

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**ANALÝZA STAVU VÝVOJE  
AUTONOMNÍCH SYSTÉMŮ ŘÍZENÍ  
VOZU**

**2018**

**LADISLAV  
NUSSBAUER**

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci s názvem: „Analýza stavu vývoje autonomních systémů řízení vozu“ vypracoval samostatně pod vedením svého vedoucího práce Ing. Nikita Astraverkhau. Při psaní této práce jsem použil literaturu a další zdroje, které jsou uvedeny v Seznamu literatury.

V Praze dne

.....

Ladislav Nussbauer

## **PODĚKOVÁNÍ**

Zde bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Nikitovi Astraverkhau za pomoc při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu.

# ANOTACE

## Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou autonomních vozidel. Popisuje kritéria, která musí splnit vozidlo, aby bylo považováno za autonomní. Rovněž popisuje rozdíly mezi jednotlivými stupni autonomie. Dále je zde popsána legislativa v České republice, Německu a USA, týkající se provozu autonomních vozidel. Jsou zde také uvedeny příklady těchto vozidel a jejich provozovatelů. Práce se dále zabývá druhy senzorů, které autonomní vozidla používají. V práci jsou rovněž popsány vybrané algoritmy, které autonomní vozidla používají, a také problematika morálního rozhodování. Dále jsou popsány základy testování vozidel a problematiky umístění senzorů na vozidle. Závěrem je zpracována tabulka, která srovnává typy senzorů a koncepty vozidel.

## Abstract

This thesis deals with the problematics of autonomous vehicles. It describes the criteria that a vehicle must meet to be considered autonomous. It also describes the differences between degrees of autonomy. Furthermore, the legislation in the Czech Republic, Germany and the USA involving the operation of autonomous vehicles is described here. There are also examples of these vehicles and their operators. This thesis also deals with the sensors used by autonomous vehicles. It also describes select algorithms used by the vehicles as well as moral decision making. The thesis also describes the basics of vehicle testing and the issue of sensors placement on the vehicle. The final table compares sensor types and vehicle concepts.

## Klíčová slova

autonomní vozidla, stupně autonomie, legislativa autonomních vozidel, senzory autonomních vozidel, morální rozhodování, testování autonomních vozidel

## Keywords

autonomous vehicles, degrees of autonomy, legislation of autonomous vehicles, sensors used by autonomous vehicles, moral decision making, testing of autonomous vehicles

# OBSAH

## Obsah

Prohlášení .....	2
Poděkování .....	3
Anotace.....	4
Abstrakt .....	4
Abstract .....	4
Klíčová slova .....	4
Keywords .....	4
Obsah.....	5
1. Úvod.....	7
2. Definice systémů.....	8
Co už je autonomní řízení.....	8
Popis autonomního řízení dle SAE.....	8
Stupně autonomního řízení dle SAE.....	9
3. Úprava infrastruktury a legislativy .....	11
Česká republika .....	12
Spolková republika Německo .....	13
Spojené státy americké .....	14
Firmy provozující autonomní vozidla .....	15
4. Senzory .....	17
Ultrazvukové senzory .....	17
Kamery.....	17
Radar .....	18
LIDAR .....	19
Cloud.....	20
Spojení systémů .....	20
5. Algoritmy a režimy .....	25
Morální rozhodování.....	26
Problematické situace .....	27

Low speed.....	28
City speed .....	30
Highway speed .....	31
6. Testování.....	34
Vývojový V – diagram.....	34
Testování v umělých podmínkách .....	36
Field testování .....	37
7. Umístění senzorů a úpravy vozidla.....	37
Bezpečná místa.....	37
Riziková místa.....	38
8. Závěr .....	39
Použitá literatura .....	42
Seznam obrázků .....	45

# 1. ÚVOD

Autonomní vůz (neboli autonomně řízený vůz) je vůz, který ke svému provozu nepotřebuje řidiče. Volba trasy a interakce s okolím probíhá pomocí elektronických senzorů a systémů, jako je například GPS, radar, lidar nebo počítačové vidění. Zcela autonomní vozidla, tedy vozidla, která dokáží jezdit bez řidiče za všech podmínek, bez ohledu na počasí, kvalitu dopravního značení a vozovky, zatím na silnicích nepotkáme (očekává se, že by se mohly objevit v horizontu 20 let) [1]. Dnes se můžeme setkat s vozidly, která jsou schopna za určitých podmínek řídit sama, ale vyžadují neustálou pozornost řidiče (podrobněji se této problematice budu věnovat v části Definic systémů).

Co se týká plně autonomních vozidel, tak v současnosti jízdě bez řidiče brání nejen nedostatečné technologické možnosti, ale také legislativní překážky – odpovědnost za provoz vozidla a případné dopravní přestupky a nehody nese vždy řidič, takže by nebylo možné provozovat vozidlo, které by neřídil člověk. K tomu, aby tato vozidla mohla jezdit bez řidiče po veřejných pozemních komunikacích, by byl potřeba legislativní rámec, který by řešil tuto problematiku. Dalším problémem jsou etické otázky, například v případě, kdy by došlo nevyhnutelně ke srážce s chodcem, a automobil by se musel rozhodnout, jestli srazí chodce, nebo narazí do zdi, což by ohrozilo posádku. Dalším problémem může být možnost automobil ovládat na dálku, která by mohla být zneužita například ke krádeži. Tato problematika však nespadá do tématu této práce, a proto se jí nebudu dále zabývat.

Autonomní vozidla nabízí do budoucna mnoho příslibů, jako je například nižší nehodovost nebo výrazné zvýšení mobility pro ty, kteří nemají řidičský průkaz. Využití nenajdou jen v osobní dopravě, velký příslib nabízí také pro nákladní automobily, především pro kamiony – dopravní společnosti ušetří na platech řidičů, takže doprava zboží bude levnější. Nebudou navíc muset zastavovat kvůli přestávkám, takže bude doprava také rychlejší.

Základem každého samořízeného vozidla, ať už osobního, nebo nákladního, jsou senzory a systémy, které data ze senzorů vyhodnocují. K tomu je potřeba hardware (senzory, řídicí jednotka) a software (programy). Tyto položky v současnosti tvoří velkou část ceny těchto vozidel, jejichž konstrukce musí být přizpůsobená instalaci těchto komponent. Těmto systémům, stejně jako konstrukci vozidel, úpravě infrastruktury a testování autonomních vozidel se budu v této práci věnovat hlouběji.

## 2. DEFINICE SYSTÉMŮ

### Co už je autonomní řízení

Není možné jednoduše rozdělit vozidla na autonomní a neautonomní. Jak je v technice obvyklé, tak i v případě autonomních vozidel dochází k postupnému vývoji, tudíž zde neexistuje jedna hranice, od které se dá mluvit o autonomních vozidlech. Výrobci automobilů zaváděli a zavádějí postupně další a další systémy, které přebírají za určitých podmínek určité role řidiče a toho upozorňují nebo suplují v řízení automobilu. Tato situace by bez jednotné normy, která jasně definuje, jak moc autonomní vozidlo je, byla matoucí nejen z hlediska zákazníka, ale také například legislativy (za jakých podmínek je možné, aby řidič již nenesl odpovědnost za vozidlo, a tudíž by se řízení nemusel věnovat?). Proto americká standardizační společnost SAE International vytvořila členění autonomních vozidel do 6 úrovní podle toho, co všechno automobil dokáže bez pomoci řidiče.

### Popis autonomního řízení dle SAE

K tomu, aby mohly být popsány systémy autonomního řízení, používá společnost SAE pojmy, které se vztahují k autonomním vozidlům a které zde vyjmenuji a vysvětlím, abych je mohl v této práci dále používat. Tyto pojmy se nyní běžně v tomto oboru používají. [2]

- **Aktivní bezpečnostní systém** – systém, který sleduje potenciální nebezpečí pro vozidlo, jeho posádku nebo ostatní účastníky silničního provozu a buď řidiče pouze upozorní, nebo provede zásah do řízení. Jako příklad lze uvést z první skupiny varování před možným výskytem námrazy nebo nízkým tlakem vzduchu v pneumatikách, z druhé skupiny nouzové brždění před překážkou.
- **DDT (Dynamic driver task)** – úkony, které jsou potřebné k ovládnutí vozidla v provozu. Patří sem pohyb vozidla do stran (zatačení), vpřed či vzad (akcelerace a brždění), sledování okolí a reakce na něj (tyto úkony jsou označovány zkratkou **OEDR** (object and event detection and response)), manévrování (například změna jízdního pruhu) a komunikace s okolím (blinkry, světelný a akustický klakson). Nepatří sem však volba a plánování trasy. To, do jaké míry dokáže vozidlo samo vykonávat tyto úkony, má vliv na stupeň autonomie vozidla.
- **ADS (Automated driving system)** – systémy, které jsou schopné vykonávat všechny úkony DDT, a to buď neomezeně, nebo za určitých podmínek (omezeno počasím, stavem vozovky nebo na určité oblasti). Tento pojem se používá pro systémy od 3. úrovně výš.



- **ADS-DV** (ADS-dedicated vehicle) – Vozidlo, které je schopné fungovat v režimu ADS během všech svých cest (nemusí však nutně za všech podmínek), ke kterým je určeno. Jedná se o vozidla 4. nebo 5. stupně autonomie. Tato vozidla může ovládat řidič pouze mimo jejich ODD nebo v případě selhání některého ze systémů. Tato vozidla se dají označit jako vozidla bez řidiče, ačkoliv tento pojem bývá někdy (především laickou veřejností) ne zcela správně užíván i pro vozidla s nižším stupněm autonomie.
- V případě, že dojde k selhání některého ze systémů DDT, je potřeba, aby jeho funkci přebрал řidič, který tak učiní po varování nebo (v případě nižšího stupně autonomie) pokud sám nefunkčnost zpozoruje. Některé autonomní systémy mají schopnost v případě, že řidič toto neučiní nebo (v případě vozidel bez řídicích prvků) nemůže učinit, samy dosáhnout tzv. stavu minimálního rizika, což může představovat například odstavení vozidla na krajnici a přivolání pomoci.
- **ODD** (Operational design domain) – podmínky, za kterých funguje automatické řízení vozidla, mohou být omezeny například oblastí, počasím, provozem, rychlostí nebo situací.
- Důležitý aspekt silničního provozu je také sledování, které provádí řidič nebo vozidlo. SAE rozlišuje sledování řidiče, okolí, stavu vozidla a systémů automatického řízení.
  - Sledování řidiče má za cíl především zjišťovat, jestli řidič plní svou roli správně. Ačkoliv se sem dá zařadit také systém sledování únavy, kterým jsou vybavena i některá vozidla bez automatizace řízení, jeho hlavní využití je tam, kde vozidlo řídí samo, ale je zároveň potřeba, aby řidič sledoval okolí a byl připraven převzít řízení, tedy u úrovní 2 a 3. Jako příklad lze uvést systém Autopilot od Tesly, kde řidič musí mít neustále alespoň jednu ruku na volantu.
  - Sledování okolí může provádět vozidlo, řidič nebo oba současně. Tato činnost patří pod OEDR.
  - Sledování stavu vozidla – od stupně 4 jej provádí samo vozidlo, do stupně 3 tak může vozidlo rovněž činit, ale řidič jej musí také sledovat, jelikož vozidlo nemusí nutně být schopné rozpoznat všechny poruchy.
  - Sledování systémů automatického řízení – ve stupních 1 a 2 sledování provádí řidič (ačkoliv vozidlo může mít funkci varování), od stupně 3 toto provádí vozidlo.

## Stupně autonomního řízení dle SAE

SAE rozeznává tyto stupně autonomního řízení 0 až 5 [2]:

- **Stupeň 0** – Žádná automatizace – všechny DDT vykonává řidič, vozidlo může být vybaveno aktivními bezpečnostními systémy. Sem patří starší vozidla bez systémů automatického řízení, ale i vozidla s klasickým tempomatem, který pouze udržuje rychlost.
- **Stupeň 1** – Asistence – určitá DDT (včetně některých OEDR) vykonává vozidlo automaticky, ale některá řidič. Ten musí být připraven navíc převzít i funkci vykonávanou automaticky, pokud vidí, že ta nekoná svou funkci správně. Sem patří například vozidla s adaptivním tempomatem (ACC) nebo systémem aktivního udržení vozidla v pruhu (Lane Assist) s možností zásahu do řízení, ale ne s kombinací obou těchto systémů. Lze sem zařadit i parkovací asistent, který ovládá při parkování volant, ale plyn a brzdu ovládá řidič. Vozidla s tímto stupněm automatizace nalezneme v nabídce prakticky každého výrobce, a to i u vozů nižší třídy.
- **Stupeň 2** – Částečná automatizace – vozidlo samo udržuje rychlost a směr jízdy, zatímco řidič vykonává některá OEDR, která systém neumí, a je připraven kdykoliv zasáhnout do řízení v případě, kdy vidí, že systémy nefungují správně. Tato automatizace může být (a většinou bývá) omezena například rychlostí, provozem nebo situacemi. Typickým příkladem je vozidlo s ACC a Lane Assist, které je schopné jet bez zásahů řidiče po dálnici. Patří sem také kupříkladu asistent pro jízdu v koloně, který umí ovládat vozidlo v hustém provozu od nulové rychlosti po nějakou maximální rychlost, například 60 km/h. Dále sem patří parkovací asistent, který zaparkuje vozidlo zcela bez zásahu řidiče. V této úrovni automatizace lze sehnat automobil u téměř všech výrobců, většinou v příplatkové výbavě. Patří sem i vozidla od firmy Tesla se systémem Autopilot. Toto označení se dá považovat za mírně zavádějící, jelikož řidič musí sledovat okolí a reagovat na nenadálé situace, které systém neumí rozpoznat.
- **Stupeň 3** – Podmíněná automatizace – vozidlo samo vykonává všechna DDT včetně OEDR. Má omezené ODD. Pokud vozidlo funguje v autonomním režimu (podmínky to umožňují), řidič se nemusí věnovat sledování provozu a okolí, ale musí být schopen na vyzvání převzít řízení. To nastane, když se vozidlo dostane do situace, když je mimo ODD systému nebo když dojde k selhání řídicích systémů vozidla. Dále musí být připraven převzít řízení ihned v případě, že dojde ke zjevnému fyzickému poškození vozidla, které zásadně mění jízdní vlastnosti, například poškození podvozku nebo pneumatiky. Tento stupeň je momentálně nejvyšší, který je možné si pořídít.

- **Stupeň 4** – Vysoká automatizace – vozidlo vykonává všechny DDT včetně OEDR samo a stejně jako u stupně 3 má omezené ODD. Na rozdíl od stupně 3 se obejde zcela bez zásahů řidiče, protože v případě, že se vozidlo dostane mimo ODD nebo pokud selže některý systém, dokáže dosáhnout stavu minimálního rizika – zastavit na okraji silnice nebo pokračovat nízkou rychlostí. Pokud je ale vozidlo vybaveno řídicími prvky, může v takovém případě ovládnutí převzít řidič a pokračovat v jízdě. V praxi to může vypadat tak, že například vozidlo, jehož ODD je omezeno na dálniční provoz, řídí na dálnici samo, a když je potřeba dálnici opustit, řidič je vyzván k převzetí řízení a učiní tak. Pokud by tak neučinil, vozidlo zastaví na krajnici. Pokud však se vozidlo nachází v ODD a všechny systémy fungují, řidič je zde prakticky ve funkci pasažéra. Tento systém se dá použít například v situaci, kdy by řidič automobil opustil před nákupním centrem, a to by samo zaparkovalo v garáži. Na vyzvání by řidiče vyzvedlo, což by znamenalo, že řidič by nemusel chodit do garáží. Další možností je výše zmíněná jízda po dálnici nebo například vozidla, jezdící zcela bez řidiče ve vymezené oblasti, například vojenská základna nebo letiště. O tomto systému se uvažuje také u nákladních automobilů, které by jezdily po dálnici v konvojích s malými rozestupy, které by v případě lidských řidičů byly nedostatečné. Pokud by zde chtěl řidič převzít řízení, systém by mu to povolil až poté, co by se vozidlo před ním vzdálilo.
- **Stupeň 5** – Plná automatizace – podobá se stupni 4 s rozdílem, že vozidlo nemá omezené ODD a je schopné samo jezdit za všech podmínek. Pokud by podmínky provoz neumožnily (například povodeň, sněžná bouře s téměř nulovou viditelností, ledovka nebo sněžné závěje), vozidlo se dostane do stavu minimálního rizika (zastaví na krajnici). Jedná se o situace, kdy by řízení nebyl schopen ani lidský řidič. Tento stupeň lze použít u taxi bez řidiče, ale také u autonomně řízených nákladních automobilů nebo autobusů. Společnost Tesla prohlašuje, že jejich nejnovější modely jsou vybaveny hardwarem, který bude v budoucnu umožňovat plně automatizované řízení, nicméně nikoliv softwarem.

### 3. ÚPRAVA INFRASTRUKTURY A LEGISLATIVY

Provoz autonomních vozidel, ve kterých by odpovědnost za případnou nehodu nenesl řidič, je z hlediska legislativy poměrně komplikovanou záležitostí, která se neobejde bez změn. Zatímco většina světových zemí toto zatím vůbec neumožňuje. Kupříkladu v roce 1968 se ve Vídni konala konference za účelem zvýšení bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích. Ratifikovalo ji 73 států, mezi nimi také Česká republika. V této konvenci je mimo jiné uvedeno

v článku 8, že „Každé pohybující se vozidlo nebo souprava vozidel musí mít řidiče.“, nebo „Každý řidič musí být vždy schopen řídit své vozidlo.“ [3] To znamená, že provoz autonomních vozidel 4. stupně (nebo dle výkladu dokonce 3. stupně) je v rozporu s touto konvencí. Tato konvence představuje jednu z překážek provozu autonomních vozidel v Evropě. Existují však případy, kdy tato problematika dostává legislativní rámec.

## Česká republika

Legislativa v České republice není provozu autonomních vozidel příliš nakloněna. Provoz na pozemních komunikacích se zde řídí „Zákonem č. 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích“, přijatým v roce 2014. [4] Celé znění tohoto zákona přesahuje rámec této práce, proto pouze vyjmenuji hlavní překážky, které tento zákon klade provozu autonomních vozidel na pozemních komunikacích.

- § 3 – Základní podmínky účasti na provozu na pozemních komunikacích – v tomto paragrafu je uvedeno, že řídit motorové vozidlo může pouze osoba, která je držitelem příslušného řidičského oprávnění (s výjimkou vozidel autoškoly) a dále je fyzicky i duševně způsobilá. Autonomní vozidla 4. a 5. stupně nicméně umožňují, aby je ovládala i osoba, která tato oprávnění nemá nebo má, ale dočasně není schopna (například kvůli úrazu nebo požití alkoholických nápojů) řídit vozidlo. To je však v rozporu s tímto paragrafem.
- § 5 – Povinnosti řidiče – v tomto paragrafu je uvedeno „Řidič je kromě povinností uvedených v § 4 dále povinen věnovat se plně řízení vozidla nebo jízdě na zvířeti a sledovat situaci v provozu na pozemních komunikacích.“ Autonomní vozidla 3. stupně však umožňují, aby se řidič nevěnoval řízení a nesledoval situaci, stačí jim, aby byl připraven reagovat na vyzvání. Od 4. stupně dále se řízení nemusí věnovat vůbec. Dále je zde uvedeno, že řidič nesmí požit alkoholický nápoj během jízdy ani řídit, pokud je pod vlivem alkoholu. To však vozidla 4. stupně nevylučují. Všechny tyto případy jsou v rozporu s tímto paragrafem.
- § 7 – Povinnosti řidiče – zde je rovněž uvedeno „Řidič nesmí při jízdě vozidlem držet v ruce nebo jiným způsobem telefonní přístroj nebo jiné hovorové nebo záznamové zařízení.“ Autonomní vozidla od 3. stupně dále však umožňují, aby se řidič věnoval například vyřizování emailů, SMS nebo telefonních hovorů.

Z výše uvedeného vyplývá, že k tomu, aby bylo možné provozovat autonomně řízená vozidla na území České republiky, by bylo potřeba schválit změnu výše uvedeného zákona. Legislativní proces v České republice je ale poměrně zdlouhavá záležitost, která trvá sama od

sebe přinejmenším několik měsíců. Tyto změny předchází téměř vždy politická i veřejná diskuse, která spolu s legislativním procesem může trvat i roky. Vývoj autonomních vozidel se však pohybuje kupředu a například vozidla 3. stupně jsou již ve výrobě. Proto bude dříve či později nevyhnutelné, aby zde byla přijata odpovídající opatření.

Co se týká vlastního provedení změn, v zásadě jsou dvě možnosti. Tou první je úprava povinností řidiče, která by okruh těchto povinností zúžila pro případ, že se jedná o autonomně řízené vozidlo. Nevýhodou tohoto řešení by byl fakt, že tím bude znění zákona méně přehledné.

Druhou možností by bylo upravit vymezení pojmů tak, aby osoba, která ovládá autonomní vozidlo čtvrtého nebo pátého stupně, nebyla považována za řidiče, ale například uživatele, jehož povinnosti by byly definovány zvlášť. Otázkou u tohoto řešení by bylo, jak naložit s vozidly třetího stupně. Nejlepší by dle mého názoru bylo, aby ovládající osoba byla uživatelem až do okamžiku, kdy jej vozidlo vyzve k převzetí řízení.

## **Spolková republika Německo**

Německo je v současnosti z evropských států nejbližší zavedení zákonných norem, které by umožnily provozování autonomních vozidel bez řidiče. Roku 2015 představila německá vláda strategii pro přijetí odpovídajících zákonných norem, a to s cílem umožnit provoz autonomních vozidel do roku 2020. Nejprve by byla provozována na dálnicích a parkovištích. [5]

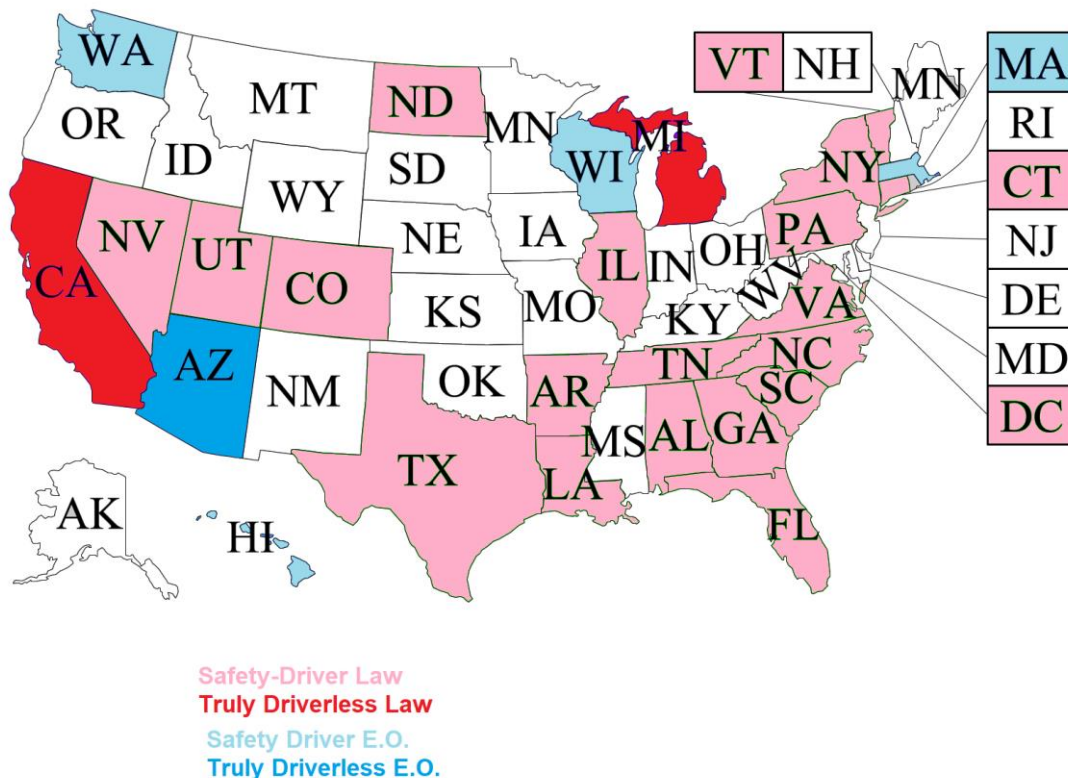
Co se týká vlastních změn, jedná se mimo jiné o úpravu vídeňské konvence, kdy je slovo „řidič“ doplněno slovy „systém s plnou kontrolou nad vozidlem“. Dále se jedná o úpravu vyhlášky o silničním provozu. Její podrobnější výpis by přesahoval obsah této práce.

Kromě těchto změn byl schválen v roce 2015 projekt tzv. digitální testovací dálnice. [6] Tato dálnice je určena pro výrobce automobilů a elektroniky a umožňuje testovat autonomní vozidla v reálném provozu na dálnici. Pro tento projekt byl vybrán úsek dálnice A9 mezi Norimberkem a Mnichovem, jedná se o poměrně důležitý a frekventovaný dopravní tah. Vozidla (nejen autonomní) mohou být digitálně propojena pomocí internetové sítě s přenosovou rychlostí nejméně 50 Mbit/s a s frekvencí 700 MHz. Od tohoto propojení si ministerstvo dopravy slibuje zvýšení bezpečnosti, plynulosti a pohodlí provozu.

Pro úplnost je vhodné dodat, že ačkoliv na německých dálnicích není implicitně omezena maximální rychlost, pro autonomní vozidla se počítá s maximální rychlostí 130 kilometrů v hodině.

## Spojené státy americké

Spojené státy byly první zemí na světě, která povolila provoz autonomních vozidel. Jedním z důvodů může být i to, že Spojené státy nepodepsaly a neratifikovaly Vídeňskou úmluvu, která, jak je výše zmíněno, představuje překážku v provozu autonomních vozidel. Ta ve Spojených státech ale nejsou povolena všude, ale pouze v některých státech, které si o této záležitosti rozhodují samy. Jako první zde provoz těchto vozidel povolila Nevada. Stalo se tak v roce 2011 a ostatní státy, které podobná legislativní opatření přijímaly později, se v jejich znění inspirovaly nevadským. Následující obrázek ilustruje, v jakých státech je provoz autonomních vozidel povolen, a to k prvnímu lednu roku 2018. Státy ve světlejším odstínu vyžadují, aby byl vždy přítomen řidič, státy ve tmavším odstínu alespoň za určitých podmínek řidiče nevyžadují. Červená barva značí, že se jedná o zákon, modrá pak výkonné nařízení vlády.



Obrázek 1

Tyto zákony definují, co je autonomní vozidlo. Podle těchto zákonů mezi autonomní vozidla nepatří automobily vybavené systémy jako ACC, Lane Assist, parkovací asistent a další, pokud nejsou používány pro autonomní režim řízení. Dá se tedy říci, že z hlediska těchto zákonů je autonomním vozidlem vozidlo se stupněm autonomie 3 a více. Ve vozidlech musí být přítomen řidič (osoba s platným řidičským oprávněním), který musí být schopen kdykoliv převzít kontrolu nad vozidlem. Dále musí být vozidla vybavena optickou indikací, která

informuje okolí o faktu, že je vozidlo řízeno autonomně. Některé státy však již některé tyto náležitosti nevyžadují (zmíním v dalších odstavcích). [7]

**Nevada** byla prvním americkým státem, který umožnil provoz autonomních vozidel, a to v roce 2011. Pojem autonomní vozidlo znamená v tomto případě technologii, která umožňuje řídit vozidlo bez zásahů nebo monitorování člověka (tedy od třetího stupně výše). Vozidla mohou být provozována za účelem testování i za účelem přepravy osob. Autonomní vozidla musí projít speciálními testy a získat osvědčení. Řídit je mohou osoby s platným řidičským oprávněním, které mají uvedenou poznámku v řidičském průkazu.

**Kalifornie** v roce 2012 přijala podobná zákonná opatření jako Nevada, jejichž znění bylo téměř totožné. Od 2. dubna 2018 však začne platit změna, která umožní provoz těchto vozidel zcela bez řidiče – jedná se tedy o autonomní vozidla 4. stupně. Licenci k provozu takových vozidel získalo zatím 50 společností. Tato vozidla musí být možné ovládat dálkově a také musí umět komunikovat s ostatními řidiči a bezpečnostními složkami. [9]

**Arizona** sice nemá zákony upravující provoz autonomních vozidel, ale díky výkonným nařízením je možné je zde testovat, a v oblasti o velikosti 100 čtverečních mil ve městě Chandler dokonce bez řidiče. Toho využívají vozidla Waymo, o kterých se podrobněji zmíním dále v této práci. [10]

## **Firmy provozující autonomní vozidla**

Autonomní vozidla představují pro výrobce automobilů potenciál velkého zisku, a proto se jich mnoho, ať už tradičních nebo nových, pokouší o jejich vývoj a testování. K tomu dochází v simulacích, na testovacích tratích a dnes už i v běžném provozu. V této části práce představím některé z těchto projektů blíže.

**Waymo**, dříve známé jako Google Self – Driving Car Project, jsou autonomní vozidla vyvíjená společností Google poháněná elektromotorem s akumulátory. Jejich charakteristickým znakem je nástavba na střeše se senzorem LIDAR. Jako první byla v běžném provozu testována v Nevadě – Google byl velkým zastáncem legislativních úprav, které jejich provoz legalizovaly. Řidič může převzít kontrolu nad vozidlem pomocí volantu a pedálů. Jedná se o vozidla 3. úrovně autonomie, ačkoliv koncem roku 2017 začalo testovat vozidla, kde řidič již není přítomen (respektive prozatím je přítomen, ale pouze na zadním sedadle), tudíž se jedná o vozidla 4. úrovně. Testování probíhá v Arizoně v oblasti města Chandler, jak jsem zmínil výše. Je plánováno, že se jízd těchto vozidel budou moci zúčastnit běžní lidé jako pasažéři. [10]

V březnu roku 2018 se společnost rozhodla, že si pro další testování pořídí vozidla Jaguar I-Pace. Jedná se o 20 000 vozidel, které mají být vyrobeny během dvou let. V budoucnu mají

sloužit pro autonomní přepravu osob, které si vozidlo objednají přes aplikaci. Testovací jízdy by měly začít ještě v letošním roce. [33]

**Volvo Drive Me** je projekt společnosti Volvo, která je velmi aktivní ve vývoji autonomních a asistenčních systémů řízení. V roce 2013 spustili projekt, který měl za cíl vyvinout do roku 2017 sto vozidel se čtvrtým stupněm automatizace řízení a dodat je vybraným uživatelům, kteří by je mohli otestovat v provozu. Jedná se vozidla XC90 s hybridním pohonem. Testování by probíhalo na vymezené trase v Göteborgu. [11] Koncem roku 2017 bylo však oznámeno, že vozidla Volvo stihne dodat až do roku 2021, ačkoliv se již první vozidla začala dodávat. Dále se nebude jednat o 100 vozidel (100 rodin), ale pouze 100 lidí. Vozidla nebudou mít 4. stupeň automatizace, ale pouze druhý (důvodem jsou i mimo jiné zákonné překážky). [12]

**Mercedes-Benz Actros Highway Pilot** je první sériově vyráběný kamion, který je vybaven částečně autonomním systémem řízení. Jeho první (a zatím jediná) testovací jízda v běžném provozu proběhla na dálnici A8 mezi Denkendorfem a Stuttgartem. Vozidlo je schopné na dálnici sledovat okolí a ovládat samo svůj směr jízdy a rychlost. Umí také jezdit v dopravní zácpě. Jedná se o autonomní systém čtvrtého stupně. Pokud má vůz opustit dálnici nebo dojde k situaci, kterou automatické řízení nedokáže řešit (například přechodné značení během práce na silnici), řidič je vyzván k převzetí řízení. Pokud nereaguje, vůz sám bezpečně zastaví. [13]

**Uber** je dnes poměrně známou společností, která nabízí levnější alternativu k taxislužbě (ačkoliv není všude legální, jelikož s sebou nese několik právních problémů, což ovšem není obsahem této práce). Tato společnost má v plánu časem nahradit své řidiče autonomními vozidly. S tímto projektem začali v roce 2015, když si pořídili a upravili 20 vozidel Ford Fusion a začali je testovat v Pittsburghu v Pensylvánii. Vozidla měla 20 kamer, sedm laserových senzorů, GPS, radar a LIDAR. Ve vozidlech byl vždy řidič, který mohl kdykoliv převzít kontrolu. Po těchto experimentech se rozhodli, že dále budou používat vozidla Volvo XC90. Tato vozidla po testování začala fungovat i v běžném provozu a dnes již v Pittsburghu poskytují taxislužbu, ovšem stále s řidičem pro případ nouze. Navíc probíhá testování i v dalších oblastech, například v Arizoně. [14] Společnost plánuje, že do 10 až 15 let budou ve většině měst používat pouze autonomní vozidla. [15]

V březni 2018 však došlo k nehodě vozidla Uber s chodcem, která měla za následek smrt chodce. Zatím není zřejmé, z jakého důvodu k nehodě došlo. V reakci na tento incident Uber dočasně přerušil testování autonomních vozidel v provozu a také mu bylo pozastaveno povolení testovat tato vozidla v Arizoně. [34]



## 4. SENZORY

Základem každého vozidla je dnes elektronika, která na vozidlech řídí prakticky vše a tvoří také nezanedbatelnou část ceny vozidla. Jejímu vývoji se proto věnuje nemálo úsilí a financí. V případě autonomních vozidel toto platí dvojnásob – autonomní vozidla se z hlediska konstrukce od neautonomních liší především přítomností množství senzorů a řídicí jednotky, která zpracovává a vyhodnocuje data z nich přijatá.

Autonomní vozidla, ať už plně nebo částečně, disponují celou řadou senzorů. Dokonce vozidla, která nejsou vůbec autonomní, už mnoho desítek let používají senzory – tachometr, otáčkoměr, teploměr apod. Těmito senzory se však v této práci zabývat nebudu a místo toho se zaměřím na senzory, které automobil používá ke vnímání okolí. Tyto senzory nalezneme i u neautonomních vozidel, ale v případě těch autonomních jsou na ně logicky kladeny podstatně vyšší nároky.

### Ultrazvukové senzory

Tyto senzory pracují na principu odrazu ultrazvukových vln. Vysílač vyšle tyto vlny, které se při dopadu na překážku odrazí a zachytí je přijímač. Čím je překážka vzdálenější, tím později je vlna zachycena. Na stejném principu se ve tmě orientují netopýři. Tyto senzory jsou schopny zjistit, jakým směrem se nachází překážka a jak je daleko.

Nevýhodou ultrazvukových senzorů je jejich malý dosah, pouze několik málo metrů. To znamená, že je lze užít pouze pro nízké rychlosti. Setkáme se s nimi kromě autonomních vozidel i u klasických – v obou případech pomáhají při parkování, ať už jen akustickou či vizuální signalizací, nebo když je vozidlo schopno zaparkovat samo. Tyto senzory jsou navíc schopny rychlého vyhodnocování, takže pokud by pod vozidlo například během parkování náhle vběhlo dítě, senzory by ho rychle zachytily a vozidlo by zastavilo. Tyto senzory se stále vyvíjí, ale již je pravděpodobně nečeká žádná revoluční změna, jelikož svůj účel plní uspokojivě a vzhledem k fyzikálním limitům této technologie nelze jejich dosah výrazně prodloužit. [16]

Mezi hlavní výrobce těchto senzorů patří firmy Bosch a Valeo. Firma Bosch nabízí v současnosti senzory 6. generace, které jsou schopné detekovat objekt, jehož rozměr je alespoň 3 centimetry, a to na vzdálenosti od 15 centimetrů až do 5,5 metru. [17]

### Kamery

Kamery pracují na stejném principu, jako oko člověka – opticky. Kromě autonomních vozidel je najdeme i na neautonomních – poměrně rozšířená je dnes zadní kamera, používaná

při couvání (od letošního roku dokonce povinná pro všechny vozy prodávané v USA); setkat se lze i se systémem Surround View – vozidlo má několik kamer (minimálně čtyři), a to vpředu, vzadu a po stranách, například na zpětných zrcátkách. Tyto kamery jsou schopny poskládat obraz a je možné si pak zobrazit vozidlo z ptačí perspektivy, což může velmi pomoci při manévrování v omezeném prostoru. U autonomních vozidel tento systém pomůže doplnit při parkování ultrazvukové senzory, například v případě, že by v cestě vozidlu stála nízká překážka, která by byla mimo zorné pole ultrazvukového senzoru. Další funkce, která je pro autonomní vozidla klíčová, ale setkáme se s ní i u vozidel řízených člověkem, je rozpoznávání dopravního značení kamerami, ať už svislých dopravních značek, světelné signalizace na semaforech nebo vodorovného značení (toho využívá i dnes poměrně rozšířený systém Lane Assist). Autonomní vozidla užívají také kamery jako senzory při jízdě – pokud jsou dvě kamery směřující stejným směrem, je možné s jejich pomocí i rozpoznat vzdálenost objektů.

Tyto kamery jsou dnes schopné vidět na vzdálenost zhruba 120 metrů, což ovšem pro provoz ve vyšší rychlosti (například mimo město nebo na dálnici) není dostačující – bylo by potřeba kolem 250 metrů, aby vozidlo mohlo dostatečně předvídat a včas reagovat. Dalším limitem tohoto typu senzoru je jeho snížená účinnost během zhoršené viditelnosti – například při mlze, hustém dešti nebo sněžení nebo například při jízdě proti slunci. Dále je potřeba vylepšit rozlišovací algoritmy – například v rozpoznání chodců mají dnes kamery jen 95 % účinnost. [16]

Co se týká výrobců, hlavním hráčem na trhu je izraelská společnost Mobileye, kterou v loňském roce odkoupil známý výrobce elektroniky Intel. Věnují se všem systémům ADAS (Advanced Driver Assistance Systems), které zahrnují i ostatní druhy senzorů. Patří sem systémy Lane Assist, varování před kolizí, nouzové brždění, ACC nebo asistent pro jízdu v koloně. Jejich hlavní specializací jsou však optické systémy a počítačové vidění – kamery snímají okolí vozidla v rozsahu 360° a řídicí jednotka na jejich základě vytváří obraz, který vyhodnocuje a řídí se podle něj. Tento systém může fungovat jako záloha pro všechny ostatní systémy. Ačkoliv by teoreticky bylo možné používat pouze kamery (Mobileye dokonce dokázali dojet s autonomním vozidlem z Jeruzaléma do Tel Avivu pouze s použitím kamer), v praxi je výhodnější kombinovat je s ostatními senzory – například radar a LIDAR mají výrazně větší dosah a lze jich použít i v podmínkách špatné viditelnosti. [18]

## **Radar**

Radar (Radio Detection and Ranging) je senzor, který funguje na principu elektromagnetických vln, které vysílá. Pokud zasáhnou překážku, odrazí se zpět. Tím je možné

zjistit vzdálenost objektu a také vzájemnou rychlost. Poprvé byl použit během druhé světové války Brity na detekci německých letadel. Dnes se používá v mnoha aplikacích – kromě vojenství je hodně důležitý v letecké a námořní navigaci, a prosadil se i do automobilů. Systém ACC, který se dnes vyskytuje v mnoha automobilech, je založen na detekci ostatních vozidel radarem. U autonomních vozidel je jeho použití podobné, navíc díky dosahu kolem 250 metrů je možné jej užít i při jízdě vyšší rychlostí mimo město nebo na dálnici. Nevýhodou je, že vysílá pouze vodorovně, tudíž není schopen rozpoznat výšku objektu, pokud se nejedná o tzv. 3D radar s druhou anténou pro vertikální směr. [16]

Největším výrobcem radarů je firma Bosch. V současnosti nabízí dvě varianty radaru, každý s výhodami a nevýhodami. Přirozeně lze oba radary kombinovat.

Jednou variantou je radar středního dosahu (MRR), který má několik antén s různými vlastnostmi. Disponuje anténou se zorným polem  $\pm 42^\circ$ , které umožní spolehlivě detekovat chodce. Hlavní anténa má zorné pole  $\pm 6^\circ$  a dosah 160 metrů. Dále má anténu, která snímá vertikálně a umožní detekovat výšku objektů a tím umožní vozidlu rozpoznat, jestli podjede například pod nízkým mostem. Radar pracuje s frekvencí 76-77 GHz a je schopen detekovat zároveň 32 objektů. [19]

Druhou variantou je radar dlouhého dosahu 4. generace (LRR4). Ten má 4 hlavní antény, které pokrývají zorné pole  $\pm 6^\circ$  a nabízí dosah 250 metrů. Dále jsou zde dvě vnější antény se zorným polem  $\pm 20^\circ$  a dosahem 5 metrů, které registrují vozidla vjíždějící do pruhu a opouštějící pruh. Radar používá frekvenci 76-77 GHz a je schopen detekovat zároveň 24 objektů. [20]

## **LIDAR**

LIDAR (Light Detection and Ranging) skenuje prostředí pomocí neviditelného laserového paprsku. Ten se odráží a vrací do senzoru, z jehož dat lze vytvořit trojrozměrný obraz snímaného prostředí. Tento senzor se u neautonomních vozů neuvádá, zato u autonomních je běžný a často výrazný – většinou se jedná o velký „maják“ na střeše. LIDAR umožňuje přesně identifikovat objekty v okolí, jako jsou chodci nebo jiná vozidla. Jeho největší nevýhodou je cena – k jeho výrobě jsou potřeba drahé materiály. Vyvíjí se jeho modifikace, která by využívala záblesky místo stálého emitování paprsků, což by umožnilo detailnější snímání. [16]

Příkladem LIDARu je Valeo SCALA®. Umisťuje se do předku automobilu a snímá oblast před vozidlem. Lze jej využít jako jeden ze senzorů v autonomních vozidlech. [21]

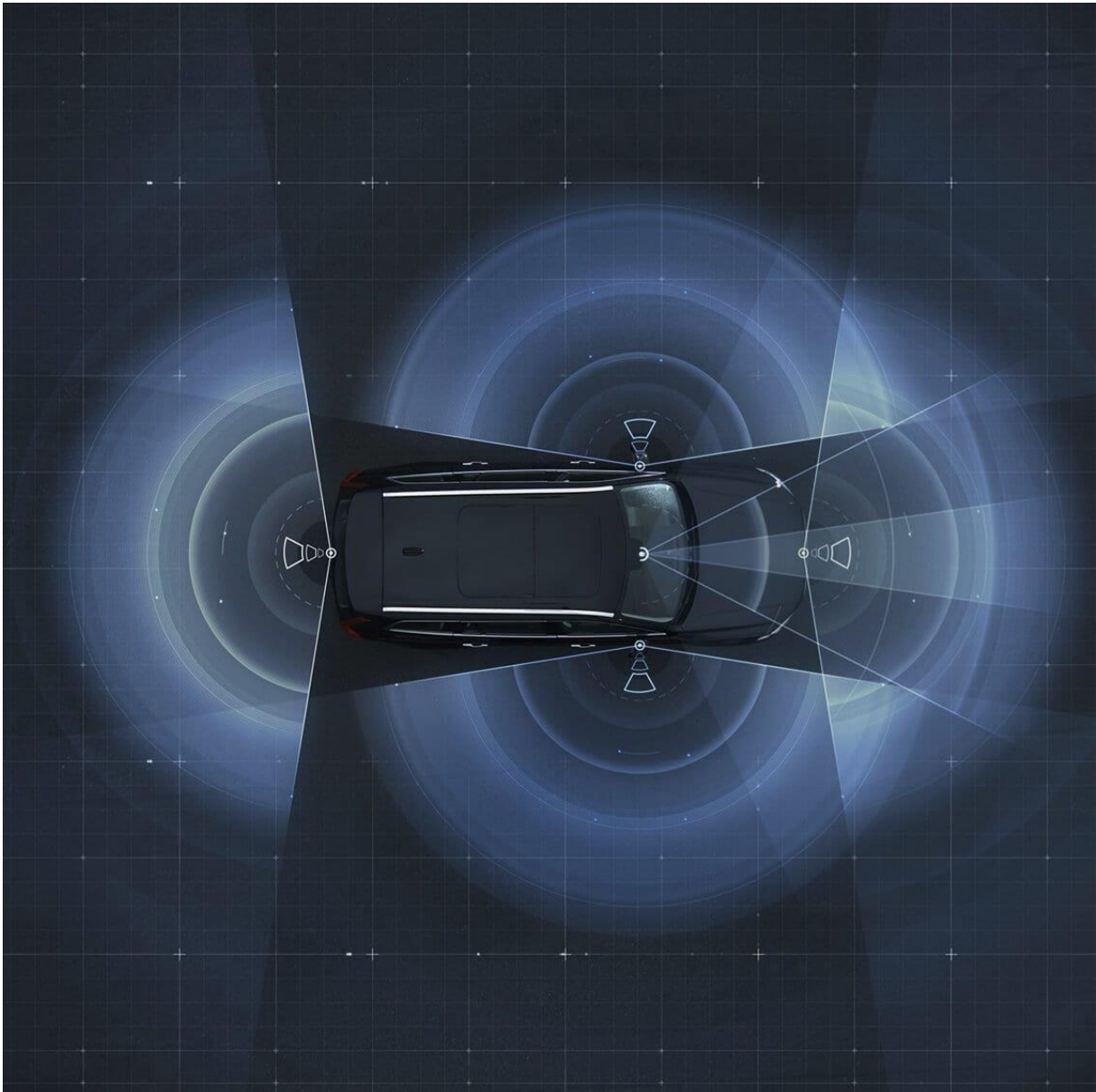
## **Cloud**

Nejedná se o klasický senzor, ale o vzájemné propojení vozidel prostřednictvím internetu. Používá se například na tzv. digitální dálnici v Německu (zmíněno již dříve v této práci), ale daly by se sem zařadit například navigace s dopravními informacemi, které umožní zvolit optimální trasu s ohledem na provoz a uzavírky. U autonomních vozidel se jedná v principu o totéž, ale s tím rozdílem, že by mohlo samotné vozidlo například změnit trasu bez pokynů řidiče nebo zpomalit před dopravní zácpou, což by snížilo spotřebu paliva.

## **Spojení systémů**

Autonomní vozidlo kombinuje výše uvedené systémy – na rozdíl od člověka není schopné se stoprocentně spolehnout se pouze na jeden druh vnímání. Následující obrázky ilustrují, jak může vypadat spojení autonomních systémů ve vozidle. Jako příklad jsem vybral Volvo XC90 z výše zmíněného projektu Drive Me, které je vybaveno všemi zmíněnými systémy.

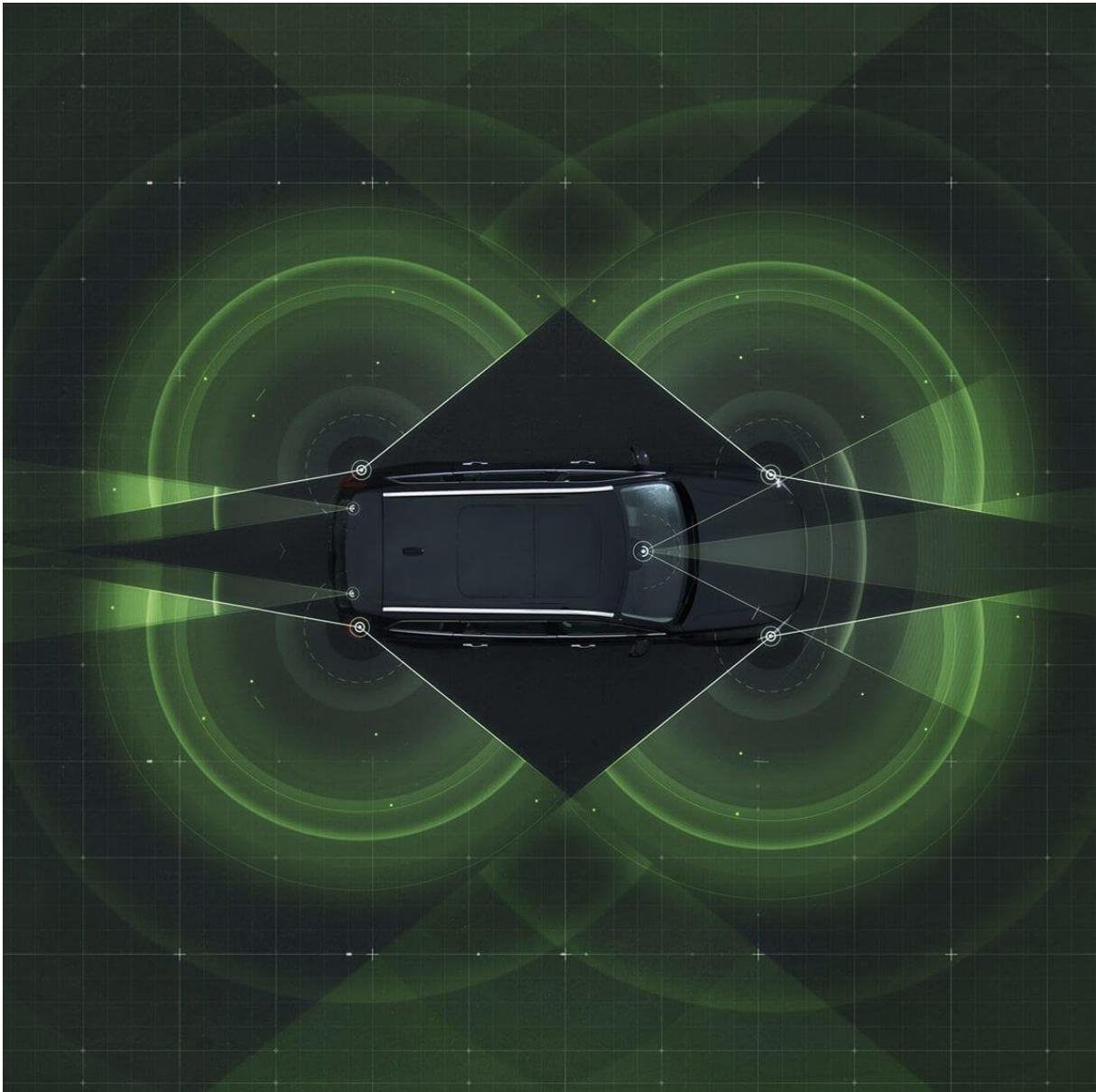
## Kamera



*Obrázek 2*

Tento obrázek ilustruje, jakými kamerami je vybaven vůz XC90. Jedná se o pět kamer. Kamery na zpětných zrcátkách, pod víkem zavazadlového prostoru vzadu a na předním nárazníku detekují objekty v blízkosti automobilu například při parkování, ale také při vyšší rychlosti, kdy sleduje dopravní značení pruhů. Kamera na předním skle zaostřená více do dálky sleduje oblast před vozidlem a je určena k detekci chodců nebo jiných automobilů (ačkoliv ty jsou primárně a dříve detekovány jinými systémy). [22]

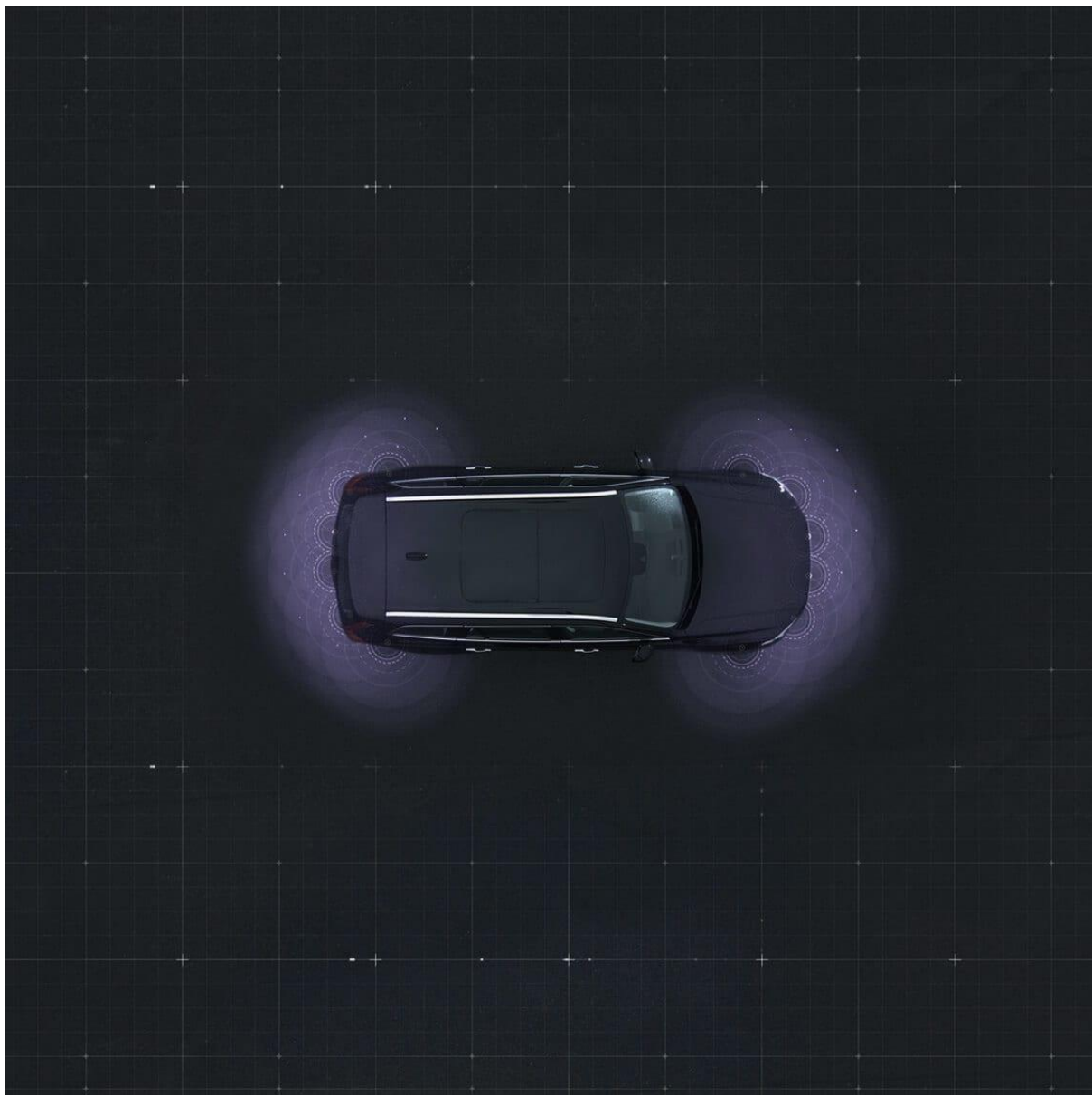
## Radar



*Obrázek 3*

Vožidlo je rovněž vybaveno radarem. Jak je patrné z obrázku, má několik vysílačů. V rozích automobilu jsou umístěny čtyři, které mají za úkol sledovat okolí vozu v plném rozsahu 360°. Dále jsou zde dva zadní radary, které detekují vozidla blížící se zezadu, což pomáhá vozidlu zjistit, jestli je možné změnit jízdní pruh. Dalším vysílačem je přední radar, jehož funkcí je kontrolovat rozestupy mezi vozidly, jako je tomu dnes již i u mnoha neautonomních vozidel. [22]

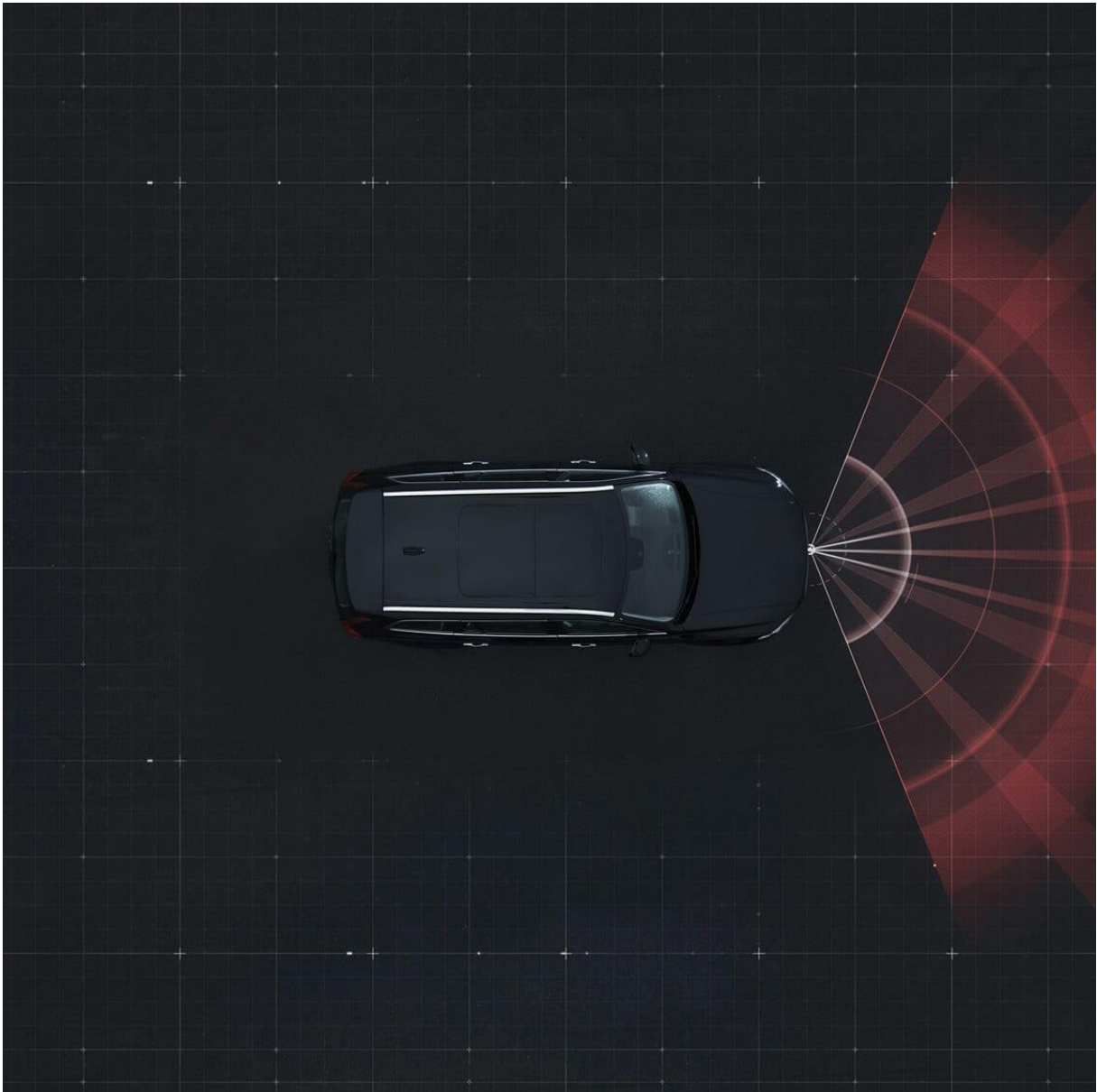
## Ultrazvuk



*Obrázek 4*

Ultrazvukové senzory snímající blízké okolí před a za vozidlem fungují v malé rychlosti. Užitečné jsou při parkování nebo manévrování na malém prostoru, kdy detekují překážky – například zdi, zaparkovaná vozidla nebo chodce. [22]

## LIDAR



*Obrázek 5*

Senzor typický pro většinu autonomních vozidel je LIDAR. Na rozdíl od dřívějších autonomních vozidel testovaných v USA, které jej mají umístěn na střeše, Volvo jej umístilo na předek automobilu. LIDAR má dosah 150 metrů a je schopen rozpoznat jednotlivé objekty, ať už se jedná o chodce, vozidla nebo pevné překážky. [22]



## Mapa okolí



Obrázek 6

Nejedná se o senzor v pravém slova smyslu – senzorem je zde GPS přijímač. Ten v kombinaci s mapou, uloženou ve vozidle, a internetovým připojením, schopným zjistit dopravní situaci, umožňuje řidiči nejen přesně zobrazit, kde je a kudy má jet, ale především sám zvolí nejrychlejší trasu do cíle. [22]

## 5. ALGORITMY A REŽIMY

Autonomní vozidlo potřebuje k vnímání okolí senzory, podobně jako lidský řidič zrakové a sluchové ústrojí. Vjemy samy od sebe ale nestačí, je potřeba je zpracovávat. U lidského řidiče tak činí mozek, u autonomních vozidel řídicí jednotka. A podobně jako se člověk naučí, jak má

reagovat v dané situaci, se to musí naučit i autonomní vozidla. Je zde ale jeden podstatný rozdíl – zatímco člověk se sám rozvíjí a na většinu situací reaguje reflexivně, autonomní vozidlo takovou schopnost nemá a musí být schopno na základě algoritmů vyhodnotit každou situaci a vymyslet, jak ji nejlépe vyřešit. Většinu času se vozidlo vyskytuje ve standardních situacích, kdy je postup celkem jasný a již dnešní autonomní vozidla jej bezpečně zvládají (jízda po dálnici, ve městě, parkování apod.). Existují však situace, které autonomní vozidla zatím nezvládají dostatečně spolehlivě (spojení dvou pruhů do jednoho, „four-way stop“); k těmto situacím se vyjádřím později. Ještě větší otázku, na kterou dosud nebylo spolehlivě odpovězeno, představuje morální rozhodování. V této části práce se budu věnovat všem výše uvedeným problémům.

## **Morální rozhodování**

Ačkoliv autonomní vozidla mohou zabránit velkému množství nehod (uvádí se až 90%) tím, že eliminují lidský faktor, který se může dopustit chyby, k nehodám může dojít i u nich – buď kvůli selhání některého ze systémů (což by však nastat nemělo, jelikož funkce systémů se překrývají a šance, že by selhaly všechny, je téměř nulová), nebo kvůli chybě jiných účastníků provozu, ať už vozidel s lidským řidičem, nebo chodců (jejichž chování je podstatně těžší předvídat). Tak jako každý účastník provozu, i autonomní vozidlo se snaží udělat vše pro to, aby zabránilo nehodě. Může se však stát, že to nebude možné a bude potřeba učinit rozhodnutí, které minimalizuje následky.

Tomuto tématu se věnuje etický kodex, který vznikl v roce 2017 v Německu. Jedná se o první usnesení v tomto směru. Tento kodex mimo jiné definuje žebříček priorit. V případě, že se vozidlo musí rozhodnout, jestli ohrozí člověka, ať už se jedná o posádku daného vozidla, jiného vozidla nebo chodce, nebo cokoliv jiného (zvíře, majetek), nikdy nesmí ohrozit člověka – lidský život má tedy prioritu nad vším ostatním. Dále stanovuje, že život zvířete má prioritu nad hmotnými neživými věcmi. Tato část je celkem evidentní, ačkoliv její použitelnost může být poněkud omezena – v případě, že se vozidlo musí například rozhodnout, jestli srazit člověka, jeho psa nebo narazit do zaparkovaného vozidla, by teoreticky mělo narazit do zaparkovaného vozidla, ale tím by ohrozilo život své posádky – správně by tedy mělo zvolit ohrožení psa. [23] [25]

Problém nastává, kdy je potřeba se rozhodnout mezi tím, jaké lidi ohrozit. Jedná se například o situaci, kdy si vozidlo musí vybrat, jestli srazí dítě nebo starce. I na tuto otázku má kodex odpověď – vozidlo nesmí učinit takové rozhodnutí. Vozidla nesmí posuzovat hodnotu lidského života na základě věku, pohlaví ani ničeho jiného. V této situaci má vozidlo pouze

intenzivně brzdít. Dalším, možná ještě větším problémem je situace, kdy skupina chodců znenadání vběhne do silnice, kde je z jedné strany sráz a z druhé skála. Má se vozidlo skupině vyhnout a riskovat pád nebo náraz, nebo pokračovat po silnici a srazit chodce? I na tuto problematiku má směrnice odpověď – vozidlo nesmí obětovat řidiče a posádku vozidla. Stejně jako v minulé situaci bude co nejsilněji brzdít, aby zmírnilo následky nehody. [24] [25]

Směrnice řeší mimo výše uvedené etické problémy také další problematiku. Například se členové shodli na tom, že vozidlo nesmí nikdy zabránit řidiči převzít plnou kontrolu nad vozidlem. Z toho důvodu je potřeba jízdu dokumentovat do „černé skříňky“, aby bylo patrné, kdy vozidlo ovládal řidič a kdy tedy nesl odpovědnost za případnou nehodu. [24] [25]

## **Problematické situace**

Autonomní řízení dnes umožňuje za určitých podmínek jezdit bez zásahu řidiče. Pokrok postupuje dále, tudíž se jejich pole působnosti zvětšuje. Nicméně existují situace, ve kterých hraje velkou roli domluva řidičů nebo řidičský cit – zde mají autonomní vozy určitý handicap.

Jednou z těchto situací je tzv. „Four – way stop“ – v Evropě se tento typ křižovatek nevyskytuje, ale ve Spojených státech je zcela běžný. Jedná se o křižovatku, kde je na všech příjezdech značka STOP a vozidlo, které k ní první přijelo a zastavilo, také první odjíždí. Může se stát, že vozidla přijedou přibližně současně – pak je to o domluvě mezi řidiči. V případě, že by některý z řidičů vyjel dříve, než má, většinou jej ostatní nechají jet. Autonomní vozidlo však není momentálně schopné intuitivně komunikovat s lidskými řidiči. Můžou zde proto nastat problémy – pokud přijedou přibližně ve stejnou dobu, vozidlo například může vyhodnotit, že přijelo později, zatímco řidič si bude myslet totéž o sobě. Budou proto navzájem čekat na toho druhého. Poté se může po nějaké době řidič rozjet, ale autonomní vozidlo, které může mít zabudován algoritmus, aby po nějaké době vjelo do křižovatky, může učinit totéž, což způsobí srážku. [26]

Podobným problémem může být přednost zprava, která se pro změnu vyskytuje v Evropě. Vozidla jedou pomalu, pokud vidí silnici, která se připojuje zprava, a to platí pro autonomní i člověkem řízená vozidla – zde problém není. Problém nastane, pokud ze všech čtyř směrů přijedou ke křižovatce vozidla – pak nemá přednost nikdo a je potřeba, aby se někdo přednosti vzdal a projel křižovatkou jako poslední. Řidiči navzájem komunikují gesty nebo světelným znamením, autonomní vozidla mohou vzájemně komunikovat přes síť, ale problém nastává v komunikaci mezi autonomním a člověkem řízeným vozidlem. Možností by bylo, aby autonomní vozidlo komunikovalo rovněž světelným znamením, případně by bylo vepředu vybaveno například barevným světlem, které by signalizovalo vzdání se přednosti.

Obě výše zmíněné situace se odehrávají v malých rychlostech, takže případná nehoda by způsobila materiální škody, které by ale nebyly extrémně vysoké, a neměl by při nich být ani ohrožen život posádky. Existují však situace, které představují pro autonomní řízení také problémy, ale odehrávají se ve výrazně vyšší rychlosti. Jednou z nich spojení dvou jízdních pruhů do jednoho (v angličtině nazýváno termínem „Double lane merge“). To samo o sobě není problémem, ten nastává v kombinaci s velkým provozem – tehdy, když vozidla jedou za sebou v minimálních bezpečných rozestupech v obou pruzích. Zde by mělo platit pravidlo střídavého řazení – metoda zip. Lidští řidiči s těmito situacemi nemívají problém – většinou situaci řeší citem a poznají, jestli je vozidlo za nimi ve vedlejšímu pruhu pustí před sebe. Někteří řidiči se chovají pasivněji, jiní naopak agresivněji. Někdy spolu také komunikují světelným znamením. Autonomní vozidla to mají složitější – jejich řešení takovéto situace musí být naprogramované a počítat se všemi možnými faktory, které mohou nastat. Autonomní vozidla mohou opět komunikovat vzájemně, ale dokud budou na silnicích jezdit i člověkem řízená vozidla (pokud bude stále platit Etický kodex popsáný v minulé kapitole, tak to může být navždy), je potřeba umět si poradit i s takovou situací. Zatím se zdá, že tento problém bude časem vyřešen se zdokonalováním systémů autonomního řízení. [26]

Podobný problém může nastat u tzv. průpletů, které se vyskytují například na tzv. čtyřlístkových mimoúrovňových křižovatkách nebo na krátkých úsecích mezi mimoúrovňovými křižovatkami – zde je situace ještě složitější. Některá vozidla pokračují ve svém pruhu, jiná potřebují přejet do vedlejšího, a to vše při různých vzájemných rychlostech. S těmito situacemi, které je potřeba řešit většinou citem, mají problém i někteří lidští řidiči, pro autonomní vozidla můžou však představovat výzvu ještě větší než předchozí zmíněné problémy.

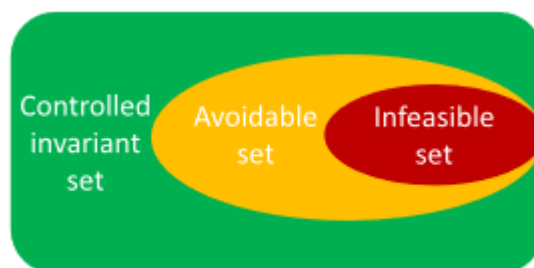
## **Low speed**

Režimy řízení vozidla lze rozdělit na tři druhy podle rychlosti, jakou se vozidlo pohybuje. Tyto režimy se liší použitými senzory, způsobem zpracování a náročností. Jako první se budou věnovat algoritmům, pracujícím v tzv. **Low speed** režimu, které se používají v malých rychlostech (většinou do 30 km/h) – například při parkování nebo jízdě v garážích, ale také pro účelová vozidla, jako například používaná pro přepravu věcí nebo lidí na letištích. Tyto algoritmy patří mezi nejstarší – používají je i vozidla, která jsou vybavena parkovacím asistentem, který je schopen částečně sám zaparkovat – ovládá volant, řidič ovládá plyn a brzdu. Vypsát dopodrobna všechny algoritmy z této kategorie by jednak široce přesahovalo obsah této

práce a jednak většina výrobců tyto algoritmy nezveřejňuje, jelikož se jedná o jejich know – how, a proto se budu věnovat pouze jednomu vybranému algoritmu.

Režim Low Speed se vyznačuje charakteristickými znaky, z nichž nejvýraznější jsou dva – nemohou se spoléhat na dopravní značení (na mnoha parkovištích nejsou ani vyznačena parkovací místa, v případě účelových vozidel často jakékoliv značení zcela chybí) a pohybují se ve společném prostoru s chodci (mezi zaparkovanými vozidly se pohybují osoby, které jdou od svého vozidla, ke svému vozidlu nebo parkovištěm jen procházejí). Proto musí být vozidla v tomto režimu schopna včas detekovat překážku a zastavit – k tomu jsou ideální ultrazvukové senzory.

Jedním z použitelných algoritmů je tzv. metoda bariérová funkce (**Barrier Function Method**), která funguje v závislosti na pravděpodobnosti kolize – pokud je dostatečně malá, funkce není aktivní (vozidlo je ovládáno jinými algoritmy). Pokud riziko vzroste, vozidlo se dostane do tzv. **Avoidable Set** (dále jen AS), což znamená, že existuje riziko kolize, ale vozidlo je schopno jí zabránit. Bariérová funkce provede zásah do řízení, aby se vozidlo opět dostalo mimo oblast AS. Může se však stát, že se vozidlo dostane (pravděpodobně příčinou neočekávané nepravděpodobné okolnosti, například kdy do cesty vozidla vjede velkou rychlostí jiné vozidlo, cyklista nebo chodec, který byl dosud skrytý za překážkou) do situace, pojmenované **Infeasible set**. To znamená, že se může stát, že dojde ke kolizi, které nepůjde zabránit. V takové situaci má vozidlo co nejrychleji zastavit. V přiloženém diagramu jsou vyznačeny vztahy těchto tří situací. [27]



Obrázek 7

Zelená oblast znamená, že bariérová funkce není potřeba – v cestě vozidla nejsou žádné překážky. Zároveň ale senzory vozidla snímají okolí a sledují jej – tuto funkci mívají kamery, které mají větší dosah než ultrazvukové senzory. Když vidí, že se do dráhy vozidla blíží chodec, přesuneme se do oranžové oblasti, bariérová funkce se aktivuje a dráhu vozidla změní nebo zpomalí/zastaví, aby zabránila kolizi s chodcem ještě dříve, než chodec do dráhy vozidla vstoupí. V této fázi nedochází k prudkým změnám směru jízdy – je čas na pozvolnější manévry, které nejsou pro posádku vozidla nepohodlné. V případě, že se z výše zmíněných důvodů

vozidlo dostane do červené oblasti, což je speciální podmnožina oranžové oblasti, je potřeba reagovat rychle – většinou se jedná o rychlé zabrzdění vozidla, které má za cíl minimalizovat pravděpodobnost kolize a případně snížit riziko ohrožení chodce a škod na vozidle. [27]

## City speed

Dalším typem algoritmů řízení vozidla jsou algoritmy, pracující v režimu tzv. **City speed**. Tento režim se používá ve městech, kde bývá maximální povolená rychlost většinou 50 km/h (v některých zemích 60 km/h). Jelikož se většina vozidel pohybuje většinu času ve městech, jedná se pravděpodobně o nejčastěji používaný režim. Rovněž se jedná o nejkomplexnější režim, jelikož ve městech musí autonomní vozidla čelit mnoha výzvám – velký provoz, dopravní zácpy, chodci, vozidla vyjíždějící z parkovacího místa nebo garáže, častá změna jízdního směru nebo pruhu a podobně. Na rozdíl od režimu Low Speed, vozidla se zde pohybují ve vyšší rychlosti, kde případná chyba může vážně ohrozit životy posádek vozidel nebo chodců. Je proto potřeba vyvinout zcela spolehlivé systémy řízení vozidla.

Některé náležitosti těchto algoritmů jsou stejné jako u dalšího typu (Highway speed), a proto některé zdroje tyto dva typy algoritmů slučují do jednoho – High speed. Navíc je někdy přechod mezi těmito algoritmy pozvolný – například radiály nebo dálnice uvnitř měst se nachází někde na pomezí mezi těmito situacemi. Používané senzory jsou rovněž stejné – jedná se o radar, LIDAR a kamery, ačkoliv je zde rozdíl mezi četností jejich používání – City speed spoléhá podstatně více na kamery a LIDAR, Highway speed na radar. Jisté je, že mezi těmito algoritmy existují rozdíly, a proto se preferuje jejich rozdělení.

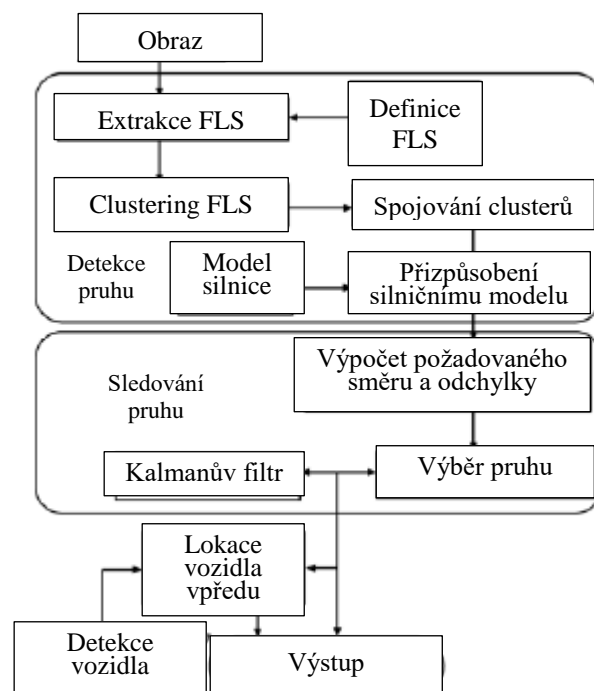
Jedním ze základních požadavků na autonomní vozidlo je schopnost vyhnout se překážce v rychlosti, ať už bržděním, zatáčením nebo kombinací obou úkonů. Jeden z algoritmů se nazývá **Predictive Control**. Jedná se o algoritmus, který řeší vyhýbání se statickým objektům, které jsou detekovány LIDAREm. Tento algoritmus zohledňuje dynamické vlastnosti vozidla, jako je hmotnost, točivý moment a výkon motoru, přilnavost pneumatik a povrchu, sílu brzd, ovladatelnost řízení apod. Základní vlastností algoritmu je, že když je detekována překážka, algoritmus provede korekci řízení, aby se vyhnul. Zároveň je monitorováno okolí a stav vozidla, které řídicí jednotka průběžně zohledňuje a řídí podle nich vozidlo – zabrání se tak například smyku, i když vozidlo vjede na kluzký povrch. Tento algoritmus se snaží vyhnout se objektu, aniž by zpomalil vozidlo více, než je nutné. Funguje i v místech, kde není dopravní značení, a lze jej tedy použít nejen u silničních vozidel, ale kupříkladu na vojenských nákladních automobilech. [28]

## Highway speed

Třetí typ algoritmů pracuje v režimu tzv. **Highway speed** algoritmy, které, jak již název napovídá, se používají na dálnicích ve velkých rychlostech. Vyskytují se i u vozidel 1. nebo 2. stupně autonomie, přesněji u vozidel vybavených adaptivním tempomatem (první stupeň) a případně navíc aktivním asistentem pro udržení v pruhu (druhý stupeň). Do druhého stupně patří i Autopilot firmy Tesla. Většina vozidel, která se dnes nachází ve druhém nebo třetím stupni autonomie, disponuje právě tímto režimem.

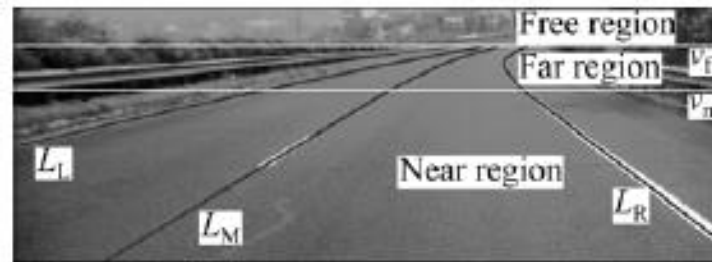
Základním znakem těchto algoritmů je schopnost ovládat vozidlo ve vysoké rychlosti – většinou do 130 km/h. Dále musí být schopné bezpečně změnit jízdní pruh. Většina vozidel s těmito systémy je také schopná zastavit za dopravní zácpou a pohybovat se v ní, ačkoliv tato situace již možná spadá spíše do režimu City speed. Tento režim nepředpokládá, že by se na silnici znenadání objevila překážka – například chodec. Nejvíce se vozidla v tomto režimu spoléhají na radar, jelikož má největší dosah. Ten je doplňován LIDAREm a kamerami.

Vozidla, která jsou schopna autonomní jízdy po dálnici, musí být schopna nejen udržet rychlost a směr vozidla, ale také se rozhodnout, jaký použít jízdní pruh. Tímto problémem se zabývá algoritmus **Vision-based long-distance lane perception**. Algoritmus používá radar a LIDAR k detekci vozidel a kameru k detekci jízdních pruhů. Podle vzájemných rychlostí vozidel se rozhodne, jestli je výhodné změnit jízdní pruh a předjet vozidlo. Zde je diagram, který popisuje základní schéma fungování algoritmu.



Obrázek 8

System musí být schopen fungovat i v zatáčce – musí poznat, ve kterém jízdním pruhu se nachází vozidlo za obloukem. Je proto potřeba, aby vozidlo zohlednilo tvar vozovky. Problém je, že kamery nemají dostatečný dosah, a proto systém aproximuje dopravní značení křivkou, která by měla co nejlépe kopírovat skutečné zakřivení a která vychází z oblasti, kam kamera ještě vidí. Principem aproximace je, že obraz kamery je rozdělen na dvě oblasti – blízká a daleká. Toto rozdělení je důležité pro aproximaci, jak bude popsáno dále. Následující obrázek ilustruje toto rozdělení (Free region je oblast, kde není silnice).



Obrázek 9

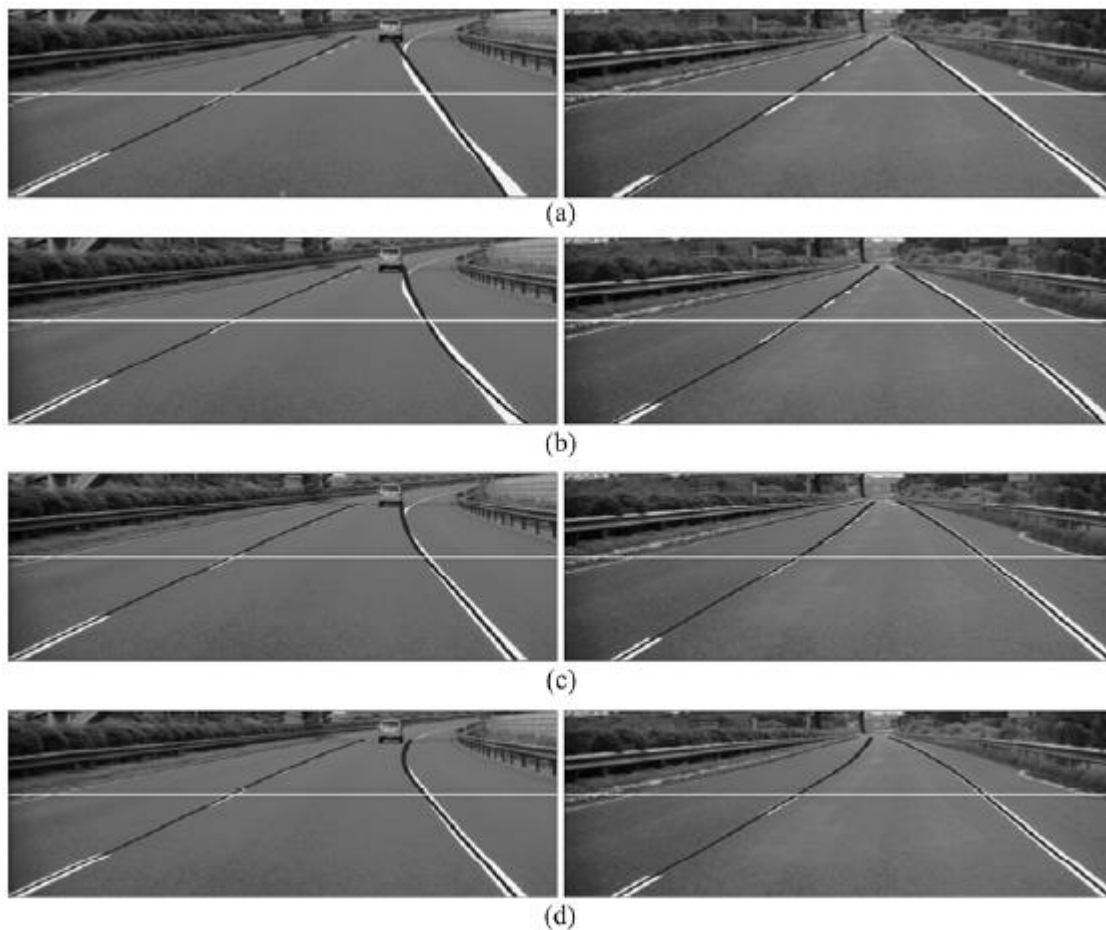
Možností, jak aproximovat tvar vozovky, je několik. Jednou z nich je použít přímku, což ovšem nebude příliš přesné, jak napovídá následující obrázek 10 v bodě a).

Další možností aproximace je parabola. Ta je schopna zohlednit zakřivení, ale pokud ji použijeme v celém rozsahu, dopustíme se nepřesnosti, jelikož v blízkosti se zakřivení zdá menší, než je ve skutečnosti. Co nastane, vidíme v bodě b).

Abychom napravili chybu z předchozího bodu, můžeme použít tzv. lineárně parabolický model. Značení v blízké oblasti nahradíme přímkou, jelikož zde se zakřivení zdá málo výrazné, a pro vzdálenou oblast použijeme parabolu. Výsledkem je o něco přesnější výsledek, ačkoliv i zde se dopustíme nepřesnosti – viz bod c).

Nejpřesnější je použít lineárně kubický model. Značení v blízké oblasti nahradíme opět přímkou, zatímco ve vzdálené oblasti použijeme křivku třetího stupně – kubiku. Ta dosáhne podstatně menší chyby při aproximaci ve vzdálené oblasti oproti předchozím modelům, zatímco v blízké oblasti je chyba stejná. Tato metoda, která je použita také u obrázku 9, vede k výsledku, který vidíme v bodě d).





Obrázek 10

V následujícím obrázku 11 je ilustrováno, jak probíhá tvorba obrazu. Nejprve je získán obraz z kamery a), který projde filtrem, který detekuje dopravní značení b). Dále dojde ke spojení přerušované čáry c) do jedné linie d), aby mohl být posléze vytvořen finální obraz e)

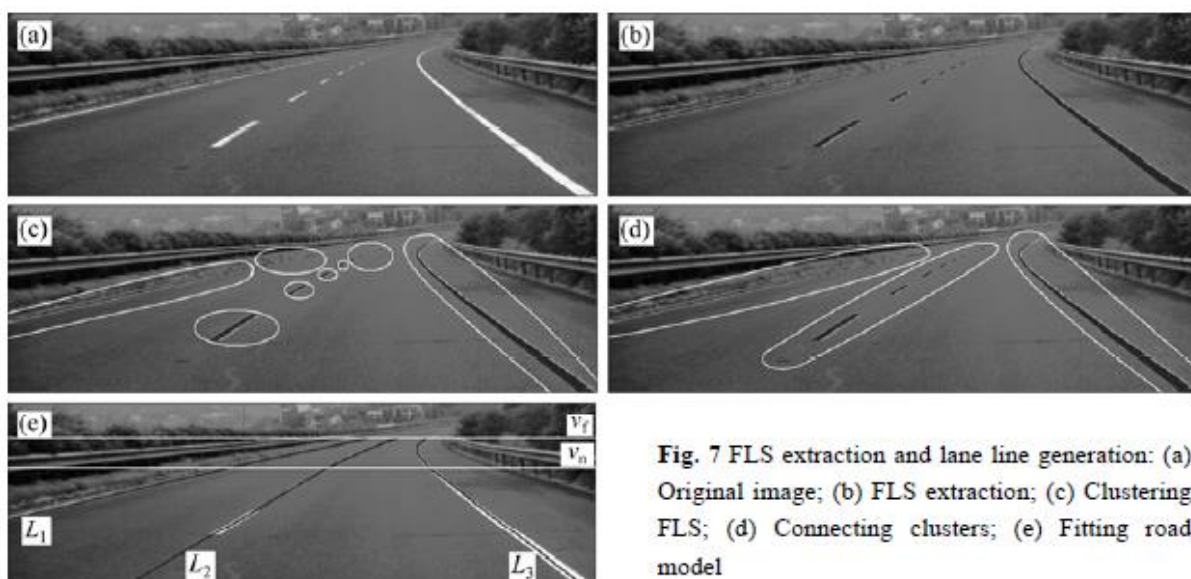
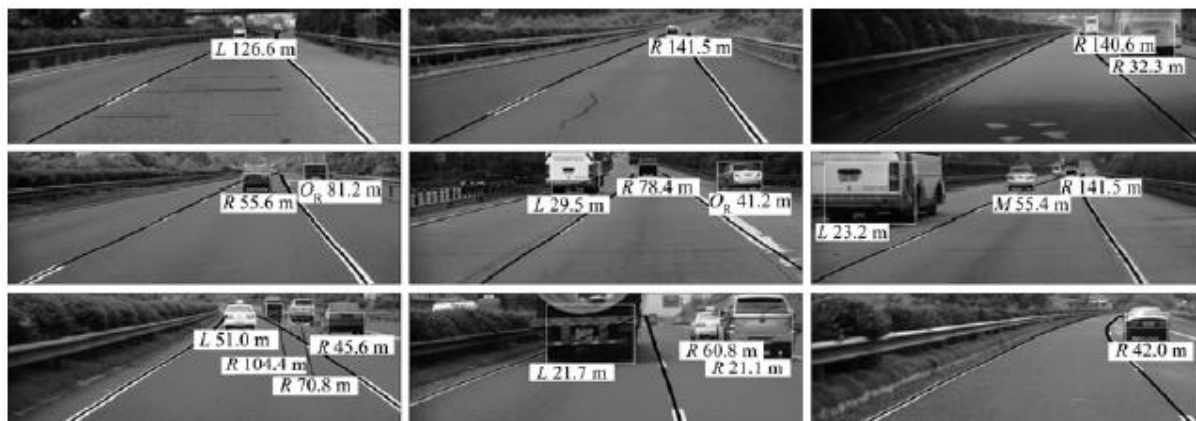


Fig. 7 FLS extraction and lane line generation: (a) Original image; (b) FLS extraction; (c) Clustering FLS; (d) Connecting clusters; (e) Fitting road model

Obrázek 11

Když přidáme ještě údaje získané z detekce vozidel, získáme údaje, které mohou vypadat jako na obrázku 12. Algoritmus rozliší, jestli se vozidlo nachází v levém (L) nebo pravém (R) pruhu, stejně jako odstavená vozidla vpravo ( $O_R$ ) nebo případně vlevo ( $O_L$ ) od kraje vozovky. Také rozpozná vozidla, která zrovna mění jízdní pruh (M).



Obrázek 12

## 6. TESTOVÁNÍ

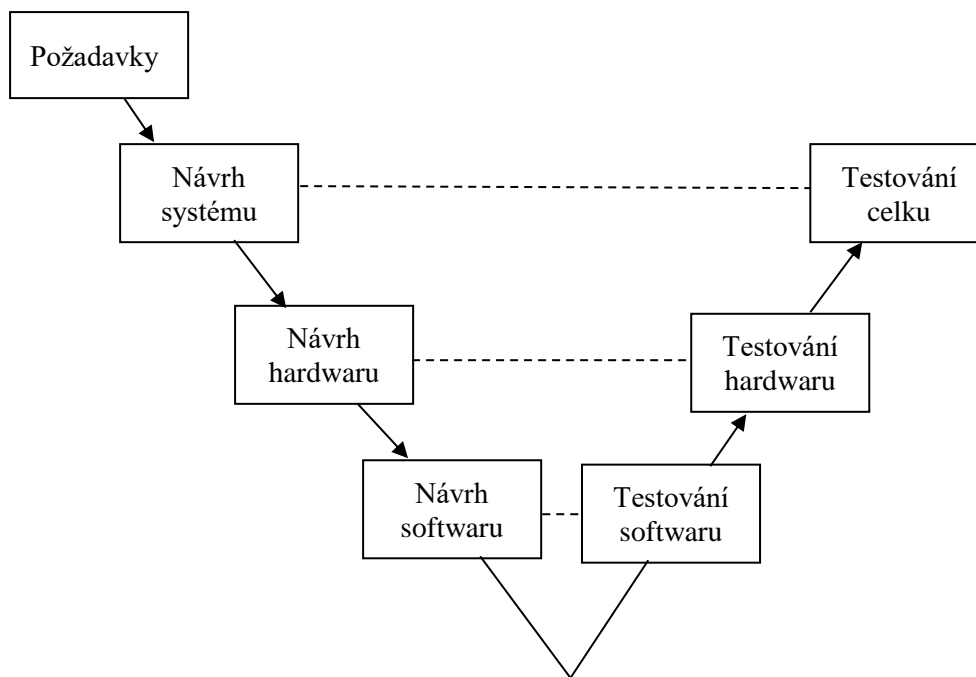
Testování vozidel je velmi důležité. Předtím, než je jakékoliv vozidlo uvedeno na trh, musí být důkladně vyzkoušené, jestli splňuje bezpečnostní požadavky a jestli v něm funguje všechno tak, jak bylo navrženo. Každý zná tzv. crash testy, které zjišťují odolnost vozidla při srážkách a především to, jak jsou schopna ochránit posádku. Podle výsledků těchto testů se poté často řídí při nákupu vozidla. Tyto testy však představují jen jeden z mnoha dílčích testů, které se v automobilovém průmyslu provádí.

Co se týká autonomních vozidel, ty samozřejmě podstupují všechny testy, které podstupují klasická vozidla. Navíc jsou testovány jejich systémy autonomního řízení, což představuje nemalou část testovacího procesu. Testování těchto vozidel je tedy časově i finančně náročnější. A právě testování autonomních vozidel se budu v této práci věnovat.

Testování neprobíhá pouze fyzicky na vyrobeném vozidle a jeho částech, ale čím dál větší roli hraje numerická simulace, které je ideální k testování softwaru. Její výhodou je, že není třeba díly fyzicky vyrábět, což znamená úsporu času, materiálu a peněz.

### Vývojový V – diagram

Pro znázornění vývoje a testování automobilů se již delší dobu používá tzv. V – model, který popisuje sled úkonů. Lze jej aplikovat na klasická i autonomní vozidla.



Obrázek 13

S vývojem začínáme v levém horním rohu. Na počátku máme **požadavky**, které chceme, aby vozidlo splnilo. Na základě požadavků sestavíme koncepční **návrh systémů** vozidla. Zde například určíme, jaké senzory a elektroniku budeme potřebovat, aby vozidlo umělo všechno, co požadujeme. Dále následuje **návrh hardwaru** – zde se vypracuje model vozidla a do něj je potřeba navrhnout a umístit komponenty. Je potřeba vše sladit tak, aby byly splněny funkční požadavky na vozidlo. Dalším krokem je **návrh softwaru**, což je u autonomních vozidel obzvláště důležité. Je potřeba napsat program, který umí řídit vozidlo s použitím senzorů z předchozího kroku. Vývoji softwaru se dnes však nevyhnou ani klasická vozidla, která rovněž na elektroniku spoléhají. [30]

Dosud jsme se pohybovali v levé části diagramu, která zahrnuje vývoj vozidla. Když je vše potřebné vytvořeno, je třeba to otestovat. Proto se přesouváme do pravé části, která popisuje testování

Jako první bývají prováděny **testy softwaru**, někdy nazývané SIL. Tyto testy probíhají především v numerických simulacích. Je proto výhodné testování provést důkladně, jelikož není potřeba vyrábět fyzické díly a testování je rychlé a levné. Dalším krokem je **testování hardwaru**. Tento proces se nazývá HIL a může probíhat numericky i fyzicky. Zde je otestována funkčnost jednotlivých komponent vozidla. Opět je výhodné provést co nejvíce testů, jelikož je testování pořád ještě rychlé a levné. Nakonec máme **testování celku**. Zde se již jedná o fyzické

testování. Vozidlo musí být již fyzicky vyrobené. Toto testování přináší výsledky pomaleji a draž, a proto je snaha provádět co nejvíce testů v předchozích stádiích. [30]

## **Testování v umělých podmínkách**

Testování v předem definovaných podmínkách je provozováno již velmi dlouhou dobu. Používá se pro testování klasických i autonomních vozidel. Princip testování spočívá v tom, že máme přesně dané podmínky, okolnosti a požadavky na vozidlo. Patří sem kromě známých crash testů také různé testy stability a ovladatelnosti vozidla, v poslední době se testují také některé asistenční systémy. Výhodou tohoto testování je to, že jsou podmínky pro všechna vozidla stejná a je možné je mezi sebou porovnávat – například společnost NCAP ohodnotí bezpečnost každého testovaného vozidla a toto hodnocení zveřejní – je tak možné se při koupi vozidla rozhodnout i podle tohoto důležitého kritéria.

Tento způsob testování je dostačující pro klasická (neautonomní) vozidla, případně do druhého stupně autonomie. Na dalších stupních narážíme na problém – ve skutečném provozu se vozidlo rozhodně nenachází v předem definovaných podmínkách, naopak je zde spousta proměnných, na které je potřeba reagovat. Proto je potřeba používat i jinou metodu testování, o které budu psát v další kapitole.

Co se týká metodiky umělého testování, v současnosti se autonomní vozidla v podstatě netestují jinak než klasická. Rozdíl je především v tom, že autonomní vozidla disponují řadou senzorů a systémů, které je potřeba testovat, a proto je testování těchto vozidel komplexnější. Jelikož zatím nejsou rozšířena vozidla, která přebírají odpovědnost za řidiče, není zatím potřeba provádět jejich testování podle nějaké speciální metodiky – autonomní systémy 1. a 2. stupně jsou testovány zcela shodně s neautonomními vozidly a vozidla vyšších stupňů mají přítomného nouzového řidiče. Nicméně společnost NCAP, která se testováním zabývá, plánuje od roku 2020 zavést testování autonomních vozidel samostatně. [31]

Nová metodika bude zahrnovat mimo jiné chování vozidla na křižovatkách, kde je riziko dopravních nehod. Dále se bude zkoušet schopnost vozidla při výjezdu z parkovacího místa upozorovat vozidlo, kterému by zkrížilo cestu. Testování bude zahrnovat také systém udržení v pruhu a chování po nehodě – přivolání pomoci, bezpečné zastavení atd. [31]

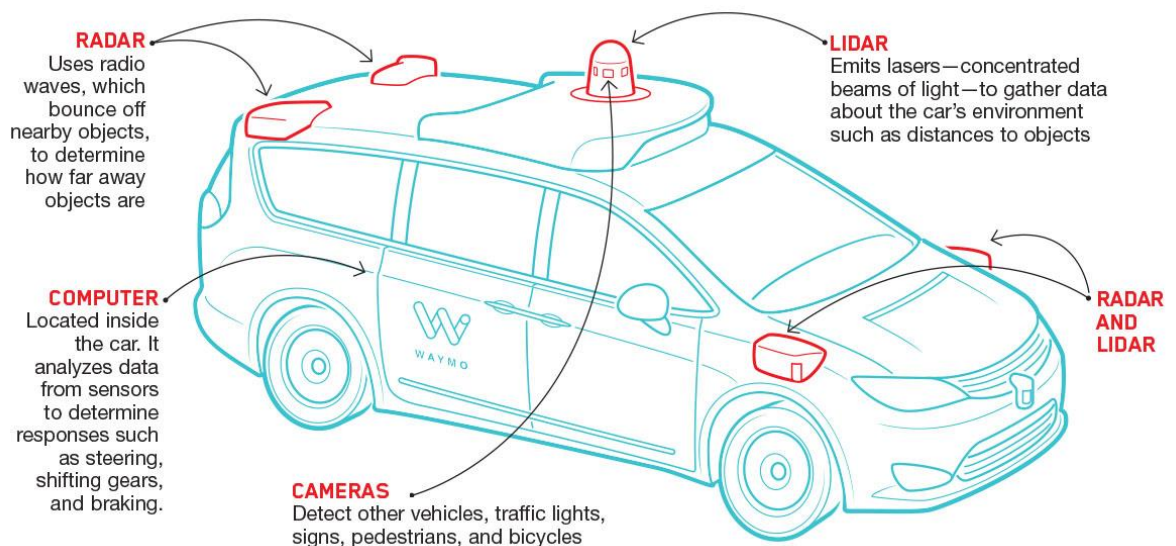
NCAP plánuje, že bude autonomní vozidla hodnotit podobně, jako to dělá s klasickými (uděluje hvězdičky podle toho, jak obstojí v crash testech). Toto hodnocení zůstane, ale přibude k němu hodnocení asistence, podpory a komfortu – přesný popis hodnocení zatím není znám. [32]

## Field testování

Tento způsob testování se týká pouze autonomních vozidel. Oproti umělému testování se jedná o testování vozidla v provozu. V současnosti je tento způsob testování rozšířen ve Spojených státech amerických, především na jihozápadě (Kalifornie, Nevada, Arizona). V principu je způsob testování podobný u všech společností, které jej provozují – nejvíce Uber a Waymo. Podrobněji jsem popsal používaná vozidla a historii tohoto testování ve třetí kapitole, v bodě **Firmy provozující autonomní vozidla**. Ve zkratce – vozidla jezdí v autonomním režimu a sbírají informace, které poté společnosti vyhodnocují a vylepšují podle nich své systémy. Ve vozidle sedí na předním (u společnosti Waymo i zadním) sedadle nouzový řidič, který by měl v případě potřeby zastavit vozidlo či převzít řízení.

## 7. UMÍSTĚNÍ SENZORŮ A ÚPRAVY VOZIDLA

Jak bylo již několikrát v této práci zmíněno, autonomní vozidla jsou vybavena řadou senzorů, které jsou pro jeho funkčnost nezbytné. Jedná se rovněž o nezanedbatelnou část ceny vozidla. Proto je žádoucí, aby byly umístěny v místech, kde jsou dobře chráněné proti poškození v dopravních nehodách. Tento požadavek však vzhledem k požadované funkčnosti není vždy možné uspokojivě splnit. V této kapitole budu odkazovat na obrázky 2-5 (vozidlo Volvo Drive Me) a také na obrázek 14 (vozidlo Waymo).



Obrázek 14

## Bezpečná místa

Tato místa na vozidlech se vyznačují tím, že vzhledem ke svému umístění není příliš velká pravděpodobnost, že budou poškozeny při dopravní nehodě.

Jedním z takových míst je střecha vozidla. Sem bývá u testovaných vozidel Waymo umístován LIDAR a kamery (viz obrázek 14). Ačkoliv se jedná o místo, které při dopravních nehodách není prakticky vůbec ohroženo, u komerčně vyráběných vozidel se s ním příliš nepočítá – jednak nezanedbatelně zhoršuje aerodynamiku vozidla, dále je to řešení relativně nevzhledné a také zvyšuje výšku vozidla, které pak nemusí být schopno vjet do garáží, kde může být omezena výška vozidla.

Dalším z relativně bezpečných míst je oblast nad předním sklem – jedná se o tuhou část vozidla mimo deformační zónu. Do tohoto místa Volvo u svého projektu Drive Me umístuje kameru a radar (viz obrázky 2 a 3). Toto místo je také výhodné v tom, že umístěním senzorů není narušen design ani aerodynamika vozidla.

Celkem bezpečně umístěné jsou také senzory, které se nachází v zadní části vozidla nahoře. Sem Volvo a Waymo umístují radary (viz obrázky 3 a 14). Umístění senzorů do tohoto místa sice naruší aerodynamiku vozidla jen minimálně, nevýhodou však je, že takto umístěné senzory mohou směřovat pouze do stran a dozadu. Nejdůležitější jsou senzory směřující dopředu, ty však na toto místo nelze umístit.

Místem, o němž se nedá říct, že by bylo vyloženě bezpečné, ale ani není vyloženě ohrožené, jsou dveře zavazadlového prostoru. V místech, kde je znak výrobce vozidla, bývá občas umístěna zadní kamera (používaná pro parkování, a to i u neautonomních vozidel). Toto místo může být ohroženo při vážnějších nehodách, ale při menších kolizích bývá celkem bezpečné. Toto řešení užívá společnost Volvo (viz obrázek 2).

## **Riziková místa**

Některé senzory jsou ve vozidle umístěny tak, že jsou v případě nehody ohrožené. V rámci opravy vozidla by bylo pravděpodobně potřeba je vyměnit, což by mohlo představovat velké finanční náklady.

Jednou takovou oblastí je oblast zadního nárazníku. Nehod, kdy vozidlo nestihne zabrzdit a narazí, byť často v malé rychlosti, do vozidla před ním, je poměrně hodně. I malý náraz mívá pak fatální důsledky pro senzory, které jsou zde umístěné. Naštěstí se sem umístují většinou jen ultrazvukové senzory, které nejsou příliš drahé. Toto řešení pro tyto senzory používají prakticky všechna vozidla, která jsou jimi vybavena (viz obrázek 4).

Ohroženou oblastí je také předek vozidla, konkrétně oblast motoru. Jejím problémem je, že se jedná o deformační oblast, která má za úkol při nárazu přijmout co nejvíce energie a ochránit tak kabinu s cestujícími. Při čelním nárazu je tak vysoká pravděpodobnost, že budou

senzory poškozeny. Do těchto míst Volvo umísťuje radary (viz obrázek 3) a Waymo radary a LIDARy (viz obrázek 14).

Místem, které je ohroženo pravděpodobně nejvíce, je úplný předek vozidla. Zde stačí jen malý náraz a senzory je potřeba vyměnit. Některá vozidla zde mají umístěn radar (většinou se to týká neautonomních vozidel, například Volkswagen Passat). Prakticky vždy se sem také umísťují ultrazvukové senzory (viz obrázek 4). Volvo sem ovšem umísťuje LIDAR (viz obrázek 5), což představuje problém, jelikož LIDAR je nejdražší ze senzorů. Jedná se ovšem o těžko řešitelný problém – o nevýhodách umístění na střechu jsem psal výše a jiná místa na vozidle jsou pro LIDAR nevhodná. Kamerové senzory ještě nejsou natolik pokročilé, aby mohly LIDAR nahradit. Dlouhodobě by řešením by mohlo být snížení výrobních nákladů na laserové senzory, které LIDAR používá, což se však momentálně nejeví jako pravděpodobné.

## 8. ZÁVĚR

Autonomní vozidla jsou v současné době často probírána v médiích. Prakticky každý o autonomních vozidlech slyšel nebo četl. Vzhledem k tomu, že takto získané informace bývají nezdědka kdy nepřesné, mnoho lidí má o autonomních vozidlech zkreslené představy. Tomu napomáhají někdy také ne úplně vhodné obchodní názvy (například Autopilot Tesla).

V současnosti je na trhu široká škála vozidel druhého stupně autonomie (mimo jiné zmiňovaný Autopilot), která jsou autonomní pouze částečně (a rozhodně by se pro ně nehodilo označení samořiditelná). Na obzoru je třetí stupeň autonomie, který může být v dohledné době v řádu měsíců k dispozici rovněž. Co se týká čtvrtého stupně, ten je již testován v provozu v USA, ale je otázkou, kdy budou vozidla s tímto systémem volně prodávána. Dříve než se tak stane, budou nejspíše již používána taxislužbami typu Uber. Pokud jde o pátý stupeň čili plnou autonomii, uvádí se, že by mohl být dostupný do 20 let – to je ale pouze odhad. Nejvíce vepředu ve vývoji jsou vozidla Uber a Waymo, ačkoliv první jmenovaný po březnové nehodě dočasně přerušil testování.

Provoz autonomních vozidel také vyžaduje změny v legislativě. Jednou z překážek je Vídeňská konvence, kterou podepsala většina evropských států a která vylučuje provoz vozidel bez řidiče. V některých evropských státech jsou podnikány kroky k umožnění provozu autonomních vozidel, ale prvenství v tomto oboru drží s přehledem Spojené státy americké, obzvláště jejich jihozápadní část. Je to i díky tomu, že Vídeňskou smlouvu nepodepsaly. Velká část amerických států povoluje jízdu těchto vozidel s nouzovým řidičem, Arizona a Kalifornie dokonce bez něj.

Základem autonomních vozidel je elektronika. Právě množství senzorů, z nichž některé jsou poměrně drahé, způsobuje výrazně vyšší cenu autonomních vozidel oproti klasickým. Proto se nedá očekávat, že by v blízké budoucnosti autonomní vozidla zcela nahradila klasická. I poté, co budou k dispozici vozidla pátého stupně autonomie, bude pravděpodobně trvat minimálně desítky let, než tato vozidla utvoří většinu na silnicích. Kromě senzorů je důležitý také software, který umí data vyhodnocovat. A právě to je společně s řídicí jednotkou prvek, který je potřeba nejvíce doladit. Na senzorech již tolik prostoru pro výrazné vylepšení není, ale vývoj softwaru musí ještě výrazně pokročit, abychom měli k dispozici skutečně spolehlivá autonomní vozidla. Hlavní roli ve vývoji tohoto softwaru mají field testy, díky kterým je možné vozidla připravit na všechny situace, které v provozu mohou nastat. Je otázkou, jak dlouho bude trvat, než budou tyto testy smět být provozovány také v Evropě.

Následující tabulka představuje základní přehled senzorů, používaných u autonomních vozidel.

<b>Senzor</b>	<b>Dosah</b>	<b>Výstup</b>	<b>Výhody</b>	<b>Nevýhody</b>
<b>Ultrazvuk</b>	5 m	Vzdálenost od překážky	Cena, rychlost	Dosah, nerozliší druh překážky
<b>Kamera</b>	120 m	Obraz prostředí	Přesný popis prostředí včetně vzdáleností objektů	Ne zcela spolehlivé algoritmy, náchylné na sníženou viditelnost
<b>Radar</b>	250 m	Překážky, vzdálenosti, vzájemná rychlost	Dosah, spolehlivě získaná potřebná data nezávislá na viditelnosti	Nevytvoří přesný obraz celého prostředí
<b>LIDAR</b>	150 m	3D obraz prostředí	Kompletní mapa prostředí nezávislá na viditelnosti	Vysoká cena, problematické umístění ve vozidle



Následující tabulka představuje základní přehled vybraných modelů autonomních vozidel napříč výrobci. [37] [38]

Provozovatel	Vozidlo	Provoz	Stupeň autonomie	Najeté kilometry	Kamery	Radar	LIDAR	Soukromé
Waymo	Lexus RX450h	od 2012	3	8 mil.	1*	4	1+3**	Ne
	Firefly	2015-2017	4		1*	1	1	Ne
	Chrysler Pacifica	od 2017	4		1*	4	1+2**	Ne
Uber	Ford Fusion	od 2015	2	3 mil.	20	7	1+6**	Ne
	Volvo XC90	od 2017	2		7	10	1	Ne
Volvo Drive Me	Volvo XC90	od 2017	2	0	5	7	1	Ano****
Tesla	Model S	od 2012	2	11,5 mld.	8	1	0	Ano
	Model X	od 2015	2		8	1	0	Ano
	Model 3	od 2017	2***		7	1	0	Ano
General Motors	Chevrolet Bolt	plán. 2019	4	?	4	8	5	Ano

\* Jedná se o více kamer, umístěných na jednom místě na střeše vozidla

\*\* Jeden hlavní LIDAR je na střeše a další jsou na jiných místech vozidla

\*\*\* Zatím druhý, po aktualizaci softwaru vyšší stupně bez nutnosti výměny hardwaru

\*\*\*\* Vozidla budou zapůjčena vybraným rodinám na určitou dobu

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Samorídící systémy* [online]. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: [https://technet.idnes.cz/autonomni-auto-porsche-lidar-sea-international-f5k-/veda.aspx?c=A170614\\_083717\\_veda\\_kuz](https://technet.idnes.cz/autonomni-auto-porsche-lidar-sea-international-f5k-/veda.aspx?c=A170614_083717_veda_kuz)
- [2] *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles* [online]. [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: [https://www.sae.org/standards/content/j3016\\_201609/](https://www.sae.org/standards/content/j3016_201609/)
- [3] *Convention on road traffic* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: [https://treaties.un.org/Pages/ViewDetailsIII.aspx?src=TREATY&mtdsg\\_no=XI-B-19&chapter=11&Temp=mtdsg3&lang=en](https://treaties.un.org/Pages/ViewDetailsIII.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XI-B-19&chapter=11&Temp=mtdsg3&lang=en)
- [4] *Zákon č. 361/2000 Sb.* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-361/zneni-20170701>
- [5] *Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?__blob=publicationFile)
- [6] *Dobrindt startet Digitales Testfeld Autobahn* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2015/084-dobrindt-startet-digitales-testfeld-autobahn.html>
- [7] ANDERSON, James M., Nidhi KALRA, Karlyn D. STANLEY, Paul SORENSEN, Constantine SAMARAS a Oluwatobi A. OLUWATOLA. *Autonomous Vehicle Technology A Guide for Policymakers*. Santa Monica, California: RAND Corporation, 2016. ISBN 978-0-8330-8398-2.
- [8] *Driverless Car* [online] [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d5/Driverless\\_Car.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d5/Driverless_Car.png)
- [9] *California Scraps Safety Driver Rules for Self-Driving Cars* [online]. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.nytimes.com/2018/02/26/technology/driverless-cars-california-rules.html>
- [10] *Waymo is first to put fully self-driving cars on US roads without a safety driver* [online]. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.theverge.com/2017/11/7/16615290/waymo-self-driving-safety-driver-chandler-autonomous>
- [11] *Volvo Drive Me* [online]. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.volvocars.com/intl/about/our-innovation-brands/intellisafe/autonomous-driving/drive-me#>
- [12] *Volvo is reportedly scaling back its ambitious self-driving car experiment* [online]. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.theverge.com/2017/12/14/16776466/volvo-drive-me-self-driving-car-sweden-delay>
- [13] *Mercedes-Benz Actros with Highway Pilot - world premiere on public roads* [online]. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Mercedes-Benz-Actros-with-Highway-Pilot---world-premiere-on-public-roads.xhtml?oid=9920353>
- [14] *Uber self-driving cars: everything you need to know* [online]. [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.techradar.com/news/uber-self-driving-cars>
- [15] *Uber CEO hopes to have self-driving cars in service in 18 months* [online]. [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://techcrunch.com/2018/01/23/uber-ceo-hopes-to-have-self-driving-cars-in-service-in-18-months/>
- [16] *Infographic: The different sensor technologies explained* [online]. [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.2025ad.com/latest/driverless-cars-infographic-sensors/>

- [17] *Ultrasonic sensor* [online]. [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/construction-zone-assist/ultrasonic-sensor/>
- [18] *Our Technology* [online]. [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.mobileye.com/our-technology/>
- [19] *Mid-range radar sensor* [online]. [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: [https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/predictive-emergency-braking-system/mid-range-radar-sensor-\(mrr\)/](https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/predictive-emergency-braking-system/mid-range-radar-sensor-(mrr)/)
- [20] *Long-range radar sensor* [online]. [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/left-turn-assist/long-range-radar-sensor/>
- [21] *Valeo Scala* [online]. [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.valeo.com/en/valeo-scala/>
- [22] *How our self-driving car works* [online]. [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: <https://www.volvocars.com/intl/about/our-innovation-brands/intellisafe/autonomous-driving/how-it-works>
- [23] *Infographic: Ethics and autonomous vehicles* [online]. [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://www.2025ad.com/latest/2017-10/infographic-ethics-and-autonomous-vehicles/>
- [24] *Auto nemůže rozhodovat, koho v mezní situaci zabije. Vznikl první etický kodex pro vozy bez řidiče* [online]. [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/auto/auto-nemuze-rozhodovat-koho-v-mezni-situaci-zabije-vznikl-pr/r~37fdfea85d8711e784870025900fea04/>
- [25] *Ethics Commission: Automated and Connected Driving* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/EN/publications/report-ethics-commission.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/EN/publications/report-ethics-commission.pdf?__blob=publicationFile)
- [26] *The holy grail of autonomous driving: the double lane merge* [online]. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.2025ad.com/latest/driverless-cars-double-lane-merge/>
- [27] CHEN, Yuxiao, Huei PENG a Jessy GRIZZLE. *Obstacle Avoidance for Low-Speed Autonomous Vehicles With Barrier Function* [online]. [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7864310>
- [28] *Combined Speed and Steering Control in High-Speed Autonomous Ground Vehicles for Obstacle Avoidance Using Model Predictive Control* [online]. [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7932889>
- [29] *Vision-based long-distance lane perception and front vehicle location for full autonomous vehicles on highway roads* [online]. [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11771-012-1162-7.pdf>
- [30] *Virtual HIL development basics* [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.embedded.com/print/4430390>
- [31] *Euro NCAP plans new tests for self-driving cars* [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.whatcar.com/news/autonomous-cars-targeted-by-new-euro-ncap-five-year-plan/>
- [32] *Euro NCAP to create new safety standards for autonomous cars* [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://www.autoexpress.co.uk/car-news/101618/euro-ncap-to-create-new-safety-standards-for-autonomous-cars>
- [33] *Waymo bude autonomní vozidla testovat pomocí Jaguaru I-Pace. Snad nedopadne jako Uber...* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/waymo-autonomni-vozidla-testovat-pomoci-jaguaru-i-pace-snad-nedopadne-uber-120272>
- [34] *Kvůli smrtelné nehodě nesmí Uber v Arizoně testovat samořídzené vozy* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: [https://zpravy.idnes.cz/uber-arizona-zakaz-testovani-nehoda-chodkyne-fad-/zahranicni.aspx?c=A180327\\_164750\\_zahranicni\\_PAS](https://zpravy.idnes.cz/uber-arizona-zakaz-testovani-nehoda-chodkyne-fad-/zahranicni.aspx?c=A180327_164750_zahranicni_PAS)

- [35] *Hands-Free Ride* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://scienceworld.scholastic.com/issues/2017-18/090417/hands-free-ride.html>
- [36] *Journey* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://waymo.com/journey/>
- [37] *Reuters: Uber Cars Emphasize Radars over Imaging* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://image-sensors-world.blogspot.cz/2018/03/reuters-uber-cars-emphasize-radars-over.html>
- [38] *Who's Winning the Self-Driving Car Race?* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.bloomberg.com/news/features/2018-05-07/who-s-winning-the-self-driving-car-race>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1: Autonomní vozidla ve Spojených státech [8]
- Obr. 2: Volvo XC90 Drive Me – kamera [22]
- Obr. 3: Volvo XC90 Drive Me – radar [22]
- Obr. 4: Volvo XC90 Drive Me – ultrazvuk [22]
- Obr. 5: Volvo XC90 Drive Me – LIDAR [22]
- Obr. 6: Volvo XC90 Drive Me – mapa prostředí [22]
- Obr. 7: Algoritmus bariérové funkce [27]
- Obr. 8: Diagram Vision-based long-distance lane perception [29]
- Obr. 9: Zpracovávaný obraz z kamery [29]
- Obr. 10: Aproximace dopravního značení [29]
- Obr. 11: Postup tvorby mapy [29]
- Obr. 12: Údaje o ostatních vozidlech [29]
- Obr. 13: V – diagram
- Obr. 14: Vozidlo Waymo [35]