

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

ANTONIO ČALUŠIĆ LJUBIČIĆ

SENZORI U AUTONOMNIM VOZILIMA

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

SENZORI U AUTONOMNIM VOZILIMA

ZAVRŠNI RAD

Student: Antonio Čalušić Ljubičić
Mentor: prof. dr. sc. Vesna Dragčević
Komentor: doc. dr. sc. Tamara Džambas

Zagreb, srpanj 2024.



Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet



OBRAZAC 2

TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: Antonio Čalušić Ljubičić

JMBAG: 0082064411

Završni ispit iz kolegija: Ceste

Naslov teme završnog ispita (HR): Senzori u autonomnim vozilima

Naslov teme završnog ispita (ENG): Sensors in Autonomous Vehicles

Opis teme završnog ispita:

Predmet rada su senzori u autonomnim vozilima. Autonomna vozila su računalno upravljana vozila, koja se na temelju raspoznavanja okoline mogu kretati samostalno, bez utjecaja ili uz ograničeni utjecaj vozača. U radu je potrebno istražiti na koji način autonomno vozilo može pravovremeno i ispravno prepoznati okruženje u kojem se nalazi te koji se sve senzori nalaze u takvim vozilima (radar, lidar, GPS i sl.) i zašto su potrebni. Analizirati i objasniti njihove funkcije i način rada.

Datum: 5. travnja 2024.

Mentor: prof. dr. sc. Vesna Dragčević

Potpis mentora: *Vesna Dragčević*

Komentor: doc. dr. sc. Tamara Džambas

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Autonomna vozila	2
3. Senzori.....	4
3.1. Kamere	5
3.2. Radari	8
3.3. LiDAR-i.....	10
3.4. Ultrazvučni senzori.....	12
3.5. Inercijska mjerna jedinica	14
4. Fuzija senzora.....	16
4.1. Prednosti fuzije senzora.....	16
4.2. Primjeri fuzije senzora.....	17
5. Senzori na primjeru Tesle model S	19
6. Zaključak	23
Literatura	24

Sažetak

Tema ovog rada su senzori u autonomnim vozilima. Razvoj tehnologije, ali i urbanizacija doprinijela je evoluciji autoindustrije koja značajno utječe na svakodnevne migracije ljudi. Procvatom elektronike uporaba različitih valova iz elektromagnetskog spektra omogućila je razvoj senzora kao što su kamere, radari i LiDAR-i što je dovelo do njihove implementacije u upravljački sustav vozila. Ovim velikim iskorakom čovjek je razvio ADAS (eng. *advanced driver assistance systems*) koji omogućava lakšu i sigurniju vožnju. Vrhunac ove ere obilježava razvoj autonomnog vozila kao automobila kojim upravlja računalni sustav upravo na temelju senzora koji djeluju kao primatelji informacija iz okoline. Stoga ovaj rad u svom uvodu obrazlaže pojam autonomnog vozila i njegovu zakonsku regulativu u Republici Hrvatskoj. Nadalje, ukazuje na različite stupnjeve autonomije pri klasifikaciji autonomnih vozila. Obrazlažući senzore i njihove podjele daje se uvid u različite načine prikupljanja informacija iz okoline, a potom detaljno opisuje upotrebu kamera, radara, LiDAR-a, ultrazvučnih senzora i inercijskih mjernih jedinica. Zatim na praktičnom primjeru Tesle kao premijernog autonomnog vozila rad analizira vrste senzora koje se koriste pri autonomnoj vožnji.

Ključne riječi: autonomna vozila; ADAS; senzori; radari; kamere; LiDARi

Abstract

The topic of this paper are sensors in autonomous vehicles. With the development of technology, as well as urbanization, the needs of an average person to use a car as a means of transportation have increased, so technology has also developed in the direction of facilitating this everyday action. With the boom in electronics, the use of different waves from the electromagnetic spectrum enabled the development of sensors such as cameras, radars and LiDARs, which led to their implementation in the vehicle control system. With this great step forward, man has developed ADAS (advanced driver assistance systems), which enables easier and safer driving. The peak of this era is marked by the development of an autonomous vehicle as a car controlled by a computer system precisely based on sensors that act as receivers of information from the environment. Therefore, in its introduction, this paper explains the concept of an autonomous vehicle and its legal regulation in the Republic of Croatia. But it also points to different levels of autonomy when classifying autonomous vehicles. Explaining the sensors and their divisions, an introduction to different ways of collecting information from the environment is given. Then the use of cameras, radar, LiDAR, ultrasonic sensors, and inertial measurement units is described in detail. Then, using the practical example of Tesla as the premier autonomous vehicle, he analyzes the types of sensors used in autonomous driving.

Keywords: autonomous vehicles; ADAS; sensors; radars; cameras; LiDARs



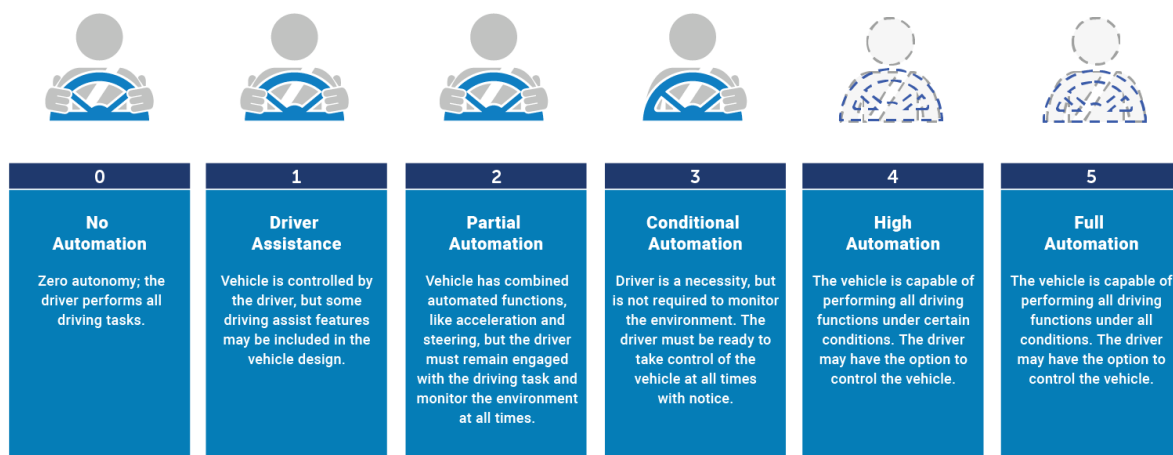
1. Uvod

Istraživanje iz 2021. godine [1] je pokazalo da je preko 1.3 milijuna smrti uzrokovano prometnim nesrećama, dok prema drugom istraživanju iz 2018. godine [2] promet je odgovoran za čak 24% globalnih emisija CO₂ od čega je većina bila iz cestovnog putničkog prometa (45,1 %) i cestovnog prijevoza tereta (29,4 %). Svi navedeni trendovi ostavljaju štetne posljedice za zdravlje i život ljudi, a rješenja se pronalaze u elektrifikaciji, zajedničkoj i povezanoj mobilnosti, ali i automatiziranoj vožnji. Trenutačni fokus je na naprednim sustavima za podršku vozaču pri upravljanju vozila (ADAS, eng. *advanced driver assistance systems*) koji su u direktnoj korelaciji sa povećanjem sigurnosti na cestama. Eichbergovo istraživanje iz 2011. godine [3] u Austriji pokazalo je da bi se korištenjem pomoći pri zadržavanju u prometnoj traci (LKA, eng. *lane keeping assistance*) preveniralo 17% prometnih nesreća sa smrtnim ishodom. Dodatno povećanje u prevenciji za dodatnih 13% bi bilo uz uporabu tehnologije za upozorenje sudara sprijeda (FCW, eng. *forward collision warning*) i upozorenja na napuštanje prometne trake (LDW, eng. *lane departure warning*). Ovaj kratki statistički pregled dobrobiti ADAS-a pokazuje kako značajan tehnološki razvoj sustava pomoći vozaču u prometu ima veliki utjecaj na očuvanje ljudskih života u prometu. Stoga se ADAS sustavi danas nalaze u mnogim modernim vozilima koja se isključivo oslanjaju na ugrađene senzore, od kojih su senzori percepcije jedini mehanizmi koji povezuju cestovnu infrastrukturu i ponašanje vozila. Navedeni senzori su zapravo kamere, radari, LiDAR-i koji putem različitih valova iz elektromagnetskog spektra „prikupljaju“ informacije iz okoline i dostavljaju ih glavnom sustavu ADAS-u. Veća pouzdanost osigurana je fuzijom senzora koja spajajući više senzora kompenzira individualne nedostatke stvarajući optimalan paket informacija iz okoline za ADAS sustav pri odlučivanju [4]. S obzirom na prethodno navedeno, ovaj rad objašnjava upotrebu senzora u autonomnim vozilima koji su ključni receptori svih informacija iz okoline.

2. Autonomna vozila

Prema Hrvatskoj enciklopediji [6] autonomna vozila su računalno upravljana vozila koja se na temelju raspoznavanja okoline mogu kretati samostalno, bez utjecaja ili uz ograničeni utjecaj vozača. Oni u svom djelovanju sadrže kombinaciju senzora poput ultrazvučnih i infracrvenih radara, LiDAR-a, GPS-a, digitalnih videokamera i računala i programske potpore koja uključuje i umjetnu inteligenciju. Specifični su po tome što njihovi napredni upravljački sustavi tumače senzorne informacije kako bi identificirali odgovarajuće navigacijske putove, prepreke i relevantne znakove, te tako omogućili autonomno kretanje vozila sukladno propisima [6]. U Republici Hrvatskoj zakonodavni okvir za autonomnu vožnju sadržan je u Zakonu o sigurnosti prometa na cestama [7], koji definira da je automatizirano vozilo: „vozilo koje koristi hardver i softver za kontinuiranu potpunu dinamičku kontrolu vozila (potpuno automatizirano vozilo bez upravljača)“. Drugim riječima, potpuno autonomni automobil može voziti sam, bez vozača na vozačkom sjedištu i takva vožnja u skladu je sa Zakonom, [7].

Udruga Inženjera Automobila (SAE International) sa sjedištem u Sjedinjenim Američkim Državama definirala je razrede automatiziranosti vozila [4]. Na slici 1 uočava se 6 razreda automatiziranosti vozila. U nultom razredu vozač ima potpunu kontrolu nad vozilom te tijekom cijele vožnje utječe na brzinu (kočenje i ubrzanje) i smjer kretanja (okretanje volana) vozila. Prvi razred opisuje kako vozač na duže vremenske periode koristi autopilot koji ima sposobnosti kretanja ili u uzdužnom (unutar vozne trake) ili poprečnom (mijenjanje trake) smjeru uz potrebu nadgledanja sustava. Nadalje, u drugom razredu sustav može istovremeno preuzeti zadaće kretanja vozila u uzdužnom i poprečnom smjeru samo za jedan određeni vremenski period ili u određenim situacijama dok vozač mora većinu vremena nadzirati sustav. Treći razred je posebno važan jer se tek od ovog razreda može govoriti o autonomnim vozilima. Ovdje sustav preuzima uzdužno i poprečno vođenje vozila na određeni vremenski period u specifičnim situacijama, a vozač nije dužan nadzirati sustav, osim po potrebi za obavljanje neke određene radne operacije u vožnji. U četvrtom razredu sustav preuzima u potpunosti uzdužno i poprečno vođenje vozila u područjima gdje su jasno definirani rubni uvjeti. Vozač ne mora nadgledati sustav, osim u iznimnim situacijama [4]. Ukoliko vozač odbije ili nije u mogućnosti preuzeti kontrolu upravljanja vozilom, tada sustav prelazi u stanje minimalnog rizika. Primjer navedenog je videosnimka Tesle [8], gdje se može vidjeti kako sustav u određenom trenutku traži da vozač preuzme kontrolu upravljanja nad vozilom, no vozač to odbija nakon čega vozilo prelazi u stanje minimalnog rizika (vozilo se nastavlja kretati, ali s linearnim usporavanjem do potpunog zaustavljanja). Dodatno je još u procesu razvijanja peti razred u kojem je sustav sposoban u potpunosti upravljati autonomnim vozilom u svim vremenskim uvjetima i situacijama te se vozač ne mora nužno nalaziti u vozilu [5].



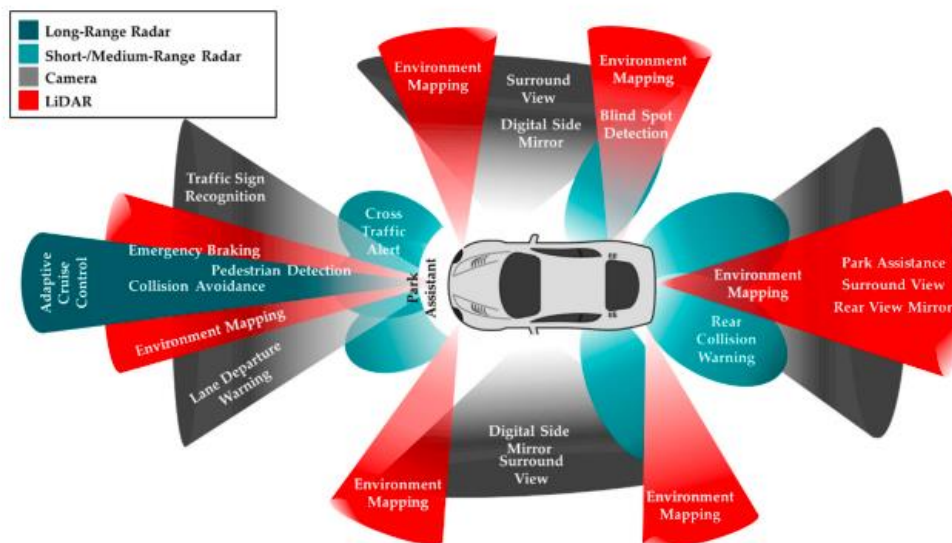
Slika 1. Prikaz razreda automatiziranosti vozila [9]

Zaključno, kako bi neko vozilo nazvali autonomnim ono mora biti u stanju bez ljudskog utjecaja ciljano i samostalno voziti i upravljati u stvarnom prometu te se mora moći samostalno parkirati. Sustavi ADAS-a napravljeni su da se ponašaju kao donositelji odluka u situacijama na cesti, ipak usprkos razvoju tehnologije danas apsolutno autonomna vozila još nisu dostupna za komercijalno tržište, stoga konačna kontrola vozača za upravljanjem vozilom je imperativ [10].

3. Senzori

Kada vozač upravlja vozilom on većinu informacija registrira pomoću očiju i može gledati samo u jednom smjeru. Kod autonomnih vozila je situacija drugačija. Kako bi se autonomna vozila u potpunosti sama mogla kretati po cesti potrebno je puno senzora bez kojih autonomna vožnja ne bi bila moguća. Kod njih se uređaji, odnosno senzori, koji služe kao izvor informacija mogu nalaziti na raznim mjestima te prikupljaju različite vrste podataka iz različitih smjerova. Svi sakupljeni podaci se unose u sustav kojim upravlja umjetna inteligencija koja na temelju svih ulaznih informacija nalazi optimalno rješenje za danu situaciju u vožnji. U klasičnim vozilima se već mogu naći razni senzori koji su većini populacije poznati, a nalaze se kao standardna oprema u autonomnim vozilima. To su senzori goriva, temperature zraka i motora, lambda sonda, senzori ulja, senzor parkinga, senzor klima uređaja, senzor tlaka u gumama itd. [11]. Za potrebe ovoga rada senzori su svrstani u dvije skupine na temelju njihovog načina funkcioniranja. Prvi su proprioceptivni senzori, a drugi eksteroceptivni senzori [12]. Proprioceptivni senzori ili senzori unutarnjeg stanja mjere unutarnje vrijednosti sustava koji funkcionira (u ovom slučaju auta), npr. silu, kutnu brzinu, opterećenje kotača, napon baterije itd. Primjeri proprioceptivnih senzora uključuju jedinice za mjerenje inercije (IMU, eng. *integral measure units*), kodere (eng. *wheels encoders*), inercijske senzore (žiroskopi i magnetometri) i senzore pozicioniranja (prijemnici globalnog navigacijskog satelitskog sustava - GNSS). S druge strane, eksteroceptivni senzori ili vanjski senzori stanja primaju informacije kao što su mjerenje udaljenosti ili intenzitet svjetlosti iz okoline sustava. Kamere, radari, LiDAR-i i ultrazvučni senzori primjeri su eksteroceptivnih senzora [12].

Osim toga, senzori mogu biti pasivni ili aktivni [12]. Pasivni senzori primaju energiju koja se emitira iz okoline kako bi proizveli informacije, npr. kamere za vid. S druge strane, aktivni senzori emitiraju energiju u okolinu i mjere ekološku „reakciju“ na tu energiju za proizvodnju informacija, poput LiDAR-a i radarskih senzora. U autonomnim vozilima su senzori ključni za percepciju okoline i lokalizaciju vozila za planiranje putanje i donošenje odluka. AV (autonomno vozilo) prvenstveno koristi više kamera za vid, radarske senzore, LiDAR senzore i ultrazvučne senzore za opažanje svoje okoline. Osim toga, za određivanje relativnih i apsolutnih položaja vozila koriste se i drugi senzori, uključujući GNSS, IMU i ostali senzori koji služe za odometriju vozila (u ovom smislu senzori se koriste za procjenu položaja i kretanja objekta). Pri čemu se razlikuju dva pojma: relativne i apsolutne lokalizacije. Relativna lokalizacija AV-a odnosi se na vozila koja definiraju njegove koordinate u odnosu na okolne orijentire, dok se apsolutna lokalizacija odnosi na vozila koje locira njegov položaj u odnosu na globalni referentni okvir (svijet) [12]. Općenito, teško je dobiti odgovarajuće informacije iz samo jednog neovisnog senzora u AV-u. Stoga je fokus u sljedećim odlomcima stavljen na kamere, radare i LiDAR-e s obzirom da su oni relevantni za interakciju s cestovnom infrastrukturom (slika 2).



Slika 2. Prikaz radara, LiDAR-a i kamera na AV-u [13]

3.1. Kamere

Autonomna vozila se u velikoj mjeri oslanjaju na kamere kako bi uočila okolinu. Kamera je tehnološki pandan ljudskom vidu. S naglim razvojem tehnologije postale su dostupne nove i modernije kamere koje sa svojom visokom rezolucijom na snimkama omogućavaju raspoznavanje objekata do najsitnijeg detalja. Kamere spadaju u grupu pasivnih senzora [12], to jest one ne odašilju signale nego ih registriraju iz svoje okoline. Prema elektromagnetskom spektru, većina kamera može se klasificirati kao vidljive (VIS, eng. *visible*) ili infracrvene (IR, eng. *infrared*) [14]. VIS kamere bilježe valne duljine koje se kreću od 400 do 780 nm, slično ljudskim očima. Pritom, kombinacija dvije VIS kamere omogućuje 3D prikaz oko vozila. Uglavnom se koriste zbog niske cijene, visoke rezolucije i sposobnosti razlikovanja boja. Postoje dvije vrste VIS kamere, a to su: monokamere i stereokamere [14].

Zbog niske cijene i nižih računalnih zahtjeva, monokamere su trenutno primarno rješenje računalnog vida za napredne sustave pomoći vozaču (ADAS) [14]. Monokamere mogu precizno identificirati prometne trakove, vertikalnu signalizaciju, pješake i ostala vozila u okolini. Međutim, u slučajevima kreiranja 3D slike okoline pokazao se manje pouzdan. Jedan od češćih primjena monokamera je postavljanje iste kao zamjenu za unutarnji retrovizor. Vozač u ovom slučaju ne mora gledati direktno u retrovizor nego na mali ekran koji se nalazi s unutrašnje strane vrata. Mnoge su prednosti u primjeni ovakvog tipa retrovizora jer daje punu sliku bez mogućih objekata kao što su putnici, nasloni za glavu ili krov vozila. Prema podacima koje daje proizvođač ovakav tip retrovizora poboljšava vidno polje za 300 posto ili otprilike četiri puta više od standardnog retrovizora [14]. Druga raširena primjena monokamera je kao pomoć pri parkiranju. U interakciji s drugim sustavima i sensorima služi autopilotu za autonomno parkiranje. Ona se u većini slučajeva nalazi pored gumba gdje se otvara prtljažnik

automobila. U trenutku kada vozilo ide unatrag na ekranu u kokpitu se prikaže snimka koju zahvaća stražnja kamera (slika 3). Osim snimke sa stražnje strane, na ekranu su prikazane žute linije koje prikazuju smjer kretanja kotača. Ako se vozilo kreće ravno unazad tada će i te linije ostati ravne. Kad vozač odluči okrenuti volan, tada shodno tome vanjske žute linije mijenjaju oblik, više nisu ravne nego zakrivljene što opisuje linije kretanja vozila [14].



Slika 3. Prikaz zaslona u kopitu tijekom vožnje unatrag [15]

Grupu stereo kamera čine prednji sustavi kamera (eng. Forward - Facing Camera Systems) gdje se kamere nalaze s prednje strane automobila [16]. Ovi sustavi kamera su predviđeni za srednje do daleke domete (područje između 100 i 275 metara). Za razliku od monokamera, stereo kamere u svoj rad uključuju dvije ili više kamera i sposobne su prikupljati snimke s podacima o dubini. To omogućuje izravno određivanje 3D koordinata objekata. Kamere koriste sustave s algoritmima za automatsko otkrivanje objekata, njihovo klasificiranje i određivanje međusobne udaljenosti. Primjerice, kamere mogu identificirati bicikliste i pješake, motorna vozila, bočne trake i rubove ceste. Osim navedenog algoritmi se koriste za prepoznavanje prometne signalizacije. Za procjenu udaljenosti i relativne brzine koriste se razni podaci sadržani u snimkama. Ti podaci mogu biti veličina objekta na snimci (broj piksela) i pozicija podnožja objekta. Objekti su podijeljeni prema veličini u klase kao što su pješaci, motociklisti, osobna vozila i teretna vozila, no kako veličina objekta varira unutar određene klase, točnost procjene (koja mjeri udaljenosti nekog objekta bazirajući se na veličinu objekta) iznosi otprilike 30 posto. Jedna od boljih metoda za procjenu udaljenosti i relativne brzine u odnosu na druge objekte može biti postignuta upotrebom geometrije ulice i kontaktnih točaka objekta s površinom ulice. Veličina objekta na slici dodatno utječe na detekciju objekta te se može proračunati uzimajući u obzir udaljenost R , visinu objekta H , širinu objekta W i fokalnu duljinu sustava leća u kameri. Jednadžbe pomoću koje se izračunava veličina objekta su prikazane u nastavku [16].

$$h_0 = \frac{f * H}{R}; w_0 = \frac{f * W}{R}$$

gdje je:

h_0 - visina objekta na snimci;

w_0 - širina objekta na snimci;

f - fokalna duljina sustava leća u kameri;

H - visina objekta;

R - udaljenost;

W - širina objekta.

Objekti na slici moraju, ovisno o klasi objekta, imati barem minimalnu veličinu (odnosi se na parametre H i W) kako bi mogli biti prepoznati od strane algoritma koji obrađuje snimke. Minimalna veličina ponovno ovisi o algoritmu te iz navedenih razloga ima veliki utjecaj na performanse senzora. Utjecaj na točnost informacija dobivenih iz snimaka uvelike ima rezolucija kamere. Rezolucija se odnosi na broj piksela od kojih se sastoji objekt na snimci i osnovna je mjera za određivanje razine detaljnosti. Za raspoznavanje okoline i objekata su pored veličine objekta, rezolucije kamere i kontrasta bitna i karakteristike prijema [16].

IR kamere rade s infracrvenim valnim duljinama u rasponu od 780 nm do 1 mm. IR kamere manje su podložne vremenskim uvjetima ili uvjetima osvjetljenja i mogu prevladati neke nedostatke VIS kamere u situacijama kada postoji više osvjetljenja (npr. na izlazu iz tunela). Osim toga, mogu se koristiti za otkrivanje toplog tijela, kao što su pješaci i životinje [17]. Infracrvena kamera ili termalni snimak otkriva i mjeri infracrvenu energiju objekata od 400-500 m, no uz veće troškove. Kamera pretvara infracrvene podatke u elektroničku snimku koja prikazuje prividnu površinsku temperaturu objekta koji se mjeri. Infracrvena kamera sadrži vizualni sustav koji prikazuje termalnu snimku putem tisuće piksela. Svaki piksel djeluje kao detektor temperature raspoređen u mreži koji pretvara infracrvenu energiju u elektronički signal koji stvara jedinstvenu snimku. Procesor kamere uzima signal iz svakog piksela i na njega primjenjuje matematički izračun kako bi stvorio kartu boja prividne temperature objekta. Svakoj vrijednosti temperature dodjeljuje se različita boja. Finalna matrica boja šalje se u memoriju i na zaslon fotoaparata kao termalna snimka tog objekta. Mnoge infracrvene kamere također uključuju vidljivu svjetlosnu kameru koja automatski snima standardnu digitalnu fotografiju svakim povlačenjem okidača. Miješanjem ovih snimaka lakše je povezati problematična područja na infracrvenoj slici sa stvarnom opremom ili područjem koje se pregledava. Osim osnovnih mogućnosti termalnog snimanja, mogu se pronaći infracrvene kamere sa širokim rasponom dodatnih značajki koje automatiziraju funkcije, omogućuju glasovne primjedbe, poboljšavaju razlučivost i snimaju videozapise te podržavaju analizu [14].

Tablica 1. Tablični prikaz kamera

TIP KAMERE	OPIS
MONO KAMERA	Široko zastupljene kamere zbog ekonomičnosti, uz pomoć umjetne inteligencije mogu utvrditi i daljinu između objekata, no zbog nedostatka 3D perspektive oslanjaju se na kompleksnije softwere kao što su stereo kamere.
STEREO KAMERA	Koriste dvije ili više kamera pozicioniranih sa prednje strane vozila. Značajna prednost je sposobnost detektiranja dubine prostora kroz analizu piksela snimke.
INFRACRVENA KAMERA	Mjere infracrvenu energiju objekta do 400 - 500 metara. Koristeći optički sustav kreira se elektronička snimka prikazujući prividnu temperaturu objekta u bojama. Efikasan sustav snimanja, no uz velike troškove.

3.2. Radari

Radar (engl. *radio detection and ranging*) je senzor koji odašilje radio valove koji putuju brzinom svjetlosti i imaju najnižu frekvenciju na elektromagnetskom spektru. Signal ovog senzora posebno dobro reflektiraju materijali koji imaju dobru elektrovodljivost (npr. metali). Nedostatak je što ostali radio valovi mogu utjecati na njegove karakteristike s obzirom da se signal može lako odbiti od zakrivljenih površina te ih senzor u tom slučaju ne registrira. Radar koristi Dopplerovo svojstvo elektromagnetskih valova za određivanje relativne brzine i relativnog položaja otkrivenih prepreka. Takozvani Dopplerov efekt, također poznat kao Dopplerov pomak, odnosi se na varijacije ili pomake u frekvenciji valova koji proizlaze iz relativnog kretanja između izvora vala i njegovih ciljeva. Na primjer, frekvencija primljenog signala se povećava (kraći valovi) kad se cilj kreće prema smjeru radarskog sustava [12]. Opća matematička jednadžba Dopplerovog pomaka frekvencije radara može se prikazati kao:

$$f_D = \frac{2 * V_r * f}{C} = \frac{2 * V_r}{\lambda}$$

gdje je:

f_D - Dopplerova frekvencija u Hertz (Hz);

V_r - relativna brzina cilja;

f - frekvencija prenesenog signala;

C - brzina svjetlosti (3×10^8 m/s);

λ - valna duljina emitirane energije.

U praksi se Dopplerova promjena frekvencije na radaru događa dva puta. Prvi put, kada se EM valovi emitiraju do cilja (ili promatrača) i drugi put, tijekom refleksije Dopplera kada je prebačena energija na radar (izvor) [12].

Razlikuje se radar s kratkim dometom koji koristi radio valove od 24 GHz i radar za veće udaljenosti koji koristi valove energije od 77-79 GHz [18]. Radar srednjeg dometa (MRR), radar velikog dometa (LRR) i radar kratkog dometa (SRR) tri su glavne kategorije automobilskih radarskih sustava. Proizvođači AV-a koriste SRR za pomoć pri pakiranju i upozorenje o blizini sudara, MRR za sustav za izbjegavanje bočnog/stražnjeg sudara i otkrivanje mrtvog kuta te LRR za prilagodljivi tempomat i aplikacije za rano otkrivanje [10]. Radarski senzori u AV-ima obično su nevidljivo integrirani na nekoliko lokacija, primjerice na krovu blizu vrha vjetrobranskog stakla, iza odbojnika vozila ili amblema marke. Ključno je osigurati preciznost položaja ugradnje i orijentacije radara u proizvodnji jer bi svaka kutna neusklađenost mogla imati kobne posljedice za rad vozila, uključujući lažno ili kasno otkrivanje prepreka oko okoline [18]. Općenito, radarski senzori jedan su od poznatih senzora u autonomnim sustavima i obično se koriste u AV-ovima kako bi pružili pouzdanu i preciznu percepciju prepreka danju i noću zbog svoje sposobnosti funkcioniranja bez obzira na osvjetljenje i nepovoljne vremenske uvjete. Nadalje, oni pružaju dodatne informacije, kao što je brzina otkrivenih pokretnih prepreka i mapiranje u kratkom, srednjem ili dugom rasponu, ovisno o načinu konfiguracije. Međutim, radarski senzor, općenito nije prikladan za aplikacije za prepoznavanje objekata zbog grubih rezolucija u usporedbi s kamerama. Stoga istraživači AV-a često spajaju radarske informacije s drugim senzorskim podacima, kao što su kamera i LiDAR, kako bi nadoknadili ograničenja radarskih senzora [19].

Tablica 2. Tablični prikaz radara

VRSTA RADARA	OPIS
LONG-RANGE RADAR (LRR)	LRR je obično ograničen uskim vidnim poljem (FOV, eng. <i>field of view</i>) i često se koristi za otkrivanje objekata na velikim udaljenostima (npr. do 300 m) za pomoć pri kočenju u nuždi, upozoravanju na sudar i prilagodljiv je tempomatu.
MID-RANGE-RADAR (MRR)	MRR ima širi FOV, obično otkriva objekte do 150 m, i može otkriti objekte koji se približavaju bočno na raskrižjima, što rezultira time da se često može koristiti za funkcije upozorenja o prometu u raskrižjima.
SHORT-RANGE-RADAR (SRR)	SRR ima najširi FOV i može otkriti objekte u širokokutnom području na kratkim udaljenostima i obično se koristi za pomoć pri parkiranju, upozoravanje o unakrsnom prometu i upozorenje o sudaru sa stražnjeg dijela.

FMCW RADAR	Na FMCW radaru frekvencija signala s vremenom se linearno povećava. Informacije o udaljenosti i brzini izračunavaju se utvrđivanjem faze koja označava vremenski period odbijanja vala između dvije antene (prijamna i odašiljača).
CW RADAR	Radarski sustav koji prenosi stabilnu frekvenciju kontinuiranog vala, a zatim ju i prima nazad od bilo kojeg reflektirajućeg objekta. Pojedinačni objekti mogu se otkriti pomoću Dopplerovog efekta, što uzrokuje da primljeni signal ima različitu frekvenciju od prenesenog signala, što omogućuje njegovo otkrivanje. Takvi se radari široko koriste u različitim sustavima za mjerenje brzine, kao što su radari za brzinu prometa.
4D RADAR	4D radar može mjeriti tri prostorna smjera (x, y i z) objekta i pripadajuće komponente radijalne brzine.

3.3. LiDAR-i

LiDAR (eng. *Light Detection and Ranging*) je tehnologija za mjerenje udaljenosti koja koristi aktivne senzore koji emitiraju vlastiti izvor energije za osvjetljenje [18]. Djeluje na principu vremena leta (TOF, eng. *time of flight*) tako što šalje pulsirajući laser svjetlosti i mjeri vrijeme koje je potrebno da se puls reflektira natrag. Ta se mjerenja zatim mogu koristiti za generiranje 3D prikaza okoline. Svi prikupljeni podaci o visini, dubini i širini prostora predstavljeni su u oblaku točaka (eng. *point of clouds*) prikazani na slici 4, u obliku guste mreže točaka visoke rezolucije koji su ključni za tehnike lokaliziranja i mapiranja. LiDAR senzori nude mnoge prednosti za tehnologiju autonomnih vozila zbog svoje visoke preciznosti i točnosti, ali i brzine mjerenja udaljenosti (čak 150 000 impulsa u sekundi) [19].



Slika 4. Prikaz oblaka točaka registriranih pomoću LiDAR senzora [20]

Tri su primarne varijante LiDAR senzora koje se mogu primijeniti u širokom rasponu primjena: 1D, 2D i 3D LiDAR. 1D ili jednodimenzionalni senzori mjere samo podatke o udaljenosti (x-koordinate) objekata u okruženju. 2D ili dvodimenzionalni senzori pružaju dodatne informacije o kutu (y-koordinatama) ciljanih objekata. 3D ili trodimenzionalni senzori ispaljuju laserske zrake preko okomitih osi za mjerenje nadmorske visine (z-koordinate) objekata u okruženju [12].

LiDAR senzori se dalje mogu kategorizirati kao mehanički LiDAR i solid-state LiDAR (SSL) [12]. Mehanički LiDAR najpopularnije je rješenje za dugotrajno skeniranje okoline u području AV istraživanja i razvoja. Koristi visokokvalitetnu optiku i rotacijske leće koje mogu postići horizontalni vidokrug od 360° pokrivajući okolinu vozila [11]. Dok, SSL-ovi koriste mnoštvo malih zrcala od 9 mm za usmjeravanje laserskih zraka koje opažaju okolinu. Ovi LiDAR-i su posljednjih godina postali zanimljivi kao alternativa rotirajućim LiDAR-ima zbog svoje robusnosti, pouzdanosti i općenito nižih troškova od mehaničkih LiDAR-a [11]. Međutim, oni imaju manje i ograničeno vodoravno vidno polje, obično 120° ili manje, od tradicionalnih mehaničkih LiDAR-a. Solid-state LiDAR-i postoje u više varijanti: MEMS LiDAR, FLASH LiDAR, OPA LiDAR i FMCW LiDAR [21].

MEMS (mikroelektromehanički, *eng. micro-electro-mechanical systems*) LiDAR je sustav koji koristi mala zrcala čiji se kut nagiba mijenja pod naponom. Za pomicanje laserske zrake u više dimenzija potrebno je stepenasto postaviti više zrcala. Nedostatak je upravo to što nakon postavljanja MEMS je jako osjetljiv na udarce i vibracije u vožnji [21].

FLASH (bljeskajući) LiDAR koristi rad optičke bljeskalice (slično kao fotoaparatu) [20]. Jedan laserski puls osvjetljava okolinu ispred sebe, a niz fotodetektora hvata svjetlo raspršeno unatrag [21]. Detektor bilježi udaljenost snimka, lokaciju i intenzitet refleksije. Prednost je brzina snimanja podataka i otpornost na efekte vibracije koji bi mogli iskriviti snimak. Loša strana je prisutnost svjetlosti u okruženju koji reflektiraju većinu svjetla čime ga zasljepljuju [21].

OPA (optički fazni modulator, *eng. optical phase amplifier*) LiDAR ne sastoji se od pomičnih dijelova, a prednost mu je velika pouzdanost. Funkcionira na principu upravljanja laserskom zrakom samo u jednoj dimenziji, te kontrolira brzinu svjetlosti koja prolazi kroz leću. Iako se smatra obećavajućom tehnologijom, danas ova vrsta LiDAR-a još nije dostupna za komercijalne svrhe [21].

FMCW (frekvencijski modulirani kontinuirani val, *eng. frequency-modulated continuous wave*) LiDAR složena je vrsta LiDAR-a koji ima mogućnost istovremene detekcije udaljenosti od snimanog objekta i njegove brzine. Princip rada isti je kao i kod FMCW radara. Pokazao se u prednosti nad ostalima u vanjskim okruženjima zbog otpornosti na ostala osvjetljenja. Negativna komponenta je sama složenost proizvodnje [21].

Općenito, trenutačno se 3D rotirajući LiDAR-i češće primjenjuju u autonomnim vozilima kako bi pružili pouzdanu i preciznu percepciju danju i noću zbog šireg vidnog polja, većeg raspona detekcije i

percepcije dubine [20]. Prikupljeni podaci u formatu oblaka točaka pružaju gustu 3D prostornu sliku okoline AV-ova. LiDAR senzori ne daju informacije o boji okoline u usporedbi sa sustavima kamera i to je jedan od razloga zašto se PCD (eng. *point clouds*) često spaja s podacima iz različitih senzora pomoću algoritama za spajanje senzora [21].

Tablica 3. Tablični prikaz LiDAR-a

VRSTA LIDARA	OPIS
MEHANIČKI LIDARI	Visokokvalitetna optika i rotacijske leće s kojima se postiže 360 stupnjeva slika okoline.
ČVRSTI LIDARI	<p>Mnoštvo mikro-strukturiranih valovoda (zrcala do 9 mm) za usmjeravanje laserskih zraka.</p> <p>MEMS – mala zrcala koji pod podražajem mijenjaju nagib.</p> <p>OPA – nepomični dijelovi, upravljanje laserskom zrakom samo u jednoj dimenziji.</p> <p>FLASH - koristi bljeskalice kao laserski puls i niz fotodetektora.</p> <p>FMCW – istovremena detekcija udaljenosti od snimanog objekta i njegove brzine, na principu odbijanja valova između dvije antene.</p>

3.4. Ultrazvučni senzori

Na novijim vozilima, ultrazvučni senzori se mogu vidjeti s prednje i stražnje strane u obliku gumba koji su poznatiji kao parking senzori [22]. Ultrazvučni senzori rade na principu odašiljanja zvučnih valova na frekvencijama višim od ljudskog sluha. U senzoru postoji pretvornik, uređaj koji konvertira energiju iz jednog oblika u drugi. U ovom slučaju on služi kao mikروفon koji zaprima i odašilje ultrazvučne valove te se u većini slučajeva u senzoru nalazi samo jedan takav pretvornik. Senzor odašilje valove na frekvenciji od 40 kiloherca te mjeri vrijeme između odašiljanja i zaprimanja ultrazvučnog vala. Znajući vrijeme i brzinu širenja zvuka kroz zrak, koje se kreće u granicama 320-340 m/s, moguće je na temelju sljedeće jednadžbe jednostavno odrediti udaljenost nekog objekta u odnosu na vozilo [22].

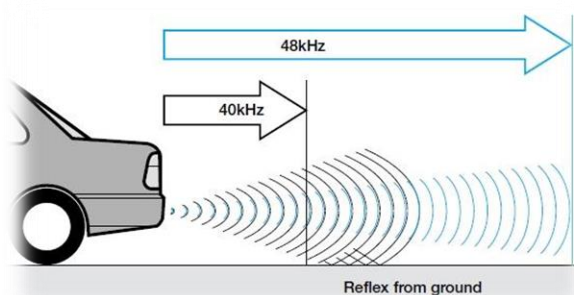
$$s = \frac{t}{2 * v}$$

gdje je:

t - vrijeme;

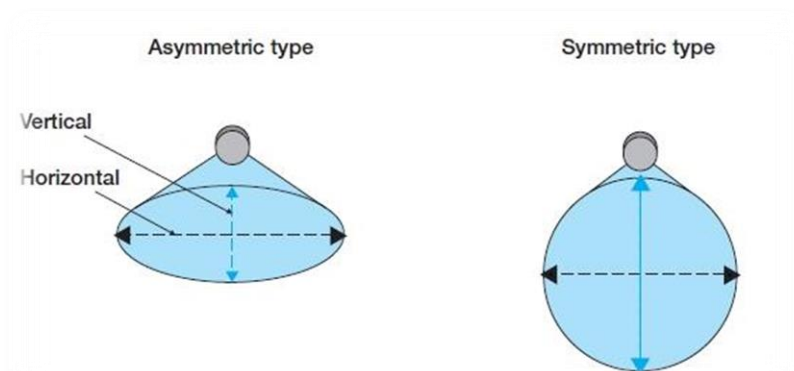
v - brzina zvuka.

Potrebno je vrijeme putovanja impulsa podijeliti s dva za izračun udaljenosti između vozila i objekta, a ne ukupno prevaženi put vala (jedan izvor). Ovakvi tipovi senzora su jednodimenzionalni i imaju doseg od maksimalno 5 metara. Mogu prepoznati koliko se daleko nalazi neka prepreka, ali ne mogu odrediti njihovu poziciju ili veličinu. U vozilima koja sadrže takve senzore u prosjeku ih ima između 10 do 12 komada. Broj senzora ovisi o frekvenciji odašiljanja valova. Korištenjem veće frekvencije i odabirom prikladnog pojačivača moguće je povećati domet senzora. Zbog povećanja dometa se u vertikalnom smjeru snop širenja valova smanjuje dok u horizontalnom smjeru valovi pokrivaju veća područja [22]. Na slici 5 prikazan je domet ultrazvučnih senzora ovisno o njihovoj frekvenciji.



Slika 5. Domet ultrazvučnih senzora ovisno o njihovoj frekvenciji [23]

Kada se uspoređuju ultrazvučni senzori s većim dosegom sa sensorima manjeg dosega može se primijetiti da se njihovi snopovi razlikuju po obliku. Sensor sa standardnom frekvencijom od 40 mHz ima simetrični oblik snopa, dok senzori s višim frekvencijama imaju asimetričan odnosno eliptičan oblik.



Slika 6. Prikaz oblika snopova ultrazvučnih valova ovisno o njihovoj frekvenciji [24]

Glavne prednosti ultrazvučnih senzora su da su općenito najjeftiniji od svih vrsta senzora [22]. Prilično su robusni u nepovoljnim vremenskim uvjetima, a također imaju dokazane rezultate u pogledu pouzdanosti koje većina proizvođača vozila godinama koristi kao senzore za parkiranje. Ultrazvučni senzori također se smatraju najtočnijim sensorima za male udaljenosti. Međutim, nedostaci ovih senzora su u tome što na njih mogu jako utjecati poremećaji u zvučnim valovima. Budući da zvuk može putovati

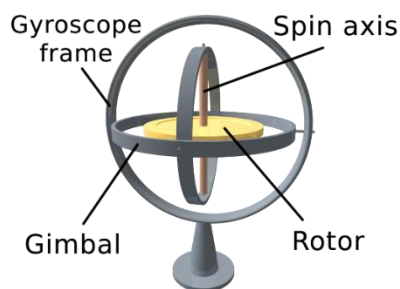
samo u mediju, promjene uvjeta okoline kao što su temperatura i vlažnost mogu uvelike utjecati na njihove sposobnosti [22].

3.5. Inercijska mjerna jedinica

Inercijska mjerna jedinica (IMU) elektronički je uređaj koji može mjeriti tjelesnu silu, kutnu brzinu i magnetsko polje. Obično se dijeli na dva tipa tehnologije: prvi, koji se sastoji od dvije vrste senzora (akcelerometra i žiroskopa) i drugi, koji se sastoji od tri vrste senzora (akcelerometar, žiroskop i magnetometar) [25].

Akcelerometar je senzor za mjerenje akceleracije, odnosno sile inercije. Akcelerometri čvrstog stanja karakterizirani su kao mali, pouzdani i robusni. Često se koriste za dobivanje razine tjelesne aktivnosti. Ubrzanja tijekom hodanja, vrijeme ciklusa hoda i broj koraka hodanja mogu se odrediti pomoću nekoliko akcelerometara pričvršćenih na tijelo [26].

S druge strane, žiroskop je kotač ili disk koji djeluje na principu očuvanja kutnog momenta tijela koji kaže da je kutna količina gibanja bilo koje čestice s obzirom na neku fiksnu točku u prostoru konstantna, ako na sustav ne djeluju vanjske sile. Za to su žiroskopi korisni za mjerenje ili održavanje orijentacije i mogu se smatrati kutnim senzorom brzine [27].



Slika 7. Prikaz žiroskopa [28]

IMU-ovi također mogu biti opremljeni senzorima magnetskog polja. Princip rada im se temelji na otkrivanju učinka Lorentzove sile koja mjeri magnetsko polje. Nedostatak magnetometra je korištenje u okolini okruženoj feromagnetskim metalom, koji može utjecati na mjerenja zbog poremećaja magnetskog polja. Dakle, IMU instrumenti uglavnom se koriste za pomoć u kalibraciji u svrhu povećanja točnosti. To omogućuje bolje performanse za izračun dinamičke orijentacije i može se koristiti u više svrha kao što su referentna mjera za orijentaciju tijela ili gravitacijsko polje Zemlje, senzori kompasa, linearni/rotacijski položaj i mjerenje brzine [26].

U autonomnim vozilima IMU često se implementira u inercijske navigacijske sustave (INS) koji obrađuju sirove podatke IMU-a kako bi izračunali linearnu brzinu i položaj u odnosu na globalni referentni okvir, odnosno GPS [19]. Glavni nedostaci ovih uređaja su u tome što nisu u mogućnosti pružiti informacije o stvarnoj lokaciji vozila, već samo o njenom kretanju, pa to mora odrediti neki drugi



izvor (npr. GPS). Još jedan nedostatak IMU-a u vezi s navigacijom je taj što imaju tendenciju stvaranja uzastopnih pogrešaka koje mogu dovesti do velikih odstupanja. Tipično rješenje ovog problema je implementacija sustava praćenja položaja kao što je GPS koji može kontinuirano ispravljati te pogreške odstupanja. Odnosno, IMU podaci obično se stapaju s GPS podacima jer su njihove prednosti i slabosti vrlo komplementarne. Dok se mjerenja IMU-a pomiču, GPS mjerenja su apsolutna i dok GPS mjerenja mogu ispasti ili doživjeti skokove, IMU podaci su kontinuirani [19]. Spajanje IMU-a i GPS-a je idealni primjer fuzije senzora koja je objašnjena u idućim odlomcima.

4. Fuzija senzora

U autonomnim vozilima koristi se mnogo različitih tehnika fuzije senzora [19]. Fuzija senzora istovremeno koristi više radara, LiDAR-a i kamera kao izvore za prikupljanje podataka. Osnovni princip po kojem se bazira ova metoda je princip fuzije informacija sličan integriranoj obradi informacija od strane ljudskog mozga [29]. Takav način rada iskorištava sinergijski rad više senzora koji omogućuje i sintezu podataka iz drugih izvora informacija kako bi se poboljšala inteligencija cijelog senzorskog sustava jer različiti senzori sadrže različite prednosti i slabosti. Radar može pružiti točna mjerenja dometa i na njega ne utječe osvjetljenje okoline, ali ne nudi detaljne informacije o izgledu objekata. Kamere, s druge strane, mogu pružiti detaljne podatke o izgledu objekata, ali mogu biti nedosljedne u različitim uvjetima osvjetljenja. Stoga, spajanjem prednosti svakog pojedinog senzora, sustav može postati mnogo efikasniji za rad [29].

4.1. Prednosti fuzije senzora

Inženjeri koriste različite kombinacije senzora kako bi kompenzirali ograničenja pojedinačnih senzora. Fizičko senzorsko mjerenje općenito ima probleme nedostatka senzora (kvar senzorskog elementa uzrokuje gubitak percepcije željenog objekta), ograničena prostorna pokrivenost, ograničena vremenska pokrivenost (neki senzori trebaju određeno vrijeme postavljanja za izvođenje i prijenos mjerenja, čime se ograničava maksimalna učestalost mjerenja), nepreciznost (ograničenost na preciznost korištenog osjetnog elementa), nesigurnost (nedostajanje određenih značajka, odnosno senzor ne može izmjeriti sve relevantne attribute percepcije). Kompenzacija za navedene nedostatke je fuzija senzora koja predstavlja kombiniranje senzorskih podataka ili podataka izvedenih iz senzorskih podataka tako da je dobivena informacija bolja od one koja bi se dobila kada bi se ti izvori koristili pojedinačno [29].

Prednosti fuzije senzora su: (1) robusnost i pouzdanost, višestruki skupovi senzora imaju svojstvenu redundantnost koja sustavu omogućuje pružanje informacija; (2) proširena prostorna i vremenska pokrivenost, jedan senzor može gledati tamo gdje drugi ne mogu, odnosno može izvršiti mjerenje dok drugi ne mogu; (3) povećana pouzdanost, mjerenje jednog senzora potvrđeno je mjerenjima drugih senzora koji pokrivaju istu domenu; (4) smanjena dvosmislenost i nesigurnost, zajedničke informacije smanjuju skup dvosmislenih tumačenja izmjerene vrijednosti; (5) otpornost na smetnje, povećanjem dimenzionalnosti mjernog prostora (npr. mjerenje željene količine optičkim sensorima i ultrazvučnim sensorima) sustav postaje manje ranjiv na smetnje; (6) poboljšana razlučivost, kada se spoji više neovisnih mjerenja istog svojstva, razlučivost rezultirajuće vrijednosti bolja je od mjerenja jednog senzora [29]. Sljedeći odlomak ispituje neke tehnike fuzije senzora koje se koriste za lokalizaciju vozila u unutarnjem i vanjskom okruženju.

4.2. Primjeri fuzije senzora

U autonomnim vozilima koriste se različite kombinacije aktivnih i pasivnih senzora za obavljanje dvije glavne zadaće percepcije okoline i lokalizacije [30]. Za percepciju okoline odnosno detekciju i praćenje vozila na cesti, detekciju pješaka, površine ceste, trake i prometnih znakova koriste se RGB kamere, termalne kamere, LiDAR i radari. Dok se za lokalizaciju i dobivanje relativne i apsolutne pozicije vozila koriste globalni navigacijski satelitski sustavi (GNSS), inercijske mjerne jedinice (IMU), inercijski navigacijski sustavi (INS), odometri, kamere i LiDAR-i [30].

Kamere su ključni senzori koji generiraju detaljan pogled na okolinu autonomnog vozila. One su jeftini senzori za prosječnu razinu performansi (npr. razlučivost, točnost) u usporedbi sa sensorima za aktivni domet i mogu pružiti informacije o gustim pikselima za okolnu scenu uz relativno nisku cijenu. Međutim, klasični sustavi temeljeni na kameri ne uspijevaju pružiti informacije o dubini, potrebne za modeliranje 3D okruženja. Jedna alternativa je korištenje stereovizijskog sustava koji se sastoji od više kamera na različitim lokacijama. Usprkos tome, ti su sustavi također izuzetno osjetljivi na vanjske uvjete okoline, kao što je intenzitet svjetlosti (slaba svjetlost i izravna sunčeva svjetlost) i teške vremenske prilike kao što su magla, snijeg i kiša. Spajanjem sustava temeljenog na viziji s LiDAR-om, na primjer, stvara se komplementarna slika koja pruža informacije o dubini prostora dok je otporan na vanjske vremenske uvjete [30].

Korištenje infracrvenih ili termalnih snimaka još je jedno aktivno polje koje istraživači često istražuju za primjene percepcije okoline, posebno u nepovoljnim svjetlosnim uvjetima i noćnom gledanju. Ovi se sustavi često koriste za aplikacije kao što su detekcija i praćenje pješaka zbog njihove sposobnosti otkrivanja ljudi bez obzira na intenzitet svjetla. U literaturi se termalne kamere spajaju sa LiDAR sensorima kako bi se dodala dubina i time poboljšala izvedba sustava. Međutim, ova prednost može biti dramatično ugrožena u ekstremnim vremenskim uvjetima, kao što su visoke temperature [30].

Lokalizacija i mapiranje obično koriste kombinaciju različitih senzora, kao što su GPS, IMU, LiDAR i kamere, kako bi se dobili točni i pouzdani rezultati. Unatoč dostupnosti vrlo preciznih i pouzdanih GPS senzora, uobičajeno je da se GPS signali obično suočavaju s blokadama ili prekidima u određenim uvjetima okoline. Stoga, kako bi se nadoknadili gubici GPS signala, lokalizacijski sustav vjerojatno će biti povezan s drugim sensorima, kao što su IMU [30].

Osim toga, senzorski uređaji visoke točnosti obično su vrlo skupi, što ih čini neprikladnima za upotrebu u drugim aplikacijama osim točnih očitavanja položaja na zemlji uz procjenu i provjeru kvalitete i izvedbe algoritma. Smanjenje troškova senzorskih tehnologija uz održavanje učinkovitog outputa jedan je od prioriteta u AV sustavima, stoga kombiniranje jeftinih IMU podataka i GPS signala može dati kontinuiranu i točnu procjenu stanja vozila. Štoviše, kamere i LiDAR-i koriste se u konfiguraciji koja će omogućiti izdvajanje specifičnih oznaka okruženja (oznake na cestama i statičke interesne točke) za

korištenje u izradi karata putem simultane lokalizacije i algoritama mapiranja (SLAM) ili uspoređujući ih s već postojećom kartom visoke razlučivosti (HD) i zatim dobivajući točne položaje i za vlastito vozilo i za okolne objekte. Tablica 4 pruža opsežan popis različitih kombinacija, spajanja i metoda povezivanja najčešćih senzora koji se koriste u autonomnim vozilima. Ona također opisuje ograničenja senzora ako se koriste pojedinačno. Dodatno, navodi prednosti spajanja prikladnog skupa senzora za postizanje željenog rezultata [30]. Primjer implementacije sustava fuzije senzora slijedi u idućem poglavlju.

Tablica 4. Fuzija senzora

PRIMJENA U AV- u	FUZIJA SENZORA	INDIVIDUALNA OGRANIČENJA	PREDNOSTI FUZIJE
DETEKCIJA PJEŠAKA	kamera i LiDAR	Osjetljiv na osvjetljenja, poteškoće s noćnim vidom, niska rezolucija rekonstrukcije LiDAR 3D scene kada se koristi sama.	Sposobnost mjerenja dubine i dometa, s manjom računalnom snagom, poboljšano djelovanje u ekstremnim vremenskim uvjetima (magla i kiša).
	kamera i infracrveno	Poteškoće s noćnim vidom samo s kamerom za vid, termalne kamere gube fine detalje predmeta zbog svoje ograničene razlučivosti.	Robusnost svjetlosnih efekata i noćno otkrivanje, infracrvena kamera pruža različite siluete predmeta, sposobnost rada u lošim vremenskim uvjetima.
DETEKCIJA CESTE	kamera i LiDAR	Uvjeti osvjetljenja i osvjetljenja, visoki računalni troškovi za mjerenje dubine vida; Mjerenja ograničene rezolucije i dometa od strane LiDAR-a, rijetki i neorganizirani LiDAR podaci u oblaku točaka.	Mjerenja geometrije cestovne scene (dubina) uz zadržavanje bogatih informacija o boji, kalibracija raspršenog LiDAR oblaka točaka sa snimkom

	kamera i polarizirana kamera	Osjetljiv na uvjete osvjetljenja; Nedostatak informacija o bojama.	Polarizirane snimke poboljšavaju razumijevanje scena, posebno s reflektirajućim površinama.
DETEKCIJA VOZILA I CESTOVNE TRAKE	kamera i radar	Niska rezolucija radara. Fotoaparatu su potrebne posebne leće, rasporedi i teški izračuni za mjerenje udaljenosti.	Točno izmjerena udaljenost, dobro se ponaša u lošim vremenskim uvjetima, kamera je prikladna za aplikacije za otkrivanje traka.
NAVIGACIJA	GPS i INS	GPS prekida rad u zabranjenim i kanjonskim područjima, pomak u očitanjima INS-a.	Kontinuirana navigacija, Ispravak u očitanjima INS-a.
VLASTITO POZICIONIRANJE	karta, kamera, GPS i INS	Nestanak GPS-a, INS odstupanja, točnost HD karte, loša vidljivost oznaka na cestama.	Precizno bočno pozicioniranje detekcijom oznake ceste i podudaranjem HD karte.

5. Senzori na primjeru Tesle model S

U sljedećim odlomcima analizirat će se senzori na autonomnom vozilu Tesle model S kao prototip jednog od najuspješnijih autonomnih vozila četvrtog razreda automatizacije. Tesla Autopilot funkcionira slično kao sustavi koje piloti zrakoplova koriste kada su uvjeti idealni. Vozač je i dalje odgovoran za vozilo i u konačnici ga kontrolira. Tesla vozaču daje intuitivan pristup informacijama koje koristi za kontrolu svojih radnji. Uz uobičajenu kombinaciju tehnologije za sprječavanje nesreća sa ADAS-om, koja pokreće upravljanje i kočenje u nuždi, tehnologija autopilota koja pokreće električna vozila Tesla model S i model X (slika 8) omogućuje vozilima autonomno upravljanje, promjenu traka, praćenje drugih vozila i horizontalnih krivina te automatsko parkiranje u garaži i izvan nje [31]. Tesla je predstavio svoj softver model S verzije 7.0 koji omogućuje vozilima da koriste podatke s okolnih kamera, radara i ultrazvučnih senzora za automatsko upravljanje autocestom, promjenu traka i

podešavanje brzine kao odgovor na prometne uvjete. Nakon što vozač stigne na određeno mjesto, vozač daje naredbe vozilu da traži parkirno mjesto. U novom autopilotu moderni dizajn usmjeren je na vozača kojem prikazuje informacije u stvarnom vremenu koje vozilo koristi za inteligentno određivanje ponašanja vozila u tom trenutku u odnosu na okolinu. Ploča s instrumentima pruža vizualizaciju ceste koju stvaraju senzori vozila, pružajući vozačima informacije kao što su napuštanje trake, otkrivanje mrtvog kuta, pomoć pri brzini, upozorenje na sudar, prilagodljivo krstarenje i automatsko upravljanje. Na temelju prethodnih istraživanja provedenih na autonomnim vozilima (koja još nisu komercijalizirana) Tesla razvija i omogućuje u skorijoj budućnosti apsolutnu autonomnu značajku autopilota [31].



Slika 8. Tesla model X [32]

Prednji odbojnici Tesle model S i modela X iza sebe imaju radare, s dometom od nekoliko stotina metara, koji mogu detektirati vozila i pokretne objekte sa značajne udaljenosti. Međutim, radar ne može otkriti prometne trakove ili nepomične objekte poput ljudi. Sustav kamera smješten sprijeda ili na krovu vozila prepoznaje ostale sudionike u prometu (druga vozila, biciklisti, pješaci) i prometnu signalizaciju [31].

Čip iza autopilota na Tesli je Mobileye Eye Q3 procesor koji obrađuje podatke preuzete sa satelitskih snimaka, radara, ultrazvučnih senzora i kamere te aktivira sustave upravljanja i kontrole brzine. Mobileye je uveo prvi DNN (eng. *Digital Neural Network*) na cesti s Teslinim električnim vozilima i odgovoran je za četiri glavne zadaće: označavanje piksela slobodnog prostora (eng. *Free Space Pixel Labeling, FSPL*), planiranje holističkog puta, opće otkrivanje objekata i otkrivanje znakova [31].

DNN je testiran na različitim bočnim, prednjim i stražnjim stranama raznih vozila dok ih ne bude sve mogao detektirati do zadovoljavajuće točnosti i posljedično konstruirati 3D model istog vozila. FSPL u

osnovi prepoznaje područje na kameri koje je bez ometanja. To je također područje na koje će vozilo smjeti ići.

Holistička sposobnost planiranja puta Mobileye čipa mu omogućuje da odluči krenuti prema naprijed s vrlo malo vizualnih znakova. To je proces koji govori vozilu gdje ići, a također kontrolira upravljanje. Čip na Tesli može identificirati više od 250 prometnih znakova u više od 50 zemalja što je ključno jer nije sva vertikalna signalizacija usklađena na međunarodnoj razini. Sustav je također sposoban identificirati i interpretirati svjetlosnu signalizaciju (semafore), horizontalnu signalizaciju i opremu na cestama kao što su prometni čunjevi. Sustav ima mogućnost otkrivanja strukture površine ceste, kao i svih eventualnih oštećenja. To omogućuje Teslinom vozilu da zna kakva je cesta na kojoj se kreće te da prepozna nepoželjne prepreke poput oštećenja kolnika (i posljedično ih izbjegne) [31].

Ultrazvučni senzori, montirani na najistaknutijim točkama karoserije vozila, omogućuju prepoznavanje vozila u susjednoj traci prilikom promjene prometnog traka ili automatskog upravljanja [31]. Ovi ultrazvučni senzori već su u vozilima koji nude automatsku tehnologiju „Reverse Park Assist“, koja pomaže u navigaciji vozilom u uska parkirna mjesta [31].



Slika 9. Praćenje vozila korištenjem ultrasoničnih senzora [31]

Vozilo Tesla opremljeno je nizom od 12 ultrazvučnih senzora. Pojedinačni senzori postavljeni su jednako na prednju i stražnju stranu. Za radnju prikazanu na slici 9 koristi se samo šest, tri sa svake strane vozila: prednja strana i stražnji senzor (otvor 75 stupnjeva) i dodatni pasivni stražnji bočni senzor (otvor 50 stupnjeva), koji prima samo ultrazvučne odjeke koje emitira stražnji senzor. Filtar čestica s mogućnostima praćenja smjese za izvođenje Bayesovog filtriranja (*machine learning* proces za filtriranje podataka [33]) u smislu uzorkovanja Monte Carla (skupina računalnih algoritama koji se temelje na ponavljanju slučajnog uzorkovanja za dobivanje numeričkih rezultata [34]) implementiran je za spajanje signala iz svih ultrazvučnih senzora [31].



Cestovni nadzor pomoću satelitskog sustava sastoji se od tri dijela: jedinice u vozilu, središnjeg računalnog poslužitelja i mobilnog satelitskog komunikacijskog sustava. Sustav u vozilu očitava položaj vozila svake sekunde pomoću GPS-a. Algoritam nazvan „podudarač karata“ (eng. *map matcher*) koristi poziciju i podatke s tahometra, koji sadržavaju brzinu vozila, u svrhu identificiranja ceste na kojoj se vozi. Svako zagušenje prometa automatski se detektira za svaki segment ceste na temelju prethodnog poznavanja te ceste, kao što je očekivana brzina prometa u nezagušenim uvjetima [31].

6. Zaključak

Tehnologija 21. stoljeća dovela je do rasterećivanja prometnog sustava kako bi se olakšale svakodnevne ljudske potrebe uzrokovane urbanizacijom i intenzivnim životnim stilom. Revoluciju predstavlja komercijalizacija i razvoj autonomnih vozila koji predstavljaju računalno upravljana vozila koja se na temelju raspoznavanja okoline mogu kretati samostalno, bez utjecaja ili uz ograničeni utjecaj vozača. U autoindustriji kroz proteklih nekoliko desetljeća intenzivno se razvijaju sve napredniji ADAS sustavi koji omogućavaju pomoć vozačima u vožnji. Ipak, automatizacija vožnje odvija se postupno na što ukazuje i višestupna kategorizacija autonomnih vozila. Otvorenost tržišta i rasprostranjenost ovakvog načina vožnje reflektiralo se i u Republici Hrvatskoj koja je svoj odgovor na razvoj ovakve tehnologije dala u Zakonu o sigurnosti prometa na cestama.

Ipak, fokus je na razvoju tehnološke infrastrukture autonomnih vozila posebno ciljajući na senzore koji djeluju kao tehnički pandan čovjekovog vida za glavno primanje informacija iz okoline. Stoga, senzori obavljaju glavnu ulogu pri davanju informacija sustavu o okolini u kojoj se vozilo nalazi. Glavni senzori su kamere, radari, LiDAR-i, ultrazvučni senzori i inercijske mjerne jedinice. Različite vrste kamere se koriste u automobilskoj industriji zbog snimaka visoke rezolucije, prihvatljivosti cijene, ali i mogućnosti raspoznavanja boja i objekata do najsitnijih detalja. Radari koriste radio valove koji putuju brzinom svjetlosti, a obično se koriste u AV-ovima kako bi pružili pouzdanu i preciznu percepciju prepreka danju i noću zbog svoje sposobnosti funkcioniranja bez obzira na osvjetljenje i nepovoljne vremenske uvjete. LiDAR-i se koriste za mjerenje udaljenosti putem pulsirajućeg lasera svjetlosti koji omogućuje generiranje 3D prikaza okoline jako velikom brzinom i dometom, što je ključno za sustav lokalizacije u vozilima. S druge strane, ultrazvučni senzori rade na principu zvučnih valova te su jeftiniji i robusniji od ostalih senzora. Posebno su korisni za detektiranje prepreka na malim udaljenostima te se stoga koriste kao parkirni senzori već dugi niz godina. Inercijska mjerna jedinica je elektronički uređaj koji koristi tri vrste senzora (akcelerometar, žiroskop i magnetometar), a u autonomnim vozilima se često implementira u inercijske navigacijske sustave (INS) koji obrađuju sirove podatke IMU-a koji se spajaju s GPS podacima kako bi se dobio točan položaj vozila. Međutim, svi navedeni senzori individualno pokazuju određene nedostatke, stoga je razvijen sustav fuzije senzora, odnosno spajanja više senzora kako bi se kompenzirali nedostaci i poboljšala učinkovitost. Najbolji praktični primjer je novi S model Tesle koji pokazuje kako se kombinacijom senzora radara, LiDAR-a i kamera mogu nadomjestiti svi nedostaci pojedinačnih tehnologija i omogućiti čovjeku bezbrižnu vožnju u automatiziranom izdanju.

Zaključno, autoindustrija autonomnih vozila na pomolu je velike revolucije u načinu transporta i vožnje koja će se odraziti na društvene, pravne, znanstvene i etičke aspekte ljudskoga života. Elektronika senzora pritom će snositi glavnu odgovornost informiranja, nekoć čovjeka, sada sustava o okolini u kojoj se on nalazi i djeluje. Stoga, ovo je tek početak napretka jedne nove tehnologije.

Literatura

- [1] World Health Organization. Road Traffic Injuries, <https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/roadtraffic-injuries>, 1.8.2023
- [2] Ritchie H.: Cars, Planes, Trains: Where do CO2 Emissions from Transport Come from? <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>, 1.8.2023
- [3] Eichberger, A.; Tomasch, E.; Hirschberg, W.; Steffan, H. Potenziale von Systemen der aktiven Sicherheit und Fahrerassistenz. ATZ Automob. Z. 2011, 113, 594–601.
- [4] <https://www.sae.org/standards>, 30.8.2023
- [5] Pecanac, M.: Autonomes Fahren – Entwicklungen und Perspektiven, 2017
- [6] Leksikografski zavod Miroslav Krleža-autonomna vozila, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=71368>, 1.8.2023
- [7] Zakon o sigurnosti prometa na cestama, pročišćeni tekst zakona, NN 67/08, 48/10, 74/11, 80/13, 158/13, 92/14, 64/15, 108/17, 70/19, 42/20, 85/22, 114/22
- [8] <https://www.youtube.com/watch?v=oBIKikBmdN8>, 25.8.2023
- [9] https://i0.wp.com/semiengineering.com/wp-content/uploads/Siemens_standards-threat-testing-autonomous-vehicles-fig1-SAE-automation-levels.jpg?ssl=1, 28.5.2023
- [10] Mihalj, T.; Li, H.; Babic, D.; Lex, C.; Jeudy, M.; Zovak, G.; Babić, D.; Eichberger, A.: *Road Infrastructure Challenges Faced by Automated Driving: A Review*. Appl. Sci. 2022, 12, 3477. <https://doi.org/10.3390/app12073477>
- [11] Balić, L.: Inteligentni senzori u vozilima, 2021, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
- [12] Yeong, D.J.; Velasco-Hernandez, G.; Barry, J.; Walsh, J.: Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles: A Review. Sensors 2021, 21, 2140. <https://doi.org/10.3390/s21062140>
- [13] https://img.machinedesign.com/files/base/ebm/machinedesign/image/2018/01/www_machinedesign_com_sites_machinedesign.com_files_SelfDriveCarSensors_Fig.png?auto=format,compress&w=750&h=421&fit=max, 25.8.2023
- [14] Vargas, J.; Alsweiss, S.; Toker, O.; Razdan R.; Santos, J. An Overview of Autonomous Vehicles Sensors and Their Vulnerability to Weather Conditions. Sensors 2021, 21, 5397. <https://doi.org/10.3390/s21165397>
- [15] <https://www.need4street.de/media/image/product/82020/lg/komplettsset-rueckfahrkamera-code-218-fuer-mercedes-benz-cls-klasse-c-x-117.jpg>, 25.8.2023
- [16] Müller, F.: Modellierung der Sensorabdeckung autonomer Fahrzeuge zur Berechnung optimaler Annäherungspfade, 2018, Master of Science (M.Sc.) an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München
- [17] FLUKE- How infrared cameras work, [https://www.fluke.com/en/learn/blog/thermal-imaging/how-infrared-cameras-work#:~:text=An%20infrared%20camera%20\(also%20known,of%20the%20object%20being%20measured](https://www.fluke.com/en/learn/blog/thermal-imaging/how-infrared-cameras-work#:~:text=An%20infrared%20camera%20(also%20known,of%20the%20object%20being%20measured), 1.8.2023
- [18] Jahromi Sh., Babak & Tulabandhula, Theja & Cetin, Sabri: Real-Time Hybrid Multi-Sensor Fusion Framework for Perception in Autonomous Vehicles. Sensors. (2019)., DOI: 10.3390/s19204357.

- [19] Campbell S., O' Mahony N., Krpalcova L., Riordan D., Walsh J.: *Sensor Technology in Autonomous Vehicles A review*, IMaR Technology Gateway Institute of Technology Tralee Tralee, Ireland
- [20] <https://www.oxts.com/wp-content/uploads/2019/11/Tree-Canopy-data.png>, 25.8.2023
- [21] Khader M., Cherian S.: *An Introduction to Automotive LIDAR*, Texas instruments, 2020
- [22] New electronics- An introduction to ultrasonic sensors for vehicle parking, <https://www.newelectronics.co.uk/content/features/an-introduction-to-ultrasonic-sensors-for-vehicle-parking/>, 1.8.2023
- [23] <https://www.newelectronics.co.uk/media/txnn0jt5/fig3.jpg>, 25.8.2023
- [24] <https://www.newelectronics.co.uk/media/f4ll3i0m/fig4.jpg>, 25.8.2023
- [25] Norhafizan A., Ariffin R., Ghazilla R., Nazirah M.: *Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications*, International Journal of Signal Processing Systems Vol. 1, No. 2 December 2013
- [26] Borenstein J., Everett H. R., Feng L., Wehe D.: *Mobile Robot Positioning: Sensors and Techniques*, Journal of Robotic Systems 14(4), pp.231–249 (1997)
- [27] Šoštarić, I.: *Nadzor dinamičkih parametara akcelatora i žiroskopa bežičnim senzorskim mrežama*, 2014, Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
- [28] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e2/3D_Gyroscope.png/1200px-3D_Gyroscope.png, 25.8.2023
- [29] Elmenreich W.: *An introduction to sensor fusion*, vol. 502, pp. 1-28, Nov. 2002.
- [30] Fayyad, J.; Jaradat, M.A.; Gruyer, D.; Najjaran, H. Deep Learning Sensor Fusion for Autonomous Vehicle Perception and Localization: A Review. *Sensors* 2020, 20, 4220. <https://doi.org/10.3390/s20154220>
- [31] Ingle S., Phute M.: *Tesla Autopilot: Semi Autonomous Driving, an Uptick for Future Autonomy*, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 03 Issue: Sep-2016, pp.369- 372
- [32] https://hips.hearstapps.com/hmg-prod/images/2020-porsche-taycan-4s-vs-2020-tesla-model-s-long-range-202-1621386342.jpg?crop=0.772xw:0.579xh;0.0489xw,0.232xh&resize=1200:*, 25.8.2023
- [33] Eyewated- Sve što trebate znati o Bayesovom filtriranju neželjene pošte, <https://hr.eyewated.com/sto-trebate-znati-o-bayesovom-filtriranju-nezeljene-poste/>, 1.8.2023
- [34] IBM- What is Monte Carlo simulation?, <https://www.ibm.com/topics/monte-carlo-simulation>, 1.8.2023