



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

NÁVRH DVOUKOLOVÉHO AUTONOMNÍHO ROBOTA

A PROPOSAL FOR TWO WHEELED AUTONOMOUS ROBOT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LUKÁŠ HESS

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. DANIEL ZUTH, PH.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Hess

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh dvoukolového autonomního robota

v anglickém jazyce:

A proposal for two wheeled autonomous robot

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat funkčním modelem autonomního dvoukolového robota využívající diferenciální samobalancující podvozek. Práce bude obsahovat popis jednotlivých prvků jejich otestování a návrh konstrukce robota. Výsledkem bude funkční prototyp navrhovaného řešení. Práce je součástí řešení projektu IGA VUT Brno, FSI-S-11-31, Aplikace metod umele intelligence.

Cíle diplomové práce:

- Seznámení s problematikou tohoto typu podvozků
- Vybrat vhodnou konstrukci
- Vybrat a otestovat vhodné prvky
- Realizovat funkční prototyp

Seznam odborné literatury:

- MANN, Burkhard. C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy - linkery, práce s ATMEL AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky. Vyd. 1. Praha: BEN, 2003, 279 s. ISBN 80-730-0077-6.
- NOVÁK, Petr. Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení. Vyd. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 247 s. ISBN 80-730-0141-1.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 21.11.2012

L.S.

Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je navrhnout autonomního dvoukolového balančního robota s diferenciálním podvozkem. Tento typ robota je vhodný zejména do menších prostor, kde vynikají jeho manévrovací schopnosti. Při návrhu robota tohoto typu je nutné vzít do úvahy několik kritérií, jako jsou provozní podmínky, materiál, velikost a hmotnost robota a také zvolit vhodný hardware a senzory. Součástí práce je kromě návrhu a konstrukce hardware a šasi robota také vývoj a implementace autonomního vyvažovacího řídicího systému.

Klíčová slova

autonomní robot, inverzní kyvadlo, diferenciální řízení, PID regulátor, inerciální snímače, DC motor

ABSTRACT

The goal of this diploma thesis is a proposal of autonomous two wheeled balancing robot, differentially driven. This kind of robot is especially suitable in confined space, where it can utilize its maneuver skills. Many criteria as operational conditions, materials, size and weight of the robot, suitable hardware and sensors must to be considered, when designing the robot. Development and implementation of autonomous balancing control system is also part of the thesis.

Key words

autonomous robot, inverse pendulum, differential driving, PID regulator, inertial measurement sensor, DC motor

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh dvoukolového autonomního robota** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23.5.2013

Datum

Lukáš Hess**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HESS, Lukáš. *Návrh dvoukolového autonomního robota*. Brno 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. 102 s.. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Danielu Zuthovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce a svým blízkým a rodině, kteří mi byli oporou.

OBSAH

1 ÚVOD	15
2 ROBOTIKA	17
2.1 Robot	17
2.2 Využití robotů	17
2.3 Autonomnost	18
2.4 Operační prostředí	18
2.4.1 Pozemní a létající roboti	18
2.4.2 Vodní roboti	19
2.4.3 Roboti v extrémním prostředí	19
2.5 Konstrukce robotů	20
2.5.1 Stacionární roboti	20
2.5.2 Mobilní roboti	20
2.6 Konstrukce typu inverzní kyvadlo	21
2.6.1 Inverzní kyvadlo	21
2.6.2 Matematický model inverzního kyvadla	22
2.6.3 Autonomní stabilita dvoukolového robota	24
2.6.4 Existující dvoukoloví roboti	25
2.6.5 Výhody a nevýhody balančních robotů	26
3 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA	27
3.1 Mikropočítač	27
3.1.1 Typy instrukčních sad mikropočítače	28
3.1.2 Dělení dle architektury mikropočítače	28
3.1.3 Dělení mikropočítačů dle šířky sběrnice	28
3.2 PLC	30
3.3 PC	30
3.4 Možností řízení	30
3.4.1 Lineární	30
3.4.2 Nelineární	31
4 POHONY	33
4.1 AC motor	33
4.2 DC motor	33
4.3 DC motor s převodovkou	33
4.4 RC servo motor	33
4.5 Krokový motor	34

5 SNÍMAČE.....	35
5.1 Dělení snímačů	35
5.1.1 Dělení snímačů dle transformace signálu:	35
5.1.2 Dělení snímačů dle práce se signály:	35
5.1.3 Dělení snímačů dle vazby na měřený objekt:	35
5.1.4 Dělení snímačů dle měřené veličiny:	35
5.1.5 Dělení snímačů dle fyzikálního principu:	36
5.2 Detekce překážek	37
5.2.1 Druhy překážek	37
5.3 Měření náklonu.....	37
5.3.1 Akcelerometr.....	37
5.3.2 Inklinometr.....	39
5.3.3 Gyroskop.....	39
6 KOMUNIKACE.....	41
6.1 Drátová komunikace.....	41
6.1.1 RS-232	41
6.1.2 CAN	41
6.1.3 USB.....	41
6.1.4 I2C.....	42
6.1.5 SPI.....	42
6.2 Bezdrátová komunikace	43
6.2.1 RF.....	43
6.2.2 802.11 WiFi	43
6.2.3 ZigBee.....	43
6.2.4 Bluetooth.....	43
7 ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE	45
7.1 Typy akumulátorů	45
7.1.1 Nikl-Metal Hydridové.....	45
7.1.2 Nikl-Cadmiové.....	45
7.1.3 Olověné	45
7.1.4 Lithium-Iontové	45
7.1.5 Lithium-Polymerové	45
8 FYZICKÁ KONSTRUKCE.....	47
8.1 Materiály, velikost, hmotnost.....	47
8.2 Motory	49

8.3	Kola	50
9	NÁVRH ELEKTRONIKY	53
9.1	Napájení a rozvody napětí.....	53
9.2	Řízení motorů.....	55
9.2.1	Princip H-můstku	55
9.2.2	Realizace řízení motorů	56
9.3	Mikropočítač	57
9.3.1	Development kit FRDM-KL25Z	57
9.3.2	Mikropočítač KL25Z128VLK4.....	58
9.4	Senzory pro určení náklonu robota	59
9.4.1	Akcelerometr MMA8451Q.....	59
9.4.2	Gyroskop LPR403AL	59
9.4.3	Zapojení akcelerometru a gyroskopu.....	59
9.5	Kombinace senzorů	60
9.5.1	Komplementární filtr	60
9.5.2	Kalmanův filtr	61
9.5.3	Návrh Kalmanova filtru	61
9.5.4	Implementace filtru a výsledky.....	62
9.6	Poloha robota	63
9.6.1	Odometrie	63
9.6.2	Enkodéry	64
9.6.3	Kvadrurní dekódování	64
9.7	Detekce překážek	66
9.7.1	Optické snímače.....	66
9.7.2	Snímač vzdálenosti	66
9.7.3	Dorazové snímače	67
9.7.4	Návrh a implementace snímačů a obslužného modulu.....	68
9.8	Návrh komunikace	68
9.8.1	USB.....	68
9.8.2	ZigBee.....	68
9.8.3	Bluetooth.....	69
9.8.4	Komunikační modul	69
9.9	Výroba desek plošných spojů.....	69
9.9.1	Oživení elektronických obvodů	70
10	MATEMATICKÝ MODEL ROBOTA	71

10.1	Fyzikální veličiny	71
10.2	Lagrangeova funkce.....	72
10.3	Energie v systému.....	73
10.3.1	Kinetická energie těla robota	73
10.3.2	Kinetická energie kol robota	73
10.3.3	Celková potenciální energie systému.....	74
10.3.4	Celková ztrátová energie systému.....	74
10.4	Lagrangeovy rovnice systému	74
10.5	Linearizace rovnic dynamiky	75
10.6	Parametry robota.....	75
11	ŘÍZENÍ ROBOTA	77
11.1	Zpracování signálů ze snímačů.....	77
11.1.1	Zpracování enkodérů.....	77
11.1.2	Zpracování snímání náklonu	78
11.2	Řídicí algoritmus	78
11.2.1	Řízení balancování.....	78
11.2.2	Řízení jízdy	79
11.2.3	Řízení brzdění	79
11.2.4	Řízení otáčení.....	80
12	VYHODNOCENÍ.....	81
12.1	Kalibrace a filtrace senzorů	81
12.1.1	Vibrace	81
12.1.2	Návrh řešení vibrací	83
12.1.3	Diskuze výsledků řešení vibrací	84
12.2	Nastavení PID regulátorů	85
12.2.1	Vyhodnocení balancování.....	85
12.2.2	Vyhodnocení balancování při skokové změně poruchové veličiny.....	88
12.2.3	Vyhodnocení jízdy	89
12.2.4	Vyhodnocení otáčení.....	90
12.3	Možnosti využití robota.....	90
	ZÁVĚR	93
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	95
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	101
	SEZNAM PŘÍLOH.....	102

1 ÚVOD

Rozvoj robotiky, kybernetických systémů a informatiky v druhé polovině 20. století umožnil lidstvu vytvářet roboty a robotické systémy, využitelné v rozličných sférách lidské činnosti. Důvody nasazení robotů a manipulátorů nejen v průmyslu jsou technické (zlepšení kvality výroby, pružnost výroby), ekonomické (zvýšení výrobní kapacity, úspora pracovních míst), i sociální povahy (uvolnění člověka z těžké a monotónní práce, ze zdraví škodlivého prostředí atd.).

Tato práce se zabývá návrhem modelu autonomního dvoukolového robota s diferenciálním podvozkem a funkční realizací modelu s využitím levných a běžně dostupných součástí. Mnou navrhovaný robot bude disponovat bezdrátovou technologií pro komunikaci s dalším systémem (PC nebo další robot) a díky této vlastnosti lze na tomto modelu demonstrovat využití složitých algoritmů, které mohou být zpracovávány v nadřazeném systému.

Dvoukoloví mobilní roboti představují zajímavou odnož klasických tří a více kolových robotů. Tento typ robota se skládá ze dvou kol a těla, s těžištěm nad osou kol. Principiálně se jedná o systém typu inverzní kyvadlo. Nezávisle řízená kola poskytují robotu 3 stupně volnosti – vodorovný pohyb, kolmý na osu kol, otáčení robota kolem svislé osy a naklápění kolem osy kol.

Důvod, proč jsem si vybral k realizaci právě model dvoukolového robota, je obecná nestabilita tohoto systému, který lze pomocí zpětnovazebního regulačního obvodu udržet v mechanicky rovnovážném stavu. Návrh a realizace modelu tak vyžaduje aplikaci znalostí a metod z oborů mechatroniky, senzoriky, elektrotechniky, automatizace, informatiky a umělé inteligence. Představuje tak pro studenta možnost využít v praxi teoretické znalosti získané při studiu a lze jej dále využít jako výukový model pro aplikaci různých řídicích algoritmů a algoritmů umělé inteligence.

Teoretická část práce se zabývá rešerší dostupné literatury a popisem prvků, jež lze využít při realizaci robota. V praktické části jsou vybrány vhodné prvky a otestovány, popsána mechanická konstrukce a navržen a vyhodnocen řídicí algoritmus robota. Práce se dále bude zabývat podrobnou analýzou problémů při konstrukci a návrhem pro jejich eliminaci.

2 ROBOTIKA

Robotika je speciální vědní disciplína, jejímž předmětem zájmu je studium vlastností a možností robotů a manipulátorů. Dělíme ji na Teoretickou robotiku a Technickou robotiku[1]:

- Teoretická robotika se zabývá základními problémy funkce robotů, studiem jejich možností a laboratorními experimenty s nimi.
- Technická robotika se zaměřuje na konkrétní problémy vývoje a konstrukce robotů a jejich aplikací v různých oblastech.

Robotika svým charakterem zapadá do kybernetiky, a proto je možné se na roboty dívat jako na kybernetický systém. Kybernetický přístup se soustřeďuje hlavně na ty aspekty, které souvisejí s pojmy: informace, rozhodování, zpětná vazba. Poznamenejme, že právě přítomností fyzikálních vlivů na prostředí se roboty odlišují od čistě informačních systémů, jako jsou např. počítače[1].

V hrubém přiblížení se robot jako kybernetický systém skládá ze 3 podsystémů[1]:

- Senzorický systém zajišťuje příjem informace z prostředí.
- Motorický systém aktivně na prostředí působí.
- Kognitivní systém je vlastně řídicí systém robota, kde probíhá veškerá poznávací, rozhodovací a řídicí činnost vyšší úrovně.

2.1 Robot

Robot, je v robotice mechanický stroj, navržený pro nahrazení nejrůznějších činností provozovaných lidmi. Robot reaguje na povely nebo dle naprogramovaného chování.

2.2 Využití robotů

Využití robotů a robotiky neustále roste a expanduje do téměř všech odvětví. Moderní roboti jsou schopni provádět obrovské množství různých činností, v porovnání s roboty v minulosti. Vývoj technologií umožnil robotům expandovat z průmyslu do lékařství, bezpečnostních složek, logistiky, domácí péče, vesmíru i armády [2].

Roboti jsou schopní pracovat bez únavy v prostředích, které jsou pro člověka příliš nebezpečné, obtížné nebo repetitivní. To umožnilo odsun lidské pracovní síly na kreativnější pozice, jako je programování robotů a jejich činnosti. Roboti v lékařství jsou pak používáni pro složité a mechanicky velmi jemné operace, např. operace srdce či mozku. Ve farmaceutickém průmyslu jsou často využíváni pro testování kvality léků [2].

V budoucnosti předpokládáme další expanzi robotů do domácností, kde by roboti zastávali kombinované funkce péče o domácnost a nemohoucí nebo starší občany.

Průmysl je však stále nejvýznamnější odvětví z hlediska využití robotiky. Průmysloví roboti jsou obvykle stacionární, s jedním ramenem, které vykonává různé funkce, jmenovitě [2]:

- Montáž a dokončování.
- Přesun materiálů/objektů.
- Práce v rizikových prostředích.

Nejvyužívanější činnost průmyslového robota je svařování, které provozuje až 1/4 všech robotů světa.

2.3 Autonomnost

Autonomní robot je schopen plnit požadované úkoly v neznámém prostředí samostatně. Mnoho robotů dosahuje určitého stupně autonomnosti v daném prostředí a pro daný typ úkolu, pro který je určen [3].

Aby byl robot plně autonomní, musí splňovat tyto podmínky [3]:

- Získat informace o svém prostředí.
- Fungovat po delší dobu bez zásahu člověka.
- Dokázat přesunout sebe nebo svou část bez asistence v prostředí, ve kterém se vyskytuje.
- Vyhnout se situacím, které jsou škodlivé pro lidi, majetek nebo robota samotného, jestliže to není jeden z naprogramovaných cílů robota.

Mezi další možné schopnosti autonomního robota patří např. adaptace na změny v operačním prostředí nebo získání a osvojení nových dovedností a schopností, případně úprava a vylepšení strategie pro plnění zadaného úkolu. Autonomní robot může stále být opravován a udržován jako ostatní stroje.

2.4 Operační prostředí

Při návrhu autonomního robota musíme uvažovat také prostředí, ve kterém se robot bude pohybovat a za jakým účelem.

2.4.1 Pozemní a létající roboti

Venkovní prostředí skýtá pro pozemní a létající roboty velmi rozmanité podmínky, kterým musí čelit. Nízké a vysoké teploty mohou negativně ovlivňovat funkci elektroniky a senzorických systémů, výdrž akumulátoru a výkonnost motorů. V nepříznivých případech (teploty vyšší než 40°C, vysoká nadmořská výška) může dojít k poškození elektroniky nebo spálení vinutí motorů, které se nedokážou navrženým způsobem uchládit. Velmi nízké teploty obecně znamenají menší riziko než vysoké, ale mráz může zvýšit křehkost konstrukce, zhoršit tlumení kol a tím zvýšit množství přenášených vibrací.

Pokud plánujeme navrhovat robota pro celoroční venkovní provoz, musíme vybírat odpovídající komponenty a před nákupem zkontrolovat jejich provozní podmínky.

Dalším nepřítelem venkovních robotů je vzdušná vlhkost, případně déšť. Robot v takovém případě může ztrácet trakci, při vniknutí vlhkosti do elektroniky hrozí elektrický zkrat a také tělo robota musí být proti vlhkosti přizpůsobeno (deštníkový štít, izolace, vlhku odolné nátěry, proti-korozní úpravy). Neméně důležitý je také povrch, po kterém se robot pohybuje. Velké nerovnosti mohou být pro malé roboty nepřekonatelné, velký robot pak může mít problém kvůli své hmotnosti a rozměrům při průjezdu např. pískem, sněhem nebo oblastí s bujnou vegetací.

Se vzrůstajícími rozměry robota také obvykle roste plocha povrchu jeho těla, což může být při větrném a rychle se měnícím počasí například pro dvoukolového robota poruchová veličina, kterou regulátor nemusí být schopen uregulovat. Pro létající roboty pak nárazy větru mohou znamenat úplnou ztrátu ovladatelnosti, která může vyústit v kolizi s okolními statickými či dynamickými objekty. Při návrhu autonomního létajícího robota bychom měli také uvažovat schopnost zotavení robota po náhodné nedestruktivní kolizi a jeho autonomní uvedení do provozuschopného stavu.

Vnitřní prostředí obecně robotům vyhovuje více. Jejich konstrukce nemusí být tak robustní a odolná živelným nástrahám. Pohybuje-li se robot v neprůmyslovém prostředí, nemusí se zpravidla obávat vlhkosti (stačí základní opatření – natření elektronických součástí voděodolným lakem zvyšujícím izolační napětí) a prachu. Také teploty jsou často v mezích udržované termostaty a klimatizačními jednotkami. Terén je zpravidla mnohem hladší, není tedy nutné odpružit závěsy kol a zabránit tak přenosu vibrací, avšak je třeba klást větší důraz na trakci robota a zabránit prokluzu kol.

V případě létajících robotů je pak třeba dávat pozor zejména na překážky a stísněný vnitřní prostor budov, takový robot musí mít obzvlášť spolehlivé senzorické sítě na detekci překážek a navigaci v malém prostoru.

Předchozí odstavce se týkají zejména pozemních a létajících mobilních robotů. V případě robotů pracujících na nebo pod vodní hladinou pak čelí roboti mnohem náročnějším výzvám.

2.4.2 Vodní roboti

Na rozdíl od pozemních a létajících mobilních robotů, je množství vyráběných podvodních robotů mnohem méně. Vodní roboty můžeme rozdělit na [4]:

- Robotické lodě.
- Plavající roboty a ponorky.
- Podvodní plazící se roboty.

Nejdůležitějším aspektem při konstrukci podvodního robota je zabránění přístupu vody a vlhkosti k elektronickým součástkám a vedení elektrické energie robota. Mezi možnosti patří například uzavření elektroniky a všech obvodů do vzduchotěsného pouzdra, zalití elektronických obvodů nevodivým olejem, který brání vniku vody nebo zalepení všech elektronických součástí tavným lepidlem, které zabráni přístupu vody nebo jiné vodivé tekutiny. Mezi další překážky při návrhu tohoto typu robota, je tlak vodního sloupce ve větších hloubkách, který vyžaduje velmi odolnou konstrukci a utěsnění [4].

2.4.3 Roboti v extrémním prostředí

Robotické podmořské ponorky a stroje jsou využívány v ropném průmyslu již téměř 30 let. Jsou schopny se ponořit a operovat v hlubinách, ve kterých by člověk přímo zasahovat nemohl. Používají se například k utěsnění otvorů, kterými uniká ropa z mořského dna. Podmořští roboti však nejsou jediným typem robotů, který se využívá v extrémních podmínkách [5].

V průmyslu se využívají roboti při práci v hořlavém a výbušném prostředí, proti kterému jsou do velké míry odolní. Často se jedná o utěsněné jednotky s rameny, natlakovanými vzduchem, jež brání vniku korozivních a těkavých rozpouštědel s motory chráněnými dle mezinárodních standardů, vytvořenými IEC TC (Technical Committee 31: Equipment for explosive atmospheres) [5].

Také operace ve vesmíru jsou velmi rizikové pro lidské posádky. Udržovat provozuschopné roboty ve vesmíru však má také svá úskalí. Maziva, běžně používaná na Zemi nemohou být použita v prostředí bez atmosféry. Běžně také v kosmu dochází k prudkým změnám teplot, v závislosti na tom, zda je robot na slunci nebo ve stínu. Velmi nízká gravitace naopak umožňuje vývoj speciálních robotů, jejichž konstrukce by na Zemi neunesla svou vlastní váhu [6].

Zanedbání některých bezpečnostních opatření pro provoz ve venkovních prostorech může u robotů mít za následek předčasné selhání, časté a nákladné opravy, potenciální ztrátu funkčnosti a produktivity při komerčním použití [6].

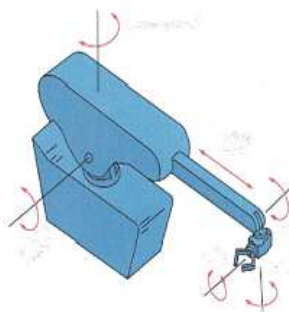
2.5 Konstrukce robotů

Roboty můžeme dělit dle pohyblivosti na stacionární a mobilní.

2.5.1 Stacionární roboti

Stacionární robot (viz obr. 1) v průmyslu a výrobě je nejčastěji tvořen základnou s fixní pozicí a ramenem, spojenými kloubem se základnou.

U stacionárních robotů je důležitý pojem *stupeň volnosti* (DOF – degrees of freedom). Stupeň volnosti se využívá k popisu svobody pohybu robota ve tří-dimenzionálním prostoru- konkrétněji schopnosti pohybu vpřed, vzad, nahoru, dolů, vlevo a vpravo [1].



Obr. 1 Stacionární robot [1].

Pro srovnání, lidská ruka (bez prstů) má 7 stupňů volnosti – 3 v rameni, jeden stupeň pro ohyb lokte, jeden pro rotaci zápěstí a dva stupně pro pohyb v zápěstí nahoru, dolů, vpravo a vlevo [1].

Stacionární roboty dělíme do několika základních kategorií, dle typu kinematické konstrukce, na [1]:

- Kartézská struktura (pravoúhlá) – tři lineární osy.
- Cylindrická struktura (válcová) – dvě lineární a jedna rotační osa.
- Sférická (kulová) – jedna lineární a dvě rotační osy.
- Angulární (úhlová) – tři rotační osy.
- Jiné (SCARA, Paralelní roboti).

2.5.2 Mobilní roboti

Mobilní roboty dělíme do dvou základních skupin, na evolventní a neevolventní. Do neevolventních pak řadíme roboty kráčející, plazivé, šplhající a létající. Do umělých evolventních pak kolové, pásové a hybridní podvozky. Dále můžeme roboty třídit dle typu jejich podvozku[7]:

- Diferenciální podvozek – dvě hnaná kola, rovnováha udržována balančním mechanismem (inverzní kyvadlo), opěrnými body nebo pasivním kolem (koly) či třecími ploškami – tento typ bude i součástí této diplomové práce, a proto mu bude věnována větší pozornost v dalším textu.

- Synchronní podvozek – často 3 kola, každé se 2 stupni volnosti (může se otáčet i natáčet), nezávislé řízení rychlosti i směru, velmi dobrá manévrovatelnou.
- Trojkolový podvozek s řízeným předním kolem – 2 hnaná kola a jedno motoricky natáčené.
- Ackermanův podvozek – 4 kola, z toho 2 pevná a 2 natáčená kola (každé mírně jinak - vnitřní více a vnější méně - protože každé při zatáčení opisuje jinou dráhu); tyto podvozky mají běžné automobily.
- Trojúhelníkový podvozek s třemi nezávisle poháněnými koly, jejichž osy procházejí těžištěm a jejichž povrch (složený obvykle z malých koleček) umožňuje volný skluz ve směru osy.
- Podvozky se všesměrovými koly- pohyb libovolným směrem, bez předchozího otočení platformy, nepoužitelná odometrie.
- Pásové podvozky – prokluz pásů při točení, vyšší energetická náročnost, dobré použití v terénu.
- Krácející podvozky – cílem větší průchodnost terénu než u pásových podvozků, stupeň volnosti odvozený z počtu končetin.

2.6 Konstrukce typu inverzní kyvadlo

V této práci se dále budu věnovat zmenšenému modelu mobilnímu typu robota, s diferenciálním dvoukolovým podvozkem, bez opěrných bodů a s autonomním provozem.

Tento typ konstrukce robota jsem si vybral jak pro jeho výborné manévrovací schopnosti, umožňující pohyb a otáčení robota na malém prostoru, tak pro přirozenou nestabilitu tohoto systému, umožňující aplikaci a otestování algoritmů teorie automatického řízení s využitím senzorů pro inerciální navigaci a práci s nimi.

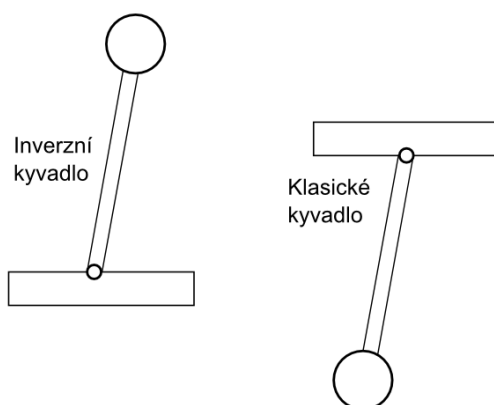
Konstrukce robota je na principu *inverzního kyvadla*, které bude dále popsáno v následující kapitole. Zmenšený model pak poslouží pro hlubší studium problematiky a ozkoušení různých možností jeho dalšího využití.

Navrhovaný robot se bude pohybovat výhradně ve vnitřních, chemicky stálých a neagresivních prostorách s možností operace ve venkovních prostorech při dodržení provozních podmínek, které budou po ozkoušení robota stanoveny.

Robot představuje zajímavý problém z hlediska studia návrhu konstrukce, řízení a umělé inteligence obsluhující robota. V dalších kapitolách teoretické části se tedy zaměřím na jednotlivé součásti a aspekty, které ovlivňují funkčnost robota.

2.6.1 Inverzní kyvadlo

Systém s inverzním kyvadlem je populární demonstrace využití řízení s pomocí zpětné vazby pro stabilizaci nestabilního systému s otevřenou smyčkou. První řešení systému je popsáno J. K. Robergem v roce 1960 a tento systém byl poté často v mnoha publikacích a článcích uváděn jako příklad nestabilního systému [8].



Obr. 2 Kyvadlo.

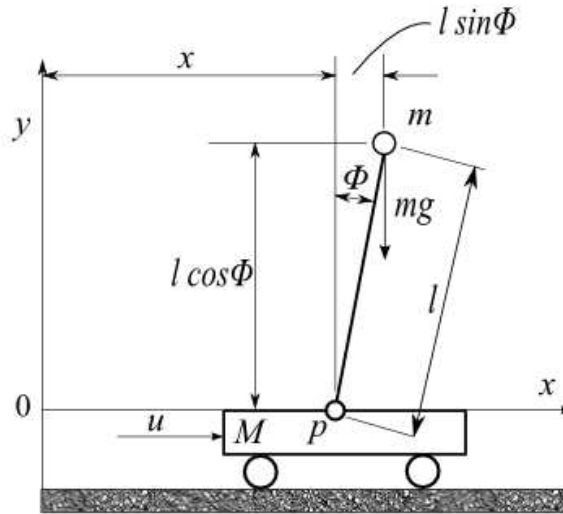
Balancování inverzního kyvadla tedy znamená udržet rameno kyvadla ve stavu rovnováhy ve vertikální poloze nad rovinou. Aby se inverzní kyvadlo udrželo ve stabilní poloze, je potřeba, aby řídicí systém, který kyvadlo stabilizuje, ovládal pohyb základny kyvadla.

2.6.2 Matematický model inverzního kyvadla

Fyzikální veličiny použité při popisu modelu inverzního kyvadla (viz obr. 3) jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Fyzikální veličiny kyvadla.

Označení veličiny/fce	Jednotka	Popis
L	-	Lagrangeova funkce
E_K	[J]	Kinetická energie
E_P	[J]	Potenciální energie
l	[m]	Délka kyvadla
m	[kg]	Hmotnost kyvadla
Φ	[°]	Úhel kyvadla
$\dot{\Phi}$	[°/s]	Úhlová rychlost kyvadla
$\ddot{\Phi}$	[°/s ²]	Úhlové zrychlení kyvadla



Obr. 3 Inverzní kyvadlo na vozíku.

Při modelování inverzního kyvadla využijeme Lagrangeovy funkce, která v sobě zahrnuje popis dynamiky systému a v klasické mechanice je definován jako [9]:

$$L = E_k - E_p \quad (1)[9]$$

Pohybovou rovnici pak můžeme derivovat pomocí substituce s využitím Eulerovy-Lagrangeovy rovnice jako:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\Phi}} \right) = \frac{\partial L}{\partial \Phi} \quad (2)[9]$$

Když kyvadlo z obr. 2 převedeme do počátku souřadného systému, můžeme psát:

$$x = L \sin \theta \quad \Rightarrow \quad \dot{x} = L \cos(\theta) \dot{\theta} \quad (3)[9]$$

$$y = L \cos \theta \quad \Rightarrow \quad \dot{y} = -L \sin(\theta) \dot{\theta} \quad (4)[9]$$

Rychlost je vektor reprezentující změnu polohy v čase, zapíšeme jako:

$$v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 = L^2 \dot{\theta}^2 (\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta)) = L^2 \dot{\theta}^2 \quad (5)[9]$$

Substitucí do Lagrangeovy funkce a dosazením za potenciální a kinetickou energii, získáme:

$$L = \frac{1}{2} m v^2 - m g y \quad (6)[9]$$

$$L = \frac{1}{2} m L^2 \dot{\theta}^2 - m g L \cos(\theta) \quad (7)[9]$$

Vyjdeme z rovnice (2) a dosadíme za obě strany rovnice a vypočteme $\ddot{\theta}$:

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 + m g L \sin(\theta) = m g L \sin(\theta) \quad (8)[9]$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = m g L^2 \dot{\theta}^2 - 0 = m L^2 \dot{\theta} \quad (9)[9]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = m L^2 \ddot{\theta} \quad (10)[9]$$

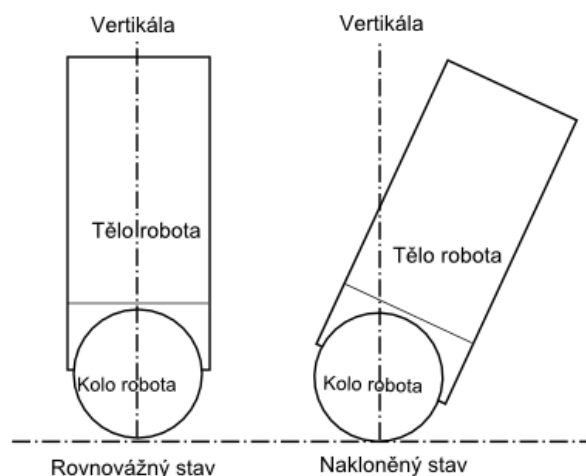
Rovnice (9) a (10) dosadíme do (2) a získáme:

$$mL^2\ddot{\theta} = mgL \sin(\theta) \Rightarrow \ddot{\theta} = \frac{g}{L} \sin(\theta) \quad (11)[9]$$

Rovnice (11) nám udává úhlové zrychlení vyvolané gravitační silou na kyvadlo.

2.6.3 Autonomní stabilita dvoukolového robota

Dvoukolový robot se nejčastěji skládá z dlouhého těla se dvěma koly na jednom konci (viz obr. 4). Pro zjednodušení regulace balancování uvažujeme, že se robot pohybuje pouze v jedné ose a kola robota se tudíž považují za jeden prvek. Balancování robota bez zásahu člověka se nazývá autonomní stabilita.



Obr. 4 Obecný tvar dvoukolového robota.

S využitím matematického popisu problému inverzního kyvadla pak lze navrhnout autonomní řídicí systém, který reaguje na senzory robota v co nejkratším čase, nutném pro zabránění pádu robota [10].

Jako vstup do regulátoru je pak nejčastěji odchylka od 90°, které svírá tělo robota s rovinou v ustáleném stavu a výstupem regulátoru je akční zásah, který ovládá pohyb robota v dané ose.

Pro zlepšení modelování dvoukolového robota je nutný zejména dobrý původní návrh. Řízení a modelování nám pak usnadní zejména tyto předpoklady [10]:

- Kola robotu při pohybu neprokluzují a jsou vždy v kontaktu s podlahou.
- Elektrické a mechanické ztráty mohou být aproximovány k nule.
- Elektronický systém reaguje výrazně rychleji než mechanický, můžeme tedy zanedbat dynamiku elektrického systému.
- Tělo robota je dokonale pevné a nepružné.
- Náklon těla robota od vertikály je dostatečně malý $\sin(\Phi) \approx \Phi$, takže můžeme systém linearizovat v rovnovážném bodě.
- Úhlová rychlost náklonu robota je dostatečně nízká $\dot{\Phi}^2 \approx 0$, abychom mohli zanedbat dostředivou sílu vznikající při rotačním pohybu.

2.6.4 Existující dvukoloví roboti

- První dvukolový balanční robot na světě byl vyvinut roku 1986 profesorem Kazuo Yamafujim (Obr. 8). Od té doby bylo vyvinuto mnoho konceptů těchto robotů. Mezi nejznámější již vyrobené dvukolové balanční roboty patří zejména Segway, nBot a Emiew 2.
- **Segway PT** (Personal Transporter) kombinuje dvukolového balančního robota s ekologickým dopravním prostředkem pro jednu osobu a přiměřený náklad (viz obr. 5). Slouží primárně jako náhrada chůze, přičemž dosahuje rychlosti až 21 km/h. Balancování podvozku za cestujícího řeší mikroprocesor v kombinaci s pěti gyroskopy, jež vyhodnocuje polohu robota 100x za sekundu a výkonnými (1 HP) servomotory udržuje Segway v rovnováze. Elektrickou energii zajišťuje Li-Ion akumulátor, který umožňuje dojezd městskému typu 29 km respektive 40 km v případě terénní verze [11].



Obr. 5 Segway –
městská verze [11].

- **nBot** – robot vyvíjený od roku 2002 David P. Andersonem byl oceněn roku 2003 organizací NASA jako Cool Robot of the Week. Tento robot, schopný jezdit v terénu a dokonce i ze schodů získává informace o náklonu kombinací gyroskopu a akcelerometru, jejichž sloučením získává poměrně přesné údaje [12]. Robot je poháněn dvěma stejnosměrnými motory s převodovkou a napájen 18ti 1800 mAh AA bateriemi. Robot byl dále doplňován o senzory detekující překážky, odometrii a další vylepšení [12].



Obr. 6 Balanční robot nBot [12].

- **Emiew 2** je robot druhé generace (viz obr. 7), vytvořený firmou Hitachi jako servisní robot do domácností, schopný komunikovat s lidmi a reagovat na povely díky 14 integrovaným mikrofonom. Díky svým rozměrům 800x300x250 mm a hmotnosti 14 kg, má ideální proporce pro pohyb v obytných zástavbách. Jeho maximální rychlost činí 6 km/h, čímž emuluje rychlost chůze člověka a zároveň si zachovává vysokou stabilitu i v prostředí s nerovným povrchem, prahy, kabely apod. Dynamické mapování terénu a pokročilý pathfinding umožňuje Emiew 2 dosažení nastaveného cíle a vyhýbání se statickým i dynamickým překážkám [13].



Obr. 7 Emiew 2 [13].

2.6.5 Výhody a nevýhody balančních robotů

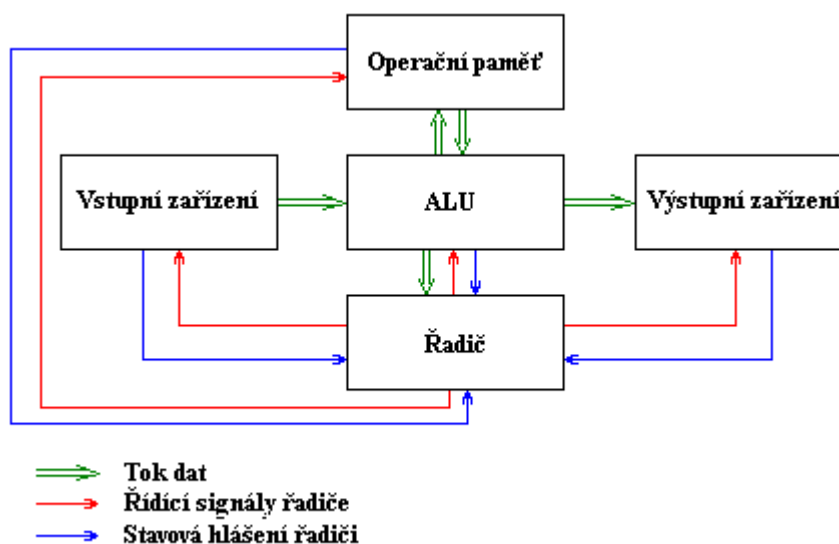
- Výhody dvoukolových balančních robotů s paralelně umístěnými koly je jejich schopnost otáčet se kolem své osy a tudíž s nulovým poloměrem otáčení. To jim umožňuje pohyb ve stísněných prostorech. Použití dvou kol pak umožňuje jednodušší konstrukci, menší rozměry a nižší hmotnost, což se příznivě projeví na výdrži baterie, výkonu robota a nákladech na konstrukci.
- Nevýhodou dvoukolových balančních robotů je jejich přirozená nestabilita, robot se musí pohybovat, aby zůstal v rovnováze, což může způsobovat problémy v terénu, který neposkytuje dostatečnou volnost k manévrování nebo obsahuje překážky, jako jsou vyvýšeniny, útesy, povrch s malou přilnavostí nebo dynamicky se pohybující objekty, které by mohly ohrozit stabilitu robota. Pokud je robot autonomní a pohybuje se v prostředí, které přispívá k ohrožení jeho stability, musí se pohybovat přizpůsobenou rychlostí, popřípadě mít k dispozici systém, který zajistí po pádu jeho návrat do stabilní polohy.

3 ŘÍDICÍ JEDNOTKA

Řídicí jednotka je nejdůležitější část každého autonomního robota. Jedná se o elektronický obvod s výpočetní kapacitou a pamětí, s jehož pomocí je robot schopen zpracovávat a reagovat na podněty ve svém okolí dle předprogramovaného chování. Volba vhodné řídicí jednotky pro autonomního dvoukolového robota má velký vliv na jeho schopnost rychlé a přesné reakce na změny, jakožto i vyhodnocení dalšího postupu při průchodu terénem.

3.1 Mikropočítač

Jednočipový mikropočítač (nebo také mikrokontroler) je druh počítače nebo přesněji druh von Neumannova počítače, pojmenovaném po významném matematikovi Johnu von Neumannovi, který jej vymyslel. Všechny von Neumannovy počítače obsahují čtyři komponenty: paměť, řadič, aritmeticko-logickou jednotku a vstupně výstupní brány a periferie (I/O), které jsou připojeny přes adresovou a datovou sběrnici. Zjednodušený diagram počítače je zobrazen na obr. 8. V paměti se ukládají jak data, tak program a vstupně výstupní periferie (I/O) poskytují možnost komunikace s okolním prostředím [14].



Obr. 8 Architektura Von Neumannova počítače [65].

V konvenčním osobním počítači (PC) jsou vstupně výstupní periferie realizovány skrze zobrazovací monitory, klávesnice, myši, scannery, tiskárny, modemy atd. U typické mikropočítačové aplikace poskytuje vstupně výstupní rozhraní komunikační prostředky se zařízením, ke kterému je připojený, jako např. PC, automobil, domácí spotřebiče, hračky, ovladače nebo laboratorní nástroje.

Aritmeticko logická jednotka (ALU) provádí aritmetické a logické operace na datech, např. sčítání, logický součin AND apod. Řadič řídí tok informací mezi komponentami pomocí řídicích, adresových a datových linek [15].

Na sběrnici mikropočítače může být v jednom okamžiku připojen pouze jeden zdroj dat. Řízení sběrnice pak nejčastěji provádí procesor. Mikrokontrolery můžeme dělit podle různých kritérií jako je architektura nebo velikosti instrukční sady [15].

3.1.1 Typy instrukčních sad mikropočítače:

- **CISC** Základní charakteristikou této sady je poměrně rozsáhlá instrukční sada stroje a její komplexnost. Na každý obtížnější problém, jako je například násobení dvou čísel, existuje zvláštní instrukce. Dalšími specifiky jsou vysoký počet adresovacích módů a proměnná délka instrukcí. Zastánci ostatních architektur považují tuto vlastnost za hlavní nevýhodu celé architektury [14].
- **RISC** - první návrh RISC procesoru byl roku 1974 představen Johnem Cockem z firmy IBM. Jednalo se o mikroprocesor IBM 801, který se nikdy nedostal do prodeje, ale představuje významnou událost ve vývoji mikroprocesorů. RISCový stroj obsahuje pouze malý počet jednoduchých instrukcí a je na programátorovi, jak se s nimi vypořádá. Všechny instrukce mají pevnou délku, v poslední době většinou 32 bitů. Všechny instrukce jsou jednoduché, tzn. žádná neprovádí více věcí najednou, narozdíl od komplexní instrukce v CISC [14]. Omezená sada jednoduchých instrukcí a jejich pevná délka výrazně zrychlí práci procesoru, jak při dekódování instrukce tak při jejím načítání. Mezi RISCové procesory se řadí zejména ARM (Advanced RISC Machine/Acorn RISC Machine) a SPARC (Scalable Processor Architecture) [14].

V poslední době se rozdíl mezi CISC a RISC postupně smazávají a procesory zůstávají v dané kategorii spíše s ohledem na jejich vývojové předchůdce.

3.1.2 Dělení dle architektury mikropočítače:

- **Harvardská architektura** vychází původně z reléového počítače Mark 1 z Harvardu. Nejvýznamnějším rysem Harvardské architektury je fyzicky oddělená paměť programu a dat a jejich spojovacích, řídicích obvodů. Je tedy možné přistupovat současně k paměti programu a datům. Typicky je paměť pro program pouze ke čtení a datová paměť umožňuje čtení i zápis [16].
- **Von Neumannova** architektura je pojmenována po matematikovi a vědci Johnu von Neumannovi. Von Neumannovy stroje sdílejí paměť pro program i data, lze tedy jednoduše program modifikovat za chodu, protože je uložen v paměti určené ke čtení i zápisu [16].

3.1.3 Dělení mikropočítačů dle šířky sběrnice:

- 8bitové mikropočítače mají sběrnici o šířce 8 bitů, 8bitové ALU, střadač a registry. Šířka adresové sběrnice je 16 bitů. Příkladem 8bitového MCU jsou Intel 8031/8051, PIC1x, Motorola MC68HCX a další [17].

Mezi jejich důležité vlastnosti patří dostupnost, malé rozměry, nízký příkon, jednoduchost programování a nízká cena, která v kombinaci s výkonem v jednotkách až desítkách MIPS (milion instrukcí za sekundu) a širokou škálou možností komunikace, postačuje i v dnešních dobách pro řízení méně výkonných zařízení, strojů a robotů. Mezi jejich nevýhody patří nižší výkon ve složitých numerických výpočtech a nižší velikost paměti.

Arduino - tato oblíbená platforma je založená na 8bitových mikropočítačích ATmega, doplněných obvody pro úpravu napájení, resetem, obvody pro komunikaci s programovacím hardware a vstupně výstupními piny přístupné přes patice s konektory. Arduino dále poskytuje software pro programování mikropočítače, spolu s množstvím knihoven pro usnadnění prototypování a vývoje aplikace. Pro další rozšíření se používají tzv. shieldy – rozšiřovací karty, kompatibilní s Arduinem.

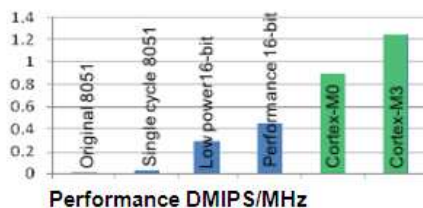


Obr. 9 Platforma Arduino s rozšiřujícími kartami [25].

Výhody Arduina leží primárně v rychlosti vývoje, univerzálnosti a ceně. Mezi nevýhody tohoto řešení patří nepoužitelnost Arduina ve velmi malých zařízeních a nižší výpočetní výkon oproti výkonným ARM platformám.

- 16bitové mikropočítače vycházejí z 8bitových mikropočítačů, avšak obsahují 16bitovou sběrnici a ALU, provádějící aritmetiku a logické operace na 16bitových operandech. Nejznámějšími 16bitovými MCU jsou 8051XA, PIC2x, Intel 8096, Motorola MC68HC12 a další. 16bitové MCU poskytují vyšší výkon v porovnání s 8bitovými.
- 32bitové mikropočítače obsahují 32bitovou sběrnici a provádějí výpočetní operace na 32bitových operandech. Mezi důležité 32bitové MCU patří rodina Intel/Atmel 251, PIC3x, Motorola M683xx, ARM 7,9,11, ARM Cortex-Mx a další.

Zejména mikropočítače založené na architektuře ARM Cortex-M poskytují v porovnání s tradičními 8 a 16bitovými mikropočítači vyšší výkon a nižší spotřebu. Protože dokáží v početních operacích pracovat efektivněji (Obr. 10), prodlužuje se tak doba, po kterou může být procesor v režimu spánku. Tyto mikropočítače nalezneme například v mobilních telefonech, MP3 audio systémech, v zařízeních pro zpracování videa, obrazu, zvuku a dalších výpočetně náročných aplikacích [18].



Obr. 10 Porovnání výkonu

ARM vs 8 a 16bit [16].

3.2 PLC

Programovatelný logický automat (PLC – Programmable logic Controller), je relativně malý počítač používaný pro automatizaci průmyslových a robotických procesů v reálném čase. Vložený program vykonává sekvenčně, v neustále se opakujících cyklech. Nejčastěji je PLC díky svému výpočetnímu výkonu, spolehlivosti a odolnosti vůči průmyslovému prostředí využíván na řízení výrobních linek v továrnách, avšak svoje uplatnění nachází i v domácnostech a mobilních robotech [19].

Programovatelný logický automat se skládá z centrální procesorové jednotky, paměti, komunikačního rozhraní a analogových nebo digitálních vstupů a výstupů. Zdroj napětí může být součástí PLC nebo připojen externě [19].

PLC dělíme dle konstrukce na:

- Kompaktní – jejich rozšiřitelnost je omezená, vše typicky integrované v jednom modulu
- Modulární – jednotlivé komponenty jsou rozděleny do modulů, ze kterých se skládá modulární PLC. Lze je snadno rozšiřovat.

PLC je v robotice nejčastěji využíván pro statické roboty a robotická ramena. Při použití v mobilních projektech musíme uvažovat výrazně vyšší cenu logického automatu v porovnání s mikrokontrolery, větší rozměry a pomalejší reakce na změny v řízeném systému. Výhodou je pak odolnost PLC, zabudovaná diagnostika poruchy a jednoduchá rozšiřitelnost pomocí modulů. Pokud zvolíme PLC jako řídicí jednotku, je často nutné jej doplnit dalšími elektronickými obvody, komunikujícími s PLC, pro práci se senzory, aktuátory, displeji a dalšími komponenty, které nelze přímo řídit programem z PLC [19].

3.3 PC

Také osobní počítače a průmyslové počítače mohou být použity pro řízení robotů. Malé notebooky, netbooky, případně kompaktní mini počítače (Raspberry PI, BeagleBoard, BeagleBone), disponují oproti mikropočítačům a Arduinu vysokým výkonem, o několik řádů větší pamětí, lze je jednoduše připojit na internet a lokální síť a jsou nezávislé na programovacím jazyku.

V robotice se PC a IPC využívá zejména jako centrální výkonný prvek, který řídí zařízení na nižší úrovni. Standardní operační systém, používaný v PC není přizpůsobený pro rychlé real-time reakce, je tedy závislý na zařízeních nižší úrovně, které tvoří mezičlánek mezi zařízeními na nejnižší úrovni (senzory, pohony...) a PC, které přijatá data dále zpracovává. Výjimkou jsou některé verze real-time operačních systémů jako RTEMS, FreeRTOS a jiné.

U robotů řízených PC lze využít levné webové kamery, výpočetního výkonu a provádět například 3D mapování terénu.

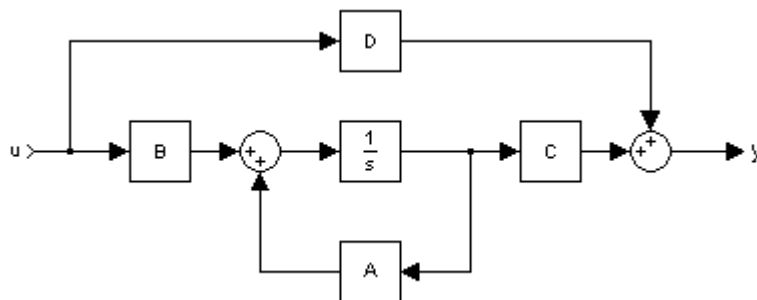
3.4 Možností řízení

Nejčastěji využívané způsoby řízení stability inverzního kyvadla můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin – lineární a nelineární metody.

3.4.1 Lineární

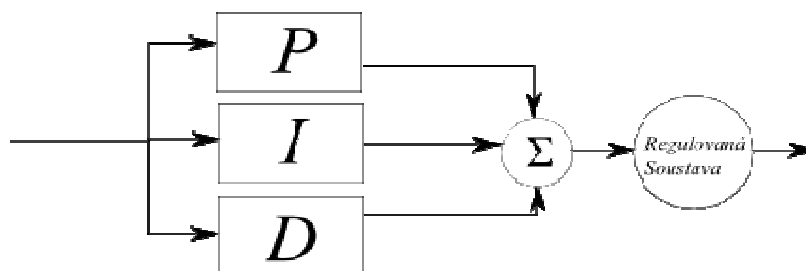
- Stavové řízení

Předpokladem pro použití stavového řízení je lineární popis soustavy n -tého řádu. Jedná se o nejpoužívanější metodu řízení. Návrh parametrů regulátoru lze pak provádět manuálně pomocí Metody přiřazení pólů nebo kvadraticky optimálními regulátory (LQ řízení). Pokud soustava není lineární (inverzní kyvadlo), pak ji nejprve linearizujeme v určitém pracovním bodě (např. pomocí funkce *linmod* v MATLABu). Nevýhodou této metody je, že navržený regulátor pracuje spolehlivě pouze v okolí uvažovaného bodu a nemusí být schopen pro některé počáteční podmínky odchylku od stabilní polohy uregulovat a utlumit.



Obr. 11 Schéma stavového popisu systému [66].

- **PID regulátory** se využívají v průmyslové praxi již více než 60 let kvůli své jednoduchosti návrhu i fyzické realizaci. Skládá se ze tří základních složek – proporcionální, integrační a derivační. S nástupem mikrokontrolerů a mikroprocesorů se stále častěji využívá diskrétní verze regulátoru – proporcionálně-sumačně-diferenční (PSD). Pro řízení tohoto typu robota by se daly použít dva zřetězené PID regulátory, jeden pro řízení polohy a druhý pro udržení robota ve stabilizované poloze. Platí pro ně však stejné omezení jako pro stavové regulátory, které regulují linearizované soustavy.



Obr. 2 PID regulátor.

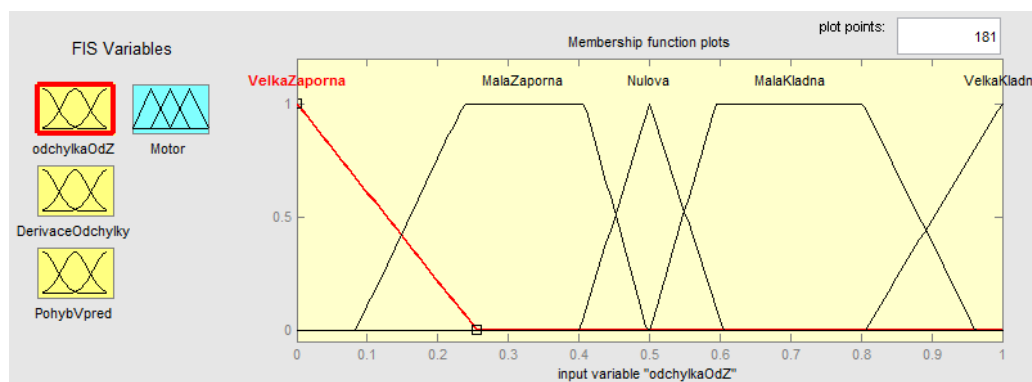
3.4.2 Nelinární:

- **Fuzzy regulátory** jsou častou alternativou k lineárním regulátorům. Existuje několik základních typů fuzzy regulátorů – neadaptivní (vycházející z PID), adaptivní a fuzzy regulátor jako adaptivní dohlížecí regulátor [21].

Fuzzy regulace se na rozdíl od klasických lineárních regulátorů liší použitím pravidel, které definují, jak se řízený systém bude chovat v závislosti na vstupech. Těch je zpravidla více než u lineárních regulátorů. Při použití v této úloze bychom za vstup

mohli použít úhel náklonu, úhlovou rychlost, vzdálenost od požadované polohy, rychlost pohybu a například zrychlení robota.

Na obrázku 13 lze vidět návrh jedné fuzzy proměnné v software MATLAB pro odchylku úhlu.



Obr. 3 Návrh fuzzy proměnné v MATLABu.

- **Neuronové sítě**

Jedná se o výpočetní struktury složené z matematických neuronů. Vlastnosti těchto neuronů jsou odvozeny od reálného (živého) neuronu v lidském mozku. Neuronové sítě mají schopnost se učit, ale potřebují k tomu učitele (některé typy neuronových sítí jsou i samoučící, např. Kohonenovy neuronové sítě) [22].

Neuro-regulátory jsou obzvláště vhodné pro regulaci nelineárních soustav, tyto regulátory jsou složitější na naprogramování a výpočetní výkon, jejich výhodou je však robustnost, schopnost regulovat v celém rozsahu nelineárních soustav a adaptibilita – neuroregulátor si sám v průběhu regulace vytvoří model regulované nelineární soustavy a dále jej může zpřesňovat [23].

Regulátor využívající neurofyzilogický mechanismus navržený prof. X. Ruanem a doktorkou J. Chen vykazoval v porovnání s klasickým regulátorem velmi dobré výsledky [24].

- **Další možnosti řízení**

Mezi další metody patří adaptivní řízení, genetické algoritmy, prediktivní řízení a hybridní formy řízení, slučující více metod (Fuzzy-Neuronové sítě apod.).

4 POHONY

Pohon je zařízení, které převádí energii (v případě robotů nejčastěji elektrickou) na fyzický pohyb. Pohony mohou vytvářet točivý pohyb nebo lineární. Pro dvoukolového robota se tedy budeme zabývat pouze pohony, které vytváří pohyb točivý. Pohony (motory) pak rozlišujeme dle dvou základních mechanických parametrů – kroutícího momentu (udává jakou silou motor působí na bod vzdálený od osy otáčení, udává se v N·m) a otáček (udává počet otáček za minutu) [25]

4.1 AC motor

Motory na střídavý proud mají vysoký kroutící moment a dělíme je na synchronní a asynchronní. V mobilních robotech se používají jen velmi zřídka, kvůli akumulátorovému (bateriovému) provozu robotů. Vzhledem k stejnosměrnému napájení elektronických obvodů robota je výhodné využívat pouze jeden typ napájecího zdroje – tedy stejnosměrný. Motory na střídavý proud mají využití převážně v průmyslu nebo u stacionárních robotů [26].

4.2 DC motor

Tyto motory jsou mechanicky komutované (přepínané) elektrické motory napájené ze zdroje stejnosměrného napětí (DC). Rozlišujeme je na kartáčové, bezkartáčové a nekomutované. Tyto motory, s převážně válcovým tvarem, disponují hřídelí, která se obvykle otáčí mezi 5 až 15 tisíci otáčkami za minutu. Jejich nevýhoda je malý kroutící moment. DC motory se mohou otáčet oběma směry, dle polaritý přiloženého napětí. Jejich rychlost otáčení a poloha natočení hřídele lze zjišťovat enkodéry nebo potenciometry [26].

4.3 DC motor s převodovkou

Jedná se o DC motor, doplněný o převodovku, která snižuje rychlost otáčení motoru a zvyšuje jeho kroutící moment. Zpřevodováním vznikají mechanické ztráty a snižuje se účinnost motoru. Mezi nejpoužívanější druhy převodovek patří čelní (nejobvyklejší), planetová (méně náročná na prostor, ale komplikovanější) a šneková (zamezuje otáčení kola při odpojení napětí) [26].

4.4 RC servo motor

Servo motor je typ pohonu, který otáčí hřídelí do nastavené polohy. Klasické modelářské servo má rozsahu otáčení omezený na 180°. Servo motor se skládá z DC motoru, převodovky, elektroniky a rotačního potenciometru, který detekuje úhel natočení hřídele. Servo motory pak můžeme dále dělit na analogové a digitální.

U Analogového servo motoru úhel natočení určuje regulátor pulzy s proměnnou střídou, jež je úměrná výslednému natočení [26].

Digitální servomotory obsahují také mikroprocesor, který poskytuje více možností přizpůsobení vlastností serva dané aplikaci. Lze například nastavit koncový a středový bod, hysterezi, polohu serva bez signálu, rychlost a citlivost serva. Servo motory pro robotiku se vyznačují kontinuálním otáčením a informují o natočení hřídele.

4.5 Krokový motor

Krokový motor otáčí hřídelí v přesně definovaných krocích (stupních). Krokové motory dělíme na bipolární a unipolární a stejně jako u DC motorů je lze vybavit převodovkou a zvýšit tím jejich kroutící moment a snížit rychlost otáčení hřídele a tím i velikost kroku. Nevýhodou krokových motorů je skutečnost, že při opětovném připojení napájení nelze určit absolutní polohu hřídele.

5 SNÍMAČE

Snímače (senzory) slouží robotům k odměřování polohy v prostoru, k regulaci dynamických pohybových veličin, jako snímače pro technologické operace, ke kalibraci a jiným speciálním činnostem. Citlivá část senzoru se občas označuje jako čidlo. Senzor, jako primární zdroj informace, snímá sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a dle určitého definovaného principu ji transformuje na měřicí veličinu - nejčastěji na veličinu elektrickou. U snímačů rozlišujeme statické a dynamické parametry (viz tab. 2) [27].

Tab. 2 – Statické a dynamické parametry snímačů [28].

Statické parametry	Dynamické parametry
Citlivost	Parametry časové odezvy
Práh citlivosti	Časová konstanta
Dynamický rozsah	Šíře frekvenčního pásma
Reprodukovatelnost	Frekvenční rozsah
Rozlišitelnost	Rychlost číslicového převodu
Aditivní a multiplikativní chyby	Parametry šumu
Linearita	
Parametry výstupu	

5.1 Dělení snímačů

5.1.1 Dělení snímačů dle transformace signálu[29]:

- **Aktivní senzor** je senzor, který se působením snímané veličiny chová jako zdroj elektrické energie.
- **Pasivní senzor** je senzor, u kterého je nutné elektrickou veličinu (odpor, indukčnost, kapacitu atd.) dále transformovat na analogový napěťový nebo proudový signál. U pasivních senzorů je na rozdíl od aktivních senzorů nezbytné napájení.

5.1.2 Dělení snímačů dle práce se signály:

- Analogové.
- Digitální.

5.1.3 Dělení snímačů dle vazby na měřený objekt:

- Dotyková.
- Bezdotyková.

5.1.4 Dělení snímačů dle měřené veličiny:

- Mechanických veličin (poloha, otáčky, vzdálenost).
- Tepelných veličin (teplota, teplo).
- Chemických veličin (pH, obsah plynů).
- Tlaku (vakuum, výška).
- Záření.
- Magnetických veličin.
- Speciální.

5.1.5 Dělení snímačů dle fyzikálního principu[30]:

- **Indukční** – aktivní bezdotykové snímače s vysokou spolehlivostí, odolné vůči vlivům prostředí. Snímač je založen na Faradayově zákoně elektromagnetické indukce.
 - **Elektromagnetické** indukční snímače pracují s časovou změnou magnetického pole (např. pro měření rychlosti výchylky).
 - **Elektrodynamické** indukční snímače – napětí vzniká pohybem vodiče v konstantním magnetickém poli (např. tachodynamo). Používají se např. pro získání informace o poloze a rychlosti objektu, k počítání kusů a k nahrazení mechanických koncových snímačů.
- **Indukčnostní** snímače jsou pasivní – měrná veličina mění indukčnost nebo vzájemnou indukčnost mezi dvěma cívkami (též označení „pasivní indukční snímače – parametrické“). Magnetický obvod cívky může být uzavřený nebo otevřený, s feromagnetickým jádrem nebo bez.

Dle provedení dělíme indukčnostní snímače na:

- **Snímače lineární výchylky** (snímače s malou vzduchovou mezerou nebo snímače s otevřeným magnetickým obvodem - transformátorové)
- **Snímače úhlové výchylky** – selsyny.
- **Kapacitní** – pracují bezdotykově, lze s nimi detekovat kovové i nekovové materiály, hlídat hladiny kapalin i sypkých materiálů apod. Snímač funguje na principu proměnného kondenzátoru v RC filtru, jehož kapacita se mění přiblížením ke snímanému předmětu. Hlavním zdrojem rušení pro kapacitní snímače jsou elektromagnetická střídavá pole, které vybudí obvod snímače a způsobí jeho rozkmitání.
- **Magnetické** senzory vycházejí z principů měření magnetického pole. Snímaný předmět tedy musí obsahovat magnet nebo v případě umístění magnetu do senzoru, musí být snímaný předmět feromagnetický. Snímače existují ve formě *Hallowy sondy*, *magnetorezistivní sondy*, *senzory s nasycovaným jádrem cívky*. Při stejných rozměrech je magnetický senzor citlivější než indukční snímač, nevýhodou je nutnost užití magnetu na snímaném předmětu.
- **Optické senzory** jsou nejvíce vyžívané senzory v průmyslové automatizaci. Pracují na základě přeměny elektrického proudu na světlo a naopak. Jako vysílače se používají LED diody a polovodičové diody. Jako přijímací prvky se využívají fotodiody, fotorezistory, fototranzistory a diody s laterálním efektem. Snímače existují ve formě *reflexních senzorů*, *reflexních závor* a *jednocestných závor*. Používají se pro dopravníkové úlohy, regulace polohy navíjených pásů, hlídání rozměrů na velké vzdálenosti, hlídání hladin a inspekční úlohy s rozlišením barvy.

Laserové dálkoměry využívají laserového paprsku k měření středních vzdáleností v řádech jednotek až stovek metrů. Dálkoměr vyšle nerozbihavý laserový paprsek a po zpětném dopadu pulzu na detektor je změřena doba od vyslání k příjmu. Přesnost laserového dálkoměru je v řádech jednotek mm. Doba měření pak u většiny přístrojů trvá maximálně desetiny sekundy. Výpočetní jednotka integrovaná v laserových dálkoměrech poskytuje doplňkové funkce jako je měření ploch, objemu, úhlu a matematické operace a převody délkových mír [31].

- **Ultrazvukové** snímače využívají akustické vlny o kmitočtu nad slyšitelným pásmem spektra lidského ucha. Jako horní hranice pro ultrazvuk bereme 1 GHz. Senzory pro měření vzdálenosti pracují na principu měření odezvy (echa) – reflexní princip. Odražená vlna je detekována, zesílena a vyhodnocovací elektronika stanoví vzdálenost od předmětu [32].

Snímače mohou být v provedení *reflexní závora*, *jednocestná závora*. Vyzařovací charakteristika je pak definována vyzařovacím úhlem a dosahem [32].

- **Snímače pro inerciální navigaci** - tento typ snímačů používá inerciální navigaci pro měření pohybu objektu (až v šesti osách volnosti) a jeho pozice, přičemž primární veličinou je zrychlení. Nejčastěji využívanými snímači jsou gyroskop, akcelerometr a inklinometr, s jejichž pomocí lze určit zrychlení, rychlost, pozici a náklon objektu, což zejména v kombinaci s MEMS provedením snímačů, umožňuje využití inerciální navigace i pro miniaturní roboty s nízkým rozpočtem.
- **Další typy** – odporové, piezoelektrické, termoelektrické, ionizační, potenciometrické, pyroelektrické, polarografické. Mnohé z těchto principů jsou vhodné pro snímání několika druhů veličin.

5.2 Detekce překážek

Fyzické překážky jsou pro autonomní roboty vždy zdrojem nebezpečných situací. V nejlepším případě se robot o překážku pouze zastaví, což může mít za následek ztráty informací o poloze při prokluzu kol. V horším případě dojde k poškození robota nebo jeho mechanických či elektrických částí.

Pro dvoukolové balanční roboty je detekce překážek v cestě obzvláště důležitá- slepý robot se může při kolizi s překážkou dostat do stavu nerovnováhy, ze kterého se robot nedokáže zotavit. V takovýchto případech přichází na řadu senzory pro detekci překážek.

V kapitole 4.1.5 byly popsány fyzikální druhy senzorů a jejich využití. Pro detekci překážek se v praxi nejčastěji využívá optických, ultrazvukových a mechanických senzorů.

5.2.1 Druhy překážek

Překážky můžeme rozdělit na statické a dynamické. Statické překážky jsou takové, které nemění svoji polohu nebo velikost v čase jako např. budovy, ploty apod. Robot je tedy obchází nejkratší možnou cestou. Dynamické překážky naopak mění směr nebo polohu v čase. Robot musí určit jejich vlastnosti v době setkání a podle nich se zařídit. Z hlediska omezení způsobu pohybu lze překážky rozdělit na prostupné a neprostupné. Neprostupné překážky může robot pouze obejít. Prostupné překážky lze překonat změnou způsobu pohybu robota, např. překročením, přeskočením, přeletem atd.

5.3 Měření náklonu

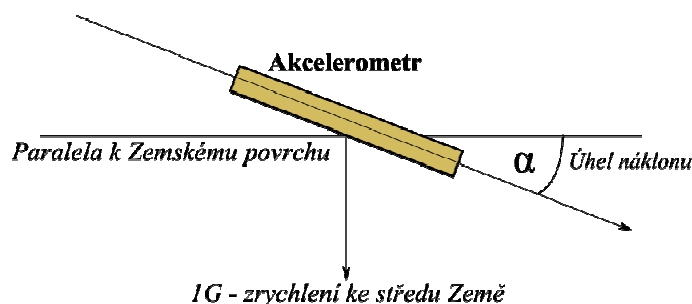
Pro měření náklonu jsou v mobilních robotech nejčastěji využívány snímače inerciální navigace - akcelerometr, gyroskop a inklinometr.

5.3.1 Akcelerometr

Akcelerometrem můžeme měřit dynamické nebo statické zrychlení podél dané osy. Akcelerometry měří zrychlení, tj. přeměňují zrychlení (změnu pohybu) na měřitelný elektrický signál. V zásadě se využívá hlavně následujících tří principů[33]:

- Piezoelektrické akcelerometry - využívají piezoelektrický krystal (přírodní nebo keramiku), který generuje náboj úměrný působící síle, která při zrychlení působí na každý objekt.
- Piezoresistivní akcelerometry - využívá mikro-křemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu
- Akcelerometry s proměnnou kapacitou (MEMS) - využívá mikro-křemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně kapacity – dnes nejpoužívanější.

MEMS akcelerometry (Obr. 15) jsou integrovány do miniaturního pouzdra, což redukuje náklady na výrobu a mohou měřit až 3 osy zároveň, v rozsahu standardně až $\pm 55G$. Rozměry pouzdra i jejich cena se rok od roku snižuje a jsou tedy vhodnými a zároveň levnými senzory na měření statického (Obr. 14) nebo dynamického zrychlení, rychlosti i náklonu v elektronických přístrojích a robotice, s minimální teplotní závislostí.

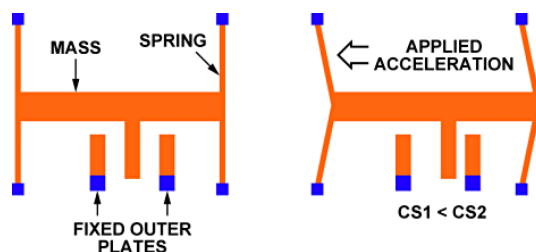


Obr. 44 Měření náklonu akcelerometrem.

Tíhové zrychlení, které míří na Zemi vždy do jejího středu, pak působí na stacionární, kolmo na tíhové zrychlení umístěný akcelerometr, zrychlením $1G$ (je definováno jako $9,806\,65\,m \cdot s^{-2}$). Zvyšováním úhlu náklonu α (viz obr. 14) se hodnota gravitačního zrychlení, působící v dané ose na akcelerometr, snižuje až na $0G$ dle vztahu:

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\text{Naměřené_zrychlení}}{\text{Tíhové_zrychlení}}\right) \quad (12)$$

Takto získaný údaj je však přesný pouze, když robot není v pohybu vůči zemskému povrchu.



Obr. 15 Funkce MEMS akcelerometru [67].

Při nestatické poloze robota, pak na akcelerometr působí jiná zrychlení, která do vypočteného úhlu zanesou chyby (šum). Řešením pro tyto situace je zavedení dolno-propustního filtru, který odfiltruje vysoké frekvence, které jsou typické pro dynamický pohyb robota a vibrace z pohybu vznikající. Nevýhoda tohoto řešení je mírně vyšší odezva

a zeslabení signálu pro rychlé změny náklonu, typické vlastnosti pro dolní propust. Získáme tedy přesné měření úhlu náklonu, avšak pouze pro nízkofrekvenční změny.

5.3.2 Inklinometr

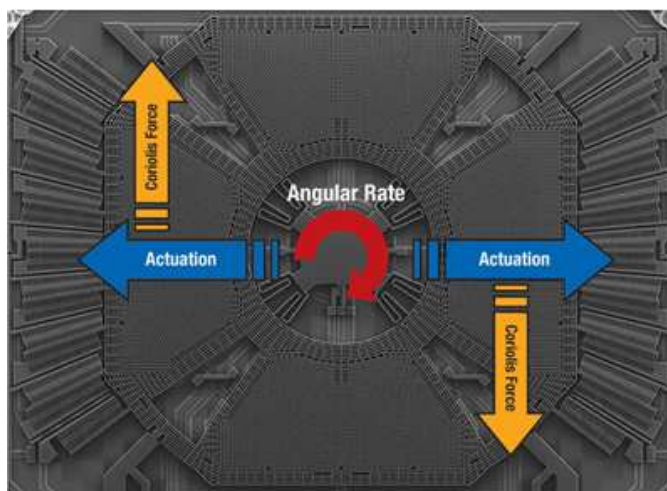
Inklinometr je přístroj pro měření úhlu náklonu objektu vzhledem ke gravitaci vytvořením umělého horizontu. Inklinometry jsou obvykle využívány v leteckém a stavebním průmyslu, u námořnictva, armády a v dopravě. Výstup z inklinometru je úhel náklonu ve stupních. Mezi nejdůležitější parametry při volbě inklinometru patří měřený rozsah, rozlišení a počet měřených os [34].

5.3.3 Gyroskop

Je snímač, měřící úhlové zrychlení. Mezi základní druhy konstrukce gyroskopu patří [35]:

- Gyrostat – ke stabilizaci využívá energie rotačního setrvačníku, využívá se pro stabilizaci zařízení, na které působí náhodné vnější síly
- MEMS gyroskopy využívají myšlenky Fokaultova kyvadla a vibrujícího prvku, kdy dochází uvnitř senzoru působením virtuální Coriolisovy síly změna kapacity
- FOG (Fiber optic gyroscope) – vláknový gyroskop využívá interferenci světla pro detekci mechanické rotace
- CVG gyroskop využívá piezoelektrický jev a rezonátor ze slitiny různých kovů pro detekci Coriolisovy síly

Stejně jako u MEMS akcelerometrů, jejich miniaturizace, digitalizace a integrace do malých elektronických součástek umožnila jejich široké využití všude tam, kde je potřeba měřit úhlovou rychlost rotačního pohybu. Standardní MEMS gyroskopy jsou schopny měřit v rozsahu 100-6000 DPS (Degrees per second). Funkce MEMS gyroskopu je znázorněna na obr. 16.



Obr. 16 Funkce MEMS gyroskopu [36].

Dva pohybující se hmotné objekty (skládající se ze statoru a rotoru) vnitřní struktury jsou udržovány v neustálém vibračním pohybu v opačném směru (modré šipky). Při působení rotačního pohybu na tělo gyroskopu, vznikne Coriolisova síla, působící kolmo (oranžové šipky) na oscilující objekty a oddalující rotor od statorové části přímo úměrně velikosti úhlové rychlosti. Vzdálenost mezi rotorem a státorem vyvolá změnu v kapacitě, kterou lze přímo měřit a převádět na úhlovou rychlost [36].

Úhlovou rychlost vypočteme jako:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (13)$$

Abychom získali údaj o náklonu robota, musíme úhlovou rychlost získanou z gyroskopu integrovat:

$$\theta = \int \omega dt \quad (14)$$

S tím je spojena jedna nevýhoda – gyroskop je stejně jako akcelerometr zatížen šumem, jehož hodnota se bude integrovat spolu s užitečným signálem. Druhou nevýhodou MEMS gyroskopu je drift. Drift vzniká při vychýlení z počátečního stavu a novým ustálením. Nově získaná hodnota se pak nerovná počátku a tento offset od počátečního stavu se dále zvyšuje s teplotní závislostí a v čase [36].

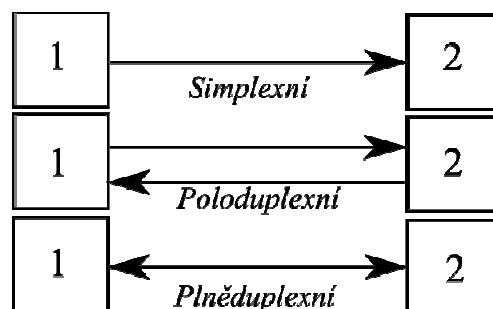
Výhodou gyroskopu oproti akcelerometru je jeho rychlá a přesná reakce na rotaci kolem osy, jejíž náklon se snažíme určit. Pro potlačení driftu můžeme výstupní hodnoty filtrovat hornopropustním filtrem, takto vyfiltrovaný signál však ztrácí schopnost reagovat na pomalé změny.

6 Komunikace

Komunikace slouží robotům pro spojení s programátorem, údržbou nebo okolními zařízeními a roboty, dělíme ji dle fyzického propojení na drátovou a bezdrátovou.

Komunikační systémy jsou také rozděleny do tří hlavních skupin (viz obr. 17), dle směru komunikace[37]:

- Simplexní – pouze jednosměrná komunikace (např. spojení rádiový vysílač a přijímač)
- Poloduplexní – obousměrná komunikace, která neumožňuje současně vysílat i přijímat data (například vysílačky)
- Plněduplexní – oboustranná komunikace, při které mohou obě strany komunikovat zároveň na oddělených kanálech (vodičích)



Obr. 17 Druhy komunikace.

6.1 Drátová komunikace

6.1.1 RS-232

RS-232 je sériové rozhraní pro přenos informací vytvořené původně pro komunikaci dvou zařízení do vzdálenosti 20 m. Pro větší odolnost proti rušení je informace po propojovacích vodičích přenášena větším napětím, než je standardních 5 V. Přenos informací probíhá asynchronně, pomocí pevně nastavené přenosové rychlosti a synchronizace sestupnou hranou startovacího impulsu. Pro propojení dvou komunikujících zařízení se nejčastěji používá 9 pinový D-sub konektor (Obr. 18)[38].



Obr. 18 D-sub Konektor.

Rychlost komunikace je udávána v baudech a dosahuje maximální rychlosti 115200 bd. Pro propojení s novějšími notebooky a počítači se využívá převodník USB-RS-232. V průmyslu je pak alternativou sběrnice RS-485 a RS-422.

6.1.2 CAN

Sběrnice CAN (Controller Area Network), je původně založená na RS-485, s dvouvodičovým vedením, jehož signálové vodiče jsou označeny CAN_H a CAN_L se zakončovacími odpory 120 Ω . K této sběrnici se připojují uzly, s maximálním počtem 110 uzlů, dle typu budičů. Maximální rychlost přenosu je 1 Mbit/s při délce sběrnice do 40 m. Při délce 3,3km je její hodnota jen 20 kbit/s. Přenos dat probíhá pomocí datových rámců. Mezi výhody sběrnice CAN patří prioritní přístup zabezpečující rychlé doručení významných zpráv, diagnostika sběrnice, nízká cena a vysoká spolehlivost [39].

6.1.3 USB

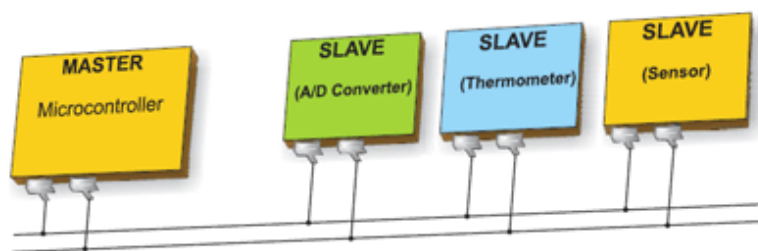
USB (Universal Serial Bus) je univerzální sběrnice se sériovým datovým tokem, kterou lze propojit různá zařízení (periferie, externí paměti, multimediální přehrávače apod.). USB sběrnice svou rychlostí (dle klasifikace až 5 Gb/s), jednoduchostí a napájecím napětím 5V, postupně nahradila v počítačích komunikační sběrnici RS-232, kterou je nutné např. v notebookech a jiných mobilních zařízeních nejprve převést z USB na RS-232 pomocí převodníku [40].

Komunikace přes sběrnici USB probíhá v paketech o délce 8 až 256 bajtů. Vzhledem k tomu, že se jedná o komunikaci Master-Slave, nemůže Slave zařízení začít vysílat samo o sobě, vždy pouze na žádost. Mezi nevýhody USB patří maximální délka vodiče 5 metrů a pomalejší odezva mezi komunikujícími zařízeními [40].

6.1.4 I2C

I2C (Inter Integrated Circuit) je sériová komunikační sběrnice, je využívána na krátké vzdálenosti mezi mikropočítači a specializovanými integrovanými obvody nové generace (vysílač i přijímač jsou umístěny na jedné desce plošných spojů). Spojení je tvořeno dvěma vodiči (viz obr. 19), jeden určený pro datový přenos, druhý pro synchronizaci (hodinový signál) [41].

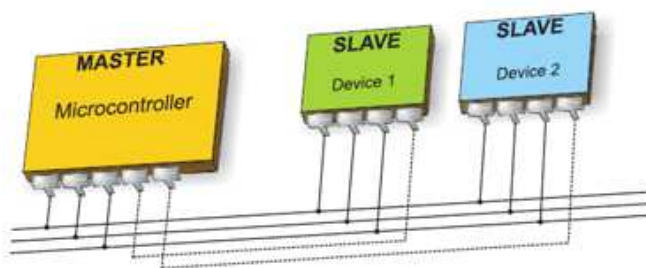
Jedno ze zařízení v komunikaci je typu Master, které řídí komunikaci a vybírá adresu Slave zařízení, se kterým bude komunikovat. Tímto způsobem může jeden mikropočítač komunikovat až se 112 různými zařízeními. Přenosová rychlost je volitelná v rozmezí 100 Kb/s až po jednotky Mb/s. Maximální vzdálenost mezi zařízeními je omezena na několik metrů [41].



Obr. 19 I2C komunikace [68].

6.1.5 SPI

SPI (Serial Peripheral Interface Bus) je typ sériové komunikační sběrnice, která využívá až čtyři vodiče (typicky tři) – pro příjem, vysílání, synchronizaci a alternativně jeden pro výběr zařízení, se kterým se komunikuje. Jde o plně duplexní komunikaci s přenosovou rychlostí typicky vyšší než u I2C [41].



Obr. 5 SPI komunikace [68].

6.2 Bezdrátová komunikace

V případě, že dvě komunikující zařízení jsou příliš vzdálena od sebe, použijeme jednu z dostupných bezdrátových možností komunikace.

6.2.1 RF

RF (Radio Frequency) je typ bezdrátové komunikace využívající vysokofrekvenční signály k přenosu dat od pásma AM (535 kHz) až po stovky GHz. Výhoda RF je téměř libovolná vzdálenost, na kterou lze komunikovat a průchod signálu překážkami [42].

Pásmo pro bez licenční používání (při zachování maximálního vyzařovaného výkonu) jsou:

- <1 GHz
- 2,4 GHz

6.2.2 802.11 WiFi

WiFi se stává poměrně zajímavou volbou z hlediska komunikace s robotem po síti, resp. přes internet. Pro navázání komunikace je potřeba použít bezdrátový router a WiFi jednotku umístěnou na robotovi. Výhodou je možnost komunikace s velkým datovým tokem, vzdáleností omezená pouze vysílacím výkonem routeru. Standard IEEE 802.11 umožňuje komunikaci v pásmu 2,4GHz, případně v licenčním pásmu 5 GHz, rychlostí typicky 2 až 54 Mbps (dle standardu) [43].

6.2.3 ZigBee

ZigBee je standard bezdrátové rádiové komunikace vytvořený pro průmyslové účely monitorovací a řídicí aplikace na standardu IEEE 802.15.4. ZigBee pracuje ve třech pásmech – 868, 915 a 2400 MHz s celkovým rozsahem 27 kanálů s přenosovou rychlostí 20, 40 a 250 kbps [44].

Standardní ZigBee zařízení může komunikovat na vzdálenost 30 metrů ve vnitřních prostorech a až 200 metrů ve venkovních. Vyšší třídy ZigBee modulů umožňují komunikaci až na vzdálenost 40 km. ZigBee podporuje zapojení topologie do hvězdy, stromu a sítě. Také vykazuje velkou odolnost proti rušení rádiovými signály, nízkou spotřebu elektrické energie a nízkou cenu [45].

6.2.4 Bluetooth

Bluetooth je nejbližší konkurence pro ZigBee. Je definován standardem IEEE 802.15.1. Deklaruje vyšší přenosovou rychlost (až 1 Mbps vs 250 kbps), avšak kratší přenosovou vzdálenost a vyšší spotřebu. Je založen na modelu master-slave, kde jedna řídicí jednotka (master) může mít v síti až sedm aktivních zařízení. Tato síť se nazývá piconet. Propojením piconetů do větší sítě získáme síť scatternet. Oproti ZigBee je však Bluetooth rozšířenější v elektronice běžné potřeby (mobilní telefony, notebooky, tablety) [46].

Tabulka 2 - Výkonové třídy Bluetooth[47].

Výkonová třída	Maximální výkon	Maximální dosah
1	100mW (20dBm)	100m
2	2,5mW (4dBm)	50m
3	1mW (0dBm)	10m

7 ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Každé elektrické zařízení vyžaduje zdroj elektrické energie. Tuto energii můžeme dodávat v podobě střídavého proudu z elektrické sítě nebo generátoru. Mezi další způsoby můžeme uvažovat stejnosměrný proud poskytovaný z usměrněného zdroje střídavého napětí nebo z baterií a akumulátorů [21].

Pro potřeby mobilního autonomního robota je nejčastější zdroj energie baterie nebo akumulátor. Pro nízkopříkonové mobilní roboty jsou zajímavou volbou také fotovoltaiické panely. V dnešní době převládají pro potřebu robotů zejména akumulátory, které poskytují dostatečný výkon a lze je opětovně dobíjet.

Mezi nejdůležitější parametry při výběru akumulátoru patří:

- Výstupní napětí (ve Voltech)
- Kapacita (v Ah)
- Maximální velikost proudu, kterou je schopen akumulátor dodávat dlouhodobě nebo špičkově (udáváno v C – násobky kapacity)
- Hmotnost akumulátoru a jeho rozměry

7.1 Typy akumulátorů

V této kapitole je uveden stručný přehled v současnosti nejčastěji využívaných typů akumulátorů v robotice a malých robotických modelech.

7.1.1 Nikl-Metal Hydridové

NiMH akumulátory poskytují vysoký proud díky nízkému vnitřnímu odporu. Mohou být také opakovaně nabíjeny bez paměťového efektu. S napětím na článek 1,2 V a kapacitou běžně mezi 1000 – 2800 mAh se jedná o poměrně dobrý zdroj energie pro menší mobilní roboty

7.1.2 Nikl-Cadmiové

NiCad akumulátory mají výraznější paměťový efekt a jsou vysoce toxické

7.1.3 Olověné

Pb akumulátor je galvanický článek s olovenými elektrodami a elektrolytem z kyseliny sírové. Kapacita olovených akumulátorů se běžně pohybuje v rozmezí od 1 do 10 000 Ah. Jmenovité napětí jednoho článku je 2 V, jejich řetězením pak získáme požadované napětí. Vzhledem ke konkurenčním akumulátorům nabízí velkou kapacitu a nízký vnitřní odpor. Mezi nevýhody patří vyšší hmotnost a rozměry.

7.1.4 Lithium-Iontové

Li-Ion akumulátory jsou dnes běžně využívány ve spotřebním průmyslu, elektronice a robotice, díky malým rozměrům, hmotnosti, absenci samovybíjení a vysoké kapacitě. Mezi nevýhody patří nižší odolnost proti nárazu a vyšším teplotám (hrozí výbuch nebo hoření) a postupná ztráta kapacity. Při úplném vybití dochází ke ztrátě funkce. Jmenovité napětí článku je 3,7 V [48].

7.1.5 Lithium-Polymerové

Li-Pol akumulátory jsou dnes pravděpodobně nejpokročilejší variantou skladování elektrické energie. Konstrukčně vycházejí z Li-Ion akumulátorů, avšak mají vyšší hustotu uchovávané elektrické energie, vysoký počet nabíjecích cyklů (okolo 1000) a umožňují

výrazně vyšší vybíjecí proudy (běžně až 65 C). Napětí článku je pak stejné jako u Li-Ion. Li-Pol akumulátory jsou tedy svými vlastnostmi ideální do RC modelů a robotů [48].

8 FYZICKÁ KONSTRUKCE

8.1 Materiály, velikost, hmotnost

Použitý materiál ovlivňuje fyzickou odolnost robota, jeho sílu, pevnost, pružnost, možnosti servisu, energetickou účinnost a manévrování ve svém prostředí.

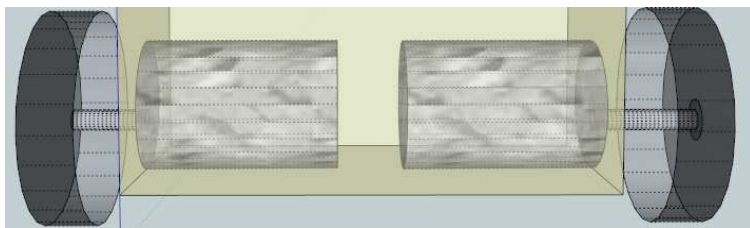
Materiály s vyšší hustotou (typicky kovy) zvyšují odolnost robota, ale negativně ovlivňují jeho jízdní vlastnosti kvůli vyšší hmotnosti a většímu přenosu vibrací z povrchu na tělo robota. Další možnosti pro šasi robota bylo dřevo, plast a sklo. Z hlediska dostupnosti, ceny, snadné obrobitelnosti byla zvolena pro tělo robota truhlářská (modelářská) překližka (viz obr. 21) o šířce 3 mm, z níž byly jednotlivé díly vypáleny laserem a epoxidovým lepidlem slepeny za pomoci zámků do pevné a zároveň lehké konstrukce, umožňující další úpravy. Šroubky by šlo šasi uchytit také, ale uchycení šroubků v překližce této tloušťky by neposkytovalo takovou pevnost.



Obr. 21 Modelářská překližka [75].

Rozměry robota je potřeba přizpůsobit prostředí, ve kterém se bude robot pohybovat. V případě malých prostor je pro lepší manévrování vhodnější úzká konstrukce, s níž robot může lépe reagovat na statické i dynamické překážky v cestě, ale ztrácí na stabilitě. Vyšší konstrukce pak usnadňuje balancování robota, ale zvyšuje riziko oscilací okolo pracovního bodu, i malý vzruch může způsobit velké vychýlení robota z rovnovážné polohy kvůli vyššímu rotačnímu momentu setrvačnosti. Jestliže má robot překonávat menší překážky, jako jsou kabely, koberce, prahy apod., měli bychom zvážit, zda dané konstrukci robota odpovídá velikost kol a výkon motorů.

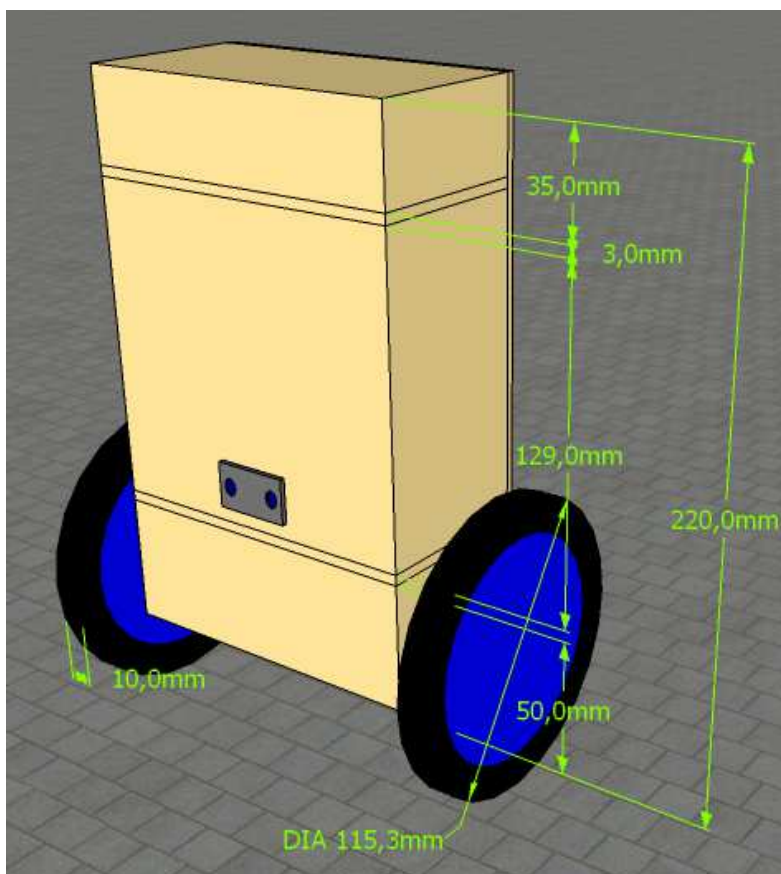
Pro tento projekt byl zvolen menší robot, s nízkou hmotností, určený zejména pro pohyb v místnosti s možností pohybu ve venkovních prostorách na rovném suchém povrchu při bezvětří. Šířka robota pak byla ovlivněna délkou obou motorů, které byly uloženy v jedné ose (viz obr. 22). Celkový souhrn fyzických parametrů robota je uveden v tabulce 7.



Obr. 22 Uložení motorů.

Motory je potřeba umístit co nejnižší kvůli zachování co možná největší světlé výšky robota. Naopak akumulátor je vhodné umístit co nejvýše, posuneme tím těžiště robota dále od osy kol a tím usnadníme vyvažování robota.

Mezi akumulátor a motory je tedy nutné umístit desky s elektronikou. Zvolil jsem sendvičové uspořádání, kdy budou desky plošných spojů uloženy vodorovně nad sebou a propojeny kabely. Elektronické součástky pro rozložení hmotnosti nehrají významnou roli, avšak je potřeba počítat s jejich přibližným umístěním již při návrhu konstrukce pro snadnější propojení vodiči.



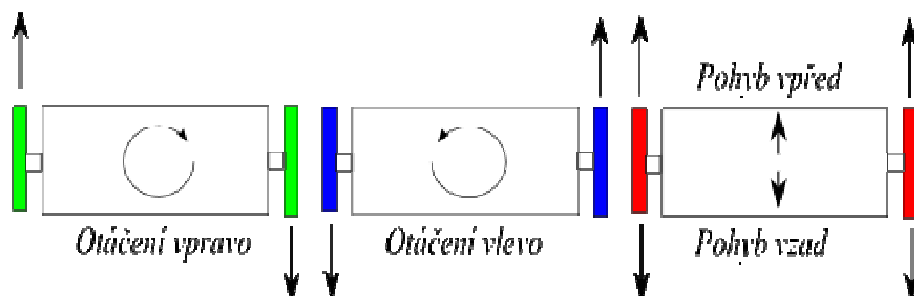
Obr. 23 Model konstrukce robota.

Na obr. 23 lze vidět 3D model s vyobrazením předpokládané konstrukce robota i s navrženými rozměry. Hloubku robota 62 mm jsem zvolil dle potřebných rozměrů pro uchycení desek plošných spojů. Výška střední části robota 129 mm by pak měla umožňovat umístění veškeré potřebné elektroniky.

Neméně důležité pak bude vyvážení robota. Do konstrukce budou umístěny závaží tak, aby těžiště robota bylo nad osami motorů. Předpokládaná hmotnost robota včetně elektroniky by neměla přesáhnout 1,5 kg.

8.2 Motory

Motory jsou pro jakéhokoliv robota zásadní komponenta. Při výběru motorů se řídíme typem podvozku. Pro dvoukolového balančního robota je nejzajímavější diferenciální podvozek, kdy každý z motorů nezávisle pohání jedno kolo.



Obr. 24 Diferenciální řízení

Diferenciálním řízením (viz obr. 24) získáme možnost otáčet robota na místě tím, že jeden motor otáčíme jedním směrem a druhý motor opačným. Zatáčet při jízdě pak provedeme zvýšením otáček jednoho kola oproti druhému. Rozdíl otáček mezi koly pak bude nepřímo úměrný poloměru otáčení.

Z dostupných druhů motorů můžeme vybírat ze střídavých (třífázových) motorů a stejnosměrných motorů a jejich variant (bezkartáčové, kartáčové, servomotory, krokové motory).

Motory napájené střídavým napětím nabízejí vyšší výkon při zachování stejných rozměrů, avšak vyžadují složitější regulátor a obvykle vyšší cenu. Krokové motory pak nedisponují potřebnou dynamikou. Rozhodování tedy bylo mezi upravením dorazu servomotoru a stejnosměrnými motory.

Kvůli jednoduchému řízení, dostupnosti a ceně volba padla na stejnosměrný kartáčový motor se zabudovanou převodovkou GM37-200 (viz obr. 25) od firmy ttmotor s příznivou cenou, napájený v rozmezí 9-12V. Převodovka s převodovým poměrem 30:1 redukuje otáčky na 200 otáček za minutu bez zátěže. Při zátěži jsou uvedeny otáčky 160 RPM (Revolutions Per Minute).



Obr. 25 - Motor GM37-200 [69].

Kroutící moment motoru s převodovkou je $T = 0,7 \text{ N} \cdot \text{m}$ (7.138 kg/cm), přičemž maximální odběr proudu motoru je $I = 0,85 \text{ A}$ při 0 RPM.

Maximální rychlost robota s koly o průměru 115 mm vypočítáme jako:

$$v_m = w_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{RPM}{60} = 0,0575 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{160}{60} = 0,963 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (15)$$

A převedeme na kilometry za hodinu:

$$v_k = v_m \cdot 3,6 = 3,47 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \quad (16)$$

Spolu s průměrem kola 112 mm je maximální rychlost robota přibližně 3,47 km/h.

Dále spočítáme sílu motoru F s danými koly:

$$F = \frac{T}{w_r} = \frac{7,138}{0,0575} = 1,24 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (17)$$

Zrychlení robota se dvěma motory pak vypočteme jako:

$$a = 2 \cdot \frac{F}{m} = \frac{2,54}{1,002} = 2,535 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2} \quad (18)$$

Výkon motoru spočítáme pak jednoduše:

$$P = U \cdot I = 12 \cdot 0,85 = 10,2 \text{ W} \quad (19)$$

8.3 Kola

Kola umožňují robotu pohyb po podložce a slouží také jako podpěra pro šasi. Průměr kol by měl být zvolen vzhledem k terénu a jeho nerovnostem, odpovídat předpokládaným jízdním vlastnostem robota a krouticímu momentu motorů (viz kapitola Motory). Mezi nejčastěji používanými typy kol u modelářů jsou kola pěnová, mechová, polo-pneumatická, plná kola a pneumatická.

Vzhledem k nízké hmotnosti robota a hladkému povrchu, po kterém bude jezdit, byla vybrána lehká plastová kola o průměru 90 mm o šířce 10 mm, s odnímatelnou silikonovou pneumatikou. Tato kola by měla robotovi poskytnout dostatečnou trakci a svými rozměry by měla proporcionálně odpovídat rozměrům robota. Silikonová pneumatika poskytuje dobrý koeficient tření, ale malý útlum vibrací z terénních nerovností, které se dále přenášejí na měřicí elektroniku robota.



Obr. 26 - Původní plastové kolo.



Obr. 27 - Upravené kolo s pneumatikou z mikropřýže.

Silikonovou pneumatiku jsem nahradil 7,5 mm vysokým páskem mikropryže, přilepeným ke kolu chemoprenem, používané v zednických hladítkách. Pro další zvýšení koeficientu tření a průměru kola, byla na první vrstvu pneumatiky nalepena vrstva druhá, o stejné výšce, z měkkí, pěnové mikropryže (viz obr. 27). Celkový průměr kola se tak zvýšil na 115 mm.

Plastové kolo má průměr otvoru na hřídel 3 mm bez možnosti připojení na 6 mm hřídel motoru. Pro upevnění kola k hřídeli motoru jsem tedy použil univerzální hliníkový unašeč Pololu1083 s 6 mm otvorem pro upevnění hřídele a šesti děrami se závity pro uchycení šroubků o průměru 2,54 mm ke kolu. Pro pevnější spojení unašeče a hřídele, jsem do unašeče vyvrtal 3 otvory se závity pro zašroubování červíků o průměru 3 mm.



Obr. 28 Univerzální unašeč na
6 mm hřídel [70].

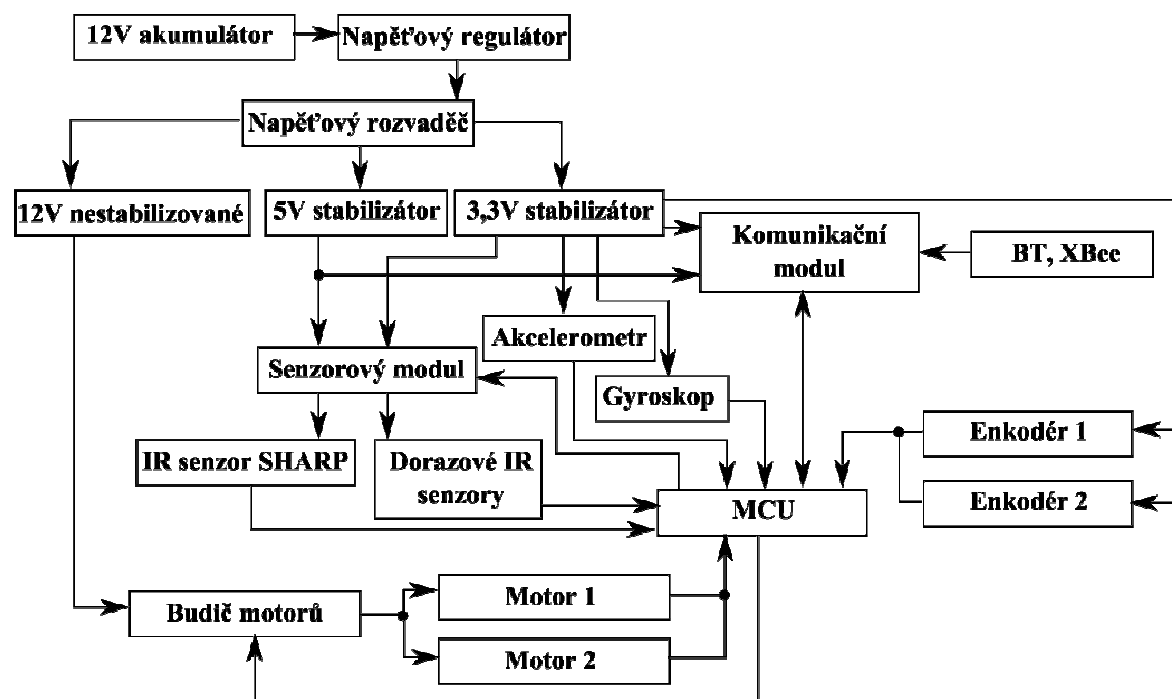
Kola budou řízena diferenciálně (viz obr. 24), každé kolo bude pohánět jeden motor. Výsledný vzhled robota lze vidět na obrázku 29.



Obr. 29 Výsledný vzhled robota.

9 NÁVRH ELEKTRONIKY

Při návrhu zapojení elektronických komponent si nejprve vytvoříme obecné blokové schéma zapojení (viz obr. 30). Při výběru vhodných komponent v následujících kapitolách uvažujeme rozměry, elektrické a mechanické parametry, odolnost proti rušení a cenu komponent.



Obr. 30 Blokové schéma elektroniky.

9.1 Napájení a rozvody napětí

Z hlediska návrhu vhodného zdroje elektrické energie musíme také uvažovat rozměry akumulátoru a jeho hmotnost, která například v podobě gelového olověného akumulátoru dosahuje vysokých kapacit, avšak hmotností několika kilogramů je pro tento projekt nevhodná.

Pro potřebu mikropočítače, senzorů, integrovaných obvodů a motorů pak musíme zajistit několik napěťových úrovní (12 V; 5 V; 3,3 V).

Protože odhadovaný maximální odběr robota dosahuje proudu 2 A, byl vybrán tříčlánkový Lithium-polymerový akumulátor ZIPPY (viz obr. 31) s kapacitou 2200 mAh, s výstupním napětím při plném nabití 12,6 V, jmenovitým provozním napětím 11,1V a jmenovitým vybíjecím proudem 20 C, který výrazně převyšuje potřeby tohoto projektu, ale umožní alespoň hodinový provoz i při maximálním odběru proudu. K takové situaci však bude docházet pouze výjimečně.

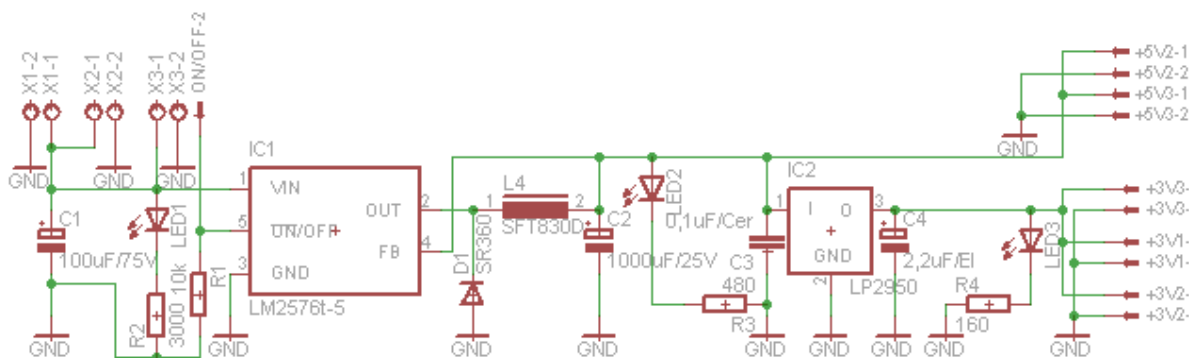
Hmotnost akumulátoru činí 180 g a se svými



Obr. 61 Li-Po akumulátor ZIPPY [71].

rozměry 102x37x24 mm je možné jej umístit do šachty v šasi, která je oddělená přepážkou od zbytku elektroniky.

Akumulátor nám tedy zajistí poskytnutí napětí, které budeme dále snižovat a využívat pro napájení dalších obvodů. Pro tyto potřeby jsem navrhl napájecí obvod (viz obr. 32) s rozvody napětí 12 V přímo z akumulátoru, snížených regulátory na 5 V a 3,3 V.

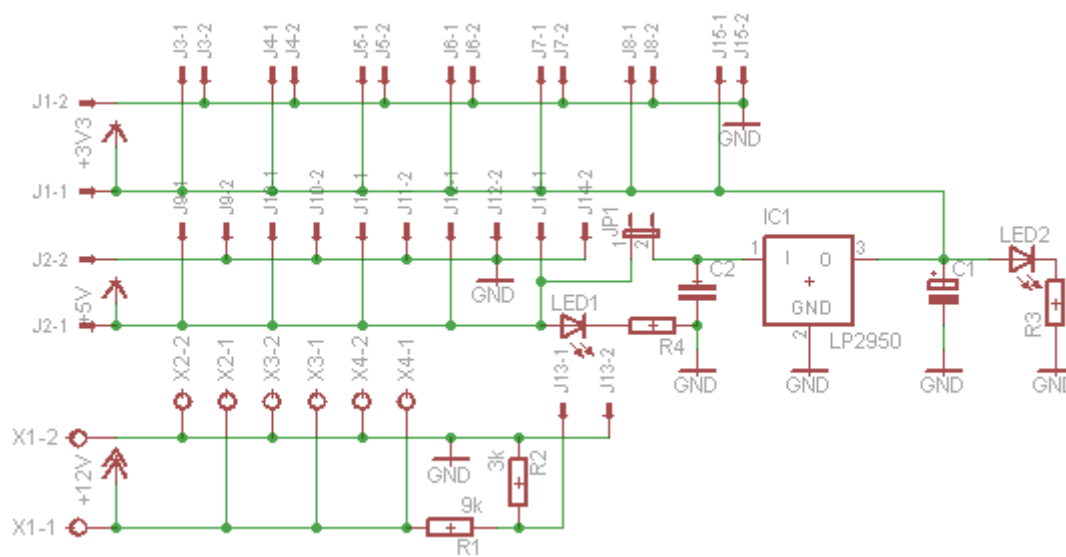


Obr. 32 Napájecí obvod s rozvody napětíových úrovní.

Pro snížení napětí z 12 V na 5 V jsem použil spínaný DC-DC měnič napětí s označením LM2576T-5 od firmy ON Semiconductor (ve schématu IC1), ve standardním zapojení dle datasheetu [49]. Účinnost tohoto měniče je závislá na zatížení a konfiguraci, ale obecně neklesá pod udávaných 77%. Maximální proud na výstupu měniče je 3 A. Integrovaný obvod byl pro snížení namáhání ztrátovým teplem upevněn k chladiči.

Kaskádovitě za spínaný měnič byl zapojen SMD pevný lineární regulátor a stabilizátor napětí LF33CDT (ve schématu IC2) od firmy STM, s výstupním napětím 3,3 V, max. proudem 1 A a úbytkem napětí na regulátoru pouze 0,45 V.

Všechna stabilizovaná napětí i 12 V výstup jsou k dispozici na konektorech a svorkovnicích pro další využití. Protože v průběhu vytváření projektu bylo zřejmé, že tři výstupy 3,3 V a dva výstupy 5 V je příliš malý počet, byl navržen nový obvod (viz obr. 33), který zajišťuje další napětíové výstupy pro jiné elektronické obvody a součástky.



Obr. 73 Napětíový rozvaděč s regulátorem.

Součástí napěťového rozvaděče je také regulátor 3,3 V LF33CDT, stejný jako v napájecím obvodu. Tento regulátor je doplňkový, připojitelný pomocí jumperu JP1 a slouží jako záložní regulátor v případě přehřívání nebo nedostatečného výkonu primárního regulátoru v napájecím obvodě, jehož výstup je limitován na 1000 mA.

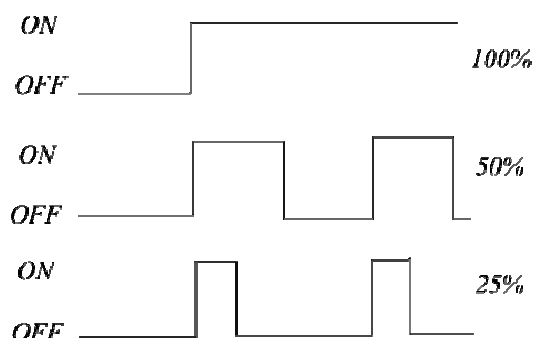
Celkem má tedy z hlediska napájení robot k dispozici:

- 5x 12 V výstup nestabilizovaný (maximální odběr 44 A stále/66 A špičkově)
- 7x 5 V výstup stabilizovaný (maximální odběr 3 A)
- 11x 3,3 V výstup stabilizovaný (maximální odběr 2 A při použití obou regulátorů)

9.2 Řízení motorů

Způsobů řízení motorů je více, závislých na použitém druhu motoru. Nejpoužívanější jsou přímé řízení, s využitím relé, tranzistorů a h-můstek.

Řízení motorů bude zajišťovat mikropočítač pulzně šířkovou modulací (PWM), kdy šířka pulzu, takzvaná střída, bude určovat dobu, po kterou bude motor zapnut (viz obr. 34).

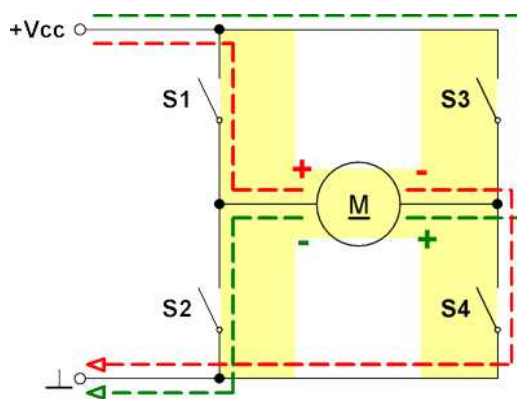


Obr. 84 Pulzně šířková modulace.

9.2.1 Princip H-můstku

Jestliže chceme měnit směr otáčení DC motoru, je výhodné použít H-můstek. Ten je tvořen čtyřmi spínacími prvky zapojenými do můstku (viz obr. 35). Kombinací sepnutí těchto spínačů pak realizujeme různé funkce můstku.

Abychom špatnou kombinací sepnutí spínačů nezpůsobili zkrat, musíme ošetřit, aby spínače S1 a S2, resp. S3 a S4 nebyly sepnuty zároveň. Ošetření provádíme softwarově nebo hardwarově (kombinací logických hradel nebo H-můstkem integrovaném do specializovaného obvodu).



Obr. 95 Princip H-můstku [72].

Nejklasičtější z hlediska množství funkcí a počtu vodičů je dvou nebo třívodičové ovládání můstku – dva (popř. jeden zinvertovaný) vstupy pro sepnutí spínačů a třetí vstup slouží jako ENABLE pro aktivaci/deaktivaci můstku. Jestliže všechny spínače vypneme, motor se může „volně“ otáčet. Závislost funkce motoru na vstupech je uvedeno v tabulce 4.

Tabulka 3 - Pravdivostní tabulka spínání výstupu můstku.

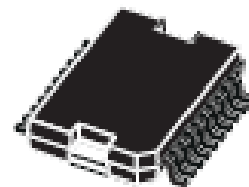
Enable	Vstup A	Vstup B	Výstup A	Výstup B	Funkce
H	X	X	Z	Z	Vypnuto
L	L	L	L	L	Brzda
L	H	L	H	L	Otáčení jedním směrem
L	L	H	L	H	Otáčení druhým směrem
L	H	H	Z	Z	Vypnuto

9.2.2 Realizace řízení motorů

Jako budič pro motory byl vybrán integrovaný obvod obsahující dvojité plný DMOS můstek L6205PD od společnosti STMicroelectronics, který nám umožňuje ovládat dva motory pomocí šesti vstupů (IN1-4, 2x ENABLE).

Mezi jeho základní vlastnosti patří:

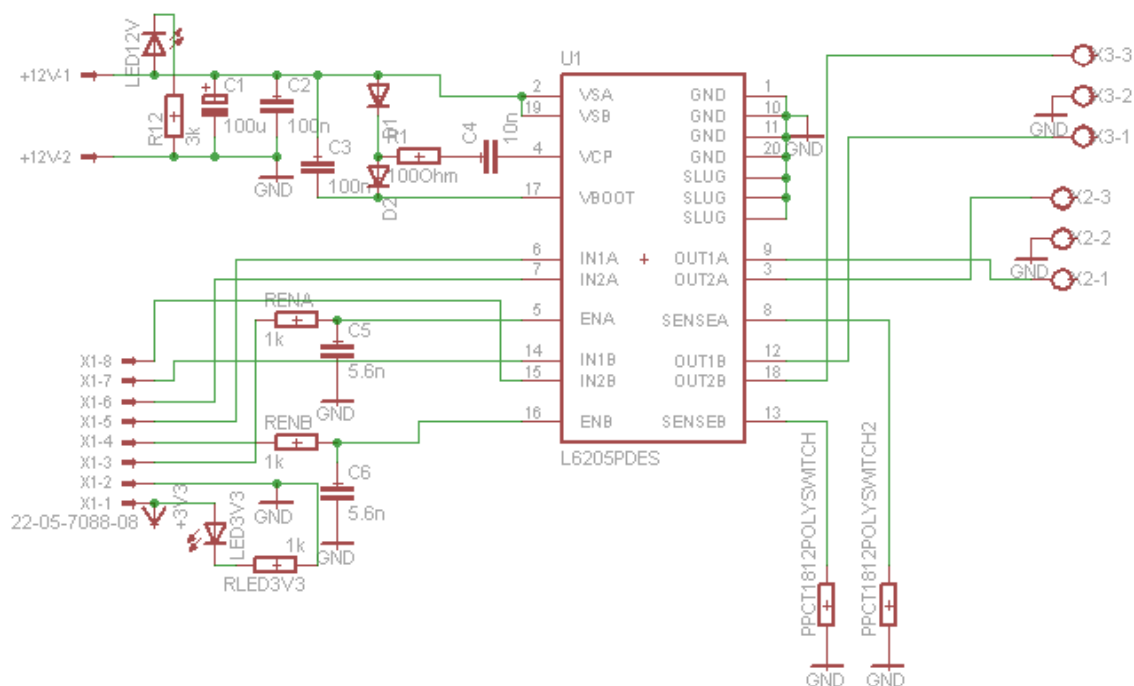
- Napájecí napětí v rozmezí 8 až 52 V
- 5,6 A špičkový proud (2,8 A stálý proud)
- $R_{DS(ON)}$ 0,3 Ω , typicky při 25° C
- Pracovní frekvence až 100 kHz
- Ochrana před nadproudem
- Tepelná ochrana
- Odpojení při nízkém napětí
- Pracuje při teplotách -25° C až +125°
- IO umístěn v pouzdře PowerSO20 (viz obr. 36)



Obr. 36 L6205PD
v pouzdře PowerSO20
[50].

Tento h-můstek kombinuje výkonové DMOS tranzistory s bipolárními a CMOS obvody, pro jednoduché připojení a spolupráci s nízkonapětovými zařízeními jako jsou moderní mikropočítače a je přizpůsoben pro PWM řízení.

Schéma obvodu (viz obr. 37) jsem vytvořil dle doporučeného zapojení [50].



Obr. 37 Zapojení budiče s L6205PD.

9.3 Mikropočítač

Pro účely robotiky a tohoto projektu je řídicí jednotka klíčový prvek. Robot by měl obsahovat velké množství senzorů pro detekci překážek, infračervený senzor pro měření vzdálenosti překážky před robotem, gyroskop, akcelerometr, motory, komunikační modul, signalizaci uživateli a jiné prvky, které je potřeba snímat, řídit, popřípadě ovládat.

Je tedy zřejmé, že základním požadavkem na řídicí jednotku bude velký počet vstupně/výstupních pinů. V souladu s velkým množstvím zpracovávaných informací a výpočtů bude nutné použít mikropočítač s vyšší frekvencí, nejlépe 32bitový.

9.3.1 Development kit FRDM-KL25Z

Během výběru mikropočítače uvedla firma Freescale na trh finančně zajímavý vývojový kit Freedom Development Platform pro Kinetis KL1x a KL2x MCU, zkráceně FRDM.KL25Z.

Tento kit obsahuje[51]:

- 32bitový MCU MKL25Z128VLK4 v 80pinovém LQFP pouzdru.
- Kapacitní dotykový slider
- 3osý Akcelerometr MMA8451Q s digitálním výstupem
- Tříbarevnou LED
- USB konektor s podporou mass storage pro rychlé nahrání aplikace
- Rozměry 82x54 mm
- mbed a Arduino kompatibilní
- Možnost uchycení napájecí knoflíkové baterie
- Napěťový regulátor
- Reset tlačítko



Obr. 38 Vývojový kit FRDM-KL25Z [51].

9.3.2 Mikropočítač KL25Z128VLK4

Jedná se o mikropočítač (viz obr. 39) řady Kinetis L od firmy Freescale. Mikropočítač obsahuje [52]:

- 32bitový ARM Cortex-M0+ procesor
 - o Frekvence až 48MHz
 - o Přístup k vstupně/výstupním pinům v jediném cyklu
- Paměti
 - o 128kB FLASH
 - o 16kB SRAM
- Integrované funkce:
 - o Řízení příkonu a ovládání režimů spotřeby
 - o Nízký odběr proudu v režimu spánku
 - o Engine s podporou operací pro bitový zápis/čtení/modifikaci periférií
 - o DMA ovladač pro přímý přístup do paměti
 - o Watchdog sledovač
- Generátor frekvence (4MHz/32KHz) pro CPU a sběrnice
- Analogové periferie:
 - o 16-bitové SAR ADC převodníky
 - o 12-bitové DAC
 - o Vysokorychlostní komparátor
- Komunikační periferie:
 - o Dva osmibitové SPI řadiče
 - o USB řadič
 - o USB napěťový regulátor
 - o Dva I²C moduly
 - o Jeden nízko-odběrový UART a dva standardní UART moduly
- Časovače:
 - o Jeden 6kanálový časovač/PWM modul
 - o Dva 2kanálové časovače/PWM moduly
 - o Dvoukanálový zdroj periodického přerušení
 - o Hodiny reálného času
 - o Nízko-odběrový časovač



Obr. 39 MCU KL25Z128VLK4 [51].

9.4 Senzory pro určení náklonu robota

Přesné a rychlé měření náklonu je pro roboty a jejich stabilitu klíčové. Měření náklonu je základní součástí např. balančních robotů, quadkoptér nebo bezpilotních vzdušných strojů. Pro měření náklonu se nejčastěji v praxi využívá akcelerometr, gyroskop a inklinometr. Vhodným zkombinováním různých typů senzorů pak můžeme pro danou aplikaci potlačit nevýhody jednotlivých senzorů a zachovat jejich výhody a výrazně zvýšit přesnost celého měření.

Pro tento projekt jsem zvolil z hlediska dostupnosti a vlastností jednotlivých obvodů kombinaci akcelerometru a gyroskopu. Tato kombinace poskytuje díky gyroskopu rychlou a přesnou reakci na rychle se měnící náklon robota a použitý akcelerometr pak eliminuje gyroskopický drift a poskytuje spolehlivé údaje při pomalejších změnách náklonu.

Pro robota byly jako snímače náklonu použity 3osý akcelerometr a 2osý gyroskop.

9.4.1 Akcelerometr MMA8451Q

Digitální MEMS akcelerometr MMA8451Q od firmy Freescale je součástí použitého development kitu FRDMKL25Z, přičemž svými vlastnostmi odpovídá požadovaným vlastnostem pro tento projekt.

Vlastnosti[53]:

- 3-osý akcelerometr s digitálním I²C výstupem
- 3 mm x 3 mm x 1 mm QFN pouzdro
- Odběr 6 μ A – 165 μ A
- Napájecí napětí 1,95 V – 3,6 V
- Detekce pádu
- 8/14 bitový digitální výstup
- Režim spánku



Obr. 40 Akcelerometr MMA8451Q [53].

9.4.2 Gyroskop LPR403AL

Při volbě MEMS gyroskopu byly zvažovány byl nejdůležitější parametr měřený rozsah, dále velikost pouzdra, změna citlivosti v závislosti na okolních podmínkách a napájecí napětí.

Základní vlastnosti [54]:

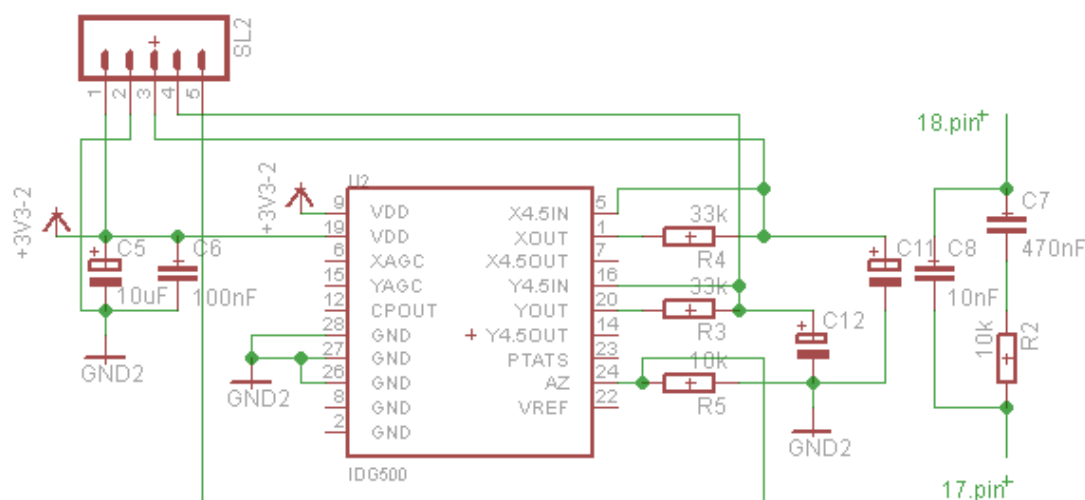
- 2-osý gyroskop s analogovým výstupem
- 4 mm x 5 mm x 1 mm pouzdro LGA-28
- Odběr 6,8 mA
- Napájecí napětí 2,7 V – 3,6 V
- Volitelný výstup $\pm 30/\pm 120$ dps
- Citlivost 8,3 mV/33,3mV na dps
- Změna citlivosti 0,07 % / °C



Obr. 41 Gyroskop LPR403AL [54].

9.4.3 Zapojení akcelerometru a gyroskopu

Akcelerometr je umístěn na vývojovém kitu, jehož popis je uveden v podkapitole 2.3.1. Gyroskop byl umístěn na samostatnou desku plošných spojů (schéma viz obr. 42). Zapojení vychází ze standardního zapojení dle datasheetu [54]. Konektory SL1, resp. SL2 slouží k připojení obvodů k napájení a mikropočítači.



Obr. 102 El. schéma s gyroskopem.

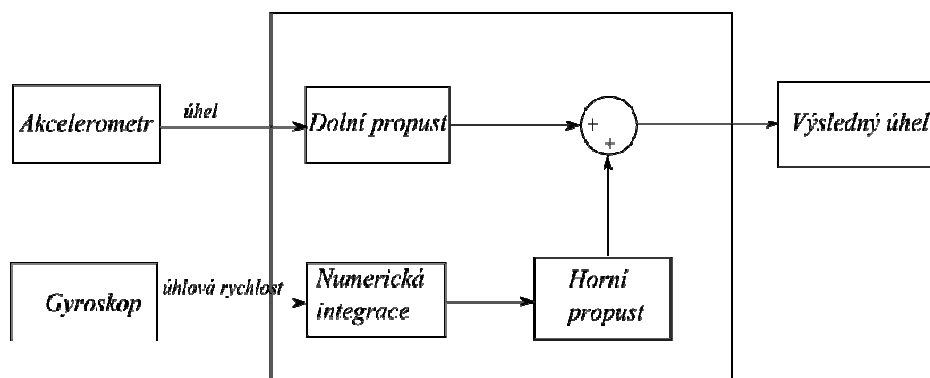
U obvodu s gyroskopem byl vyveden konektor z obou měřených os a reset horno-propustního filtru (pin 24), který výrobce doporučuje resetovat při každém zapnutí napájení ke gyroskopu.

9.5 Kombinace senzorů

Na sloučení těchto typů senzorů se dá s výhodou využít např. Kalmanův filtr, DCT (diskrétní kosinová transformace) nebo komplementární filtr.

9.5.1 Komplementární filtr

Filtr je výpočetně velmi jednoduchý a poměrně přesný, lze jej tedy s výhodou oproti jiným typům filtru využít v případě omezeného výpočetního výkonu. Jeho blokové schéma je uvedeno na obr. 43. Jeho nevýhodou je, že neposkytuje žádné informace o velikosti gyroskopického driftu [55].



Obr. 11 Komplementární filtr.

Rovnice komplementárního filtru s vahami je pak:

$$\text{úhel}_{\text{nový}} = a \cdot (\text{úhel}_{\text{předch.}} + \text{úhlové_zrychlení}_{\text{gyr}} \cdot dt) + (1 - a) \cdot \text{úhel}_{\text{akc}} \quad (20)$$

Kde:

a je váha pro gyroskop

$(1-a)$ je váha pro akcelerometr

dt je vzorkovací perioda

9.5.2 Kalmanův filtr

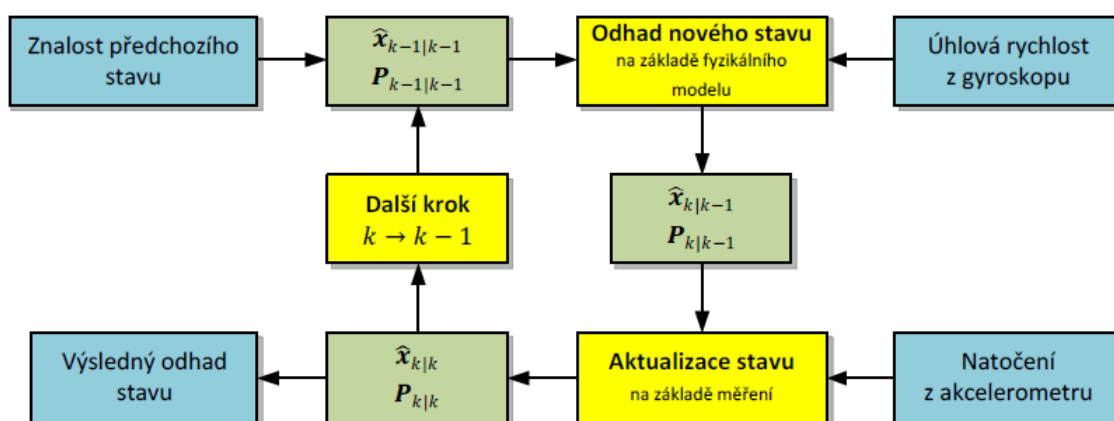
Kalmanova filtrace je speciální matematický aparát (algoritmus) pro filtraci signálů v časové oblasti. Výhodou tohoto systému je schopnost získat čistý signál a hodnoty ze zašuměného signálu nebo jinak znehodnoceného souboru hodnot, i bez jakéhokoliv poznatku o rušení. Prakticky lze takto matematicky zjistit hodnoty, které jsou přímým měřením těžko zjistitelné, protože se při samotném aktu měření do získaných hodnot indukují chyby měřících přístrojů nebo okolní působící šum a rušení [56].

Ve zjednodušené podobě jde o predikční-estimační algoritmus, který z předchozích a i následných budoucích dat snaží předpovědět průběh signálu, tedy vždy z průběhu minulých vzorků signálu vzorky následující, např. neznámý čistý signál bez rušení jen z měřeného. Ty jsou pak konfrontovány s opravdu naměřenými vzorky a jejich rozdíl se opět využívá k zlepšení odhadu dalších budoucích vzorků [56].

Výhodou oproti filtrům pracujícím ve frekvenční oblasti je, že Kalmanův filtr pracuje přímo v časové oblasti a odpadá nám tedy práce s transformací do frekvenční oblasti. Oproti komplementárnímu filtru také získáme odhad driftu gyroskopu, což můžeme dále použít při řízení.

9.5.3 Návrh Kalmanova filtru

Každý krok algoritmu (viz obr. 44) se skládá ze dvou fází – fáze odhadu, ve které se vytváří odhad nového stavu systému a fáze aktualizace, kdy algoritmus sloučí hodnoty odhadu a měření pomocí váženého průměru [57].



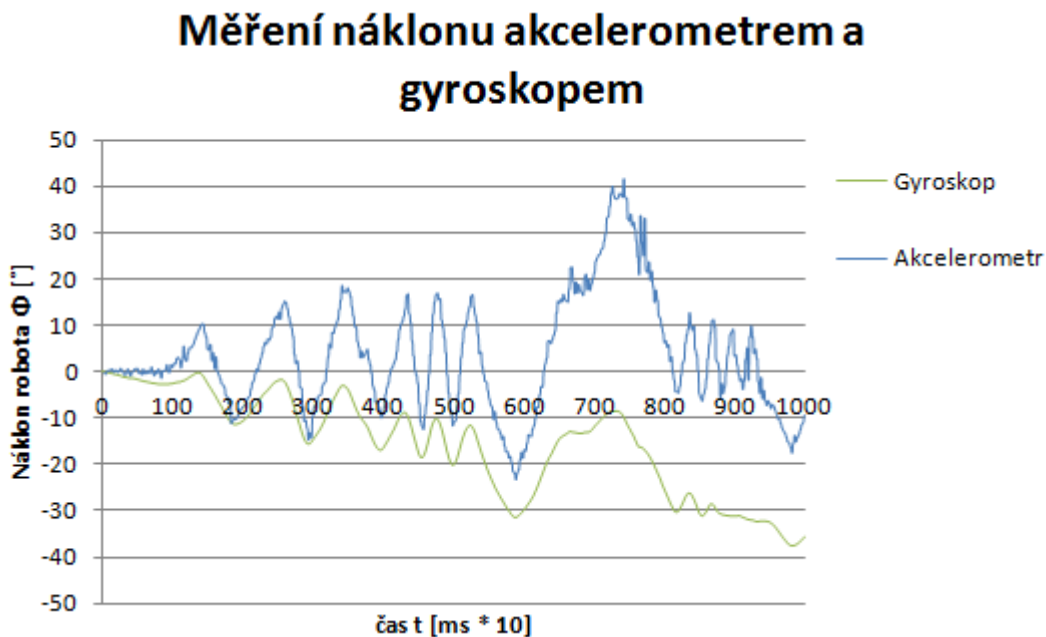
Obr. 124 Průběh algoritmu Kalmanova filtru [57].

Ve schématu má $\hat{x}_{n|m}$ význam odhadu hodnoty x v čase n za použití pozorování získaných do času m , proměnná x je stavový vektor a P je kovarianční matice [57].

9.5.4 Implementace filtru a výsledky

Konkrétní implementace a počáteční nastavení kovariančních matic bylo převzato z open-source projektu, který kombinoval právě gyroskop a akcelerometr pro určení náklonu robota [58].

Vzorkovací frekvence signálů byla nastavena na 100 Hz.

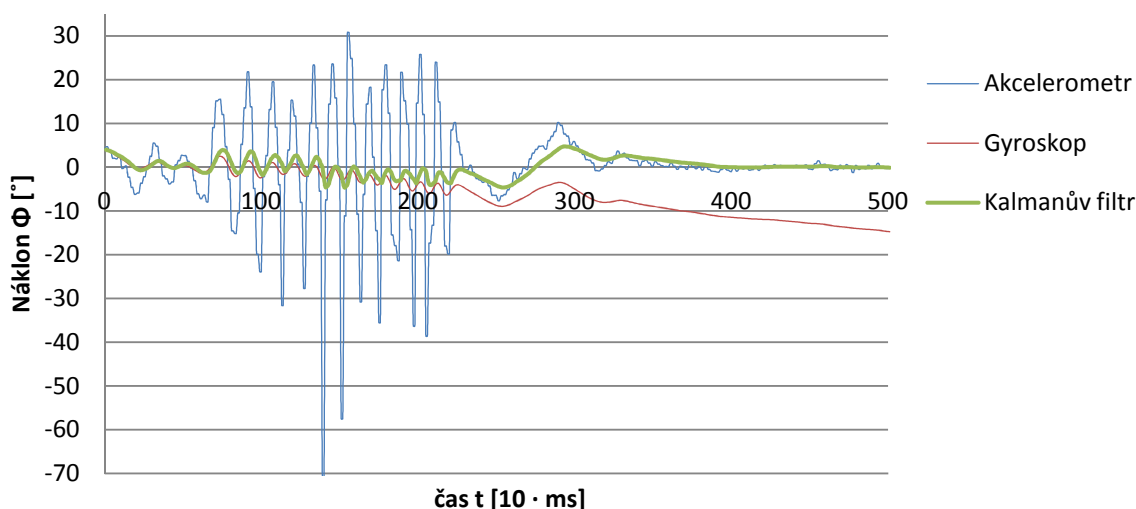


Obr. 45 Měření náklonu pomocí akcelerometru a gyroskopu.

Na obr. 45 můžeme vidět naklápění inerciálního snímače podle osy y , s typicky zašuměným výstupem akcelerometru, který reaguje na vysokofrekvenční vibrace a dynamické zrychlení, které na senzor působí. Průběh náklonu gyroskopu vzniká integrací naměřené úhlové rychlosti. Výsledný náklon měřený pomocí gyroskopu není zatížen šumem, ale průběh driftuje v čase cca $3,5^\circ/\text{s}$. Je tedy zřejmé, že ani gyroskop ani akcelerometr nelze použít samostatně pro přesné měření náklonu.

Kalmanův filtr pro jeho robustnost a přesnost použijeme ke sloučení úhlové rychlosti z gyroskopu a zrychlení z akcelerometru.

Filtrace signálu Kalmanovým filtrem



Obr. 46 Filtrace signálu Kalmanovým filtrem.

Z obrázku 46 vidíme, že Kalmanův filtr nám vyhladil šum akcelerometru a současně odstranil akumulaci chyby gyroskopu (drift). Takto nastavený filtr je tedy připravený pro použití v robotu.

9.6 Poloha robota

Znalost polohy robota a její změny v prostoru, je pro autonomní roboty klíčové. Se znalostí své aktuální polohy může robot vykonávat rozličné úlohy související s polohou, nalézt nejkratší cestu k cíli, vyhýbat se známým překážkám, sledovat předem určenou cestu, mapovat terén, vrátit se na původní pozici a další.

Veškeré potřebné informace, metody a pro výpočet polohy kolového robota zachytil ve své práci s názvem „Where Am I?“ Johannes Borenstein v roce 1996 [59],[60].

Měření polohy dělíme na [60]:

- Relativní - mezi relativní metody pro určení pozice patří odometrie a inerciální navigace
- Absolutní – mezi absolutní metody patří navigace pomocí aktivních majáků, GPS lokalizace, pomocí rozpoznatelných umělých pomocných bodů nebo přírodních identifikačních znaků a porovnávání naměřených dat s modelem prostředí, uloženém v robotu

Robot v tomto projektu bude využívat pouze relativní měření polohy, z důvodu použití ve vnitřních prostorech, které nebudou předem upraveny pro možnost detekce absolutní polohy.[59]

9.6.1 Odometrie

Tato metoda využívá enkodéry pro měření rychlosti robota, ujeté vzdálenosti a natočení robota vůči referenčnímu bodu – startovní pozici. Vypočtená poloha je vždy pouze odhadem, v praxi se při měření polohy akumuluje chyba, která pokud není korigována, neustále roste. Jedním ze způsobů korekce chyby je periodická oprava chyby pomocí prostředků absolutní navigace.

9.6.2 Enkodéry

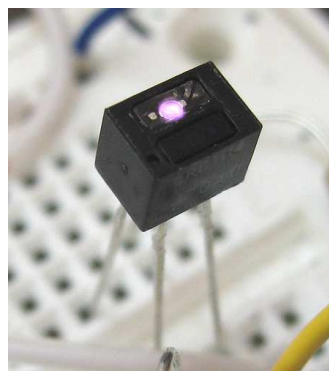
Pro potřeby mobilních robotů jsou nejčastěji využívány druhy enkodérů optické, magnetické a potenciometry. Pro potřeby tohoto projektu byly zvoleny inkrementální optické enkodéry, založené na principu dvojice vysílače infračerveného paprsku a detektoru, detekující odražený paprsek z rotujícího kotouče s pravidelně se střídajícími odraznými a matnými pruhy, připojeného na osu motoru.

Protože použitý motor má na výstupu převodovku s ozubenými koly, nejvhodnějším způsobem pro měření natočení kola je umístit enkodér přímo na kolo. Po průzkumu trhu, se svými parametry jeví jako optimální rotační optický enkodér HEDS (viz obr. 47), s různými průměry pro hřídel, s 512 tiky na otáčku a dvěma fázově posunutými kanály, umožňující snímat nejen rychlost otáčení, ale i směr rotace.

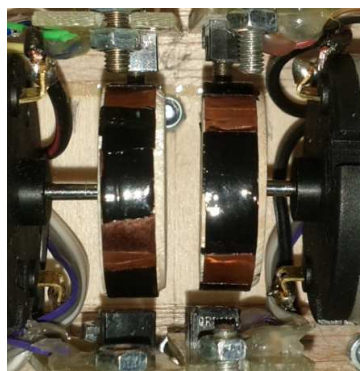
Nevýhodou tohoto typu senzoru pro malé roboty je jejich vysoká cena. Rozhodl jsem se tedy pro tento projekt vytvořit enkodéry vlastní výroby, složené z miniaturního infračerveného LED vysílače a fototranzistoru, s označením QRD1114 (Obr. 48), umístěné v jednom pouzdře, s filtrací na příjem vlnové délky 940 nm v kombinaci s dřevěným válcem o šířce 6 mm a průměru 25 mm, umístěném na 2 mm motorové hřídelce. Po obvodu válce je umístěna samolepící měděná páska, jejíž lesklý odrazný povrch je na čtyřech místech pravidelně přerušen pruhy černé barvy s matnou povrchovou úpravou (Obr. 49).



Obr. 47 Rotační optický enkodér HEDS [73].



Obr. 48 Reflexní senzor QRD1114.

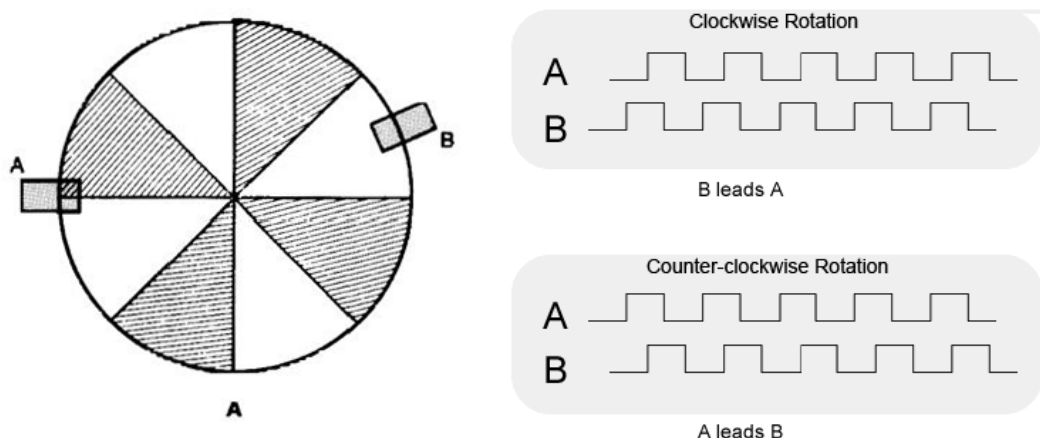


Obr. 49 - Instalované enkodéry.

9.6.3 Kvadrurní dekodování

Pro detekci nejen polohy, ale i směru otáčení je nutné senzory obou detekovaných kanálů umístit o 90° fázově posunutě (Obr. 50).

Externí přerušení vyvoláme sestupnou i vzestupnou hranou na kanálech A i B a dle posloupnosti pulzů zjistíme směr rotace disku.



Obr. 50 - Kvadrurní dekódování [74].

Ujetou vzdálenost vypočteme jako:

$$s = \frac{(\text{levý enkodér} + \text{pravý enkodér})}{2} \quad (21)[60]$$

Rychlost pohybu vypočteme jako:

$$v = \frac{|\text{enkodér}_k - \text{enkodér}_{k-1}|}{\Delta t} \quad (22)[60]$$

Úhel natočení zjistíme jako:

$$\theta = \frac{\text{levý enkodér} - \text{pravý enkodér}}{\text{vzdálenost mezi koly}} \quad (23)[60]$$

V kartézském souřadnicovém systému pak zjistíme pozici robota následovně:

$$X = s \cdot \sin(\theta) \quad (24)[60]$$

$$Y = s \cdot \cos(\theta) \quad (25)[60]$$

Se čtyřmi tiky na otáčku motoru a převodovým poměrem 30:1 získáme 120 tiků na otáčku kola. S využitím kvadrurního dekódování, kdy generujeme přerušování na náběžné i sestupné hraně obou kanálů, získáme čtyřnásobný počet tiků – 480 tiků na otáčku kola.

S průměrem kola 115 mm je rozlišení natočení kola:

$$r = \frac{\pi \cdot D}{480} = \frac{\pi \cdot 115}{480} = 0,753 \text{ mm} \quad (26)[60]$$

Nevýhodou snímání natočení na hřídeli motoru, je absence informace o malém natočení kola, které vzniká vůlí převodovky. Přesný senzor s vysokým rozlišením, který by snímal natočení přímo na kole a zároveň by byl řádově levnější než profesionální řešení, se mi však nepodařilo vyrobit.

9.7 Detekce překážek

V kapitole 4.2.1 byly popsány překážky, jejich druhy a důsledky, které překážky pro mobilní roboty představují.

9.7.1 Optické snímače

U optických senzorů používáme pro detekci překážek nejčastěji zdroje emitující infračervené světlo, které není okem viditelné a detektor k zachycení odraženého paprsku. Pro výběr detektoru překážek máme dvě možnosti:

- Senzor měřící vzdálenost od překážky
- Dorazový senzor, který pouze detekuje „přítomnost“ překážky

Z finančního i funkčního hlediska je nejlepší zkombinovat oba přístupy.

9.7.2 Snímač vzdálenosti

Pro detekci vzdálenosti před robotem využijeme již hotový odrazový infrasenzor Sharp GP2Y0A21 s vlastnostmi:

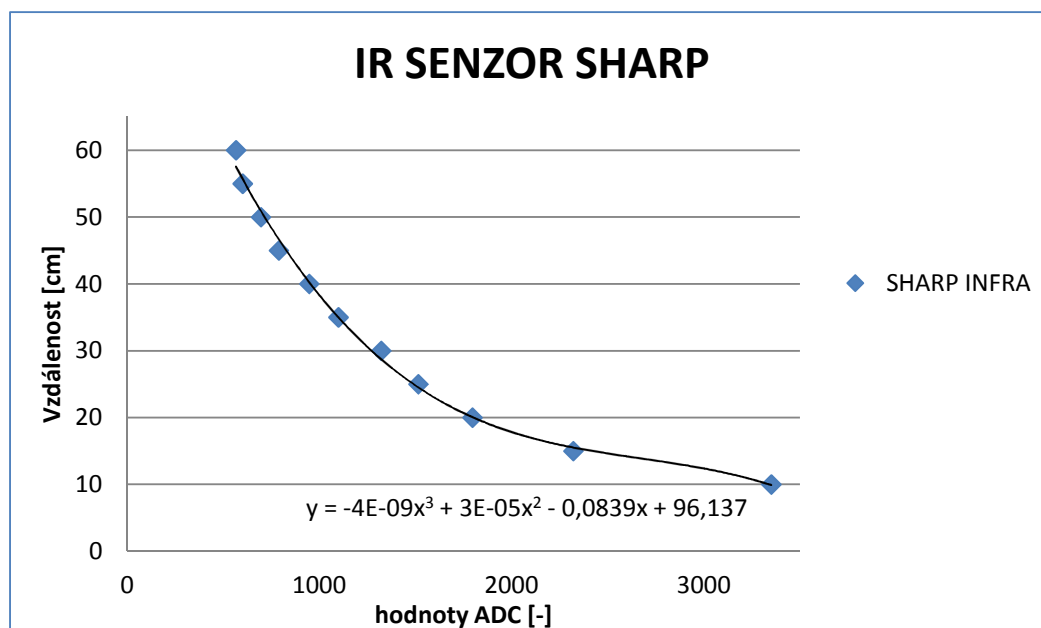
- Detekce na vzdálenost 10-80 cm
- Rozměry 40x13x13.5 mm
- Napájení 5 V/30 mA
- Výstup je napětí úměrné vzdálenosti

Senzor umístíme na přední straně robota (viz obr. 28).

Výstup senzoru připojíme na 12bitový ADC vstup mikropočítače a po kalibraci senzoru získáme ADC hodnoty v závislosti na vzdálenosti (Obr. 51).

Proložení bodů polynomem získáme závislost:

$$Vzd = -4 \cdot 10^{-9}x^3 + 3 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0839x + 96,137 \quad (27)$$

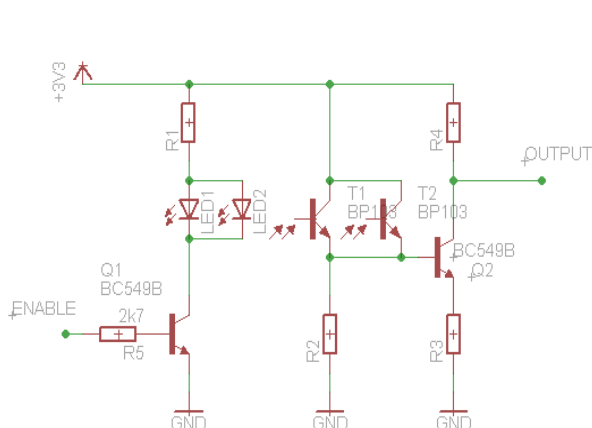


Obr. 51 Závislost ADC hodnot na vzdálenosti senzoru SHARP.

9.7.3 Dorazové snímače

Pro návrh dorazového senzoru pak musíme zvážit, na jakou vzdálenost je robot schopen při zaregistrování překážky zastavit. Stejně důležité je také správné rozmístění senzorů pro pokrytí co největší oblasti.

Zajímavou volbou pro dorazový senzor je IR LED doplněná fototranzistorem, který detekuje světlo o vlnové délce odpovídající vysílanému světlu z LED. Signál z fototranzistoru je zesílen a přiveden na ADC vstup mikropočítače. ADC vstup je použit kvůli rozdílným světelným podmínkám, ve kterých se robot vyskytuje. Nejprve přečteme hodnotu výstupu z obvodu (algoritmus viz obr. 53) při vypnuté LED, poté opakujeme měření se zapnutou LED a výsledky od sebe odečteme. Získáme tak hodnotu, která není zatížena rušením okolním světlem.



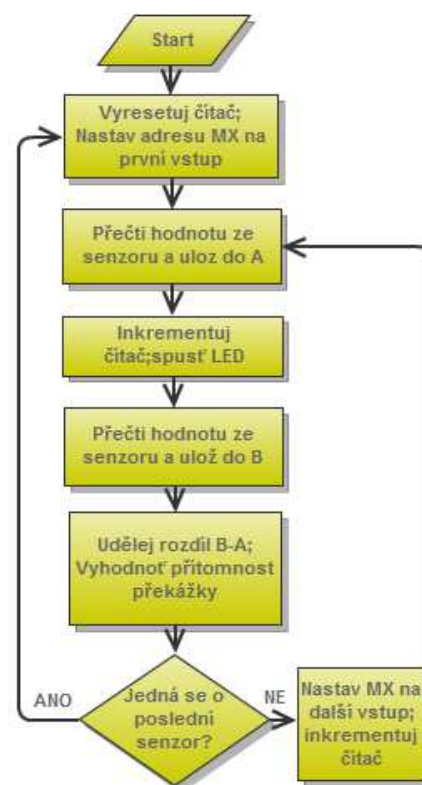
Obr. 52 Schéma dorazového IR senzoru.

Experimentálně bylo zjištěno, že nejlepší výsledky získáme použitím dvou IR LED zapojených paralelně a dvou paralelně zapojených fototranzistorů. Jako LED byly vybrány 5 mm IR940 firmy HB, s 20° úhlem osvětlení o výkonu 30 mW. Jako detektory byly použity fototranzistory L53P3BT. Ke spínání a zesílení signálu jsou v obvodu univerzální NPN tranzistory BC549b. Celé schéma obvodu je na obrázku 52.

Celková cena jednoho tohoto senzoru pak nepřesahuje 25kč.

Abychom zvýšili šance pro zjištění překážky v okolí robota, použijeme těchto senzorů více (minimálně 6, ideálně 9 pro dobré pokrytí okolního prostoru). Velké množství senzorů však vyžaduje i velké množství pinů mikropočítače pro jejich obsluhu. S cílem ulehčit mikropočítači práci, byl navržen elektronický obvod (Příloha 1.1.3), který v kombinaci s mikropočítačem spolupracuje s až devíti infrasenzy a využívá k tomu pouze 10 pinů mikropočítače (oproti 20 pinům při přímém zapojení).

Jednotlivé senzory zapínáme pomocí pinů mikropočítače přes tranzistory. Analogový multiplexer Philips HC4051, na jehož vstup jsou připojeny výstupy ze senzorů, pak na



Obr. 53 Algoritmus pro práci s dorazovými infrasenzy.

výstup přepíná vždy pouze jednu hodnotu. Přepínání výstupu multiplexeru zajišťuje mikropočítač – třemi vodiči nastavuje 3 bitovou adresu vstupu.

Dorazové překážkové IR senzory by bylo možné nahradit ultrazvukovým snímačem, umístěným na servomotoru. Nevýhodou takového řešení je vyšší cena a pomalejší odezva senzoru, výhodou pak nahrazení velkého množství senzorů pouze jedním senzorem a tím snížit složitost konstrukce i nároky na řízení a obslužný kód.

9.7.4 Návrh a implementace snímačů a obslužného modulu

IR Senzor SHARP pro měření vzdálenosti před robotem byl osazen, byla přezkoušena jeho funkce a změřena statická charakteristika, zaznamenaná na obr. 51. Dorazové optické snímače byly navrženy a jejich funkce vyzkoušena na nepájivém poli. Obslužný model, umožňující multiplexování naměřených hodnot, byl navržen jako elektronický obvod spolu s deskou plošných spojů (příloha 1.1.3) a řídicím algoritmem (obr. 53).

Modul ani dorazové senzory nebyly z nedostatku času vyrobeny a implementovány do obslužného kódu modelu. Jsou pouze připraveny jako varianta dalšího rozšíření.

9.8 Návrh komunikace

Pro komunikaci robota s ostatními zařízeními jako jsou mobilní telefon, PC, tablet, herní ovladače apod., je třeba tuto komunikaci umožnit skrze komunikační zařízení. V Kapitole 5, teoretické části, jsou popsány základní typy komunikace běžně využívané v robotice. V této kapitole budou popsány zařízení, které byly navrženy pro spolupráci s robotem a pro jejichž případnou implementaci byl vyčleněn prostor uvnitř těla robota a navržen komunikační obvod.

9.8.1 USB

Základním požadavkem na robota je možnost jej připojit k PC pro nahrání řídicího programu a jeho další ladění. Pro tyto účely je deska Freedom Board KL25Z vybavena USB Mini B konektorem. Pomocí něj můžeme komunikovat nejen s vývojovým softwarem, ale také po nakonfigurování jej lze využít pro komunikaci s uživatelem přes emulované sériové rozhraní nebo přímo přes USB protokol.

9.8.2 ZigBee

Avšak pouze s drátovým propojením robota s PC si při vývoji řídicího algoritmu nevystačíme, bylo by nutné při každé změně parametrů robota zastavit, otevřít a připojit znovu kabel pro zadání příkazu, případně nahrát novou verzi programu.

Pro tyto účely je vhodné použít bezdrátovou variantu klasické sériové linky – ZigBee (XBee) modul (viz obr. 54). Jako vhodný modul byl zvolen rádiový Bee DigiMesh, pracující na frekvenci 2,4 GHz a protokolu 802.15.4, s přenosovou rychlostí 250 kbps. S výkonem 1mW, dosahem až 100 m a možností spánkového režimu pro snížení příkonu, je plně dostačující pro projekt tohoto typu a rozpočtu.



V případě stavby větší verze modelu s více funkcemi, lze sáhnout po výkonnějších variantách s komunikačním dosahem až desítky kilometrů. Nevýhodou tohoto typu komunikace je, že potřebujeme také přijímač propojený s komunikujícím zařízením.

Obr. 54 XBee modul.

9.8.3 Bluetooth

Levnější alternativou k ZigBee/XBee je Bluetooth modul pracující na frekvenci 2,4 – 2,4835 GHz. Ma imální dosah Bluetooth komunikace je dáno třídou zařízení (a jí odpovídajícím vysílacím výkonu) v rozsahu 10 až 100 m. Pro tento projekt byl z hlediska nízkých nákladů použit Bluetooth modul třídy 3, s vysílacím výkonem 1 mW a maximálním dosahem 10 m. To v praxi dostačuje pro online ladění parametrů řídicího algoritmu a výpis dat z robota přes emulovanou sériovou linku. Rychlost komunikace lze zvolit, pro naše potřeby stačí základní přenosová rychlost 9600 baud.

V případě potřeby větší rychlosti nebo dosahu lze opět tento modul nahradit jeho výkonnější a dražší variantou. Výhodou Bluetooth modulu oproti ZigBee(XBee) je možnost snadné komunikace s mobilními zařízeními (mobilní telefon, tablet, herní ovladače).

9.8.4 Komunikační modul

Abychom mohli bezdrátově komunikovat skrze XBee a Bluetooth, potřebujeme obvod, který tyto periferie soustředí na jednu desku plošných spojů, která bude sloužit jako mezičlánek mezi periferiemi a deskou s řídicím mikrokontrolerem. Návrh tohoto obvodu i desky plošných spojů je uveden v příloze 1.1.1.

9.9 Výroba desek plošných spojů

V dnešní době představuje domácí výroba desky plošných spojů fotocestou velmi efektivní způsob z hledisek náročnosti na čas, finance a přesnost výsledné desky.

K výrobě DPS fotocestou jsou potřeba zejména:

- Cuprexitová deska s naneseným fotocitlivým lakem nebo cuprexitová deska a sprej s fotocitlivou emulzí (např. Positiv 20)
- Pauzovací papír nebo fólie do tiskárny
- Kvalitní laserová nebo inkoustová tiskárna
- Tenká lihová fixa
- Zdroj UV světla
- Program pro tvorbu schémat (např. EAGLE)
- Vývojku (roztok hydroxidu sodného a vody)
- Chlorid železitý nebo kyselina chlorovodíková s peroxidem vodíku
- Rozpuštěnou kalafunu nebo nevodivý ochranný lak

Nejprve tedy navrhne DPS, např. v programu EAGLE a vytiskneme jej v tiskárně na fólii nebo pauzovací papír. Pokud vyrábíme oboustranný plošný spoj, vytiskneme horní stranu zrcadlově otočenou a spodní stranu normálně. Je nutné klást důraz zejména na dostatečné krytí černou barvou, případné šmouhy nebo nečistoty by mohly způsobit chyby a nefunkčnost desky. Pokud není krytí dostatečné, můžeme spoje nebo plochy lihovou fixou dobarvit nebo motiv vytisknout několikrát a přesně k sobě přitisknout.

Vytištěný motiv desky následně připevníme na cuprexit. Při výrobě oboustranné desky musíme dát pozor, abychom měli horní i spodní stranu plošného spoje přesně napozicovanou. Poté můžeme přejít k osvětlení. Doba osvětlení je závislá na typu osvětlení, výkonu a vzdálenosti desky od zdroje UV světla. Tuto dobu lze zjistit experimentálně, pohybuje se v domácích podmínkách mezi desítkami sekund až desítkami minut.

Po osvětlení dáme desku vyvolat do rozpuštěného hydroxidu sodného v poměru asi 7-15 g na litr vody. Doba vyvolání se liší dle koncentrace roztoku, nejčastěji se pohybuje v řádu několika minut. Vyvolaná deska má odstraněnou fotocitlivou vrstvu na místech, kde nebyla zakryta fólií a lze ji tedy vyleptat. V případě zjištěné chyby, ji stále ještě můžeme napravit lihovou fi ou, kterou spoj opravíme.

Leptá se například v roztoku FeCl_3 (chloridu železitého) po dobu nezbytně nutnou k odleptání veškeré mědi, která nebyla krytá lakem. V případě, že bychom nechali desku v roztoku déle než je nutné, žíravina by mohla cesty podleptat a narušit. Po vyleptání odstraníme zbytky fotocitlivého laku a desku máme připravenou k osazení součástkami. Po osazení je nezbytné desku přetřít nevodivým ochranným lakem, v mém případě byla použita kalafuna rozpuštěná v lihu. Koncentrace kalafuny pak určuje dobu schnutí natřené desky [61].

9.9.1 Oživení elektronických obvodů

V této kapitole krátce popíšu postup, který používám při ožívování mnou navržených elektronických desek plošných spojů.

Při ožívování elektronických obvodů nejprve opticky zkontrolujeme, zda deska plošných spojů neobsahuje výrobní vady, slité cesty, přerušení, odleptané spoje apod. Po vizuální kontrole provedeme logickou kontrolu desky, odhalení chybně navrženého spoje před osazením nám ušetří čas i námahu při následných korekcích.

Po kontrole připojíme napájecí napětí o známém napětí a ověříme si měřicím přístrojem, zda je napájecí napětí rozvedeno ve správné polaritě ke všem součástkám a konektorům. Je-li to možné, rozdělíme si ožívovanou desku na části s nezávislou funkcí a provedeme jejich osazení a ozkoušení po částech. Osazovat začínáme od nejsložitějších součástek (např. MCU), či součástek s nejvyšší hustotou vodivých cest, jejichž osazení bývá zpravidla nejobtížnější a vyžaduje nejvíce volného prostoru pro manipulaci. Při osazování a opravách citlivých součástek dbáme na antistatickou ochranu, zabráníme tím zničení citlivých integrovaných obvodů.

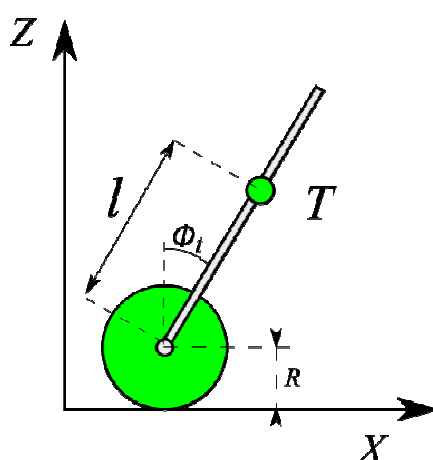
Po osazení jednotlivých částí zkontrolujeme jejich funkci připojením napájecího napětí a ozkoušením pomocí logické sondy, případně multimetrem. Jestliže se obvod nechová dle očekávání, nejprve odpojíme napájecí napětí a zkontrolujeme propojení souvisejících měděných cest, správné osazení součástek a opticky také kvalitu pájených spojů. Poté připojíme napájecí napětí a změříme elektrické veličiny v obvodu a porovnáme s očekávanými. Mezi nejčastější závady patří chyba v návrhu, špatným způsobem osazené součástky, špatný kontakt mezi součástkami nebo vady součástek. Nejhuře odhalitelné jsou vady v integrovaných obvodech, jež vykazují chybné stavy pouze někdy.

Všechny mnou navržené obvody pracovali dle očekávání na první zapojení, kromě desky s budičem DC motorů. Jeden z použitých SMD rezistorů byl osazen s chybnou hodnotou, která nebránila funkci budiče, ale na výstupu poskytoval motorům o 1,6 V nižší napětí než byl předpoklad. Teprve po důkladném překontrolování byla chyba objevena a napravena.

10 MATEMATICKÝ MODEL ROBOTA

Matematický model dvoukolového robota slouží k vyjádření vztahů dynamicky se měnících fyzikálních veličin, které je potřeba pozorovat a řídit. Získaný matematický model je možné v budoucnu využít pro simulaci chování reálného modelu, případně pro výběr ideálního typu regulátoru. V této kapitole budou zjištěny jednotlivé energie modelu a dosazeny do Lagrangeovy rovnice.

Dvoukolový balanční robot má tři stupně volnosti pohybu, avšak v tomto projektu nás primárně zajímá rotace robota kolem osy Y. Předpokládáme umístění těžiště do bodu T , veličina Φ_t představuje úhel odklonu bodu T od vertikály, l je vzdálenost těžiště od středu osy kol a R je poloměr kola (viz obr. 55). Všechny uvažované fyzikální veličiny jsou zapsány v tabulce 5 a 6.



Obr. 135 - Dynamický model.

10.1 Fyzikální veličiny

Tabulka 4 - Fyzikální veličiny těla robota.

Tělo robota		
Veličina	Popis veličiny	Jednotka
X_T	Pohyb těžiště T po ose X	m
Z_T	Pohyb těžiště T po ose Z	m
L	Vzdálenost těžiště T od osy kol	m
Φ	Úhel svírající osa robota procházející těžištěm od vertikály	rad
ω_t	Úhlová rychlost těla robota	rad/s
m_t	Hmotnost těla robota	kg
v_t	Rychlost těla robota v	m/s
E_{ktt}	Translační kinetická energie těla robota	J
E_{krt}	Rotační kinetická energie těla robota	J

E_{kt}	Celková kinetická energie těla robota	J
J_t	Moment setrvačnosti těla robota k ose otáčení	kgm^2
μ_1	Koeficient tření mezi tělem robota a koly	$kg \cdot s^{-1}$
G	Gravitační zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
E_p	Potenciální energie těla robota	J
E_z	Ztrátová energie soustavy	J

Tabulka 5 - Fyzikální veličiny kol robota.

Kola robota		
Veličina	Popis veličiny	Jednotka
M	Hmotnost kola	kg
v_k	Rychlost kola	$m \cdot s^{-1}$
R	Poloměr kola	m
ω_k	Úhlová rychlost kola	rad/s
J_k	Moment setrvačnosti kola k ose otáčení	kgm^2
E_{ktk}	Translační kinetická energie kola	J
E_{krk}	Rotační kinetická energie kola	J
E_{kk}	Celková kinetická energie kola	J
μ_0	Koeficient tření mezi koly a zemí	$kg \cdot s^{-1}$
T	Krouticí moment	Nm

10.2 Lagrangeova funkce

Souřadnice těžiště bodu T podél osy X a Z [64]:

$$X_T = x + l \cdot \sin \Phi_T \quad (27)[62]$$

$$Z_T = l \cdot \cos \Phi_T \quad (28)[62]$$

Pro tvorbu obyčejných diferenciálních rovnic systému využijeme Lagrangián.

V klasické mechanice je Lagrangián definován jako rozdíl kinetické a potenciální energie:

$$L = T - V \quad (29)[62]$$

Kde T je kinetická energie a V potenciální energie systému.

Obecnější tvar Lagrangiánu je pak:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_r} = Q_r \quad (30)[62]$$

Kde q_r ($r=1,2,3,\dots,n$) jsou zobecněné souřadnice/proměnné a Q_r je suma nekonzervativních sil.

Abychom mohli sestavit Langrangiánovu rovnici, musíme nejprve určit kinetické a potenciální energie systému. Ty můžeme rozdělit na:

- Kinetickou energii (translační a rotační)
- Potenciální energii
- Ztrátovou energii

Rovnice 31 popisuje Lagrangiánovu rovnici dvoukolového balančního robota, kde E_k je kinetická energie, E_p je potenciální energie, E_z je ztrátová energie a t je požadovaný kroutící moment pro levé a pravé kolo:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{E_k}{\partial q_r} + \frac{E_z}{\partial \dot{q}_r} + \frac{E_p}{\partial q_r} = t \quad (31)[62]$$

10.3 Energie v systému

10.3.1 Kinetická energie těla robota

Translační kinetická energie těla robota s rychlostí v , konstantní hmotností m a těžištěm T byla určena jako:

$$E_{ktt} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m (\dot{X}_T^2 + \dot{Z}_T^2) \quad (32)[62]$$

S využitím rovnice 27 a 28, dosazených do rovnice 32, získáme po úpravě rovnici translační kinetické energie těla:

$$E_{ktt} = \frac{1}{2} m (v^2 + l^2 \omega_T^2) + m v l \omega_T \cos(\Phi_T) \quad (33)[62]$$

Rotační kinetickou energii těla robota získáme jako:

$$E_{krt} = \frac{1}{2} J_T \omega_T^2 \quad (34)[62]$$

Kde J_T je moment setrvačnosti těla robota a ω_T je úhlová rychlost těžiště T . Celková kinetická energie těla robota je tedy rovna:

$$E_{kt} = E_{ktt} + E_{krt} \quad (35)[62]$$

$$E_{kt} = \frac{1}{2} m (v^2 + l^2 \omega_T^2) + m v l \omega_T \cos(\Phi_T) + \frac{1}{2} J_T \omega_T^2 \quad (36)[62]$$

10.3.2 Kinetická energie kol robota

Translační kinetická energie kol byla určena jako:

$$E_{ktk} = 2 \cdot \frac{1}{2} M v^2 = M v^2 \quad (37)[62]$$

Rotační kinetická energie kol pak odpovídá:

$$E_{krk} = 2 \cdot \frac{1}{2} J_K \omega_K^2 = J_K \frac{v^2}{R^2} \quad (38)[62]$$

Kde J_T je moment setrvačnosti těla robota a ω_K je úhlová rychlost jednoho kola. Celková kinetická energie kol robota je tedy rovna součtu translační a rotační kinetické energie:

$$E_{kk} = E_{ktk} + E_{krk} \quad (39)[62]$$

$$E_{kk} = Mv^2 + J_K \frac{v^2}{R^2} \quad (40)[62]$$

Celková kinetická energie systému se určí součtem částí kinetické energie těla robota a jeho kol:

$$E_k = E_{kt} + E_{kk} \quad (41)[62]$$

$$E_k = \frac{1}{2} m(v^2 + l^2 \omega_T^2) + mvl\omega_T \cos(\Phi_T) + \frac{1}{2} J_T \omega_T^2 + Mv^2 + J_K \frac{v^2}{R^2} \quad (42)[62]$$

10.3.3 Celková potenciální energie systému

Potenciální energie kol zůstává při pohybu konstantní, mění se pouze potenciální energie naklápěného těla robota. Celková potenciální energie systému E_p je tedy rovna:

$$E_p = mgl \cos(\Phi_T) \quad (43)[62]$$

10.3.4 Celková ztrátová energie systému

Celkovou ztrátovou energii systému E_z určíme jako:

$$E_z = \mu_0 \cdot v^2 + \mu_1 \omega_T^2 \quad (44)[62]$$

Kde μ_0 je koeficient tření mezi kolem a zemí, μ_1 zastupuje koeficient tření mezi tělem robota a osou rotace kol.

10.4 Lagrangeovy rovnice systému

Jako první zobecněná souřadnice byla zvolena změna pozice robota x , tedy $q_1 = x$. Platí tedy:

$$\frac{\partial E_k}{\partial q_1} = \frac{\partial E_k}{\partial x_1} = \frac{\partial E_k}{\partial v} = mv + ml \cos(\Phi_T) \ddot{\Phi}_T + 2M\ddot{x} + 2J_K \frac{\ddot{x}}{R^2} \quad (45)[62]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial v} \right) = \left(m + 2M + \frac{2J_K}{R^2} \right) \ddot{x} + ml(\cos(\Phi_T)) \ddot{\Phi}_T \quad (46)[62]$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial q_1} = \frac{\partial E_k}{\partial x} = 0 \quad (47)[62]$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial q_1} = \frac{\partial E_z}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial E_z}{\partial v} = 2\mu_0 v \quad (48)[62]$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial q_1} = \frac{\partial E_p}{\partial x} = 0 \quad (49)[62]$$

První diferenciální rovnici systému získáme součtem rovnic 46 až 49:

$$\left(m + 2M + \frac{2J_K}{R^2} \right) \ddot{x} + ml(\cos(\Phi_T)) \ddot{\Phi}_T + 2\mu_0 v = 0 \quad (50)[62]$$

Jako druhou zobecněnou souřadnici zvolíme náklon robota v ose y :

$$q_2 = \Phi_T \quad (51)[62]$$

Pohybové rovnice budou sestaveny na základě parciálních derivací podle q_2 , tedy:

$$\frac{\partial E_k}{\partial q_2} = \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\Phi}_T} = \frac{\partial E_k}{\partial \omega_T} = ml^2 \omega_T + mvl \cos(\Phi_T) + J_K \omega_T \quad (52)[62]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \omega_T} \right) = (ml^2 + J_K) \ddot{\Phi}_T + ml(\cos(\Phi_T))x \quad (53)[62]$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial q_2} = \frac{\partial E_k}{\partial \Phi_T} = -mv l(\sin(\Phi_T))\omega_T \quad (54)[62]$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial \dot{q}_2} = \frac{\partial E_z}{\partial \omega_T} = 2\mu_1 \omega_T \quad (55)[62]$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial q_2} = \frac{\partial E_p}{\partial \Phi_T} = -mgl(\sin(\Phi_T)) \quad (56)[62]$$

Složením rovnic 53 až 56 získáme druhou diferenciální rovnici systému:

$$ml(\cos(\Phi_T))\ddot{x} + (ml^2 + J_K)\ddot{\Phi}_T + (mv\omega_T - mg)l(\sin(\Phi_T) + 2\mu_1\omega_T) = T_L + T_R \quad (57)[62]$$

10.5 Linearizace rovnic dynamiky

Rovnice 50 a 57 představují dvě nelineární rovnice dvoukolového balančního robota. Abychom je mohli využívat např. pro návrh lineárního regulátoru, musíme je nejprve zlinearizovat. Jediný rovnovážný stav vyváženého balančního robota je v případě, že $\Phi_T = 0$.

Uvažujeme tedy:

$$\sin(\Phi_T) \approx \Phi_T \quad (58)[62]$$

$$\cos(\Phi_T) \approx 1 \quad (59)[62]$$

Dosazením do našich získaných diferenciálních rovnic 50 a 57, získáme zlinearizované rovnice dynamiky našeho systému:

$$\left(m + 2M + \frac{2J_K}{R^2} \right) \ddot{x} + ml\ddot{\Phi}_T + 2\mu_0 v = 0 \quad (60)[62]$$

$$ml\ddot{x} + (ml^2 + J_K)\ddot{\Phi}_T + (mv\omega_T - mg)l\Phi_T + 2\mu_1\omega_T = T_L + T_R \quad (61)[62]$$

10.6 Parametry robota

Jednotlivé parametry robota vyskytující se v linearizovaných diferenciálních rovnicích byly změřeny a zaneseny do tabulky 7.

Tělo robota bylo pro zjednodušení výpočtů uvažováno jako pravidelný kvádr. Rovnice 62 byla použita pro výpočet momentu setrvačnosti těla robota:

$$J_T = \frac{1}{12} m(h^2 + d^2) \quad (62)[62]$$

Kde h je výška kvádrů a d je hloubka šasi.

Pro výpočet momentu setrvačnosti kola jsme jej uvažovali jako válec. Rovnice momentu setrvačnosti tedy je:

$$J_K = \frac{1}{2} MR^2 \quad (63)[62]$$

Kde M je hmotnost kola a R je poloměr kola.

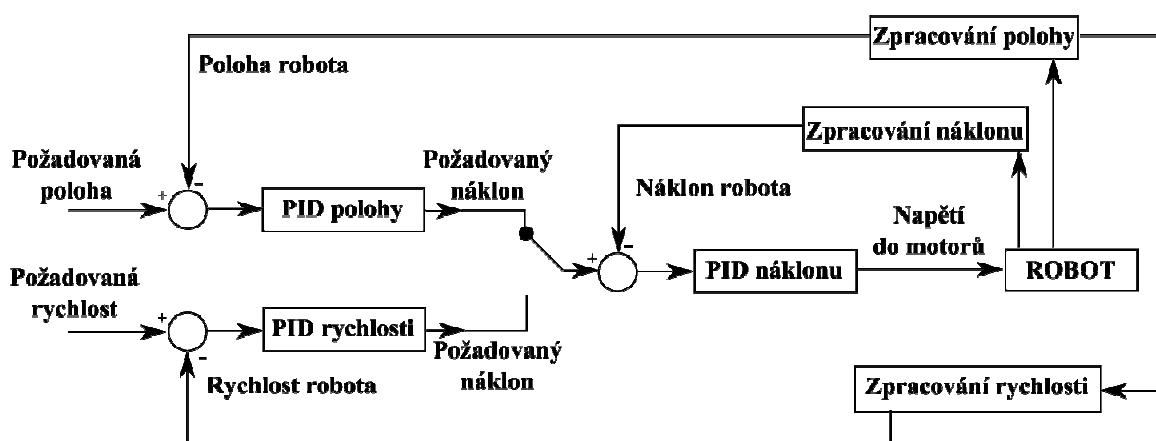
Tabulka 6 - fyzické parametry modelu robota.

Parametr	Popis parametru	Jednotka
$g=9,81$	Gravitační zrychlení	m/s
$m=1,002$	Hmotnost těla robota	kg
$J_T=0,00436$	Moment setrvačnosti těla robota	kgm^2
$R=0,0575$	Poloměr kola	m
$J_K=0,000124$	Moment setrvačnosti kola	kgm^2
$M=0,075$	Hmotnost kola	kg
$w=0,13$	Šířka těla robota	m
$d=0,065$	Hloubka těla robota	m
$H=0,22$	Výška těla robota	m

11 ŘÍZENÍ ROBOTA

Řídicí algoritmus využívá dvou kaskádně zapojených číslicových PID regulátorů a zpětnovazební smyčky. Jednou z hlavních výhod dvou PID regulátorů zapojených do série, je lepší dynamika regulace a schopnost v jednom cyklu regulovat dvě veličiny.

První z PID regulátorů (PID polohy nebo rychlosti) reguluje pomocnou veličinu, jeho výstupem je požadovaná hodnota pro druhý PID regulátor, který následně reguluje rychleji se měnící hlavní regulovanou veličinu, čímž je náklon robota. Celkové zjednodušené blokové řídicí schéma modelu (pro jeden motor) lze vidět na obr. 56.



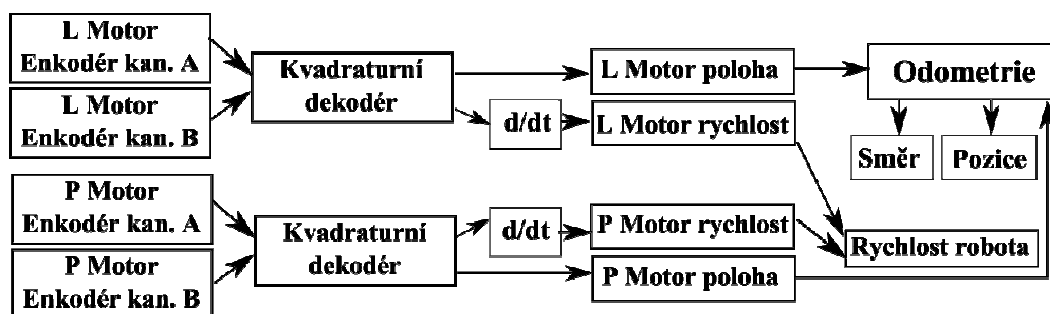
Obr. 56 Blokové řídicí schéma modelu.

Vzhledem k výrobním odlišnostem obou motorů je pro správné a přesné fungování algoritmu nutné celý řídicí proces provést dvakrát, pro každý motor samostatně.

11.1 Zpracování signálů ze snímačů

11.1.1 Zpracování enkodérů

Abychom mohli realizovat zpětnou vazbu v regulačním obvodu, potřebujeme snímat výstupní veličinu. Blokové schéma měření polohy a rychlosti je na obr. 57. Vstupem jsou tiky dvoukanálových enkodérů, jejichž kvadrurní zpracování je uvedeno v kapitole 2.6.3 praktické části. Výstupem je poloha levého a pravého motoru v tících a rychlost otáčení obou motorů v tících/s. Výstup je opatřen znaménkem, vždy tedy známe nejen ujetou vzdálenost a rychlost, ale také směr pohybu.



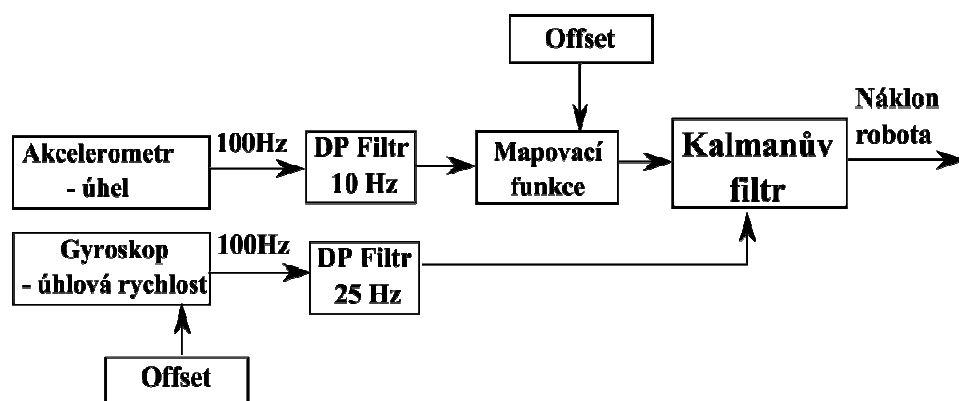
Obr. 57 Blokové schéma zpracování signálu z enkodérů.

11.1.2 Zpracování snímání náklonu

Základem tohoto měřicího obvodu je Kalmanův filtr, popsáný v kapitole 2.5.2 praktické části.

Prvním vstupem do filtru je úhel náklonu, získaný z akcelerometru s digitálním výstupem, jehož hodnota je načítána s frekvencí 100 Hz. Takto získaná hodnota v rozsahu 0-4095 je nejprve filtrována filtrem typu dolní propust pro redukci špiček vzniklých vibracemi z motoru a předána mapovací funkci, která linearizuje výstupní charakteristiku akcelerometru. K namapované hodnotě je dále přičten offset, způsobený osovou nevyvážeností robota.

Druhým vstupem Kalmanova filtru je úhlová rychlost gyroskopu, vzorkovaná s frekvencí 100 Hz, přepočtená dle hodnot z datasheetu k senzoru, na stupně/s. Výsledná hodnota je pro snížení vlivu vibrací z motoru na senzor vyfiltrována filtrem typu dolní propust s mezní frekvencí 25 Hz. Celá situace je znázorněna na obr. 58.



Obr. 58 Blokové schéma měření náklonu.

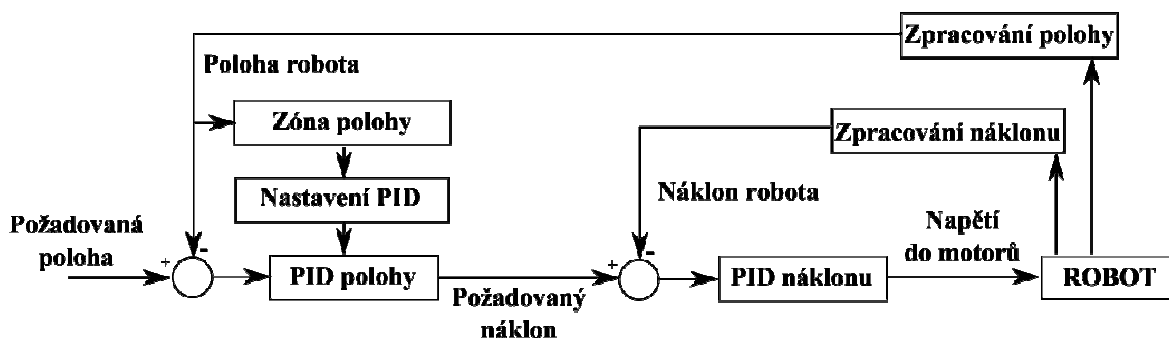
11.2 Řídicí algoritmus

Algoritmus lze rozdělit na několik dílčích částí:

- Balancování na místě
- Jízda vpřed/vzad
- Brzdění
- Otáčení

11.2.1 Řízení balancování

Balancování na místě je defaultně nastavená funkce robota po zapnutí. Robot detekuje tiky enkodérů, z nich spočítá směr a polohu obou motorů. Tyto informace jsou předány PID regulátoru polohy, který informaci porovná s požadovanou polohou (zde vždy nulová) a vypočte požadovaný úhel náklonu robota tak, aby se robot vrátil do původní pozice. Vypočtený náklon je předán do PID regulátoru náklonu, který jej porovná s informací o náklonu získanou z Kalmanova filtru a z rozdílu mezi žádanou a skutečnou hodnotou vypočte napětí ve formě PWM do levého a pravého motoru.

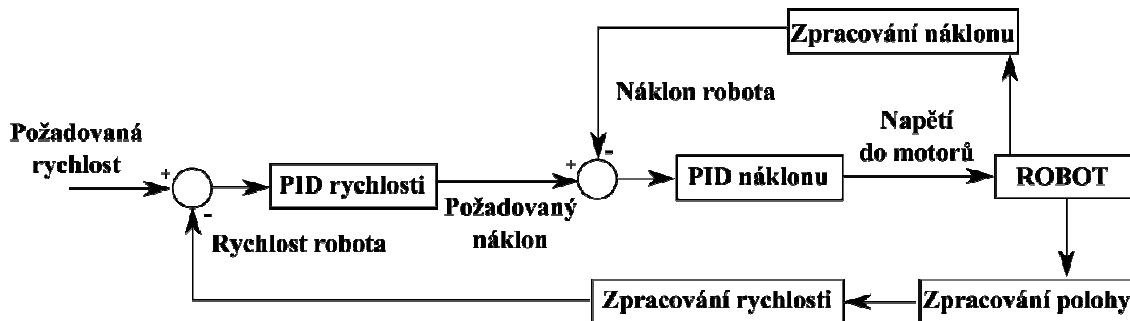


Obr. 59 Blokové schéma balancování pro jeden motor.

Algoritmus je dále upraven vytvořením tří zón, ve kterých se robot při balancování může nacházet. Každá zóna má jinak nastavené parametry PID regulátoru a může tak lépe a rychleji reagovat na poruchové veličiny v závislosti na odchylce od žádané hodnoty polohy.

11.2.2 Řízení jízdy

Při požadavku jízdy vpřed/vzad, se přepne z PID regulátoru polohy na PID regulátor rychlosti, do nějž vstupuje zadaná požadovaná rychlost se znaménkem dle žádaného směru pohybu a porovná se se skutečnou rychlostí obou motorů. Výstupem regulátoru rychlosti je požadovaný náklon robota, který vstupuje jako žádaná hodnota do PID regulátoru náklonu (viz Řízení balancování).

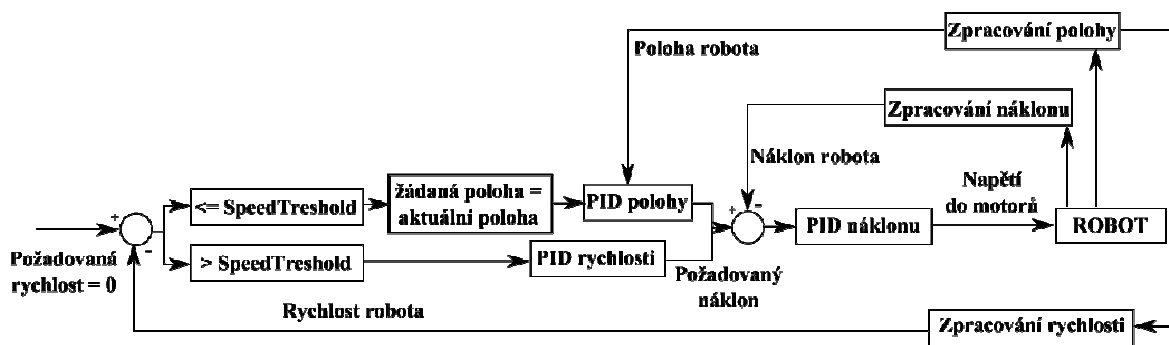


Obr. 59 Blokové schéma jízdy pro jeden motor.

11.2.3 Řízení brzdění

Jestliže během jízdy vpřed/vzad dostane robot příkaz k zastavení, nastaví žádanou hodnotu rychlosti na nulu. Snižující se rychlost dále sleduje a v okamžiku, kdy dojde ke zpomalení pod určitou mez, přepne regulátor rychlosti na regulátor polohy. Žádaná hodnota polohy robota je nastavena jako poloha, při které došlo k přepnutí regulátorů.

Tímto způsobem jsme schopni robota plynuleji řídit, aniž by došlo k velkému překmitu, způsobenému setrvačností, a následnému vracení se do vzdálené požadované polohy.



Obr. 60 Blokové schéma brzdění pro jeden motor.

11.2.4 Řízení otáčení

V případě, že robot chce změnit směr, musí nejprve zastavit a přepnout se do režimu balancování, tudíž jeho rychlost musí klesnout pod určitou hranici, v programu označovanou jako SpeedTreshold. Zastavení a přepnutí režimů obstarává program. Pro demonstraci otáčení je v programu nastaveno otočení o 90° vlevo/vpravo. Po zastavení si algoritmus uloží z enkodérů aktuální polohu robota a nastaví požadovanou polohu pro levý motor jako:

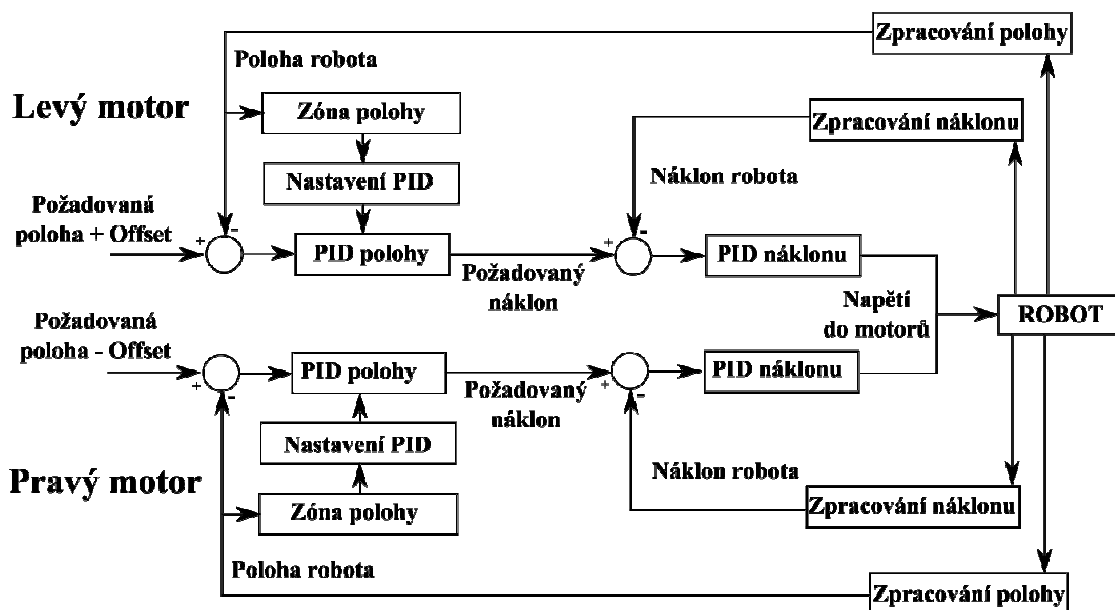
$$L_{\text{žádaná pozice}} = L_{\text{Pozice}} + \text{Offset} \quad (64)[62]$$

Pro pravý motor analogicky:

$$P_{\text{žádaná pozice}} = P_{\text{Pozice}} - \text{Offset} \quad (65)[62]$$

Kde Offset se vypočítá jako:

$$\text{Offset} = \frac{\text{Poloměr}_{\text{otáčení}}}{2} \quad (66)[62]$$



Obr. 61 Blokové schéma otáčení.

12 VYHODNOCENÍ

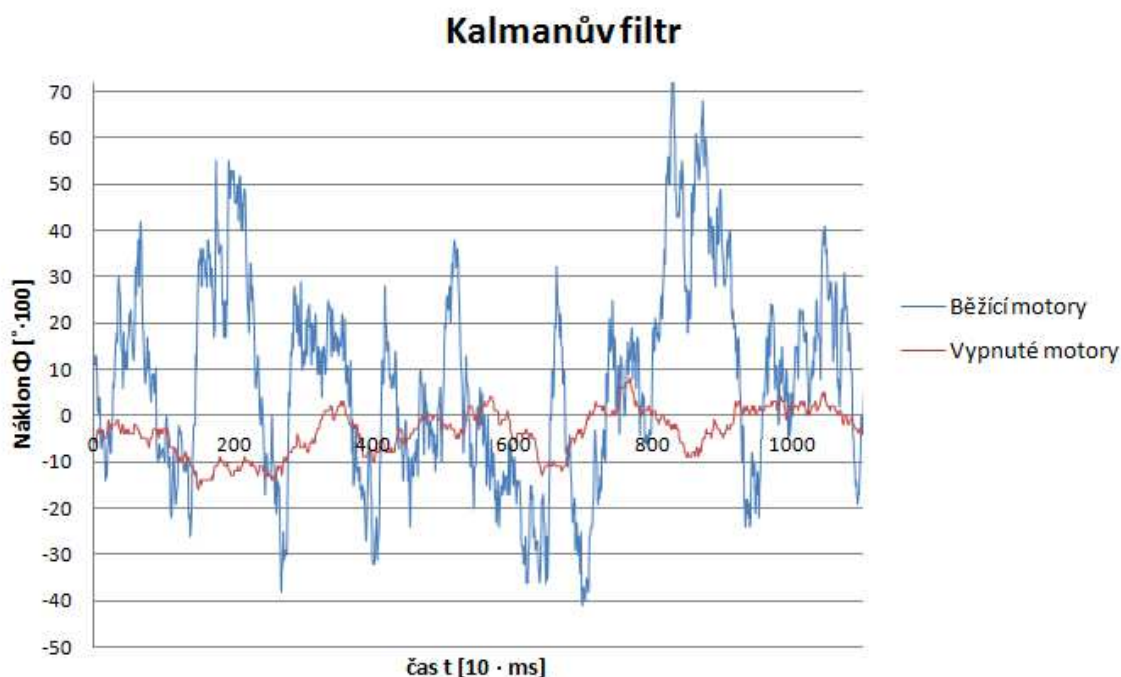
Tato kapitola se zabývá vyhodnocením funkčnosti modelu a jeho částí v kombinaci s navrženými algoritmy řízení. Celý systém řízení je naprogramován v jazyce C, ve vývojovém software CodeWarrior v10.3b firmy Freescale. Zdrojový kód je uveden v příloze 1.3.

12.1 Kalibrace a filtrace senzorů

Pro správnou funkci zpětnovazebního řídicího systému potřebujeme co nejpřesnější údaje ze snímačů. V kapitole 2.5.4 praktické části byly pomocí Kalmanova filtru sloučeny naměřené údaje z gyroskopu a akcelerometru (viz obr. 46). Naměřené údaje vykazovaly předpokládaný šum, jež neměl na funkci filtru žádný výrazný negativní vliv.

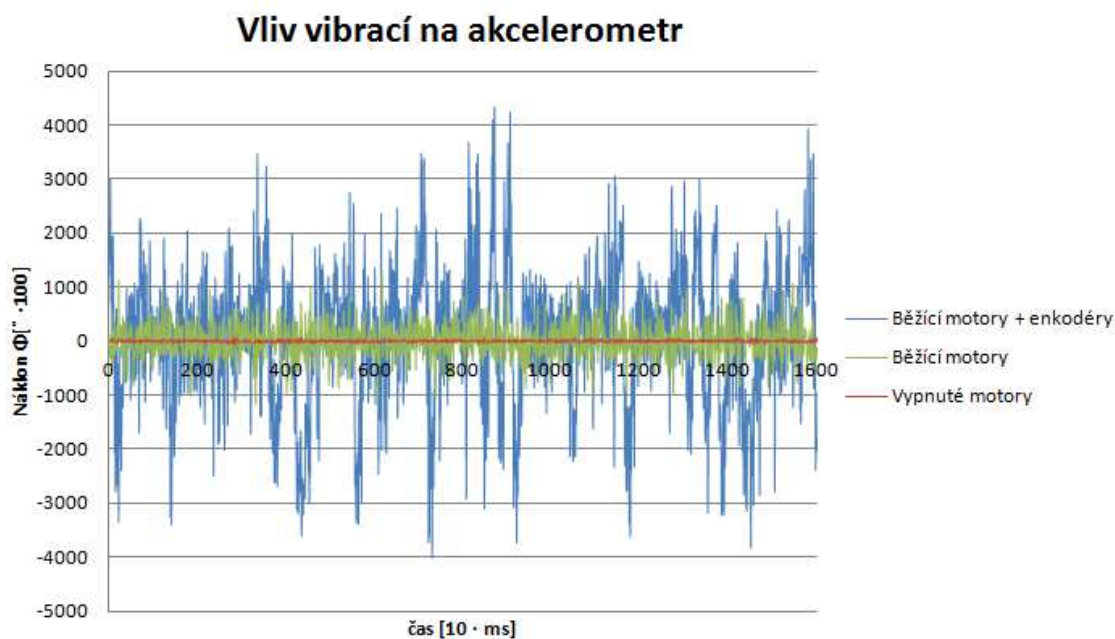
12.1.1 Vibrace

Při zapnutí motorů robota se však situace změnila. Důsledkem vibrací přenášených z volně běžících motorů na inerciální snímače se zvýšila hodnota šumu po aplikování Kalmanova filtru až šestinásobně (viz obr. 62).



Obr. 62 Vliv vibrací motoru přenášených na inerciální snímače.

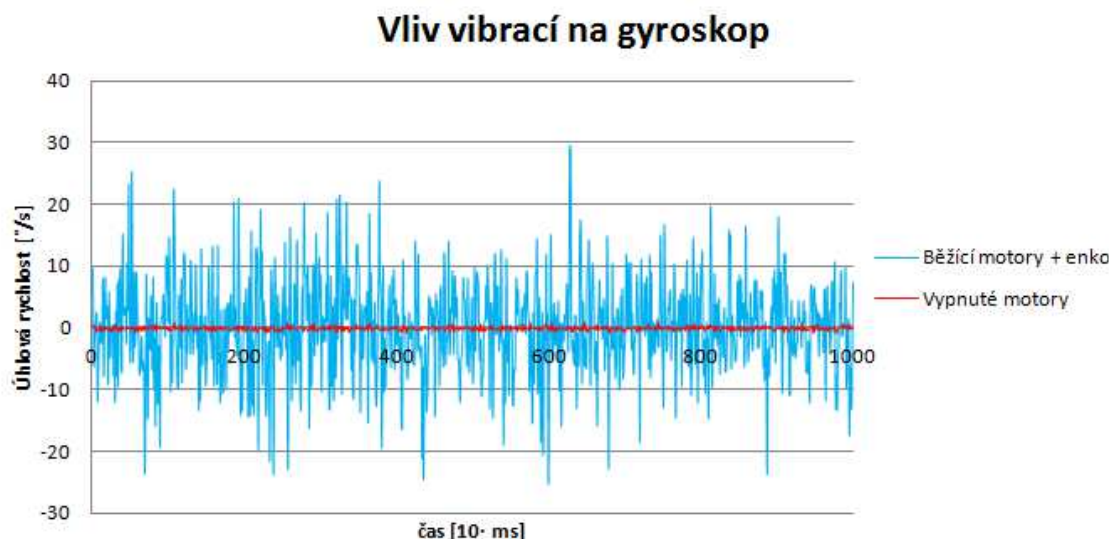
Vibrace přenášené na snímače způsobily výrazné oscilace robota kolem rovnovážné polohy. Amplituda vibrací se dále zvýšila po nainstalování dřevěných enkodérů na hřídelku motoru (viz obr. 63).



Obr. 63 Vliv běžících motorů a enkodérů na hodnoty akcelerometru.

Podobná situace nastává u gyroskopu, který je však na vibrace méně citlivý. Na obrázku 64 je znázorněna závislost úhlové rychlosti v čase, v klidové poloze při běžících/vypnutých motorech.

S vypnutými motory měření náklonu akcelerometrem v klidové poloze dosahuje mezních hodnot $\pm 1^\circ$. Se zapnutými motory a enkodéry dosahují amplitudové špičky až 4300% původní hodnoty. Z grafu lze také vyčíst, že největší podíl na šumu mají právě enkodéry, jejichž nevyváženost vážným způsobem narušuje průběh měření.



Obr. 64 Vliv běžících motorů a enkodérů na hodnoty gyroskopu.

S vypnutými motory měření úhlové rychlosti gyroskopem v klidové poloze dosahuje špičkově hodnot $\pm 1^\circ/\text{s}$. Se zapnutými motory a enkodéry dosahují amplitudové špičky až 3000% původní hodnoty.

12.1.2 Návrh řešení vibrací

Pro potlačení vlivu vibrací na inerciální snímače máme několik možností:

- **Odstranit původ vibrací.**

Odstranění původu vibrací se ukázalo v podmínkách, ve kterých byl robot vyráběn, jako neuskutečnitelné. Pokusy o lepší vyváženost enkodérových kotoučů či pevnější spojení motorů se šasi robota nepřinesly žádaný výsledek a na velikosti amplitudy vibrací neměly výrazný vliv. I přes tyto neúspěchy je z průběhu na obr. 66 jasné vidět, že dokonale vyvážené enkodéry nebo jiné druhy enkodéru, by měly na přesnost měření výrazný vliv.

- **Omezit jejich přenos na snímače.**

Další variantou potlačení vlivu vibrací bylo omezení jejich přenosu na samotné snímače. Pro tuto variantu byla pořízena oboustranně lepící pěnová páska o výšce 2 mm, kterou jsem ve dvou vrstvách umístil mezi šasi robota a desku plošných spojů, na které byl snímač umístěn. Bylo tedy třeba aplikovat tlumení na destičku s gyroskopem a na celý vývojový kit s mikrokontrolerem, na kterém byl umístěn akcelerometr.

Nedokonalostí tohoto typu řešení je nemožnost tlumení vibrací, přenášených z ostatních elektronických modulů na desky se snímači skrze vodiče. Ideálním řešením by byla kombinace první metody – potlačení vzniku vibrací a druhé metody – omezení jejich přenosu na snímače přidáním tlumících prvků na všechny komponenty, které jsou ve fyzickém styku se snímači.

- **Filtrování snímané hodnoty a softwarové úpravy**

Třetí možností potlačení vlivu vibrací byly softwarové úpravy.

- o U akcelerometru s digitálním výstupem byl dle datasheetu [53] snížen měřený rozsah z $\pm 4\text{G}$ na $\pm 2\text{G}$ a v konfiguračním registru nastaven režim High resolution a Low Noise. Metoda oversamplingu, spočívající v naměření několika vzorků, jejich zprůměrování a odeslání do mikrokontroleru, byla zvýšena ze 4 vzorků na 16.

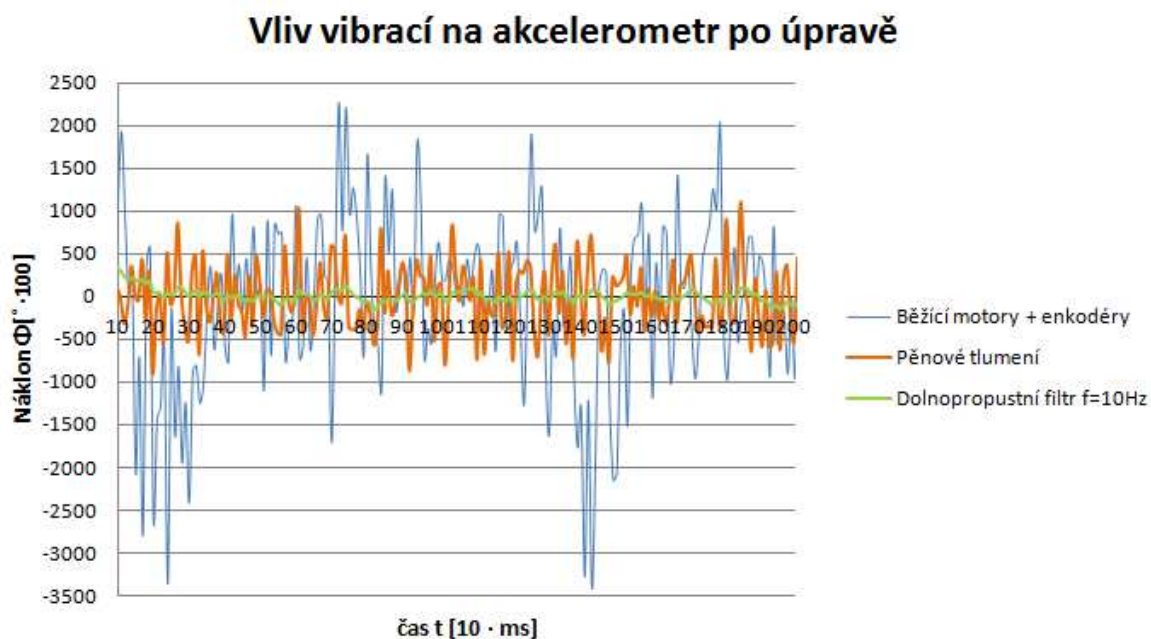
Dalším krokem bylo filtrování snímaných hodnot akcelerometru dolnoproputným filtrem s mezní frekvencí 10Hz, ještě před odesláním dat do Kalmanova filtru.

- o Gyroskop s analogovým výstupem tolik možností nastavení neposkytoval. Zaměřil jsem se tedy na snímání hodnot úhlové rychlosti AD převodníkem. Nejprve bylo zvýšeno rozlišení AD převodníku z 12 na 16 bitů. Pro další zvýšení přesnosti měření byl prodloužen čas, potřebný na převod vzorku a hardwarový oversampling byl nastaven na 8 vzorků, z nichž byl proveden aritmetický průměr.

Softwarové filtrování hodnot z gyroskopu bylo provedeno dolnoproputným filtrem s mezní frekvencí 25 Hz.

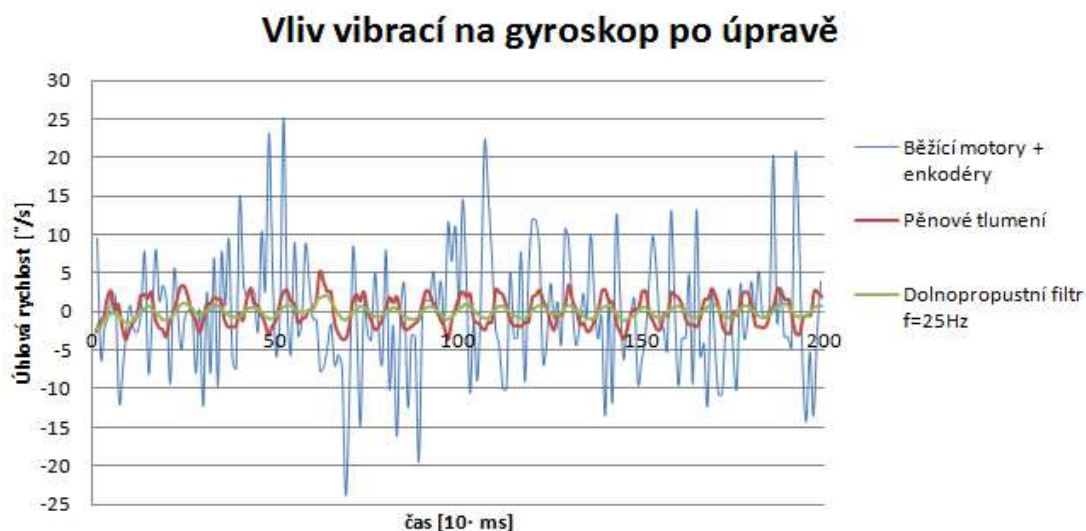
12.1.3 Diskuze výsledků řešení vibrací

Po aplikování všech navržených řešení v kapitole 5.1.2 praktické části, bylo provedeno nové měření za stejných podmínek. Na obrázku 65 lze vidět graf srovnávající na malém časovém úseku původní průběh měření náklonu akcelerometrem, s pěnovým tlumením, softwarovými úpravami a filtrem typu dolní propust (softwarové úpravy a filtrování bylo aplikováno po přidání pěnového tlumení).



Obr. 65 Vliv vibrací na akcelerometr po navržených úpravách.

Vlivem popsaných metod v kapitole 5.1.2 bylo dosaženo snížení amplitudy rozkmitu akcelerometru v klidovém stavu s běžícími motory na $\pm 1^\circ$, tedy navržené řešení přineslo potlačení vlivu vibrací až o cca 97%.



Obr. 66 Vliv vibrací na gyroskop po navržených úpravách.

Na obrázku 66 pak můžeme vidět průběh závislosti úhlové rychlosti gyroskopu v čase, s aplikovaným tlumením, následnými softwarovými úpravami a filtrací dolnopropustním filtrem. Navržené řešení zvýšilo útlum rozkmitu měřené veličiny až o cca 90%.

12.2 Nastavení PID regulátorů

Balancování robota, jízda i udržování nastavené pozice bylo regulováno PID regulátory (schéma viz obr. 59). Pro správnou funkci regulátoru musí být proporcionální, integrační i derivační složka regulátoru správně nastavena.

Postup ladění regulátoru vycházel z Ziegler-Nicholsovy metody:

- 1) Nastavit hodnotu požadované veličiny, vypnout derivační a integrační složku.
- 2) Zvyšovat proporcionální složku, až do chvíle, kdy se v regulovaném průběhu objeví oscilace o konstantní periodě a amplitudě.
- 3) Snížit proporcionální složku na $1/2$.
- 4) Postupně zvyšovat derivační složku a testovat její vliv na snížení amplitudy oscilací kolem žádané hodnoty, tak aby odezva na poruchovou veličinu byla co nejrychlejší a překmit co nejvíce zatlumený.
- 5) Pomalu zvyšovat integrační složku, do doby, než začne robot oscilovat kolem žádané hodnoty, poté integrační složku snížit na $1/2$.
- 6) Dalšími úpravami doladit parametry PID tak, aby vznikl kompromis mezi velikostí oscilací a rychlostí reakce na poruchu a změnu žádané veličiny.

12.2.1 Vyhodnocení balancování

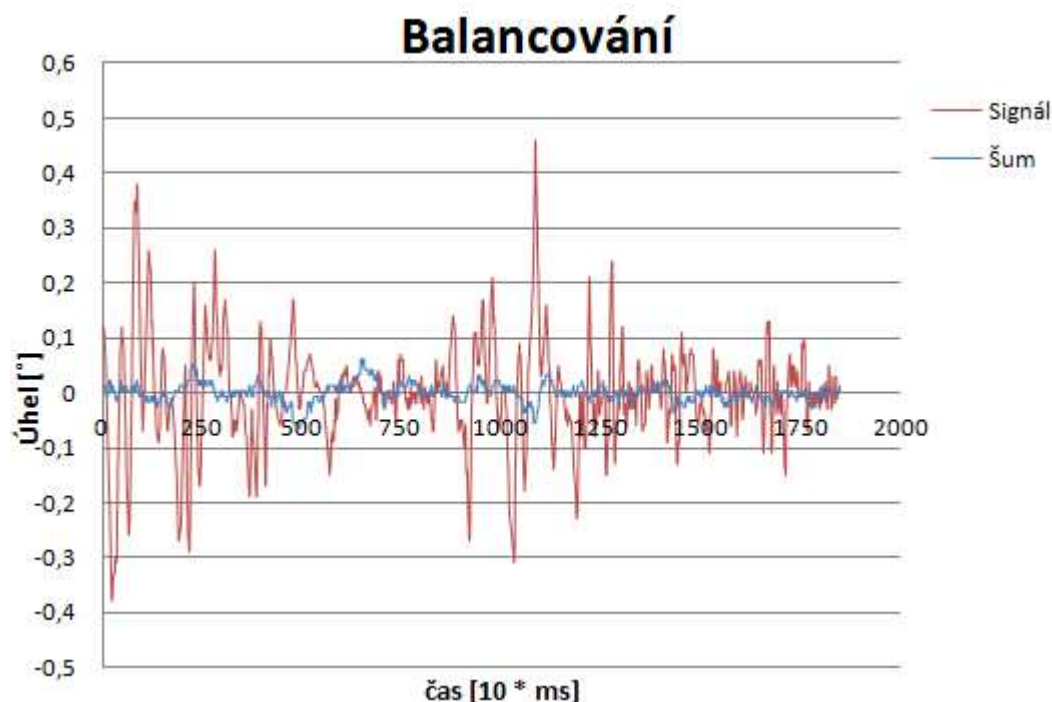
Pro ověření schopnosti balancovat byl robot umístěn na rovný povrch, zapnut a ponechán 18 vteřin bez vnějších poruchových vlivů v režimu balancování a současného udržování žádané (nulové) pozice. Určitá oscilace těla robota kolem rovnovážné polohy byla předpokládána kvůli nelinearitám v soustavě a měřením byl tento předpoklad potvrzen. Pro výpočet odstupů signál šum byl také změřen šum při dalším měření.

Při testování na reálném modelu jsem však narazil na omezení, vycházející z nelinearit v soustavě – nedokonalé enkodéry a výrazně rozdílná vůle převodovek motorů znemožnila naladění regulátorů a odladění algoritmu v rozumném čase natolik, aby robot balancoval stabilně. Pro další testování balancování, jízdy a otáčení, byl použit vždy pouze pravý nebo levý enkodér.

Vypočtené statistické hodnoty balancování jsou uvedeny v tabulce 8. Naměřená oscilace robota kolem rovnovážné polohy je zachycena v grafu na obrázku 68 spolu s ukázkou šumu, který byl pro informaci naměřen zvlášť.

Tabulka 8 – vyhodnocení balancování

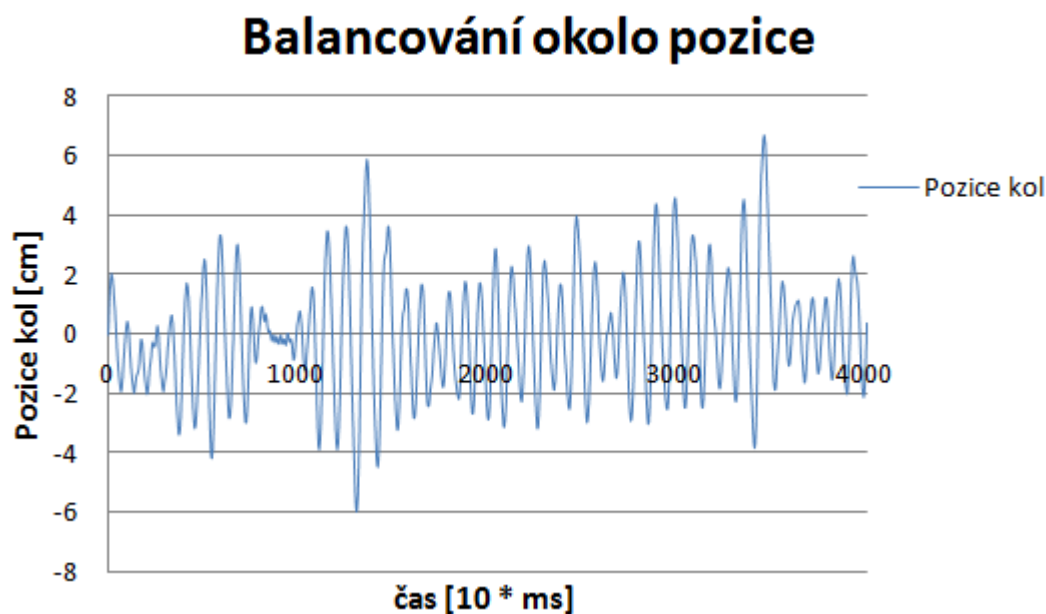
RMS signálu [°]	RMS [°]	SNR [db]	Směr. odchylka [°]	Rozptyl [° ²]	Frekvence oscilací [Hz]	Max. výchylka [°]
0,09721	0,01776	14,764	0,09718	0,009445	3,704	0,46



Obr. 67 Graf balancování robota v čase.

Současně s balancováním robota kolem rovnovážné polohy, bylo vyhodnoceno udržování žádané polohy po dobu 40 sekund. Závislost polohy na čase je vyobrazena v obrázku 67.

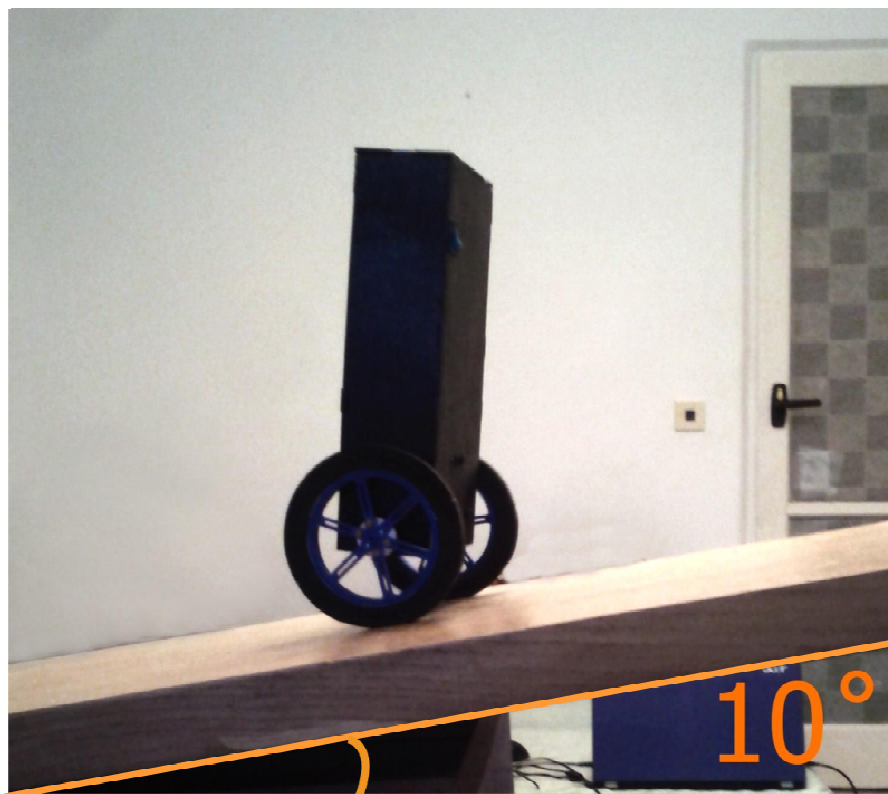
V souvislosti s tímto grafem je třeba uvést, že priorita při balancování je kladena na stabilizaci náklonu robota. Držení žádané pozice je tedy sekundární cíl, na který není kladen takový důraz.



Obr. 68 Graf balancování kol robota okolo žádané polohy.

Při balancování robota okolo žádané pozice je měřena změna polohy kol pomocí zabudovaných enkodérů. Pozice kol, znázorněná v grafu na obrázku 68, tedy znamená pozici bodu, ve kterém dochází k dotyku kol a podložky. Frekvence balancování okolo žádané pozice je 0,88 Hz. Maximální velikost výchylky od žádané pozice byla naměřena 6,5 cm. Videoklip demonstrující balancování robota lze nalézt mezi přílohami (příloha 1.2.1 a 1.2.2).

V reálném prostředí je možné narazit na nerovnosti terénu, byla tedy ověřena také schopnost robota udržet žádanou pozici i při naklonění povrchu o 10° (viz obr. 69).

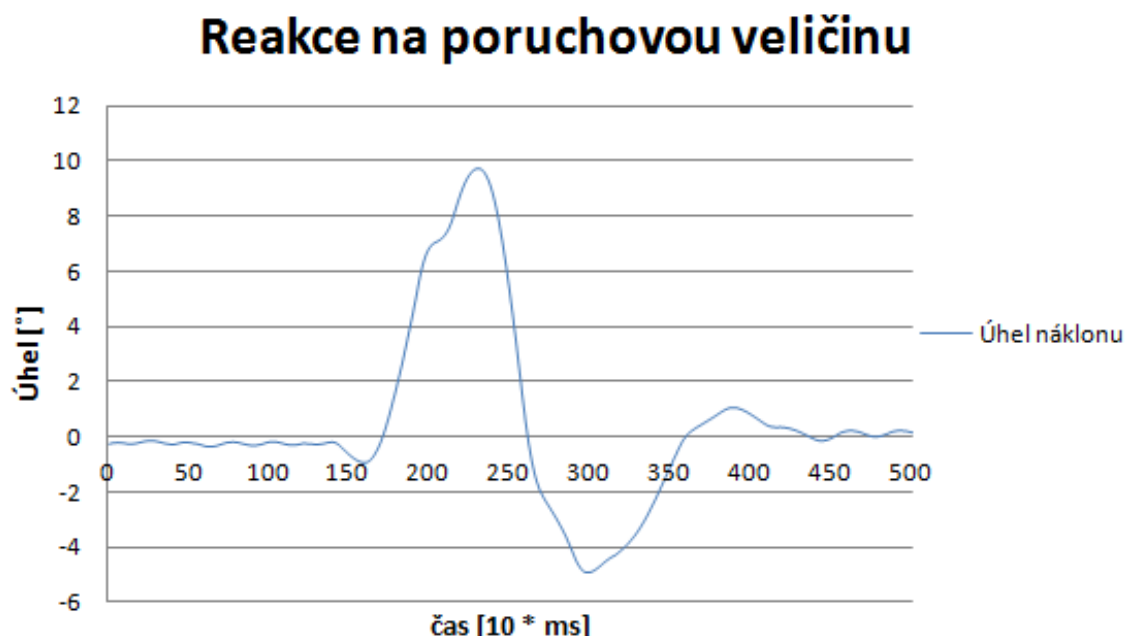


Obr. 69 Balancování na nakloněném povrchu.

Experiment prokázal schopnost robota udržet žádanou pozici i na nakloněné rovině.

12.2.2 Vyhodnocení balancování při skokové změně poruchové veličiny

Pro otestování chování robota při působení poruchové veličiny byl robot spuštěn v režimu balancování a mezi časem 1,5 s a 2,5 s byl vychýlen o zhruba 10° v kladném směru a puštěn.



Obr. 70 Reakce na poruchovou veličinu.

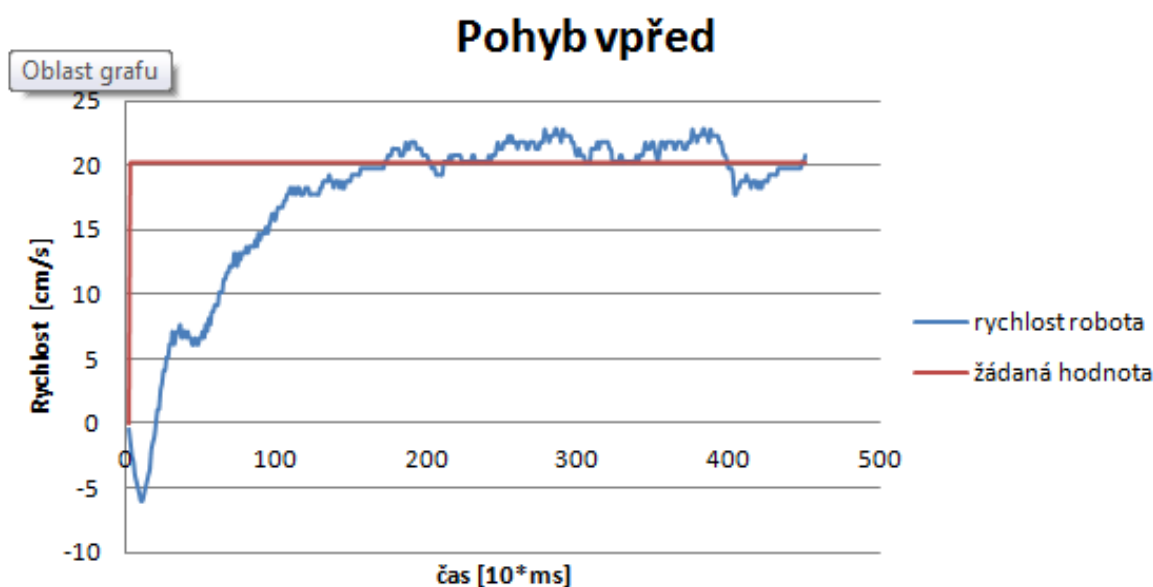
Na obrázku 70 lze vidět reakci robota na vychýlení z rovnovážné polohy. Byla provedena analýza průběhu regulované veličiny a výsledky jsou uvedeny v tabulce 9. Experimenty bylo zjištěno, že robot je schopen se vrátit do rovnovážného stavu při vychýlení o cca 20° od vertikály.

Tabulka 9 Analýza průběhu regulované veličiny

Veličina	Hodnota
Pásmo regulace	$\pm 1^\circ$
Doba odezvy	0,31 s
Doba dosažení max. hodnoty regulované veličiny	0,68 s
Doba regulace	1,59 s
Maximální hodnota regulované veličiny	$-4,87^\circ$

12.2.3 Vyhodnocení jízdy

Při vyhodnocení pohybu vpřed a vzad, byl opět použit pouze levý enkodér. Rychlost robota byla vypočítána z rozdílu polohy mezi dvěma časovými okamžiky. Vzhledem k nízkému rozlišení enkodérů byla poloha robota filtrována dolnoprostupním filtrem, který vyhladil skokové změny rychlosti, avšak zanesl do regulačního pochodu dopravní zpoždění. Pro zvýšení rozlišení rychlosti byly upraveny enkodéry ze stávajících 480 tiků/otáčku na 720 tiků/otáčku, což se blíží fyzickým limitům použitých senzorů a konstrukci enkodérů.



Obr. 71 Regulace rychlosti jízdy robota.

Zvýšené rozlišení umožnilo lepší průběh regulace (viz obr. 71), avšak při jízdě stále docházelo k přeskmitům a nerovnoměrně rychlé jízdě, kdy robot při překročení žádané rychlosti, musel rychlost zvýšit, aby snížil svůj náklon od vertikály a tím následně snížil svou rychlost.

Tabulka 10 Analýza průběhu regulace rychlosti pohybu.

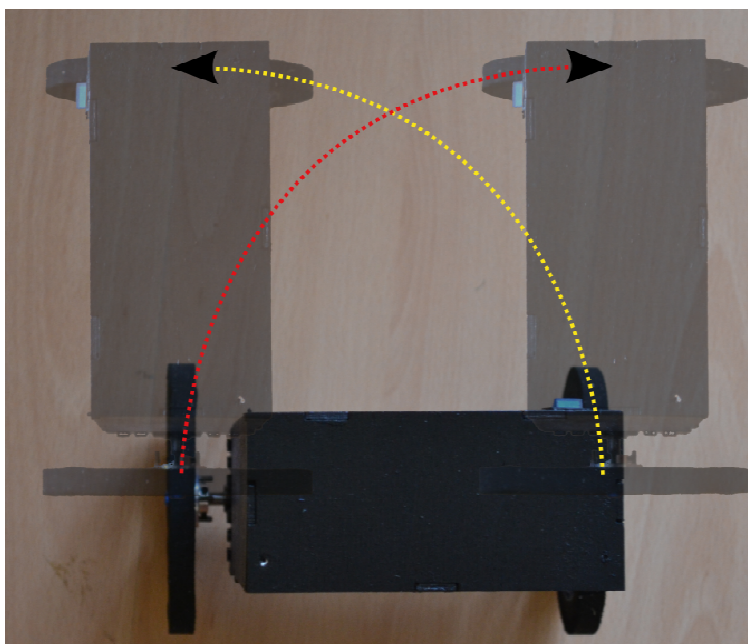
Veličina	Hodnota
Pásmo regulace	± 3 cm/s
Doba odezvy	1,71 s
Doba dosažení max. hodnoty regulované veličiny	2,28 s
Doba regulace	1,71 s
Maximální hodnota regulované veličiny	22,8 cm/s

Pro optimální regulaci je potřeba do budoucna alespoň zdvojnásobit rozlišení enkodérů. Videoklip demonstrující jízdu robota lze nalézt mezi přílohami (příloha 1.2.4).

12.2.4 Vyhodnocení otáčení

V kapitole 4.2.4 praktické části byl popsán algoritmus otáčení robota. Stejné omezení použití obou enkodérů, které bylo popsáno v kapitole 5.2.1 praktické části, bylo aplikováno i při otáčení a algoritmus byl pozměněn pro práci s jedním enkodérem.

V současné verzi algoritmu je při otáčení robota vpravo, zastaveno pravé kolo na místě. K žádané pozici levého enkodéru je přičten offset (viz rovnice 64), po jehož dosažení je odbržděno pravé kolo a obnoven režim balancování kolem nové pozice. Pro otočení robota vlevo je situace analogická (robot se otočí okolo levého kola). Proces otáčení je znázorněn na obr. 72. Experimentováním bylo zjištěno, že robot je schopen otáčet se s přesností $\pm 10^\circ$. Nepřesnost při otáčení je způsobena nízkým rozlišením enkodérů.



Obr. 72 Způsob otáčení robota.

Videoklip demonstrující otočení robota o 90° lze nalézt mezi přílohami (příloha 1.2.3).

12.3 Možnosti využití robota

Ačkoliv model robota vytvořený v této práci je určen primárně pro studium této problematiky a sám o sobě nemá žádnou praktickou funkci, lze jej dále rozšiřovat a modifikovat pro konkrétní aplikaci. Úzký a vysoký tvar robota, spolu s možností diferenciálního řízení kol, umožňuje robotu pohyb a manévrování ve stísněných prostorech a mezi lidmi. Doplněním robota vhodnými senzory jej můžeme dále vyprofilovat.

Příklady využití dvoukolového robota:

- **Hlídací robot**

Dvoukolový robot, hlídající objekt, by se skládal z odolného těla robota, doplněného o detektory pohybu a pasivní infračervené detektory, kalibrované pro detekci objektů s teplotou blízkou lidskému tělu. Senzorový systém by byl dle potřeby doplněn o všesměrové mikrofony, umožňující robotu detekovat a analyzovat zvuky o různé frekvenci, např. lidský hlas či zvuk tříštěného skla. Bezdrátové propojení robota

s nadřazeným systémem by zprostředkovalo výměnu informací a plánování trasy, případně analýzu zachycených vzorků. Speciální konstrukce dvoukolového robota jej umožňuje s výhodou použít v místech pro jiné roboty hůře dostupné.

- **Protipožární robot**

Pohyblivý robot, s infračervenými čidly, detekujícími vysoké teploty či chemické látky, vznikající při spalování, by byl výborným doplňkem statické senzorické protipožární sítě, s jejichž prvky by aktivně spolupracoval. Tím, že je robot mobilní, pokryje větší plochu hlídaného objektu než statické protipožární snímače. Robot, s nehořlavou konstrukcí, doplněný o hasicí přístroj by tak byl schopen lokalizovat místa se zvýšenou teplotou, provést analýzu okolního vzduchu, upozornit nadřazený hlídací systém, vyhodnotit nebezpečí a případně se pokusit o likvidaci požáru.

Dobře naprogramovaný řídicí systém, hlídající stabilitu robota, by mohl zabránit pádu či převržení robota v důsledku požáru i v situacích, ve kterých by robot klasické konstrukce mohl stabilitu ztratit.

- **Robot v domácnosti**

Ideálním příkladem robota, spolupracujícího s lidmi je dvoukolový robot EMIEW2 firmy Hitachi, popsáný v kapitole 1.6.4. Svými rozměry, hmotností, rychlostí a senzory, detekujícími překážky kolem sebe, je robot schopný se pohybovat všude tam, kde se pohybují lidé (vyjma schodů), aniž by při pohybu zavazet. Dle požadované funkce lze robota vybavit hlasovým modulem, přijímajícím dotazy či povely a reagovat na ně, modulem pro zpracování obrazu, který rozpozná jednotlivé objekty či osoby a uloží si je do paměti pro další využití, či připojením k internetu, které dále rozšíří databázi rozpoznatelných předmětů v okolí robota, případně umožní vyhledání odpovědi na neznámý dotaz nebo podnět.

Robot musí dostatečně rychle reagovat na dynamické změny ve svém okolí a propočítávat trajektorie pohybujících se objektů a osob ve svém okolí. Jeho primární funkcí je zabránit kolizi s osobou, zvířaty či předměty nebo omezení jejich pohybu. Doplňkové funkce robota mohou zahrnovat přepravu osob, monitorování zdravotního stavu určených osob, poskytovat služby nahrazující mobilní počítač, televizi či telefon s organizérem, vydávat léky v daný čas, lokalizovat předměty, hlídat děti nebo upozorňovat osoby na nebezpečné situace a mnoho dalších.

ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce byl návrh a realizace funkčního modelu dvoukolového robota.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je obecně popsán pojem robot, možnosti využití mobilních robotů a jejich dělení dle typu konstrukce. Dále je popsána konstrukce robota, založená na inverzním kyvadlu, jenž je hlavním bodem této práce. V této části je také uveden matematický model dynamiky a kinematiky inverzního kyvadla a z něj vycházející dvoukolový robot, již existující dvoukoloví roboti a jejich vlastnosti.

Následující kapitoly jsou věnovány jednotlivým elektronickým a mechanickým prvkům, které lze využít pro realizaci robota, jejich popisu a alternativním možnostem výběru.

Praktická část práce popisuje jednotlivé kroky při návrhu a realizaci mechanické konstrukce robota, elektronických součástí a elektronických modulů, tvorbu matematického modelu robota a samotné řízení modelu.

Výsledkem práce je funkční model autonomního dvoukolového robota, který po mechanické stránce splňuje předpoklady. Jako regulátor byla zvolena dvojice kaskádovitě řazených, manuálně laděných PID regulátorů, zpracovávajících ve zpětné vazbě signály z inerciálních snímačů (kombinace akcelerometru a gyroskopu) a reflexních optických enkodérů vlastní výroby, snímajících natočení hřídele motoru. Tyto signály byly vyhodnoceny v mikropočítačové řídicí jednotce, jež generovala akční veličinu pro DC motory s převodovkou v podobě signálu s pulzně šířkovou modulací.

Navržený řídicí algoritmus umožňuje robotu tyto činnosti:

- Balancování okolo vertikály.
- Balancování okolo zadané pozice.
- Otočení robota o pevně daný úhel.
- Pohyb robota ve směru kolmém na osu kol.

Vyhodnocením těchto funkcí v kapitole 5.21 až 5.24 bylo zjištěno, že v režimu balancování není robot schopen setrvat v dokonale rovnovážném stavu, nýbrž osciluje kolem rovnovážné polohy s frekvencí cca 3,7 Hz a maximální naměřenou výchylkou 0,46°.

Jako sekundární, volitelnou funkcí je balancování robota kolem žádané pozice. Analýzou bylo zjištěno, že robot při této činnosti osciluje kolem žádané pozice s frekvencí cca 0,9 Hz a maximální výchylka bodu dotyku kola s podložkou od žádané pozice činí 6,5 cm. Robot byl schopen udržet svou pozici i při náklonu podložky o $\pm 15^\circ$.

Oscilace robota v obou případech byly vyhodnoceny jako důsledek nelinearit v systému, z nichž nejvýznamnější jsou výrazné vůle v převodovkách motorů a šum působící na inerciální snímače. Nejvýznamnějším zdrojem šumu při měření náklonu se prokázaly být vibrace z nevyvážených enkodérů, jejichž následky na snímače byly z velké části potlačeny, ale ne zcela odstraněny (viz kapitola 5.1).

Následkem nelinearit v systému, nízkého rozlišení enkodérů (720 tiků/otáčku kola) a jejich nedokonalé výroby, nebyly odladěny parametry regulátoru pro využití obou enkodérů pro správnou a bezchybnou funkci otáčení a pohybu robota. Současný algoritmus tedy využívá pro pohyb a otáčení vždy pouze jednoho enkodéru, jež má ale za následek postupné pomalé stáčení robota jedním směrem. I přes tyto nedokonalosti, způsobené zejména snahou o zachování nízkého rozpočtu, se prokázala funkčnost mechanické konstrukce,

elektronických prvků i řídicího algoritmu. Model robota je tedy možné použít jako základ pro tvorbu profesionálního řešení s praktickým využitím, jejichž nástin je uveden v kapitole 5.3.

Do budoucna je možné model robota vylepšit následujícími úpravami:

- Použít motory s vyšším počtem otáček a větším kroutícím momentem pro rychlejší pohyb a vyšší stabilitu při působení poruchové veličiny. Menší vůle převodovky také výrazně omezí oscilace robota.
- Aplikovat enkodéry s vyšším rozlišením přímo na hřídele kol.
- Osadit do robota senzory pro detekci překážek a srážů a vytvořit pro ně obslužný kód (návrh viz kapitola 2.7)
- Na místo PID regulátorů využít vytvořeného matematického modelu pro návrh robustnějšího regulátoru (vhodný by byl zejména nelineární).

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ZÁDA, Václav. Úvod do robotiky [online]. katedra softwarového inženýrství FM TUL, 2005, s. 1-15 [cit. 2013-05-18].
- [2] Robot Use in the Present and Future: How Robots are Used in the Present. RobotWorx [online]. [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.robots.com/articles/viewing/robot-use-in-the-present-and-future>
- [3] How Robots Work: Autonomous robots. In: HARRIS, Tom. HowStuffWorks [online]. 2008. vyd. [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://science.howstuffworks.com/robot4.htm>
- [4] Aquatic robots. In: Robot Platform [online]. 2010 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://www.robotplatform.com/knowledge/Classification_of_Robots/aquatic_robots.html
- [5] From the very big to the very small: Robotic applications in Ex environments. E-tech [online]. 2011 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://www.iec.ch/etech/2011/etech_0711/ca-2.htm
- [6] Robots In Space. HOOPER, Rich. Learn about robots [online]. - [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.learnaboutrobots.com/space.htm>
- [7] ČERNOHORSKÝ, Josef. ZÁKLADY ROBOTIKY: Úvod do mobilní robotiky. [online]. 2011, s. 1-46 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://www.fm.tul.cz/esf0247/download_file.php/Prezentace%20PPT-ZRO13.pdf?id=388
- [8] H. LUNDBERG, Kent. The Inverted Pendulum System [online]. 2002 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://web.mit.edu/klund/www/papers/UNP_pendulum.pdf
- [9] Derivation of Equations of Motion for Inverted Pendulum Problem. [online]. 2011, 1 - 22, 28.11.2012 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.cas.mcmaster.ca/~qiao/courses/cs4xo3/presentations/InvPend.pdf>
- [10] R. BAGEANT, Maia. Derivation of Equations of Motion for Inverted Pendulum Problem. [online]. 2011, 1 - 22, 28.11.2012 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.cas.mcmaster.ca/~qiao/courses/cs4xo3/presentations/InvPend.pdf>
- [11] JAK FUNGUJE SEGWAY PT?. Segway PT [online]. 2012 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.segwaypt.cz/segway-funkce>
- [12] NBot Balancing Robot. ANDERSON, David P. GEOLOGICAL SCIENCES [online]. 2002, 2012 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>
- [13] Robotics: Emiew 2. In: Features [online]. 2013 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://www.hitachi.com/rd/portal/research/robotics/emiew2_01.html
- [14] Výpočetní systémy podrobně: Základní architektura počítače, formáty strojových instrukcí, základní typy strojových instrukcí. [online]. 2003, s. 1-6 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://malitch.ic.cz/bakule/Vypocetni_systemy-podrobne.pdf
- [15] MARCHALÍN, Jiří. Historie procesorů od počátku až po současnost [online]. Praha, 2004 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z:

- <http://artax.karlin.mff.cuni.cz/~marcj1am/download-files/hist.pdf>. Univerzita Karlova v Praze.
- [16] ARM The Architecture for the Digital World. HARVARD VS VON NEUMANN [online]. 2009 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://infocenter.arm.com/help/index.jsp?topic=/com.arm.doc.faqs/ka11516.html>
- [17] KAMAL, Raj. DORLING KINDERSLEY. Microcontrollers: Architecture, Programming, Interfacing and System Design, Second Edition [online]. 2011 [cit. 2013-05-18]. ISBN 978-81-317-5990-5. Dostupné z: <http://my.safaribooksonline.com/book/electrical-engineering/semiconductor-technology/9788131759905>
- [18] NXP licenses ARM Cortex™-M0 Processor. NXP. [online]. 2009 [cit. 2013-05-18] Dostupné z: <http://www.nxp.com/news/press-releases/2009/02/nxp-licenses-arm-cortex-m0-processor.html>
- [19] ZEŽULKA, František, Zdeněk BRADÁČ, Petr FIEDLER, Pavel KUČERA a Radek ŠTOHL. Programovatelné automaty [online]. Brno, 2003 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://www.vaeprosyst.cz/Dokumentace/Programovatelné_automaty/Programovatelné_automaty-Skripta_FEKT_VUT_Brno.pdf
- [20] HAVLENA, Vladimír a Jan ŠTĚCHA. Moderní teorie řízení [online]. Praha, 1999 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: https://moodle.dce.fel.cvut.cz/pluginfile.php/798/mod_page/content/13/Moderni_teorie_rizeni.pdf. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ PRAHA.
- [21] MILLER, Peter. Building a Two Wheeled Balancing Robot [online]. Southern Queensland, 2008 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://eprints.usq.edu.au/6168/1/Miller_2008.pdf. University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying.
- [22] BŘEZINA, Tomáš, Vladislav SINGULE, Pavel HOUŠKA, Tomáš MARADA, Vít ONDROUŠEK, Jaroslav PULCHART, Stanislav VĚCHET a Milan TUREK. ŘÍZENÍ MECHATRONICKÝCH SOUSTAV [online]. Brno, 2004 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://autnt.fme.vutbr.cz/brezina/Rizeni_Mech_Soustav.pdf
- [23] SMETANA, Ladislav. NELINEÁRNÍ ADAPTABILNÍ NEURO-REGULÁTOR [online]. Praha, 2009 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/vyzkum/trebon09/cd/AR/Sm.pdf>. Ústav přístrojové a řídicí techniky ČVUT v Praze.
- [24] RUAN, Xiaogang a Jing CHEN. On-line NNAC for a Balancing Two-Wheeled Robot Using Feedback-Error-Learning on the Neurophysiological Mechanism. [online]. 2011, s. 1-8 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://ojs.academypublisher.com/index.php/jcp/article/download/0603489496/2761>
- [25] RobotShop Learning Center. In: Robotshop [online]. [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.robotshop.com/learning-center.html>
- [26] BENSON, Coleman. How to Make a Robot: Making Sense of Actuators. How to Make a Robot [online]. 2010 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.robotshop.com/blog/en/how-to-make-a-robot-lesson-3-actuators-2-3703>

- [27] LINDA, Miloslav, Filip ŠKEŘÍK, Michal RŮŽIČKA a Vladislav BEZOUŠKA. Roboty a manipulátory: Snímače RaM I. [online]. [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://skola.spectator.cz/8_SEMESTR/RobotiManipulatory/8_RaM_snimaceI.ppt
- [28] ŠŤASTNÝ, František. ZPRACOVÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH DAT. Amper [online]. 1997 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html_tree/frst_zed.html
- [29] HLAVÁČ. NEJISTOTY MĚŘENÍ: PŘESNOST A CHYBY MĚŘENÍ A PŘÍSTROJŮ. Fs.čvut [online]. 2005 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>
- [30] VANUŠ, Jan. Základy Systémové techniky budov: Základy měření elektrických a neelektrických veličin v budovách a bytech [online]. 2008 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/STB/3_mereni_neelektrickych_velicin.pdf
- [31] Senzory. Omron: Průmyslová automatizace [online]. [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://industrial.omron.cz/cs/products/catalogue/sensing/measurement_sensors/displacement_sensors/default.html
- [32] LACHNIT, Zdeněk. INERCIÁLNÍ SNÍMACE PRO ZPŘESNOVÁNÍ ODOMETRIE MOBILNÍCH ROBOTU [online]. [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://autnt.fme.vutbr.cz/szz/2007/BP_Lachnit.pdf. Bakalářská práce. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY. Vedoucí práce Pavel Houška.
- [33] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů: Piezoelektrické. Automatizace: Principy akcelerometrů [online]. 2007 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [34] Inclinometer: Mechanical Ball-in-Tube & Electronic Types. Rieker [online]. 2005 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://riekerinc.com/Inclinometers.htm>
- [35] Proceedings of Anniversary Workshop on Solid-State Gyroscopy (19–21 May 2008. Yalta, Ukraine). - Kyiv-Kharkiv. ATS of Ukraine. 2009. ISBN 978-976-0-25248-6.
- [36] PASOLINI, Fabio. MEMS Accelerometers, Gyroscopes, & Geomagnetic Sensors - Propelling Disruptive Consumer Applications. Digi-Key [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/us/en/techzone/sensors/resources/articles/MEMS-Accelerometers.html>
- [37] Control by Radio Signal: Robotoid. Robotoid: App notes [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.robotoid.com/appnotes/electronics-control-by-radio-signal.html>
- [38] OLMR, Vít. HW server představuje - Sériová linka RS-232. [online]. 2005 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/rozhrani/hw-server-predstavuje-seriova-linka-rs-232.html>

- [39] Aplikování sběrnice CAN. Návrh obvodů [online]. 2004 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/rozhrani/hw-server-predstavuje-seriova-linka-rs-232.html>
- [40] Kainka Burkhard: USB – měření, řízení a regulace pomocí sběrnice USB – základy, popis a charakteristika rozhraní USB, mikrokontroléry, BEN - technická literatura, 2002, ISBN 80-7300-073-3
- [41] VERLE, Milan. PIC Microcontrollers: Introduction: World of microcontrollers [online]. 2008 [cit. 2013-05-19]. ISBN 978-86-84417-15-4.
- [42] ARIMANY, Guillem. Radio Frequency communication for Modular Robots [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/14698/1/70000.pdf>. Master thesis. Mærsk Mc-Kinney Møller Institute University of Southern Denmark.
- [43] GET IEEE 802®: LOCAL AND METROPOLITAN AREA NETWORK STANDARDS. IEEE STANDARDS ASSOCIATION [online]. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802>. [cit. 2013-05-19].
- [44] Experiments with a ZigBee Wireless Communication System for Self-Reconfiguring Modular Robots [online]. NSW Australia, 2009 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: https://www2.lirmm.fr/lirmm/interne/BIBLI/CDROM/ROB/2009/ICRA_2009/ICRA_CONF_2009/data/papers/1513.pdf. Australian Centre for Field Robotics.
- [45] Senzorová síť ZigBee s dosahem 40 km. Senzory [online]. 2007 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?1226&senzorova_sit_zigbee_s_dosahem_40_km
- [46] ZigBee - novinka na poli bezdrátové komunikace. Návrh obvodů [online]. 2005 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/navrh-obvodu/rozhrani/zigbee-novinka-na-poli-bezdratove-komunikace.html>
- [47] HYNČICA, Ondřej. Bezdrátové sítě typu mesh. Automa [online]. 2005 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30826
- [48] PAVLIS, Jakub. Li-Pol akumulátory - proč se nejpokročilejší technologie neprosazuje?. Technika [online]. 2011 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30826
- [49] NATIONAL SEMICONDUCTOR. LM2576/LM2576HV Series SIMPLE SWITCHER® 3A Step-Down Voltage Regulator. 1999. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dokumentace/330/330-113/dsh.330-113.1.pdf>
- [50] L6205: DMOS DUAL FULL BRIDGE DRIVER. STM [online]. 2002 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/7616.pdf>
- [51] Freescale FRDM-KL25Z Freedom Development Platform. Mouser Electronics [online]. 2013 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://cz.mouser.com/new/freescalesemiconductor/freescale-freedom-kl25z/>
- [52] FRDM-KL25Z: Freescale Freedom Development Platform for Kinetis KL1x and KL2x MCUs. Freescale [online]. 2013 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z:

- http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=FRDM-KL25Z#prettyPhoto
- [53] Xtrinsic MMA8451Q 3-Axis, 14-bit/8-bit Digital Accelerometer. Freescale Semiconductor [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA8451Q.pdf?fpsp=1
- [54] LPR403AL: MEMS motion sensor: dual-axis pitch and roll ± 30 dps analog gyroscope. STM [online]. 2009 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00254121.pdf>
- [55] Tilde - NXT balancing robot: Project Session 4. LASSE, Christian. [online]. 2011 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://chrfredelasse.blogspot.cz/2011/01/project-session-4.html>
- [56] VOJÁČEK, Antonín. Co je to Kalmanova filtrace ?. Měření a regulace [online]. 2007 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007042901>
- [57] NÁVRH ŘÍDICÍHO SYSTÉMU DVOUKOLÉHO MOBILNÍHO ROBOTU [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://uai.fme.vutbr.cz/szz/2012/BP_Robenek.pdf. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Pavel Houška.
- [58] LAUSZUS, Kristian. A practical approach to Kalman filter and how to implement it. In: [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://blog.tkjelectronics.dk/2012/09/a-practical-approach-to-kalman-filter-and-how-to-implement-it/>
- [59] BORENSTEIN, J a H.R. EVERETT. Where am I?: Sensors and Methods for mobile robots positioning [online]. Michigan, 1996 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www-personal.umich.edu/~johannb/Papers/pos96rep.pdf>. The University of Michigan.
- [60] IMU ODOMETRY. ANDERSON, David P. Seattlerobotics [online]. Dallas, Texas, 2006 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.seattlerobotics.org/encoder/200610/article3/IMU%20Odometry,%20by%20David%20Anderson.htm>
- [61] HESS, Lukáš. Mikropočítačové řízení ventilátorů. Zlín, 2011. bakalářská práce (Bc.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky
- [62] Design and Parametric control of Co-Axes Driven Two-Wheeled Balancing Robot [online]. New Zealand, 2010 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://mro.massey.ac.nz/bitstream/handle/10179/2258/02_whole.pdf?sequence=1. Master thesis. Massey Univesity.
- [63] MANN, Burkhard. C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy - linkery, práce s ATMEL AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky. Vyd. 1. Praha: BEN, 2003, 279 s. ISBN 80-730-0077-6.
- [64] NOVÁK, Petr. Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení. Vyd. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 247 s. ISBN 80-730-0141-1.

- [65] Von Neumann MARKO net [online]. 9.9.2007 [cit. 2011-05-18]. Počítače von Neumannovské architektury. Dostupné z WWW: <<http://www.markonet.cz/pages/vyuka/principy-pocitacu/04historie/neumann.gif>>.
- [66] KLUSÁČEK, Ondřej. MODELOVÁNÍ, IDENTIFIKACE A ŘÍZENÍ ROTACNÍHO KYVADLA [online]. Brno, 2009 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18652. Diplomová práce. VUT.
- [67] Sensors: Your technical resource for Sensing, Communication and Control. MARTELLA, Melanie. Sensors [online]. 2010 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.sensorsmag.com/files/sensor/nodes/2009/5852/Figure1.gif>
- [68] MikroElektronika: Development tools, Compliars, Books. [online]. 2010 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.mikroe.com/img/publication/pic-books/pic-microcontrollers/chapter/00/fig0-25.gif>
- [69] HANZAL, Josef. Snail Instruments. Snail Instruments [online]. 2008 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://shop.snailinstruments.com/images/medium/ttgm37.jpg>
- [70] Pololu: Robotics & Electronics. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://a.pololu-files.com/picture/0J1107.200.jpg?20bf0830ba37a3360566f478798b2152>
- [71] HobbyKing. [online]. 2010 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.hobbyking.com/hobbycity/store/catalog/6306.jpg>
- [72] Hranické robotování: Sledovač čáry s PICaxe. SÁMEL, M. [online]. 2009 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://www.sps.hranet.cz/samelm/images/H_mustek_princip.png
- [73] GME: Elektronika, kterou znáte. [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dokumentace/532/532-007/pctdetail.532-007.1.jpg>
- [74] Robot Gestation. [online]. 2011 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://robotgestation.com/images/QuadratureEncoder.bmp>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ADC	Analog to Digital Converter
ALU	Aritmetical and Logical Unit
ARM	Advanced RISC Machine
CISC	Complex Instruction Set Computer
CAN	Controller Area Network
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CPU	Central processor unit
DC	Direct Current
DCT	Discrete Cosine Transformation
DOF	Degrees Of Freedom
DP	Dolní Propust
DPS	Deska Plošných Spojů, Degrees Per Second
DMOS	Double-Diffused Metal-Oxide Semiconductor
EAGLE	Easily Applicable Graphical Layout Editor
FOG	Fiber Optic Gyroscope
HP	Horse Power
I/O	Input/Output
I2C	Intelligent Interface Controller
IEC	International Electrotechnical Commission
IR	InfraRed
LED	Light Emitting Diode
LQ	Linear Quadratic
MCU	Microcontroller Unit
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board
PID	Proportional-Integral-Derivative
PSD	Proportional-Sum-Derivative
PLC	Programovatelný Logický Automat
PWM	Pulse Width Modulation
QFN	Quad-Flat No-leads
RC	Radio Controlled
RF	Radio Frequency
RISC	Reduced Instruction Set Computing
RPM	Revolutions Per Minute
RTOS	Real-Time Operating System
SCARA	Compliance Assembly Robot Arm
SMD	Surface Mount Device
SPARC	Scalable Processor Architecture
SPI	Serial Peripheral Interface
SWI	Software Interrupt
TC	Technical Committee

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: DVD

1.1 Elektrotechnická schémata

- 1.1.1 Schéma komunikačního modulu
- 1.1.2 Schéma desky pro práci s enkodéry
- 1.1.3 Schéma modulu pro práci s IR senzory
- 1.1.4 Schéma měniče a rozvaděče
- 1.1.5 Schéma přídatného napěťového rozvaděče
- 1.1.6 Schéma modulu budiče motorů

1.2 Videa

- 1.2.1 Videoklip balancování robota
- 1.2.2 Videoklip balancování okolo žádané pozice
- 1.2.3 Videoklip otáčení robota
- 1.2.4 Videoklip jízdy robota

1.3 Program