



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

**MODEL VOZIDLA REDUKOVANÉ SLOŽITOSTI
SE SAMOŘÍDICÍMI SCHOPNOSTMI**

LIGHTWEIGHT SELF-STEERING MODEL VEHICLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MATEJ KUBOVÝ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL BIDLO, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce



Student: **Kubový Matej**
Program: Informační technologie
Název: **Model vozidla redukované složitosti se samořidicími schopnostmi**
Lightweight Self-Steering Model Vehicle
Kategorie: Vestavěné systémy

Zadání:

1. Seznamte se s principy konstrukce a řízení vozidel s nějakou mírou autonomie a získejte přehled o modelových platformách použitelných ve školních podmínkách.
2. Zvolte vhodný koncept pro návrh a konstrukci vlastního modelu vozidla s cílem dosažení co nejnižší složitosti při použití běžně dostupných komponent.
3. Navržený model fyzicky realizujte a vybavte jej vhodnými senzory pro zajištění samočinného řízení ve vybraných modelových situacích.
4. Zvolte vhodný koncept samořízení, integrujte jej do výpočetní platformy modelu a vykonajte sadu experimentů za účelem analýzy jeho schopností.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a diskutujte možnosti pokračování projektu.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího projektu.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Splnění bodů 1 a 2 zadání, demonstrace prototypu z bodu 3 zadání.

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 2021

Datum odevzdání: 11. května 2022

Datum schválení: 29. října 2021

Abstrakt

Cielom tejto práce je navrhnuť a zrealizovať model vozidla redukovanej zložitosti so samo-riadiacimi schopnosťami s použitím bežne dostupných komponentov. Hlavná časť riešenia pozostáva zo stavebnice LEGO s doplnením výpočtovej platformy RaspberryPi. Pohyb vozidla po navigačnej línii zabezpečuje spracovanie obrazu zo zabudovanej kamery. Podarilo sa vytvoriť systém pozostávajúci z ľahko dostupných a finančne nenáročných komponentov, ktorý sa dokáže autonómne pohybovať v priestore. Výsledkom práce je tiež demonštrovanie procesu spracovania obrazu a vyhodnotenie experimentov zameraných na overenie funkcionality riešenia.

Abstract

The main goal of this bachelor's thesis is to design and implement a model vehicle of reduced complexity with self-steering capabilities using commonly available components. The main part of the solution consists of a LEGO kit with the addition of the Raspberry Pi computing platform. The movement of the vehicle along the navigation line is ensured by the image processing from the built-in camera. It has been possible to create a system consisting of easily accessible and inexpensive components that can move autonomously in area. The result of this thesis is also a demonstration of the image processing and evaluation of experiments focused on functionality verification.

Klíčové slová

samočinné riadenie, autonómne vozidlo, nasledovanie čiary, strojové videnie, Raspberry Pi

Keywords

self-steering, autonomous vehicle, line-follower, machine vision, Raspberry Pi

Citácia

KUBOVÝ, Matej. *Model vozidla redukované složitosti se samořídícími schopnostmi*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Michal Bidlo, Ph.D.

Model vozidla redukované složitosti se samořídícími schopnostmi

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.

.....
Matej Kubový
18. mája 2022

Podakovanie

Rád by som poďakoval vedúcemu práce Ing. Michalovi Bidlovi Ph.D. za jeho ochotu, trpezlivosť a cenné rady pri tvorbe tejto bakalárskej práce.

Obsah

1	Úvod	2
2	Prehľad techník pre samoriadiace vozidlá	3
2.1	Senzory vzdialenosti	4
2.2	Riadenie s využitím LiDARu	7
2.3	Riadenie s využitím obrazu z videokamery	8
2.4	Kombinácia viacerých prístupov	9
3	Požiadavky na model redukovanej zložitosti	10
3.1	Podvozok a princípy pohybu vozidla	10
3.2	Napájanie pomocou batérií a akumulátorov	13
3.3	Výpočtové platformy	14
4	Návrh riešenia	15
4.1	Hnacia a riadiaca sústava	15
4.2	Senzorická sústava	19
4.3	Samoriadiaca sústava	21
4.4	Napájacia sústava	22
5	Algoritmus samoriadenia	25
5.1	Experimenty	28
6	Záver	30
	Literatúra	31
A	Obsah priloženého pametového média	33
B	Diagram zapojenia	34
C	Fotografie modelu	35

Kapitola 1

Úvod

Téma autonómnych vozidiel sa dostala do povedomia širokej verejnosti v posledných rokoch vďaka lákavej vízií komfortného cestovania bez potreby zásahu do riadenia posádkou vozidla. Osobné vozidlá s určitým stupňom autonómnej jazdy sú výdobytkom dnešnej doby vďaka špičkovým hardvérovým komponentom, kamerám a senzorom, ale tiež aj vďaka inovatívnym softvérovým riešeniam, ktoré zabezpečujú spracovávanie a vyhodnocovanie zozbieraných dát. Plne autonómne vozidlá sa ale už dnes nachádzajú v priemyselnej sfére, kde nahrádzajú často drahú a pomalú ľudskú pracovnú silu pri skladovaní alebo inej preprave menšieho nákladu vrátane napríklad logistickej haly, alebo pri doručovaní zásielok.

Táto práca je zameraná na návrh a realizáciu zjednodušeného modelu vozidla s určitým stupňom autonómie. Narozdiel od predchádzajúcich prác, ktoré riešili autonómne parkovanie [20] alebo vyhýbanie sa prekážkam [9] pomocou laserových senzorov vzdialenosti, je táto zameraná na navigovanie v priestore pomocou spracovania obrazu z kamery. Pre modelové podmienky bol zvolený pohyb vozidla po navigačnej línii. Dôraz je kladený na redukciu zložitosti, rozmerov a váhy vozidla, ako aj na použitie ľahko dostupných komponentov.

V kapitole 2 sú uvedené najdôležitejšie prvky potrebné pre samoriadiace vozidlá – senzory, ich základné rozdelenie, výhody jednotlivých prístupov a prípady použitia. Kapitola 3 zase popisuje možnosti konštrukcie podvozku pre model, uvádza výhody a nevýhody využitia rôznych zdrojov elektrickej energie pre potreby napájania vozidla a rozdelenie medzi výpočtovými platformami použiteľnými v tejto práci. Čitateľ sa ďalej v kapitole 4 dozvie o komponentoch navrhnutých pre použitie na stavbu vozidla redukovanej zložitosti a aké možnosti, výhody a vylepšenia ponúkajú voči predošlým prácam. V kapitole 5 je opísaný základný princíp fungovania algoritmu pre spracovanie obrazu z kamery a vypočítanie hodnoty vychýlenia vozidla. Ďalej sa táto kapitola venuje experimentom overujúcim funkcionality celého vozidla.

Kapitola 2

Prehľad techník pre samoriadiace vozidlá

Vnímanie svojho okolia je esenciálna schopnosť zariadení vykonávajúcich akýkoľvek samostatný pohyb. Pre autonómne sa pohybujúce vozidlá existuje mnoho možností získavania informácií o svojom prostredí. Počnúc jednoduchými senzormi ktoré dokážu detegovať náraz do cudzieho predmetu (prekážky), ktoré využívajú napríklad robotické vysávače, po rozmerné a finančne nákladné 3D LiDAR skenery pre cestné vozidlá, ktoré dokážu podrobne a presne sledovať takmer celé svoje okolie alebo videokamery, z ktorých je možné získať širokú škálu informácií. V tejto kapitole je uvedené základné rozdelenie senzorov relevantných pre oblasť zjednodušeného samoriadenia, princípy ich fungovania, výhody ale aj nevýhody použitia.

Z možností pre použitie na modeli vozidla v interiéroých podmienkach môžeme senzory rozdeliť na **proprioceptívne**, ktoré merajú interné hodnoty systému a **exteroceptívne**, ktoré snímajú hodnoty z okolia [18].

- **Proprioceptívne senzory** dokážu zaznamenávať pozíciu pohyblivých častí, zrýchlenie, orientáciu ale aj teplotu, napätie a iné vlastné hodnoty systému. Pomocou zaznamenávania pohybu akcelerometrom, gyroskopom alebo enkodérom použitým ako otáčkomer je možné odhadnúť pozíciu vozidla v priestore bez informácií z vonkajšieho prostredia. Meranie napätia môže byť zase dôležité pre zaistenie kontroly stavu akumulátorov.



Obr. 2.1: Trojosový akcelerometer DFRobot¹

¹https://wiki.dfrobot.com/H3LIS200DL_Triple_Axis_Accelerometer_SKU_SEN0408

- **Exteroceptívne senzory** merajú a zaznamenávajú vlastnosti prostredia v ktorom sa pohybujú. Najčastejšie slúžia na meranie vzdialenosti od prekážok alebo detekciu predom definovanej trajektórie, po ktorej sa má vozidlo pohybovať. Často používané sú ultrazvukové, laserové senzory, radar alebo kamery.



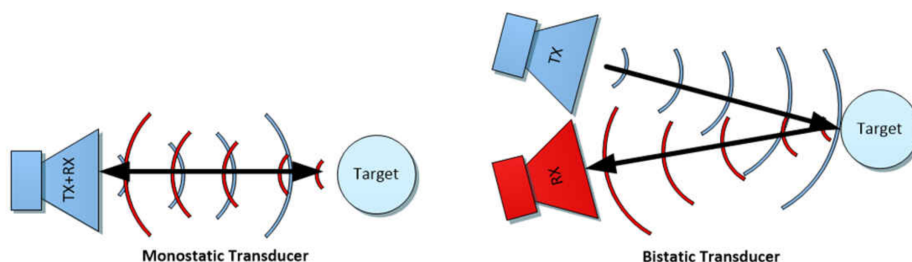
Obr. 2.2: Laserový senzor vzdialenosti DFRobot².

2.1 Senzory vzdialenosti

Slúžia na detekciu predmetov alebo meranie vzdialenosti od nich. Bezkontaktné senzory vzdialenosti sú tiež označované ako **aktívne senzory** [18], pretože vysielajú určitý druh energie do prostredia. Najčastejšie využívané senzory fungujú na princípoch šírenia mechanického alebo elektromagnetického vlnenia, ich rýchlosti šírenia a vlastnostiach pri odraze.

Ultrazvukové senzory

Princíp fungovania je meranie časového intervalu medzi vyslaným impulzom a prijatým odrazom zvukových vln. Vlny s frekvenciou vyššou ako 20kHz sú vysielané pomocou piezoelektrického meniča, ktorý môže slúžiť v **monostatickom** prevedení tiež ako prijímač odrazeného zvuku. Pri **bistatických** ultrazvukových senzoroach sú použité dva oddelené piezomeniče, z ktorých jeden slúži ako vysielateľ a druhý ako prijímač zvukových vln. Výhodou tohto riešenia je možnosť merať kratšie vzdialenosti, pri ktorých monostatickému prevedeniu zabraňuje chvenie po odoslaní signálu rýchlu detekciu odrazeného vlnenia.



Obr. 2.3: Monostatický a bistatický ultrazvukový senzor³

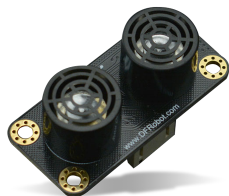
²https://wiki.dfrobot.com/TF_Mini_LiDAR_ToF__Laser_Range_Sensor_SKU__SEN0259

³Prevzaté z <https://www.ti.com/lit/an/slaa907d/slaa907d.pdf>

Keďže poznáme rýchlosť šírenia zvukových vln V_{sound} , ktorá je v suchom vzduchu pri teplote 20° **343m/s**, dokáže senzor zistiť vzdialenosť od objektu d ako:

$$d = \frac{t * V_{sound}}{2}$$

kde t je zmeraný časový interval medzi vyslaním a prijatím signálu [22]. Tento typ senzoru dokáže detegovať pevné objekty z rôznych materiálov ako aj kvapalinu. Naopak nepresné výsledky alebo nefunkčnosť vykazuje pri mäkkých, zvuk pohlcujúcich materiáloch alebo pri šikmých hladkých plochách, kedy sa zvukové vlny neodrážajú naspäť smerom k senzoru. Nevýhodou je tiež nízka frekvencia samostatných meraní, keďže maximálna kadencia je limitovaná rýchlosťou šírenia zvuku. Rozsah meranej vzdialenosti sa pohybuje od jednotiek centimetrov do jednotiek metrov. Výhodou je ďalej široký uhol záberu, malé rozmery a nízka jednotková cena.

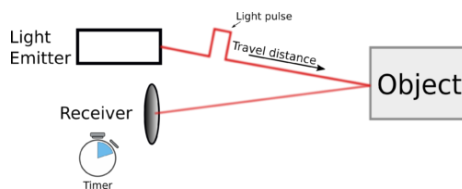


Obr. 2.4: Bistatický ultrazvukový senzor DFRobot⁴

Laserové senzory

Označované tiež **LiDAR** (Light Detection and Ranging) využívajú techniku merania vzdialenosti s použitím svetelných impulzov. Tieto senzory majú veľmi malý uhol záberu a sú jednodimenzionálnym základom pre rozšírené 2D a 3D LiDAR senzory a skenery. Získavanie informácie o vzdialenosti od objektu môže prebiehať použitím troch metód [14]:

- **Time-of-Flight:** princíp je podobný ako pri ultrazvukových senzoroch, kedy sa meria časový interval medzi vyslaním a prijatím impulzu, výhodou oproti ultrazvukovým senzorum je možnosť rýchlejšieho merania, nevýhodou sú vyššie požiadavky na rozlišovaciu schopnosť hardvéru, ktorý meria časový interval rádovo v nanosekundách až pikosekundách.

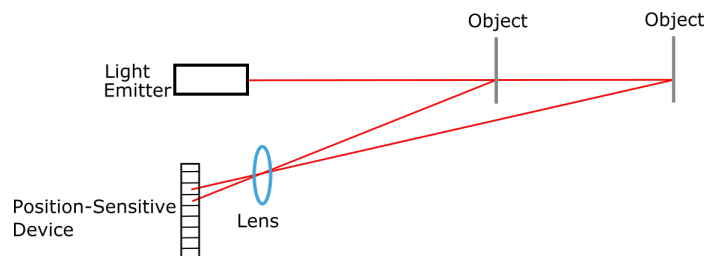


Obr. 2.5: Princíp merania ToF⁵

⁴[https://wiki.dfrobot.com/URM09_Ultrasonic_Sensor_\(Gravity-I2C\)_\(V1.0\)_SKU_SEN0304](https://wiki.dfrobot.com/URM09_Ultrasonic_Sensor_(Gravity-I2C)_(V1.0)_SKU_SEN0304)

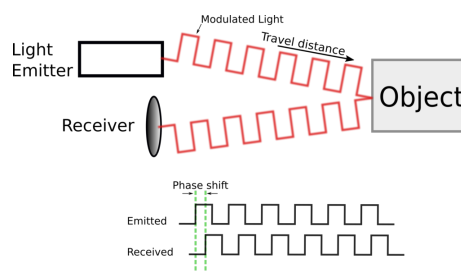
⁵Prevzaté z: <https://tof-insights.com/category/knowledge/>

- **Optická triangulácia:** meranie vzdialenosti touto metódou prebieha na základe detekcie uhla, pod ktorým svetelný lúč dopadá na prijímač, ktorý je známou vzdialenosťou oddelený od vysielača [18].



Obr. 2.6: Princíp merania optickou trianguláciou

- **Meranie fázovým posunom:** laser je amplitúdovo modulovaný sinusoídou so známou periódou. Vzdialenosť od objektu je odvodená od fázového posunu medzi vyslaným a prijatým signálom. Pre jednoznačné meranie je maximálna vzdialenosť obmedzená dĺžkou jednej periódy modulačného signálu [7].



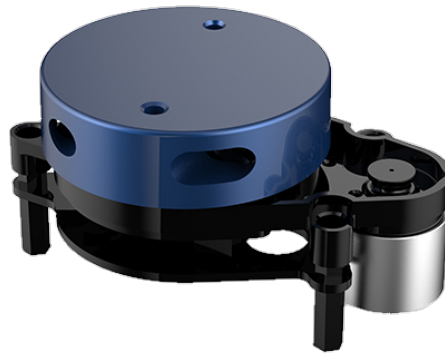
Obr. 2.7: Princíp merania fázovým posunom⁶

Technológiou LiDAR je okrem merania vzdialenosti možná čiastočná identifikácia materiálu od ktorého sa svetelné impulzy odrážajú. Tieto vlastnosti je možné určiť na základe intenzity ale tiež spektra odrazeného žiarenia. Sensory sa okrem metód merania vzdialenosti odlišujú tiež vlnovou dĺžkou a vyžarovanou energiou, ktoré môžu mať negatívny vplyv na ľudské zdravie [17]. Rozsah meranej vzdialenosti sa môže pohybovať rádovo od jednotiek centimetrov po desiatky metrov. Na maximálnu vzdialenosť vplýva okrem iného aj reflektivita povrchu od ktorého sa svetelný impulz odráža, negatívne tiež môže pôsobiť svetelné žiarenie v prostredí, kde dochádza k meraniu.

⁶Prevzaté z: <https://tof-insights.com/category/knowledge/>

2.2 Riadenie s využitím LiDARu

Veľmi obľúbená technológia pri samoriadiacich vozidlách ale aj iných zariadeniach je dnes LiDAR. Rozšírením metód statického merania vzdialenosti laserovými senzormi, dokážeme dvojrozmerné alebo trojrozmerné mapovať okolitý priestor vozidla. Často používaná metóda pri vyhýbaní sa prekážkam je použitie 360-stupňového horizontálneho **2D LiDAR** skeneru, ktorý pomocou mechanickej rotácie po vlastnej osi v jednotlivých momentoch meria vzdialenosť a vďaka zabudovanému enkodéru určuje smer merania voči vozidlu. Týmto spôsobom je možné zaznamenať vzdialenosť vozidla od okolitých objektov a vytvoriť mapu priestoru, ktorá môže byť ďalej spracovaná algoritmom pre výpočet optimálnej trajektórie vozidla.



Obr. 2.8: 360° 2D LiDAR skener *YDLIDAR X2* s meraním vzdialenosti metódou optickej triangulácie⁸

Pridaním ďalšej otočnej osi môže byť skonštruovaný tiež 3D LiDAR skener. V takom prípade je však mapovanie okolia časovo náročné v závislosti na požadovanom uhlovom rozlíšení a rýchlosti pohybu mechanizmov zabezpečujúcich rotáciu senzora [18]. Možným riešením je použitie senzoru s väčším počtom zdrojov žiarenia, kedy dochádza k viacerým meraniam v jednom okamihu.

Využitie technológie LiDAR je dnes možné nájsť v širokom spektre zariadení a preto aj vývoj technológie prichádza s rôznymi prístupmi pre rôzne prípady použitia. LiDAR skenery dokážu sledovať celé okolie vozidla a pracovať samostatne, s doplnením ďalších senzorov ako napríklad kamery je možné zostrojiť vozidlo ktoré rieši simultánnu lokalizáciu a mapovanie, čo je známa disciplína s označením **SLAM** [8].

⁸<https://www.ydlidar.com/products/view/6.html>

2.3 Riadenie s využitím obrazu z videokamery

Spracovaním obrazu z kamery sa snažíme priblížiť k ľudskému zraku, ktorý nám dokáže poskytovať obrovské množstvo informácií o prostredí. Kamera je teda zariadenie, ktoré zachytáva svetelné žiarenie z okolia a premieňa ho na digitálny signál. Následne môže prebiehať spracovanie tohto signálu do obrazu a extrakcia požadovaných informácií. Pomocou rôznych algoritmov pre spracovanie obrazu je možné zaznamenávať pohyb, sledovať a rozpoznávať objekty. Detekciu vzdialenosti je možné docieľiť koreláciou snímok z dvoch kamier, kedy detegované objekty menia svoju pozíciu v zachytenom obraze podľa ich vzdialenosti. Takéto meranie je však nepresnejšie a výpočtovo náročnejšie napríklad oproti meraniu laserovým senzorom vzdialenosti.

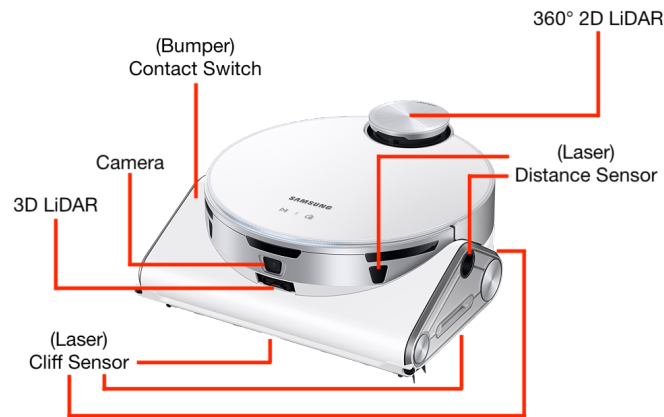
Najrozšírenejšie dve technológie v kamerových senzoroch sú CCD a CMOS⁹. Kamery s technológiou CMOS sa však v oblastiach robotiky a drobnej elektroniky vyskytujú častejšie, keďže sú konštrukčne jednoduchšie a majú oveľa menšiu spotrebu energie, naopak s technológiou CCD dokážu zachytiť kvalitnejší snímok. Obe technológie dokážu premeniť intenzitu svetla na digitálny signál, teda zachytávať bezfarebný obraz. Pre vytvorenie farebného obrazu je potrebné rozdeliť prichádzajúce svetlo na tri základné farebné zložky pomocou filtrov, zachytiť ich intenzitu a následne ich skombinovať. Farebné snímanie teda pri zachovaní rozlíšenia vyžaduje minimálne trikrát väčšiu plochu senzoru oproti monochromatickým kamerám, ktoré majú potom výhodu aj v rýchlosti prenosu a spracovania obrazu. Kamery sa okrem rozlíšenia obrazu, teda počtu pixelov, ktoré dokáže zaznamenať, ďalej môžu líšiť rôznymi vlastnosťami pri zhoršených svetelných podmienkach, rozlišovacou schopnosťou jednotlivých farieb ale aj napríklad uhlom záberu, hĺbkou ostrosti a ďalšími parametrami, ktoré sú často závislé na použitej šošovke a jej geometrických a optických vlastnostiach [18]. Cieľom práce je však používať komponenty s redukovanou zložitou a teda parametre a funkcionality kamier so zložitou optikou, prípadne potrebou prídavného mechanizmu pre ostrenie obrazu nie sú v tomto okamihu dôležité.

Navigácia pomocou spracovania obrazu z kamery je neoddeliteľnou súčasťou riešení vo vozidlách alebo modeloch, ktoré sa majú pohybovať po predom definovanej trajektórii. Hlavnou úlohou je v takom prípade detegovať navigačnú líniu, jej pozíciu vzhľadom k modelu a zmenu s narastajúcou vzdialenosťou. Podľa týchto základných informácií je ďalej možné plánovať pohyb vozidla. Spracovanie obrazu sa môže skladať z viacerých krokov, napríklad zmenou perspektívy, filtráciou šumu rozmazaním obrazu, prevod na monochromatický obraz v odtieňoch šedej farby a následným prahovaním na binárny obraz. Ďalším krokom môže byť orezanie na oblasť záujmu, aplikovanie algoritmov na detekciu hrán alebo čiar a ďalších [5]. Použitým algoritmom a postupu spracovania obrazu sa ďalej venuje kapitola 5.

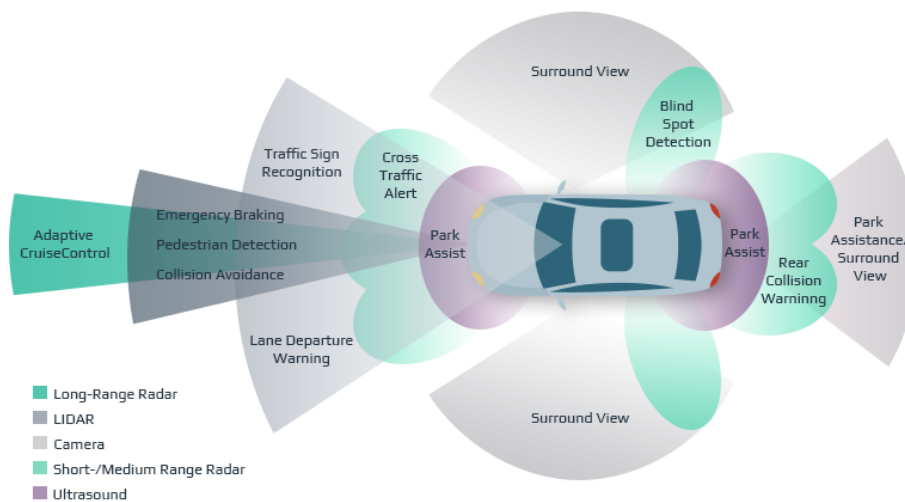
⁹<https://www.opto-e.com/basics/sensor-types-ccd-and-cmos>

2.4 Kombinácia viacerých prístupov

V skutočnom svete je potrebné pri samoriadiacich vozidlách sledovať mnohé parametre svojho okolia. Preto sú využívané nielen viaceré senzory, ale aj viaceré metódy sledovania okolia. Hlavne pri vozidlách a robotoch určených do interiérových podmienok sú čoraz viac využívané senzory LiDAR, pri osobných vozidlách a iných modeloch určených do komplikovanejších, exteriérových podmienok sú senzory kombinované a rozšírené napríklad o technológie ako GPS¹⁰ alebo Radar¹¹.



Obr. 2.9: Exteroceptívne senzory robotického vysávača Samsung Jet Bot AI+¹²



Obr. 2.10: Exteroceptívne senzory cestných vozidiel¹³

¹⁰https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/gps

¹¹<https://www.thinkautonomous.ai/blog/?p=how-radars-work>

¹²<https://www.samsung.com/us/home-appliances/vacuums/jet-bot-robot/jet-bot-ai-plus-robot-vacuum-with-object-recognition-vr50t95735w-aa/>

¹³Prevzaté z: <https://intellias.com/sensor-fusion-autonomous-cars-helps-avoid-deaths-road/>

Kapitola 3

Požiadavky na model redukovanej zložitosti

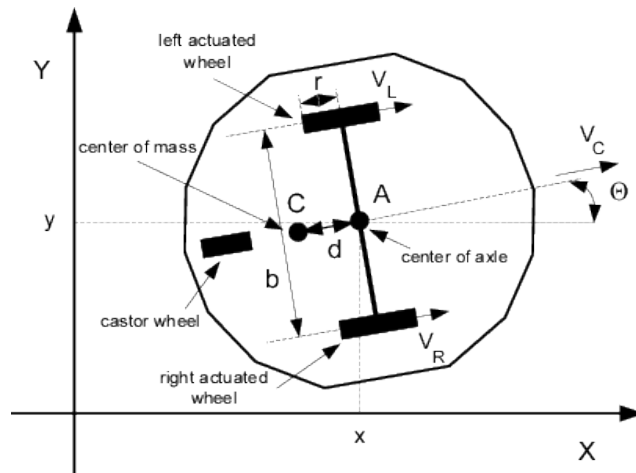
Cieľom tejto práce je návrh a konštrukcia modelu z ľahko dostupných a finančne nenáročných komponentov. Vozidlo postavené na platforme, ktorá umožňuje použitie ľahkých materiálov a možnosť prispôbovania ďalším komponentom by malo disponovať jednoduchým ale efektívnym riešením pohybu a manévrovania s ohľadom na minimalizovanie počtu hnacích motorov, prípadne riadiacich servomotorov. Kľúčovým komponentom je tiež zdroj energie, ktorý by mal byť rozmerovo a hmotnostne vhodný pre takéto vozidlo a v prípade akumulátorov by nemal vyžadovať špeciálne nabíjanie. Sensorická výbava musí vyhovovať potrebám a spôsobu samoriadenia, ako aj nárokom na minimalizovanie hmotnosti a finančnej náročnosti. Ďalšou výhodou je tiež výpočetná platforma so širokou podporou komunity, s možnosťou použitia bežných komunikačných rozhraní a knižníc potrebných pre spracovanie dát získaných zo sensorov v dostatočnej rýchlosti pre ovládanie vozidla. V tejto kapitole sú opísané možnosti riešenia pre jednotlivé časti systému.

3.1 Podvozok a princípy pohybu vozidla

Najdôležitejší komponent vozidla z hľadiska hmotnosti a pohyblivosti je samotný podvozok vozidla na ktorom je ďalej model postavený. Zvolenie vhodných rozmerov a materiálu dokáže výrazne ovplyvniť nároky na pohyb a ovládanie vozidla. S ohľadom na ovládanie je tiež dôležitý výber mechanických prvkov, ich počet a rozmiestnenie na vozidle, ktorý môžeme označiť ako lokomočný aparát, ktorý súhrnne zabezpečuje pohyb vozidla. Narozdiel od iných robotov, ktoré môžu využívať bio-inšpirované mechanizmy pre pohyb, vozidlá určené pre rovné povrchy sú odkázané na ľudský vynález, ktorý sa inde v prírode nevyskytuje – koleso [18]. Aby bola zabezpečená stála stabilita, vozidlo musí byť vybavené najmenej tromi kolesami. Ďalej existuje množstvo konfigurácií, ako zabezpečiť pohyb a manévrovateľnosť vozidla [6]. Bez kombinovania pohonu aj natáčania na ktoromkoľvek z konvenčných kolies, ktoré môže byť konštrukčne zložitý, pripadajú do úvahy dva prístupy:

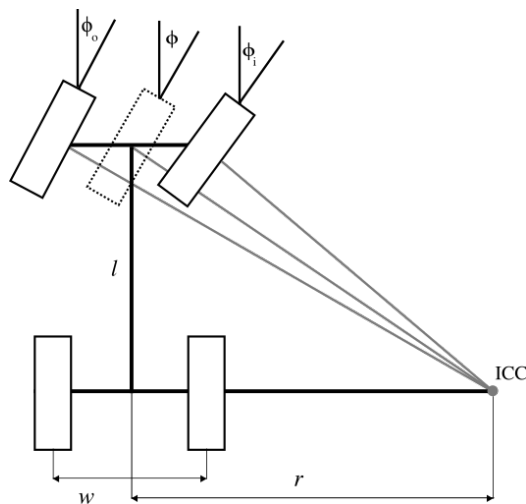
- **Trojkoľosové riešenie**, kedy dvojica kolies leží na jednej spoločnej osi, nie sú však spojené a každé z nich je zvlášť motorizované. Dvojicu hnacích kolies dopĺňa voľne zavesené tretie, ktoré slúži na stabilizáciu vozidla. Táto konfigurácia umožňuje hnacou nápravou tiež meniť smer jazdy pomocou rôznej rýchlosti alebo smeru otáčania kolies [11]. Výhodou tohto riešenia je možnosť meniť smer jazdy takmer bez zmeny pozície

vozidla, nevýhodou naopak citlivosť na minimálne odchýlky medzi hnacími kolesami, ktorá môže spôsobiť vychýlenie z trajektórie.



Obr. 3.1: Konfigurácia vozidla s dvomi hnacími a jedným voľne otočným kolesom¹

- Konfigurácia s dvomi osami, na ktorých sú uložené dvojice kolies, predstavuje zjednodušenú verziu podvozku automobilu. Táto konfigurácia však so zachovaním väčšiny vlastností môže existovať aj v trojkolesovom prevedení. Ak je dvojica kolies na hnacej náprave spojená, respektíve ak je hnané iba koleso na samostatnej náprave, je možné použiť pre pohon iba jeden motor. Keďže sa vozidlo nedokáže otáčať okolo vlastnej osi, znižuje sa stupeň mobility [6]. Pri precíznom konštrukčnom prevedení je potrebné zohľadniť rôzne rýchlosti a uhly natočenia jednotlivých kolies, podľa polomeru zatáčania, ktoré popisuje Ackermanov model riadenia [18].

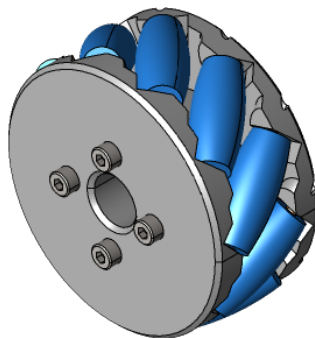


Obr. 3.2: Princíp Ackermanovho modelu riadenia²

¹Prevzaté z [11]

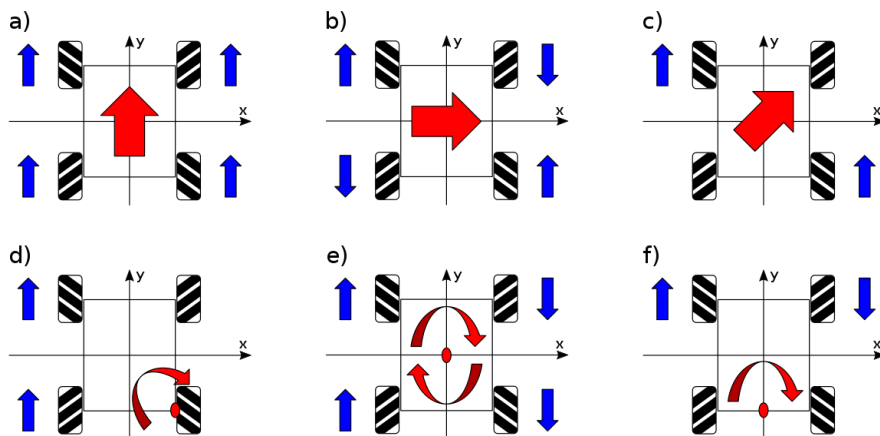
²Prevzaté z <https://www.xarg.org/book/kinematics/ackerman-steering/>

Ďalšou možnosťou namiesto použitia konvenčných kolies, môžu byť kolesá **Mecanum**³. Použitie týchto kolies dokáže zabezpečiť pohyb vozidla všetkými smermi bez zmeny jeho orientácie a s použitím štandardného šasi ktoré nedisponuje mechanizmom pre zatačanie náprav. Koleso sa skladá z viacerých valčekov uložených po obvode nosnej časti s natočením 45° voči stredovej osi.



Obr. 3.3: Koleso Mecanum⁴

Rôznou rýchlosťou a smerom otáčania privádzanou na kolesá je možné dosiahnuť pohyb všetkými smermi. Vďaka malej ploche dotyku s povrchom, po ktorom sa vozidlo pohybuje, kolesá jednoduchšie klížu, čo je dôležité pri tomto mechanizme, kedy pohyb kolies je často kolmý na vektor krútiacej sily privádzanej na koleso [21]. Nevýhodou je nutnosť samostatného pohonu pre každé z kolies, ako aj potreba precízneho ovládania pre požadovaný pohyb vozidla.



Obr. 3.4: Pohyb vozidla s kolesami Mecanum⁵

³Nazývané tiež Švédske koleso alebo Ilonove koleso [21]

⁴Prevzaté z <https://thangs.com/designer/HowToMechatronics/3d-model/Mecanum%20Wheel%20-%203D%20Printable-43528>

⁵Prevzaté z https://www.wikiwand.com/en/Mecanum_wheel

3.2 Napájanie pomocou batérií a akumulátorov

Zdroj napájania dokáže zohrať zásadnú úlohu pri návrhu modelu redukovanej zložitosti. Pri stavbe takýchto vozidiel je možné často vidieť použitie viacerých akumulátorov súčasne z dôvodu citlivosti výpočtových komponentov na výkyv napätia pri skokovom odbere energie napríklad hnacím motorom [9]. Oddelenie napájania pre časti modelu tiež môže riešiť rôzne požiadavky systému, na vstupné napäťové úrovne. Takéto použitie však zvyšuje zložitosť systému a môže ovplyvniť finálnu hmotnosť vozidla a tým aj konštrukčné požiadavky a samotné pohybové vlastnosti.

Najpoužívanejší spôsob napájania v oblasti rôznych modelov ale aj inej elektroniky so schopnosťou dobíjania sú rôzne typy **lítiových akumulátorov**. Pri použití samostatných článkov takéhoto akumulátora je však potrebné zohľadniť vlastnosti pri dobíjaní, ktoré sa líšia medzi jednotlivými druhmi s rôznymi charakteristikami [19]. Tieto rozdiely a tiež samotný postup dobíjania si vyžadujú často použitie špeciálnych nabíjačiek, ktoré zvyšujú zložitosť celého modelu. S cieľom zabezpečiť prísun elektrickej energie pre vozidlo na požadovanej úrovni aspoň rádovo v desiatkach minút a zároveň sa vyhnúť komplikovanému dobíjaniu akumulátorov, pripadá do úvahy aj použitie jednorazových alkalických článkov.

V prípade použitia akumulátorov ale aj alkalických článkov je však potrebná následná stabilizácia napätia, ochrana pred preťažením alebo prehriatím. Redukciu zložitosti v tejto oblasti môže vyriešiť použitie **power banky**. Napájanie modelu vozidla týmto spôsobom zaručí možnosť dobíjania energie štandardným USB portom bez nutnosti použitia ďalších špecifických komponentov, ale aj stabilné a bezpečné výstupné napätie pre výpočtovú časť systému na štandardnej úrovni 5V. Zmenu napäťových úrovní pre prvky systému s inými požiadavkami na napájanie ako 5V je možné jednoducho zabezpečiť napríklad modulmi DC/DC step-up alebo step-down meničov.

3.3 Výpočtové platformy

Možnosti výberu výpočtovej platformy sú široké. Výber je potrebné zhodnotiť podľa požiadaviek na hardvérové rozhrania, spotrebu elektrickej energie, ale aj výpočtovú kapacitu. Ak má byť model autonómny a všetky výpočtové činnosti majú prebiehať iba v rámci vozidla, podľa presnejších požiadaviek je možné rozhodnúť sa medzi dvomi prístupmi.

- **Mikrokontroléry** sú integrované obvody obsahujúce procesor, RAM, ROM a vstupno-výstupné rozhrania v jednom čipe. Na programovanie mikrokontrolérov je potrebné špeciálne softvérové prostredie ale aj hardvérové programátory. Mikrokontroléry sú určené na beh nahraného programu v nekonečnom cykle. Jednoduché používanie dokážu zabezpečiť vývojové dosky, ktoré okrem samotného mikrokontroléru obsahujú ďalšie komponenty pre jednoduché programovanie, komunikáciu, napájanie ale aj konektivitu s ďalšími modulmi alebo časťami systému. V súčasnosti najznámejšou vývojovou doskou pre mikrokontroléry je **Arduino** s jednoduchým jazykom a prostredím na programovanie. V rôznych konfiguráciách obsahuje rôzne typy mikrokontrolérov s rôznymi podpornými komponentami. Mikrokontroléry sú charakteristické tiež nízkou spotrebou elektrickej energie, digitálnymi ale aj analógovými vstupmi, rôznymi komunikačnými rozhraniami a integrovanou impulzovou šírkovou moduláciou výstupov, ktorá umožňuje ovládať analógové zariadenia pomocou digitálnych výstupov.
- **Jednodoskové počítače** sú zariadenia s malým rozmerom, ktoré majú všetky dôležité vlastnosti štandardného počítača a obsahujú tiež konektory pre digitálne vstupy, výstupy alebo komunikačné rozhrania. Ďalej môžu tieto počítače integrovať rôzne periférie ako myš, klávesnicu, monitor, kameru alebo pripojenie na internet. Základným rozlišovacím prvkom jednodoskových počítačov od mikrokontrolérov je operačný systém. Najrozšírenejším jednodoskovým počítačom v oblasti modelov alebo robotov je **Raspberry Pi**. Vďaka natívnemu operačnému systému odvodeného od Linuxovej distribúcie Debian je možné široké použitie programovacích jazykov ako aj knižníc a iných programov určených pre počítače [12].

Kapitola 4

Návrh riešenia

V tejto kapitole je popísaný postup návrhu a stavby modelu vozidla, zdôvodnenie výberu komponentov pre pohyb, manévrovanie a napájanie ale aj senzorickej výbavy a výpočtovej platformy. Cieľom návrhu vozidla je zabezpečiť pohyblivosť a manévrovateľnosť vybranej platformy jedným motorom a servomotorom, zjednodušiť potrebné doplňujúce konštrukčné a elektronické komponenty, zminimalizovať počet senzorov na jednu videokameru a dodať modelu elektrickú energiu z dostatočne výkonného zdroja bez špeciálnych požiadaviek na jeho obsluhu. Dôležitou časťou riešenia je tiež voľba výpočtovej platformy, ktorá bude schopná dostatočne rýchlo spracovať obraz z kamery, a ovládať akčné prvky vozidla. Konečným výsledkom návrhu je zjednodušený model vozidla so schopnosťou samostatného pohybu po vyznačenej línii na rovnom povrchu bez prekážok.

4.1 Hnacia a riadiaca sústava

Pohyb a riadenie modelu je priamo závislé na zvolenej platforme vozidla. V tomto prípade ide o model stavebnice LEGO z rady Technic. Pri výbere tejto platformy zavážila najmä modulárnosť a jednoduchosť prispôbovania na účely práce. LEGO je tiež charakteristické plastovými dielmi z ľahkých a pevných materiálov [2], ktoré sú vyhovujúce z hľadiska redukcie hmotnosti. Konkrétny model stavebnice **LEGO 9395** na obrázku 4.1 je vozidlo disponujúce štvorkolesovou konfiguráciou popísanou v kapitole 3.1. Predná náprava je spojená mechanizmom zabezpečujúcim zatáčanie vozidla, na zadnú nápravu je cez diferenciál privádzaná hnacia sila z jednosmerného elektromotora. Diferenciál je mechanizmus zabezpečujúci možnosť rôznej rýchlosti otáčania kolies na hnacej náprave, ktorá je dôležitá pri zatáčaní vozidla, kedy koleso na vonkajšej strane prejde väčšiu vzdialenosť a teda otáča sa rýchlejšie [13]. Bez tohto mechanizmu by pri zmene smeru jazdy vozidla bola potrebná väčšia sila pre pohyb a dochádzalo by k prešmykovaniu kolies. Z pôvodného modelu stavebnice je teda použitý mierne upravený podvozok s mechanizmami dôležitými pre kynetické schopnosti vozidla.



Obr. 4.1: Stavebnica LEGO Technic 9395, ktorá je použitá ako základná platforma pre stavbu modelu vozidla²

Táto stavebnica však nie je primárne určená na motorizovaný pohyb a manévrovanie. Z toho dôvodu bol potrebný vhodný výber a integrácia komponentov zabezpečujúcich tieto vlastnosti. Pre pohon zadnej nápravy je aj vďaka diferenciuálu možné použiť iba jeden motor. Vhodnou možnosťou s ohľadom na redukovanie zložitosti je použitie jednosmerného motora LEGO s označením M, ktorý s napájacím napätím 9V ponúka vyhovujúcu silu a rýchlosť otáčania pre potreby modelu. Výhodou sú tiež kompaktné rozmery elektromotora a jeho vyhotovenie, ktoré umožňuje fyzickú konektivitu so zvyškom podvozku a pripojenie na hnací hriadeľ. Akčný prvok zabezpečujúci manévrovanie vozidla je štandardné analógové 9g micro servo otočné o 180° s napájacím napätím 5V. Silou, rýchlosťou aj presnosťou je dostatočne vyhovujúce pre potreby manévrovania modelu vozidla. Pre upevnenie a pripojenie serva na mechanizmus zatáčania prednej nápravy bolo však potrebné doplniť medziskusy kompatibilné so štandardnými rozmermi LEGO prvkov. Na základe týchto požiadaviek bol navrhnutý a vyhotovený pomocou 3D tlačie diel pre uchytenie servomotora k podvozku a ozubené koleso ktoré prenáša pohyb serva na mechanizmus zatáčania. Výroba menších dielov z plastu pre rôzne potreby prototypovania je najvýhodnejšia použitím tejto technológie, ktorá je veľmi rýchla a finančne nenáročná aj v prípade, kedy nemáme priamo dostupnú samotnú 3D tlačiareň.



Obr. 4.2: Jednosmerný motor LEGO M 8883 poháňajúci model vozidla³

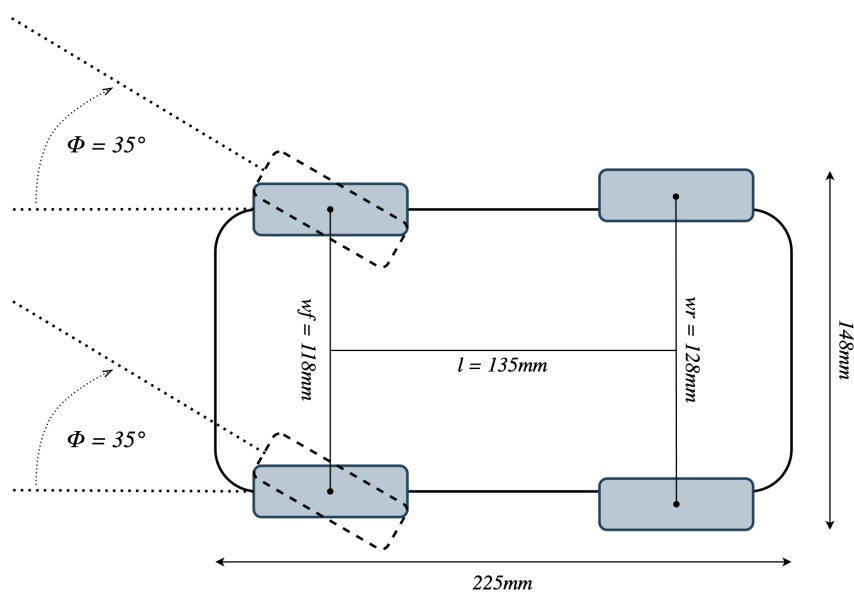
²Prevzaté z <https://www.lego.com/en-us/service/buildinginstructions/9395>

³Prevzaté z <https://www.lego.com/en-us/product/lego-power-functions-m-motor-8883>



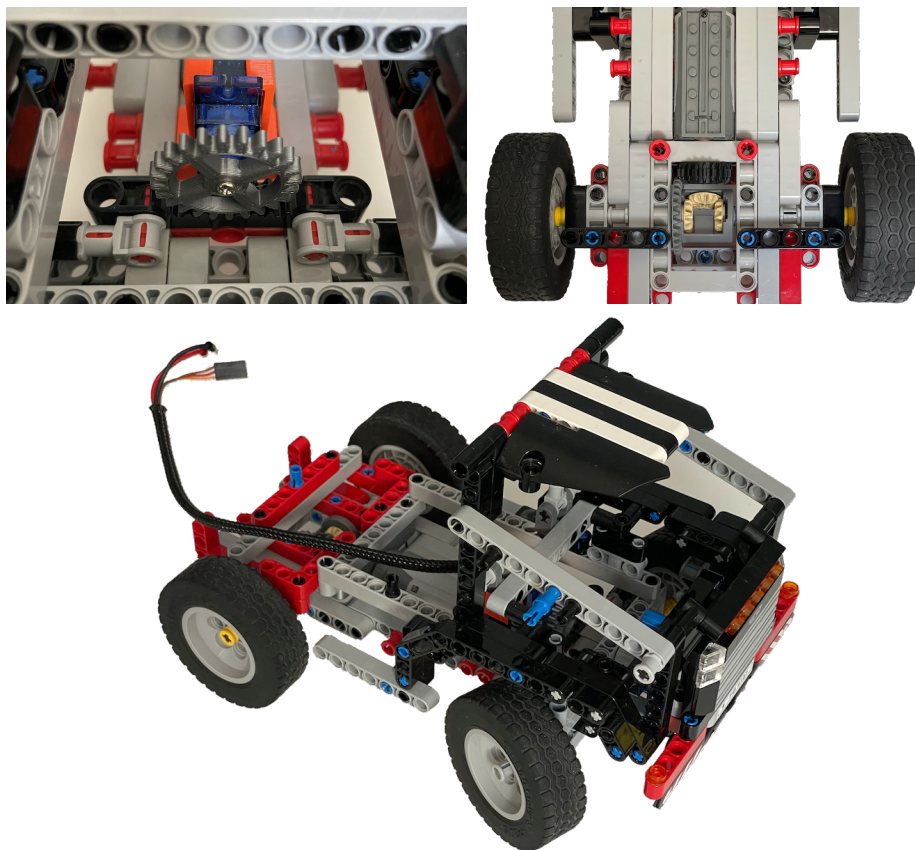
Obr. 4.3: Analógové 9g micro servo⁵ a návrhy dielov pre zabezpečenie kompatibility so stavebnicou LEGO.

Výsledkom je podvozok modelu vozidla schopný pohybu až do rýchlosti asi $1m/s$ a minimálnym polomerom otáčania $20cm$. Hmotnosť bez ďalších komponentov senzorickej, výpočtovej a napájacej sústavy je $415g$. Ďalšie parametre podvozku je možné vidieť na obrázku 4.4

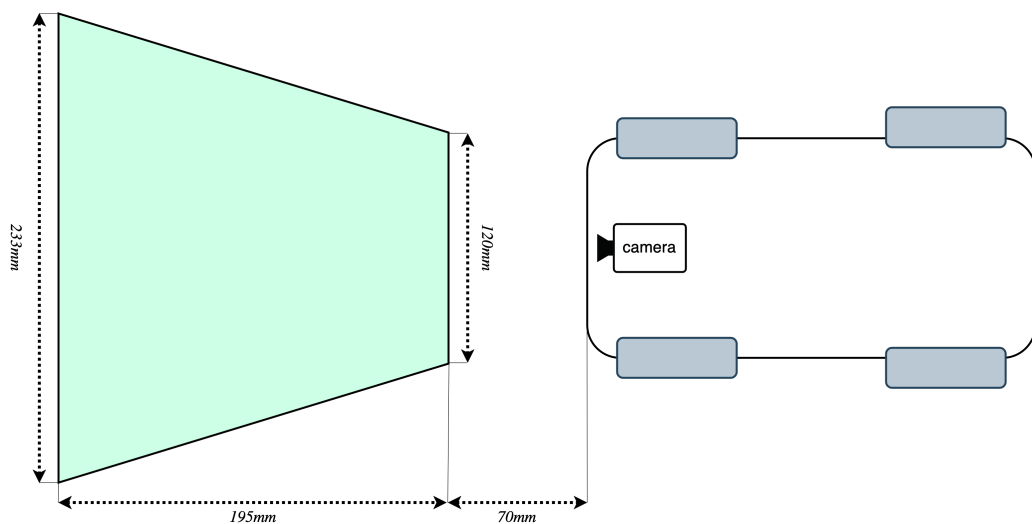


Obr. 4.4: Rázvor náprav l určuje vzdialenosť medzi stredom prednej a zadnej nápravy, rozchod kolies určujúci vzdialenosť dvojice kolies na jednej náprave od ich stredov je na prednej náprave označený w_f , na zadnej w_r , maximálne natočenie predných kolies voči pozdĺžnej osi vozidla ϕ je asi 35° . Maximálne vonkajšie rozmery sú $225mm$ a $148mm$.

⁵Prevzaté z <https://ardubotics.eu/en/motors-actuators/1684-towerpro-micro-servo-motor-180-degree-sg90.html>



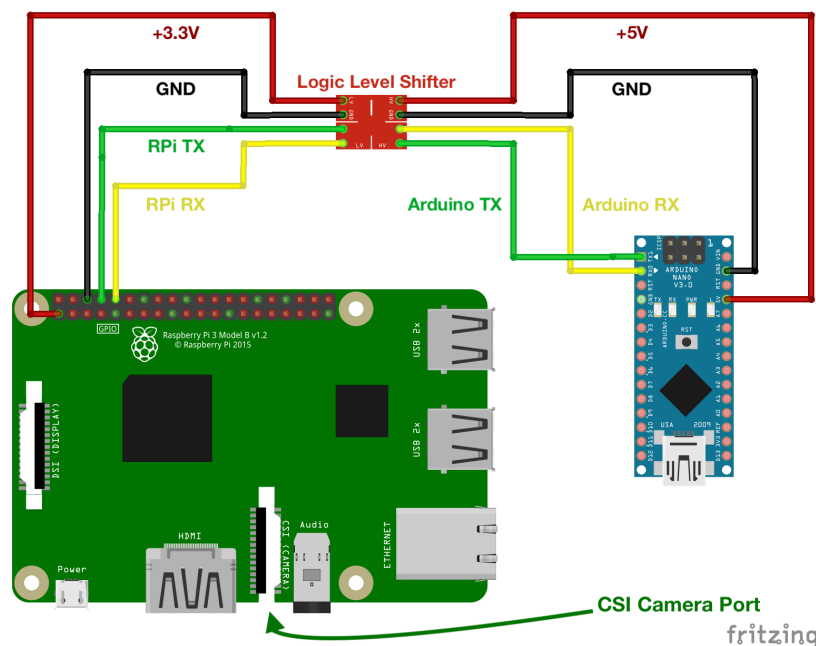
Obr. 4.5: Fotky uloženia servomotora s pripojením na mechanizmus zatáčania vozidla, jednosmerného motora ktorý cez diferenciál poháňa zadnú nápravu kolies a fotka skonštruovaného modelu vozidla prispôbeného pre doplnenie ďalších častí systému.



Obr. 4.8: Z dôvodu potreby otočenia kamery o 90° sa z vertikálneho uhla záberu stal horizontálny a vertikálny záber bol softvérovou orezaný pre viditeľnosť potrebnej oblasti. Pri uložení kamery vo výške 120mm vznikla vyznačená oblasť so známymi rozmermi v tvare lichobežníka, z ktorej je možné získaný obraz ďalej spracovávať.

4.3 Samoriadiaca sústava

Platformou, ktorá spracováva obraz z kamery a podľa detegovanej navigačenej línie počíta vychýlenie servomotora je **Raspberry Pi 3 Model B**. Tento jednodoskový počítač disponuje dostatočnou výpočtovou kapacitou ktorú zabezpečuje 64 bitový štvorjadrový procesor s architektúrou ARM a taktom 1,2GHz. Ďalšími dôležitými parametrami platformy z pohľadu tejto práce sú tiež 1GB pamäte RAM, bezdrôtová konektivita pre LAN, rozhranie CSI pre pripojenie kamery a možnosť sériovej komunikácie s ďalšími zariadeniami⁹. Raspberry Pi disponuje tiež digitálnymi výstupmi s funkciou impulzovej šírkovej modulácie (PWM) [10], ktorými možno nepriamo regulovať rýchlosť jednosmerného motora alebo riadiť servo. Tieto konektory sú však pripojené priamo k čipu mikroprocesora ktorý pracuje na logickej úrovni 3,3V a nedisponujú tiež žiadnou ochranou proti preťaženiu alebo privedeniu napätia väčšieho ako pracovné napätie mikroprocesora. Chybnou manipuláciou alebo poruchou tak môže ľahko prísť k závažnému poškodeniu počítača [3]. Práve to je jedna z hlavných motivácií rozšíriť výpočtovú a samoriadiacu sústavu o vývojovú dosku s mikrokontrolérom ATmega328 - **Arduino**. Vozidlo disponuje klonom dosky Arduino Nano od výrobcu DF-Robot s označením *DFRduino Nano*¹⁰. Mikroprocesor disponuje rôznymi komunikačnými protokolmi, analógovými a digitálnymi vstupmi, výstupmi s funkciou PWM a pracuje na logickej úrovni 5V, čo je bežnejšie aj pri ďalších komponentoch ako sú rôzne senzory alebo podporné moduly a ovládané výstupy,



Obr. 4.9: Mikrokontrolér v tomto prípade komunikuje s Raspberry Pi pomocou sériového protokolu UART [16] a prijíma povely pre nastavenie rýchlosti otáčania motora a pozície serva. Rôzne napätové úrovne medzi komunikujúcimi zariadeniami vyžadujú použitie prevodníku logických úrovní.

⁹<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>

¹⁰https://wiki.dfrobot.com/Arduino_Nano_328__SKU__DFR0010_

4.4 Napájacia sústava

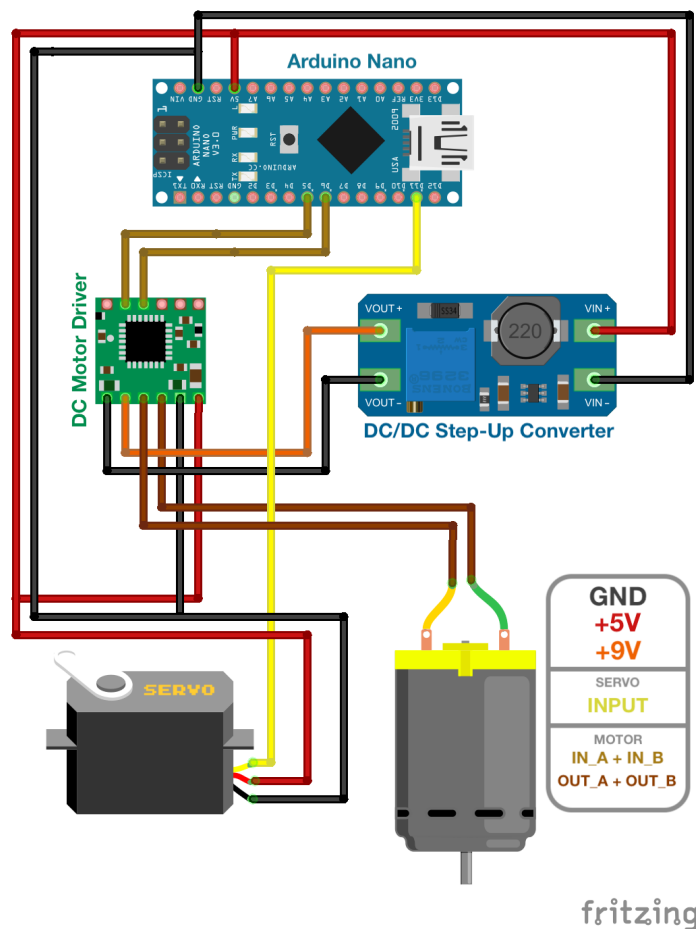
Kritické z oblasti napájania sú hlavne vlastnosti výpočtovej platformy Raspberry Pi, ktorá je navrhnutá pre napájanie na úrovni 5V cez Micro USB port s odporúčaním pre použitie zdroja schopného dodať až 2,5A. Pri frekvencií 1,2GHz a s aktivovanou kamerou a bezrôtovým LAN modulom pri riešení práce bola však nameraná spotreba maximálne 600mA. Napájanie tohto počítača je ale veľmi citlivé na drobné výkyvy napätia, pri ktorých môže byť aktivovaný ochranný mechanizmus, ktorý dočasne zníži frekvenciu procesora, alebo môže dôjsť k reštartovaniu operačného systému. Použitý mikrokontrolér je na nestabilitu napätia citlivý oveľa menej, v niektorých prípadoch však môže tiež prísť k reštartovaniu bežiacieho programu. Takéto správanie spôsobovalo hlavne skokové zapnutie jednosmerného elektromotora, ktorý zabezpečuje pohyb vozidla. Tento problém je možné riešiť doplnením elektrického obvodu, ktorý obmedzí vplyv elektromotora na napájanie výpočtovej časti, alebo obmedzením jeho skokového zapínania. V tomto prípade mikrokontrolér pri rozbiehaní vozidla cez driver pre jednosmerné motory¹¹ postupne reguluje elektrický prúd privádzaný do motora. Rozbeh vozidla na maximálnu rýchlosť tak môže trvať viac ako 200ms, čo však nemá pri zámere tejto práce vplyv na vlastnosti samoriadenia.

Z možností napájania modelu vozidla elektrickou energiou, ktoré boli popísané v podkapitole 3.2, vzišlo ako vhodné riešenie použitie **power-banky**. Základom power-banky je *Lítium-Polymérový* článok s menovitým napätím 3,7V a kapacitou 10000mAh. Vnútorňa elektronika však zabezpečuje stabilné výstupné napätie na úrovni 5V. Vzhľadom k ostatným komponentom systému tak spĺňa zámer minimalizácie zložitosti riešenia, pretože 5V výstup je možné priamo spojiť s napájacím konektorom RaspberryPi a tiež dosky s mikrokontrolérom. Použitá power-banka má pri maximálnom odbere 2,6A kapacitu 5500mAh, čo sa odzrkadľuje na jej hmotnosti 270g, ktorá model zbytočne zaťažuje, avšak pri vývoji dokáže zabezpečiť niekoľkohodinovú dodávku energie pre všetky komponenty vozidla, ktoré v priemere spotrebujú asi 5W. Konkrétny model power-banky¹² tiež disponuje dvomi výstupmi, z ktorých jeden je použitý iba na napájanie Raspberry Pi, čo z časti tiež eliminuje kolísanie napätia.

Druhý výstup power-banky privádza napájanie 5V cez Micro USB konektor umiestnený na doske s mikrokontrolérom pre zvyšok systému. Napätie 5V je priamo využívané pre chod mikrokontroléru, napájanie servomotora aj logickej časti modulu pre riadenie jednosmerného motora. Pre napájanie samotného jednosmerného motora je však potrebné väčšie napätie, ktoré zabezpečuje *DC/DC step-up menič*, ktorý s pomerne vysokou efektívnosťou dokáže vyprodukovať z 5V vstupného napätia, 9V na výstupe.

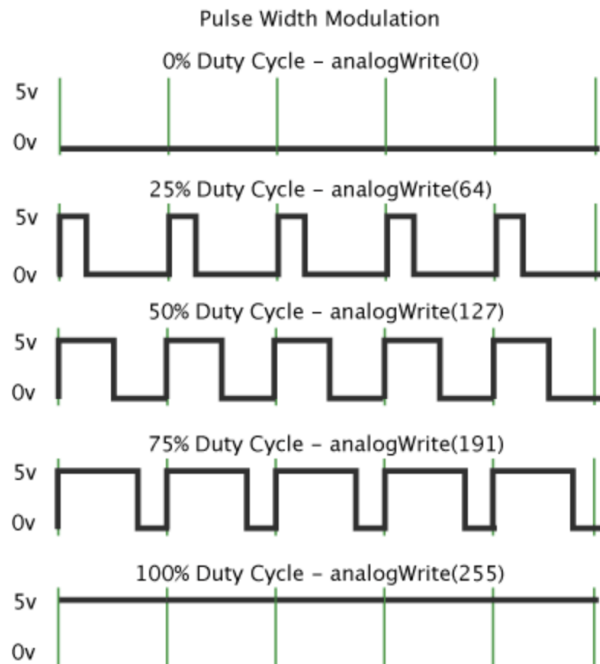
¹¹<https://www.pololu.com/product/2960>

¹²<https://www.mi.com/us/10000mAh-redmi-10w-fast-charge-power-bank/>

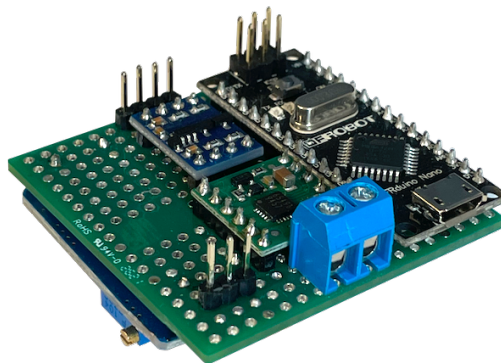


Obr. 4.10: Zapojenie vývojovej dosky s mikrokontrolérom, modulu pre ovládanie jednosmerného motora, step-up meniča so servomotorom a hnacím motorom.

Mikrokontrolér, ktorý dostáva informácie o požadovanej rýchlosti a smere otáčania motora a odchýlke serva, ovláda tieto akčné členy pomocou signálu so šírkovou moduláciou impulzou. Keďže mikrokontrolér disponuje iba digitálnymi výstupmi, kedy výstupy môžu byť buď v logickej 0 alebo 1, teda na úrovni 0V alebo 5V, PWM je spôsob ako ovládať analógové zariadenia impulzmi s rôznou dĺžkou. Správanie analógového zariadenia sa potom odvíja od priemernej hodnoty napätia v čase periódy generovanej mikrokontrolérom. Týmto spôsobom je privádzaná dvojica signálov do modulu pre ovládanie jednosmerného motora, každý signál ovláda rýchlosť otáčania jedným smerom v pomere k dĺžke impulzu ako je možné vidieť na obrázku 4.11. Ovládanie vychýlenia servomotoru sa môže líšiť v závislosti od použitého modelu, avšak väčšinou sa neovláda v celom rozsahu PWM 0-100%.



Obr. 4.11: Generovanie signálu so šírkovou moduláciou impulzov(PWM) mikrokontrolérom ATmega328 s frekvenciou 490Hz (resp. 980Hz) pre ovládanie analógových zariadení¹⁴.



Obr. 4.12: Pre potreby zapojenia jednotlivých modulov a komponentov bol vyrobený prototyp dosky plošných spojov s osadenými konektormi, zabezpečujúci distribúciu elektrickej energie a signálov.

¹⁴Prevzaté z: <https://docs.arduino.cc/learn/microcontrollers/analog-output>

Kapitola 5

Algoritmus samoriadenia

Táto kapitola sa zaoberá spracovaním obrazu z kamery, výpočtom hodnoty pre vychýlenie servomotora a následnými experimentmi na overenie funkčnosti celého modelu. Algoritmy samoriadenia boli navrhnuté a implementované s ohľadom na výber komponentov senzorickej a výpočtovej sústavy, ako aj potrebami s cieľom samostatného pohybu po čiernej navigačnej čiare na bledom povrchu.

Použitie platformy Raspberry Pi a kompatibilnej kamery ponúka možnosť podpory knižníc jazyka Python **PiCamera**¹ pre prístup k obrazu z kamery, **OpenCV**² s funkciami pre ďalšie spracovanie obrazu a **NumPy**³ pre efektívnu prácu s väčším objemom dát. Obraz z kamery sa spracováva v rozlíšení 320 x 240 pixelov a v rýchlosti 20 snímkov za sekundu, čo je dostatočná kvalita pre detekciu navigačnej čiary.



Obr. 5.1: Pôvodný, farebný obraz zachytený kamerou s čiernou navigačnou čiarou na mierne textúrovanom povrchu.

¹<https://picamera.readthedocs.io>

²<https://opencv.org>

³<https://numpy.org>

Prvým krokom v spracovaní je prevod farebného snímku na monochromatický obraz v odtieňoch šedej a tým zníženie objemu dát potrebných v ďalších krokoch. Pôvodná hodnota každého pixelu sa skladá z trojice 8-bitových hodnôt zastupujúcich farby červenú(R), zelenú(G) a modrú(B). Pri prevode na stupeň šedej je použitý výpočet výslednej hodnoty

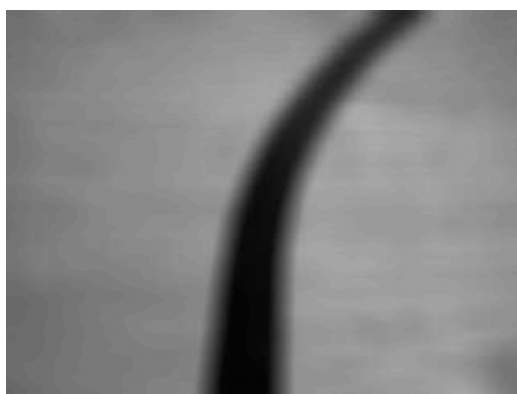
$$Y = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.114 * B$$



Obr. 5.2: Monochromatický obraz po prevode na stupeň šedej farby.

Ďalším krokom je odstránenie šumu rozmazaním obrazu v stupňoch šedej farby. Priemerovaním hodnoty každého pixelu podľa hodnôt v jeho okolí je možné odstrániť ostré okraje zo snímku, čo obmedzí v ďalších krokoch falošnú detekciu navigačnej čiary. Výslednú hodnotu pixelu po aplikovaní rozostrenia v okolí o rozmere 3x3 môžeme definovať ako K

$$K = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$



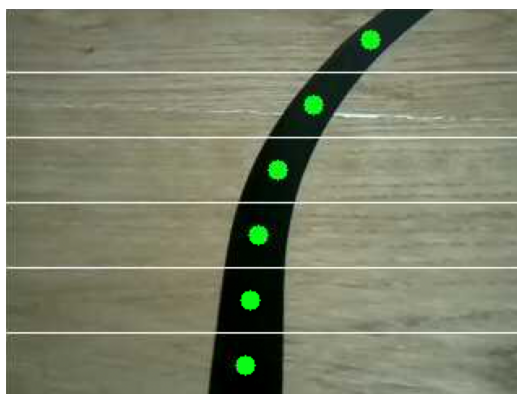
Obr. 5.3: Obraz po aplikovaní rozostrenia priemerovaním hodnoty v okolí definovanom maticou o rozmere 17 x 17 pixelov.

Posledným krokom v spracovaní obrazu je prevod na binárny obraz prahovaním. Hodnota prahu je určená automaticky Otsuho metódou [15] [4].



Obr. 5.4: Binárny obraz po aplikovaní prahovania Otsuho metódou.

Po získaní binárneho obrazu s vyznačenou navigačnou čiarou je obraz rozdelený na šesť horizontálnych oblastí a v každej z nich, ak je to možné, je spriemerovaním súradníc detegovanej čiary určený jeden bod charakterizujúci časť navigačnej línie.



Obr. 5.5: Navigačná línia zjednodušená na šesť bodov.

Výpočet hodnoty pre ovládanie serva je inšpirovaný PID regulátorom [23] a zložený z dvoch parametrov. Prvým, proporcionálnym, je vychýlenie najbližšieho bodu navigačnej línie voči stredovej osi a druhým, derivačným, je smernica navigačnej línie. Výsledná hodnota je súčtom hodnôt odvodených od týchto dvoch parametrov. Tento spôsob dokáže eliminovať osciláciu vozidla pri priamo smerujúcej navigačnej línií, ako aj zabezpečiť väčšiu toleranciu na prudké zmeny jej tvaru za cenu nie dokonalého pohybu vozidla nad čiarou.

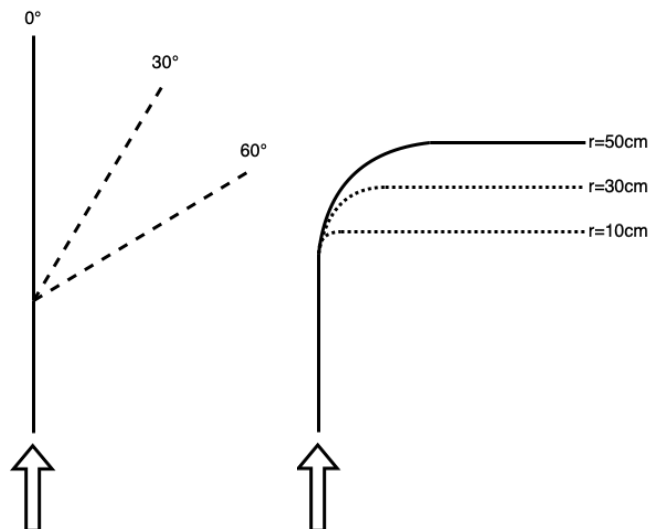
5.1 Experimenty

Pre vyhodnocovanie experimentov bude potrebná tabuľka so vzťahom percentuálnej hodnoty výkonu motora k nameraným rýchlostiam pohybu vozidla. Merania boli vykonané na vodorovnej, hladkej ploche s finálnou podobou modelu o hmotnosti 805g.

Výkon [%]	Rýchlosť [m/s]
25	0,11
30	0,17
40	0,27
50	0,38
60	0,46
70	0,53
80	0,62
90	0,75
100	0,87

Tabuľka 5.1: Rýchlosť vozidla pri maximálnom výkone bola 0,87m/s, pri výkone nižšom ako 25% nebolo vozidlo schopné rozbehu, hodnoty v tomto rozmedzí však môžu byť použité napríklad pri pomalom zastavovaní.

Úlohou experimentov vykonaných pri ideálnych svetelných podmienkach bolo nájdenie limitov vlastností navigačnej čiary pri úspešnom prejazde vozidla. Prejazd bol vyhodnotený ako úspešný, ak vozidlo dokázalo nasledovať navigačnú čiaru v desiatich po sebe idúcich behoch. Prvá časť experimentu sleduje úspešnosť prejazdu po čiare s rôznou zmenou zakrivenia v jednom bode, teda s nulovým polomerom zákruty.

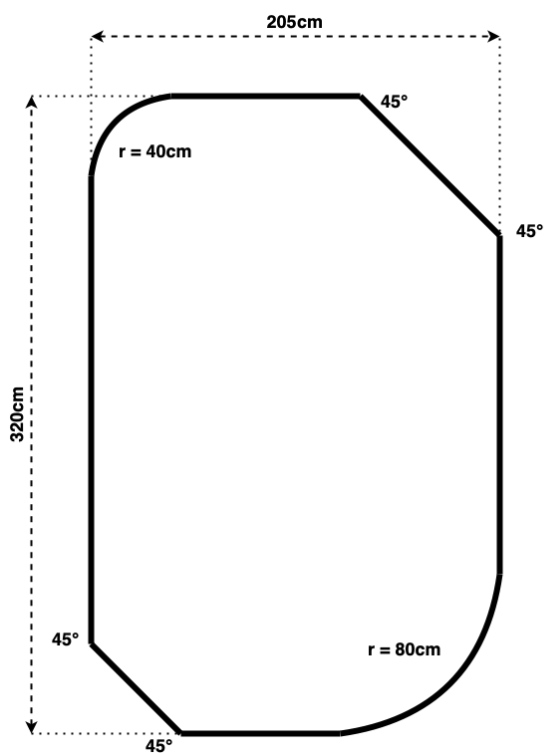


Obr. 5.6: Návrhy trate pre experimenty. V prvom vozidlo mení smer jazdy v jednom bode o určitý uhol, v druhom prípade zatáča o 90° v zákrute s daným polomerom.

Vozidlo bolo úspešné v prejazde maximálnou rýchlosťou pri ostrosti zákruty do 50° . Pri zmene smeru navigačnej línie o 60° bola rýchlosť pri úspešnom pokuse maximálne $0,62m/s$ a pri zmene o 70° asi $0,42m/s$. So zmenou o 80° a ostrejšou nebolo vozidlo úspešné ani v minimálnej rýchlosti.

V druhej časti experimentu navigačná čiara obsahuje 90° zákrutu s určitým polomerom. Meraná je opäť maximálna rýchlosť pri úspešnom prejazde. Vozidlo bolo úspešné pri maximálnej rýchlosti s polomerom väčším ako $30cm$, pri polomere $20cm$ a úspešnom prejazde bola rýchlosť $0,62m/s$, pri polomere $10cm$ nebolo vozidlo úspešné ani v minimálnej rýchlosti.

Ako finálne overenie funkčnosti modelu vozidla bol navrhnutý okruh, na ktorom sa vozidlo dokázalo pohybovať nepretržite po dobu 30 minút s výkonom pohonu na úrovni 60% , kedy sa čas prejazdu jedného kola pohyboval na úrovni 20s.



Obr. 5.7: Okruh pre finálne testovanie modelu vozidla.

Kapitola 6

Záver

Cieľom práce bol návrh a zostrojenie modelu vozidla so samoriadiacimi schopnosťami s ohľadom na redukciiu zložitosti komponentov a návrh algoritmu pre autonómny pohyb po navigačnej čiare. Zvolená platforma na ktorej je model postavený disponuje možnosťou jednoduchej optimalizácie konštrukcie pre potreby práce s dostatočnou kinematickou charakteristikou. S hmotnosťou vozidla 805g vrátane zdroja elektrickej energie v podobe power-banky, ktorý dokáže napájať vozidlo po dobu niekoľkých hodín s hmotnosťou 271g, sa tiež podarilo zminimalizovať nároky na akčné členy ktoré zabezpečujú pohyb a manévrovanie vozidla. Riešením modelovej situácie pohybu po navigačnej línii sa podarilo znížiť nároky na senzorkú sústavu, ktorá obsahuje iba finančne nenáročnú kameru so zanedbateľnou hmotnosťou. Kombináciou jednodoskového počítača Raspberry Pi a mikrokontroléru sa podarilo vytvoriť výpočtovú sústavu, ktorá dokáže v dostatočnej rýchlosti spracovať obraz z kamery a tiež disponuje hardvérovými rozhraniami jednoducho prepojitelnými s ďalšími perifériami. Navrhnutý algoritmus spracovania obrazu a výpočtu vychýlenia sa snaží o minimalizáciu výpočtovej zložitosti, avšak je použiteľný len vo vybraných modelových podmienkach. Odrazy svetelných zdrojov od povrchu navigačnej čiary môžu znemožniť jej detekciu, prípadne veľmi textúrovaný povrch po ktorom sa vozidlo pohybuje môže viesť k určeniu falošných súradníc navigačnej línie.

Koncept modelu vozidla je vytvorený tak, aby nebol špecificky závislý na ktorejkoľvek z použitých súčastí alebo inom príslušenstve a teda aj ľahko rozšíriteľný o ďalšiu funkcionality alebo senzory. Zároveň sa podarilo minimalizovať finančnú náročnosť na stavbu tohto vozidla na úroveň cca 235€/5875Kč, kde veľkú časť sumy tvoria nahraditeľné komponenty LEGO.

Časť modelu	Cena (cca)
Stavebnica LEGO 9395	100€/2500Kč
LEGO Motor M	30€/750Kč
TowerPro Micro Servo 180°SG90	6€/150Kč
Raspberry Pi 3 Model B	44€/1100Kč
5Mpx kamera pre Raspberry Pi	12€/300Kč
Arduino Nano (klon)	10€/250Kč
Power-banka	18€/450Kč
Podporné moduly a súčiastky	15€/375Kč

Literatúra

- [1] *Introducing the Raspberry Pi Cameras* [online]. [cit. 2022-5-11]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html>.
- [2] *Materials in LEGO® elements* [online]. [cit. 2022-5-10]. Dostupné z: <https://www.lego.com/ms-my/sustainability/product-safety/materials/>.
- [3] *Everything You Want to Know About Raspberry Pi* [online]. 2017 [cit. 2022-5-12]. Dostupné z: <https://www.circuits.dk/everything-about-raspberry-gpio/>.
- [4] *Image Processing in OpenCV*. 1.8.13. OpenCV, máj 2022. Dostupné z: https://docs.opencv.org/4.x/d2/d96/tutorial_py_table_of_contents_imgproc.html.
- [5] ANDREI, M.-A., BOIANGIU, C.-A., TARBĂ, N. a VONCILĂ, M.-L. Robust Lane Detection and Tracking Algorithm for Steering Assist Systems. *Machines*. 2022, zv. 10, č. 1. ISSN 2075-1702.
- [6] CAMPION, G., BASTIN, G. a DANDREA NOVEL, B. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. IEEE. 1996, zv. 12, č. 1, s. 47–62.
- [7] FRYDLEWICZ, P. *LiDAR and ToF Cameras – Technologies explained* [online]. November 2018 [cit. 2022-4-24]. Dostupné z: <https://tof-insights.com/time-of-flight-lidar-and-scanners-technologies-explained/>.
- [8] GUL, F., RAHIMAN, W. a ALHADY, S. S. N. A comprehensive study for robot navigation techniques. *Cogent Engineering*. Cogent OA. 2019, zv. 6, č. 1, s. 1632046. DOI: 10.1080/23311916.2019.1632046.
- [9] HAZUCHA, I. *Samočinné řízení modelu vozidla*. Brno, 2021. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/thesis/23361/>.
- [10] HEATH, J. *Pulse Width Modulation: What is it and how does it work?* [online]. Apríl 2017 [cit. 2022-5-13]. Dostupné z: <https://www.analogictips.com/pulse-width-modulation-pwm/>.
- [11] IVANJKO, E., PETRINIC, T. a PETROVIC, I. Modelling of mobile robot dynamics. In: *7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*. 2010, sv. 2.
- [12] MAKSIMOVIC, M., VUJOVIC, V., DAVIDOVIĆ, N., MILOSEVIC, V. a PERISIC, B. Raspberry Pi as Internet of Things hardware: Performances and Constraints. In: Jún 2014.

- [13] MCINTOSH, J. *How It Works: Differentials* [online]. Január 2021 [cit. 2022-5-10]. Dostupné z: <https://driving.ca/column/how-it-works/how-it-works-differentials>.
- [14] MYLLYLÄ, R., MARSZALEC, J., KOSTAMOVAARA, J., MÄNTYNIEMI, A. a ULBRICH, G.-J. Imaging distance measurements using TOF lidar. *Journal of Optics*. IOP Publishing. jun 1998, zv. 29, č. 3, s. 188–193. DOI: 10.1088/0150-536x/29/3/016.
- [15] OTSU, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979, zv. 9, č. 1, s. 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [16] PEÑA, E. a LEGASPI, M. G. UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter. *Analog Dialogue*. Analog Devices. December 2020, zv. 54, č. 4, s. 51–55.
- [17] RAJ, T., HASHIM, F. H., HUDDIN, A. B., IBRAHIM, M. F. a HUSSAIN, A. A survey on LiDAR scanning mechanisms. *Electronics*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2020, zv. 9, č. 5, s. 741.
- [18] SIEGWART, R., NOURBAKHSI, I. R. a SCARAMUZZA, D. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. 2. vyd. The MIT Press, 2011. ISBN 0262015358.
- [19] SOURMEY, I. *All about batteries* [online]. Január 2022 [cit. 2022-5-7]. Dostupné z: <https://www.saftbatteries.com/energizing-iot/charging-your-lithium-ion-batteries-5-expert-tips-longer-lifespan>.
- [20] STOJAN, R. *Autonomní řízení modelu vozidla*. Brno, 2020. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/thesis/23091/>.
- [21] TAHERI, H., QIAO, B. a GHAEMINEZHAD, N. Kinematic model of a four mecanum wheeled mobile robot. *International Journal of Computer Applications*. Marec 2015, zv. 113, č. 3, s. 6–9. DOI: 10.5120/19804-1586.
- [22] TOA, M. a WHITEHEAD, A. *Ultrasonic Sensing Basics*. Texas Instruments Incorporated, 2019. Application Note SLAA907D. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slaa907d/slaa907d.pdf>.
- [23] ZHANG, J. *PID Controller Intro: Controlling a Self-Driving Car to Follow a Path* [online]. December 2019 [cit. 2022-5-15]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/pid-controller-intro-26fda41aaa59>.

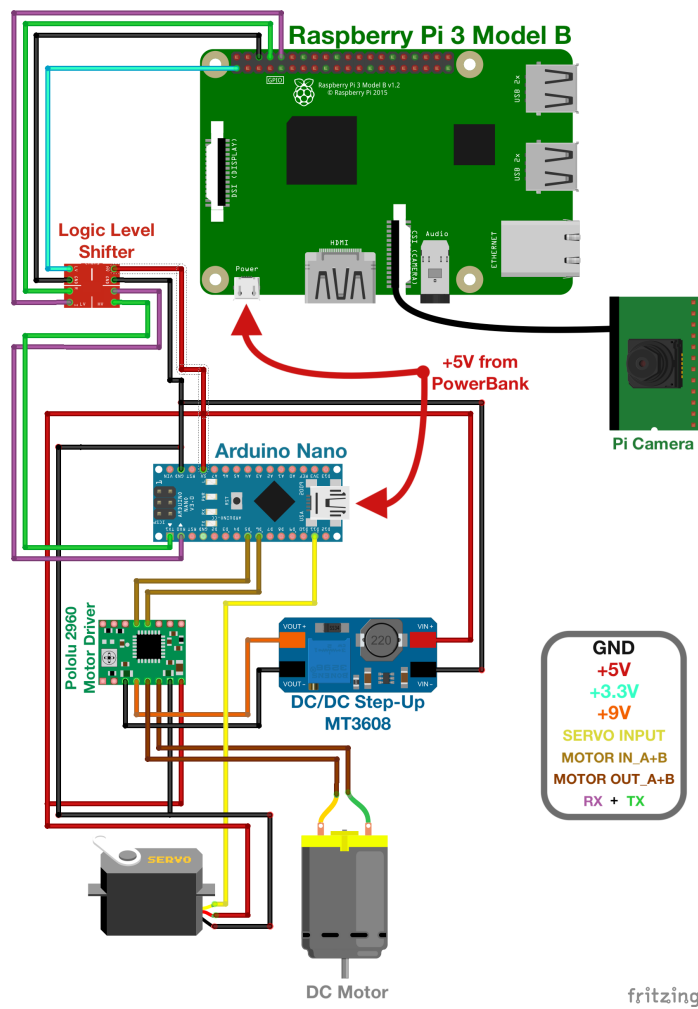
Príloha A

Obsah priloženého pametového média

- **src/** obsahuje zdrojové kódy *lineFollower.py* a *arduinoController.ino*
- **latex/** obsahuje zdrojové kódy L^AT_EX
- **pdf/** obsahuje *bp-xkubov08.pdf*
- **others/** obsahuje súbor so zoznamom závislostí jazyka Python a demonštračné videá

Príloha B

Diagram zapojenia



Obr. B.1: Diagram zapojenia komponentov modelu vozidla.

Príloha C

Fotografie modelu



Obr. C.1: Fotografie finálnej podoby modelu vozidla.