recimo prevoze ugljen između rudnika i privatne luke u Australiji. Željeznički promet u lukama se može podijeliti na dvije operacije: vožnja i ranžiranje. Oba načina rada razlikuju se po ulaznim zahtjevima što rezultira različitim zahtjevima za autonomni rad. Stupanj automatizacije oba načina rada također se značajno razlikuje [44].

Jedno rješenje za budućnost autonomnih vlakova nudi kompanija Parallel System koja za cilj ima decentraliziranje teretnog prijevoza i distribucije kako bi se povećala razina fleksibilnosti, učinkovitosti i smanjenje opterećenja luka. Plan ove tvrtke je da uvedu naprednu tehnologiju autonomnih vlakova na postojeću infrastrukturu. Današnje lokomotive sposobne su vući vagon s teretom od nekoliko kilometara.

Međutim, takvi vlakovi zahtijevaju opsežne radnje na terminalima luka koje uključuju velike kolosijeke za sortiranje vagona što zauzima puno prostora i dovodi do kašnjenja. Parallel System planira to napraviti s autonomnim željezničkim vagonima koji za pogon koriste električne motore s baterijskim skladištima energije (slika 23.) te tvrde da njihovo autonomno željezničko vozilo koristi 75% manje energije nego kamioni s prikolicom.

Domet ovakvog vozila je oko 800 km s potpunim punjenjem koje traje kraće od jednog sata. Ovakvu energetska učinkovitost vozilo postiže zbog svoje manje težine i bolje aerodinamike u odnosu na teretne vlakove što omogućava smanjeno opterećenje

mreže, korištenje manjih baterija i niže troškove infrastrukture za punjenje. Svaki autonomni vagon ima vlastiti pogon, a međusobno se mogu spojiti i formirati konvoj.

U slučaju blokiranja željezničkih prijelaza moguće je razdvojiti vagonne kako bi vozila hitnih službi nesmetano prošla. Također je moguće i u vožnji konvoja odvojiti određene vagonne koji bi išli na različite destinacije što eliminira potrebu za ručnim sortiranjem vagona i ponovnim stavljanjem tereta na sekundarne vlakove štedeći sate, ili čak dane, tranzitnog vremena. Gotovo kontinuirani protok kontejnera kroz terminale rezultira većim stupnjem korisnosti imovine, bržim rokovima isporuke i višom kvalitetom usluge.



Slika 23. Prikaz Parallel System autonomnog željezničkog vozila

Izvor: [56]

Ovi autonomni vagoni mogli bi značajno smanjiti emisije ugljika u teretnoj industriji. Prema brojkama američke agencije za zaštitu okoliša za 2019. godinu kamionski prijevoz čini 444 milijuna tona ugljičnog dioksida ili približno 7% svih emisija CO₂ ekvivalenta stakleničkih plinova u Sjedinjenim Američkim Državama.

Kako bi se povećala razina sigurnosti ovi vagoni koriste kamere za percipiranje okoline i redundantno kočenje što im omogućava sigurno zaustavljanje koje je do deset puta brže od tradicionalnih lokomotiva s vagonima. To znači da se vozila mogu zaustaviti u nuždi unutar vidnog polja u kojem senzori percipiraju objekt. Osim toga, konvoji automatski održavaju sigurne brzine na temelju uvjeta na tračnicama.

Kako bi se omogućila integracija ovih autonomnih vagona s postojećom željezničkom infrastrukturom i njenim operacijama Parallel Systems razvija softver koji koristi strojno učenje kako bi se optimiziralo usmjeravanje vozila, planiranje prometa i potrošnja energija [56, 57].

4.3. BESPILOTNE LETJELICE

Bespilotne letjelice (UAV, engl. Unmanned Aerial Vehicles) također poznati kao dronovi prvi put su razvijeni u 19. stoljeću i koristili su se u vojne svrhe no danas se koriste u komercijalne i osobne svrhe. U komercijalnom sektoru mogu se koristiti u otvorenim i zatvorenim prostorima za prijevoz tereta malih dimenzija i težine ili snimanje iz zraka u marketinške, inspeksijske, nadzorne i sigurnosne svrhe. Bespilotne letjelice koriste senzore i softver koji im omogućavaju potpuno autonomni let, let sa daljinskim upravljanjem ili kombinaciju oba načina.

Moderni dronovi su relativno malih dimenzija što im omogućuje pristup teško dostupnim područjima, brzi su, neovisni su o prometnoj infrastrukturi i financijski su višestruko isplativiji u odnosu na zrakoplov ili helikopter. Bespilotne letjelice za privatnu i komercijalnu upotrebu kao pogon uglavnom koriste ukupno četiri ili čak osam propelera pogonjenih elektromotorima. Ove izvedbe letjelica relativno su jeftine, mogu sletjeti i poletjeti na mnogim lokacijama i obuka ljudi za korištenje letjelica gotovo pa nije ni potrebna zbog jednostavne kontrole letjelice [44].

Ovisno o zadaći, na bespilotne letjelice mogu se postaviti različite vrste senzora. Svaka letjelica mora imati podatke o trenutnoj lokaciji i visini za što se koristi GNSS prijemnik. Za prijenos optičkih informacija o okolini tijekom leta koriste se HD, infracrvene ili termalne kamere kojima je potreban uređaj za pohranu podataka i

stabilna veza sa pilotom na zemlji. Ukoliko postoji dovoljno kvalitetna i stabilna veza ostvarena pomoću 4G ili 5G mobilne mreže pilot može koristiti sliku kamere za pogled iz prvog lica (FPV, first person view) [61].

Iako trenutno korištenje bespilotnih letjelica u lukama nije intenzivno, u budućnosti će sve više koristiti za nadzor i u sigurnosne svrhe. Primjena kamera visoke razlučivosti na letjelicama u kombinaciji s poboljšanim performansama autonomnog leta olakšava se provođenje redovite inspekcije infrastrukture u lukama.

Dizalice, mostovi i zidovi pristaništa obično su teško dostupni, tako da korištenjem bespilotnih letjelica koje redovito bilježe stanje može donijeti vidljivu korist u održavanju luka. Još neke od primjena u lukama su provođenje inventure na kontejnerskim terminalima kao i skeniranje identifikacijskih oznaka kontejnera kao i mogućnost korištenja u hitnim situacijama gdje su potrebni stručnjaci, hrana i druge potrepštine za na primjer oštećeno plovilo.

U takvim situacijama bi se čak i medicinsko osoblje i oprema mogli osigurati na brz i efikasan način. Korištenje bespilotnih letjelica za transport još je u vrlo ranoj fazi razvitka, no kompanije koje se bave rukovanjem kontejnerima započele su konceptualne studije za prijevoz praznih kontejnera. Iako je to tehnički izvedivo, zbog velike težine letjelice bi morale koristiti motore na unutarnje izgaranje što bi dovelo do povećanja emisije ispušnih plinova i buke.

Međutim, letjelice za prijevoz putnika već su u funkciji od 2015. godine kada je kompanija Beijing Yi-Hang Creation Science & Technology Corporation konstruirala autonomnu letjelicu nazvanu Ehang 184 koja ima mogućnost prijevoza jednog do dva putnika i razvijanja brzine leta do 100 km/h. Daljnim razvijanjem konstruiran je Ehang 216 (slika 24.) koji ima sposobnost voziti dva putnika na visini od 300 m i maksimalnim dometom od 8.8 km. Između 30 i 40 prototipova bespilotnih letjelica Ehang izvršilo je više od 1500 letova do danas, a Ehang je prvi put predstavljen u Europi u Amsterdamu 2018. godine [44].



Slika 24. Ehang 216

Online izvor: <https://transportup.com/ehang-216/>

4.4. PREDNOSTI KORIŠTENJA AUTONOMNIH VOZILA U LUKAMA

Korištenje autonomnih vozila u lukama pruža mnoge benefite. Općenito govoreći, ono omogućuje upravljanje autonomnim vozilima bez vozača u svim vremenskim uvjetima te u bilo koje doba i noći. Primjerice, iako su luke često na udaru jakih vjetrova i kišnih oluja, autonomni kamioni mogu raditi 24 sata dnevno, 7 dana u tjednu čak i u takvim ekstremnim vremenskim uvjetima [58, 59].

Nadalje, korištenje autonomnih vozila u lukama povećava sigurnost radnika prvenstveno zbog sprječavanja ljudske greške, ali i zbog uklanjanja ljudi iz opasnih situacija odnosno visokorizičnih aktivnosti. To također rezultira povećanom dostupnošću i operativnom učinkovitošću, što omogućuje luci prednost u odnosu na konkurente [58, 42]. Još jedna prednost je ekološka. Naime, autonomna vozila pokreće električni motor te su stoga ekološki prihvatljivi [59]. Ona ne stvaraju emisije

stakleničkih plinova te time smanjuje zagađenje i pomaže u postizanju ciljeva održivosti [59, 58, 42, 60, 8].

Osim ovih društvenih i ekoloških vrijednosti, korištenje autonomnih vozila povećava i učinkovitost luke te smanjenje troškove. Integriranje autonomnih tehnologija i vozila rezultira i uštedom troškova popravaka i održavanja. Uspoređujući autonomno vozilo kao što je kamion s dizelskim kamionom, cijena održavanja dizelskog motora znatno je skuplja [HP]. Nadalje, pandemija COVID-19 uzrokovala je mnoge promjene. Osoblje nije uvijek moglo dolaziti na dužnost, što zbog zaraze što zbog karantene u kojoj su bili obvezni biti.

Nedostatak osoblja, u lukama koje ne koriste autonomna vozila, rezultiralo je scenarijima u kojima su luke morale tražiti dodatno osoblje u kratkom roku. S druge strane, luke koje su koristile autonomna vozila imali su neograničenu razinu podrške. Autonomna vozila omogućila su kontinuitet redovnih usluga te istovremeno rad osoblja u sigurnom udaljenom okruženju (poštujući udaljenost od dva metra) te općenito otpornost na neočekivane uvjete poput ovih [59, 42].

Učinkovitost luka se također povećava omogućavanjem boljeg planiranja lučkih operacija podacima koje uzimaju u obzir potražnju, raspored rada i njegov tijek. Time se povećava i kapacitet luke jer optimizirane operacije omogućuju rukovanje s povećanim teretom [42]. Standardizacija lučkih operacija kroz automatizaciju će smanjiti i nedosljednosti i operativne troškove kroz smanjenje potrebnog osoblja te minimizirati pogreške, nezgode i kašnjenja.

Nadalje, uz automatizirana vozila moguće je i smanjiti zemljište koje je potrebno za lučke operacije zbog toga što manje osoblja zahtijeva i manje potrebnih objekata poput blagovaonice ili parkinga. Brodovi će također provoditi manje vremena usidreni jer će doći do smanjenja vremena potrebnog za istovar te će se time smanjiti i prostora koji je potreban za pristajanje brodova [3, 60]. Također, implementacija sučelja sa širim lancem opskrbe za razmjenu podataka omogućuje da cijeli lanac opskrbe postane učinkovitiji te da brzo reagira na moguća kašnjenja.

Podaci koji dolaze u luku mogu omogućiti bolje planiranje operacija unutar luke primjerice ažurirati vrijeme dolaska broda [42]. Iako je izravna ljudska interakcija s

visokorizičnim aktivnostima i strojevima svedena na minimum kako bi se osigurala sigurnost, uloga ljudi i dalje igra važnu ulogu u nadzoru operacije te osoblje mora biti spremno intervenirati ukoliko je to potrebno [42].

5. ZAKLJUČAK

S obzirom da je sustav pomorskog prometa odnosno obalnih luka ključan za gospodarstvo zemlje, od izrazito velike važnosti je njen rast i razvoj. Tradicionalan pogled na rad luke uključuju rad isključivo radnika čak i u opasnim situacijama. Dugotrajno izlaganje osoblja može dovesti do pada koncentracije te veće podložnosti greškama. Upravo upotreba autonomnih vozila u lukama omogućuje povećanje sigurnosti radnika odnosno smanjenje broja nesreća i ozljeda na radu, čime se potvrđuje prvi dio hipoteze.

Autonomna vozila obuhvaćaju vozila za čije upravljanje i interpretiranje okoline nije potreban vozač. Današnje tvrtke teže potpuno automatiziranim vozilima iako je trenutno dostupno (za otvoreno tržište) najviše naprednih sustava pomoći vozaču odnosno vozila razine autonomije 2 te razine autonomije 3. Razlozi ove težnje su primarno smanjenje broja nesreća i štednja energije.

Moderne luke suočavaju se s brojnim izazovima kako bi održali svoje mjesto kao čvorište globalnih opskrbnih lanaca. Upravo zbog njene ključne uloge u transportu sirovina, pomorske kontejnerske luke moraju biti učinkovitije nego ikad. Primjena autonomnih vozila pokazala se izrazito dobra u zatvorenim okruženjima poput lučkih terminala i skladišta, dok otvorena okruženja poput zaleđa nije u potpunosti automatizirana.

Automatizirana vozila koriste se desetljećima u lukama, točnije u prijevozu tereta tijekom utovara i istovara. Na taj način roba se isporučuje brže i sigurnije. Drugim riječima, dolazi do povećanja efikasnosti odnosno bržeg prenošenja tereta, manje broja oštećenja te manjeg broja kašnjenja, čime se potvrđuje i drugi dio radne hipoteze.

Međutim, izazovno obalno okruženje i visokorizični industrijski procesi zahtijevaju da svaki autonomni senzor bude iznimno pouzdan. Često korišteni senzori autonomne opreme mogu postati oštećeni u nepovoljnim uvjetima koji su česti u obalnim područjima. Ova pojava ponekad čini vozilo nesposobnim za rad. Kamere i radar senzori primjerice gube vidljivost tijekom jake kiše, magle i kada se morska voda

nakuplja na objektivu. Potrebno je dodatno vrijeme za potpuni razvoj senzora kako bi se onemogućile takve i slične situacije.

Potpuna autonomija smanjuje pritisak na radnu snagu terminala i povećava sigurnost, no s druge strane postavlja se pitanje što će biti s brojnim radnicima. Ukoliko smanjimo broj radnika koji su potrebni na terminalu i u lukama općenito (uključujući i osoblje poput kuhara, čistačica i slično), doći će do drastičnog pada broja radnika.

LITERATURA

- [1] Alam, T., Campaneria, A., Silva, M., Bobadilla, L., & Weaver, G. A. (2020, November). Coastal infrastructure monitoring through heterogeneous autonomous vehicles. In *2020 Fourth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)* (pp. 79-82). IEEE.
- [2] Meinel, H. H., & Bösch, W. (2017). Radar sensors in cars. *Automated Driving: Safer and More Efficient Future Driving*, 245-261.
- [3] DE GRAAUW, A. (2019). Ancient Port Structures An engineer's perspective. PortusLimen Conference, Rome.
- [4] Rodrigue, J. P., & Notteboom, T. (2017). 6.2–Transport Terminals and Hinterlands.
[file:///C:/Users/rokot/Desktop/diplomski/\[13\]%20Port%20Terminals%20The%20Geography%20of%20Transport%20Systems.htm](file:///C:/Users/rokot/Desktop/diplomski/[13]%20Port%20Terminals%20The%20Geography%20of%20Transport%20Systems.htm)
- [5] Palmer, S. (2020). History of the Ports. *International Journal of Maritime History*, 32(2), 426-433.
- [6] Dwarakish, G. S., & Salim, A. M. (2015). Review on the Role of Ports in the Development of a Nation. *Aquatic Procedia*, 4, 295-301.
- [7] Placek M. (2023.) 'Ocean shipping worldwide - statistics & facts', Statista, online: <https://www.statista.com/topics/1728/ocean-shipping/#topicOverview>
- [8] Hoffman J., Hoffman J., (2020) 'Ports in the global liner shipping network: Understanding their position, connectivity, and changes over time' UNCTAD, online: <https://unctad.org/news/ports-global-liner-shipping-network-understanding-their-position-connectivity-and-changes-over>
- [9] Rapp, J. et al. 2020. 'Advances in Single-Photon Lidar for Autonomous Vehicles: Working Principles, Challenges, and Recent Advances', *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 37, no. 4, p. 62-71, online: https://pure.hw.ac.uk/ws/portalfiles/portal/41662542/SPM_AV_1.pdf
- [10] Khader, M., Cherian, S. (2020). 'An Introduction to Automotive LIDAR', *Texas Instruments Incorporated*, online: <https://www.scribd.com/document/481425544/An-Introduction-to-Automotive-LIDAR-Rev-A>

- [11] Hecht, J. (2018). Lidar for Self-Driving Cars, siječanj, The Optical Society, online: https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/FAAD49F5-60F8-45CC-A7F59C080CF47249_380434/opn-29-1-6.pdf?da=1&id=380434&seq=0&mobile=no
- [12] Yaqoob, I., Khan, L. U., Kazmi, S. M. A., Imran, M., Guizani, N., & Hong, C. S. (2019). *Autonomous Driving Cars in Smart Cities: Recent Advances, Requirements, and Challenges*. *IEEE Network*, 1–8. doi:10.1109/mnet.2019.1900120
- [13] Antsaklis, P. (2020). Autonomy and metrics of autonomy. *Annual Reviews in Control*, 49, 15-26.
- [14] Opačić, A. (2007). 'Autonomna vozila - automobili budućnosti', *Ekscentar*, Vol 10, p. 114-115, online: <https://hrcak.srce.hr/20691>
- [15] Study: The rise of autonomous vehicles, 2021, online: <https://www.steinlaw.com/resources/studies/the-rise-of-autonomous-vehicles/> (06.07.2021.)
- [16] The 6 Levels of Vehicle Autonomy Explained, 2021, online: <https://www.synopsys.com/automotive/autonomous-driving-levels.html> (05.07.2021.)
- [17] Rödel, C., Stadler, S., Meschtscherjakov, A., & Tscheligi, M. (2014, September). Towards autonomous cars: The effect of autonomy levels on acceptance and user experience. In *Proceedings of the 6th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications* (pp. 1-8).
- [18] Fossen T., Pettersen K. Y., Nijmeijer H. (2017). *Sensing and Control for Autonomous Vehicles*, Springer International Publishing AG.
- [19] Surface vehicle recommended practice, 2021, SAE international,
- [20] Scott Brown, D. (2019). *Driverless Cars: Levels of Autonomy*, 22. kolovoz, Technopedia, online: <https://www.techopedia.com/driverless-cars-levels-of-autonomy/2/33449> (06.07.2021)
- [21] Ignatious, H. A., & Khan, M. (2022). An overview of sensors in Autonomous Vehicles. *Procedia Computer Science*, 198, 736-741.

- [22] Yeong, D. J., Velasco-Hernandez, G., Barry, J., & Walsh, J. (2021). Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review. *Sensors*, 21(6), 2140.
- [23] Häne, C., Heng, L., Lee, G. H., Fraundorfer, F., Furgale, P., Sattler, T., & Pollefeys, M. (2017). *3D visual perception for self-driving cars using a multi-camera system: Calibration, mapping, localization, and obstacle detection*. *Image and Vision Computing*, 68, 14–27. doi: 10.1016/j.imavis.2017.07.003
- [24] Salman, Y. D., Ku-Mahamud, K. R., & Kamioka, E. (2017, April). Distance measurement for self-driving cars using stereo camera. In *International Conference on Computing and Informatics* (Vol. 1, No. 105, pp. 235-242).
- [25] Roriz, R., Cabral, J., & Gomes, T. (2021). Automotive LiDAR technology: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 6282-6297.
- [26] Godbaz, J. P., Cree, M. J., Dorrington, A. A., & Payne, A. D. (2009, October). A fast maximum likelihood method for improving AMCW lidar precision using waveform shape. In *SENSORS, 2009 IEEE* (pp. 735-738). IEEE.
- [27] Baek, S. H., Walsh, N., Chugunov, I., Shi, Z., & Heide, F. (2023). Centimeter-wave free-space neural time-of-flight Imaging. *ACM Transactions on Graphics*, 42(1), 1-18.
- [28] Bridger electronics, (2019.), ‘FMCW LiDAR’
- [29] Zhaohua, L., & Bochao, G. (2020, May). Radar sensors in automatic driving cars. In *2020 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT)* (pp. 239-242). IEEE.
- [30] Liu, Z., Cai, Y., Wang, H., Chen, L., Gao, H., Jia, Y., & Li, Y. (2021). Robust target recognition and tracking of self-driving cars with radar and camera information fusion under severe weather conditions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 6640-6653.
- [31] Strohm, K. M., Bloecher, H. L., Schneider, R., & Wenger, J. (2005, October). Development of future short range radar technology. In *European Radar Conference, 2005. EURAD 2005*. (pp. 165-168). IEEE.

- [32] Abedi, H., Magnier, C., Mazumdar, V., & Shaker, G. (2021). Improving passenger safety in cars using novel radar signal processing. *Engineering Reports*, 3(12), e12413.
- [33] Joubert N., Reid T., Noble F., (2020.) ‘Developments in Modern GNSS and Its Impact on Autonomous Vehicle Architectures’, IEEE Intelligent Vehicles Symposium
- [34] Perea D., Morell A., Toledo J., Leopoldo A., (2019.) ‘GNSS integration in the localization system of an autonomous vehicle based on Particle Weighting’, IEEE
- [35] Jing, H., Gao, Y., Shahbeigi, S., & Dianati, M. (2022). Integrity monitoring of GNSS/INS based positioning systems for autonomous vehicles: State-of-the-art and open challenges. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(9), 14166-14187.
- [36] Ilci, V., & Toth, C. (2020). High-definition 3D map creation using GNSS/IMU/LiDAR sensor integration to support autonomous vehicle navigation. *Sensors*, 20(3), 899.
- [37] Lin, X., Wang, F., Yang, B., & Zhang, W. (2021). Autonomous vehicle localization with prior visual point cloud map constraints in GNSS-challenged environments. *Remote Sensing*, 13(3), 506.
- [38] Lee, W., Cho, H., Hyeong, S., & Chung, W. (2019). Practical modeling of gnss for autonomous vehicles in urban environments. *Sensors*, 19(19), 4236.
- [39] Yanase, R., Hirano, D., Aldibaja, M., Yoneda, K., & Suganuma, N. (2022). LiDAR-and radar-based robust vehicle localization with confidence estimation of matching results. *Sensors*, 22(9), 3545.
- [40] Ilci, V., & Toth, C. (2020). High-definition 3D map creation using GNSS/IMU/LiDAR sensor integration to support autonomous vehicle navigation. *Sensors*, 20(3), 899.
- [41] Fayyad, J., Jaradat, M. A., Gruyer, D., & Najjaran, H. (2020). Deep learning sensor fusion for autonomous vehicle perception and localization: A review. *Sensors*, 20(15), 4220.
- [42] Global infrastructure hub, (2020.) ‘Autonomous Machines for Efficient Ports’,

- [43] Park, S., Yun, S., & Kim, S. (2023). Autonomous Vehicle-Loading System Simulation and Cost Model Analysis of Roll-On, Roll-Off Port Operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(8), 1507.
- [44] Fiedler, R., Bosse, C., Gehlken, D., Brümmerstedt, K., & Burmeister, H. S. (2019). Autonomous vehicles' impact on port infrastructure requirements. *Fraunhofer Center for Maritime Logistics and Services CML, Hamburg*.
- [45] Hämäläinen, J., Yli-Paunu, P., & Peussa, P. (2018). Automated container terminals and self-driving cars: Industry outlook.
- [46] Biswas, A., & Wang, H. C. (2023). Autonomous vehicles enabled by the integration of IoT, edge intelligence, 5G, and blockchain. *Sensors*, 23(4), 1963.
- [47] Clemente, D., Cabral, T., Rosa-Santos, P., & Taveira-Pinto, F. (2023). Blue Seaports: The Smart, Sustainable and Electrified Ports of the Future. *Smart Cities*, 6(3), 1560-1588.
- [48] Vrakas, G., Chan, C., & Thai, V. V. (2021). The effects of evolving port technology and process optimisation on operational performance: The case study of an Australian container terminal operator. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 37(4), 281-290.
- [49] (2019.) 'An Insight into the Automated Guided Vehicle (AGV) Used in the Maritime Industry', marine insight, online: <https://www.marineinsight.com/guidelines/an-insight-into-the-automated-guided-vehicle-agv-used-in-the-maritime-industry/>
- [50] (2023.) 'The World's Largest Automated Container Port', Huawei, online: <https://e.huawei.com/se/case-studies/global/2018/201807050920>
- [51] Dávid, A. (2019). 'Automation of handling systems in the container terminals of maritime ports'.
- [52] Blaiklock P., (2017.) 'Automated stacking cranes in port terminals' TMEIC Corporation.
- [53] Leserinnen L., & Leser, L. (2019.) 'Selbst ist der truck', *HHLA Magazin*
- [54] Pourmohammad-Zia, N., Schulte, F., & Negenborn, R. R. (2020, September). Platform-based platooning to connect two autonomous vehicle

- areas. In *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [55] Lee, Y., Ahn, T., Lee, C., Kim, S., & Park, K. (2020). 'A novel path planning algorithm for truck platooning using V2V communication'. *Sensors*, 20(24), 7022.
- [56] (2023.) 'Product', Parallel, online: <https://moveparallel.com/product/>
- [57] (2022.) 'Parallel Systems', Green car congress, online: <https://www.greencarcongress.com/2022/01/20220122-parallel.html>
- [58] Wood S., (2021.), 'Automated Vehicles in Smart Container Ports', Navtech radar, online: <https://navtechradar.com/innovation-lab/port-automation/>
- [59] (2021.), 'Autonomous trucks benefits', Hutchinson ports, online: <https://hutchisonports.com/en/media/stories/autonomous-trucks-benefits/>
- [60] Pourmohammad-Zia, N., Schulte, F., González-Ramírez, R. G., Voß, S., & Negenborn, R. R. (2023). A robust optimization approach for platooning of automated ground vehicles in port hinterland corridors. *Computers & Industrial Engineering*, 177, 109046.
- [61] T. Alam, A. Campaneria, M. Silva, L. Bobadilla, G. A. Weaver, "Coastal Infrastructure Monitoring through Heterogeneous Autonomous Vehicles," (2020.) Fourth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), Taichung, Taiwan, 2020, pp. 79-82, doi: 10.1109/IRC.2020.00019

KAZALO KRATICA

| Kratika | Puni naziva na stranom jeziku | Puni naziv ili objašnjenje na hrvatskom jeziku |
|----------------|--|--|
| UNCTAD | engl. United Nations Conference On Trade And Development | Konferencija Ujedinjenih naroda o trgovini i razvoju |
| TEU | engl. twenty-foot equivalent unit | kontejner dužine 20 stopa |
| DARPA | engl. Defence Advanced Research Projects Agency | Agencija ministarstva obrane SAD-a odgovorna za razvoj novih tehnologija za vojsku SAD-a |
| ADAS | engl. advanced driver assistance systems | napredni sustav za pomoć vozaču |
| SAE | engl. Society of automotive engineers | Društvo automobilskih inženjera |
| GNSS | engl. Global navigation satellite system | globalni navigacijski satelitski sustav |
| IMU | engl. inertial measuring unit | inercijalna mjerna jedinica |
| LIDAR | engl. light detection and ranging | optički instrument koji odašilje laserske zrake |
| TOF | engl. time of flight | LIDAR na principu vremena leta |
| AMCW TOF | engl. amplitude-modulated continuous wave | amplitudno modulirano kontinuirani val |
| MEMS | engl. microelectromechanical | mikro elektro mehanički |
| OPA | engl. optical phase array | optički fazni niz |
| FMCW | engl. frequency-modulated continuous wave | frekvencijski modulirano kontinuirani val |
| LRR | engl. Long range radar | radar dugog dometa |
| BSD | engl. Blind spot detection | senzor za otkrivanje mrtvog kuta |
| SSR | engl. Short range radar | radar kratkog dometa |
| ADC | engl. analog to digital | analogno-digitalni pretvarači |

| | | |
|------|---|------------------------------------|
| | converters | |
| MCU | engl. microcontrollers | mikrokontroleri |
| DSP | engl. digital signal processors | procesori digitalnih signala |
| INS | engl. inertial navigation system | inercijalni navigacijski sustav |
| SLAM | engl. Simultaneous Localization and Mapping | simultana lokalizacija i mapiranje |
| HD | engl. High Definition | visoka rezolucija |
| ITS | engl. intelligent transport systems | inteligentni transportni sustavi |
| IoT | engl. Internet of things | internet stvari |
| AGV | engl. Automatic Guided Vehicle | automatski vođena vozila |
| ACC | engl. adaptive cruise control | adaptivni tempomat |
| V2V | engl. vehicle to vehicle | komunikaciju između vozila |
| IVN | engl. In-Vehicle Network | mreža unutar vozila |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Kontejnerska obalna dizalica..... | 7 |
| Slika 2. Okvirna dizalica | 8 |
| Slika 3. Kontejnerski prijenosnici | 9 |
| Slika 4. Luka Shanghai | 11 |
| Slika 5. Razine automatizacije..... | 16 |
| Slika 6: Područje vidljivosti stereo kamere | 19 |
| Slika 7. Oblak točaka nastao mjerenjem LIDAR-a | 21 |
| Slika 8. Princip rada TOF LIDAR-a..... | 23 |
| Slika 9. Princip rada AMCW..... | 24 |
| Slika 10. Princip rada FMCW | 26 |
| Slika 11. Primjer korištenja radara dugog i kratkog dometa | 28 |
| Slika 12. Senzor detekcije mrtvog kuta | 29 |
| Slika 13. Razne primjene radara kratkog dometa..... | 32 |
| Slika 14. Elementi arhitekture automatizirane vožnje razine 2 | 35 |
| Slika 15. Raspored milimetarskog radara na vozilu | 38 |
| Slika 16. Mapiranje LIDAR promatranja u apsolutnom koordinatnom sustavu | 40 |
| Slika 17. LIDAR karta..... | 41 |
| Slika 18. Radar karta | 41 |
| Slika 19. Distribucija korelacije i vjerojatnost pomaka..... | 42 |
| Slika 20. AutoStrad automatizirani kontejnerski prijenosnici..... | 47 |
| Slika 21. Primjer korištenja AGV-a na kontejnerskom terminalu..... | 49 |
| Slika 22. Prikaz odstupanja od putanje pri maloj i velikoj brzini..... | 52 |
| Slika 23. Prikaz Parallel System autonomnog željezničkog vozila | 55 |
| Slika 24. Ehang 216..... | 58 |