



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

SENZORIKA PRO AUTONOMNÍ VOZIDLA - REŠERŠE

AUTONOMOUS VEHICLES SENSORS - STUDY SEARCH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kamil Macejka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Stanislav Věchet, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Kamil Macejka**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **doc. Ing. Stanislav Věchet, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Senzorika pro autonomní vozidla – rešerše

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autonomní vozidla používají pro navigaci širokou škálu senzorů. V současnosti neexistuje žádné standardní řešení a každý výrobce/vývojář osazuje autonomní vůz vlastní sadou senzorů. Cílem práce je vytvořit podrobnou rešerši senzorky vhodné pro navigaci v běžném provozu s analýzou aktuálně existujících řešení autonomních vozidel.

Cíle bakalářské práce:

1. Provedte rešerši funkcionality očekávané od autonomních vozidel.
2. Provedte rešerši senzorky aktuálně využívané ve vozidlech vybavených alespoň částečnou autonomií.
3. Provedte rešerši potenciálních aplikací a provozů autonomních vozidel.
4. Provedte zhodnocení využívané senzorky vzhledem ke vhodnosti daného provozu.

Seznam doporučené literatury:

SOLEM, J. E., Programming Computer Vision with Python: Tools And Algorithms For Analyzing Images, 1st edition, 2012.

LIGHT, R. A., Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol, The Journal of Open Source Software, vol. 2, no. 13, May 2017, DOI: 10.21105/joss.00265.

BALÁTĚ, J.: Technické prostředky automatického řízení. Praha, SNTL 1986.

ROS.org. ROS.org | Powering the world's robots. [online]. 2.11.2016 [cit. 2016-11-02]. Dostupné z: <http://www.ros.org/>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Táto bakalárska práca je zameraná na aktuálne trendy a hardvérové riešenia v oblasti autonómnych vozidiel (AV). V úvodnej časti je uvedená definícia AV a tiež rozdelenie úrovní autonómie podľa niekoľkých kritérií. Nasleduje stručný prehľad počiatkov a historického vývoja AV a zoznámenie s jednotlivými senzormi potrebnými pre ich prevádzkovanie. Ďalej sú popísané AV vytvorené v rámci súťaží DARPA Grand Challenge, ktorými sa inšpirujú aj dnešné spoločnosti. Nasledujúca kapitola popisuje firmy s vedúcim postavením v oblasti vývoja AV, ich prístupy k voľbe a umiestneniu senzorov ako aj ich hlavné ciele. Ďalšia kapitola sa zaoberá popisom možných aplikácií AV a prehľadom súčasných pilotných projektov slúžiacich na realizáciu týchto aplikácií. V poslednej časti sú poznatky z tejto rešerše využité na návrh vlastného experimentálneho AV.

Summary

This bachelor's thesis is aimed at current trends and hardware solutions in the field of autonomous vehicles (AVs). Firstly, the definition of AV is presented and levels of autonomy are listed according to several criteria. This is followed by a brief overview of the early stages and historical development of AVs and by an introduction of sensors needed for their operation. The following part focuses on AVs created at DARPA Grand Challenge competition, which inspire even present-day companies. Next chapter describes leading companies in the area AV development, their approach to sensor selection and placement and their main goals. Furthermore, possible real applications of AVs and current pilot projects are presented. In the last part, results of this research are used to design a custom experimental AV.

Klíčové slová

autonómne vozidlo, samoriadiace, senzor, radar, LIDAR, solid-state, DARPA, návrh

Keywords

autonomous vehicle, self-driving, sensor, radar, LIDAR, solid-state, DARPA, design

MACEJKA, K. *Senzorika pro autonomní vozidla - rešerše*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2021. 50 s. Vedoucí doc. Ing. Stanislav Věchet, Ph.D.

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu na tému „Senzorika pro autonomní vozidla - rešerše“ vypracoval samostatne pod vedením doc. Ing. Stanislav Věchet, Ph.D. a že som uviedol všetky použité zdroje a literatúru.

Kamil Macejka

Chcem sa poďakovať doc. Ing. Stanislavovi Věchetovi, PhD. za jeho rady pri písaní tejto práce, za jeho cenné poznatky a pripomienky. Veľká vďaka patrí aj rodine a priateľom za ich pomoc a podporu počas štúdia.

Kamil Macejka

Obsah

Úvod	13
1 Definícia	14
2 História	16
3 Senzory	18
3.1 Radar	18
3.2 LIDAR	19
3.2.1 ToF LIDAR	19
3.2.2 FMCW LIDAR	20
3.3 Sonar	21
3.4 Kamera	21
3.5 GPS	21
3.6 IMU	21
4 DARPA Challenge	22
4.1 Grand Challenge 2004	22
4.2 Grand Challenge 2005	23
4.3 Urban Challenge 2007	24
5 Súčasní výrobcovia AV	26
5.1 Google/Waymo	26
5.2 Tesla	28
5.3 Cruise	30
5.4 Zoox	31
5.5 Argo AI	32
6 Aplikácie AV	33
6.1 Verejná doprava	33
6.2 Preprava tovaru	35
6.3 Ťažobný priemysel	35
7 Vlastný návrh experimentálneho AV	36
7.1 Nízkonákladová verzia	36
7.2 Vysokonákladová verzia	37
7.3 Realistická verzia	38
Záver	40

Literatúra	42
Zoznam skratiek	50

Úvod

„Ráno sa vyberieme so svojim autom do práce a počas jazdy si môžeme pohodlne čítať knihu či pozerať svoj obľúbený seriál. Nemusíme sa báť toho, že budeme za volantom unavení a auto nás bezpečne dopraví na miesto určenia, pričom bude dbať na bezpečnosť a dodržiavanie pravidiel cestnej premávky.“ Táto predstava už nie je iba hudbou ďalekej budúcnosti. Už dnes sa napríklad v USA premávajú po cestách autá bez vodičov v rámci rôznych vývojových testov. Ich výrobcovia sa však pri realizácii týchto samojazdiacich automobilov vydali odlišnými cestami. Táto téma je čoraz aktuálnejšou a každú chvíľu počúvame nové správy z tohto sveta, akoby vystrihnutého zo sci-fi filmu. Cieľom tejto práce je preto vytvoriť rešerš súčasných riešení autonómnych vozidiel so zameraním na použitú sensoriku a možné aplikácie tejto technológie.

Práca je rozdelená do siedmich kapitol. Úvodná kapitola vysvetľuje definíciu autonómnych vozidiel a popisuje jednotlivé úrovne automatizácie riadenia, ktoré definujú, nakoľko je auto schopné samostatnej jazdy.

Druhá kapitola poskytuje historický prehľad vývoja autonómnych vozidiel. Pretože aj keď sa o autonómnych vozidlách výrazne hovorí len posledné roky, myšlienky a testy s podobnými konceptami tu boli už takmer pred sto rokmi.

Aby vozidlá mohli autonómne jazdiť, musia svoje okolie neustále monitorovať a zaznamenávať pomocou senzorov, ako sú kamery, radary, LIDAR-y, či sonary. Ako sa tieto technológie vnímania líšia? Aké sú ich výhody a nevýhody? Ktorý senzor je pre autonómne riadenie najvhodnejší? Odpovede na tieto otázky poskytuje tretia kapitola, ktorá sa senzorom podrobnejšie venuje.

Štvrtá kapitola sa zaoberá popisom súťaže s názvom DARPA Grand Challenge a priblíži dôvody, prečo sa táto udalosť považuje za počiatok dnešných AV.

Keď príde reč na autonómne autá, tak sa mnohým ľuďom automaticky vybaví najmä Tesla a Elon Musk. V skutočnosti však v tomto priemysle funguje viacero ďalších, úspešnejších, ale menej známych spoločností, ktorým venuje pozornosť piata kapitola.

Autonómne dopravné prostriedky, ktoré sa dokážu pohybovať samostatne a absolvovať zvolenú trasu aj za meniacich sa vonkajších podmienok, pritom nezahŕňajú len osobné automobily, ale napríklad aj hromadnú dopravu či rôzne priemyselné odvetvia. Ich súčasný stav je popísaný v šiestej kapitole.

Všetky tieto poznatky môžu byť užitočné pri návrhu vlastného experimentálneho AV. V siedmej kapitole sú predvedené tri príklady, ktoré pri voľbe jednotlivých senzorov zohľadňujú aj otázku bezpečnosti a nákladov potrebných pre vytvorenie takéhoto vozidla.

1 Definícia

Autonómnym vozidlom (AV) rozumieme také vozidlo, ktoré je schopné na základe vne-
mov z okolia samostatne vykonávať činnosti, ktoré v bežnom vozidle vykonáva človek,
napr. ovládanie zrýchľovania a brzdenia, navigácia v priestore, vyhýbanie sa prekážkam,
parkovanie, reakcia na dopravné značenie, na správanie ostatných účastníkov premávky
a pod. Vozidlo môže byť plne alebo čiastočne autonómne. Pri plnej autonómii dokáže
fungovať úplne bez prítomnosti človeka a za akýchkoľvek podmienok, pri čiastočnej
autonómii buď nie sú automatizované všetky činnosti, alebo vozidlo funguje samos-
tatne iba za určitých podmienok. Spoločnosť automobilových inžinierov (SAE, Society
of Automotive Engineers) vydala normu J3016TM [1], v ktorej rozdeľuje automatizáciu¹
vozidiel na šesť úrovní (obr. 1.1).

Úroveň 0 popisuje vozidlo bez asistenčnej automatizácie, kedy má vodič plnú kon-
trolu nad vozidlom a jeho funkciami. Od úrovne 1 začínajú asistenčné systémy preberať
čoraz viac úloh vodiča. Plne automatizovanú jazdu bez kontroly vodiča, v každom pro-
stredí a za každej situácie, definuje úroveň 5.

Tretia úroveň je v súčasnosti najvyššou poskytovanou úrovňou automatizácie v pro-
dukčnom automobile. Disponuje ňou Honda Legend, ktorá bola v marci v roku 2021
uvedená na japonský trh. Je vybavená systémom, ktorý dokáže ovládať vozidlo v po-
maly pohybujúcej sa premávke (napr. v dopravnej zápche) a nevyžaduje pritom vodi-
čovú pozornosť [2].

Svetovo prvým vozidlom s takouto funkciou malo byť Audi A8. Tento plán ale zlyhal
pre nedostatky v legislatíve, čo dokazuje, že úroveň použitých technológií nie je jedi-
ným problémom pri sprístupnení AV pre verejnosť. Pre ich bezpečné prevádzkovanie
je potrebné kompletné právne pokrytie, ktoré umožní ich homologizáciu [3].

¹SAE používa slovo “automatizácia” namiesto “autonómia”. Význam slova autonómia má pre-
sah aj mimo oblasti elektromechaniky a môže implikovať, že je auto schopné vedome robiť vlastné
rozhodnutia.

	SAE ÚROVEŇ 0	SAE ÚROVEŇ 1	SAE ÚROVEŇ 2	SAE ÚROVEŇ 3	SAE ÚROVEŇ 4	SAE ÚROVEŇ 5
Čo musíte robiť na mieste vodiča?	Riadite vozidlo kedykoľvek sú tieto funkcie aktivované, a to aj v prípade, že nemáte nohy na pedáloch a neovládate smer jazdy.			Neriadite vozidlo keď sú tieto funkcie aktivované, a to ani keď sedíte na mieste vodiča.		
	Musíte na tieto podporné funkcie neustále dohliadať; musíte ovládať smer a rýchlosť vozidla v miere zachovania bezpečnosti.			Ak vás tieto funkcie vyzvú, musíte riadiť.	Tieto automatizované funkcie nevyžadujú, aby ste prevzali riadenie.	
	Funkcie podpory vodiča			Funkcie automatizovaného riadenia		
Čo tieto funkcie robia?	Tieto funkcie sú obmedzené na poskytovanie výstrah alebo krátkodobej asistencie.	Tieto funkcie poskytujú vodičovi podporu ovládania smeru ALEBO rýchlosti.	Tieto funkcie poskytujú vodičovi podporu ovládania smeru A rýchlosti.	Tieto funkcie ovládajú vozidlo za predom definovaných podmienok a neaktivujú sa, pokiaľ všetky dané podmienky nie sú splnené.		Tieto funkcie môžu ovládať vozidlo za akýchkoľvek podmienok.
	- automatické brzdenie - sledovanie mŕtveho uhla - varovanie pred opustením jazdného pruhu	- udržiavanie jazdného pruhu ALEBO - adaptívny tempomat	- udržiavanie jazdného pruhu A - adaptívny tempomat	- asistent pre jazdu v kolóne	- samojazdiace taxi v určitej vymedzenej oblasti - pedále a volant nemusia byť namontované	- rovnaké ako úroveň 4, ale tieto funkcie môžu ovládať vozidlo za akýchkoľvek podmienok
Príklady funkcií						

Obr. 1.1: Úrovně automatizácie podľa SAE J3016™ [4]

2 História

Aj keď sa môže zdať, že autonómne vozidlá sú novodobý vynález, prvé myšlienky vozidiel pohybujúcich sa bez prítomnosti človeka siahajú až do 15. storočia, ďaleko pred samotné vynájdenie automobilu. Leonardo DaVinci, vynálezca veľkého množstva rôznych strojov a mechanizmov, navrhol samostatne sa pohybujúci vozík. Mal byť poháňaný systémom pružín, ktoré sa pred jazdou natiahli a vďaka nim by bol vozík schopný prejsť približne 40 metrov, než by sa zastavil. Používateľ mohol taktiež prednastaviť požadovaný smer jazdy. Sám Leonardo ho nikdy nezostrojil - pravdepodobne by to v jeho dobe pre komplexnosť mechanizmu ani nebolo možné. V roku 2004 sa o to ale pokúsil tím z Florencie a úspešne postavili funkčný model [5].

Pokusy o vývoj autonómnych osobných automobilov sa objavujú začiatkom 20. storočia. V roku 1939 Norman Bel Geddes nastolil novú víziu s názvom "Futurama". Bola súčasťou výstavy General Motors Highways and Horizons na akcii New York World's Fair a predstavovala budúcnosť amerických miest o 20 rokov. Súčasťou bol diaľničný systém s plne autonómnou dopravou, ktorý mal zvýšiť efektivitu automobilov a znížiť preplnenosť ciest. Mal fungovať na princípe elektrických obvodov zabudovaných v ceste, pomocou ktorých mal automobil zisťovať aktuálnu rýchlosť a polohu na vozovke. Do roku 1960 Radio Corporation of America v spolupráci s General Motors postavili dva prototypy takéhoto systému. Pre nedostatok financií ale zlyhali plány na uvedenie do bežnej prevádzky. S podobným osudom sa stretli aj pokusy o automatizovanú diaľnicu v Spojenom Kráľovstve [6].

V roku 1977 sa objavuje prvé AV ako ho chápeme dnes, za ktorého vývojom stáli ľudia z Tsukuba Mechanical Engineering Laboratory v Japonsku. Vozidlo dokázalo pomocou dvoch kamier spracovávať obrázky okolia a sledovať značenie na predom určenej ceste a dosahovalo rýchlosť 33 km/h [6].

V roku 1987 postavil tím z Universität der Bundeswehr v Nemecku pod vedením Ernsta Dickmanna v spolupráci s Daimler-Benz dodávku VaMoRs, ktorá bola schopná autonómnej jazdy rýchlosťou až 96 km/h vďaka kamerám a senzorom na sledovanie značenia na ceste [7]. Vozidlá VaMoRs-P a Vita-2 predviedli v roku 1994 na diaľnici pri rýchlosti 130 km/h autonómne zmeny jazdných pruhov a predbiehanie [8]. O rok neskôr zvládli vyše 1600 km dlhú cestu z Mníchova do Kodane a späť, najdlhší úsek prejdený autonómne mal okolo 160 km [9]. Podrobnejšie informácie o týchto projektoch sú k nájdeniu na webovej stránke Ernsta Dickmanna [10].

Úspechy zaznamenali v 80. a 90. rokoch aj v USA. V roku 1984 vznikol projekt ALV (Autonomous Land Vehicle – Autonómne pozemné vozidlo) pod Agentúrou pre výskum pokročilých obranných projektov (DARPA, Defense Advanced Research Projects Agency), kde bol na navigáciu vozidla prvýkrát použitý LIDAR [11]. V tomto období sa vývojom zaoberali aj výskumníci z Carnegie Mellon University, ktorí v roku 1995 (po asi 10 ročnom vývoji) predviedli so svojim minivanom Navlab 5 jazdu naprieč USA.

98% trasy dlhej vyše 4500 km prešlo vozidlo autonómne vďaka kamere umiestnenej pod spätným zrkadlom. Stroj mal na starosti riadenie, pričom plyn a brzdy ovládal vodič [12].

V roku 1998 sa v Taliansku uskutočnila 2000 km dlhá a z 94 % autonómna jazda vozidla vytvoreného tímom z Univerzity v Parme pod vedením Alberta Broggiho v rámci projektu ARGO. Na vnímanie diaľničného značenia boli použité dve nízkonákladové kamery [13].

Aktuálny smer vývoja udala v roku 2004 súťaž DARPA Grand Challenge, ktorá je bližšie popísaná v kapitole 4.

3 Senzory

Aby sa vozidlo dokázalo pohybovať bez zásahu vodiča, predtým, než sa začne samo rozhodovať, potrebuje určité vnemy z okolia. Tieto vnemy sú zachytávané pomocou rôznych typov senzorov, ktorých princípy a funkcie sú popísané v tejto kapitole.

3.1 Radar

Radar (z angl. Radio Detection and Ranging, “rádiové rozpoznávanie a zameriavanie”) je prístroj vysielajúci elektromagnetické vlny, ktoré sa následne odrazia od objektu späť do prijímača, na základe čoho určí polohu a rýchlosť objektu. Na rozdiel od kamier a LIDAR-u, radar dokáže spoľahlivo fungovať aj v zlých podmienkach – v daždi, v hmle, v snehu a pod.

Automobilové radary môžu fungovať na frekvencii 24 GHz alebo 77 GHz. V súčasnosti výrobcovia volia takmer výhradne druhú možnosť, nakoľko 77-GHz radar má niekoľko významných výhod. Jednou z nich je väčšia šírka pásma (až 4 GHz; 24-GHz radar poskytuje šírku pásma iba 200 MHz), ktorá zaisťuje vyššie rozlíšenie a vyššiu presnosť pri meraní vzdialenosti. Vďaka kratšej vlnovej dĺžke je presnejšie aj meranie rýchlosti objektu. Ďalšou výhodou je menšia veľkosť systému (pre kratšie vlnové dĺžky je potrebná menšia anténa) a tiež vyšší povolený výkon [14].

Z hľadiska princípu fungovania je najpoužívanejším typom radaru v automobiloch FMCW radar (Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar) [15]. V tomto prípade sú vysielané neprerušené vlny, ktorých frekvencia sa s časom mení. Výhodou tohto typu radaru je lepšie meranie na krátku vzdialenosť, schopnosť merať súčasne vzdialenosť a rýchlosť pozorovaného objektu a odolnosť voči interferencii. Na určenie rýchlosti sa využíva Dopplerov efekt – vlna odrazená od približujúceho sa objektu má vyššiu frekvenciu, vlna odrazená od vzdalujúceho sa objektu má nižšiu frekvenciu.

Hlavnou nevýhodou radarov dnes masovo používaných v automobilovom priemysle (napr. v systémoch ako adaptívny tempomat, automatické brzdy či detekcia slepých uhlov) je nízke rozlíšenie, a teda neschopnosť klasifikácie objektov. Je preto nutné ich doplniť iným druhom senzoru. Moderné špičkové radary, ktoré dokážu poskytovať detailnejšie informácie o objektoch, či vytvárať modely prostredia síce existujú, ale zatiaľ sú príliš drahé pre automobilový trh [16].

3.2 LIDAR

LIDAR (z angl. Light Detection and Ranging, “svetelné rozpoznávanie a zameriavanie”) funguje na rovnakom princípe ako radar, ale namiesto rádiových vln využíva svetelné vlny. LIDAR-y môžeme podľa spôsobu detekcie rozdeliť na niekoľko typov [17]:

3.2.1 ToF LIDAR

ToF je anglická skratka pre Time of Flight, čo v preklade znamená čas letu. Je to teda základný typ fungujúci na princípe merania času, za ktorý sa emitovaný výboj odrazí od objektu a vráti do detektora. Z nameraného času sa vďaka známej rýchlosti šírenia svetla vypočíta vzdialenosť objektu. Svetlo je opakovane emitované vo veľmi krátkych pulzoch, pričom sa zaznamenáva vzdialenosť k rôznym bodom sledovaného objektu a následne sa z týchto hodnôt vytvára 3D mapa zložená z mračien bodov. ToF LIDAR-y môžeme ďalej rozdeliť na štyri typy:

Rotujúci LIDAR

Tento LIDAR pozostáva z niekoľkých snímačov umiestnených v rotujúcom mechanizme, ktorý vytvára 360-stupňovú mapu okolia (obr. 3.1a). Každý snímač pritom zaznamenáva vlastnú rovinu bodov. Takéto riešenie je zaužívané, ale jeho nevýhodou je mechanická zložitosť a veľký počet pohyblivých častí, čo má za následok vysokú cenu a potenciálnu poruchovosť pri zhoršených prevádzkových podmienkach. Aktuálny vývoj sa preto sústreďuje na tzv. solid-state LIDAR-y, ktoré neobsahujú pohyblivé časti alebo je ich počet minimálny, a ktoré sú vďaka ich malej veľkosti vhodnejšie k masovej výrobe.

MEMS LIDAR

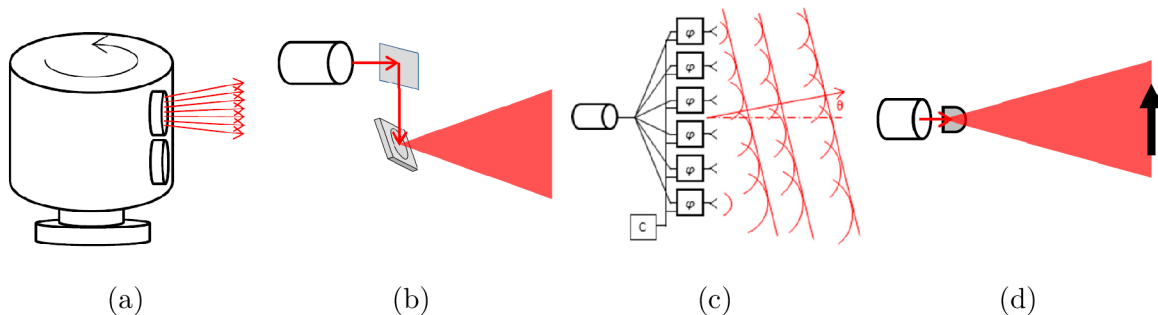
LIDAR-y postavené na princípe mikroelektromechanického systému (MEMS, Micro-electromechanical system) (obr. 3.1b), korigujú smer emitovaného lúča pomocou miniatúrnych zrkadiel o veľkosti niekoľkých milimetrov. Tento LIDAR už spadá do kategórie solid-state. Vďaka malej veľkosti, nízkej hmotnosti a vysokým rezonančným frekvenciám sú odolnejšie voči mechanickému poškodeniu a je možné ich vyrábať vo veľkých množstvách pri nižšej cene. Ich zorné pole (FOV, Field of View) je ale obmedzené, čo vedie k nutnosti použiť väčší počet kusov na pokrytie celého okolia vozidla.

OPA LIDAR

Tieto LIDAR-y využívajú na korigovanie smeru lúča optické fázované pole (OPA, Optical Phased Array). Toto pole je zložené z antén, pričom každá z nich vysiela signál s istým fázovým posunom. Výsledné vlny navzájom interferujú a ďalej sa šíria v požadovanom smere (obr. 3.1c). Takáto konštrukcia neobsahuje žiadne pohyblivé časti (jedná sa o solid-state LIDAR) a je možné ju umiestniť na čip, vďaka čomu sú odolné a spoľahlivé. Avšak pre veľké výkonové straty je ich efektívny dosah obmedzený a sú vhodné hlavne na snímanie na krátku až strednú vzdialenosť.

Flash LIDAR

Flash LIDAR (obr. 3.1d) patriaci k solid-state druhom namiesto emitovania jedného lúča svetla osvetľuje celú rovinu (2D) alebo celú scénu (3D) jedným zábleskom (angl. flash). Funguje podobne ako kamera: detektor je rozdelený na viacero obdĺžnikov (pixelov), kde každý pixel deteguje konkrétnu časť objektu alebo scény. Čím menšie sú pixely, tým väčší je ich počet, a teda je vyššie aj rozlíšenie. Na druhú stranu sa tým ale znižuje citlivosť jednotlivých pixelov, pretože na každý z nich dopadne menej svetla a zhoršuje sa tak pomer užitočného signálu k šumu. Jeho ďalšou nevýhodou je krátky dosah.



Obr. 3.1: Schémy jednotlivých typov LIDAR-ov: a) Rotujúci LIDAR, b) MEMS LIDAR, c) OPA LIDAR, d) Flash LIDAR [18]

3.2.2 FMCW LIDAR

Tento typ funguje na rovnakom princípe ako FMCW radar. Jeho výhodou je väčší dosah, odolnosť voči priamemu slnečnému žiareniu, odolnosť voči interferencii s inými senzormi, schopnosť merať súčasne vzdialenosť a rýchlosť objektu a väčšia citlivosť (schopnosť zaznamenať jeden fotón). Panuje všeobecný názor, že tieto LIDAR-y sú bezpečnejšie pre oči, pretože fungujú pri vlnovej dĺžke 1550 nm, na rozdiel od bežných LIDAR-ov pracujúcich v oblasti (850 – 905) nm. Tieto kratšie vlnové dĺžky sú blízke viditeľnému svetlu, ktoré dokáže oko preniesť na sietnicu a poškodiť ju. Z toho dôvodu musí byť sila žiarenia obmedzená, čo znižuje dosah. Ani 1550 nm LIDAR-y však nie sú pre oči dokonale bezpečné a môžu poškodiť šošovku a rohovku. Je ich ale možné bezpečne prevádzkovať pri vyššom výkone, vďaka čomu majú väčší dosah [21]. Hlavnou nevýhodou 1550-nm FMCW LIDAR-u je miera pohlcovania tejto vlnovej dĺžky vodou – v daždivom a hmlistom počasí a pri zameriavaní mokrých objektov uňho dochádza k výraznejšiemu zníženiu vzdialenosti a kvality detekcie ako pri vlnovej dĺžke 905 nm [22].

3.3 Sonar

Sonar (z angl. Sound Detection and Ranging, “zvukové rozpoznávanie a zameriavanie”) využíva ultrazvukové vlny na meranie vzdialenosti od objektu. Podobne ako radar a LIDAR, aj sonar funguje na princípe merania času, za ktorý sa vyslaná vlna odrazí a vráti späť. Vlny sú vysielané vo frekvencii nezachytiteľnej ľudským uchom (nad 20 kHz). V automobiloch slúžia na detekciu objektov v bezprostrednej blízkosti (väčšinou do 5 m) a dnes sú ich bežnou súčasťou vo forme napr. parkovacích senzorov, varovných systémov pred kolíziou, či automatického parkovania.

3.4 Kamera

Kamery v automobiloch slúžia na rozpoznávanie objektov a ich klasifikáciu, čítanie dopravného značenia a umožňujú detailnejšie spracovávanie okolia než ostatné senzory. Ich nevýhodami sú nízka spoľahlivosť v zlých podmienkach (hmla, sneh), náchylnosť na nečistoty a hlavne úroveň softvéru pre počítačové videnie. V prípade nízkeho okolitého osvetlenia pomáha spolupráca s infračerveným svetlom. Problém s meraním vzdialenosti a hĺbky objektov rieši implementácia stereo kamery.

3.5 GPS

GPS (Global Positioning System – globálny polohový systém) je globálny navigačný satelitný systém vyvinutý a spravovaný americkou armádou. V dnešnej dobe pozostáva z 31 satelitov obiehajúcich okolo Zeme v 12 hodinových intervaloch. Na dostatočne presné určenie polohy objektu (v našom prípade vozidla) je potrebný voľný výhľad na aspoň 4 satelity (so zvyšujúcim sa počtom satelitov sa zvyšuje presnosť). V moderných mestách s veľkým množstvom výškových budov (mestské kaňony) môžu nastávať problémy so spojením alebo s presnosťou. Bežným riešením (napr. v smartfónoch) je potom doplnenie informácií o polohe pomocou WiFi signálu alebo mobilných dát. Vo sfére AV je vhodné GPS doplniť porovnávaním informácií zo senzorov so samostatnými mapami.

3.6 IMU

Inerciálna meracia jednotka (IMU, Inertial Measurement Unit) pozostáva z troch akcelerometrov a troch gyroskopov. Z nimi poskytnutých dát potom vypočítava rýchlosť, smer a natočenie vozidla. Je vhodným a nutným doplnkom ostatných senzorov, najmä pri ich prípadnom výpadku. Napr. pri strate signálu GPS dokáže po nejakú dobu odhadovať polohu vozidla, ale nepresnosť sa s časom zväčšuje a je nutné čo najskôr obnoviť spojenie [23].

4 DARPA Challenge

V USA bola v roku 2003 vyhlásená súťaž DARPA Grand Challenge, ktorej úlohou bolo urýchliť vývoj bezpilotných pozemných vozidiel, ktoré by v budúcnosti slúžili pre vojenské nasadenie na nebezpečných územiach [24].

Táto udalosť bola veľkým míľnikom v odvetví autonómie. Pomohla vyvolať záujem o túto technológiu a formovala tímy vedcov a inžinierov so spoločným cieľom, z ktorých sú mnohí dodnes dôležitými členmi najúspešnejších spoločností.

4.1 Grand Challenge 2004

Do prvého ročníka súťaže sa prihlásilo 160 tímov, z ktorých 15 bolo vybraných k účasti. Ich úlohou bolo plne autonómne prejsť do desiatich hodín trasu dlhú takmer 230 km v Mohavskej púšti a víťaz mal získať odmenu 1 milión dolárov. Ani jeden z tímov úlohu nesplnil a najďalej (11,7 km) sa dostal Red Team z Carnegie Mellon University so svojim vozidlom Sandstorm (obr. 4.1) [25].



Obr. 4.1: Sandstorm (M998 HMMWV, “Humvee”) – Red Team [26]

Sandstorm (Red Team)

- jeden pohyblivý LIDAR na streche schopný otáčania a nakláňania sa,
- jeden fixný LIDAR na streche smerujúci dopredu,
- dva fixné LIDAR-y na predných rohoch vozidla,
- jeden radar na streche smerujúci dopredu,
- dve strešné kamery pre stereo videnie.

4.2 Grand Challenge 2005

O rok neskôr sa súťaž opakovala (tentokrát s odmenou navýšenou na 2 milióny dolárov) a trasu dokončilo 5 tímov, pričom všetci účastníci okrem jedného prekonal rekord z minulého roka. Víťazom sa stalo vozidlo Stanley (obr. 4.2) zostrojené tímom Stanford Racing Team pod vedením Sebastiana Thruna s časom 6 hodín a 54 minút [27].

Stanley (Stanford Racing)

- 5x SICK LIDAR na streche – nasmerované dopredu pod rôznymi uhlami na snímanie terénu na krátku až strednú vzdialenosť (max. 25 m),
- 2x 24-GHz radar na streche – slúžiace na detekciu veľkých objektov na veľkú vzdialenosť s dosahom 200 m a 20-stupňovým horizontálnym FOV,
- kamera umiestnená na streche zachytávajúca cestu na veľkú vzdialenosť (>70 m),
- GPS antény a IMU so šiestimi stupňami voľnosti [28].



Obr. 4.2: Stanley (Volkswagen Touareg) – Stanford Racing Team [29]

4.3 Urban Challenge 2007

V roku 2007 sa súťaž presunula do mestského prostredia. Trasa bola dlhá 96 km a zahŕňala navigáciu na uliciach a križovatkách, dodržiavanie pravidiel cestnej premávky a detekciu ostatných vozidiel s časovým limitom 6 hodín. Trasu dokončilo šesť tímov, z toho štyri v časovom limite. Víťazom sa stal Boss tímu Tartan Racing (obr. 4.3) s časom 4 hodiny 10 minút a na druhom mieste sa umiestnil víťaz predchádzajúceho ročníka, Stanford Racing Team, s vozidlom Junior (obr. 4.4) a časom 4 a pol hodiny [30].

Boss (Tartan Racing)

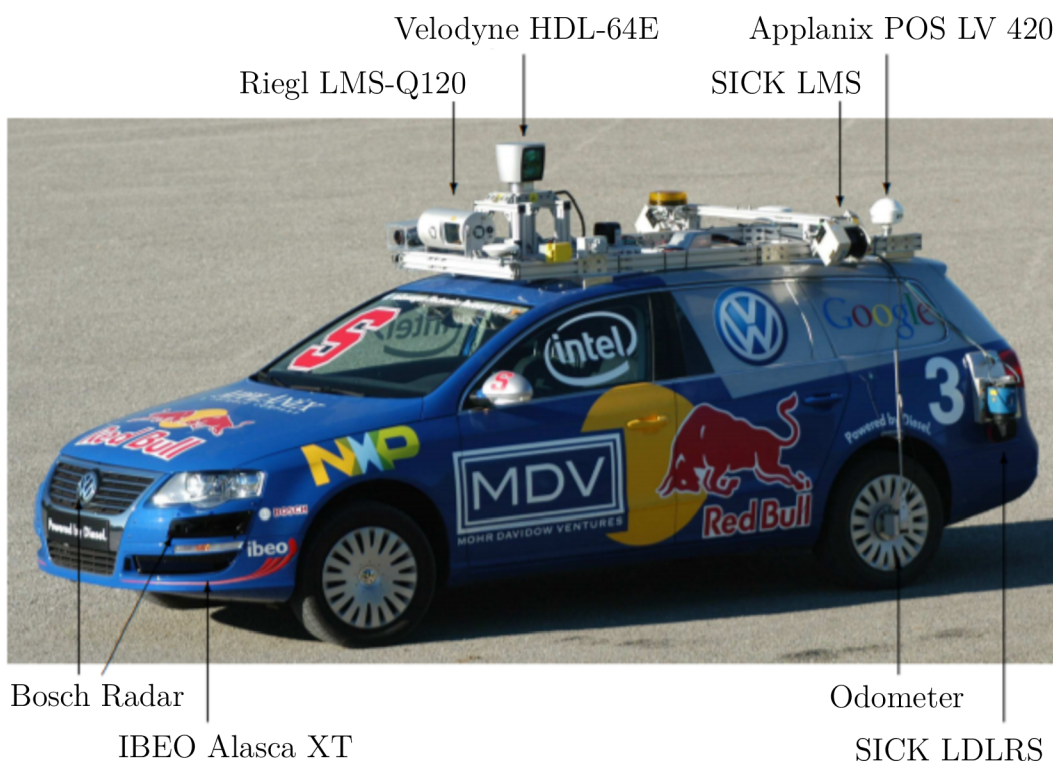
- SICK LMS 291-S05/S14 Lidar so $180^\circ/90^\circ \times 0,9^\circ$ FOV a dosahom 80 m,
- Velodyne HDL-64 Lidar s $360^\circ \times 26^\circ$ FOV a dosahom 70 m,
- Continental ISF 172 Lidar s $12^\circ \times 3,2^\circ$ FOV a dosahom 150 m,
- IBEO Alasca XT Lidar s $240^\circ \times 3,2^\circ$ FOV a dosahom 300 m,
- Ma/Com Radar s 80° FOV a dosahom 27 m,
- Continental ARS 300 Radar so $60^\circ/17^\circ \times 3,2^\circ$ FOV a dosahom 60 m/200 m,
- MobileEye Vision System so $45^\circ \times 45^\circ$ FOV a dosahom 35 m [31].



Obr. 4.3: Boss (Chevrolet Tahoe) – Tartan Racing [31]

Junior (Stanford Racing)

- 2x SICK LMS 291-S14 po stranách a Riegl LMS-Q120 LIDAR namierený dopredu na snímanie prilahlej cestnej štruktúry a detekciu dopravných čiar,
- Velodyne HDL-64E LIDAR na streche poskytujúci 360-stupňový rozhľad s 30-stupňovým vertikálnym FOV slúžiaci na detekciu objektov a ostatných vozidiel,
- 2x SICK LDLRS LIDAR v zadnej časti vozidla,
- 2x IBEO Alasca XT LIDAR na prednom nárazníku,
- 5x Bosch ďalekonosné radary na prednej maske poskytujúce dodatočné informácie o pohybujúcich sa vozidlách,
- Ladybug kamera pozostávajúca zo šiestich kamier, poskytujúca panoramatický výhľad na okolie,
- Applanix POS LV 420 systém pozostávajúci z GPS prijímačov, IMU a odometra, slúžiaci na určovanie polohy, orientácie a rýchlosti [32, 33].



Obr. 4.4: Junior (Volkswagen Passat B6) – Stanford Racing [32]

5 Súčasní výrobcovia AV

5.1 Google/Waymo

Počiatky Waymo siahajú do roku 2009, kedy pod tajným oddelením Google X vznikol AV projekt, na ktorého čele stál Sebastian Thrun, víťaz DARPA Grand Challenge 2005. Ďalšími významnými členmi boli Chris Urmson, víťaz DARPA Urban Challenge 2007, a Anthony Levandowski, ktorý postavil autonómnu Toyotu Prius nazvanú “Pri-bot” už pred oficiálnym vznikom Google Car projektu a ktorého dve spoločnosti (510 System a Antohny’s Robots) kúpil samotný Google [34, 35]. S Toyotami Prius pokračovali aj naďalej, neskôr do svojej flotily pridali Lexusy RX450h, a v roku 2015 vytvorili “Firefly” – auto bez volantu a pedálov, na ktorom sa po prvýkrát sám na verejných cestách previezol (nevidiaci) pasažier, Steve Mahan [36]. O dva roky sa tento projekt osamostatnil a vzniklo Waymo, sesterská spoločnosť Google-u patriaca pod Alphabet Inc. Spojili sa s Fiat Chrysler Automobiles, vďaka čomu získali autá Chrysler Pacifica (obr. 5.1) a začali testovať plne autonómne jazdy na verejných cestách. V roku 2020 sa stali prvou a jedinou spoločnosťou na svete poskytujúcou verejnú komerčnú autonómnú taxislužbu bez prítomnosti bezpečnostného vodiča, vo Phoenixe (Arizona) [37].

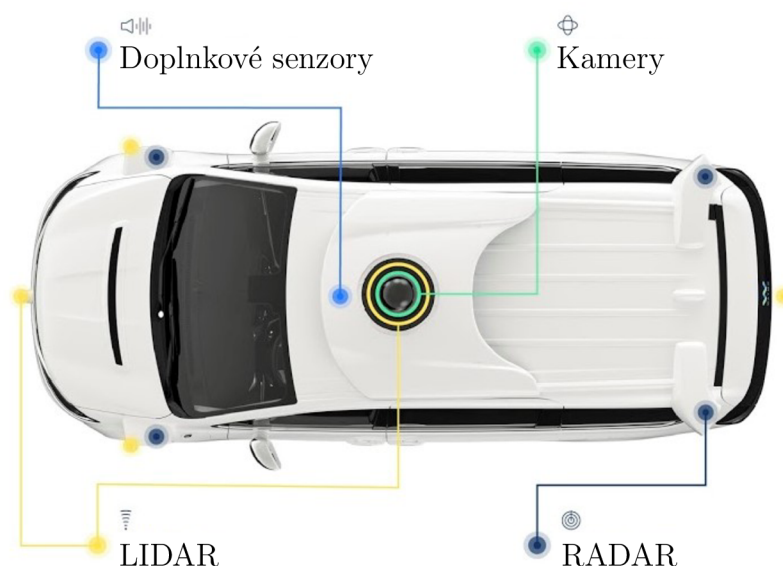
Táto taxislužba funguje aj vďaka využívaniu detailných máp prostredia, na čo kladie Waymo veľký dôraz [38]. Ak auto pozná okolie a vie určovať polohu podľa vzdialeností od rôznych trvalých objektov, môže sa viac sústrediť na dôležitejšie veci: chodcov, cyklistov a ostatné autá. Mapy ďalej obsahujú dáta o dopravných pravidlách, ako sú rýchlostné limity či odbočovacie pruhy. Ďalšou významnou súčasťou sú simulácie, v ktorých najazdia denne okolo 32 miliónov kilometrov a z ktorých poznatky implementujú do reálnej prevádzky [39].

V roku 2018 poskytol Jaguar Land Rover spoločnosti Waymo niekoľko automobilov Jaguar I-Pace (obr. 5.2), pričom cieľom je počas najbližších rokov prevádzkovať až dvadsaťtisíc týchto vozidiel [40].

Nepochybne najdrahším kusom hardvéru na AV je LIDAR a len pred niekoľkými rokmi zaplatila spoločnosť za jeden modul až 75 tisíc dolárov. Z toho dôvodu sa rozhodli vytvoriť vlastné LIDAR-y, ktorých cenu sa podarilo zredukovať o 90 % [41]. Jedným z nich je Laser Bear Honeycomb, pulzný mechanický LIDAR s 95-stupňovým vertikálnym FOV, 360-stupňovým horizontálnym FOV a nulovou minimálnou detekčnou vzdialenosťou [42].

Chrysler Pacifica

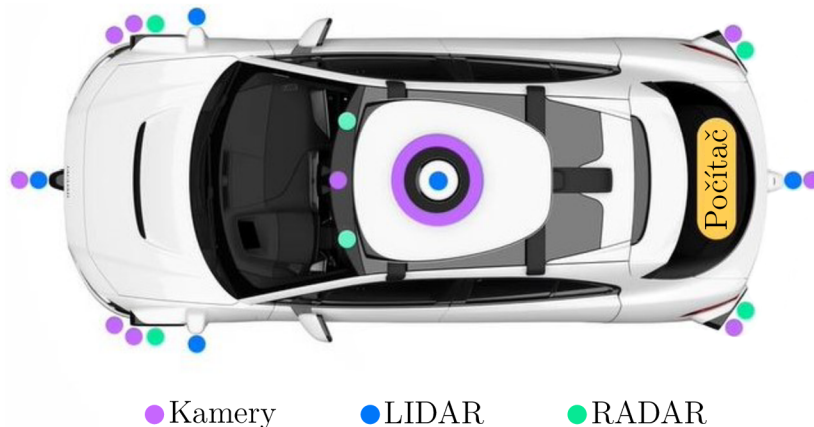
- 360-stupňový LIDAR systém pozostávajúci zo senzora s krátkym dosahom na sledovanie blízkeho okolia auta a senzora s dosahom takmer 200 m na sledovanie diania pred vozidlom,
- 360-stupňový radarový systém,
- osemmodulový kamerový systém s 360-stupňovým FOV doplnený predným modulom so supervysokým rozlíšením. Veľký dynamický rozsah umožňuje funkčnosť aj pri zlých svetelných podmienkach [41].



Obr. 5.1: Znázornenie umiestnenia senzorov na Chrysler Pacifica [43]

Jaguar I-Pace

- Dva strešné LIDAR-y so stredným, resp. dlhým dosahom (vyše 300 m), spojené v jednom module. Štyri Laser Bear LIDAR-y umiestnené vpredu, vzadu a na bokoch vozidla slúžiace na pokrytie slepých uhlov. Dva LIDAR-y pri predných kolesách doplnené kamerami a radarmi.
- Dva radary na streche spolu so štyrmi radarmi pri kolesách dohromady pokrývajú celé okolie vozidla.
- Kamerový systém s dosahom vyše 500 m pozostávajúci z 29 kamier odolných voči extrémnym teplotám. Strešné kamery sú doplnené stieračmi a tryskami na zbavovanie sa nečistôt [44].



Obr. 5.2: Znázornenie umiestnenia senzorov na Jaguar I-Pace [45]

5.2 Tesla

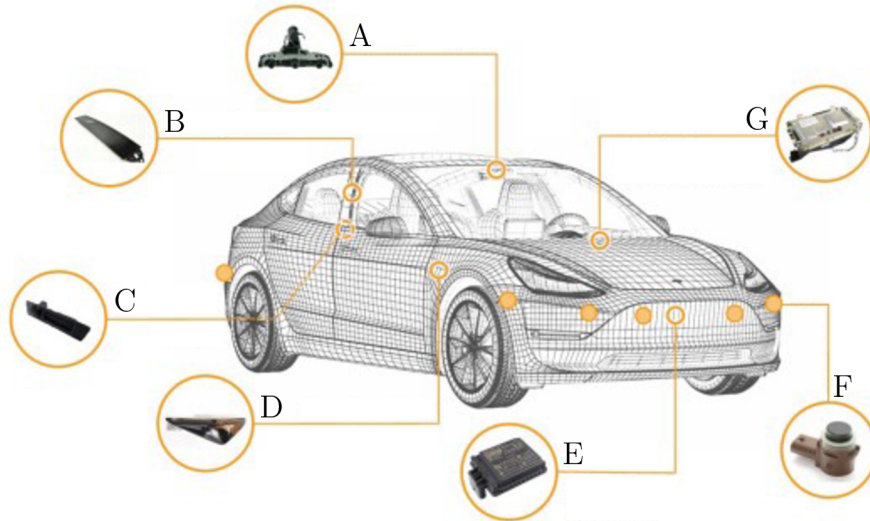
Vozidlá tejto svetoznámej značky sú aj napriek zavádzajúcemu pomenovaniu funkcie “Autopilot” vybavené len čiastočnou autonómiou úrovne 2 a vyžadujú aktívnu pozornosť vodiča. “Autopilot” zahŕňa adaptívny tempomat, automatické zatáčanie, automatickú zmenu jazdného pruhu, automatické parkovanie, či privolanie. Spoločnosť však tvrdí, že všetky nové autá obsahujú výbavu potrebnú pre plne autonómnu jazdu a že táto funkcia v budúcnosti príde v podobe softvérovej aktualizácie.

Na dosiahnutie tohto cieľa zvolila firma značne odlišný hardvérový prístup ako ostatní výrobcovia AV. Elon Musk, výkonný riaditeľ firmy, považuje LIDAR-y za zbytočne drahé a tvrdí, že je nutné zdokonaľiť snímanie prostredia pomocou kamier. Druhým rozdielom je, že vo svojom softvéri nepoužívajú dopredu nasnímané mapy prostredí, pretože sa sústreďia na to, aby ich vozidlá boli schopné navigácie kdekoľvek na svete a neboli obmedzované hranicami týchto máp (tzv. geo-fence).

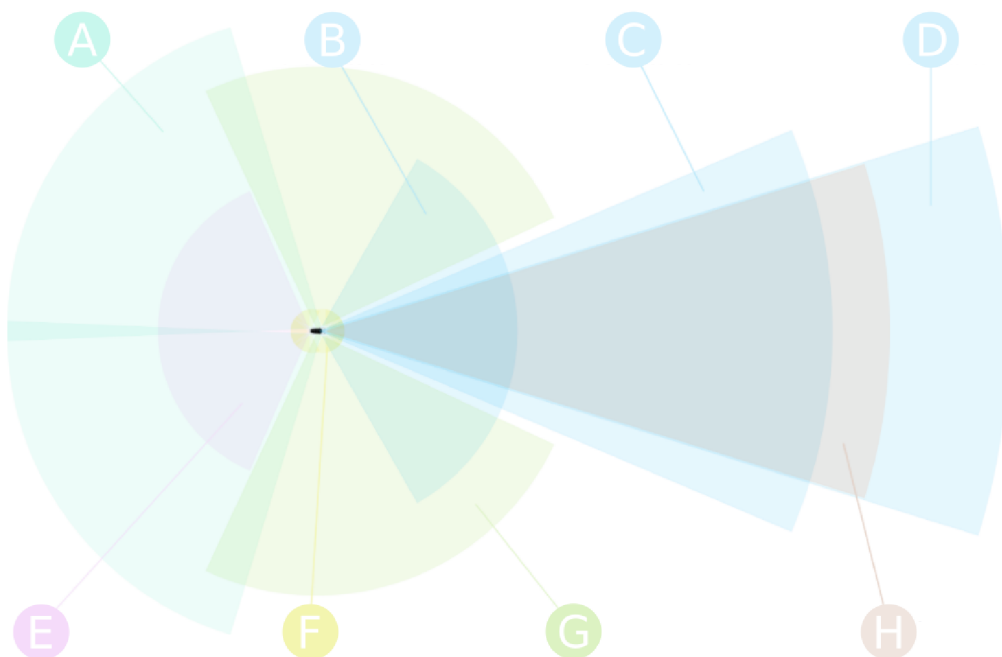
Automobily Tesla sú vybavené týmito senzormi (viď obr. 5.3) [46]:

- Radar s dosahom 160 m na snímanie diania ďaleko pred vozidlom.
- Tri predné kamery za čelným sklom:
 - Širokouhlá so 120-stupňovým FOV a dosahom 60 m slúžiaca na zachytávanie semaforov, objektov krížiacich cestu a blízkych objektov.
 - Kamera s úzkym FOV a dosahom 250 m na zachytávanie objektov na veľkú vzdialenosť pri vysokých rýchlostiach.
 - Hlavná kamera s dosahom 150 m.
- Dve dopredu namierené bočné kamery s dosahom 80 m na detekciu objektov po stranách auta, napr. na križovatkách s obmedzenou viditeľnosťou.
- Dve dozadu namierené bočné kamery s dosahom 100 m na elimináciu slepých uhlov a zaistenie bezpečnej zmeny jazdného pruhu a zaradenia sa medzi ostatné vozidlá.
- Dve zadné kamery s dosahom 50 m užitočné napr. pri cúvaní a parkovaní.

- 12x sonar s 360-stupňovým výhľadom a rádiusom 8 m slúžiaci na detekciu objektov v blízkosti auta, prípadne ako podpora pri parkovaní. Tiež funguje ako detektor slepých uhlov a ako súčasť funkcie automatickej zmeny jazdného pruhu.



Obr. 5.3: Znáznornenie senzorov na Tesla Model 3. Legenda: A – trojitá predná kamera, B – dopredu namierená bočná kamera, C – zadná kamera v rukoväti kufra, D – dozadu namierená bočná kamera, E – radar Continental, F – ultrazvukové senzory Valeo, G – centrálny ovládač Tesla Autopilot [47].



Obr. 5.4: Znáznornenie FOV a maximálneho dosahu senzorov (Tesla Model S). Legenda: A – dozadu namierené bočné kamery, B – širokouhlá kamera, C – hlavná predná kamera, D – kamera s dlhým dosahom, E – zadné kamery, F – ultrazvukové senzory, G – dopredu namierené bočné kamery, H – radar [48].

5.3 Cruise

Túto spoločnosť sídliaču v San Franciscu založil v roku 2013 Kyle Vogt, účastník DARPA Grand Challenge 2004. V roku 2018 sa firma Cruise stala súčasťou General Motors a začala vyvíjať AV na základe Chevrolet Bolt (obr. 5.5), ktorý vybavila sensorikou popísanou nižšie [49]. Ich cieľom nie je osobné vlastníctvo automobilov, ale služby, ktoré pomôžu znížiť preplnenosť ciest, environmentálny dopad a nehodovosť. K tomuto cieľu spoločnosť predstavila v januári 2020 Cruise Origin, vozidlo postavené od základu ako AV, fungujúce na princípe ridesharing-u [50, 51].

Chevrolet Bolt

- 5x Velodyne Puck LIDAR slúžiaci na tvorbu 3D modelu okolia.
- 8x radar ďalekého dosahu na zachytávanie vozidiel na veľkú vzdialenosť.
- 3x otáčavý radar na spätných zrkadlách, ktorý pomocou motorčeka dokáže rýchlo zamieriť na najdôležitejšie objekty, od ktorých potrebuje viac informácií, napr. na protiídúce autá pri odbočovaní na križovatke. Toto riešenie je výhodné z hľadiska počtu senzorov. Navyše, vďaka HD mapám vozidlo vie, kde sa nachádza a pri rozhodovaní o ďalšom smere jazdy predvída možný pohyb premávky [52].
- 10x radar ultra-krátkeho dosahu, ktorý na rozdiel od ultrazvukových senzorov dokáže presne určiť horizontálnu aj vertikálnu polohu blízkych objektov.
- 16 kamier na snímanie dopravného značenia, semaforov, chodcov, cyklistov, klasifikáciu objektov a pod.
- 12x sonar s 360-stupňovým výhľadom a rádiusom 8 m slúžiaci na detekciu objektov v blízkosti auta (chodci, zvieratá, malé prekážky...), prípadne ako podpora pri parkovaní. Tiež funguje ako detektor slepých uhlov a ako súčasť funkcie automatickej zmeny jazdného pruhu.



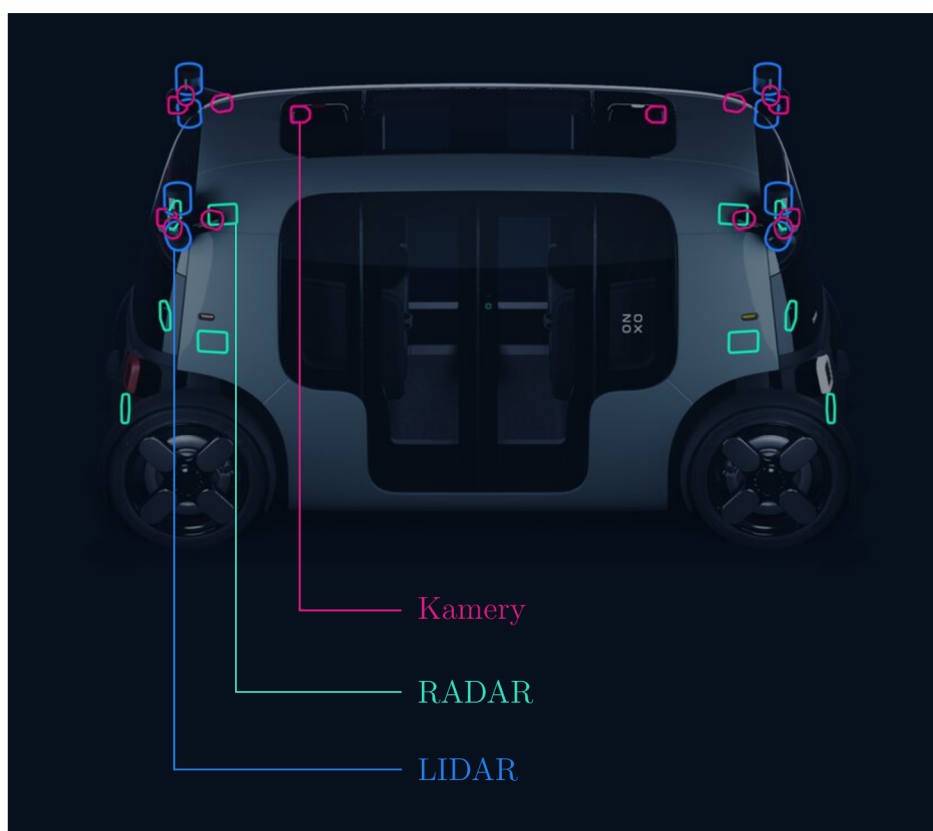
Obr. 5.5: Rozloženie senzorov na Cruise AV (Chevrolet Bolt) [53]

5.4 Zoox

Táto spoločnosť (od roku 2020 vlastnená Amazonom), podobne ako Cruise so svojim konceptom Origin, namiesto osadzovania existujúcich automobilov senzormi od základov vyvíja vlastné elektrické vozidlo pre autonómnu jazdu slúžiace ako mestské robo-taxi. Je symetrické a schopné jazdiť rovnocenne do oboch strán maximálnou rýchlosťou až 120 km/h, má riadené všetky štyri kolesá a vo vnútri nie je žiadne miesto pre vodiča, iba štyri sedadlá pre pasažierov sediacych oproti sebe [54]. Na jedno nabitie má pritom vydržať 16 hodín prevádzky a na navigáciu v preddefinovanom prostredí používa detailné mapy, obsahujúce informácie o rýchlostných limitoch, semaforoch a dopravnom značení, vďaka ktorým zároveň vyberá najvhodnejšiu cestu do cieľa [55].

Okolie zachytáva pomocou kombinácie LIDAR-ov, radarov a kamier zabezpečujúcich 360-stupňový výhľad (rozloženie znázornené na obr. 5.6) [54]:

- 8x LIDAR – dvojica Hesai a Velodyne na každom rohu vozidla. Jeden je nasmerovaný vodorovne pre zaznamenávanie okolia, druhý nadol na elimináciu slepých miest. S dosahom 150 m sa dokáže bezpečne pohybovať v mestskom prostredí.
- 10x RADAR – päť senzorov vpredu a päť vzadu.
- 14x kamery – tri na každom rohu a dve na streche.



Obr. 5.6: Rozloženie senzorov na vozidle Zoox [55]

5.5 Argo AI

Argo AI založili v roku 2016 Bryan Salesky, člen víťazného tímu v DARPA Urban Challenge 2007 a bývalý riaditeľ vývoja hardvéru v Google AV projekte (dnes Waymo), a Peter Rander, bývalý inžinier vývoja AV vo firme Uber. Ich cieľom je spraviť mestskú dopravu bezpečnejšou, čistejšou a pohodlnejšou prostredníctvom ride-hailing a donáškových služieb.

Firma pre vozidlá dodávané automobilkou Ford (v budúcnosti aj Volkswagen) vytvára vlastný softvér, hardvér a mapy pre autonómiu úrovne 4, ktoré v súčasnosti aplikuje na Ford Fusion Hybrid a Ford Escape Hybrid (obr. 5.7). Senzory použité na najnovšej generácii AV sú popísané nižšie [57, 58]:

Ford Escape Hybrid

- 128-lúčový Velodyne Alpha Prime LIDAR na streche poskytujúci 360-stupňový výhľad na okolie so 40-stupňovým vertikálnym FOV a dosahom vyše 200 m.
- Štyri LIDARy s krátkym dosahom v prednej časti a jeden vzadu s dosahom do 40 m.
- Jeden radar vpredu, jeden vzadu a dva páry radarov nad prednými blatníkmi.
- Štyri kamery v prednej časti vozidla, dve vzadu a ďalšie umiestnené v strešnom module.
- Zvukové senzory reagujúce na výstražné znamenia pohotovostných vozidiel.



Obr. 5.7: Ford Escape Hybrid spoločnosti Argo AI [59].

6 Aplikácie AV

6.1 Verejná doprava

Verejná doprava je sektorom, pre ktorý bude zavedenie AV najdôležitejšie. Osobné autá (vrátane zdieľaných služieb ako napr. Uber) v mnohých prípadoch vezú len jedného pasažiera a v neustále rastúcich mestách sú veľmi neefektívne pre transport vysokého počtu ľudí. Zvýšené využitie prostriedkov verejnej dopravy a zníženie počtu osobných automobilov v mestách môže znamenať drastický pokles preplnenosti ciest, čo by spolu s elektrifikáciou automobilov taktiež viedlo k výraznému obmedzeniu znečistenia ovzdušia.

V niekoľkých svetových mestách už výrobcovia (napr. Navya, Baidu, EasyMile, Olli) úspešne zaviedli do prevádzky autonómne minibusy fungujúce vo vymedzených oblastiach ako sú univerzitné kampusy, letiská, priemyselné parky a podobne [60]. Stručný prehľad takýchto nasadení je uvedený v tab. 6.1.

Projekt FABULOS

Jedným z hormadných tzv. smart mobility projektov je európsky projekt FABULOS (Future Automated Bus Urban Level Operation Systems), ktorý vznikol s cieľom začleniť AV do bežnej mestskej verejnej dopravy a demonštrovať technické, ekonomické, sociálne a právne požiadavky na takýto systém [61]. V rokoch 2020 – 2021 boli v rámci projektu nasadené AV v piatich európskych mestách: Helsinky (Fínsko), Gjesdal (Nórsko), Helmond (Holandsko), Talinn (Estónsko) a Lamia (Grécko) (viď tab. 6.1). Vo všetkých prípadoch sa vo vozidle nachádzal dohliadajúci vodič.

Výsledky dotazníkov vyplnených pasažiermi ukazujú, že ľudia, ktorí si vyskúšali jazdu v AV, považujú túto skúsenosť za pozitívnu a boli by ochotní takto cestovať denne [62]. Niektoré negatívne pripomienky sa týkali hlavne nízkej rýchlosti, prudkého brzdenia, obmedzených trás či nedostatočného riešenia pre zdravotne znevýhodnených ľudí.

Tabuľka 6.1: Plánované, prebiehajúce a ukončené pilotné programy implementujúce AV do verejnej dopravy.

Mesto, krajina	Začiatok	Koniec	Dĺžka trasy	Vozidlo	Zdroj
Toronto, Kanada	jeseň 2021	neznámy	<5 km	Local Motors Olli 2.0	[63]
Edinburgh, Škótsko	2021	neznámy	48 km	ADL Enviro200 ^{1,2}	[64, 65]
Göteborg, Švédsko	január 2021	jún 2021	1,8 km	Navya Autonom® Shuttle Evo	[66]
Helmond, Holandsko ³	január 2021	neznámy	3 km	Navya Autonom® Shuttle Evo	[67]
Gjesdal, Nórsko ³	január 2021	marec 2021	neznáma	Toyota Proace ²	[68]
Hamburg, Nemecko	2020	2021	1,8 km	HEAT minibus	[69]
Gjesdal, Nórsko ³	júl 2020	september 2020	neznáma	Navya Autonom® Shuttle Evo	[70]
Lamia, Grécko ³	október 2020	december 2020	3,2 km	Taltech Iseauto	[71]
Štokholm, Švédsko	september 2020	október 2020	1,6 km	Dongfeng F600 ²	[72]
Talinn, Estónsko ³	september 2020	neznámy	2,4 km	Taltech Iseauto	[73]
Newcastle, Austrália	júl 2020	október 2020	neznáma	Navya Autonom® Shuttle Evo	[74]
Helsinki, Fínsko ³	apríl 2020	júl 2020	neznáma	Sensible 4 GACHA, Dongfeng CM7 ² , Renault Twizy ²	[75]

¹Prvý autonómny autobus plnej veľkosti v Európe

²Konvenčné vozidlo osadené hardvérom a softvérom pre autonómnu jazdu

³Súčasť projektu FABULOS

6.2 Preprava tovaru

Ďalšou aplikáciou AV s vysokým potenciálom je preprava tovaru pomocou kamiónov. V štátoch s dobre rozvinutou infraštruktúrou sa kamióny pohybujú hlavne po diaľniciach, ktoré sú do vysokej miery monotónne a procesy rozhodovania sa vyskytujú v menšej miere ako v mestskom prostredí. Výhodou by bol rýchlejší rozvoz tovaru a materiálu, pretože na rozdiel od ľudského vodiča sa AV neunaví, nepotrebuje prestávky a môže bezproblémovo fungovať aj v noci.

Veľký problém predstavuje aj nedostatok ľudí v odvetví dopravy. Prieskum Medzinárodnej únie cestnej dopravy (IRU, International Road Transport Union) ukázal, že v roku 2019 chýbalo v Európe 23 % vodičov nákladných áut [76] a v USA to bolo podľa Americkej asociácie nákladnej dopravy (ATA, American Trucking Associations) okolo 60 tisíc vodičov. Predpovede navyše ukazujú, že toto číslo by mohlo do roku 2028 vrásť až na 160 tisíc vodičov [77].

Príchod autonómnych nákladných vozidiel pritom môže byť bližšie, než sa zdá. Už v roku 2021 plánuje startup TuSimple spustiť prevádzku bez prítomnosti operátora na mieste vodiča a v roku 2024 má byť dostupný prvý komerčný kamión s autonómnou úrovňou 4. Spoločnosť úspešne prevádzkuje 40 vozidiel v Texase a v Arizone a okrem zvýšenej bezpečnosti a efektivity, autonómne kamióny dokázali znížiť spotrebu paliva o 10 %, vďaka čomu pozitívne vplývajú nielen na náklady, ale aj na uhlíkovú stopu tohto odvetvia [78, 79]. Ďalšími firmami úspešne testujúcimi autonómnou technológiu v nákladnej doprave sú napríklad Aurora, Kodiak Robotics či Waymo so svojou platformou Waymo Via.

Oproti osobným AV sú tu odlišné požiadavky na senzoriku. Z dôvodu vysokej hmotnosti a primárne diaľničnej dopravy vo vysokej rýchlosti musia senzory sledovať dianie pred vozidlom v omnoho väčšej vzdialenosti. Vozidlá TuSimple sa spoliehajú hlavne na HD kameru s dosahom až 1 km, čo je dvojnásobok vzdialenosti, do akej sa pozerajú profesionálni vodiči [79]. Ďalším dôležitým prvkom je schopnosť vidieť dozadu a odstránenie slepých miest spôsobených návesom. Waymo rieši tento problém pomocou senzorov vyčnievajúcich do strán [80].

6.3 Ťažobný priemysel

Ťažobný priemysel je už v súčasnosti oblasťou s vysokým podielom využitia AV. Tie prispievajú k zvýšeniu bezpečnosti a efektivity a dokážu pracovať bez prestávky v nebezpečných podmienkach. Prevádzka je menej riziková než v prípade iných druhov dopravy vďaka nižšiemu výskytu nepredvídateľných situácií, ako sú strety s chodcami alebo inými účastníkmi premávky.

Napríklad spoločnosť Rio Tinto prevádzkuje vyše 130 autonómnych nákladných vozidiel, 26 autonómnych vrtákov a vozidlá umiestňujúce výbušniny. Podľa odhadov dokázali vďaka tejto technike v roku 2018 ušetriť 15 % nákladov a operovať o 700 hodín dlhšie ako pri použití konvenčných vozidiel [81]. Ďalšími významnými spoločnosťami v tomto priemysle sú Caterpillar a Komatsu.

7 Vlastný návrh experimentálneho AV

Prehľad riešení AV rôznych výrobcov v kapitole 5 ukazuje, že neexistuje jednotný prístup k použitiu senzorov či ich umiestneniu. Táto kapitola sa zaoberá návrhom vlastného riešenia AV pre tri rôzne verzie: nízkonákladová, vysokonákladová a realistická. Vo všetkých troch prípadoch sa jedná o osadenie senzorov na bežný automobil. Okrem kamier, radarov a LIDAR-ov je vhodné na týchto vozidlách pre presnejšie získavanie dát použiť aj IMU, GPS a odometre.

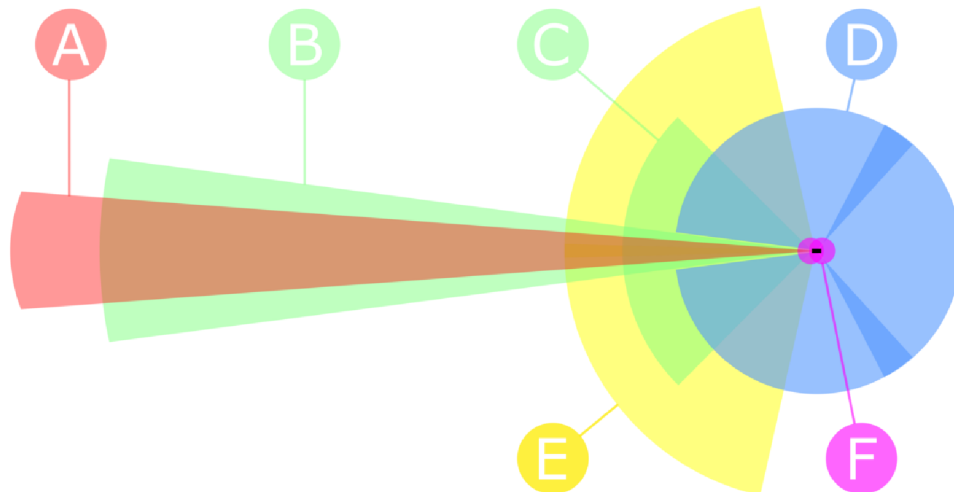
7.1 Nízkonákladová verzia

Toto riešenie (obr. 7.1) je vhodné pre začínajúce projekty, školy či amatérskych nadšencov na vstup do sveta AV a na zoznámenie sa s hardvérom a softvérom pri zachovaní nízkych nákladov. Nie je vhodné na testovanie plnej autonómie v skutočnej premávke, pretože samotné počítačové videnie sprostredkované kamerami zatiaľ nie je na dostatočnej úrovni, aby to bolo bezpečné. Z dôvodu nízkeho rozpočtu sa tu nenachádza LIDAR, ktorý je najdrahším senzorom pre AV.

Základom sú tri kamery za čelným sklom. Jedna kamera s dlhým dosahom (>200 m) a úzkym FOV na sledovanie objektov vo veľkej vzdialenosti pred vozidlom, čo je dôležité pri rýchlej jazde. Pri nej sa nachádzajú ďalšie dve kamery so širším FOV a kratším dosahom (~ 70 m), ktoré slúžia na sledovanie a klasifikáciu objektov v krátkej až strednej vzdialenosti, rozoznávajú dopravného značenia a rozhodovanie pri nižších rýchlostiach. Na stranách a v zadnej časti vozidla sú tri širokohlavé kamery s dosahom do 50 m, ktoré spolu s prednými kamerami zabezpečujú 360-stupňový výhľad na okolie vozidla, čo je dôležité najmä pri parkovaní, pri jazde v úzkych priestoroch, na elimináciu slepých uhlov, na kontrolu jazdného pruhu či varovanie pred kolíziou.

Okrem kamier, ktoré nie sú vhodné na meranie vzdialenosti, a ktoré nedokážu merať rýchlosť objektu, sa v prednej časti nachádza jeden radar (napr. Continental ARS441) s ďalekým dosahom (>200 m) potrebný pri rýchlej jazde a druhý (napr. Continental SRR520) s kratším dosahom (<100 m) a širším FOV na snímanie objektov na kratšiu vzdialenosť.

Na zachytávanie diania v bezprostrednej blízkosti vozidla slúži osem ultrazvukových senzorov s dosahom do 5 m. Tie sú rozmiestnené po obvode auta a pomáhajú najmä pri parkovaní a pri pohybe v stiesnených priestoroch.



Obr. 7.1: Sensory nízkonákladovej verzie AV. Legenda: A – kamera s dlhým dosahom, B – radar s dlhým dosahom, C – radar s krátkym až stredným dosahom, D – kamery pokrývajúce okolie vozidla, E – predné kamery, F – ultrazvukové senzory.

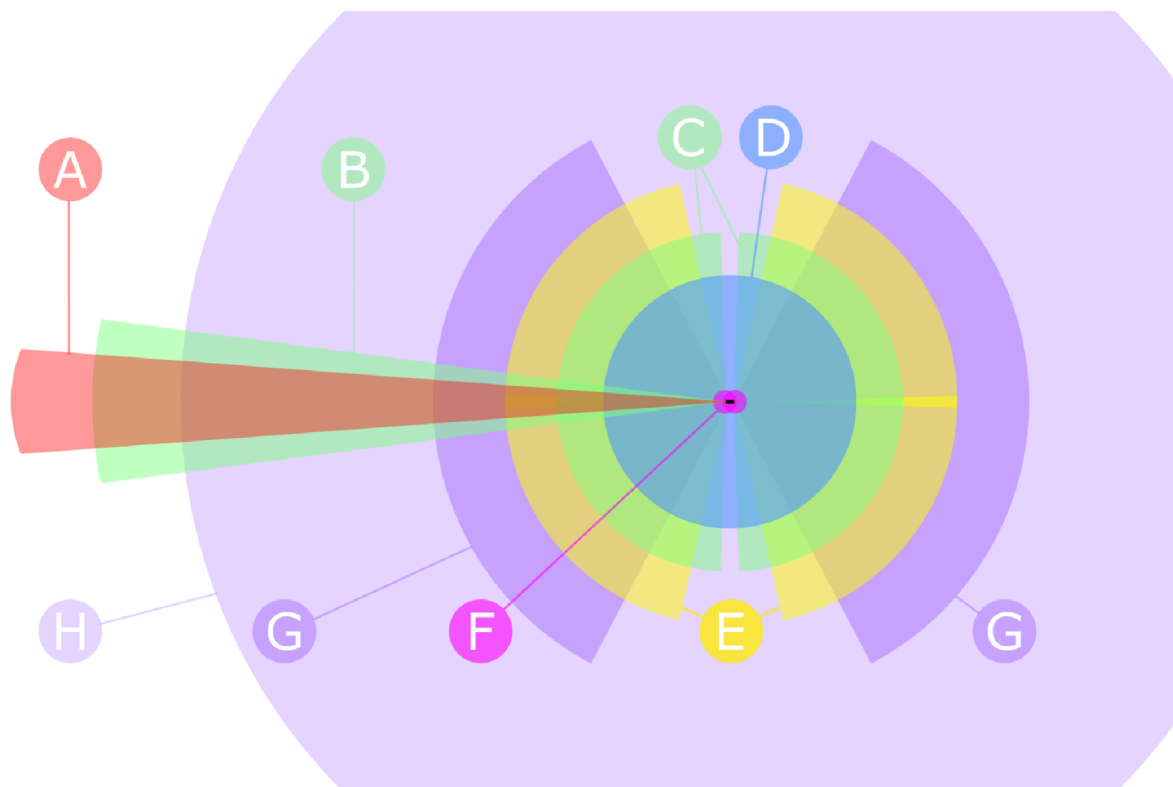
7.2 Vysokonákladová verzia

Veľké spoločnosti, prípadne firmy s veľkými investormi, kde je rozpočet prakticky neobmedzený, môžu použiť omnoho väčší počet senzorov. Základom sú v tomto prípade LIDAR-y (obr. 7.2) tvoriace 3D mapu okolia, ktoré sú spoľahlivejšie a presnejšie ako kamery. Z dôvodu vysokých nákladov nie je toto riešenie vhodné na reálne nasadenie a na výrobu pre komerčnú sféru a slúži len na testovacie účely a zdokonaľovanie softvéru.

V prípade, že rozpočet nedovoľuje zostrojiť takýto skutočný model, je možné toto riešenie nasimulovať vo voľne dostupnom softvéri CARLA, kde sa dá overiť správanie a funkčnosť navrhnutého rozmiestnenia senzorov (viac informácií k nájdeniu na oficiálnej webstránke [82]). Takáto simulácia môže potom slúžiť ako referencia pri vývoji a výrobe realistickej verzie.

Rovnako ako v predchádzajúcej verzii, aj tu sa nachádza kamera a radar s ďalekým dosahom (napr. Continental ARS540) a ultrazvukové senzory. Tri predné kamery sú doplnené dvomi zadnými kamerami s rovnakým dosahom (~70 m) a FOV na sledovanie diania za vozidlom, bezpečné cúvanie a parkovanie a na kontrolu jazdných pruhov. Okrem toho je na streche umiestnený kamerový modul s 360-stupňovým výhľadom na úplne odstránenie slepých miest. V zadnej časti sú ďalšie dva radary s krátkym až stredným dosahom (napr. Continental SRR520). Vysoký počet senzorov slúži hlavne ako istota v prípade výpadku niektorého zo senzorov.

Na streche sa nachádza 360-stupňový rotujúci LIDAR (napr. Velodyne Alpha Prime, RS-Ruby alebo Hesai Pandar128), ktorý vytvára 3D mapu okolia a ten je doplnený dvomi solid-state MEMS LIDAR-mi (napr. Velodyne Velarray M1600) alebo rotujúcimi LIDAR-mi s krátkym dosahom a širokým vertikálnym FOV (napr. PandarQT) na presnejšie mapovanie prostredia pred a za vozidlom.



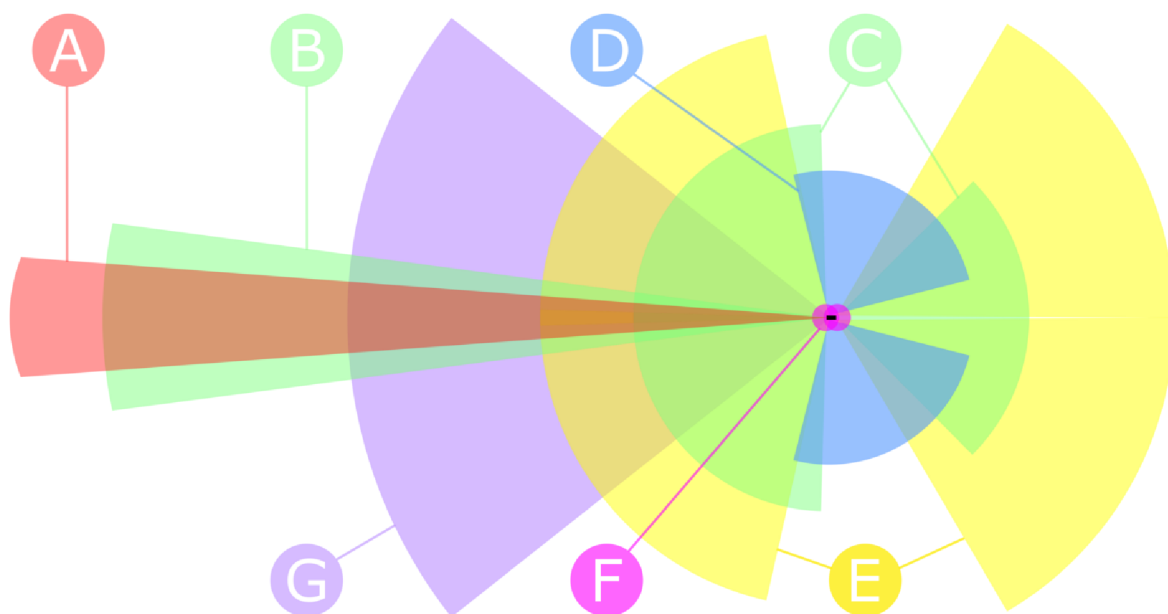
Obr. 7.2: Sensory vysokonákladovej verzie AV. Legenda: A – kamera s dlhým dosahom, B – radar s dlhým dosahom, C – radary s krátkym až stredným dosahom, D – kamery pokrývajúce okolie vozidla, E – predné a zadné kamery, F – ultrazvukové senzory, G – MEMS LIDAR-y, H – 360-stupňový rotujúci LIDAR.

7.3 Realistická verzia

Aby mohlo byť AV komerčne dostupné a zavedené do skutočnej premávky, musí byť dosiahnutý kompromis medzi cenou a množstvom jednotlivých senzorov. Kvôli požiadavkam na maximálnu bezpečnosť je pre tento účel potrebná kombinácia kamier, radarov a LIDAR-ov (obr. 7.3).

Pre jazdu vysokou rýchlosťou sú v prednej časti taktiež kamera a radar s dlhým dosahom, na detailnejšie vnímanie prostredia pred vozidlom dve hlavné kamery a dva radary s krátkym až stredným dosahom (rovnakého druhu ako v predchádzajúcich prípadoch). Vzadu sa tentokrát nachádza jeden radar krátkeho až stredného dosahu s dostatočným FOV na kontrolu diania za vozidlom a na kontrolu pred zmenou pruhu. Okrem neho sú tu dve zadné kamery s dosahom do 100 m na dostatočné pokrytie okolia pri cúvaní a pri zmene pruhu. Pri spätných zrkadlách na bokoch auta sú umiestnené širokouhlé kamery s dosahom do 50 m na elimináciu slepých miest po stranách vozidla.

Na streche sa nachádza dopredu nasmerovaný MEMS LIDAR (napr. Velodyne Velarray H800, RS-LiDAR-M1, Luminar Hydra alebo Hesai PandarGT) s dosahom (200 – 300) m a 60° až 120° FOV, ktorý vytvára presnú mapu prostredia pred vozidlom a zabezpečuje prehľad o všetkých objektoch v jeho zornom poli. Tento solid-state variant je lacnejší než rotujúci typ a vďaka rýchlemu vývoju a klesajúcej cene sa stáva čoraz bežnejšou voľbou pre použitie na AV.



Obr. 7.3: Senzory realistickej verzie AV. Legenda: A – kamera s dlhým dosahom, B – radar s dlhým dosahom, C – radary s krátkym až stredným dosahom, D – bočné kamery, E – predné a zadné kamery, F – ultrazvukové senzory, G – LIDAR.

Záver

Cielom tejto práce bolo oboznámiť sa s konceptom a princípmi AV, poskytnúť prehľad o súčasných riešeniach AV a popísať možné využitie týchto vozidiel v rôznych oblastiach dopravy.

V prvej kapitole bolo vysvetlené, v akých prípadoch už môžeme vozidlo považovať za autonómne. Bola tu uvedená norma SAE J3016TM, ktorá podľa presných kritérií definuje šesť úrovní autonómie, a ktorá uvádza, za akých podmienok prechádza zodpovednosť za riadenie z vodiča na automobil.

Pre lepšiu predstavu o tom, ako ďaleko dospel vývoj AV, bol v druhej kapitole uvedený stručný historický prehľad prvých predstáv a úspešných projektov vedcov a inžinierov po celom svete. Už v 70. rokoch 20. storočia sa začali objavovať koncepty a prototypy, ktorých princípy sa využívajú dodnes.

Ďalšia časť sa venovala definícii a rozdeleniu senzorov potrebných k správne a bezpečnému prevádzkovaniu AV. Radary a sonary sú dnes už bežnou súčasťou konvenčných automobilov, kde sú ich úlohou funkcie podpory vodiča, ako napr. adaptívny tempomat či automatické parkovanie. Svoje dôležité miesto majú aj v AV, no samy o sebe nie sú postačujúce a slúžia výhradne ako doplnok pre hlavné senzory zachytávajúce okolité prostredie a objekty – kamery a LIDAR-y.

Dôležitým impulzom pre svet autonómnych vozidiel bola súťaž DARPA Grand Challenge popísaná vo štvrtej kapitole. Položila základy pre voľbu a umiestnenie senzorov, ako ich vidíme na dnešných vozidlách, kde sa hlavné senzory (LIDAR-y a kamery) nachádzajú na streche pre čo najlepší výhľad na okolie. Od tejto udalosti nabral vývoj AV obrovské tempo a mnoho zúčastnených neskôr stálo pri vzniku najväčších a najúspešnejších spoločností tohto priemyslu.

V piatej kapitole bolo popísaných päť z týchto vedúcich firiem. Každá z nich pritom k problematike návrhu AV pristupuje inak. Zatiaľ čo Tesla dôrazne odmieta použitie LIDAR-u pre jeho vysokú cenu, ostatní výrobcovia ho uprednostňujú pre jeho nesporné výhody. Vďaka rýchlemu pokroku a novým konštrukciám navyše náklady na výrobu LIDAR-ov neustále klesajú, a tak je pravdepodobné, že v budúcnosti sa budú AV spoliehať práve na tento senzor. Ďalším rozdielom Tesly oproti konkurencii je ich predstava o poskytovaní AV verejnosti. Automobily Tesla sú určené k predaju a k osobnému vlastníctvu. Waymo, Cruise, Zoox a Argo AI sa naopak sústreďujú na poskytovanie AV ako služby v podobe robotaxi či zdieľaných jász.

Osobné automobily nie sú jediným odvetvím, kde môže autonómna technológia byť k prospechu. Cielom šiestej kapitoly bolo poskytnúť prehľad o možných aplikáciách mimo osobnej dopravy. Jednou z takýchto aplikácií je zavedenie AV do systémov verejnej dopravy. V súčasnosti už prebiehajú po celom svete pilotné projekty testujúce takéto použitie AV, zatiaľ ale vo veľmi obmedzenej miere, na krátkych trasách a v malom počte. Okrem toho budú AV zastávať dôležitú úlohu pri preprave tovaru

nákladnými vozidlami, kde má táto technológia potenciál vyriešiť problémy s nedostatkom vodičov, znížiť náklady a pomôcť splniť rastúce požiadavky na rýchlosť dodania tovaru.

Siedma kapitola ukázala, že výsledok tejto rešerše môže poslúžiť ako inšpirácia pri navrhovaní vlastného experimentálneho AV. Boli tu uvedené tri rôzne príklady rozdelené podľa dostupného rozpočtu a potenciálneho využitia. Pre stále vysokú cenu LIDAR-ov bola nízkonákladová verzia založená na kamerovom videní doplnenom radarom. Ak to rozpočet dovoľuje, je možné pre testovacie účely zostrojiť vysokonákladovú verziu používajúcu LIDAR-y a väčší počet ostatných senzorov pre kompletne a spoľahlivé pokrytie okolia. V opačnom prípade je vhodné si takýto model pre porovnanie s vlastným zostrojeným variantom nasimulovať v simulátore CARLA. V realistickej verzii bol predvedený návrh, ako by mohlo byť riešené komerčne dostupné AV vhodné k uvedeniu na trh, ktoré tvorí kompromis medzi nízkou cenou nízkonákladovej verzie a bezpečnosťou a spoľahlivosťou vysokonákladovej verzie.

Aj keď je dnešná technológia na pomerne vysokej úrovni, stále je tu veľa prekážok, ktoré je treba prekonať pred tým, než sa AV stanú bežnou súčasťou našich životov. Napríklad výzor auta – senzormi pokrytá karoséria nie je ideálna ani z hľadiska dizajnu, ani z hľadiska aerodynamiky. Ďalším problémom je infraštruktúra. Bude náročné úspešne uviesť AV do premávky medzi ostatných účastníkov. Tu sa nabáda vytvoriť samostatné zóny či jazdné pruhy vyhradené špeciálne pre AV, aby sa množstvo nepredvídateľných situácií znížilo na minimum. Okrem toho, stále neexistuje presná legislatíva, ktorá by sa starala o otázky z právnej stránky, ako napríklad kto by bol zodpovedný v prípade nehody. Akonáhle sa podarí tieto nedostatky vyriešiť, budeme, dúfajme, svedkami veľkých zmien k lepšiemu – efektívnejšej osobnej aj nákladnej doprave a dostupnejšiemu a bezpečnejšiemu cestovaniu.

Literatúra

- [1] SAE International. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. 15.6.2018 [cit. 12.3.2021].
Dostupné z: doi:10.4271/J3016_201806
- [2] BERESFORD, Colin. Honda Legend Sedan with Level 3 Autonomy Available for Lease in Japan. In: *Car and Driver* [online]. 30.6.2019 [cit. 4.2.2021].
Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/news/a35729591/honda-legend-level-3-autonomy-leases-japan>
- [3] HETZNER, Christiaan. Audi quits bid to give A8 Level 3 autonomy. In: *Automotive News* [online]. 28.4.2020 [cit. 16.5.2021].
Dostupné z: <https://www.autonews.com/cars-concepts/audi-quits-bid-give-a8-level-3-autonomy>
- [4] SHUTTLEWORTH, Jennifer. SAE Standards News: J3016 automated-driving graphic update. In: *SAE International* [online]. 7.1.2019 [cit. 12.3.2021].
Dostupné z: <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>
- [5] Leonardo da Vinci's Car. *Leonardo Da Vinci's Inventions* [online]. [cit. 4.2.2021].
Dostupné z: <http://www.leonardodavincisinventions.com/mechanical-inventions/leonardo-da-vincis-car>
- [6] NGUYEN, Tuan C. History of Self-Driving Cars. In: *ThoughtCo* [online]. 30.6.2019 [cit. 4.2.2021].
Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/history-of-self-driving-cars-4117191>
- [7] Oral-History:Ernst Dickmanns. *Engineering and Technology History Wiki* [online]. 21.6.2010 [cit. 5.2.2021].
Dostupné z: https://ethw.org/Oral-History:Ernst_Dickmanns
- [8] Premiere 25 years ago: Luxury and technology: Mercedes-Benz S-Class W 140. *Daimler Global Media Site* [online]. 22.2.2016 [cit. 5.2.2021].
Dostupné z: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko.xhtml?oid=9919753>
- [9] BHAT, Aditya. Autonomous VEHICLES: A Perspective of Past and Future Trends. *IJETSR*, 2017. s. 3-4 [cit. 5.2.2021]. ISSN 2394 – 3386
Dostupné z: http://ijetsr.com/images/short_pdf/1509888463_1183-1190-mccia979_ijetsr.pdf

- [10] *Dynamic Vision* [online]. [cit. 5.2.2021].
Dostupné z: <http://dyna-vision.de>
- [11] LOWRIE, James W., David P. CASASENT, Mark THOMAS, Keith GREMBAN a Matthew TURK. The Autonomous Land Vehicle (ALV) Preliminary Road-Following Demonstration. 12.11.1985, s. 336- [cit. 6.2.2021].
Dostupné z: doi:10.1117/12.950819
- [12] SHAW, Keith. 25 Years Ago, the First Robot Car Drove Across America's Highways. In: *RoboPGH* [online]. 31.7.2020 [cit. 6.2.2021].
Dostupné z: <https://robopgh.org/news/2020/7/31/3rf390xlo9uy6cuijm1enahk18rmkd>
- [13] MilleMiglia in Automatico: Tour Description. *ARGO* [online]. [cit. 6.2.2021].
Dostupné z: <http://www.argo.ce.unipr.it/ARGO/english/mmdesc.html>
- [14] RAMASUBRAMANIAN, Karthik, Ramaiah, K. Moving from Legacy 24 GHz to State-of-the-Art 77-GHz Radar. *ATZelextronik worldwide*. 2018, 13, 46-49 [cit. 11.5.2021].
Dostupné z: doi:10.1007/s38314-018-0029-6
- [15] WOLFF, Christian. Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar (FMCW Radar). In: *Radartutorial* [online]. [cit. 6.2.2021].
Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency%20Modulated%20Continuous%20Wave%20Radar.en.html>
- [16] BRISKEN, Stefan, Florian RUF a Felix HÖHNE. Recent evolution of automotive imaging radar and its information content. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2018, 12(10), 1078-1081 [cit. 17.2.2021]. ISSN 1751-8792.
Dostupné z: doi:10.1049/iet-rsn.2018.0026
- [17] RABLAU, Corneliu I., Anne-Sophie POULIN-GIRARD a Joseph A. SHAW. Lidar: a new self-driving vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences. *Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2019* [online]. SPIE, 7.2.2019, s. 138- [cit. 24.2.2021]. ISBN 9781510629790.
Dostupné z: doi:10.1117/12.2523863
- [18] WANG, Dingkan, Connor WATKINS a Huikai XIE. MEMS Mirrors for LiDAR: A Review. *Micromachines*. 2020, 11(5) [cit. 17.2.2021]. ISSN 2072-666X.
Dostupné z: doi:10.3390/mi11050456
- [19] RICHTER, Michael. FMCW LIDAR: Game changer for autonomous driving. In: *Geospatial World* [online]. 28.12.2020 [cit. 7.2.2021]
Dostupné z: <https://www.geospatialworld.net/blogs/fmcw-lidar-game-changer-for-autonomous-driving>
- [20] HECHT, Jeff. Lasers for Lidar: FMCW lidar: An alternative for self-driving cars. In: *LaserFocusWorld* [online]. 31.5.2019 [cit. 7.2.2021]
Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/home/article/16556322/lasers-for-lidar-fmcw-lidar-an-alternative-for-selfdriving-cars>

- [21] HECHT, Jeff. Automotive Lidar: Safety questions raised about 1550 nm lidar. In: *LaserFocusWorld* [online]. 25.9.2019 [cit. 18.2.2021].
Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/blogs/article/14040682/safety-questions-raised-about-1550-nm-lidar>
- [22] WOJTANOWSKI, Jacek, M. ZYGMUNT, M. KASZCZUK, Z. MIERCZYK a M. MUZAL. Comparison of 905 nm and 1550 nm semiconductor laser rangefinders' performance deterioration due to adverse environmental conditions. *Opto-Electronics Review*. 2014, 22(3) [cit. 18.2.2021]. ISSN 1896-3757.
Dostupné z: doi:10.2478/s11772-014-0190-2
- [23] TESCHLER, Lee. Inertial measurement units will keep self-driving cars on track. In: *Microcontroller Tips* [online]. 15.8.2018 [cit. 8.2.2021].
Dostupné z: <https://www.microcontrollertips.com/inertial-measurement-units-will-keep-self-driving-cars-on-track-faq>
- [24] SEETHARAMAN, Guna, Arun LAKHOTIA a Erik Philip BLASCH. Unmanned vehicles come of age: The DARPA grand challenge. *Computer*. 2006, 39(12), 26-29 [cit. 6.2.2021]. ISSN 0018-9162.
Dostupné z: doi:10.1109/MC.2006.447
- [25] DARPA Grand Challenge (2004). *Wikipedia* [online]. [cit. 6.2.2021].
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge_\(2004\)](https://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge_(2004))
- [26] Red Team. DARPA Grand Challenge Technical Paper. *Wayback Machine*. 8.4.2004 [cit. 6.2.2021].
Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20050909192933/http://www.darpa.mil/grandchallenge04/TeamTechPapers/RedTeamFinalTP.pdf>
- [27] DARPA Grand Challenge (2005). *Wikipedia* [online]. [cit. 6.2.2021].
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge_\(2005\)](https://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge_(2005))
- [28] THRUN, Sebastian, Mike MONTEMERLO, Hendrik DAHLKAMP, et al. Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. *Journal of Field Robotics*. 2006, 23(9), 661-692 [cit. 9.2.2021]. ISSN 15564959.
Dostupné z: doi:10.1002/rob.20147
- [29] Self Driving Car. *Stanford CS221* [online]. [cit. 6.2.2021].
Dostupné z: <https://stanford.edu/~cpiech/cs221/apps/driverlessCar.html>
- [30] DARPA Grand Challenge (2007). *Wikipedia* [online]. [cit. 6.2.2021].
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge_\(2007\)](https://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge_(2007))
- [31] URMSON, Chris, J. Andrew BAGNELL, Christopher BAKER, Martial HERBERT, Alonzo KELLY, Raj RAJKUMAR, et al. Tartan Racing: A Multi-Modal Approach to the DARPA Urban Challenge. *Carnegie Mellon University. Journal contribution*. 2018 [cit. 9.2.2021].
Dostupné z: doi:10.1184/R1/6561125.V1

- [32] MONTEMERLO, Michael, Jan BECKER, Suhrid BHAT, et al. Junior: The Stanford entry in the Urban Challenge. *Journal of Field Robotics*. 2008, 25(9), 569-597 [cit. 9.2.2021]. ISSN 15564959.
Dostupné z: doi:10.1002/rob.20258
- [33] Stanford Racing Team. Stanford's Robotic Vehicle Junior: Interim Report. [online] [cit. 9. 2. 2021]
Dostupné z: <https://archive.darpa.mil/grandchallenge/TechPapers/Stanford.pdf>
- [34] DAS, Souvik. Google and Cars: A Brief History. In: *Digit* [online]. 23.10.2017 [cit. 5.4.2021].
Dostupné z: <https://www.digit.in/features/car-tech/google-and-cars-a-brief-history-37694.html>
- [35] HARRIS, Mark. How a robot lover pioneered the driverless car, and why he's selling his latest to Uber. In: *The Guardian* [online]. 19.8.2016 [cit. 5.4.2021].
Dostupné z: <https://www.theguardian.com/technology/2016/aug/19/self-driving-car-anthony-levandowski-uber-otto-google>
- [36] FAIRFIELD, Nathaniel, Waymo Team. On the road with self-driving car user number one. In: *Waymo – Medium* [online]. 13.12.2016 [cit. 5.4.2021].
Dostupné z: <https://medium.com/waymo/scenes-from-the-street-5bb77046d7ce>
- [37] KRAFCIK, John. Waymo is opening its fully driverless service to the general public in Phoenix. In: *Waypoint – The official Waymo blog* [online]. 8.10.2020 [cit. 5.4.2021].
Dostupné z: <https://blog.waymo.com/2020/10/waymo-is-opening-its-fully-driverless.html>
- [38] The Waymo Team. The Waymo Driver Handbook: How our highly-detailed maps help unlock new locations for autonomous driving. In: *Waypoint – The official Waymo blog* [online]. 21.9.2020 [cit. 5.4.2021].
Dostupné z: <https://blog.waymo.com/2020/09/the-waymo-driver-handbook-mapping.html>
- [39] Off road, but not offline: How simulation helps advance our Waymo Driver. In: *Waypoint – The official Waymo blog* [online]. 28.4.2020 [cit. 5.4.2021].
Dostupné z: <https://blog.waymo.com/2020/04/off-road-but-not-offline-simulation27.html>
- [40] Meet our newest self-driving vehicle: the all-electric Jaguar I-PACE. In: *Waypoint – The official Waymo blog* [online]. 27.3.2018 [cit. 5.4.2021].
Dostupné z: <https://blog.waymo.com/2019/08/meet-our-newest-self-driving-vehicle.html>
- [41] Waymo Team. Introducing Waymo's suite of custom-built, self-driving hardware. In: *Waymo – Medium* [online]. 16.2.2017 [cit. 5.4.2021].
Dostupné z: <https://medium.com/waymo/introducing-waymos-suite-of-custom-built-self-driving-hardware-c47d1714563>

- [42] Laser Bear. *Waymo* [online]. [cit. 5.4.2021].
Dostupné z: <https://waymo.com/lidar>
- [43] How Autonomous Vehicles Work. *Let's Talk Autonomous Driving* [online]. [cit. 5.4.2021].
Dostupné z: <https://www.ltad.com/about/how-autonomous-vehciles-work.html>
- [44] JEYACHANDRAN, Satish. Introducing the 5th-generation Waymo Driver: Informed by experience, designed for scale, engineered to tackle more environments. In: *Waypoint – The official Waymo blog* [online]. 4.3.2020 [cit. 5.4.2021].
Dostupné z: <https://blog.waymo.com/2020/03/introducing-5th-generation-waymo-driver.html>
- [45] Waymo. Designing the Waymo Driver. In: *Youtube* [online]. 26.3.2020 [cit. 19. 2. 2021].
Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=o8rCOKSDMcg&ab_channel=Waymo
- [46] HEATH, Nick. Tesla's Autopilot: Cheat sheet. In: *TechRepublic* [online]. 1.8.2018 [cit. 10.2.2021]
Dostupné z: <https://www.techrepublic.com/article/teslas-autopilot-cheat-sheet>
- [47] YOSHIDA, Junko. Teardown: Tesla's Hardware Retrofits for Model 3. In: *EE Times Asia* [online]. 24.6.2020 [cit. 5.4.2021].
Dostupné z: <https://www.eetasia.com/teslas-hardware-retrofits-for-model-3>
- [48] Autopilot. *Tesla* [online]. [cit. 10.2.2021].
Dostupné z: https://www.tesla.com/cs_CZ/autopilot
- [49] ABUELSAMID, Sam. GM and Cruise Finally Give a Peek behind the Curtain of Their Automated-Driving Program. In: *Car and Driver* [online]. 29.11.2017 [cit. 12.2.2021]
Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/news/a15339038/gm-and-cruise-finally-give-a-peek-behind-the-curtain-of-their-automated-driving-program>
- [50] Introducing the Cruise Origin. Self-Driven. All-Electric. Shared. *Cruise* [online]. [cit. 11.2.2021].
Dostupné z: <https://www.getcruise.com/origin>
- [51] AMMANN, Dan. The Cruise Origin Story. In: *Cruise – Medium* [online]. 22.1.2020 [cit. 11.2.2021].
Dostupné z: <https://medium.com/cruise/the-cruise-origin-story-b6e9ad4b47e5>
- [52] FISCHER, JM. The Decision Behind Using Articulating Sensors on Cruise AVs. In: *Cruise – Medium* [online]. 1.7.2020 [cit. 12.2.2021]
Dostupné z: <https://medium.com/cruise/cruise-embedded-systems-articulating-radars-7cae24642930>

- [53] General Motors 2018 Self-Driving Safety Report [online]. 2018 [cit. 12.2.2021].
Dostupné z: <https://www.gm.com/content/dam/company/docs/us/en/gmcom/gmsafetyreport.pdf>
- [54] Zoox Vehicle Brochure [online]. [cit. 7.4.2021].
Dostupné z: <https://www.zoox.com/wp-content/uploads/zoox-press-release-vehicle-reveal-12.14.2020.pdf>
- [55] The ‘full-stack’ behind autonomous driving. *Zoox* [online]. [cit. 7.4.2021].
Dostupné z: <https://www.zoox.com/autonomy>
- [56] A vehicle built for riders. *Zoox* [online]. [cit. 7.4.2021].
Dostupné z: <https://www.zoox.com/vehicle>
- [57] BROWNING, Brett. New Eyes, New Ears, New Brains: Inside the Next Generation Argo AI Self-Driving System. In: *Ground Truth* [online]. 22.1.2021 [cit. 19.4.2021].
Dostupné z: <https://groundtruthautonomy.com/new-eyes-new-ears-new-brains-inside-the-next-generation-argo-ai-self-driving-system>
- [58] ABUELSAMID, Sam. Ford 4th-Generation Automated Vehicle Prototype Approaches Escape Velocity. In: *Forbes* [online]. 20.10.2020 [cit. 19.4.2021].
Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/samabuelsamid/2020/10/20/ford-4th-generation-automated-vehicle-prototype-approaches-escape-velocity/?sh=1e22d9e45587>
- [59] DAVIES, Chris. Ford’s latest autonomous car looks very familiar – Here’s why that matters. In: *SlashGear* [online]. 20.10.2020 [cit. 19.4.2021].
Dostupné z: <https://www.slashgear.com/fords-latest-autonomous-car-looks-very-familiar-heres-why-that-matters-20643535>
- [60] AINSALU Jaagup, Ville ARFFMAN, Mauro BELLONE, Maximilian ELLNER, Taina HAAPAMÄKI, Noora HAAVISTO, Ebba JOSEFSON et al. State of the Art of Automated Buses. *Sustainability*. 2018, 10, 3118. [cit. 19.3.2021].
Dostupné z: [doi:10.20944/preprints201807.0218.v2](https://doi.org/10.20944/preprints201807.0218.v2)
- [61] FABULOS project. *FABULOS* [online]. [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://fabulos.eu/fabulos-project>
- [62] Passenger survey results. *FABULOS* [online]. [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://fabulos.eu/passenger-survey-results>
- [63] Automated Shuttle Trial. *City of Toronto* [online]. [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://fabulos.eu/passenger-survey-results>
- [64] O’SULLIVAN, Kevin. Autonomous buses to become ‘fully operational’ later in 2021. In: *FutureScot* [online]. 18.2.2021 [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://futurescot.com/autonomous-buses-to-become-fully-operational-later-in-2021>

- [65] Groundbreaking Autonomous Bus Trial Begins. *Stagecoach* [online]. 18.3.2019 [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://www.stagecoachbus.com/news/national/2019/march/groundbreaking-autonomous-bus-trial-begins>
- [66] Autonomous shuttles in Gothenburg: green light for a pilot by Keolis – Västtrafik. *Sustainable Bus - Electric Bus and Sustainable mobility* [online]. 20.1.2021 [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://www.sustainable-bus.com/news/autonomous-shuttles-gothenburg-keolis>
- [67] Helmond pilot. *FABULOS* [online]. [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://fabulos.eu/helmond-pilot>
- [68] Gjesdal pilot 2. *FABULOS* [online]. [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://fabulos.eu/gjesdal-pilot-2>
- [69] Project HEAT. *Hamburger Hochbahn AG* [online]. [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: https://www.hochbahn.de/hochbahn/hamburg/en/home/projects/expansion_and_projects/project_heat
- [70] Gjesdal pilot. *FABULOS* [online]. [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://fabulos.eu/gjesdal-pilot>
- [71] Lamia pilot. *FABULOS* [online]. [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://fabulos.eu/lamia-pilot>
- [72] Sweden: Keolis launches a new 5G autonomous electric vehicle trial in Stockholm. *Keolis* [online]. 24.9.2020 [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://www.keolis.com/en/media/newsroom/press-releases/sweden-keolis-launches-new-5g-autonomous-electric-vehicle-trial>
- [73] Tallinn pilot. *FABULOS* [online]. [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://fabulos.eu/tallinn-pilot>
- [74] *Newcastle Driverless Shuttle Bus Trial – Newcastle Transport* [online]. [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://newcastlesdriverlessshuttle.com.au>
- [75] Helsinki pilot. *FABULOS* [online]. [cit. 23.3.2021].
Dostupné z: <https://fabulos.eu/helsinki-pilot>
- [76] IRU report forecasts alarming jump in driver shortage in Europe. *IRU* [online]. 9.3.2020 [cit. 16.5.2021].
Dostupné z: <https://www.iru.org/resources/newsroom/iru-report-forecasts-alarming-jump-driver-shortage-europe>
- [77] Truck Driver Shortage Analysis 2019. *American Trucking Associations*. 2019 [cit. 16.5.2021].
Dostupné z: <https://www.trucking.org/sites/default/files/2020-01/ATA%20Driver%20Shortage%20Report%202019%20with%20cover.pdf>

- [78] MULLEN, Jim. The Promise of Autonomous Driving Technology. In: *TuSimple* [online]. 20.2.2021 [cit. 16.5.2021].
Dostupné z: <https://www.tusimple.com/the-promise-of-autonomous-driving-technology>
- [79] ACKERMAN, Evan. Robot Trucks Overtake Robot Cars: This year, trucks will drive themselves on public roads with no one on board. In: *IEEE Spectrum*. vol. 58, no. 1, pp. 42-43, January 2021 [cit. 16.5.2021].
Dostupné z: doi:10.1109/MSPEC.2021.9311454
- [80] The Waymo Team. In the cab with the Waymo Driver: How trucks help advance our self-driving technology. In: *Waypoint – The official Waymo blog* [online]. 13.10.2020 [cit. 16.5.2021].
Dostupné z: <https://blog.waymo.com/2020/10/How%20trucks%20help%20advance%20our%20self-driving%20technology.html>
- [81] Pioneering Automation and Robotics in Mining. *Rio Tinto* [online]. [cit. 16.5.2021].
Dostupné z: <https://www.riotinto.com/about/innovation/automation>
- [82] *CARLA Simulator* [online]. [cit. 17.5.2021].
Dostupné z: <http://carla.org>

Zoznam skratiek

ALV	Autonomous Land Vehicle – autonómne pozemné vozidlo
ATA	American Trucking Associations – Americká asociácia nákladnej dopravy
AV	autonómne vozidlo
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency – Agentúra pre výskum pokročilých obranných projektov
FMCW	Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar – frekvenčne modulovaný radar s kontinuálnou vlnou
FOV	Field of View – zorné pole
GPS	Global Positioning System – globálny polohový systém
IMU	Inertial Measurement Unit – inerciálna meracia jednotka
IRU	International Road Transport Union – Medzinárodná únia cestnej dopravy
LIDAR	Light Detection and Ranging – svetelné rozpoznávanie a zameriavanie
MEMS	Microelectromechanical system – mikroelektromechanický systém
OPA	Optical Phased Array – optické fázované pole
SAE	Society of Automotive Engineers – Spoločnosť automobilových inžinierov
ToF	Time of Flight – čas letu