



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Бојан Штрбац

Употреба фузије сензора у систему за упозоравање од чеоног судара

МАСТЕР РАД

Нови Сад, 2020



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска документација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Дипломски – мастер рад
Аутор, АУ:	Бојан Штрбац
Ментор, МН:	Доц. др. Момчило Крунић
Наслов рада, НР:	Употреба фузије сензора у систему за упозоравање од чеоног судара
Језик публикације, ЈП:	Српски / ћирилица
Језик извода, ЈИ:	Српски
Земља публикавања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	Војводина
Година, ГО:	2020
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Нови Сад; трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	6/62/34/1/28/0/0
Научна област, НО:	Електротехника и рачунарство
Научна дисциплина, НД:	Рачунарска техника
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Аутомобилска индустрија; Аутономна вожња; ROS; Фузија сензора;
УДК	
Чува се, ЧУ:	У библиотеци Факултета техничких наука, Нови Сад
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	Аутомобилска индустрија је у протеклим годинама доживела велике промене. Све је више електронских система који управљају возилом. Такође, велика пажња се даје системима за повећање сигурности у вожњи. Имплементација једног таквог система, система за упозоравање од чеоног судара, је описана у овом раду. Ослања се на употребу фузије сензора. Конкретно на фузију камере и LIDAR-а.
Датум прихватања теме, ДП:	
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: Проф. Др Драган Самарџија
	Члан: Доц др Немања Недић
	Члан, ментор: Доц др Момчило Крунић
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	Master Thesis
Author, AU :	Bojan Štrbac
Mentor, MN :	Momčilo Krunić, PhD
Title, TI :	Utilization of sensor fusion in the forward collision warning system
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2020
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Novi Sad, Dositeja Obradovica sq. 6
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	6/62/34/1/28/0/0
Scientific field, SF :	Electrical Engineering
Scientific discipline, SD :	Computer Engineering, Engineering of Computer Based Systems
Subject/Key words, S/KW :	Automotive industry; Autonomous driving; ROS; Sensor fusion;
UC	
Holding data, HD :	The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia
Note, N :	
Abstract, AB :	<p>The automotive industry has gone through major changes in recent years. There are more and more electronic systems which have purpose to control the vehicle. Also, a lot of attention is paid to systems which need to increase driving safety. The implementation of one such system, the forward collision warning system, is described in this paper. It relies on the utilisation of sensor fusion. Specifically on the fusion of camera and LIDAR.</p>
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: Prof. Dragan Samardžija, PhD
	Member: Asst. Prof. Nemanja Nedić, PhD
	Member, Mentor: Asst. Prof. Momčilo Krunić, PhD
	Mentor's sign

Захвалност

Захваљујем се ментору доц. др Момчилу Крунићу на несебичним саветима и стручној помоћи током израде овог рада.

Такође се захваљујем Марку Драгојевићу и Стевану Стевићу на стручним саветима и подршци у току израде практичног дела овог рада.

Посебно се захваљујем својој породици и пријатељима на огромној подршци током читавих студија и школовања уопште.

На крају се захваљујем и Институту РТ-РК на указаној прилици и подршци која ми је пружена у току мог школовања, а посебно током израде овог рада.

САДРЖАЈ

1. Увод.....	1
1.1 Развој аутономних возила кроз историју.....	3
2. Теоријске основе.....	5
2.1 Аутономна вожња и нивои аутономности возила.....	5
2.1.1 Сензори у аутономним возилима.....	8
2.1.2 Фузија сензора.....	10
2.1.3 Напредни системи за помоћ возачу.....	12
2.2 Процеси у развоју софтвера у аутомобилској индустрији.....	15
2.2.1 Традиционални приступ развоју софтвера у аутомобилској индустрији (<i>ASPICE, V-Model</i>).....	16
2.2.2 Агилни приступ развоју софтвера у аутомобилској индустрији (<i>LeSS</i>)....	18
2.3 Софтверске платформе за развој аутономних возила.....	19
2.3.1 AUTOSAR Classic платформа.....	20
2.3.2 AUTOSAR Adaptive платформа.....	22
2.3.3 ROS платформа.....	23
2.3.4 Autoware платформа.....	26
2.4 Функционални захтеви и функционална архитектура за аутономну вожњу.....	28
2.4.1 Функционални захтеви.....	28
2.4.2 Функционалне компоненте.....	30
2.4.2.1 Перцепција.....	31
2.4.2.2 Одлучивање и контрола.....	34
2.4.2.3 Управљање (манипулација) возилом.....	36
3. Решење.....	38

3.1	Поставка проблема	38
3.2	Реализација решења	40
4.	Тестирање и евалуација.....	43
4.1	<i>CARLA</i> симулатор.....	43
4.2	Тестирање решења	44
5.	Закључак	47
6.	Литература.....	49

СПИСАК СЛИКА

Слика 1 Развој аутономних возила кроз историју	4
Слика 2 SAE нивои аутономности возила [5].....	6
Слика 3 Сензори у аутономним возилима	9
Слика 4 Пример Алгоритма за фузију више сензора.....	11
Слика 5 Понашање возила у кривини са и без система за електронску стабилизацију возила	14
Слика 6 Приказ система који се ослањају на комуникацију између учесника у саобраћају и инфраструктуре (V2V, V2X) уз коришћење Cloud-а [9].....	15
Слика 7 Head-Up екран.....	15
Слика 8 V-Model	17
Слика 9 Улоге у оквиру LeSS-а [12]	19
Слика 10 AUTOSAR партнерство	21
Слика 11 Архитектура Classic AUTOSAR платформе [13].....	22
Слика 12 Архитектура Adaptive AUTOSAR платформе [14]	23
Слика 13 Приказ Publish/Subscribe комуникационог механизма на ROS платформи.	24
Слика 14 Приказ Request/Response комуникационог механизма на ROS платформи.	25
Слика 15 Архитектура Autoware.AI софтверске платформе	26
Слика 16 RViz – Алат за визуелизацију сензора из Autoware-а	27
Слика 17 Преглед функционалних компоненти у систему за аутономну вожњу	30
Слика 18 Приказ локализације его возила на микро нивоу [19].....	32
Слика 19 Локална линеаризација која се примењује у проширеном Калмановом филтеру [25]	33
Слика 20 Излаз из YOLOv3 алгоритма	34

Слика 21 Системска архитектура комплетног пројекта [32].....	39
Слика 22 Блок шема решења	40
Слика 23 Тродимензионални оквир (енгл. 3D Bounding Box)	41
Слика 24 Илустрација мапе окупираности	42
Слика 25 CARLA симулатор	44
Слика 26 Резултат алгоритма за детекцију препрека приказан у CARLA симулатору	45
Слика 27 Тестирање алгоритма у различитим временским условима. Ведро време(лево), сумрак (десно)	45
Слика 28 Приказ резултата алгоритма који на основу читавања са LIDAR-а одређује да ли се испред аутомобила налази препрека.	46

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 1 <i>Карактеристике сензора који се користе у аутомобилима, карактеристике сензора када се примењује фузија сензора и карактеристике човека у погледу извршавања битних операција приликом управљања возилом</i>	12
---	----

СКРАЋЕНИЦЕ

ABS	- <i>Anti Braking System</i> , Систем против блокирања точкова приликом кочења
ACC	- <i>Adaptive Cruise Control</i> , Адаптивни темпомат
ADAS	- <i>Advanced Driver Assistance Systems</i> , Напредни системи за помоћ возачу
API	- <i>Application Program Interface</i> , Програмско сучеље за апликацију
ASPICE	- <i>Automotive Software Process Improvement and Capability Determination</i>)
AUTOSAR	- <i>Automotive Open System Architecture</i> , Стандардизован софтвер за развој софтвера у аутомобилима
CNN	- <i>Convolutional neural network</i> , Конволуционе неуронске мреже
DSRC	- <i>Dedicated short-range communication</i> , Комуникација између повезаних возила на краткој удаљености
ECS	- <i>Electronic Stability Control</i> , Електронска контрола стабилности
ECU	- <i>Electronic Control Unit</i> , Електронска контролна јединица
EKF	- <i>Extended Kalman Filter</i> , Проширени Калманов филтер
FCW	- <i>Forward Collision Warning</i> , Систем за упозорење од чеоног судара
GPS	- <i>Global Positioning System</i> , Глобални систем за позиционирање
OEM	- <i>Original Equipment Manufacturer</i> , Оригинални произвођачи опреме
ROS	- <i>Robot Operating System</i> , Роботски софтверски стек
ROI	- <i>Region of Interest</i> , Регија од интереса
RADAR	- <i>Radio Detection and Ranging</i> , Сензор за одређивање удаљености на основу радио таласа

SAE	- <i>Society of Automotive Engineers</i> , Удружење инжењера за развој аутомобилске индустрије
V2V	- <i>Vehicle to Vehicle</i> , Комуникација између два возила
V2X	- <i>Vehicle to Everything</i> , Комуникација возила са целим саобраћајем
LiDAR	- <i>Light Detection and Ranging</i> , Сензор за одређивање удаљености на основу ласерских зрака
LeSS	- <i>Large Scale Scrum</i> , <i>Scrum</i> примењен на велики број тимова
YOLO	- <i>You Only Look Once</i> , Алгоритам за детекцију објеката базиран на вештачкој интелигенцији

1. Увод

Аутомобилска индустрија је кроз историју тежила да произведе велики број различитих производа, не би ли се задовољили укуси и потребе купаца. На тржишту су се појављивали модели аутомобила од веома практичних, породичних, луксузних па све до супер спортских, који су служили у сврху забаве и ауто-мото спорта. Током двадесетог века представљене су технологије које су јасно приказале пут којим ће се развијати аутомобилска индустрија у будућности. Највећи акценат стављен је на безбедност, како путника у аутомобилу, тако и свих осталих учесника у саобраћају. Средином прошлог века је по први пут представљен сигурносни појас и од тада па до данас нису престали да се развијају системи за безбеднију вожњу. У последњих неколико година огромна средства се улажу од стране свих *OEM* у развој аутономних возила са циљем да се достигне ниво где ће аутомобил бити у могућности да се доведе од тачке А до тачке Б без интервенције возача у току саме вожње. Аутономна возила ће ускоро постати реалност и постаће свакодневица човека, што ће донети праву револуцију у животима људи, јавном превозу и многим другим гранама индустрије.

Сама идеја аутономне вожње произашла је из више разлога. Први и најважнији је да се у што већој мери покуша избацити утицај човека, односно утицај човекове грешке у току вожње. Истраживања су показала да велика већина саобраћајних несрећа произилази из грешке возача. Такође, нису ретки случајеви у којима људи за волан седају под утицајем разних психоактивних супстанци, или уморни и самим тим ризикују како свој тако и животе осталих учесника у саобраћају. Други, такође веома значајан разлог је количина времена коју просечан човек проведе у вожњи, а која би могла бити искоришћена на неке корисније ствари, уколико би аутомобил сам могао да обавља све активности у вожњи. Студија америчког универзитета Харвард показала је да просечан Американац у вожњи дневно

проведе 101 минут, што уопште није занемарљива бројка. Такође, није занемарљив ни економски аспект. Потпуно аутономни систем ће бити у стању да управља возилом у оптималном режиму у сваком тренутку, што резултира смањеном потрошном енергије, и самим тим даје одређену уштеду.

У овом раду ће бити представљен један подсистем за аутономну вожњу, базиран на *ROS*-у. Такође биће описани процеси који се данас користе у развоју софтвера за аутомобилску индустрију. Биће дат преглед платформи које су данас најзаступљеније у изради аутомотив софтвера, као што су: *ROS*, *Autoware*, *AutoSAR (classic, adaptive)* и *CARLA* симулатор. Што се саме имплементације тиче, имплементирана је библиотека која на основу читавања са камере и *LiDAR*-а ради локализацију самог возила и проверава да ли постоје препреке у траци којом се аутомобил креће. Библиотека је реализована као *ROS* пакет који представља део целог система за аутономну вожњу који ће бити описан у каснијим секцијама.

Рад се састоји од четири целине:

1. Теоријске основе – У овом поглављу описани су нивои аутономне вожње, да би се јасније приказало шта је тачно циљ овог рада. Описани су сензори који се данас користе у аутомобилској индустрији. Посебан акценат је дат на фузију сензора, представљене су предности и мане овог приступа. Са сврхом да се да увид у то шта је до сада достигнуто, објашњени су безбедносни системи и системи за помоћ возачу у току вожње (*ABS*, *ACC*, *FCW*, *LDW*, итд.). Такође, објашњени су процеси у аутомобилској индустрији (*V* модел и *LeSS*) као и платформе које су данас најзаступљеније у развоју аутономних возила. На крају овог поглавља су објашњени функционални захтеви које једно аутономно возило треба да испуњава.

2. Решење – Друго поглавље нуди преглед алгоритама који се данас користе у развоју аутономних возила и који су коришћени у овом конкретном раду. Објашњени су алгоритми за детектовање објеката на сликама, како традиционални тако и алгоритми који користе вештачку интелигенцију. Такође је објашњен алгоритам који користи *LiDAR* за праћење околине. Дат је и преглед саме интеграције решења у *CARLA* симулатор који је коришћен са евалуацију и тестирање решења.

3. Тестирање и евалуација решења – Поглавље даје увид у тестне случајеве који су коришћени као потврда исправности решења. Такође описани су концепти који се користе у данашњој индустрији та тестирање аутономних возила.

4. Закључак – У последњем поглављу је сумирано све урађено у овом раду. Дати су правци у коме ће се кретати даље истраживање на ову тему.

1.1 Развој аутономних возила кроз историју

Појам аутономне вожње, иако се чини као нова технологија, заправо се појављује од шездесетих година двадесетог века. 1961. године се на универзитету Стенфорд појавила иницијатива и направљено је прво интелигентно возило [1]. Циљ је био да се контролише возило, за кретање по месецу, са Земље користећи само видео камеру.

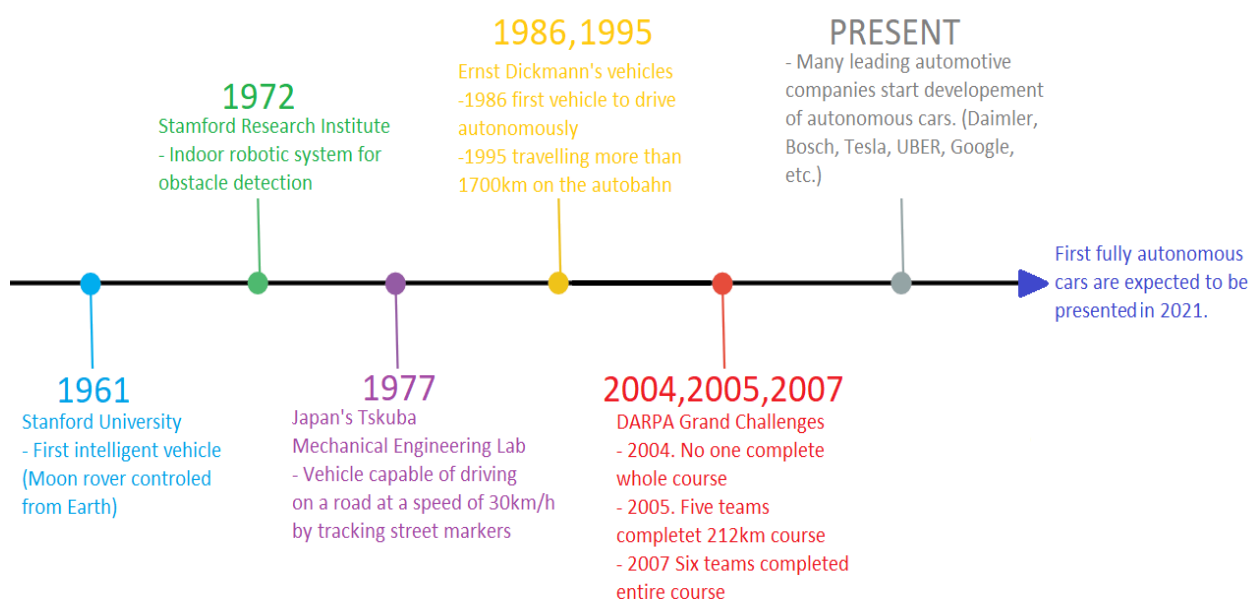
Наредни значајан искорак у свет аутономних возила догодио се 1972. године. Центар за развој вештачке интелигенције *SRI (Stanford Research Institute)* је развио роботски систем за рад у затвореном простору који је био опремљен са више различитих сензора који су служили за детекцију препрека (*TV* камера, сензори за перцепцију околине, итд.). 1977. година доноси вероватно најзначајнији помак. Јапански универзитет *Tskuba* развија возило које је у стању да се вози по путу брзинама до 30 километара на час, пратећи ознаке на путу.

Ернст Дикман 1986. године представља свој аутономни комби. Изабран је комби из разлога што је било потребно много хардвера не би ли уопште било могуће извести аутономну вожњу. Ово је уједно и прво возило које је успело потпуно аутономно да одвезе деоницу. Вожња је изведена на баварском ауто-путу и достигнута је брзина од чак 90 километара на час. Неколико година касније, 1995. године, Дикман са својим тимом представља своје значајно унапређено возило. Извели су вожњу дугу 1700 километара, возећи се по затвореном ауто-путу од Баварске до Данске. Највећа достигнута брзина била је 175 километара на час.

DARPA Grand Challenge [3] је у великој мери допринео развоју аутономне вожње. Одржава се под покровитељством огранка за безбедност владе Сједињених Америчких Држава 2004. године одржан је први и ни један тим није успео да прође цео полигон. Већ следеће године, чак пет тимова је успешно завршило задати полигон. 2007. године се одржава први *DARPA Urban* догађај, у коме успешно учествује шест тимова. Овај догађај се сматра веома значајним јер је већина тимова који су учествовали у њему касније успешно реализовала пројекте аутономне вожње за највеће светске компаније које су се одлучиле да свој развој организују у правцу развоја аутономних возила.

Тренутно стање у аутомобилској индустрији је такво да се сви највећи светски произвођачи возила надмећу у развоју хибридних и аутономних возила. Компанија Тесла је за сада стигла најдаље у погледу аутономне вожње. То је изазвало, може се слободно рећи револуцију у пословању између највећих светских компанија. Долази до стварања алијанси које ће резултирати убрзаним развојем аутономне вожње. Праве се полигони и центри за развој и тестирање аутономне вожње који у потпуности симулирају реалне услове и проблеме са којима се сусрећу возачи у свакодневной употреби возила. Очекује се да ће се

до краја 2021. године на улицама појавити прва потпуно аутономна возила, а да ће у наредној деценијама доћи до потпуне експанзије истих на путевима. Такође, ова грана индустрије има велики утицај на индустрију јавног превоза. То је приметно и по томе што се мултинационална компанија *UBER* укључила у сам развој аутономних возила и представила своје решење. На *слици 1* се може видети временска линија на којој су приказане најважније године за аутономну вожњу, које су такође описане у овој секцији.



Слика 1 Развој аутономних возила кроз историју

2. Теоријске основе

У овом поглављу су описани сви термини неопходни за разумевање решења које је приказано у овом раду. Објашњени су нивои аутономности возила, као и најважнији сензори који се данас користи у возилима. Такође, објашњени су сви битни појмови који се користе у процесима развоја аутономних возила. Посебно је описано неколико најзаступљенијих софтверских платформи које су данас у употреби за развој и тестирање услед недостатка правих полигона. Између осталог, једно поглавље биће посвећено обради слике и видео садржаја у алгоритмима за аутономну вожњу који су такође коришћени у овом решењу.

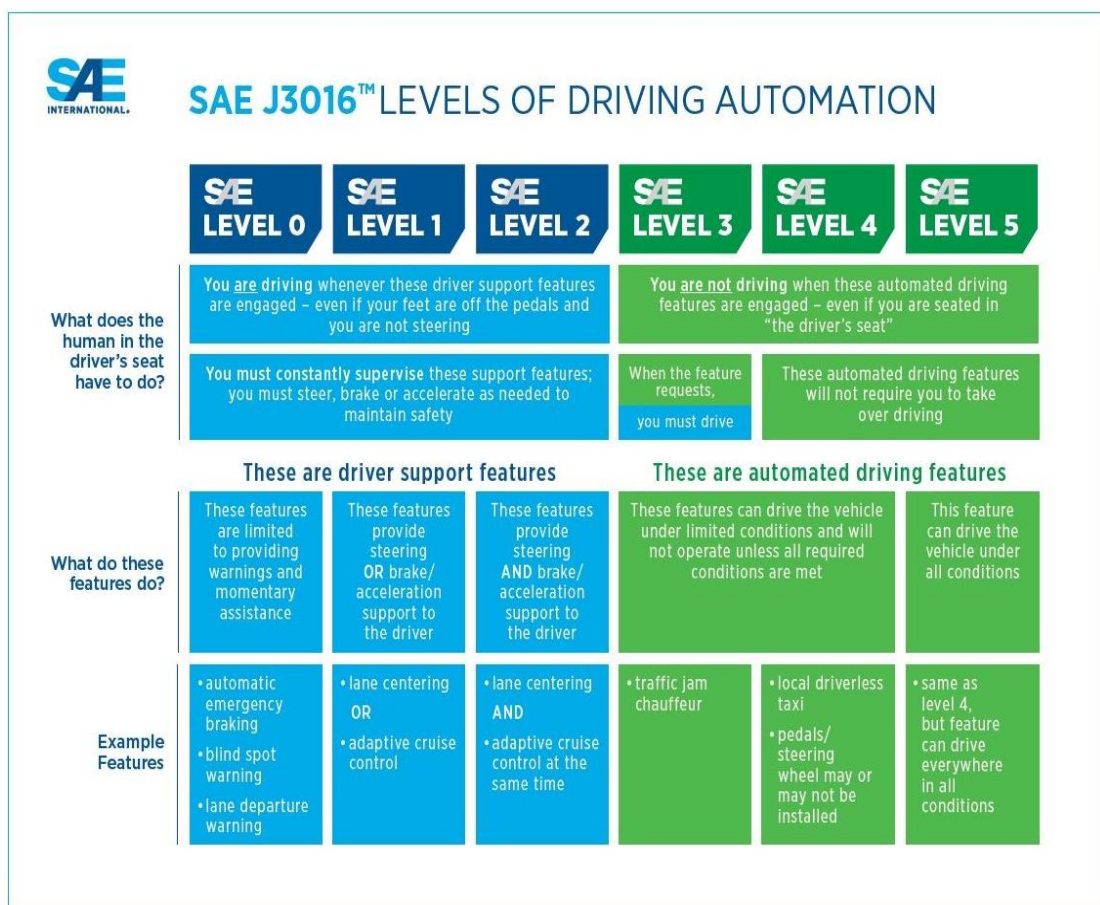
2.1 Аутономна вожња и нивои аутономности возила

Поред развоја аутомобила на потпуно електрични погон, аутономна возила представљају најзначајније поље развоја у аутомобилској индустрији. Промене које аутономна вожња са собом носи не тичу се само возила. Да би овакав начин вожње био изводљив у пракси инфраструктура мора да буде у веома добром стању. Такође све у вези аутономности возила мора да буде законски покривено. Што се социјалног аспекта тиче развој оваквог начина вожње има добре али такође и лоше стране. Јасно је да је први и основни циљ да се сигурност у вожњи, како људи тако и материјалних ствари, подигне на највиши могући ниво. Са друге стране велики број људи за живот зарађује вожњом (Јавни превози, транспорт робе, лични возачи, итд.), а аутономна возила претендују да у потпуности замене људе који врше те делатности.

Сама идеја аутономне вожње, како је раније поменуто, се родила првенствено због повећања сигурности свих учесника у саобраћају, али то је само један од бројних разлога. Веома значајна ствар коју ће аутономна вожња обезбедити јесте независност у саобраћају

особама које из бројних разлога нису у стању да управљају данашњим аутомобиле. Такође, важно је поменути и нову технологију која ће своју примену добити развојем аутономне вожње. То су аутономни конвоји, који се данас могу пронаћи и под именом *platooning* [4]. Ова технологија представља конвој теретних возила, међусобно повезаних, где прво возило у колони извршава све логичке задатке аутономне вожње и шаље команде остатку колоне. Остатак колоне за задатак има само да прати сва упутства која добија од предводника. Овакав начин транспорта за резултат даје велику уштеду, јер што је више пратећих камиона уштеда је већа.

Када су се појавиле прве идеје аутоматизације вожње, нивои аутономности су били субјективни. Сваки произвођач је аутономност процењивао према личним достигнућима. Стандардизацију ове теме извршио је *SAE International* (енгл. Society of Automotive Engineers) у стандардну под ознаком J3016 [5]. Као што се може видети на *слици 2* они су направили критеријум где постоји шест нивоа аутоматизације вожње који су подељени у две подгрупе, плаву и зелену. Првој групи припадају нижи нивои аутономности (ниво 0, ниво 1 и ниво 2) код којих возач управља аутомобилом било да су системи укључени или не. Док код друге групе возач не управља возилом када су системи за аутономну вожњу активирани.



Слика 2 SAE нивои аутономности возила [5]

Детаљније објашњење свих нивоа аутоматизације вожње:

Ниво 0 : Без аутоматизације – Нулти ниво аутоматизације представља ниво где практично нема аутоматизације. Возач је обавезан да у сваком тренутку управља возилом док су помоћни системи ту да возачу обезбеђују упозорења или минималне асистенције у случају да успеју да предвиде проблем. Неки од најпознатијих система аутоматизације, који спадају у нулти ниво су: аутоматско кочење у случају нужде, упозорење ако се неки објекат налази у „мртвој тачки“, упозорење приликом напуштања возне траке, итд.

Ниво 1 : Помоћ возачу – Први ниво аутоматизације је први ниво у коме систем у појединим начинима вожње контролише управљање, односно додавање гаса или кочење. Као што је важило у нивоу 0, и овде је возач обавезан да све време буде у потпуности свестан своје околине и да држи руке на волану. Систем за аутоматизацију у првом нивоу аутоматизације је задужен за центрирање возила у возну траку или за *ACC* (енгл. *Adaptive Cruise Control*). Још увек није способан да све ради у исто време.

Ниво 2 : Парцијална аутоматизација - Овај ниво се не разликује много од нивоа један. Систем за аутоматизацију је способан да возилом управља сам (управљање, додавање гаса и кочење) у појединим начинима вожње. Разлика у односу на први ниво је што је у овом нивоу систем способан да алгоритме центрирања возила и *ACC* обавља у исто време.

Ниво 3 : Условна аутоматизација - Ниво три представља прекретницу између нивоа где је возач неопходан у сваком тренутку и нивоа где је возач потребан само у случају нужде или уопште није потребан. Овај ниво такође представља и најкритичнији корак у потпуној аутоматизацији. Возило је у овом нивоу задужено за праћење околине и управљање возилом у појединим начинима вожње. Да би ово било изводљиво користи се велики број сензора. У овом нивоу аутоматизације возач још увек није скроз ослобођен вожње, систем може у сваком тренутку да захтева да возач преузме контролу над возилом уколико процени да је ситуација критична. Једна од значајних могућности овог нивоа јесте потпуно аутономна вожња на ауто-путу где се веома ретко дешавају непредвиђене ситуације.

Ниво 4 : Висока аутоматизација – Представља потпуно аутоматизовано возило у већини начина вожње. Возило је у потпуности одговорно и за надгледање околине и за управљање. Од возача се ни у једној ситуацији не очекује да преузме контролу што практично доводи до тога да већ од овог нивоа није потребно постојање волана и папучица за гас, кочење или квачило. Овакав ниво аутоматизације ће своју примену наћи највише у возилима јавног превоза.

Ниво 5 : Потпуна аутоматизација – Последњи ниво представља потпуно аутономно возило које је, независно од услова вожње, способно да успешно обавља све операције управљања возилом.

Тренутно стање у индустрији је такво да је трећи ниво аутоматизације успешно достигнут од стране неколико водећих компанија у аутомобилској индустрији. У наредним годинама очекује се да се велика већина компанија прикључи трци за прво потпуно аутономно возило. Чак се у плановима неким *OEM*-ова може приметити да није циљ постепени напредак од нивоа нула до нивоа пет, него се у сврху што бржег постизања потпуне аутоматизације прескачу међунивои и као једини и главни циљ се поставља ниво пет, односно потпуно аутономно возило. Како ови нивои немају јасно дефинисане KPIs тако се не може прецизно описати тренутно стање у индустрији аутономних возила.

2.1.1 Сензори у аутономним возилима

Да би уопште било могуће развијати системе за аутоматизацију вожње, неопходно је да возило буде свесно своје околине и услова за вожњу. Такође, да у зависности од стања околине буде у могућности да перципира потенцијалне догађаје у блиској будућности. Процес перцепције у аутономним возилима користи напредне сензоре и видео камере у комбинацији са веома напредним софтвером који је у стању да у реалном времену даје информације о стању околине возила. Постоје две групе сензора, сензори унутар возила служе да контролишу исправност самог возила (притисак, ниво разних течности у возилу, температуру, итд.) и надгледање возача, док сензори изван возила служе првенствено системима за асистенцију возачу, односно аутономну вожњу.

Објашњење свих најзначајнијих сензора следи у наставку:

Динамички сензори – Служе са одређивање свих динамичких величина као што су: брзина, убрзање, промена путање, промена угла управљања, притисак, итд.

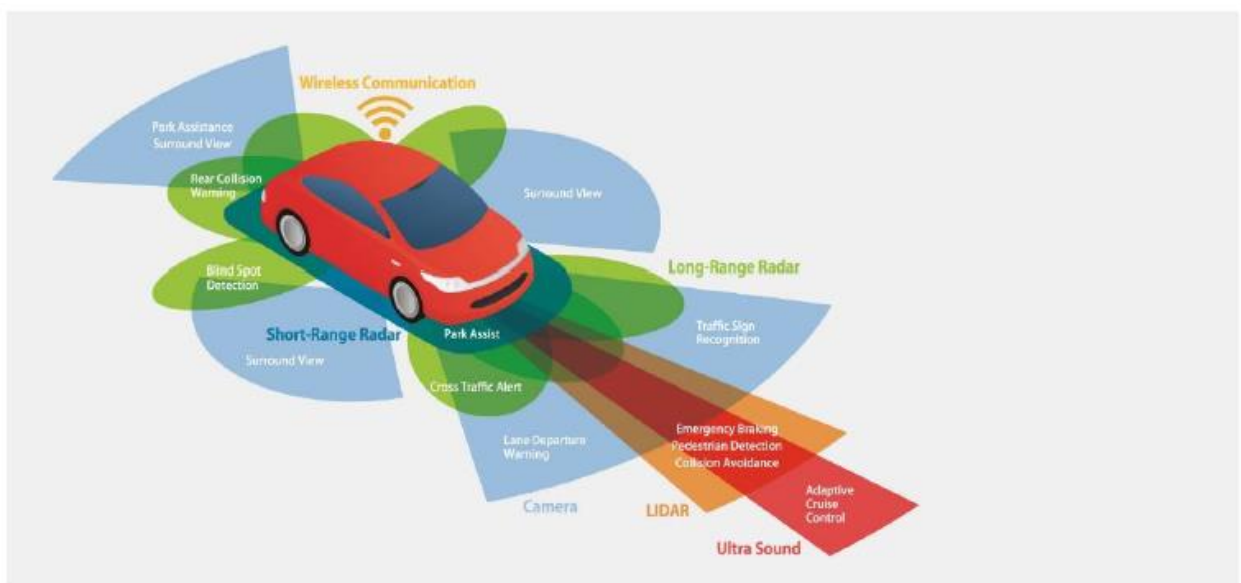
Ултразвучни сензори – Најчешће су позиционирани на предњем и задњем бранику возила. Најчешћа примена ове врсте сензора је у системима за помоћ приликом паркирања.

RADAR – Овај сензор се састоји од антене која емитује радио сигнал у одређеном правцу и радио пријемника који детектује сигнал након што се он одбије од препреке и врати према пријемнику. Принцип на коме се заснива рад овог сензора је мерење времена колико треба емитованом радио сигналу да се врати од тренутка када се одбије од препреку. Рачун није компликован из разлога што је брзина простирања сигнала кроз ваздух константна. Ова врста сензора се показала као веома поуздана и приликом лоших временских прилика (киша, снег, магла). RADARи су примену нашли у мерењу удаљености и брзине кретања, конкретно у системима за заштиту и превенцију од судара, као и системима за помоћ при промени возне траке.

LiDAR – Ова врста сензора ради на сличном принципу као и RADAR, емитује и прима таласе и на основу времена одређује дистанцу. LiDAR се сматра најпоузданијим сензором

од свих и користи се у најкритичнијим операцијама за сигурност у војњи. Разлика између LiDAR и RADAR сензора је у томе што LiDAR уместо радио таласа емитује велику количину ласерских таласа сваке секунде и на основу одзива креира мапу дубине, познатију као мапу тачака (енгл. *Point cloud*). Мапа тачака веома поуздано и тачно осликава околину возила и може да се користи приликом детекције објеката на основу његових контура. Проблем ових сензора је то што нису у стању да детектују боју светла на семафору или саобраћајне знакове. Такође, главна мана LiDARa која је заслужна што нема ширу употребу је цена овог сензора. Главна примена ових сензора је мерење удаљености, детекција објеката, мерење видљивости, детекција дан/ноћ и процена брзине.

Видео камере – За разлику од свих претходно наведених сензора, камере дају најбогатију слику околине. За разлику од два претходно описана сензора, камере су у стању да детектују ситне детаље (семафори, знакови поред пута, итд.) који често знају да буду кључни. Развој вештачке интелигенције је камере ставио на прво место по употреби у аутомобилима. Чак су и неки OEM-ови одлучили да свој развој већине система аутономне војње заснивају баш на сликама које добијају са камера. Камере су једини сензори који се одлично сналазе у извршавању основних алгоритама који се користе у системима за аутономну војњу, а то су: детекција и класификација линија (употреба: да его возило зна да ли је претицање дозвољено), детекција и класификација семафора (употреба: да его возило зна која је боја светла на семафору), детекција и класификација саобраћајних знакова, детекција, класификација и праћење различитих објеката. Битно је напоменути да постоји више врста камера које се користе у возилима. У зависности од потреба може да се разликује: видно поље камере, резолуција, број слика у секунди које камера добавља, итд.



Слика 3 Сензори у аутономним возилима

2.1.2 Фузија сензора

Фузија сензора представља процес спајања података са више различитих сензора, исте или различите врсте, са циљем да се смањи несигурност која може бити укључена у кретање или извршавање задатака его возила. Фузија сензора помаже у изградњи прецизнијег модела света који его возила користе за кретање. Битан аспект за разумевање потребе постојања алгоритама за фузију сензора је и сама немогућност да се све неопходне информације добију из само једног сензора. Фузија сензора је мултидисциплинарна наука која користи идеје и алгоритме из више праваца научног истраживања као што су: обрада сигнала, машинско учење, теорија информација и многе друге. [6].

Историјски гледано, до експанзије у развоју фузије сензора долази у другој половини двадесетог века. Министарство одбране Сједињених Америчких Држава је уложило значајна средства у решавање проблема локализације, карактеризације и препознавања динамичких објеката као што су војна возила, разне врсте оружја, беспилотне летелице итд. Након што се фузија сензора у војној индустрији показала веома добро, значајну примену је добила и у развоју система за аутономну вожњу.

Постоје три основна начина фузије сензора [7]:

Редундантни сензори – Сви сензори дају исте информације о свету. Овим приступом се добија робуснији систем, минимализује се могућност грешке.

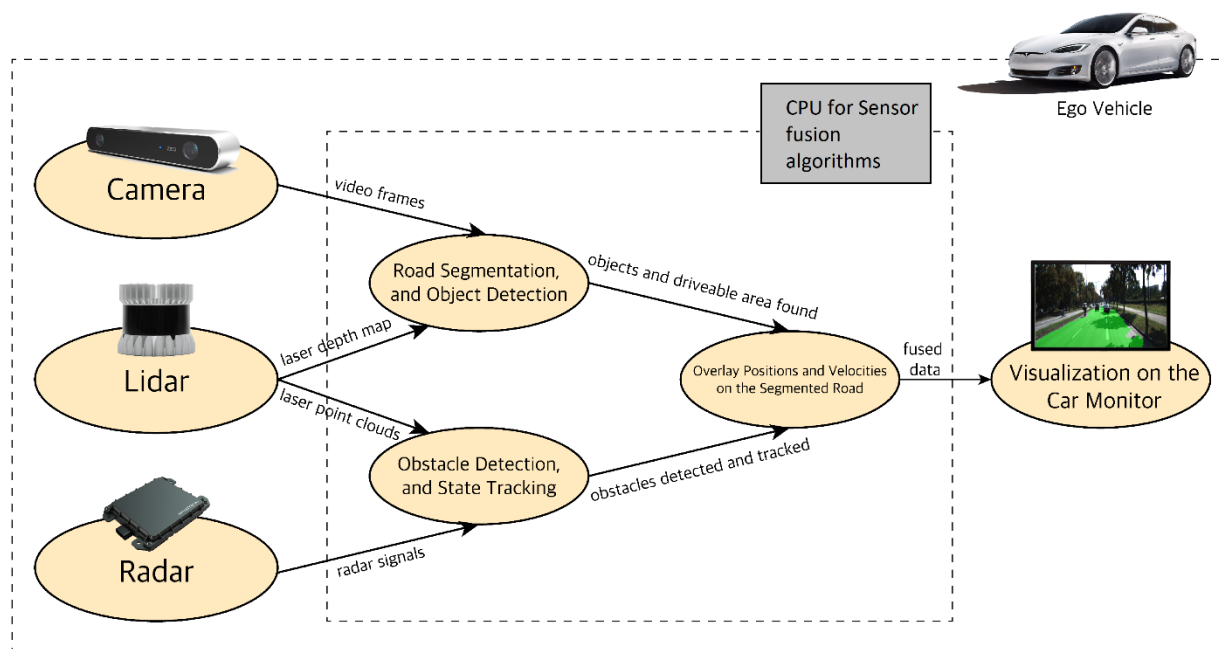
Комплементарни сензори – Различити сензори добављају независне типове информација о свету. Овај приступ проширује количину информација које его возило може да користи. Самим тим се повећава и број алгоритама који могу да се користе.

Координисани сензори – Сензори секвенцијално добављају информације о свету.

Три сензора који су најзаступљенији у аутомобилској индустрији су камера, радар и LiDAR. Сваки има своје предности и мане. Стога, информације које се добијају од њих теже да буду комбиноване не би ли се добила најбоља и најпрецизнија слика околине. Један добар пример за разумевање важности фузије сензора и самог функционисања овог приступа се може видети на *слици 4*. Сваки део алгоритма користи конфигурацију сензора и методе фузије са сврхом да се добије најбољи могући резултат.

Први корак алгоритма служи за задатке где су потребни сензори високе резолуције, камера и LiDAR. У њему се ради класификација и локализација објеката као и сегментација коловоза. Комбинација улаза са ова два сензора се шаље у дубоку неуронску мрежу (енг. Deep Neural Network) која је задужена за класификацију и сегментацију. Комбинација камере, LiDAR-а и конволуционе неуронске мреже се показала најбоље на пољу класификације и сегментације. Вештачка интелигенција на челу са вештачким неуронским

мрежама се показала доста боље од традиционалних алгоритама (SIFT, HOG) за детекцију објеката на сликама. Више о алгоритмима за обраду слике и видеа ће бити у наставку рада.



Слика 4 Пример Алгоритма за фузију више сензора

Други део алгоритма извршава задатке детектовања и праћења објеката коришћењем LiDARa и радара. Облак тачака који се добавља помоћу LiDARa и сигнали са радара се обрађују и комбинују на нивоу објеката. Ово резултира са низом препрека које су препознате испред аутомобила унутар *ROI* (Коловозне траке којом се аутомобил креће). Што се тиче праћења објеката, најчешће се користи проширени Калманов филтар, који ће бити објашњен у наставку рада.

Излази из претходно описана два корака алгоритма се комбинују и тиме се добија потпуна слика света испред аутомобила. Добија се регија од интереса, односно коловозна трака са свим ограничењима брзине као и информације о свим постојећим препрекама које се морају узети у обзир приликом управљања аутомобилом.

Гледиште перформансе	Човек	Аутономно возило (АВ)			Конектовано возило (КВ)	КАВ
		Радар	Лидар	Камера	DSRC	АВ + КВ
Детекција објеката	Добро	Добро	Добро	Задовољ.	-	Добро
Класификација објеката	Добро	Лоше	Задовољ.	Добро	-	Добро
Процена удаљености	Задовољ.	Добро	Добро	Задовољ.	Добро	Добро
Детекција ивица	Добро	Лоше	Добро	Добро	-	Добро
Праћење возне траке	Добро	Лоше	Лоше	Добро	-	Добро
Домет видљивости	Добро	Добро	Задовољ.	Задовољ.	Добро	Добро
Перформансе по лошем времену	Задовољ.	Добро	Задовољ.	Лоше	Добро	Добро
Перформансе при лошем осветљењу	Лоше	Добро	Добро	Задовољ.	-	Добро
Могућност комуникације са осталим учесницима у саобраћају и инфраструктуром	Лоше	-	-	-	Добро	Добро

Табела 1 Карактеристике сензора који се користе у аутомобилима, карактеристике сензора када се примењује фузија сензора и карактеристике човека у погледу извршавања битних операција приликом управљања возилом

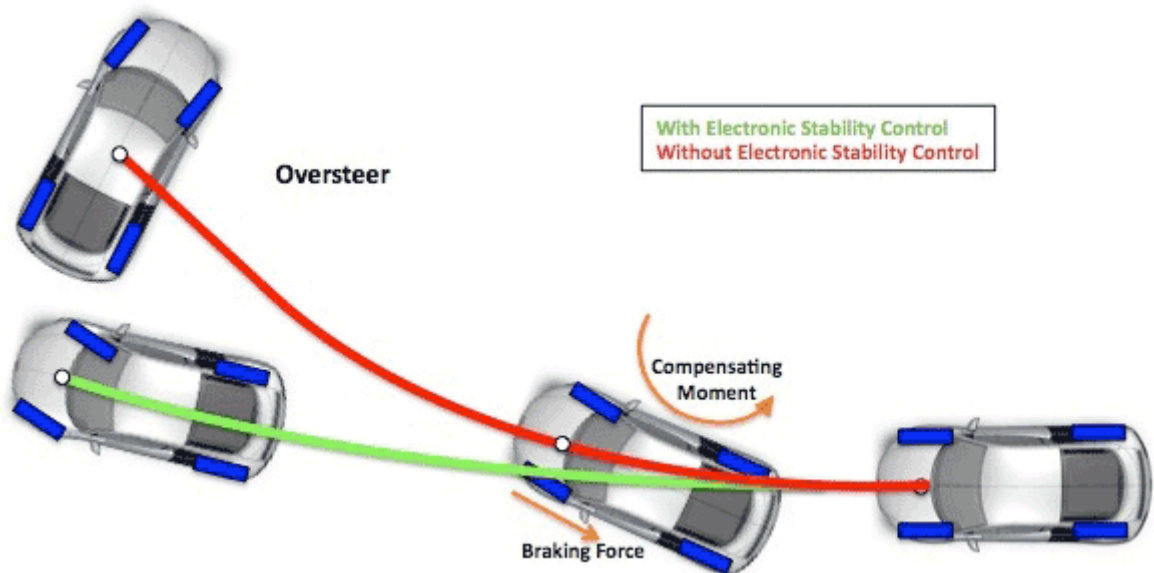
Важност фузије сензора се јако добро може видети из табеле 1. У њој се јасно може видети како се који од сензора појединачно налази у разним операцијама приликом вожње. Такође, приказано је и шта се добија фузијом сензора. Значајан део табеле представља и приказ понашања међусобно умрежених возила. Последња колона представља аутономно возило које је при том и умрежено са осталим учесницима у саобраћају као и са инфраструктуром. Може се видети да ни један од сензора није у стању сам све операције да изводи на задовољавајућем нивоу, али када се сензори комбинују добија се робуснији систем, задовољавајуће поузданости. Као референца за све наведено може се посматрати човек и његово сналажење у истим ситуацијама. Јасно се види да и људи имају доста ограничења, што је, како је раније поменуто, један од главних разлога за употребу фузије сензора у аутономним возилима. [8]

2.1.3 Напредни системи за помоћ возачу

Напредни системи за помоћ возачу (енгл. *Advanced Driver Assistance Systems – ADAS*) представљају системе који све више почињу да буду део аутономних возила са сврхом да се достигну виши нивои аутономности. Задатак ових система је да се возило начини безбеднијим и удобнијим за вожњу. Уз коришћење претходно описаних сензора и алгоритама за фузију истих, ови системи су у стању да разумеју свет око себе и самим тим

предвиде критичне ситуације и по потреби преузму контролу над возилом или обавесте возача на постојање потенцијалне критичне ситуације. Најпознатији системи за помоћ возачу ће бити побројани и кратко објашњени у наставку.

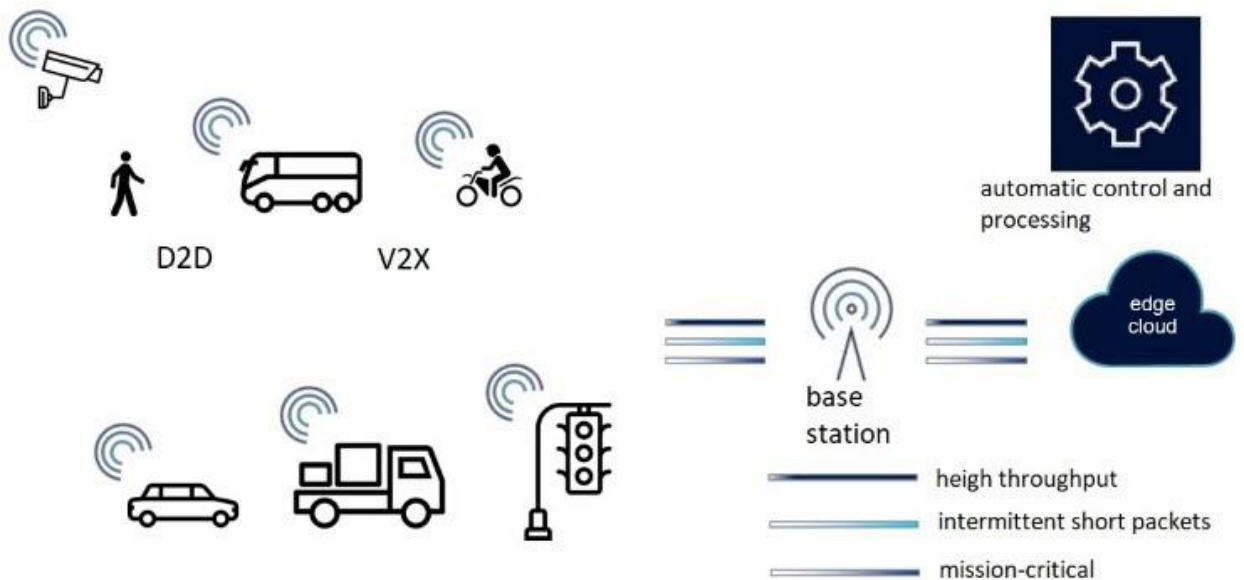
- Систем против закључавања точкова у случају кочења познатији као ABS (енг. *Antilock Braking System*). Како само име каже, овај систем је задужен да у случају наглог кочења обезбеди да не дође до закључавања точкова да би било могуће скретање у току кочења. Ово је веома значајан систем јер се уз помоћ њега обезбеђује да не дође до неконтролисаног проклизавања.
- Систем за упозоравање од чеоног судара, познатији као FCW (енгл. *Forward Collision Warning*) је систем који, на основу информација које добија са камера, LiDAR-a и у неким случајевима радара, шаље упозорење возачу да постоји могућност судара. Поред самог упозорења, овај систем може да се користи и као „окидач“ за хитно кочење.
- Систем за надгледање мртвих тачки (енгл. *Blind Spot Detection*) детектује покретне објекте које возач није у стању да види. Овај систем своју примену налази приликом скретања, претицања, паркирања, итд.
- Прилагодљиви темпомат (енгл. *Adaptive Cruise Control*), познатији као ACC, користи радар са сврхом да одржава сигурно удаљеност од возила испред. Овај систем је направљен да би се повећала сигурност тако што се, одржавајући сигурну удаљеност, отклања могућност да у случају непредвиђене ситуације возач не стигне да закочи.
- Електроничка контрола стабилности (енгл. *Electronic stability control*), често у литератури помињана као ESC преставља систем који побољшава стабилност возила тако што тежи да одржи најбољу могућу тракцију, односно лежање аутомобила на путу. Најзначајнија примена овог система је приликом улазака у оштрије кривине, јер се на оваквим местима најлакше губи стабилност. На *слици 5* се јасно може видети какав ефекат даје овај систем.



Слика 5 Понашање возила у кривини са и без система за електронску стабилизацију возила

- Систем за детекцију успаваности возача (енгл. *Driver Drowsiness Detection*). Како само име говори, овај систем надгледа возача и тежи да што је раније могуће препозна успаваност возача. У случају да систем препозна да возач даје знаке успаваности, покушава да звучним сигналимa разбуди возача и тако отклони опасност. Код најновијих верзија овог система, у случају да систем не успе да пробуди возача, возило се зауставља на сигурном месту и тиме се отклања свака опасност.

Набројани системи представљају само део свих система који данас чине једно сигурно возило. Сви горе наведени системи се ослањају на сензоре у аутомобилу. Постоје многи други системи који се ослањају на комуникацију возила са другим учесницима саобраћаја (енгл. *Vehicle2Vehicle*) или на комуникацију возила са инфраструктуром (енгл. *Vehicle2Everything*) уз употребу интернета (*Cloud* принцип).



Слика 6 Приказ система који се ослањају на комуникацију између учесника у саобраћају и инфраструктуре (V2V, V2X) уз коришћење Cloud-a [9]

Веома значајни системи су системи засновани на интеракцији човека и рачунара. Веома добар пример оваквих система је *Head-Up* екран (енгл. *Head-Up Display*) који се може видети на слици 7. Сврха овог екрана је да се пажња возача не скреће са пута, него да све неопходне информације за вожњу добија на екрану који се емитује на предњем стаклу. Најновије верзије ове врсте екрана донеле су иновацију у виду дигиталних ознака по путу који јасно и прецизно приказују када је могуће претицање, где се налази оштра кривина и још много других корисних ознака.



Слика 7 *Head-Up* екран

2.2 Процеси у развоју софтвера у аутомобилској индустрији

Развој аутомобила представља спој много процеса који се одвијају паралелно. Механички, електрични и софтверски системи, иако на први поглед потпуно независни, у данашњој аутомобилској индустрији не могу да се развијају независно без унапред строго

дефинисаних интерфејса. Постављају се јасно дефинисане спреге између ових система, из разлога да крајња интеграција може да се изврши једноставно и без већих проблема. Све ово наведено представља велики изазов, како из аспекта постојања различитих зависности између система, тако и из аспекта оптималног развоја у погледу брзине и квалитета крајњег производа.

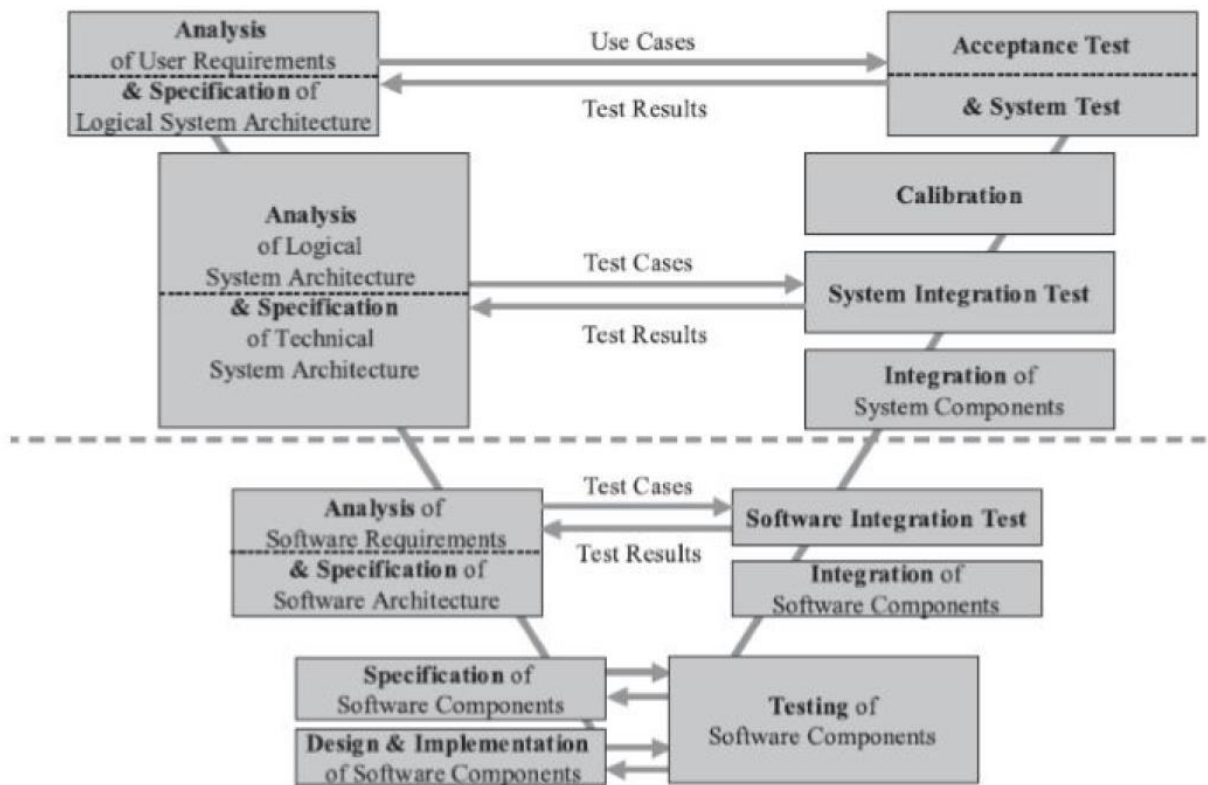
У возилима данашњице и будућности се велика већина функционалности извршава или контролише на нивоу софтвера. Па се из тога може закључити колико је горе поменута зависност између система јака. Сваки софтвер је неопходно тестирати до најситнијих детаља на хардверским платформама које ће бити коришћене. Није редак случај да се крене у развој софтвера и без произведеног хардвера, али се у том случају користе симулатори који веродостојно симулирају реалан хардвер који ће бити интегрисан у систем.

Данас се као најзначајнији приступи у развоју софтвера у аутомобилској индустрији намећу, са једне стране традиционални приступ који за основна начела узима *ASPICE* и *V-Model*, а са друге стране нова технологија намеће агилни приступ развоју софтвера.

2.2.1 Традиционални приступ развоју софтвера у аутомобилској индустрији (*ASPICE, V-Model*)

Традиционалан приступ развоју софтвера се кроз године примењивања показао веома добро. У корист томе говори и то да готово сви главни произвођачи аутомобилског софтвера користе *ASPICE* (*Automotive Software Process Improvement and Capability Determination*) стандард [10] и *V-Model*. Главна одлика оваквог приступа је то што се добија квалитетан и поуздан производ јер се подједнако велики акценат даје како на развој тако и на тестирање софтвера. *ASPICE*, како се из самог имена може закључити, служи како би се унапредили процеси за производњу софтвера и како би се у сваком тренутку знало до ког се нивоа квалитета стигло у развоју. Са друге стране, *V-Model* [11] се може описати као скуп основних процеса системског и софтверског инжењерства за развој софтвера у аутомобилској индустрији који покрива са једне стране сам развој, а са друге стране интеграцију и детаљно тестирање произведеног софтвера. Оно што је специфично код овог модела је то што је подељен на процесне кораке, који представљају независне целине у процесу развоја једног дела софтвера. Резултат сваког процесног корака је такође и улаз у следећи процесни корак и назива се артефакт. *Слика 8* даје јасан приказ *V-Model*-а. Први процесни корак код *V-Model*-а је анализа корисничких захтева и спецификација логичке архитектуре система. Јасно је да је улаз у први процесни корак детаљно описан жељени производ на високом нивоу апстракције. Наредни процесни корак је анализа логичке архитектуре система који је као артефакт добављен из претходног корака. Анализом

логичке архитектуре се добија спецификација техничке архитектуре система. Следећи корак јесте анализа софтверских захтева и као резултат се добија спецификација софтверске архитектуре. Једном када је добијена спецификација софтверске архитектуре креће се са спецификацијом софтверских компонената. Последњи корак у развоју је дизајнирање и имплементација свих софтверских компонената са свим неопходним функционалностима.



Слика 8 V-Model

Са Слике 8 јасно може да се закључи да леву страну V-Model-а прати десна страна на којој се налазе све врсте неопходних тестова и интеграција развијених компонената. Тестови се имплементирају од најнижих нивоа према вишим. Најнижи тестови у хијерархији јесу тестови софтверских компоненти познатији као *Unit Test*-ови. *Unit* тестирање служи да се потврди исправност најмањих независних делова софтвера, најчешће функција. Следећи у низу тестова су тестови интеграције софтвера. Они служе да провере да ли је изводљива интеграција развијених софтверских компоненти у целокупан систем. Преостали тестови се тичу тестирања системске архитектуре. Ту спадају тестови интеграције система, калибрације и тестови прихватљивости, познатији као *Acceptance Test*-ови.

Главна предност V-Model-а и ASPICE-а јесте двосмерна следљивост између процесних корака и артефаката и одговарајућих тестова. Сви процесни кораци имају своје одговарајуће тестове и двосмерна следљивост је присутна свуда. То практично значи да на сваком нивоу

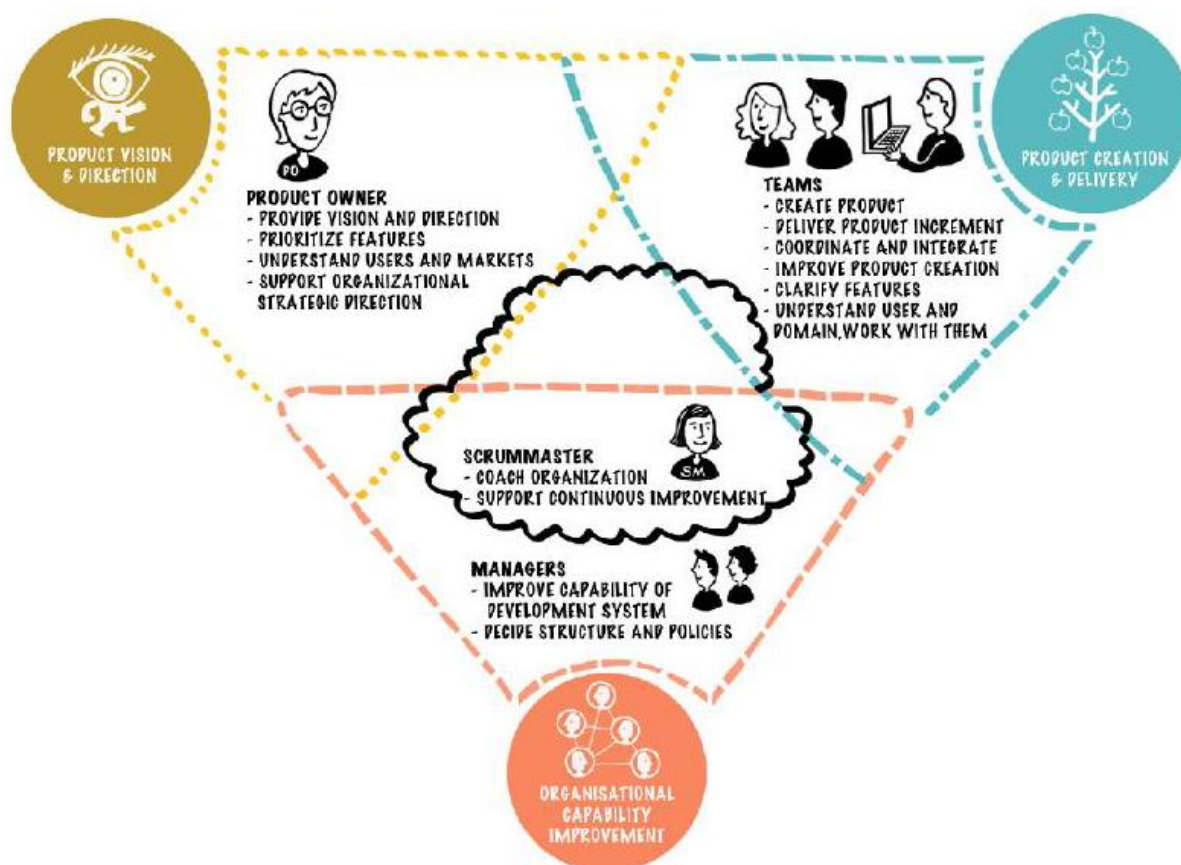
процеса у сваком тренутку постоје тестови који проверавају доследност зацртаном циљу. Са друге стране, највећа мана оваквог приступа је то што ако дође до промене корисничких захтева који представљају полазну тачку читавог процеса, долази до промене у свим процесним корацима. Оваква ситуација представља проблем како са временског аспекта, тако и са економског. Опште је познато да је развој аутомобилског софтвера подложен честим променама што узрокује да развој траје доста дуже и то резултира доста већим трошковима.

2.2.2 Агилни приступ развоју софтвера у аутомобилској индустрији (LeSS)

Агилни приступ развоју софтвера у аутомобилској индустрији добија на значају из разлога како би се отклонили највећи недостаци у класичном, традиционалном приступу. Претходно је поменуто да је највећи проблем код традиционалног приступа и *V-Model*-а то што у случају промене било ког корисничког захтева, комплетан процес трпи последице. Агилан проблем тежи да тај проблем отклони тако што један макропроцес дели на микропроцесе који се називају спринтови. Спринтови трају од једне до четири недеље и у оквиру једног спринта се јасно дефинише један или више задатака који треба да се ураде у том периоду. Један од тренутно најзаступљенијих модела агилног пословања јесте *Scrum*. *Scrum* подразумева итеративно решавање проблема односно развој софтвера кроз итеративне циклусе које зовемо Спринтови. Према унапред зацртаном великом циљу се иде корак по корак. Тимови који развијају софтвер по *Scrum*-у броје између три и девет чланова и као карактеристику имају флексибилност тима, што значи да су тимови сачињени од инжењера са широким спектром знања. Недостатак *Scrum*-а јесте примена на веће пројекте који броје више од једног тима. *LeSS* (Large Scale Scrum) [12] је методологија која успешно адаптира *Scrum* на пројекте који захтевају више од једног тима. Такође, постоји и *LeSS Hugh* који своју употребу налази на пројектима који броје више од осам тимова.

LeSS тежи да процесе начини доста једноставнијим у односу на традиционалан приступ. То се види на свим пољима, значајно мање улога постоји у процесима. Најзначајније улоге су *Product Owner* PO, функционални тимови, *Scrum Master* SM и муштерија (Слика 9). Улога PO-а је да вођење пројекта од његовог почетка па све до успешног краја, одређивање приоритета на пројекту (Тријажа *Product Backlog*-а), разумевање потреба кориснике и тржиште, итд. Одређивање приоритета је његова основна улога. У спрези са SM-има свих тимова и самим тимовима ради на приоритизацији задатака, односно одређивању мањих целина које функционални тимови реализују у оквиру сваког спринта. Састанак на коме се ово обавља назива се *Product Backlog Refinement*.

Функционални тим у оквиру једног спринта, заједно са својим *Scrum Master*-ом одржава три врсте састанака. Свакодневно се обавља дневни састанак (*Daily Meeting*) где сви чланови тима износе које задатке обављају. На почетку сваког спринта се врши планирање, на овом састанку се врши подела задатака између чланова тима. На крају спринта тим одржава састанак на коме се анализира спринт који је прошао (*Spring Retrospective*). Веома значајан догађај у сваком спринту представља састанак где функционални тим износи муштерији и РО-у шта је реализовано у оквиру протеклог спринта. Ово представља кључни детаљ у *Scrum* филозофији зато што се, на нивоу од једне до четири недеље, колико траје спринт, утврђује да ли развој иде у добром правцу. Не може да се деси случај да због ситне промене мора да дође до измена у целом пројекту, што је чест случај у традиционалном приступу развоја софтвера.



Слика 9 Улоге у оквиру LeSS-a [12]

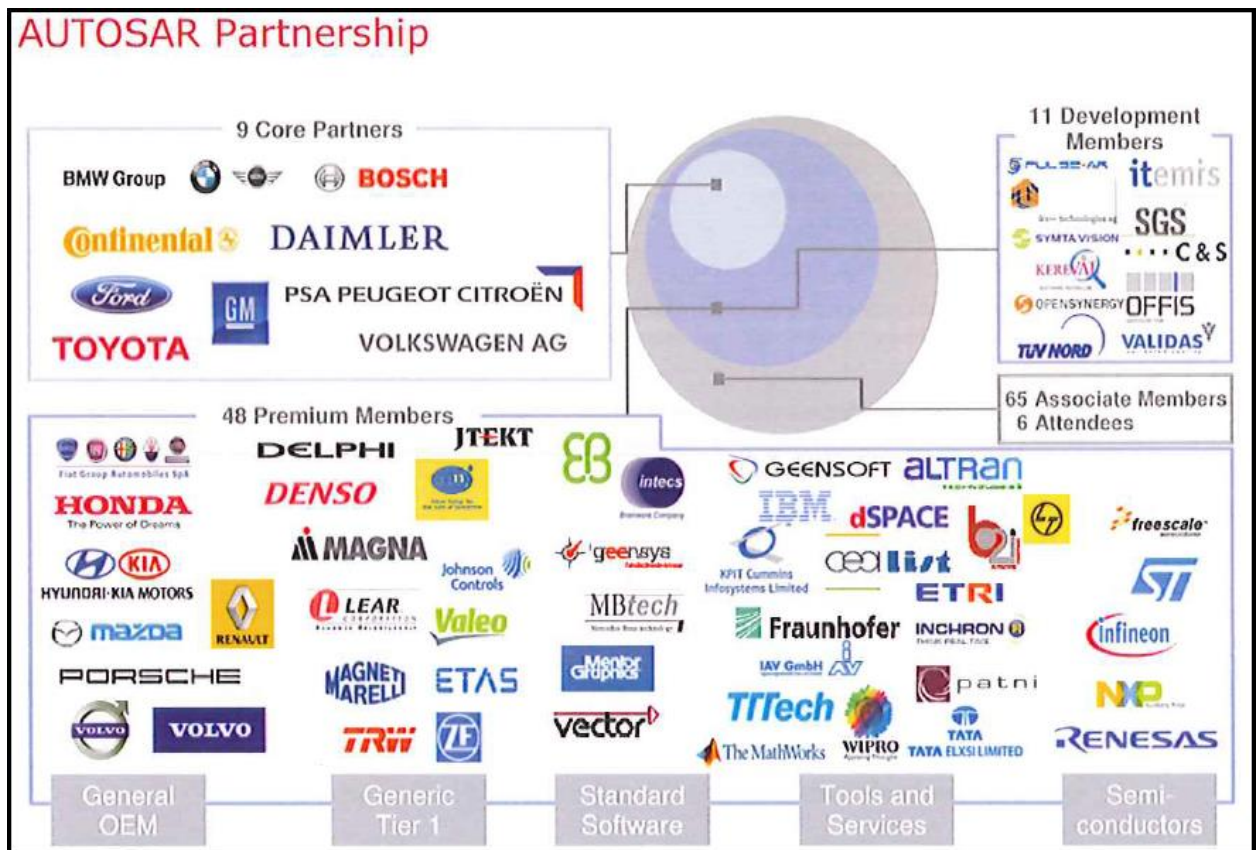
2.3 Софтверске платформе за развој аутономних возила

Да би се успешно реализовао систем за аутономну вожњу, потребно је уклопити много различитих система. Као и у свакој другој индустрији, стандарди који покривају област аутономне вожње проузроковали су да дође до усаглашавања OEM-ова како и на који начин да се направе платформе које ће подстаћи лакшу реализацију софтвера ове врсте. Такође,

један од главних разлога за настајање платформи за развој софтвера јесте брзина развоја ове гране индустрије и потреба за кодом који може да се изнова користи, без да се за сваки нови модел аутомобила мора писати потпуно нов код. Између осталог, тестирање ових софтвера је у реалности веома скупо. Једно аутономно возило неретко вреди близу пола милиона евра, стога је веома скупо користити реалне аутомобиле за тестирање софтвера који није довољно сигуран. Из тог разлога, велику експанзију доживљава посебна врста софтвера односно симулатора аутономне вожње. Они веома добро опонашају реалне ситуације у стварном саобраћају, такође је могуће исценирати неке ретке и веома ризичне ситуације који би у стварном свету биле веома опасне за тестирање са човеком у улози возача. Развој ових платформи је отишао на веома висок ниво апстракције у неким случајевима, па софтвери почињу да личе на видео игре и самим тим постају много интересантнији за коришћење и привлаче све више младих инжењера. У овом поглављу биће представљено неколико најзначајнијих платформи данашњице.

2.3.1 AUTOSAR Classic платформа

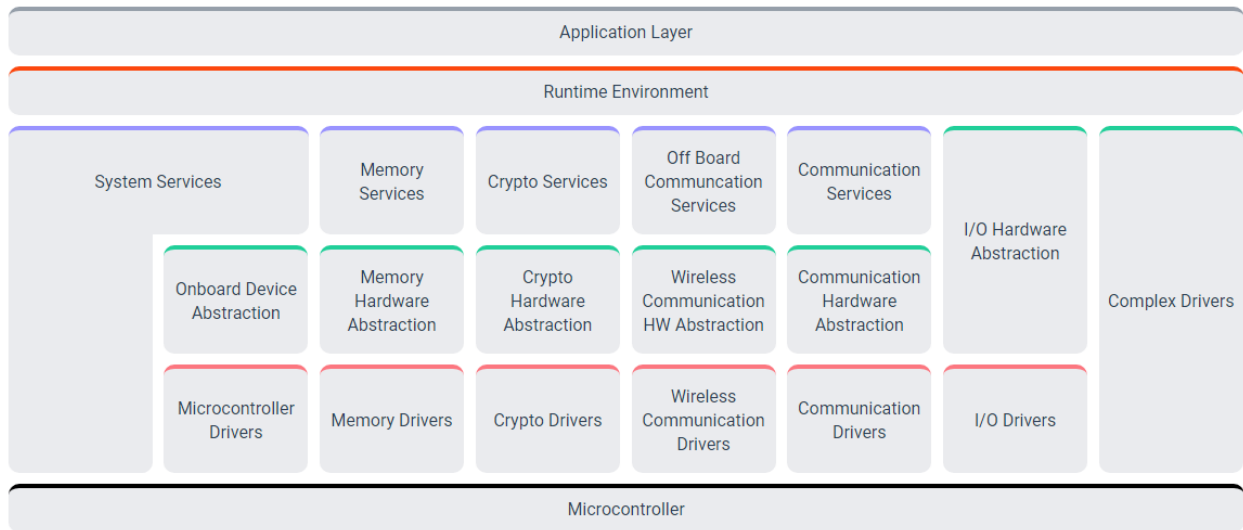
AUTOSAR представља стандардизовану архитектуру за развијање ECU-а. Настао је 2003. године као плод партнерства највећих светских компанија за производњу аутомобила и софтвера за њих. Поред велике већине највећих светских OEM-ова, AUTOSAR конзорцијуму се прикључило мноштво компанија из целог света. Све компаније које се налазе у овом конзорцијуму су подељене у неколико подгрупа (*слика 10*), од партнера од највећег значаја (*Core Partners*), па све до произвођача свих делова аутомобила (софтвер, машински склопови, полупроводници, платформе, итд.). Неколико разлога је било кључно за настанак оваквог вида партнерства. Циљ је био да се направи архитектура која ће гарантовати скалабилност софтвера и да једном написан софтвер може да се користи више пута, на неограничено много различитих платформи и возила. Поред овога, тежило се архитектури која ће бити у стању да испуни све сигурносне захтеве који чине значајан део стандарда у аутомобилској индустрији. Најзначајнија ствар коју је AUTOSAR унео у аутомобилску индустрију је стандардизација софтвера и ECU-ова, што је резултирало могућношћу сарадње између компанија, потенцијалном заједничком развоју свих елемената аутомобила. Такође, AUTOSAR гарантује подршку за софтвере током целог животног века софтвера.



Слика 10 AUTOSAR партнерство

Classic AUTOSAR платформа [13] је први стандард који је настао из AUTOSAR конзорцијума и тренутно најразвијенији. Заснива се на раду са микроконтролерима и представља стандард за ECU-ове који раде у реалном времену и који се користе у аутомобилима. На слици 11 је представљена архитектура Classic AUTOSAR платформе, јасно се може видети да постоје три главна слоја, односно нивоа апстракције који се ослањају на микроконтролере. Микроконтролери су у директној спреси са хардвером. Најнижи слој је слој базичног софтвера (*Basic Software - BSW*). Овај слој је подељен у три подслоја и слој на коме су описани драјвери који нису имплементирани по класичној AUTOSAR архитектури (*Complex Device Drivers - CDD*). У три подслоја спадају: слој за апстракцију микроконтролера, слој за апстракцију ECU-ова и слој сервиса. Сервиси су даље подељени на функционалне групе које представљају сервисе меморије, комуникације и самог система. Кључни концепт класичне платформе је виртуелна функционална магистрала (*Virtual Functional Bus - VFB*). Овај концепт представља апстракцију окружења за рад у реалном времену (*Runtime Environment - RTE*) који је други слој у AUTOSAR стеку. VFB се користи у случајевима када RTE још није развијен за одређене ECU-ове. Виртуелна магистрала је задужена како за комуникацију унутар једног ECU-а, тако и за међусобну комуникацију

између различитих ECU-a. Између осталог, концепт виртуелне магистрале је задужен за потпуну независност највишег, апликационог слоја, од хардвера и његову употребу.

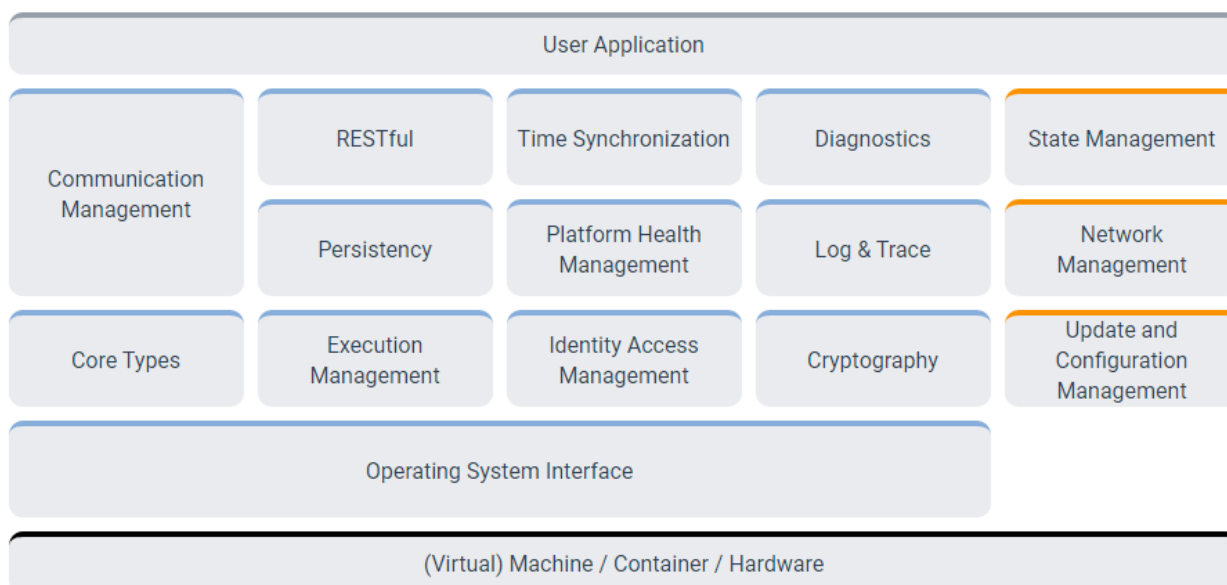


Слика 11 Архитектура Classic AUTOSAR платформе [13]

AUTOSAR тежи да специфицира све аспекте неопходне за интеграцију софтверских компоненти на ECU-ове, и да учини могућим интеграцију различитих ECU-ове на читаву комуникациону мрежу помоћу широког спектра магистрала (CAN, *FlexRay*, *Ethernet*, итд.)

2.3.2 AUTOSAR Adaptive платформа

Како је описано у претходном поглављу, *AUTOSAR Classic* платформа је заснована на раду са микроконтролерима који сами по себи имају одређена ограничења у погледу процесорске моћи. Самим тим, могућности које класична платформа нуди су ограничене. Примера ради, употреба напредних, захтевних, алгоритама као што су алгоритми за обраду слике и видеа базирани на неуронским мрежама и детекција објеката, линија и осталих значајних делова саобраћаја није изводљива на класичној платформи. Из тог разлога AUTOSAR конзорцијум представља нови стандард под називом *AUTOSAR Adaptive* [14], који за основни циљ има убрзање протока информација и повећање процесорске моћи у возилима најновијих генерација. Заснива се на концепту сервиса што резултира повећаном флексибилношћу система и, за разлику од *Classic AUTOSAR*-а, добија се погодност интеграције нових компоненти у систем, независно од стања у ком се систем налази. Адаптивна платформа, иако још увек у процесу настанка, има велики број корисника у свету развоја софтвера за аутомобиле, поготово у свету развоја аутономних возила. Разлог за то је горе поменуто повећање процесорске моћи, које је од круцијалног значаја за аутономна возила. Она се у потпуности ослањају на информације које долазе са великог броја сензора и чија је обрада у погледу процесорске моћи веома скупа.



Слика 12 Архитектура Adaptive AUTOSAR платформе [14]

AUTOSAR Adaptive платформа поседује скуп функционалних група, које заједно чине *ARA Runtime Environment*. На слици 12 ARA се налази између корисничких апликација и виртуалне машине, односно хардвера. ARA није оперативни систем, она је предвиђена интегрисана заједно са платформом која већ има постојећи оперативни систем. C++ је програмски језик који се користи на адаптивној платформи и то према *POSIX 51* стандарду. Свака функционална група представља независан скуп функционалности. Кратко ће бити описане неке од кључних функционалних група.

Communication Management је функционална група која има улога да управља комуникацијом сервиса и апликација, независно од протокола на основу ког су имплементирани. Ова функционална група представља једно решење међупроцесне комуникације (енгл. *Inter-Process Communication - IPC*) из разлога што по *POSIX 51* стандарду није дозвољена класична *IPC*.

Time Synchronization функционална група, како јој само име говори, служи за временско усклађивање између апликација и ECU-ова. Овај функционалност је веома значајна за праћење редоследа догађаја у систему, повезивање одређених догађаја или покретање догађаја у унапред одређеном временском периоду.

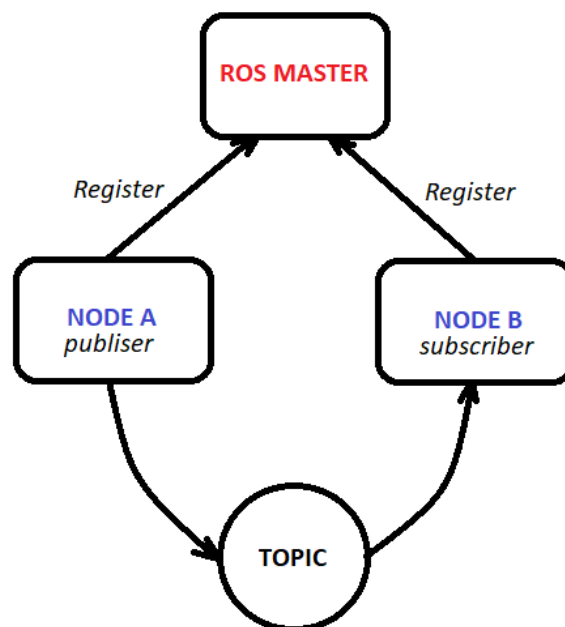
Execution Management функционална група у кооперацији са *State Management* функционалном групом има задужење да рукује апликацијама и системом.

2.3.3 ROS платформа

ROS (Robot Operating System) [15] представља софтверску платформу за креирање роботских система. Сачињена је од алата, библиотека и конвертора који имају заједнички

циљ развоја комплексних роботских система који могу да буду примењени на широк спектар роботски оријентисаних машина. Једну такву машину представља и аутономно возило. Развој роботизоване машине представља веома велики изазов из разлога што неки наизглед једноставни задаци за човека, машини представљају веома комплексне задатке. *ROS* је настао као платформа отвореног кода. Разлог за то је да би се окупила комуна стручњака из различитих области које су важне за роботску и да би се добила платформа која подједнако добро може да се примењује на широк спектар производа.

ROS структуре чине *ROS Master*, по потреби неограничен број чворова (енгл. *Node*) и комуникација између чворова. Главни чвор система је *ROS Master* чвор. Његова улога је регистрација и претплата свих нових чворова који се интегришу у систем. Ово се може тумачити као топологија звезде јер *ROS Master* чвор систем чини централизованим, што само по себи има ману да уколико дође до отказивања *Master* чвора, цео систем пада. Овај проблем је отклоњен у најновијим верзијама, такође уведена је и подршка за системе који раде у реалном времену. Следећа кључна компонента је чвор. Чвор се може тумачити као један независан процес. Сваки чвор има могућност комуникације са осталим чворовима помоћу емитовања сигнала, било то претплаћивањем на разне теме (енг. *Topic*), слањем података на разне теме или оба начина комбиновано.



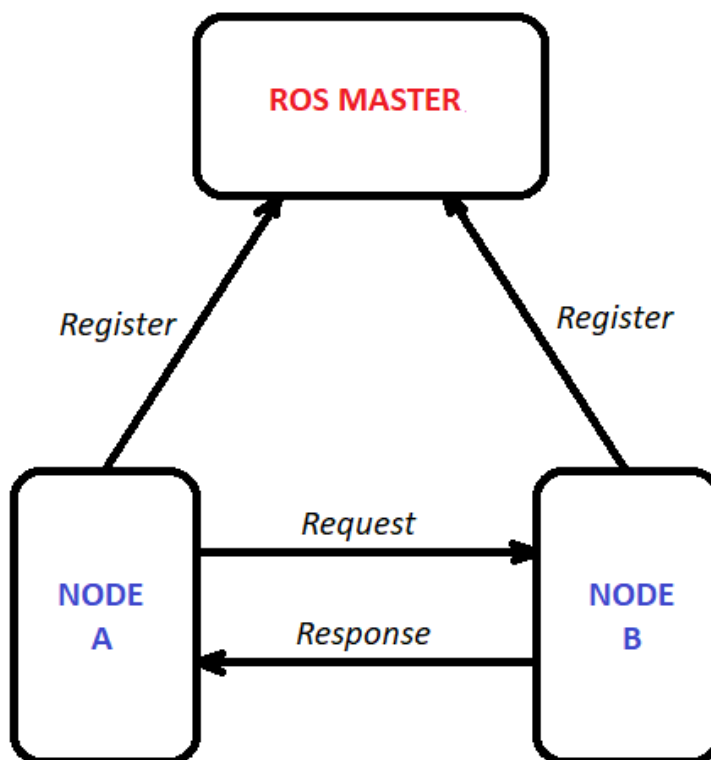
Слика 13 Приказ *Publish/Subscribe* комуникационог механизма на *ROS* платформи

Комуникација између чворова се одвија на два опште позната механизма:

1. *Publish/Subscribe* комуникациони механизам – Овај механизам подразумева постојање тема на које чворови или објављују поруке које се тичу те теме или су

преплаћени и примају све објављене поруке у вези те теме. Може се сматрати да овај вид комуникације представља асинхрони вид комуникације. Након што неки чвор објави нешто на одређену тему, сви чворови који су преплаћени на ту тему добијају обавештење о пристиглој новој поруци, односно информацији. Пример овакве комуникације може бити на тему температуре аутомобила, где један чвор врши мерење и објављује ту информацију на тему температуре, док су сви остали чворови којима је температура значајна из неког разлога преплаћени на ту тему. Значајно је напоменути да не постоје ограничења по броју чворова који могу бити преплаћени или објављивати на једну тему. Овај вид комуникације је приказан на *слици 13*.

2. *Request/Response* комуникациони механизам – Овај начин комуникације представља веродостојну имплементацију синхроне комуникације. Систем мирује све док један чвор не упути захтев другом чвору за достављање одређене информације или извршавање одређеног процеса. Након што други чвор прими и обради пристигао захтев, он прелази на извршавање функционалности и слање одговора. На *слици 14* се може видети поједностављен приказ овог вида комуникације.



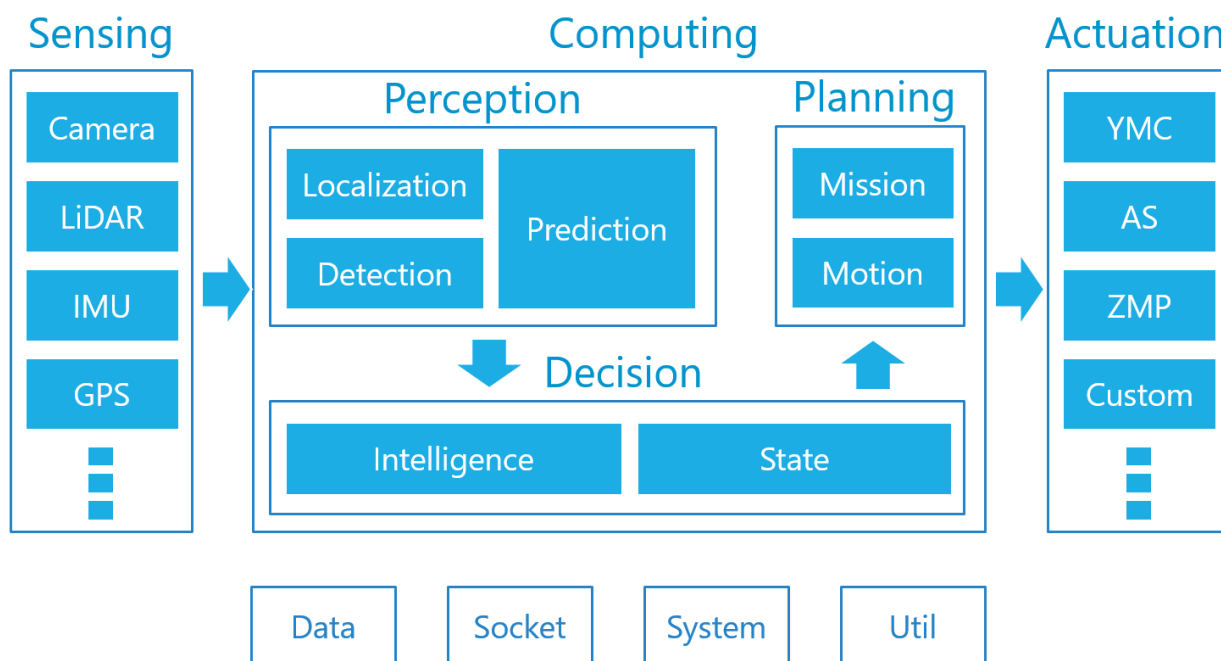
Слика 14 Приказ *Request/Response* комуникационог механизма на *ROS* платформи

Главни разлози употребе *ROS* платформе леже у једноставности имплементације великог броја алгоритама. Такође, важно је напоменути да су сви чворови, односно сви процеси,

који се имплементирају на *ROS* платформи потпуно независни од платформе. Ово даје могућност поновног искоришћења истог кода што је веома значајно јер се велика количина кода често понавља у овој грани индустрије. Веома значајна примена *ROS*-а је у прототиписању решења за аутономну вожњу. Разлог за то је тај што је веома ризично и скупо тестирати прототипе у реалним условима.

2.3.4 Autoware платформа

Autoware [16] представља непрофитну организацију која за циљ има да подржи пројекте аутономне вожње и да то буде отвореног кода. Ова организација представља синергију између индустријског развоја и академских научних истраживања. *Autoware* није уско оријентисана организација, постоји неколико различитих великих пројеката које развијају. За тему коју овај рад покрива, најзначајнији је *Autoware.AI* [17]. Овај пројекат представља први светски софтвер отвореног кода чије је поље од интереса аутономна вожња. Базиран је на *ROS* платформи која је описана у претходном поглављу и доступан је под *Apache 2.0* лиценцом.



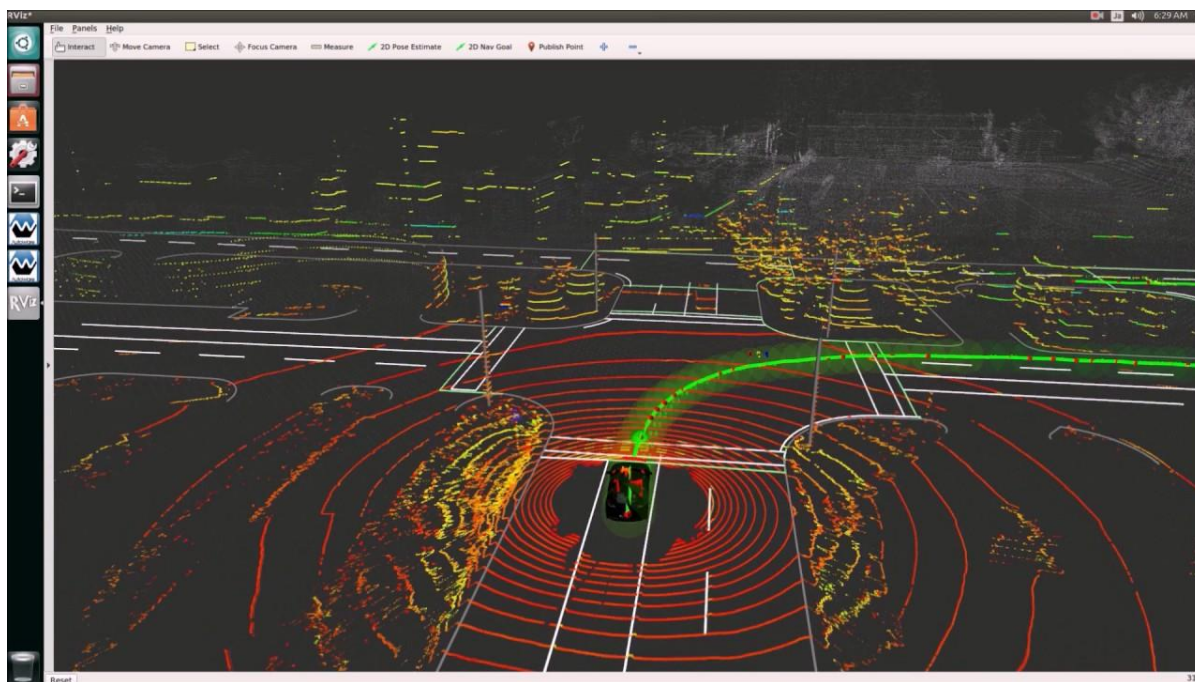
Слика 15 Архитектура *Autoware.AI* софтверске платформе

Овај софтвер се састоји из више модула који су представљени на слици 15. Први модул је модул за локализацију. Локализација се врши помоћу 3D мапа и помоћу *SLAM* (*Simultaneous Localization And Mapping*) [18] у комбинацији са *GNSS* (*Global Navigation Satellite System*) и *IMU* (*Inertial Measurement Unit*) који представља јединицу за прорачун инерције.

Следећи модул, уједно и модул који је највише коришћен у истраживању за овај рад је модул за детекцију. Базира се на употреби камера и *LIDAR*-а и помоћу алгоритама за комбинацију ова два сензора и машинског учења успешно детектује објекте, препреке и слободне зоне на коловозу.

Модули за предикцију и планирање је базиран на пробабилистичкој роботички и на системима базираним на правилима (енгл. *Rule-Based Systems*). Такође, као и претходни модул, делом се ослања на употребу машинског учења и неуронских мрежа. Планирање се извршава након што је предикција већ урађена. Ова два модула су директно спрегнута помоћу блока за одлуку. Унутар тог блока се најчешће на основу вештачке интелигенције доносе одлуке који је следећи потез возила.

Излаз из *Autoware* платформе је актуација, односно добија се податак о брзини и угаоној брзини јер се уз помоћ ове две величине може у потпуности описати кретање возила.



Слика 16 *RViz* – Алат за визуелизацију сензора из *Autoware*-а

Веома значајан алат за употребу *Autoware*-а је *RViz* [19]. Уз помоћ њега је могућа визуелизација свих сензора које *Autoware* користи. На слици 16 је приказан тај алат. Црвени концентрични кругови представљају *LIDAR* и јасно се могу видети препреке које су детектоване уз помоћ њега. Зелена линија представља испланирану путању. Уз помоћ *RViz*-а могућности су веома широке и од велике је помоћи за тестирање имплементираних решења. Што се тиче решења које је покривено у овом раду, *Rviz* је коришћен за тестирање одређивања дистанце помоћу *LIDAR*-а.

2.4 Функционални захтеви и функционална архитектура за аутономну вожњу

Појам функционалне архитектуре и функционалних захтева је дефинисан у *ISO26262* функционалном безбедносном стандарду [20]. У стандарду се налази под именом „функционални концепт“. Овај концепт је дефинисан као јасно специфициране жељене функционалности и њихову међусобну интеракцију са циљем постизања унапред одређеног понашања.

2.4.1 Функционални захтеви

Дефинисање скупа функционалних захтева представља веома значајан корак у целом процесу пројектовања једног аутономног возила. Без добро дефинисаних захтева није могуће успоставити функционалну архитектуру система. Аутономно возило можемо да посматрамо као потпуно аутоматизован систем који има сврху транспорта људи или предмета чија једина интеракција са човеком треба да буде унос одредишта од стране човека. Из овога закључујемо да је потребан веома велики ниво апстракције да би аутономна вожња била могућа без човека као директног учесника у саобраћају. Да би се произвео један поуздан систем аутономне вожње неопходно је разложити комплетну архитектуру на најситније компоненте и урадити детаљну анализу свих потенцијалних проблема. Главни разлог за то је што аутономно возило пре свега мора да буде апсолутно сигурно како за особе које га користе, тако и за околину. Такође, веома велики изазов представља то што да би једно аутономно возило било комплетно, оно мора да буде оспособљено за употребу у свим областима вожње. Од најједноставнијих операција као што је паркирање и вожња на аутопуту, па све до најнепредвидијег начина вожње, а то је градска вожња. Саобраћај који познајемо је уређен тако да људима буде најједноставније могуће. Ознаке на путу се постављају тако да човек сада по интуицији зна на шта да се упути у случају недоумица. Због комплетне инфраструктуре што већ постоји и начина тренутно саобраћај функционише, тежи се аутономним возилима који би имала веома сличан „начин размишљања“ као људи. Такође, није реално очекивати да аутономна возила истог тренутка по изласку на тржиште постану једина возила на путевима. Још дуго година након њихове премијере људи ће возити традиционална возила. Тако да се цео процес револуције саобраћаја мора пажљиво испланирати и веома је важно да захтеви који се стављају пред аутономно возило буду реални и у складу са тренутним стањем у саобраћају, наравно уз унапређења на свим пољима. Цео процес одређивања функционалних захтева и функционалне архитектуре је добро описан у [21]. Присвојен је опште познат приступ да се

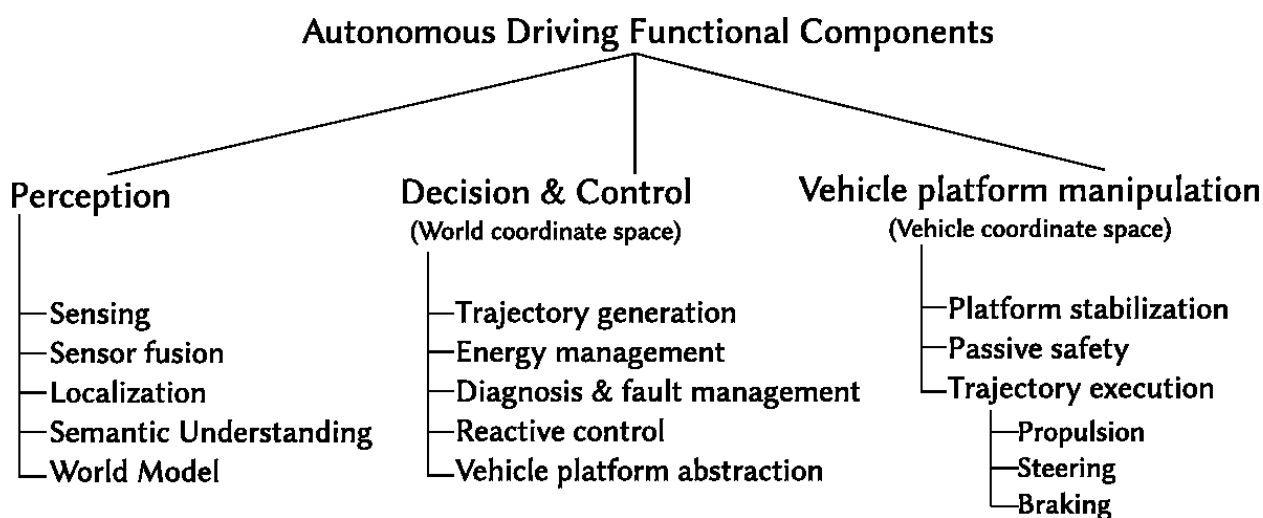
процес реализације аутономног возила посматра од горе према доле (енгл. *Top-Down approach*). Што значи да је пре свега битно да системске архитектуре буду свесне шта је то што једно аутономно возило мора да испуни и такође који се све проблеми могу појавити једном кад се возило произведе. Најзначајнији функционални захтеви које једно аутономно возило мора да испуњава су:

- **Управљање возилом** – Основна сврха аутономног возила јесте самостално управљање возилом. Како је раније наведено, човекова једина улога треба да буде уношење крајњег циља и евентуално руте у случају посебних захтева. Ово треба да буде обезбеђено помоћу интерфејса веома високог нивоа апстракције. Управљање возилом треба да буде прецизно, без наглих промена брзине или правца како би само време проведено у возњи било пријатно за путнике.
- **Остварење мисије** – Унос дестинације од стране путника за аутономно возило представља мисију која мора да буде извршена. Неопходно је да возило стигне од тачке А до тачке Б у оптималном времену.
- **Употреба мапа** – Како би било могуће испунити мисију, неопходно је испланирати путању којом ће се возило кретати. У сврху овога је потребно користити прецизне и ажурне мапе.
- **Локализација** – Како би возило могло да употребљава и прати мапе, мора у сваком моменту да буде свесно своје тренутне локације на глобалном нивоу. Константни развој данашње индустрије понудио је решење комуникације возила са комплетном саобраћајном инфраструктуром – *Vehicle2X (Vehicle to Everything)*. Возило, уз помоћ мапа и информација које добија од осталих учесника у саобраћају и инфраструктуре, постаје свесно загушења у саобраћају и пре него што се само увери у то. Ова функционалност може доста да оптимизује руту коју возило мора да прође до крајњег циља.
- **Перцепција околине** – Како само име говори, овај захтев, са становишта возила, представља надгледање околине возила и предвиђање могућих потеза осталих учесника у саобраћају. Највише се ослања на употребу сензора који су описани у претходним поглављима.
- **Кооперација са осталим учесницима у саобраћају** – Овај захтев се може тумачити као узајамна сарадња свих учесника у саобраћају. Ево возило је дужно да реагује на намере других учесника, али такође је дужно и да обавести друге о својим намерама. Ово може да се посматра из два угла. Посредно обавештавање осталих учесника, помоћу указивача правца на пример, или непосредно помоћу система који користе облак за међусобну комуникацију возила (*Vehicle to Vehicle – V2V*).

- **Безбедност у вожњи** – Безбедност у вожњи је представљена као један од главних разлога за идеју о аутономним возилима. Па се самим ти веома велика пажња мора посветити да возило буде беспрекорно сигурно за све учеснике у саобраћају. Поред традиционалних система за безбедност као што су појасеви и ваздушни јастуци, постоји велики број софтверских система који се баве сигурношћу.
- **Самонадгледање** – Возило мора да буде свесно свог стања у сваком тренутку из разлога да би знало тренутне могућности свих компоненти.

2.4.2 Функционалне компоненте

Функционална архитектура се може тумачити као спој „когнитивне интелигенције“ и основног платформског слоја аутономног возила, на коме се налази скуп основних функционалности. Рад [22] нуди детаљно описан скуп тих функционалности. Што се тиче слоја когнитивне интелигенције, он је задужен за перцепцију околине, генерисање путање и управљање платформским слојем са циљем да се изврше жељени покрети и да се испуни зацртан циљ.



Слика 17 Преглед функционалних компоненти у систему за аутономну вожњу

Слика 17 нуди преглед функционалних компоненти код аутономних возила. Функционалне компоненте представљају основне градивне јединице функционалне архитектуре која ће бити описана у наставку. Све функционалне компоненте могу да се сврстају у једну од три основне категорије: перцепција, доношење одлука и контрола возила и управљање, односно манипулација возилом. Све категорије сачињене су од неколико компоненти и свака компонента појединачно представља један значајан сегмент у реализацији аутономног возила.

2.4.2.1 Перцепција

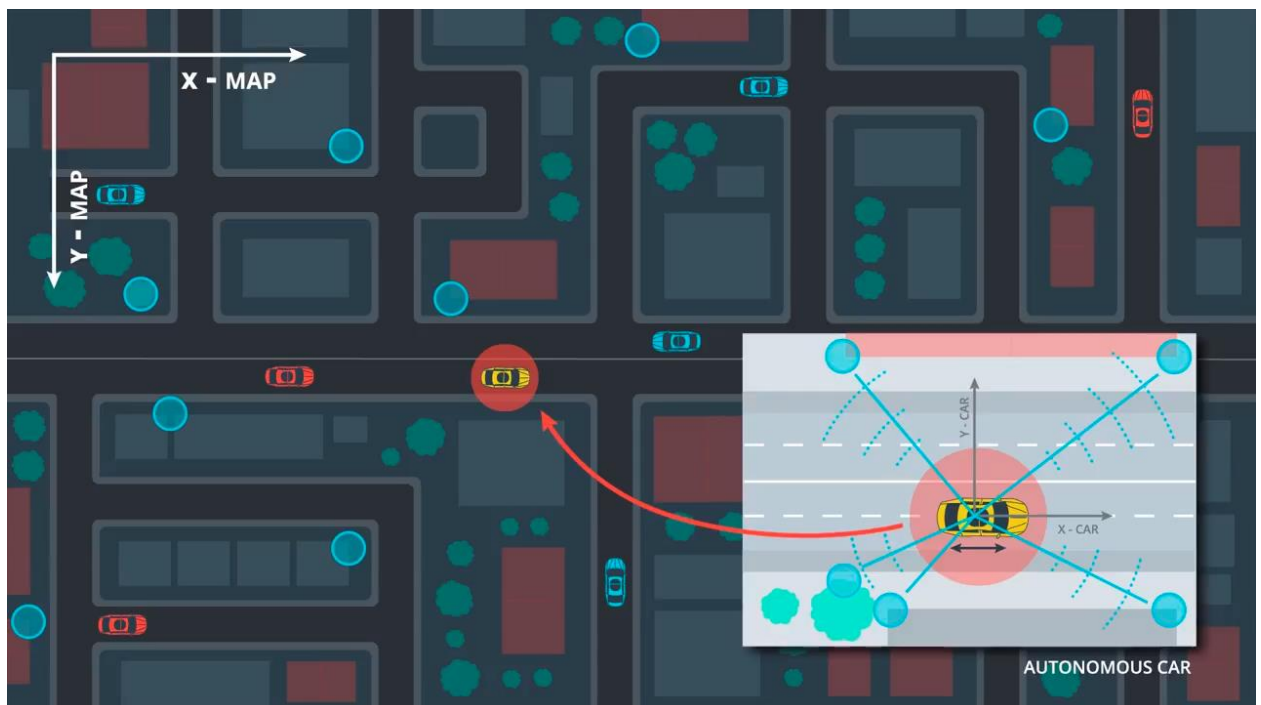
Прва категорија функционалних компоненти јесте перцепција. Перцепција се може описати као одређивање просторних и временских односа између возила и статичких и динамичких објеката у околини возила. Основна улога ове категорије функционалних компоненти је да „произведе“ модел света на основу информација које добија са сензора и да одреди све могућности за кретање.

Прва компонента која се налази у овој категорији је компонента задужена за добављање информација са сензора. Ова компонента даје улазне податке целом систему аутономне вожње. Постоје две основне врсте сензора који се користе у аутономним возилима. Први су сензори који мере стање околине и неопходни су за перцепцију понашања динамичких објеката који се налазе у непосредној близини возила. Ови сензори називају се сензорима за екстерна мерења, ту спадају камере, *LIDAR*-и, радари, итд. Друга врста сензора су сензори за интерна мерења. Њихова улога је да проверавају стање самог возила, нивое разних течности у возилу, притисак, температуру, итд. Основне информације о најзаступљенијим врстама сензора у аутономним возилима се могу пронаћи у поглављу 2.1.1. Нове генерације сензора у себи садрже и специјализоване алгоритме за обраду слике и видеа, који раде предобраду и ове врсте сензора се називају паметни сензори (енгл. *Smart Sensing*). Овакав приступ значајно може да уштеди време које је потребно једном *ECU* да обради све пристигле податке јер овако добија већ обрађене слике.

Наредна компонента која сачињава категорију перцепције је фузију података који се добављају помоћу сензора (енгл. *Sensor Fusion*). Комбиновањем података који се добијају са више различитих сензора добија се систем који је робуснији, тачнији и поузданији за употребу. Ово је веома значајно јер аутономно возило представља високоризичан систем у коме не сме ништа да буде препуштено случају. Фузија сензора, гледано из математичке перспективе, се ослања на употребу алата као што је специјални случај *Bias* филтера, *Kalman* филтер [24]. Ови алгоритми служе за одређивање реалног стања посматраних променљивих у прошлом времену, садашњости и будућности (предиктивно мерење). Такође, одређују расподелу вероватноће тренутног стања на основу измерених података о кретању. Основне информације о фузији сензора су дате у поглављу 2.1.2.

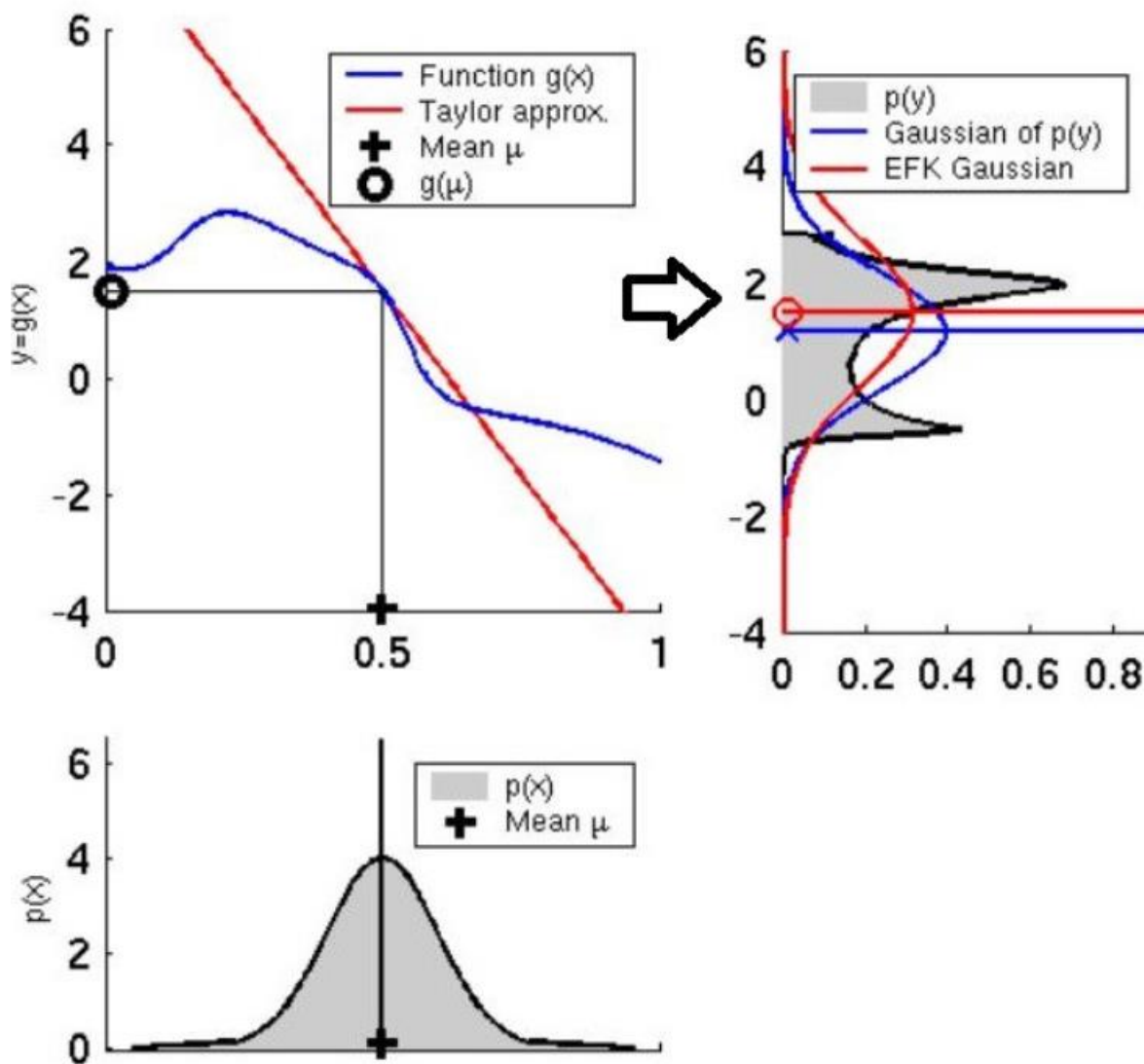
Наредна компонента је компонента задужена за локализацију и мапирање (енгл. *Localization and Mapping*). Сам процес локализације представља успостављање просторних односа између возила и стационарних објеката и може да се сврста међу најкомплексније функционалне компоненте. Да би било изводљиво аутономно кретање, возило у сваком тренутку мора да зна где се налази у односу на пут, возну траку и осталу

инфраструктуру значајну за вожњу. Што се мапирања тиче, мапирање представља успостављање просторних односа између стационарних инфраструктурних објеката. Неки од значајних система за локализацију и мапирање су већ поменути системи за међусобну комуникацију између возила V2V и системи за комуникацију возила и инфраструктуре и осталих објеката V2X. Локализација се може вршити на макро, мезо и микро нивоима. Макро локализација се може посматрати кроз системе за навигацију, где са одређеном грешком имамо приказ тренутке локације возила у односу на мапу. Овај тип локализације је користан као помоћ возачу али никако није поуздан за системе аутономне вожње. За системе којима се бави овај рад најзначајнија је микролокализација која је приказана на слици 18. Она представља одређивање односа возила са непосредном близином са високом тачношћу.



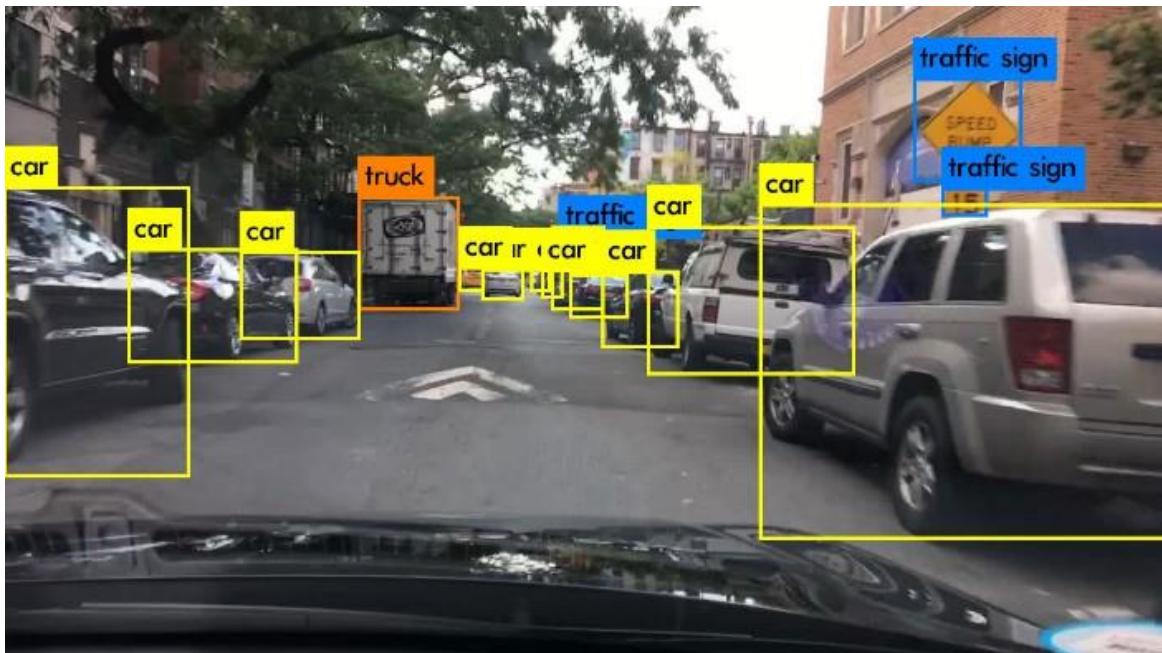
Слика 18 Приказ локализације его возила на микро нивоу [19]

Приликом објашњавања локализације и мапирања, битно је споменути проширени Калманов филтер (енгл. *Extended Kalman Filter*). Ова врста филтера се користи у случајевима када модели нису линеарни, јер се у том случају добијају расподеле које немају гаусовске карактеристике. Овакав случај се јавља у аутономној вожњи. Оваква врста проблема се решава помоћу локалне линеаризације функције модела. Користи се апроксимација која се ослања на Тејлоров ред. Детаљан опис проширеног Калмановог филтера се може наћи на [25], са свим неопходним сликама и математичким формулама за потпуно разумевање алгорита.



Слика 19 Локална линеаризација која се примењује у проширеном Калмановом филтеру [25]

Компонента за семантичку анализу представља компоненту где се више систем не бави мерењем већ се прелази на семантичко разумевање сцене и стварање представе тачног стања околине. У овај корак спада детекција свих учесника у саобраћају (пешака, свих врста возила, инфраструктурних објеката, итд.), детекција саобраћајних знакова и семафора, итд. На основу детекција које се добављају врши се предикција понашања динамичких објеката. Тренутно најзаступљенији алгоритми за семантичку анализу се заснивају на вештачкој интелигенцији, конкретно на конволутивним неуронским мрежама *CNN*. Алгоритам који представља најоптималнији начин детекције у погледу тачности и рада у реалном времену, заснован на неуронским мрежама, је *YOLO* алгоритам [26]. *YOLO* алгоритам је способан да у реалном времену детектује, класификује и локализује објекат у сцени. На слици 20 се може видети излаз из треће генерације *YOLO* алгоритма.



Слика 20 Излаз из YOLOv3 алгоритма

Последња компонента која спада у категорију перцепције је компонента задужена за прављење модела света. Модел света може бити пасива и активан. Пасиван модел се употребљава при прављењу слојевитих мапа. Конкретно, пасивни модел се користи за најнижи слој односно статичку мапу. Док активан модел у себи садржи претходно описану семантичку анализу и самим тим се добијају динамичке мапе са могућношћу предикције. Сама компонента треба да произведе модел онога што аутономно возило види око себе. Помоћу свих компонената које су претходно поменуте, ова компонента прави, може се рећи, излаз из система за перцепцију.

2.4.2.2 Одлучивање и контрола

Планирање и контрола је друга категорија функционалних компоненти. Планирање може да се тумачи као доношење најоптималнијих одлука, са циљем да возило изврши зацртан циљ. Контрола, са друге стране представља управљање возилом као целином, решавање непредвиђених ситуација, итд. Ова категорија се састоји од генерисања трајекторије којом би возило требало да се креће, управљања оптималног утрошка енергије, система за дијагностику и управљање грешкама. Између осталог, у овој категорији се налази и компонента која се бави реактивном контролом која је веома значајна за манипулисање возилом у случају непредвиђених ситуација.

Компонента за генерисање трајекторије којом возило може да се креће представља веома комплексан систем који има задужење да пронађе трајекторију, односно путању сигурну за кретање возила. То подразумева да у односу на циљ који возило треба да испуни,

генерисана трајекторија треба да буде оптимална и без препрека. Такође, генерисање трајекторије не представља само избор путање на основу циља који возило треба да испуни. Већ се у обзир мора узети и тип возила, проходност разних терена, саобраћајна ограничења (нпр. Пут где теретна возила немају право пролаза), итд. Са становишта софтвера и аутономне вожње трајекторија представља скуп тачака које ево возило треба што тачније да прати помоћу алгоритама који су специјализовани за праћење зацртане путање. Један од најзаступљенијих алгоритама за праћење путање је *Pure Pursuit* алгоритам [27]. Логика овог алгоритма је да се тражи најближа следећа тачка која означава путању и након проналажења извршава се интерполација. Разлог за интерполацију је да би се избегли нагли покрети возила. Крај алгоритма означава стизање до циља.

Компонента за управљање енергијом има задужење да на најоптималнији начин енергијом снабдева све системе у аутомобилу. У аутомобилима новијих генерација велика већина компонената је аутоматизована, односно напаја се неком врстом енергије. Из тог разлога је веома битно да постоји оптималан утрошак енергије.

Дијагностика и руковање грешкама је још једна компонента која припада категорији за одлучивање и контролу. Системи за дијагностику имају задатак да прате стање комплетног аутомобила и да у случају било каквог проблема. Прате се како хардверске тако и софтверске компоненте. Такође, контролишу се и токови података кроз све магистрале. Да би се прецизно означили проблеми до којих дође на возилу користе се дијагностички кодови за проблеме (енг. *Diagnostic Trouble Code - DTC*). Сваки код означава једну специфичну проблематичну ситуацију. Овај вид праћења проблема у аутомобилу је направио, може се рећи, „малу револуцију“ и у контроли и у сервисирању возила. Дијагностика нуди могућност да се веома једноставно и брзо открију сви проблеми на возилу и то на веома високом нивоу. Добијају се информације у којим тачно ситуацијама долази до проблема и на ком *ECU* се проблем јавио. Овакво решење је у великој мери олакшало контролу и праћење стања аутомобила. Дијагностика нуди велике могућности али то представља посебну грану истраживања.

Компонента задужена за реактивну контролу има задатак да у случају непредвиђених ситуација обезбеди брзу реакцију како би се избегле несреће. Један од система који спада у ову компоненту је систем за хитно кочење (енгл. *Emergency braking*). Важно је напоменути да се системи који сачињавају ову компоненту извршавају у паралели са номиналним системом. У случају да дође до непредвиђене ситуације, компонента за реактивну контролу постаје компонента нултог приоритета, не би ли се учинило све да се отклони потенцијални ризик од катастрофе. Овакав тип компоненти се обично састоје од затворене петље „мери-планирај-делуј“ и она код компоненти за реактивну контролу има доста краће трајање у

поређењу са осталим компонентама из система. Овакви системи обично прате информације које долазе са неколико сензора и на основу мерења делују. Као добар пример може да послужи нагло истрчавање пешака испред возила. Пешак се помоћу камере или *LIDAR*-а детектује и на основу ових детекција следује планирање које мора да буде веома брзо. Последња операција је деловање, односно манипулација наглог заустављања возила или евентуалног заобилажења препреке, уколико је то испланирано. Такође, у случају да је потребно постићи одређен *ASIL* [28] ниво, компоненте за реактивну контролу могу да послуже као редундантне мере сигурности. Ово је неопходно једино у случају да компоненте за генерисање трајекторије и перцепцију немају довољно брзу реакцију у критичним ситуацијама.

2.4.2.3 Управљање (манипулација) возилом

Последња категорија функционалних компоненти се састоји из компоненти за стабилизацију платформе, извршење трајекторије и компонента за пасивну безбедност. Наредбе које долазе из фазе планирања, ове компоненте треба да изврше. На нивоу ових компоненти долази до апстракције принципа функционисања система за актуацију. Поред тога што се компоненте ове категорије користе за управљање самим возилом, значајно је рећи да им је један од основних задатака да стабилизују платформу у току вожње.

Прва компонента која се помиње у контексту ове категорије је компонента задужена за стабилизацију платформе. Задатак ове компоненте је да у току вожње обезбеди стабилно и сигурно управљање, тако што ће контролисати целокупну платформу. Стабилизација платформе је уско повезана са *ADAS* системима као што су систем за електронску контролу проклизавања *ECS* и систем који не дозвољава блокирање кочница *ABS*. Као што само име каже *ECS* има улогу да у сваком тренутку обезбеди највећу могућу тракцију, односно да се побрине да сви точкови имају контакт са коловозом. Са друге стране, *ABS* служи да у случају наглог кочења не дође до блокирања точкова и самим тим губљења контроле над возилом. Ови системи и још неколико значајних *ADAS* система су детаљније описани у поглављу 2.1.3. Важно је још напоменути да неоправдани захтеви за кретање возила, који долазе од стране модула који планира трајекторију, могу бити одбачени ради безбедности самог возила.

Наредна компонента у овој категорији је компонента за извршење испланиране трајекторије. Како је раније поменуто, трајекторија у нашем случају је представљена као скуп тачака на путу које представљају одредишта која возило треба да достигне у одређеним временским тренуцима. Механизми ове компоненте се заснивају на контролисању две врсте убрзања. Прво је дужинско (енгл. *Longitudinal*) убрзање које је

задужено за контролисање брзине возила, односно успоравање. Дobar пример контроле дужинског убрзања је систем адаптивног темпомата АСС. Друго убрзање је бочно (енгл. *Lateral*). Манипулацијом ове врсте убрзања одређује се правац којим ће се возило кретати. Дobar пример контроле лонгитудиналног убрзања је система за држање возила у возној траци (енгл. *Lane keep assist*).

Компонента задужена за пасивну безбедност обухвата системе који се на основу информација о угрожености путника активирају, до тада мирују. Такви системи су ваздушни јастуци и сигурности појасеви. Најновији модели, у највишим класама аутомобила имају системе за активну безбедност, који нпр. у случају да детектују неизбежан бочни судар подижу аутомобил од 8 до 10 центиметара са сврхом да се заштите витални органи путника. Такође, још један систем за активну безбедност који се често користи је и систем за кочење у хитним случајевима (енгл. *Emergency braking*).

3. Решење

Ово поглавље нуди опис проблема употребе фузије сензора у систему за упозоравање од чеоног судара, чије је једно решење истражено у овом раду. Поред тога, детаљно је описано решење овог проблема и коришћени алгоритми.

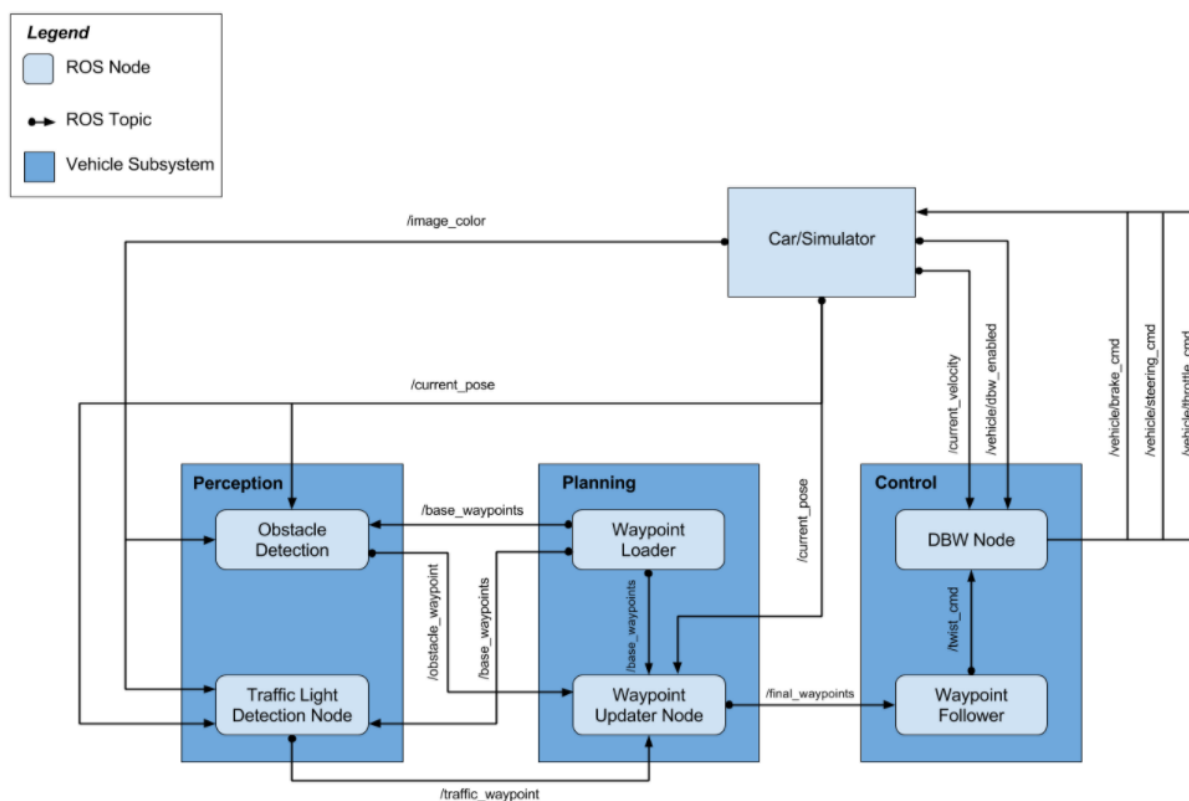
3.1 Поставка проблема

Употреба фузије сензора у алгоритмима за аутономну вожњу представља главну тему овог истраживања. Конкретније, алгоритам за упозоравање од чеоног судара који се ослања на информације које се допремају са камера и *LIDAR*-а.

Употреба фузије сензора није нова технологија у аутономној индустрији, већ дуго су у овој индустрији присутни сви сензори који су раније описани у раду. Тежи се већој и што је могуће прецизнијој употреби ових сензора. Такође, фузија сензора се појавила као решење које има све потребне услове да буде технологија која се савршено уклапа у аутономну вожњу. Пружа повећану тачност, сигурност и робусност алгоритма за аутономну вожњу.

Обзиром да постоји велики број истраживања и мањих пројеката који се баве аутономном вожњом, као костур за решење узети су пројекти [32] и [33]. На *слици 21* је приказана системска архитектура решења. Цео пројекат је реализован на *ROS* платформи. Јасно се може видети подела између перцепције, планирања и манипулације его возилом. Чвор (*ROS Node*) који је имплементиран спада у категорију перцепције и назван је „детекција препрека“ (енгл. *Obstacle Detection*). Потребно је било имплементирати решење које на основу слике и видео записа које добија са фронталне камере и „облака тачака“ (енгл. *Point cloud*) који се допрема са *LIDAR*-а детектује и локализује објекте који се налазе у истој возној траци у којој је и его возило. Основна идеја је била да се *LIDAR* користи као

„главни сензор“, док би камера служила као потврда онога што се добије са *LIDAR*-а. Пројекат на основу кога је вршено истраживање се ослањао на генерисање имагинарних тачака на путу (енгл. *Waypoint*) који его возило треба да прати, како би извршило задату трајекторију. Овај корак се извршава у планирању, у чвору који се назива „*Waypoint updater node*“. Да би генерисање било прецизно, систем мора да буде свестан да ли постоје неке препреке испред возила. Ту информацију добија преко *topic*-а *Obstacle_waypoint* где је наш чвор за детекцију препрека *publisher*. Након што се изврши генерисање *waypoint*-а, чвор из категорије контроле, на слици обележен као *Waypoint Follower* их користи. Он има задатак да прати *waypoint*-е које чвор *Waypoint Updater Node* објављује на *topic final_waypoint*.



Слика 21 Системска архитектура комплетног пројекта [32]

Са становишта имплементације, сви чворови су реализовани уз помоћ *Python* програмског језика. Овај програмски језик је изабран због једноставности саме имплементације. *ROS* нуди избор програмског језика између *Python*-а и Ц-а.

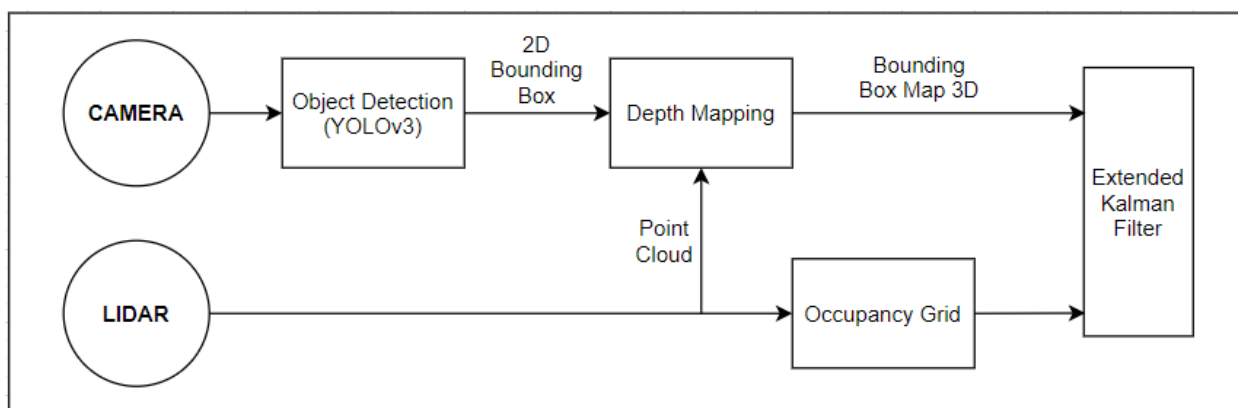
3.2 Реализација решења

Решење је реализовано из две целине. Прва целина се заснива на обради слике и видео садржаја који се допремају са фронталне камере, док је друга целина везана за обраду информација које се добијају са *LIDAR*-а. Цео алгоритам је реализован као *ROS* чвор који је „претплаћен“ (енгл. *Subscribe*) на две теме (енгл. *Topic*). Прва тема се тиче слике са камере и назива се „*Image Colour*“. На ову тему се објављују слике у *RGB* формату и наш алгоритам их користи као улазну информацију за обраду слике. Део изворног кода који извршава претплаћивање на ову тему се може видети испод.

```
def listener():
    rospy.init_node('listener', anonymous = True)
    camera_sub = rospy.Subscriber('carla/ego_vehicle/camera/rgb/front/image_color', Image, image_cb)

    rospy.spin()
```

Друга тема је тема везана за информације које долазе са *LIDAR*-а и она се назива „*Point Cloud*“. Формат „*Point Cloud*“ информације се може описати као тачка у простору, односно тачка која има три координате на основу којих се тачно зна њен положај.



Слика 22 Блок шема решења

На слици 22 је приказана блок шема алгоритма. Може се приметити да цела обрада има два канала. Улази у оба канала су раније објашњени. Први канал представља обраду слике.

Први блок у који улази слика је блок за детекцију објеката. У овом решењу је одабрано да се за детекцију објеката користи алгоритам који се заснива на вештачкој интелигенцији. Конкретно, коришћен је *YOLOv3* алгоритам [29] који је и раније помињан у раду. Разлози за то леже у брзини рада овог алгоритма. Његова главна предност јесте рад у реалном времену и задовољавајућа прецизност. У поређењу са претходним верзијама *YOLO* алгоритама, трећа верзија је постигла посебан напредак у случајевима детекције мањих објеката. Као излаз из овог блока добија се слика, идентична улазној, за исцртаним

дводимензионалним оквирима око детектованих објеката. Потврда исправности овог дела алгоритма је добијена уз помоћ *OpenCV* библиотеке коју *Python* нуди. Овај део кода се може видети испод:

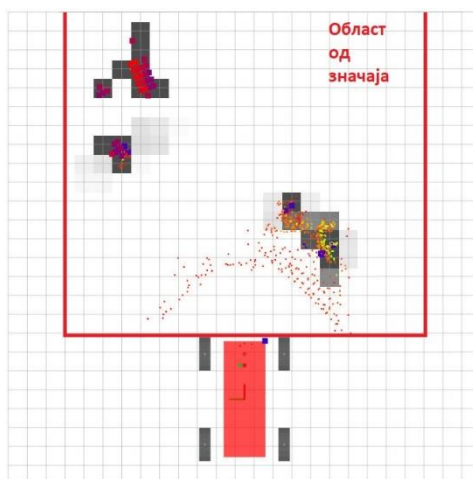
```
def image_cb(msg):  
    img = bridge.imgmsg_to_cv2(msg, "bgr8")  
    img_box = pipeline(img)  
    cv2.imshow('image',img_box)  
    cv2.waitKey(3)
```

Наредни блок је блок за одређивање удаљености објеката, односно мапирање дубине (енгл. *Depth Mapping*). Овај блок користи дводимензионалне оквире око објеката који су добијени у блоку за детекцију, а поред тога користи и „облаке тачака“ који се допремају са *LIDAR*-а. Задатак овог блока је да на основу ове две врсте информација направи тродимензионалне оквире око детектованих објеката (слика 23). Потребно је да се дода трећа димензија дводимензионалним оквирима око детектованих објеката, односно димензија дубине. Ова димензија уједно може да се тумачи и као удаљеност до објекта, односно препреке.



Слика 23 Тродимензионални оквир (енгл. *3D Bounding Box*)

Што се обраде података који су добијени помоћу *LIDAR*-а тиче, коришћен је алгоритам за прављење мапе окупираности (енгл. *Occupancy grid*). Ово је реализовано тако што је област од значаја (у нашем случају област испред возила) издељена на мања поља, тако да подсећа на шаховску таблу (слика 24). Следећи корак је да се броје тачке из облака тачака („Point Cloud“ који се добија од *LIDAR*-а) за свако поље појединачно. И у случају да се у неком пољу појави значајан број тачака (већи од унапред одређеног прага (енгл. *Threshold*)), сматра се да се у том пољу налази објекат, односно препрека. Два веома добра истраживања на тему мапе окупираности и њеној употреби у аутомобилској индустрији представљена су у радовима [30] и [31].



Слика 24 Илустрација мапе окупираности

Након што су добијени подаци о тродимензионалним мапама оквира око детектованих објеката и подаци о мапи окупираности у *ROI*, они улазе у блок у коме је реализован проширени Калманов филтер. Како је раније поменуто, овај алгоритам рачуна вероватноћу тренутног стања на основу низа мерења. Потребно је имати оваква алгоритам на крају јер је систем за аутономну вожњу веома нестабилан.

Последњи корак у целом систему је израчунавање озбиљности ситуације у случају да је препрека детектована. У обзир се узима брзина самог его возила и удаљеност до препрека. Такође, велику улогу у прорачуну игра и то да ли се препрека креће или стоји. На основу брзине его возила лако се рачуна дужина кочионог пута која се након тога пореди са удаљеношћу до препреке. У случају да је дужина кочионог пута дужа од удаљености до препреке, или да је критично мала разлика између те две дужине, шаље се упозорење да постоји опасност од чеоног судара.

4. Тестирање и евалуација

У овом поглављу ће првенствено бити кратко објашњен CARLA симулатор који је коришћен као главни алат за тестирање јер није било реално да се тестирање обавља у реалним условима. Такође, биће приказани резултати и евалуација решења кроз неколико тестних случајева.

4.1 CARLA симулатор

CARLA симулатор је симулатор отвореног кода намењен за истраживање и тестирање везано за аутономну вожњу. CARLA је развијена од нуле и специјализована је за тренирање, развој и валидацију решења која се користе у аутономним возилима. Важно је напоменути да је овај симулатор обезбедио средства као што су: урбани полигони, грађевине, возила која могу слободно да се додају у симулацију и као таква користе за разна истраживања.

Неке од најзначајнијих погодности које CARLA нуди су

- Флексибилан API – Корисник има потпуну слободу у погледу начина како жели да користи симулатор. Постоји могућност контролисања саме симулације, генерисања свих учесника у саобраћају, понашања учесника у саобраћају, мењања времена што може да буде веома корисно приликом тестирања неуронских мрежа, итд. На слици 25 се у доњем десном углу могу видети сви учесници у саобраћају који су релативно близу его возилу, а који су претходно уз помоћ скрипте, коју нуди сам симулатор, убачени у симулацију.
- Додавање свих врста сензора – Корисник има могућност додавања свих врста сензора на своје его возило. Ово укључује камере, LIDAR-е, радаре, GPS, итд.

- Генерисање мапа – Постоји могућност генерисања мапа, тако да се могу правити конкретне ситуације у саобраћају које су значајне за одређена тестирања. (намерно изазивање судара, непредвиђене ситуације, итд.)
- Интеграција са ROS-ом – Веома значајна могућност овог симулатора је то што постоји могућност интеграције са ROS софтверским стеком помоћу ROS-bridge [34].



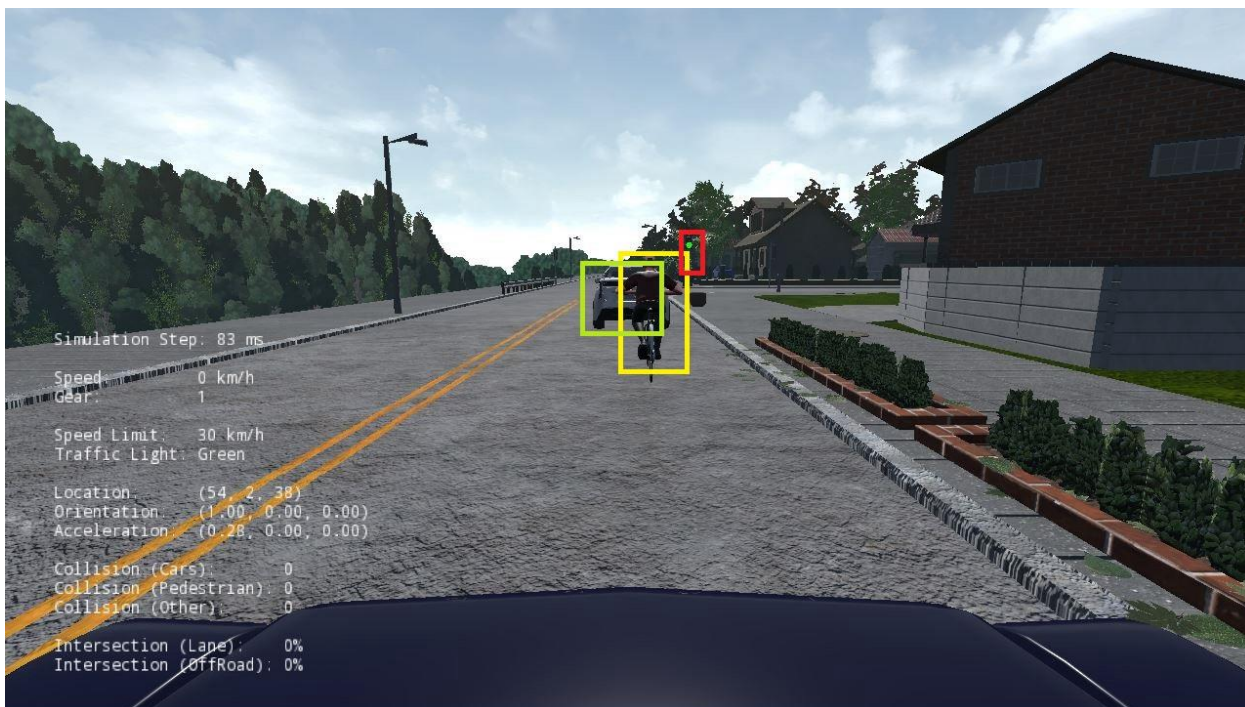
Слика 25 CARLA симулатор

Код CARLA симулатора је могуће управљати его возилом мануелно али такође се може пустити симулација да сама вози возило и да се само посматра дешавање. На слици 25 се може видети симулатор са его возилом и осталим учесницима у саобраћају. Поред овога, са леве стране се могу видети неке од значајних величина као што су: брзина возила, употреба кочница, смер кретања возила, и многе друге.

4.2 Тестирање решења

Тестирање је вршено помоћу два алата у зависности од дела алгоритма које је тестирано. Што се тиче тестирања дела алгоритма који се бави обрадом слике са камере, коришћен је CARLA симулатор.. Алгоритам је успешно обрађивао преко двадесет слика у секунди. На основу овога може да се закључи да алгоритам успешно извршава обраду у реалном времену. Поред рада у реалном времену, тестирана је и тачност алгоритма. У симулатору су додати учесници у саобраћају (аутомобили, пешаци, бициклисти) који су

успешно детектовани на већини слика. Добијени резултати се могу видети на *слици 26*. Може се видети да је алгоритам успешно детектовао бицикл и аутомобил у својој траци. Такође, успешно је детектован и семафор. На слици се такође може видети да није дошло до судара (енгл. *Collision*). Ова информација се налази на доњем левом углу у симулатору и веома је корисна за овај тип тестирања.



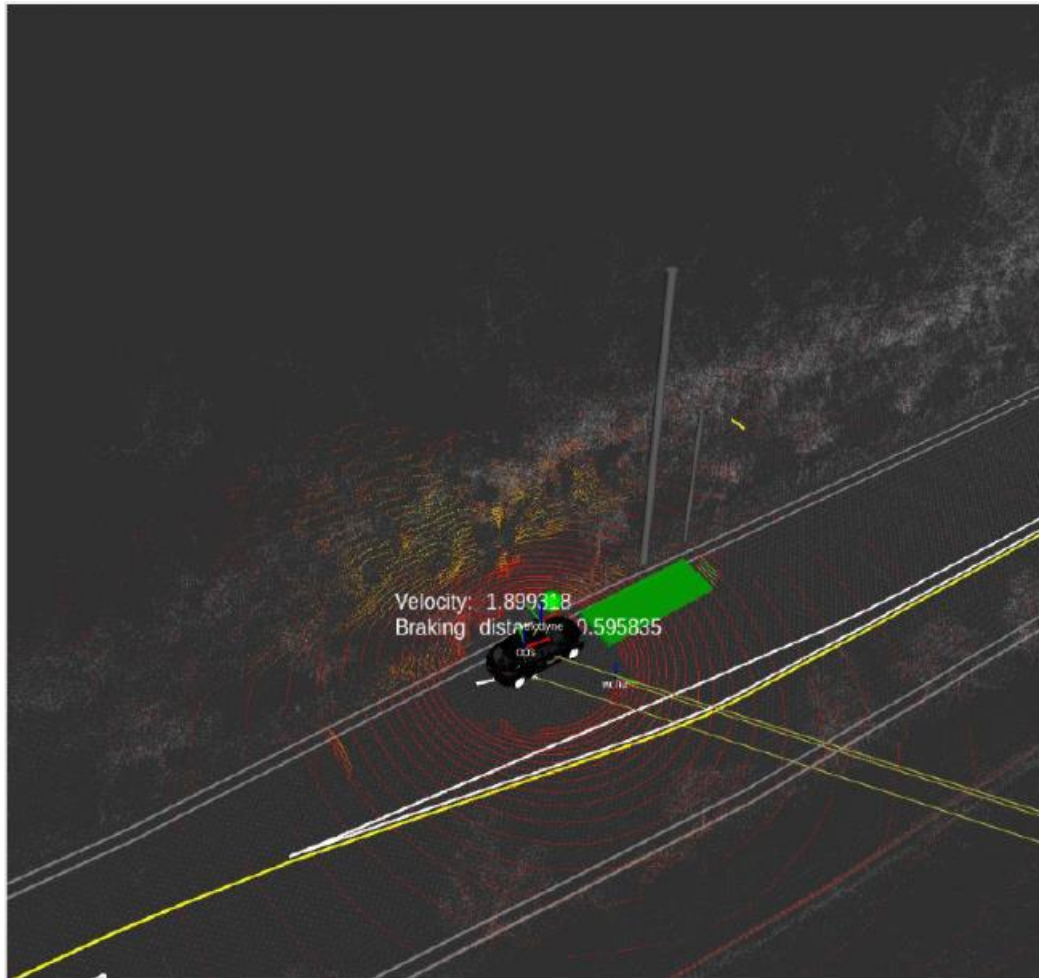
Слика 26 Резултат алгоритма за детекцију препрека приказан у CARLA симулатору

Како је раније поменуто, CARLA симулатор нуди подршку за динамичко време. Тако да су покривени тестни случајеви када је време ведро-сунчано, кишовито, сумрак и магла. Слика 27. показује ситуације различитог времена у симулатору. У већини случајева алгоритам за детекцију се показао веома добро, осим у случају кише, када је видљивост била видно смањена.



Слика 27 Тестирање алгоритма у различитим временским условима. Ведро време(лево), сумрак (десно)

Што се тиче дела решења које се бави обрадом информација које су добијене са *LIDAR*-а, оно је тестирано уз помоћ *rViz* алата, који пружа визуелни приказ зрака које емитује *LIDAR* и исто тако показује где тачно алгоритам препознаје препреке. На слици 28 је приказан резултат који даје имплементирани алгоритам за прављење мапе окупираности. Може се видети да је испред аутомобила зелена трака која симболише да испред возила нема препрека и да је кочиони пут мањи од удаљености до следеће препреке.



Слика 28 Приказ резултата алгоритма који на основу очитавања са *LIDAR*-а одређује да ли се испред аутомобила налази препрека.

5. Закључак

У овом раду приказано је истраживање везано за развој модерних апликација у области аутомобилске индустрије. Описани су најзначајнији процеси за развој аутономних возила. Поред тога, објашњене су платформе које су најзаступљеније данас. Између осталог објашњени су и најзначајнији концепти на којима се заснивају аутономна возила, функционална архитектура, захтеви и компоненте, у чијем контексту је развијено решење на које се овај рад фокусира. Што се саме имплементације тиче, акценат је дат на употреби фузије сензора у алгоритмима који се користе у аутономним возилима. Алгоритми коришћени у овом раду су успешно интегрисани у *ROS* софтверски стек и дали охрабрујуће резултате за будућа унапређења.

Аутомобилска индустрија је у претходним годинама јасно показала правце у којима планира даљи развој. Аутомобили на струјни погон полако постају свакодневица и готово да нема произвођача који није понудио своје решење на том пољу. Такође, у протеклим деценијама су велика средства уложена у развоје безбедносних система у самим аутомобилима. Сада се кренуло корак даље, тежи се постизању највеће могуће аутономности аутомобила из два разлога који се истичу. Први и најзначајнији је сигурност како путника у аутомобилу тако и свих осталих учесника у саобраћају. Како је и поменуто у раду, истраживања су показала да је велика већина саобраћајних несрећа проузрокована човековом грешком. Други разлог, који се може третирати као разлог социјалне природе, је искоришћење времена које људи проводе возећи своје аутомобиле на неке друге, корисније начине.

Што се тиче практичног решења развијеног у овом раду, понуђен је један приступ решавању проблема детекције и упозорења од чеоног судара. Показано је да је потенцијално могуће са квалитетним решењем на пољу фузије сензора достићи задовољавајуће резултате. Решење је тестирано помоћу *rVIZ* алата и *CARLA* симулатора

који су послужили као добра визуелна потврда тачности решења. Наравно, има доста простора за напредак што се тачности и прецизности самог решења тиче. Није било могуће развити алгоритам који у потпуности испуњава захтеве из *поглавља 3.1.*, како збор хардверски тако и због временских ограничења.

Главни правац даљег истраживања на ову тему и побољшања рада је унапређење постојећег решење и додавање нових функционалности који се ослањају на сличне врсте сензора. Такође, веома значајан корак представља и „спуштање“ овог алгоритма на неку од платформи помоћу којих се може тестирати ова врста алгоритама у реалним условима. Потенцијални проблеми који могу да се јаве су недостатак меморије и процесорске моћи самих платформи што ће захтевати детаљну оптимизацију кода.

6. Литература

- [1] Hans P. Moravec, „The Stanford Cart and The CMU Rover“, 1983
- [2] E. D. Dickmanns, A. Zapp, „Autonomous High-Speed Road Vehicle Guidance by Computer Vision“, 1987.
- [3] „DARPA Grand Challenge“, <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>. [Приступљено: Јул 2020].
- [4] „Аутономни конвој камиона - *Platooning*“, https://www.acea.be/uploads/publications/Platooning_roadmap.pdf. [Приступљено: Јул 2020].
- [5] „SAE International J3016 стандард“, <https://www.darpa.mil/about-us/timeline/-grand-challenge-for-autonomous-vehicles>. [Приступљено: Јул 2020].
- [6] Bahador Khaleghi, Alaa Khamis and Fakhri Karray, „A Data-Centric Review of the State of the art and Overview of Emerging Trends“
- [7] David L. Hall and James Llinas, „Multisensor Data Fusion“, 2008
- [8] Brandon Schoettle, „Sensor Fusion: A Comparison of Sensing Capabilities of Human Drivers and Highly Automated Vehicles“, 2017
- [9] Бојан Штрбац, Марко Гостовић, Жељко Лукач, Драган Самарџија, „YOLO Multi-Camera Object Detection and Distance Estimation“, 2020

-
- [10] „Automotive SPICE“ , http://www.automotivespice.com/fileadmin/software-download/Automotive_SPICE_PAM_30.pdf , [Приступљено: Јул 2020.]
- [11] Y. Hand, D. Lee, B. Choi, H. In, M.G. Hinchey, „Value Driven V-Model: From Requirements Analysis to Acceptance Testing “, 2016.
- [12] „LeSS - Large Scale Scrum“, <http://less.works>. [Приступљено: Јул 2020.]
- [13] „AUTOSAR Classic платформа“, <https://www.autosar.org/standards/classic-platform/>. [Приступљено: Јул 2020.]
- [14] „AUTOSAR Adaptive платформа“, <https://www.autosar.org/standards/adaptive-platform/>. [Приступљено: Јул 2020.]
- [15] „ROS платформа“, <https://www.ros.org/>. [Приступљено: Јул 2020.]
- [16] „Autoware платформа“, <https://www.autoware.org/>. [Приступљено: Јул 2020.]
- [17] „Autoware.AI софтвер“, <https://www.autoware.ai/>. [Приступљено: Јул 2020.]
- [18] Dorian J. Spero, Ray A. Jarvis, „A Review of Robotic SLAM “, 2010.
- [19] „RViz – Алат за визуелизацију *Autoware* платформе“, <https://github.com/ros-visualization/rviz..> [Приступљено: Јул 2020.]
- [20] „ISO 26262:2011 Road Vehicles – Functional Safety“, 2011.
- [21] Matthaei Richard, Markus Maurer, „Autonomous driving – A top-down approach “, 2014.
- [22] Sagar Behere, Martin Törngren, „A Functional architecture for autonomous driving“, 2015.
- [23] J. Z. Sasiadek, P. Hartana „Sensor Data Fusion Using Kalman Filter “, 2000.
- [24] „Локализација аутономног возила“, <https://fjr.at/self-driving/localization/basics/localization/>. [Приступљено: Август 2020.]
- [25] „Проширени Калманов филтер“, <https://towardsdatascience.com/extended-kalman-filter-43e52b16757d> . [Приступљено: Јул 2020.]

-
- [26] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi, „You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection“, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas
- [27] H. Ohta, N. Akai, E. Takeuchi, S. Kato and M. Edahiro, „Pure Pursuit Revisited: Field Testing of Autonomous Vehicles in Urban Areas“, 2016 IEEE 4th International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks and Applications (CPSNA), Nagoya, 2016
- [28] ISO26262-9:2011, „Road Vehicles – Functional Safety“, Part 9, 2011.
- [29] „YOLOv3 алгоритам за детекцију објеката“, <https://towardsdatascience.com/yolo-v3-object-detection-53fb7d3bfe6b>. [Приступљено: Август 2020.]
- [30] Марко Драгојевић, „ROS као платформа за развој прототип апликације за упозоравање од фронталног судара“, 2019.
- [31] Стеван Стевић, „Имплементација параметризоване мреже окупираности у ROS окружењу“, 2019.
- [32] „CarND-Capstone project“, <https://github.com/udacity/CarND-Capstone> , [Приступљено: Август 2020.]
- [33] „CarND-Capstone Team Fusion“, <https://github.com/team-fusionx/CarND-Capstone> [Приступљено: Август 2020.]
- [34] „ROS bridge за CARLA симулатор“, <https://github.com/carla-simulator/ros-bridge>. [Приступљено: Август 2020.]