

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Autonomní řízení mobilního robotu

Autonomous control of the mobile robot

2014

Tomáš Dočekal

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Dočekal**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2601R004 Měřicí a řídicí technika
Téma: **Autonomní řízení mobilního robotu**
Autonomous Control of the Mobile Robot

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s problematikou mobilních robotů, jejich řídicích a senzorických systémů, autonomního řízení, strojového učení a umělé inteligence.
2. Návrh a realizace soustavy mobilního robotu a jeho autonomního řízení pro jednoduchou úlohu pohybu mobilního robotu v bludišti.
3. Sestavení soustavy autonomního mobilního robotu, realizace měřicího systému experimentu a realizace experimentů prokazujících autonomnost systému.
4. Zhodnocení výsledků řešení a experimentů.

Seznam doporučené odborné literatury:

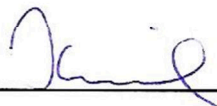
- [1] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty*. Vyd. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 247 s. ISBN 80-7300-141-1.
- [2] MATIČKA, Robert a Jaroslav TALÁČKO. *Mechanismy manipulátorů a průmyslových robotů*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1991, 269 s. ISBN 80-03-00567-1.
- [3] MARÍK, V., O. STEPÁNKOVÁ, J. LAZANSKÝ, a kol. *Umělá Inteligence (1-4)*. Praha: Academia, 1993-c2003, v. <1-4>. ISBN 80-200-0502-1.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

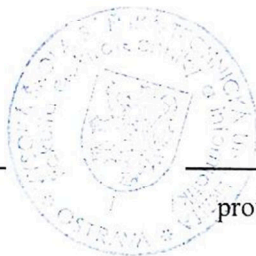
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Bohumil Horák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 4.5.2014

Dvořák
podpis

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a realizací mobilního robotu s primárním zaměřením na jeho autonomní řízení. Pro tento účel byla zvolena úloha průjezdu robotu bludištěm s požadavkem na jeho mapování a vyhledávání nejkratší cesty mezi dvěma místy v bludišti. Při tvorbě robotu byla nejprve vyrobena jeho mechanická část zahrnující především pohony a poté elektronická. Mezi hlavní body tvorby elektronické části patřil výběr vhodných senzorů a mikrokontroléru pro řízení robotu. V poslední části vývoje byl tvořen program obsahující algoritmy pro zajištění požadovaného autonomního řízení.

Klíčová slova

Mobilní robot, bludiště, micromouse, mapování, vyhledávací algoritmus

Abstract

This work is about design and realization of the mobile robot with primary focus on its autonomous control. For this purpose was chosen the task moving in the maze with requirement for mapping the maze and finding the shortest path from one to another position. The mechanical part, which contains especially the drives, was constructed as the first. The main issues related to electronic part were selecting of suitable sensors and microcontroller. The last phase of development was focused on creation of controlling program. The individual algorithms provide the autonomous control of the mobile robot.

Key words

Mobile robot, maze, micromouse, mapping, maze solving algorithm

Seznam zkratek a symbolů

A	ampér
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
A/D	analogově digitální převodník
a	zrychlení
BLDC	brushless direct current
CAN	Controller Area Network
CCD	Charge Coupled Device
cm	centimetr
cm ³	centimetr krychlový
D/A	digitálně analogový převodník
d	průměr (m)
F	síla (N)
f	frekvence (Hz)
GPS	Global Positioning System
g	gram
H	stav High
IR	infra red
ISP	In System Programming
kB	kilobyte
kg/m ³	kilogram na metr krychlový
kgm ²	kilogram metr čtvereční
kHz	kilohertz
kΩ	kiloohm
L	stav Low
LED	Light Emmiting Diode
Li-pol	lithium polymer
M	moment síly (Nm)
MEMS	Micro Electro Mechanical System
MHz	megahertz
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
m	hmotnost (kg)
m/s	metr za sekundu
m/s ²	metr za sekundu na druhou
mA	miliampér
mAh	miliampérhodina
mm	milimetr
mm ³	milimetr krychlový
mNm	milinewton metr
ms	milisekunda
N	newton

NiCd	nikl kadmium
NiMH	nikl metal hydrid
Nm	newton metr
n	otáčky (ot/min, rpm)
nF	nanofarad
ns	nanosekunda
P	výkon (W)
PC	Personal Computer
PSD	Position Sensitive Detector
PWM	Pulse Width Modulation
pF	pikofarad
r	poloměr (m)
rpm	revolutions per minute
SRAM	Static Random Access Memory
s	sekunda
T	perioda (s)
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus
V	objem (kg/m^3)
V	volt
v	rychlost (m/s)
W	watt
μH	mikrohenry
μs	mikrosekunda
ρ	hustota (kg/m^3)

Obsah

1 Úvod	10
2 Mobilní robot.....	11
2.1 Konstrukční uspořádání.....	11
2.2 Pohonný systém.....	12
2.3 Senzory	12
2.3.1 Dělení senzorů	13
2.4 Řídicí systémy	14
2.4.1 Koncepce řídicích systémů.....	14
2.5 Napájecí systém.....	15
2.6 Komunikace.....	16
2.7 Autonomní řízení.....	16
3 Definice úlohy pro bakalářskou práci.....	18
3.1 Popis bludiště.....	18
3.2 Požadavky kladené na robot	19
3.3 Konstrukce robotu	19
3.4 Specifikace typu pohonu	19
3.5 Sensorický systém	20
3.5.1 Interní senzory	20
3.5.2 Externí senzory	22
3.6 Řídicí systémy	25
3.7 Algoritmy pro průjezd bludištěm	25
3.7.1 Sledování stěny („Wall follower“)	26
3.7.2 Odřezávání slepých konců („Dead end filler“).	26
3.7.3 Tremauxův algoritmus.....	26
3.7.4 Rozlévání barvy („Flood fill“).	27
4 Realizace hardwarové části	28
4.1 Konstrukce.....	28

4.2 Pohony	28
4.2.1 Kola	28
4.2.2 Motory	30
4.2.3 Převody	34
4.2.4 Konstrukční díl	34
4.3 Napájecí systém	35
4.4 Elektronické zapojení a plošný spoj	36
4.4.1 Řídicí systém	36
4.4.2 Sensorický systém	36
4.4.3 Budící obvod motorů	38
4.4.4 Napájení systémů	39
4.5 Sestavený mobilní robot	40
5 Softwarové řešení	41
5.1 Obsluha jednotlivých periferií	41
5.1.1 Základní uživatelské rozhraní	41
5.1.2 Kontrola stavu baterie	42
5.1.3 Komunikace přes rozhraní UART	43
5.1.4 Čtení ze senzoru stěn a zpracování údajů	43
5.1.5 Ovládání pohonů	46
5.2 Algoritmy pro autonomní chování	50
5.2.1 Pohyb robotu	50
5.2.2 Reprezentace bludiště a jeho ukládání	52
5.2.3 Algoritmus pro vyhledávání cesty	52
6 Experiment	54
6.1 Dosažení zadané pozice	54
6.2 Průjezd bludištěm třemi způsoby	54
6.3 Autonomní mapování potřebné oblasti	55
7 Závěr	56

8 Seznam použité literatury	58
9 Seznam příloh	60

1 Úvod

Vymežit samotný pojem mobilní robot je poměrně složité, byť se to tak nemusí zdát a většina lidí si dokáže vytvořit svoji přibližnou představu. Jedná se o zařízení uzpůsobené k pohybu v určitém prostředí, pro které je určeno. Problematikou mobilních robotů se zabývá vědní disciplína robotika, která je v dnešní době z velké části realizována na vysokých školách.(1)

Jelikož samotné zařízení obsahuje mechanický a elektronický subsystém, pod které spadají také subsystémy řídicí, pohonné, senzorické a další, označujeme roboty jako mechatronické systémy.

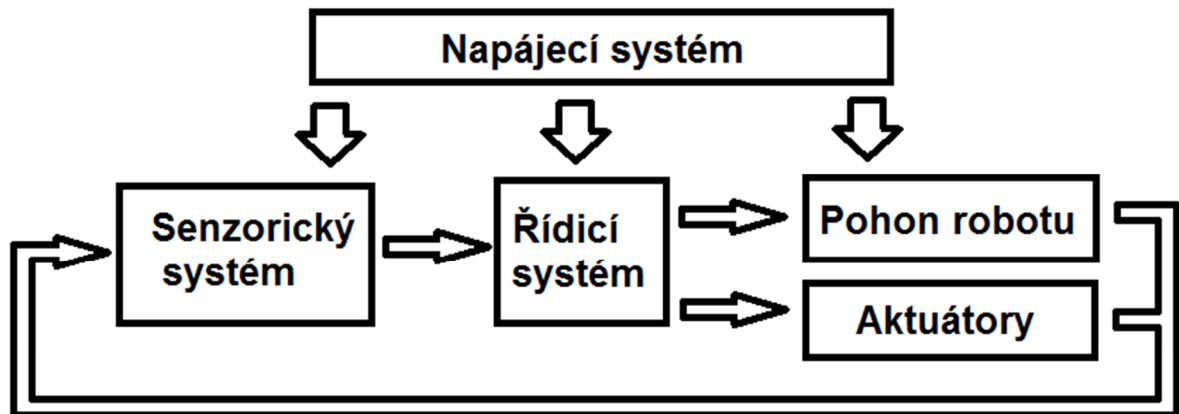
Obecnou skupinu mobilních robotů je možno rozdělit podle řady kritérií. Mezi jedno ze základních patří dělení na autonomní a na dálkově řízené roboty. V prvním případě je robot navržen tak, aby zvládal vykonávat určitou činnost autonomně, bez zásahu operátora, pouze s využitím svého senzorického systému. V druhém je robot ovládán na dálku a k uzavření pomyslné zpětné vazby, například mezi jeho senzory a aktuátory, je zapotřebí člověk, kterého označujeme jako operátora. I v tomto případě však může být robot částečně autonomní a například reagovat na určité podmínky prostředí, třeba výskyt překážky, kterou nezvládne překonat, takže zastaví svůj pohyb v daném směru i přes příkazy od operátora. Na okraji této druhé kategorie mohou být roboty, které bychom mohli označit jako poloautonomní nebo lépe částečně autonomní. V takovémto případě může být operátorem zadána kupříkladu pozice, na kterou se má robot přemístit, avšak samotný přesun je již plně autonomní bez dalších zásahů.

V oblasti robotiky se také rozlišují dva téměř totožné pojmy – roboti a roboty. Označení roboty považujeme za neživotné a klasickými zástupci této skupiny jsou průmyslové roboty umístěné na montážních linkách různých firem. V případě pojmu roboti mluvíme o zařízeních živých nebo alespoň takových, kterým přiřazujeme určité známky života či inteligence. Takovýto robot by měl být schopen určitým způsobem řešit různé situace. Můžeme se také setkat s použitím životného výrazu robot jakožto označení pro humanoidní roboty, tedy roboty připomínající svým vzhledem člověka.(2)

Býť se problematika mobilních robotů zabývá z velké části autonomními roboty, bývají tyto povětšinou spíše pojezdové, navržené pro pohyb v terénu s využitím pásů či kol, méně často se pak jedná o varianty létající či pohybuující se v tekutinách, a i když zvládají určitý problém řešit autonomně, volíme pro jejich označení neživotnou variantu slova robot.

2 Mobilní robot

Důvodem návrhu těchto robotů je především potřeba provádět určité operace v nebezpečném nebo nepřístupném prostředí, případně zastání určitých jednoduchých a monotónních prací. Zařízení spadající do této kategorie, mezi mobilní roboty, musí obsahovat několik systémů, které jsou vzájemně propojeny a umožňují robotu určitým způsobem fungovat. V zásadě přímo ovlivňují jeho omezení a možnosti použití, proto je zapotřebí věnovat jejich volbě dostatek pozornosti.

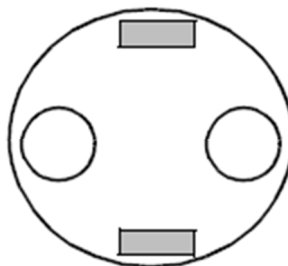


Obrázek 1 - Blokové schéma mobilního robotu

2.1 Konstrukční uspořádání

Nejčastěji se můžeme setkat s kolovými mobilními roboty. Jejich pohonný systém z hlediska mechaniky může být řešen několika různými způsoby.

Nejjednodušším řešením je podvozek s diferenčně řízenými koly (též diferenční podvozek), který bývá obvykle opatřen jedním či více pasivními koly či opěrnými body, které slouží pro zajištění stability a rovnováhy robotu během pohybu i při stání. Takto řešený podvozek má ohromnou výhodu především ve velké manévrovatelnosti. Robot s diferenčně řízenými koly se může prakticky otáčet na místě s nulovým poloměrem zatáčení.(1)

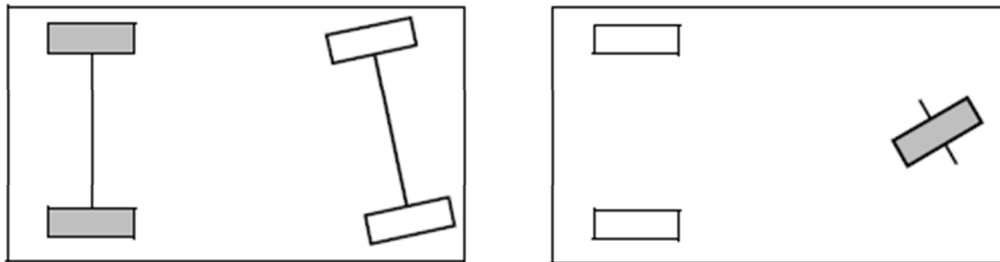


Obrázek 2 - Znáznornění diferenčního podvozku se dvěma poháněnými koly (šedá) a dvěma opěrnými body (4)

Totožný princip řízení využívají roboty s pásovými podvozky vycházející z konceptů různých tanků. Kromě vysoké manévrovatelnosti je robot s diferenčním podvozkiem také snadno ovladatelný. Mluvíme-li o ideálních podmínkách a pohybu na rovné ploše, stačí pro rovnou jízdu zajistit otáčení

obou hnacích kol stejnou rychlostí, mají-li shodný obvod. Úpravou rychlosti některého z kol zajistíme zatáčení mobilního robotu po kružnici s určitým poloměrem zatáčení, který se bude zmenšovat spolu s rozdílem rychlostí obou kol. Při uvažování pohybu v terénu se ale řízení komplikuje a je zapotřebí využívat různé senzory.(1)

Druhým nejčastěji používaným řešením pojezdového systému je Ackermanovo uspořádání podvozku. Běžně se s ním setkáváme u automobilů. Důležitým aspektem těchto konstrukcí je využití alespoň jednoho kola, které je otočné kolem svislé osy a určuje tedy směr pohybu.



Obrázek 3 - Znázornění Ackermanova uspořádání se čtyřmi a třemi koly, šedá kola jsou poháněná (4)

U mobilních robotů se nejčastěji můžeme setkat s řešením, kdy dvě přední kola jsou otočná a zadní kola jsou hnací, obvykle vybavena diferenciálem, ať už elektronickým nebo mechanickým. I když robot s takto řešeným podvozkem ztrácí možnost otáčet se na velmi malém prostoru či dokonce na místě, umožňuje na druhou stranu velmi jednoduše pohyb konstantní rychlostí při křivočarém pohybu.(1)

2.2 Pohonný systém

Podle zaměření robotu a jeho konstrukčního uspořádání bývá vybaven určitým typem pohonu. Omezíme-li se na dříve zmíněná konstrukční uspořádání týkající se mobilních robotů určených pro pohyb na pevném povrchu, můžeme dojít k několika variantám.

Pohon je často elektrický a využívá určitý typ elektromotoru. Mezi další varianty patří pohony s hydraulickými nebo pneumatickými motory. Obvykle se však u mobilních robotů příliš nepoužívají, své využití mají u robotů průmyslových. Použitelné jsou také různé druhy spalovacích motorů, především u robotů větších konstrukcí určených pro pohyb ve venkovním prostředí.(3)

Omezíme-li se na pohony s elektromotory, probíhá obvykle jejich volba nejen na základě dostupného prostoru na robotu, ale také podle požadavků, které jsou na pohonný systém kladeny, jelikož různé typy motorů jsou vhodné pro jiné využití a mají odlišné charakteristiky a také způsoby řízení. Mnohdy bývají doplněny o převody, které způsobí snížení výstupních otáček pohonu a nárůst krouticího momentu na výstupní hřídeli. Díky tomu může mít robot vyšší hmotnost nebo se může bez potíží pohybovat i do svahu.

2.3 Senzory

Mobilní robot je obvykle navrhován pro určitou činnost či úlohu. Základním předpokladem pro její správné řešení není co nejvyšší inteligence systému, nýbrž co nejlepší vybavení pro danou úlohu. To znamená, že není až tak podstatné, aby byl robot vybaven nejvýkonnějším řídicím

systémem. Důležitější je jeho vybavenost vhodnými senzory, díky kterým je schopen vnímat potřebné podněty z okolí, ale také interní informace o sobě samém. Tyto údaje pak mohou být zpracovány a vyhodnocovány a na jejich základě dochází k volbě nevhodnější činnosti, která má vést ke zdárnému splnění definovaného problému.(2)

Návrh adekvátního senzorického systému není nikterak jednoduchý a je zapotřebí mu věnovat dostatečnou pozornost. Je důležité zvolit vhodnou metodu pro měření dané veličiny a také správný způsob vyhodnocování získaných údajů. K celkovému návrhu se váže několik doporučení.(5)

Senzorický systém by měl být co nejjednodušší. Neznamená to, že by se neměly využívat složité a komplexní senzory, ale jejich nasazení by mělo být předem zváženo. U jednoduchých senzorů se snižuje možnost vzniku poruchy či chyby při převodu měřené veličiny.(6)

Je vhodné myslet také na modulárnost. Při vhodném návrhu systému je později možné jednoduše vyměnit nefunkční senzory, nahradit stávající variantu vhodnější či úplně jinou, odstranit nepoužívané senzory či přidat další, které jsou zapotřebí. Každý z těchto zásahů by neměl mít vliv na ostatní senzory a měl by být snadno proveditelný.(6)

V mnoha případech, kde se využívají mobilní roboty, je zapotřebí, aby robot fungoval bez závad. Často to může být z důvodu, že jeho okamžitá oprava není možná nebo že jeho selhání může mít těžké následky. Příkladem může být využití ve vojenském sektoru nebo při práci v nebezpečném prostředí, kterým může být okolí požáru. Pro zabránění selhání robotu se používá u senzorů určitá redundance. Ta může být dvojího typu. V prvním případě se jedná o fyzickou redundanci, kdy je robot vybaven několika totožnými senzory, takže v případě vypovězení jednoho z nich má stále dostatek informací ke správnému plnění své funkce. Druhou možností je redundance logická. Ta spočívá ve využití dvou různých senzorů pracujících na odlišných principech pro měření totožné veličiny. Jejich údaje pak mohou být porovnány nebo použity společně k dalším výpočtům a zvolení nevhodnější reakce. Je však zapotřebí brát v úvahu, že odlišné senzory pracují různě rychle a zpracování více údajů může trvat značně déle.(6)

2.3.1 Dělení senzorů

Obecně se můžeme setkat s dvojím různým dělením senzorů na interní či externí a na aktivní nebo pasivní.

Zatímco interní senzory informují robot o jeho vlastním stavu, například teplotě mikroprocesoru nebo natočení určitého motoru, externí senzory mu poskytují informace o tom, jak vypadá jeho okolí a obvykle slouží k jeho navigaci. Mezi interní senzory můžeme zařadit enkodéry nebo akcelerometry, k externím pak všechny druhy senzorů pro detekci překážek, ale také například moduly GPS.

Druhé zmíněné dělení senzorů se týká víceméně pouze externích. Mluvíme-li o aktivním senzoru, míníme tím takový, který do svého okolí vysílá určitou energii a na jejím základě získává z okolí informace. Příkladem může být ultrazvukový senzor sloužící k identifikaci překážek a jejich vzdálenosti, který nejprve do prostředí vyše akustický signál a následně čeká na vrácení jeho odrazu – echa. Pasivní senzory pak pouze přijímají energii z okolí a na jejím základě může robot určit některé jeho vlastnosti. Do této kategorie můžeme zařadit snímače okolního osvětlení, hluku, ale také například CCD kameru, nepoužívá-li přídavné světlo.(2)(6)

2.4 Řídicí systémy

Jedná se o nedílnou součást každého mobilního robotu. Spolu s ovládacím programem zajišťuje zpracování údajů ze sensorů, kterými je robot vybaven, jejich správné vyhodnocení a zajištění požadované reakce na aktuátorech a pohonech. Zatímco program s daty provádí různé operace a přepočty, řídicí systém sám o sobě musí umožnit jejich načtení ze všech sensorů a to bez ztráty informací. Podstatné je také umožnění připojení rozličných výstupních členů a jejich obsluha. S tím se pojí požadavky týkající se dostatečného výpočetního výkonu řídicích systémů, aby bylo možno všechny operace provádět v požadovaném čase, především kvůli realizaci regulačních smyček, ale také kvůli samotné činnosti mobilního robotu, který musí na dané podněty reagovat včas.(1)

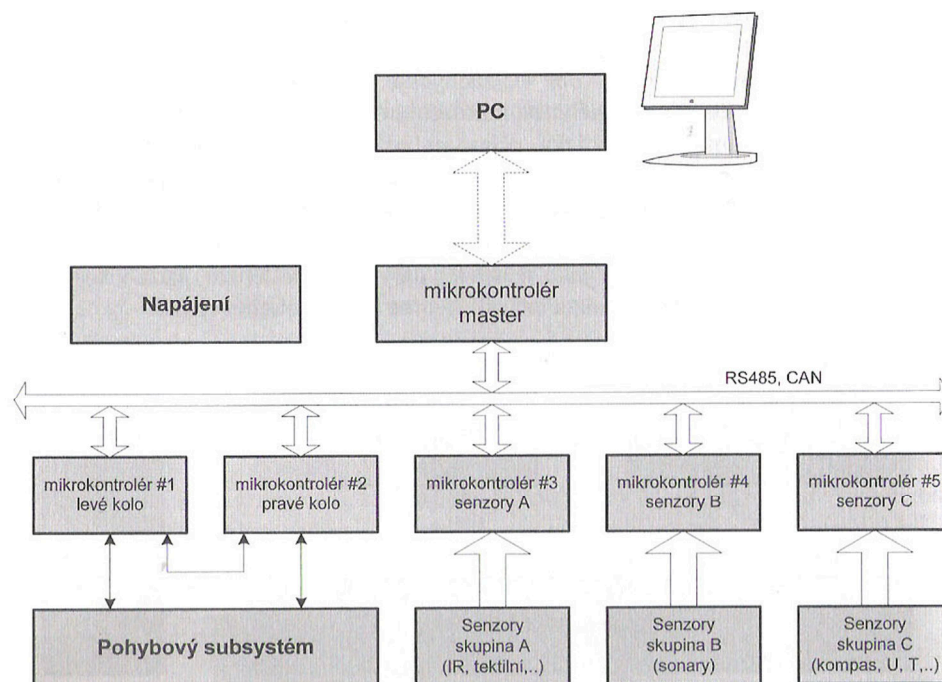
Volba řídicího systému se odvíjí od řady parametrů. Jednou z jejich skupin je jeho odolnost vůči okolním podmínkám, například teplotě či vlhkosti. S tím souvisí také fyzická realizace systému, zda se jedná pouze o plošný spoj nebo zda je nějakým způsobem kryt.(1)

Dalším parametrem je také rozměr a hmotnost řídicího systému. Ten totiž může být představován malým mikrokontrolérem nebo daleko rozměrnějším počítačem, ať už v podobě základní desky s procesorem a nezbytnými součástmi nebo celého notebooku či průmyslového PC.(1)

2.4.1 Koncepce řídicích systémů

Řídicí systém nemusí být realizován pouze jedním mikrokontrolérem či počítačem, může se také jednat o systém tzv. distribuovaný. To znamená, že celý systém je složen z jednodušších dílčích řídicích obvodů, nejčastěji mikrokontrolérů, které obsluhují daný sensor, jejich skupinu nebo dané akční členy a komunikují mezi sebou nebo s nadřazenou jednotkou, podle hierarchie celé sítě. Propojení jednotlivých částí bývá obvykle realizováno pomocí některého z definovaných rozhraní, například CAN, UART nebo Ethernet. Hlavní řídicí jednotka nemusí být obsažena přímo na robotu, ale robot s ní může komunikovat bezdrátově – odesílat naměřené údaje a přijímat povely.(1)

K distribuovanému uspořádání se můžeme uchýlit při realizaci velkého a složitého mobilního robotu. Jeho koncepce umožňuje testovat jednotlivé komponenty samostatně a také je samostatně vytvářet, což umožňuje rozdělení práce do více týmů. Díky využívání komunikačních rozhraní není ani složitá výměna určitých kompletních modulů, rozšíření robotu o další nebo odebrání nepotřebných částí.



Obrázek 4 - Blokové schéma distribuovaného řídicího systému (1)

V případě malých mobilních robotů je vhodné realizovat řídicí systém založený pouze na jednom mikrokontroléru. Ten musí být volen tak, aby obsahoval dostatečný počet periférií s požadovanými funkcemi a režimy práce, adekvátně velkou paměť pro uložení programu i dat a patřičný výkon umožňující plynulý běh různých algoritmů. I za předpokladu realizace mobilního robotu modulárně, složeného z více dílčích plošných spojů, nemusí být v takovémto případě snadná výměna například určitého senzoru za jiný typ, jelikož ten může ke své činnosti požadovat jiný způsob připojení.

Populárním řešením v oblasti systémů s mikrokontroléry je využívání vývojových desek od různých výrobců. Ty obvykle kromě samotného čipu obsahují konektory s vyvedenými veškerými vstupními i výstupními linkami, pár signalizačních LED, tlačítka a programovací obvod umožňující snadné připojení vývojové desky k počítači s vývojovým prostředím, často pouze prostřednictvím USB kabelu. Můžeme se ale také setkat s tím, že dané desky obsahují i senzory, především z kategorie MEMS – gyroskopy, akcelerometry a magnetometry. Tím se jejich využití značně rozšiřuje.

2.5 Napájecí systém

Aby mohl být robot mobilní, musí obsahovat také svůj samostatný zdroj energie. Jeho výběr se opět odvíjí od zaměření robotu. Pro danou činnost musí napájecí systém zajišťovat dostatek energie tak, aby mohla být splněna zadaná úloha.

Základní možností je využití rozličných typů baterií. S výhodou se využívá článků dobíjecích, kdy činnost robotu může zahrnovat také kontrolu stavu baterií a případné autonomní dobíjení. V dnešní době se stále častěji používají baterie typu Li-pol, které mají velmi příznivý poměr hmotnosti k množství uložené energie. Při plném nabití dosahují napětí až 4,2 V, nicméně nominální hodnoty se pohybují v rozmezí 3,6 až 3,7 V. U tohoto typu baterií je zapotřebí dbát na vhodné uložení a případné

mechanické krytí, které baterie v základu neobsahují, jelikož v případě výrazného mechanického poškození může dojít k destrukci nejen baterie, ale i zařízení v jejím okolí. V dřívějších dobách se pak jednalo o baterie NiMH nebo NiCd, které však mají nižší kapacitu a také napětí připadající na jeden článek, které je u NiMH baterií 1,2 V a u NiCd 1,5 V. Za zmínku také stojí olověné akumulátory, které zvládají dodávat poměrně vysoký výkon, který může být zapotřebí u větších konstrukcí při jejich rozjezdu.

Spalovací procesy se běžně u mobilních robotů nepoužívají. Tato skutečnost může vycházet například z jejich nasazování v nebezpečných prostorech, kde by vylučování zplodin vzniklých spalováním mohlo být nežádoucí. Navíc nutnost provádět převody energie z chemické na mechanickou a poté elektrickou by vedly ve výsledku ke značným ztrátám a neefektivnosti.

U některých aplikací se také rozšiřuje nasazení alternativních zdrojů elektrické energie, mezi které můžeme zařadit například nasazení fotovoltaických panelů nebo využití palivových článků pro získání elektrické energie. Energie získaná z fotovoltaických panelů nachází uplatnění například u mobilních robotů, které jsou určeny pro nasazení ve vnějším prostředí a nemají jiné možnosti dobíjení nebo také u robotů pro vesmírný výzkum, kdy bez energie získané ze slunečního záření by výzkumný robot byl ve výsledku nepoužitelný, jelikož by téměř okamžitě vyčerpал veškerou svoji energii.

Obvykle bývá samotný zdroj energie doplněn stabilizátory napětí. Velmi často se u mobilních robotů používají napěťové úrovně 5 V a 3,3 V, pro které bývá uzpůsobena většina elektronických obvodů i modulů. U větších mobilních robotů se může jednat i o napěťové úrovně 24 V a další.

2.6 Komunikace

Často se u mobilních robotů setkáme s různými způsoby komunikace s dalšími zařízeními. Důvodem k tomu může být skutečnost, že se nejedná o robot autonomní, ale dálkově řízený, který by bez komunikace s operátorem byl nepoužitelný. Také může být zapotřebí monitorovat a zaznamenávat velké množství dat, která by se do pamětí umístěných na mobilním robotu nevešla, nebo jen data zobrazovat v reálném čase. U mobilních robotů určených pro práci ve skupinách je navíc komunikace nutností, probíhá pomocí ní realizace spolupráce nebo předávání informací o okolí.

V základu může být komunikace realizována pomocí drátů, kdy se obvykle využívá některé z definovaných standardních rozhraní, jako například CAN či Ethernet, nebo využitím některé z bezdrátových technologií, mezi které můžeme zařadit WiFi a Bluetooth. V obou případech se jedná o komunikaci rádiovou. Umožňuje-li prostředí přímou viditelnost a je-li to z nějakých důvodů výhodné, může být také pro realizaci bezdrátové komunikace použito infračervené záření. Tento princip se hojně využívá u elektroniky, která je vybavena dálkovými ovladači, a nasazení u mobilních robotů není vyloučeno.

2.7 Autonomní řízení

Roboty z podskupiny mobilních robotů označované jako autonomní jsou vždy určeny pro vykonávání daného úkolu. Ten musí být nejprve specifikován a následně posouzen a rozebrán do různých detailů, které zahrnují nejen návrh potřebných senzorů a mechanického rozložení robotu, ale také způsob chování mobilního robotu, jeho reakce na určité podněty tak, aby mohl ve všech situacích pokračovat v plnění zadaného úkolu. Jedná se tedy o první část autonomního řízení, která je velmi specifická a liší se vždy podle požadované činnosti robotu.

Druhou oblastí spadající do autonomního řízení je bezesporu navigace mobilního robotu v prostoru. Tato část je v základu pro všechny roboty shodná, může se ale odlišovat způsobem snímání okolního prostoru, přístupem k získaným údajům i dalšími detaily. Jiné nároky na detekci okolních předmětů bude mít robot určený pro práci například v lese a jiné průzkumná kvadrokoptéra. V prvním případě se pravděpodobně bude jednat především o detekci a vyhýbání se stromům, konstrukce robotu bude velká a robustní a může pro přesun využívat například systém GPS. Naopak mobilní robot typu kvadrokoptéra určený pro průzkum budov nebo jiné špionážní akce bude mnohdy potřebovat přesně rozlišovat jednotlivé předměty a jejich rozměry a detekce bude muset probíhat v 3D prostoru, nikoliv pouze v rovině. S výhodou nebo dokonce nutností bude moci takovýto robot prostory, ve kterých se bude pohybovat, mapovat.

V praxi může být problematika autonomního řízení spojená s navigací v prostoru zjednodušena díky znalosti některých jeho vlastností již při tvorbě řídicích algoritmů. Například mobilní robot, který by byl určený pro pohyb po vymezeném úseku chodníku nebo nějaké komunikace, může apriorně znát druh povrchu, po kterém se má pohybovat, jeho naklonění nebo minimální poloměry zatáček atd.

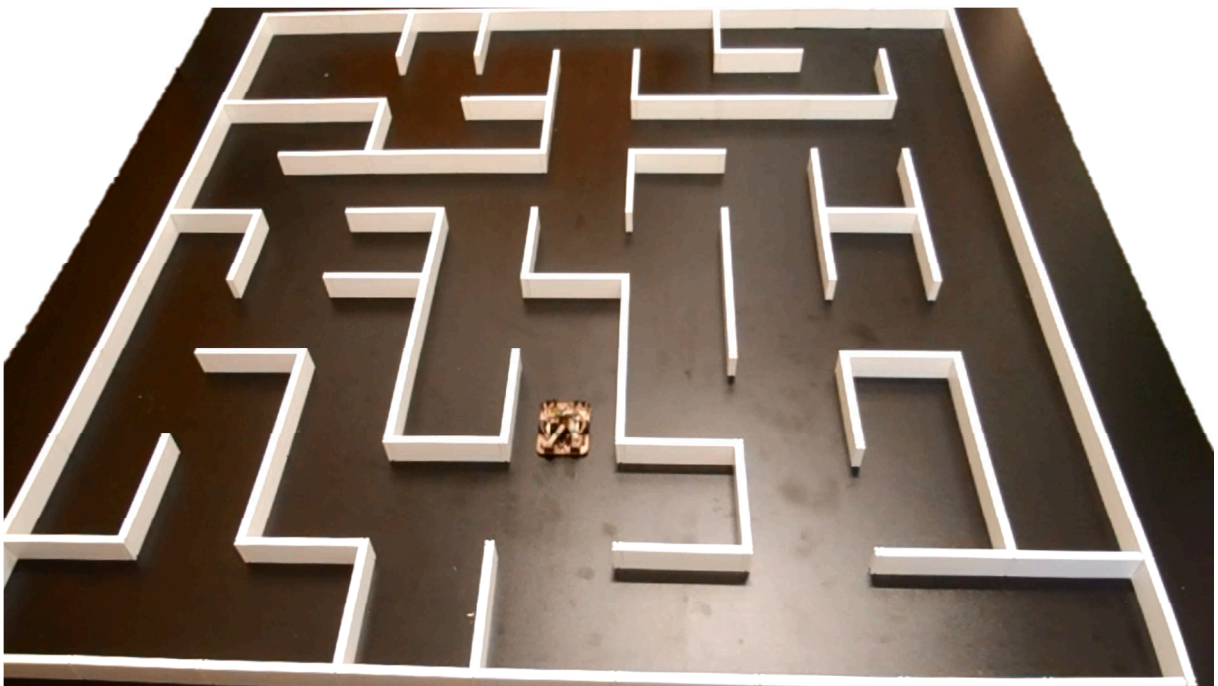
U dnešních mobilních robotů se můžeme setkat také s určitými prvky umělé inteligence. Určitá rozhodnutí v algoritmech se pak mohou provádět na základě získaných zkušeností nebo uvedení jistých pravidel. Tento postup, kdy si robot utváří pravidla a rozhoduje se na základě poznatků a zkušeností, nazýváme strojovým učením. V obecnější podobě robot na základě poznatku utváří pravidla, která pak aplikuje na různé příklady a v důsledku oprav těchto rozhodnutí nebo pozorování následků původní pravidla modifikuje.(7)

3 Definice úlohy pro bakalářskou práci

Praktickou náplní bakalářské práce je realizace mobilního robotu a jeho autonomního řízení. K tomuto účelu byl zvolen mobilní robot určený pro pohyb v bludišti. Jedná se o soutěžní kategorii autonomních mobilních robotů, která vznikla již v roce 1977. Základním úkolem robotu je dostat se ze startovní pozice do cílové buňky bludiště v co nejkratším čase. Díky tomu dochází ke zjednodušení problematiky autonomního řízení, přesněji problematiky týkající se navigace v prostoru, jelikož jsou předem známy vlastnosti a parametry bludiště. Z nich také vychází definice mnoha požadavků na mobilní robot a jeho jednotlivé systémy.(5)

3.1 Popis bludiště

Soutěžní bludiště bývá čtvercové a skládá se z 16×16 základních buněk, kdy každá z nich má stanovený rozměr 18×18 cm. Startovní pozice se nachází v jednom z rohů a bývá ohraničena ze tří stran stěnami, jak jsou nazývány části bludiště, a cílová pak ve středu bludiště, kde je tvořena čtvercem čtyř buněk ohraničených stěnami tak, že do něj existuje pouze jeden vstup. Někdy je možno se setkat se zmenšenou variantou 9×9 buněk, kdy zůstává zachována relativní vzdálenost startovní a cílové pozice, akorát dochází ke zmenšení okolního prostoru.(8)(9)



Obrázek 5 - Ukázka soutěžního bludiště

S výjimkou cílové oblasti se v rohu všech buněk nacházejí sloupky, kdy ke každému sloupku musí vést alespoň jedna stěna. Oba tyto prvky musejí být ze stran bílé a seshora červené. Jejich povrch musí navíc dle pravidel odrážet infračervené záření a výška je stanovena na 5 cm. Rozměry sloupků jsou tedy 12×12×50 mm a mimoto jsou navíc doplněny o výstupek umožňující uchycení k podložce

bludiště. Také mají po stranách zářezy, do kterých se upevňují stěny. Ty mají rozměry 168×12×50 mm a jsou zakončeny výstupy, které zajišťují při složení bludiště jejich přichycení ke sloupkům.(8)(9)

Podložka bludiště bývá rovná a má mít černou barvu, která infračervené záření pohlcuje. Její rozměr je dán výslednou velikostí bludiště a u kompletního bludiště 16×16 se obvykle skládá z více dílů, takže se na hranicích mezi nimi mohou vyskytnout drobné nerovnosti, které by neměly přesáhnout 0,5 mm.(8)(9)

Celé bludiště pak musí být ohraničeno stěnami, neexistuje tedy do něj žádný vchod. Výskyt nepřístupných buněk, které budou ohraničeny stěnami ze všech čtyř stran, není vyloučen. Veškeré uvedené rozměry by měly být dodržovány s tolerancí $\pm 5\%$.(8)(9)

3.2 Požadavky kladené na robot

Podle obecných pravidel platných na soutěžích pro kategorii robotů do bludiště musí být daný robot plně autonomní a během pohybu v bludišti nesmí vyžadovat žádný zásah člověka. Podmínka na jeho autonomnost je rovněž zahrnuta přímo v zadání bakalářské práce. Co se týče jeho rozměrů, není výška nijak omezena, avšak délka ani šířka nesmějí přesáhnout 25 cm. S přihlédnutím na rozměr základní buňky tvořící bludiště bývají roboty klasických konstrukčních provedení výrazně pod tímto limitem. Je také omezen způsob pohonu robotu a zisku energie, ke kterému robot nesmí využívat spalovací proces. Navíc robot nesmí bludiště poškozovat či demolovat a také není dovoleno jeho stěny přelézat, přeskakovat ani přelétávat.(8)(9)

Tyto parametry zařazují daný robot mezi malé mobilní roboty. Předem může být řešeno, že by měl být co nejlehčí, aby při daném výkonu pohonu mohl dosahovat co nejvyššího zrychlení a aby byla zajištěna jeho dobrá pohyblivost a nebyl výrazně omezen v pohotovosti reakcí setrvačností. Z uspořádání bludiště vychází také požadavek na schopnost robotu manévrovat i na malém prostoru.

3.3 Konstrukce robotu

Bludiště, ve kterém se má mobilní robot pohybovat, je možné považovat za velmi členité a rozmanité prostředí s řadou překážek. Samotné chodby mají šířku necelých 18 cm a v bludišti se mohou vyskytnout řady odboček nebo slepých cest. Z toho můžeme usoudit, že robot by měl být schopný se otáčet na velmi malém prostoru. Proto se jako vhodné řešení jeví využití diferenčního podvozku.

Kromě toho můžeme říci, že by měl robot mít vysokou stabilitu a nízkou hmotnost pro možnost dosahovat dostatečně velkého zrychlení. Z těchto předpokladů by měl vycházet finální návrh mechanické části robotu.

3.4 Specifikace typu pohonu

Z elektrických pohonů připadají v úvahu především motory krokové, BLDC nebo stejnosměrné kartáčové motory. Ostatní typy nejsou vhodné především kvůli svým rozměrům, které se neslučují s použitím na malém mobilním robotu.

Ze zmíněných možností se jako vhodné jeví stejnosměrné motory. Jejich řízení nevyžaduje použití složitých obvodů a vyrábějí se i ve velmi malých rozměrech. Navíc při použití vhodného převodu nabízejí možnost dosažení vysokých rychlostí při zajištění dostatečného momentu.

Případnou alternativou by mohly být motory krokové. Jejich výhoda spočívá v samotném způsobu řízení, kdy je přímo kontrolována ujetá vzdálenost, která je pevně dána velikostí kroků motoru a poloměrem kol. Nevýhodou však je relativně vyšší hmotnost oproti stejnosměrným motorům, která by se mohla nepříznivě projevit na dalších vlastnostech robotu. Pokud by se navíc pro jejich řízení nevyužíval komplexní řídicí obvod, bylo by zapotřebí většího počtu výstupních linek řídicí jednotky.

3.5 Senzorický systém

Ze specifikace úlohy, pro kterou má být robot určen, a ze základních parametrů bludiště mohou být definovány požadavky na jeho senzorický systém. Z nabídky různých druhů senzorů pro odlišné veličiny mohou být vybrány senzory, o kterých má smysl dále uvažovat při samotném návrhu robotu, které by mohly být určitým způsobem využívány při jeho pozdější činnosti. Jelikož se má jednat o poměrně malý mobilní robot, je zapotřebí brát v úvahu také rozměry senzorů, jejich hmotnost a spotřebu, jelikož robot nebude moci být vybaven příliš velkými bateriemi.

3.5.1 Interní senzory

Jejich úkolem je informovat robot o jeho vlastním stavu. V první řadě to jsou různé senzory informující o jeho aktuátorech, o rychlosti motorů, jejich natočení, poloze serv či posunu lineárních mechanismů. Dále se pak může jednat o informace o náklonu celého robotu či jeho otáčení nebo o údaje diagnostické určující parametry různých veličin, kupříkladu velikost napětí baterií, množství jiných pohonných hmot a teplotu komponent. Dále budou uvedeny příklady některých interních senzorů, které by mohly být využity na realizovaném robotu.(1)

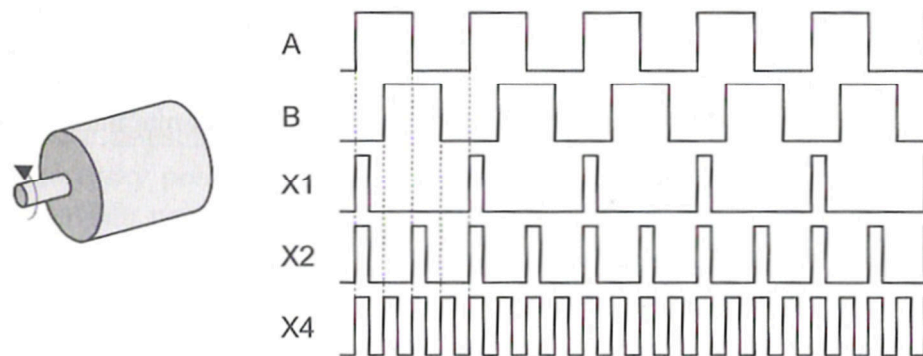
Enkodéry

Tyto senzory jsou brány u mobilních robotů jako základ pro tvorbu zpětnovazebního řízení motorů. Slouží k měření ujeté vzdálenosti nebo rychlosti otáčení kol, respektive motorů. Existuje řada principů, na nichž může být jejich funkčnost založena. Nejčastěji se jedná o enkodéry optické, které využívají zdroj a detektor záření a specifickou clonku, nebo magnetické, jenž pracují na základě měření intenzity magnetického pole co do velikosti i směru. Enkodéry mohou být absolutní, čili měřit natočení určité hřídele, nebo inkrementální. Ty se využívají právě při zpětnovazebním řízení.(1)

Inkrementální enkodéry mají na výstupu digitální signál, jehož stav se mění vždy po otočení hřídele o malý dílek. Jejich rozlišení se udává právě dle tohoto aspektu v počtu pulzů (tiků) na jednu otočku. Aby bylo možné rozlišit také směr otáčení, obsahují enkodéry druhý výstup, který je oproti prvnímu fázově posunutý o 90°. Při otáčení na jednu stranu je poté při přechodu prvního výstupu ze stavu H do L na druhém výstupu například stav H, zatímco při otáčení na druhou stranu je na jeho výstupu stav L. Výstupy enkodéru jsou označovány písmeny A a B. Takto pracující enkodér označujeme jako kvadraturní. Je možné také narazit na variantu se třetím výstupem. Ten bývá označen písmenem I a slouží k měření počtu celých otáček – na jeho výstupu je vždy při jednom otočení vygenerován jeden pulz. Všechny zmíněné výstupy se u enkodérů mohou vyskytovat také v negované podobě, může tak mít až šest výstupů.(1)

Při zpracování údajů z enkodéru může být využito několik metod, pomocí kterých je možno až zčtyřnásobit rozlišení enkodéru. Nejjednodušší metoda spočívá v detekci pouze jednoho typu hran

(náběžných či sestupných) na jednom výstupním kanálu. Druhý slouží pouze k určení směru otáčení. V tomto případě získáme rozlišení shodné s počtem impulsů enkodéru na jednu otočku. Složitější metoda spočívá v detekci náběžných i sestupných hran v průběhu jednoho výstupu, druhý opět slouží k určení směru. Tímto způsobem rozlišení zdvojnásobíme. Pokud je zapotřebí čtyřnásobné rozlišení, detekují se při vyhodnocování údajů náběžné i sestupné hrany na obou výstupních kanálech, přičemž ten, v jehož průběhu aktuálně nedochází ke změně stavu, slouží k určení směru otáčení.(1)



Obrázek 6 - Znárodnění jedno, dvou a čtyřnásobné metody zpracování údajů z kvadraturního enkodéru (1)

Gyroskop

Tento senzor slouží k detekci a určení velikosti úhlové rychlosti, ojedinele přímo ke snímání absolutního natočení. Snímač může pracovat až ve třech osách, které se označují jako svislá (yaw axis), příčná (pitch axis) a podélná osa (roll axis). Podle jeho provedení rozlišujeme tři typy.(10)

Nejstarší variantou je mechanický gyroskop. Jeho funkci zajišťuje rychle rotující hmota označovaná jako rotor, vznikající efekt je označován jako gyroskopická precese. Při snaze vychýlit rotor vznikají díky momentu setrvačnosti reakční síly.(4)

Novější typ gyroskopů je označován jako optický. Ke své funkci využívají paprsek monochromatického světla. Ten je vyslán do kruhové optické dráhy (optického kabelu) v obou směrech. Pokud se tato dráha otáčí kolem své osy, dochází ke skládání rychlosti každého paprsku a rychlosti otáčení. V důsledku toho pak vzniká fázový posun mezi paprsky vyslanými v opačných směrech, který je úměrný úhlové rychlosti otáčení.(4)

S rozvojem technologií pro výrobu integrovaných obvodů vznikly také MEMS gyroskopy. Mikromechanická struktura vytvořená společně s elektronickými obvody ve struktuře polovodiče umožňuje snímat úhlovou rychlost otáčení a zároveň i další zpracování údajů v rámci jednoho mikročipu. Základem je miniaturní těleso o určité hmotnosti, které je uchyceno v rámu pomocí pružin a se kterým je periodicky pohybováno. Díky tomu pak na tuto část působí Coriolisovy síly vznikající v důsledku rotace senzoru a podle jejího směru vychylují celý rám na danou stranu úměrně velikosti úhlové rychlosti. Přímka, po které se periodicky pohybuje těleso v rámu, osa, kolem níž celý senzor rotuje, i přímka, ve které se vychyluje rám v důsledku rotace, jsou na sebe navzájem kolmé. Výchylka rámu je pak měřena pomocí změny kapacity mezi elektrodami spojenými s rámem a s okolní nepohyblivou strukturou. Tento údaj je pak převáděn díky zahrnuté elektronické části na analogový či digitální signál. Jedná se však pouze o informaci o úhlové rychlosti. Pro získání úhlu je zapotřebí získané hodnoty integrovat. Sensory také často obsahují možnost nastavení rozsahu, ve kterém pracují. Tímto

nastavením lze buď zvýšit rozlišení senzoru při snížení rozsahu, nebo naopak zvětšit rozsah a snížit rozlišení.(10)

Akcelerometr

Jedná se o zařízení, které umožňuje měřit statické i dynamické zrychlení. Využívá se k rozpoznávání pohybů podle odstředivé a setrvačné síly, určení náklonu v závislosti na směru síly tíhové nebo také k měření vibrací různých zařízení. Podle principu, na kterém je detekce zrychlení založena, můžeme definovat některé základní druhy akcelerometrů.(11)

Prvním z nich jsou akcelerometry piezoelektrické. Jak název napovídá, využívají piezoelektrický krystal, který v důsledku mechanického namáhání, jež je zajištěno tělesem o neměnné hmotnosti, na které působí zrychlení, generuje elektrický náboj úměrný tomuto zrychlení.(11)

U piezorezistivních akcelerometrů se využívá keramického materiálu, který v důsledku mechanického namáhání způsobeného zrychlením mění svůj odpor. Ten je následně měřen pomocí Wheatstoneova můstku.(12)

Poslední zmíněný druh akcelerometrů pracuje na základě měření změny kapacity. Mezi dvě pevné elektrody je umístěna třetí, pohyblivá, která se vychyluje úměrně zrychlení působícího na senzor. Jelikož je v tomto uspořádání možné měřit dvě kapacity, kdy při výchylce prostřední elektrody jedna roste a druhá klesá, využívá se pro zpřesnění měření diferenční údaj.(13)

Stejně jako gyroskopy mohou být akcelerometry doplněny o elektrický obvod zpracovávající naměřené údaje, které pak mohou být poskytovány přes různá digitální rozhraní nebo jako analogová hodnota. U akcelerometrů rozlišujeme kromě počtu snímaných os (1 až 3) také měřitelný rozsah zrychlení, který se udává v násobcích zrychlení tíhového.

Další senzory

Do této kategorie můžeme zařadit další interní senzory mobilních robotů. Důležitým parametrem je například stav vlastní energie robotu, což obvykle znamená měřit napětí baterie a hlídat, zda nepokleslo pod kritickou hodnotu. Někdy může být vhodné také měřit velikost celkového proudu odebíraného z baterie, kdy vyšší hodnoty mohou ukazovat například na větší zatížení motorů apod. V poslední době je také možno se setkat s mikročipy, které mají zabudovaný teplotní senzor, což je také interní senzor mobilního robotu.

3.5.2 Externí senzory

Bez těchto senzorů by robot nebyl schopný zjistit žádné informace o svém okolí. Většina těchto senzorů slouží k navigaci, pouze malá skupina poskytuje speciální data určující jiné vlastnosti prostředí. Může se jednat o senzory určující složení vzduchu, množství vlhkosti nebo přítomnost a intenzitu různých záření, nicméně tyto specializované senzory by pravděpodobně nenašly na realizovaném mobilním robotu uplatnění, s výjimkou senzoru okolního osvětlení.(4)

Senzory pro detekci překážek

Snad nejdůležitější skupina senzorů pro mobilní roboty, která jim umožňuje detekovat předměty kolem sebe a následně se jim vyhýbat, sbírat je nebo vykonávat další činnosti odvíjející se

od jejich přítomnosti a vzdálenosti. V závislosti na vlastnostech a principech měření rozlišujeme mnoho druhů těchto senzorů.

Taktilní senzory

Tyto snímače jsou zdaleka nejjednodušší variantou pro detekci překážek. Bývají realizovány různými koncovými spínači připevněnými k nárazníkům, pružinami spínajícími při nárazu elektrické kontakty nebo také kruhem vyčnívajícím z robotu. Ten je tvořen dvěma vrstvami a při nárazu dojde k jejich spojení, sepnutí kontaktu a detekci objektu.(6)

Podle konstrukcí je patrné, že taktilní senzory pouze informují o bezprostřední blízkosti překážky, se kterou jsou již v kontaktu. Jejich údaj má tedy binární hodnotu.

Ultrazvukové senzory

Sonary, jak se těmto senzorům také říká, využívají pro detekci překážky akustické vlnění s frekvencí vyšší než 40 kHz. Na začátku měření dojde k vyslání zvukového signálu a následně senzor čeká na tzv. echo, tedy signál odražený od překážky. Doba mezi vysláním signálu a přijetím echa odpovídá dvojnásobku vzdálenosti senzoru od překážky při rychlosti zvuku. Pokud nedojde k detekci odraženého signálu do určité stanovené doby, je měření ukončeno s tím, že v daném směru se překážka nevyskytuje.(1)(6)

Při použití hotových sonarových modulů bývá součástí také obvod zajišťující správné vyslání akustické vlny i její detekci a měření požadovaného časového údaje. Výstupní údaj může být posléze předáván některým ze standardních digitálních rozhraní nebo také jako impulz o délce odpovídající změřené časové hodnotě.(1)

Problém může nastat při použití ultrazvukových senzorů v prostředí s velkým množstvím rozličných překážek různých tvarů. Jelikož má tento typ senzoru poměrně široký rozptyl vysílaného signálu, může docházet k různým vzájemným odrazům od překážek a návratu většího množství ech. Proto je zapotřebí mezi jednotlivými měřeními počkat dostatečně dlouho, aby mohlo dojít k utlumení signálu. Kvůli rozptylu také není možno sonarem určit přesnou polohu překážky.(1)(6)

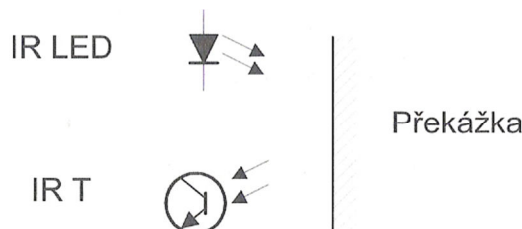
Senzory pracující s infračerveným zářením

Jelikož je záření asi o šest řádů rychlejší než akustické vlnění (rychlost přibližně $3 \cdot 10^8$ m/s oproti asi 343 m/s podle teploty a vlhkosti vzduchu), je i rychlost snímání pomocí těchto senzorů vyšší než u sonarů. Ke zpomalení měření dochází především kvůli náběhům detektorů záření, které se v senzorech využívají. Výhodou je také dobrá prostupnost infračerveného záření prostředím, například i mlhou či kouřem. Existuje několik způsobů, jak využít infračervené záření k detekci překážek.

- *měření intenzity odraženého záření*

Nejjednodušší senzor spadající do kategorie využívající infračervené záření je realizován pouze pomocí infračervené LED a fototranzistoru s potřebnými odpory. Podle intenzity záření, které se odrazí zpět k senzoru a je zachyceno fototranzistorem, dochází k jeho otevření. Tato skutečnost je pak měřitelná na připojeném odporu v podobě napětí. Aby mohl senzor pracovat na větší vzdálenost, je zapotřebí dostatečně výkonné infračervené LED. Těmi může procházet proud o velikosti řádově jednotek ampér, ovšem pouze po krátký časový úsek. Proto bývá vysílán pouze impulz záření namísto

trvalého sepnutí led. Jelikož můžeme zanedbat dobu putování záření od senzoru k překážce a zpět, je jeho délka dána dobou náběhu LED i fototranzistoru a dobou potřebnou ke změření analogového údaje.



Obrázek 7 - Princip detekce překážky senzorem měřícím intenzitu odraženého záření (1)

Výhodou tohoto senzoru je jeho jednoduchost. Za předpokladu využití vhodných komponent může být dosaženo velmi úzkého rozptylu záření a tudíž k dostatečně přesné detekci pozice překážky. Po linearizaci závislosti intenzity odraženého záření na vzdálenosti překážky může být tento senzor využit také k měření vzdálenosti překážky.

Senzor je však poměrně citlivý na sluneční světlo. Z tohoto důvodu je vhodný spíše pro využití ve vnitřních prostorech. Navíc se parametry naměřené závislosti mění s odrazivostí povrchu překážky a také jejím natočením oproti směru šíření záření.

- *modulovaný signál*

U tohoto typu senzoru již nedochází k měření intenzity odraženého záření, ale pouze k detekci odraženého záření. Vysílaný signál je modulován pomocí pulzně šířkové modulace a vytváří tak sérii obdélníkových pulzů obvykle o frekvenci řádově v desítkách kHz a plněním 50 %. Příjímá obvod je složitější a obsahuje demodulátor signálu. Výstup z něj má pouze binární podobu – překážka je detekována nebo není.(1)

Nespornou výhodou je daleko vyšší necitlivost senzoru k okolnímu záření a částečně také slunečnímu svitu. Dochází však ke ztrátě možnosti měřit vzdálenost překážky. Navíc v závislosti na použitém přijímači může docházet k jeho zvyšování citlivosti, pokud nepřijímá odražený signál. Důležité je také při zpracovávání signálu ze senzoru ošetřit situace, kdy může docházet k rušení jiným zdrojem záření, jelikož na stejném principu pracují dálkové ovladače.(1)

Ztráta měření vzdálenosti překážky může být částečně kompenzována, a to buď hardwarově, nebo softwarově. V obou případech dochází ke snížení intenzity vysílaného signálu. V důsledku toho snížíme i dosah senzoru a můžeme orientačně určit vzdálenost překážky. Při hardwarovém řešení se využívá jednoduchý D/A převodník, pomocí kterého lze měnit proud tekoucí LED. U softwarového přístupu lze snížit plnění vysílaného signálu a tím také intenzitu záření.(1)

- *optická triangulace*

Funkce těchto senzorů je založena na PSD čidle. Toto čidlo má na výstupu signál úměrný místu, na které dopadá záření. Může se jednat například o speciální diodu. Nejprve dojde k vyslání zaostřeného paprsku infračerveného záření (může se jednat také o laserový paprsek). To se odráží od překážky a vrací se k senzoru, ve kterém prochází jeho optikou a dopadá na PSD čidlo, přičemž pozice dopadu je závislá na vzdálenosti překážky. Běžně dostupné senzory se vyznačují téměř neměnnou

výstupní charakteristikou pro překážky s různou odrazivostí. Výstupní signál může být analogový nebo digitální. Bohužel může být měření těmito senzory výrazně ovlivněno slunečním zářením.(4)

Kompas

Jedná se o senzor používaný pro globální navigaci, díky kterému je robot schopen určit svoji orientaci (natočení) v globální vztažné soustavě definované světovými stranami. K tomuto účelu je detekováno magnetické pole Země. Využívány jsou materiály vykazující Hallův jev nebo jinak reagující na magnetické pole, například změnou odporu. Údaje bývají zpracovávány přímo u měřicího elementu a poskytovány v různé podobě. U nejlevnějších variant se může jednat pouze o výstup určující analogovou hodnotou jeden ze základních osmi směrů. Naopak dražší a složitější senzory poskytnou rozlišení v jednotkách nebo dokonce desetínách stupně s přesností v jednotkách stupňů.(4)(5)

Moderní varianty obvykle nevyžadují ani uložení ve vodorovné poloze. Bývají vybaveny čidly ve třech na sebe kolmých osách, ze kterých jde směr určit, třiosým akcelerometrem pro detekci náklonu, případně kombinují obě varianty a výsledný údaj z nich vypočítávají.

Jelikož je magnetické pole Země relativně slabé, může být měřený údaj často ovlivněn jinými magnetickými poli, případně kovovými objekty. S touto skutečností je potřeba počítat při návrhu robotu a minimálně umístit kompas na vhodné místo.

3.6 Řídicí systémy

Jelikož úloha, kterou má mobilní robot řešit, je relativně jednoduchá, respektive nevyžaduje provádění extrémně složitých výpočtů v reálném čase ani obsluhu velkého množství složitých senzorů, přichází v úvahu koncepce řídicího systému s jedním mikrokontrolérem. Díky tomuto řešení může být ušetřeno místo, které by jinak bylo zapotřebí pro více integrovaných obvodů. Důsledkem může být rovněž snížení spotřeby elektronického systému a tím umožnění delší doby vykonávání úkolu robotem na jedno nabití baterií nebo výběr baterií o nižší kapacitě i hmotnosti.

Na trhu je dostupná řada variant řídicích mikrokontrolérů, od jednodušších 8bitových variant až po výkonné 32bitové verze. Všechny tyto řady obsahují mnoho jednotlivých mikrokontrolérů, které se liší počtem vstupně/výstupních pinů, množstvím a rozmanitostí periférií a také pamětí určenou pro samotný program i data, která se během provozu snímají a zpracovávají. Právě tyto parametry budou rozhodovat při výsledné volbě mikrokontroléru na základě specifikace požadavků podle použitých motorů, obvodů pro jejich řízení a jednotlivých druhů senzorů a jejich počtu.

3.7 Algoritmy pro průjezd bludištěm

Kromě obsluhy jednotlivých periférií bude muset robot obsahovat určitý typ algoritmu, který zajistí plnění zadané funkce – průjezd bludištěm. Bude se jednat o jakýsi vyšší stupeň programového vybavení robotu, který bude mít za úkol plnit logickou část samotné úlohy. Existuje řada postupů, jak řešit průjezd bludištěm. V následujícím textu budou uvedeny některé neznámější algoritmy, popsán jejich princip a také uvedeny jejich výhody a omezení.

3.7.1 Sledování stěny („Wall follower“)

Jedná se o pravděpodobně nejjednodušší algoritmus pro průchod bludištěm. Často se rozlišují dva druhy – sledování pravé stěny nebo levé. Někdy je tento algoritmus zjednodušeně označován jako pravidlo pravé nebo levé ruky.

Princip spočívá v tom, že robot pomyslně položí pravou (respektive levou) ruku na stěnu, a při svém pohybu v bludišti ji z ní nesmí sundat. To znamená, že dokud je po jeho pravé straně stěna, pohybuje se rovně. V případě, že se vpravo stěna nenachází, zatačí doprava a pokud se vyskytne stěna před robotem, otáčí se vlevo.

Implementace tohoto algoritmu je velmi jednoduchá a u robotů do bludiště se mnohdy jedná o první realizovaný způsob průchodu. Omezení však spočívá v tom, že ne ve všech bludištích je tento postup použitelný. Obecně je zaměřený na bludiště, která obsahují vstup i výstup na svém okraji. I když je velmi neefektivní, jelikož dochází k průchodu všech slepých cest, nevyžaduje žádné pamatování si struktury bludiště ani aktuální pozice nebo směru.

3.7.2 Odřezávání slepých konců („Dead end filler“)

Tento algoritmus, někdy označován také podle anglického názvu jako vyplňování slepých cest, slouží k zefektivnění průchodu bludištěm. V základní podobě slouží k doplnění algoritmu sledování stěny.

Při použití tohoto postupu již robot musí bludiště mapovat a zaznamenávat si jeho podobu podle rozložení stěn v každé buňce. Narazí-li na buňku, která je ohraničena ze tří stran stěnami a přitom se nejedná o počáteční ani cílovou pozici, dojde k jejímu odstrižení či vyplnění například doplněním virtuální stěny na volné místo dané buňky. Tímto způsobem se postupně odříznou všechny navazující buňky bludiště až k takzvané křižovatce, což je buňka, která ani po doplnění pomyslné stěny ve směru slepé cesty nebude ohraničena ze tří stran. Po průchodu celého bludiště pomocí sledování stěny a odřezání slepých cest robot získá efektivnější cestu ze startovní pozice k cíli.

Tento algoritmus je určený ke zkrácení cesty, kterou považujeme za řešení bludiště, a tím tedy k zvýšení efektivity pohybu robotu. Jeho provedení ale vyžaduje předchozí znalost struktury bludiště nebo alespoň jeho části. Pokud by bludiště obsahovalo pouze jednu možnou cestu k cíli, získáme tímto algoritmem nejkratší variantu řešení.

3.7.3 Tremauxův algoritmus

Tento algoritmus je podobně jako sledování stěny využitelný i člověkem, který nezná strukturu bludiště. Základem je možnost vytvářet v bludišti značky, ať už fyzické, nebo v případě mobilního robotu virtuální ve zmapované struktuře.

Na začátku subjekt vyrazí ze startovní pozice. Přitom za sebou nechává stopu, například v podobě čáry, v případě robotu se může jednat o bitovou značku přiřazenou dané buňce. Narazí-li na slepý konec, vrací se zpět stejnou cestou s tím, že i nadále vytváří stopu. Při vstupu na křižovatku, na které ještě subjekt nebyl, je zvolen libovolný nový směr. Jestliže se subjekt dostane po nové cestě, která ještě nebyla označena, na křižovatku, považuje ji za slepý konec cesty a vrací se zpátky. Pokud dojde ke vstupu na již navštívenou křižovatku z cesty, po které se subjekt vracel (je nyní označena dvakrát), zvolí si náhodně jednu z cest, kterými ještě neprocházel. Jestliže žádná taková není, vrací se

dále po cestě, která je označena jen jednou. Při dodržení těchto pravidel dojde k nalezení cílové pozice, jestliže je dosažitelná, a cesta s jedním označením vede zpět na startovní pozici. Nalezená cesta však nemusí být nejkratším řešením daného bludiště.

Tremauxův algoritmus použitý u mobilního robotu vyžaduje buď možnost vytvářet v bludišti značky, nejlépe v podobě čar, a jejich následnou detekci, nebo schopnost bludiště mapovat po jednotlivých buňkách a jim přiřazovat značky. Jeho provádění není příliš náročné, nicméně výsledné řešení může být celkem neefektivní, avšak je použitelné i na bludiště, ve kterých již nefunguje algoritmus sledování stěny, což je jeho značná výhoda.

3.7.4 Rozlévání barvy („Flood fill“)

I když při překladu názvu tohoto algoritmu získáme označení šíření záplav, používá se v češtině spíše pojem rozlévání barvy. Algoritmus simuluje šíření kapaliny strukturou bludiště a tento princip využívá k nalezení cesty mezi dvěma pozicemi. Z hlediska počítačových věd se odvíjí od algoritmu prohledávání do šířky, který se uplatňuje při průchodu grafů. U tohoto algoritmu můžeme definovat jeho základní činnost a tu pak používat v různých variacích. Během provádění dané metody dojde k přiřazení číselné hodnoty každé buňce bludiště podle její vzdálenosti od zadané buňky.

Nejprve se zadané buňce přiřadí hodnota 0. Následně je všem sousedním buňkám, do kterých je přístup, čili nenachází se v tomto směru stěna, přiřazena inkrementovaná hodnota předchozí buňky. Všechny takto ohodnocené buňky se zařadí do struktury typu fronta. Poté se berou jednotlivé prvky fronty a provádí se s nimi totožná operace, avšak není možné přiřazovat buňce hodnotu, pokud ji již má.

Algoritmus je možné zastavit podle více kritérií. První možností jeho ukončení je vyprázdnění celé fronty. V takovémto případě byly ohodnoceny všechny buňky, které jsou dostupné ze zadané pozice. Druhou možností zastavení je přiřazení hodnoty některé konkrétní buňce. V tomto případě totiž došlo k nalezení nejkratší cesty mezi dvěma buňkami, jelikož algoritmus simuluje postupné rovnoměrné šíření kapaliny ve všech směrech.

Jedním z možných využití algoritmu je jeho nasazení na již zmapované bludiště. Jako počáteční buňka s hodnotou 0 bývá volena cílová pozice a algoritmus může být zastaven při ohodnocení startovní pozice. Následně se mobilní robot pohybuje vždy na buňku s hodnotou nižší než má buňka, na které se právě nachází. V případě, že je takovýchto buněk více, existuje v bludišti více cest se stejnou délkou a je možné jednu z nich zvolit.

Druhou možností, která vede k zefektivnění průchodu bludištěm i při jeho mapování, je využití tohoto algoritmu pro výběr směru pohybu již od začátku. Mobilní robot nacházející se v určité buňce nejprve zjistí rozložení stěn kolem sebe, uloží tyto informace do vnitřní struktury a následně provede algoritmus rozlévání barvy, do kterého zahrne již známou strukturu bludiště. Poté podle hodnot buněk zvolí, na kterou se přesune, a celý postup opakuje, dokud se nedostane na cílovou pozici. Posléze se celý postup opakuje, avšak s tím rozdílem, že nulová hodnota se přiřadí buňce, která je startovní. Jestliže robot při přesunu ze startu do cíle nebo z cíle na start nevstoupí do žádné ještě nenavštívené buňky, má již zmapovanou celou oblast bludiště, kterou potřebuje a dále se bude již pohybovat po cestě, která je nejkratším řešením daného bludiště. Mnohdy tak může dojít ke zmapování jen malé části bludiště. Pohyb robotu je tedy velmi efektivní.

4 Realizace hardwarové části

Po první fázi vývoje mobilního robotu, ve které došlo k seznámení s obecnou problematikou mobilních robotů, jejich jednotlivými systémy a dále konkrétněji s mobilními roboty určenými pro pohyb v bludišti, bylo možné zahájit samotnou realizaci robotu, nejprve tedy hardwarové stránky. V této kapitole bude popsána mechanická konstrukce zahrnující celkové uspořádání a vzhled mobilního robotu, jeho pohonný a napájecí systém a následně elektronické komponenty, které byly vybrány pro realizaci senzorického systému, obvodu pro ovládání pohonů, napájení i samotný řídicí systém.

4.1 Konstrukce

Pro realizaci mobilního robotu byla zvolena jednoduchá konstrukce zahrnující minimum dílů. Jelikož je robot určen do bludiště, které je poměrně členité a neskýtá velký prostor k otáčení či složitému pohybu, bylo pro něj zvoleno diferenční uspořádání pohonů. Aby byla zajištěna co největší manévrovatelnost, budou oba samostatné pohony umístěny uprostřed robotu tak, aby poháněná kola byla umístěna na jedné pomyslné ose, která navíc bude procházet středem robotu. Díky tomu bude tedy přední i zadní okraj robotu od této osy stejně vzdálený a budou zajištěny minimální nároky na prostor potřebný k otočení robotu.

Jak již vyplývá z konstrukčního uspořádání, bude robot vybaven dvěma poháněnými koly. Na základě jejich umístění vzniká požadavek na přidání dvou opěrných bodů, jedním vepředu a druhým vzadu. Ty budou zajišťovat stabilitu robotu.

Celý robot by měl být dostatečně malý. Po zhodnocení vzdáleností stěn v bludišti a možných způsobů pohybu robotu v něm byly zvoleny přibližné rozměry z perspektivy 100×80 mm. Co se výšky týče, měl by být robot pokud možno co nejnižší, kvůli zajištění vhodné pozice těžiště a tím také stability. Celý robot bude realizován na jedné desce plošných spojů, která bude umístěna přibližně 4 mm nad povrchem, po kterém se bude robot pohybovat. K ní pak budou upevněny pohony, které by měly být složeny z motoru, převodu, poháněného kola a konstrukčního dílu, ke kterému budou všechny části připevněny.

4.2 Pohony

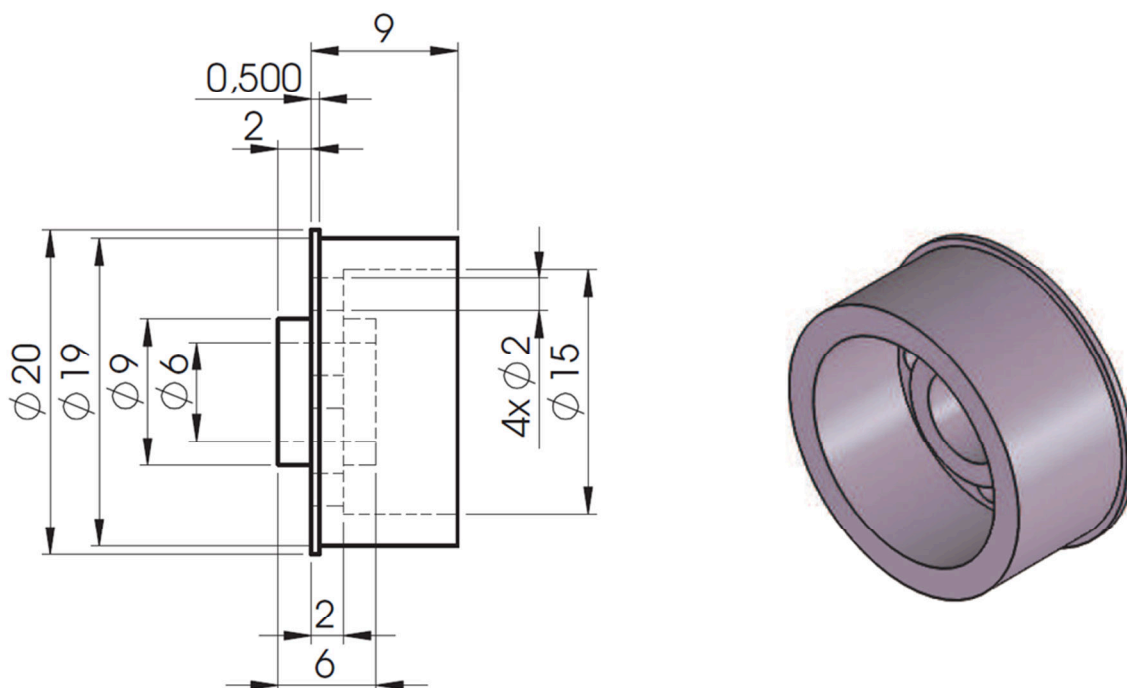
Aby byla zajištěna nízká hmotnost robotu, byly pro realizaci pohonů vybrány stejnosměrné kartáčové motory. Ty by měly poskytnout dostatečný výkon při zachování nízké hmotnosti a jejich řízení je poměrně jednoduché. V případě potřeby budou otáčky a moment motoru přenášeny na hnaná kola přes jednoduchou převodovku realizovanou ozubenými koly. Samotná poháněná kola by měla mít také nízkou hmotnost a dobrou přilnavost k povrchu, aby bylo zamezeno jejich prokluzování či smýkání.

4.2.1 Kola

Pro zajištění všech požadovaných vlastností byla zvolena varianta kompletace kola z několika dílů. Tím bude moct být v základu realizováno z lehkého materiálu a jeho styčná plocha s povrchem

bude moci být vyrobena z materiálu s vysokou adhezí. Návrh celkové podoby kola je podřízen také požadavkům na rozměr robotu a byl inspirován mobilními roboty do bludiště, které existují ve světě.

Základním dílem kola je disk. Na něj budou přichyceny všechny ostatní části. Pro zajištění jeho nízké hmotnosti a tudíž především nízkého momentu setrvačnosti při zabezpečení dostatečné pevnosti a mechanické odolnosti byla zvolena výroba pomocí 3D tiskárny z materiálu ABS. Samotné rozměry disku se odvíjely od dále zvolených částí.



Obrázek 8 - Disk kola

Druhou podstatnou součástí kola je pneumatika. Ta zajišťuje potřebnou přilnavost a díky součiniteli smykového tření mezi ní a povrchem umožňuje robotu dostatečně rychle akcelerovat. Tyto vlastnosti splňují gumové pneumatiky určené pro modely aut Mini-Z. Vyrábí se se vzorkem i bez něj, v několika šířkách a řadě tvrdostí. Čím tvrdší pneumatika je, tím déle vydrží, ale tím má zároveň nižší přilnavost. Proto byla vybrána jedna z měkčích variant, aby bylo dosaženo potřebné adheze. Šířka pneumatik se pohybuje v rozmezí 9-11 mm v závislosti na konkrétním výrobcu a určení pro přední či zadní kola modelů. Tyto pneumatiky jsou určeny na disky s průměrem 19 mm a zkompletované kolo má průměr 23,5 mm. Pneumatiky mají navíc na jedné straně drážku, pro niž jsou uzpůsobeny disky a která zajišťuje správné nasazení.

Třetím dílem je převodové kolo, které bude zajišťovat přenos otáček motoru na poháněné kolo. Jeho volba se bude odvíjet od parametrů zvoleného motoru, nejen od jeho otáček a krouticího momentu, ale také rozměrů. V úvahu připadají ozubená kola s modulem 0,3 nebo 0,5. Kolo bude umístěno na výstupek disku a bude doléhat na jeho zadní stranu. Aby nebyla zbytečně zvyšována hmotnost robotu, bylo by vhodné použít převod plastový, minimálně na straně kola.

Poslední částí, kterou je možno považovat za součást kola, jsou ložiska, jež budou umožňovat jeho efektivní uchycení k neotočné hřídeli s co nejmenším třením vznikajícím při otáčení. Za tímto účelem byla zvolena jednořadá kuličková ložiska, kdy ve vnitřním otvoru disku jsou umístěna tři těsně

doléhající na sebe svými vnitřními i vnějšími částmi. Navíc je jedno krajní ložisko opatřeno přírubou, aby se zafixovala jeho poloha. Ložiska mají vnější průměr 6 mm a vnitřní 3 mm.

Důležité je rovněž samotné uchycení zkompletovaného kola ke konstrukčnímu dílu pohonu. K tomuto účelu byly vybrány šrouby M3 s válcovou hlavou, vnitřním šestihranem a dříkem, který bude sloužit jako hřídel. Pro zajištění doteku pouze vnitřní části ložiska při upevňování pomocí této hřídele budou použity podložky vyrobené navinutím tenkého měděného drátu na hřídel.

4.2.2 Motory

Výběr motoru je ovlivněn požadavky, které jsou následně kladeny na pohyb robotu. Jedná se tedy o velikost jeho maximální rychlosti a maximálního zrychlení, kterého bude robot schopen dosáhnout. V úvahu je zapotřebí brát i hmotnost robotu, která významně ovlivňuje výběr motoru.

Pro výběr byla zvolena nabídka stejnosměrných kartáčových motorů od firmy Faulhaber. Během výpočtů pro určení vhodných motorů bylo vycházeno z podkladů (1), (14) a technických informací firmy Faulhaber (15).

Určení hmotnosti robotu

U dílů, které již byly vytvořeny, byla hmotnost změřena pomocí digitální váhy s přesností 1 g. U ostatních dílů byla vypočtena z jejich odhadovaného tvaru a hustoty daného materiálu nebo zvážení obdobného dílu.

Konstrukční díl pro upevnění kola a motoru by měl být vyroben z ABS, jehož hustota je 1045 kg/m^3 . Jeho základní tvar by měl odpovídat kvádru o předběžných rozměrech $44 \times 22 \times 5 \text{ mm}$. Jeho objem a hmotnost byly vypočteny pomocí rovnic (4.1) a (4.2).

$$V_{konst} = 44 \cdot 22 \cdot 5 = 4840 \text{ mm}^3 = 4,84 \text{ cm}^3 \quad (4.1)$$

$$m_{konst} = V_{konst} \cdot \rho_{ABS} = 4,840 \cdot 1,045 = 5,058 \text{ g} \quad (4.2)$$

Hmotnost ostatních dílů byla změřena. V případě plošného spoje se jedná o neosazenou desku s rozměry $100 \times 80 \text{ mm}$, kdy přesahy desky oproti zamýšlené podobě nahrazují součástky. U motorů se vycházelo z hmotnosti jednoho z použitelných typů, konkrétně o motor s označením 1717. Tento údaj byl navíc navýšen o hmotnost enkodéru, která není v dokumentaci k motoru uvažována, a pastorku. V případě převodového kola byla použita plastová varianta přibližně odpovídající převodu, který by mohl být použit.

Tabulka 1 - Hmotnost dílů robotu

Součást	Hmotnost [g]	Počet kusů
Kompletní kolo s hřídelí	4	2
Konstrukční díl	5,1	2
Motor s enkodérem a pastorkem	20	2
Baterie Li-pol 240 mAh	8	4
Plošný spoj	34	1
Celková hmotnost robotu	124,2	

Jedním ze základních parametrů pro výběr motorů je požadavek na jejich výkon. Pro jeho určení potřebujeme nejprve vypočítat velikost tažné síly, kterou od pohonů požadujeme. Její velikost určíme jako součet tří složek.

$$F = F_A + F_V + F_S \quad (4.3)$$

Složka F_A je určena maximálním zrychlením, kterého by měl být robot schopen dosáhnout. Tato hodnota byla zvolena 5 m/s^2 .

$$F_A = m \cdot a = 0,124 \cdot 5 = 0,62 \text{ N} \quad (4.4)$$

Síla F_V je odporová síla vnikající valivým třením při pohybu kol po povrchu a je určena vztahem (4.5)

$$F_V = \frac{1}{r} \cdot \xi \cdot F_N \quad (4.5)$$

kde r je poloměr kola, ξ je součinitel valivého tření a F_N je kolmá tlaková síla působící na podložku. V tomto případě, kdy se robot bude pohybovat po vodorovné ploše, se jedná o tíhovou sílu určenou součinem hmotnosti robotu m a tíhového zrychlení g . Součinitel valivého tření se odvíjí od materiálu pneumatiky a povrchu. Jeho velikost proto byla určena experimentálními měřeními.

Pro tento účel byla vytvořena z překližky jednoduchá maketa robotu, ke které se upevnila kola vybavená danou pneumatikou a využívající k uložení kuličková ložiska. Celková hmotnost byla uměle zvýšena na 124 g. Pro minimalizaci tření opěrných bodů byla dovažující hmota soustředěna v ose kol a opěrné body potaženy teflonovou páskou. Následně byla změřena síla potřebná k překonání statického tření, z jejíž velikosti, hmotnosti modelu a známého poloměru kol byl podle rovnice (4.5) stanoven součinitel valivého tření, jehož hodnota pro dané materiály byla 0,9 mm. Jelikož byla hmotnost makety upravena tak, aby se shodovala s odhadovanou hmotností mobilního robotu, je velikost statické odporové síly F_V dána přímo změřeným údajem.

$$F_V = 0,1 \text{ N} \quad (4.6)$$

Poslední složkou tažné síly je odporová síla rotujících částí podvozku. Její velikost je možné určit ze vztahu (4.7)

$$F_S = J_C \cdot \varepsilon = J_C \cdot \frac{a}{r} \quad (4.7)$$

kde ε je úhlové zrychlení a J_C je moment setrvačnosti rotačních částí. Mezi ně zahrnujeme celé kolo a rotor motoru. Celkový moment setrvačnosti určíme jako součet momentů setrvačností uvedených částí, přičemž moment setrvačnosti motoru J_M , který získáme z katalogového listu daného typu motoru (pro výpočty prozatím použijeme shodný typ jako pro určení hmotnosti, tzn. 1717), musí být přepočten na stranu zátěže pomocí převodového poměru i . Tento parametr předběžně zvolíme 3. Moment setrvačnosti kola J_K , u kterého počítáme i s převodovým kolem, byl pro zjednodušení vypočten ze vzorce pro moment setrvačnosti plného válce (4.8). K momentu setrvačnosti rotoru by měl být započten také podíl, který je tvořen pastorkem. Vzhledem k jeho řádově nižší hmotnosti byl

ale zanedbán. Je zapotřebí nezapomínat, že robot bude vybaven dvěma koly i motory, tudíž momenty setrvačnosti jednotlivých komponent musí být započteny dvakrát.

$$J_K = m \cdot \frac{r^2}{2} = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(11,75 \cdot 10^{-3})^2}{2} = 2,76 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2 \quad (4.8)$$

$$F_S = J_C \cdot \frac{a}{r} = 2 \cdot (J_M \cdot i^2 + J_K) \cdot \frac{a}{r}$$

$$F_S = 2 \cdot (58 \cdot 10^{-9} \cdot 3^2 + 2,76 \cdot 10^{-7}) \cdot \frac{5}{11,75 \cdot 10^{-3}} = 0,679 \cdot 10^{-3} \text{ N} \quad (4.9)$$

Velikost požadované tažné síly je dána podle (4.3) součtem jednotlivých složek, které byly vypočteny nebo určeny ve vztazích (4.4), (4.6) a (4.9).

$$F = F_A + F_V + F_S = 0,62 + 0,1 + 0,679 \cdot 10^{-3} = 0,721 \text{ N} \quad (4.10)$$

Jak již bylo uvedeno, pro výběr motoru je zapotřebí určit požadavek na jeho výkon. Ten vypočteme z určené požadované tažné síly a maximální rychlosti robotu. Ta byla zvolena na 3 m/s.

$$P = F \cdot v = 0,721 \cdot 3 = 2,163 \text{ W} \quad (4.11)$$

Při určování odporové síly vznikající v důsledku valivého tření F_V byl zanedbán při měření vliv tření mezi opěrným bodem a povrchem a také tření v ložiscích. Při výpočtu odporové síly rotujících částí F_S byl částečně zanedbán tvar kola a jeho rozdělení na jednotlivé díly. Nejen z těchto důvodů, ale také kvůli plánovanému použití převodů, jejichž účinnost bude vždy nižší než 100 %, zavádíme do výpočtu výkonu rozšiřující faktor 1,5. Ten v sobě zahrne uvedené nepřesnosti a případné další vlivy, které by se mohly při použití motorů vyskytnout.

$$P' = P \cdot 1,5 = 2,163 \cdot 1,5 = 3,2445 \text{ W} \quad (4.12)$$

Protože bude robot vybaven dvěma pohony, kdy každý obsahuje samostatný motor, rozdělí se potřebný výkon na oba motory, z čehož vyplývá, že požadovaný výkon motoru bude poloviční oproti výkonu určenému v (4.12).

$$P_m = \frac{P'}{2} = \frac{3,2445}{2} = 1,6223 \text{ W} \quad (4.13)$$

Následně byl vypočten požadovaný moment (4.14) a otáčky (4.15) na straně kola.

$$M = \frac{P_m}{\omega} = \frac{P_m \cdot r}{v} = \frac{1,6223 \cdot 11,75 \cdot 10^{-3}}{3} = 6,35 \text{ mNm} \quad (4.14)$$

$$n = \frac{\omega \cdot 30}{\pi} = \frac{v \cdot 30}{\pi \cdot r} = \frac{3 \cdot 30}{\pi \cdot 11,75 \cdot 10^{-3}} = 2438,12 \text{ rpm} \quad (4.15)$$

Podle požadovaného výkonu na motor P_m byl v nabídce firmy Faulhaber zvolen typ motoru 1717, konkrétně 6V varianta. Tento motor má následující parametry.

Tabulka 2 - Parametry motoru Faulhaber 1717T006SR

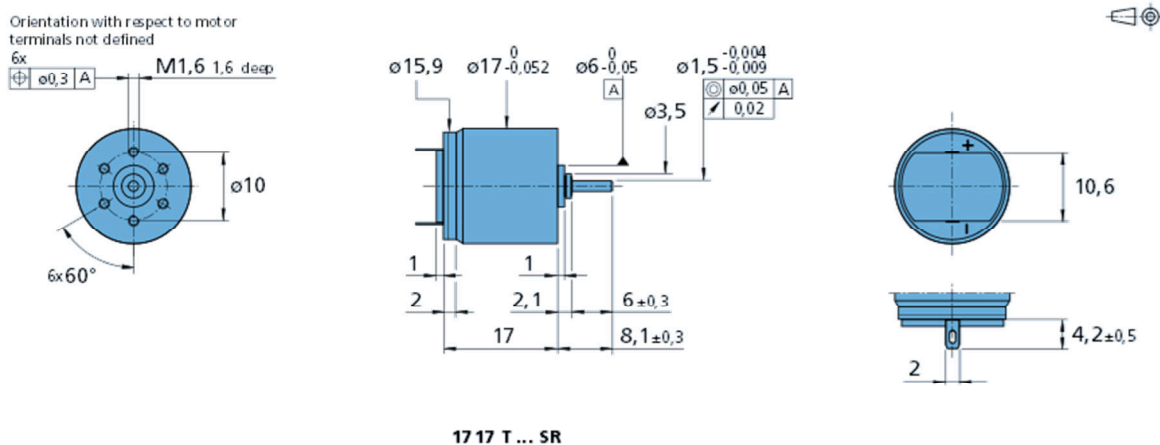
Maximální výkon	1,96 W
Maximální moment	5,34 mNm (2 mNm)
Maximální otáčky	14000 rpm (10000 rpm)

Údaje uvedené v závorkách jsou maximální hodnoty doporučené výrobcem při stálém chodu. Abychom nesnižovali životnost motorů, budeme z těchto údajů vycházet. Jelikož je požadovaný moment vyšší, než doporučená hodnota maximálního momentu pro stálý chod, bude muset být součástí pohonu převod, se kterým již bylo od začátku počítáno. Převodový poměr byl během předchozích výpočtů zvolen 1:3. Nyní se pomocí něj vypočte požadovaný moment (4.16) a otáčky (4.17) na straně motoru.

$$M' = \frac{M}{i} = \frac{6,35}{3} = 2,12 \text{ mNm} \quad (4.16)$$

$$n' = n \cdot i = 2438,12 \cdot 3 = 7314,36 \text{ rpm} \quad (4.17)$$

Při porovnání vypočtených údajů s doporučenými hodnotami zjistíme, že moment stále tuto hodnotu přesahuje. Rozdíl však není tak veliký a maximální moment motoru je více než dvakrát vyšší. Důležité je uvědomit si, že požadovaný moment (4.16) vychází z rozšířeného požadavku na výkon a navíc se vztahuje k situaci, kdy se bude robot rozjíždět. Po překonání statických odporových sil dojde ke snížení potřebného výkonu a při pohybu rovnoměrnou rychlostí bude potřebný moment daleko nižší (v důsledku nulové složky požadované síly F_A). Z těchto důvodů byl zvolený převodový poměr v kombinaci s určeným typem motoru přijat jako adekvátní.



Obrázek 9 - Výkres motoru Faulhaber 1717 (16)

Samotné motory byly zakoupeny s již zabudovanými kvadraturními enkodéry s rozlišením 512 pulzů na otočku. Motor je v tomto případě vybaven šestižilovým kabelem a samořezným konektorem, který při použití vhodného protikusu zabraňuje otočení a nesprávnému připojení motoru.

4.2.3 Převody

Během dimenzování motorů byl určen převodový poměr mezi motorem a kolem 1:3. Jelikož se jedná o malý poměr, může být realizován ozubenými koly s modulem 0,5.

Z konstrukčního hlediska by bylo vhodné kvůli vyrovnání polohy těžiště umístit motory tak, aby byly oproti sobě otočeny o 180° podle středu robotu. To znamená, že vzdálenost osy motoru od osy kola musí být ve vodorovném směru rovna minimálně poloměru motoru pro případ, že by se motory navzájem přesahovaly. Tato vzdálenost je 8,5 mm a omezuje minimální velikost převodových kol. Jejich maximální velikost je dána velikostí kola, protože převod jej nemůže přesahovat. Při započtení vztahu pro určení průměru roztečné kružnice ozubeného kola (4.18), kde N je počet zubů, zjistíme, že pastorek může mít 9 až 15 zubů a ozubené kolo podle převodového poměru 27 až 44 zubů.

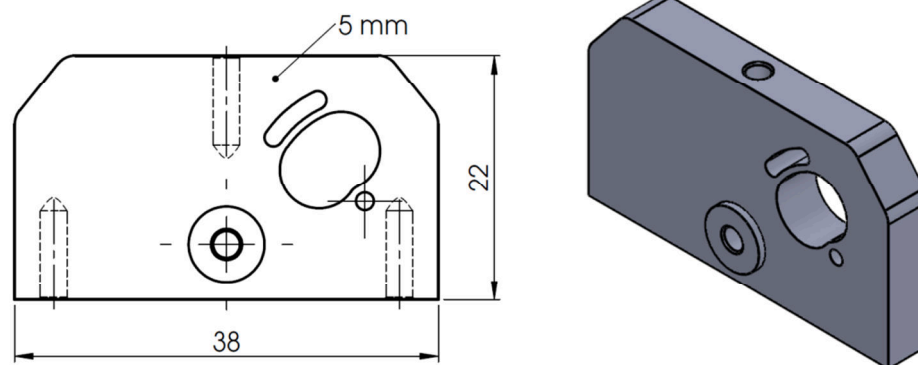
$$d_{rozt} = N \cdot modul \text{ (mm)} \quad (4.18)$$

Vzhledem k dobré dostupnosti bylo zvoleno na stranu kola plastové ozubené kolo s 36 zuby určené pro modely aut od firmy Scaletrix. K němu byl zvolen mosazný pastorek s 11 zuby. Zvolená kombinace zajišťuje zvýšení převodového poměru, čímž dojde ke snížení potřebného momentu na straně motoru a zvýšení jeho potřebných otáček.

4.2.4 Konstrukční díl

Tato komponenta má sloužit ke kompletaci celého pohonu a také jeho upevnění k mobilnímu robotu. Důležité je zajistit vhodné uchycení kola i motoru ve správných vzdálenostech a také dostatečnou mechanickou pevnost při pokud možno nízké hmotnosti. V úvahu připadá několik možností výroby konstrukčního dílu, přičemž od zvoleného způsobu se odvíjí jeho samotný tvar. Díl by bylo možné vyrobit z plechu vyřezáváním a ohýbáním, z kovového nebo plastového bloku frézováním, případně z plastu pomocí 3D tiskárny. Jelikož poslední uvedený způsob byl již použit pro tvorbu disků, bude takto vyroben i konstrukční díl.

Tvar konstrukčního dílu byl zvolen symetrický, kdy se jedná o kvádr se zkosenými horními rohy. Uprostřed dílu se nachází otvor se závitem M3 pro upevnění kola přes jeho hřídel. Výška otvoru je zvolena v závislosti na velikosti kola tak, aby mohl být konstrukční díl upevněn k plošnému spoji robotu a mezi ním a povrchem byla ještě mezera přibližně 4 mm. Uchycení k plošnému spoji bude realizováno také pomocí šroubů M3. Jelikož čelo motoru je opatřeno šesti otvory se závitem M1,6 ve vzdálenosti 5 mm od osy hřídele motoru, bude upevněn ke konstrukčnímu dílu právě pomocí nich. K tomuto účelu byl vytvořen v dílu otvor, kdy pro jeden šroub je připravena díra a pro druhý i pro hřídel výřez, který umožňuje upravit polohu motoru vzhledem ke kolu v závislosti na převodu. Tento způsob uchycení slouží k potlačení případných nepřesností při výrobě dílu a zároveň umožňuje drobné změny převodových kol bez nutnosti vyrábět konstrukční díl nový.



Obrázek 10 - Konstrukční díl

4.3 Napájecí systém

Aby mohl být robot mobilní, potřebuje svůj vlastní nezávislý zdroj energie. V tomto případě se bude jednat o baterie. Jako vhodný typ byly zvoleny baterie Li-pol. I přes jejich nízké hmotnosti a malé rozměry poskytují dostatečnou zásobu energie pro činnost robotu. Z hlediska fyzikálních vlastností robotu by bylo vhodné, aby byly umístěny co nejnižší, aby byla zajištěna poloha těžiště robotu nízko nad povrchem, a také co nejbližší středu robotu pro zajištění malého momentu setrvačnosti při rotačním pohybu, jenž bude vznikat při zatáčení.

Maximální napětí samostatného Li-pol článku je 4,2 V, nominální pak 3,7 V. Enkodéry od použitých motorů však vyžadují napětí 5 V a samotné motory jsou určeny pro 6V napájení. Z těchto důvodů vyplývá použití sériového zapojení dvou článků. Tím dojde k zisku nominálního napětí 7,4 V. Prozatímtní realizovaná konstrukce skýtá k umístění baterií prostor vedle obou motorů široký 21 mm. Do této oblasti by bylo možné umístit článek s kapacitou 240 mAh používaný v modelářství. Jeho rozměry jsou 25×20×5 mm a podle svých parametrů je schopen dodávat trvalý proud o velikosti 7,2 A (30C), což výrazně převyšuje proud odpovídající maximálnímu momentu použitých motorů (1,35 A na motor dle (16)). Problém by však mohl nastat s nízkou kapacitou napájecího systému. Z tohoto důvodu bylo využito i paralelního zapojení článků. Finálně se napájecí systém skládá celkem ze čtyř Li-pol baterií, jeho nominální napětí je 7,4 V a kapacita 480 mAh. Výsledné zapojení je složeno ze dvou dvojic paralelně spojených článků, které jsou následně spojeny sériově. Toto zapojení by mělo zajistit částečné samostatné balancování paralelně spojených článků.

U baterií typu Li-pol je zapotřebí zajistit, aby napětí na bateriích nekleslo pod 3 V na článek. Tato skutečnost bude řešena softwarově. Každý článek je opatřen nepřepólovatelným konektorem JST-PH, který je uzpůsoben na trvalý proud 2 A. Napájecí systém je navíc opatřen vratnou pojistkou polyswitch, která zajistí odpojení baterií od obvodu v případě příliš vysokého proudového odběru.

Pro možnost nabíjení sestavené baterie společně na modelářském nabíječi s funkcí balancování jednotlivých článků byla vytvořena jednoduchá propojovací deska. Všechny články jsou spojeny sériově a každý spoj je vyveden na konektor pro balancování. Nabíjení probíhá přes hlavní vodiče, které jsou spojeny s konci sériového propojení baterií. Takto nabíjených baterií může být až šest. Veškeré použité konektory jsou nepřepólovatelné a patří mezi modelářské standardy.

4.4 Elektronické zapojení a plošný spoj

Při volbě konstrukce robotu bylo zvoleno, že bude celý realizován na jednom plošném spoji. Jeho rozměry jsou tedy omezeny zvolenými rozměry robotu na 100×80 mm. Rohy plošného spoje by měly být zaobleny a uprostřed by měl obsahovat výřezy pro kola, aby bylo zabráněno možnosti zachycení robotu o překážku. Veškeré elektronické součásti by měly být umístěny na horní straně plošného spoje, aby nepřišly do kontaktu s povrchem, po kterém se bude robot pohybovat.

4.4.1 Řídicí systém

Z možností uvedených v teoretickém rozboru byla vybrána varianta, kdy bude veškeré řízení zajištěno jedním centrálním prvkem. V tomto případě, jelikož se jedná o poměrně malý mobilní robot, se bude o řízení starat mikrokontrolér. Výběr byl omezen na 8bitové mikrokontroléry firmy Atmel z rodiny ATmega, především pro velké zkušenosti s jejich programováním a také kvůli dostupnosti a jejich dostatečnému vybavení. Bylo zapotřebí, aby měl mikrokontrolér k dispozici přibližně 31 vstupů a výstupů, z toho 7 kanálů pro A/D převodník, 3 výstupy pro generování PWM signálu, 6 vstupů vybavených externím přerušením a dva piny pro komunikaci přes rozhraní UART. Následným kritériem byla velikost paměti pro program a zpracovávaná data. Jelikož nebylo předem známo, jak velké tyto paměti musí být, byla z tohoto důvodu vybrána Atmega128 s 128 kB flash paměti a 4 kB SRAM, přestože řada pinů nebude využita.

Zapojení mikrokontroléru vychází z datasheetu (17). Ke všem napájecím pinům je připojen pro odrušení kondenzátor s kapacitou 100 nF. Aby bylo možné využívat maximální výkon mikrokontroléru, je k němu připojen externí krystal, který zajišťuje taktování na maximální frekvenci 16 MHz, a potřebné 22pF kondenzátory. Napájení pro analogové obvody je na vstupní pin připojeno přes dolnoproputný filtr tvořený cívku s indukčností 10 μ H a 100nF kondenzátorem. Referenční vstup pro A/D převodník nebude využíván.

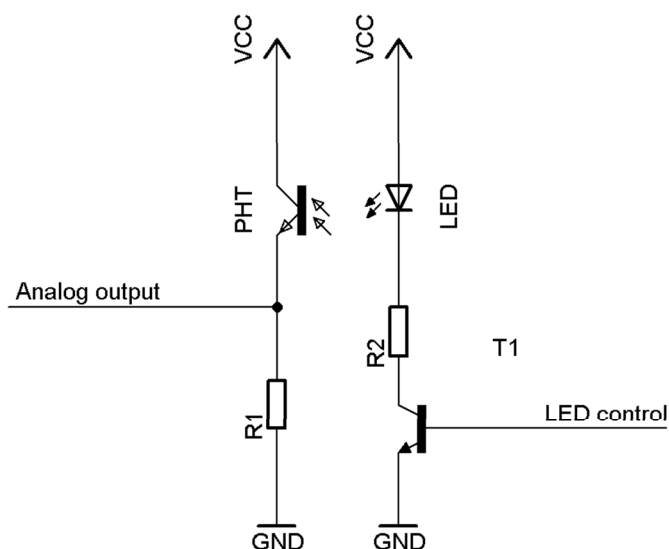
Pro základní signalizaci, komunikaci a programování je k mikrokontroléru připojeno tlačítko sloužící k jeho restartování, 2 ovládací tlačítka, 5 LED a má vyvedeno komunikační rozhraní UART a rozhraní ISP pro programování.

4.4.2 Senzorický systém

Pro realizaci robotu byly zvoleny pouze nezbytně nutné senzory. Mezi interními senzory se jedná o kvadrurní enkodéry pro řízení motorů, jež jsou přímo jejich součástí a jejich výstupy jsou připojeny k pinům mikrokontroléru s externím přerušením, a měření napětí baterie, které je z důvodu dosahování vyšších hodnot, než je měřitelná úroveň A/D převodníkem mikrokontroléru, připojeno přes odporový dělič. Z externích sensorů byly zvoleny pouze senzory pro detekci okolních stěn a jejich vzdálenosti.

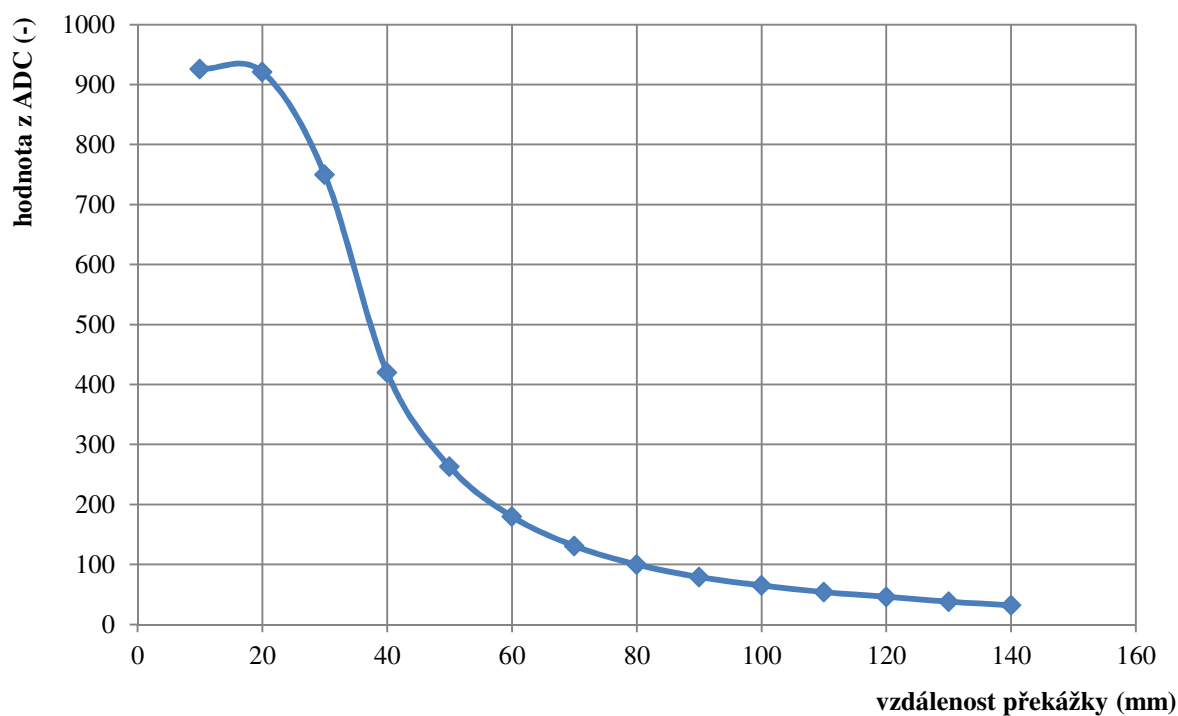
Jako vhodný druh byly zvoleny senzory pracující s infračerveným zářením, které využívají k určení vzdálenosti objektu měření intenzity odraženého záření. Tyto senzory jsou velmi jednoduché a levnější než ostatní varianty. Navíc měření probíhá dostatečně rychle a jejich zapojení umožňuje měnit určité parametry senzoru, například rozsah vzdáleností, ve kterém pracují. Zapojení tohoto typu senzoru je na obrázku 11. Při volbě velikostí odporů, především odporu R1, bylo vycházeno z článku

zabývajícího se touto problematikou (18). Na základě zjištěných informací a dalších měření byla zvolena hodnota odporu 1 k Ω .



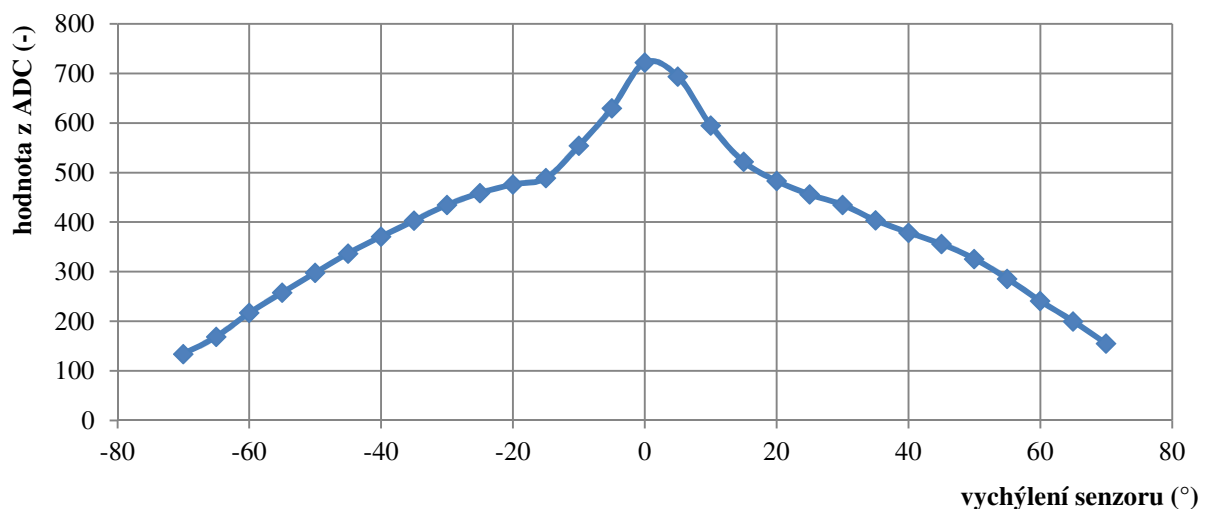
Obrázek 11 - Schéma zapojení senzoru

Zapojení senzoru bylo voleno tak, aby vykazoval dobré vlastnosti ve vzdálenostech od 30 mm. Výsledná podoba byla otestována a byla změřena závislost výstupního údaje, v tomto případě napětí, na vzdálenosti překážky (obrázek 12). Hodnota napětí byla měřena 10bitovým A/D převodníkem a nebyla přepočítána zpět na napětí.



Obrázek 12 - Závislost údaje ze senzoru na vzdálenosti překážky

Robot bude vybaven celkem šesti samostatnými senzory, dva budou směřovat do stran, dva dopředu a poslední dvojice zešikma přibližně mezi dva předchozí. Důležité je samotné natočení senzoru do daného směru. Ze změřené závislosti údaje ze senzoru na natočení překážky (obrázek 13), která se nachází v neměnné vzdálenosti, je patrné, že nemíří-li senzor kolmo na překážku, naměřený údaj se snižuje. Pokud by byl senzor mířící do strany rovnoběžný s osou kol, čili mířil by v ideálním případě kolmo na překážku, docházelo by při vychýlení robotu z přímého směru k chybné detekci boční překážky. Senzor by na ni mířil s určitou odchylkou a naměřená hodnota by udávala vzdálenost překážky vyšší, než by ve skutečnosti byla. Navíc při stejné vzdálenosti senzoru od překážky, avšak vychýlení robotu do různých směrů, by nemohlo být z daného údaje zjištěno, zda je robot natočen od překážky nebo k ní. Z těchto důvodů jsou boční senzory vychýleny od kolmého směru lehce směrem dopředu.



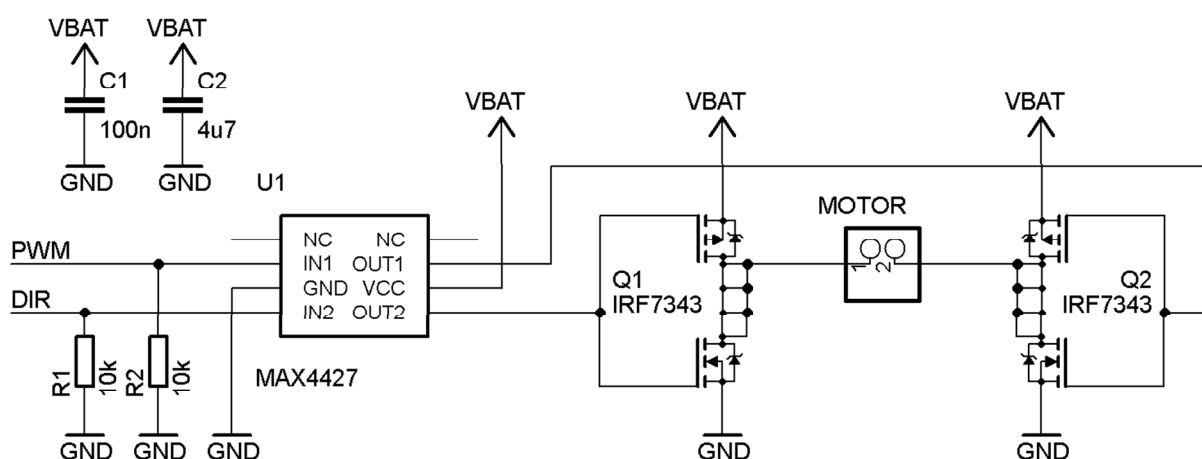
Obrázek 13 - Závislost údaje ze senzoru na jeho vychýlení od kolmého směru

4.4.3 Budící obvod motorů

U motorů je zapotřebí ovládat nejen rychlost otáčení, ale také směr otáčení motoru, aby se mohl mobilní robot pohybovat vpřed i vzad. K této funkci byl vytvořen h-můstek. Jako základní výkonový prvek byly zvoleny unipolární tranzistory typu MOSFET. Ty vykazují velmi nízký odpor v sepnutém stavu a krátké doby náběhu i sestupu. Pro jeden motor je zapotřebí dvou tranzistorů typu N a dvou typu P. Za tímto účelem byly zvoleny MOSFET tranzistory IRF7343. Jedná se vlastně o komplementární dvojici MOSFETů typu N a P. Doba náběhu i sestupu se u obou kanálů pohybuje řádově v desítkách ns a trvalý proud tekoucí oběma typy je 2 A, což podle údajů z dokumentace motorů plně dostačuje.

Jelikož budou motory, respektive zmíněné výkonové spínací prvky, připojeny přímo na napětí baterie, bude zapotřebí upravit napěťovou úroveň řídicího signálu z mikrokontroléru. K této funkci byly zvoleny duální drivery MOSFET tranzistorů MAX4427. Kromě úpravy napěťové úrovně tyto drivery také zkracují dobu potřebnou k sepnutí či rozepnutí tranzistorů oproti přímému řízení z mikrokontroléru, jelikož zvládnou dodat do GATE elektrod mnohem vyšší proud. Zapojení bylo podle dokumentace driverů MAX4427 (19) doplněno o potřebné kondenzátory v blízkosti jejich

napájení pro zamezení vzniku rušení v důsledku špičkového proudového odběru při přepínání stavu tranzistorů. Na vstupy driverů musí být navíc připojeny pull-up nebo pull-down odpory kvůli zajištění definované logické úrovně ve všech případech. Bez nich by byly vstupy například při restartování mikrokontroléru plovoucí, napětí na výstupech driveru by nemělo stabilní úroveň a v konečném důsledku by mohlo dojít ke zničení tranzistorů kvůli otevření obou komplementárních kanálů a toku nadměrného proudu.



Obrázek 14 - Zapojení budícího obvodu pro jeden motor

4.4.4 Napájení systémů

Nominální napětí baterií, kterými je robot vybaven, je 7,4 V. Tato hodnota navíc není stabilní a při odběru energie postupně klesá. Jedním z požadavků je zajistit napájecí napětí pro enkodéry motorů, které vyžadují 5 V. Další požadavek vzniká u řídicího mikrokontroléru. Při využití externího taktovacího krystalu o frekvenci 16 MHz musí být napájecí napětí dle dokumentace (17) v rozsahu 4,5 až 5,5 V. Vhodným řešením je použít standardní 5V napájecí úroveň. K výběru vhodného napěťového regulátoru je zapotřebí určit maximální proud, který bude potřeba na dané napěťové úrovni dodávat. U senzorů je také počítáno s napájením z 5 V, budící obvody pro motory budou napájeny přímo z baterie.

Tabulka 3 - Proudový odběr komponent

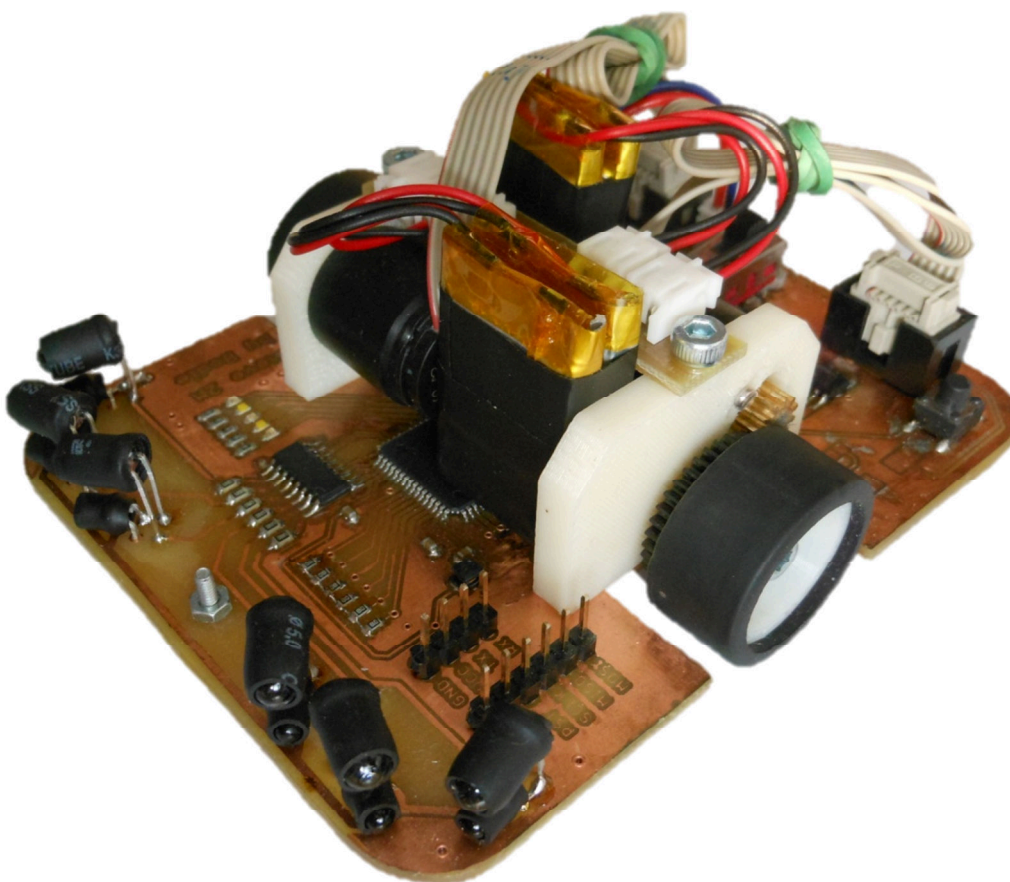
Komponenta	proudový odběr (mA)
mikrokontrolér	33
senzor stěny	430
enkodéry	2×8,5
signalizační LED	5×0,5
celkový odběr	482,5

Zatímco u jiných prvků je počítáno s možností jejich současného provozu, u senzoru stěny bude z důvodu šetření energie vždy sepnut pouze jeden, z něhož se bude právě získávat hodnota pomocí A/D převodníku. Po zhodnocení požadavků byl zvolen lineární regulátor LF50. V jeho

dokumentaci (20) se udává možný výstupní proud 500 mA, nicméně proudový omezovač je nastaven na 1 A. Tento regulátor navíc obsahuje vlastní ochranu proti přepólování a teplotní ochranu.

4.5 Sestavený mobilní robot

Na základě návrhu jednotlivých mechanických i elektronických částí a jejich následné realizace byl sestrojen daný mobilní robot. Plošný spoj byl vyroben oboustranný pomocí techniky leptání a součástky, které to umožňovaly, byly zapájeny v IR peci. Výsledná hmotnost robotu je 125 g a rozměry 100×80×39 mm. Oba údaje odpovídají stavu, kdy jsou na robotu umístěny i baterie.



Obrázek 15 - Sestavený mobilní robot

5 Softwarové řešení

Má-li robot vykonávat určitou činnost, musí jeho řídicí systém, pakliže je tvořen určitou formou procesoru, obsahovat program, který se stará o snímání údajů ze senzorů, jejich vyhodnocování a následnou reakci aktuátorů a pohonů. Pro realizovaný robot byl zvolen pro tvorbu řídicího programu jazyk C a vývojové prostředí Eclipse s nástavbou pro mikrokontroléry AVR.

Pro nahrávání programů byl nejprve využit profesionální programátor Presto od firmy ASIX, který hlídá například zvýšený proudový odběr programovaného zařízení a tudíž je vhodný při případném odhalování závad. Následně byl používán vyrobený programátor USBAsp.

5.1 Obsluha jednotlivých periférií

V první řadě bylo zapotřebí zvládnout obsluhovat jednotlivé části robotu, ať už se jedná o senzory pro určení vzdálenosti stěny nebo o motory sloužící k pohybu robotu. Teprve po této fázi bylo možné věnovat se tvorbě programu zaměřeného na autonomní robotu. Pro práci s jednotlivými perifériemi byly vytvořeny samostatné funkce, které vždy zahrnují ucelený úsek kódu vykonávající celistvou nebo opakující se činnost. Jednotlivé úseky programu byly vždy testovány a odladěny. Samotná práce s perifériemi či jejich inicializace spočívá především ve správném nastavení příslušných registrů, které jsou k daným perifériím přiřazeny.

5.1.1 Základní uživatelské rozhraní

První částí programu, která vždy slouží k otestování, zda mikrokontrolér funguje správně, je ovládání signalizační LED. V tomto případě je robot vybaven pěti LED. Umožňují předávat základní informace o robotu na pravděpodobně nejnižší úrovni, jelikož jsou ovládány pouze logickým signálem.

Inicializace tohoto signalizačního rozhraní spočívá pouze v nadefinování příslušných pinů do režimu výstupů. Následné ovládání je realizováno pouze změnou hodnoty určitého bitu v registru, který odpovídá portu, k němuž jsou LED připojeny. Soupis funkcí a jejich význam je uveden v následující tabulce.

Tabulka 4 - Funkce pro obsluhu LED

Led_on	zapnutí zadané LED
Led_off	vypnutí zadané LED
Led_toggle	změna stavu zadané LED
Led_blink	bliknutí zadanou LED po dobu 200 ms

Určení, se kterou LED se má příslušná činnost vykonat, se provádí pomocí argumentu funkcí s tím, že současně nemůže být zadáno do jedné funkce více LED. Pro snadnější obsluhu byla definována pro všechny LED makra, která umožňují jejich zadávání pomocí názvů Led0 až Led4.

Druhou částí spadající do uživatelského rozhraní jsou tlačítka. Nepočítáme-li tlačítko určené pro restart, je robot vybaven dvěma. Obě tlačítka jsou připojena na vstupní piny mikrokontroléru vybavené externím přerušením. Tato skutečnost umožnila využít pro jejich obsluhu přerušení, což

bylo záměrem. Díky tomu může robot reagovat na jejich zmáčknutí poměrně nezávisle na běhu programu.

Jelikož jsou piny mikrokontroléru defaultně nastaveny jako vstupní, není zapotřebí měnit jejich režim práce. Při inicializaci dochází k zapnutí interních pull-up odporů, jelikož tlačítka jsou připojena k zemi. Dále dochází k povolení externího přerušení na daných pinech a k definici vyvolání přerušení při detekci sestupní hrany, což vyplývá z fyzického zapojení tlačítek.

Pro případné zamezení chybné nebo mnohonásobné detekce zmáčknutí tlačítek v důsledku jejich zákmitů bylo zvoleno softwarové řešení, které je součástí obsluhy přerušení. Jeho podoba je uvedena v následujícím úryvku kódu.

```
ISR(INT2_vect) {
    _delay_ms(20);
    if ((PIND & (1 << But2)) == 0) {
        //samotna obsluha preruseni
    }
}
```

Při detekci sestupné hrany dojde k volání obslužné rutiny. V té se nejprve počká po dobu přibližně 20 ms a následně se testuje stav daného tlačítka. Je-li jeho hodnota vyhodnocena jako logická 0, což znamená, že je tlačítko stále sepnuté, dojde k vykonání obslužné části kódu, klasicky k nastavení tzv. flagu, podle něhož se následně změní průběh jiné části programu. Správně by obslužná rutina neměla obsahovat dlouhý úsek kódu, tudíž ani prodlevu 20 ms. V tomto případě se zde ale vyskytovat může, protože se jedná o ošetření zmíněných zákmitů, které za tuto dobu s největší pravděpodobností odezní. Navíc v porovnání s řádově delší reakcí člověka, který tlačítko obsluhuje, se nejedná o žádné zpomalení programu ani narušení jeho činnosti, jelikož člověk nebude schopen tlačítko zmáčknout při samotném pohybu robotu, kdy by prodleva narušila jinou část programu.

5.1.2 Kontrola stavu baterie

Hlídní hodnota napětí baterií je poměrně zásadní činnost, kterou by měl robot vykonávat trvale, aby nedošlo k podvybití článků a jejich poškození. Z tohoto důvodu bylo zvoleno, že měření stavu baterie bude probíhat v pravidelných časových intervalech daných časovačem a bude spouštěno v přerušení, které má vyšší prioritu než průběh hlavního programu.

Při inicializaci této činnosti dochází k povolení přerušení daného časovače a nastavení periody měření na přibližně 0,25 s. Přesně ji lze určit z předděličky časovače, která je zvolena nastavením registrů, typu časovače, kdy byl zvolen 16bitový, a taktovací frekvence mikrokontroléru.

$$T_{BAT} = \frac{2^{16} \cdot N}{f_{CPU}} = \frac{65536 \cdot 64}{16000000} = 0,262 \text{ s} \quad (5.1)$$

K měření hodnoty se využívá A/D převodníku. Vzhledem k tomu, že ten se bude využívat i v hlavní části programu pro získání hodnot ze senzorů stěn, bylo zapotřebí vyřešit otázku synchronizace dvou procesů, které budou přistupovat ke stejným prostředkům. V případě, kdy by probíhalo čtení A/D převodníkem v hlavní části programu a nastalo by přerušení, které by se pokoušelo spustit další převod z jiného kanálu A/D převodníku před dokončením předchozí operace, došlo by k takzvanému deadlocku (uváznutí), kdy pro dokončení přerušení by musela být nejprve dokončena práce A/D

převodníku v hlavní smyčce a vymazání příslušného flagu, avšak pro dokončení tohoto převodu by muselo být ukončeno přerušení. Pro řešení tohoto uvážnutí byl použit princip vzájemného vyloučení (anglicky mutual exclusion). K jeho realizaci byla použita proměnná mutex sloužící k uzamčení operace čtení z A/D převodníku. Před zahájením čtení hodnoty ze senzoru v hlavním programu dojde k nastavení mutex na hodnotu 1, po dokončení je vynulován. V přerušení je následně před pokusem o čtení stavu baterie testováno, zda je hodnota proměnné mutex 0. V opačném případě je přerušení ukončeno, jelikož není tak závažné, nedojde-li občas k přečtení stavu baterie. U čtení údaje ze senzorů není zapotřebí testovat, zda se A/D převodník nepoužívá, jelikož hlavní program má nižší prioritu provedení než přerušení.

5.1.3 Komunikace přes rozhraní UART

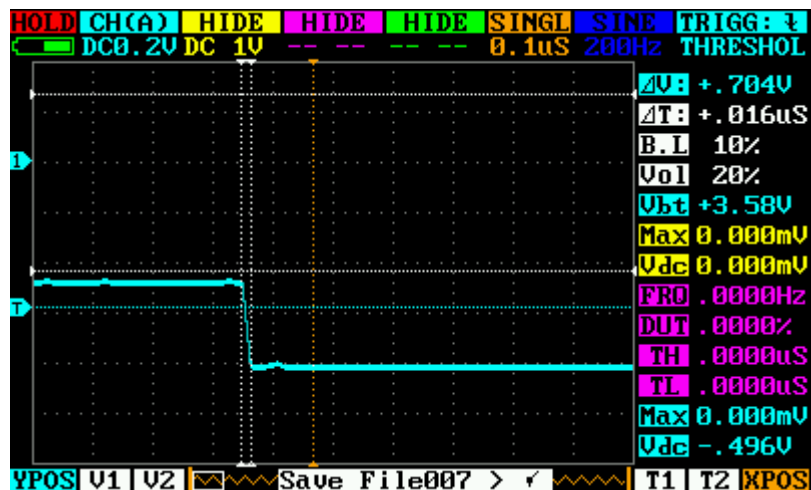
Aby byl robot schopen předávat uživateli více dat, například údaje ze senzorů nebo strukturu bludiště, ale také aby mu byl uživatel schopen zadat složitější příkazy, třeba souřadnice pozice, na kterou se má robot přesunout, musí robot podporovat komunikaci přes určité rozhraní. K tomuto účelu byl zvolen UART, kdy je rozhraní mikrokontroléru připojeno k bezdrátovému Bluetooth modulu, přes který může robot komunikovat s počítačem či jiným zařízením prostřednictvím virtuálního sériového portu.

Inicializace rozhraní spočívá v definici protokolu, který má být použit. Byla zvolena jeho poměrně často používaná varianta. Zpráva obsahuje 8 datových bitů, 1 stop bit a je bez parity. Pro příjem zpráv slouží rutina pro obsluhu daného přerušení, ve které se na základě přijatého znaku rozhoduje o vykonání příslušné činnosti. K odesílání hodnot bylo vytvořeno několik základních funkcí pro číselné datové typy a znakové řetězce. V návaznosti na později realizované algoritmy byly vytvořeny také funkce pro odesílání dvourozměrného pole, které zachycuje strukturu bludiště, nebo také pro odeslání pozice robotu v bludišti a jeho aktuálním relativním směru.

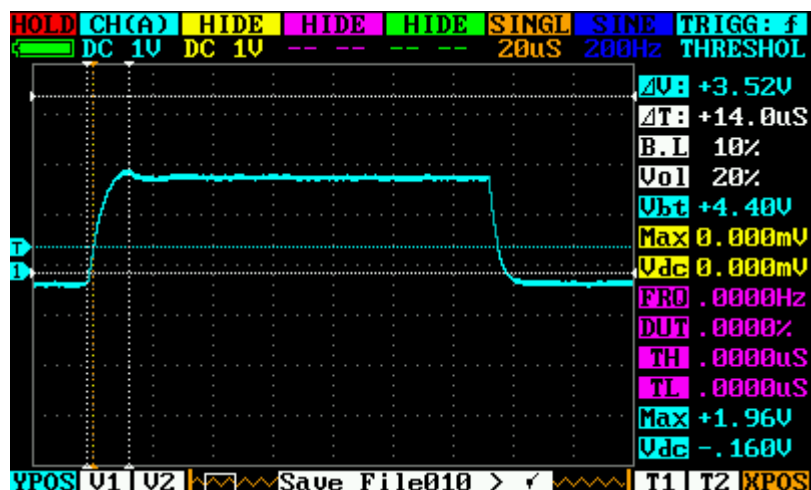
5.1.4 Čtení ze senzoru stěn a zpracování údajů

Tato operace je velmi podstatná pro jakoukoliv další činnost mobilního robotu. Zároveň je při měření a následném zpracování údajů ze senzorů zapotřebí co nejvíce potlačit nežádoucí vlivy, kterými jsou získané hodnoty ovlivněny.

Nejprve je potřeba přečíst údaj ze senzoru. Z principu, který senzor využívá k vlastnímu měření, vyplývá způsob získání hodnoty ze senzoru, kdy nejprve musí dojít k zapnutí infračervené LED, jež emituje záření, a následnému změření hodnoty pomocí A/D převodníku. Rychlost šíření záření celý proces neomezuje, při měřených vzdálenostech můžeme proces emitování a návratu signálu považovat za okamžitý (pro vzdálenost 20 cm se jedná o čas 0,6 ns). Je však zapotřebí dbát na samotné parametry komponent, konkrétně doby náběhu. Změřené přechody jsou vidět na obrázcích 16 a 17 a údaje se shodují s parametry součástek uvedenými v jejich dokumentaci.



Obrázek 16 - Doba náběhu IR LED (měřeno vůči napájení)



Obrázek 17 - Doba náběhu fototranzistoru

Na základě změřených průběhů byla do programu zajišťujícího měření údaje ze senzoru přidána po zapnutí IR LED prodleva 20 μ s. Pro potlačení vlivu okolního osvětlení, které se může měnit, dochází vždy nejprve k získání informace o jeho velikosti, čili bez zapnuté IR LED, a následně již popsaným způsobem. Dále používaný údaj je pak diferencí těchto dvou měření. Prakticky tento postup zachycuje následující část kódu.

```
unsigned int sensor_read_one(unsigned char led, unsigned char pht) {
    unsigned int value_dark, value_light;

    mutex = 1;

    value_dark = Adc_read(pht);
    PORTA |= (1 << led);
    _delay_us(20);
    value_light = Adc_read(pht);
    PORTA &= ~(1 << led);
```

```

mutex = 0;

_delay_us(15);

if ((value_light - value_dark) < 0)
    return 0;
else
    return (unsigned int) (value_light - value_dark);
}

```

Jak již bylo uvedeno dříve na obrázku 12, závislost takto změřeného údaje na vzdálenosti je značně nelineární a má klesající charakter. Pro zajištění snazšího využití údajů v dalších částech programu byl navržen a implementován přepočít pro linearizaci údaje. Podrobný postup byl popsán ve článku (18). Základem je výpočet převrácené hodnoty přirozeného logaritmu z naměřeného údaje, jak popisuje rovnice (5.2). Díky tomu dojde k zisku závislosti, která je v pracovním rozsahu senzoru lineární.

$$hodnota_{lin} = \frac{1}{\ln(hodnota_{AD})} \quad (5.2)$$

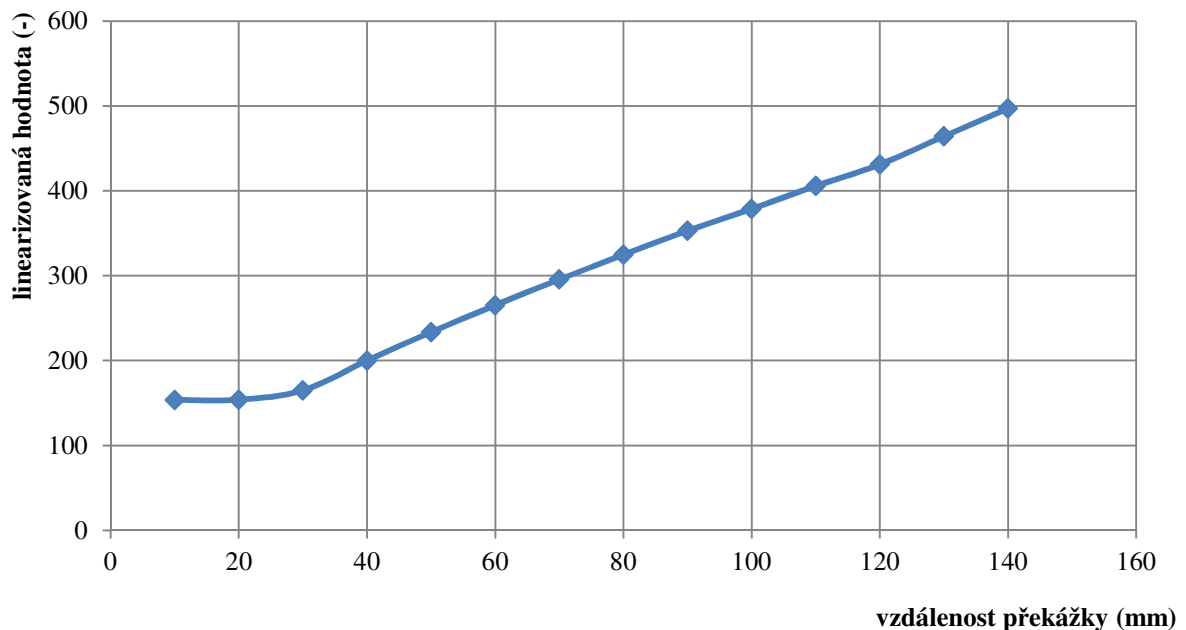
Přidáním hodnoty logaritmu z určitého naměřeného údaje odpovídajícího zvolené vzdálenosti do čitatele vztahu (5.2) dojde k normování závislosti, kdy v dané vzdálenosti bude mít linearizovaná hodnota ze senzoru vždy stejnou velikost, konkrétně 1. Zvolená vzdálenost bude brána jako kalibrační.

$$hodnota_{lin} = \frac{\ln(hodnota_{kalibrace})}{\ln(hodnota_{AD})} \quad (5.3)$$

Při implementaci výpočtu do mikrokontroléru bylo zapotřebí provést jeho optimalizaci. Operace prováděné s reálnými čísly jsou časově daleko náročnější než operace s čísly celými a výpočet logaritmu by taktéž celý přepočít značně zpomalil. Z těchto důvodů byl vztah (5.3) upraven přidáním částečně pomyslných konstant na vztah (5.4).

$$hodnota_{lin} = 400 \frac{7000 \cdot \ln(hodnota_{kalibrace})}{7000 \cdot \ln(hodnota_{AD})} - 200 \quad (5.4)$$

Aby nebylo zapotřebí počítat hodnotu logaritmu, byla do mikrokontroléru uložena tabulka jeho hodnot. Pro odstranění potřeby použít reálná čísla tato tabulka obsahuje hodnoty logaritmů vynásobené konstantou 7000, které jsou pouze celočíselné. Velikost konstanty se odvíjí od nejvyššího možného argumentu logaritmu (při 10bitovém rozlišení A/D převodníku 1023) a velikosti datového typu uint16_t, což je 65 535. Konstanta 400 vystupující ve vztahu (5.4) slouží opět k odstranění potřeby použít reálná čísla a zároveň k zisku dostatečné přesnosti výpočtů, hodnota 200 pak k posunutí celé závislosti na ose y směrem dolů pro celkové snížení hodnot použitých v dalších výpočtech.



Obrázek 18 - Závislost linearizovaných hodnot na vzdálenosti překážky

Jelikož se vypočtené charakteristiky pro jednotlivá čidla lišily, byl přidán do celého měřicího algoritmu ještě další výpočet pro lineární zobrazení. Ten vyžaduje změření hodnoty pro druhou kalibrační vzdálenost a na základě získaných údajů probíhá přepočítání linearizované hodnoty ze senzoru přímo na vzdálenost v mm. Výsledný odvozený vztah má následující podobu.

$$hodnota = \frac{40 \cdot hodnota_{lin} - 8000}{hodnota_{2lin} - hodnota_{1lin}} + 40 \text{ (mm)} \quad (5.5)$$

Konstanty v uvedeném vztahu byly vypočteny ze zvolených kalibračních vzdáleností 40 a 80 mm. Hodnoty ve jmenovateli odpovídají údajům ze senzoru po linearizaci pro dané kalibrační vzdálenosti. Tento postup byl zvolen především pro názornost, odlišnost údajů ze senzorů by mohla být řešena v programu jinak, například specifickými podmínkami pro každý senzor.

5.1.5 Ovládání pohonů

U realizovaného robotu jsou jeho pohony jediný prvek, který umožňuje robotu vykonávat pohyb. Jejich ovládání je tedy zásadní. Vytvořené budící obvody jsou navrženy pro ovládání jedním výstupem, který určuje směr, a druhým, který generuje PWM signál určující rychlost otáčení daného motoru.

Při inicializaci motorů dochází k nastavení potřebných pinů mikrokontroléru do výstupního režimu a k nastavení časovače pro generování PWM signálu na dvou výstupech. Frekvence modulovaného signálu je dána při použití 8bitového rozsahu časovače taktovací frekvencí mikrokontroléru a použitou předděličkou (5.6).

$$f_{pwm} = \frac{f_{CPU}}{2^8 \cdot N} \text{ (Hz)} \quad (5.6)$$

V závislosti na možnostech daných tímto vztahem a na požadavku frekvence mimo slyšitelný rozsah byla zvolena frekvence PWM 62,5 kHz. Jakékoliv jiné nastavení by spadalo do slyšitelné oblasti. K následnému ovládní směru a rychlosti otáčení motorů a potažmo kol byla vytvořena funkce umožňující nastavení každého motoru zvlášť. Rychlost i směr se zadávají pomocí jednoho číselného parametru, kdy velikost udává následně použité plnění PWM signálu a polarita směr. Jeho nastavení zajišťuje samotná funkce.

Aby bylo možné zajistit pohyb robotu rovně, případně jeho zatáčení po určitém oblouku, bylo zapotřebí snímat otáčení motorů podle enkodérů a následně tuto informaci využít k zavedení zpětné vazby. Snímání otáček je realizováno pomocí vstupů mikrokontroléru vybavených externím přerušením. Na ně jsou přivedeny signály z A výstupů enkodéru a zachycují náběžné i sestupné hrany. Podle stavu na výstupu B je pak počet tiků z daného enkodéru inkrementován či dekrementován. Jelikož mikrokontrolér neobsahuje samostatnou periférii pro zpracování kvadrurního signálu a to musí být realizováno v přerušení, nebyla použita varianta, kdy dochází k detekci hran v signálech z obou výstupů A i B, aby nebyl mikrokontrolér nadměrně zatěžován.

Pomocí časovače je vyvoláváno přerušení s periodou 4,096 ms, ve kterém je zaznamenávána diference aktuálního počtu tiků z enkodéru a posledního zaznamenaného počtu. Výsledný údaj odpovídá rychlosti otáčení kola a je následně použit pro regulaci. Dané přerušení je doplněno o záznam ujeté vzdálenosti a natočení robotu. Oba parametry jsou uchovávány v počtu tiků a nejsou dále převáděny.

Pro ovládní otáček motorů byl experimentálně navržen PI regulátor, respektive jeho diskretní forma PS. Jako regulační odchylka do něj vstupuje rozdíl požadované hodnoty otáček a změřené. Pro integrační složku je počítána suma odchylek. Její hodnota je omezena kvůli rozsahu použitého datového typu. Výpočet plnění PWM pomocí regulátoru pro jeden motor zachycuje následující ukázka programu.

```
eL = (cppLdem - cppL);

eL_sum += eL;
if (eL_sum > 30000)
    eL_sum = 30000;
else if (eL_sum < -30000)
    eL_sum = -30000;

l_value = (signed int) (((signed long) P * eL + I * eL_sum) / 100);

l_value = value_control(l_value);

Motor_set('L', l_value);

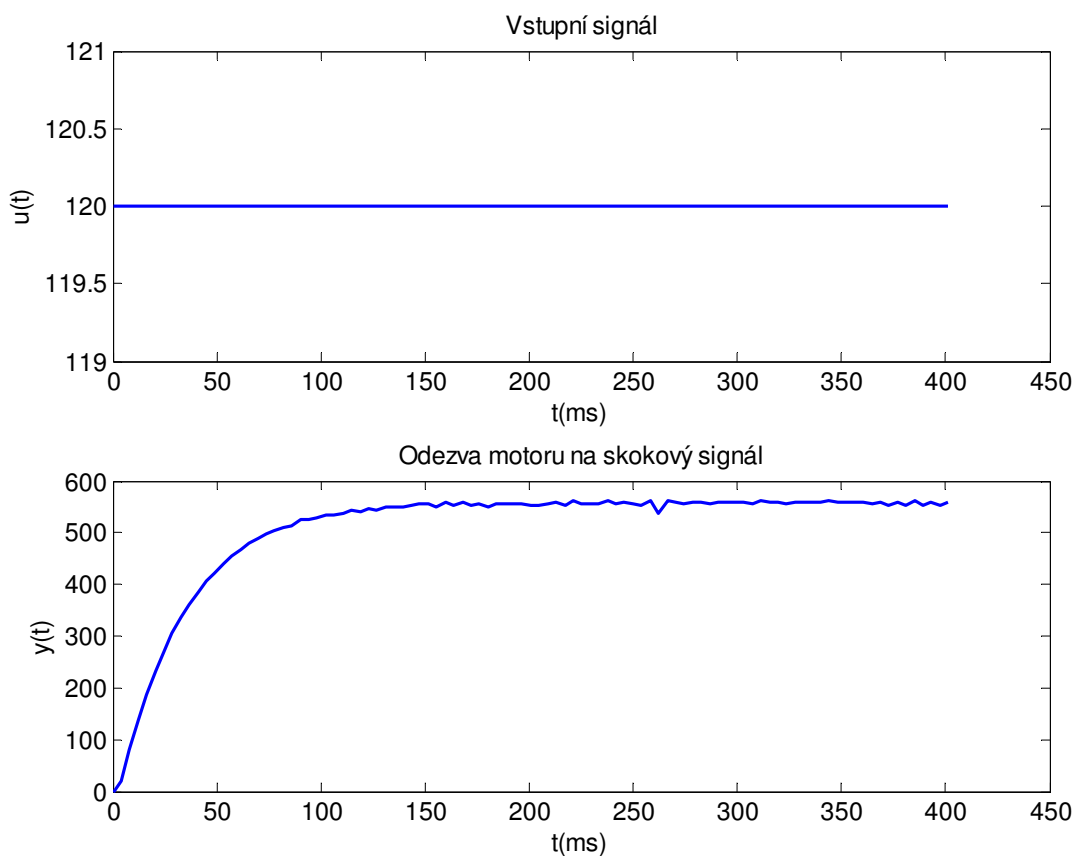
eL0 = eL;
```

Výpočet je opět upraven pro použití celočíselných datových typů. Před nastavením rychlosti motoru dochází ještě ke kontrole velikosti požadovaného plnění a případnému omezení této hodnoty.

Kód regulátoru se spouští v přerušení spolu s měřením rychlosti otáček motoru. Konstanty P a I byly upravovány experimentálně na základě měření rychlosti motoru a odeslání této hodnoty

pomocí rozhraní UART tak, aby daná odezva na skokovou změnu požadované hodnoty byla co nejkratší, ale zároveň nekmitala a jednalo se ideálně o průběh na mezi aperiodicity.

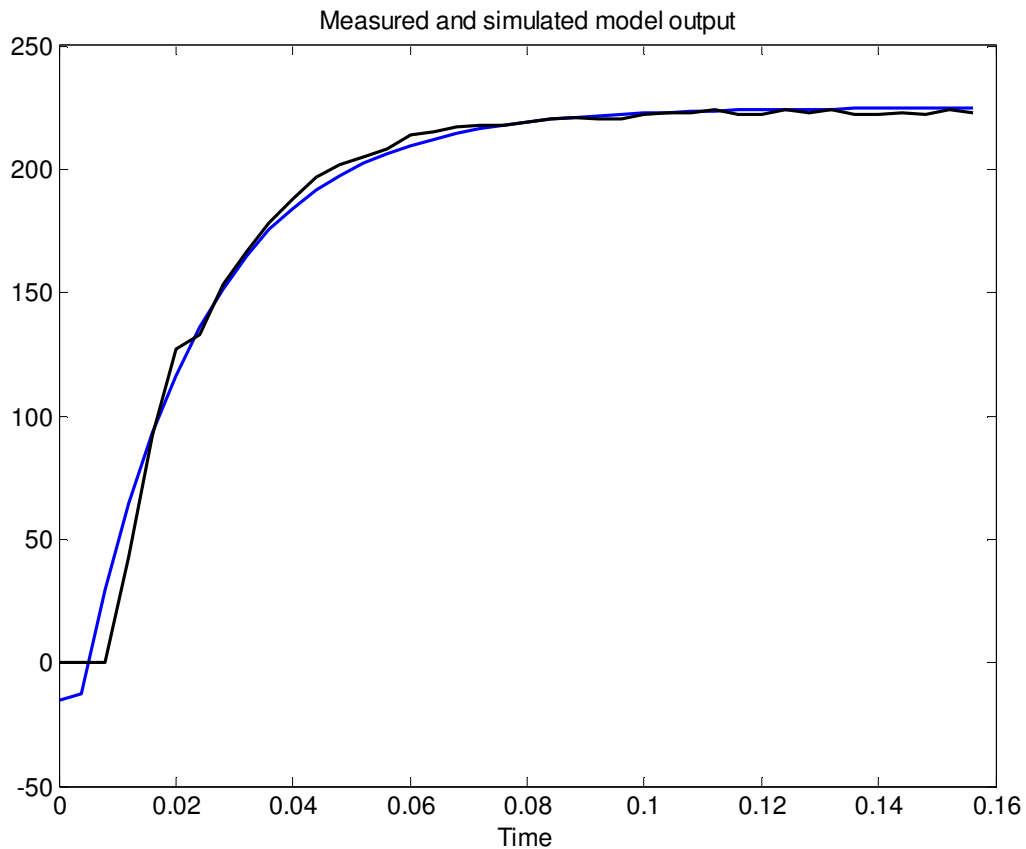
V rámci práce byla vyzkoušena také jiná možnost návrhu regulátoru, konkrétně pomocí programu Matlab. Nejprve byla odměřena přechodová charakteristika $y(t)$ samotných motorů jakožto odezva na skokovou změnu přivedeného napětí $u(t)$. Měření probíhalo v nezatíženém stavu, kdy kolo poháněné motorem bylo umístěno ve vzduchu. Pro zjednodušení pozdějších operací byla hodnota skoku zvolena podle plnění PWM signálu, tedy 120 z 255 možných. Perioda vzorkování byla shodná s periodou časovače pro obsluhu enkodérů, tedy 4,096 ms. Jelikož motor považujeme za spojitý systém, je charakteristika brána také jako spojitá.



Obrázek 19 - Průběh vstupního signálu $u(t)$ a výstupního signálu $y(t)$

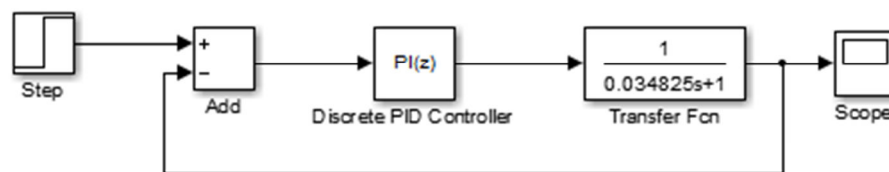
Tyto dva průběhy byly vloženy do nástroje Ident. V něm byla testována identifikace pomocí přenosů různého řádu. Jako adekvátní byl zvolen systém prvního řádu popsáný následujícím přenosem.

$$G(s) = \frac{1}{0,034825s+1} \quad (5.7)$$



Obrázek 20 - Identifikace pomocí soustavy 1. řádu (modrý průběh)

K identifikované soustavě byl v prostředí Simulink navržen diskretní PS regulátor tak, aby výsledný uzavřený regulační obvod nekmital a měl vhodné parametry.



Obrázek 21 - Blokové schéma regulačního obvodu z nástroje Simulink

Na základě výsledného průběhu byl zvolen regulátor definovaný následujícím přenosem.

$$G_r(z) = P + \frac{I \cdot T_s}{z-1} = 3,13425 + \frac{84,84387 \cdot 0,004096}{z-1} \quad (5.8)$$

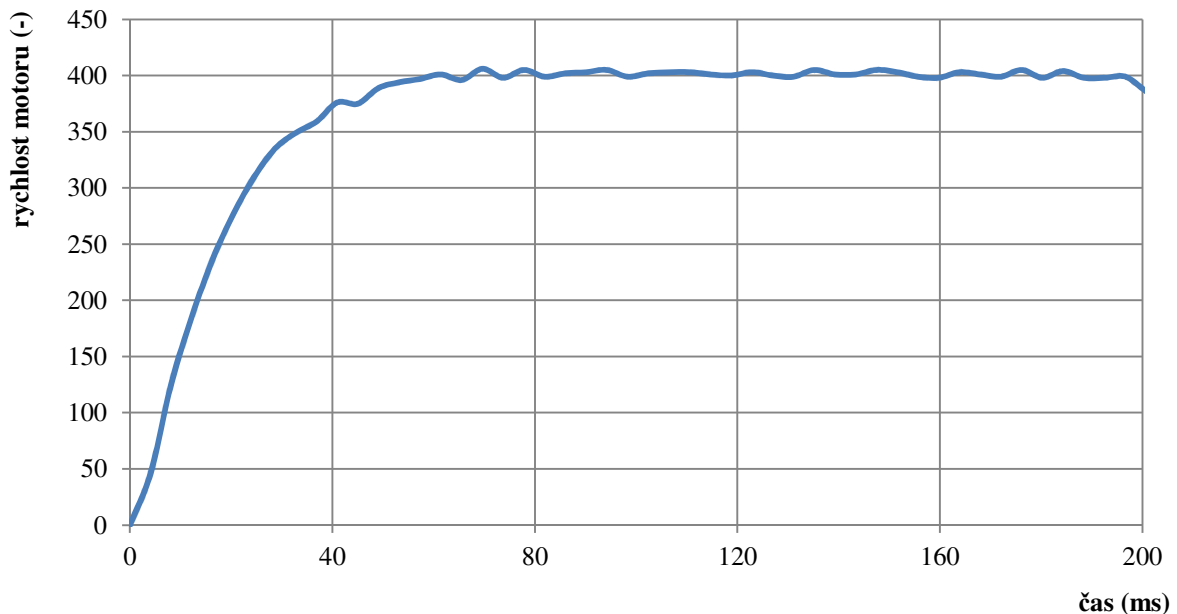
Posléze byl přenos převeden do časové oblasti a upraven do podoby umožňující výpočet akčního zásahu.

$$u[n] = P \cdot e[n] + (I \cdot T_s - P) \cdot e[n - 1] + u[n - 1] \quad (5.9)$$

$$u[n] = 3,13425 \cdot e[n] - 2,78673 \cdot e[n - 1] + u[n - 1] \quad (5.10)$$

Tento vztah je diametrálně odlišný od způsobu výpočtu akčního zásahu u experimentálně navrženého regulátoru. Při realizaci regulátoru na mikrokontroléru je ale zapotřebí pouze zaznamenávat velikost regulační odchylky a akčního zásahu z minulého cyklu.

Průběh rychlosti při požadované hodnotě 400 je na následujícím grafu.



Obrázek 22 - Odezva regulačního obvodu na skokovou změnu žádané hodnoty

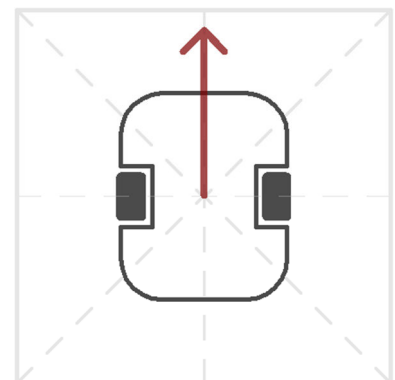
Aby mohl být takto navržený regulátor použit na robotu, musel by být celý postup zopakován pro nově odměřenou přechodovou charakteristiku motoru v situaci, kdy bude robot položen na podložce.

5.2 Algoritmy pro autonomní chování

Po dokončení obsluhy jednotlivých systémů robotu bylo možné přejít na realizaci algoritmů, které budou zajišťovat samotné autonomní chování robotu. V první řadě se bude jednat o funkce zajišťující pohyb robotu v bludišti. Poté, co je robot schopen pohybu, potřebuje zaznamenávat rozložení stěn kolem sebe a ukládat celkovou strukturu bludiště. Díky těmto informacím může svůj pohyb v bludišti určovat na základě zvoleného algoritmu.

5.2.1 Pohyb robotu

Prvním pohybem, který musí být robot schopen vykonávat, je jízda vpřed. Základem je nastavení stejné požadované rychlosti pro oba motory. Aby nedocházelo k prokluzu kol při rozjezdu v důsledku prudké změny otáček, byl realizován plynulý rozjezd spočívající v postupném zvyšování požadované rychlosti. Stejně tak



Obrázek 23 - Pohyb vpřed

je tomu i při zastavování. Jelikož je předem známo, že základní buňka bludiště měří 18×18 cm, byla rovná jízda vpřed realizována tak, aby robot mohl při požadavku z nadřazeného algoritmu zastavovat právě po ujetí celého úseku 18 cm nebo násobcích této základní délky. Během rovné jízdy dochází ke korekci pozice robotu mezi stěnami. Jestliže se vzdálenost robotu od postranní stěny bludiště příliš sníží, dojde k úpravě požadované rychlosti o hodnotu vypočtenou jednoduchým PD regulátorem. Podmínkou je, že údaj z jednoho bočního senzoru musí být menší než mezní limit a druhý zároveň vyšší, aby bylo zajištěno, že k regulaci dojde pouze při přiblížení se k jedné straně. Celá problematika je zachycena v následující části programu.

```

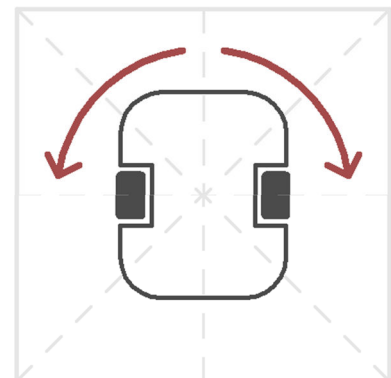
if ((sensor[1] > leftWall) && (sensor[4] < rightWall)) {
    errorP = rightWall - sensor[4];
} else if ((sensor[4] > rightWall) && (sensor[1] < leftWall)) {
    errorP = sensor[1] - leftWall;
} else {
    errorP = 0;
}

errorD = errorP - errorP_last;
errorP_last = errorP;
error = (P_w * errorP + D_w * errorD) / 10;

```

V důsledku těchto korekcí může dojít k nepřesnému měření ujeté vzdálenosti podle enkodérů, jelikož robot nemusí jet úplně rovně. Aby se zamezilo tomuto nežádoucímu jevu, byla aplikována další korekce. Ta spočívá v detekci přechodu stěna-volný prostor nebo sloupek-volný prostor pomocí bočních senzorů. Po jeho objevení se provádí úprava ujeté vzdálenosti. Hodnota, na kterou má být tento údaj korigován, byla určena při experimentálním měření. Samotný princip korekce spočívá nejprve v detekování stěny či sloupku podle překročení mezní hodnoty z bočního senzoru a následném překročení druhé mezní hodnoty při ztrátě stěny nebo sloupku.

Druhým typem pohybu robotu je jeho otáčení na místě. Můžeme ho rozdělit podle úhlu, o který se má robot otočit, tedy na otáčení vlevo nebo vpravo a na otočení robotu zpátky. Během otáčení o 90° dochází pouze k nastavení rychlostí obou kol na stejnou velikost, avšak každému je přiřazen jiný směr. Po otočení robotu o požadovaný úhel dojde k zastavení motorů. Aby při začátku pohybu nebo na jeho konci nedocházelo k prudkým změnám rychlosti, během kterých by sebou mohl robot takzvaně cuknout a vychýlit se z požadovaného směru nebo pozice, je otáčení doplněno o plynulý rozjezd a zastavení stejně jako pohyb vpřed.

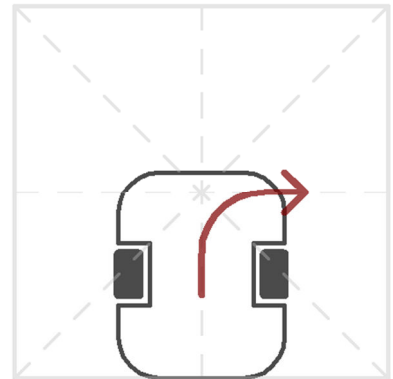


Obrázek 24 - Otočení o 90°

Otočení robotu o 180° je již trochu komplikovanější. Bylo realizováno tak, aby byl během něj robot schopný vyrovnat svou pozici na střed buňky bludiště. Před samotným otáčením se proto robot podle předních senzorů natočí kolmo proti přední stěně, pokud se zde nachází. Toho docílí změnou otáček motoru podle údajů z předních senzorů, dokud se tyto hodnoty nebudou shodovat a nebudou mít velikost odpovídající stavu, kdy je robot uprostřed buňky. Následující činnost se odvíjí od toho,

zda se kolem robotu nacházejí boční stěny. Pokud ano, robot se otočí o 90° v tom směru, kde se stěna nachází, a nastaví se k ní kolmo stejně jako v předchozím případě. Následně se opět otočí o 90° a tím svůj pohyb dokončí. Jestliže se kolem robotu vyskytnou obě boční stěny, bylo v programu zvoleno otočení vlevo. Naopak není-li zde ani jedna boční stěna, robot se přímo otočí o celých 180° .

Výše uvedené pohyby již stačí, aby mohl robot projíždět celé bludiště. Později však byly vytvořeny ještě další dva možné způsoby pohybu. Jedná se o jízdu vpravo nebo vlevo. Tím, že robot po zatočení nezastavuje, ale plynule zatočí, výrazně zrychluje svůj pohyb v bludišti. Zahájení plynulého zatáčení se primárně provádí podle údaje o ujeté vzdálenosti. Pro zamezení možných chyb, které mohou vzniknout v poloze robotu vůči stěnám bludiště, byla přidána také podmínka pro spuštění tohoto pohybu, existuje-li požadavek na zatočení a nachází-li se přední stěna v dostatečné blízkosti k robotu.



Obrázek 25 - Plynulé zatočení

5.2.2 Reprezentace bludiště a jeho ukládání

Jelikož je již robot schopen se v bludišti pohybovat, je zapotřebí, aby ho byl schopen také mapovat. K uložení informací o struktuře bludiště byla vybrána jeho reprezentace pomocí dvourozměrného pole 16×16 prvků tvořených 8bitovými proměnnými. Každý prvek pole odpovídá jedné buňce reálného bludiště. První čtyři bity s nejnižší hodnotou určují, kde se v příslušné buňce nacházejí stěny, následující bit slouží k uložení informace o tom, zda byla daná buňka robotem při mapování již navštívena. Rozložení stěn je určováno v relativních souřadnicích, jejichž názvy odpovídají anglickému označení světových stran, tedy N, S, E a W. Z tohoto důvodu je zapotřebí, aby si robot uchovával informaci o svém aktuálním směru. Pro tento účel bylo použito stejné označení, jako pro rozložení stěn. Kromě aktuálního směru si robot také ukládá údaj o své aktuální pozici v bludišti pomocí souřadnic x a y . Na základě těchto tří údajů a dat pořízených ze senzorů robotu probíhá vždy při vstupu do nové buňky uložení informací o rozložení stěn do příslušného prvku pole a také do prvků, které mají s aktuálním společnou hranu.

5.2.3 Algoritmus pro vyhledávání cesty

K určení směru, kterým se má robot pohybovat, aby se dostal na určitou pozici v bludišti, je zapotřebí určitý řídicí algoritmus. Z různých druhů, které byly popsány v teoretickém rozboru, byl vybrán algoritmus rozlévání barvy („flood fill“). Ten by měl umožňovat robotu nalézt vždy tu nejkratší cestu mezi dvěma pozicemi, případně jednu z několika nejkratších cest. Jeho použití není omezeno žádnými specifickými podmínkami na strukturu bludiště, což znamená, že by měl fungovat v libovolném typu bludiště. K realizaci byla vybrána varianta, kdy robot daný vyhledávací algoritmus využívá již od počátku i k samotnému mapování.

Jelikož během vykonávání algoritmu dochází k rozdělování číselných hodnot jednotlivým buňkám, bylo vytvořeno druhé dvourozměrné pole se stejným počtem prvků, jako má pole pro uchování informací o struktuře bludiště. Celkový počet buněk v kompletním bludišti je 256, tudíž pro rozdělování hodnot bude postačovat, aby prvky pole byly 8bitové proměnné.

Během přiřazování hodnot algoritmus provádí takzvané prohledávání do šířky. K tomuto účelu byla zvolena jako nejvhodnější dynamická struktura typu fronta, která pracuje s ukazateli. Fronta může obsahovat specifické prvky. Pro jejich reprezentaci byl vytvořen strukturovaný datový typ `element`, jehož definice je zachycena v následujícím úryvku kódu.

```
typedef struct {
    unsigned char x, y;
    void *next;
} element_t;
```

Tento datový typ tedy obsahuje proměnné pro zachycení souřadnic konkrétní buňky bludiště a ukazatel na další element fronty. Před vložením prvku do fronty je zapotřebí ho nejprve vytvořit. Během této operace dochází k alokování potřebného prostoru v paměti, výstupem je poté ukazatel na daný prvek. Ten může být následně přiřazen na konec fronty. Při mazání prvku z fronty dochází k odstranění prvku, který se nachází na jejím počátku a uvolnění daného místa v paměti.

Na začátku vyhledávacího algoritmu je pozici, na kterou se má robot přemístit, přiřazena hodnota 0 a prvek s danými souřadnicemi je vložen do fronty. Pokud se přímo nejedná o aktuální pozici robotu, dojde k přiřazení hodnot všem ostatním buňkám bludiště způsobem popsáním v teoretické části, tedy z fronty se odebere první prvek a buňkám, které s ním sousedí a prozatím nemají žádnou hodnotu, se přiřadí hodnota o 1 vyšší, než je hodnota tohoto prvku. Následně jsou podle těchto buněk vytvořeny nové prvky a vloženy do fronty. Tyto operace se provádí, dokud se fronta úplně nevyprázdí. Robot se pak pohybuje do takové sousední buňky, jejíž hodnota je nižší než hodnota buňky, ve které se aktuálně nachází.

Jakmile se robot dostane na novou pozici, dojde k uložení nově detekovaných stěn do struktury bludiště a buňkám se přiřadí nové hodnoty. Opakováním daného postupu se robot dostane až na cílovou pozici.

6 Experiment

Během tvorby mobilního robotu byla provedena řada experimentů, ať již při dimenzování motorů, výběru senzorů a zpracování jejich hodnot nebo při tvorbě jednotlivých pohybů, kdy bylo zapotřebí ladit různé konstanty určující například délku úseku, který má být ujet. Pro ověření autonomního chování mobilního robotu v bludišti a jeho celkové funkce byly navrženy tři experimenty.

6.1 Dosažení zadané pozice

První ze série experimentů byl zaměřen na otestování funkčnosti jednotlivých pohybů, mapování struktury bludiště a samotného vyhledávacího algoritmu. Princip spočíval v zadání požadované pozice robotu pomocí odeslání souřadnic a následném spuštění činnosti robotu.

Na počátku byl robot umístěn na nulovou pozici. Té odpovídá při pohledu shora na bludiště levý spodní roh. Počáteční směr robotu byl nahoru, který je v jeho reprezentaci označen písmenem N. K dosažení pozice robot využíval algoritmus rozlévání barvy. Na jeho základě volil směr jízdy. Jakmile se robot dostal na cílovou pozici, zastavil se a očekával zaslání dalších příkazů. Postupně mu byly zasílány souřadnice odpovídající jednotlivým rohům bludiště s tím, že nejprve se jednalo o roh protilehlý. Poté bylo robotu zadáno, aby se vrátil do startovní buňky a celý proces byl opakován, avšak s tím rozdílem, že nyní měl již robot většinu bludiště zmapováno a pohyboval se po kratších a přímějších cestách.

Během celého experimentu se robot choval korektně a nevykazoval žádné chyby. Občasné nepřesnosti ve směru byly v průběhu pohybu korigovány k tomu určenými funkcemi.

6.2 Průjezd bludištěm třemi způsoby

Druhý experiment byl zaměřen na porovnání tří způsobů pohybu robotu. Ve všech případech byl robot nejprve naveden do určitých buněk bludiště tak, aby zmapoval jeho potřebnou oblast. Poté měl zadánu cestu ze startovní pozice do protilehlého rohu, který byl označen jako cíl.

První pohyb se skládal z rovné jízdy a otáčení robotu na místě. Kvůli tomu docházelo vždy při změně směru k zastavení robotu, otočení a poté opět rozjezdu, což ve výsledku značně prodlužovalo dobu potřebnou k dosažení cíle. Navíc se ve funkcích pro pohyb vyskytovaly určité prodlevy a signalizace blikajícími LED, které byly využívány při ladění. Výsledný naměřený čas byl 31,61 s.

Druhý způsob průjezdu se odvíjel od stejných pohybů. Byly však odstraněny nepotřebné úseky kódu sloužící k signalizaci, které robot zpomalovaly, a celkově byla navýšena rychlost pohybu. Tak jako v předchozím případě robot zmapovaným bludištěm projel bez potíží a změřený čas byl 20,57 s.

Jako poslední byla testována varianta, u které se využívá plynulého zatáčení. V případě, kdy bylo již bludiště zmapováno, byl celý pohyb plynulý, jelikož se robot nemusel nikde zastavovat a otáčet se. Pro průjezd byla zvolena rychlost nižší než u druhého způsobu. I přesto byl naměřený čas kratší, konkrétně 17,44 s.

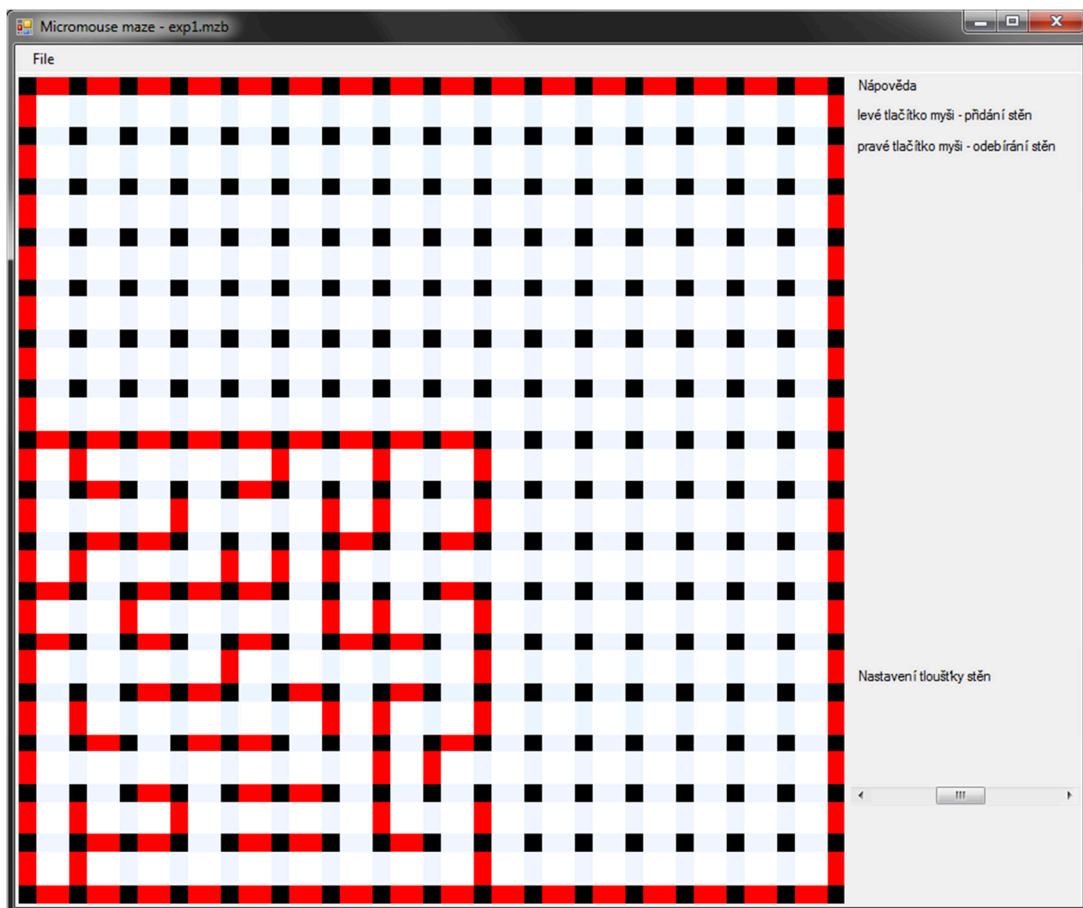
Z naměřených časů je patrné, že pro dosažení nejkratšího času při průjezdu bludištěm je výhodné využívat plynulého zatáčení, kdy robot není zpomalován zastavováním při každé změně směru jízdy.

6.3 Autonomní mapování potřebné oblasti

Poslední experiment měl za úkol otestovat doplněk vyhledávacího algoritmu, jehož účelem bylo zajistit pohyb robotu v bludišti tak dlouho, dokud nenajde nejkratší cestu mezi zvolenými pozicemi. Ty byly zvoleny stejně jako v předchozím případě, tedy počáteční pozice v levém dolním rohu a cílová v pravém horním rohu bludiště.

Doplnění algoritmu během cesty z jedné pozice na druhou zjišťovalo, zda robot během pohybu navštívil nějakou buňku, do které se doposud nedostal a kterou nemá zmapovanu. Pokud k takové situaci došlo, zaměnil po doražení na požadovanou pozici cílovou buňku za tu, která sousedí se startovní a celý algoritmus opakoval. Jakmile již při své cestě robot nevstoupil do žádné nové buňky, bylo mapování prohlášeno za kompletní a robot se vrátil na start. Ve zmapovaném úseku se pak nacházela nejkratší cesta spojující zadané pozice.

I v tomto případě robot splnil zadanou úlohu bez obtíží. Při svém pohybu využíval plynulého zatáčení. Výsledná podoba zmapovaného bludiště byla z robotu vyčtena do počítače a zobrazena v programu vytvořeném k simulaci rozložení bludiště.



Obrázek 26 - Zmapované bludiště ve vizualizačním programu

7 Závěr

V první části realizace byla navržena mechanická konstrukce pro mobilní robot určený pro pohyb v bludišti. Při návrhu bylo dbáno na základní požadavky týkající se minimální hmotnosti konstrukce i celého robotu, tudíž i maximální jednoduchost celého provedení, a uspořádání s co nejnižší položeným těžištěm, aby byl robot stabilní. Vzhledem k těmto skutečnostem byla zvolena varianta s jedním plošným spojem, který slouží také jako základní nosný díl, k němuž jsou upevněny pouze konstrukční díly nesoucí kola a motory. Prvním realizovaným dílem byla kola. Pro snížení hmotnosti byla vytištěna z ABS na 3D tiskárně a opatřena gumovými pneumatikami pro zajištění co nejvyšší přilnavosti. Aby bylo možno doplnit kola o převody, bylo zapotřebí vypočítat požadavek na tah podvozku, čili vybrat vhodné motory. K výpočtům byly využity odhadované hmotnosti jednotlivých komponent, případně reálné hodnoty již hotových součástí. Vybrány byly motory firmy Faulhaber 1717, 6V varianta opatřená kvadraturními enkodéry s 512 tiky na otočku. Během výpočtu byl také určen požadovaný převodový poměr a z rozměru motoru a kola vybrána vhodná převodová kola. Dále byl navržen a vytvořen základní konstrukční díl pro uchycení motorů a kol. Stejně jako disky je vyroben na 3D tiskárně z ABS, především kvůli odlehčení robotu. Jeho tvar i umístění na plošném spoji byly koncipovány tak, aby poloha motorů byla co nejnižší a aby mezi ně co nejbližší ose kol šly ještě umístit baterie. Díky tomu se také zajistí nízký moment setrvačnosti finálního robotu.

V druhé části byl realizován plošný spoj se všemi komponentami. Nejprve bylo nutné určit jeho rozměry, které byly zvoleny tak, aby se mohl robot bez problému pohybovat v bludišti pro něj určeném. Dalším krokem byl výběr senzorů stěn a jejich rozmístění. V této fázi bylo postupováno dle již realizovaných konstrukcí a byly voleny již otestované komponenty. Celý robot byl pak navržen tak, aby k jeho řízení postačoval jeden mikrokontrolér. Po zvážení byla pro tento účel zvolena Atmega128, byť její použití co do velikosti paměti může být částečně předimenzované. K ovládání motorů byly navrženy h-můstky skládající se pro každý motor ze dvou komplementárních dvojic MOSFET tranzistorů IRF7343 a jejich driveru MAX4427. Robot byl také doplněn o čtyři baterie typu Li-pol s kapacitou 240 mAh, které vytvořily článek 2S2P (dvě a dvě baterie spojeny paralelně a dohromady pak sériově). Tato možnost byla vybrána pro zajištění požadovaného napětí pro motory, dostatečné kapacity na pohyb v bludišti a zároveň kvůli skladnosti a vhodnému umístění na robotu.

Ze softwarového hlediska byl jako první zásadní úkol řešen získání údajů ze senzorů stěn a jejich následná linearizace a další úprava. Za tímto účelem byly naměřeny závislosti výstupního údaje ze senzoru na vzdálenosti překážky. Jako vhodný způsob linearizace se ukázal výpočet převrácené hodnoty přirozeného logaritmu s využitím kalibračního údaje. Jelikož se však jednotlivé senzory od sebe částečně liší naměřenou závislostí, byl zvolen ještě druhý přepočít přes lineární zobrazení, ke kterému se využívá již dříve zvolená kalibrační hodnota a druhá naměřená v jiné vzdálenosti. Tímto postupem jsou získány hodnoty odpovídající vzdálenosti robotu od překážek.

Druhý zásadní úkol spočíval v řízení motorů při využití zpětné vazby poskytované kvadraturními enkodéry. K tomuto účelu byl experimentálně navržen diskretní PS regulátor, jehož konstanty byly laděny na základě měření odezvy systému na jednotkový skok. Byl také vyzkoušen postup návrhu regulátoru pomocí programu Matlab, s jehož pomocí bylo rovněž dosaženo dobrých výsledků.

Poslední část softwarového řešení obnášela tvorbu algoritmů, které zajišťují samotnou autonomitu robotu. Kromě tvorby funkcí pro jednotlivé pohyby, které robot může v bludišti využívat, byl především navržen způsob, jakým může robot vhodně zaznamenávat a uchovávat informaci o struktuře bludiště. Tu následně využívá při hledání nejkratší cesty mezi dvěma pozicemi. K tomu byl zvolen pokročilý algoritmus rozlévání barvy, který využívá takzvaného prohledávání do šířky, jež je založeno na využití dynamické struktury typu fronta.

Veškeré realizované algoritmy byly laděny a prakticky otestovány v několika experimentech, ve kterých robot prokázal schopnost autonomního pohybu v bludišti.

Celý projekt skýtá řadu možností pro další práci. První z nich obnáší implementaci pohybu robotu po diagonálách, pro kterou je uzpůsoben rozměrově i uspořádáním a počtem senzorů stěn. Díky tomu by mohlo dojít k dalšímu zefektivnění pohybu robotu v podobě rychlejšího přesunu mezi buňkami.

Další rozšíření by mohlo být zaměřeno na senzorický systém robotu, který by mohl být doplněn o gyroskop, akcelerometr i magnetometr. Tyto senzory by umožnily realizovat celou řadu dalších úkolů nebo minimálně testů a pokusů. Údaje z gyroskopu by se mohly například využívat pro řízení zatáčení robotu, především ve vyšších rychlostech, kdy se v důsledku smýkání a prokluzů snižuje přesnost enkodérů. Akcelerometr i gyroskop by mohly být také využity při mapování bludiště jakožto alternativní záznam pohybu robotu. Jejich využití by pak mohlo rozšířit celou úlohu na realizaci pohybu v nerovnoměrném bludišti či terénu. Použití magnetometru by znamenalo možnost získat informaci o natočení robotu v prostoru v každé situaci, i při kolizi se stěnou nebo ručním přesunutím robotu. Ten by pak na základě průjezdu několika okolních buněk a znalosti svého natočení mohl provést prohledávání zmapovaného bludiště a na základě shody určité oblasti s nově zmapovaným úsekem přesně určit, na které pozici se nachází.

8 Seznam použité literatury

- (1) NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty*. Vyd. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 247 s. ISBN 80-7300-141-1.
- (2) *Robot revue: magazín ze světa robotiky*. Praha: RCR, 2009, roč. 1, č. 1. ISSN 1804-056X.
- (3) MATIČKA, Robert a Jaroslav TALÁČKO. *Mechanismy manipulátorů a průmyslových robotů*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1991, 269 s. ISBN 80-030-0567-1.
- (4) SIEGWART, Roland. *Introduction to autonomous mobile robots* [online]. 1. vyd. Massachusetts: MIT Press, 2004, 321 s. [cit. 2013-12-15]. ISBN 02-621-9502-X. Dostupné z: http://www.robotee.com/EBooks/Introduction_to_Autonomous_Mobile_Robots.pdf
- (5) BRÄUNL, Thomas. *Embedded robotics: mobile robot design and applications with embedded systems* [online]. 2nd ed. New York: Springer, c2006, xiii, 458 p. [cit. 2013-12-15]. ISBN 35-403-4318-0. Dostupné z: <http://www.robotee.com/Ebooks/Embedded%20Robotics.pdf>
- (6) MURPHY, Raymond. *Introduction to AI robotics* [online]. Vyd. 1. Massachusetts: MIT Press, 2002, 466 s. [cit. 2013-12-15]. ISBN 02-621-3383-0. Dostupné z: <http://www.robotee.com/EBooks/Introduction%20to%20Ai%20Robotics.pdf>
- (7) MAŘÍK, V., O. ŠTĚPÁNKOVÁ, J. LAŽANSKÝ a kol. *Umělá inteligence (1-4)*. Praha: Academia, 1993-2013, v. <1-4>. ISBN 80-200-0502-1.
- (8) YE, Luzhou. *Micromouse USA* [online]. © 2012 [cit. 2014-01-12]. Dostupné z: www.micromouseusa.com
- (9) HARRISON, Peter. *Micromouse Online* [online]. © 2010 [cit. 2014-01-12]. Dostupné z: www.micromouseonline.com
- (10) VOJÁČEK. Integrované MEMS GYROSKOPY. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. 2019 [cit. 2014-01-08]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>
- (11) VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. 2007 [cit. 2014-01-08]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- (12) VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 2. díl - Piezorezistivní. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. 2007 [cit. 2014-01-08]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007012601>
- (13) VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 3. díl - Tepelné akcelerometry MEMSIC. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. 2007 [cit. 2014-01-08]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007040901>
- (14) Notes for workshop. NG BENG KIAT. *NgBengKiatHomepage* [online]. 2009 [cit. 2014-03-21]. Dostupné z:

<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbnuZ2Jlbmdr aWF0ZG9jfGd4OjM0YzMOY2EyYThmNjI5MTc>

- (15) Technical Information. FAULHABER. *Faulhaber* [online]. 2013 [cit. 2014-03-21]. Dostupné z: <http://www.faulhaber.com/servlet/com.itmr.waw.servlet.FileViewer?dokmanid=802458&kdid=40929&spachid=1>
- (16) DC Micromotors: Series 1717. FAULHABER. *Faulhaber* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://www.faulhaber.com/uploadpk/EN_1717_SR_DFF.pdf
- (17) ATmega128 datasheet. ATMEL. *Atmel* [online]. 2011 [cit. 2014-03-29]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc2467.pdf>
- (18) DOČEKAL, Tomáš a Kristýna FRIEDRISCHKOVÁ. The obstacles sensors for mobile robot designed into the maze. In: *II. Workshop NETFEI*. 1. vyd. Ostrava: TIGRIS, 2013, s. 33-37. ISBN 978-80-248-3188-6. 978-80-248-3188-6.
- (19) MAX4426-MAX4428 datasheet. MAXIM INTEGRATED. *Maxim integrated* [online]. 2006 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX4426-MAX4428.pdf>
- (20) LFXX datasheet. STMICROELECTRONICS. *STMicroelectronics* [online]. 2014 [cit. 2014-03-31]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000546.pdf>

9 Seznam příloh

Příloha č. 1	Mobilní robot	4 strany
Příloha č. 2	Nabíjecí deska	1 strana
Příloha č. 3	Diplomy	2 strany
Příloha č. 4	Zdrojový kód (verze pro experiment 1)	příloha na CD/DVD
Příloha č. 5	Video experiment 1	příloha na CD/DVD
Příloha č. 6	Video experiment 2.1	příloha na CD/DVD
Příloha č. 7	Video experiment 2.2	příloha na CD/DVD
Příloha č. 8	Video experiment 2.3	příloha na CD/DVD
Příloha č. 9	Video experiment 3	příloha na CD/DVD
Příloha č. 10	Program pro vizualizaci bludiště	příloha na CD/DVD

Príloha č. 1

Mobilní robot

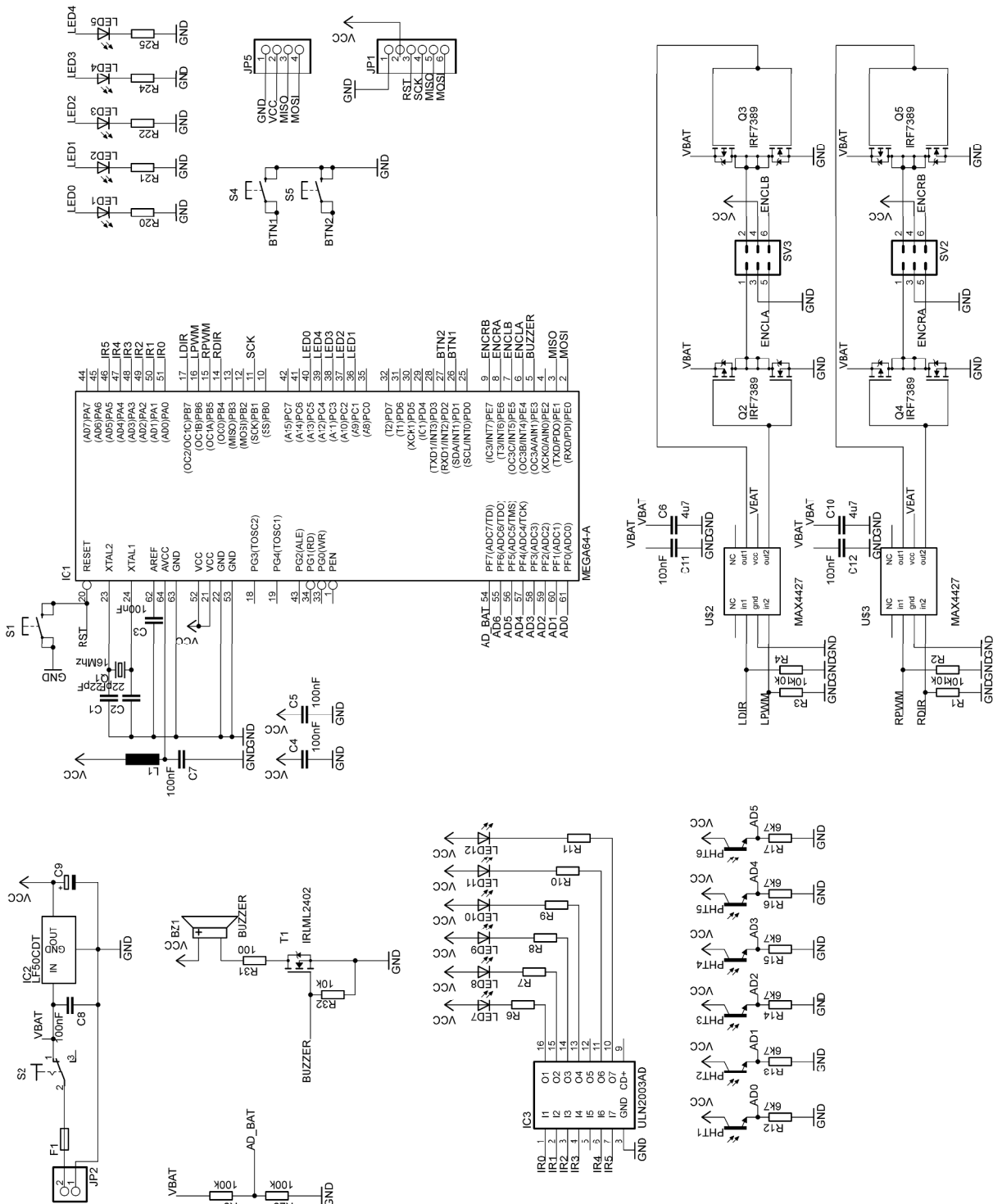
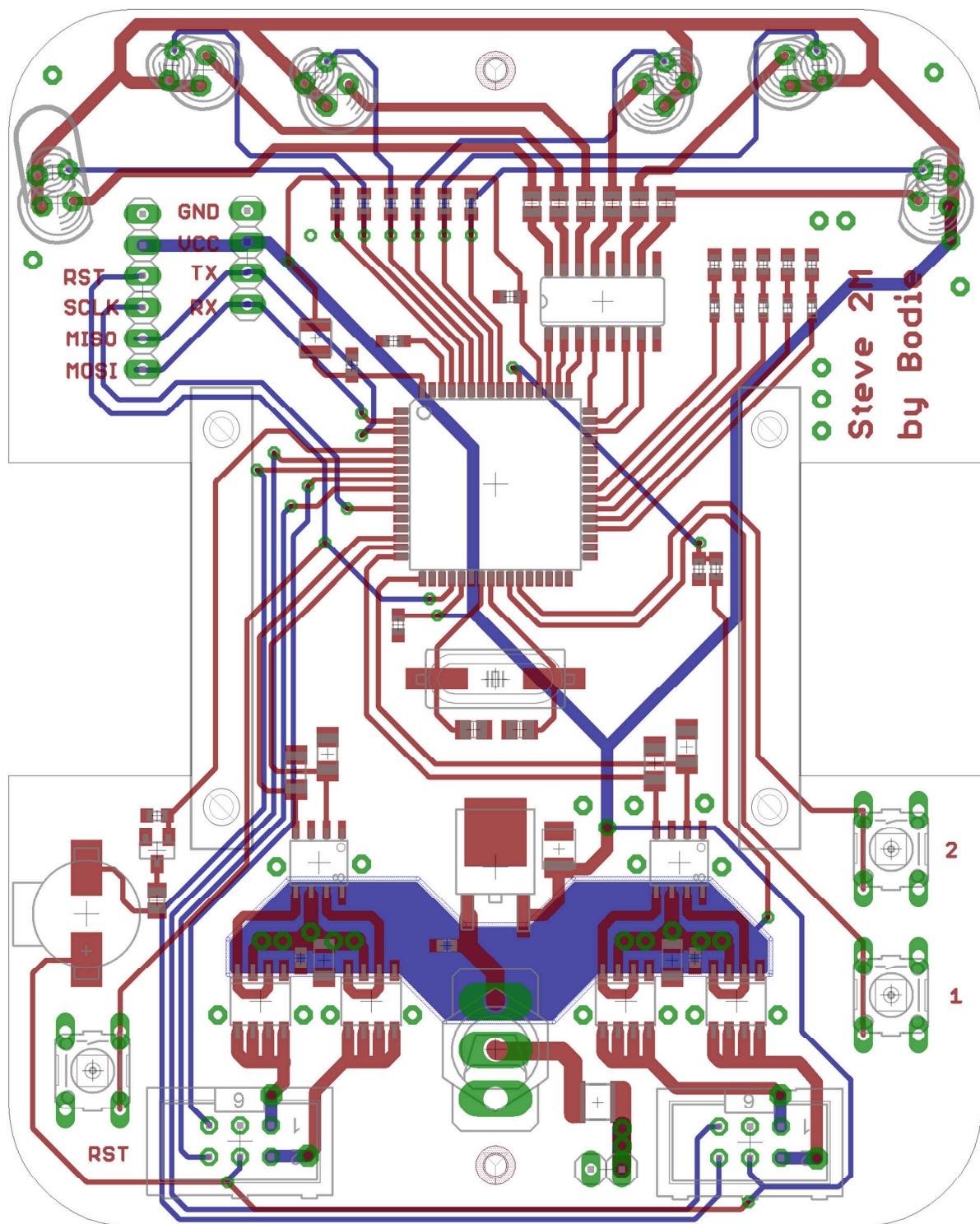


Schéma mobilného robota



Plošný spoj mobilního robota

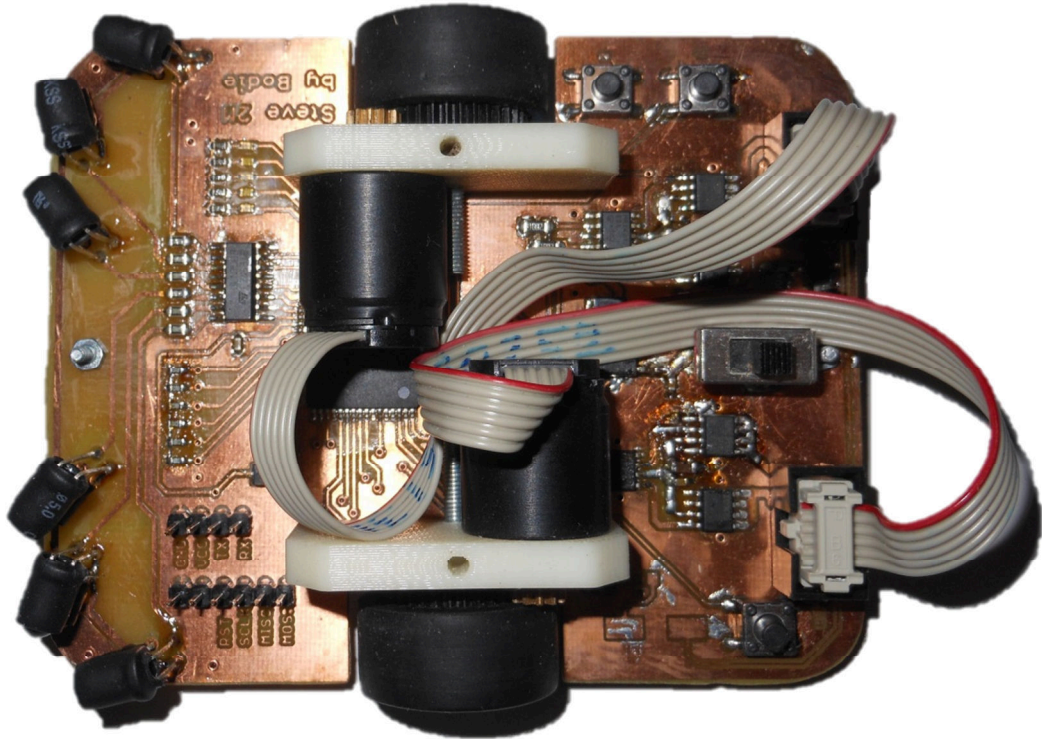


Foto mobilného robotu 1

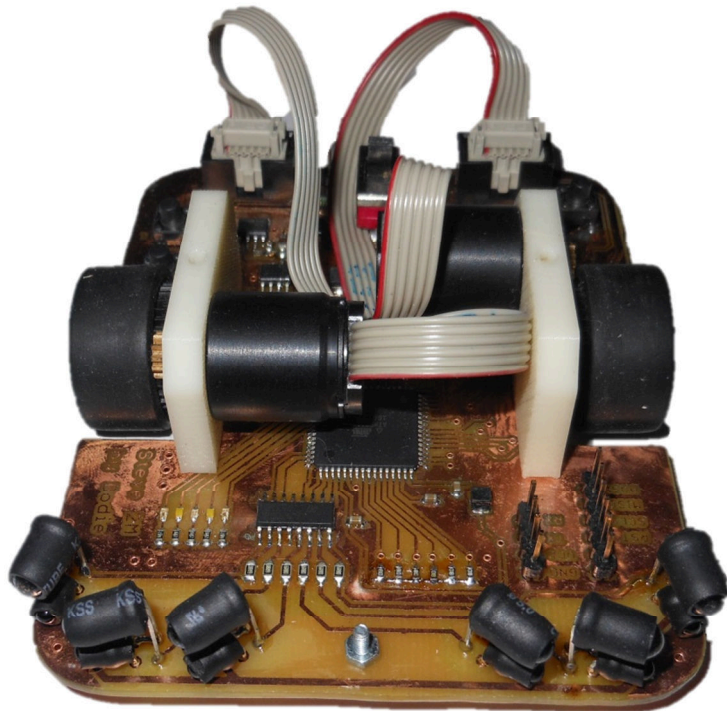


Foto mobilného robotu 2

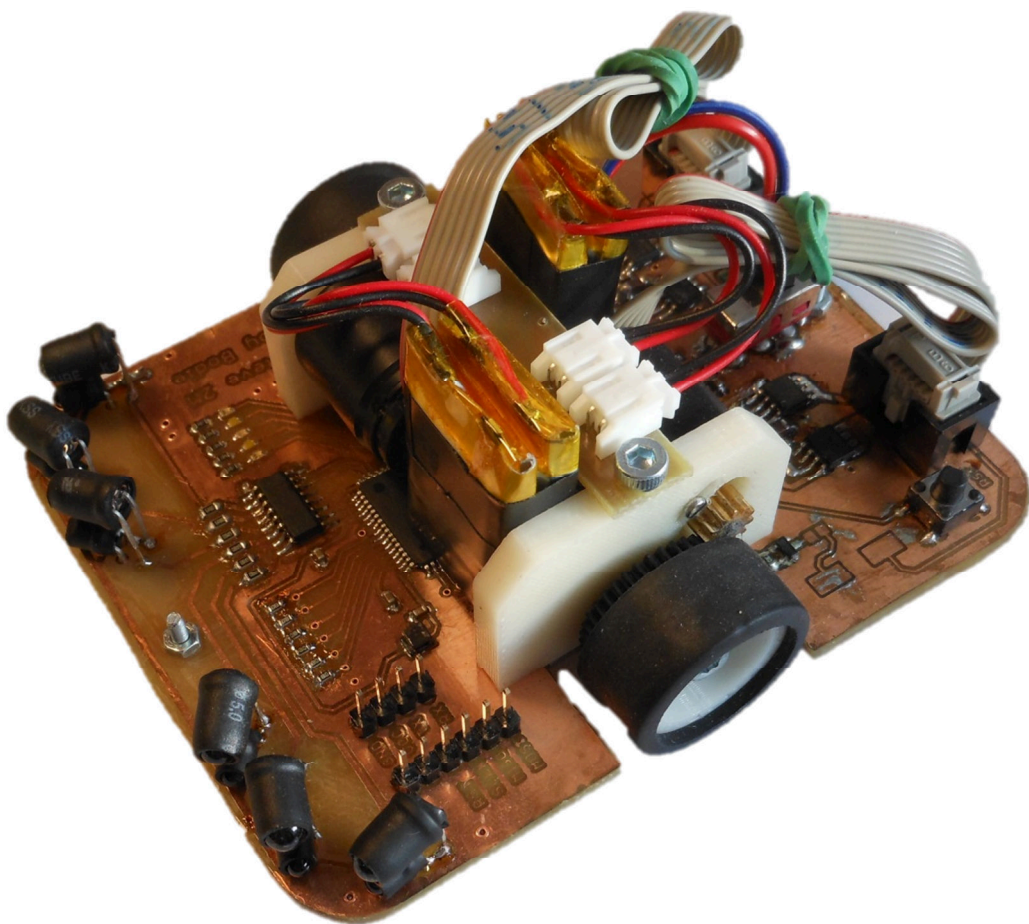


Foto mobilního robotu 3

Příloha č. 2

Nabíjecí deska

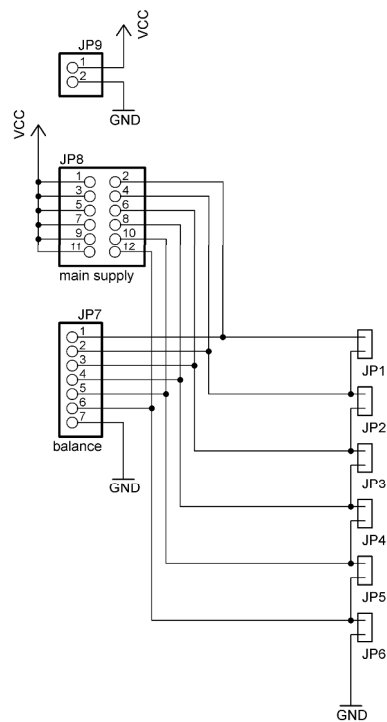
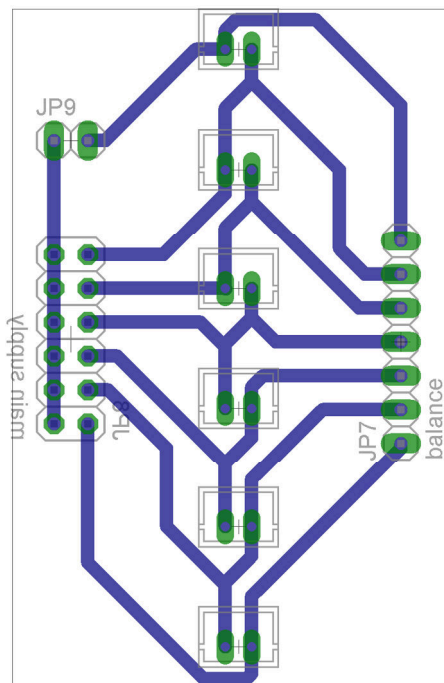


Schéma nabíjecí desky



Plošný spoj nabíjecí desky



Diplom ze soutěže Robotic Tournament 2014

ISTROBOT 2014

DIPLOM

Tomáš Dočekal

1. MIESTO

V KATEGÓRII
MYŠ V BLUDISKU
S ROBOTOM

Steve 2M

WWW.ROBOTIKA.SK

Bratislava, 26. 4. 2014

Diplom ze súťaže Istrobot 2014