



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

SAMOČINNÉ RIADENIE MODELU VOZIDLA

SELF-DRIVING OF A MODEL CAR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

IVAN HAZUCHA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL BIDLO, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce



Student: **Hazucha Ivan**
Program: Informační technologie
Název: **Samočinné řízení modelu vozidla**
Self-Driving of a Model Car
Kategorie: Vestavěné systémy

Zadání:

1. Seznamte se s modelem vozidla postaveného na platformě NXP Cup Kit.
2. Vozidlo doplňte vhodnými senzory tak, aby bylo možné zkoumat algoritmy pro samočinné řízení.
3. Proveďte rešerši existujících možností a technik pro samočinné řízení vozidel ve zvolené kategorii a zpracujte studii na toto téma.
4. Pro alespoň dva různé modelové scénáře provozu navrhnete algoritmy s cílem dosažení co nejvyššího stupně autonomie při řízení vozidla.
5. Proveďte sadu experimentů za účelem zjištění schopností navržených řešení.
6. Zhodnoťte dosažené výsledky a diskutujte možnosti pokračování projektu.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího projektu.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Bidlo Michal, Ing., Ph.D.**
Vedoucí ústavu: Sekanina Lukáš, prof. Ing., Ph.D.
Datum zadání: 1. listopadu 2020
Datum odevzdání: 12. května 2021
Datum schválení: 30. října 2020

Abstrakt

Cielom práce je demonštrácia možností samočinného riadenia modelu vozidla, so zameraním na metódy plánovania lokálnej trajektórie a vyhýbania sa prekážkam. V rámci práce bol model doplnený o výpočtovú platformu Raspberry Pi a vhodné senzory. Konkrétne 2D LiDAR na detekciu a meranie vzdialenosti okolitých objektov, inkrementálny rotačný enkóder na meranie urazenej vzdialenosti a aktuálnej rýchlosti, a gyroskop, ktorý sníma relatívnu orientáciu vozidla. Následne bol implementovaný riadiaci systém schopný prijímať a spracovávať sensorové dáta, využiť ich pri odhade aktuálnej polohy a výpočte optimálnej trajektórie v nezmapovanom prostredí, a podľa parametrov tejto trajektórie ovládať akčné členy na ceste do cieľovej destinácie. Výsledkom je funkčný model vozidla schopný navigácie v neznámom prostredí a dosiahnutia zadaných cieľov jazdou po trajektórii tvorenej dynamicky v závislosti na okolitých prekážkach.

Abstract

The aim of this thesis is to demonstrate options for self-driving model cars, focused on local path planning methods and obstacle avoidance. As a part of the project, the model was supplemented by a computing platform Raspberry Pi and appropriate sensors. Specifically, a 2D LiDAR sensor was used for detection and measuring the distance of surrounding objects, an incremental rotary encoder for measuring the distance travelled and current speed, and a gyroscope to keep track of the vehicle's relative orientation. Subsequently, a control system was implemented. This system is able to receive and process sensor data, use it to estimate vehicle's current location, compute an optimal trajectory in an uncharted environment, and control the vehicle's actuators accordingly. The result is a functional model car able to navigate in an unknown environment and reach specified goals by following a trajectory, dynamically generated depending on the surrounding obstacles.

Kľúčové slová

samočinné riadenie, model vozidla, plánovanie lokálnej trajektórie, vyhýbanie sa prekážkam, NXP Cup Alamak, Raspberry Pi, LiDAR, PID regulátor, kinematické modely vozidla, Dynamic Window Approach

Keywords

self-driving, model car, local path planning, obstacle avoidance, NXP Cup Alamak, Raspberry Pi, LiDAR, PID Controller, kinematic vehicle models, Dynamic Window Approach

Citácia

HAZUCHA, Ivan. *Samočinné riadenie modelu vozidla*. Brno, 2021. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Michal Bidlo, Ph.D.

Samočinné riadenie modelu vozidla

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Michala Bidla Ph.D. Uviedol som všetky literárne pramene, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som čerpal.

.....
Ivan Hazucha
12. mája 2021

Podakovanie

Rád by som poďakoval pánovi Ing. Michalovi Bidlovi Ph.D. za jeho ochotu, pomoc a cenné rady pri tvorbe tejto bakalárskej práce. Taktiež by som rád vyjadril vďaku pánovi Ing. Jaroslavovi Rozmanovi Ph.D. za poskytnutie LiDAR senzoru, ktorý bol pre potreby práce kľúčový.

Obsah

1	Úvod	2
2	Samočinné riadenie vozidiel	3
2.1	Koncepcia samočinne riadených vozidiel	3
2.2	Senzorová výbava	4
2.3	Lokalizácia a navigácia	6
2.4	Riadenie akčných členov	10
3	Model vozidla a návrh sensorovej výbavy	13
3.1	Sústava akčných členov	15
3.2	Napájacia sústava	16
3.3	Systémová doska	19
3.4	Výpočtová platforma	20
3.5	Senzorová výbava	22
3.6	Schéma zapojenia	31
4	Implementácia riadiaceho systému	32
4.1	Návrh a štruktúra	32
4.2	Implementácia riadiaceho systému	34
4.3	Systém pre testovanie a ladenie	37
5	Testovanie a vyhodnotenie experimentov	39
5.1	Overenie funkčnosti a ladenie komponentov	39
5.2	Realizácia modelových scenárov	46
5.3	Zhrnutie dosiahnutých výsledkov	49
6	Záver	50
	Literatúra	51
A	Obsah SD karty	54
B	Fotografie finálneho modelu	55

Kapitola 1

Úvod

Automatizácia a s ňou súvisiace samočinné ovládanie sú významným trendom súčasnosti. Špecifickou oblasťou je samočinné riadenie vozidiel, ktorého cieľom je dosiahnutie a prekonanie schopností človeka riadiť vozidlo. Táto úloha má viacero rovín počínajúc snímaním a interpretáciou okolitého prostredia, aplikáciou navigačných algoritmov, až po ovládanie akčných členov vozidla. V súčasnom štádiu vývoja sú kritickými oblasťami práve vnímanie okolia a plánovanie lokálnej trajektórie.

Motiváciou pre prácu je snaha preskúmať možnosti navigácie a vyhýbania sa prekážkam s využitím fyzického modelu vozidla a vhodného sensorového vybavenia tak, aby bolo možné použité techniky otestovať a vyhodnotiť na reálnych experimentoch.

Na začiatku trasy musí byť známa aktuálna poloha a stav vozidla, následne je zvolená cieľová destinácia. V tomto momente je možné s využitím mapy určiť približnú trasu. Vozidlo na ceste do cieľa typicky narazí na radu prekážok. Tie môžu byť reprezentované napríklad dopravným značením alebo fyzickými objektami, ktoré stoja vozidlu v ceste – prvky infraštruktúry, ďalšie vozidlá, chodci a ďalšie. V týchto prípadoch je nutné trajektóriu upraviť tak, aby sa predišlo kolízii a následne vozidlo pokračovalo na ceste k destinácii. Práca je zameraná práve na detekciu a vyhýbanie sa fyzickým objektom, ktoré priamo obmedzujú vozidlo na ceste k cieľu. Úspešné zvládnutie úlohy znamená presun do cieľovej destinácie bez kolízie s prekážkami.

Riešenie je postavené na modele vozidla NXP Cup Alamak [17]. Pohybovú sústavu tvoria dva jednosmerné motory, ktoré poháňajú kolesá zadnej nápravy, a servo motor, ktorý nastavuje uhol natočenia kolies prednej nápravy. Na detekciu prekážok bol použitý laserový senzor vzdialenosti so zorným polom 360 stupňov, ktorý je umiestnený na streche vozidla. Za účelom lokalizácie vozidla bol pridaný rotačný enkodér snímajúci otáčky kolesa zadnej nápravy a gyroskop, ktorý sleduje uhol natočenia vozidla voči počiatočnej polohe. Údaje zo senzorov sú ďalej využité ako vstup algoritmu Dynamic Window Approach [11], ktorý z podmnožiny možných trajektórií vyberie tú optimálnu. Na základe zvolenej trajektórie je pomocou PID regulátoru [2] nastavená požadovaná rýchlosť, a použitím vzťahov kinematického modelu vozidla určený správny uhol natočenia kolies prednej nápravy. Výpočtovú platformu systému tvorí populárny jednodoskový počítač Raspberry Pi 3B+ [19].

Výsledkom je funkčný model vozidla schopný samočinného riadenia v neznámom prostredí, bez využitia globálnej mapy prekážok. Funkčnosť je overená realizáciou a vyhodnotením sady experimentov, ktoré pozostávajú z testovania funkčnosti jednotlivých komponentov systému, a následne dvoch modelových situácií zameraných na schopnosti navigácie a vyhýbania sa prekážkam v neznámom prostredí.

Kapitola 2

Samočinné riadenie vozidiel

Kapitola prezentuje využívané techniky samočinného riadenia vozidiel, so zameraním na problematiku lokálnej navigácie z pohľadu hardware aj software. Začína stručným popisom koncepcie samočinne riadených vozidiel 2.1 a prináša pohľad na možnosti aktuálne využívaného sensorového vybavenia 2.2. Následne rozoberá techniky lokalizácie, lokálnej navigácie 2.3, a riadenia 2.4, ktorými sa táto práca zaoberá.

2.1 Koncepcia samočinne riadených vozidiel

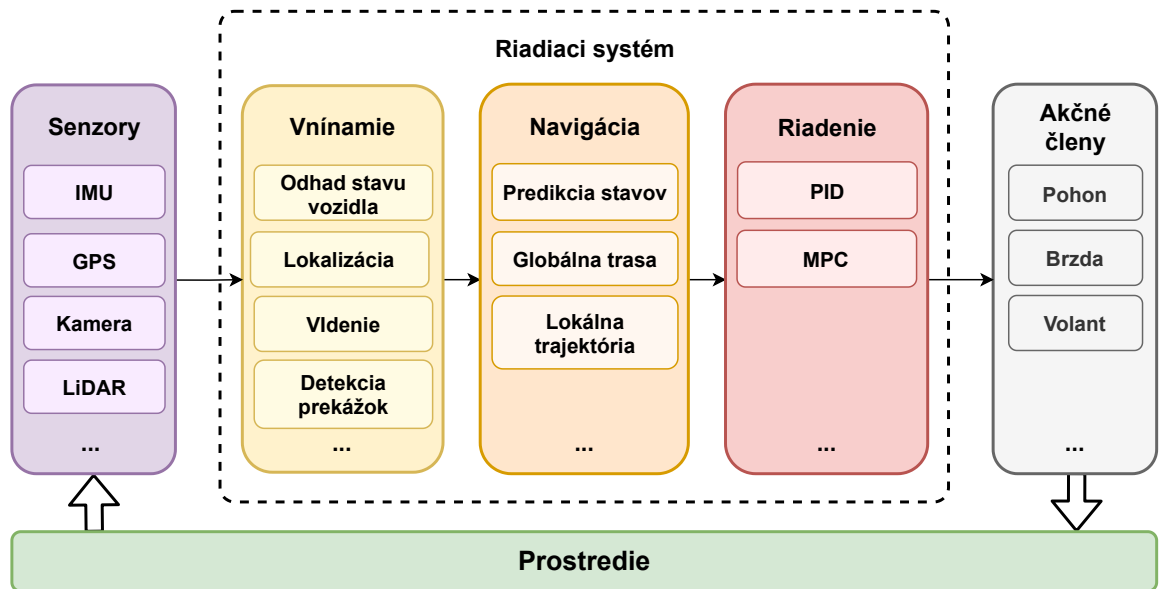
Samočinné riadenie vozidla je proces vzájomnej interakcie riadeného vozidla a okolitého prostredia. Vozidlo vníma okolie prostredníctvom sensorov, vykonáva rozhodnutia na základe implementovaného riadiaceho systému a pomocou akčných členov pôsobí na prostredie [26].

Senzorový systém okrem vnímania okolia slúži aj na snímanie veličín týkajúce sa samotného vozidla. V prípade konvenčného vozidla sú to typicky údaje o aktuálnej rýchlosti, natočení volantu, a iné. Merané hodnoty sú následne spracovávané riadiacim systémom. V tomto štádiu je typicky vykonávaný odhad pozície vozidla, detekcia prekážok, aplikácia rozpoznávania objektov ako dopravné značenie, a podobne.

Ďalším krokom je plánovanie, ktoré je možné rozlíšiť na globálne a lokálne. Globálne plánovanie sa zaoberá plánovaním dlhodobej trajektórie na ceste k cieľu – typicky sa jedná o využitie mapy ciest a údajov pozície získaných z GPS, na základe ktorých je určená optimálna trasa.

Naproti tomu plánovanie lokálnej trajektórie sa zameriava na navigáciu v blízkom okolí vozidla, kedy je treba reagovať na rýchlo sa meniace prostredie. Cieľom je schopnosť reaktívne spomaliť, zrýchliť, prípadne sa dočasne vychýliť z globálnej trasy tak, aby sa predišlo kolízii, bolo dodržané dopravné značenie, a iné. Problematika odhadu relatívnej polohy a lokálnej navigácie je jedným so zameraní tejto práce.

Na základe takto modifikovanej trajektórie vzniká podnet pre systém riadenia akčných členov, ktorý pôsobí a svojimi zásahmi reguluje akčné členy vozidla. Príklad schémy samočinne riadeného vozidla je na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Obecná schéma samočinne riadeného vozidla. Systém pozostáva z troch hlavných častí – senzorov, riadiaceho systému a akčných členov, ktoré operujú v kontexte daného prostredia. V prvom kroku senzory získavajú informácie o vozidle a prostredí. Následne sensorové dáta spracuje a interpretuje riadiaci systém. Po spracovaní prebieha predikcia a plánovanie ďalších krokov. Výsledky plánovania sú prevedené na vstupy systému riadenia akčných členov, ktorý pôsobí na akčné členy za účelom zmeny rýchlosti alebo smeru jazdy vozidla. Vypracované na základe podkladov z článku [26].

2.2 Sensorová výbava

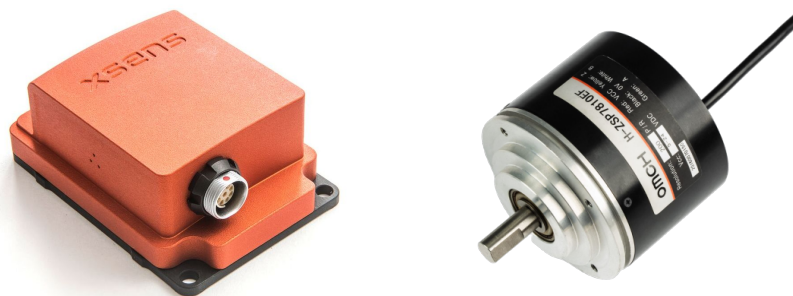
Pre spoľahlivý odhad polohy vozidla a efektívnu lokálnu navigáciu je potrebné zabezpečiť dostatok informácií o stave vozidla a prostredí, v ktorom sa nachádza. Sensory potrebné na získavanie týchto informácií je možné rozdeliť do dvoch skupín:

- senzory na snímanie veličín súvisiacich so stavom vozidla,
- senzory snímajúce okolité prostredie.

Senzory snímajúce stav vozidla

Základné veličiny charakterizujúce pohyb vozidla vyplývajú z jeho kinematického modelu. Jedná sa o rýchlosť, uhol natočenia volantu, a smerovanie vozidla.

Na meranie rýchlosti a uhlu natočenia volantu sa najčastejšie využívajú rotačné enkóдеры, ktoré umožňujú meranie otáčok. Enkóдеры sa rozdeľujú na viacero druhov podľa princípu fungovania. Ďalšie možnosti zahŕňajú využitie IMU (Inertial Measurement Unit) senzoru, ktorý je schopný snímať zrýchlenie vozidla aj jeho relatívne smerovanie, prípadne GPS (Global Positioning System), ktorý umožňuje odhad rýchlosti na základe meraní polície. Typové príklady senzorov je možné vidieť na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Zľava IMU senzor Xsens MTi 100 [25] a optický inkrementálny rotačný enkóder Omch H-ZSP7810EF [18].

Senzory snímajúce okolité prostredie

Existuje veľké množstvo rozličných senzorov určených na snímanie okolia vozidla. Ich využiteľnosť závisí na danej oblasti samočinného riadenia a prípadných ďalších prevádzkových podmienkach. Najčastejšie využívané senzory v osobných automobiloch sú ultrazvukové senzory a kamery. Bežne sa využívajú v rámci parkovacích systémov, a to autonómnych, aj človekom riadených. Ultrazvukový senzor má pomerne malý efektívny dosah a je teda vhodný prevažne k detekcii objektov na krátke vzdialenosti. Často sa využíva napríklad v parkovacích systémoch. Kamera má v oblasti samočinného riadenia univerzálne využitie v rámci detekcie a rozpoznávaním dopravného značenia, možných prekážok, iných vozidiel, a iné. Príklad kamerového systému využitého pre účely samočinného riadenia sa nachádza na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Ukážka vývojovej súpravy comma two spoločnosti comma ai. Jedná sa o systém priamo pripojený k rozhraniu vozidla, využívajúci mobilný telefón ako kameru a výpočtovú platformu na detekciu cestných pruhov, prekážok a iných vozidiel. Prevzaté z [22].

Medzi pokročilejšie senzory je možné zaradiť senzory merania vzdialenosti od objektov, medzi ktoré patrí radar alebo LiDAR. Radary sú používané prevažne na meranie vzdialenosti od iných vozidiel. LiDAR v závislosti na type môže byť použitý aj na komplexnejšie účely ako 3D mapovanie prostredia. Tieto senzory však patria medzi najdrahšie a ich využitie je v súčasnosti obmedzené prevažne na experimentálne vozidlá. Príklad LiDAR senzoru je možné vidieť na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Obrázok LiDAR senzoru Sick MRS1000 so zorným polom 275 stupňov, umožňujúci 3D snímanie prostredia v okolí vozidla. Prevzaté z [23].

2.3 Lokalizácia a navigácia

Lokalizácia, respektíve odhad relatívnej polohy vozidla, je potrebným predpokladom pre úspešnú navigáciu. Dosiahnutie dostatočne presného odhadu polohy je možné pomocou spracovania sensorových dát a aplikovaním kinematického modelu vozidla. Následne je možné využiť navigačný algoritmus, ktorého výstupom je trajektória, optimálna vzhľadom na zadané vstupy. Vybrané techniky odhadu polohy vozidla a lokálnej navigácie sú predmetom tejto sekcie.

2.3.1 Kinematický model vozidla

Kinematika je oblasť fyziky v rámci klasickej mechaniky, zaoberajúca sa popisom pohybu telies. Neuvažuje pritom pôsobenie síl, ktoré tento pohyb spôsobujú. Kinematický model vozidla je lineárna matematická reprezentácia pohybových vlastností vozidla. Pracuje s veličinami ako poloha alebo rýchlosť, a zaoberá sa ich vývojom v čase. Zanedbáva pritom dynamické vlastnosti vozidla ako hmotnosť, sklz kolies, a iné.

Výhodou kinematického modelu je jeho jednoduchosť a dostatočná presnosť za ideálnych podmienok jazdy a nízkych rýchlostiach, kedy je vplyv dynamických vlastností zanedbateľný.

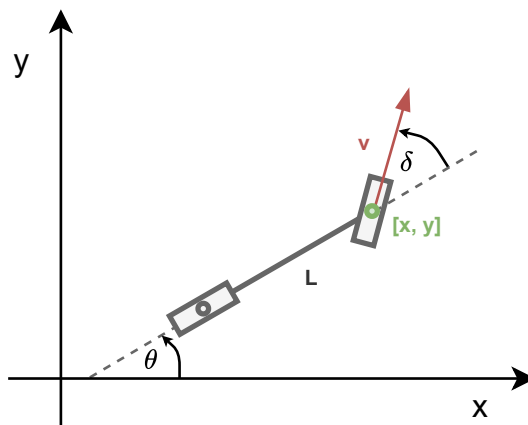
Existuje viacero druhov modelov, ktoré sú vhodné na popis rôznych typov vozidiel, v závislosti na ich konštrukcii. Model štvorkolesového vozidla so schopnosťou natáčať kolesá prednej nápravy, je typicky reprezentovaný zjednodušeným bicyklovým modelom. V závislosti na situácii a dostupných dátach je však možné napríklad pre potreby odhadu polohy aj v tomto prípade použiť ešte jednoduchší model jednokolesového vozidla.

Bicyklový model

Jedná sa o zjednodušenie modelu vozidla so štyrmi kolesami, v rámci ktorého sú dvojice kolies oboch náprav zlúčené do jedného, ktoré je umiestnené centre prednej a zadnej nápravy [8]. Schému bicyklového modelu je spolu s podrobným popisom možné vidieť na obrázku 2.5.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos(\delta + \theta) \\ \dot{y} &= v \sin(\delta + \theta) \\ \dot{\theta} &= v \sin(\delta) / L \end{aligned} \tag{2.1}$$

Model je možné popísať matematicky pomocou vzťahov 2.1, kde \dot{x} , \dot{y} a $\dot{\theta}$ vyjadrujú hodnotu prírastkov pozície a smerovania vozidla. Vstupmi systému sú rýchlosť v a uhol natočenia prednej nápravy δ .



Obr. 2.5: Diagram bicyklového kinematického modelu. Ako vzťažný bod je vyžité centrum prednej nápravy. Dĺžka L je vzdialenosť medzi centrom prednej a zadnej nápravy. Uhol θ udáva smerovanie vozidla vzhľadom k osi x súradnicového systému, δ je uhol natočenia kolesa prednej nápravy vzhľadom na osu vozidla, a v je rýchlosť.

Model jednokolky

Jedná sa o ďalšie zjednodušenie kinematického modelu, kedy je zanedbaná dĺžka vozidla a uvažované je iba jedno koleso [4]. Tento model je vhodný napríklad pre účely odhadu polohy v prípade, že nie sú dostupné spoľahlivé dáta o uhle natočenia prednej nápravy, ale orientácia vozidla a rýchlosť vozidla sú známe. Schéma modelu sa nachádza na obrázku 2.6.

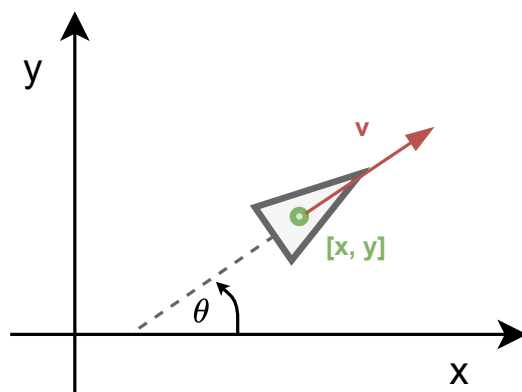
$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \cos(\theta) \\ \dot{y} &= v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= \omega\end{aligned}\tag{2.2}$$

Vzťahy 2.2 popisujú výpočet prírastkov pozície a smerovania vozidla. Prírastok pozície v tomto prípade závisí iba na rýchlosti v a orientácii θ . Prírastok smerovania je rovný uhlovej rýchlosti vozidla ω .

2.3.2 Odometria a Dead Reckoning

Termín odometria znamená využitie dát senzorov pohybu na odhad zmeny pozície skúmaného systému. Z pohľadu samočinného riadenia vozidiel je jedným z jej častých využití odhad aktuálnej pozície vozidla na základe počiatočnej pozície a urazenej vzdialenosti [5].

Metóda Dead Reckoning zakomponováva do odhadu pozície okrem urazenej vzdialenosti (prípadne rýchlosti) aj smerovanie vozidla. Praktický príklad je snímanie otáčok kolesa a uhlovej rýchlosti vozidla pomocou rotačného enkóderu a gyroskopu. Na základe týchto hodnôt a predchádzajúcej známej pozície je možné aplikáciou kinematického modelu vozidla vypočítať odhad aktuálnej polohy.



Obr. 2.6: Diagram modelu jednokolky. Ako vzťažný bod sa berie stred vozidla. Uhol θ udáva smerovanie vozidla vzhľadom k ose x súradnicového systému, a v je rýchlosť.

Tento spôsob odhadu pozície je náchylný na chyby spôsobené nepresnosťou senzorov a integráciou chybou zafaržených meraných hodnôt v čase. Pri implementácii je nutné na tieto vplyvy dbať a podniknúť kroky na ich minimalizáciu. Praktickým riešením je využitie dodatočných podporných senzorov [5].

V závislosti od typu senzoru je následne možné realizovať fúziu sensorových dát za účelom zvýšenia presnosti meraní. Napríklad fúzia meraní uhlovej rýchlosti a zrýchlenia, meraných pomocou gyroskopu a akcelerometu. Ďalšou možnosťou je periodická korekcia na základe hodnôt dát z referenčného senzoru. Možné je napríklad využitie kompasu na korekciu hodnoty orientácie, alebo GPS na korekciu polohy vozidla.

2.3.3 Lokálna navigácia

Algoritmy lokálnej navigácie umožňujú vozidlu pohybovať sa bez globálnej mapy prostredia. Využívajú pri tom znalosti aktuálnej pozície, stavu vozidla, a snímaných dát prostredia, ktoré sú vyhodnocované v reálnom čase. Existuje viacero techník lokálnej navigácie, ktorých efektívne použitie závisí na kinematike príslušného vozidla, využitých senzoroch a type prostredia, v ktorom vozidlo operuje.

Ako príklad je možné uviesť metódy *Vector Field Histogram* [3], alebo *Nearness Diagram* [15]. Pre potreby tejto práce bol využitý algoritmus Dynamic Window Approach [11], nakoľko jeho fungovanie priamo vychádza z kinematického modelu vozidla.

Dynamic Window Approach

Jedná sa o algoritmus reaktívneho plánovania pohybu mobilných robotov. Jeho hlavnou výhodou je, že sa nespolieha statické dáta prostredia, ale využíva hodnoty merané v reálnom čase a reaktívne vyhýbanie sa prekážkam, na základe čoho je schopný dynamicky plánovať trasu. Popis princípu fungovania algoritmu DWA je vypracovaný na základe pôvodného článku autorov metódy [11].

Je navrhnutý tak, aby sa dokázal vysporiadať s fyzickými obmedzeniami vozidla, konkrétne voľnosť pohybu vozidla a možných dosiahnuteľných rýchlostí. Tento problém rieši uvažovaním výhradne kruhových trajektórii, daných dvojrozmerným priestorom traslačných a rotačných rýchlostí – takzvané Dynamic Window (dynamické okno) – ktoré je vozidlo

schopné dosiahnuť v nasledujúcom časovom intervale. Prehľadávaný priestor teda vyplýva priamo z kinematiky vozidla. Tento priestor je ďalej redukovaný len na také kombinácie rýchlostí, ktoré pre zvolený časový interval nevyústia v kolíziu s prekážkou.

Z prehľadávaného priestoru možných rýchlostí je zvolená optimálna pomocou maximalizácie objektívnej funkcie. Táto funkcia pozostáva z troch zložiek – smerovanie vozidla k cieľu, rýchlosť, a vzdialenosť od najbližšej prekážky. Na základe týchto zložiek a nameraných dát algoritmus uprednostňuje buď rýchly pohyb smerom k cieľovej destinácii, alebo vyhýbanie sa prekážkam. Algoritmus je teda možné rozdeliť na dve hlavné časti:

- zúženie prehľadávaného priestoru,
- optimalizácia objektívnej funkcie,

Zúženie prehľadávaného priestoru možných rýchlostí je realizované aplikáciou nasledujúcich obmedzení.

- Kružnicové dráhy – algoritmus uvažuje výhradne také trajektórie, ktoré je vozidlo schopné reálne dosiahnuť v závislosti na jeho kinematickom modeli. Trajektória je daná dvojicou lineárnej a uhlovej rýchlosti (v, ω) . Výsledkom je dvojrozmerný priestor rýchlostí.
- Prípustné rýchlosti – priestor rýchlostí je zredukovaný tak, že sú odstránené trajektórie, u ktorých by v rámci uvažovaného časového došlo ku kolízii s prekážkou. Dvojica rýchlostí je teda prípustná v prípade, že je vozidlo schopné zastaviť kým dorazí k najbližšej prekážke na odpovedajúcej trajektórii.
- Dynamické okno – uvažované sú len také rýchlosti, ktoré je vozidlo schopné dosiahnuť v najbližšom časovom intervale. Schopnosť dosiahnutia rýchlosti vyplýva z limitovanej akcelerácie vozidla.

$$V_d = \{(v, \omega) | v \in [v_a - \dot{v}t, v_a + \dot{v}t] \wedge \omega \in [\omega_a - \dot{\omega}t, \omega_a + \dot{\omega}t]\} \quad (2.3)$$

Vzťah 2.3 popisuje výber dynamického okna V_d , teda rýchlosti, ktoré je vozidlo schopné dosiahnuť. Volené sú také rýchlosti v a ω , ktoré je možné dosiahnuť na základe aktuálnej rýchlostí v_a a ω_a , a prírastkov rýchlostí \dot{v} a $\dot{\omega}$ v čase t .

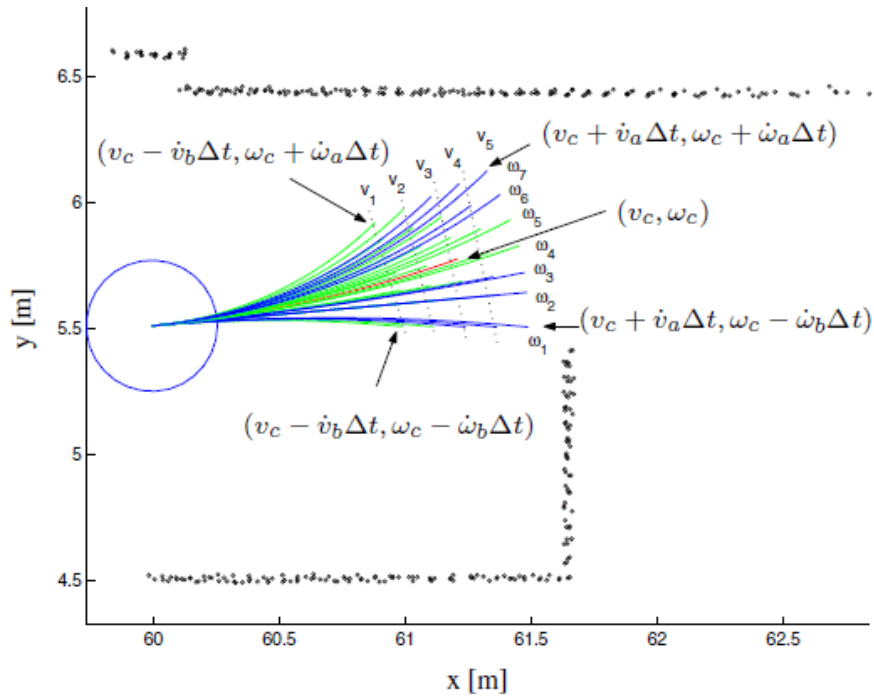
Optimalizácia objektívnej funkcie je daná maximalizáciou celkového skóre, ktoré je súčtom troch zložiek.

- Smerovanie vozidla (heading) – hodnota smerovanie vozidla je daná ako rozdiel uhlov aktuálnej orientácie vozidla a pozície cieľa. Menší uhol znamená väčšiu hodnotu.
- Viditeľnosť (clearance) – vyjadruje vzdialenosť najbližšieho objektu na danej trajektórii. Čím väčšia vzdialenosť od objektu, tým väčšia hodnota.
- Rýchlosť (velocity) – rýchlosť pohybu vozidla smerom dopredu. Hodnota je maximálna pre maximálnu rýchlosť.

$$G(v, \omega) = \alpha \cdot \text{heading}(v, \omega) + \beta \cdot \text{clearance}(v, \omega) + \gamma \cdot \text{velocity}(v, \omega) \quad (2.4)$$

Objektívna funkcia G je reprezentovaná vzťahom 2.4. Funkcie heading, clearance a velocity odpovedajú jednotlivým zložkám popísaných vyššie. Konštanty α , β a γ sú konfigurovateľné váhové koeficienty, ktorými je možné nastaviť chovanie systému v závislosti na použití tak, aby boli jednotlivé zložky objektívnej funkcie zvýhodnené alebo penalizované. Hodnoty jednotlivých zložiek sú normalizované na hodnoty z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$

Dvojica rýchlostí, pre ktorú objektívna funkcia vráti najväčší výsledok, bude zvolená ako optimálna. Príklad priestoru rýchlostí a voľbu optimálnej trajektórie je možné vidieť na obrázku 2.7.



Obr. 2.7: Grafická reprezentácia prehľadávaného priestoru. Jednotlivé krivky odpovedajú možným trajektóriám daným dvojicami rýchlostí. Červená trajektória je daná aktuálnou rýchlosťou vozidla. Modrou farbou sú označené vylúčené kolízne trajektórie. Zelená farba označuje bezpečné trajektórie, z pomedzi ktorých sa na základe objektívnej funkcie volí optimálna. Prevzaté z [21].

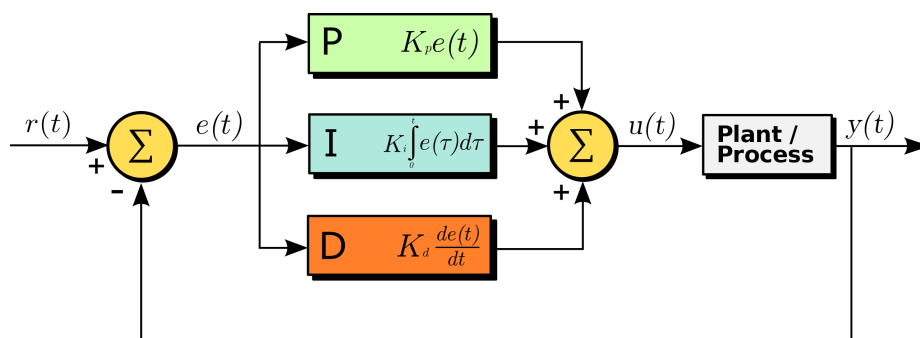
2.4 Riadenie akčných členov

Na základe výstupov navigačných algoritmov je nutné v poslednej fáze riadiaceho systému zabezpečiť riadenie akčných členov tak, aby bol dosiahnutý pohyb po požadovanej trajektórii. Je teda nutné previesť tieto hodnoty na veličiny, na základe ktorých je akčné členy možné ovládať. V prípade vozidla sa typicky jedná o nastavenie správneho výkonu motoru a natočenie volantu tak, aby bola dosiahnutá požadovaná rýchlosť a smer jazdy. Často používaný systém pre riadenie akčných členov je takzvaný PID regulátor, popísaný nižšie.

2.4.1 PID regulátor

PID (proporcionálny, integračný a derivačný) regulátor je mechanizmus regulačnej slučky využívajúcej spätnú väzbu na dosiahnutie požadovaných hodnôt regulovanej veličiny. Princíp fungovania regulátoru je založený na výpočte regulačnej odchýlky, danej rozdielom medzi požadovanou a aktuálnou hodnotou regulovanej veličiny [2]. Výstupom je hodnota akčnej veličiny, pozostávajúca z nasledujúcich zložiek:

- proporcionálna – priamo aplikuje hodnotu regulačnej odchýlky na výstupnú hodnotu akčnej veličiny,
- integračná – zrýchľuje proces dosiahnutia požadovanej hodnoty zakomponovaním histórie predošlých odchýlok,
- derivačná – predpovedá správanie systému na základe aktuálneho trendu odchýlky, čím pozitívne vplýva na čas ustálenia požadovanej hodnoty.



Obr. 2.8: Obecná schéma PID regulátoru. Vstupmi regulátoru sú požadovaná hodnota $r(t)$ a aktuálna meraná hodnota $r(t)$, ktorá pôsobí ako spätná väzba. Ich rozdielom je regulačná odchýlka $e(t)$. Nasleduje výpočet jednotlivých zložiek podľa uvedených vzťahov. Súčtom jednotlivých zložiek je výsledná akčná veličina, ktorá pôsobí na regulovaný systém. Prevzaté z odkazu².

Príkladom je regulácia otáčok, kedy regulovaným systémom je motor, vstupnou veličinou je požadovaná rýchlosť otáčok, výstupná akčná veličina je hodnota napájacieho napätia motoru a spätná väzba je zabezpečená senzorom, ktorý sníma rýchlosť otáčok motoru.

Z pohľadu PID regulátorov je kľúčové práve správne naladenie váhových koeficientov K_p , K_i a K_d , ktoré určujú vplyv jednotlivých zložiek na výslednú hodnotu akčnej veličiny. Princípy ladenia PID regulátorov sú popísané nižšie.

Ladenie regulátoru

Ladenie regulačného cyklu spočíva v nastavení koeficientov proporcionálnej, integračnej a derivačnej zložky tak, aby bola dosiahnutá požadovaná odozva systému. Požiadavky na doby odozvy sa môžu v závislosti od daného systému líšiť. V prípade regulácie rýchlosti vozidla, ktorá je v práci využitá, je kladený dôraz predovšetkým na stabilitu a dobu reakcie na zmenu požadovanej hodnoty.

²Obecná schéma PID regulátoru: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller#/media/File:PID_en.svg

Existuje viacero spôsobov ladenia koeficientov a optimálny spôsob závisí na konkrétnom systéme a situácii. Možné prístupy sú nasledovné:

- manuálne,
- čiastočne manuálne s využitím overených metód,
- automatizované s využitím špecializovaného software.

Výlučne manuálne ladenie môže predstavovať v závislosti na zvolenom systéme zložitý proces, ktorý je časovo náročný a často vyžaduje odborné znalosti a skúsenosti v danej oblasti.

Tento proces je možné zjednodušiť využitím niektorej z overených metód, ktoré popisujú pevne daný postup, na základe ktorého je možné dosiahnuť požadované vlastnosti efektívnejšie. Metódy typicky vyžadujú manuálne prvotné nastavenie parametrov pre dosiahnutie predpísanej odozvy systému. Táto odozva je následne analyzovaná a na základe jej vlastností sú podľa postupu danej metódy parametre modifikované s cieľom dosiahnutia optimálneho výsledku.

Automatizované ladenie typicky vyžaduje model daného systému. Tento model je následne použitý ako jadro simulácie, na základe ktorej ladiaci software určí optimálne parametre regulátoru. V prípade, že model systému nie je k dispozícii, prípadne by jeho realizácia bola komplikovaná, je možné využiť namerané dáta odozvy systému na zadané vstupy, na základe ktorých je simulačný software vytvorí aproximáciu modelu, pre ktorú parametre optimalizuje. Príkladom takéhoto ladiačeho software sú komerčné nástroje Matlab a Simulink³ od spoločnosti MathWorks.

Metóda Ziegler–Nichols

Jedná sa o populárnu metódu umožňujúcu ladenie P, PI, aj PID regulátorov [10]. Na začiatku je integračná zložka K_i aj derivačná zložka K_d nastavená na nulu. Proporcionálna zložka K_p je nastavená na malú hodnotu a postupne zvyšovaná až do momentu, kedy systém začne pravidelne oscilovať. Minimálna hodnota K_p , pri ktorej začne dochádzať k oscilácii, označíme ako K_{max} . Následne je zmeraná frekvencia oscilácie f_o .

Na základe hodnoty proporcionálnej zložky K_{max} a oscilačnej frekvencie f_o je možné zvyšné zložky regulátoru nastaviť podľa tabuľky 2.1.

Tabuľka 2.1: Tabuľka vzťahov pre nastavenie zložiek PID regulátoru pre dané typy regulátoru, na základe metódy Ziegler–Nichols. Prevzaté z [10].

Typ regulátoru	K_p	K_i	K_d
P regulátor	$0.5K_{max}$	0	0
PI regulátor	$0.45K_{max}$	$1.2f_o$	0
PID regulátor	$0.6K_{max}$	$2.0f_o$	$0.125/f_o$

³Ladenie PID regulátoru v prostredí Matlab a Simulink: <https://www.mathworks.com/help/slcontrol/guides/automated-tuning-of-simulink-pid-controller-block.html>

Kapitola 3

Model vozidla a návrh sensorovej výbavy

Kapitola popisuje vlastnosti modelu vozidla NXP Cup Alamak¹ v jeho základnom prevedení a v rámci jednotlivých sekcií prezentuje realizované modifikácie a pridané komponenty.

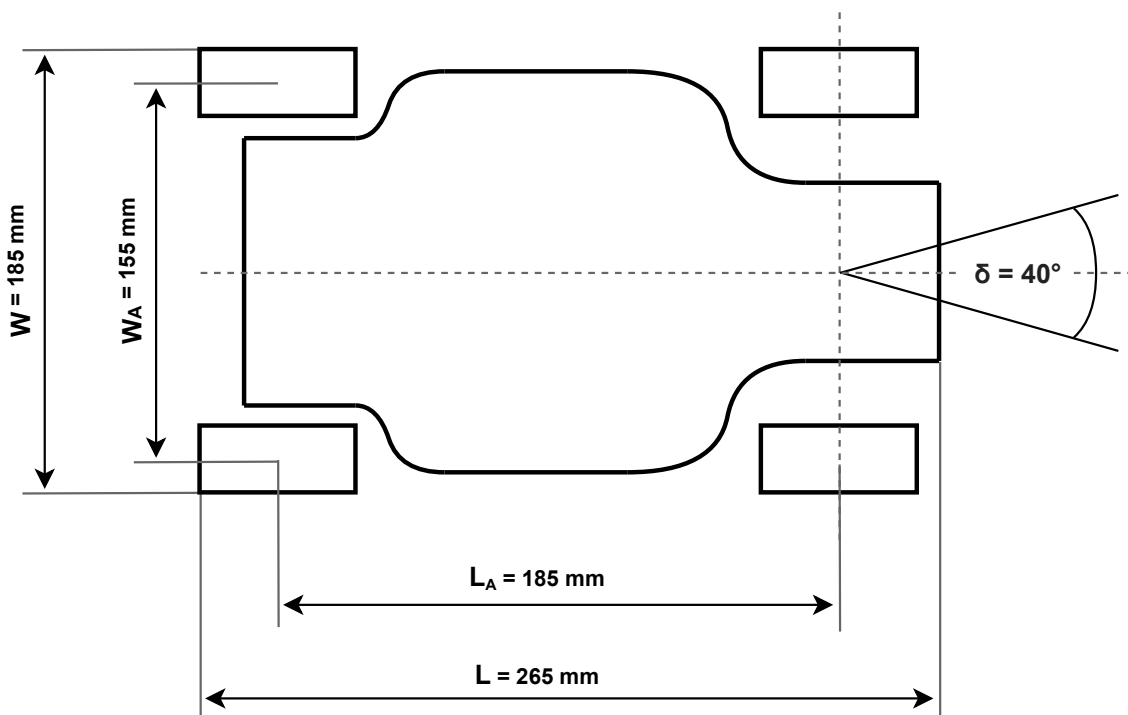
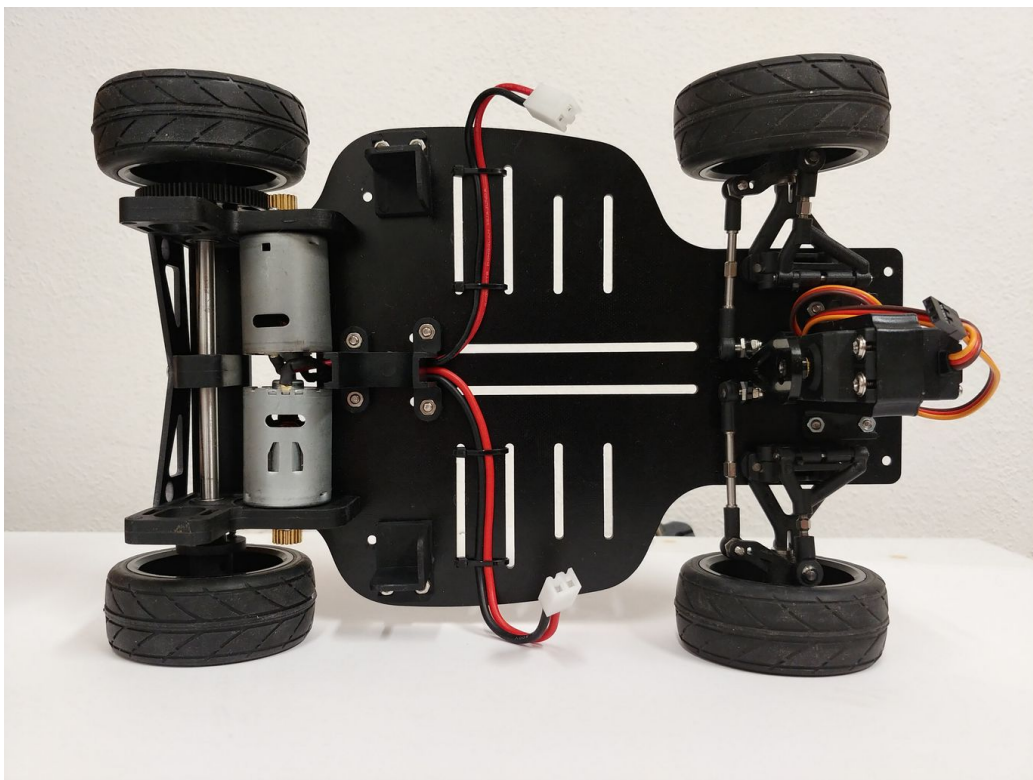
Model Alamak spoločnosti Landzo bol využívaný ako referenčné vozidlo v súťaži NXP Cup ročník 2017/2018, ktorá je každoročne organizovaná spoločnosťou NXP za účelom demonštrácie schopností algoritmov pre autonómne riadenie modelov vozidiel. Cieľom súťaže býva návrh a implementácia riadiaceho systému postaveného na snímaní hraníc vozovky lineárnou kamerou, spolu s využitím podporných senzorov, ako snímač otáčok kolies. Úlohou je zdolať danú dráhu v čo najkratšom čase bez kolízie alebo prekročenia hraníc vozovky.

Konštrukcia modelu vozidla

Konštrukcia je tvorená podvozkom s dvomi nápravami a priestorom pre uloženie napájacieho akumulátoru. Zadná náprava je osadená dvoma jednosmernými motormi, určenými k pohybu vozidla. V konštrukcii prednej nápravy je integrovaný servo motor, ktorý natáča kolesá do požadovaného smeru. Zostavený podvozok a jeho náčrt spolu s vyznačenými parametrami je možné vidieť na obrázku 3.1. Hmotnosť konštrukcie vrátane akčných členov je približne 670 gramov.

Z pohľadu kinematiky vozidla sa jedná o model založený na princípoch pohybu konvenčných automobilov. Pohybová sústava je tvorená motormi umožňujúcimi pohyb dopredu a dozadu a servo motorom v roli volantu.

¹Dokumentácia modelu NXP Cup Alamak: <https://nxp.gitbook.io/nxp-cup/developer-guide/landzo-car-model/kit-contents/model-alamak>



Obr. 3.1: Podvozok modelu. Zhora fotka a následne nákres s rozmermi vozidla – dĺžka L a šírka W , a rozpätie kolies náprav na pozdĺžnej L_A a priečnej W_A ose. Uhol δ značí rozsah natočenia kolies prednej nápravy.

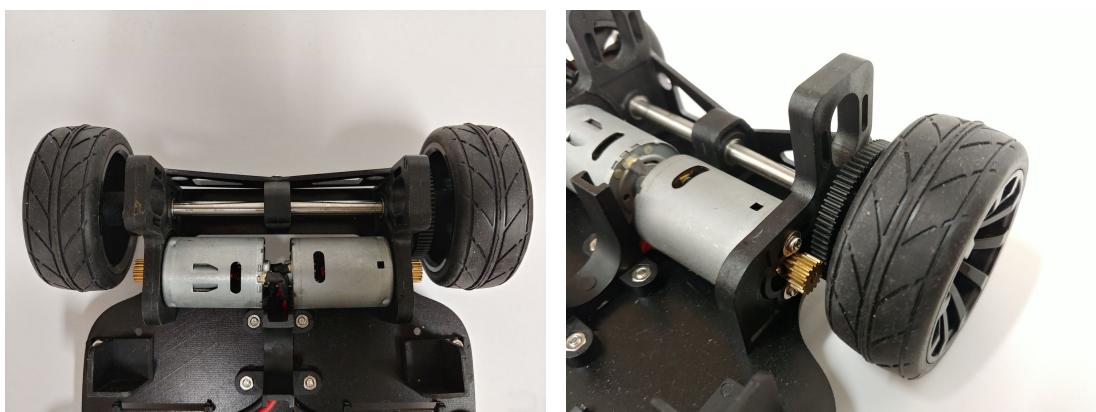
3.1 Sústava akčných členov

Pozostáva z dvojice jednosmerných motorov umiestnených v zadnej náprave, ktoré umožňujú vozidlu pohyb dopredu a dozadu, a servo motoru, ktoré ovláda smer natočenia kolies prednej nápravy.

3.1.1 Jednosmerné motory

Kolesá zadnej nápravy sú poháňané dvojicou jednosmerných (*anglicky DC – Direct Current*) motorov. Prevod medzi otáčkami motoru a kolesa je realizovaný pomocou ozubených koliesok. Výkon motoru je regulovaný polovičným mostíkom BTN7960², ktorý na základe hodnoty PWM (*Pulse-Width Modulation*) signálu reguluje výstupné napätie. Využitím dvoch mostíkov je možné dosiahnuť ovládanie smeru otáčok motoru tak, že PWM signál privedený na jeden z mostíkov bude nastavený na logickú hodnotu nula, a druhý bude mať nenulovú hodnotu. Pre dva motory sú na konektore J1 systémovej dosky (viď schéma 3.17) vyvedené celkom štyri PWM signály, aby bolo možné u každého motoru nezávisle regulovať výkon aj smer otáčok. Detail motorov a prevodu otáčok je možné vidieť na obrázkoch 3.2.

Pre potreby tejto práce boli PWM signály oboch motorov v jednotlivých smeroch spojené do jedného a motory sú tak ovládané ako jeden. Bližšia špecifikácia motorov je neznáma, nakoľko sa na zariadení ani stránkach NXP Cup³ poskytujúcich informácie o modele nepodarilo vyhľadať žiadne dodatočné údaje.



Obr. 3.2: Pohľad na zadnú nápravu s motormi a detail prevodu otáčok medzi motorom a kolesom

3.1.2 Servo motor

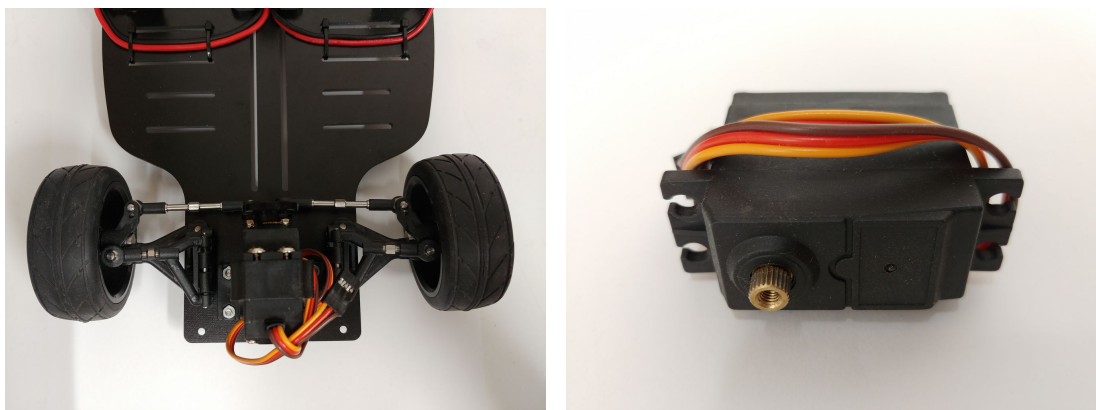
Originálny servo motor Futaba S9402⁴, ktorý sa nachádza v základnej výbave vozidla, sa po otestovaní ukázal byť nefunkčný. Jednalo sa o model s krútiacim momentom 8 kg.cm^{-1} pri napätí 6 V a maximálnym rozsahom natočenia 170 stupňov.

²Katalógový list polovičného mostíku BTN7960: <https://datasheet.octopart.com/BTN7960BAUMA1-Infineon-datasheet-11629726.pdf>

³NXP Cup GitBook: <https://nxp.gitbook.io/nxp-cup/developer-guide/landzo-car-model>

⁴Špecifikácia Futaba S9402: <https://servodatabase.com/servo/futaba/s9402>

Ako alternatíva bol zvolený model MG996R⁵. Uvádzaný krútiaci moment 11 kg.cm^{-1} pri napätí 6 V je o niečo vyšší ako v prípade pôvodného modelu a pomôže sa vysporiadať s dodatočnou váhou konštrukcie a sensorového vybavenia, s ktorými pôvodný návrh vozidla nepočítal. Rozsah natočenia 120 stupňov je stále viac ako dostatočný, nakoľko maximálny rozsah natočenia kolies prednej nápravy je približne 40 stupňov. Rozmery náhradného modelu sú takmer identické s tým pôvodným, takže inštalácia nevyžadovala žiadne dodatočné modifikácie. Detaily serva je možné vidieť na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Pohľad na prednú nápravu s osadeným servom a detail použitého serva MG996R

3.2 Napájacia sústava

Pozostáva zo zdrojov napätia pre jednotlivé komponenty modelu, napájacej dosky a ďalších pomocných obvodov, ktorých účelom je zabezpečiť napájanie stabilnými úrovňami napätia.

3.2.1 Zdroje napätia

Riadiace dosky a akčné členy sú napájané Ni-MH akumulátorom od firmy Landzo s kapacitou 2500 mAh , menovitým napätím $7,2 \text{ V}$ a hmotnosťou približne 300 g (obrázok 3.4 vľavo). Maximálna nameraná hodnota napätia po nabití bola približne $8,4 \text{ V}$.

Pre napájanie platformy Raspberry Pi bol použitý sekundárny zdroj Zendure SuperMini 5K⁶ s kapacitou 5000 mAh a hmotnosťou 112 g (obrázok 3.4 vpravo). Dôvodom pre využitie ďalšieho akumulátoru je vyššia spotreba Raspberry Pi, ktorá sa pohybuje v okolí 500 mA v nečinnom režime a pri vykonávaní programu riadenia môže presiahnuť aj 1000 mA . Pri pokuse napájať celé vozidlo z jedného zdroja dochádzalo k reštartu platformy kvôli náhlemu poklesu prúdu vplyvom spotreby akčných členov. Ďalší z prínosov prídavného zdroja energie je predĺženie operačnej doby vozidla. Nevýhodou je pridaná hmotnosť, ktorá má negatívny vplyv na výkon akčných členov.

⁵Katalógový list MG996R: https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R_Tower-Pro.pdf

⁶Špecifikácia Zendure SuperMini 5K: <https://zendure.com/products/supermini-5k>



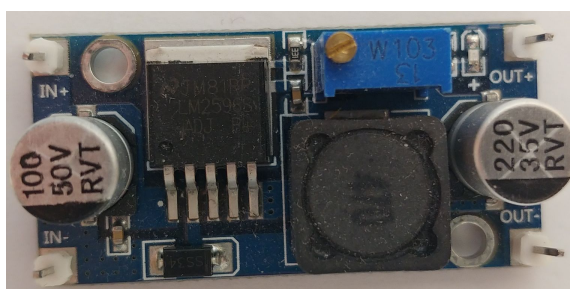
Obr. 3.4: Zľava originálny 2500 mAh Ni-MH akumulátor pre napájanie akčných členov a systémových dosiek. Vpravo Zendure SuperMini 5000 mAh určený pre napájanie platformy Raspberry Pi a sensorovej výbavy.

3.2.2 Napájanie akčných členov

Napájanie jednosmerných motorov je realizované prostredníctvom motorovej riadiacej dosky (popísaná v sekcii 3.1) podľa originálnej schémy výrobcu⁷.

Servo motor je v pôvodnom návrhu napájaný pomocou regulátora napätia zabudovaného na systémovej doske. Tento prístup bol však zavrhnutý, nakoľko zabudovaný regulátor napätia nie je dimenzovaný na zvládnutie prúdových špičiek vyvolaných aktiváciou servo motoru. Tie následne spôsobovali výpadky a reštart riadiacej dosky. Jedná sa chybu návrhu, ktorá je podrobnejšie popísaná v diplomovej práci [20].

Ako riešenie tohoto problému bol použitý jednosmerný menič napätia LM2596⁸, ktorý je možné vidieť na obrázku 3.5. Na jeho vstup je privedené napätie akumulátora a výstupné napätie je nastavené na 6 V, teda maximálna nominálna hodnota napájania pre servo uvádzaná výrobcom. Maximálny výstupný prúd meniča je 3 A, čo je vzhľadom na maximálnu spotrebu serva uvádzanú výrobcom dostatočné. Toto riešenie bolo zvolené na základe jeho úspešného využitia v bakalárskej práci [24].



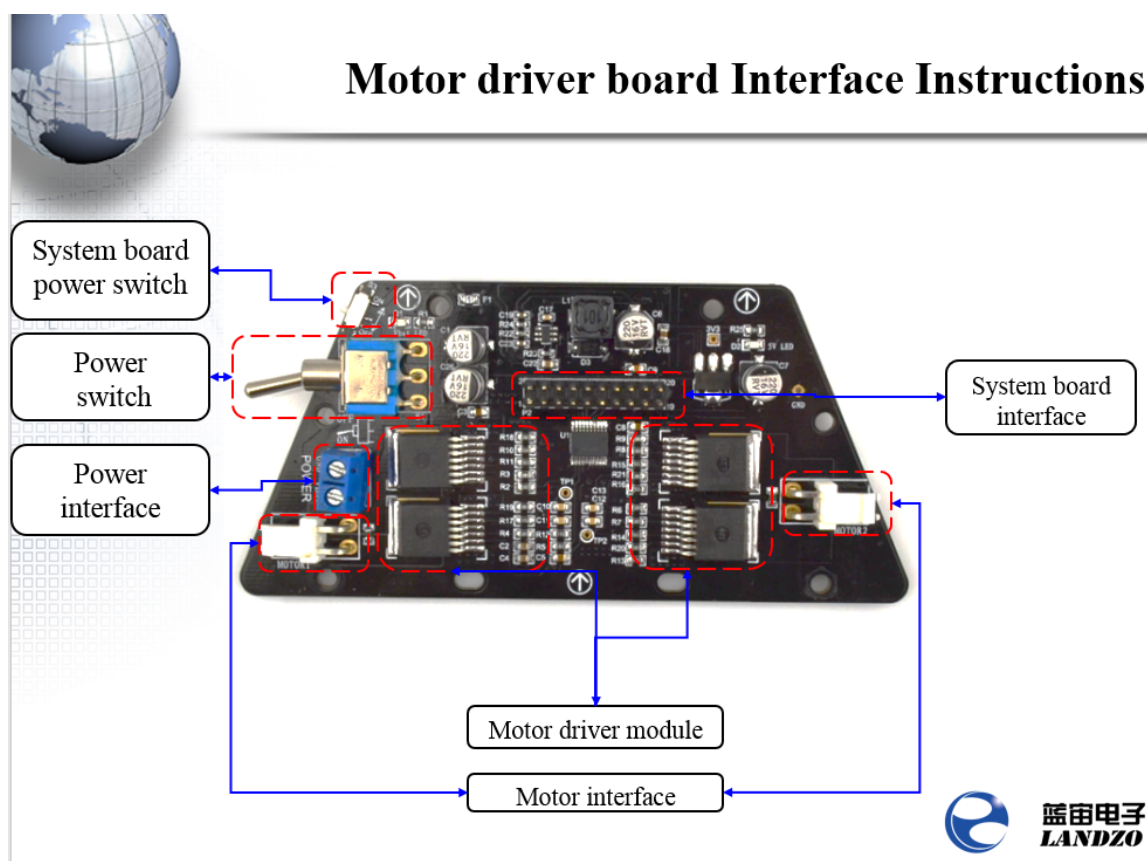
Obr. 3.5: Menič jednosmerného napätia LM2596 určený k regulácii napájacieho napätia servo motoru. Prevádza vstupné napätie akumulátora na hodnotu 6 V.

⁷Schémy zapojenia riadiacich dosiek modelu Alamak: <https://nxp.gitbook.io/nxp-cup/developer-guide/landzo-car-model/software/2017-tfc-hardware-overview/schematics>

⁸Katalógový list LM2596: <https://www.ti.com/product/LM2596>

3.2.3 Napájacia doska s budičmi motorov

Napájacia doska obsahuje rozhranie na pripojenie akumulátora a hlavný systémový vypínač. Nachádza sa na nej tiež obvod pre riadenie výkonu motorov, vrátane konektorov na ich pripojenie, bližšie popísané v sekcii 3.1. Uprostred dosky je osadené rozhranie pre komunikáciu so systémovou doskou. Rozloženie jednotlivých komponent spolu s popisom je možné vidieť na obrázku 3.6. Podrobná schéma zapojenia obvodov oboch dosiek je dostupná na stránke NXP Cup GitBook⁹.

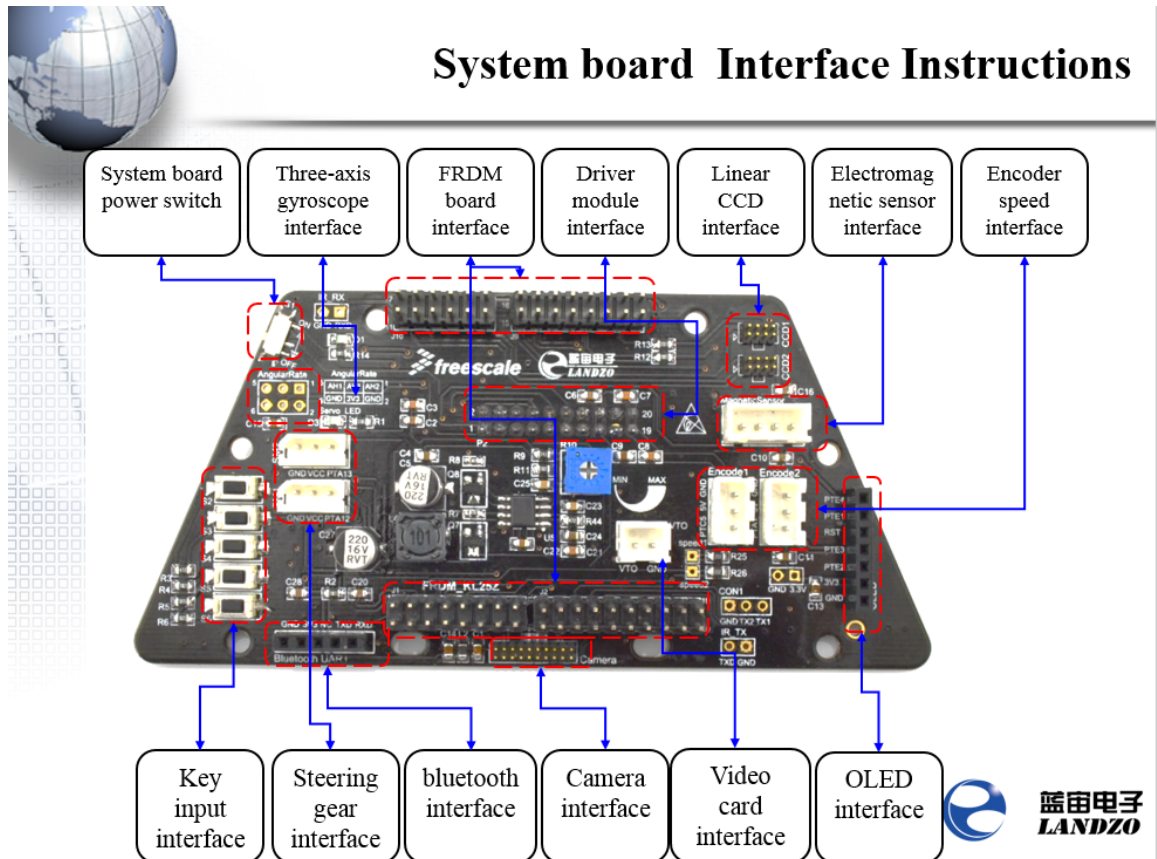


Obr. 3.6: Doska pre napájanie a riadenie motorov je napájaná priamo pomocou akumulátora. Jej úlohou je sprostredkovanie napájania zvyšku systému a riadenie motorov zadnej nápravy. Prevzaté z NXP Cup GitBook [17].

⁹NXP Cup GitBook - obvodové schémy: <https://nxp.gitbook.io/nxp-cup/developer-guide/landzo-car-model/software/2017-tfc-hardware-overview/schematics>

3.3 Systémová doska

Systémová doska je spojená s napájacou za pomoci 20-pinového konektoru umiestneného uprostred dosky. Nachádzajú sa na nej rozhrania pre pripojenie ďalších komponent, napríklad servo motoru alebo dodatočnej sensorovej výbavy. Z dostupných rozhraní sú pre potreby práce využívané napájacie konektory s napätím akumulátora na pripojenie servo motoru, a 3,3 V na pohon motoru použitého LiDAR senzoru. Na doske sú tiež vyvedené piny PWM signálov polovičných mostíkov, ktoré ovládajú výkon a smer otáčok motorov. Podrobný popis poskytovaných rozhraní sa nachádza na obrázku 3.7.



Obr. 3.7: Systémová doska poskytuje rozhrania na pripojenie dodatočného, primárne sensorového vybavenia. Sú na nej tiež vyvedené PWM signály pre ovládanie motorov zadnej nápravy. Prevzaté z NXP Cup GitBook [17].

3.4 Výpočtová platforma

Kritériá pre výber výpočtovej platformy zahrňovali dostatočný počet a variabilitu rozhraní pre pripojenie periférií (primárne senzorov a akčných členov), dostatočný výpočtový výkon pre implementáciu riadiacich algoritmov, nízku spotrebu, a perspektívu z hľadiska budúceho vývoja.

Hlavnými kandidátmi boli Arduino-kompatibilné mikrokontroléry a platforma Raspberry Pi. Je tiež možné vydať sa cestou špecializovanejších vývojových dosiek, ktoré sú výbornou voľbou z hľadiska efektivity, avšak na úkor jednoduchosti a prenositeľnosti implementácie. Platformy Arduino a Raspberry Pi majú širokú užívateľskú základňu a portfólio knižníc, ktoré uľahčujú komunikáciu s pripojenými perifériami. Výhodou je aj užívateľská prívetivosť a možnosť implementovať prehľadné a prenositeľné riešenie, ktoré môže byť použité ako základ pre budúci vývoj. Vzhľadom na tieto skutočnosti bola zvolená varianta jednodoskového počítača Raspberry Pi.

Raspberry Pi 3B+

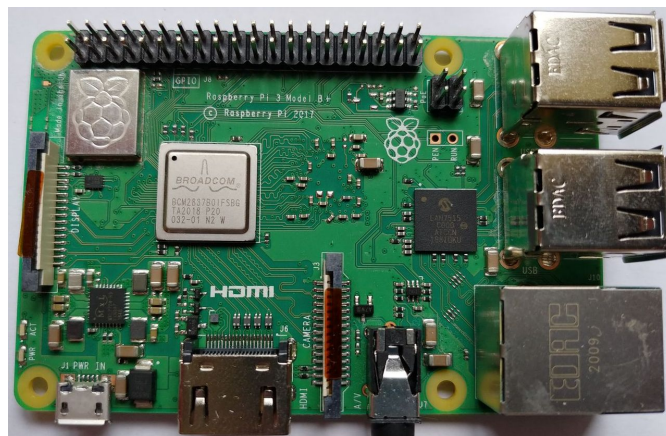
Jedná sa o kompaktný systém postavený na 64-bitovom procesore BCM2837B0 Cortex-A53 s frekvenciou 1.4 GHz od spoločnosti Broadcom. Zvolená verzia disponuje 1 GB LPDDR2 SDRAM. Neobsahuje integrované pamäťové úložisko. Ako externé pamäťové médium je možné použiť Micro SD kartu alebo USB flash disk. Výkon systému je viac ako dostačujúci a umožňuje okrem samotnej aplikácie aj beh plne funkčného operačného systému.

Zvolená bola verzia Linuxu Raspberry Pi OS poskytovaná výrobcom. Využitie operačného systému poskytuje rozšírené možnosti v oblasti vývoja. Významné sú predovšetkým možnosti jednoduchého využitia sieťovej komunikácie, nástrojov pre ladenie, a rozhraní pre prácu s procesmi a vlákнами.

Doska poskytuje bežné komunikačné rozhrania typické pre osobné počítače a navyše disponuje sadou GPIO (General Purpose Input-Output) pinov, ktoré je možné použiť na napájanie, ovládanie akčných členov a komunikáciu so senzormi. Zoznam vybraných podporovaných rozhraní:

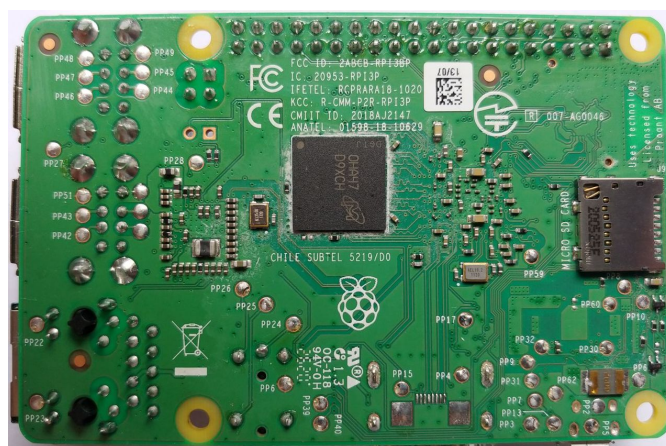
- Základná konektivita:
 - Gigabit Ethernet
 - 2.4GHz a 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac Wi-Fi
 - Bluetooth 4.2 a BLE
 - 4x USB 2.0
- Rozšírená konektivita pomocou GPIO:
 - 4x hardware PWM (2 kanály), podpora software PWM na všetkých pinoch
 - 2x SPI
 - 1x I^2C
 - 1x Serial
- Video a audio:
 - HDMI
 - MIPI DSI a CSI porty pre displej a kameru

V rámci práce boli zo základných rozhraní využité USB pre pripojenie pamäťového média a Wi-fi 2.4 GHz pre komunikáciu s klientským počítačom. Sada GPIO pinov je potom využívaná na riadenie akčných členov a komunikáciu so senzorovou výbavou. Využité boli rozhrania I^2C , Serial a niekoľko GPIO pinov v režimoch *input* a *PWM output*. Podrobné informácie k využitiu rozhraní v sekcii 3.5 vždy u jednotlivých senzorov. Oba hardware PWM kanály boli využité na riadenie akčných členov. Doska tiež disponuje napäťovým meničom schopným dodať napätie 3,3 V, ktorým sú napájané niektoré senzory. Podrobné informácie o platforme Raspberry Pi 3B+ vrátane detailnej špecifikácie a schém zapojenia je možné nájsť na stránkach výrobcu [19]. Detail konštrukcie a rozhraní je možné vidieť na obrázkoch 3.8 a 3.9.



Obr. 3.8: Výpočtová platforma Raspberry Pi 3B+ (pohľad zhora).

Špecifikácia doporučuje napájanie pomocou 5 V a uvádza maximálny prúdový odber 2,5 A. Uvedený prúdový odber je uvažovaný pri náročnejšom využití rozhraní zariadenia, takže spotreba samotného mikrokontroléru je omnoho nižšia (typicky okolo 500 mA pri nízkej záťaži). Zariadenie je možné napájať pomocou Micro-USB rozhrania alebo využitím 5V5 a GND pinov GPIO konektoru. Napájanie pomocou pinov sa nedoporučuje, nakoľko táto cesta neposkytuje ochranu pred prepólovaním ani prepätím. Napájanie platformy a zapojenie ďalších komponentov je zobrazené v schéme 3.17.



Obr. 3.9: Výpočtová platforma Raspberry Pi 3B+ (pohľad zdola).

3.5 Senzorová výbava

Pôvodná výbava modelu Alamak obsahuje lineárnu kameru od spoločnosti Landzo¹⁰, určenú na detekciu okrajov dráhy. Tento senzor nebol v rámci práce využitý, nakoľko nie je pre realizované techniky samočinného riadenia relevantný. Výber vhodných senzorov a ich integrácia do konštrukcie vozidla sú jedným z prínosov tejto práce. Táto sekcia prezentuje vybrané možnosti senzorového vybavenia vzhľadom na nasledujúce požiadavky:

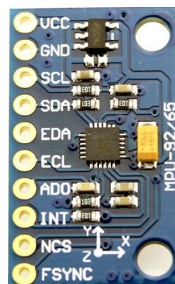
- schopnosť určiť relatívnej polohy a aktuálnej rýchlosti,
- schopnosť detekcie a merania vzdialenosti od okolitých objektov.

3.5.1 Meranie rýchlosti a urazenej vzdialenosti

Pre potreby lokalizácie a navigácie je potrebné poznať aktuálnu polohu, smer a rýchlosť vozidla. Existuje viacero spôsobov ako tieto údaje získať.

Medzi uvažovanými riešeniami bolo využitie 3-osého senzoru zrýchlenia, ktorý sníma hodnoty zrýchlenia v daných smeroch. Integráciou týchto hodnôt v čase je možné získať rýchlosť a dvojitou integráciou urazenú vzdialenosť. Tento prístup je však problematický z dôvodu nízkej presnosti a odolnosti daného typu senzoru voči vibráciám. V praxi sa pri využití senzoru zrýchlenia využíva fúzia dát z viacerých senzorov napríklad za pomoci Kalmanovho filtru. Medzi prídavné senzory v závislosti na aplikácii patria typicky gyroskop, ktorý sníma uhlovú rýchlosť (respektíve orientáciu), a magnetometer kvôli určeniu referenčného bodu, ktorý je z dlhodobého hľadiska stabilný a pomáha tak redukovať vplyv kumulatívnych chýb. Výstupné dáta sú do veľkej miery závislé na kalibrácii senzorov, okolitých podmienkach (rušení) a použitých algoritmoch. Podrobnosti k problematike odhadu polohy fúziou spomínaných senzorov, využívané metódy, výhody a nevýhody je možné nájsť v článku [9].

Kombinácia senzoru zrýchlenia (akcelerometer), uhlového zrýchlenia (gyroskop) a magnetického poľa (kompas) je bežne realizovaná v rámci jedného modulu. Príkladom takéhoto riešenia je MPU9250¹¹, ktorý je možné vidieť na obrázku 3.10.



Obr. 3.10: Ukážka modulu MPU9250 obsahujúci senzory zrýchlenia (akcelerometer), uhlového zrýchlenia (gyroskop) a magnetického poľa (kompas). Prevzaté z [6].

Pre účely práce bol zvolený jednoduchší a zároveň presnejší prístup s využitím inkrementálneho rotačného enkóderu.

¹⁰NXP Cup Alamak lineárna kamera: <https://nxp.gitbook.io/nxp-cup/developer-guide/landzo-car-model/kit-contents/model-alamak/kit-contents-camera-module>

¹¹Špecifikácia MPU9250: <https://components101.com/sensors/MPU9250-9-dof-mems-sensor-module-datasheet-pinout-features-working>

Rotačný enkóder

Rotačný enkóder je zariadenie schopné prevádzať zmenu uhlu natočenia snímanej komponenty na signál spracovávaný elektronickým zariadením [13]. Typickým výstupom enkóderu je hodnota, ktorá odpovedá aktuálnej pozícii, alebo séria impulzov odpovedajúcich zmenám pozície v čase. Rotačné enkóдеры sa primárne delia na:

- absolútne,
- inkrementálne.

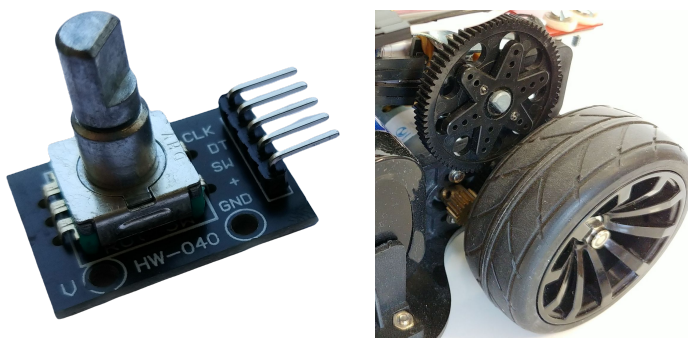
Absolútny rotačný enkóder sa vyznačuje pevne daným rozsahom hodnôt, ktoré odpovedajú konkrétnej pozícii, respektíve uhlu natočenia. Typicky neumožňujú vykonať viac ako jednu otáčku.

Inkrementálny rotačný enkóder deteguje relatívnu zmenu pozície, na základe ktorej vyšle riadiacemu systému signál. Na začiatku musí byť hodnota čítača pozície inicializovaná na východziu hodnotu, ktorá sa následne v závislosti na prijímaných signáloch mení.

Ďalšie delenie rotačných enkóderov je podľa mechanizmu snímania otáčok. Najčastejšie používané typy sú:

- magnetické – využívajú sadu magnetov a senzor citlivý na zmenu magnetického poľa,
- optické – využívajú zdroj svetla, optický snímač a dierkovanú rotujúcu dosku,
- mechanické – využívajú fyzické spájanie vodivých kontaktov.

Z vymenovaných sú dostatočne presné a zároveň bežne dostupné optické a mechanické enkóдеры. Výhodou optických snímačov je typicky vysoké rozlíšenie, menšia náchylnosť k chybám a dlhšia životnosť, nevýhodou sú väčšie rozmery a vysoká cena v porovnaní s mechanickými. Kvôli dostupnosti, dostatočnej presnosti a menším rozmerom, ktoré zjednodušia integráciu do konštrukcie vozidla, bol zvolený mechanický inkrementálny rotačný enkóder KY-040¹². Detail senzoru a integrácie do systému pohonu zadnej nápravy je možné vidieť na obrázkoch 3.11.

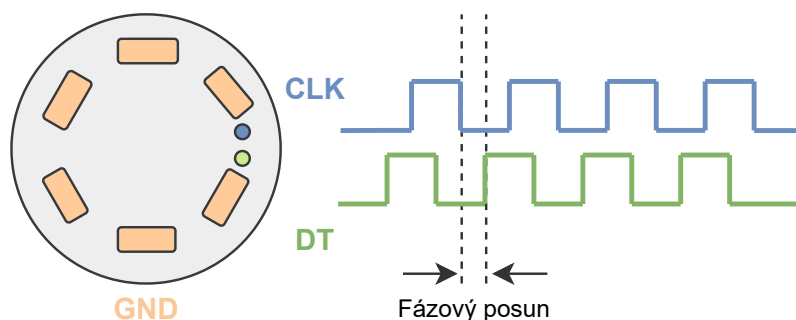


Obr. 3.11: Zľava modul enkóderu KY-040 a jeho integrácia do zadnej nápravy vozidla s využitím rovnakého ozubeného prevodu ako využíva koleso na prevod otáčok motora.

Zapojenie senzoru je realizované pomocou štvorice pinov. DT a CLK sú vývody kontaktov, ktoré sa pri otáčaní hriadeľu dotýkajú vodivých plôch spoločnej zeme GND vo vnútri

¹²Užívateľský manuál k enkóderu KY-040: <https://www.epitran.it/ebayDrive/datasheet/25.pdf>

senzoru. Piny DT a CLK sú pomocou pull-up rezistoru spojené s napájacím napätím UCC. Detail zapojenia a princíp generovania signálov je možné vidieť na obrázku 3.12.



Obr. 3.12: Princíp fungovania inkrementálneho rotačného enkodéru s mechanickými kontaktami. Kontakty CLK a DT sú privedené na napätie UCC. Vodivé plôšky, s ktorými prichádzajú do kontaktu sú uzemnené. Pri otáčaní hriadeľa prichádzajú piny do kontaktu s plôškami a dochádza na nich k zmene úrovne napätia. Rozstup medzi kontaktami spôsobuje fázový posun medzi signálmi, ktorý je možné interpretovať a zistiť tak smer otáčania.

Špecifikácia uvádza 20 impulzov na jednu otáčku hriadeľa a umožňuje vykonávať neobmedzený počet otáčok. Uvádzaný počet impulzov je v rámci jedného z kontaktov a impulzom sa rozumie dvojica nábežnej a zostupnej hrany. Pri implementácii rozhrania je možné zvýšiť citlivosť tak, že budú nábežné aj zostupné hrany počítané ako samostatné impulzy a tým sa efektívne zdvojnásobí citlivosť senzoru. Tento efekt je možné znovu zdvojnásobiť počítaním hrán na oboch kontaktoch (DT a CLK). Výsledný maximálny počet impulzov na jednu otáčku je teda 80. Skutočná citlivosť sa však typicky líši v závislosti na kvalite senzoru, implementácii spracovávania signálov a prevádzkových podmienkach (typicky rýchlosť otáčok). Pri spojení mechanických kontaktov dochádza k nežiadúcemu efektu výkyvov napätia, spôsobených nedokonalosťami povrchu materiálov, takzvaný *bounce*. Po testovaní viacerých implementácií spracovávania signálov senzoru sa podarilo dosiahnuť stabilné rozlíšenie 60 impulzov na otáčku.

Pri integrácii senzoru bol využitý rovnaký prevodový mechanizmus otáčok ako v prípade kola a motora, a to pomocou identického ozubeného kolečka. Prevodový pomer medzi otáčkami kola a hriadeľa enkodéru je teda 1:1.

$$R = \frac{O_k}{I_c} = \frac{198}{60} \doteq 3,3 \text{ [mm]} \quad (3.1)$$

Na základe obvodu kola O_k a počtu impulzov na jednu otáčku je možné vypočítať rozlíšenie senzoru urazenej vzdialenosti R podľa vzťahu (3.1). Dosadený údaj 198 odpovedá skutočnému obvodu kola v milimetroch.

3.5.2 Snímanie orientácie vozidla

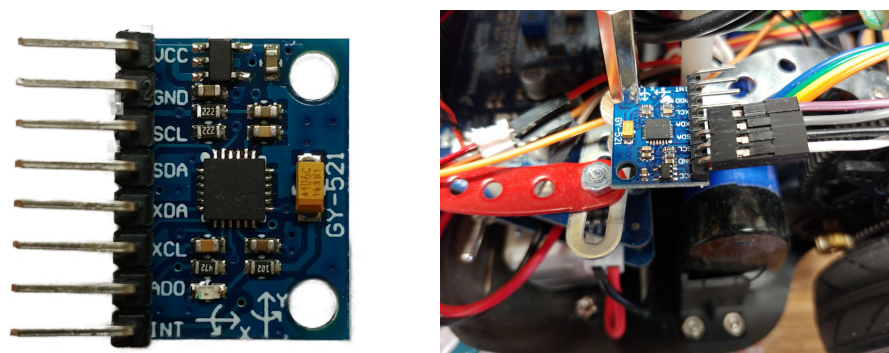
Pre potreby určenia aktuálnej polohy je okrem urazenej vzdialenosti diskutovanej v predošlej sekcii nutné sledovať aj orientáciu vozidla. Orientácia predstavuje uhol natočenia vozidla voči vzťažnej sústave, ktorá je definovaná počiatočnou polohou vozidla.

Pôvodná úvaha smerovala k odhadu orientácie iba za pomoci rýchlosti zistenej rotačným enkodérom, nastaveného uhlu natočenia kolies prednej nápravy a aplikáciou vzťahov

kinematického modelu vozidla. Problém s týmto odhadom spočíva prevažne vo fyzických odchýlkach konštrukcie prednej nápravy a nespoľahlivosti dosiahnutia zadaného uhlu natočenia vplyvom nedostatočného výkonu servo motoru a trecích sily medzi vozovkou a koliesami. Vozidlo sa nedokáže dlhodobo pohybovať po rovnej trajektórii ani v prípade, že je nastavený uhol kolies prednej nápravy nulový, nakoľko jedno z kolies je vplyvom vadnej konštrukcie vychýlené.

Gyroskop

Ako riešenie bol zvolený senzor uhlovej rýchlosti (gyroskop), ktorý umožňuje orientáciu vozidla zmerať priamo. Konkrétne bol použitý modul MPU6050¹³ obsahujúci 3-osý akcelerometer a 3-osý gyroskop. Okrem uhlovej rýchlosti natočenia dokáže zmerať aj uhlovú rýchlosť pozdĺžneho a priečneho náklonu, a zrýchlenie vo všetkých troch rovinách. Tie však ďalej v práci nie sú uvažované. Detail senzoru a upevnenie v konštrukcii vozidla je možné vidieť na obrázkoch 3.13.



Obr. 3.13: Zľava modul MPU6050 a jeho integrácia do konštrukcie vozidla.

Senzor je k systému pripojený pomocou štvorice pinov. Napájanie 5 V sprostredkovávajú piny VCC a GND. Na komunikáciu využíva rozhranie I^2C . Jedná sa o synchronnú riadenú dátovú zbernicu, ktorá využíva na komunikáciu dva vodiče. Prvý z vodičov je SCL (Synchronous Clock), určený k prenosu hodinového signálu. Druhý vodič SDA (Synchronous Data) slúži na prenos dát [14].

Modul umožňuje konfiguráciu rozlíšenia gyroskopu až do 2000 °/s, pričom východzia hodnota je 250 °/s. Pre potreby práce bol použitý režim 500 °/s. Vyššia citlivosť nie je potrebná, nakoľko ju manévry vykonávané vozidlom nevyžadujú. Výstupom merania sú 3 hodnoty uhlovej rýchlosti odpovedajúce trom osám gyroskopu. Z nich je využívané iba natočenie v horizontálnej rovine (anglicky yaw).

Princíp fungovania

Gyroskop v prevedení mikro elektromechanického systému (MEMS) meria uhlovú rýchlosť na základe takzvaného Coriolisovho efektu. Konštrukcia senzoru pozostáva z pevných rámov a pohyblivých plôch upevnených na pružinách. Pohyblivé plochy sa pri aplikovaní rotačného pohybu vychýlia zo základnej pozície a tým zmenia hodnotu kapacitancie medzi nimi a pevnými rámmi. Táto zmena kapacitancie je následne senzorom detegovaná a interpretovaná

¹³Katalógový list MPU6050: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>

ako uhlová rýchlosť, ktorú senzor pri meraní dosiahol. Podrobnejšie vysvetlenie princípu fungovania spolu s ďalšími informáciami o senzore MPU6050 je možné nájsť v článku [7].

Meranie uhlu natočenia a kalibrácia

Meranie uhlu natočenia je sprevádzané chybami merania vyplývajúcimi z fyzickej konštrukcie senzoru a následného spracovania dát [9]. Najvýznamnejšie z nich v prípade gyroskopu a snímania horizontálneho natočenia sú:

- Nenulová kludová hodnota meranej uhlovej rýchlosti (takzvaný bias alebo offset). Jedná sa o hodnotu, ktorú senzor produkuje aj napriek tomu, že sa zariadenie nachádza v pokoji. Riešením je online kalibrácia senzoru pred použitím. Jednoduchá metóda je meranie hodnôt v kludovom režime a ich následné spriemerovanie do výslednej hodnoty odchýlky. Táto hodnota bude následne odčítaná od všetkých budúcich meraní.
- Biely šum zahrňuje všetky nepredvídateľné vplyvy prostredia a samotného senzoru na výsledné hodnoty. Typickými javmi sú vibrácie, u ktorých senzor nesprávne deteguje zrýchlenie a interpretuje ho ako uhlovú rýchlosť. Riešenie využívané v praxi je fúzia dát viacerých sensorov, typicky kombinácie gyroskop, akcelerometer, a kompas.
- Kumulatívna chyba (takzvaný drift) spôsobená vplyvom odchýlky a bieleho šumu. Dochádza k nej pri výpočte relatívneho natočenia akumulovaním meraných zmien zaťažených chybou. To spôsobí, že výsledný uhol natočenia nebude po uplynutí istej doby odpovedať reálnemu. Meranie zmeny horizontálneho natočenia je v tomto smere náchylnejšie ako meranie zmeny naklonenia. Dôvodom je, že pri naklonení po dĺžke aj šírke je možné využívať ako referenčnú hodnotu gravitačné zrýchlenie. To pri horizontálnom natočení nehrá žiadnu rolu, nakoľko objekt rotuje v rovine paralelne ku smeru gravitačnej sily, a gravitačné zrýchlenie je tak konštantné.

$$\Delta\theta = (\omega - \omega_o) \Delta t \quad (3.2)$$

Aby bolo možné určiť relatívny uhol natočenia vozidla je nutné pri inicializácii zvoliť východziu hodnotu natočenia θ . Tá bude následne modifikovaná podľa zmeny uhlu $\Delta\theta$ medzi dvoma meraniami. Zmena uhlu je vypočítaná na základe vzťahu 3.2, kde ω je nameraná uhlová rýchlosť, ω_o je offset a Δt je čas medzi meraniami.

3.5.3 Detekcia a meranie vzdialenosti od prekážok

Jedným z cieľov práce je demonštrácia navigácie vozidla v neznámom prostredí. Aby bolo možné realizovať navigáciu bez globálnej mapy prekážok, je nutné realizovať ich detekciu priamo za chodu. Pre tento účel je možné zvoliť z rady senzorov v závislosti na požiadavkách systému. Kritériá výberu vhodného senzoru v rámci práce boli nasledovné:

- dostatočné zorné pole, umožňujúce detegovať objekty pred a prípadne aj vedľa vozidla,
- presnosť, maximálna a minimálna merateľná vzdialenosť,
- veľkosť a hmotnosť senzoru,
- požiadavky na výpočtový výkon,
- cena.

Táto sekcia v krátkosti približuje uvažované riešenia, ich klady a zápory. Následne sa zameriava na zvolený senzor a bližšie popisuje jeho princíp fungovania a technické detaily.

Ultrazvukový senzor

Funguje na princípe merania doby letu vysielaných ultrazvukových pulzov. Na začiatku merania je spustený časovač a vyslaný pulz, ktorý je po odrazení od objektu zaregistrovaný prijímačom a časovač sa zastaví. Na základe rozdielu časov a rýchlosti zvuku je možné určiť vzdialenosť detegovaného objektu [27].

- **Výhody:** nízka cena, jednoduchosť použitia, schopnosť detegovať širokú škálu materiálov.
- **Nevýhody:** nízka presnosť v závislosti na uhle odrazu a tvare objektu, menší efektívny dosah.

Stereo kamera

Pomocou stereo kamery je možné aplikáciou algoritmov spracovania obrazu zhotoviť hĺbkovú mapu prostredia a určiť vzdialenosť jednotlivých objektov. Presnosť takéhoto systému je ovplyvnená kvalitou optiky, svetelnými podmienkami a použitými algoritmi. Podrobné informácie o možnostiach aplikácie dát stereo kamery na detekciu prekážok sú dostupné v článku *Stereovision-Based Algorithm for Obstacle Avoidance* [16].

- **Výhody:** možnosť tvorby komplexnej mapy prostredia s pokročilou detekciou objektov.
- **Nevýhody:** nižšia presnosť, obmedzené zorné pole, náročnosť spracovania dát, citlivosť na svetelné podmienky.

Laserový senzor

Využíva na meranie vzdialenosti dobu letu svetelného lúča (ToF – Time of Flight), alebo princíp triangulácie, kedy je snímaný uhol dopadu lúča na plochu snímača. Rozlišujeme jednorozmerné (bodové a viacrozmerné (snímajúce v rovine alebo priestore)). Viacrozmerné senzory sa nazývajú LiDAR (Light Detection And Ranging) [28]. Výstupom je priamo vzdialenosť objektov – v prípade viacrozmerných senzorov doplnená o odpovedajúci uhol.

- **Výhody:** presnosť, veľkosť zorného pole (2D a 3D senzory), výstupom je vzdialenosť od detegovaného objektu.
- **Nevýhody:** vyššia cena (závisí na type), problém s detekciou materiálov s nízkou odrazivosťou, náročnejšie spracovanie dát.

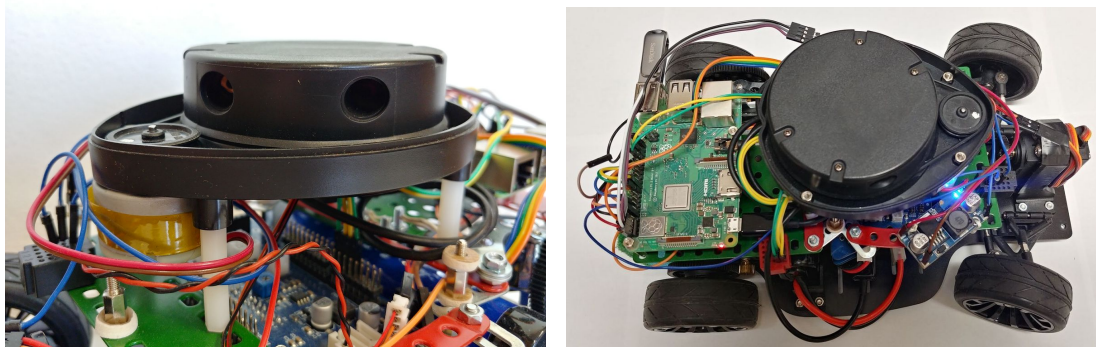
Po zvážení uvedených možností bol zvolený senzor typu 2D LiDAR. Hlavnými dôvodmi boli dostatočná presnosť, zorné pole 360 stupňov, vhodné rozmery a váha, a predovšetkým natívna detekcia fyzických objektov pomocou priameho merania vzdialenosti.

3.5.4 LiDAR XV-11 Picollo Laser Distance Scanner

Senzor XV-11 Picollo Laser Distance Scanner (ďalej ako XV-11) bol extrahovaný z chytrého vysávacieho robota Neato XV-11¹⁴, kde slúžil na mapovanie miestnosti, orientáciu a vyhýbanie sa prekážkam. Zariadenie sa skladá z dvoch hlavných častí.

Senzorová časť je umiestnená na voľne rotujúcej platforme, ktorá obsahuje infračervený laser, fotocitlivý senzor a podpornú elektroniku. Komunikácia so senzorom je zabezpečená sériovým rozhraním UART¹⁵, pomocou štvorice pinov. Napájanie je realizované pomocou pinov UCC a GND, pri napätí 5 V dodávaných platformou Raspberry Pi. Zvyšné 2 dátové piny RX (Receive) a TX (Transmit) slúžia na prijímanie riadiacich dát a vysielanie nameraných hodnôt.

Rotácia platformy je poháňaná malým jednosmerným motorom s využitím pásového prevodu otáčok. Motor je napájaný maximálnym napätím 3,3 V dodávaného systémovou doskou. Pri tomto napätí dosahuje rotácia platformy približne 300 otáčok za minútu. Doba jednej otáčky je teda približne 200 ms. Detail zariadenia a jeho umiestnenia vo vrchnej časti vozidla je možné vidieť na obrázkoch 3.14.



Obr. 3.14: Zľava LiDAR XV-11 a jeho umiestnenie vo vrchnej časti vozidla.

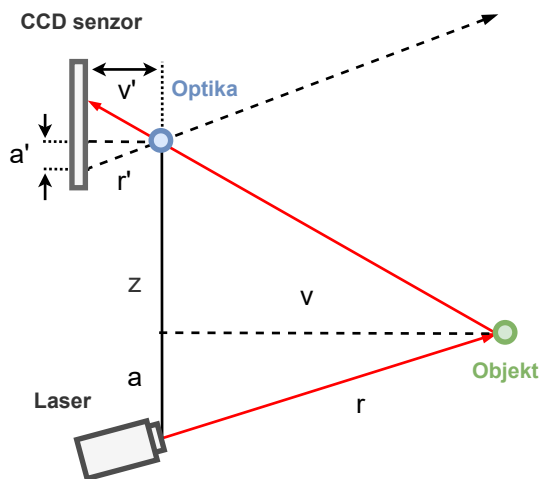
Zariadenie je umiestnené tak, aby sa stred sensorovej časti nachádzal v približnom strede vozidla, konkrétne 135 mm od predného konca vozidla. Kvôli jednoduchšiemu upevneniu do vytvorenej konštrukcie bol umiestnený motorom smerujúcim dopredu. Čelo senzoru tak smeruje dozadu. Uhol asociovaný s meranou vzdialenosťou bolo teda potrebné v rámci implementácie posunúť o 180 stupňov.

¹⁴Podrobnosti k vysávaču Neato XV-11: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/home-robots/review-neato-robotics-xv11>

¹⁵Raspberry Pi dokumentácia UART rozhrania: <https://www.raspberrypi.org/documentation/configuration/uart.md>

Princíp merania vzdialenosti

LiDAR XV-11 meria vzdialenosť od objektov s využitím princípu laserovej triangulácie. Jeho hlavnými časťami sú laserový zdroj infračerveného žiarenia a CCD (Charge-Coupled Device) fotocitlivý senzor umiestnený za dierkovou optikou. Pri meraní dochádza k emiovaniu žiarenia, ktoré je odrazené od povrchu objektu a následne dopadá pod na plochu fotocitlivého senzoru. Na základe miesta dopadu a ďalších známych parametrov geometrie senzoru je určená vzdialenosť zdroja žiarenia od detegovaného objektu [1]. Schému princípu laserovej triangulácie je možné vidieť na obrázku 3.15.



Obr. 3.15: Zjednodušená schéma princípu laserovej triangulácie. Laser emituje žiarenie, ktoré je odrazené od snímaného objektu a dopadá cez dierkovú optiku na plochu senzoru, ktorý zaznamená polohu dopadu. Geometria polohy a uhlu laseru, optiky, a parametre senzoru sú známe. Je teda možné pomocou podobnosti trojuholníkov o stranách rva a $r'v'a'$ vyjadriť vzdialenosť r medzi laserom a objektom.

Výpočet polohy snímaných objektov

Výstupom senzoru sú vzdialenosti medzi laserom a detegovanými objektami a s nimi asociovaný uhol φ , ktorý odpovedá natočeniu sensorovej hlavy pri danom meraní. Na základe tejto hodnoty však nie je možné vypočítať presnú polohu objektu. Laser, od ktorého je vzdialenosť meraná, sa nachádza od centra rotácie v určitej vzdialenosti, a jeho pozícia sa pri otáčaní sensorovej hlavy mení. Geometriu merania XV-11 z pohľadu laseru a centra rotácie popisuje obrázok 3.16.

Vzhľadom na túto relatívnu odchýlku je nutné pri výpočte súradníc objektov vykonať korekciu. Táto korekcia bola vykonaná na základe článku [12], ktorý sa zaoberá konštrukciou podobného zariadenia Revo LDS. Podobnosť geometrie senzorov týchto dvoch zariadení umožňuje po menších úpravách aplikovať nasledujúce vzťahy korekcie meranej vzdialenosti:

$$x', y' = r \cos \varphi, r \sin \varphi \quad (3.3)$$

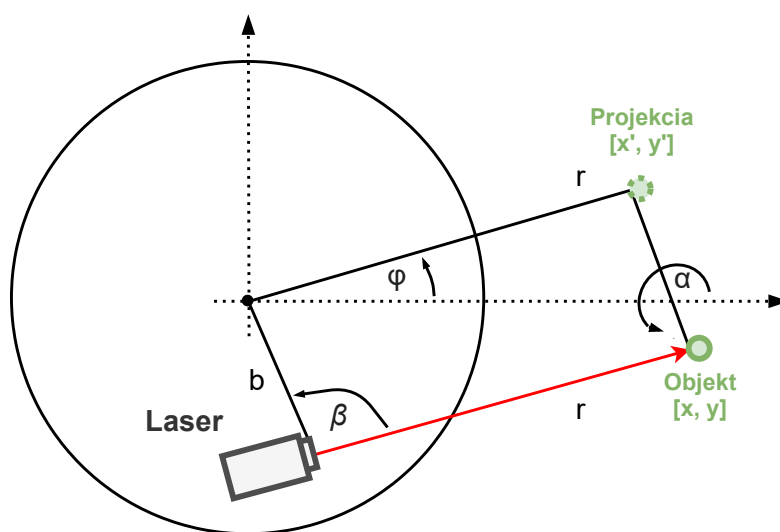
$$\alpha = \pi + \beta + \varphi \quad (3.4)$$

$$x, y = x' + b \cos \alpha, y' + b \sin \alpha \quad (3.5)$$

Využitie vyššie uvedených vzťahov pre výpočet skutočnej polohy detegovaných objektov prebieha nasledovne:

1. V prvom kroku sú vypočítané súradnice $[x', y']$ projekcie objektu na základe hodnoty vzdialenosti r a odpovedajúceho uhlu φ podľa vzťahu 3.3.
2. Nasleduje výpočet uhlu α zvieraného osou centra rotácie a objektom, podľa vzťahu 3.4. Uhol $\beta = 82$ bol zvolený na základe výpočtu v článku [12]. Následne bola hodnota experimentálne overená z dôvodu možných odlišností medzi sensorom Revo LDS diskutovaným v článku a XV-11 použitým v práci. V rámci vzťahu 3.4 je hodnota uhlu β kladná na rozdiel od vzťahu v článku, kde je použitá záporná hodnota. Vyplýva to z usporiadania komponentov v rámci sensorovej hlavy, ktoré je vzhľadom k zariadeniu diskutovaného v článku zrkadlovo obrátené.
3. Na záver sú súradnice projekcie a uhol α použité pri výpočte skutočných súradníc objektu $[x, y]$. V odpovedajúcom vzťahu 3.5 navyše figuruje hodnota b , ktorá predstavuje vzdialenosť laseru od centra rotácie. Táto vzdialenosť bola ručne nameraná a jej hodnota je približne 25 mm.

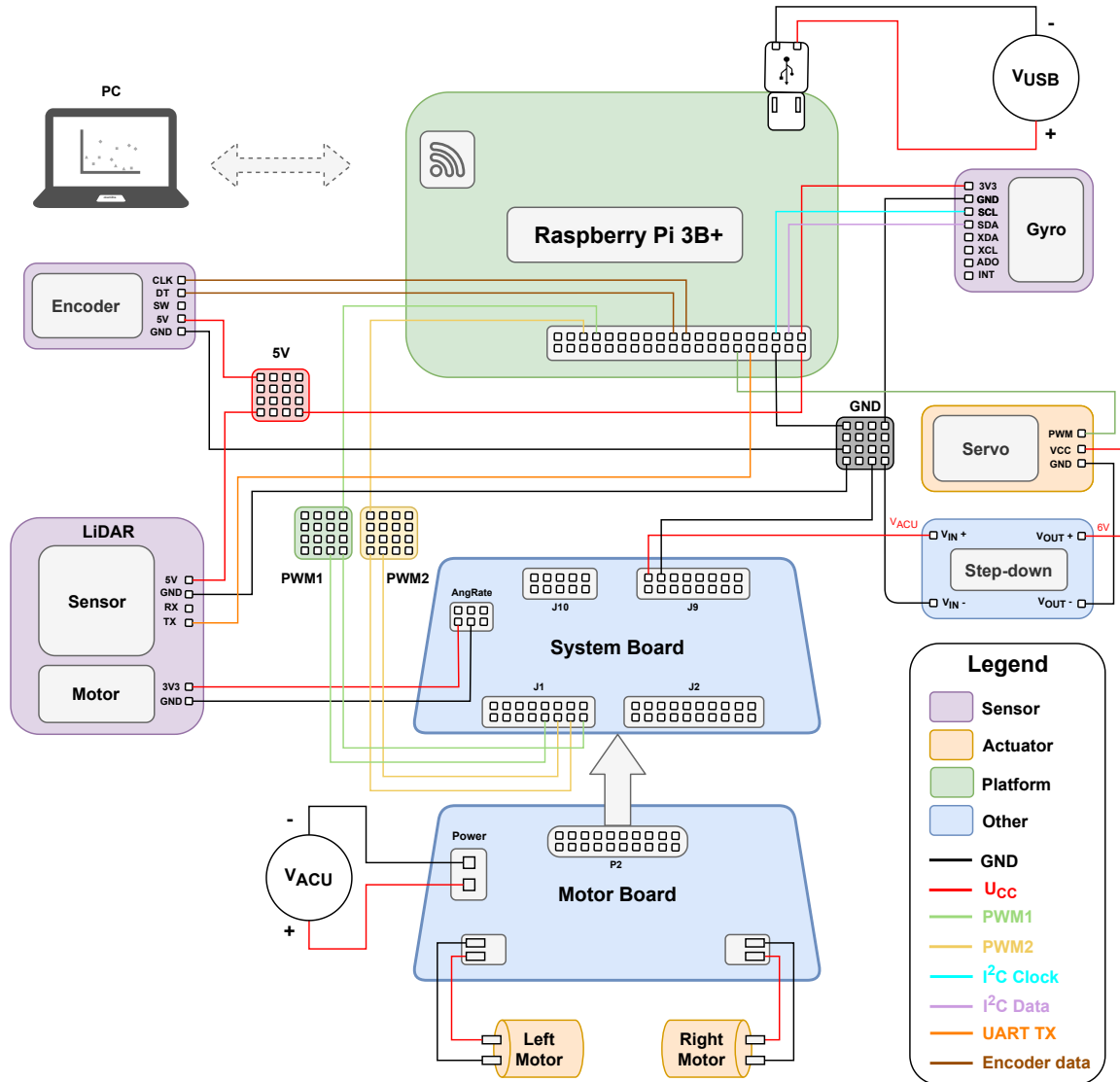
Experimentálne overenie funkčnosti senzoru a aplikovanej korekcie sa nachádza v sekcii 5.1, kde je na grafe 5.1 možné vidieť porovnanie dát pred a po aplikovaní korekcie.



Obr. 3.16: Vzťah medzi skutočnou pozíciou objektu a jeho projekciou vzhľadom na centrum rotácie sensorovej hlavy. Dĺžka b a uhol β predstavujú vzdialenosť a uhol zvieraný s centrom rotácie. Dĺžka r je vzdialenosť medzi laserom a objektom, respektíve centrom rotácie a projekciou objektu. Uhol φ je meraný medzi osou centra rotácie a pozíciou projekcie objektu. Uhol α , meraný medzi osou centra rotácie a objektom, je závislý na uhloch β a φ . Obrázok vychádza z nákresu v článku [12].

3.6 Schéma zapojenia

Obrázok 3.17 zobrazuje schému výsledného zapojenia jednotlivých komponentov výsledného systému podľa popisu predchádzajúcich sekcií.



Obr. 3.17: Schéma zapojenia modelu. Zobrazuje zapojenie výpočtovej platformy, senzorov a akčných členov. Význam jednotlivých komponentov a spojení popisuje legenda v pravom dolnom rohu

Kapitola 4

Implementácia riadiaceho systému

Kapitola prezentuje návrh a implementáciu riadiaceho systému modelu vozidla. Nasledujúce sekcie popisujú štruktúru riadiaceho systému ako celku 4.1 a následne približujú implementačné detaily jednotlivých jeho súčastí 4.2. Doplnením k samotnému riadiacemu systému je vytvorený ladiaci klient určený pre vizualizáciu živých dát získavaných v priebehu riadenia vozidla 4.3.

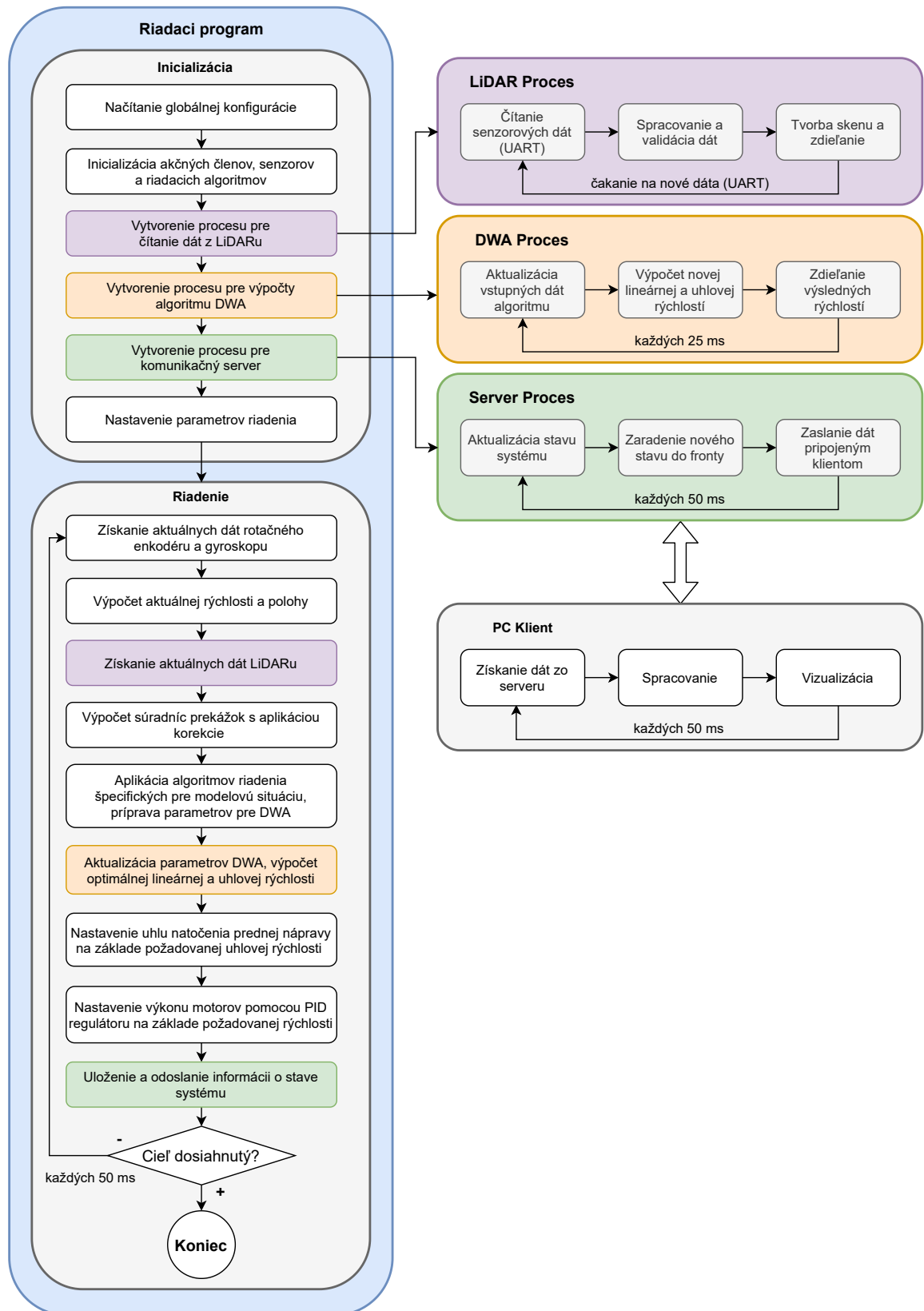
4.1 Návrh a štruktúra

Koncepcia systému riadenia vozidla je zameraná na schopnosť lokálnej navigácie a vyhýbania sa prekážkam. Kľúčové aspekty systému sú teda predovšetkým:

- odhad relatívnej polohy vozidla,
- detekcia a výpočet polohy prekážok,
- výpočet optimálnej trajektórie,
- riadenie akčných členov pre dosiahnutie požadovanej trajektórie.

Uvedené schopnosti využívajú obe implementované modelové situácie. Jednou z nich je jazda tunelom smerom k cieľu, ktorá vyžaduje schopnosť precízne manévrovať v úzkych priestoroch definovaných prekážkami. Zároveň musí udržiavať informáciu o aktuálnej polohe, aby bolo možné dosiahnuť zadanú cieľovú destináciu. Druhá situácia je vyhnutie sa prekážke so zachovaním pôvodného smeru jazdy, kedy sa vozidlo pohybuje smerom vpred až do momentu, keď sa dostane do kritickej vzdialenosti od prekážky. Tejto prekážke sa vozidlo musí vyhnúť, vrátiť sa na pôvodnú trajektóriu a pokračovať smerom k cieľu.

Platforma Raspberry Pi 3B+ poskytuje so svojim výpočtovým výkonom a veľkosťou operačnej pamäte dostatok priestoru pre využitie komplexnejšej senzornej výbavy (LiDAR) a navigačných algoritmov (Dynamic Window Approach). K dispozícii sú 4 jadrá procesoru taktované na frekvencii 1,4 GHz. Niektoré výpočtovo náročné časti systému boli extrahované do samostatných procesov tak, aby sa minimalizovala perióda hlavného riadiaceho cyklu. Diagram riadiaceho systému, ktorý bol v rámci tejto práce navrhnutý, je možné vidieť na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Diagram realizovaného riadiaceho systému. Samostatné procesy sú odlíšené farebne a rovnako sú vyznačené aj miesta, kde dochádza k ich vzájomnej komunikácii.

4.2 Implementácia riadiaceho systému

Sekcia podrobne popisuje jednotlivé súčasti systému postupne podľa diagramu 4.1. Popis obsahuje zasadenie do kontextu riadiaceho systému, detail implementácie a možnosti konfigurácie.

Na začiatku behu programu je načítaná globálna konfigurácia implementovaná triedou *Config*. Táto trieda je ďalej rozdelená na časti, pričom každá odpovedá konkrétnej komponente systému. Príkladom je riadenie výkonu motorov – konfigurovateľné parametre sú v tomto prípade piny PWM signálov, ktoré ovládajú výkon motorov a maximálna povolená strieda PWM signálu. Týmto spôsobom je možné konfigurovať dôležité parametre systému v rámci jedného súboru. Niektoré prvky tejto konfigurácie je taktiež možné zmeniť parametrami príkazovej riadky pri spúšťaní programu.

Ďalším krokom je postupná inicializácia komponentov systému, ktoré je možné rozdeliť do hlavných štyroch skupín:

- rozhrania senzorov,
- rozhrania a riadenie akčných členov,
- lokalizácia a navigácia.
- riadiaci cyklus a pomocné prvky,

Rozhrania senzorov

Trieda *Encoder* predstavuje obálku pre získavanie dát enkóderu pomocou modulu tretej strany s rovnakým názvom *Encoder*¹, ktorý implementuje čítač počtu impulzov od poslednej aktualizácie. Hodnota čítača je inkrementovaná alebo dekrementovaná na základe detegovaných pulzov enkóderu. Rozlíšením kladných a záporných hodnôt je možné zistiť smer otáčok kolies. Obálková trieda tiež obsahuje konštanty počtu pulzov na jednu otáčku (Pulses Per Revolution – PPR) a hodnotu obvodu kolies modelu, na základe ktorých je vypočítaná priemerná rýchlosť a urazená vzdialenosť od posledného merania. Modul je schopný registrovať celkom 60 pulzov na otáčku.

Trieda *Gyroscope* využíva moduly *board* a *busio* na komunikáciu po rozhraní *I²C*. Ku konfigurácii a čítaniu dát mikrokontroléru MPU6050 je použitý modul *Adafruit MPU6050*². Všetky 3 moduly pochádzajú z knižnice *CircuitPython*³. Pri inicializácii senzoru je nastavené rozlíšenie gyroskopu na hodnotu 500 °/s, ktorá bola empiricky určená ako najpresnejšia pre dané použitie, vzhľadom na dosahované uhlové rýchlosti vozidla a úroveň vibrácií. Súčasťou inicializácie je výpočet odchýlky senzoru, takzvaného offsetu. Vozidlo sa nachádza v klude po dobu 40 čítaní senzoru, z ktorých je následne vypočítaná priemerná hodnota odchýlky. Tá je následne použitá ako hranica pre platné čítanie senzoru. Od platných čítaní (také, ktorých hodnota je väčšia ako odchýlka) je táto odchýlka odčítaná od meranej hodnoty, čo vedie k minimalizácii jej vplyvu.

Pre potreby komunikácie a spracovania dát LiDARu bol implementovaný modul pozostávajúci z niekoľkých tried. Trieda *Lidar* je inicializovaná v hlavnom riadiacom programe a jej úlohou je vytvorenie samostatného procesu *LidarClient* a komunikačné rozhranie medzi

¹Dokumentácia modulu Encoder: <https://pypi.org/project/Encoder/>

²Dokumentácia modulu Adafruit MPU6050: <https://circuitpython.readthedocs.io/projects/mpu6050/en/latest/>

³Knižnica Adafruit CircuitPython: <https://github.com/adafruit/circuitpython>

týmto procesom a hlavným programom. *LidarClient* implementuje komunikáciu so senzorom LiDARu cez sériové rozhranie s využitím knižnice *pySerial*⁴, a následné predspracovanie prijímaných dát. Senzor zasiela dáta po paketoch s definovanou štruktúrou, pričom jeden paket obsahuje 4 za sebou idúce merania. Jedno meranie pozostáva zo štyroch údajov – uhol natočenia senzoru, pre ktorý je dané meranie realizované, meraní vzdialenosť, údaj udávajúci silu signálu, respektíve hodnovernosť merania, a poslednú zaznamenanú rýchlosť otáčok sensorovej hlavy. Tieto údaje sú ukladané do štruktúry *LidarPacket*. Po vykonaní jednej celej otáčky senzoru, počas ktorej je realizovaných celkom 360 meraní (1 meranie odpovedá jednému stupňu), sú všetky hodnoty uložené do štruktúry *LidarScan*, ktorá obsahuje indexované hodnoty vzdialeností.

V priebehu programu sú na základe meraných vzdialeností vypočítané súradnice okolitých objektov. Pri výpočte súradníc sú aplikované korekcie vyplývajúce z geometrie LiDARu diskutované v sekcii 3.5.4 a zároveň korekcia na základe aktuálnej polohy a orientácie vozidla. Tento krok je nutný z pohľadu navigácie, aby bolo vozidlo schopné vnímať prekážky v kontexte zadaných súradníc cieľovej destinácie.

Rozhrania riadenia akčných členov

Ovládanie natočenia kolies prednej nápravy implementuje trieda *Steering*. Jedná sa o obálku nad modulom *AngularServo* z knižnice *GPIO Zero*⁵, ktorá umožňuje pomocou hodnoty atribútu v stupňoch nastaviť natočenie servo motoru. Trieda *Steering* zabezpečuje konverziu zadaného uhlu z intervalu -20 až 20 stupňov, teda úrovne natočenia, ktoré náprava fyzicky dokáže dosiahnuť, na hodnoty uhlu natočenia servo motoru, ktorého základná pozícia (0 stupňov) je voči konštrukcii nápravy o 15 stupňov posunutá.

Rozhranie pre ovládanie motorov zadnej nápravy je implementované triedou *Engines*. Oba motory sú ovládané súčasne za pomoci dvoch PWM signálov, jeden určený k pohybu dopredu a druhý dozadu. Definovanie pinu ako výstupný PWM signál umožňuje trieda *PWMOutputDevice* z knižnice *gpiozero*. Táto trieda tiež umožňuje nastaviť na vybraných pinoch hardware PWM, ktoré je na rozdiel od software PWM spoľahlivé a podoba výsledného signálu nezávisí na aktuálnej záťaži procesoru. Implementovaná trieda poskytuje rozhranie pre jednoduché ovládanie smeru otáčok a výkonu motorov pomocou metód *forward*, *backward*, ktoré ako parameter akceptujú hodnoty striedy PWM signálu, pričom 1 znamená maximálny výkon a 0 znamená zastavenie. Zároveň je priamo na tejto úrovni definovaná maximálna možná hodnota výkonu, ktorú je možné podľa potreby upraviť v globálnej konfigurácii.

Regulácia výkonu motorov za účelom dosiahnutia stabilnej rýchlosti vozidla je realizovaná pomocou PID regulátoru. Ten je implementovaný triedou *Controller* spolu s podpornými komponentami určenými k výpisu dodatočných informácií pri ladení hodnôt koeficientov regulátoru. Pre potreby práce bola využitá verzia regulátoru PI, teda bez derivačnej zložky. Dôvodom bol vyhovujúci výkon samotného PI regulátoru. V rámci implementácie bolo nutné riešiť problém s integračnou zložkou, ktorá má tendenciu neobmedzene rásť – takzvaný *integral windup*, ktorý následne spôsobuje presiahnutie požadovanej hodnoty rýchlosti. Riešením bolo nastavenie limitu integračnej zložky na polovicu limitu maximálneho výkonu motorov. Ladenie koeficientov regulátoru prebehlo experimentálne za pomoci metódy Ziegler–Nichols, ktorá je podrobne popísaná spolu s obecným princípom fungovania PID regulátoru v sekcii 2.4.1.

⁴Dokumentácia knižnice *pySerial*: https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/pyserial_api.html

⁵Dokumentácia knižnice *GPIO Zero*: <https://gpiozero.readthedocs.io/en/stable/>

Lokalizácia a navigácia

Pre potreby lokalizácie vozidla, respektíve odhadu aktuálnej pozície zo sensorových dát, bol použitý model jednokolesového vozidla (Unicycle model), ktorý je bližšie popísaný v sekcii 2.3.1. Je implementovaný triedou *UnicycleModel* a umožňuje na základe predchádzajúcej pozície vozidla, urazenej vzdialenosti a súčasnej orientácie vozidla odhadnúť aktuálnu pozíciu.

Ďalším krokom je výpočet trajektórie. Pre tento účel riadiaci systém využíva algoritmus Dynamic Window Approach (DWA), ktorého detailný popis sa nachádza v sekcii 2.3.3. Pre potreby práce bola využitá optimalizovaná implementácia tohoto algoritmu implementovaná v jazyku C s názvom Dynamic Window Approach⁶.

V rámci experimentovania s konfiguráciou a testovaním modulu bola objavená a opravená chyba implementácie pri generovaní možných trajektórii, kvôli ktorej vozidlo bezdôvodne preferovalo zatačanie do jednej strany. V rámci práce bolo vytvorené rozhranie *DWAPlanning*, ktoré tento algoritmus zapúzdruje a vytvára samostatný proces, v ktorom výpočet optimálnych rýchlostí prebieha. Výpočet na základe aktuálne nastavených parametrov je realizovaný každých 200 ms.

Algoritmus pracuje s radou konfiguračných parametrov, pričom ako konštantné sú nastavené parametre maximálneho zrýchlenia 20 m/s, rozlíšenia možných rýchlostí 0,05 m/s, maximálnej uhlovej rýchlosti 60 °/s, maximálneho uhlového zrýchlenia 140 °/s, rozlíšenia možných uhlových rýchlostí 1 °/s, času predikcie 2 s, kroku predikcie 0.2 s a rozmery vozidla 265 x 185 mm.

Hodnoty maximálnej a minimálnej rýchlostí vozidla závisia na konkrétnej modelovej situácii a experimente. Model bol testovaný pri rozličných rýchlostiach od 0,2 mm/s po 0,4 m/s.

Dynamicky konfigurované parametre sú cieľová destinácia a váhové koeficienty objektívnej funkcie algoritmu. Cieľová destinácia určuje základný smer jazdy a váhové koeficienty ovplyvňujú výberu optimálnej trajektórie. Voľbu týchto parametrov zabezpečuje trieda *Navigation*, ktorá implementuje špecifické správanie modelových situácií na základe stavu vozidla a detegovaných prekážkach. Váhové koeficienty môžu byť upravované na základe prítomnosti prekážok a priamej viditeľnosti cieľovej destinácie (uprednostňuje sa trajektória, ktorá smeruje priamo k cieľu maximálnou rýchlosťou). Cieľová destinácia určuje smer jazdy a jej modifikácia umožňuje vytvorenie dočasných cieľov, pomocou ktorých je možné podľa potreby upraviť trajektóriu. Tento fakt je využitý pri modelovej situácii vyhnutia sa prekážke so zachovaním smeru jazdy, pri návrate do pôvodnej trajektórie.

Výstupom algoritmu DWA je nová optimálna lineárna a uhlová rýchlosť. Lineárna rýchlosť je nastavená na vstup PID regulátoru triedy *MotorController*, ktorý na základe nej upraví rýchlosť vozidla. V prípade uhlovej rýchlosti je nutné previesť túto hodnotu na uhol natočenia kolies prednej nápravy. K tomu slúži trieda *BicycleModel*, ktorá implementuje bicyklový kinematický model vozidla (podrobnosti v sekcii 2.3.1). Typicky sa tento model používa pre odhad polohy vozidla pri známom uhle natočenia kolies a lineárnej rýchlosti. V tomto prípade je proces opačný, a na základe požadovanej uhlovej rýchlosti a aktuálnej lineárnej rýchlosti je nutné zistiť, aký by mal byť odpovedajúci uhol natočenia kolies. Tento proces popisuje vzťah 4.1.

$$\delta = \arcsin\left(\frac{\dot{\theta}L}{v}\right) \quad (4.1)$$

⁶Dokumentácia modulu Dynamic Window Approach: <https://pypi.org/project/dynamic-window-approach/>

Výpočet uhlu natočenia kolies prednej nápravy δ na základe požadovaného uhlového zrýchlenia $\dot{\theta}$, aktuálnej rýchlosti v a vzdialenosti medzi nápravami L . Na základe vypočítaného uhlu natočenia kolies je nastavená pozícia servo motoru.

Riadiaci cyklus a pomocné prvky

Hlavný cyklus programu je vykonávaný primárnym procesom s periódou 50 ms definovanou v globálnej konfigurácii. Od hodnoty tejto periódy sa odvíjajú všetky ďalšie deje chodu programu ako aktualizácia dát senzorov a ich spracovanie.

Pre účely ladenia boli zhotovené pomocné triedy *Dashboard*, *Server* a *Recorder*. *Dashboard* slúži na prehľadnú vizualizáciu dát v prostredí príkazovej riadky. *Server* sprostredkovaná údaje o aktuálnom stave systému pripojeným klientom a umožňuje tak dodatočné spracovanie dát a ich vizualizáciu na klientskej stanici. *Recorder* slúži na ukladanie priebehov stavov systému za účelom offline spracovania. Tieto procesy sú vykonávané vo finálnej časti riadiaceho cyklu.

4.3 Systém pre testovanie a ladenie

Za účelom testovania a ladenia implementácie bol zhotovený pomocný program *alamakpc.py* spúšťaný na klientskej stanici. Tento program je schopný prijímať dáta zasielané vozidlom a zobrazovať priebeh sledovaných veličín v reálnom čase. Vizualizácia je realizovaná pomocou knižnice Matplotlib⁷, umožňujúcej tvorbu animovaných grafov, a za pomoci knižnice NumPy⁸, ktorá je využívaná v rámci celej implementácie kvôli zjednodušeniu práce s poľami a matematickými operáciami.

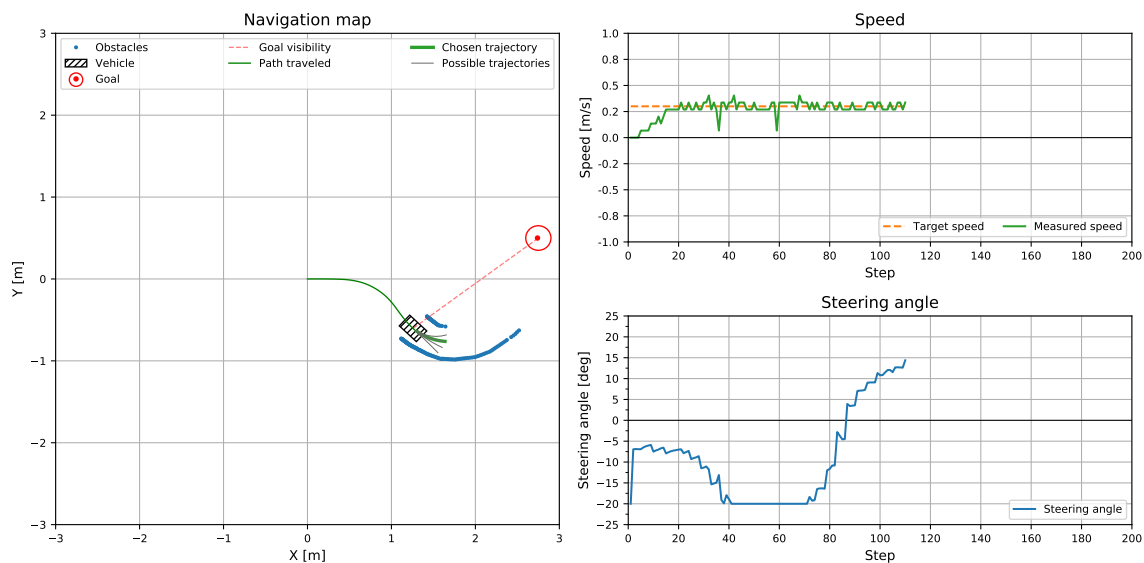
Vizualizačný panel pozostáva z troch častí:

- mapa obsahujúca polohu vozidla, cieľovú destináciu, detegované prekážky, budúcu trajektóriu vozidla a podmnožinu možných trajektórií,
- priebeh nastavenej a meranej rýchlosti vozidla,
- priebeh natočenia kolies prednej nápravy.

Zobrazenie dodatočných dát, ktoré nevyžadujú vizualizáciu pomocou grafov, je riešené pomocou textového výpisu v terminále. Modifikovaná verzia tohoto panelu bola použitá vo video demonštráciách funkčnosti riadenia, diskutovaných v sekcii 5.2. Vizualizovať je možné živé dáta, aj dáta z vytvorených záznamov jazdy. Ukážku programu je možné vidieť na obrázku 4.2.

⁷Knižnica Matplotlib: <https://matplotlib.org/stable/users/installing.html>

⁸Knižnica NumPy: <https://numpy.org/install/>



Obr. 4.2: Vizualizácia dát pomocou panelu grafov aktualizovaných v reálnom čase. Na ľavej strane sa nachádza navigačná mapa zobrazujúca údaje o pozícii a trajektórii vozidla, pozície prekážok a cieľová destinácia. Na pravej strane sa zhora nachádzajú časové priebehy rýchlosti a uhlu natočenia kolies prednej nápravy.

Kapitola 5

Testovanie a vyhodnotenie experimentov

Táto kapitola prezentuje výsledky experimentov vykonaných za účelom overenia funkčnosti jednotlivých komponentov vozidla a následné podrobenie celého systému dvom zložitejším modelovým situáciám. Testovanie komponentov 5.1 zahŕňa presnosť merania vzdialenosti objektov, reguláciu rýchlosti a schopnosť orientácie v priestore. Hlavné experimenty pozostávajú z modelových situácií 5.2 jazdy tunelom a vyhnutia sa prekážke pri zachovaní pôvodnej trasy.

5.1 Overenie funkčnosti a ladenie komponentov

Pred testovaním systému ako celku bolo vykonané overenie funkčnosti jeho jednotlivých častí. Na základe výsledkov je možné konfigurovať príslušné parametre systému za účelom minimalizácie vplyvov chýb meraní senzorov. Kľúčovými časťami systému sú detekcia a meranie vzdialenosti objektov LiDARom, snímanie rýchlosti a urazenej vzdialenosti rotačným enkodérom, ovládanie rýchlosti pomocou PID regulátoru a orientácia v priestore s využitím dát gyroskopu.

5.1.1 Meranie vzdialenosti objektov

Použitý senzor na detekciu a meranie vzdialenosti objektov typu 2D LiDAR (bližšie informácie v sekcii 3.5) bol testovaný za účelom získania a overenia parametrov týkajúcich sa presnosti merania za daných podmienok. Testom boli podrobené potencionálne chyby merania v závislosti na:

- vzdialenosti od objektu,
- svetelných podmienkach prostredia (denné svetlo, silné protisvetlo, tma),
- odrazivosti materiálu (rôzne farby a druhy povrchov),
- veľkosti uhlu medzi senzorom a meraným objektom.

Rozsah meraných vzdialeností

Minimálna a maximálna vzdialenosť, ktoré je senzor schopný zmerať boli experimentálne overené na objekte kartónovej dosky hnedej farby. Jedná sa o materiál, ktorý bol neskôr

použitý ako prekážka v ďalších experimentoch. Minimálna meraná vzdialenosť bola stanovená na 150 mm a maximálna na 6000 mm. Vzdialenosti mimo týchto hraníc sú typicky vo výstupe senzoru reprezentované ako vzdialenosť s hodnotou 0 a príznakom chyby merania, na základe ktorého je hodnota vyhodnotená ako neplatná a nie je ďalej využitá pri navigácii.

Závislosť chyby merania na skutočnej vzdialenosti objektu

Chyba merania sa líši v závislosti od skutočnej vzdialenosti. Tabuľka 5.1 prezentuje merania pri rôznych vzdialenostiach.

Tabuľka 5.1: Tabuľka meraných vzdialeností zobrazuje presnosť nameraných hodnôt v závislosti na skutočnej vzdialenosti. Pri meraní jednej vzdialenosti je vykonaných 10 za sebou idúcich snímaní, z ktorých je extrahovaná minimálna, maximálna a priemerná nameraná hodnota. Skutočná hodnota odpovedá meraniu fyzickým metrom. Priemerné hodnoty sú zaokrúhlené na celé milimetre.

Vzdialenosť [mm]	Hodnota									
Skutočná	150	170	200	240	300	400	600	900	1500	2000
Priemerná	151	170	201	242	303	402	614	921	1522	2029
Minimálna	150	170	201	240	303	399	613	918	1518	2025
Maximálna	151	171	201	242	303	403	616	922	1524	2033

Vo výsledkoch meraní je možné pozorovať skreslenie meraní smerom k väčším hodnotám vzdialenosti. Chyba rastie so zväčšujúcou sa vzdialenosťou od rádu milimetrov až po jednotky centimetrov.

Rozptyl maximálnych a meraných hodnôt je pomerne stabilný. Nie je teda kľúčová filtrácia hodnôt napríklad priemerom viacerých meraní, ktoré by viedlo k zvýšeniu doby merania a odozvy celého systému.

Vplyv svetelných podmienok prostredia

Pri meraní vplyv osvetlenia na presnosť meraní boli využité dva extrémne scenáre. Prvým z nich bola expozícia senzoru priamemu bielemu svetlu z LED zdroja, ktorým bolo zariadenie osvetlené zo vzdialenosti približne 5 cm tak, aby svetlo dopadalo priamo zo smeru meraného objektu pod čo najmenším uhlom. V druhom scenári bol senzor umiestnený do uzavretého priestoru s úplnou tmou.

V ani jednom zo scenárov neboli namerané znateľné odchýlky nad rámec tých, ktoré sa prejavujú za bežných podmienok popísaných v predošlom teste. Hodnoty meraní nie sú uvádzané vzhľadom na takmer identické výsledky ako v prípade tabuľky 5.1.

Vplyv odrazivosti materiálu

Materiály reagujú na rozličné typy žiarenia rôzne. Niektoré vlnové dĺžky sú absorbované a iné odrazené. Testovanie presnosti merania na základe odrazivosti bolo realizované na hnedom dreve, kancelárskom papieri, stene s bielou omietkou, čiernom kartóne a skle.

V prípade dreva, papieru, steny boli výsledky v súlade s hodnotami v tabuľke 5.1 bez znateľných odchýlok.

U čierneho kartónu sú priame merania rovnako presné ako v predošlých prípadoch, avšak nastáva problém so snímaním hodnôt pod určitým uhlom zvieraným medzi senzorom a plochou prekážky. Pri čelnej vzdialenosti od objektu nastavenej na 500 mm sú úspešne namerané hodnoty iba v prípade uhlu menšieho ako 15 stupňov. Časti objektu nachádzajúce sa mimo tohoto zorného poľa nie sú detegované vôbec.

So sklom má senzor problém pri určitých vzdialenostiach, typicky v rozmedzí 150 až 300 mm senzor objekt buď nedeteguje, alebo deteguje ojedinele s dlhými výpadkami medzi úspešnými meraniami. Následne sú hodnoty stabilné približne do vzdialenosti 1000 mm. Hodnoty za touto hranicou vykazujú veľké odchýlky medzi jednotlivými meraniami a väčšina meraní končí chybou. Merania môžu byť ovplyvnené deformáciami a čistotou skla.

Vplyv uhlu medzi senzorom a meraným objektom

Ako už bolo zmienené v predošlej sekcii pri experimente s čiernym kartónom, táto kombinácia materiálu absorbujúceho žiarenie a uhlu dopadu môže zapríčiniť neúspešnosť meraní. V prípade iných materiálov k tomuto fenoménu nedošlo, avšak samotný vplyv uhlu na chybu merania sa ukázal byť znateľný. Tabuľka 5.2 zobrazuje výsledky meraní vzdialenosti v závislosti na uhle dopadu žiarenia.

Tabuľka 5.2: Tabuľka meraných vzdialeností a ich porovnanie s vypočítanými hodnotami v závislosti na uhle, ktorý zvierá senzor so snímaným objektom. Senzor bol čelom postavený do vzdialenosti 300 mm od rovnej dosky z hnedého dreva s dĺžkou 780 mm. Následne bolo pre každý uhol vykonaných 10 za sebou idúcich meraní, ktorých výsledkom je minimálna, maximálna a priemerná nameraná vzdialenosť. Priemerné hodnoty sú zaokrúhlené na celé milimetre.

Uhol [°]	-60	-50	-30	-20	-10	0	10	20	30	50	60
Vzdialenosť [mm]											
Vypočítaná	600	467	346	319	305	300	305	319	346	467	600
Priemerná	625	485	358	327	309	301	303	314	338	452	583
Minimálna	624	485	358	327	308	301	303	314	338	452	583
Maximálna	626	486	358	327	309	301	303	314	339	452	584

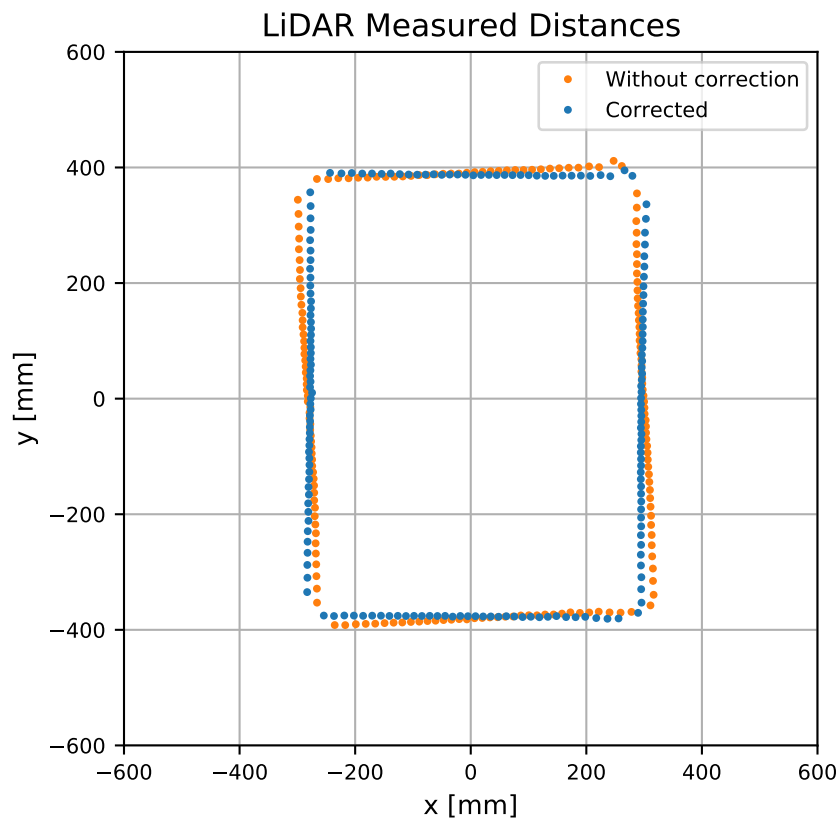
Pri porovnaní meraní záporných a kladných uhlov je možné pozorovať, že pri záporných uhloch (vpravo od senzoru) sú merané hodnoty vzdialenosti väčšie ako skutočné, a pri kladných uhloch (vľavo od senzoru) menšie. K tomuto javu dochádza vplyvom geometrie senzoru. Riešením je korekcia hodnôt na základe vzdialenosti a uhlu natočenia zdroja laserového žiarenia vzhľadom na centrum rotácie sensorovej platformy LiDARu. Princíp korekcie je bližšie popísaný v sekcii 3.5.4.

Po aplikácii uvedenej korekcie je možné pozorovať zníženie úrovne rozptylu medzi dvojicami záporných a kladných uhlov. Tabuľka 5.3 zobrazuje výsledky merania s korekciou pri zachovaní zvyšných parametrov experimentu.

Tabuľka 5.3: Tabuľka meraných vzdialeností po aplikácii korekcie meraných hodnôt.

Uhol [°]	-60	-50	-30	-20	-10	0	10	20	30	50	60
Vypočítaná	600	467	346	319	305	300	305	319	346	467	600
Priemerná	617	476	349	321	303	301	303	320	347	473	612
Minimálna	616	474	348	321	303	301	303	320	349	472	610
Maximálna	617	477	350	322	304	301	303	321	339	475	613

Pre lepšiu vizualizáciu bol vykonaný podobný experiment v uzavretom priestore. Hodnoty vzdialeností a odpovedajúcich uhlov boli prevedené na súradnice detegovaných bodov a vynesené do grafu. Stred pravej hrany je od senzoru vo vzdialenosti 300 mm rovnako ako v prípade predošlého merania. Výsledný graf so súradnicami je možné vidieť na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Porovnanie aplikovanej korekcie pri meraní vzdialeností v uzavretom priestore o rozmeroch 780 x 580 mm. Oranžové súradnice sú vypočítané bez korekcie, modré s korekciou. Na jednotlivých hranách je možné pozorovať rovnaký jav ako u hodnôt merania v tabuľke 5.2.

Na základe získaných údajov je možné prehlásiť, že senzor je vhodný pre potreby samočinného riadenia modelu, nakoľko umožňuje (s výnimkou extrémnych prípadov) dostatočne presné meranie vzdialenosti objektov.

5.1.2 Regulácia rýchlosti

Test regulácie rýchlosti si kladie za cieľ overiť schopnosť využitého PID regulátora dosiahnuť a udržať stabilnú požadovanú rýchlosť vozidla. Skúmané parametre sú:

- doba potrebná pre dosiahnutie požadovanej rýchlosti,
- stabilita regulovanej rýchlosti,
- skutočná dosiahnutá priemerná rýchlosť,
- doba potrebná pre zabrzdzenie.

Vozidlo bolo umiestnené na rovnej čistej ploche s dostatočnou prínavosťou vzhľadom ku gumovému povrchu kolies vozidla. Cieľom je zabrániť prešmyku kolies a eliminovať tak chybné čítania otáčok. Na začiatku experimentu je rýchlosť vozidla nulová, následne je nastavená požadovaná konštantná rýchlosť 300 mm/s a dĺžka dráhy 2000 mm. Po urazení danej vzdialenosti bude rýchlosť nastavená na nulu. Regulačný cyklus, teda meranie aktuálnej rýchlosti, aplikácia regulátora a ovládanie výkonu motorov, sa odohráva v rámci hlavného riadiaceho cyklu s periódou 50 ms. K aktualizácii teda dochádza 20x za sekundu. Priebeh experimentu je možné vidieť na grafe 5.2.



Obr. 5.2: Priebeh rýchlosti vozidla kontrolovanej PID regulátorom. Požadovaná rýchlosť je na začiatku nastavená na 400 mm/s. Regulátor dosiahne priemernú rýchlosť 360 mm/s za približne 0.8 sekundy (16. krok). Priemerná rýchlosť plynule rastie a blíži sa požadovanej. V okolí 1 sekundy (20. krok) sa priemerná rýchlosť dostáva na hodnotu približne 400 mm/s. Po urazení vzdialenosti 2000 mm je požadovaná rýchlosť nastavená na nulu a vozidlo zastavuje. Proces zastavenia trvá približne 0.25 sekundy.

Nevýhodou manuálneho nastavenia striedy PWM signálu je, že nie je možné priamo nastaviť požadovanú rýchlosť vozidla. Výkon je navyše závislý na napätí akumulátora, takže

rovnaká úroveň PWM signálu by pri rôznych štádiách nabitia vyústila v rozličný výkon a výslednú rýchlosť.

Medzi hlavné výhody použitia PID regulátoru patrí schopnosť presného dosiahnutia a udržania požadovanej konštantnej rýchlosti, relatívna stabilita, a čas potrebný na rozbeh, či zabrzdzenie. Regulátor je taktiež schopný vysporiadať sa s problémom rozličných úrovní nabitia batérie vďaka spätnej väzbe a dynamickej kontrole výkonu. Koefficienty PID regulátoru boli určené experimentálne využitím metódy Ziegler–Nichols [10], ktorá je spolu s princípom fungovania regulátoru popísaná v sekcii 2.4.1.

Výsledky meraní potvrdzujú schopnosť spoľahlivej regulácie rýchlosti pri rýchlostiach do 450 mm/s. Vyššie hodnoty rýchlosti narážajú na problémy s nízkou stabilitou regulovanej rýchlosti. Dôvodom je kombinácia hardware a software nedostatkov. Z pohľadu hardware sú to predovšetkým chyby merania využitého senzoru otáčok a jeho provizórna integrácia do konštrukcie modelu, ktorá môže byť príčinou chýb spôsobených mechanikou prevodu otáčok kolies na hriadeľ senzoru. Po stránke software je to nestabilita v dôsledku manuálne naladených konštánt PID regulátoru. Napriek týmto faktom bola potvrdená vhodnosť zvoleného postupu pre účely testovania, s využitím nastavených rýchlostí v rozmedzí od 200 do 400 mm/s.

5.1.3 Lokalizácia

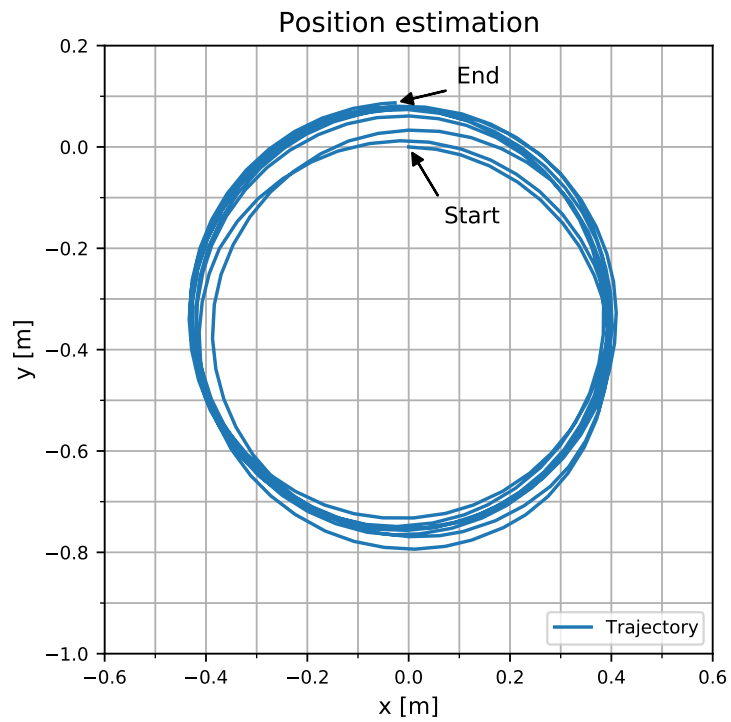
Navigácia vozidla po zvolenej trajektórii vyžaduje informáciu o aktuálnej polohe vozidla a schopnosť snímať ako sa v čase mení. Súčasťou systému lokalizácie v tejto práci je modul gyroskopu, ktorý umožňuje snímať uhlovú rýchlosť a na základe nej určiť relatívny uhol natočenia vozidla v priestore. V kombinácii s rotačným enkóderom umožňujúcim merať urazenú vzdialenosť je následne možné určiť polohu výpočtom na základe aktuálnej polohy, prírastku uhlu natočenia a prírastku urazenej vzdialenosti medzi dvoma meraniami. Detaily odometrie a metódy dead reckoning popisuje sekcia 2.3.

Tento princíp lokalizácie úzko závisí na presnosti meraní použitých senzorov. Za účelom overenia schopností vozidla reprezentovať pevne danú trajektóriu bol vykonaný test jazdy po kruhovej dráhe, ktorý je možné vidieť na grafe 5.3.

Vozidlo bolo na začiatku dráhy umiestnené na rovnú podlahu s dobrou priľnavosťou. Uhol natočenia kolies prednej nápravy bol nastavený na maximálny možný (20 stupňov) smerom doprava. Vozidlo sa pohybovalo po kruhovej dráhe požadovanou konštantnou rýchlosťou 300 mm/s. Celkom bolo vykonaných 8 otáčok, pričom skúmanou vlastnosťou bol rozptyl dráh jednotlivých okruhov.

Po zmeraní reálnej koncovej pozície vozidla voči počítačovej bolo zistené, že došlo k fyzickému posunu vozidla o približne 20 mm. Toto vychýlenie zodpovedá približne za 30 % z celkovej meranej odchýlky a je spôsobené nedokonalosťami konštrukcie vozidla a dynamickými javmi (napríklad sklz kolies). Odchýlka spôsobená meraním je zapríčinená prevažne kumuláciou meraní gyroskopu zaťažených chybou. Pri jednom celom otočení vozidla (360 stupňov) dochádza v závislosti na dosahovanej uhlovej rýchlosti k odchýlke v rozsahu približne od 0.25 do 2 stupňov. Príčiny chyby meraní sú bližšie popísané v sekcii 3.5.2.

Na základe výsledkov merania bola potvrdená schopnosť lokalizácie vozidla s presnosťou menších jednotiek centimetrov, čo je pre potreby práce dostačujúce.



Obr. 5.3: Graf kruhovej trajektórie vozidla demonštruje schopnosť predikcie polohy pomocou dát zo snímaných senzormi. Počiatočná poloha vozidla sa nachádza v bode $[0,0]$ odkiaľ sa pri zadanej konštantnej rýchlosti pohybuje v pravotočivom smere. Je možné pozorovať prevažne postupné vychýlenie dráhy v kladnom smere osy y , ktoré dosahuje priemernej hodnoty 8,5 mm na jednu otáčku.

5.2 Realizácia modelových scenárov

Na testy jednotlivých komponent nadväzujú komplexnejšie experimenty, ktoré majú za úlohu otestovať funkčnosť vozidla ako celku. Za týmto účelom bol realizovaný modelový scenár jazdy tunelom, popísaný v sekcii 5.2.1, a scenár vyhnutia sa prekážke so zachovaním pôvodného smeru jazdy, ktorému sa venuje sekcia 5.2.2.

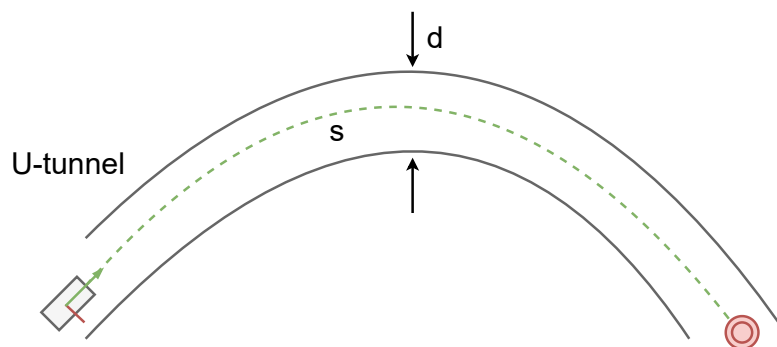
Experimenty v oboch scenároch testujú schopnosť vyhýbania sa prekážkam, lokalizácie a navigácie v neznámom prostredí. Pred začiatkom každej jazdy je známa počiatočná pozícia vozidla a cieľová destinácia (prípadne smer jazdy). Hlavným parametrom vyhodnotenia experimentov je úspešnosť. Obecne je experiment prehlásený za neúspešný pokiaľ dôjde ku jednej z nasledujúcich situácií:

- nepodarilo sa dosiahnuť cieľovú destináciu,
- kolízia s iným objektom,
- zastavenie vozidla a neschopnosť pokračovať ani v prípade, že to fyzická konfigurácia vozidla a okolia umožňujú.

Podmienky špecifické pre jednotlivé modelové situácie sú diskutované v popise daného experimentu. Cieľovú destináciu tvorí kruh o priemere 15 cm. Po jej dosiahnutí vozidlo automaticky zastaví. Overenie skutočného dosiahnutia cieľovej pozície a detekcia kolízií boli vykonávané manuálne.

5.2.1 Jazda tunelom

Jazda tunelom vytvoreným z prekážok skúma schopnosť vozidla precízne manévrovať v stiesnených priestoroch. Zvolené boli 2 konfigurácie, ktoré sa líšia svojím tvarom a priemerom. Zároveň boli tieto konfigurácie testované jazdou pri rôznych minimálnych rýchlostiach. Vozidlo je pred štartom postavené na začiatok tunelu. Následne je zvolená cieľová destinácia tak, aby vozidlo zvolilo trajektóriu naprieč tunelom. Cieľová destinácia je volená pomocou súradníc na slepej mape. Znamená to, že vozidlo má definovaný základný smer jazdy, ku ktorému inklinuje. Na základe detegovaných stien tunelu je táto základná trajektória dynamicky modifikovaná tak, aby sa zabránilo kolízii.



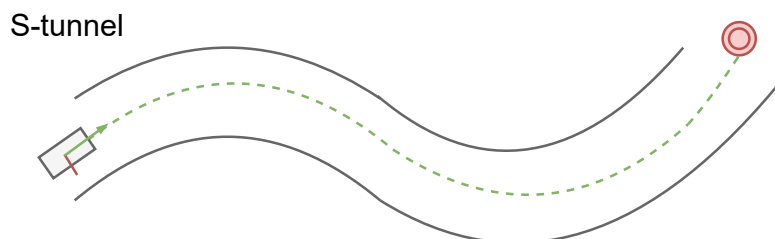
Obr. 5.4: Príklad tunelu s pravotočivou zatáčkou v tvare U. Vozidlo je postavené na začiatok tunelu a cieľová destinácia umiestnená na jeho druhom konci. Experimenty boli realizované pri rozličnom priemere tunelu d .

Vizualizáciu realizovaných konfigurácií tunelu je možné vidieť na obrázku 5.4 pre tvar tunelu U s jednou pravotočivou zatáčkou a obrázku 5.5 so zatáčkou v tvare S.

Tabuľka 5.4: Tabuľka vyhodnotenia experimentov jazdy tunelom s pravotočivou zákrutou pri rozličných priemeroch tunelu a minimálnych rýchlostiach vozidla.

Počet pokusov	10								
Priemer tunelu [mm]	300	340	380	420	460	500	540	580	
Min. rýchlosť [mm/s]	200								
Úspešných pokusov	0	1	5	8	8	10	10	10	
Úspešnosť [%]	0	10	50	80	80	100	100	100	
Min. rýchlosť [mm/s]	300								
Úspešných pokusov	0	0	4	7	8	10	10	10	
Úspešnosť [%]	0	0	40	70	80	100	100	100	
Min. rýchlosť [mm/s]	400								
Úspešných pokusov	0	0	0	0	3	7	8	10	
Úspešnosť [%]	0	0	0	0	30	70	80	100	

Z nameraných hodnôt v tabuľke 5.4 je vidieť schopnosť vozidla prekonať tunel tvorený pravotočivou zatáčkou, ak je jeho šírka dostatočne veľká. Ideálny priemer pri nižších rýchlostiach je približne 1,75 násobok šírky vozidla. Pri vyššej rýchlosti je potrebná šírka väčšia nakoľko reakčná doba vozidla nie je dostatočne veľká na kompenzáciu rýchlo meniaceho sa prostredia. Priemerná dĺžka dráhy bola približne 2 metre.



Obr. 5.5: Konfigurácia tunelu s dvomi zatáčkami v tvare S. Podobne ako v prípade tunelu tvaru U boli skúmané rôzne priemery tunelu a prekonaná priemerná dráha.

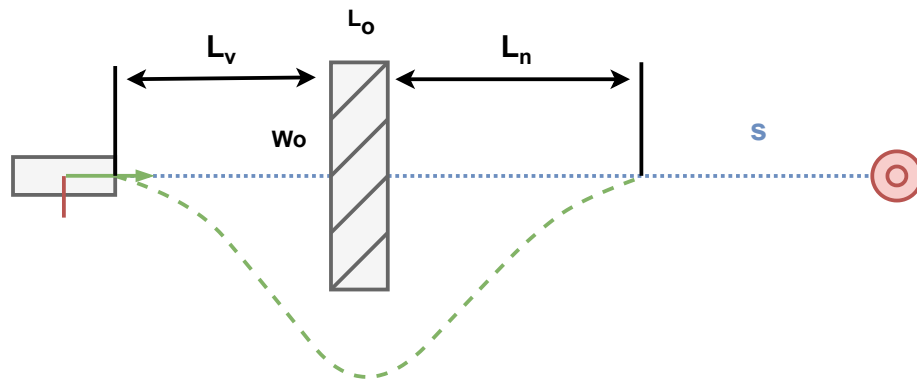
Tabuľka 5.5 zobrazuje výsledky pre jazdu tunelom v tvare S. Priemerná urazená dráha bola približne 2,8 m. Podobne ako v prípade pravotočivej zákruty je možné pozorovať závislosť úspešnosti na priemere tunelu a rýchlosti vozidla, pričom v tomto prípade je priemerná úspešnosť nižšia. Je to zapríčinené primárne zložitejšou konfiguráciou, ktorá vyžaduje aby vozidlo častejšie menilo smer jazdy a necháva k dispozícii menej priestoru na manévrovanie.

Tabuľka 5.5: Tabuľka vyhodnotenia experimentov jazdy tunelom s dvomi po sebe idúcimi opačne orientovanými zákrutami pri variabilných priemeroch tunelu a minimálnych rýchlostiach vozidla.

Počet pokusov	10								
Priemer tunelu [mm]	300	340	380	420	460	500	540	580	
Min. rýchlosť [mm/s]	200								
Úspešných pokusov	0	1	5	8	8	10	10	10	
Úspešnosť [%]	0	10	50	80	80	100	100	100	
Min. rýchlosť [mm/s]	300								
Úspešných pokusov	0	0	6	7	8	10	9	10	
Úspešnosť [%]	0	0	60	70	80	100	90	100	
Min. rýchlosť [mm/s]	400								
Úspešných pokusov	0	0	0	0	0	3	8	7	
Úspešnosť [%]	0	0	0	0	0	3	80	70	

5.2.2 Vyhnutie sa prekážke so zachovaním smeru jazdy

Experiment uvažuje vozidlo pohybujúce sa po rovnej dráhe smerom k cieľu, ktorému pri jazde po zvolenej trajektórii stojí v ceste prekážka. Túto prekážku má vozidlo za cieľ obísť a pokračovať v pôvodnom smere jazdy až kým nedosiahne cieľovej destinácie. Vizualizáciu konfigurácie experimentu spolu s popisom je možné vidieť na obrázku 5.6.



Obr. 5.6: Experiment vyhnutia sa prekážke so zachovaním smeru jazdy. Na začiatku sa vozidlo pohybuje po rovnej dráhe s smerom k cieľovej destinácii. Kritická vzdialenosť L_v od prekážky o šírke W_o a dĺžke L_o určuje pozíciu, kedy dôjde vplyvom navigačného algoritmu ku zmene trajektórie. Vozidlo následne obchádza prekážku a následne deteguje možnosť návratu do pôvodnej trajektórie. Dĺžka L_n značí vzdialenosť prekážky a bodu návratu do pôvodnej trajektórie. Po jej dosiahnutí vozidlo pokračuje do cieľovej destinácie.

Výsledky experimentov zobrazuje tabuľka 5.6. Systém bol testovaný pri piatich rôznych rýchlostiach, pričom u každej rýchlosti bolo vykonaných 10 meraní. Dĺžka dráhy s bola stanovená na 3 m. V ceste stojí vozidlu prekážka o šírke približne 300 mm a dĺžke 200 mm.

Tabuľka 5.6: Výsledky experimentov vyhnutia sa prekážke so zachovaním smeru jazdy.

Počet pokusov	10				
Min. rýchlosť [mm/s]	200	250	300	350	400
Úspešných pokusov	10	9	9	4	0
Úspešnosť [%]	100	90	9	4	0
Priemerná dĺžka L_v [mm]	413	467	524	572	N/A
Priemerná dĺžka L_n [mm]	1058	1072	1099	1087	N/A

Podmienkou pre úspešné dokončenie experimentu je návrat vozidla na pôvodnú trajektóriu pred dosiahnutím cieľovej destinácie. Ukážky experimentov sú dostupné na odkaze¹.

5.3 Zhrnutie dosiahnutých výsledkov

V rámci kapitoly bola vykonaná sada experimentov, ktoré podrobili skúške jednotlivé komponenty riadiaceho systému, a následne overili jeho funkčnosť ako celku.

Testovaním komponentov bola demonštrovaná presnosť použitého LiDAR senzoru pri rozličných prevádzkových podmienkach, a vylepšenie jeho presnosti aplikáciou korekcie vyplývajúcej z geometrie senzoru. Následne bol testu podrobený implementovaný a odladený PID regulátor rýchlosti, ktorý je schopný v krátkom časovom intervale dosiahnuť stabilnú požadovanú rýchlosť vozidla. V poslednom rade bola overená funkčnosť kombinácie senzorov rotačného enkóderu a gyroskopu a ich schopnosť odhadu aktuálnej polohy vozidla. Na výsledkoch testovacej jazdy je možné pozorovať, že na kratšie vzdialenosti je v závislosti na prostredí a nastavenej rýchlosti možné dosiahnuť relatívne spoľahlivý odhad polohy, ktorý vykazuje maximálnu odchýlku nižších jednotiek centimetrov pri urazenej vzdialenosti niekoľkých metrov.

Komplexnejšie experimenty demonštrujú schopnosť odhadu polohy, detekcie prekážok, a lokálnej navigácie v praxi. Na hodnotách meraní je možné pozorovať, že pri nižších rýchlostiach je možné dosiahnuť vysokej úspešnosti aj pri relatívne vysokej hustote prekážok. Výsledky sú do značnej miery ovplyvnené konfiguráciou algoritmu DWA, kedy jedna konfigurácia typicky nie je optimálna pre rôzne typy prostredí, a to ani v rámci jedného experimentu. Jedným z podnetov pre budúce rozšírenia je realizácia adaptívnej zmeny konfigurácie váhových koeficientov objektívnej funkcie za behu vozidla. Bolo by napríklad možné využiť techniky strojového učenia na rozpoznávanie druhov prostredí, v ktorých by sa vozidlo malo orientovať viac smerom k agresívnejšiemu vyhýbaniu sa prekážkam, alebo naopak voliť väčšiu rýchlosť. Aktuálne implementovaná adaptívna zmena funguje iba na základe výberu vopred definovaných konfigurácií v závislosti na viditeľnosti cieľovej destinácie.

¹Odkaz na videá vykonaných experimentov: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLcQkaYaXQmqJvHZP1R-A5X1X9InpeNiwc>

Kapitola 6

Záver

Práca sa zaoberá návrhom sensorového vybavenia, jeho integrácie do konštrukcie vozidla, a implementáciou systému potrebného pre riadenie modelu vozidla. Primárne sa pri tom zameriava na problematiku lokálnej navigácie a vyhýbania sa prekážkam. V rámci riešenia boli zvolené senzory umožňujúce snímať aktuálnu rýchlosť a orientáciu vozidla, a merať vzdialenosť od okolitých objektov. Na základe týchto dát je s využitím vzťahov kinematických modelov možné vykonať odhad aktuálnej polohy, a za pomoci algoritmu lokálnej navigácie Dynamic Window Approach určiť optimálnu trajektóriu na ceste k cieľovej destinácii. Riadenie vozidla po zvolenej trajektórii vyžaduje schopnosť nastavenia a udržania konštantnej rýchlosti vozidla, o ktorú sa stará implementovaný PID regulátor výkonu motorov.

Hlavnými prínosmi práce sú návrh a integrácia sensorového vybavenia vhodného pre realizáciu samočinného riadenia s využitím metód lokálnej navigácie, implementácia systému riadenia, experimentálne overenie funkčnosti a ladenie jednotlivých komponentov systému, a realizácia dvoch komplexnejších modelových situácií. Model je v súčasnom stave využiteľný na demonštráciu princípov samočinného riadenia, prípadne ako pomôcka v oblasti návrhu a programovania elektromechanických systémov. V rámci testovania a ladenia funkčnosti systému a jeho komponentov bol zhotovený systém umožňujúci vizualizovať a analyzovať rozličné veličiny v reálnom čase, alebo prostredníctvom vytvoreného záznamu.

Riešenie realizované na platforme Raspberry Pi má potenciál pre budúce rozšírenia. Okrem algoritmov samočinného riadenia, ktoré je možné ďalej optimalizovať, je možné celé riešenie doplniť o nové senzory a prístupy. Riešenie implementuje aj celú sadu obecných komponent k jednotlivým sensorom a akčným členom, ktoré môžu byť využité v prípadných budúcich implementáciách.

V rámci ďalšieho vývoja by boli z hľadiska hardware vhodné úpravy konštrukcie vozidla za účelom zníženia hmotnosti, výmena použitého rotačného enkóderu za optický kvôli väčšej citlivosti, pridanie senzoru na snímanie natočenia kolies prednej nápravy, nakoľko sa použitému servo motoru nedarí za každých okolností dosiahnuť požadovanej pozície, a výmenu senzoru gyroskopu za model obsahujúci kompas, aby bolo možné minimalizovať vplyv kumulatívnej chyby pri výpočte orientácie vozidla. Z pohľadu software je možné dosiahnuť kvalitnejšie naladenie PID regulátoru, napríklad využitím simulátoru odozvy motorov pre automatizovaný výpočet optimálnych koeficientov. Ďalším vylepšením by bolo zakomponovanie akcelerometru a využitie sensorovej fúzie k precíznejšiemu odhadu polohy, a implementácia komplexnejších algoritmov riadenia, za účelom dosiahnutia vyššej miery autonómnosti a schopnosti zvládať náročnejšie modelové scenáre.

Literatúra

- [1] ALHASHIMI., A., VARAGNOLO., D. a GUSTAFSSON., T. Statistical Modeling and Calibration of Triangulation Lidars. In: INSTICC. *Proceedings of the 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - Volume 1: ICINCO*,. SciTePress, 2016, s. 308–317. DOI: 10.5220/0005965803080317. ISBN 978-989-758-198-4.
- [2] BILL MESSNER, D. T. *Control Tutorials for MATLAB and Simulink (CTMS) - Introduction: PID Controller Design*. 2011-2017. Note = Cit.: 20.4.2021. Dostupné z: <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>.
- [3] BORENSTEIN, J. a KOREN, Y. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1991, zv. 7, č. 3, s. 278–288. DOI: 10.1109/70.88137. ISSN 2374-958X.
- [4] BOWER, T. *Control of Mobile Robots - 12.1.3. The Unicycle Model*. Cit.: 20.04.2020. Dostupné z: http://faculty.salina.k-state.edu/tim/robotics_sg/Control/kinematics/unicycle.html.
- [5] CLARK, C. *ARW – Lecture 01 Odometry Kinematics*. 2016. Cit. 25.03.2021. Dostupné z: <https://www.hmc.edu/lair/ARW/ARW-Lecture01-Odometry.pdf>.
- [6] COMPONENTS101. *MPU9250 9-DOF MEMS Sensor Module*. Február 2021. Citované: 28.2.2021. Dostupné z: <https://components101.com/sensors/MPU9250-9-dof-mems-sensor-module-datasheet-pinout-features-working>.
- [7] DEJAN. *MEMS Accelerometer Gyroscope Magnetometer & Arduino*. 2016. Citované: 2.3.2021. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/mems-accelerometer-gyroscope-magnetometer-arduino/>.
- [8] DING, Y. *Simple Understanding of Kinematic Bicycle Model*. Február 2020. Cit.: 20.04.2021. Dostupné z: <https://dingyan89.medium.com/simple-understanding-of-kinematic-bicycle-model-81cac6420357>.
- [9] DU, J., GERDTMAN, C. a LINDÉN, M. Signal Quality Improvement Algorithms for MEMS Gyroscope-Based Human Motion Analysis Systems: A Systematic Review. *Sensors*. Apríl 2018, zv. 18, č. 4. DOI: 10.3390/s18041123. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/1123>.
- [10] ELLIS, G. Chapter 6 - Four Types of Controllers. In: ELLIS, G., ed. *Control System Design Guide (Fourth Edition)*. Fourth Edition. Boston: Butterworth-Heinemann,

- 2012, s. 97–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385920-4.00006-0>. ISBN 978-0-12-385920-4. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123859204000060>.
- [11] FOX, D., BURGARD, W. a THRUN, S. The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Robotics Automation Magazine*. 1997, zv. 4, č. 1, s. 23–33. DOI: 10.1109/100.580977. ISSN 1070-9932.
- [12] KONOLIGE, K., AUGENBRAUN, J., DONALDSON, N., FIEBIG, C. a SHAH, P. A low-cost laser distance sensor. In: IEEE, ed. *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008, s. 3002–3008. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543666. ISBN 978-1-4244-1646-2.
- [13] LEWOTSKY, K. *How to Select the Right Encoder for Your Motion Axis*. September 2019. Citované: 20.2.2021. Dostupné z: https://www.motioncontrolonline.org/content-detail.cfm/Motion-Control-News/How-to-Select-the-Right-Encoder-for-Your-Motion-Axis/content_id/3155.
- [14] MALÝ, M. *Hradla, volty, jednočipy – Úvod do bastlení*. 1. vyd. CZ.NIC, 2017. ISBN 9788088168232.
- [15] MINGUEZ, J. a MONTANO, L. Nearness diagram navigation (ND): a new real time collision avoidance approach. In: *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No.00CH37113)*. 2000, sv. 3, s. 2094–2100 vol.3. DOI: 10.1109/IROS.2000.895280. ISBN 0-7803-6348-5.
- [16] NALPANTIDIS, L., KOSTAVELIS, I. a GASTERATOS, A. Stereovision-Based Algorithm for Obstacle Avoidance. In: XIE, M., XIONG, Y., XIONG, C., LIU, H. a HU, Z., ed. *Intelligent Robotics and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, s. 195–204. ISBN 978-3-642-10817-4.
- [17] NXP. *NXP Cup GitBook - Landzo Car Model*. 2018. Citované: 10.4.2021. Dostupné z: <https://nxp.gitbook.io/nxp-cup/developer-guide/landzo-car-model/kit-contents/model-alamak>.
- [18] OMCH. *Incremental Rotary Encoder H-ZSP7810EF*. 2021. Cit. 26.04.2021. Dostupné z: <https://www.omch.co/product/incremental-rotary-encoder-h-zsp7810ef/>.
- [19] PI, R. *Raspberry Pi Documentation*. 2021. Citované: 10.4.2021. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/>.
- [20] PÁRAL, J. *Autonomní řízení robota po jednoduché dráze [online]*. 2019 [cit. 2021-03-24]. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Fakulta informatiky, Brno. Vedúci práce MATĚJ, Z. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/ze9z5/>.
- [21] SEDER, M., MACEK, K. a PETROVIC, I. An integrated approach to real-time mobile robot control in partially known indoor environments. In: *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005*. 2005, s. 6 pp.–. DOI: 10.1109/IECON.2005.1569176. ISBN 0-7803-9252-3.
- [22] SHEN, C. *Decoding comma.ai/openpilot: the driving model*. November 2019. Dostupné z: <https://medium.com/@chengyao.shen/decoding-comma-ai-openpilot-the-driving-model-a1ad3b4a3612>.

- [23] SICK. *3D LiDAR sensorsMRS1000*. Dostupné z: <https://www.sick.com/ag/en/detection-and-ranging-solutions/3d-lidar-sensors/mrs1000/c/g387152>.
- [24] STOJAN, R. *Autonomní řízení modelu vozidla*. Brno, CZ, 2020. Bachelor's thesis. Brno University of Technology, Faculty of Information Technology. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/thesis/23091/>.
- [25] STUFF, A. *Xsens MTi 100-Series*. 2021. Cit. 22.04.2021. Dostupné z: <https://autonomoustuff.com/products/xsens-mti-100-series>.
- [26] TAS, O. S., KUHNT, F., ZOLLNER, J. M. a STILLER, C. Functional system architectures towards fully automated driving. In: *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2016, s. 304–309. DOI: 10.1109/IVS.2016.7535402. ISBN 978-1-5090-1821-5.
- [27] ZHMUD, V. A., KONDRATIEV, N. O., KUZNETSOV, K. A., TRUBIN, V. G. a DIMITROV, L. V. Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. may 2018, zv. 1015, s. 032189. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032189. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032189>.
- [28] ŘEHOŘKA, J. *Graphic Processing of LiDAR Data [online]*. 2018 [cit. 2021-03-24]. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Fakulta informatiky, Brno. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/q0y8y/>.

Príloha A

Obsah SD karty

```
/
├── src/
├── text/
├── xhazuc00_bp.pdf
├── requirements.txt
└── README.txt
```

src/ obsahuje zdrojové súbory riadiaceho systému a vizualizačného klienta

text/ obsahuje zdrojové súbory technickej správy

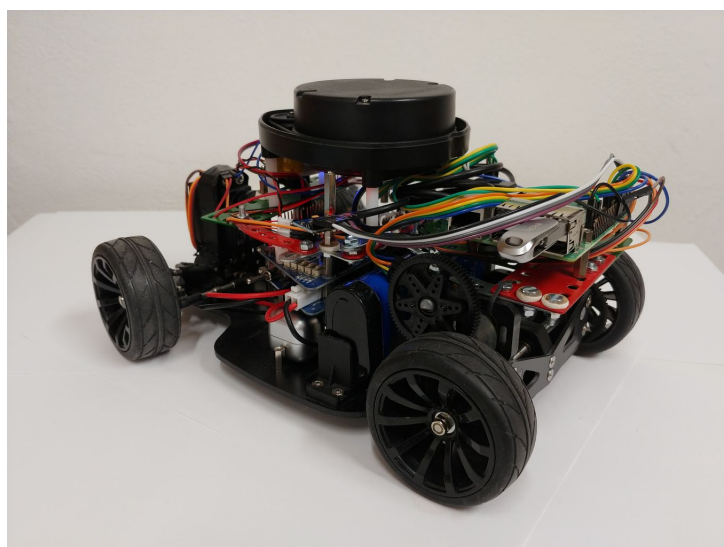
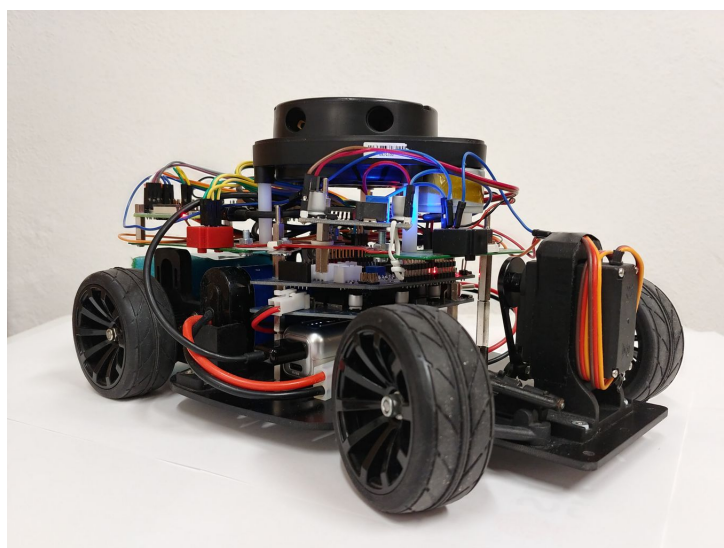
xhazuc00_bp.pdf obsahuje text technickej správy vo formáte PDF

requirements.txt obsahuje zoznam závislostí jazyka Python, ktoré je možné nainštalovať pomocou *pip install -r requirements.txt*

README.txt obsahuje dodatočné podrobnosti k štruktúre projektu, odkaz na demonštračné videá, a návod k použitiu

Príloha B

Fotografie finálneho modelu



Obr. B.1: Finálna verzia funkčného modelu vozidla, vrátane integrácie výpočtovej platformy a senzorovej výbavy.