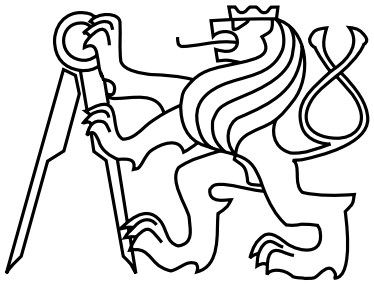
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra řídící techniky



Bakalářská práce

Model vzducholodi s využitím stavebnic LEGO Mindstorms Education EV3

Filip Kirschner

Vedoucí práce: Ing. Martin Hlinovský, Ph.D.

Studijní program: Kybernetika a Robotika, Bakalářský

Obor: Systémy a Řízení

19. června 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Filip Kirschner**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Model vzducholodi s využitím stavebnic LEGO Mindstorms Education EV3**

Pokyny pro vypracování:

1. Navrhněte a realizujte řízení vzducholodi zejména s ohledem na dynamické vlastnosti jejího pohybu v uzavřené místnosti s využitím stavebnic LEGO Mindstorms EV3.
2. Navrhněte jednoduchý způsob stanovení polohy vzducholodě při jejím pohybu po předem stanovené trajektorii.
3. Navrhněte a realizujte komfortní uživatelské rozhraní k dálkovému stanovování reference pro pohyb vzducholodi.
4. Vytvořte webové stránky k modelu vzducholodi.

Seznam odborné literatury:

[1] Marek Vondra: Vzducholoď – dynamický model, Bakalářská práce, ČVUT FEL v Praze, 2010
[2] Petr Řimnáč: Vzducholoď – přenos dat, Bakalářská práce, ČVUT FEL v Praze, 2010

Vedoucí: Ing. Martin Hlinovský, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 16. 1. 2014

Poděkování

Především děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinovi Hlinovskému, Ph.D. za ochotu, cenné rady a podněty. Za cenné praktické rady děkuji Ing. Jiřímu Zemánkovi, Ing. Martinovi Samkovi a Martinovi Burianovi. V neposlední řadě patří můj vděk mé rodině, přátelům a všem, kteří mně po celou dobu studia podporovali.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 22. 5. 2014 .....

Abstract

The aim of this thesis is to create a physical model of an Airship made from LEGO MINDSTORMS EV3 and enabling it to operate antonomously according to user-specified references for motion of the airship.
A system for tracking approximate position of the airship is also designed.
Another objective is to create an ergonomic remote controller for the airship to allow user to naturally set references for airship motion.
Last goal of this thesis is to prepare data for website concerning the airship model on robosoutez.cz server.

Abstrakt

Cílem této práce je vytvořit fyzický model vzducholodě ze stavebnic LEGO MINDSTORMS EV3 a implementovat do něj řídící algoritmy schopné sledovat referenci na polohu nebo rychlost stanovenou uživatelem.
Také je navržen způsob pro sledování přibližné polohy vzducholodě.
Dále je v rámci této práce vytvořeno ergonomické dálkové ovládání vzducholodi sloužící k přirozenému stanovení referencí uživatelem.
V poslední částí práce jsou vytvořeny podklady pro webovou stránku o modelu vzducholodě pro server robosoutez.cz.

Obsah

1 Úvod **1**

2 Vývoj stavebnice LEGO **3**
2.1 Doba dřevěná . . . 4
2.2 Doba plastová . . . 5
2.3 Doba elektrická . . . 6
2.4 První krůčky inteligentního Lega . . . 8
2.5 LEGO Mindstorms RCX . . . 8
2.6 LEGO Mindstorms NXT . . . 9
2.7 LEGO Mindstorms EV3 . . . 9
2.7.1 Programovací jazyky podporované LEGO Mindstorms EV3 . . . 10

3 Návrh modelu vzducholodě **11**
3.1 Nosné médium . . . 11
3.1.1 Vodík . . . 12
3.1.2 Helium . . . 13
3.1.3 Horký vzduch . . . 13
3.1.4 Výběr nosného média . . . 13
3.2 Výběr balónu . . . 13
3.2.1 Tvar balónu . . . 14
3.2.2 Typ balónu . . . 14
3.2.3 Konfigurace stabilizátorů . . . 15
3.2.4 Technologická výbava balónu . . . 16
3.3 Konstrukce gondoly vzducholodě . . . 17
3.3.1 Hlavní použité součásti z lega . . . 17
3.3.2 Motory . . . 17
3.3.3 Rotor . . . 19
3.3.4 Tělo gondoly . . . 20

4 Uživatelské rozhraní pro stanovení reference **25**
4.1 Komunikace dálkového ovládání a vzducholodě . . . 25
4.1.1 Implementace komunikačního kanálu . . . 26
4.2 Ovládání pomocí joysticku . . . 27
4.2.1 Výběr výstupní veličiny . . . 27
4.2.2 Program pro joystick . . . 28

4.3 Ovládání pomocí senzorické rukavice 28
4.3.1 Výběr výstupní veličiny 30
4.3.2 Program pro senzorickou rukavici 30

5 Stanovení polohy vzducholodě 33
5.1 Senzorické vybavení vzducholodě 33
5.2 Určení polohy a orientace vzducholodě 33

6 Řízení vzducholodě 37
6.1 Identifikace modelu 37
6.1.1 Identifikace přenosu azimutální rotace 37
6.1.2 Identifikace přenosu pohybu v ose z 38
6.1.3 Identifikace přenosu pohybu v ose x 39
6.2 Inteligentní řízení 40
6.2.1 Nezávisle ovládaný tah motorů 42

7 Internetové stránky modelu vzdcholodě 45
7.1 Cílová skupina 45
7.2 Možnosti vzoru 46

8 Závěr 47

Literatura 49

A Obsah přiloženého CD 51

Seznam obrázků

2.1 Ole Kirk Kristiansen, zakladatel firmy LEGO 3
2.2 Logo společnosti LEGO z roku 1932 4
2.3 Dřevěná hračka Kačer 4
2.4 Stavebnice LEGO Klodser 5
2.5 Stavebnice LEGO Mursten 5
2.6 Detail dílů LEGO Mursten 6
2.7 LEGO System of play 6
2.8 4,5 V motor ze setu č. 155 7
2.9 Set č. 720 7
2.10 LEGO Technic Control Center 8
2.11 LEGO Technic Control Center II 9

3.1 Vzducholoď s první verzí gondoly na finále ROBOSOUTĚŽE 2013 11
3.2 Havárie vzducholodi LZ 129 Hindenburg 13
3.3 Schematický nákres sférického balónu 14
3.4 Schematický nákres elipsoidního balónu 14
3.5 Schematický nákres doutníkovitého balónu 15
3.6 Běžné konfigurace stabilizačních ploch 16
3.7 Výstup inteligentní kostky pro motory 18
3.8 Realizace obvodu s relé spínajícím motory 19
3.9 Zapojení řídícího obvodu s MOSFET tranzistorem 19
3.10 Realizace řídícího obvodu s MOSFET tranzistorem 20
3.11 Jednotka motoru s nasazenou vrtulí 20
3.12 Díl 4624645 21
3.13 Dokončená gondola vzducholodě 22
3.14 Detaily gondoly 23

4.1 Vzducholoď mimo dosah rukou uživatele 25
4.2 Problémy s infračerveným dálkovým ovládáním 26
4.3 NXT-G bloky používané pro komunikaci via bluetooth 27
4.4 Cílová poloha motorů pro daný stav joysticku 28
4.5 Pohledy na joystick 29
4.6 Pohledy na joystick 31

5.1 Konfigurace pro měření pohybu 35
5.2 Podvozek pro testování 35

6.1 Identifikace přenosu azimutální rotace 37
6.2 Srovnání přechodové charakteristiky azimutální rotace reálného a identifikovaného systému 38
6.3 Identifikace přenosu stoupání 39
6.4 Srovnání přechodové charakteristiky stoupání reálného a identifikovaného systému 39
6.5 Identifikace přenosu dopředného pohybu 40
6.6 Srovnání přechodové charakteristiky dopředného pohybu reálného a identifikovaného systému 40
6.7 Modul pro nezávislé řízení motorů 43

7.1 Úvodní strana portálu ROBOSOUTĚŽ 45

Seznam tabulek

3.1 Nosnost plynů běžně používaných ve vzducholodích 12
3.2 Popis jednotlivých žil v propojovacím kabelu pro motory sady EV3 18

Kapitola 1

Úvod

V listopadu 1999 magazín Fortune právem označil kostičku lega za jeden z produktů století.[1] Dvacáté století by se dalo bez nadsázky označit právě za století Lega. Z malé tesařské firmy LEGO se v průběhu několika desetiletí stala celosvětová firma LEGO Group proslulá svým jediným produktem - stejnojmennou stavebnicí LEGO. Tato stavebnice se proslavila hlavně svojí jedinečnou kreativní formou zábavy. Na začátku devadesátých let začala LEGO Group propagovat i robotiku a programování a od té doby vydala celkem 5 generací robotického Lega.

Fakulta elektrotechnická využívá pro výuku posledních tří generací programovatelného Lega, a to od roku 2009.[2] Využíváno je jak pro motivaci studentů v předmětu Roboti zaštiťovaného Katedrou Řídící techniky, Katedrou počítačů a Katedrou měření, tak k výuce například v rámci předmětu Automatické řízení. Programovatelné LEGO je také díky své prototypovací jednoduchosti využíváno k základnímu výzkumu řídících algoritmů.

Vzducholodě se zrodily v druhé polovině devatenáctého století ve Francii, ale již brzy se rozšířily po celém světě. Ze začátku dominovaly nebi jako jediný vzdušný dopravní prostředek a i po vynálezu letadel jen pomalu ustupovaly ze scény. V současnosti se vzducholodě používají zejména pro převoz materiálu a osob, ale i jako reklamní nosiče či pro rekreaci.[3] Cílem této bakalářské práce je vytvořit autonomní vzducholoď, která bude vhodná pro prezentační účely Elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze. Pro obohacení zážitku uživatele bude vybavena inovativním, ale zároveň intuitivním dálkovým ovládáním, které zaujme a pomocí nějž bude možné stanovit vzducholodi reference pro dynamiku jejího pohybu.

Kapitola 2

Vývoj stavebnice LEGO

"Det bedste er ikke for godt."
"Jen to nejlepší je dostatečně dobré."

Ole Kirk Kristiansen, motto firmy LEGO z roku 1932[4]

Rok 1932 byl pro celý svět rokem Velké hospodářské krize, kdy se celý svět zmítal v hluboké ekonomické depresi po propadu akcií na americké burze v roce 1929.[5] Nedostatečná poptávka přinutila dánského tesaře Ole Kirka Kristiansena (7.4.1891 – 11.3.1958), aby propustil všechny své zaměstnance, nechávaje svou živnost v troskách.[4] Navíc v létě roku 1932 umírá jeho žena, ponechávaje Kristiansenovi čtyři nezletilé syny k výchově. Nepřízně života však Kristiansena nezlomily a koncem roku 1932 zakládá v dánském městě Billund společnost LEGO, soustředící se na výrobu dřevěných hraček.[4]

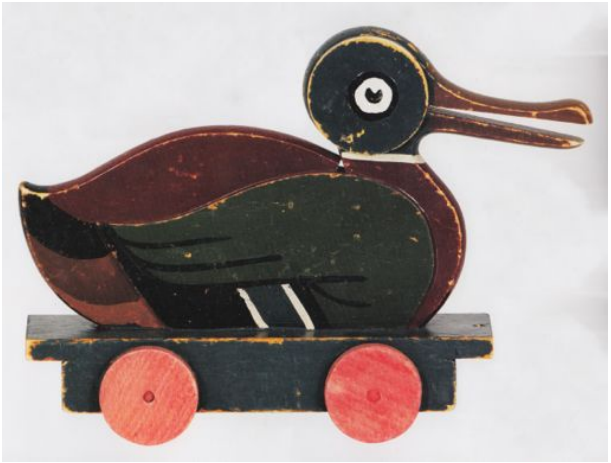
Obrázek 2.1: Ole Kirk Kristiansen (vlevo), zakladatel firmy LEGO[4]

Název firmy LEGO pochází z dánské fráze *leg god*, jež je možné do češtiny volně přeložit jako *dobře si hrát*. Vysoké nároky na standard kvality hraček firmu v následujících letech několikkrát přinutily Kristiansena vzít si půjčku od dalších členů své široké rodiny (Ole byl desátým dítětem[4]), avšak z každé krize se společnost úspěšně dostala.[4]

Obrázek 2.2: Logo společnosti LEGO z roku 1932[4]

2.1 Doba dřevěná

Během třicátých a čtyřicátých let se společnost LEGO soustředila pouze na výrobu ručně malovaných dřevěných hraček.[4] Široká nabídka hraček zahrnovala joja, dřevěné kostky, zvířata, která bylo možné táhnout na provázku a různých typů vozidel. Jeden z nejprodávanějších produktů firmy LEGO z této doby bylo čtyřkolé vozidlo připomínající kačera, jemuž se při rotaci kol periodicky otevírá a zavírá zobák, zobrazené na obrázku 3.[4]



Obrázek 2.3: Dřevěná hračka Kačer[4]

V průběhu okupace Dánska v roce 1940 bylo zakázáno použití kovu a gumy v hračkách, což bylo příčinou zvýšení prodejů firmy LEGO, která gumu a kovy prakricky nevyužívala.[4] V roce 1946 společnost LEGO vyprodukovala dřevěné hrací kostky *LEGO Klodser*, které byly zřejmě prvním předchůdcem stavebnice LEGO.

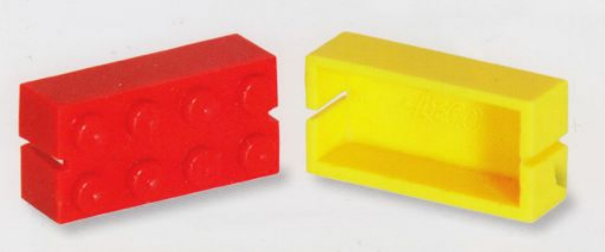
Obrázek 2.4: Stavebnice LEGO Klodser[4]

2.2 Doba plastová

V roce 1947 společnost LEGO zakoupila první stroj na zpracování plastů, původem z Velké Británie. Ačkoli byla výroba plastových hraček ve strovnání s dřevěnými nákladnější (stroj na výrobu plastových dílů stál 30,000 DKK[4]), již brzy se společnosti LEGO měla vyplatit; v roce 1949 vyvinulo LEGO první hračku sestávající ze spojitelných kostek nazvanou *Automatic binding bricks*, česky *Automaticky spojitelné cihly*. V roce 1953 byla stavebnice přejmenována na název *LEGO Mursten* (v anglickém překladu *LEGO Bricks*, v českém potom *LEGO Cihly*), který se ujal a používá se dodnes.

Obrázek 2.5: Stavebnice LEGO Mursten[4]

Díly ze stavebnice LEGO Mursten však trpěly zásadním nedostatkem, absencí zámku, mechanismu, jenž by kostičky pevně dočasně spojoval, avšak neodolal cílené snaze o jejich rozdělení. Tento nedostatek byl v roce 1955 překonán novou stavebnicí LEGO System of Play. Tato sada vyšla na trh v podobě 28 stavebnic budov a osmi vozidel.



Obrázek 2.6: Detail dílů LEGO Mursten[4]

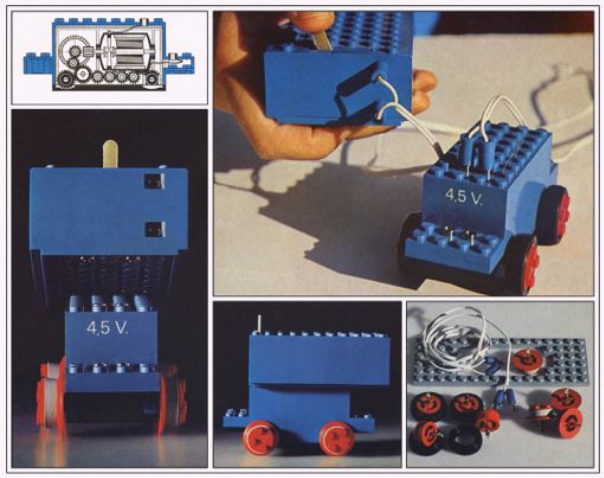
Obrázek 2.7: LEGO System of play[6]

LEGO System of Play pomohl v následujících letech společnosti LEGO vybudovat unikátní identitu svému brzy jedinému produktu, založenou zejména na kreativní zábavě. Do této doby se LEGO díly vyráběly z acetátových vláken (mezinárodní zkratka CA), ale už v roce 1963 nahradil acetátová vlákna Akrylonitrilbutadienstyren (ABS). Akrylonitrilbutadienstyren je tvárnější než acetátová vlákna a také se snáze zabarvuje, což umožňovalo nižší náklady a tudíž větší objem produkce.[7, 8]

2.3 Doba elektrická

První elektrifikovaná LEGO stavebnice byla vlaková souprava vydaná v roce 1966 jako set č. 115. Sestávala z krátkých cyklických kolejí, lokomotivy a tří vagonů. Lokomotiva byla poháněna stejnosměrným 4,5 V motorem napájeným baterií drženou v ruce dítěte.

V roce 1969 byl následně v setu č. 720 představen vlak napájený dvojicí kolejí s rozdílem napětí 12 voltů. Nešikovné řešení napájení pro 4,5 V motory bylo v roce 1972 nahrazeno



Obrázek 2.8: 4,5 V motor ze setu č. 155[6]

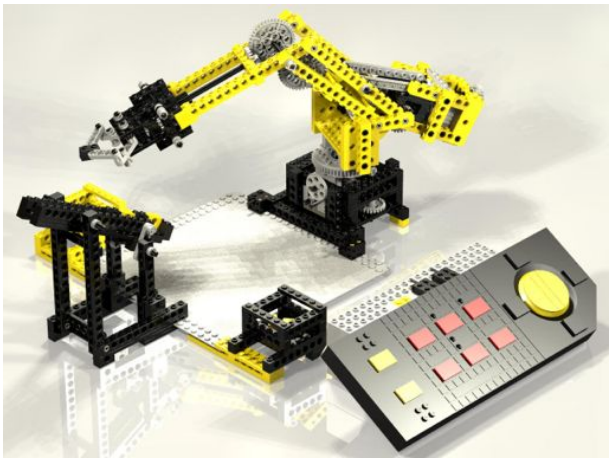
vagonem nesoucím napájecí baterii. Všechny tři typy pohonů a napájení byly prodávané ve stejnou dobu a bylo možné je zaměňovat, neboť motorové jednotky měly u všech shodné rozměry.

Obrázek 2.9: Set č. 720[9]

V roce 1986 LEGO použilo pro vybrané modely řady LEGO City a LEGO Space jednotky, které byly schopny jak vydávat zvuk tak produkovat světelné signály. Tyto jednotky LEGO dodávalo pouze pro 12 V systém, což dále prohloubilo oblíbenost 12 V souprav. V roce 1991 LEGO doplnilo svojí nabídku o 9 V motor, dodávaný v transformátorem ovládané vlakové soupravě, který byl taktéž kompatibilní se aktivně svítícími díly. V současnosti jsou 9 V motory nejčastěji používanými LEGO motory vůbec.[10]

2.4 První krůčky inteligentního Lega

V roce 1984 se LEGO Group spojila s Laboratoří Médií na Massetchusetts Institute of Technology, aby společně postavili základy unikátnímu projektu - využití stavebnice LEGO pro vzdělávací účely na technických školách.[4] Po dvou letech vývoje v roce 1986 LEGO započalo program LEGO Techic Computer Control, v rámci kterého dodávali do škol interface mezi 9 V LEGO motory a počítači. V roce 1990 přišlo LEGO Group na trh s produktovou řadou LEGO Control Center, která umožňovala řídit LEGO pomocí řídícího prvku označovaného jako Control Center - řídící centrum. První stavebnicí této řady byl set č. 8094 LEGO Technic Control Center, s jehož pomocí bylo možné postavit čtyři modely - planární manipulátor, jednoduché tříkolé vozidlo, jeřáb a robotizovanou rýsovací desku.[11]



Obrázek 2.10: LEGO Technic Control Center[11]

Stavebnice umožňovala staviteli řídit tři nezávislé motory jako výstupy systému, zatímco jako vstupy sloužilo osm tlačítek a jeden čtyřsměrný kruhový volič, vše umístěné na ovládacím panelu. Dvě tlačítka a kruhový volič sloužily jako vstupy tří nezávislých kanálů (kanál první ovládaný tlačítky dopředu/dozadu, druhý kanál ovládaný na voliči nahoru/dolů a poslední, třetí kanál ovládaný voličem vpravo/vlevo). Zbylých šest tlačítek sloužilo k nahrávání programů do paměti. Po stisku tlačítka Program (programování) se zaznamenávaly uživatelské vstupy a po stisku tlačítka Stop se uložily jako sekvence příkazů do paměti ovládacího panelu. Tyto sekvence nebyly vymazány při vypnutí panelu a bylo je možné spustit po stisku tlačítka Go (běž). O pět let později se LEGO Control Center dočkalo druhé verze, která sice obsahovala další tři modely - helikoptéru, tyranosaura a vznášedlo - avšak po hardwarové stránce se řídící centrum od své první verze lišilo pouze minimálně, a to odlišnou barvou tlačítek a vstupem pro stejnosměrné napájení dodávaným transformátorem.[12]

2.5 LEGO Mindstorms RCX

V roce 1998 dospěla spolupráce LEGO Group a výzkumné laboratoře MIT ke vskutku revolučnímu produktu - inteligentní sadě LEGO MINDSTORMS RCX. Inteligentní kostka z této

Obrázek 2.11: LEGO Technic Control Center II[12]

stavebnice měla už nejen výstupy pro motory, ale i vstupy, pomocí nichž bylo možné komunikovat se senzory, konkrétně s dotykovým senzorem, světelným senzorem, senzorem otáček a senzorem měřícím teplotu. Inteligentní kostku bylo možné už plnohodnotně programovat včetně řídících struktur jako jsou cykly a podmínky.

V pozdějších letech vyšly i dvě limitované edice RCX, a to droid development kit a dark side development kit, inspirované filmovou ságou *STAR WARS*.

2.6 LEGO Mindstorms NXT

V roce 2006 LEGO Group vytvořila nástupce RCX, inteligentní kostku NXT. Hlavními rozdíly mezi nimi je přibližně desetinásobný výkon a nové programovací prostředí NXT-G, které umožňovalo programovat i dětem pomocí grafického rozhraní, které programování připodobňovalo konstrukci ze stavebnice.

LEGO Mindstorms NXT navíc přidávalo k senzorům z RCX i další senzory, mikrofon, ultrazvukový dálkoměr, barevný senzor a také výkonnější motory, u kterých bylo možné měřit úhel natočení.

2.7 LEGO Mindstorms EV3

Nejnovějším programovatelným legem je v současnosti LEGO Mindstorms EV3, které se započalo prodávat v září 2013. Mimo desetinásobného výkonu a tisíckrát větší paměti oproti staršímu NXT navíc nabízí plnohodnotný operační systém založený na populárním OS Linux. Ve stavebnici EV3 se objevil pouze jeden nový senzor, gyroskopický senzor schopný měřit úhlovou rychlost.

2.7.1 Programovací jazyky podporované LEGO Mindstorms EV3

V době započetí psaní této práce bylo pro platformu EV3 dostupné pouze prostředí pro grafické programování NXT-G. Později byl adaptován pro platformu EV3 i virtuální stroj JAVA (EV3 LeJOS), avšak ten trpěl dětskými nemocemi, kterými každé nové prostředí trpí. Byl zamořený chybami a některé z nich (nefunkčnost bluetooth komunikace) byly s implementací vzducholodě neslučitelné. Proto bylo rozhodnuto, že práce bude vytvořena v prostředí pro grafické programování.

Kapitola 3

Návrh modelu vzducholodě

Prvním úkolem této bakalářské práce je vytvořit funkční model vzducholodě za pomoci stavebnic LEGO Mindstorms EV3.

Obrázek 3.1: Vzducholoď s první verzí gondoly na finále ROBOSOUTĚŽE 2013

3.1 Nosné médium

Při konstrukci vzducholodí se pro nadnášení standartně používají tři plyny - horký vzduch, vodík a helium.

Nejdůležitějším parametrem nosného plynu je jeho hustota při provozní teplotě a tlaku. Ta přímo ovlivňuje vztlak působící na těleso vzducholodi. Podle archimedeovy věty je vztla-

ková síla F_{vz}

$$F_{\mathrm{vz}} = V \cdot \rho_{\mathrm{a}}, \tag{3.1}$$

kde

V je objem plynu a

ρ_a je lokální hustota atmosféry

(ρ_a je samotřejmě funkcí času i prostorových souřadnic, v tomto případě však lze lokální hustotu atmosféry nahradit přibližnou hodnotou atmosférického tlaku v prostorech, kde se bude plánovaný model vzducholodě pohybovat).

V potaz však také musíme vzít tíhovou sílu působící na nosný plyn, která má směr opačný k síle vztlakové. Celková síla F působící na plyn tedy je

$$F = V \cdot (\rho_{\mathrm{a}} - \rho_{\mathrm{g}}), \tag{3.2}$$

kde

ρ_{g} je hustota nosného plynu.

Jako nejvhodnější vyjádření tohoto parametru zavedeme nosnost média vztaženou na 1 m^3. Hodnoty tohoto parametru pro vodík, helium a horký vzduch jsou v tabulce 3.1. Vodík vychází při tomto porovnání jako nejlepší varianta s nosností vyšší o 7,92% než helium. Horký vzduch ze srovnání vychází jako poslední s nosností pouhých 133 g·m^{-3}. Při použití horkého vzduchu by oproti vodíku musela být vzducholoď téměř desetkrát objemnější, aby unesla ekvivalentní náklad.

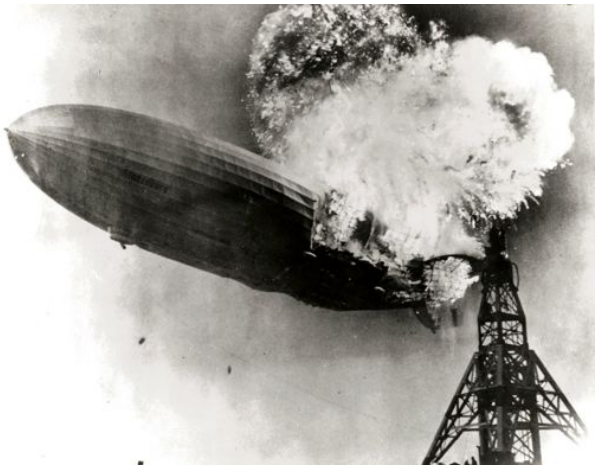
plyn	**nosnost [g.m^{-3}]**
vodík	1118
helium	1036
horký vzduch (323°K)	133

Tabulka 3.1: Nosnost plynů běžně používaných ve vzducholodích[13]

Jako směrodatná ktritéria při výběru nosného plynu je však vhodné brát v potaz i bezpečnost manipulace s daným plynem, jeho cenu a náročnost konstrukce vzducholodě.

3.1.1 Vodík

Vodík je nejen hořlavý, ale ve směsi s kyslíkem dokonce výbušný plyn[14]. Bezpečná manipulace s vodíkem je složitá a dojde-li k jeho zapálení či výbuchu, následky jsou katastrofální. Cena vodíku je přibližně 40 Kč·m^{-3}.[15] Protože má vodík velmi malé molekuly, je mnohem náročnější na kvalitu materiálu použitého pro konstrukci balónu, aby se minimalizoval samovolný únik vodíku.



Obrázek 3.2: Havárie vzducholodi LZ 129 Hindenburg plněné vodíkem dne 6.5.1937[16]

3.1.2 Helium

Helium je podobně jako ostatní prvky podskupiny vzácných plynů inertní.[17] Není hořlavé a manipulace s ním není složitá. Cena helia se pohybuje kolem 490 Kč.m^{-3}.[18] Pro použití helia jako nosného plynu nejsou žádné speciální technické požadavky na konstrukci balónu.

3.1.3 Horký vzduch

Horký vzduch je ze všech tří řešení nejvhodnější jak po ekonomické stránce, neboť vzduch není potřebné kupovat a je možné ho čerpat z okolí, tak po stránce údržby, když vzducholoď není potřebná, je možné jí vyfouknout. Problematické však jsou jeho požadavky na konstrukci vzducholodě. Jednak je nutné použít tepelně odolný materiál na konstrukci pláště a také je potřeba vytvořit mechanismus pro jeho zahřívání. Zahřívání je možné vykonávat jednak elektricky nebo pomocí chemického paliva, například propan-butanu.

3.1.4 Výběr nosného média

Po diskusi s vedoucím této práce, Ing. Martinem Hlinovským, Ph.D., bylo rozhodnuto, že kvůli bezpečnostním rizikům není vhodné jako nosné médium pro vzducholoď využít vodíku. Horký vzduch je také nevhodný, a to především kvůli své nízké hodnotě nosnosti. Navíc vzhledem k tomu, že je pro zahřívání vzduchu v tělese vzducholodě navíc potřebné nadnášet i palivo, ať už ve formě baterií či bomby s chemickým palivem, bylo by potřeba ještě zvětšit objem vzducholodě. Jako nejvhodnější nosné médium se tedy navzdory své vysoké ceně jeví helium.

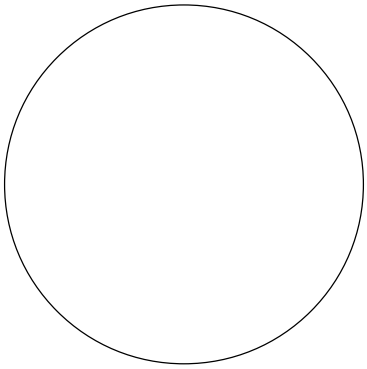
3.2 Výběr balónu

Balón je bezesporu nejdůležitější částí vzducholodě. Tvoří ho pevný obal, který obklopuje nosný plyn. Důležitými parametry při výběru balónu jsou především tvar balónu, typ balónu,

konfigurace stabilizátorů, technologická výbava balónu ale i materiál použitý při jeho výrobě.

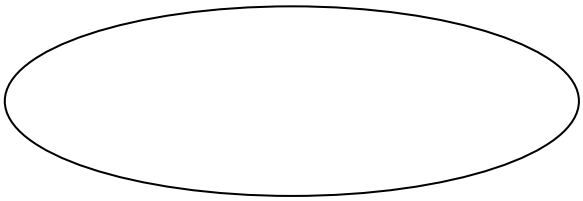
3.2.1 Tvar balónu

Nejjednodušším tvarem balónu je koule. Jelikož je koule tělesem s minimálním povrchem pro daný objem, je tento tvar pro vzducholoď vhodný, neboť jím minimalizujeme váhu balónu. Kulaté balóny mají však i řadu nevýhod, především jejich velký aerodynamický odpor, který značně komplikuje řízení vzducholodě.



Obrázek 3.3: Schematický nákres sférického balónu (pohled z levé strany)

Balón ve tvaru elipsoidu či doutníku je při dopředném pohybu aerodynamičtější a proto jsou tyto tvary pro konstrukci vzducholodě vhodnější, navzdory vyšší váze balónu oproti kulovému tvaru.



Obrázek 3.4: Schematický nákres elipsoidního balónu

3.2.2 Typ balónu

S tvarem balónu je úzce provázaný jeho typ. Základní tři typy jsou nerigidní, polorigidní a rigidní balón.

Nerigidní balón postrádá vnitřní strukturu a jeho tvar je udržován pouze vnitřním tlakem plynu na balón. Kvůli chybějící vnitřní struktuře je nejlehčí, nejjednodušší na konstrukci a nejlevnější ze všech tří typů, avšak jeho velikost a nosnost jsou omezené. V případě, že se jedná o balón doutníkovitého tvaru, hrozí jeho prohnutí v místě největšího zatížení. Vhodnějším tvarem pro tuto konstrukci je elipsoid.

Obrázek 3.5: Schematický nákres doutníkovitého balónu

Polorigidní balón má oproti neriginímu tzv. kýl, nosnou konstrukci která prochází celým tělesem balónu v předo-zadním směru. To dovoluje výrazně zvětšit velikost vzducholodě, což umožňuje i vyšší nosnost. Pro tuto konstrukci jsou vhodné jak doutníkovité tak elipsoidní balóny.

Rigidní balón je ze všech tří konstrukcí nejpevnější, kromě kýlu je vybaven i pevným pláštěm. Nejčastěji je u rigidních vzducholodí používaný tvar doutníku, neboť je prostřední část možné rozdělit do sekcí, které dovolují jistou modulárnost systému a je tedy možné ze standartních dílů vyrobit balón s nosností a velikostí podle potřeby. Standartně je v každém oddílu separátní *plynový vak*, který obsahuje nosný plyn. Ten je obklopen vnitřní konstrukcí oddílu, která je potažena textilovým pláštěm. *Plynový vak* nevyplňuje celý objem segmentu, uvnitř balónu je uloženo i palivo. Rigidní vzducholodě mohou být největší ze všech typů balónů, zároveň ale nejsou vhodné pro konstrukci malých vzducholodí - vnitřní struktura je příliš těžká a vzducholoď tudíž musí být větší v porovnání s nerigidní nebo polorigidní vzducholodí.

3.2.3 Konfigurace stabilizátorů

Standartně se používají tři typy konfigurací stabilizátoru. Aby byla vzducholoď stabilní, musí být stabilizátory umístěné na vzducholodi symetricky a musí vytvářet odpor vůči horizontálnímu i vertikálnímu naklánění vzducholodě. Minimální počet je proto tři stabilizátory a často se používají i čtyři stabilizátory.

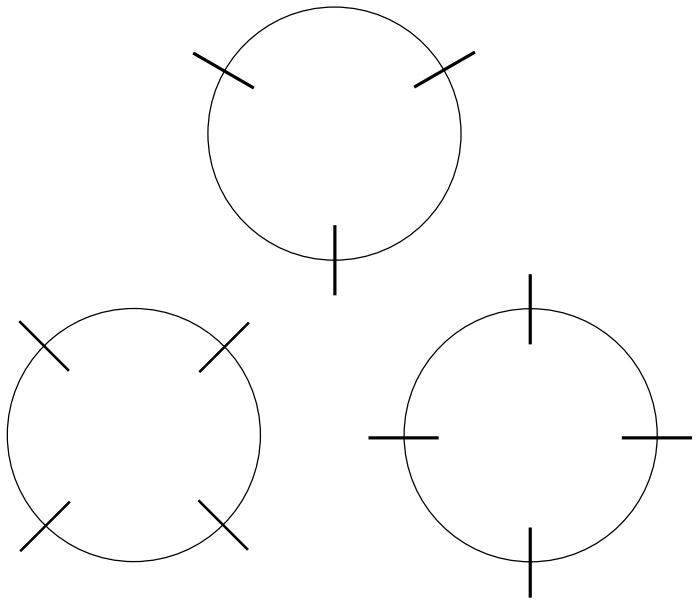
Hlavní rozdíl mezi použitím tří a čtyř stabilizátorů je aktivní plocha stabilizátorů. V případě pravidelného 120°úhlu mezi stabilizátory je aktivní plocha menší

$$\frac{S_h^3}{S_h^4} = \frac{a + 2 \cdot (a \cdot sin(30°))}{a} = 2 \text{ krát pro horizontální směr a} \tag{3.3}$$

$$\frac{S_v^3}{S_v^4} = \frac{2 \cdot (a \cdot cos(30°))}{a} = \sqrt{3} \text{ krát pro vertikální směr,} \tag{3.4}$$

kde

a je plocha stabilizátoru.



Obrázek 3.6: Běžné konfigurace stabilizačních ploch (pohled zezadu)

U malé vzducholodě však mohou být stabilizátory větší v poměru k velikosti vzducholodě oproti velkým vzducholodím, kde by způsobovaly problémy s rozložením váhy. S přihlédnutím ke zmíněným faktům bylo rozhodnuto, že na konstrukci vzducholodě bude využito tří stabilizátorů.

3.2.4 Technologická výbava balónu

Pro určený objem balónu a váhu vzducholodě je možné zavést *rovnovážnou výšku*, nadmořskou výšku h pro kterou platí rovnice

$$V \cdot (\rho_{\mathrm{a}}(h) - \rho_{\mathrm{g}}(h)) = m_{vz} \cdot g(h), \tag{3.5}$$

kde

V je objem balónu,

$\rho_a(h)$ je vzduchu v nadmořské výšce h,

$\rho_g(h)$ je hustota nosného plynu v nadmořské výšce h,

m_{vz} je hmotnost balónu a

$g(h)$ je gravitační zrychlení v nadmořské výšce h

(veličiny ρ_a a ρ_g jsou závislé i na teplotě, avšak pro momentální potřebu je možné tuto závislost zanedbat). Do této výšky vzducholoď samovolně nastoupá a bude se v ní držet dokud nebude změněn jeden z parametrů vzducholodě.

Pro regulaci výšky se u většiny vzducholodí využívá *balonetů*, vzduchových vaků uvnitř tělesa vzducholodě. Když je do těchto vaků natlačen vzduch z okolí vzducholodě, její hmotnost stoupá při zachování konstantního objemu balónu. Hodnota rovnovážné výšky se při tom snižuje a vzducholoď samovolně klesá. Výroba balonetů je na plánované škále náročná a LEGO není vhodné pro regulaci množství uvnitř balonetů, a tudíž balonety nebudou při konstrukci použity. Udržování výšky bude realizováno pomocí motorů, které budou konstrukčně řešeny tak, aby umožňovaly tah směrem nahoru a dolů.

3.3 Konstrukce gondoly vzducholodě

Požadavky na konstrukci gondoly jsou následující:

- Gondola musí být sestavena z co největší části ze stavebnice LEGO Mindstorms EV3.
- Gondola musí být co nejlehčí, aby nebylo potřeba příliš velkého balónu.
- Gondola musí být pevná, aby odolala silovému působení motorů.
- Konfigurace motorů musí umožňovat jak azimutální rotaci vzducholodě tak její dopředný či zpětný chod.
- Kvůli absenci balonetů musí být konfigurace motorů schopná vyvinout vertikální tah.
- Gondola musí být vybavena senzory pro stanovení polohy a orientace vzducholodě.

3.3.1 Hlavní použité součásti z lega

Nejdůležitější součástí gondoly je inteligentní kostka LEGO Mindstorms EV3, kterou je zcela nutné použít pro splnění prvního požadavku na konstrukci gondoly. Aby bylo umožněno inteligentní řízení, gondola je vybavena i LEGO-kompatibilním tříosým akcelerometrem pro sledování polohy, jedním gyroskopickým senzorem pro sledování azimutu a kamerou EV3 vision subsystem v4 pro sledování polohy.

3.3.2 Motory

V počáteční fázi konstrukce vzducholodě byly v duchu prvního požadavku na gondolu pro pohon vrtulí použity LEGO motory ze setu EV3. Již po prvním experimentu s těmito motory vzniklo podezření, že nebudou dostatečně výkonné. Následně bylo zjišťeno, že motory ze setu EV3 jsou schopné vyvinout maximální rychlost 175 otáček za minutu a maximální točivý moment 74 N.cm při zastaveném motoru. Tyto parametry jsou pro pohon vzducholodě zcela nevhodné.

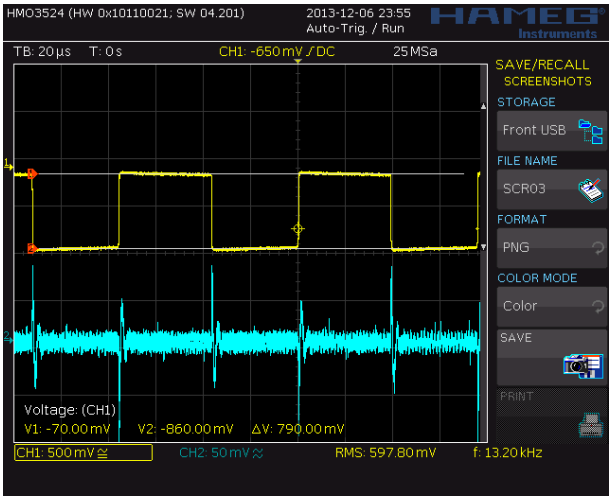
Jako řešení se ukázalo použití stejnosměrných pomaloběžných leteckých modelářských motorů, které vzducholodi poskytují výkon dostatečný pro realizaci automatického řízení.

Pro použití motorů je nutné připojit motory k inteligentní kostce. Nejprve je nutné zjistit, jak LEGO řídí motory. Inteligentní kostka je propojena s motorem pomocí šestižilového kabelu. Jednotlivé barvy kabelů a jejich korespondující funkce jsou popsány v tabulce 3.2.

barva žíly v kabelu	funkce vodiče
bílá	dodává motoru energii
černá	dodává motoru energii
červená	zem (GND)
zelená	4,3 V
žlutá	výstup pro měření úhlové rychlosti
modrá	výstup pro měření úhlové rychlosti

Tabulka 3.2: Popis jednotlivých žil v propojovacím kabelu pro motory sady EV3[19]

Směrodatné pro naší aplikaci jsou bílý a černý kabel. Výstupem z nich je PWM signál o frekvenci přibližně 8 kHz. Rozdíl v napětí je 9 V, jsou-li pro napájení inteligentní kostky EV3 použité baterie a 7,4 V, napájí-li kostku dodávaný akumulátor. Výstupní charakteristika byla změřena na osciloskopu viz obrázek 3.7. V případě, že je na bílém kabelu kladné napětí a na černém záporné napětí, rotují LEGO motory po směru hodinových ručiček, v případě opačného rozdílu potenciálu se točí motor proti směru hodinových ručiček.



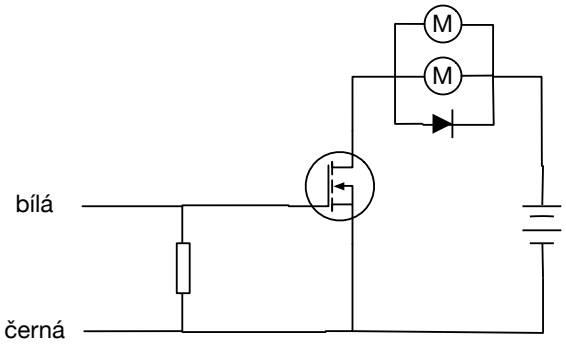
Obrázek 3.7: Výstup inteligentní kostky pro motory (střída 0,5)

První verze řízení motorů byla realizována přímým připojením výstupu inteligentní kostky EV3 na napájecí konektory motoru. Toto řešení se ukázalo jako nevhodné, protože vnitřní napájení inteligentní kostky EV3 není schopno dodávat dostatek energie pro motory a tudíž se motory otáčí natolik pomalu, že nebylo možné let uspokojivě řídit.

Řešením tohoto problému je použití akumulátoru jako externího zdroje energie pro motory. Jako ideální zdroj byl vybrán dvojčlánkový Li-Pol akumulátor firmy Energo. Kvůli jednoduchosti realizace bylo rozhodnuto, že bude vnější obvod napájející motory z akumulátoru spínán pomocí relé. Kvůli použití relé však bylo možné ovládat pouze sepnutí/rozepnutí motorů, nebylo tedy možné řídit jejich výkon.

Obrázek 3.8: Realizace obvodu s relé spínajícím motory

Kvůli nepraktičnosti absence proporcionálního řízení výkonu motorů byla nakonec vytvořena třetí, definitivní verze rozhraní mezi leteckými motory a inteligentní kostkou. Aby bylo možné řídit výkon motorů, bylo využito tranzistoru typu MOSFET v zapojení popsaném na obrázku 3.9.

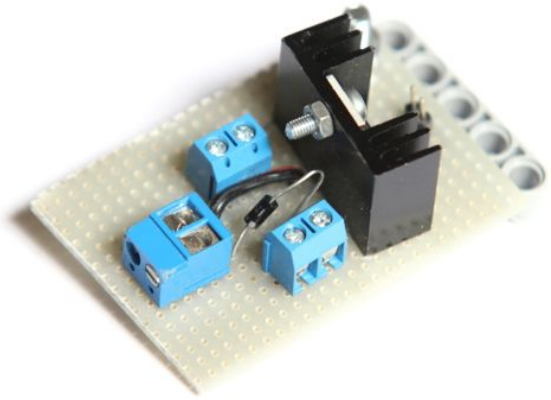


Obrázek 3.9: Zapojení řídícího obvodu s MOSFET tranzistorem

Použitý tranzistor je IOR IRF3205, rezistor má hodnotu 10 kΩ. Dioda nese označení 1N4007. Kvůli vysokému proudu procházejícímu tranzistorem se tranzistor nadměrně zahříval a proto byl opatřen chladičem. Realizovaný obvod, opatřený navíc velkou propojkou "L"ze stavebnice LEGO, je na obrázku 3.10. Experimentálně bylo zjištěno, že se motory rozbíhají při střídě vstupního signálu regulačního obvodu větší než 0.3. Toto zjištění musí být bráno v potaz při návrhu a implementaci řídícího regulátoru. Zároveň řízení neumožňuje zpětný chod motoru, takže pro opačný směr akčního zásahu je potřebné motor otočit o 180°.

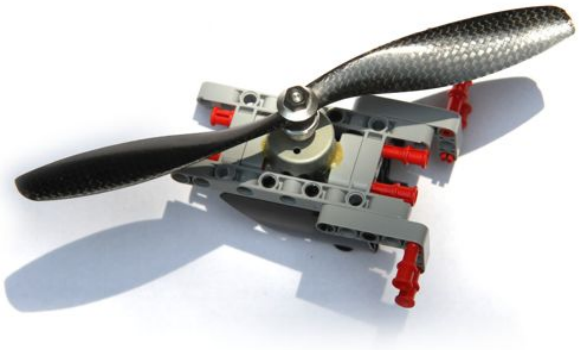
3.3.3 Rotor

Jako rotor byla po konzultaci s obsluhou obchodu s RC modely vybrána dvojlistá tažná vrtule o průměru 205 mm. V maximálních otáčkách poskytuje motorům dostatečný tah



Obrázek 3.10: Realizace řídícího obvodu s MOSFET tranzistorem

pro svižné ovládání vzucholodě. Jako materiál byl vybrán karbon, zejména kvůli své nízké hmotnosti. Použitá vrtule je zobrazena na obrázku 3.11.



Obrázek 3.11: Jednotka motoru s nasazenou vrtulí

3.3.4 Tělo gondoly

Inteligentní kostka EV3 je nejtěžší součástí vzducholodě a tudíž je vhodné ji kvůli stabilitě umístit doprostřed gondoly.

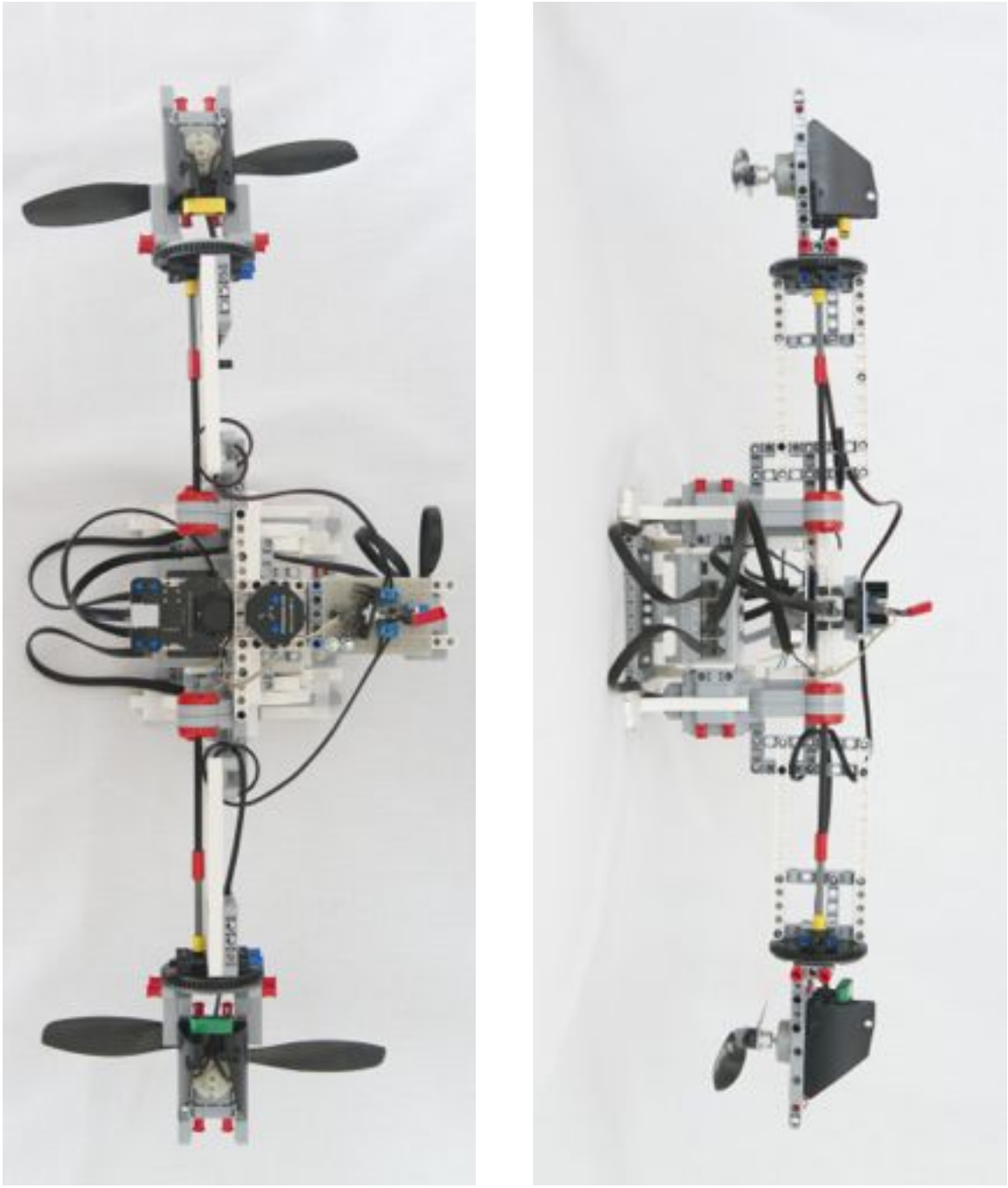
Na ní je umístěna nosná konstrukce s velkými plochami na horní straně. Na těchto plochách jsou umístěné suché zipy, které drží gondolu na balóně.

Jelikož je potřebné motory otáčet, je nutné vytvořit robustní lůžko pro motor, které se může otáčet o 360°. Jeho směr je řízený LEGO motory z inteligentní kostky EV3. Pro zajištění pevnosti spoje se hodí díl 4624645, nejpevnější ze všech LEGO rotačních propojek[20].

Tento spoj má na vnitřním obvodu 24 zubů a hnací ozubené kolo má 8 zubů. Pro otočení leteckého motoru o 360° je nutné otočit motor řídící orientaci leteckého motoru o 1080°.

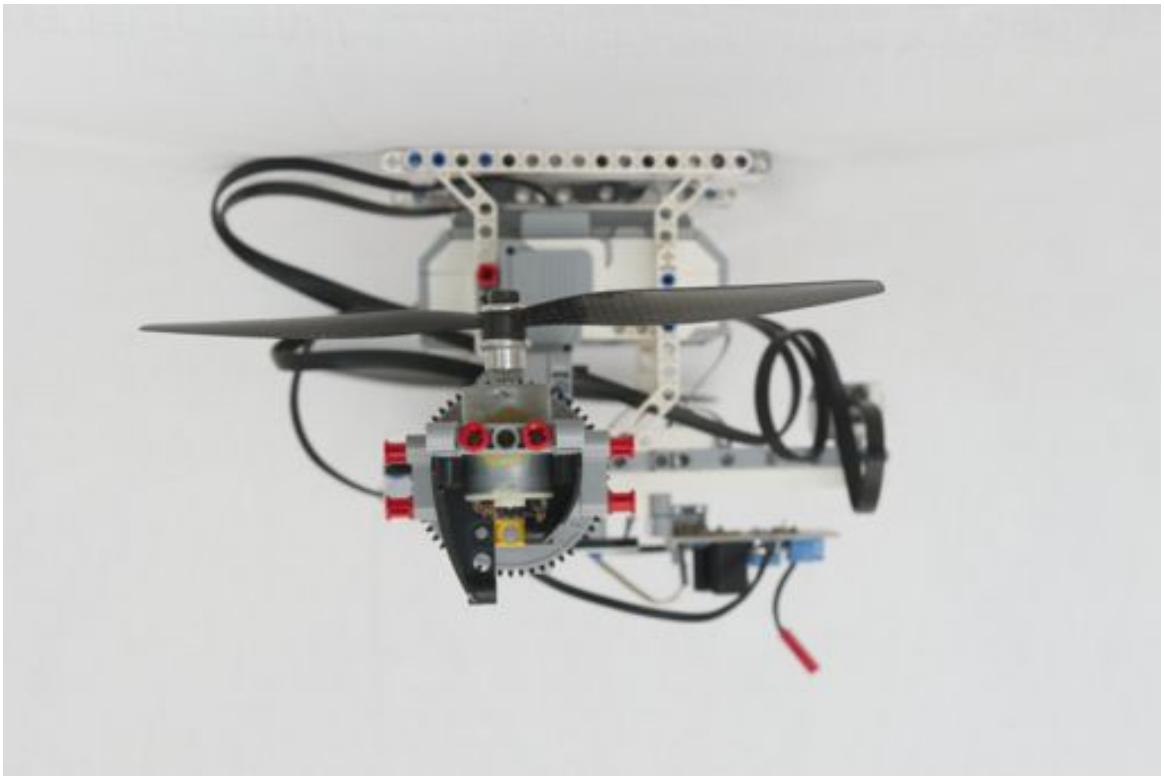
Obrázek 3.12: Díl 4624645, vhodný jako robustní spoj schopný rotace[21]

Dále je vhodné na gondolu umístit plošku vhodnou pro instalaci senzorů a rozhraní mezi leteckými motory a inteligentí kostkou. Na této plošce bude dále připevněn i akumulátor napájející motory.

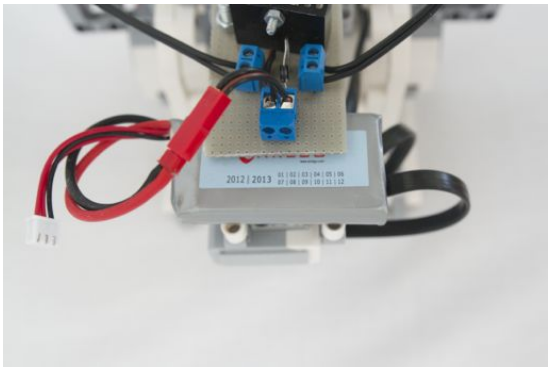


(a) Pohled zespoda (b) Pohled zepředu

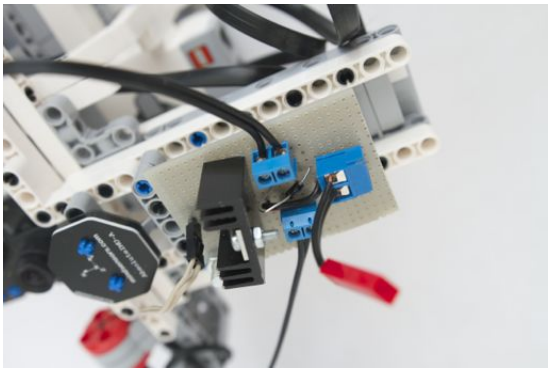
Obrázek 3.13: Dokončená gondola vzducholodě



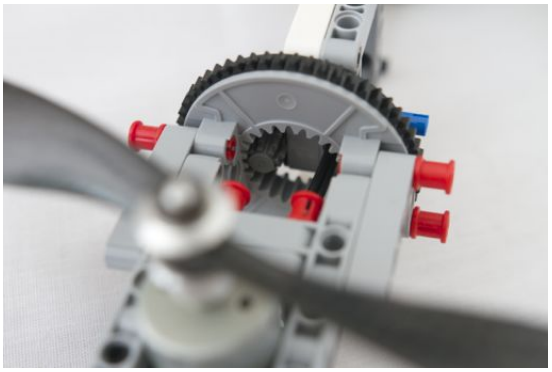
(a) Pohled z levé strany



(b) Upevnění akumulátoru



(c) Rozhraní mezi EV3 a motory



(d) Detail upevnění lůžka motoru

Obrázek 3.14: Detaily gondoly

Kapitola 4

Uživatelské rozhraní pro stanovení reference

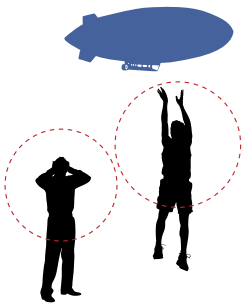
Aby bylo možné vzducholoď řídit, je vhodné vyvinout dálkové ovládání pro vzducholoď, pomocí kterého bude uživatel schopen vzducholodi předat instrukce k jejímu pohybu.

Toto dálkové ovládání by mělo být uživatelsky komfortní jak s ohledem na ergonomii tak na složitost ovládání a rychlou učící křivku[22], neboť je vzducholoď určena zejména pro prezentační účely FEL ČVUT a je tedy pravděpodobné, že jí budou často řídit nezkušení lidé. Dobře zpracované dálkové ovládání pilotovi umožní soustředit se na pohyb vzducholodě a prohloubí jeho zážitek z letu.

4.1 Komunikace dálkového ovládání a vzducholodě

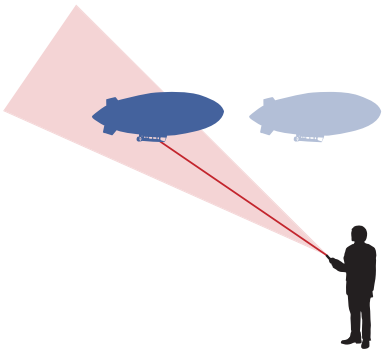
Inteligentní kostka lega Mindstorms EV3 je schopna komunikovat čtyřmi různými kanály.

Nejjednodušší z nich je pomocí tlačítek přímo na těle inteligentní kostky, avšak to se pro ovládání vzducholodě nezdá vhodné, a to zejména kvůli možnosti vzducholodi vzdálit se z akčního radia rukou uživatele, viz obrázek 4.1.



Obrázek 4.1: Vzducholoď mimo dosah rukou uživatele (hranice akčního rádia je znázorněna červenou přerušovanou čarou)

Dalším komunikačním kanálem jsou senzory, které je možné ke kostce připojit. Pro komunikaci se hodí zejména infračervený senzor, který je schopen vysílat, přijímat a interpretovat infračervené signály.[23] Infračervený senzor je však pro komunikaci dálkového ovládání se vzducholodí značně nevhodný. Mimo krátkého dosahu (přibližně dva metry[24]) je tento senzor směrový a tudíž by se musel při pohybu vzducholodě pohybovat i uživatel či natáčet infračervený sezor. Jelikož však musí být dálkové ovládání uživatelsky přijemné, není vhodné jako řešení volit pohyb uživatele. Natáčení senzoru však není možné, neboť by se musel měnit jak jeho azimut tak jeho elevace, což kvůli obsazenosti motorových výstupů[1] inteligentní kostky není možné.



Obrázek 4.2: Problémy s infračerveným dálkovým ovládáním (přibližná efektivní oblast vysílače znázorněna červenou barvou)

Nejvhodnějším kanálem pro komunikaci ovládání a vzducholodě je bluetooth. Má dosah minimálně 25 metrů[25] a pokles kvality přijímaného signálu v závislosti na směru je minimální. Pro využití bluetooth není potřebná žádná zvláštní výbava a má plnou podporu využitého programovacího jazyka.

Poslední variantou je využití Wi-Fi. Pro zprovoznění Wi-Fi kanálu je potřebný specifický modul, komunikující s inteligentní kostkou pomocí rozhraní USB. Pomocí tohoto modulu je v současnosti možné kostku připojit k počítači a také pomocí standartního rozhraní SSH komunikovat se systémem linux běžícím na inteligentní kostce. Bohužel není možné použít Wi-Fi pro programování v NXT-G a proto bylo její použití zavrženo.

4.1.1 Implementace komunikačního kanálu

Bluetooth komunikaci v prostředí NXT-G zajišťují dva bloky. První z nich je blok *Bluetooth connection*, který má tři základní funkce - zapnutí bluetooth, vypnutí bluetooth a připojení se k jiné inteligentní kostce. První dvě funkce nepřijímají žádné parametry, inicializace připojení potřebuje jako vstup název cílové inteligentní kostky. Druhým blokem je blok *Messaging*, který zajišťuje vysílání a čtení přijatých zpráv.

Posílání a čtení zpráv má mimo určení cílové inteligentní kostky i identifikátor schránky, kam zpráva dorazí. Tuto schránku je možné si představit jako proměnnou, do které se ukládá nejnovější přijatá hodnota s identifikátorem dané schránky.

[1] Inteligentní kostka má 4 výstupy pro motory, přičemž dva z nich řídí úhel naklonění motorů a jeden výkon motorů. Zbývá již tedy pouze jeden výstupní port.

(a) Zapnutí bluetooth

(b) Inicializace komunikace

(c) Odesílání zprávy

(d) Čtení přijaté zprávy

Obrázek 4.3: NXT-G bloky používané pro komunikaci via bluetooth

V případě, že se vysílací zařízení (dálkové ovládání) odpojí od přijímače (vzducholoď), přijímač o této události nedostává žádnou informaci. Tento problém je řešen schránkou *Watchdog*, která vzducholoď informuje o připojeném joysticku hodnotou *pravda*. V případě, že vzducholoď vteřinu nedostává hodnotu *pravda* do schránky *Watchdog*, dochází k timeoutu a vzducholoď se přepne do režimu automatického udržování výšky.

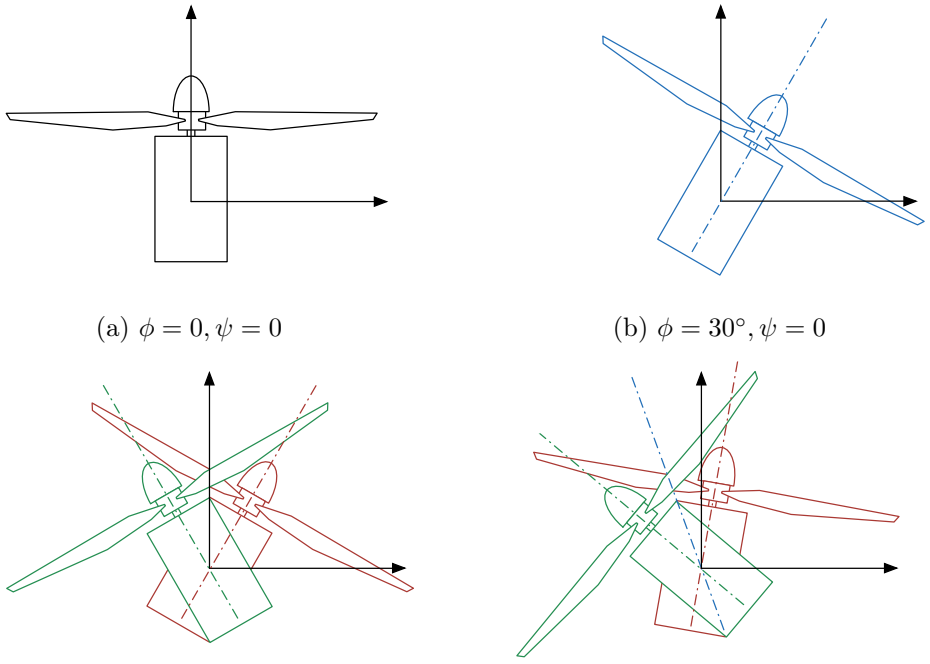
4.2 Ovládání pomocí joysticku

Nejpřirozenějším způsobem ovládání létajících vozidel je joystick. Joystick je typ dálkového ovládání, které sestává z pevné podložky a v neutrální poloze vertikálně orientované tyče. Orientace této tyče a úhel, pod kterým prochází podložkou, určují hodnoty výstupních veličin joysticku. Tyč je nakláněna uživatelem a v případě, že uživatel přestane na tyč působit silou, vrací se sama do neutrální polohy, případně zůstává na místě (závisí na konkrétní implementaci).

Obrázky reálné implementace joysticku s použitím stavebnice LEGO Mindstorms EV3 jsou v příloze.

4.2.1 Výběr výstupní veličiny

Předozadní náklon joysticku v naší implementaci určuje směr obou motorů, což umožňuje řídit pohyb vzducholodě dopředu či dozadu. Nulová výchylka oproti vetikále značí směřování motorů přímo nahoru, viz obrázek 4.4a. Azimutální výchylka řídící tyče joysticku oproti tomu má vliv na rotaci vzducholodě, určuje fázový rozdíl úhlů natočení obou motorů. Ty se natáčí symetricky o polovinu tohoto úhlu kolem úhlu daného předozadním náklonem řídící tyče joysticku. V případě, že je znaménko azimutální výchylky kladné (rotace po směru



(a) $\phi = 0, \psi = 0$ (b) $\phi = 30°, \psi = 0$

(c) $\phi = 0, \psi = 60°$ (d) $\phi = -20°, \psi = 60°$

Obrázek 4.4: Cílová poloha motorů pro daný stav joysticku (ϕ značí úhel náklonu a ψ značí azimutální rotaci řídící tyče, modrá značí rotaci obou motorů, zelená rotaci pravého motoru a červená rotaci levého motoru)

hodinových ručiček), natáčí se levý motor více dopředu a pravý motor více dozadu. Tím je zajištěno přirozená reakce na pohyb joysticku - při rotaci vpravo zatáčí vzducholoď doprava.

V případě, že uživatel stiskne tlačítko na horní straně joysticku, motory se zapnou na plný výkon.

4.2.2 Program pro joystick

Naklonění řídící tyče joysticku jsou vyčítána z enkodérů na LEGO motorech. Ty mají rozlišení 360 kroků na jednu rotaci, jeden krok tedy odpovídá úhlu 1°. Tyto úhly jsou zaznamenávány do proměnných **HANGLE** a **WANGLE**.

Současně s počítáním úhlů řídící tyče je do proměnné **POWER** zaznamenáváno, je-li stisknuto tlačítko plyn.

Třetím a posledním procesem je odesílání dat přes bluetooth, kdy se periodicky odesílá obsah všech tří řídících proměnných a watchdog, viz. 4.1.1, do korespondujících schránek vzucholodě.

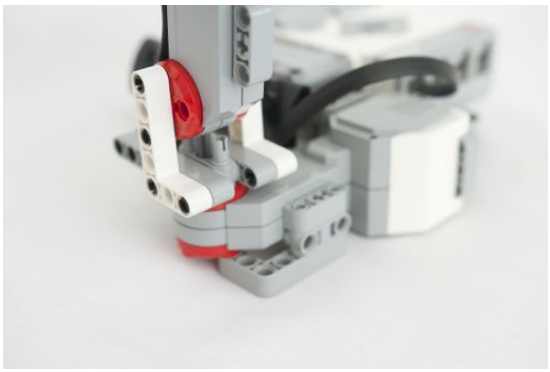
4.3 Ovládání pomocí senzorické rukavice

Senzorická rukavice není obvyklý způsob ovládání, avšak je velmi intuitivní. Sestává především z inteligentní kostky EV3 připevněné k paži a kostry se senzory, která je připevněná

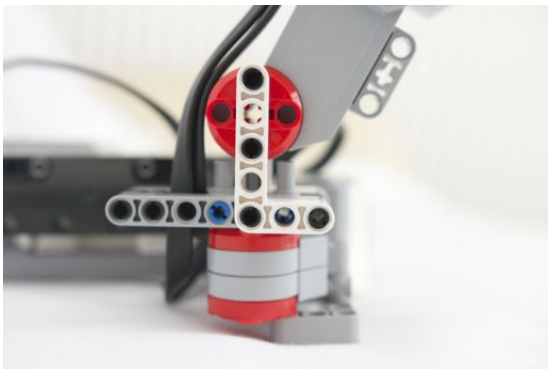
(a) Pohled z úhlu na joystick

(b) Čelní pohled na joystick

(c) Pohled shora na joystick



(d) Detail kloubu joysticku



(e) Detail nakloněného kloubu joysticku

Obrázek 4.5: Pohledy na joystick

k ruce. Senzory detekují naklonění ruky a vysílají je vzducholodi, která na ně přirozeným způsobem reaguje. Je možná i regulace stoupání a klesání.

4.3.1 Výběr výstupní veličiny

Senzorická rukavice je schopná pomocí gyroskopických čidel měřit úhlovou rychlost dlaně dopředu/dozadu a doleva/doprava. Sumou úhlových rychlostí je možné měřit náklon ruky. Intuitivní volbou veličiny odpovídající náklonu ruky v určitém směru je síla působící na vzducholoď. V případě předozadního náklonu jde o sílu působící vpřed/vzad a v případě náklonu do strany o sílu rotující vzducholoď. Aby bylo možné řídit letovou hladinu vzducholodě, je senzorická rukavice vybavena i dvěma tlačítky umístěnými pod ukazováčkem a prostředníčkem. Pokud je stisknuto tlačítko pod ukazováčkem, po dobu stisku vzducholoď stoupá, a analogicky po stisku tlačítka pro prostředníček vzducholoď klesá.

4.3.2 Program pro senzorickou rukavici

Narozdíl od joysticku je nutné do programu pro rukavici umístit i část programu zodpovědnou za kalibraci gyroskopických senzorů. Kalibrace se provádí položením rukavice na pevnou podložku a zapnutím programu. Zamezením kontaktu s rukami se zabrání chybám v měření.

Ačkoli jsou při rozumných pohybech rukou senzory úspěšné v měření náklonu, při rychlejších pohybech je možné rozkalibrovat nulové úhly naklonění. Proto je vhodné program vybavit i větví, kdy po stisku prostředního tlačítka inteligentní kostky vynulujeme úhly naklonění. Tato větev se automaticky provádí po iniciační kalibraci, a to v momentě kdy si uživatel rukavici nasadí.

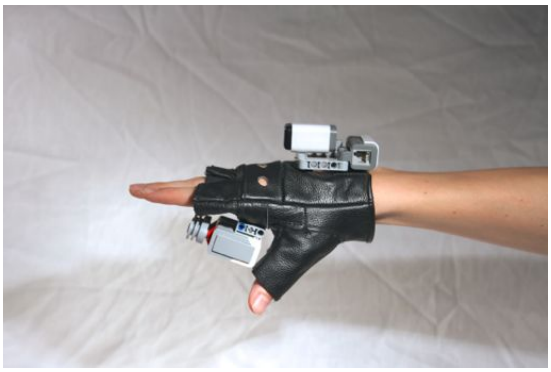
Samotné měření úhlu naklonění probíhá v režimu **RAW**, kdy senzor dodává data v rozmezí -1023 až 1024. Od tohoto měření je odečtený offset senzoru zjištěný při kalibraci a výsledky jsou násobeny časem od posledního měření a sčítány. Úhel 90° při tom odpovídá přibližně hodnotě 30. Aby bylo ovládání vzducholodě pro uživatele příjemné, je vhodné zavést do programu pásmo necitlivosti. Velikost tohoto pásma byla po experimentech stanovena na -5 až 5.

Komunikaci s gondolou obstarává samostatný proces, interpretující naměřená data a odesílání instrukcí vzducholodi.

(a) Studentka střední školy řídí model vzducholodě pomocí senzorické rukavice v průběhu exkurze na FEL ČVUT

(b) Celkový pohled na sestavu

(c) Ruka v rukavici (pohled shora)



(d) Ruka v rukavici (pohled zleva)

(e) Ruka v rukavici (pohled zespodu)

Obrázek 4.6: Pohledy na joystick

Kapitola 5

Stanovení polohy vzducholodě

5.1 Senzorické vybavení vzducholodě

Pro potřeby řízení je vzducholoď vybavena

- Tříosým akcelerometrem pro měření zrychlení vzducholodě. Tento senzor má citlivost 0,01 $m \cdot s^{-2}$.[26]
- Gyroskopickým senzorem pro určení azimutu. Tento senzor má pro měření úhlu přesnost $\pm 3°$.[27]
- Kamerou pro orientaci v prostoru a určování trajektorie letu. Kamera však není příliš spolehlivá a není vhodná pro jemnou manipulaci. Tato kamera je vybavena subsystémem zajišťujícím zpracování obrazu, pomocí nějž je schopna detekovat barvy v předdefinovaném rozsahu.

5.2 Určení polohy a orientace vzducholodě

Pro návrh regulátoru řízení vzducholodě je vhodné vducholoď modelovat jako systém se čtyřmi stupni volnosti, pohybem ve třech rozměrech a azimutální rotací. Azimutální rotace vzducholodi je sledována pomocí gyroskopického senzoru, poloha je potom sledována dvojitou sumací dat z tříosého akcelerometru váženou časem vzorku s ohledem na směřování vzducholodě.

Výzkum určení polohy byl realizován za pomoci tříkolého podvozku přidaného na spodní stranu gondoly, který zajišťoval volnost jak dopředného pohybu tak azimutální rotace. Schématický nákres této konfigurace je na obrázku 5.1 a realizace na obrázku 5.2. Gondola je přitom připojena k hnacímu motoru pomocí ocelového lanka, aby bylo minimalizováno jeho relativní prodloužení působící silou. Jako kalibrační papíry byly použity červené čtvrtky velikosti A3 (297 mm na 420 mm), přilepené na stropě ve výšce 212 cm (191 cm od přední čočky kamery).

Data z akcelerometru bohužel vykazují šum 0,04 - 0,05 $m \cdot s^{-2}$.[26] Proto je vhodné zprůměrovat data z pěti měření. To poskytne dostatečnou přesnost za cenu nízké citlivosti na

rychlé změny zrychlení vzducholodi (rychlé změny zrychlení nebyly na přirozeném chování modelu pozorovány).

Data z akcelerometru jsou uspokojivě přesná pouze po krátkou dobu, po čtyřiceti sekundách již odchylka dat od skutečnosti v 80% případů překročí desetiprocentní hranici, zvolenou jako přijatelná přesnost. Měření bylo prováděno pětkrát. Z tohoto důvodu jsou na zemi v intervalu pěti metrů rozmístěny červené papíry, které vzducholoď detekuje kamerou namířenou směrem k zemi. Tato kamera slouží ke kalibraci polohy, vždy, když vzducholoď přeletí nad papírem, data o poloze vzducholodě se aktualizují na souřadnice papíru nejbližšímu k současně odhadované poloze.

Aby se předešlo fantomovým detekcím při analýze výstupu z kamery, musí být papír detekován při aspoň třech po sobě jdoucích měřeních kamery.

Globální poloha vzducholodě tedy odpovídá rovnicím

$$x[n] = \sum_{i=k}^{n} \left(\sum_{j=k}^{i} ((a_x[j] - o_x) \cdot cos\left(\Phi[j]\right) \cdot t_j) \cdot t_i \right) + x[k], \tag{5.1}$$

$$y[n] = \sum_{i=k}^{n} \left(\sum_{j=k}^{i} ((a_y[j] - o_y) \cdot sin\left(\Phi[j]\right) \cdot t_j) \cdot t_i \right) + y[k] \text{ a} \tag{5.2}$$

$$z[n] = \sum_{i=0}^{n} \left(\sum_{j=0}^{i} ((a_z[j] - o_z) \cdot t_j) \cdot t_i \right) + z[0], \tag{5.3}$$

kde

$x[n]$ je absolutní poloha souřadnice x vzducholodě v době vzorku n vzhledem k poloze při zapnutí,

$y[n]$ je absolutní poloha souřadnice y vzducholodě v době vzorku n vzhledem k poloze při zapnutí,

$z[n]$ je absolutní poloha souřadnice z vzducholodě v době vzorku n vzhledem k poloze při zapnutí,

$a_x[n]$ je zrychlení v ose x v době vzorku n,

$a_y[n]$ je zrychlení v ose y v době vzorku n,

$a_z[n]$ je zrychlení v ose z v době vzorku n,

o_x je offset zrychlení v ose x, zjištěný při kalibraci,

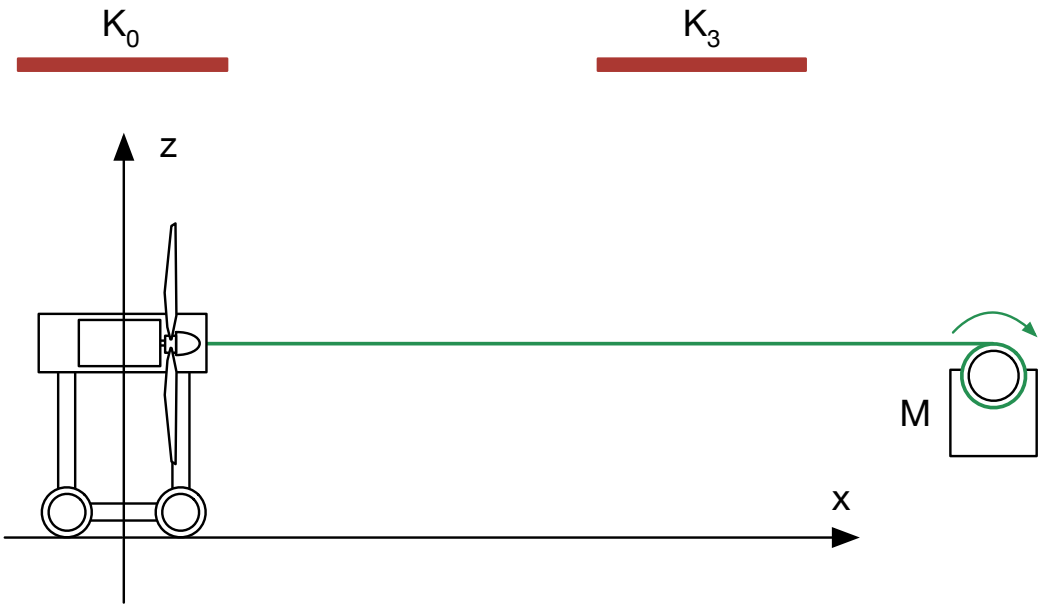
o_y je offset zrychlení v ose y, zjištěný při kalibraci,

o_z je offset zrychlení v ose z, zjištěný při kalibraci,

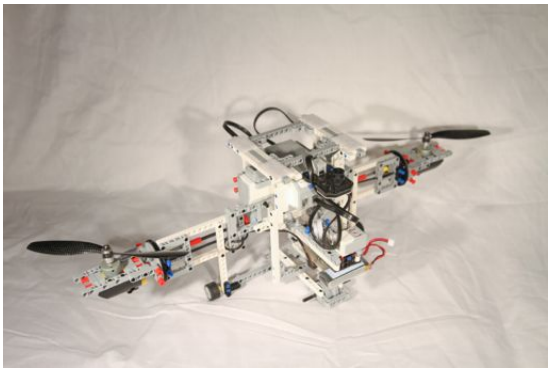
$\Phi[n]$ je azimutální úhel vzducholodi v době vzorku n,

$t[n]$ je doba trvání vzorku n a

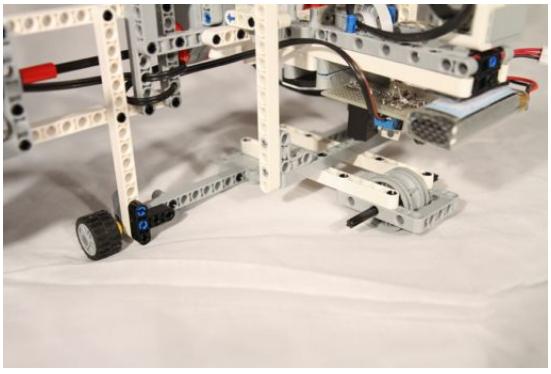
k je poslední kalibrační vzorek (kalibrace pomocí papíru).



Obrázek 5.1: Konfigurace pro měření pohybu. **M** označuje hnací motor, $\mathbf{K}_0$ je kalibrační papír na souřadnici $x = 0$, $\mathbf{K}_3$ je kalibrační papír na souřadnici $x = 3$ metry.



(a) Gondola s podvozkem



(b) Detail testovacího podvozku

Obrázek 5.2: Podvozek pro testování

Kapitola 6

Řízení vzducholodě

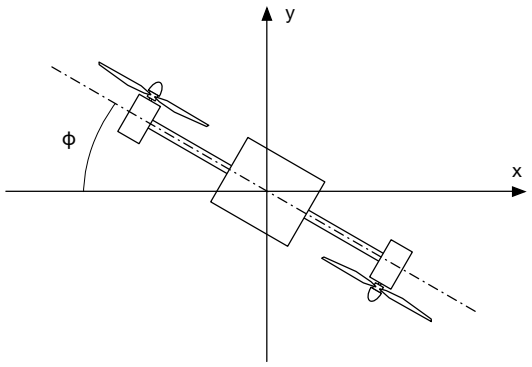
6.1 Identifikace modelu

Při identifikaci modelu byl model rozdělen na 3 části, azimutální rotaci, pohyb v ose z (stoupání a klesání) a pohyb v ose x (pohyb dopředu a dozadu).

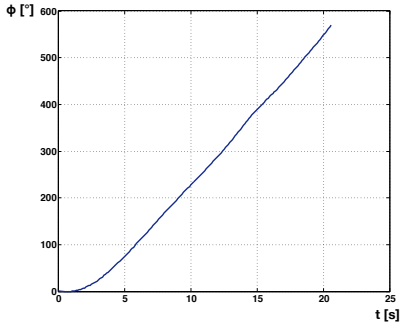
Pro zaznamenávání dat byl využit LEGO blok File access, následně byla data stažena z inteligentní kostky a zpracována v programu MATLAB.

6.1.1 Identifikace přenosu azimutální rotace

Přechodová charakteristika azimutálního pohybu je na obrázku 6.1b. Měření úhlu bylo prováděno pomocí gyroskopického senzoru ve vzducholodi po dobu dvaceti vteřin, kdy byly motory namířeny opačným směrem rovnoběžně s osou x, viz. obrázek 6.1a.



(a) Konfigurace pokusu pro měření přechodové charakteristiky azimutu (pohled shora).



(b) Přechodová charakteristika azimutální rotace.

Obrázek 6.1: Identifikace přenosu azimutální rotace

Z přechodové charakteristiky azimutální rotace je zřejmé, že se jedná o systém integrač-

ního charakteru se zpožděním. Obecný přenos takového systému je

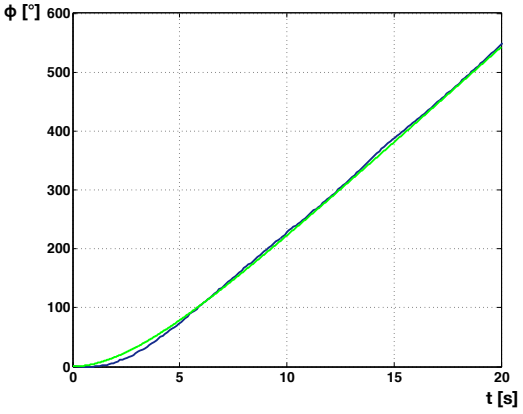
$$G_{In_{(s)}} = \frac{1}{T_I} \cdot \frac{1}{s \cdot (T_1 \cdot s + 1)^n}. \tag{6.1}$$

Abychom mohli identifikovat přenos, musíme určit čas t_0, kdy asymptota přechodové charakteristiky protne osu x, úhel $y(t_0)$ v čase t_0 a úhel $y(1)$ v čase 1.

Pomocí zmíněných parametrů odezvy a postupu podrobně popsaného v [28] byl přenos identifikován jako

$$G_{\Phi_{(s)}} = \frac{9,75}{s \cdot (s \cdot +0,3)}. \tag{6.2}$$

Srovnání reálné a identifikované odezvy na skok je na obrázku 6.2.

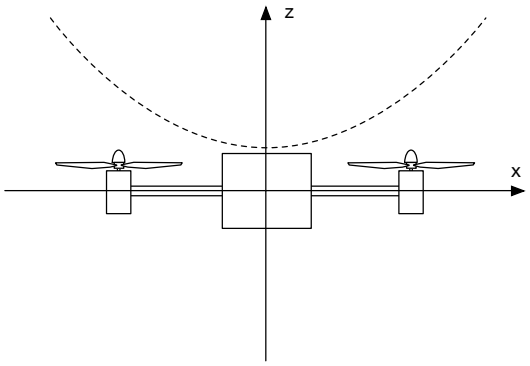


Obrázek 6.2: Srovnání přechodové charakteristiky azimutální rotace reálného a identifikovaného systému. Reálný systém je znázorněn modře, identifikovaný model zeleně

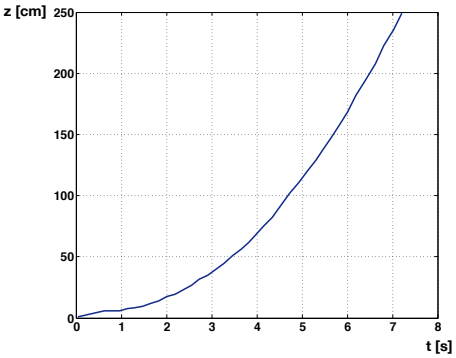
6.1.2 Identifikace přenosu pohybu v ose z

Přechodová charakteristika pohybu v ose z je na obrázku 6.3b. Měření bylo provedeno pomocí ultrazvukového senzoru namířeného dolů. Akcelerometry nebyly použity zejména kvůli vysokým nárokům kvalitní identifikace na přesnost dat. Při pokusu byly motory namířeny souhlasně s osou z, viz. obrázek 6.3a. Měření bylo prováděno po dobu dvaceti vteřin, avšak v čase 7,4 s dosáhl ultrazvuk saturační hodnoty 255 cm. Po této hodnotě už ultrazvuk zaznamenával pouze hodnotu 255 a tudíž jsem se rozhodl další měření ignorovat a odezvu charakterizovat pouze za pomoci měření do 7,2 s včetně.

Zřejmě se podobně jako u azimutální rotace jedná o integrační systém se zpožděním a identifikuje se tedy obdobně.



(a) Konfigurace pokusu pro měření přechodové charakteristiky stoupání (pohled zepředu).



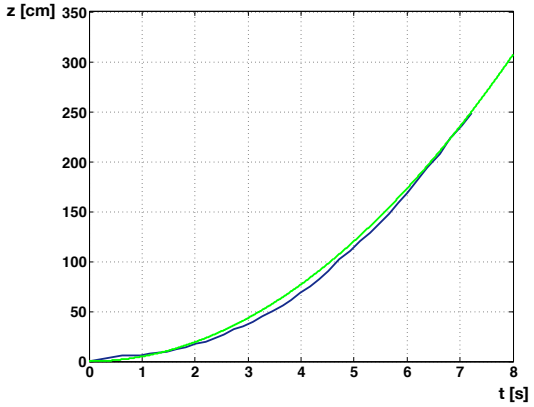
(b) Přechodová charakteristika stoupání.

Obrázek 6.3: Identifikace přenosu stoupání

Nakonec se při srovnávání odezev reálného a modelovaného systému ukázalo, že je zpoždění systému minimální a lépe sedí, je-li systém modelován jako bez zpoždění. Systém byl identifikován jako

$$G_{z_{(s)}} = \frac{9,5}{s^2}. \tag{6.3}$$

Srovnání reálné a identifikované odezvy na skok je na obrázku 6.4.

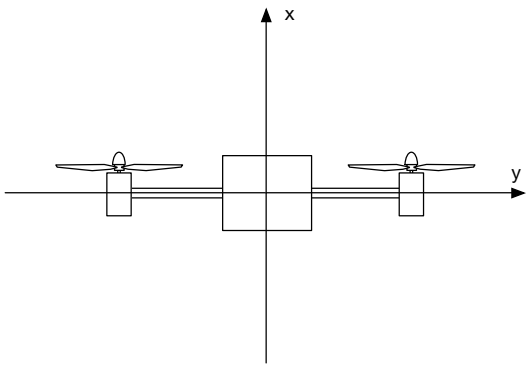


Obrázek 6.4: Srovnání přechodové charakteristiky stoupání reálného a identifikovaného systému. Reálný systém je znázorněn modře, identifikovaný model zeleně

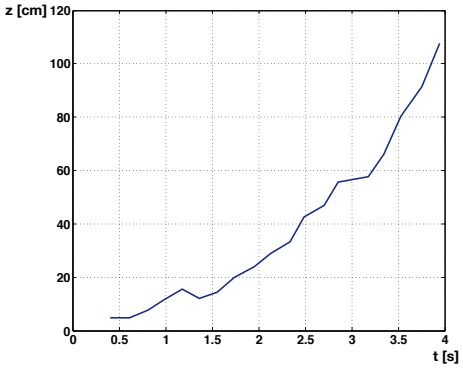
6.1.3 Identifikace přenosu pohybu v ose x

Přechodová charakteristika pohybu v ose x je na obrázku 6.5b. Podobně jako u měření přechodové charakteristiky stoupání bylo měření provedeno pomocí ultrazvukového senzoru, v tomto případě namířeného dozadu. Motory byly při pokusu namířeny souhlasně s osou x,

viz. obrázek 6.5a. Saturace ultrazvuku bylo dosaženo v čase 4,1 s, saturované hodnoty byly ignorovány.



(a) Konfigurace pokusu pro měření přechodové charakteristiky stoupání (pohled shora).



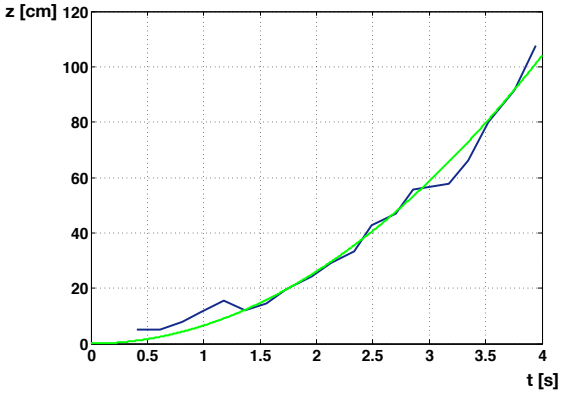
(b) Přechodová charakteristika dopředného pohybu.

Obrázek 6.5: Identifikace přenosu dopředného pohybu

Identifikace byla provedena obdobně jako identifikace stoupání, systém byl identifikován jako

$$G_{x_{(s)}} = \frac{13}{s^2}. \tag{6.4}$$

Srovnání reálné a identifikované odezvy na skok je na obrázku 6.6.



Obrázek 6.6: Srovnání přechodové charakteristiky dopředného pohybu reálného a identifikovaného systému. Reálný systém je znázorněn modře, identifikovaný model zeleně.

6.2 Inteligentní řízení

První zvažovaná možnost pro inteligentní řízení bylo použití lineárního PID regulátoru, to však bylo zamítnuto jako nevhodné. Lineární regulátor s časem snižuje velikost akčního

zásahu a letecké motory použité v modelu nemají při nízkém napětí dostatečný výkon, aby překonaly odpor vzduchu.[1] Regulátor by tedy dosáhl nenulové regulační odchylky, což je nežádoucí.

Dalším návrhem bylo použití časově suboptimálního řízení navrženého pro tento typ vzducholodě v [29], avšak zmíněná práce neuvažuje současný pohyb v ose x i v ose z, což je nepřijatelné.

Jako nejvhodnější varianta se jeví realizace řízení pomocí tři PID regulátorů pro každý pohyb zvlášť (azimutální rotace, pohyb v ose x a pohyb v ose z). Jelikož je azimutální rotace a pohyb v ose x provázán, v případě, že je azimutální odchylka větší než $\frac{\pi}{2}$, je regulátor pro pohyb v ose x vypnut.

Problém s nedostatečným výkonem pro roztočení vrtulí u malého akčního zásahu je eliminován nelineární transformací výstupu z regulátoru. Jako nelineární funkce je použita funkce f definovaná jako

$$\begin{aligned} x \in (-\infty; -1) &\Rightarrow f(x) = -1 \text{ (saturace)}, \\ x \in \langle -1; 0) &\Rightarrow f(x) = 0,7 \cdot x - 0,3 \text{ (proporční řízení)}, \\ x = 0 &\Rightarrow f(x) = 0 \text{ (motory vypnuty)}, \\ x \in (0; 1\rangle &\Rightarrow f(x) = 0,7 \cdot x + 0,3 \text{ (proporční řízení)}. \\ x \in (1; \infty) &\Rightarrow f(x) = 1 \text{ (saturace)}. \end{aligned} \tag{6.5}$$

To zaručuje, že na motorech vždy bude napětí poskytující reálný tah.

Výstup PID regulátoru řídícího pohyb je F_z, síla působící na vzducholoď směrem vzhůru, F_x, síla působící směrem vpřed a M_{rot}, točivý moment působící na vzducholoď vzhledem k ose z. Oproti tomu jsou vstupy motorů řízeny parametry ϕ a ρ, značící směr motorů a F, sílu kterou každý motor působí.

Uvažujeme-li vzducholoď neschopnou rotace kolem os x a y, existují mezi těmito veličinami tyto vazby:

$$F_z = F \cdot \cos(\phi) + F \cdot \cos(\rho), \tag{6.6}$$

$$F_x = F \cdot \sin(\phi) + F \cdot \sin(\rho) \text{ a} \tag{6.7}$$

$$M_{rot} = d \cdot (F \cdot \sin(\phi) - F \cdot \sin(\rho)), \tag{6.8}$$

kde d je vzdálenost motoru od osy azimutální rotace a
vstupní veličiny F_z, F_x a M_{rot} jsou v rozmezí $\langle -1; 1\rangle$.

Výstupní veličiny ϕ, ρ a F jsou definované jen pokud

$$\sqrt{\left(\frac{F_x}{2} + \left|\frac{M_{rot}}{2 \cdot d}\right|\right)^2 + \left(\frac{F_z}{2}\right)^2} \leq 1. \tag{6.9}$$

Optimální variantou je řešit tyto rovnice numerickým solverem, avšak ten v legu není a implementace vlastního solveru by byla příliš složitá. Proto je nutné výpočet zjednodušit na sadu algebraických rovnic.

[1] Tento jev nastává při akčním zásahu $a \in (-0,3; 0,3)$

Pokud odečteme rovnici 6.8 od 6.7, obdržíme rovnici

$$\frac{F_x}{2} - \frac{M_{rot}}{2 \cdot d} = F \cdot \sin(\rho). \tag{6.10}$$

Pro danou sílu F dostaneme spolu s rovnicí 6.6 výsledné úhly motorů

$$\rho = \arcsin\left(\frac{1}{2 \cdot F} \cdot \left(F_x - \frac{M_{rot}}{d}\right)\right) \text{ a} \tag{6.11}$$

$$\phi = \arccos\left(\frac{F_z}{F} - \cos\left(\arcsin\left(\frac{1}{2 \cdot F} \cdot \left(F_x - \frac{M_{rot}}{d}\right)\right)\right)\right). \tag{6.12}$$

Zaměnit proměnnou F za parametr jsme si mohli dovolit zejména proto, protože se snažíme o co nejrychlejší pohyb a tudíž je vhodné volit F jako maximální. Vyjadřovat z rovnic F by bylo nevhodné i z hlediska náročnosti na komplexitu programu (vzhledem ke zvolenému prostředí je už realizace rovnic 6.13 a 6.14 velmi nepřehledná).

Tyto rovnice nepokrývají všechna řešení rovnic 6.7, 6.6 a 6.8, ale k řízení vzducholodě postačují.

Při vytváření algoritmu je navíc kvůli nejednoznačnosti inverze funkcí sin a cos je nutné zavést i další dvě pravidla, a to

$$F_x < 0 \Rightarrow \phi = -\phi \text{ a} \tag{6.13}$$

$$F_z < 0 \Rightarrow \rho = \rho + \pi, \tag{6.14}$$

které zajistí, že nalezneme řešení ve správném kvadrantu.

6.2.1 Nezávisle ovládaný tah motorů

Řešení 6.13 a 6.14 rovnic 6.7, 6.6 a 6.8 se po uvedení do praxe ukázalo sice jako funkční, avšak nepříliš uspokojivé. Kvůli stejné síle F obou motorů je ovládání značně neflexibilní a kvůli malým výslednicím sil obou motorů pomalé. Na poslední chvíli bylo proto rozhodnuto umožnit gondole nezávislou regulaci výkonu motorů. Z tohoto důvodu bylo nutné vytvořit nové rozhraní mezi kostkou a motory. Rozhraní bylo realizováno zapojením dvou obvodů 3.9 na společné napájení, viz obrázek 6.7.

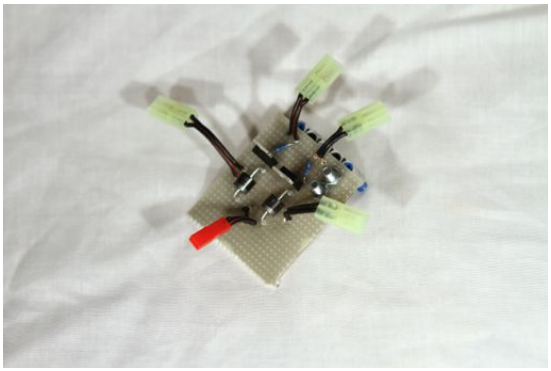
Pro nezávisle řízený tah motorů F_1, F_2 jsou rovnice vazeb výstupních veličin

$$F_z = F_1 \cdot \cos(\phi) + F_2 \cdot \cos(\rho), \tag{6.15}$$

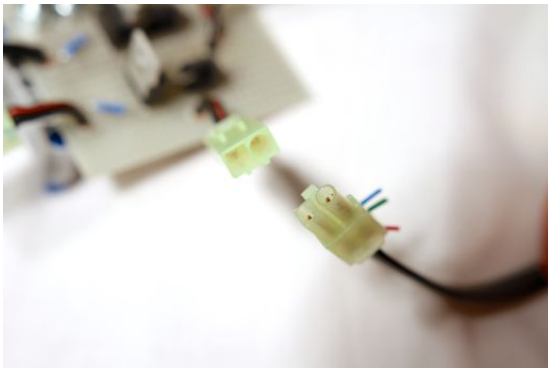
$$F_x = F_1 \cdot \sin(\phi) + F_2 \cdot \sin(\rho) \text{ a} \tag{6.16}$$

$$M_{rot} = d \cdot (F_1 \cdot \sin(\phi) - F_2 \cdot \sin(\rho)), \tag{6.17}$$

které namísto jednotlivých řešení poskytují prostory řešení. Bohužel tyto rovnice již nelze řešit algebraicky a tudíž by bylo nutné použít numerický solver pro nalezení správných řešení.



(a) Celkový pohled



(b) Detail mechanismu zámku

Obrázek 6.7: Modul pro nezávislé řízení motorů

Pro nalezení řešení tedy byla vytvořena co nejjednodušší intuitivní metoda určování výstupu. Nejprve se vypočítají síly F_{1_x} a F_{2_x}, kterými musí jednotlivé motory působit ve směru osy x, aby byly uspokojeny požadavky na dopřednou sílu a moment působící na vzducholoď.

$$F_{1_x} = \frac{F_x}{2} + \frac{M_{rot}}{2 \cdot d} \text{ a} \tag{6.18}$$

$$F_{1_x} = \frac{F_x}{2} - \frac{M_{rot}}{2 \cdot d}. \tag{6.19}$$

Nyní spočítáme síly $F_{1_{z_{\max}}}$ a $F_{2_{z_{\max}}}$, které vyjadřují maximální možný tah daného motoru ve směru osy z při uspokojení požadavku na velikost sil F_{1_x} resp. F_{2_x} jako

$$F_{1_{z_{\max}}} = \sqrt{1 - (F_{1_x})^2} \text{ a} \tag{6.20}$$

$$F_{2_{z_{\max}}} = \sqrt{1 - (F_{2_x})^2}. \tag{6.21}$$

V případě, že tyto maximální hodnoty tahu ve směru osy z jsou větší než polovina požadované hodnoty tahu, tah se rozloží na oba motory stejnoměrně. V opačném případě se využije maximální tah na motoru s nižší maximální hodnotou a doplní se tahem na druhém motoru tak, aby dohromady vytvářely požadovaný tah. Úhly natočení motorů se potom spočítají jako

$$\phi = \arctan\left(\frac{F_{1_x}}{F_{1_z}}\right) \text{ a} \tag{6.22}$$

$$\rho = \arctan\left(\frac{F_{2_x}}{F_{2_z}}\right). \tag{6.23}$$

Při testování na reálném modelu vzudcholodě s nezávisle ovládanými motory bylo zjištěno, že je mnohem agilnější a její chování je přirozenější. Také výrazně méně limituje požadované výstupní veličiny.

Kapitola 7

Internetové stránky modelu vzdcholodě

Dalším z cílů této práce je vytvořit obsah pro internetové stránky modelu vzducholodě. Stránky se nachází na doméně www.robosoutez.cz, která zahrnuje celou webovou prezentaci soutěže ROBOSOUTĚŽ, pořádané katedrou řídící techniky, katedrou kybernetiky a katedrou měření. Úvodní stránka tohoto portálu je na obrázku 7.1.

Obrázek 7.1: Úvodní strana portálu ROBOSOUTĚŽ

7.1 Cílová skupina

Cílovou skupinou prohlížející webové stránky jsou především děti ve věku 17-20 let, to znamená poslední ročníky střední školy a první ročník vysoké školy. K tomuto faktu musí být při vytváření obsahu pro webovou stránku přihlíženo, neboť na rozdíl od akademické obce tato demografická skupina překvapivě nedokáže ocenit elegantní vyjádření polohy pomocí dvojité sumace okamžitého zrychlení váženého délkou vzorku.

[30] zmiňuje, že pro populární literaturu platí rovnice

$$p = p_0 \cdot 2^{-n}, \tag{7.1}$$

kde

p je prodejnost knihy (ekvivalentem je v našem případě čtenost článku),

p_0 je maximální možná prodejnost knihy (v našem případě maximální možná čtenost článku) a

n je počet rovnic v knize (článku).

Z toho vyplývá zřejmý cíl při psaní podkladů pro webovou stránku, kterým je minimalizace počtu obsažených rovnic. Oproti tomu je vhodné použít velké množství obrázků, které jsou na internetu všeobecně oblíbené a přitahují pozornost čtenáře. Pro čtenost článku je také dobré používat velké množství adjektiv a nebýt striktně objektivní, neboť je cílem celého portálu nadchnout čtenáře pro stavbu robotů ze stavebnice LEGO, čehož suchý objektivní text nemusí zcela nezbytně dosáhnout.

7.2 Možnosti vzoru

Jelikož je webová stránka součástí většího celku, musí její vizuální styl souhlasit s ostatními stránkami projektů. Tyto projekty jsou dva, a to *inverzní kyvadlo* a *rubikova kostka*. Ty se drží rozdělení na pět celků - úvod, konstrukce, popis programu, stručný návod k používání a odkazy. Proto bylo rozhodnuto využít šablonu, ve které jsou psány tyto stránky. Použitou technologií je jazyk HTML v obálce PHP. Možnosti šablony jsou různé styly písma (nadpis, podnadpis, tělo textu), řezy písma (regular, bold, italic), hypertextové odkazy, obrázky a tabulky. V případě potřeby je možné doplnit stránku o vlastní specifikace stylů ve formátu css.

Vytvořená webová stránka se nachází na přiloženém CD/DVD nosiči.

Kapitola 8

Závěr

Prvním ohniskem této práce bylo sestrojit funkční model vzducholodě. Kvůli požadavku na konstrukci vzducholodě ze stavebnice LEGO se toto ukázalo jako problematické a standartní konstrukční prvky vzducholodi (především *balonety* sloužící k regulaci výšky) musely být nahrazeny zástupnými řešeními (v případě *balonetů* větší flexibilitou pohybu motorů).

V rámci této práce byly také experimentálně určeny přenosy modelu vzducholodě ve třech směrech pohybu, a to pro pohyb v ose z (stoupání), pohyb v ose x (dopředný pohyb) a rotaci vzhledem k ose z (azimutální otáčení). Tyto přenosy byly odvozeny i matematicky a poté byly s experimentálními výsledky úspěšně srovnány.

Řízení vzducholodě bylo realizováno jako tři nezávislé lineární regulátory, jejichž výstupy kombinuje nelineární funkce, která je převádí na úhly natočení motorů a výkon na jednotlivých motorech.

Jako největší výzvou této části zadání se nakonec ukázalo realizovat řídící program vzducholodě, neboť prostředí pro grafické programování inteligentní kostky zcela zřejmě není designované k vytváření složitých řídících konstrukcí.

Dalším úkolem bylo navrhnout systém pro stanovení globální polohy vzducholodě. Ten se podařilo realizovat váženou sumací dat z tříosého akcelerometru a jejich následným zpřesněním pomocí kamery identifikující kalibrační červené papíry uspořádané do pravidelné čtvercové sítě.

Také byly v rámci vypracování tohoto projektu navrženy a realizovány dvě uživatelská rozhraní pro stanovení referencí pro pohyb vzducholodě. Prvním z nich je joystick, který přímo ovládá úhly naklonění motorů. Druhým je senzorická rukavice, která na základě úhlu naklonění dlaně nastavuje referenci na sílu působící na vzducholoď v daném směru. Druhé z nich je k ovládání výrazně vhodnější, zejména z důvodu větší intuitivity.

Posledním cílem práce bylo vytvořit webovou stránku o modelu vzducholodi na serveru robosoutez.cz, což se zdárně podařilo. Při tvorbě obsahu bylo přihlíženo k cílové skupině čtenářů i k možnostem platformy.

Literatura

[1] Tim Carvell Christine Chen. Fortune Magazine - Play. http://money.cnn.com/magazines/fortune/fortune_archive/1999/11/22/269110/.

[2] Ph.D. Ing. Martin Hlinovský. Robosoutěž 2009. http://www.robosoutez.cz/index.php?sekce=roborace_university&id=roborace_0910_final.

[3] Gabriel Alexander Khoury. *Airship Technology*. Cambridge University Press, 2. edition, 2012.

[4] Daniel Lipkowitz. *The LEGO book*. DK, 2. edition, 2012.

[5] Marek Lipšaj. Dánsko v období druhé světové války. Master's thesis, Masarykova univerzita v Brně, 2006.

[6] Jim Hughes. Lego: A Natural History of Package Design. http://www.codex99.com/design/88.html.

[7] Přispěvatelé Wikipedie. Cellulose acetate. http://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose_acetate.

[8] Přispěvatelé Wikipedie. Acrylonitrile butadiene styrene. http://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene.

[9] Erkki. Bauanleitungen für Lego. http://www.gutefrage.net/video/bauanleitungen-fur-lego-online-finden.

[10] Philo. LEGO® 9V Technic Motors compared characteristics. http://www.philohome.com/motors/motorcomp.htm.

[11] Blakbird. Technicopedia 8094 Control Center. http://www.technicopedia.com/8094.html.

[12] Blakbird. Technicopedia 8485 Control Center II. http://www.technicopedia.com/8485.html.

[13] Steve Griffin. Balloon Pilot and Crew Education - How to Calculate Air Density. http://www.brisbanehotairballooning.com.au/faqs/education/116-calculate-air-density.html.

[14] Přispěvatelé Wikipedie. Vodík. http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Vod%C3%ADk&oldid=11315032.

[15] Lukáš Sokolovski. Vodík 3.5. http://www.e-plyn.cz/?p=productsMore&iProduct=65&sName=Vodik-3.5--50-200.

[16] Gus Pasquerella. Das brennende Luftschiff LZ 129 Hindenburg am 6.5.1937 in Lakehurst. http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hindenburg_burning.jpg.

[17] Přispěvatelé Wikipedie. Helium. http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Helium&oldid=11289349.

[18] Lukáš Sokolovski. Helium 4.8. http://www.e-plyn.cz/?p=productsMore&iProduct=55&sName=Helium-4.8--50-200.

[19] Kevin Knuth. LEGO NXT Motor Wiring. http://www.brickengineer.com/pages/2008/09/05/lego-nxt-motor-wiring/.

[20] Jeremy McCreary. Illustrated gearing tutorial focusing on spur gears, primarily in studless settings. http://www.mocpages.com/moc.php/383194.

[21] Brickset ltd. LEGO part 4624645: Turntable ø4.85. http://brickset.com/parts/4624645.

[22] Přispěvatelé Wikipedie. Learning curve. http://en.wikipedia.org/wiki/Learning_curve.

[23] The LEGO Group. Infrared Link Sensor for LEGO® MINDSTORMS® NXT. http://shop.lego.com/en-US/Infrared-Link-Sensor-2853216.

[24] The LEGO Group. Ev3 infrared sensor. http://shop.lego.com/en-US/EV3-Infrared-Sensor-45509?fromListing=listing.

[25] Ltd. Afrel Co. Connection to external equipment. http://www.ev-3.net/en/archives/97.

[26] Mindsensors ltd. AbsoluteIMU User Guide. http://www.mindsensors.com/index.php?module=documents&JAS_DocumentManager_op=viewDocument&JAS_Document_id=197.

[27] Ltd. Afrel Co. Ev3 gyro sensor. http://www.ev-3.net/en/archives/849.

[28] P. Noskovič. *Modelování a identifikace systémů*. Montanex a.s., Ostrava.

[29] Marek Vondra. Vzducholoď - Dynamický model. Master's thesis, České vysoké učení technické v Praze, 2009.

[30] Jack Cohen Terry Pratchett, Ian Stewart. *Věda na Zeměploše*. Talpress, 1. edition, 2005.

Příloha A

Obsah přiloženého CD

Přiložené CD obsahuje:

- Složku **text**, ve které je vlastní text této práce ve formátu PDF.
- Složku **foto**, ve které jsou všechny fotografie vyfocené pro účely této práce v plném rozlišení.
- Složku **ev3**, ve které je projekt ve formátu EV3. Tento projekt obsahuje všechny realizované programy, včetně experimentů, kalibračních programů a řídících programů.
- Složku **blocks**, ve které se nachází všechny bloky třetích stran použité v projektu ve formátu EV3B.
- Složku **web**, obsahující vytvořenou webovou stránku ve formátu PHP (použitý jazyk je však HTML).
- Složku **data**, ve které jsou naměřená data ve formátu kompatibilním s programem MATLAB. Pro nahrání dat do prostředí použijte příkaz

  ```
  matice = dlmread('soubor');
  ```

- Soubor **readme.txt**, obsahující tento popis obsahu CD.