

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

VYTVOŘENÍ ŘÍDÍCÍHO SOFTWARE PRO ROBOTICKÉ VOZÍTKO

Pavel Vodička

Bakalářská práce
2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel Vodička**
Osobní číslo: **I12092**
Studijní program: **B2646 Informační technologie**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Vytvoření řídicího softwaru pro robotické vozítko**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je vytvoření řídicího software pro semi-autonomní robotické vozítko s diferenciálním pohonem. Tento software musí zajišťovat jak řízení na nejnižší úrovni, tak i zpracování požadavků od nadřazeného systému a dat ze sensorů. Na vyšší úrovni pak řídicí algoritmus zajišťuje autonomnost robota (určení polohy a natočení robota, návrh trajektorie robota na základě dat ze sensorů a informací z nadřazeného systému, atd). Součástí práce je i verifikace vytvořeného softwaru.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

VÁŇA, V. Mikrokontroléry Atmel AVR - assembler. Praha: BEN - technická literatura, 2003. 144 s. ISBN 80 7300-093-8.

VÁŇA, V. Mikrokontroléry Atmel AVR - popis procesoru a instrukční soubor. Praha: BEN - technická literatura, 2003. 336 s. ISBN 80 7300-083-0.

NOVÁK, P. Mobilní roboty - pohony, senzory, řízení. Praha: BEN - technická literatura, 2007. 248 s. ISBN 80 7300-141-1.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Škrabánek, Ph.D.

Katedra řízení procesů

Konzultant bakalářské práce:

Sule Yildirim-Yayilgan

Norwegian university of science and technology, NTNU
i Gjøvik

Datum zadání bakalářské práce:

6. prosince 2014

Termín odevzdání bakalářské práce:

13. května 2016



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2016

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 09. 05. 2016

Pavel Vodička

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu Ing. Pavlu Škrabánkovi, Ph.D. a Dr. Şule Yildirim Yayilgan, Associate Prof., za jejich čas a cenné rady které mi velice pomohly při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych pak rád poděkoval těm, kteří mě podporovali během studia především pak rodině za morální a finanční podporu, kterou mi poskytovali.

V Pardubicích dne 09. 05. 2016

Pavel Vodička

ANOTACE

Práce je věnována vytvoření programu pro autonomního robota. Role robota je projet bludiště bez kontaktu s překážkami a plnění úkolů od nadřazeného systému. Program je vypracován v prostředí Arduino.

KLÍČOVÁ SLOVA

autonomní, Arduino, mobilní robot, orientace v bludišti, řídicí algoritmus, zpracování dat ze senzorů

TITLE

CREATING OF A CONTROL SOFTWARE FOR A MOBILE ROBOT PLATFORM

ANNOTATION

The work is oriented to creating the program for autonomous robot. Robot task is to drive through maze without contact with obstacles and to fulfil tasks from superior system. Program is developed in Arduino software.

KEYWORDS

Autonomous, Arduino, Mobile robot, Orientation in maze, Control algorithm, Processing of sensor data

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam zkratk | 9 |
| Seznam značek | 10 |
| Seznam ilustrací | 11 |
| Seznam tabulek | 12 |
| ÚVOD | 13 |
| 1 MOBILNÍ ROBOTI | 14 |
| 1.1 TYPY ROBOTŮ PODLE KONSTRUKCE | 14 |
| 1.2 AUTONOMNOST ROBOTŮ | 15 |
| 2 LABORATORNÍ ÚLOHA | 16 |
| 2.1 OBECNÝ POPIS ÚLOHY A JEJÍHO PRAKTICKÉHO VYUŽITÍ | 16 |
| 2.2 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ ROBOTA | 17 |
| 2.2.1 Senzory | 18 |
| 2.2.2 CPU | 20 |
| 2.2.3 Komunikační rozhraní | 20 |
| 2.2.4 Vývojové prostředí a jazyk | 20 |
| 2.3 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ BLUDIŠTĚ | 22 |
| 2.4 KOMUNIKACE S NADŘAZENÝM SYSTÉMEM | 23 |
| 3 PRAKTICKÁ ČÁST | 25 |
| 3.1 ANALÝZA PROBLÉMU | 25 |
| 3.2 ZPRACOVÁNÍ DAT ZE SENZORŮ | 27 |
| 3.2.1 Optické senzory | 27 |
| 3.2.2 Magnetický senzor | 32 |
| 3.3 ŘÍZENÍ MOTORŮ | 36 |
| 3.3.1 Enkodéry | 37 |
| 3.3.2 Ovládání rychlosti otáčení | 39 |
| 3.4 FÚZE DAT ZE SENZORŮ A ŘÍZENÍ ROBOTA | 40 |
| 3.5 ŘEŠENÍ KOMUNIKACE S NADŘAZENÝM SYSTÉMEM | 47 |
| 4 ZÁVĚR | 50 |
| LITERATURA | 52 |
| Seznam příloh | 54 |

Seznam zkratek

| | |
|------------------|---|
| ALFUS | AUTONOMY LEVELS FOR UNMANNED SYSTEMS |
| ASCII | American Standard Code for Information Interchange |
| C | programovací jazyk |
| C++ | programovací jazyk |
| EEPROM | Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory |
| I ² C | Inter-Integrated Circuit |
| I/O | input/output – vstup/výstup |
| IDE | Integrated Development Environment – vývojové prostředí |
| IR | Infrared - infračervená |
| LED | Light-Emitting Diode |
| PWM | Pulse Width Modulation – pulzně šířková modulace |
| RAM | Random Access Memory |
| RX | pin 0 na desce arduina |
| USB | Universal Serial Bus |
| TX | pin 1 na desce arduina |

Seznam značek

| | |
|-----------|------------------------|
| φ | úhel otočení robota, ° |
| f | frekvence, Hz |
| i | dvoustavová proměnná |
| l | délka, m |
| p | dvoustavová proměnná |
| t | čas, s |
| U | elektrické napětí, V |
| x | osa x, μT |
| y | osa y, μT |
| z | osa z, μT |

Seznam ilustrací

| | |
|---|----|
| Obr. 2.1 – Fotografie Robota | 18 |
| Obr. 2.2 – Rozložení senzorů | 19 |
| Obr. 2.3 – Fotografie vnitřní části kola | 20 |
| Obr. 2.4 – Vývojové prostředí Arduino | 21 |
| Obr. 2.5 – Náčrt bludiště | 22 |
| Obr. 2.6 – Fotografie bludiště | 23 |
| Obr. 2.7 – Změna směru robota | 24 |
| Obr. 3.1 – Robot v bludišti | 25 |
| Obr. 3.2 – Sestavené bludiště..... | 26 |
| Obr. 3.3 – Graf bludiště | 26 |
| Obr. 3.4 – Průměr z měření levého bočního optického senzoru | 29 |
| Obr. 3.5 – Průměrné hodnoty z měření P a L čelního senzoru | 31 |
| Obr. 3.6 – Magnetické pásky | 32 |
| Obr. 3.7 – Řízení se zpětnou vazbou | 36 |
| Obr. 3.8 – Závislost pulzů enkodéru na počet stupňů..... | 38 |
| Obr. 3.9 – Zjednodušený diagram řízení robota | 41 |
| Obr. 3.10 – Inicializace robota..... | 42 |
| Obr. 3.11 – Čtení instrukce a výběr akce..... | 42 |
| Obr. 3.12 – Vykonání instrukce..... | 42 |
| Obr. 3.13 – Opuštění buňky..... | 43 |
| Obr. 3.14 – Vjezd do nové buňky | 43 |
| Obr. 3.15 – Hledání středu buňky..... | 44 |
| Obr. 3.16 – Trasa robota v bludišti | 44 |
| Obr. 3.17 – Nastavení rozhraní bluetooth..... | 48 |
| Obr. 3.18 – Bluetooth modul HC-05 | 49 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 3.1 – Měření levého bočního senzoru..... | 28 |
| Tab. 3.2 – Měření čelních senzorů první část | 29 |
| Tab. 3.3 – Měření čelních senzorů druhá část | 30 |
| Tab. 3.4 – Měření čelních senzorů třetí část | 30 |
| Tab. 3.5 – Měření magnetické indukce nad páskou A..... | 33 |
| Tab. 3.6 – Měření magnetické indukce mimo pásku..... | 34 |
| Tab. 3.7 – Měření ujeté vzdálenosti na počet pulzů enkodéru | 37 |
| Tab. 3.8 – Měření otočení robota s enkodéry – doleva..... | 37 |
| Tab. 3.9 – Možné polohy robota v buňce se dvěma bočními stěnami..... | 45 |
| Tab. 3.10 – Chování robota v buňce se dvěma bočními stěnami | 45 |
| Tab. 3.11 – Možné polohy robota v buňce s chybějícími stěnami | 46 |
| Tab. 3.12 – Chování robota v buňce bez jedné nebo dvou bočních stěn..... | 47 |

ÚVOD

Cílem této práce je vytvoření řídicího software pro robotické semi-autonomní vozítko. Robot musí být schopený projet bludištěm bez nárazu a zároveň plnit úkoly zadané nadřazeným systémem. Tato práce je mezičlánkem většího projektu – vytvoření bludiště s několika roboty, kteří komunikují mezi sebou a s nadřazeným systémem. Tento projekt bude použit pro výuku umělé inteligence. V souvislosti s touto prací byl proveden výzkum a vývoj v oblasti lokalizace robota pomocí magnetických značek, výsledky byly shrnuty do článku (Škrabánek, 2016).

Tato bakalářská práce je rozdělena na teoretickou část, laboratorní úlohu a praktickou část.

V teoretické části naleznete přehled druhů mobilních robotů, vysvětlení pojmu autonomnost a její dělení.

V laboratorní úloze naleznete vlastnosti a rozměry bludiště, popis a vlastnosti robota a seznámení s vývojovým prostředím a nadřazeným systémem.

V praktické části naleznete podrobně rozebrané ovládání jednotlivých senzorů, motorů a jejich výstupní data. Následně pak popsany řídicí program a komunikaci mezi robotem a nadřazeným systémem.

1 MOBILNÍ ROBOTI

V následující kapitole a jejích oddílech se nachází teoretická část této práce. Čtenář zde nalezne rozdělení robotů podle konstrukce a vysvětlení pojmu autonomní robot a jejich dělení.

K porozumění robotů bylo nezbytné nastudování patřičné literatury. Úvodem bych rád citoval jednu z nich:

Když se roboti předvedli jako efektivní nástroj pro zlepšení kvality, produkce a konkurenceschopnosti mezi výrobními organizacemi, začali expandovat jako obsluha organizací, kancelářím, nebo domácnostem. Globální závod a snaha o redukování výrobní ceny výrobků a zvýšení efektivity dává příležitost mobilním robotům na vykonávání práce, kterou stacionární roboti vykonat nemohou. Od robotů je tak požadován pohyb a zároveň vykonávání určitých aktivit ve stejném čase. Dostupnost a nízká cena rychlejších procesorů, lepšího programového vybavení a nového hardwaru umožňují designerům vyrobit přesnější, rychlejší a bezpečnější roboty. (Buchli, 2006)

1.1 TYPY ROBOTŮ PODLE KONSTRUKCE

Spousty různých druhů robotů bylo navrženo tak, aby vyhovovaly druhu použití, rychlosti a druhu prostředí - voda země vzduch a vesmír, s pevnými nebo pohyblivými se překážkami. Určujeme čtyři hlavní kategorie (Buchli, 2006):

- **Pozemní nebo s dotykem:** nejčastější druh robotů v této kategorii jsou vybaveni koly. Další vozidla používají pásy nebo končetiny (limbs).
- **Vodní roboti:** Operují na hladině nebo pod ní. K tomu využívají vodní trysky nebo vrtule.
- **Letečtí roboti:** Letečtí roboti jako robotické helikoptéry, drony, letadla, roboticky ovládané padáky a vzducholodě.
- **Vesmírní roboti:** Tito roboti jsou navrženi na operaci v mikrogravitaci vesmíru a běžně jsou použiti na údržbu stanic. Vesmírní roboti se pohybují buď šplhem, nebo nezávislým pohonem (independently propelled).

1.2 AUTONOMNOST ROBOTŮ

Výraz autonomní můžeme přeložit jako samosprávný, nezávislý, spontánní nebo samovolný.

Úrovně autonomnosti robotů (ALFUS) se podrobně zabývá (Huang, 2007):

- **dálkové ovládání** (úroveň 1): druh bezpilotního robota bez sebeurčení a nezávislosti. Vnímání, analýza, plánování a rozhodování je prováděno člověkem, který řídí systém vzdáleně. Člověk tedy řídí všechny akce, je to příklad maximálního vlivu člověka na robota.
- **Teleoperace** (úroveň 2): druh bezpilotního robota který má za úkol sledování prostředí a hlášení stavu. Všechno plánování, analyzování a rozhodování je prováděno člověkem. Většina sledování je taktéž prováděna člověkem.
- **Řízení člověkem** (úroveň 3): druh bezpilotního robota, který umožňuje člověku přímé sledování s tím, že je potřeba aby systém sám sledoval své prostředí a hlásil jeho stav. Většina analýzy, plánování a rozhodování je prováděno člověkem, vnímání a vykonávání je sdílené s člověkem.
- **Podporovaný člověkem** (úroveň 4): druh bezpilotního robota, který sleduje prostředí a hlásí stav člověku. Analýza, plánování a rozhodování je částečně vykonáno člověkem a částečně systémem, většina vnímání a vykonávání je prováděna bezpilotním systémem.
- **Autonomní** (úroveň 5): druh bezpilotního robota s maximální úrovní nezávislosti a sebeurčení v rámci schopností a omezení systému. Tím že je systém ovlivněn člověkem minimálně, je potřeba, aby veškeré vnímání, vykonávání, analyzování, plánování a rozhodování bylo prováděno strojem. Pouze komunikace a spolupráce může být vykonávána člověkem.

2 LABORATORNÍ ÚLOHA

V této kapitole naleznete obecný popis laboratorní úlohy. Její součástí je mobilní robot a detailní popis jeho technického řešení. Pozornost je také věnována jeho senzorům a způsobům komunikace s nadřazeným systémem. Dále je uveden popis vývojového prostředí Arduino a technické řešení bludiště

2.1 OBECNÝ POPIS ÚLOHY A JEJÍHO PRAKTICKÉHO VYUŽITÍ

Cílem práce je vytvořit řídicí program pro semi-autonomního robota. Je potřeba, aby byl robot schopen projet skrz bludiště bez poškození bludiště nebo sebe sama.

Existuje bludiště, které se skládá z podlahy, zdí a sloupců. Do podlahy bludiště jsou upevněny sloupce a do sloupců mohou být vloženy stěny, to záleží na požadovaném rozestavění bludiště. Bludiště je rozděleno na buňky, ty mají čtvercový tvar – v každém rohu čtverce se nachází sloupec. Podrobněji bude bludiště rozebráno v oddílu 2.3.

Semi-autonomnost robota vychází ze schopnosti orientace v rámci buňky, ve které se nachází. Robot také rozpozná změnu vjezd do nové buňky a dokáže sám najít její střed.

Robot musí dávat pozor na stěny a sloupce, které jsou překážkou a zároveň plnit zadané úkoly nadřazeným systémem.

Nadřazený systém obsahuje plánovací program, který komunikuje s robotem a stará se o plánování trasy v bludišti. Disponuje kamerou na sledování pozice robota v bludišti. Ta je, mimo jiné, důležitá součást v komunikaci s robotem.

Aby byl robot schopen projet bludištěm, potřebuje znát trasu, tu obdrží od nadřazeného systému pouze tehdy, kdy se nachází jeho větší část v nové buňce. Což pozná jak kamera, tak robot samotný.

Zadané úkoly od nadřazeného systému jsou, zjednodušeně, jízda z výchozího bodu do cíle s tím, že cíl se může kdykoliv změnit a tedy je nutné změnit trasu. Robot obsahuje paměť, buffer, aby byl v případě výpadku komunikace schopen alespoň po určitou dobu pokračovat v jízdě.

Jako skvělý příklad praktického využití této práce jsou logistické operace, nebo mapování neznámého terénu pokud ovšem pomineme rozdíl mezi laboratorním prostředím a prostředím mimo laboratoř.

2.2 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ ROBOTA

Robot byl navrhnout a sestaven na půdě Univerzity Pardubice, Fakultě elektrotechniky a informatiky panem Ing. Liborem Havlíčkem, Ph.D. Rozměry robota jsou $110 \times 94 \times 83$ mm bez bluetooth modulu. Je řízen jednotkou Arduino Uno. Ta má 20 vstupních/výstupních pinů z toho 14 digitálních a 6 analogových. Pracuje na frekvenci až 16 MHz.

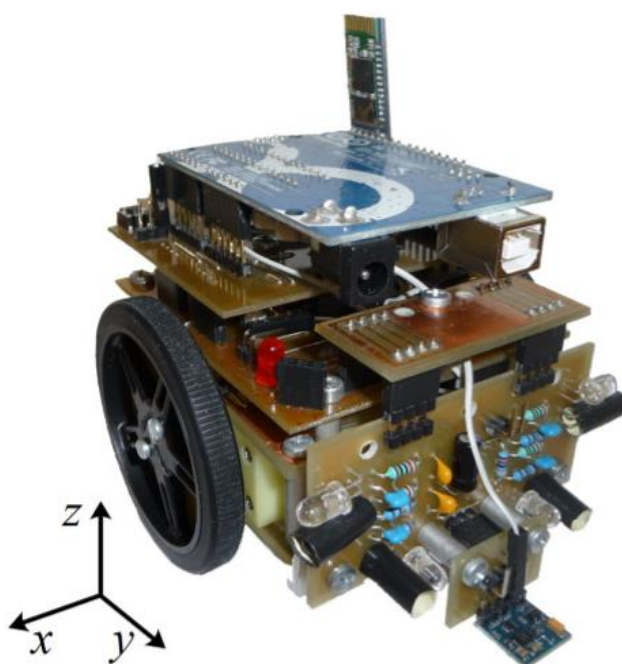
Komunikace mezi počítačem a robotem je možná přes USB rozhraní, nebo přes bluetooth HC-05.

Robot je posazen na diferenciálním podvozku. Diferenciální podvozek popsal ve své práci student této fakulty. Popisuje jej takto (Konfršt, 2012):

„Diferenciální podvozek obsahuje dvě nezávisle na sobě ovládaná (hnaná) kola, která zajišťují pohyb a zároveň umožňují zatáčet. Diferenciální podvozek je nazýván proto, že změna orientace je závislá na rozdílu rychlosti pohybu levého a pravého kola. Pro stabilizaci celého robota je použit opěrný bod, může být tvořen jedním kolečkem s jedním nebo více stupni volnosti. Jako pohon jsou nejčastěji používány malé stejnosměrné motory, nebo krokové motory. Pokud se kola točí stejně rychle a stejným směrem, robot jede rovně. Pokud se točí stejně rychle ale opačným směrem, robot se otáčí kolem středu (osy nápravy). V případě že se kola točí stejným směrem ale různou rychlostí, robot se pohybuje po kružnici a zatáčí směrem ke kolu s menšími otáčkami. Výhodou diferenciálního podvozku je jednoduchá a robustná konstrukce, nízká cena a přitom relativně přesná odometrie.“

Na obr. 2.1 můžete vidět použitého robota. Osa znázorňuje orientaci robota, ta je pak důležitá pro magnetický senzor.

Vytvořený robot používá dva motory (L293D, 2016) které jsou umístěné proti sobě a opěrný bod je tvořen uchycenou kuličkou.



Obr. 2.1 – Fotografie Robotu

Robot je dále osázen třemi druhy senzorů: magnetický, čtyři optické a dva enkodéry. Dílčí senzory za běžných podmínek nejsou moc přesné, a rozhodně nestačí, aby se robot mohl pohybovat v bludišti jen díky jednomu druhu z uvedených senzorů. Avšak při použití všech senzorů najednou se přesnost výrazně zvýší.

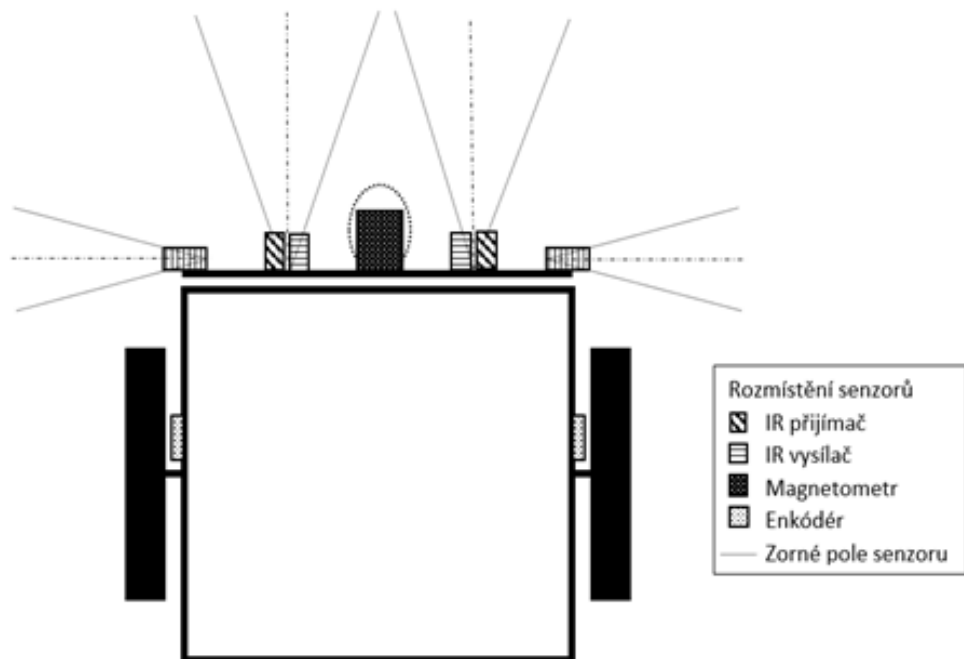
2.2.1 Senzory

Senzory jsou určeny pro sledování prostředí, ve kterém se robot pohybuje. Díky výstupním datům a po aplikaci logiky je robot schopen vyhýbat se překážkám, znát svou pozici v buňce a rozpoznat příjezd do nadcházející buňky.

Robot využívá enkodéry a optické senzory na měření vzdálenosti, magnetický pak na rozpoznání příjezd do nové buňky. Na obr. 2.2 můžete vidět rozložení senzorů a jejich zorné pole. Optické senzory jsou umístěné na čelním panelu robota. Skládají se z párů, IR – infračerveného vysílače (L-53F3C, 2012) a fototranzistoru (L-53P3BT, 2012). Dva senzory jsou připevněny tak, aby směřovaly zorným polem před robota a další dva po stranách robota (pravé i levé). Optické senzory mají dosah až na vzdálenost dvou buněk, tabulky z měření optickými senzory můžete nalézt v příloze. Čelní senzory sledují, zda je jízda v před bezpečná, zatímco krajní senzory jsou určeny na sledování, zda se robot nestáčí k jedné ze stěn.

Uprostřed předního panelu robota se nachází tříosý senzor magnetického pole (HMC5883L, 2013), k robotovi je připojen přes I²C sběrnici. Tento magnetometr je velice citlivý, naneštěstí však robot produkuje silné elektromagnetické pole, které jeho citlivost snižuje.

Poslední druh senzoru jsou enkodéry (QRD1114, 2005). Jsou to optické senzory připevněné k bočním stranám robota tak, aby mířily na kola. Na kolech z vnitřní strany se nachází černobílý kruh a enkodéry detekují změnu stavu. Enkódér se skládá z infračervené emitující diody a fototranzistoru. Jejich rozlišení je cca 1 pulz = 1 cm (jeden přečtený pulz znamená, že se robot posunul o jeden centimetr).



Obr. 2.2 – Rozložení senzorů

Pro bližší představu jak použité enkodéry pracují, přikládám fotografii vnitřní části kola obr. 2.3. Senzor je umístěn cca půl centimetru od kola a sepne tehdy, když se před ním nachází reflektivní plocha. Senzor zaznamená změnu stavu a inkrementuje proměnnou. Ta reprezentuje ujetou vzdálenost robota od výchozího bodu.



Obr. 2.3 – Fotografie vnitřní části kola

2.2.2 CPU

Na desce Arduina Una je zasazen do patice mikroprocesor (ATmega328P, 2015), 8 bit s kmitočtem 0 až 20 MHz, 23 I/O pinů a paměť 1k EEPROM a 2k RAM a 32k FLASH. Díky tomu že je zasazen do patice lze v případě poruchy jednoduše vyměnit.

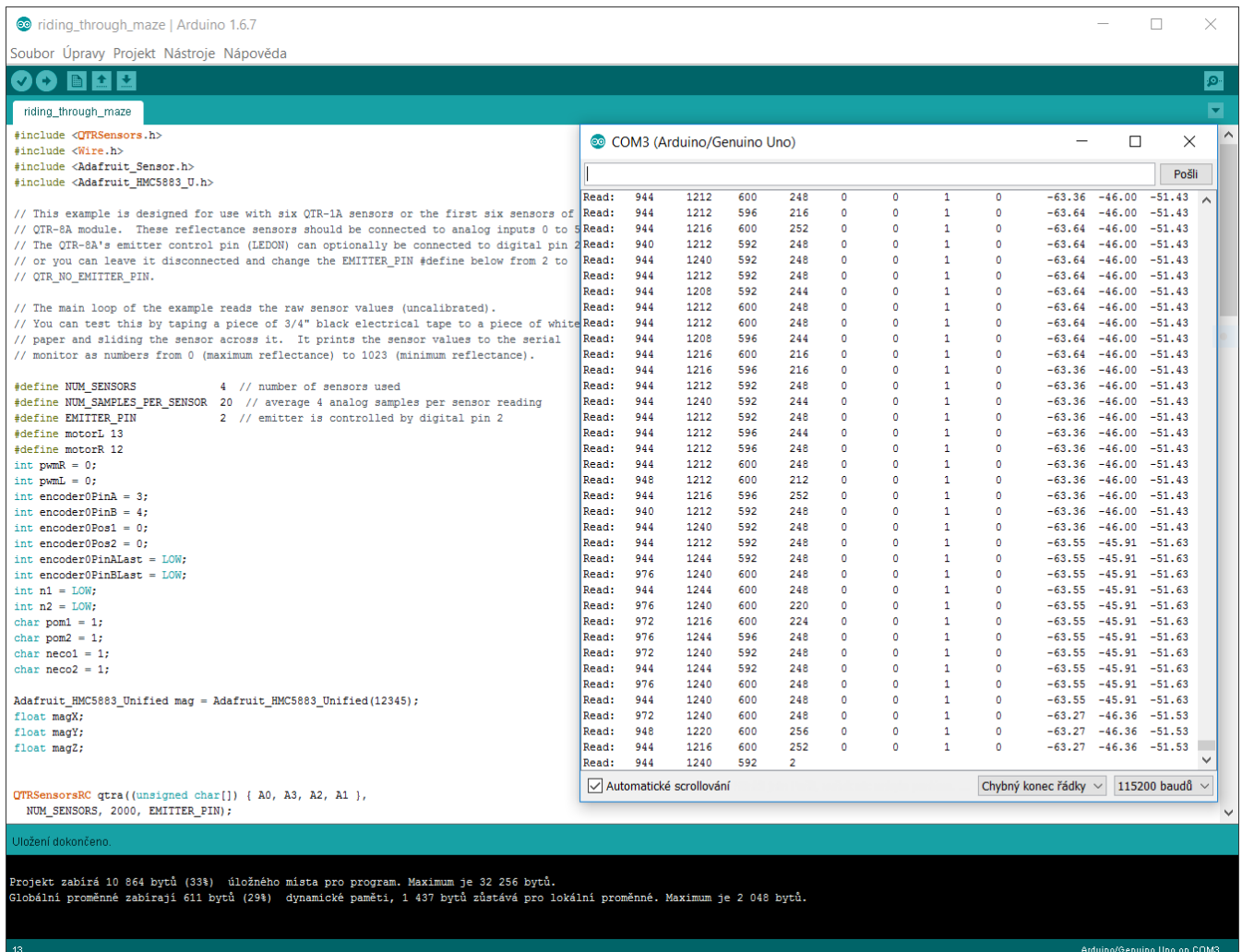
2.2.3 Komunikační rozhraní

Jako komunikační rozhraní lze použít USB nebo bluetooth modul HC-05. USB je zabudované do desky Arduina, bluetooth má vlastní patici na zadní části robota. Ve stejném čase lze použít pouze jedno z uvedených zařízení, z důvodu sdílení stejných pinů na desce Arduina (RX, TX). Pro jízdu v bludišti bude použito pouze bluetooth, nicméně bez USB nelze nahrát do Arduina program a odladění kódu je mnohem rychlejší. Maximální přenosová rychlost pro bluetooth je až 460800 Baud.

2.2.4 Vývojové prostředí a jazyk

Jako vývojové prostředí bylo použito open-source Arduino Software (IDE) verze 1.6.8 napsané v Javě. V Arduino IDE lze psát v C/C++. Obsahuje seriál monitor pro komunikaci s robotem přes USB nebo bluetooth.

Na obr. 2.4 můžete mimo jiné vidět sériový monitor Arduina, kde lze nastavit rychlost přenosu (baud rate), ta musí být shodná s nastavenou rychlostí přenosu v robotovi. Dále obsahuje textové pole pro odeslání dat. V názvu sériového monitoru i v levém dolním rohu lze vidět že Arduino je připojeno na portu 3. V konzoli IDE lze vidět kolik paměti projekt zabírá a kolik zabírají globální proměnné.



Obr. 2.4 – Vývojové prostředí Arduino

Samotný kód je rozdělen do dvou hlavních částí a to je: `void setup()` a `void loop()`. V `setup` části se nachází kód který je potřeba, aby běžel pouze jednou před hlavním kódem - inicializace. V `loop` pak běží smyčka hlavního kódu.

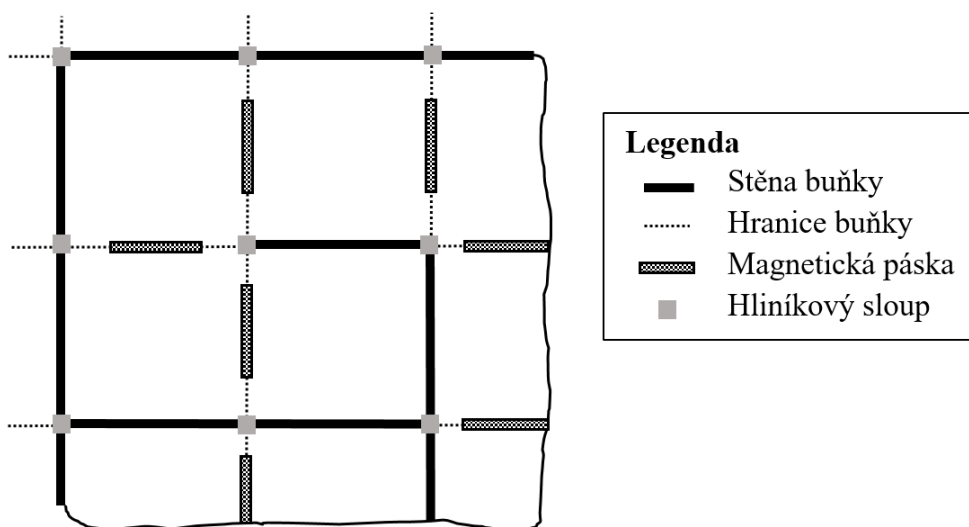
Pro komunikaci Arduina se zařízením připojeným ať už přes bluetooth nebo USB je nutné nastavení sériové linky. To se provede vložním následujícího kódu do `setup`:

```
Serial.begin(9600);
```

kde číslo v závorce znamená rychlost přenosu (baud rate). Rychlost přenosu musí být podporována zařízením a shodná s nastavením v terminálu, aby bylo možné číst data.

2.3 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ BLUDIŠTĚ

Bludiště je vyrobeno ze dřevěného základu a stěn, které jsou natřené bílou barvou pro vylepšení optické vlastnosti, a hliníkových sloupců. Bludiště je sestaveno ze čtvercových buněk o rozměrech přibližně 20×20 cm tj. délka stěn a sloupců. Stěny jsou zasazeny do sloupců a sloupce kovových vložek a ty jsou pevně zasazeny do desky. Tento mechanismus umožňuje lehkou modifikaci, nebo rozšíření bludiště.



Obr. 2.5 – Náčrt bludiště

Mezi sloupci - bránou mezi buňkami je uprostřed umístěná magnetická páska o rozměrech 60×6 mm. Rozměry magnetické pásky byly zvoleny na základě jednoduchého měření - bylo potřeba, aby robot pokaždé přešel a rozpoznal magnetickou pásku. Pro robota, který má zhruba 10×10 cm tedy zbývá přibližně, po odečtení šířky stěn 4 až 5 cm na každé straně. Tabulku z měření naleznete v příloze. Problematiku naleznete podrobně popsanou v (Škrabánek, Vodička, [v tisku]). Na obr. 2.6 můžete vidět část bludiště.



Obr. 2.6 – Fotografie bludiště

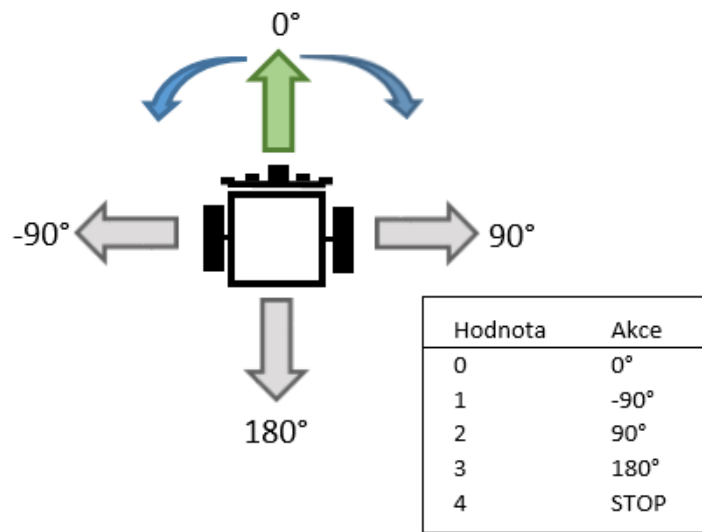
2.4 KOMUNIKACE S NADŘAZENÝM SYSTÉMEM

Komunikace s nadřazeným systémem je nezbytná pro zadání úkolu robotovi. Nadřazený systém může být například tablet nebo počítač. Ten zpracovává výstupní data z kamery a na základě jejich dat a požadavků uživatele je vytvořena trasa (path-planning). Komunikace probíhá přes bluetooth. Z počítače se data odesílají z programu Matlab. Na počátku robot obdrží 5 hodnot, tedy robot zná trasu na 5 buněk dopředu, včetně té, ve které se nachází.

Robot pojedí rovně, dokud se nedostane do středu bludiště, ve středu bludiště se rozhodne, zda má změnit směr a pokud ano, o kolik stupňů. Toto probíhá na základě dat uložených v bufferu.

Při přejetí do každé nové buňky se hodnoty v bufferu aktualizují. Robot je tak schopný dojet do správného cíle, změní-li se během jízdy.

Každá jedna hodnota může nabývat pouze 0, 1, 2, 3 nebo 4. Kde 0 znamená otočení o 0° , 1 otočení o -90° , tedy z pohledu robota doleva, 2 otočení o 90° , 3 otočení o 180° a 4 je STOP signál. Ve středu buňky bludiště bude daná operace provedena pouze jednou. Pro grafické znázornění je přiložen obr. 2.7.



Obr. 2.7 - Změna směru robota

3 PRAKTICKÁ ČÁST

V této kapitole čtenář nalezne analýzu problému, zpracování dat ze senzorů, ovládání motorů a řešení komunikace s nadřazeným systémem. To bude přiblíženo pomocí přiložených tabulek a grafů výstupních dat, vzorků kódu, kterými jsou senzory ovládány a postup, jak se robot rozhoduje na základě výstupních dat. Na obr. 3.1 můžete vidět část bludiště s robotem.



Obr. 3.1 – Robot v bludišti

3.1 ANALÝZA PROBLÉMU

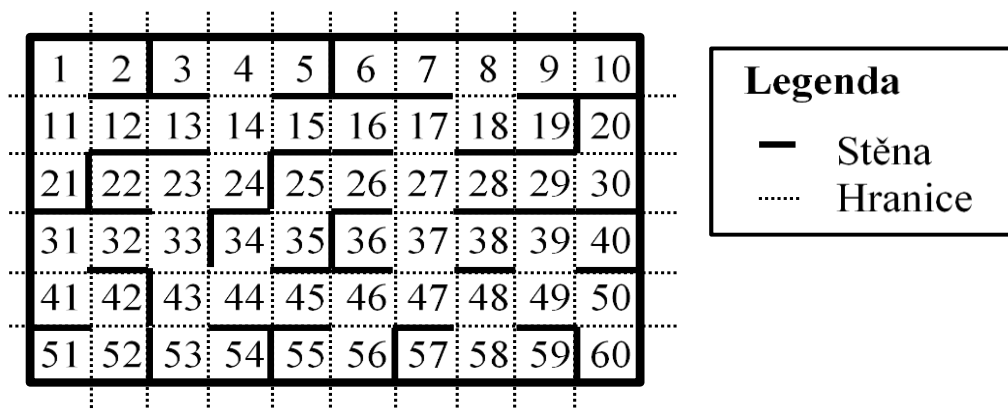
Bludiště je rozděleno na buňky. Plán pohybu je popsán jako sekvence akcí, které mají být vykonány v buňkách. Mapování bludiště provádí nadřazený systém. Ten robotovi naplánuje trasu, která se může kdykoliv během jízdy robota změnit a tomu je třeba přizpůsobit program.

Nadřazený systém obsahuje kameru, která robota sleduje. Aby robot obdržel aktualizaci trasy v pravou chvíli, je potřeba synchronizovat robota s nadřazeným systémem. S popisem kamery se čtenář může blíže seznámit v (Škrabánek, 2016).

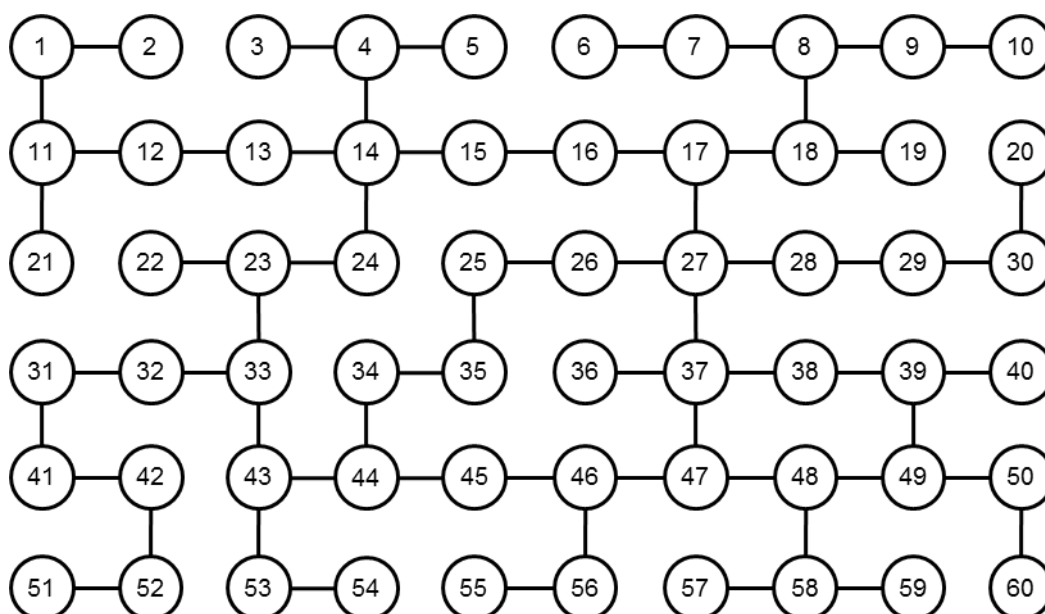
Robot také musí být odolný vůči výpadku spojení. V případě že komunikace vypadne, má robot vyčleněn kus paměti, který slouží jako buffer 5 hodnot. Robot je schopný při výpadku dat dojet až 5 dalších buněk.

Robot vnímá bludiště pouze v rámci jedné buňky. Bohužel robot nemá tolik paměti, aby mohl obsahovat rozsáhlé dvourozměrné bludiště. O to se tedy stará nadřazený systém, ve

kterém je bludiště reprezentováno jako graf. To si můžeme představit jako sestavené bludiště (obr. 3.2), které je převedeno na graf (obr. 3.3).



Obr. 3.2 – Sestavené bludiště



Obr. 3.3 – Graf bludiště

Bludiště bude reprezentováno v nadřazeném systému jako graf s počáteční buňkou v kořenu a studenti umělé inteligence, kam bude tento robot dodán jako učební pomůcka, budou řešit pomocí plánovacích algoritmů jak nalézt cestu. Podrobněji se s problematikou může čtenář seznámit v (Škrabánek, 2015). Trasu pak nadřazený systém předá robotovi. Při hledání trasy vzniká stromový graf.

Aby byl robot schopen projet bludištěm, musí být vytvořený řídicí program, který čerpá informace ze senzorů a podle informací vykonává akce. Tím se zabývá následující kapitola.

3.2 ZPRACOVÁNÍ DAT ZE SENZORŮ

V tomto oddíle se se čtenář podrobně seznámí s optickými a magnetickým senzorem robota. Naleznete zde v pododdílech, jak senzory fungují, jejich výstupní data a ovládání.

3.2.1 Optické senzory

Konstrukce čelního panelu s optickými senzory byla inspirována QTR-8RC modulem od společnosti (Pololu Robotics and Electronics, 2016). Ovládají se následujícím nastavením:

- Zapnutí IR LED,
- nastavení I/O pin na výstup,
- nechat zapnuté alespoň 10 μ s, aby se mohl kondenzátor nabít,
- přepnout I/O pin na vstup,
- počítat čas do vybití kondenzátoru, tedy počkat než napětí na I/O klesne.
- vypnutí IR LED.

Se silným odrazem, pokles napětí na I/O bude v řádu mikrosekund, s žádným odrazem v řádu milisekund.

Během denní doby se síla odrazu mění. Přes den kdy je přítomno více IR záření (ze slunce) se zkracuje doba vybití kondenzátoru, což snižuje rozlišení senzorů. Data jsem proto měřil v zatažených místnostech s umělým osvětlením. Síla odrazu také záleží na druhu materiálu a jeho barvě. Proto jsou stěny bludiště pouze z jednoho druhu materiálu (avšak sloupce jsou z jiného) a natřené stejnou barvou.

Při vytvoření řídicího programu robota je potřeba vědět, v jakém formátu jsou data a zdali zůstanou stejná po celou dobu běhu robota. S optickými senzory jsem provedl několik měření a našel jsem jisté nepřesnosti senzoru. V rámci vzdálenosti, ve kterých se robot pohybuje, se hodnoty drží v desítkách mikrosekund. Příložená tab. 3.1 je z měření bočního levého senzoru. Další tabulky a grafy z měření optickými senzory můžete nalézt v příloze.

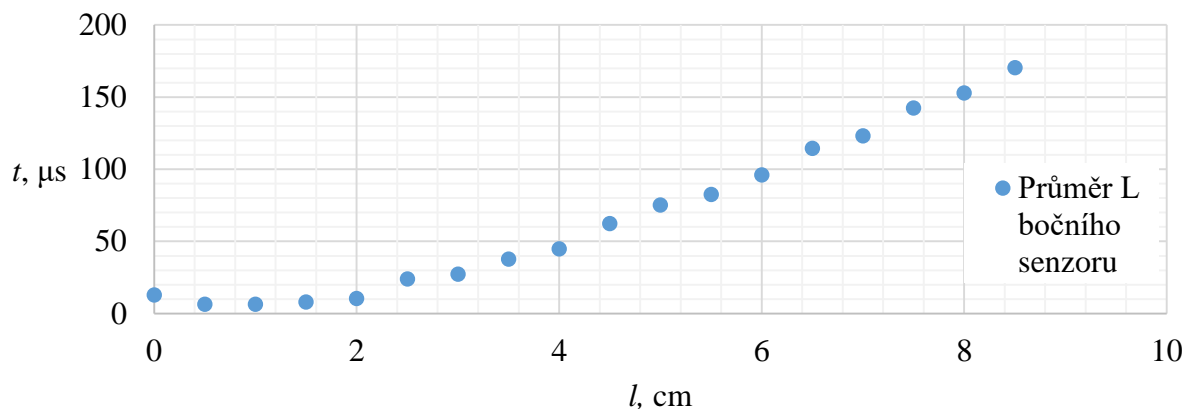
Tab. 3.1 – Měření levého bočního senzoru

| l , cm | měření 1 t , μs | měření 2 t , μs | měření 3 t , μs | měření 4 t , μs | měření 5 t , μs | průměr t , μs |
|----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 8.5 | 164 | 148 | 160 | 164 | 216 | 170 |
| 8 | 144 | 144 | 144 | 152 | 180 | 153 |
| 7.5 | 124 | 144 | 128 | 132 | 184 | 142 |
| 7 | 112 | 108 | 128 | 116 | 152 | 123 |
| 6.5 | 108 | 108 | 112 | 100 | 144 | 114 |
| 6 | 92 | 92 | 92 | 92 | 112 | 96 |
| 5.5 | 72 | 76 | 76 | 80 | 108 | 82 |
| 5 | 76 | 76 | 76 | 56 | 92 | 75 |
| 4.5 | 56 | 56 | 60 | 60 | 80 | 62 |
| 4 | 40 | 40 | 44 | 40 | 60 | 45 |
| 3.5 | 40 | 40 | 24 | 44 | 40 | 38 |
| 3 | 24 | 24 | 24 | 24 | 40 | 27 |
| 2.5 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 2 | 8 | 8 | 4 | 8 | 24 | 10 |
| 1.5 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 1 | 8 | 8 | 8 | 4 | 4 | 6 |
| 0.5 | 4 | 8 | 8 | 8 | 4 | 6 |
| 0 | 4 | 8 | 4 | 8 | 40 | 13 |

Pro každý senzor jsem provedl alespoň pět měření, abych nashromáždil dostatek dat a zjistil tak chování senzoru. Výsledkem jsou pak hodnoty v tab. 3.1 a z obr. 3.4. V nich lze vyčíst mrtvou zónu pro senzor, která se nachází přibližně od 0 do 2 cm. Mrtvá zóna je označení intervalu (v tomto případě 0 až 2 cm) ve kterém senzory vrací stejnou hodnotu.

Robotovi zbývá cca 4 cm místa na každou stranu, pokud se drží ve středu buňky (místo na každou stranu = (šířka buňky - šířka robota) / 2). To není moc místa a rozlišení senzorů je na tak krátkou vzdálenost velmi slabé.

Řešení jsem našel následující: ve chvíli, kdy se robot ocitne jednou stranou v mrtvé zóně, měřím vzdálenost druhým senzorem, který se tak nachází dál od stěny a vrací přesnější data.



Obr. 3.4 – Průměr z měření levého bočního optického senzoru

Pro lepší představu jak čelní senzory pracují, rozeberu měření z čelních senzorů. Na čelním panelu jsou umístěny dva senzory. Dále označeny jako pravý (P) a levý (L) z pohledu robota. V tabulkách jsou uvedeny průměrné hodnoty z pěti měření.

Tab. 3.2 – Měření čelních senzorů první část

| | P | L |
|-------|-------|-------|
| l, cm | t, μs | t, μs |
| 6 | 124 | 138 |
| 5 | 100 | 113 |
| 4 | 79 | 95 |
| 3 | 60 | 60 |
| 2 | 43 | 46 |
| 1 | 24 | 32 |
| 0 | 21 | 24 |

Přední senzory jsou stejného druhu jako boční, sdílejí tedy stejnou mrtvou zónu. V tomto případě to ale není žádný problém. Na menší vzdálenost než 3 cm není nahlíženo jako na bezpečnou, robot nemá dostatek prostoru pro manévrování, navíc po přečtení hodnoty zastavení robota není okamžité. Robot má jistou setrvačnost, tedy se dostane ke stěně o něco blíže. Pokud je doba odrazu t menší než 60 μs robot obdrží informaci, že dál není bezpečné pohybovat se kupředu.

Tab. 3.3 – Měření čelních
senzorů druhá část

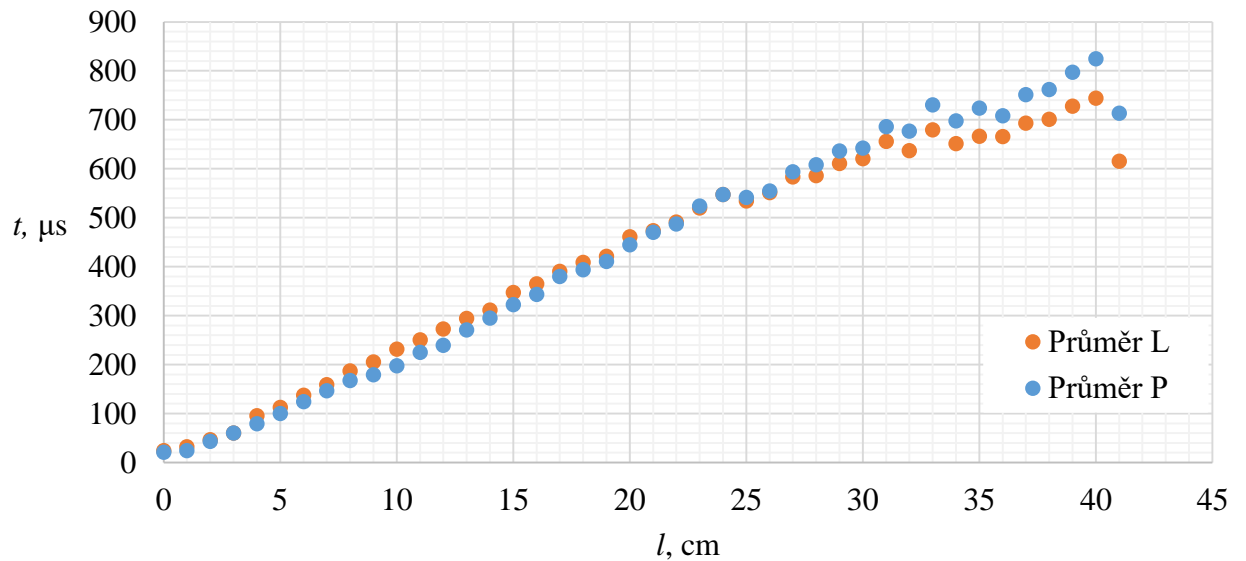
| | P | L |
|----------|---------------|---------------|
| l , cm | t , μ s | t , μ s |
| 20 | 445 | 461 |
| 19 | 410 | 421 |
| 18 | 394 | 409 |
| 17 | 380 | 390 |
| 16 | 343 | 365 |
| 15 | 322 | 347 |
| 14 | 295 | 311 |
| 13 | 270 | 294 |
| 12 | 239 | 273 |
| 11 | 225 | 250 |
| 10 | 198 | 231 |
| 9 | 179 | 206 |
| 8 | 167 | 187 |
| 7 | 146 | 159 |

Měření vzdálenosti od 3 do 20 cm s rozlišením na 1 cm vrací velmi dobré, lineární hodnoty, je-li intenzita světla neměnná. Jak můžete vidět v příložené tab. 3.3.

Tab. 3.4 – Měření čelních senzorů
třetí část

| | P | L |
|----------|---------------|---------------|
| l , cm | t , μ s | t , μ s |
| 30 | 642 | 621 |
| 29 | 636 | 610 |
| 28 | 608 | 586 |
| 27 | 594 | 583 |
| 26 | 554 | 551 |
| 25 | 542 | 534 |
| 24 | 547 | 547 |
| 23 | 524 | 520 |
| 22 | 487 | 491 |
| 21 | 470 | 474 |

Je vhodné, aby měly senzory lineární chování. Avšak je-li překážka dále než 23 cm, tak se stává, že optické senzory mají pro dvě různé vzdálenosti l stejnou hodnotu času t což je nepřijatelné. Není pak možné identifikovat správně vzdálenost robota od překážky. Jak můžete vidět v tab. 3.4 a na obr. 3.5, senzory nad 23 cm již ztrácí svou přesnost.



Obr. 3.5 – Průměrné hodnoty z měření P a L čelního senzoru

V příloze naleznete zbývající části tabulky s měřením čelních senzorů včetně jednotlivých měření pro senzor P a L.

Aby bylo možné senzory ovládat, je zapotřebí napsat kód. Arduino je známé tím že nabízí velké množství knihoven, které psaní kódu usnadňuje. Dále bude rozebrán kód pro ovládání optických senzorů.

Kód pro ovládání optických senzorů:

```
#include <QTRSensors.h>
#define NUM_SENSORS          4
#define NUM_SAMPLES_PER_SENSOR  20
#define EMITTER_PIN          2

QTRSensorsRC qtra((unsigned char[]) { A0, A3, A2, A1 },
    NUM_SENSORS, 2000, EMITTER_PIN);
unsigned int sensorValues[4];

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    for (int i = 0; i < 5; i++){
        qtra.calibrate();}
}
```

```

void loop()
{
    qtra.read(sensorValues);
    Serial.print("\nRead: ");
    for (int i = 0; i < NUM_SENSORS; i++){
        Serial.print('\t');
        Serial.print(sensorValues[i]);
    }
}

```

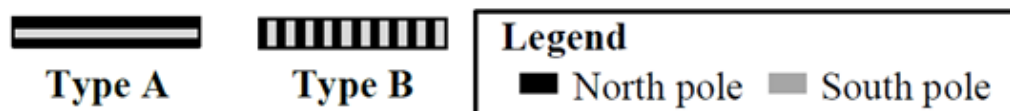
V prvním kroku načítám knihovnu a definuji hodnoty pro počet senzorů, počet vzorků a piny. Dále je zavolán konstruktor (druh funkce) s vyplněnými hodnotami pro piny, kde jsou připojeny senzory (A0, A3, A2, A1), počet senzorů, čas vypršení (v μ s) a pin emitoru. A následně vytvořeno pole 4×1 pro výstupní hodnoty ze senzoru.

V setup části je inicializována komunikace a použita kalibrace. V loop zbývá jen volání funkce a poslání dat přes sériovou linku.

3.2.2 Magnetický senzor

Magnetický senzor je využit k rozpoznání vjezdu do nové buňky. Magnetické pásky jsou položeny v bráně mezi buňkami a tak jejich detekcí robot pozná, že přejíždí do nové buňky. Avšak aby bylo možné rozpoznat tuto změnu, je potřeba mít vhodný senzor. Jako magnety používám tenké magnetické pásky, jsou velmi podobné obyčejným magnetům na lednici. Důvod jejich použití je nízká cena a možnost vytvoření požadovaného tvaru.

Robot byl původně osazen Hallovou sondou (TLE4905L, 2007). Tento senzor nebyl schopen pracovat s pořízenými magnetickými páskami. Tyto pásky jsou tvořeny několika magnetickými póly (obr. 3.6).



Obr. 3.6 – Magnetické pásky

Se silnějším magnetem, například nedýmovým senzor neměl problém. Rozhodovalo se mezi úpravou robota nebo bludiště. Úprava bludiště by byla velmi náročná a cena nedýmových

magnetů je výrazně vyšší než cena magnetických pásek, proto bylo rozhodnuto zkusit jiné senzory. Zkusil jsem SMD Hallovu sondu ze staré disketové jednotky neznámého druhu. Její chování bylo téměř totožné jako u TLE4905L.

Nakonec jsem zkusil tříosý digitální kompas HMC5883L. Při připojení a měření na nepájivém poli se nový senzor osvědčil, a tak byl přidělán na robota. Díky výstupním datům je možné rozlišit magnetickou pásku A a B (obr. 3.6). V bludišti je použit typ A, protože na něj magnetický senzor reaguje lépe. Více se čtenář může dočíst v (Škrabánek, 2016).

Jediná nepříjemnost s novým senzorem nastala s připojením k desce. Původní senzor vyžadoval pouze jeden analogový pin a tento nový potřebuje dva a je nezbytné, aby to byly piny A4 (SDA) a A5 (SCL), neboť komunikuje přes I²C sběrnici. Popisem I²C se zabývá ve své práci (Dudáček, 2011):

I²C je sběrnice typu multimaster. Lze na ní připojit až 128 zařízení, každá stanice má určenou svou vlastní adresu o délce 7 nebo 10 bitů. Jednotlivé stanice jsou propojeny jedním datovým vodičem (SDA) a jedním hodinovým vodičem (SCL). Maximální přípustná signálu SCL je podle verze I²C 100 kHz nebo 400 kHz.

Bylo tedy nutné upravit přední panel robota, A5 byl volný a A4 bylo potřeba vyměnit s optickým senzorem.

Jak už bylo zmíněno, je k dispozici pouze jeden druh magnetu s poměrně hustou sítí magnetických pólů. A je rozdíl zdali robot přejíždí siločáry podélně nebo napříč. S tím se čtenář může podrobně seznámit v (Škrabánek, 2016).

V tab. 3.5 přikládám výstupní hodnoty ze senzoru HMC5883L. Senzor měří tři osy (x , y , z) na ploše 2×2 mm.

Tab. 3.5 – Měření magnetické indukce nad páskou A

| | | 1.2 cm | 1 cm | 0.8 cm | 0.6 cm | 0.4 cm | 0.2 cm | 0 cm |
|--------|-----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | B , μT | B , μT | B , μT | B , μT | B , μT | B , μT | B , μT |
| 0 cm | x | -64.36 | -64.00 | -64.00 | -63.82 | -63.55 | -63.55 | -63.36 |
| | y | -46.55 | -46.82 | -47.09 | -46.73 | -46.91 | -47.09 | -47.00 |
| | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| 0.2 cm | x | -63.18 | -65.91 | -64.18 | -63.27 | -64.09 | -63.73 | -63.45 |
| | y | -45.27 | -44.91 | -44.73 | -45.45 | -45.09 | -44.82 | -45.73 |
| | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| 0.4 cm | x | -65.73 | -60.45 | -51.18 | -35.64 | -40.45 | -31.18 | -48.18 |
| | y | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 |
| | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -55.00 | 15.41 | -26.84 | -5.00 |

Pro porovnání přikládám tab. 3.6, kde jsou uvedeny data ze senzoru ve chvíli, kdy se pod robotem nenachází žádný magnet. V příloze je uvedena celá tabulka.

Tab. 3.6 – Měření magnetické indukce mimo pásku

| | | 1.6 cm | 1.4 cm | 1.2 cm | 1 cm | 0.8 cm | 0.4 cm | 0.2 cm |
|---------|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | $B, \mu\text{T}$ | $B, \mu\text{T}$ | $B, \mu\text{T}$ | $B, \mu\text{T}$ | $B, \mu\text{T}$ | $B, \mu\text{T}$ | $B, \mu\text{T}$ |
| -1.6 cm | x | -63.55 | -63.55 | -63.45 | -63.82 | -63.45 | -63.64 | -63.64 |
| | y | -46.82 | -46.73 | -46.55 | -46.45 | -46.64 | -46.64 | -46.82 |
| | z | -52.45 | -52.55 | -52.24 | -52.45 | -52.14 | -52.04 | -52.24 |

Magnetické pole robota ruší senzor natolik, že pokud se nachází kolem magnet, jsou vidět pouze skokové změny. Této skutečnosti jsem si vědom a využívám jí. Ve chvíli kdy robot vjíždí do nové buňky, postačí, aby detekoval magnetickou pásku pouze jednou.

Nejvíce reagují na změnu osa y a z. Obě byly původně využity pro řízení robota z důvodu vyšší přesnosti.

Osa y je detekována pouze nad magnetickou páskou a osa z v blízkém okolí pásky. Celá tabulka z měření je uvedena v příloze. Z časových důvodů probíhalo měření magnetického pole v neúplném bludišti (papírová podložka, úplné bludiště je opatřeno dřevěnou podlahou) a mimo laboratoř. Při dokončení bludiště a dodatečném měření v laboratorních podmínkách bylo zjištěno, že osa z může být naměřena i ve středu buňky, což je nežádoucí, bylo ji nutné odstranit z řízení. Je tedy využívána jen osa y. V tab. 3.5 je možné vidět, že výstupní hodnota osy y nad magnetickou páskou je -372.36, proto je podmínka pro detekci magnetické pásky $p(t)$ stanovena takto:

$$p(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } B(t) < -300, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.1)$$

Dále bude předveden kód pro ovládání magnetického senzoru.

Kód pro ovládání magnetického senzoru:

```
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_HMC5883_U.h>
Adafruit_HMC5883_Unified mag =adafruit_HMC5883_Unified(12345);
float magX;
float magY;
float magZ;

void setup()
```

```

{
    Serial.begin(9600);
    if(!mag.begin())
    {
        Serial.println("no HMC5883 detected, check
wiring!");
        while(1);
    }
}
void loop()
{
    sensors_event_t event;
    mag.getEvent(&event);
    Serial.print(event.magnetic.x); Serial.print('\t');
    Serial.print(event.magnetic.y); Serial.print('\t');
    Serial.print(event.magnetic.z); Serial.print('\t');
}

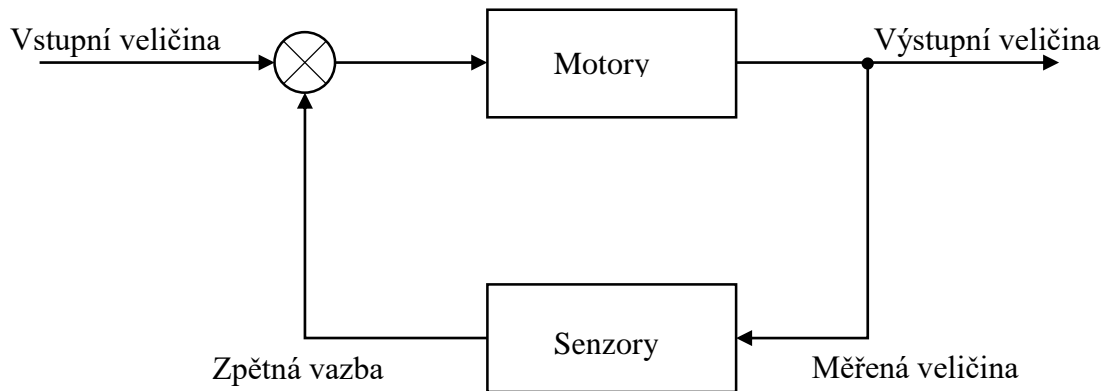
```

Pro zjednodušení práce s magnetickým senzorem byla použita knihovna výrobce senzoru. Obě knihovny jsou inicializovány v prvním kroku. Ve druhém kroku je zvoleno typ senzoru a jeho číslo (to umožňuje použít více senzorů přes I²C, nicméně toho v tomto případě nevyžívám).

V dalším kroku se alokuje část paměti pro osy *x*, *y* a *z*, V části `setup` se inicializuje komunikace a kontroluje, zda je senzor připojen a nakonec v `loop` pak probíhají události na vyčtení dat ze senzoru a poslání přes sériovou linku.

3.3 ŘÍZENÍ MOTORŮ

Řízení motorů můžeme rozdělit na řízení bez a se zpětnou vazbou. V tomto případě je využito řízení se zpětnou vazbou. Zpětnou vazbu zajišťují všechny uvedené senzory (optické, magnetický a enkodéry).



Obr. 3.7 – Řízení se zpětnou vazbou

U robotů existuje problém, kdy se stáčí k jedné straně přesto, že motory jsou jednoho druhu a jejich nastavená rychlost je stejná. Může to být dáno nedostatečnou přesností výrobou motorů, rozdílnou velikostí nebo umístěním kol, těžištěm robota, nerovným nebo lepkavým povrchem... Možných příčin je spousta. Existuje metoda výpočtu pozice robota a se znalostí té pozice můžeme robota nasměrovat žadaným směrem. Metoda se nazývá odometrie.

Odometrie:

„Odometrie je metoda relativní lokalizace založená na odhadu změny pozice a orientace kolového robota prostřednictvím údajů o otáčení jeho hnacích nebo běžných kol naměřených pomocí rotačních enkodérů. Název metody vznikl složením řeckých slov hodos (cesta) a metron (měřiti).

Pro svou spolehlivost, vysoké rozlišení a rozumnou cenu jsou v mobilní robotice nejčastěji používané enkodéry optické, transmisivní a reflexivní.

Podle konstrukce a funkcionality můžeme rotační enkodéry rozdělit na jednokanálové, inkrementální a absolutní. Jednokanálové enkodéry mají pouze jednobitový výstup, neposkytují žádnou informaci o smyslu otáčení a při velmi nízkých rychlostech nebo v klidu u nich hrozí výskyt šumu – zastaví-li se enkodér na hraně mezi 0 a 1, bude mít jeho výstup náhodnou hodnotu, která se v čase může náhodně měnit. Pro odometrii se jednokanálové enkodéry zpravidla nepoužívají.“ (Skalka, 2011)

Podrobněji se s odometrií může čtenář seznámit v (Skalka, 2011). Z citovaného textu je nutno podotknout, že přestože není jednokanálový enkodér pro svou nepřesnost běžně používaný, je jím robot vybaven. V kombinaci s ostatními senzory přesnost jednokanálového enkodéru bohatě postačí.

3.3.1 Enkodéry

Jak už bylo zmíněno, enkodéry jsou nezbytné k určení polohy robota. Použitý enkodér se skládá z emitoru a fototranzistoru. Fototranzistor sepne pouze, když se před ním nachází reflektivní povrch a proto je nalepený kruh na vnitřní části kola dvoubarevný (obr 2.3). Jak pro světlo, tak i pro infračervené záření obecně platí, že černá (tmavá) barva pohlcuje záření více než bílá (světlá) barva.

S enkodéry bylo provedeno měření (tab. 3.7) ujeté vzdálenosti za daný počet pulzů. Toho bylo využito pro hledání středu buňky.

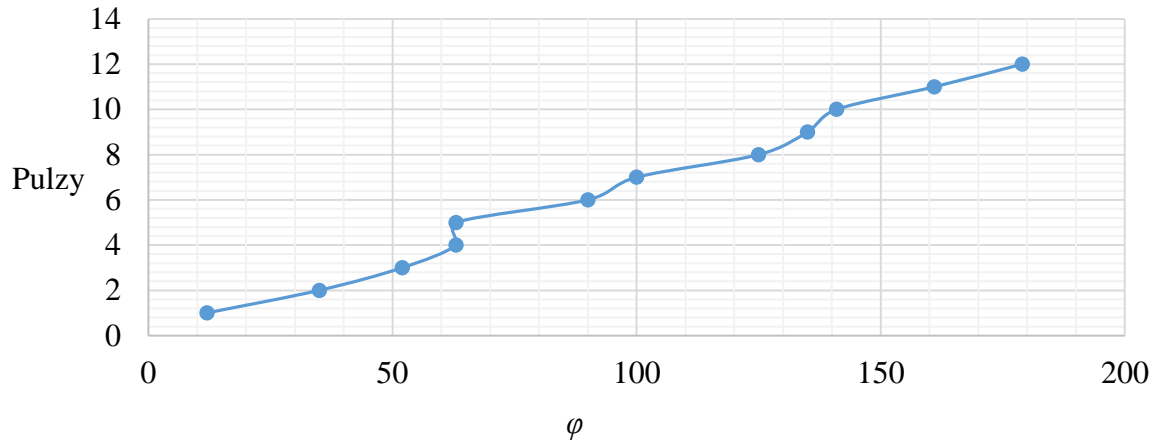
Tab. 3.7 – měření ujeté vzdálenosti na počet pulzů enkodéru

| | pulzy | | | | | | | |
|----------|-------|---|----|----|----|----|----|----|
| | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| l , cm | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| l , cm | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| l , cm | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| l , cm | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| l , cm | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |

Další měření bylo, o kolik stupňů se robot otočí při daném počtu pulzů. Pro otočení jsou použity obě kola, které se točí navzájem opačným směrem. Výsledné data jsou v tab. 3.8.

Tab. 3.8 – měření otočení robota s enkodéry – doleva

| | pulzy | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| φ | 10° | 30° | 50° | 70° | 85° | 90° | 100° | 120° | 130° | 140° | 175° | 160° |
| | 15° | 35° | 55° | 55° | 80° | 80° | 100° | 125° | 130° | 145° | 150° | 165° |
| | 15° | 30° | 40° | 65° | 80° | 95° | 110° | 110° | 150° | 135° | 160° | 180° |
| | 15° | 25° | 55° | 55° | 80° | 90° | 110° | 125° | 135° | 135° | 155° | 175° |
| | 10° | 35° | 40° | 60° | 70° | 95° | 115° | 110° | 130° | 135° | 170° | 160° |
| Průměr | 13° | 31° | 48° | 61° | 79° | 90° | 107° | 118° | 135° | 138° | 162° | 168° |



Obr. 3.8 – Závislost pulzů enkodéru na počet stupňů

Jak můžete vidět v tab. 3.8 a na obr. 3.8 ani enkodéry nejsou stoprocentně přesné, nicméně stačí, aby se robot v rámci jedné buňky otočil zhruba v požadovaném směru, a je-li potřeba, robot se dorovná optickými senzory.

Protože kód je pro oba enkodéry totožný krom pinu a názvu proměnných, bude předveden pouze kód pro ovládání prvního.

Kód pro ovládání enkodéru:

```
int encoder0PinA = 3;
int encoder0PinALast = LOW;
int n1 = LOW;

void setup() {
    pinMode(encoder0PinA, INPUT);
}

void loop()
{
    n1 = digitalRead(encoder0PinA);
    if ((encoder0PinALast == LOW) && (n1 == HIGH)) {
        encoder0Pos1++;
    }
    encoder0PinALast = n1;
}
}
```

Nejdříve proběhne inicializace pinu 3 na vstup a nastavení proměnné `encoder0PinALast` a `n1` na nízké napětí. Proměnná `n1` reprezentuje současný stav a `encoder0PinALast` reprezentuje stav předchozí. Měření napětí probíhá přes `digitalRead()`; na pinu 3 (`encoder0PinA`). Pokud je napětí vyšší než 3 V, je nastaveno

n1 na HIGH a přes podmínku `if` je rozpoznána změna stavu. Při změně stavu je inkrementován registr `encoder0Pos1` který reprezentuje pozici robota od výchozího stavu.

3.3.2 Ovládání rychlosti otáčení

Ovládání rychlosti otáčení u motorů je možné více způsoby, jako první se nabízí snížení napětí motoru. Druhou možností je použití pulzně šířkové modulace. Stručný popis a využití PWM čtenář nalezne na Linuxsoft.cz:

„Tento pulsující signál se využívá za pomoci jednoduchého triku k různým úkonům. Nejčastěji udávaným příkladem použití PWM je pohaslá LED dioda, nebo dokonce její pomalé rozsvícení a zhasínání. Trik tohoto efektu je v hustotě po sobě rychle jdoucích signálů 1 a 0, které velmi rychle rozsvěcejí a zhasínají LEDku tak, že lidské oko vnímá až průměr času rozsvíceného a zhaslého. Jinak řečeno LEDka bliká tak rychle, že to není poznat, místo toho je ale pohaslá.“(TŮMA, 2011)

Stejný přístup se používá i u DC motorů, u kterých by snížení napětí vedlo ke ztrátě síly, což je nevhodné. S použitím PWM zůstane síla motoru zachována přesto, že je počet otáček snížený.

Robota pouštím maximálně na hodnotu 120, kde 0 se rovná zastaveným motorům a 255 maximální rychlosti. Tedy přibližně 47 % maximálního výkonu motorů.

Při vyšším nastavení PWM motorů se robotu při rozjezdu zdvihá přední část a pak tvrdě dopadne zpět. Dalo by se to vyřešit postupným zvyšováním rychlosti, ale při daných rozměrech bludiště není zvyšování rychlosti nezbytné a navíc poněkud riskantní v případě selhání sensorů.

Aby se robot mohl otočit v rámci jedné buňky, případně couvat, s diferenciálním podvozkem je nutné, aby se motory dovedly pohybovat dopředu i vzad. Což samozřejmě použité motory dovedou. Nastavení směru otáčení je popsáno v příložené části kódu a jeho rozebrání.

Kód pro nastavení pravého motoru:

```
#define motorR 12
int pwmR = 0;
void setup()
{
    pinMode(motorR, OUTPUT);
}
void loop()
```

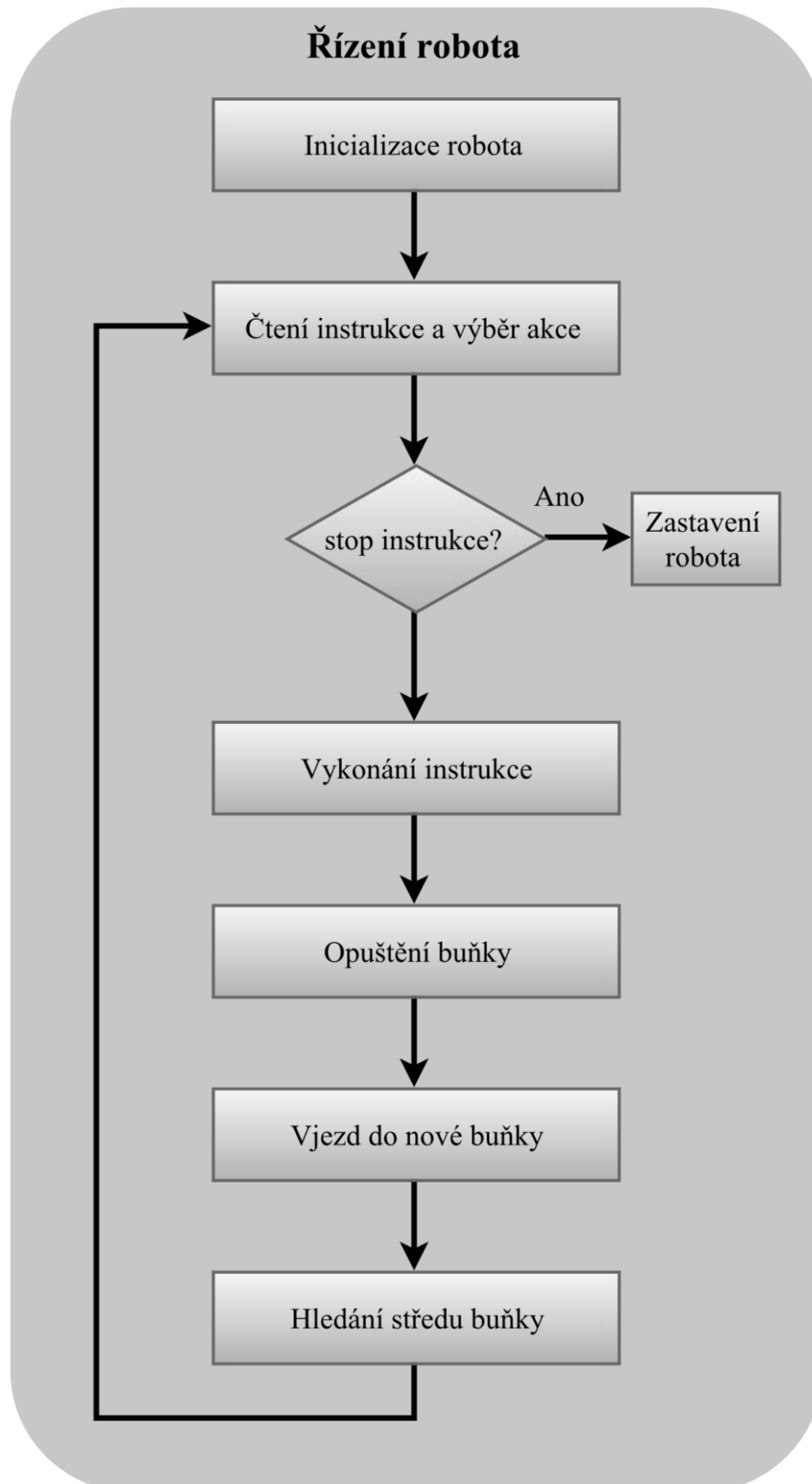
```
{  
    digitalWrite(motorR, HIGH);  
    pwmR = 90;  
    analogWrite(9, pwmR);  
}
```

Nejdříve je definován pin pro motor a inicializována paměť pro PWM hodnotu. Protože není žádoucí v tomto případě číst příchozí data ale naopak posílat, je pin nastaven na výstup `pinMode(motorR, OUTPUT);` v části `setup`. Přes `digitalWrite();` je motor nastavený na HIGH, to má za výsledek nastavení motoru na pohyb vpřed. Hodnota LOW by pak nastavila pohyb motoru směrem vzad. Nakonec stačí už jen nastavit pin 9 přes `analogWrite();` požadovaný PWM.

3.4 FÚZE DAT ZE SENZORŮ A ŘÍZENÍ ROBOTY

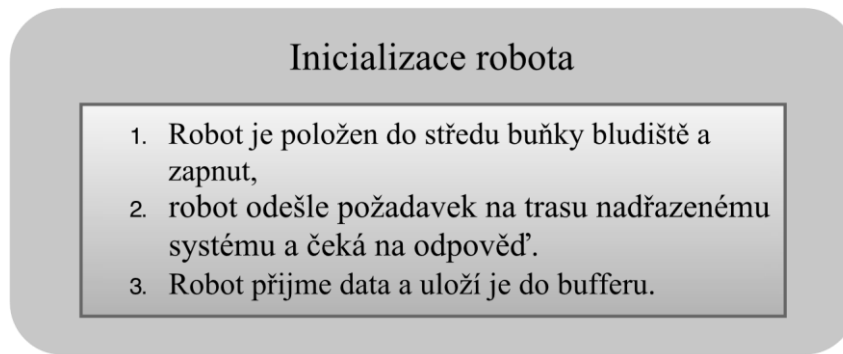
V tomto oddíle bude nejprve rozebráno řízení robota. Jako grafické znázornění byl vytvořen diagram obr. 3.9. Řízení robota je cyklus s jednotlivými postupy robota. Jediná část, která není v cyklu, je inicializace tu stačí provést pouze jednou. Zastavení robota může způsobit pouze instrukce (stop instrukce, popsána v oddílu 2.4) z nadřazeného systému.

Senzory robota:
optické senzory,
tříosý digitální kompas,
enkódéry (ENC).



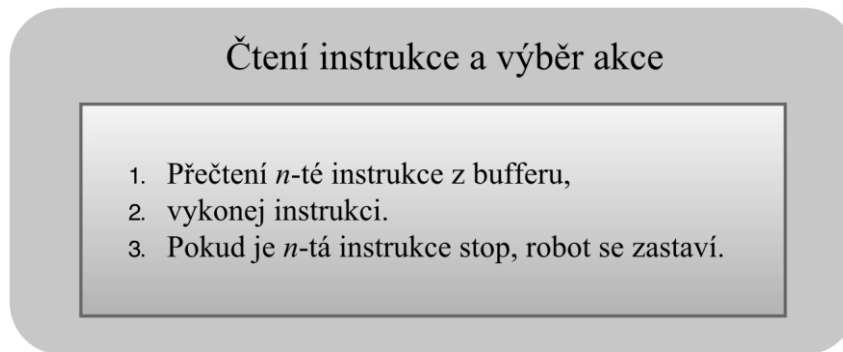
Obr. 3.9 – Zjednodušený diagram řízení robota

Diagram z obr. 3.9 bude nyní rozebrán podrobně.



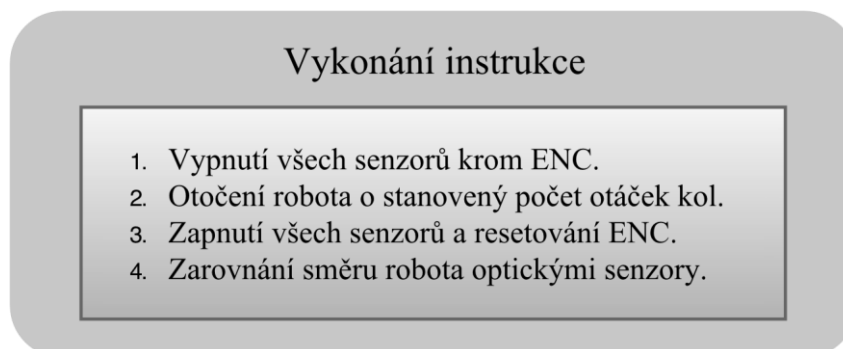
Obr. 3.10 – Inicializace robota

Řízení robota začíná jeho inicializací. Během ní jsou senzory i motory vypnuté. Robot pouze odešle zprávu nadřazenému systému, až mu bude odeslána trasa. Trasu pak uloží do části vyhrazené paměti, bufferu.



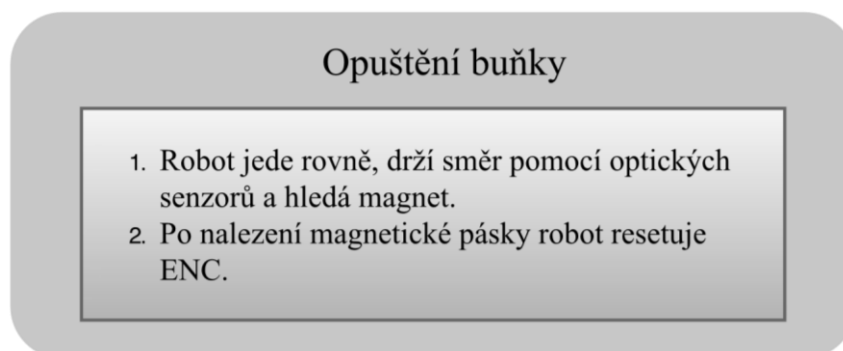
Obr. 3.11 – Čtení a výběr akce

Při inicializaci a pokaždé, kdy robot obdrží aktualizaci trasy, bude příští instrukce, kterou přečte ta první v pořadí bufferu. Pokud aktualizaci trasy neobdrží, čte druhou. Pokud aktualizace trasy podruhé nedorazí, robot čte v pořadí třetí instrukci a tak dále. Výběr akce probíhá podle obr. 2.7. Pokud je daná instrukce stop, robot se zastaví. Program může být znovu spuštěn restartováním robota.



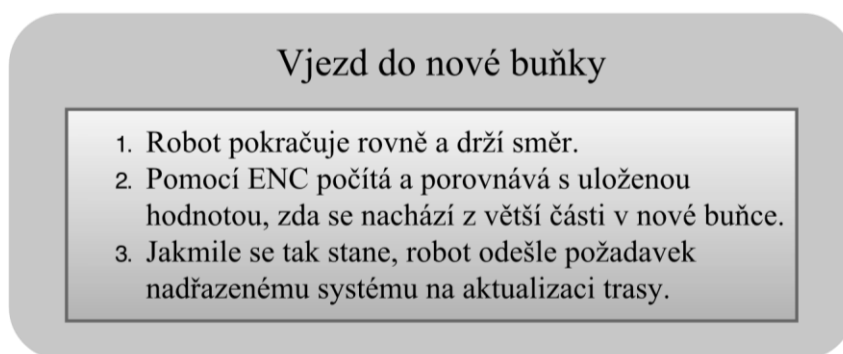
Obr. 3.12 – Vykonání instrukce

Vykonání instrukce probíhá ve středu buňky. Začíná tím, že robot vypne senzory, aby jejich výstupní data nezasahovaly do řízení robota během jeho otáčení. Pouze enkodéry, podle kterých robot zatačí, zůstanou zapnuté. Pro každou instrukci (uloženou v bufferu, podrobně popsáno v oddílu 2.4) platí jiný počet pulzů enkodéru, nebo směru otáčení kol. Robot nejprve přepne motory na požadovaný směr a počítá pulzy enkodéru a porovnává je s uloženou hodnotou. Když jsou obě hodnoty stejné, vykonání instrukce (otočení robota v na požadovaný směr), je dokončeno. Ostatní senzory jsou zapnuty a robot je připraven k jízdě.



Obr. 3.13 – Opuštění buňky

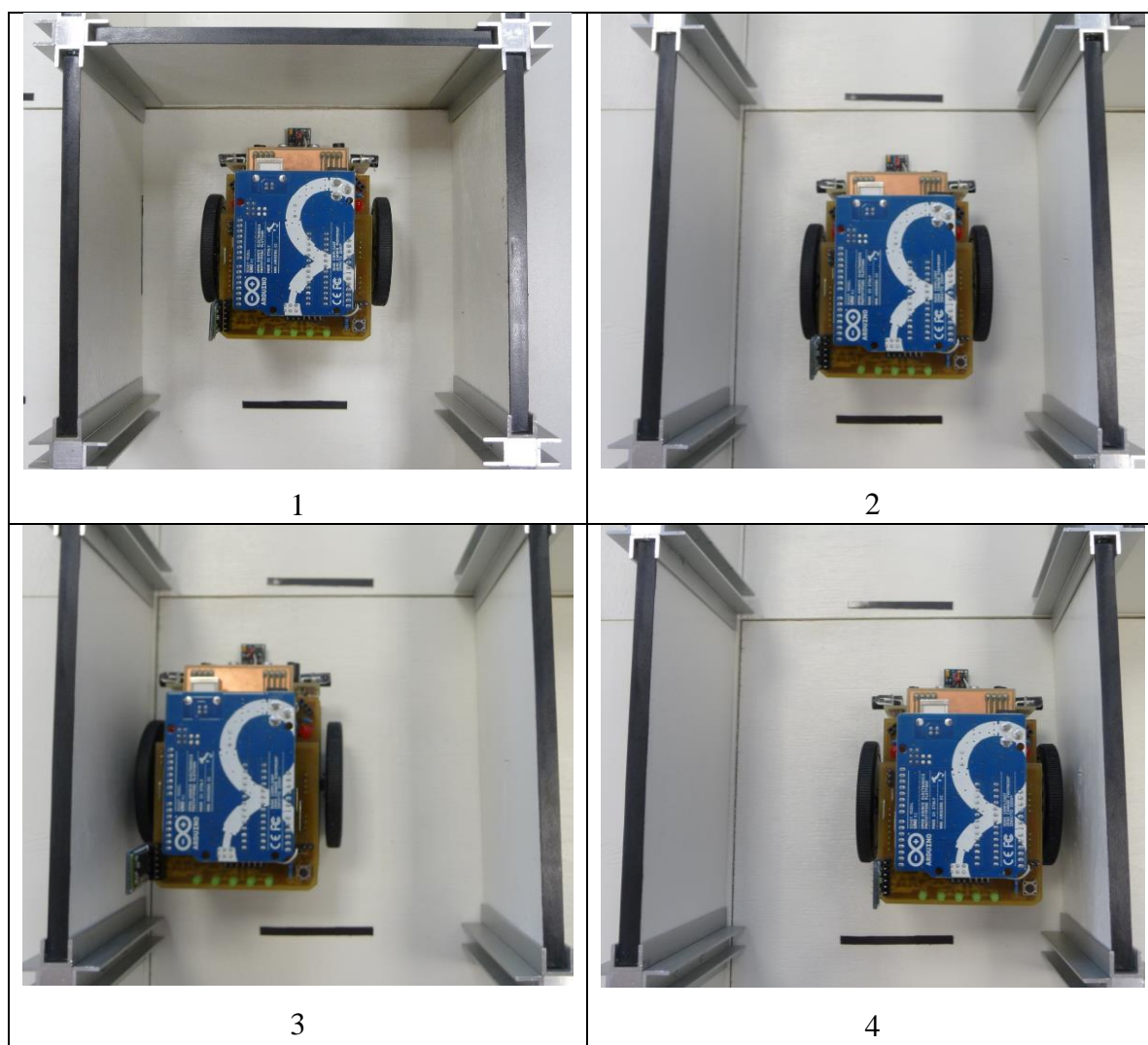
Po vykonání instrukce se robot vydá směrem k nové buňce. Jak bylo popsáno dříve, roboti mají problém se stáčením k jedné straně, přesto že jsou motory i jejich nastavení stejné. Robot se dorovnává optickými senzory a pokračuje rovně, dokud nenalezne magnetickou pásku.



Obr. 3.14 – Vjezd do nové buňky

Stejně jako v předcházející části, robot musí držet směr během jízdy, to dělá pomocí optických senzorů. Po překročení magnetické pásky robot počítá otáčky enkodéru a porovnává je s uloženou hodnotou, ta odpovídá vzdálenosti jakou robot ujede od magnetické pásky. Je potřeba aby robot zažádal o aktualizaci trasy až ve chvíli, kdy se nachází v nové buňce z větší části. Vzdálenost, kterou musí robot aby byla tato podmínka splněna byla vypočítána na 4 cm.

Tab. 3.9 – Možné polohy robota v buňce se dvěma bočními stěnami



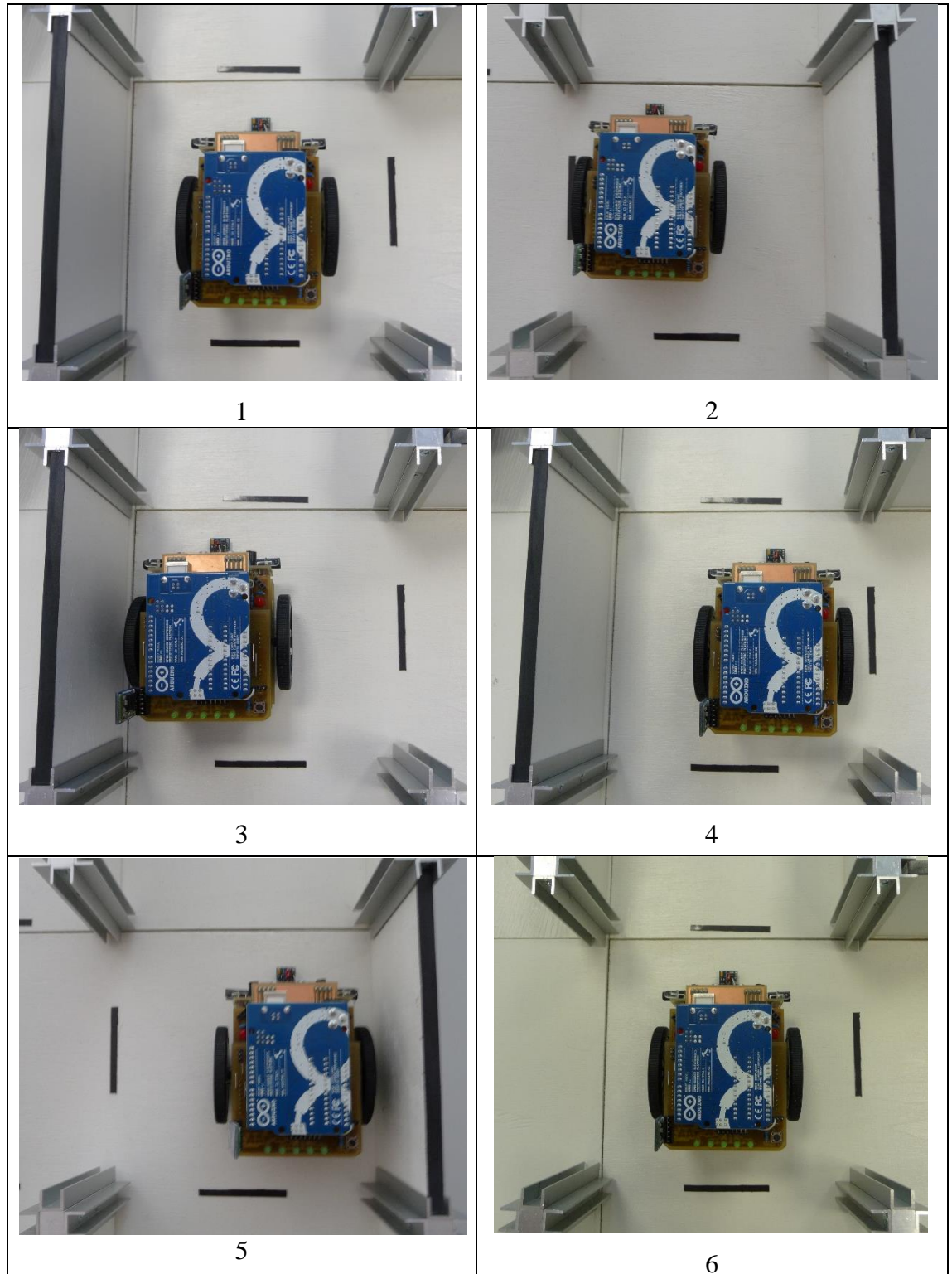
Tab. 3.10 – Chování robota v buňce se dvěma bočními stěnami

| Pozice robota | Popis pozice | Akce |
|-----------------|---|------------------------|
| Před stěnou (1) | Čelní senzory vidí blízko stěnu | Zastavení |
| Střed (2) | Oba senzory jsou stejně daleko od stěny | Jízda rovně |
| Mírně vpravo | Pravý senzor je blíž u stěny, levý dál | Mírné zatočení doleva |
| Mírně vlevo | Levý senzor je blíž u stěny, pravý dál | Mírné zatočení doprava |
| Vpravo (4) | Pravý senzor je blízko stěny, levý dál | Ostré zatočení doleva |
| Vlevo (3) | Levý senzor je blízko stěny, pravý dál | Ostré zatočení doprava |

V tab. 3.12 naleznete akci robota, kterou vykoná na základě své pozice v buňce v případě kdy jedna nebo obě boční stěny chybí. Chybějící stěna je velmi běžným stavem v bludišti. Stává se tak, když robot vjede do zatáčky nebo křižovatky. Tím spíše je nutné, aby

se robot držel ve středu buňky, jinak hrozí náraz během změny směru, kdy jsou optické senzory vypnuty. Nejprve bude uvedeno grafické zobrazení pozice robota v tab. 3.11.

Tab. 3.11 – Možné polohy robota v buňce s chybějícími stěnami



Tab. 3.12 – Chování robota v buňce bez jedné nebo dvou bočních stěn

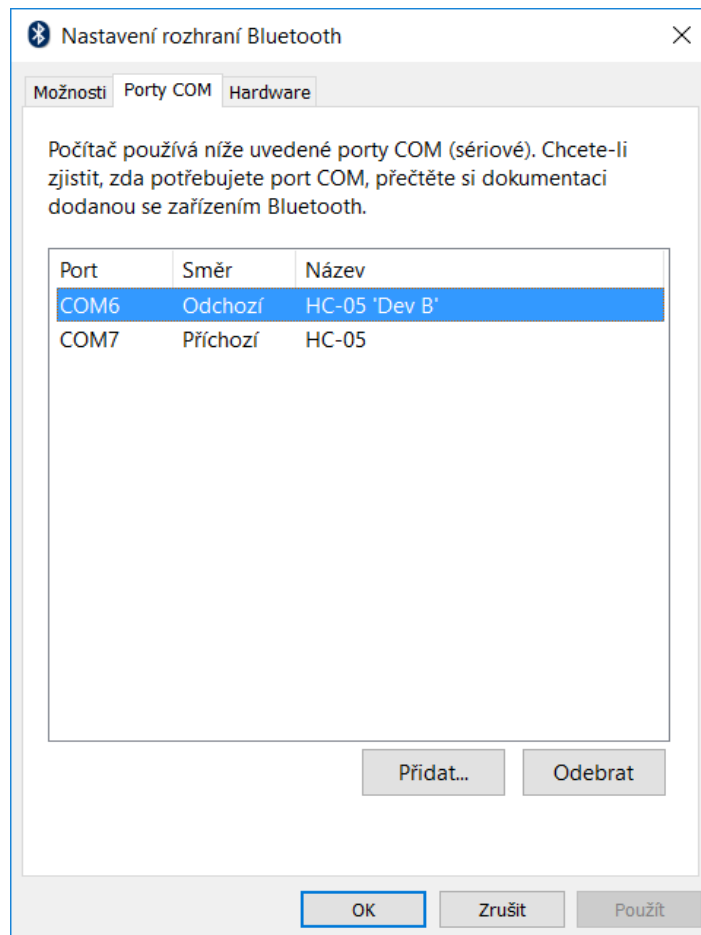
| Pozice robota | Popis pozice | Akce |
|----------------------------|--|------------------|
| Střed bez stěny (1) | Pravý nebo levý senzor nevidí stěnu, druhý je v přijatelné vzdálenosti | Jízda rovně |
| Vlevo bez levé stěny (2) | Pravý senzor je daleko od stěny, levý nevidí stěnu | Zatočení doprava |
| Vlevo bez pravé stěny (3) | Levý senzor je blízko stěny, pravý nevidí stěnu | Zatočení doprava |
| Vpravo bez pravé stěny (4) | Levý senzor je daleko od stěny, pravý nevidí stěnu | Zatočení doleva |
| Vpravo bez levé stěny (5) | Pravý senzor je blízko stěny, levý nevidí stěnu | Zatočení doleva |
| Bez stěn (6) | Robot se spoléhá na čelní senzory a enkodéry | Jízda rovně |

3.5 ŘEŠENÍ KOMUNIKACE S NADŘAZENÝM SYSTÉMEM

Jak už bylo napsáno v úvodu, tato bakalářská práce je součástí většího projektu. Můj kolega stejného ročníku (Ihnát, 2016), pracuje na komunikaci mezi robotem a nadřazeným systémem. Avšak součástí této bakalářské práce je implementování kódu pro přijímání a odesílání dat v robotovi. Tento oddíl je částečně společný.

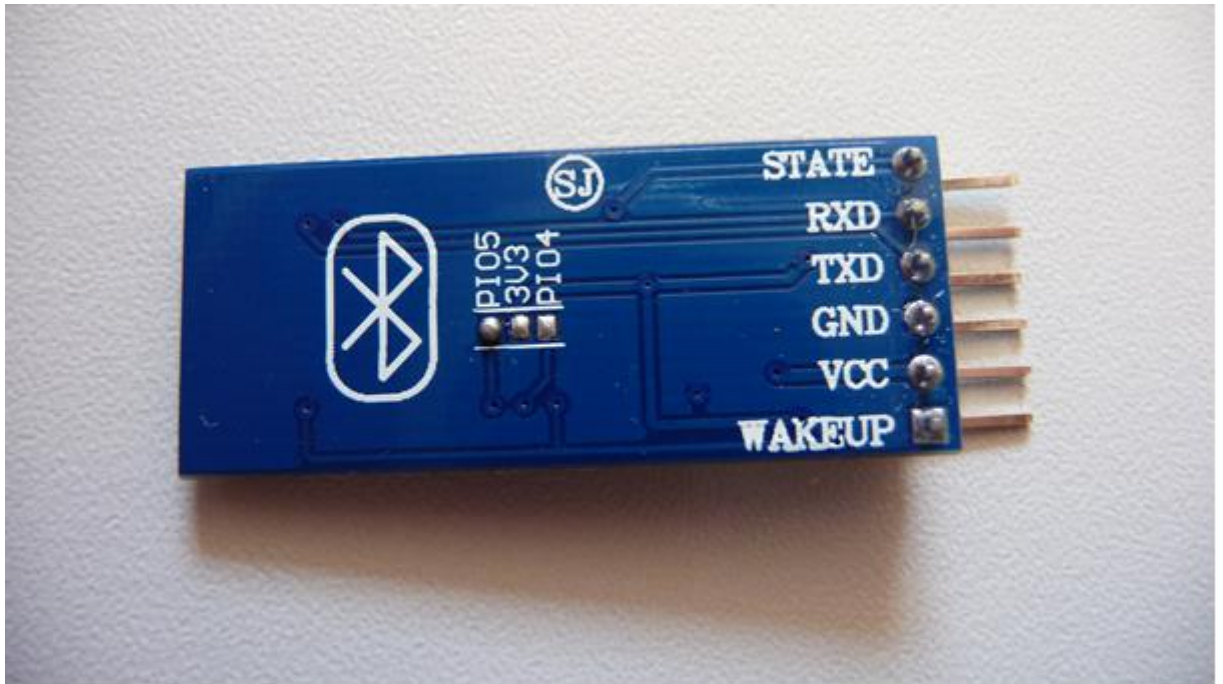
Komunikace s nadřazeným systémem probíhá přes bluetooth. Aby byla komunikace přes bluetooth možná, je nutné spárovat robota s používaným počítačem. Pro ovládání robota byl použit notebook s operačním systémem Windows 10 a s bluetooth zařízením Intel Wireless Bluetooth 3160. Použitý bluetooth v robotovi (HC-05) je v základním nastavením nastaven na: baud rate 9600, data bits: 8, stop bit: 1bit, no parity a no handshake. Handshake se může použít protokolem při navázání komunikace a parita je pro kontrolu bezchybnosti přenosu. Bluetooth i USB sdílejí na desce Arduina stejné piny, proto není možné je využít současně.

Pro spárování stačí ve Windows 10 přejít do Správce zařízení Bluetooth, vybrat zařízení HC-05 a zadat heslo 1234. Pod možností Další nastavení pro Bluetooth vám vyskočí tabulka s nápisem Porty COM v horní liště. Proběhlo-li spárování v pořádku, můžete zde nalézt dva porty pro HC-05, odchozí a příchozí.



Obr. 3.17 Nastavení rozhraní bluetooth

Pro komunikaci přes bluetooth je pak nutno zadat číslo odchozího portu (na obr. 3.14 COM6) do zvoleného terminálu (testován monitor Arduina a program PUTTY) a nastavit rychlost přenosu. Ve vývojovém prostředí Arduina číslo portu provádí v nástrojích a rychlost přenosu v samotném sériovém monitoru. Na obr. 3.18 lze vidět bluetooth modul HC-05.



Obr. 3.18 – Bluetooth modul HC-05

Aby byla možná komunikace mezi robotem a počítačem, je nutné inicializovat sériovou linku, což se provádí takto:

```
void setup() {  
    Serial.begin(115200);  
}
```

Kde parametr v závorce je přenosová rychlost.

Data z nadřazeného systému přicházejí ve formátu ASCII, buffer je však ve formátu integer pole, je tedy potřeba data převést a uložit.

```
if (Serial.available() > 0) {  
    buff[i] = Serial.read();  
    buff[i] = buff[i] - 48;  
    Serial.print(buff[i]);  
    i++;  
}
```

Pokud jsou k dispozici příchozí data (`Serial.available() > 0`) tak probíhá jejich uložení do pole `buff[5]` a následně jsou převedeny z ASCII do integer odečtením čísla 48. Přes `Serial.print(buff[i]);` je pak pro kontrolu vypsan v terminálu obsah pole.

4 ZÁVĚR

V rámci této bakalářské práce byl vytvořen řídicí program pro semi-autonomního mobilního robota. Mobilní robot je vybaven třemi druhy senzorů, které umožňují jeho lokalizaci v pracovním prostředí, kterým je bludiště. S využitím dat ze všech senzorů je robot schopen bezpečně projet bludištěm po trajektorii zadané nadřazeným systémem

Během tvorby této práce robot musel projít řadou úprav. Původní Hallova sonda, určená pro detekci magnetických značek, se ukázala jako nedostatečně citlivá. A tak nastalo rozhodnutí mezi zásadní úpravou bludiště nebo robota. Z finančních i časových důvodů bylo přistoupeno k úpravě robota. Na základě předchozích zkušeností byla původní Hallova sonda nahrazena tříosým digitálním kompasem, který dokáže detekovat i slabá magnetická pole.

V průběhu práce s robotem se však vyskytly i další komplikace. Ukázalo se, že životnost optických členů, které jsou součástí enkodérů, je mnohem kratší než se původně předpokládalo. Tyto senzory musely být kompletně vyměněny. V další verzi robota by měly být raději využity jiné senzory, popř. by mohl být využit jiný typ enkodérů.

Největší komplikace však způsobují optické senzory, které jsou využívány při detekci stěn bludiště. Aby byla zajištěna alespoň základní funkčnost, musely být senzory opatřeny stínítky. V takovéto úpravě, za umělého osvětlení, umožňují optické senzory bezchybnou navigaci. Za přítomnosti však dochází k tak významné změně jejich statické charakteristiky, že se robot stává neovladatelným. Za těchto podmínek totiž mrtvá zóna (popsaná v pododdílu 3.2.1) náhle přesahuje manévrovací vzdálenost, kterou má robot k dispozici. Pro budoucí použití je tedy doporučeno používat robota v místnosti bez oken s umělým osvětlením.

V souvislosti s touto prací byl proveden výzkum a vývoj systému pro lokalizaci robota v bludišti. Zmíněný lokalizační systém je založen na použitém digitálním kompasu a magnetických značkách, které jsou vyrobeny z magnetické fólie. Získané výsledky budou publikovány na konferenci. V této práci je doporučeno využívat k detekci značek data z osy y a z . Při aplikaci tohoto systému ve finální verzi bludiště se však ukázalo, že se na ose z může objevovat signál i ve značné vzdálenosti od značky. To může být způsobeno odlišnou konstrukcí původní experimentální arény a finální verzi bludiště. V konečné verzi řídicího programu jsou tak využita pouze data naměřené v rámci osy y .

Součástí zadání bakalářské práce je verifikace vytvořeného řídicího softwaru. Jako přiměřený způsob verifikace se jevílo vytvoření záznamu pohybu robota v bludišti. Součástí této práce je několik videí zachycujících pohyb robota v bludišti po předem dané trajektorii. Videá jsou součástí přílohy A, kterou naleznete na CD.

V průběhu této bakalářské práce byla samozřejmě provedena celá řada dílčích verifikací. Jednalo se o verifikace zpracování dat z jednotlivých senzorů. Související data naleznete v příloze B. V kapitole 3 také naleznete části kódů určené k ovládní senzorů. K jejich reprodukci je samozřejmě potřeba použít desku Arduino Uno, včetně senzorů, které jsou uvedeny v oddíle 2.2. Na CD také naleznete vytvořený řídicí software robota.

Přesto že se projevily nepříjemné nepřesnosti senzorů, hlavně optických, doufám, že se robot v budoucnu dočká pozornosti studentů umělé inteligence.

LITERATURA

- Atmega328P. 2015. *Datasheet*. Atmel. Dostupné z: http://www.atmel.com/images/atmel-8271-8-bit-avr-microcontroller-atmega48a-48pa-88a-88pa-168a-168pa-328-328p_datasheet_complete.pdf
- BUCHLI, Jonas. 2006. *Mobile robots: moving intelligence*. Mammendorf: Pro-Literatur-Verl, ISBN 38-661-1284-X.
- TLE4905L. 2007. *Datasheet*. Infineon Technologies. Dostupné z: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLE49X5L-DS-v01_05-en.pdf?fileId=db3a304316f66ee80117549ac8b206b1
- DUDÁČEK, Karel. 2011. *Analyzátor komunikace sériové sběrnice I2C s hardwarovou podporou*. Diplomová práce. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd. Vedoucí: Vlastimil Vavříčka.
- HC-05 Bluetooth module. 2010. *Datasheet*. ITEadstudio. Dostupné z: http://www.robotshop.com/media/files/pdf/rb-ite-12-bluetooth_hc05.pdf
- HMC5883L. 2013. *Datasheet*. Honeywell. Dostupné z: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf
- HUANG, Hui-Min; Elena MESSINA. 2007. *AUTONOMY LEVELS FOR UNMANNED SYSTEMS (ALFUS) FRAMEWORK* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=823618.
- IHNÁT, Vojtěch. 2016. *Návrh a realizace komunikačního protokolu a softwaru pro bezdrátový přenos dat mezi robotickým vozítkem a matlabem*. Bakalářská práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí: Pavel Škrabánek.
- L-53F3C. 2012. *Datasheet*. Kingbright. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1683593.pdf>
- L-53P3BT. 2012. *Datasheet*. Kingbright. Dostupné z: <http://datasheet.octopart.com/L53P3BT-Kingbright-datasheet-17578066.pdf>
- L293D. 2016. *Datasheet*. Texas Instruments. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293.pdf>
- KONFRŠT, Pavel. 2012. *Všesměrový podvozek robota se servopohonu a základní odometrii*. Bakalářská práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí: Pavel Rozsival.
- Pololu Robotics and Electronics [online]. 2016 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <https://www.pololu.com>.
- SKALKA, Marek. 2011. *Srovnání lokalizačních technik*. Diplomová práce. Praha: Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta. Vedoucí: David Obdržálek.
- ŠKRABÁNEK, Pavel; MARIŠKA, Martin; DOLEŽEL, Petr. 2015. *The time optimal path-planning of mobile robots motion respecting the time cost of rotation*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- ŠKRABÁNEK, Pavel; VODIČKA, Pavel. 2016. *Magnetic Strips as Landmarks for Mobile Robot Navigation*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky. [v tisku].

- TŮMA, Ondřej. 2011. *Arduino - pulsně šířková modulace (PWM) v C(++)*. *Linuxsoft.cz* [online]. [cit. 2016-05-02]. ISSN 1801-3805. Dostupné z: http://www.linuxsoft.cz/article.php?id_article=1878.
- QRD1114. 2005. *Datasheet*. FAIRCHILD. Dostupné z: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/QR/QRD1114.pdf>
- WINKLER, Zbyněk. 2005. *Odometrie*. In: *Robotika.cz* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <https://robotika.cz/guide/odometry/cs>.

PŘÍLOHY

A - CD

B - Grafy a tabulky z měření senzory

Příloha k bakalářské práci

VYTVOŘENÍ ŘÍDÍCÍHO SOFTWARE PRO ROBOTICKÉ VOZÍTKO

Pavel Vodička

CD

Obsah

- 1 Text bakalářské práce ve formátu pdf
- 2 Úplný zdrojový kód robota (Arduino)
- 3 Úplný zdrojový kód komunikace (Matlab)
- 4 Záznamy jízdy robota v bludišti

Příloha k bakalářské práci

VYTVOŘENÍ ŘÍDÍCÍHO SOFTWARE PRO ROBOTICKÉ VOZÍTKO

Pavel Vodička

Grafy a tabulky z měření senzory

Obsah

- 1 Obr. 1 – Měření vzdálenosti pravým čelním senzorem
- 2 Obr. 2 – Měření vzdálenosti levým čelním senzorem
- 3 Obr. 3 – Průměrné hodnoty z měření pravým čelním optickým senzorem
- 4 Obr. 4 – Průměrné hodnoty z měření levým čelním optickým senzorem
- 5 Obr. 4 – Měření bočním levým senzorem
- 6 Obr. 5 – Měření bočním pravým senzorem
- 7 Obr. 6 – Průměr z měření bočním levým senzorem
- 8 Obr. 7 – Průměr z měření bočním pravým senzorem
- 9 Obr. 8 – Měření enkodéry – otočení robota doprava
- 10 Obr. 9 – Měření enkodéry – otočení robota doleva
- 11 Obr. 10 – Měření enkodéry – průměrné hodnoty otočení robota doprava
- 12 Obr. 10 – Měření enkodéry – průměrné hodnoty otočení robota doleva
- 13 Tab. 1 – měření rozsahu magnetické pásky
- 14 Tab. 2 – Měření vzdálenosti čelními optickými senzory
- 15 Tab. 3 – Měření bočním levým senzorem
- 16 Tab. 4 – Měření bočním pravým senzorem
- 17 Tab. 5 – Měření enkodéry – otočení robota doprava
- 18 Tab. 6 – Měření enkodéry – otočení robota doleva

Tab. 1 – měření rozsahu magnetické pásky

| | | x, cm | | | | | | | |
|-------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1 | 0.8 | 0.6 | 0.4 | |
| y, cm | -1.60 | x | -63.55 | -63.55 | -63.45 | -63.82 | -63.45 | -63.64 | -63.64 |
| | | y | -46.82 | -46.73 | -46.55 | -46.45 | -46.64 | -46.64 | -46.82 |
| | | z | -52.45 | -52.55 | -52.24 | -52.45 | -52.14 | -52.04 | -52.24 |
| | -1.40 | x | -63.55 | -63.73 | -63.82 | -62.73 | -63.55 | -63.45 | -63.64 |
| | | y | -46.82 | -46.64 | -46.91 | -46.91 | -47.00 | -46.82 | -46.82 |
| | | z | -52.55 | -52.76 | -52.14 | -52.24 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| | -1.20 | x | -63.45 | -63.82 | -63.82 | -63.45 | -63.73 | -63.45 | -63.55 |
| | | y | -46.73 | -46.91 | -46.73 | -47.00 | -46.64 | -47.00 | -47.00 |
| | | z | -52.24 | -52.45 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| | -1.00 | x | -63.82 | -63.73 | -63.55 | -63.73 | -63.55 | -63.45 | -63.36 |
| | | y | -46.64 | -46.73 | -46.82 | -46.82 | -47.09 | -47.18 | -46.91 |
| | | z | -52.55 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| | -0.80 | x | -63.82 | -63.55 | -63.64 | -63.73 | -63.64 | -63.55 | -63.36 |
| | | y | -47.00 | -46.73 | -46.73 | -46.82 | -47.00 | -47.27 | -46.91 |
| | | z | -52.35 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| | -0.60 | x | -64.00 | -63.82 | -63.91 | -63.55 | -63.73 | -63.82 | -63.64 |
| | | y | -46.55 | -46.73 | -46.73 | -46.91 | -47.00 | -47.18 | -47.36 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| | -0.40 | x | -63.91 | -63.91 | -64.36 | -64.00 | -64.00 | -63.82 | -63.55 |
| | | y | -46.27 | -46.27 | -46.55 | -46.82 | -47.09 | -46.73 | -46.91 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| | -0.20 | x | -63.73 | -64.00 | -63.18 | -65.91 | -64.18 | -63.27 | -64.09 |
| | | y | -46.00 | -45.73 | -45.27 | -44.91 | -44.73 | -45.45 | -45.09 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| 0.00 | x | -63.27 | -63.18 | -65.73 | -60.45 | -51.18 | -35.64 | -40.45 | |
| | y | -45.55 | -44.73 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | |
| | z | -52.65 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -55.00 | 15.41 | |
| 0.20 | x | -62.36 | -61.00 | -372.36 | -65.55 | -36.64 | 3.82 | 10.82 | |
| | y | -46.18 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | |
| | z | -52.86 | -52.65 | -54.08 | -56.02 | -55.92 | 5.2 | 28.47 | |
| 0.40 | x | -61.64 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -58.55 | -59.36 | |
| | y | -46.64 | -47.00 | -48.36 | -47.18 | -372.36 | -47.55 | -44.82 | |
| | z | -52.55 | -53.16 | -54.18 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | |
| 0.60 | x | -62.00 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -64.09 | -65.27 | |
| | y | -47.09 | -48.00 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | |
| | z | -52.24 | -52.55 | -53.16 | -54.39 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | |
| 0.80 | x | -62.64 | -62.00 | -62.36 | -62.64 | -63.64 | -64.91 | -65.45 | |
| | y | -47.18 | -47.36 | -47.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | |
| | z | -52.35 | -52.65 | -417.96 | -52.55 | -417.96 | -52.65 | -53.06 | |
| 1.00 | x | -63.18 | -62.82 | -63.18 | -63.36 | -63.82 | -63.82 | -64.27 | |
| | y | -47.09 | -47.36 | -47.00 | -47.55 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | |
| | z | -52.45 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | |

Tab. 1 – měření rozsahu magnetické pásky - první pokračování

| | | x, cm | | | | | | | |
|-------|------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1 | 0.8 | 0.6 | 0.4 |
| y, cm | 1.00 | x | -63.18 | -62.82 | -63.18 | -63.36 | -63.82 | -63.82 | -64.27 |
| | | y | -47.09 | -47.36 | -47.00 | -47.55 | -372.36 | -372.36 | -372.36 |
| | | z | -52.45 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| | 1.20 | x | -63.18 | -63.45 | -63.64 | -63.55 | -63.27 | -63.64 | -63.73 |
| | | y | -46.91 | -47.09 | -47.27 | -47.18 | -47.18 | -47.00 | -47.45 |
| | | z | -52.14 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| | 1.40 | x | -63.36 | -63.45 | -63.55 | -63.55 | -63.64 | -63.45 | -63.45 |
| | | y | -47.00 | -46.91 | -46.91 | -47.27 | -47.00 | -47.00 | -46.91 |
| | | z | -52.45 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| | 1.60 | x | -63.45 | -63.36 | -63.36 | -63.36 | -63.27 | -63.45 | -63.45 |
| | | y | -47.09 | -47.09 | -47.18 | -47.18 | -47.00 | -46.91 | -46.91 |
| | | z | -52.35 | -52.45 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| | 1.80 | x | -63.27 | -63.45 | -63.45 | -63.36 | -63.27 | -63.27 | -63.45 |
| | | y | -46.91 | -46.82 | -46.82 | -46.91 | -46.91 | -46.82 | -46.64 |
| | | z | -52.45 | -51.94 | -52.24 | -52.55 | -417.96 | -417.96 | -417.96 |
| | 2.00 | x | -63.55 | -63.27 | -63.36 | -63.45 | -63.27 | -63.18 | -63.45 |
| | | y | -46.91 | -46.91 | -46.82 | -46.64 | -46.91 | -46.82 | -46.73 |
| | | z | -52.45 | -52.35 | -52.45 | -417.96 | -52.24 | -417.96 | -417.96 |

Tab. 1 – měření rozsahu magnetické pásky - druhé pokračování

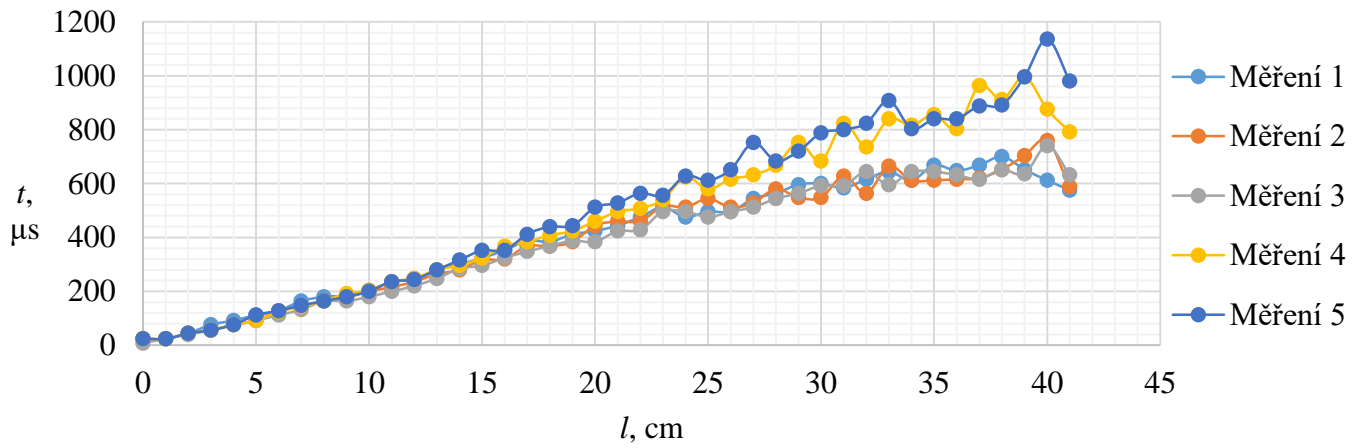
| | | | x, cm | | | | | | | | |
|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | | | 0.2 | 0 | -0.2 | -0.4 | -0.6 | -0.8 | -1 | -1.2 | -1.4 |
| y, cm | -1.60 | x | -63.55 | -63.64 | -63.73 | -63.55 | -63.45 | -63.45 | -63.73 | -63.55 | -63.64 |
| | | y | -46.64 | -46.64 | -46.82 | -46.73 | -47.00 | -46.64 | -46.91 | -46.73 | -46.55 |
| | | z | -52.24 | -52.35 | -52.35 | -52.24 | -52.45 | -52.24 | -52.45 | -52.55 | -52.35 |
| | -1.40 | x | -63.36 | -63.64 | -63.36 | -63.45 | -63.36 | -63.36 | -63.55 | -63.36 | -63.45 |
| | | y | -46.91 | -46.82 | -46.55 | -46.73 | -46.91 | -46.73 | -46.64 | -46.73 | -46.73 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -52.04 | -52.24 | -52.45 | -52.24 | -52.45 |
| | -1.20 | x | -63.55 | -63.55 | -63.73 | -63.64 | -63.45 | -63.45 | -63.64 | -63.55 | -63.55 |
| | | y | -46.91 | -47.09 | -46.73 | -47.00 | -46.82 | -46.73 | -46.82 | -46.73 | -46.91 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -51.94 | -52.24 | -52.45 | -52.35 |
| | -1.00 | x | -63.45 | -63.36 | -63.36 | -63.36 | -63.36 | -63.36 | -63.45 | -63.55 | -63.55 |
| | | y | -47.00 | -47.00 | -46.91 | -47.00 | -46.64 | -46.73 | -46.64 | -46.73 | -46.73 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -52.45 | -52.35 | -52.24 |
| | -0.80 | x | -63.36 | -63.45 | -63.36 | -63.27 | -63.27 | -63.55 | -63.36 | -63.36 | -63.45 |
| | | y | -47.00 | -47.09 | -47.00 | -46.73 | -46.73 | -46.55 | -46.45 | -46.73 | -46.64 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -52.35 | -52.65 |
| | -0.60 | x | -63.45 | -63.09 | -63.09 | -63.18 | -63.27 | -63.36 | -63.45 | -63.73 | -63.55 |
| | | y | -47.18 | -47.09 | -47.09 | -46.73 | -46.55 | -46.91 | -46.55 | -46.27 | -46.64 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -52.24 |
| | -0.40 | x | -63.55 | -63.36 | -63.00 | -62.91 | -63.18 | -63.55 | -63.64 | -63.64 | -63.45 |
| | | y | -47.09 | -47.00 | -46.91 | -46.55 | -46.55 | -46.45 | -46.55 | -46.64 | -46.27 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -52.45 |
| | -0.20 | x | -63.73 | -63.45 | -62.91 | -63.00 | -63.27 | -63.27 | -64.09 | -63.82 | -63.64 |
| | | y | -44.82 | -45.73 | -46.00 | -45.18 | -45.64 | -45.73 | -46.18 | -46.18 | -46.45 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -52.35 |
| | 0.00 | x | -31.18 | -48.18 | -63.82 | -65.36 | -63.09 | -63.45 | -63.00 | -63.82 | -63.82 |
| | | y | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -45.36 | -45.82 | -46.64 | -46.55 |
| | | z | -26.84 | -5.00 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -52.55 | -52.35 | -52.24 |
| | 0.20 | x | -13.82 | -36.45 | -29.45 | -372.36 | -372.36 | -64.64 | -63.73 | -63.45 | -63.55 |
| | | y | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -45.09 | -46.09 | -46.18 | -46.82 |
| | | z | 59.90 | -2.04 | 37.86 | -55.51 | -55.31 | -53.16 | -52.86 | -52.24 | -52.24 |
| 0.40 | x | -60.55 | -60.45 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -63.82 | -64.00 | -63.91 | -63.73 | |
| | y | -45.73 | -372.36 | -47.18 | -47.73 | -46.91 | -46.91 | -46.45 | -46.73 | -46.45 | |
| | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -53.98 | -52.65 | -52.45 | -52.45 | |
| 0.60 | x | -65.55 | -67.55 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -64.09 | -63.82 | -64.00 | -62.91 | |
| | y | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -48.09 | -47.27 | -46.64 | -46.73 | -46.73 | |
| | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -54.39 | -53.78 | -52.76 | -52.55 | -52.24 | -52.04 | |
| 0.80 | x | -65.82 | -65.45 | -65.73 | -64.91 | -64.36 | -64.09 | -64.00 | -63.91 | -63.45 | |
| | y | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -372.36 | -47.45 | -47.36 | -47.09 | -47.00 | -46.82 | |
| | z | -53.27 | -417.96 | -52.96 | -52.76 | -52.55 | -52.24 | -52.35 | -52.65 | -52.55 | |
| 1.00 | x | -64.45 | -64.45 | -64.45 | -64.45 | -64.18 | -64.00 | -63.64 | -63.73 | -63.73 | |
| | y | -372.36 | -372.36 | -47.64 | -47.45 | -47.27 | -47.18 | -47.18 | -47.00 | -47.00 | |
| | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -52.24 | -52.45 | -52.45 | |

Tab. 1 – měření rozsahu magnetické pásky - třetí pokračování

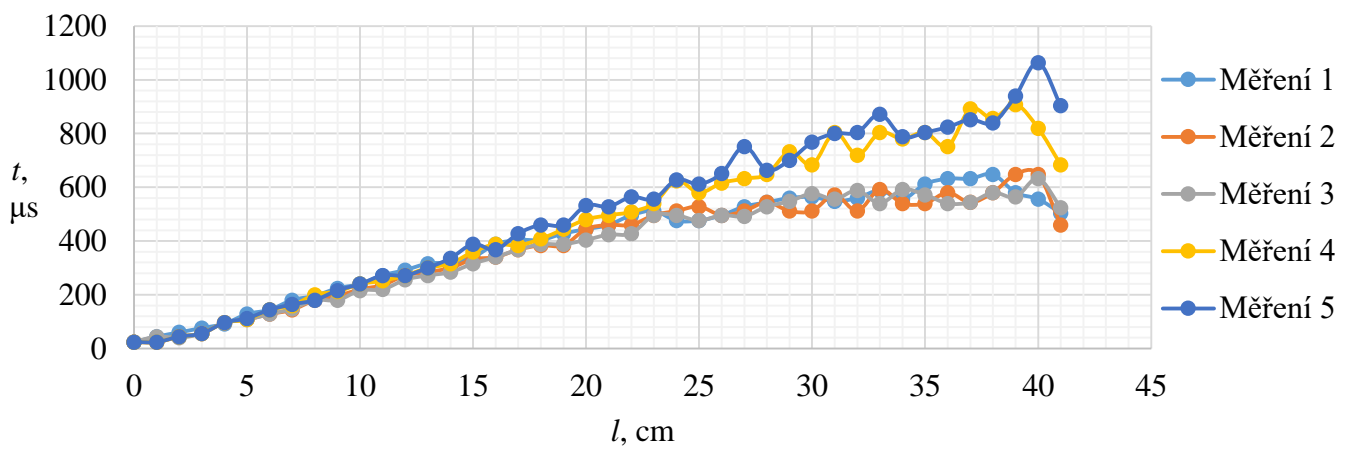
| | | | x, cm | | | | | | | | |
|-------|------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| | | | 0.2 | 0 | -0.2 | -0.4 | -0.6 | -0.8 | -1 | -1.2 | -1.4 |
| y, cm | 1.00 | x | -63.73 | -64.27 | -63.55 | -63.73 | -63.82 | -63.82 | -63.73 | -63.64 | -64.00 |
| | | y | -47.09 | -47.09 | -47.09 | -47.09 | -47.09 | -47.27 | -46.91 | -47.00 | -46.82 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -52.24 | -52.45 | -52.45 |
| | 1.20 | x | -63.64 | -63.55 | -63.64 | -63.64 | -63.36 | -63.73 | -63.45 | -63.73 | -63.55 |
| | | y | -47.09 | -47.09 | -47.00 | -47.00 | -46.91 | -47.00 | -46.55 | -46.55 | -46.55 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -52.45 | -52.14 | -52.65 |
| | 1.40 | x | -63.73 | -63.73 | -63.64 | -63.55 | -63.55 | -63.55 | -63.64 | -63.55 | -63.73 |
| | | y | -47.00 | -47.09 | -47.00 | -46.82 | -46.82 | -47.00 | -47.00 | -46.45 | -46.91 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -52.14 | -52.14 | -52.35 | -52.24 |
| | 1.60 | x | -63.55 | -63.45 | -63.45 | -63.36 | -63.45 | -63.45 | -63.82 | -63.36 | -63.64 |
| | | y | -46.91 | -46.82 | -46.82 | -46.91 | -46.82 | -46.82 | -46.91 | -46.64 | -47.09 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -417.96 | -51.94 | -52.24 | -52.04 | -52.45 | -52.45 |
| | 1.80 | x | -63.36 | -63.36 | -63.73 | -63.73 | -63.64 | -63.45 | -63.64 | -63.55 | -63.45 |
| | | y | -46.82 | -46.82 | -47.09 | -46.82 | -46.55 | -46.82 | -47.00 | -46.55 | -46.82 |
| | | z | -417.96 | -417.96 | -52.24 | -52.35 | -52.04 | -52.24 | -52.24 | -52.14 | -52.45 |

Tab. 2 – Měření vzdálenosti čelními optickými senzory

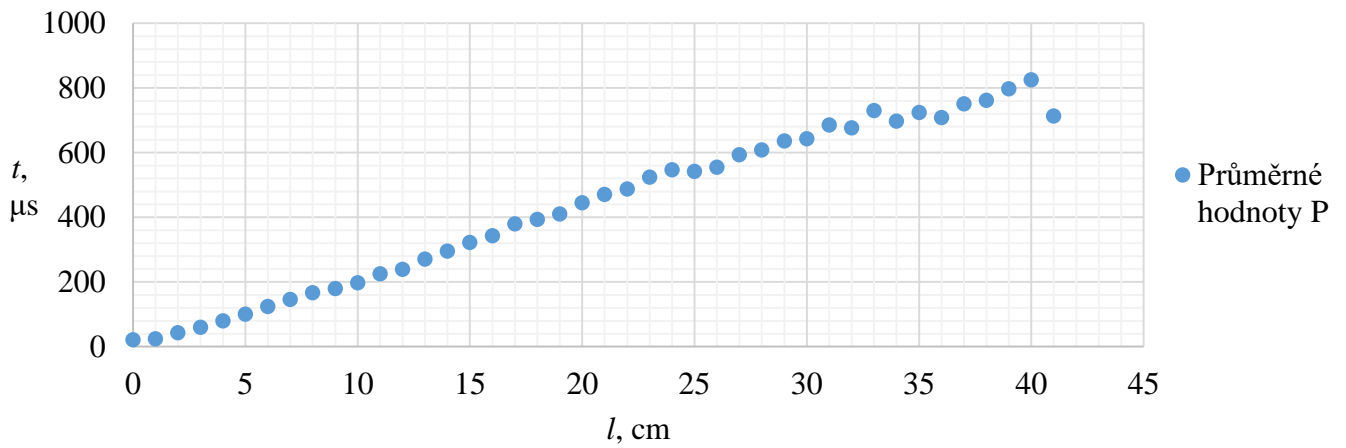
| l , cm | t , μ s | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|----------|----------|
| | P | L | P | L | P | L | P | L | R | L | průměr P | průměr L |
| 41 | 576 | 504 | 588 | 460 | 632 | 524 | 792 | 684 | 980 | 904 | 714 | 615 |
| 40 | 612 | 556 | 760 | 648 | 740 | 632 | 876 | 820 | 1136 | 1064 | 825 | 744 |
| 39 | 652 | 580 | 704 | 648 | 636 | 564 | 996 | 908 | 996 | 940 | 797 | 728 |
| 38 | 700 | 648 | 652 | 580 | 652 | 580 | 912 | 856 | 892 | 840 | 762 | 701 |
| 37 | 668 | 632 | 620 | 544 | 616 | 544 | 964 | 892 | 888 | 852 | 751 | 693 |
| 36 | 648 | 632 | 616 | 580 | 632 | 540 | 804 | 752 | 840 | 824 | 708 | 666 |
| 35 | 668 | 612 | 612 | 540 | 644 | 572 | 856 | 804 | 840 | 804 | 724 | 666 |
| 34 | 612 | 556 | 612 | 540 | 644 | 592 | 816 | 780 | 804 | 788 | 698 | 651 |
| 33 | 644 | 588 | 664 | 592 | 596 | 540 | 840 | 804 | 908 | 872 | 730 | 679 |
| 32 | 616 | 560 | 564 | 512 | 644 | 588 | 736 | 720 | 824 | 804 | 677 | 637 |
| 31 | 584 | 548 | 628 | 572 | 592 | 556 | 824 | 804 | 800 | 800 | 686 | 656 |
| 30 | 600 | 564 | 548 | 512 | 592 | 576 | 684 | 684 | 788 | 768 | 642 | 621 |
| 29 | 596 | 560 | 548 | 512 | 564 | 548 | 752 | 732 | 720 | 700 | 636 | 610 |
| 28 | 564 | 544 | 580 | 544 | 544 | 528 | 668 | 648 | 684 | 664 | 608 | 586 |
| 27 | 544 | 528 | 528 | 512 | 512 | 492 | 632 | 632 | 752 | 752 | 594 | 583 |
| 26 | 496 | 496 | 512 | 496 | 496 | 496 | 616 | 616 | 652 | 652 | 554 | 551 |
| 25 | 496 | 476 | 544 | 528 | 476 | 476 | 580 | 580 | 612 | 612 | 542 | 534 |
| 24 | 476 | 476 | 512 | 512 | 496 | 496 | 624 | 624 | 628 | 628 | 547 | 547 |
| 23 | 512 | 512 | 516 | 496 | 496 | 496 | 540 | 540 | 556 | 556 | 524 | 520 |
| 22 | 476 | 496 | 460 | 460 | 428 | 428 | 508 | 508 | 564 | 564 | 487 | 491 |
| 21 | 444 | 460 | 460 | 460 | 424 | 424 | 496 | 496 | 528 | 528 | 470 | 474 |
| 20 | 424 | 444 | 444 | 444 | 384 | 404 | 460 | 480 | 512 | 532 | 445 | 461 |
| 19 | 412 | 428 | 384 | 384 | 388 | 388 | 424 | 444 | 444 | 460 | 410 | 421 |
| 18 | 384 | 404 | 368 | 384 | 368 | 388 | 408 | 408 | 440 | 460 | 394 | 409 |
| 17 | 388 | 404 | 368 | 368 | 348 | 368 | 384 | 384 | 412 | 428 | 380 | 390 |
| 16 | 352 | 388 | 320 | 340 | 324 | 340 | 368 | 388 | 352 | 368 | 343 | 365 |
| 15 | 324 | 340 | 316 | 332 | 296 | 316 | 324 | 360 | 352 | 388 | 322 | 347 |
| 14 | 300 | 320 | 280 | 300 | 284 | 284 | 296 | 316 | 316 | 336 | 295 | 311 |
| 13 | 280 | 316 | 264 | 284 | 248 | 272 | 280 | 300 | 280 | 300 | 270 | 294 |
| 12 | 248 | 292 | 236 | 272 | 220 | 256 | 248 | 272 | 244 | 272 | 239 | 273 |
| 11 | 236 | 272 | 216 | 236 | 200 | 220 | 236 | 252 | 236 | 272 | 225 | 250 |
| 10 | 204 | 240 | 200 | 220 | 180 | 216 | 204 | 240 | 200 | 240 | 198 | 231 |
| 9 | 184 | 224 | 176 | 196 | 164 | 180 | 192 | 212 | 180 | 216 | 179 | 206 |
| 8 | 180 | 196 | 164 | 180 | 164 | 180 | 164 | 200 | 164 | 180 | 167 | 187 |
| 7 | 164 | 180 | 144 | 144 | 132 | 148 | 144 | 160 | 148 | 164 | 146 | 159 |
| 6 | 128 | 144 | 128 | 128 | 112 | 128 | 124 | 144 | 128 | 144 | 124 | 138 |
| 5 | 112 | 128 | 92 | 108 | 92 | 108 | 92 | 108 | 112 | 112 | 100 | 113 |
| 4 | 92 | 92 | 76 | 96 | 76 | 96 | 76 | 96 | 76 | 96 | 79 | 95 |
| 3 | 76 | 76 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 56 | 60 | 60 |
| 2 | 44 | 60 | 44 | 44 | 40 | 40 | 44 | 44 | 44 | 44 | 43 | 46 |
| 1 | 24 | 44 | 24 | 24 | 24 | 44 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 32 |
| 0 | 24 | 24 | 24 | 24 | 8 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 21 | 24 |



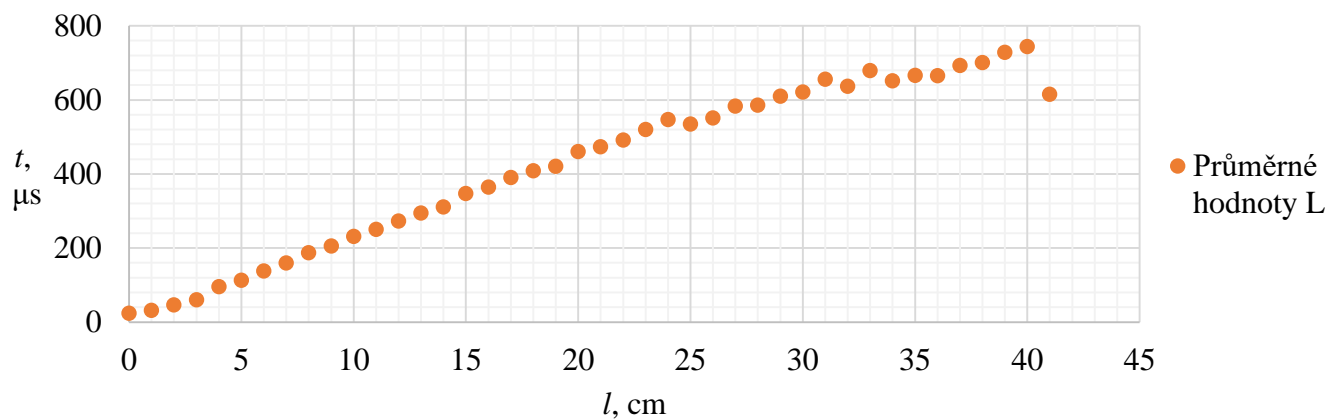
Obr. 1 – Měření vzdálenosti pravým čelním senzorem



Obr. 2 – Měření vzdálenosti levým čelním senzorem



Obr. 3 – Průměrné hodnoty z měření pravým čelním optickým senzorem



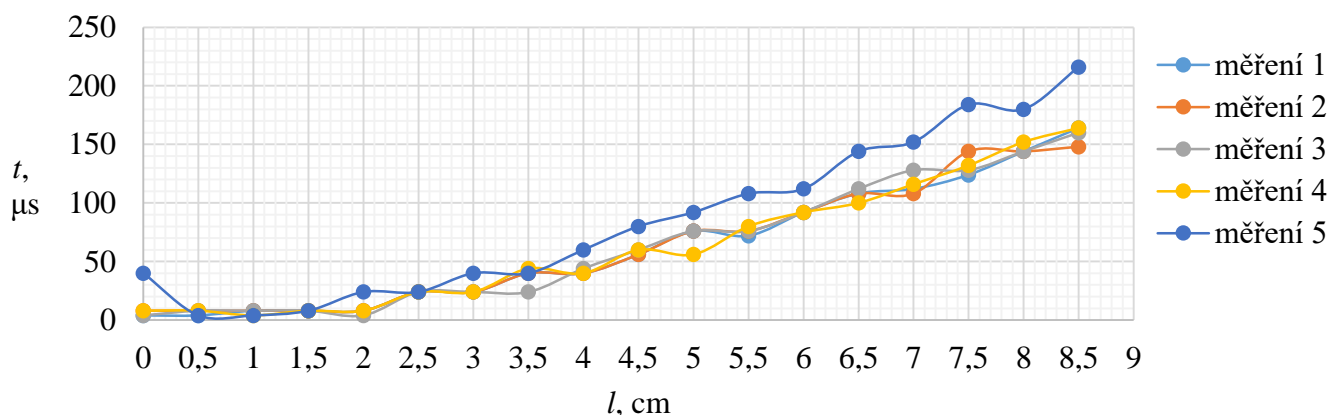
Obr. 4 – Průměrné hodnoty z měření levým čelním optickým senzorem

Tab. 3 – Měření bočním levým senzorem

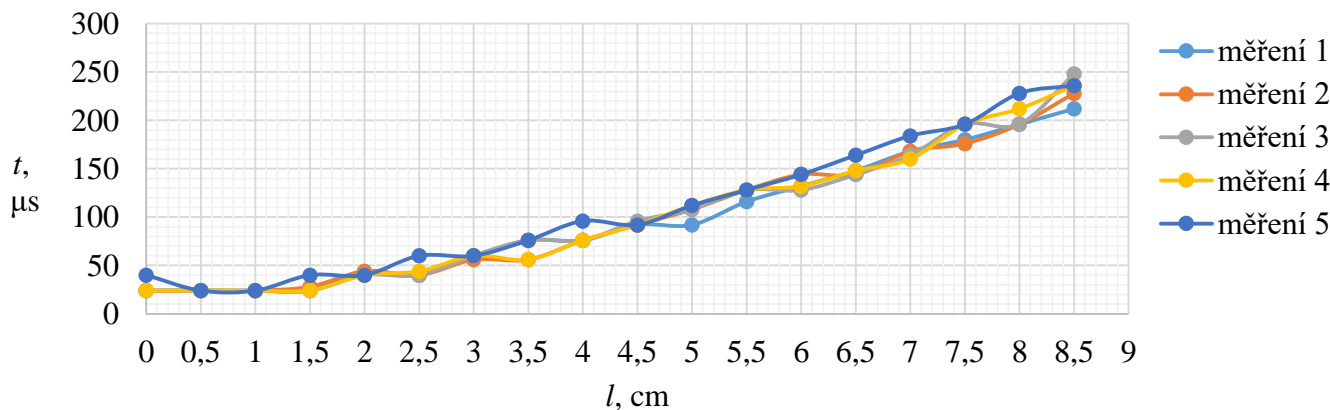
| $l, \text{ cm}$ | $t, \mu\text{s}$ | | | | | průměr |
|-----------------|------------------|-----|-----|-----|-----|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 8.5 | 164 | 148 | 160 | 164 | 216 | 170 |
| 8 | 144 | 144 | 144 | 152 | 180 | 153 |
| 7.5 | 124 | 144 | 128 | 132 | 184 | 142 |
| 7 | 112 | 108 | 128 | 116 | 152 | 123 |
| 6.5 | 108 | 108 | 112 | 100 | 144 | 114 |
| 6 | 92 | 92 | 92 | 92 | 112 | 96 |
| 5.5 | 72 | 76 | 76 | 80 | 108 | 82 |
| 5 | 76 | 76 | 76 | 56 | 92 | 75 |
| 4.5 | 56 | 56 | 60 | 60 | 80 | 62 |
| 4 | 40 | 40 | 44 | 40 | 60 | 45 |
| 3.5 | 40 | 40 | 24 | 44 | 40 | 38 |
| 3 | 24 | 24 | 24 | 24 | 40 | 27 |
| 2.5 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 2 | 8 | 8 | 4 | 8 | 24 | 10 |
| 1.5 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 1 | 8 | 8 | 8 | 4 | 4 | 6 |
| 0.5 | 4 | 8 | 8 | 8 | 4 | 6 |
| 0 | 4 | 8 | 4 | 8 | 40 | 13 |

Tab. 4 – Měření bočním pravým senzorem

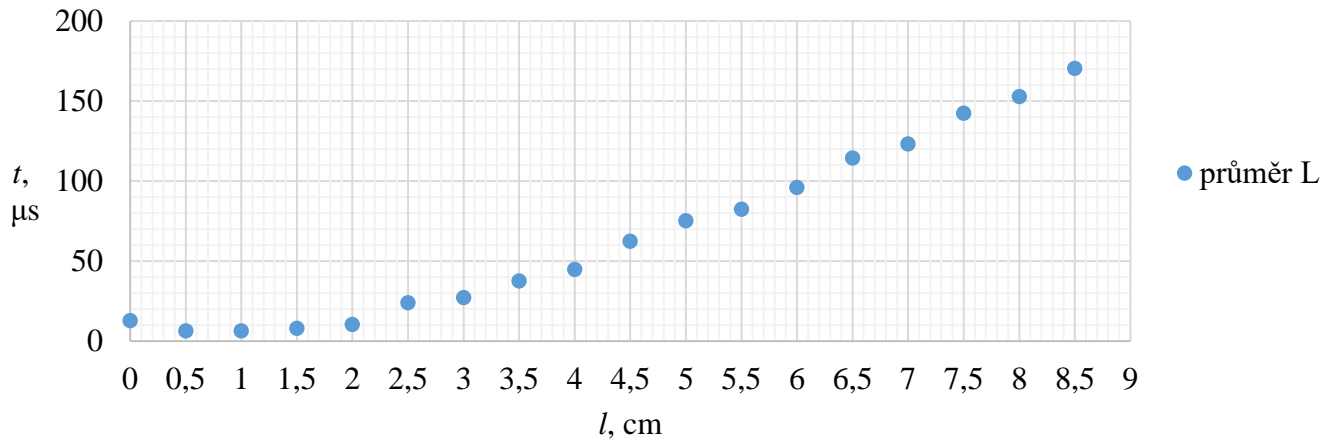
| l , cm | t , μs | | | | | průměr |
|----------|---------------------|-----|-----|-----|-----|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 8.5 | 212 | 228 | 248 | 236 | 236 | 232 |
| 8 | 196 | 196 | 196 | 212 | 228 | 206 |
| 7.5 | 180 | 176 | 196 | 196 | 196 | 189 |
| 7 | 168 | 168 | 164 | 160 | 184 | 169 |
| 6.5 | 148 | 144 | 144 | 148 | 164 | 150 |
| 6 | 132 | 144 | 128 | 132 | 144 | 136 |
| 5.5 | 116 | 128 | 128 | 128 | 128 | 126 |
| 5 | 92 | 108 | 108 | 112 | 112 | 106 |
| 4.5 | 92 | 92 | 96 | 92 | 92 | 93 |
| 4 | 76 | 76 | 76 | 76 | 96 | 80 |
| 3.5 | 76 | 56 | 76 | 56 | 76 | 68 |
| 3 | 60 | 56 | 60 | 60 | 60 | 59 |
| 2.5 | 40 | 40 | 40 | 44 | 60 | 45 |
| 2 | 44 | 44 | 40 | 40 | 40 | 42 |
| 1.5 | 24 | 28 | 24 | 24 | 40 | 28 |
| 1 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 0.5 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 0 | 24 | 24 | 24 | 24 | 40 | 27 |



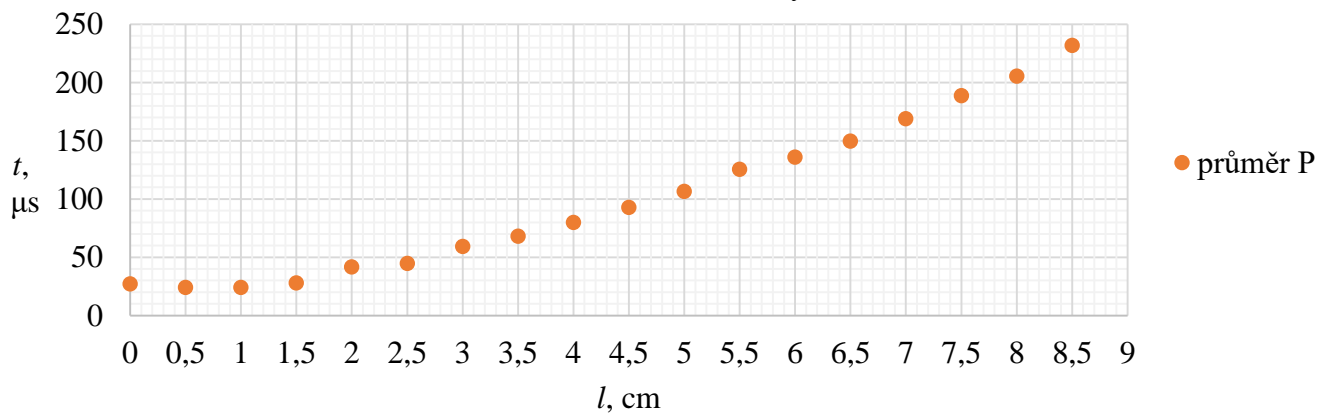
Obr. 4 – Měření bočním levým senzorem



Obr. 5 – Měření bočním pravým senzorem



Obr. 6 – Průměr z měření bočním levým senzorem



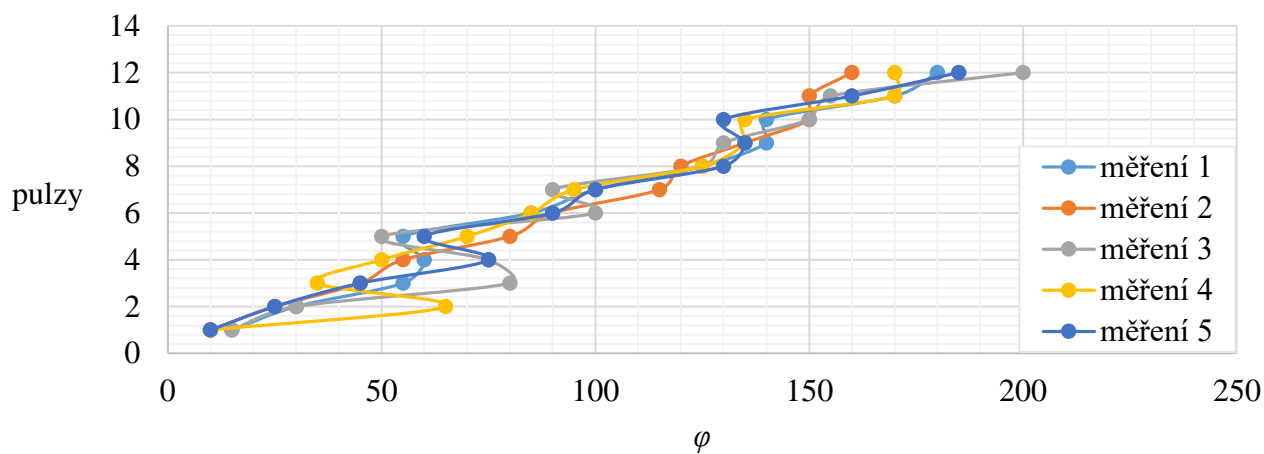
Obr. 7 – Průměr z měření bočním pravým senzorem

Tab. 5 – Měření enkodéry – otočení robota doprava

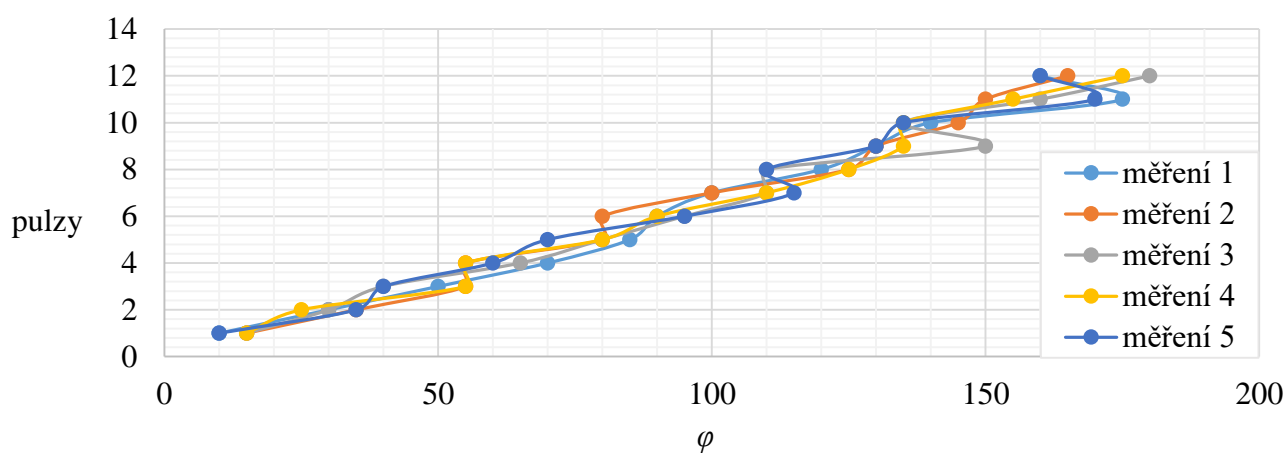
| | pulzy | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| φ | 15° | 30° | 55° | 60° | 55° | 85° | 100° | 125° | 140° | 140° | 170° | 180° |
| | 10° | 25° | 45° | 55° | 80° | 90° | 115° | 120° | 135° | 150° | 150° | 160° |
| | 15° | 30° | 80° | 75° | 50° | 100° | 90° | 125° | 130° | 150° | 155° | 200° |
| | 10° | 65° | 35° | 50° | 70° | 85° | 95° | 125° | 135° | 135° | 170° | 170° |
| | 10° | 25° | 45° | 75° | 60° | 90° | 100° | 130° | 135° | 130° | 160° | 185° |
| průměr | 12° | 35° | 52° | 63° | 63° | 90° | 100° | 125° | 135° | 141° | 161° | 179° |

Tab. 6 – Měření enkodéry – otočení robota doleva

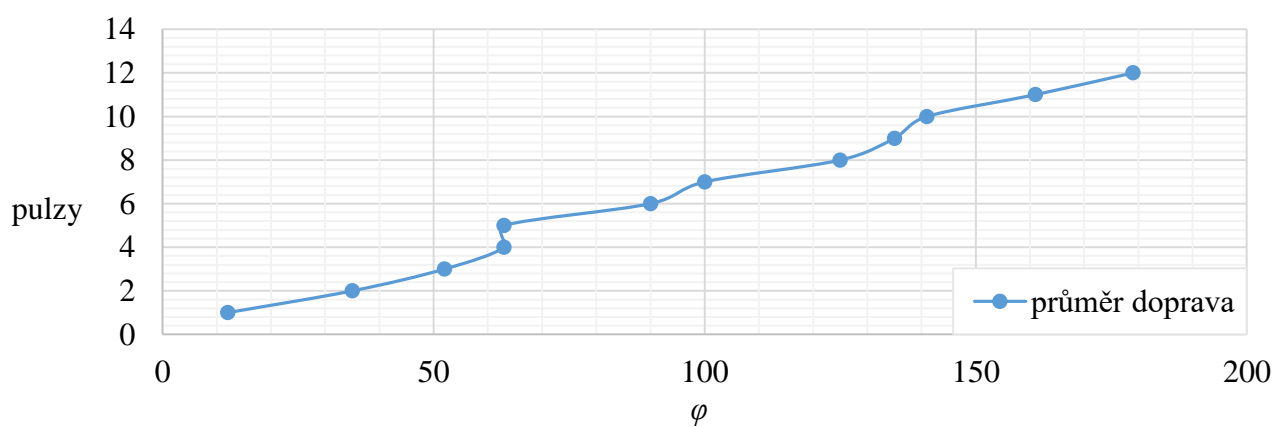
| | pulzy | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| φ | 10° | 30° | 50° | 70° | 85° | 90° | 100° | 120° | 130° | 140° | 175° | 160° |
| | 15° | 35° | 55° | 55° | 80° | 80° | 100° | 125° | 130° | 145° | 150° | 165° |
| | 15° | 30° | 40° | 65° | 80° | 95° | 110° | 110° | 150° | 135° | 160° | 180° |
| | 15° | 25° | 55° | 55° | 80° | 90° | 110° | 125° | 135° | 135° | 155° | 175° |
| | 10° | 35° | 40° | 60° | 70° | 95° | 115° | 110° | 130° | 135° | 170° | 160° |
| průměr | 13° | 31° | 48° | 61° | 79° | 90° | 107° | 118° | 135° | 138° | 162° | 168° |



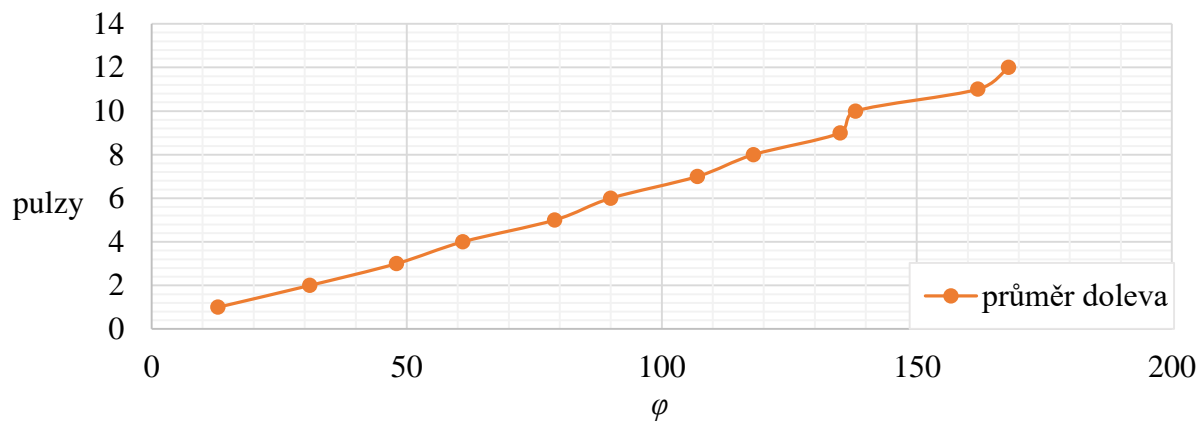
Obr. 8 – Měření enkodéry – otočení robota doprava



Obr. 9 – Měření enkodéry – otočení robota doleva



Obr. 10 – Měření enkodéry – průměrné hodnoty otočení robota doprava



Obr. 11 – Měření enkodéry – průměrné hodnoty otočení doleva