

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra kybernetiky

Robot se schopností jezdit po zdi

Bc. Miroslav Běloch

Vedoucí: Ing. Vojtěch Vonásek, Ph.D.

Obor: Kybernetika a robotika

Srpen 2023

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce panu Ing. Vojtěchovi Vonáskovi, Ph.D., za ochotu a cenné připomínky k práci a k projektu, který předcházel. Také děkuji rodině a přátelům za vytvoření příjemného prostředí pro psaní.

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, 14. srpna 2023

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou robotů schopných šplhat po zdi. Jsou představeni již hotoví roboti. Na jejich základě jsou formulovány požadavky na vytvoření vlastního robota. Je analyzována kinematika představeného robota a poté je robot sestaven. Dále je implementováno řízení robota. Nakonec je robot otestován na stěně.

Klíčová slova: robot, zeď, šplh, pohyb, hardware, konstrukce

Vedoucí: Ing. Vojtěch Vonásek, Ph.D.
Multirobotické systémy
Resslova 307/9
Praha 2

Abstract

This thesis studies the problematics of wall-climbing robots. It introduces already built robots and based on them a new robot is proposed with all requirements needed. The kinematics is analyzed and simulated. Then the robot is constructed. Thereafter the control of the robot is implemented. Finally the robot is tested on a wall.

Keywords: robot, wall, climbing, movement, construction

Title translation: A Wall-Climbing Robot

Obsah

| | | | |
|--|-----------|--|-----------|
| 1 Úvod | 1 | 4.2 Kalibrace elektronického regulátoru otáček | 39 |
| 1.1 State of the art | 2 | 4.3 Konstrukční systém | 41 |
| 1.1.1 Přísavkový typ | 2 | 4.4 Mechanismus podvozku robota . | 43 |
| 1.1.2 Elektroadhezní typ | 3 | 4.5 Komunikace s robotem a jeho řízení | 46 |
| 1.1.3 Vrtulový typ | 4 | 4.5.1 Sériová linka | 46 |
| 1.1.4 Přírodou-inspirovaný typ | 7 | 4.5.2 Dálkové řízení pomocí joysticku | 47 |
| 2 Analýza problému a řešení | 9 | 4.6 DC Driver Shield | 49 |
| 2.1 Obecné požadavky | 9 | 5 Experimentální ověření | 53 |
| 2.2 Představení robota | 10 | 5.1 Testování tahu na testovacím stojánu | 53 |
| 2.3 Kinematika robota | 14 | 5.2 Celkové zapojení pro měření . . . | 57 |
| 2.4 Výpočet váhy | 19 | 5.3 Testování různých konstrukčních návrhů | 59 |
| 2.5 Výběr rotorů a vrtulí | 20 | 5.4 Váha všech komponent | 62 |
| 3 Teoretické pozadí | 23 | 5.5 Testování robota na zdi | 63 |
| 3.1 O robotice | 23 | 5.6 Testování na dřevěném povrchu . | 66 |
| 3.2 Motory | 25 | 6 Závěr | 67 |
| 3.2.1 Kartáčový DC motor | 25 | A Cenový rozbor | 69 |
| 3.2.2 Bezkartáčový BLDC motor . . | 26 | B Příložené soubory | 71 |
| 3.3 Teorie lopatkových elementů . . . | 27 | C Literatura a Reference | 73 |
| 3.4 Efekt koaxiální konfigurace vrtulí na pohon vícerotorových systémů . | 29 | D Zadání práce | 75 |
| 3.5 Typy pohonů | 30 | | |
| 3.6 Typy konektorů | 32 | | |
| 3.7 Zdroje energie | 34 | | |
| 3.7.1 Baterie | 34 | | |
| 3.7.2 ATX zdroje | 34 | | |
| 4 Implementace | 37 | | |
| 4.1 Stojan pro testování tahu | 37 | | |

Obrázky

| | | | |
|--|----|---|----|
| 1.1 Konstrukce robota Safari [2] | 3 | 3.8 Stojánek na pájení konektorů | 33 |
| 1.2 Schéma a princip měkkého robota [3] (upraveno) | 4 | 4.1 Schéma stojánku pro měření tahu | 37 |
| 1.3 Robot VertiGo [4] | 5 | 4.2 Test-bench pro měření tahu vrtule a motoru | 38 |
| 1.4 Robot UOTWCR-II ve fázi přechodu mezi zemí a stěnou [7] | 7 | 4.3 Schéma stojánku pro měření tahu pro dvě vrtule | 39 |
| 1.5 Robot ACROBOT se synteticky vyrobenými gekoními chodidly [8] | 8 | 4.4 Pulzně šířková modulace | 40 |
| 2.1 Duální konfigurace vrtulí | 11 | 4.5 Schéma zapojení pro kalibraci ESC | 40 |
| 2.2 Princip valivého odporu s hysterezí gumy | 13 | 4.6 Konstrukční systém Totem | 41 |
| 2.3 Prototyp šplhajícího robota | 14 | 4.7 Totem - detaily | 42 |
| 2.4 Silový diagram tělesa | 15 | 4.8 Příklady spojení konstrukce | 42 |
| 2.5 Silový diagram tělesa - přední strana | 16 | 4.9 Mechanismus hnacího ústrojí - zadní část | 43 |
| 2.6 Simulace třecích sil | 18 | 4.10 Broušení seříznuté hřídele | 44 |
| 2.7 Graf momentu síly v závislosti na náklonu stěny | 18 | 4.11 Mechanismus hnacího ústrojí - přední část | 45 |
| 2.8 Graf znázorňující výběr vrtule | 21 | 4.12 Vytisknuté držáky | 45 |
| 3.1 Humanoidní robot Atlas od Boston Dynamics [12] | 24 | 4.13 Hnací soustava | 46 |
| 3.2 Popis DC kartáčového motoru [15] (upraveno) | 26 | 4.14 Zapojení modulu HC-05 pro konfiguraci | 48 |
| 3.3 Popis BLDC bezkartáčového motoru [16] (upraveno) | 27 | 4.15 Zapojení joysticku, potenciometru a stavové diody | 49 |
| 3.4 Teorie lopatkových elementů [17] (upraveno) | 28 | 4.16 Ovladač | 49 |
| 3.5 Mecanum kola | 31 | 4.17 Motorový řadič L298N | 50 |
| 3.6 Znázornění pohonů se čtyřmi koly [22] | 32 | 4.18 Zapojení L298N s Arduinem a motory | 51 |
| 3.7 Konektory | 33 | 5.1 Vývojový diagram měření na testovacím stojánku | 53 |
| | | 5.2 Graf znázorňující tah/proud různých vrtulí s motorem AXI 2820/12 990 KV | 55 |

| | |
|---|----|
| 5.3 Graf znázorňující tah/proud různých vrtulí s motorem T-Motor AS2820 880 KV | 55 |
| 5.4 Graf znázorňující tah/proud různých vrtulí s motorem MK3644/24 490 KV..... | 56 |
| 5.5 Graf představující tah a proud vzhledem k nastavené rychlosti motorů (v procentech)..... | 57 |
| 5.6 Zapojení během testování | 58 |
| 5.7 Pohled ze shora..... | 58 |
| 5.8 Pohled na robota | 59 |
| 5.9 Design se závětrováním uprostřed. Vibrace systému při nastavení BLDC na 20 % | 60 |
| 5.10 Upravený design - symetrický můstek na všechny strany. Vibrace systému při nastavení BLDC na 35 %..... | 61 |
| 5.11 Destrukce robota při testování. | 61 |
| 5.12 Design se závětrováním po stranách | 62 |
| 5.13 Testování robota na zdi s jemnou omítkou | 64 |
| 5.14 Testování robota na zdi s hrubší omítkou | 65 |
| 5.15 Testování robota na dřevěné nakloněné rovině..... | 66 |

Tabulky

| | |
|---|----|
| 2.1 Tabulka parametrů | 19 |
| 4.1 Tabulka příkazů | 47 |
| 5.1 Maximální RPM kombinace vrtule a motoru | 56 |
| 5.2 Maximální tah a proud dvou vrtulí..... | 56 |
| 5.3 Tabulka hmotností komponent . | 63 |
| 5.4 Potřebný tah pro schopnost pohybovat se po nakloněné dřevěné rovině | 66 |
| A.1 Tabulka hmotností komponent . | 69 |

Kapitola 1

Úvod

Obrovskou výhodou robotů je jejich schopnost pomáhat člověku v nebezpečných situacích. Dobrým příkladem jsou výškové práce, které jsou zcela po právu řazeny mezi riziková povolání. Mohou to být i toxické prostory, které mohou poškodit lidské zdraví. V uvedených případech může být obrovskou výhodou použití šplhajících robotů, kteří za člověka nebezpečnou činnost odvedou.

Ačkoliv téma šplhajících robotů je pořád relativně neprozkoumaným územím robotiky, několik institucí se jím již zabývalo. Jejich podoba většinou vychází z jejich zamýšlené funkce. Některé stroje mohou být navrženy za účelem čištění povrchů, jiné jsou určeny k jeho co nejrychlejšímu překonávání nebo naopak pomalému, ale preciznímu monitorování. Některé z těchto robotů nemají účel žádný a jedná se spíše o proof-of-concept.

Z tohoto důvodu jsou vytvořené prototypy založeny na různých fyzikálních principech.

Existují roboti přísavkového typu. Takové provedení je založeno na přichytávání přísavkových chodidel robota na stěnu, která by měla být bez větších nerovností a nepórovitého typu. Pohyb je pak založen na lokomoci nohou nebo na posuvném rámu. Takový robot je většinou kombinací pneumatického napájení přísavky (ze země) a lineárních motorů sloužících k pohybu.

Dále existují roboti založení na mechanickém (případně elektromagnetickém) principu. Ti jsou vytvořeni tak, že se většinou pohybují po konstrukcích z kovových profilů. Může se jednat např. o potrubí. Takoví roboti mají většinou klešťovité chapadlo. Těmto robotům zde nebude věnována větší pozornost, nás budou spíše zajímat roboti šplhající po stěnách.

Dále byli vytvořeni roboti fungující na principu elektroadhese. Jejich výhodou je, že se jedná o tzv. měkkou robotiku, která je velmi lehká a bezpečná. Mohou být velmi malí, na druhou stranu mají prakticky minimální nosnost.

State of the art se převážně věnuje šplhajícím robotům vrtulového typu. Jejich doménou je generování tahu pomocí vrtulí, díky kterému se přisávají ke zdi. V této oblasti je poměrně velká variabilita. Existují roboti, kteří zvládají být hybridem létajícího dronu (přesněji koptéry) a šplhajícího robota se sofistikovaným systémem přichycení (a odchycení) od povrchu. Někteří roboti jsou i schopni přechodu mezi podlahou, stěnou i stropem.

Bude to právě šplhající robot vrtulového typu, který bude v této práci navrhnout a vytvořen. Budou diskutovány požadavky na takového robota a na jejich základě bude navržený prototyp. Při tom analyzujeme kinematiku robota, přesněji budou definovány síly a momenty, které na robota působí. Jak bude z dalších kapitol zřejmé, bude to trochu podobné problému slepice a vejce, protože abychom mohli simulovat kinematiku robota, potřebujeme znát rozměry a váhu robota, která se odvíjí od použitých komponent, které naopak musí být vybrány na základě simulace.

V následující sekci si podrobněji představíme State of the art, tedy zástupce některých výše jmenovaných skupin, popíšeme si jejich funkci a konstrukci. Ve druhé kapitole bude představen návrh vlastního robota. Ve třetí kapitole si představíme některé teoretické koncepty důležité pro pochopení této práce. Ve čtvrté kapitole bude rozvedena samotná implementace – sestavení robota a podpůrných prostředků. V páté kapitole budou provedeny experimenty s robotem. V poslední kapitole budou shrnuty veškeré poznatky a výsledky.

Motivací této práce je postavit robota, vytvořit produkt, který bude použitelný pro další úpravy a práci. Vytvořit jakousi živnou půdu pro další výzkum, na který v této práci již nezbyl prostor. Je zamýšleno, že by se příští práce mohly zabývat reálným použitím – třeba monitoringem výškových povrchů či jinou aplikací. Zároveň se jedná o poměrně neprozkoumané téma, na které zatím na naší univerzitě nebyl prostor. Na druhou stranu je to poměrně logické vyústění dlouholetého výzkumu robotických systémů, neboť se ve své podstatě jedná o kombinaci koptéry a pozemního prostředku UGV.¹

1.1 State of the art

1.1.1 Přísavkový typ

V této sekci se zaměříme na postavené roboty přísavkového typu. Fungují na principu vytváření podtlaku v přísavkách. Toho je docíleno pneumatickým odsáváním vzduchu pomocí hadic. Pohyb těchto robotů je buď krácející povahy [1] nebo povahy posuvného rámu.

Jako zástupce tohoto typu si uvedeme polského robota Safari [2]. Jeho předností je inspekce betonového povrchu budov. Dokáže na sobě udržet i pomocné nástroje, takže je schopný základních údržbářských prací. Safari se řadí mezi roboty s tzv. posuvným rámem. Je to obdélníková konstrukce skládající se z na sebe kolmých modulů, které se pohybují relativně k sobě posuvným pohybem. To znamená, že se jeho tělo pohybuje rovnoběžně se zemí.

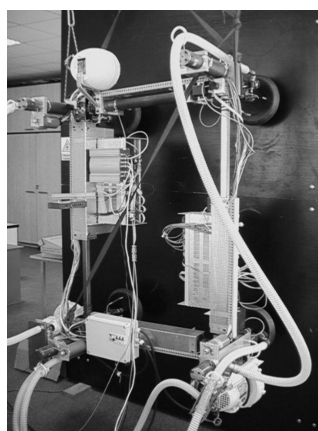
¹Tento robot není zamýšlen k žádným jiným než člověku pomáhajícím účelům.

Robot je poměrně velký – v klidovém stavu jsou jeho rozměry 60 x 60 cm. Jeho tělo se skládá ze čtyř válců, které během pohybu mění svojí délku pomocí lineárních motorů (kuličkových šroubů). Tyto válce spojují moduly nohou. Struktura tohoto robota vede k tomu, že k vyvinutí potřebné adheze je potřeba současné přichycení alespoň tří nohou. Robustní design umožňuje Safari udržet se i na porézním povrchu, jakým beton je. Na každé ze čtyř nohou má totiž tři malé vysoko-podtlakové přísavky obklopené jednou velkou nízko-podtlakovou přísavkou s rychlým odsáváním vzduchu (napojeno ze země). Tento design dokáže vyvinout poměrně velké lepivé síly.

Pohybu robota ve světových souřadnicích je docíleno posouváním válců. Řídící systém řeší inverzní kinematickou úlohu, jehož vstupem je pozice nohou a výstupem pozice prizmatických kloubů. Pro výpočet je potřeba měřit několik fyzikálních veličin:

- délka válců
- úhel mezi válci
- délka nohou
- síla přichycení přísavek u jednotlivých nohou

Autoři na robota také zkoušeli přidat dvoukilový robotický manipulátor s pěti stupni volnosti schopný vykonávat základní diagnostické / údržbářské úkony. Safari je znázorněno na obr. 1.1.



Obrázek 1.1: Konstrukce robota Safari [2]

■ 1.1.2 Elektroadhezní typ

Poměrně unikátním řešením se zdá být použití principu elektroadheze. Je to fyzikální jev, při kterém dochází k přitahování dvou objektů vlivem elektrostatické síly. Je zde nevýhoda – čím je větší přilnavá plocha, tím větší potřebujeme napětí na elektrodě, aby se robot na zdi udržel.

Tohoto principu se pokusili využít autoři na univerzitě v Šanghaji [3]. Vytvořili malého (9 cm dlouhého) měkkého robota s ohebným tělem. Jako pohyblivý sval je využit přednatažený

dielektrický elastomer a jako dvě chodidla sloužící k přitažení ke stěně jsou implementovány elektroadhezivní plošky.

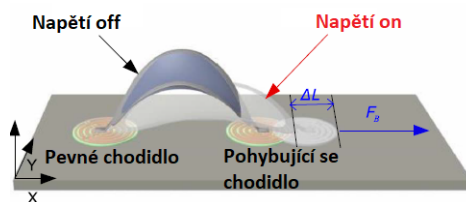
Princip elastomeru, který je napěchován mezi dvě poddajné elektrody spočívá v tom, že při aplikaci napětí má dielektrikum tendenci se roztahovat. A protože je elastomerová membrána přednatažená – v klidovém stavu je ohnutá do sedlového tvaru – při zapnutí napětí se tělo narovná. Samotné narovnání by nevedlo k řízenému pohybu.

Toho je docíleno pomocí chodidel. Jedná se o speciální koncentrické elektrody vnořené mezi dvě dielektrické tepelně odolné polyimidové vrstvy. Koncentrický tvar zaručuje maximální efektivitu elektroadheze – indukovaný náboj na stěně bude mít nejlepší možné vlastnosti.

Lokomoce je docíleno synchronizovaným pouštěním harmonického napětí na svalový aktuátor a skokovým napětím na chodidla robota. Díky tomu lze dosáhnout rychlosti až 63 mm/s (0.75 % délky robota).

Takový pohyb je pouze dopředu. Autoři tyto roboty spojili do dvojice (pomocí flexibilního rámu) a díky tomu se mohl spojený robot i otáčet. Rovněž bylo demonstrováno přidání drobné 1g zátěže – malé kamery, díky které mohl robot reagovat na prostředí. Řídící jednotka a napájení bylo přivedeno ze země.

Základní schéma a princip popsaného robota jsou znázorněny na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2: Schéma a princip měkkého robota [3] (upraveno)

1.1.3 Vrtulový typ

Šplhající roboti vrtulového typu mají oproti ostatním typům určitou výhodu, jsou totiž od jisté míry nezávislí na povrchu stěny. Z tohoto důvodu mají velký potenciál využití v civilních i vojenských oblastech. Na druhou stranu se potýkají s problémy přechodu mezi na sebe kolmými částmi (stěnou/stropem/podlahou). Vrtulové typy můžeme dále rozdělit na typ schopný letu a na typ, který se soustředí pouze na pohyb po stěně. U prvního zmíněného je zapotřebí vytvořit mechanismus přichycení ke stěně. Jedná se o kritickou energeticky náročnou část.

Princip těchto robotů je postaven na vytváření tahu vrtulemi, který produkuje potřebnou adhezivní sílu důležitou pro udržení robota na stěně.

Jedním ze zástupců robotů, který je schopný jak letu, tak pohybu po stěně či zemi, je VertiGo [4].

VertiGo je robot postavený ve spolupráci Disney Research Zurich a ETH. Je pro něho charakteristické, že jeho skoro všechna dynamika je tvořena vrtulemi zasazenými do Kardanova závěsu se dvěma stupni volnosti. Ty mají na svědomí posuvný pohyb včetně brždění a vytváření tahu. Robot je schopný přechodu mezi zemí a stěnou, do budoucna se plánuje i se stropem. Při přechodu je jedna vrtule natočena tak, aby se robot pohyboval dopředu a druhá tak, aby se robot přetočil do vertikální polohy.

Robot má dohromady osm stupňů volnosti, systém s vrtulí má tři, další dva jsou využity v podobě zatáčení předních dvou kol. Jak již bylo naznačeno, kola nejsou poháněna. Pro dobré tlumící vlastnosti jsou zavěšena na rovnoběžníkové nápravě. Materiál základní desky jsou karbonová vlákna a drží všechny části robota pohromadě. Nejdůležitější z nich – řadič – využívá data ze 6osé inerciální měřicí jednotky a dvou infračervených senzorů nacházejících se v přední části robota. Přijímá signály z RC ovladače v ruce operátora a na základě dat ze zmíněných senzorů kontroluje 8 aktuátorů.

O robotovi lze říci, že systém pro řízení robota je poměrně složitý z důvodu vysokého počtu stupňů volnosti. Důležité bylo vyvinutí brzdícího systému. Řízení nedělá jednodušší ani fakt, že dvě vrtule se mohou točit různě rychle, což způsobuje nevyvážený reakční točivý moment. Robot se pohybuje velmi rychle v porovnání s ostatními roboty ve stejné kategorii. Robot je znázorněn na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3: Robot VertiGo [4]

Jako zástupce vrtulového typu bez schopnosti létat si uvedeme robota z Kasetsartské univerzity v Thajsku [5].

Jedná se o stroj, který je svými vlastnostmi velmi podobný robotu VertiGo popsany výše. Vrtule jsou ve stejné konfiguraci, ale pouze s jedním stupněm volnosti měnění natočení. Robot se při pohybu spoléhá pouze na vrtule, jeho kola také nejsou poháněna. Výhoda takového návrhu je zjednodušené řízení. To je ovšem za cenu méně flexibilní manévrovatelnosti. Jeho tělo je tvořeno polykarbonovou deskou.

Provedené experimenty ukazují, že robot je schopen se pohybovat na kolmé stěně. Servomotory dokáží otáčet jednoduchým Kardanovom závěsem tak, aby se robot zotavil z dvoubodové pozice, kdy se stěny dotýkají pouze dvě kola a robot se chystá spadnout.

Dalším zajímavým robotem stejného typu je EJBot [6]. Jeho hlavním cílem je inspekce a monitorování benzinových nádrží – prostředí toxické pro člověka. Díky tomu je jedním z cílů tohoto projektu schopnost robota pohybovat se po vnitřní straně válce, tedy při jakémkoliv natočení podkladu.

Návrh od předchozích robotů se zásadně liší. Kromě vrtulí produkujících tah využívá pohonu kol. Každá strana má jeden motor (umístěný na zadních kolech) a trakce je přenášena na přední kola pomocí rozvodového řemene. To maximalizuje trakci mezi koly a povrchem

a zároveň snižuje hmotnost robota, která je cca 1.66 kg. Díky tahu od vrtulí mohou kola vytvořit dostatečně velký točivý moment tak, aby se sama neprotáčela a výsledná třecí síla držela robota na zdi. Na rozdíl od předchozích robotů má dvě vrtule zapojené v koaxiální konfiguraci. To umožňuje vytvořit kompaktnější rozměry.

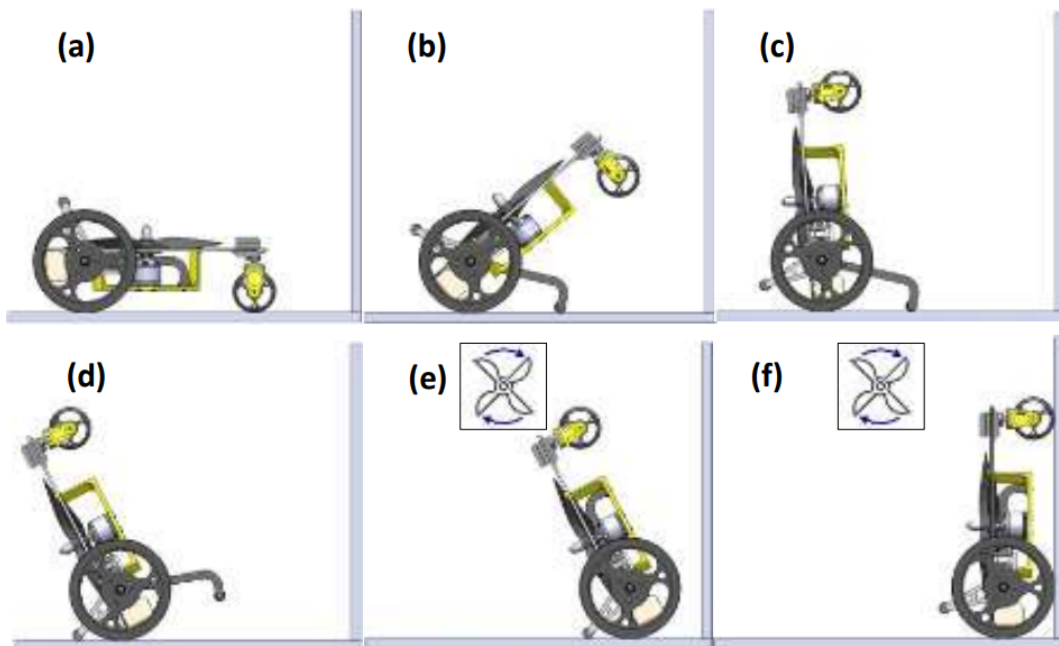
Konstrukce EJBota-I je tvořena z tyčí hliníku-6061, což má zmenšit váhu a zároveň zachovat pevnost. Trochu nepraktické a těžkopádné je osazení těla součástkami, které jsou přilepeny k tělu lepicí páskou. Optimalizací váhy a celkového výkonu se zabýval EJBot-II. Výhoda této vylepšené verze je ta, že na sobě dokáže nést LiPo baterii, takže není potřeba mít robota napojeného pupečným kabelem.

Dalším vrtulovým typem je robot UOTWCR-II z Iráku [7]. Cílem tohoto projektu bylo vytvořit robota schopného přechodu mezi zemí a stěnou. Design tohoto robota se liší uspořádáním rotorového systému, který je v tomto případě ve víceosé horizontální konfiguraci. Robot se i tentokrát opět spoléhá výhradně na třecí síly k udržení na stěně. K pohybu na stěně využívá diferenciální pohon dvou poháněných koleček (pomocí kontinuálních servomotorů). Původní návrh počítal s neříditelným kolečkem v přední části k podpoře. Jak se ale ukázalo, tak takové kolečko může vytvářet parazitní odporovou sílu znesnadňující pohyb. Z toho důvodu je nakonec poloha kolečka upravována 180° servomotorem. Materiál těla je z akrylu (2.5 mm široké Plexisklo) podpořeného karbonovými tyčemi pro zvýšení pevnosti.

Přechod mezi zemí a stěnou řeší systém s mechanickou podpěrou. Ta je ovládána 180° servem. Při přechodu je vysunuta z pozice paralelní k zemi směrem od robota. To má za následek naklonění robota od země. To by samo o sobě mohlo způsobovat gyroskopický efekt. Z tohoto důvodu je na konci podpěry drobné kolečko, které umožňuje její vysunutí při pohybu robota (směrem ke stěně). Jakmile je robot v nakloněné pozici, tak se pohne směrem ke stěně až do momentu, kdy se jí předním kolem dotkne. Podpěra je zasunuta a spodní kola se pohybem vpřed dostanou až ke stěně. Při této poslední fázi jsou roztočeny vrtule, aby se robot nepřevážil dozadu.

Robot je schopen pohybu po zemi dvěma způsoby. První je základní na dvou zadních kolech a předním kolečku. Druhý způsob pohybu autoři pojmenovali jako "klokaní". Robot se převáží mírně dozadu, kde je podepřen další malou zadní podpěrou s kolečkem. Díky tomu je robot schopen dostat se ke stěně i v případě, nacházela by se před ním nějaká malá překážka, kterou by přední podpěra s kolečkem nedokázala překonat.

Autoři rovněž přišli se způsobem přichycení ke stěně. Motivací k tomuto úkonu je šetření energie při inspekcí povrchu. Zároveň by se při tom jednoho dne mohla robotovi dobíjet baterie pomocí např. solárního panelu. Na spodní straně robota je umístěný malý hák, který se při přichycení vysune a zapadne do malého výčnělku ve stěně. Pro přichycení je tedy potřeba oné nerovnosti. Bylo to otestováno přidáním 4mm ploché desky ke stěně. Robot UOTWCR-II je znázorněn na obrázku 1.4. Je to znázornění "klokaního" způsobu přechodu mezi zemí a stěnou. Fáze (b) znázorňuje vytažení podpěry. Robot se převáží ve fázi (d) a poté jsou spuštěny motory a robot se přitlačí ke stěně.



Obrázek 1.4: Robot UOTWCR-II ve fázi přechodu mezi zemí a stěnou [7]

1.1.4 Přírodou-inspirovaný typ

Na závěr si ještě uvedeme prototyp robota, který si bere inspiraci přímo z přírody. Projektů podobného typu je skutečně málo, což je dáno poměrně velkou nedostupností používaného materiálu. Tím robotem je ACROBOT z dílny NASA JPL [8].

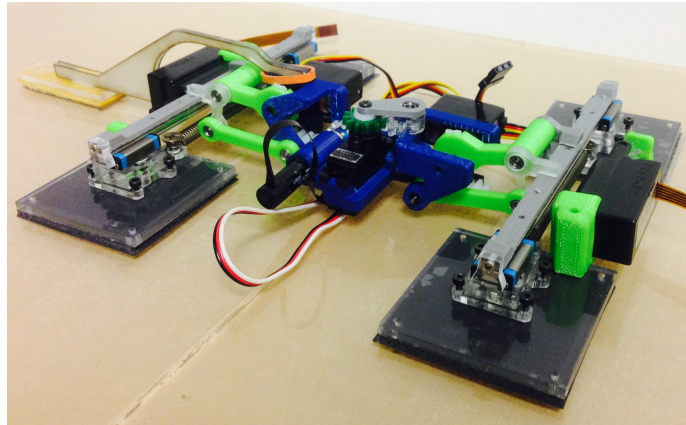
Hlavní motivací pro výzkum tohoto robota byla venkovní inspekce povrchu vesmírné stanice ISS. Překážkou pro šplhajícího robota v tomto nehostinném prostředí je absence atmosféry/vzduchu a gravitace (přesněji pohyb ve stavu beztíže). To znamená, že zde nemůže být použit ani přísavkový ani vrtulový typ.

Myšlenka tohoto robota je založena na principu, který využívají gekoni – ještěři schopní šplhat po stěnách pomocí unikátních přilnavých polštářků na jejich chodidlech. Tyto polštářky jsou strukturou velkého množství milimetrových lamel, které mají na sobě ještě menší nanometrové špachtle. Ty pomocí Van der Waalsových sil (elektrické přitažlivé síly mezi molekulami) udrží zvíře na stěně. Takový materiál je obtížné replikovat. Jeho nespornou výhodou je, že po sobě nezanechává, na rozdíl od tradičních lepidel, žádnou stopu. Dále se dá do značné míry kontrolovat, kdy bude plocha přilnavá a kdy nikoliv. Nanometrové špachtle jsou totiž nakloněné. To znamená, že pokud je na špachtle vyvinuta smyková síla, špachtle přilnou k povrchu a dochází k adhezi. Pokud smykovou sílu vypustíme, tak se špachtle od povrchu odlepí.

ACROBOT využívá čtyři přilnavá chodidla – plochy ze synteticky napodobeného gekoniho materiálu. Přední nohy jsou orientované proti sobě a jsou spojené pružinou, která je natahována

lineárním aktuátorem. Díky tomu jsou při natažení vyvolané smykové síly a obě chodidla, nacházející se ve stejné rovině, se přilepí ke zdi. Podobně jsou napojena zadní chodidla. Robot může otáčet přední část těla pomocí servomotoru. Chůze robota je ve stylu housenky.

Bylo otestováno, že tento robot vážící 0.323 kg dokáže unést sám sebe a k tomu ještě zátěž 0.2 kg. ACROBOT je na obrázku 1.5.



Obrázek 1.5: Robot ACROBOT se synteticky vyrobenými gekoními chodidly [8]

Kapitola 2

Analýza problému a řešení

V této práci se budeme zabývat šplhajícím robotem vrtulového typu. K výběru tohoto typu nás přivedlo několik faktorů. Chtěli bychom, aby robot utáhl drobnou zátěž v podobě malé kamerky nebo jiného zařízení. Z tohoto důvodu byl zavrhnut elektroadhezní typ, který se hodí spíše pro malé měkké roboty. Gekoní typ rovněž nebudeme navrhovat, protože syntetický materiál napodobující jedinečné gekoní chodidlo je nedostupný. Možnost tedy byla vybrat mezi přísavkovým nebo vrtulovým druhem. Přísavkový typ má poměrně velké nároky na povrch stěny, která by neměla být porézní. Zároveň je i citlivý na jakékoliv nerovnosti. Tento typ tak vyžaduje poměrně robustní design. Nejlepší varianta se tedy pro naše potřeby jeví být typ vrtulový. Jeho výhodou je tedy relativní nezávislost na povrchu (do jisté míry), dostupnost komponent a schopnost nést nějakou váhu. Nevýhodou může být bezpečnost člověku, protože vrtule při neopatrném zacházení mají potenciál přivodit zranění. Zároveň se podle nalezených informací jedná o State of the art, v porovnání s ostatními druhy bylo podobných robotů sestrojeno více.

2.1 Obecné požadavky

- **Váha.** Při návrhu robota je potřeba brát ohled na jeho váhu. Ta má klíčovou roli pro udržení robota na zdi a pro jeho pohyb. Váha je důležitá pro výběr komponentů, je potřeba si uvědomit, jaký minimální výkon budeme vyžadovat, aby nespadl.
- **Točivý moment.** V důsledku točení vrtulí dochází k jejich tření se vzduchem. To vede (podle Newtonova třetího pohybového zákona) k odporovému momentu, který míří opačným směrem, než se pohybuje rotor. Díky tomu má robot tendenci se otáčet na jednu stranu. Pro kompenzaci existuje několik způsobů.
- **Koeficient tření.** Poměrně důležitou vlastností robota, který se pro udržení na stěně spoléhá na třecí síly, je koeficient tření. Ten je daný materiálem pneumatik a materiálem povrchu stěny v místě dotyku. Čím je větší, tím lepší lepicí vlastnosti a díky tomu i rychlejší pohyb. Zároveň při velkém koeficientu tření si vystačíme s menším výkonem rotoru vrtulí. Je také třeba rozlišovat statický a dynamický koeficient tření.

- **Tvar, sklon a materiál stěny.** Na robota budou rozdílné požadavky z hlediska výkonu, bude-li se snažit udržet na kolmé stěně nebo na stropě. Záleží i na materiálu stěny, se kterým souvisí koeficient tření zmíněný výše. Pokud budou na stěně významné nerovnosti, je tomu také potřeba návrh přizpůsobit.
- **Přechody.** Někteří roboti zmínění v předchozí sekci (1), byli schopni přechodu mezi zemí a stěnou, případně stěnou a kolmou stěnou nebo stěnou a stropem. V tom případě je většinou potřeba vytvořit speciální systém.
- **Bezpečnost.** Je potřeba hledět i na bezpečnost jak operátora, tak samotného robota. Při testování a experimentování bude potřeba zajistit, aby při pádu (nebo nefunkčnosti) robota nedošlo k jeho destrukci.
- **Napájení.** Bez napájení se stroj neobejde. Musí se zvolit takové, aby bylo schopné pohánět systém vrtulí, jízdní a řídicí systém. Velkou překážkou může být váha baterií. Také je třeba myslet na dobu, po kterou může robot bezpečně fungovat.
- **Jízdní systém.** Někteří roboti mohou mít za cíl pouze pohyb vpřed, jiný se budou chtít umět otáčet. Je třeba uvažovat, jaký typ jízdního systému je nejlepší ve smyslu třecího koeficientu a váhy.
- **Materiál konstrukce.** Neméně důležitou součástí prototypování je i výběr materiálu, z kterého se bude skládat konstrukce. Materiál musí být co nejlehčí, ale i pokud možno co nejpevnější. Zároveň je vhodné brát v úvahu i možnosti opracování a spojování. Některé materiály mohou být navíc toxické a mohou vyžadovat speciální laboratorní podmínky pro práci s nimi. Zároveň je i důležitá dostupnost a cena.
- **Provedení konstrukce.** Dalším faktorem je samotné provedení konstrukce. Musí se brát v úvahu celková váha, pevnost a stabilita. Na robota totiž budou působit různé momenty včetně vibrací. S konstrukcí souvisí i aerodynamika robota, neboť různé nosníky mohou mít vliv na celkový tah a tedy adhezi ke stěně.
- **Vhodná kombinace motoru a vrtulí.** Velmi důležité je vybrat správný motor a vrtuli, která s motorem bude spolupracovat. Nevhodným výběrem může dojít k poškození motoru i vrtule, což může mít za následek i ohrožení bezpečnosti. Je nutné i zvážit dostupné napájení. Jsou totiž motory s velkým odběrem, na který by nemusel stačit dostupný zdroj energie.
- **Řízení robota.** Způsob řízení souvisí s následným prováděním experimentů. Například pro testování na zemi může být plně dostačující ovládání skr pupeční šňůru. Ovšem na stěně již bude potřeba bezdrátové řízení.

2.2 Představení robota

Design našeho robota je tak trochu problém "slepice/vejce". Potřebujeme znát váhu robota, abychom mohli pomocí kinematického rozboru ověřit, že se udrží na zdi. Na základě váhy se totiž musí vybrat vhodné motory pro vytvoření dostatečného tahu a i pneumatiky (kola) pro

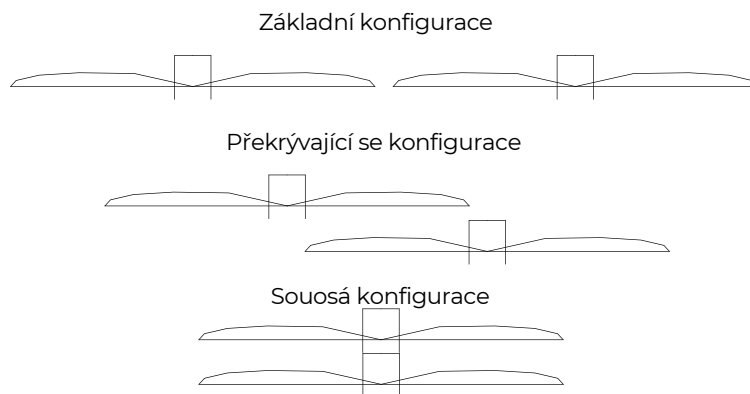
určení koeficientu tření. Jenže motory (a kola) mají zásadní vliv na váhu robota. Většinou platí, že čím výkonnější motor, tím je i těžší. Z tohoto důvodu bylo třeba nejdříve analyzovat, jaké síly na robota působí. S touto znalostí pak experimentovat (simulování v Matlabu) a zjistit upravováním parametrů, jaká konfigurace a komponenty jsou nejlepší.

Na následujících řádcích bude popsána kinematika robota, co je důležité pro jeho přisání ke zdi. Na základě toho budou uvedeny grafy ze simulace a z toho vyvozený návrh prototypu šplhajícího robota.

Ještě však před popsáním a rozborem silového diagramu popíšeme některá rozhodnutí, která padla pro náš design.

Vzhledem k již výše odůvodněné podmínce, že navrhujeme šplhajícího robota vrtulového typu, je třeba kompenzovat točivý moment, který vzniká reakcí k otáčení vrtule; síla, kterou motor působí na vrtuli se potká s opačnou silou, kterou vrtule působí na motor a díky tomu na celého robota. Tento parazitní moment přidává k celkovému bočení (angl. yaw) robota. K vybalancování této parazitní síly existuje více způsobů, my jsme zvolili vyrovnání v podobě opačného točivého momentu, který vznikne točením vrtule na druhou stranu vzhledem k vrtuli první. Z tohoto důvodu budou potřeba vrtule pravotočivé a levotočivé.

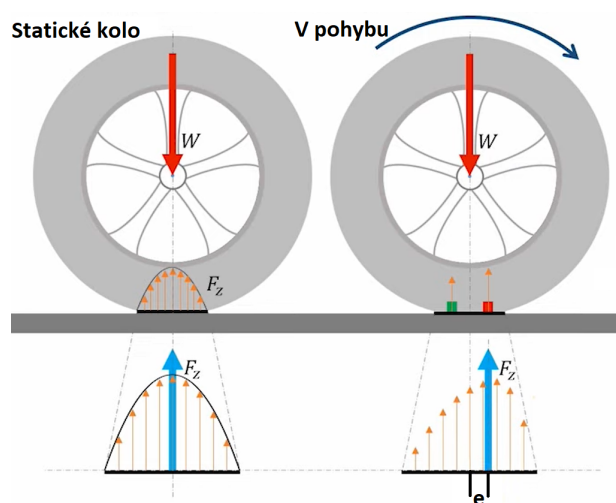
Abychom se vyhnuli příliš složitému řízení, padla volba na duální pohon. Existuje několik možných konfigurací duálních vrtulí. Ty jsou znázorněny na obrázku 2.1.



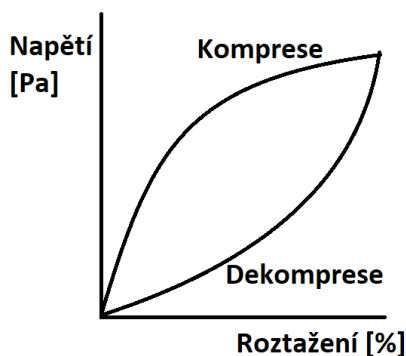
Obrázek 2.1: Duální konfigurace vrtulí

První je posazení obou vrtulí vedle sebe. To má výhodu takovou, že se obě vrtule navzájem aerodynamicky neovlivňují a efektivita produkovaného tahu tak může být maximální. Nevýhodou je fakt, že s tímto uspořádáním roste celková velikost robota, a tím i váha. Je třeba zmínit, že díky efektivitě lze zvolit o trochu menší vrtule.

kompresi je menší, než jaká je velikost roztažení při totožné síle při dekompresi. Pokud se gumová pneumatika dotýká povrchu, vlivem tíhy pneumatiky (robota) se guma u povrchu stlačí. Hystereze má však za následek, že se na náběhové straně pneumatiky guma deformuje rychleji, na opačné straně se guma při opuštění dotyku se zemí rozpíná zpět do ekvilibría, ale pomaleji. Díky tomu jsou na náběhové straně větší normálové síly od povrchu (tuhost gumy působí větší silou na povrch). Tato disbalance normálových sil má za následek vznik momentu působícího proti točivému momentu pneumatiky, která pneumatiku zpomaluje. Toto je znázorněno na obr. 2.2b. Z tohoto důvodu se tedy znovu pokusíme o kompromis, aby pneumatika nebyla ani moc tvrdá, ani moc měkká.



(a) : Valivý odpor - schéma vzniku protimomentu



(b) : Graf hystereze gumy

Obrázek 2.2: Princip valivého odporu s hysterezí gumy

Důležitou součástí k dosažení funkčnosti našeho robota je zvolení správného pohonu pro samotný pohyb na zdi. Náš cíl je ten, aby byl robot co nejlehčí. Zároveň chceme, aby se uměl pohybovat nahoru a dolů. Jako vedlejší požadavek je schopnost zatáčet. Zároveň klademe důraz na jednoduchost řízení.

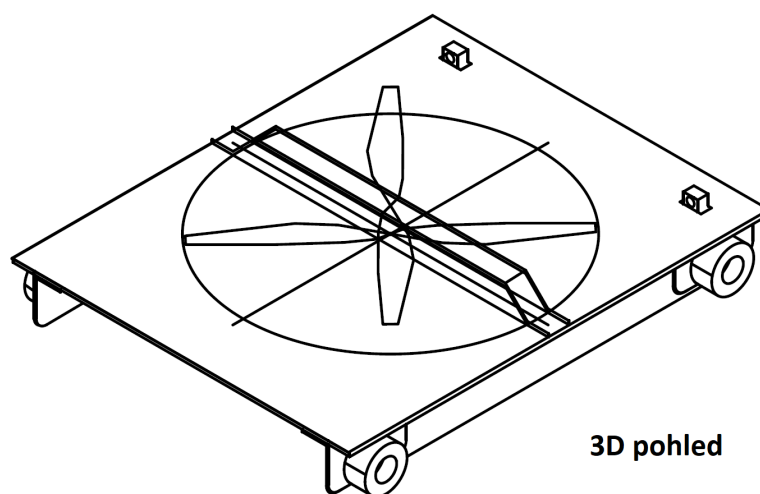
Existují různé typy pohonů, jejichž princip bude detailněji popsán v následující sekci. Lze je popsat z hlediska váhy, konstrukční složitosti či dostupného točivého momentu.

V našem případě zvolíme diferenciální pohon se čtyřmi koly a dvěma motory. Díky tomu bychom měli mít dostatek točivého momentu pro udržení robota na zdi, při zachování dobré váhy. Jeden motor bude na levé straně (u dolního kola) a druhý na pravé straně (taktéž u dolního kola). Na přední kola na korespondující straně se moment bude přenášet pomocí ozubeného řemene.

V úvahu přichází i konfigurace se třemi koly. Jedno z nich by bylo pasivní. Problém je ten, že pasivní kolo by se na stěně otáčelo vlivem gravitace k zemskému povrchu a způsobovalo by komplikace v podobě parazitního odporu.

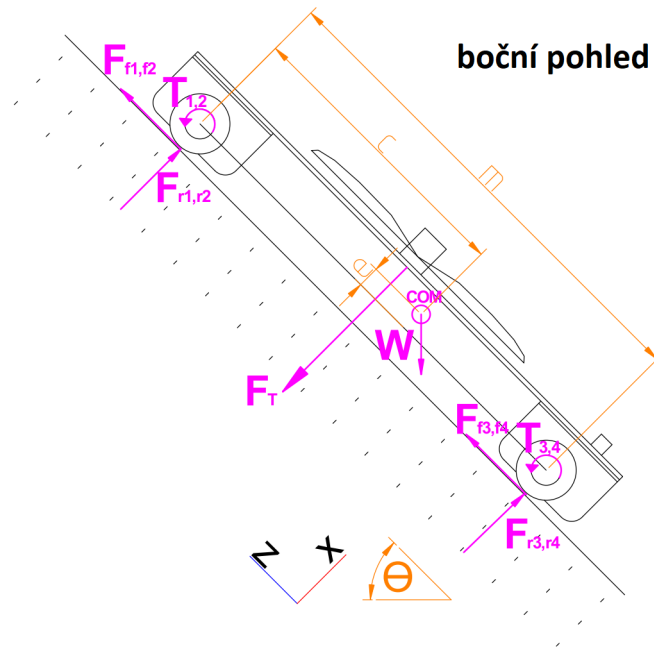
2.3 Kinematika robota

Z hlediska návrhu je zásadní analyzovat, jaký tah a točivý moment, od motorů pohánějících kolečka, je potřeba v ekvilibriu – stavu, kdy se robot udrží na stěně a nehýbe se žádným směrem nebo se pohybuje stálou rychlostí. K tomuto rozboru jsou potřeba určité předpoklady, které jsme zmínili výše – tedy duální konfigurace rotorů a systém pohonu se čtyřmi koly. Zároveň předpokládáme určitý tvar. Tento design byl vytvořen v programu QCAD [9], jehož komunitní verze je k dispozici zdarma. Tento design je znázorněn na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Prototyp šplhajícího robota

Kinematiku je důležité analyzovat i proto, abychom si vůbec uvědomili, jakým způsobem bude robot fungovat, a aby nás poté při realizaci nic nepřekvapilo. Na obrázku 2.4 jsou znázorněny všechny síly a interakce působící na robota – silový diagram. Vycházíme z faktu, že se robot nachází v ekvilibriu. Podle Newtonovské mechaniky je tak výslednice sil působících na robota ve všech směrech nulová.



Obrázek 2.4: Silový diagram tělesa

Platí tedy následující rovnice.

V x-ovém směru:

$$F_x : \sum_{i=1}^4 F_{ri} - W \cos \theta - F_T = 0 \quad (2.1)$$

a v z-ovém směru:

$$F_z : \sum_{i=1}^4 F_{fi} - W \sin \theta = 0. \quad (2.2)$$

Kde F_{ri} jsou reakční síly, kterými povrch působí na robota v důsledku třetího Newtonova pohybového zákona o akci a reakci. F_T je tah produkovaný vrtulema, W je tíha robota, F_{fi} jsou třecí síly vznikající vlivem otáčení kol o povrch (působí proti směru otáčení kol a ve směru pohybu robota). Úhel θ je náklon povrchu (stěny) vzhledem k zemi.

Podobně postupujeme při popisu rotačních účinků. V ekvilibriu se robot neotáčí, a tedy podle momentové věty je superpozice jednotlivých momentů nulová.

Otáčení kolem osy x:

$$M_x : d(F_{f1} + F_{f3} - F_{f2} - F_{f4}) = 0. \quad (2.3)$$

Kde d je boční vzdálenost od těžiště ke kolům, což je znázorněno na obrázku 2.5.

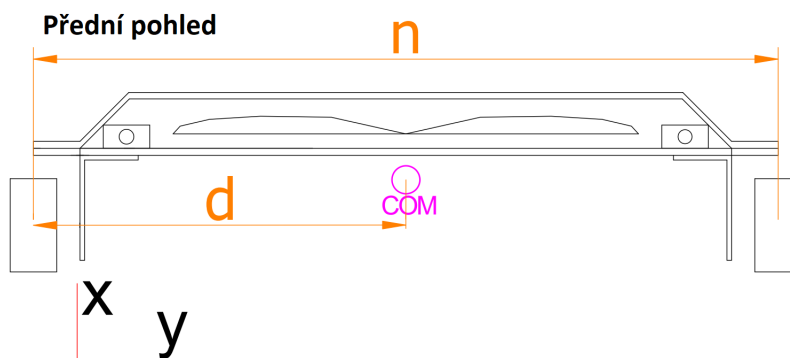
Otáčení kolem osy z:

$$M_z : d(F_{r1} + F_{r3} - F_{r2} - F_{r4}) = 0. \quad (2.4)$$

Otáčení kolem osy y :

$$M_y : \sum_{i=3,4} F_{ri}(m - c) - \sum_{i=1,2} F_{ri}c + F_T(c - \frac{m}{2}) - \sum_i^4 F_{fi}(e + r). \quad (2.5)$$

Kde m je délka robota, c je vzdálenost od těžiště robota (které díky motorům není uprostřed) k předním kolům, e je hloubka od těžiště na úroveň středu kol, r je poloměr kola.



Obrázek 2.5: Silový diagram tělesa - přední strana

Pokud se robot nachází ve stavu, kdy mu neprokluzují kolečka, platí následující vztah:

$$T_i = F_{fi}r \text{ pro } i = 1, 2, 3, 4, \quad (2.6)$$

kde T_i je točivý moment jednotlivých koleček.

Protože se robot nachází v ekvilibriu, a protože jsou kolečka stejně velká a ze stejného materiálu, předpokládáme, že třecí síly $F_{f1} = F_{f3}$ a $F_{f2} = F_{f4}$. Tedy, že si třecí síly odpovídají u koleček na levé straně a podobně na pravé straně.

Nyní tedy máme 6 neznámých - F_{f1} , F_{f2} , F_{r1} , F_{r2} , F_{r3} a F_{r4} . Bohužel máme pouze 5 rovnic (podmínek pro ekvilíbrio), proto je systém tzv. staticky neurčitý. Abychom mohli systém vyřešit, potřebujeme ještě použít nějakou deformační podmínku.

K tomu využijeme rovnici popisující deformaci ("zmáčknutí") koleček.

$$\frac{F_{r1}}{k_1} - \frac{F_{r3}}{k_3} + \frac{F_{r2}}{k_2} - \frac{F_{r4}}{k_4} = 0, \quad (2.7)$$

kde k_i jsou tuhosti koleček (závislé na materiálu).

A protože jsou všechna kola ze stejného materiálu, můžeme uvažovat, že $k_1 = k_2 = k_3 = k_4$. Díky tomu se k_i z rovnice vyruší. To nám dává šestou rovnici:

$$F_{r1} - F_{r3} + F_{r2} - F_{r4} = 0. \quad (2.8)$$

Systém rovnic (2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.8) můžeme vyřešit pomocí metody nejmenších čtverců [10]. Lze zapsat ve tvaru:

$$AX - B = 0. \quad (2.9)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d & -d & d & -d \\ d & -d & d & -d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c & -c & (m-c) & (m-c) & -(e+r) & -(e+r) & -(e+r) & -(e+r) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ \frac{1}{k_1} & \frac{1}{k_2} & -\frac{1}{k_3} & -\frac{1}{k_4} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$B = \begin{bmatrix} W \cos \phi + F_t & W \sin \phi & 0 & 0 & F_t(c - m/2) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$X = \begin{bmatrix} F_{r1} & F_{r2} & F_{r3} & F_{r4} & F_{f1} & F_{f2} & F_{f3} & F_{f4} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

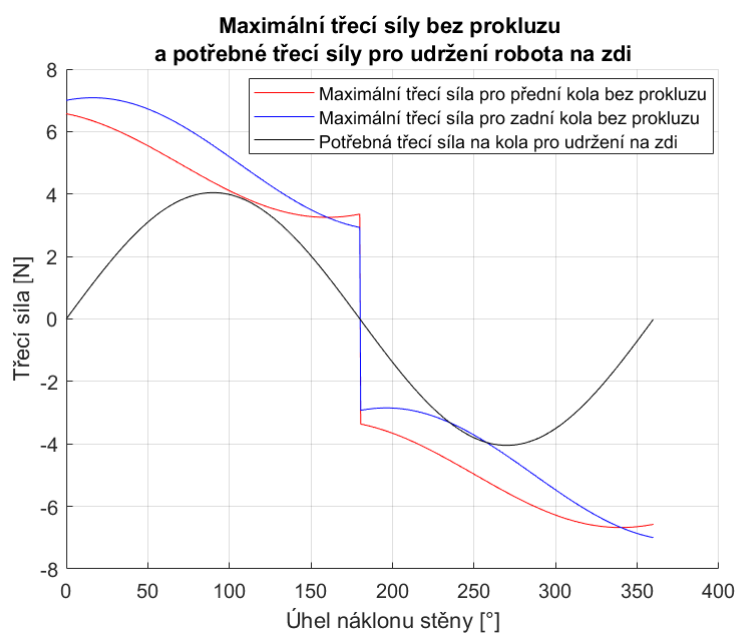
K tomu, aby byl robot v ekvilibriu, tedy aby se nehýbal nebo aby se pohyboval konstantní rychlostí, musí platit následující vztah, který svazuje reakční síly k třecím silám.

$$F_{fi} \leq \mu F_{ri} \text{ pro } i = 1, 2, 3, 4 \quad (2.13)$$

Je to klíčová podmínka, kterou musíme uvážit při návrhu robota, jinak by kola začala prokluzovat a ztratila by se přilnavost ke stěně. Této podmínce se také říká Coulombovo tření. Řecké písmeno μ značí koeficient statického tření. V podstatě dobře popisuje princip našeho robota. K tomu, aby se robot udržel na zdi, potřebujeme co největší výslednou sílu mířící nahoru. Těmi silami jsou právě třecí síly. Abychom si mohli dovolit co největší třecí síly, můžeme měnit dva parametry. Buď koeficient tření, který je závislý na materiálu kolečka a materiálu povrchu stěny, a nebo reakční síly – ty měníme tahem vrtulí ke stěně (čím větší tah, tím větší reakční síla).

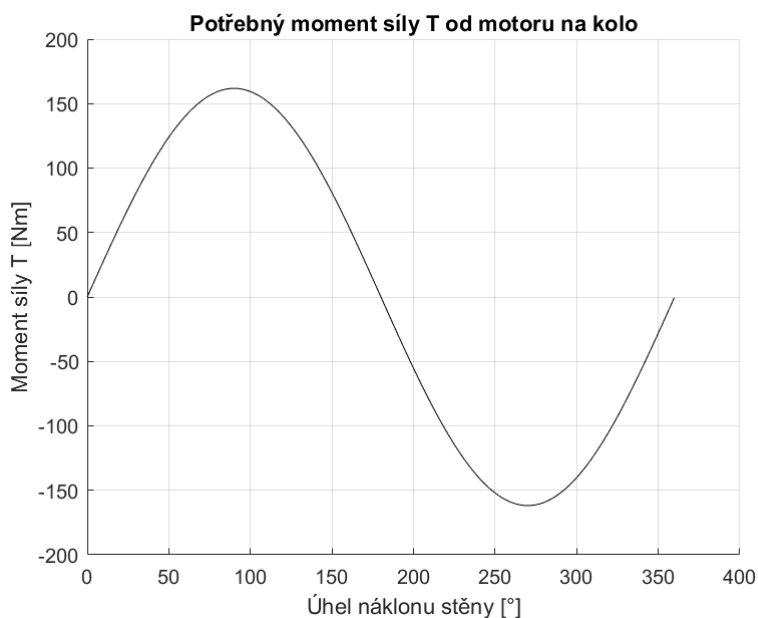
Na grafu 2.6 je znázorněno několik důležitých sil. První – černý graf – je řešením soustavy rovnic (2.9). Je to třecí síla, která je potřebná k udržení robota na zdi. Pokud budou výsledné třecí síly menší, robot spadne. Oranžovou, resp. modrou barvou je maximální třecí síla, kterou můžeme vyvinout, aby zadní, resp. přední kolečka neprokluzovala. Tedy potřebujeme takového robota, jehož maximální třecí síly (bez prokluzu) jsou při každém náklonu stěny nad černou křivkou.

Z grafu je vidět, že kritický bod je zhruba při náklonu 100° . Přední kola zde mají pouze malou rezervu než začnou prokluzovat, a tím se ztratí přilnavost ke stěně. Zadní kola mají v tomto bodě větší rezervu.



Obrázek 2.6: Simulace třecích sil

Na dalším grafu (2.7) křivka představuje potřebný kroutící moment, který musí vyvinout motor na kolo, aby byl robot v ekvilibriu. Ve skutečnosti to není nic jiného, než potřebná třecí síla na jednotlivá kola, zmíněná výše, přenásobená poloměrem kolečka (a upravená na jednotku Nm). To je pro nás důležité, protože na základě tohoto údaje vybereme stejnosměrné motory pro pohon koleček.



Obrázek 2.7: Graf momentu síly v závislosti na náklonu stěny

Simulace byla provedena pro následující parametry (tabulka 2.1), v následujících řádcích bude popsáno, proč byly uvažovány.

| Veličina | Hodnota |
|----------------------|-----------------------------|
| n | 350 mm |
| d | 175 mm |
| m | 400 mm |
| c | 150 mm |
| e | 15 mm |
| r | 40 mm |
| k_1, k_2, k_3, k_4 | 1 |
| W | 4.5 kgf |
| μ | 0.45 |
| g | $9.806650 \text{ m s}^{-2}$ |

Tabulka 2.1: Tabulka parametrů

Rozměry (n, m) robota (nosné desky) byly zvoleny tak, aby na něm byl prostor pro všechny komponenty a zároveň, aby byl větší ve všech směrech, než je průměr vrtulí. To zvýší bezpečnost, protože při roztočení rotoru nejsou vrtule na první pohled vidět, ale podle nosné desky víme, kam už nedosahují. Pozice těžiště (c, d) jsme odhadli na základě umístění komponent. Pohon kol bude v zadní části, proto se těžiště posune dozadu. Zároveň je předpokládáno, že bude těsně pod deskou (e) . Poloměr kol na simulaci má pouze malý vliv, prozatím byla zvolena hodnota 40 mm. Koeficienty tuhosti nemají na simulaci vliv (viz výše). Koeficient tření byl zvolen jako $\mu = 0.45$. Je to koeficient tření mezi pneumatikou a (vlhkým) asfaltem. Zde je poměrně velká rezerva. Např. u betonu (ze kterého je stěna) by měl být koeficient tření vyšší. Třeba guma na suchém betonu dává $\mu = 1$. Váha byla zvolena jako 1.65 kg, podrobnosti dále. S těmito parametry bylo v Matlabu analyzováno, jaký tah F_T je potřeba. Výsledný graf pro $F_T = 4.5 \text{ kgf}$ byl popsán výše.

2.4 Výpočet váhy

- Nosná deska (uhlíková). Pro rozměry $2 \times 400 \times 250$ je váha 330 g. Rozměry sice budou trochu větší, ale v desce bude velký otvor, který naopak váhu sníží. Řekněme, že bude otvor kruhového výřezu s poloměrem $R = 140 \text{ mm}$. Pak $S = \pi \cdot 140^2 = 61\,573 \text{ mm}^2$. To je mnohem víc, než zbývající nezapočítaný obsah desky ($100 \cdot 400 = 40\,000 \text{ mm}^2$). Proto bude váha o něco menší.
- Mikrokontroler. Všechny mají podobnou váhu. Arduino Mega 2560 váží 37 g.
- ESC. Elektronický kontroler rychlosti bude potřeba dvakrát. $2 \cdot 35 \text{ g} = 70 \text{ g}$
- Pohon pro kola. DC motor s převodovkou a enkodérem váží 140 g. Tedy $2 \cdot 140 \text{ g} = 280 \text{ g}$
- Driver shield. Nejspíše bude potřeba řadič, který řídí motory kol. Produkt MD25 váží 40 g.

- 4 kola. Jedná se o lehkou komponentu. Použijeme gumová nebo mechová. $4 \cdot 15 \text{ g} = 60 \text{ g}$
- Ozubený řemen. Např. produkt HTD SM-800 váží 30 g . Tedy $2 \cdot 30 \text{ g} = 60 \text{ g}$
- Vrtule. Vrtule jsou taky lehké. Uvažujeme 11palcové. Tedy $2 \cdot 30 \text{ g} = 60 \text{ g}$
- BLDC. Bezkartáčový motor pro vrtule. Nejtěžší komponenta. Budeme uvažovat 2x kvalitní motor. Tedy $2 \cdot 148 \text{ g} = 296 \text{ g}$
- Přijímač. Velmi lehký. 6 g
- IF senzor. Taky velmi lehký. 6 g
- Náklad. Když budeme chtít na robotovi další součástky, např. kameru. Proto budeme chtít 300 g .
- Rezerva. 100 g .

Toto všechno dává dohromady 1645 g .

Tento výpočet váhy je orientační, na konci této práce bude srovnáno s reálnou váhou robota, kde pečlivě zvážíme všechny komponenty. Tento odhad bylo nutné udělat z toho důvodu, aby vůbec bylo možné analyzovat kinematiku robota. Jak již bylo zmíněno, abychom znali přesnou váhu, museli bychom na základě simulace zvolit potřebné komponenty a ty zvážít. Jenže pro simulaci, která slouží mimo jiné právě pro výběr komponent, váhu potřebujeme znát. Proto je nutné udělat tento odhadující výpočet.

2.5 Výběr rotorů a vrtulí

Správné zvolení motoru a vrtulí je zásadní pro správný běh a zamýšlenou funkci sestavovaného robota. Špatné zvolení může znamenat selhání a destrukci.

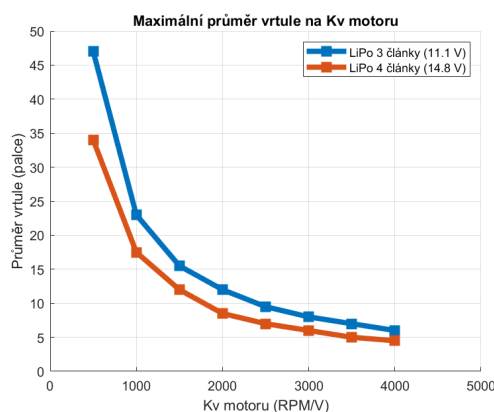
- Váha. Při výběru motoru vycházíme ze znalosti (alespoň přibližně) váhy robota. $W = 1.65 \text{ kg}$
- Tah. Dále potřebujeme vědět, jaký tah by měl vrtulový systém produkovat. Ze simulací popsaných výše vyplývá, že potřebujeme $T = 4.5 \text{ kgf}$
- KV. Konstantní rychlost motoru (neplést s elektrickou jednotkou kV) udává RPM, které motor zvládne na jeden volt. Tedy čím větší KV, tím více má otáček za minutu. Obecně platí, že na pomalejší (menší) letouny se používá menší KV. Hodnota byla zvolena na $KV = 1000$
- Poměr Výkon/Tah. Platí, že čím větší KV, tím více výkonu potřebujeme na vytvoření stejného tahu. To je proto, že s větším KV musí být použita kratší vrtule.

$$PT_{ratio} = 0.17 \cdot \frac{KV}{1000} + 0.09 = 0.17 \cdot \frac{1000}{1000} + 0.09 = 0.26 \quad (2.14)$$

- Výkon. Ze znalosti PT_{ratio} a potřebného tahu T dopočítáme výkon motoru. Pro pouze jeden motor vydělíme hodnotu tahu dvěma. Tedy $T' = 2.25 \text{ kgf}$

$$P = T \cdot PT_{ratio} = 2250 \cdot 0.26 = 585 \text{ W} \quad (2.15)$$

- Nyní s hodnotami $KV = 1000$ a $P = 585 \text{ W}$ můžeme hledat v katalogu výrobce nejvhodnější motor. Vždy je lepší vzít o trochu výkonější. Takto byl zvolen BLDC motor AXI 2820/12 (KV990, 650 W).



Obrázek 2.8: Graf znázorňující výběr vrtule

- Vrtule. Průměr vrtule musíme vybrat tak, jak doporučuje výrobce. Jde totiž o to, aby špička vrtule s největší obvodovou rychlostí nedosáhla rychlosti zvuku. Pak dochází k velkému napětí v materiálu, což může mít fatální následky. Naopak při zvolení příliš krátké vrtule nezískáme potřebný tah. Na grafu 2.8 jsou vyznačeny maximální průměry vrtulí, které se nesmí překročit (pro různá napájení). V zásadě čím vyšší napětí, tím musíme vybírat z vrtulí s kratším poloměrem. Měli bychom vždy zvolit hodnotu menší než je maximální hodnota pro dané napájení (tedy pod danou křivkou). Pro začátek byla zvolena vrtule s průměrem 11 palců a sklonem 5.5 palců (teoretická vzdálenost, kterou vrtule urazí při jednom otočení).

Pro názornost si zde ještě uvedeme výpočet obvodové rychlosti. Řekněme, že jsme vybrali vrtuli o délce 11 palců a motor, který ji bude pohánět, bude napájen napětím 20 V a jeho parametr Kv bude 900. Nejdříve převedeme palce na centimetry: 11 palců = $11 \cdot 2.54 \text{ cm} = 27.94 \text{ cm}$. Nyní spočítáme velikost obvodu kružnice, kterou okraje vrtule při otáčení opisují: $27.94 \cdot \pi = 87.77 \text{ cm}$. Nyní vycházíme z definice Kv - tedy počet otáček za minutu na jeden volt: $900 \cdot 20 = 18\,000$, tedy teoreticky 18 000 otáček za minutu při napájení 20 V (v praxi je ta hodnota nižší, ale je dobré brát v úvahu maximální teoretické hodnoty). Tedy za minutu urazí okraje vrtule vzdálenost $18\,000 \cdot 87.77 = 1\,579\,860 \text{ cm}$. Za vteřinu to je $1\,579\,860/60 = 26\,331 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Nakonec převedeme ještě na metry: $26\,331/100 = 263.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tato hodnota je menší než rychlost zvuku, která je ve vzduchu $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tedy nedojde k fatálním škodám způsobeným napětím v materiálu při překročení rychlosti zvuku.

Kapitola 3

Teoretické pozadí

3.1 O robotice

Robotika je odvětví na pomezí počítačových věd a inženýrství. Zahrnuje vytvoření konceptu, návrh a jeho optimalizaci, výrobu, nasazení do provozu a samotný provoz. Roboti jsou fyzičtí agenti, kteří vykonávají činnost a působí na svět v reakci na jeho vnímání. Jejich hlavním úkolem je pomáhat člověku, ať už ve výrobě, tak v osobním životě. Pojem *robot* se poprvé objevil ve hře Karla Čapka *Rossumovi univerzální roboti* z roku 1920. Robotů je celá řada, ale všichni vykazují tyto 3 základní charakteristiky:

1. Mechanická konstrukce. Všichni roboti (kromě těch měkkých, viz dále) potřebují pevnou konstrukci, která tvoří kostru robota, a ke které jsou přichycené další komponenty. V závislosti na účelu robota se používají různé materiály, jmenujme např. uhlíkové kompozity, sklolamináty, překližky, dural nebo tzv. sendviče. Využívají se také různé plasty, které souvisejí s 3D tiskem. Mohou se použít duté konstrukce nesoucí elektroniku nebo se dá vystačit s lehčími rámy. Výběr materiálu úzce souvisí s hmotností, pevností a možnostmi materiálů obrábět.
2. Elektrické vlastnosti. Každý robot, aby vyhovoval definici, musí být nějakým způsobem poháněn. K tomu potřebuje elektrické napájení. Robot může být napájen bateriemi nebo pupeční šňůrou. Existují roboti, kteří se dokáží i sami nabíjet, např. mohou na sobě nést malé solární panely nebo jsou schopni se v případě potřeby odnavigovat do dokovací stanice.
3. Software. Aby roboti mohli fungovat a komunikovat se světem či operátorem, potřebují schopnost mít v sobě nahraný program / řídicí systém. Programování robotů je z velké většiny realizované pomocí nízkourovňových jazyků, které jsou přirozenějším způsobem pro komunikaci s hardwarem.

Dále pak robot potřebuje *snímače* pro vnímání okolního světa. Můžou to být různé kamery, senzory vzdáleností, lidary nebo senzory vnímající vlastní parametry robota jako gyroskopy, akcelerometry či enkodéry.

Robotický systém se neobejde ani bez *akčních členů* (nebo jinak aktuátorů), které se světem interagují. Potřebují pohybovat svojí mechanickou kostrou, aby přemístili sami sebe nebo svůj *efektor* – pracovní část robota. K tomu je zapotřebí celá řada motorů, které budou popsány dále. Dost často se kromě elektrických signálů používá pneumatika (stlačený vzduch) nebo hydraulika (olej). Primární důvody jsou schopnost přenášet velké síly, poměrně lehká údržba a funkčnost (spolehlivost).

Existují různé typy robotů. V roce 2005 bylo 90 % robotů používáno jako *manipulátory* [11]. Tyto robotické paže byly (a dodnes jsou) používány k šroubování, svařování a manipulaci v automobilovém průmyslu. Jsou připevněny bez možnosti měnit svoji pozici. Dalším typem jsou *mobilitní roboti*, kteří jsou schopni se ve světě pohybovat. Mohou mít kola, křídla či končetiny. Tyto dále rozlišujeme na *UGV* (bezpilotní pozemní vozidla). Ta se mohou pohybovat ve skladech, na silnicích či dokonce na jiné planetě s odlišnou gravitací (např. vozítko Perseverance od společnosti NASA, které přistálo na Marsu v únoru 2021 s cílem najít známky života). Dalším typem jsou *UAV* (létaající bezpilotní prostředky) důležité pro monitorovací aplikace, letecké průzkumné či armádní účely. Dále jmenujme *AUV*, tedy podvodní bezpilotní prostředky používané pro podvodní průzkum; *mobilitní manipulátor*, který je kombinací mobilního robota a manipulátoru; *humanoidní robot*, který se snaží napodobit člověka, i např. kvůli psychologickým důvodům (např. robot Atlas od firmy Boston Dynamics s neuvěřitelnou dynamikou pohybu); a v neposlední řadě některé *protetické pomůcky* pro lidi se zdravotním postižením.



Obrázek 3.1: Humanoidní robot Atlas od Boston Dynamics [12]

V této kapitole bychom neměli ani opomenout, že existují roboti *měkkí* a *tvrdí*. Tvrdí používají pevné materiály (viz výše) a měkkí používají materiály měkké, jako je např. guma či silikon. Výhoda tvrdých robotů je jejich přesnost a opakovatelnost pohybu, jejich schopnost konat náročnou práci a poměrně jednoduché řízení. Výhoda měkkých robotů je jejich flexibilita, schopnost dobře se adaptovat neznámému prostředí a většinou nenákladný materiál.

Abychom mohli popsat pohyb robotů ve světě je potřeba u každého systému zvážit *počet stupňů volnosti (SV)*. Podle definice se jedná o počet nezávislých směrů, kterými se může robot nebo jeho efektor(y) hýbat. Tyto pak ještě rozlišujeme na *efektivní stupně volnosti (ESV)* a *řiditelné stupně volnosti (ŘSV)*. Např. náš šplhající robot se může pohybovat

v rovině (x, y) a může být libovolně orientovaný kolem osy z . Robot má tedy 3 efektivní stupně volnosti. Ovšem s robotem můžeme pohybovat nahoru a dolů a můžeme s ním zatáčet – má tedy 2 říditelné stupně volnosti. Robot je *neholonomní* pokud platí, že $ESV > \check{R}SV$. Pokud ovšem platí $ESV = \check{R}SV$, pak je systém *holonomní* [13].

■ 3.2 Motory

Motory jsou nedílnou součástí robotického systému. Zajišťují pohyb částí robota nebo jeho pohyb po světě. Motory mohou být napojeny na kolečka u mobilních robotů, mohou pohybovat mechanickými díly, jako jsou klapky na letadlech nebo mohou měnit natočení kloubů manipulátoru. V následujících sekcích si blíže představíme motory důležité pro naše řešení.

■ 3.2.1 Kartáčový DC motor

Stejnoseměrný kartáčový DC motor je ve skutečnosti cívka namotaná na válcovitý magnetický materiál (rotor), který se otáčí v magnetickém poli produkovaném permanentními magnety (nebo elektromagnety), kterým se říká stator.

Při průchodu proudu cívkou na ni vlivem vnějšího magnetického pole vyvolaného statorem působí kolmá síla, která má za následek otáčení kotvy (rotoru) uložené v ložisku. Pokud by ale cívkou procházel proud neustále stejným směrem, kotva by se zastavila, protože po půl-otáčce by na cívku působila opačná síla. Je tedy potřeba v cívce otočit polaritu. K tomu slouží rotující komutátor, který se skládá z alespoň dvou kovových částí. Ty se dotýkají tzv. kartáčů z karbonového materiálu [14].

Uvažujme nyní jeden závit cívky s délkou L . Necháme cívkou protékat proud i a bude v magnetickém poli permanentních magnetů B . Na závit pak působí síla $F = BiL$. Pakliže má závit šířku b , pak pro točivý moment hřídele motoru platí $T = bF$. Tedy platí

$$T = bBiL = \theta i, \quad (3.1)$$

kde θ je magnetický indukční tok. Vzhledem k tomu, že na cívce je závitů velké množství a stejnosměrný motor může mít více pólů, tuto rovnici ještě přenásobíme konstantou k_t . Tedy

$$T = k_t \theta i. \quad (3.2)$$

Konstanta K_t (velké písmeno) pak ještě zahrnuje i magnetický indukční tok θ a nazýváme ji jako konstantu točivého momentu motoru.

Vlivem otáčení cívky v magnetickém poli se mění magnetický indukční tok, který ji obklopuje, a následkem tohoto se v cívce indukuje zpětné elektromotorické napětí

$$U_b = k_v \theta \omega. \quad (3.3)$$

Je tedy úměrné změně magnetického toku přenásobenou konstantou k_v . Tato konstanta v sobě opět může zahrnovat i magnetický tok, v tom případě ji značíme jako K_v .

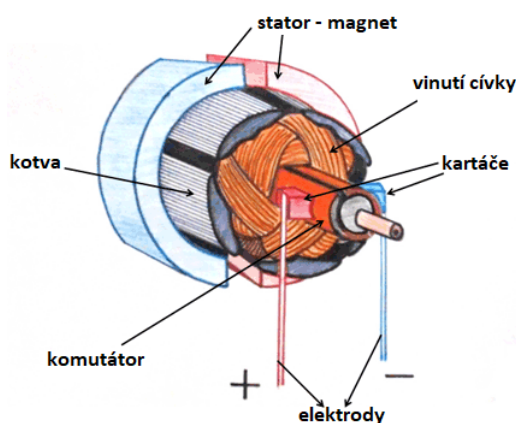
Výsledný proud protékající cívkou je tedy roven:

$$i = \frac{U - U_b}{R} = \frac{U - K_v \omega}{R} \quad (3.4)$$

a točivý moment hřídele je po úpravě:

$$T = K_t i = K_t \frac{U - K_v \omega}{R}. \quad (3.5)$$

Na obrázku 3.2 jsou znázorněny všechny důležité a zmíněné části DC kartáčového motoru.



Obrázek 3.2: Popis DC kartáčového motoru [15] (upraveno)

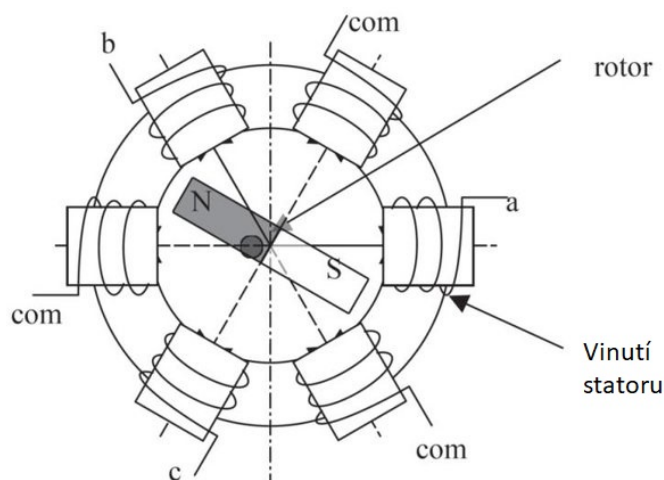
3.2.2 Bezkartáčový BLDC motor

U kartáčových DC motorů může docházet k tomu, že se po čase opotřebují kartáče kvůli neustálému tření s komutátorem, který obvykle musí být taky vyměňován. DC motory taky mohou jiskřit a nemusí se tak hodit pro aplikace, kde existuje riziko vzplanutí. Z těchto důvodů se vytvořil bezkartáčový motor, který ačkoliv je složitější na řízení, tyto zmíněné problémy potlačuje. Jeho bezespornou výhodou je schopnost poskytovat velký výkon a také jeho relativní tichost.

BLDC motory mají v podstatě prohozený rotor a stator. Na statoru jsou cívkky a rotorem je permanentní magnet většinou z feritového materiálu. V cívkce teče proud a protože se nachází v magnetickém poli, na vodiče působí síla. Podle Třetího Newtonova zákona o akci a reakci působí na permanentní magnet reakční síla a uvádí tak rotor do pohybu. Schéma BLDC motoru je na obrázku 3.3.

Na jednotlivé cívkky je aplikováno napětí tak, aby jejich magnetické pole působilo na magnetické pole rotoru, a to jak přitažlivými, tak odpudivými účinky. A protože je rotor v pohybu, je potřeba neustále měnit polaritu cívek (protilehlé cívkky jsou propojeny). Dřív

se k tomu používala hallova sonda na motoru spolu s integrovaným obvodem (např. STM L6235). Dnes se spíše používají elektronické regulátory otáček (ESC), které jsou schopny detekovat zpětné elektromotorické napětí generované v cívkách statoru (motor se vlastně chová jako generátor, což je podrobněji popsáno v předchozí sekci). Z tohoto napětí dokáže ESC dekódovat úhlovou rychlost a pozici rotoru. Na základě této informace pak napájí stator BLDC motoru.



Obrázek 3.3: Popis BLDC bezkartáčového motoru [16] (upraveno)

3.3 Teorie lopatkových elementů

Teorie lopatkových elementů se používá pro návrh vrtulí. Analyzuje profil křídla a optimalizuje ho tak, aby byl co nejefektivnější. Vzhledem k tomu, že náš robot disponuje vrtulovým systémem, bude v této sekci tato teorie blíže představena pro pochopení, jakým způsobem vrtule produkují tah.

Tato teorie (anglicky Blade Element Theory) dobře popisuje vrtule, které mají menší počet listů (dva až tři) a poměrně úzkou tětivu (v podstatě šířka listu). Na rozdíl od jiných teorií bere v úvahu tvar a profil křídla – je důležité si uvědomit, že list vrtule je ve skutečnosti vlastně jen křídlo. List vrtule je rozdělen na malé elementy, pro které se odděleně počítá tah o odpor. Tyto se ve výsledku sečtou, a tím se získá celková tažná síla vrtulového systému.

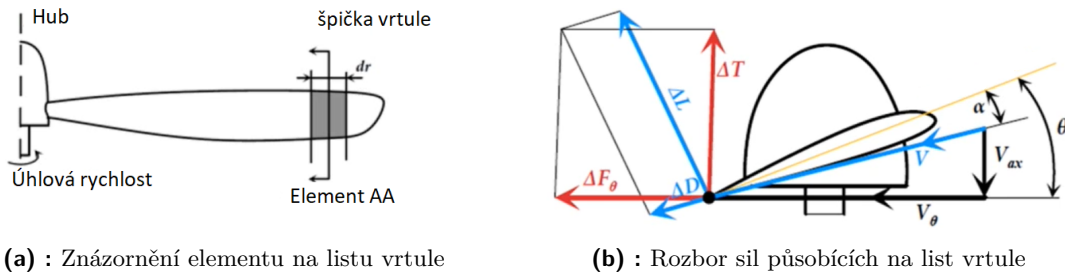
Aby listy vrtule svými účinky co nejméně interferovaly s ostatními, mělo by platit následující:

$$\frac{s}{c} \gg 1. \quad (3.6)$$

Konstanta s je vzdálenost, přesněji obvodové oddělení od nejbližší další vrtule. A c je tětiva – tedy šířka vrtule. Pro validitu teorie je potřeba definovat tzv. pevnost (anglicky solidity) vrtule. Platí, že

$$\sigma = \frac{B \cdot c}{\pi \cdot r}, \quad (3.7)$$

kde B je počet listů a r poloměr vrtule (délka listu). V podstatě toto číslo vyjadřuje poměr pevné plochy k ploše, kterou opisuje vrtule. Pokud je $\sigma \ll 1$, pak je tato teorie validní a použitelná.



Obrázek 3.4: Teorie lopatkových elementů [17] (upraveno)

Na obrázku 3.4a je znázorněn element na listu vrtule. List je rozdělen na elementy z toho důvodu, že profil listu není stejný po celé délce. To je proto, že špička vrtule se pohybuje rychleji vůči vzduchu (větší obvodová rychlost) než část blízko středového hubu. A díky vyšší unášivé rychlosti V_θ by byla také jiná rychlost proudu nabíhajícího na list V , která je součtem zmíněné unášivé rychlosti a rychlosti letu V_{ax} . To by mělo za následek menší efektivitu a případně ztrátu vztlaku. Z toho důvodu má křídlo po své délce jiný tvar.

Tyto vektorové veličiny jsou znázorněny na obrázku 3.4b. Vrtule musí mít nenulové stoupání (úhel θ), aby byl nenulový úhel náběhu α . Čím větší je pak rychlost letu, tím je menší úhel náběhu. Hodí se ale poznamenat, že $V_\theta \gg V_{ax}$. Díky tomu je úhel náběhu velmi podobný stoupání vrtule, tedy $\alpha \approx \theta$.

Element na křídle pak díky nabíhajícímu proudu vzduchu produkuje vztlakovou sílu ΔL . Zároveň vzduch, který vrtule musí protlačit, vytváří odpor ΔD . Tah vrtulového systému od jednoho elementu je pak daný vztahem:

$$\Delta T = \Delta L \cdot \cos \phi - \Delta D \cdot \sin \phi, \quad (3.8)$$

kde $\phi = \theta - \alpha$. Dále pak obvodovou protisílu od elementu, která je vektorovou kombinací x-ové složky vztlakové síly ΔL a odporu ΔD , můžeme popsat jako:

$$\Delta F_\theta = \Delta D \cdot \cos \phi + \Delta L \cdot \sin \phi. \quad (3.9)$$

Vrtule pak musí vyvinout točivý moment k roztočení elementu:

$$\Delta Q = r \cdot \Delta F_\theta, \quad (3.10)$$

kde r je vzdálenost elementu od osy otáčení procházející hubem.

Pro vztlakovou sílu elementu ΔL a pro odpor elementu ΔD pak platí:

$$\Delta L = \frac{\rho V^2}{2} \cdot C_l \cdot c \cdot dr, \quad (3.11)$$

$$\Delta D = \frac{\rho V^2}{2} \cdot C_d \cdot c \cdot dr, \quad (3.12)$$

kde C_l je vztlaková konstanta (většinou získaná experimentálně, zahrnuje v sobě materiál křídla, viskozitu vzduchu a další vlastnosti), C_d je koeficient odporu a ρ je hustota vzduchu na zemském povrchu.

Celkově po dosazení 3.11 a 3.12 do vztahů 3.8 a 3.10 dostáváme pro B listů:

$$\Delta T = \frac{\rho V^2}{2} \cdot (C_l \cdot \cos \phi - C_d \cdot \sin \phi) \cdot B \cdot c \cdot dr, \quad (3.13)$$

$$\Delta Q = \frac{\rho V^2}{2} \cdot (C_l \cdot \sin \phi + C_d \cdot \cos \phi) \cdot B \cdot c \cdot r \cdot dr. \quad (3.14)$$

Celkový tah T a celkový točivý moment pro roztočení vrtule Q pak získáme integrací elementů po celé délce listu.

3.4 Efekt koaxiální konfigurace vrtulí na pohon vícerotorových systémů

Efekt koaxiální konfigurace z hlediska celkého produkovaného tahu studovali autoři v [18] a v [19].

V prvně jmenovaném se analyzovala jak koaxiální konfigurace, tak konfigurace částečně se překrývající vrtulí. Autoři došli k závěru, že pokud jsou od sebe vrtule vzdáleny 10-15 cm, je účinnost obou vrtulí velice vysoká. Dále testovali vzdálenost velmi blízkou (3.5 cm), pak se účinnost velmi snižovala. Při částečně se překrývajícím uspořádání bylo nejlepší, pokud se vrtule překrývaly z 10-15 % při co nejmenší vzájemné vzdálenosti.

V druhé práci bylo vyhodnocováno pouze soustředné uspořádání, za to však šli autoři do mnohem větší hloubky. Kromě dvou vrtulí testovali až čtyři vrtule. Jejich experiment se skládal ze za sebou uspořádaných hliníkových tyčí, které byly na jednom konci přichycené ke stolu a na druhém konci přesahovaly do volného prostoru. Na koncích v prostoru byly umístěny tenzometrické snímače a na nich byly přišroubovány vrtule s korespondujícími motory. Takové uspořádání umožnilo měřit tah produkovaný na každé vrtuli zvlášť. Byly použity 13palcové vrtule a tah spodních vrtulí byl měřen relativně k první vrtuli v procentech.

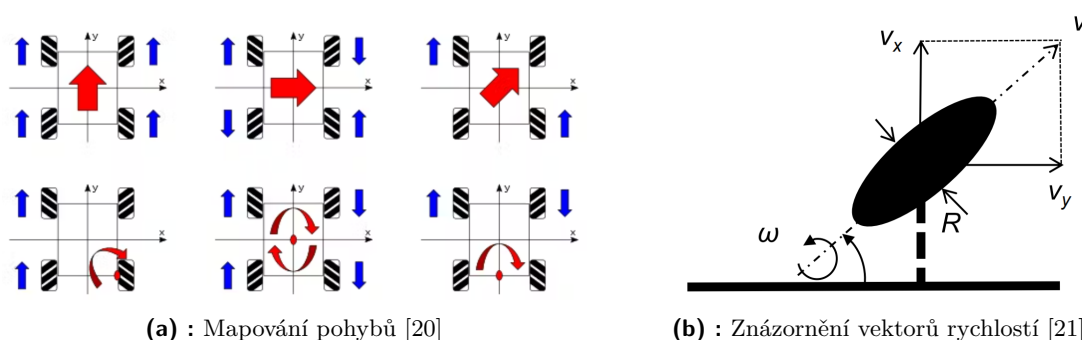
Nejříve bylo změřeno, že pokud se vrtule pohybovaly stejným směrem, pak tah od spodních vrtulí (stoupání vrtule 4.4 palců) byl nižší, než pokud se směr otáčení dolů směrem po proudu postupně měnil. Dalším poznatkem bylo to, že pokud se zvýšilo stoupání vrtule, ztráty tahu na spodních vrtulích se významně zmenšily. Co se vzdálenosti týče, celkový tah čtyř vrtulí byl větší při vzájemné vzdálenosti 5 cm oproti 20 cm. Zajímavým zjištěním byl fakt, že tah se zvýšil, pokud se spodní vrtule otáčely rychleji než ty nad nimi. Podle autorů by bylo nejlepší, pokud by se spodní vrtule otáčela na maximální otáčky, zatímco u vrtulí výše by se rychlost podle potřeby upravovala. Podobně jako u rychlostí, se došlo k závěru, že spodní vrtule by měly mít pokud možno větší stoupání.

Pro našeho robota bylo zvoleno řešení dvou soustředných vrtulí pohybujících se v opačném směru, aby byl potlačen vliv parazitního momentu vyvolaného v reakci na otáčející se rotor. Toto řešení bylo zvoleno i z toho důvodu, že je pak robot rozměrově o něco kompaktnější. Zároveň to umožňuje poměrně jednoduché řízení. Nevýhodou tohoto řešení může být posun těžiště dál směrem od stěny. Proto jsou vrtule umístěny poměrně blízko k sobě. Z konstrukčního pohledu to vyjde víceméně nastejno, a to z hlediska složitosti i použitého materiálu (a tedy váhy). Zároveň máme k dispozici 2 vrtule, a proto se přistoupilo ke stejné rychlosti otáčení (na opačnou stranu) pro co nejjednodušší řízení a maximální redukci parazitního momentu. Typ vrtule, délka a stoupání bude blíže představeno v implementační kapitole.

3.5 Typy pohonů

Výběr správného typu pohonu pro robotickou aplikaci je zásadním momentem, protože rozhoduje o typu řízení a kinematicce robota. V následující sekci si představíme několik druhů takovýchto pohonů, aby mohlo být učiněno správné rozhodnutí pro šplhajícího robota.

Prvním druhem je pohon pomocí Omni-kol nebo Mecanum-kol. Obojí jsou tzv. všesměrová kola. Tato speciální kola se liší od konvenčních svojí celkovou strukturou, která na první pohled vůbec nemusí kolo připomínat. Jedno kolo se totiž ve skutečnosti skládá z několika malých válců, které jsou na velké kolo připevněny odděleně od sebe. Tato kola se kromě pohybu dopředu (rotace kolem rotační osy na nápravu) mohou pohybovat i do strany. Skvělé na tomto typu pohonu je, že umožňuje holonomní pohyb robota (viz 3.1). Mecanum kola mají válečky uspořádané v určitém úhlu (45°). Omni kola mají válečky rovně, to umožňuje rozjet se dopředu plným výkonem.



(a) : Mapování pohybů [20]

(b) : Znázornění vektorů rychlostí [21]

Obrázek 3.5: Mecanum kola

Pokud budou v_1 , v_2 , v_3 a v_4 rychlosti otáčení jednotlivých koleček, pak platí, že

$$v_y = \frac{1}{4}(v_0 + v_1 + v_2 + v_3), \quad (3.15)$$

$$v_x = \frac{1}{4}(v_0 - v_1 + v_2 - v_3), \quad (3.16)$$

$$v_\theta = \frac{1}{4}(v_0 + v_1 - v_2 - v_3). \quad (3.17)$$

Výsledná rychlost robota je pak součtem těchto rychlostí – to je znázorněno na obrázku 3.5a. Obrázek 3.5b se pak snaží blíže přiblížit funkci jednotlivých válečků. Ty přispívají do celkové rychlosti kola jak x-ovou složkou tak y-ovou složkou. Čím větší je jejich šířka R , tím je větší celková rychlost. Na závěr se hodí poznamenat, že existuje pohon typu Kiwi, který využívá Omni nebo Mecanum kola a potřebuje pouze tři kola natočená k sobě navzájem o 120° .

Dalšími dvěma příbuznými typy jsou tzv. Ackermannův pohon a diferenciální pohon. Diferenciální pohon má časté zastoupení v mobilní robotice, Ackermannův pohon se častěji využívá pro dopravní prostředky určené pro lidi. To z toho důvodu, že Ackermannův pohon má stabilnější trajektorii. Nevýhodou diferenciálního pohonu může být opotřebování povrchu kol a vozovky. Navíc je spousta výkonu ztracena ve formě tepla třením o povrch. Ackermannův pohon je znázorněn na obrázku 3.6a, diferenciální pak na obrázku 3.6b.

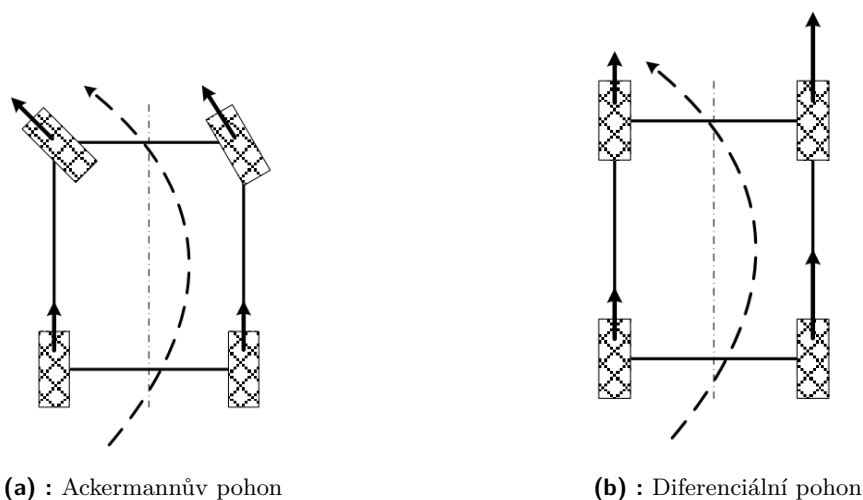
Oba pohony se podobají tím, že mají jejich kola společný střed otáčení. U Ackermannova pohonu mají zadní kola stejnou rychlost, zatímco přední kola mají jiný směr. Pro tento typ pohonu je také důležité, aby natočení předních kol bylo kolmé na spojnici od středu kola ke společnému středu otáčení. To má za následek mírně rozdílné natočení předních kol. Díky tomu se pak vozidlo při zatáčení drží trajektorie a neplave. Při vzdálenosti předních a zadních kol L a úhlu otáčení δ (průměr úhlu otáčení levého předního a pravého předního kola), pak pro poloměr otáčení R (vzdálenost středu robota od středu otáčení) platí:

$$R = \frac{L}{\tan \delta}. \quad (3.18)$$

Diferenciální pohon funguje na rozdílne rychlosti pravých a levých kol (stejná rychlost předního a zadního kola). Pokud se levá kola točí rychlostí v_l a pravá kola se točí rychlostí v_r , pak poloměr otáčení R je:

$$R = \frac{l(v_l + v_r)}{2(v_l - v_r)}. \quad (3.19)$$

Tyto poloměry se pak mohou dosadit do zobecněných kinematických rovnic (platných pro oba typy pohonů) a výsledkem je vektor $[v_x, v_y, v_\theta]$, kde v_x a v_y jsou rychlosti robota v x-ovém a y-ovém směru a v_θ je úhlová rychlost otáčení kolem společného středu otáčení.



Obrázek 3.6: Znáornění pohonů se čtyřmi koly [22]

Pro naši práci byl zvolen diferenciální pohon. Všeměrová kola bylo rozhodnuto nepoužít z důvodu horší adheze těchto kol k povrchu. Diferenciální pohon je vhodnější než Ackermannův z toho důvodu, že umožňuje otáčení robota s menším poloměrem otáčení. Navíc nemusíme řešit otáčení předních kol, o které by se pravděpodobně staral servomotor, který je váhou navíc. Je možno použít buď čtyři DC motory pro pohon každého kolečka zvlášť, v naší práci použijeme řešení ve formě řemenů, které budou přenášet stejný moment od motoru na jedné straně robota pro obě kola (zadní a přední) - tedy ve výsledku budeme mít pouze dva DC motory.

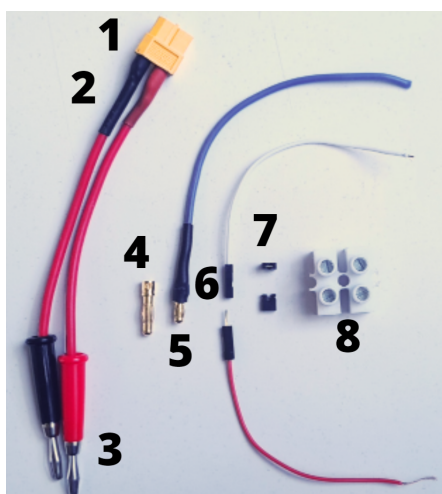
3.6 Typy konektorů

Obecně lze definovat, jaké požadavky na konektor je třeba brát v úvahu. Zaprvé je zásadní určit, kolik pinů potřebujeme. Dělají se konektory v různém provedení – jednopinové, dvoupinové, ale může jich být i více. Musíme také brát ohled na elektrické vlastnosti daného konektoru. Dále se velká většina konektorů rozděluje na část samicovou a samcovou. Na první pohled se může zdát, že to není důležité. Ale jde o bezpečnost. Řekněme, že budeme mít odhaleného samce a zakrytou samici. Který konektor je vhodné umístit na stranu baterie či jiného zdroje?

Měla by to být samice, protože v případě odhaleného samce hrozí, že se kabelem dotkneme vodivého povrchu konektoru a v případě dvoupinového konektoru bychom dokonce mohli baterii vyzkratovat.

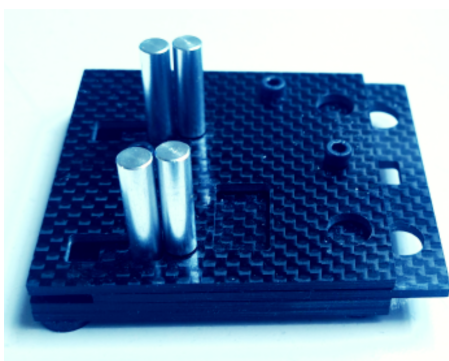
Častým konektorem, který se používá převážně v modelářství, jsou žluté konektory XT30, XT60 a XT90. Číslo řady znamená nominální proud konektoru. Mají skvělé elektrické vlastnosti a proto jsou v naší práci použity.

Dalším typem, který bude použit, jsou nekruté jednopinové konektory typu Bullet. Uplatnění nacházejí u BLDC motorů a elektronických regulátorů otáček. Bullet konektory existují ve verzi 3.5 mm a 4 mm, pro motory se většinou používají ty menší. Naproti tomu větší konektor je kompatibilní se samicí banánkového konektoru, který se často používá na zdrojích.



- 1) XT60 F; 2) Smršťovací bužírka; 3) Banánek M; 4) Bullet 4 mm M;
5) Bullet 3.5 mm M; 6) Jumperry M; 7) Jumper 2-pin; 8) Svorkovnice "čokoláda"

Obrázek 3.7: Konektory



Obrázek 3.8: Stojánek na pájení konektorů

Dále jsou pro naši práci relevantní konektory typu Jumper. Ty se používají již u datových kabelů. Tyto konektory jsou kompatibilní s různými mikroprocesory (Arduino, RaspBerry Pi, STM Nucleo). Mohou se k vodiči krimpovat nebo připájet.

Další relevantní konektory jsou Wago svorky, které umožňují kabely od svorky kdykoliv oddělit. Jejich popularita vychází z jejich jednoduchého používání, kdy speciální páčkou kabel připevníme nebo odpojíme. Poslední konektor, který stojí za to zmínit, je tzv. svorkovnice "čokoláda", která spojuje dva vodiče tak, že jsou přišroubovány k sobě. Prodává se po platech, které se postupně odlamují.

Některé ze zmíněných konektorů jsou vidět na obrázku 3.7. Na obrázku 3.8 je zachycen stojánek, který byl dobrým pomocníkem pro pájení většiny konektorů.

3.7 Zdroje energie

Součástí návrhu bylo i učinit rozhodnutí, zda-li budeme robota napájet bateriemi, které by nesl na sobě a nebo pupeční šňůrou, která by ho napájela ze země. K tomu, abychom mohli dělat jakékoliv závěry, bylo nejdříve potřeba vybrat správný BLDC motor a vrtule, jejichž kombinace má zásadní vliv na odběr proudu a napětí. Řádově se pohybujeme kolem příkonu 400 – 500 W. DC motory, které budou pohánět kola, nemají takový odběr - u nich je důležité pouze dodávané napětí zdroje. Běžně prodávané DC motory pracují pod 24V, 12V nebo 6V napětím.

3.7.1 Baterie

Výhoda dostupných LiPo baterií je ta, že dokážou poskytovat opravdu velké proudy (a ještě větší v případě odběrové špičky). Jejich nevýhoda je jejich rychlé vybití. Pokud chceme delší výdrž baterie, musíme použít baterii s větší kapacitou. Bohužel čím větší kapacita, tím větší váha, a to poměrně o dost.

LiPo baterie jsou dobíjitelné baterie složené z několika článků s lithiovými elektrodami a polymerovým elektrolytem. Články jsou většinou zapojeny v sérii. Díky tomu mohou poskytovat větší nominální napětí. Zároveň je možné se setkat i s paralelní kombinací sady článků. Taková konfigurace pak poskytuje větší kapacitu. Celkové uspořádání je popsáno písmeny S a P . Tedy například $3S2P$ jsou 2 sady tří sériově zapojených článků (dohromady šest článků). Jeden článek má 3.7 V. Takže zmíněná konfigurace by měla nominální napětí $3.7 \cdot 3 = 11.1$ V a větší kapacitu než $3SP1$.

Dalším důležitým parametrem LiPo baterií je jejich kapacita C udávaná v mAh a vybíjecí (a případně nabíjecí) faktor, který je udáván jako násobek kapacity C . Např. baterie 5000 mAh 60C dokáže poskytovat 5 A po dobu jedné hodiny a až $60 \cdot 5000 = 300$ A po dobu jedné minuty. Jak je vidět, LiPo baterie dokáží poskytnout opravdu velkou dávku proudu. Je tomu tak ale za cenu rychlého vybití.

3.7.2 ATX zdroje

ATX je standard síťových spínaných zdrojů, které se většinou používají jako součást stolních počítačů, kde je potřeba napájet různé komponenty. Poskytují napětí 12 V, 5 V a 3.3 V.

Výhoda spínaných zdrojů je ta, že jsou galvanicky oddělené od sítě – tím se zvětšuje bezpečnost. Dále spínané zdroje poskytují přesné regulované napětí a nedochází k velkým ztrátám. Mají také implementované různé ochrany.

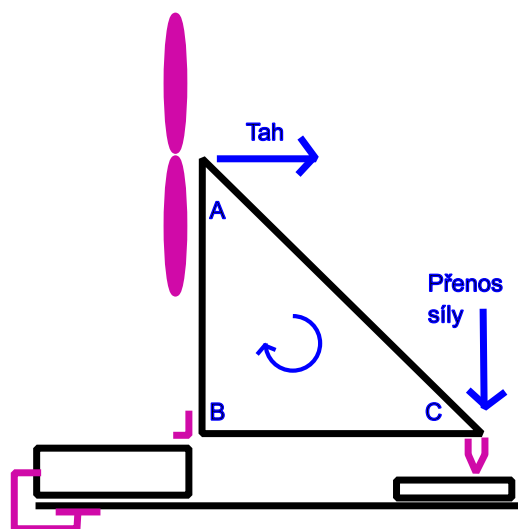
V naší práci budou použity dva zdroje. Prvním je spínaný počítačový ATX zdroj s výkonem 300 W. Druhým je vysokovýkonný stabilizovaný zdroj KAVAN P40 s výkonem 1000 W. Důvod, proč jsme použili dva zdroje, je uveden v kapitole 5.2.

Kapitola 4

Implementace

4.1 Stojan pro testování tahu

Součástí návrhu robota bylo vybrat správnou kombinaci vrtule a BLDC motoru. Každý motor může mít jiné vlastnosti, které se hodí pro jiné aplikace. V druhé kapitole (sekce 2.5) bylo rozvedeno, proč bychom se chtěli držet kolem hodnoty 1000 KV (tedy hodnoty 1000 otáček na 1 volt). Tyto motory se mohou lišit např. počtem magnetů, vinutím, účinností, napájecím napětím a proudem. Vrtule se mohou lišit rozdílným stoupáním, délkou, tvarem a materiálem. Proto je důležité vybrat nejlepší možnou kombinaci, která bude dávat nejlepší možné výsledky. Je potřeba říct, že někteří výrobci motorů poskytují dokumentaci, ve které jsou tahy zmíněny. Problém je ten, že je to často jen průměrná hodnota pro různé vrtule a navíc tato hodnota bývá z marketingových důvodů nadsazená.

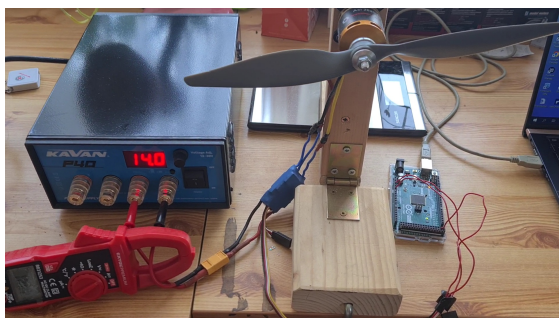


Obrázek 4.1: Schéma stojánku pro měření tahu

Z tohoto důvodu byl vyhotoven test-bench pro analýzu tahu jednotlivých kombinací motorů a vrtulí - schéma na obrázku 4.1. Stojánek je rovnoramenným pravoúhlým trojúhelníkem. Na jeho prvním konci je mechanismus pro uchycení motoru s vrtulí, na druhém konci je připevněný kolík. Vzdálenosti těchto dvou komponent musí být stejné od tzv. pivotu, který je uprostřed na vrcholu (při pravém úhlu trojúhelníku). Kolem pivotu se trojúhelníková konstrukce otáčí. Myšlenka je taková, že motor produkující tah vytváří moment síly na jeden konec trojúhelníku (konzole). A díky otáčení kolem pivotu je ten stejný moment síly produkovaný na druhé straně u kolíku, který tlačí na váhu. Na váze je digitální display, který nám pak ukazuje velikost produkovaného tahu.

Zároveň je potřeba tento testovací stojánek nějak vhodně uchytit. Produkovaný tah může s neupevněným stojánkem úplně bez problému hýbat. Zároveň ale musí být připevnění konstrukčně provedeno tak, aby se mohl trojúhelník pohybovat kolem své osy otáčení v pivotu. Z tohoto důvodu byl navržen masivní blok, který je jedním koncem přichycen ke kloubovému závěsu a druhým koncem k šroubovému svěracímu mechanismu. Na kloubový závěs je přichycen trojúhelník. Díky tomu je závěs pivotem.

Na obrázku 4.12 můžeme vidět zrealizovaný stojánek zepředu i ze strany. Lze si všimnout, že motor se nachází ve stejné vzdálenosti od pivotu jako dřevěný kolík, který tlačí na váhu. Postup experimentu a měření spolu s výsledky budou představeny v kapitole 5.2.



(a) : Pohled zepředu



(b) : Pohled ze strany

Obrázek 4.2: Test-bench pro měření tahu vrtule a motoru

Dále bylo pro měřicí účely potřeba vyhotovit test-bench pro měření tahu dvou vrtulí (BLDC motorů) současně. Z tohoto důvodu byla sestrojena dřevěná konstrukce, která je koncepčně velice podobná můstku držícího motory na samotném robotovi. Tento testovací stojánek je pak připevněn na váhu a lze tak sledovat celkově produkovaný tah. V následující kapitole 5.2 bude zdokumentováno měření i na tomto stojánku. Ve skutečnosti však byla většina testů provedena na test-benchi s pivotem, protože velká část testů byla věnována výběru samotných motorů, kde nám stačilo měřit v konfiguraci s jednou vrtulí. Tento stojánek tedy sloužil především k výběru vrtulí a k ověření funkčnosti prvního stojánku, který je stabilnější.



Obrázek 4.3: Schéma stojánku pro měření tahu pro dvě vrtule

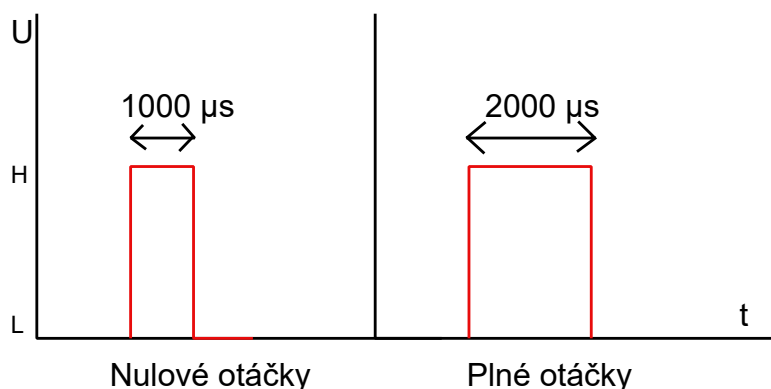
4.2 Kalibrace elektronického regulátoru otáček

Elektronický regulátor otáček (ESC) je spojkou mezi mikroprocesorem a samotným BLDC motorem, který potřebuje rychle přepínat napětí na svých cívkách, čímž roztočí rotor.

ESC se skládá ze tří hlavních součástí:

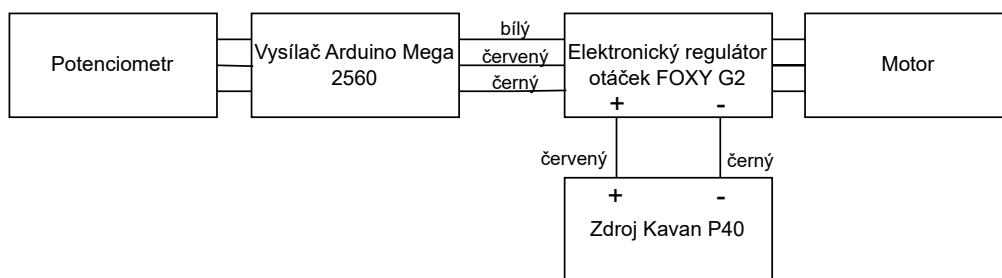
- Mikrokontrolér (MCU). Úkolem MCU je zpracovávat signál z mikroprocesoru. Interpretuje ho a pošle do řídicí smyčky. Zároveň vyhodnocuje elektromotorické napětí vznikající v motoru. To udává informaci o pozici rotoru. Díky tomu pak může jeho rychlost regulovat. Nakonec posílá pulzy do spínacího modulu.
- Spínací modul. Má na starosti zesílit signál poskytnutý od MCU. To se děje kvůli tomu, že MOSFET přepínače mají během přepínání při malém proudu na gate určité ztráty (kvůli pomalému nabíjení a vybíjení gate protéká proud při průchodu MOSFETem s určitou rezistancí). Na gate tak díky spínacímu modulu půjde větší proud a ztráty se tak minimalizují.
- MOSFET přepínače. Mají za úkol přepínat polaritu tří vodičů vedoucích do BLDC motoru. Skládá se ze šesti tranzistorů. A platí, že vždy dva tranzistory napájí jeden vodič. Tyto vodiče již přenášejí velký proud.

K roztočení motoru na požadovanou rychlost se používají mezi mikroprocesorem a ESC komunikační protokoly. Nejpoužívanější protokol je Pulzně šířková modulace (PWM). Jedná se o digitální pulzy, kdy se střídají napěťové úrovně High a Low. Poměr mezi těmito časy se nazývá střída. Protokol PWM pro aplikace s motory používá délku pulzu od $1000 \mu S$ do $2000 \mu S$. Frekvence pulzů je $490 Hz$ (kdyby to bylo $500 Hz$ – tedy $2 ms$, tak pak při High pulzu s maximální délkou $2000 \mu S$ by docházelo k chybě, protože by nebylo možné rozlišit mezi jednotlivými pulzy). Tento protokol je znázorněn na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Pulzně šířková modulace

Naše ESC má z výroby výchozí tovární nastavení signálu plynu v rozmezí $1100 \mu S$ až $1940 \mu S$. Pro správné používání je tedy dobré provést kalibraci rozsahu plynu (na rozsah $1000 \mu S$ až $2000 \mu S$). Abychom mohli kalibraci provést, připojíme ESC ke zdroji (Kavan P40). Byla k tomu vytvořena dvakrát redukce Bullet 3.5 mm – Banánek. Připojíme ho k vysílači, kterým je Arduino Mega 2560. Signál plynu ovládáme přes potenciometr, který posadíme do nepájivého pole. Napájíme ho z Arduina. Arduino napájíme obvodem BEC, což je výkonný spínaný stabilizátor napětí na ESC poskytující výstupní nastavitelné napětí ($5.2V$, $6.2V$, $7.4V$). Nakonec je nutné připojit ESC (Foxy G2 R-40SB) k BLDC motoru. Schéma zapojení je znázorněné na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5: Schéma zapojení pro kalibraci ESC

ESC Foxy G2 je programovatelný regulátor otáček. Dají se programovat různé funkce jako síla brzdy, napětí BEC, rozběh, smysl otáčení motoru a další. Kalibrace je poloautomatický proces a programuje se podobně jako výše zmíněné funkce. Kalibrace se provádí jen jednou při připojení nového vysílače, regulátor si kalibraci uloží a nemusí se znovu provádět. Chceme-li provést kalibraci znovu, je nutné ESC uvést do továrního nastavení pomocí programování.

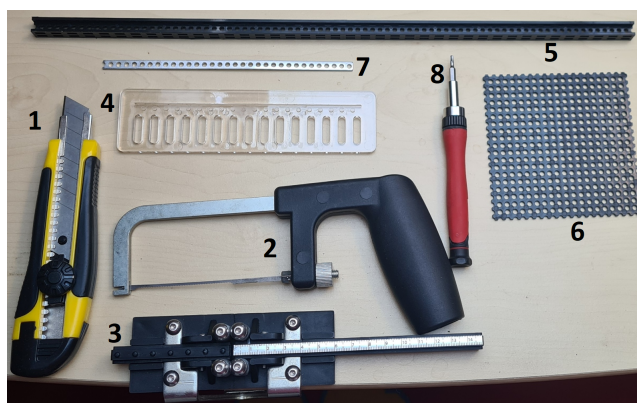
Pro kalibraci postupujeme podle manuálu Foxy [23].

- Potenciometr nastavíme do maximální pozice (plný plyn) a zapneme zdroj.
- Motor svým trylkem zahlásí, že napájení je normální.
- Čekáme na potvrzující dvě krátká pípnutí, která signalizují přijetí signálu plného plynu.
- Při zaznění těchto pípnutí okamžitě nastavíme potenciometr do nulové pozice (žádný plyn). To musíme stihnout do 5 vteřin.
- Zazní pípnutí signalizující napájecí napětí. Nakonec zazní dlouhé pípnutí signalizující úspěšnou kalibraci. Kalibrace je uložena.

Zároveň naprogramujeme velmi měkký rozběh. Postupujeme podobně jako při kalibraci. V tomto případě však počkáme 5 vteřin a vstoupíme do programovacího režimu. Nyní podle datasheetu od výrobce můžeme nastavit různé funkce pomocí potenciometru, které jsou signalizovány různou zvukovou stopou.

4.3 Konstrukční systém

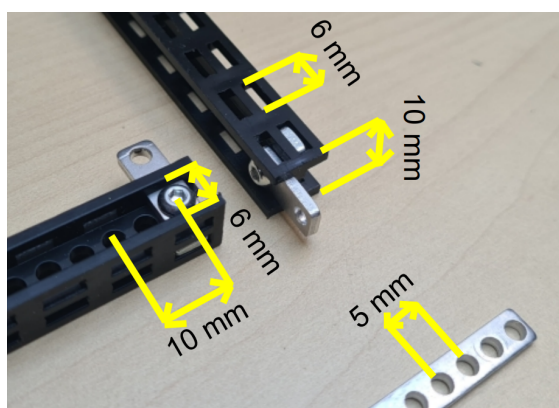
Po zvážení různých faktorů, jakými jsou váha, pevnost, dostupnost, složitost a bezpečnost, jsme nakonec zvolili konstrukční systém litevské firmy Totem. Jedná se o sadu plastových nosníků, desek a spojovacích materiálů, ze kterých se dají dobře stavět jakékoliv robotické konstrukce schopné na sobě nést elektroniku. Tento konstrukční systém je od začátku navržen tak, aby byl co nejvíce kompatibilní s nejrůznější elektronikou či spojovacím materiálem od třetích stran. Velkou výhodou tohoto systému je možnost modulárně dokupovat různé chybějící části. Zároveň je k dispozici speciální řezací náčiní, díky kterému se dají podle potřeby zmenšovat jednotlivé nosníky či desky.



- 1) Řezací nůž; 2) Řezací pilka; 3) Řezací stojánek; 4) Řezací pravítka; 5) Plastové nosníky;
- 6) Plastové desky; 7) Hliníkové tyče; 8) Inbusový šroubovák

Obrázek 4.6: Konstrukční systém Totem

Na obrázku 4.6 jsou všechny důležité části určené ke konstrukci robota, které jsou součástí sady Totem.



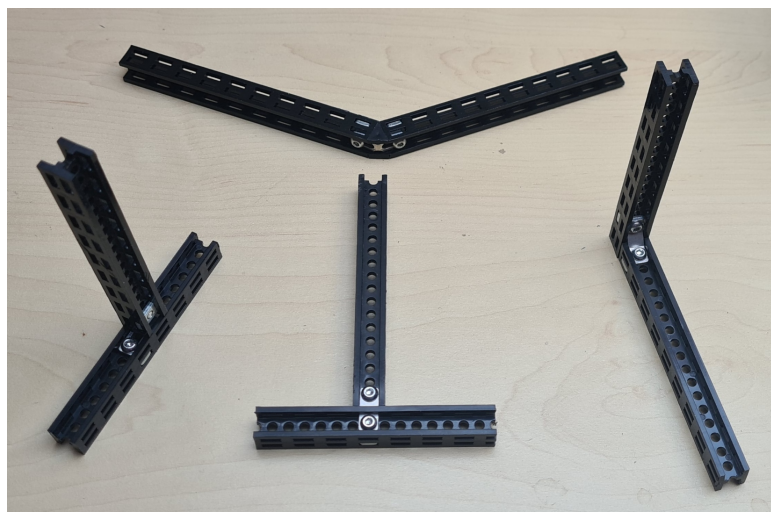
(a) : Rozměry nosníků



(b) : Spojovací materiál

Obrázek 4.7: Totem - detaily

Na obrázku 4.7a jsou znázorněny rozměry nosníků a hliníkové výstuže. Konstrukční systém je navržen rozměrově tak, aby se daly jednotlivé části dobře spojovat různými způsoby. Spojovací materiál je na obrázku 4.7b. Jak je z obrázku vidět, existuje mnoho způsobů, jak nosníky či desky spojit (existují pravoúhlé spojky, úhelníky, vodorovné spojky nebo dokonce spojky umožňující spoj 45°). K dispozici jsou i nylonové šrouby pro snadnější připojení různé elektroniky. Několik příkladů nejpoužívanějších spojů je zachyceno na obrázku 4.8.

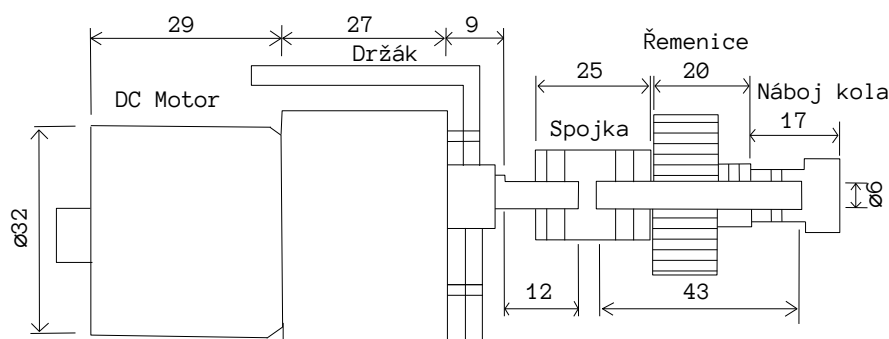


Obrázek 4.8: Příklady spojení konstrukce

4.4 Mechanismus podvozku robota

Pro našeho robota jsme zvolili diferenciální pohon. Na každé straně (na bocích) robota jsou dvě kola poháněná DC motorem. DC motor se nachází u zadního kola. To z toho důvodu, že to usnadňuje celý mechanismus, kdy je výstupní hřídel přímo napojená na jedno z kol. Točivý moment motoru je pak přenášen pomocí systému ozubených řemenic a řemenů.

Během návrhu existovala varianta, že by byl motor připevněn u můstku uprostřed. Tím by se sice lépe rozložila váha robota (motor SG370-12-200-E váží 181 g), ale zároveň by se posunulo těžiště robota směrem pryč od stěny a mechanismus by byl složitější – např. kvůli přítomnosti více řemenic a složitějšího držáku motoru. Proto byl nakonec zvolen první způsob.



Obrázek 4.9: Mechanismus hnacího ústrojí - zadní část

Na obrázku 4.9 můžeme vidět navrženou první část hnacího ústrojí – tedy část nacházející se u DC motoru. Vzhledem k tomu, že se pracovalo s rozhodnutím použít ozubený řemen a řemenice, bylo potřeba navrhnout řešení, aby na ose hřídele byla jak zmíněná řemenice, tak náboj pro kolo. Bohužel výstupní hřídel motoru je příliš krátká, proto bylo potřeba nějakým způsobem hřídel prodloužit. Na to byla použita hliníková spojka obsahující čtyři otvory pro inbusové červíky (délka 25 mm). Vzhledem k nedostupnosti součástky, byl původně tento díl vymodelován pomocí 3D softwaru a vytisknut 3D tiskárnou. Bohužel se ukázalo, že hřídel se v plastové spojce občas protočí, proto byla součástka nakonec pořízena až z Indonésie. Ta vzhledem k tomu, že je celokovová (z hliníku), je celkově pevnější. Do hliníkové spojky se musela přidat ocelová tyč, která supluje hřídel a má tedy roli přenášet kroutící moment od motoru až po kolo. Tato tyč musí mít průměr 6 mm. Tato hodnota byla zvolena z toho důvodu, že pasuje do spojky a do navazující řemenice (délka 20 mm). Řemenice je opět k ocelové ose připevněna červíkem. Mechanismus je zakončen celokovovým šestihranným nábojem (s délkou 17 mm), na který se namontuje pomocí šroubu kolo, které s tímto nábojem musí být kompatibilní. Výběr řemenu se odvíjel od rozměrů robota a od průměrů dostupných řemenic. Naopak řemenice musela být zvolena s odpovídajícím profilem a roztečí zubů. Čím je větší, tím méně by mělo docházet k prokluzům řemenu a tím lépe se přenášejí otáčivé účinky. Naopak čím je menší, tím méně váží a je celkově kompaktnější.

Pro délku řemenu platí následující vztah:

$$L_B = ((D_L + D_S) \cdot \frac{\pi}{2}) + (D_L - D_S) \cdot \arcsin \frac{D_L - D_S}{2L} + 2\sqrt{(L^2 - 0.25 \cdot (D_L - D_S)^2)}, \quad (4.1)$$

kde L_B je délka řemenu, D_L je průměr větší řemenice, D_S je průměr kratší řemenice a L je vzdálenost mezi oběma řemenicemi.

Chceme-li, aby obě řemenice měly stejný průměr, pak se vztah zjednoduší na:

$$L_B = \pi D + 2L. \quad (4.2)$$

Pokud dosadíme do tohoto vztahu průměr řemenic $D = 28 \text{ mm}$ a vzdálenost mezi nimi $L = 350 \text{ mm}$, pak dostaneme $L_B = 787 \text{ mm}$. V tomto případě byl zvolen dostupný řemen o délce 762 mm a se 150 zuby. O tomto návrhu se dá opět říct, že se jedná o problém "slepice/vejce", protože pro výběr řemenice potřebujeme řemen a naopak. V praxi bylo zjištěno, že je větší dostupná nabídka pro řemenice než pro řemeny. Proto se použila tato rovnice a zkoušelo se, které hodnoty průměru řemenice a vzdálenosti mezi nimi budou nejhodnější pro zakoupený řemen.

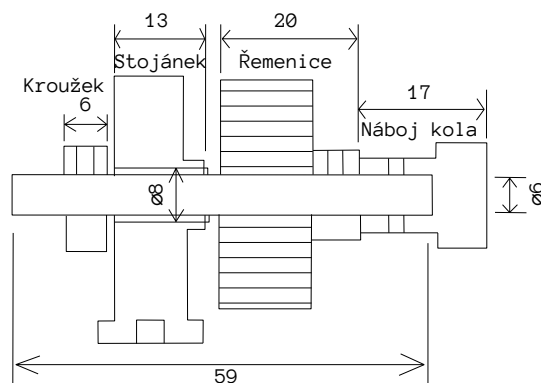
Na tvorbu hřídele byla použita tyč z nerezové oceli o průměru 6 mm . Tato tyč byla nejprve zkrácena speciální úhlovou bruskou s řezným kotoučem. Délka výsledné hřídele je 43 mm . Tato hodnota je vypočtena jako součet rozměrů jednotlivých součástí, které na sebe těsně doléhají. Následně musela být hřídel ještě trochu obroušená vrtačkou s brusným válečkem. To z toho důvodu, aby na ni šly nasadit jednotlivé komponenty, které mají průměr otvoru také 6 mm , ale mohou mít od této hodnoty drobné odchylky (větší i menší). Proces broušení je zachycen na obrázku 4.10.



Obrázek 4.10: Broušení seříznuté hřídele

Na obrázku 4.11 je znázorněna spolu s rozměry druhá část mechanismu podvozku – tedy část, která je poháněna řemenem. Na rozdíl od předešlé části se zde hřídel pohybuje volně,

tedy ji můžeme otáčet rukou. Toho je docíleno pomocí stojánku s ložiskem s tloušťkou 13 mm . Bohužel tento stojánek je dostupný pouze ve verzi s průřezem 8 mm a více. Z tohoto důvodu bylo potřeba hřídeli zvětšit průměr. Toho jsme docílili vyztužením hřídele uklíkovou trubičkou s vnitřním průměrem 6 mm a vnějším průměrem 8 mm . Díky tomu (a použitím červíků) nemá hřídel žádnou vůli a uvnitř ložiska se nehýbe. Abychom zajistili pozici stojánku, byl použit upínací kroužek s průměrem otvoru a tloušťkou shodně 6 mm . Stojánek pak bude připevněn ke konstrukci robota. Hřídel byla vyhotovena stejným způsobem, jak bylo uvedeno v odstavci výše (u první hřídele.) Její délka byla zvolena opět jako součet délek všech komponentů. K tomu byla přidána navíc drobná rezerva, kterou si v tomto případě můžeme dovolit, protože není hřídel z jedné strany ničím omezená. Tato rezerva nám dá prostor, abychom měli kola na jedné straně robota na stejné úrovni.



Obrázek 4.11: Mechanismus hnacího ústrojí - přední část

Na straně u DC motoru byl původně vymodelován a vytisknut (opět kvůli nedostupnosti) speciální držák, který by přichytil motor ke konstrukci. Záměrem bylo ho udělat co nejtenčí a rozměrově nejmenší. První verze 4.12a byla z plastového materiálu PET-G. Tento prototyp byl po konzultaci zavrhnutý, protože byl příliš tenký a hrozilo riziko, že by se držák při zátěži rozbil. Druhá verze 5.5 byla zhotovena z materiálu ABS, který se deformuje při vyšší teplotě než PET-G. Držák byl vyztužen a bylo přidáno závětrování na bocích. Tento držák už by bez rizika motor unesl. Při montování na konstrukci se však ukázalo, že je tento zvětšený držák příliš velký. Naštěstí byl nakonec k dostání kovový držák ze zahraničí a byl pořízen spolu s hřídelovou spojkou.



(a) : První verze

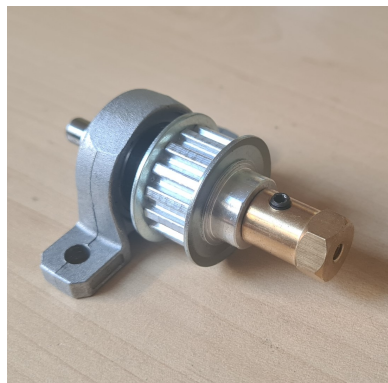
(b) : Druhá verze

Obrázek 4.12: Vytisknuté držáky

Výsledné mechanismy jsou na obrázcích 4.13a a 4.13b. Na prvně jmenovaném obrázku je vidět výsledný držák, který je tenký a je z kovového materiálu. Obě části byly zhotoveny po dvou kusech – na každou stranu robota zvlášť.



(a) : První část mechanismu u DC motoru s držákem



(b) : Druhá část mechanismu se stojánkem

Obrázek 4.13: Hnací soustava

4.5 Komunikace s robotem a jeho řízení

4.5.1 Sériová linka

Jako první způsob řízení robota byla zvolena komunikace po sériové lince přes USB. Byl využit poměrně dlouhý USB kabel, který ale není z praktických důvodů vhodný pro testování robota na zdi. Je určen především pro testovací účely "na zemi", např. pro analýzu tahu na testovacím stojánku nebo testování DC motorů a koleček. Jak už název napovídá, sériová komunikace je posílání slova postupně (sériově) po jednotlivých bitech. Kvůli povaze této komunikace je realizováno posílání příkazů, díky kterým můžeme dát Arduino z počítače pokyny, co má udělat. Arduino poslouchá PC a čeká na příchozí zprávy. Pokud zpráva přijde, náležitě reaguje posláním signálu na příslušný pin. Zároveň ihned posílá napsaný znak uživateli zpět na PC, aby se mu zobrazil v sériové konzoli.

Jako konzoli používáme volně dostupný open-source software PuTTY. Umožňuje nastavit tzv. baud-rate a umí se připojit i např. přes SSH. Baud-rate – tedy počet poslaných bitů za vteřinu – nastavujeme na hodnotu 9600.

Samotný kód je napsán v jazyce Arduino. Jedná se o silně odvozený jazyk z C/C++, ale s jistými úpravami, protože má Arduino malou operační paměť RAM. Pro uživatelsky příjemné ovládání bylo naprogramováno vypisování i mazání znaků. Jednotlivé příkazy jsou formulovány tak, aby byly co nejkratší a nejsrozumitelnější. Struktura příkazu je *typ_motoru hodnota*. Tyto hodnoty se pak mapují na pwm signál posílaný buď do elektronického regulátoru otáček nebo do motorového řadiče. Zároveň jsou nastaveny počáteční hodnoty tak, aby bylo zajištěno, že se motory při zapnutí komunikace neroztočí. Bylo myšleno i na lidský faktor – pokud

uživatel udělá chybu v zadání hodnoty, automaticky se nastaví nulové hodnoty. Příkazy jsou popsány v tabulce 4.1.

| Příkaz | Rozsah hodnot | Popis |
|--------|---------------|------------------|
| bldc1 | 0-100 | první BLDC motor |
| bldc2 | 0-100 | druhý BLDC motor |
| bldc | 0-100 | oba BLDC motory |
| dc1 | -100-100 | první DC motor |
| dc2 | -100-100 | druhý DC motor |
| dc | -100-100 | oba DC motory |
| off | - | vše vypnout |

Tabulka 4.1: Tabulka příkazů

4.5.2 Dálkové řízení pomocí joysticku

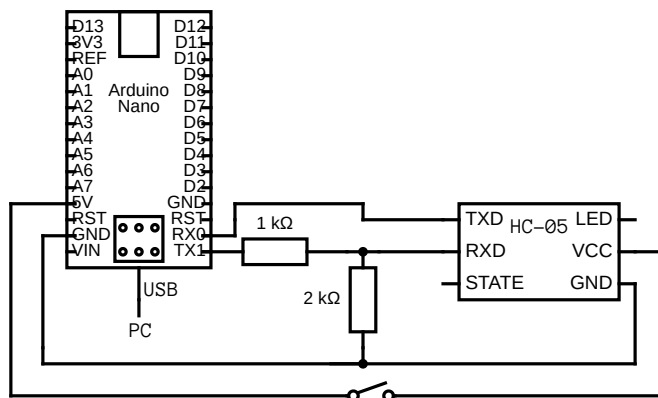
Jako hlavní způsob řízení robota po stěně bylo zvoleno dálkové ovládání pomocí vyrobeného ovladače, který byl navržen tak, aby zvládal řídit vícero funkcí a zároveň, aby byl pokud možno ergonomický a jednoduchý na ovládání. Dálkové ovládání jsme vybrali z toho důvodu, abychom nebyli k robotovi připojeni dalším kabelem – to by případně znamenalo větší váhu či riziko kontaktu s vrtulema a následné selhání.

Pro vzdálenou komunikaci mezi ovladačem a robotem byly zvoleny bluetooth moduly HC-05. Tyto moduly umožňují komunikaci v režimu *master-slave*. Lze je tedy propojit mezi sebou, a to až na vzdálenost 10 m. Počáteční konfigurace je v režimu *slave*. Aby mezi sebou oba moduly komunikovaly správně, musíme je odděleně nakonfigurovat.

Pro konfiguraci HC-05 se potřebujeme dostat do konfiguračního režimu, kde můžeme zadávat AT příkazy. Nejdříve nahrajeme do Arduina program, pomocí kterého budeme moci příkazy zadávat (v příloze). Poté musíme modul zapojit tak, jak je znázorněno na obrázku 4.14. Rozhraní UART funguje s dvěma piny. Vysílací pin TXD u Arduina musí být připojen k přijímacímu pinu RXD u modulu a naopak. HC-05 pracuje s logikou 3.3 V a Arduino Nano s logikou 5 V. Proto je potřeba na přijímací pin modulu RXD přidat odporový dělič, který sníží napětovou úroveň na požadovanou hodnotu. Do konfiguračního režimu se pak dostaneme následovně. Ujistíme se, že je vypnuto napájení pro modul. Poté stiskneme a podržíme tlačítko na modulu a do toho spustíme napájení. Poté čekáme a jakmile začne na modulu pomalu blikat LED kontrolka, můžeme tlačítko pustit. Nyní se HC-05 nachází v konfiguračním režimu.

Zde je nutné nastavit několik věcí. K tomu si otevřeme sériovou konzoli. Nejlépe nám fungovala konzole dostupná v Arduino IDE (nastavíme baud-rate 9600 a "No Line Ending" změníme na "Both NL & CR"). Zaprvé pomocí příkazu *AT+RMAAD* vymažeme z paměti všechna spárovaná zařízení (pokud modul používáme poprvé, je paměť již prázdná). Následně nastavíme režim *master*, resp. *slave*, pomocí příkazu *AT+ROLE=1*, resp. *AT+ROLE=0*. U modulu, který se bude nacházet na ovladači, nastavíme *master*, u modulu na robotovi nastavíme *slave*. Je praktické si tyto moduly označit, např. malou samolepkou, abychom věděli, který je který. U modulu *slave* se pak podíváme na adresu pomocí *AT+ADDR* – tuto adresu ve formátu *xxxx,xx,xxxxxx* si někde poznamenejeme, abychom ji pak mohli zadat modulu *master*

pomocí příkazu $AT+BIND=adresa$. Modulu *master* pak ještě nastavíme $AT+CMODE=0$, což znamená, že se *master* bude chtít připojovat pouze k zařízení specifikovanému příkazem $AT+BIND$. Na závěr je ještě potřeba u obou zařízení nastavit baud-rate pomocí příkazu $AT+UART=38400,0,0$ pro přenosovou rychlost $38\ 400\ bit/s$. Dále je ještě vhodné nastavit jméno a heslo obou zařízení.



Obrázek 4.14: Zapojení modulu HC-05 pro konfiguraci

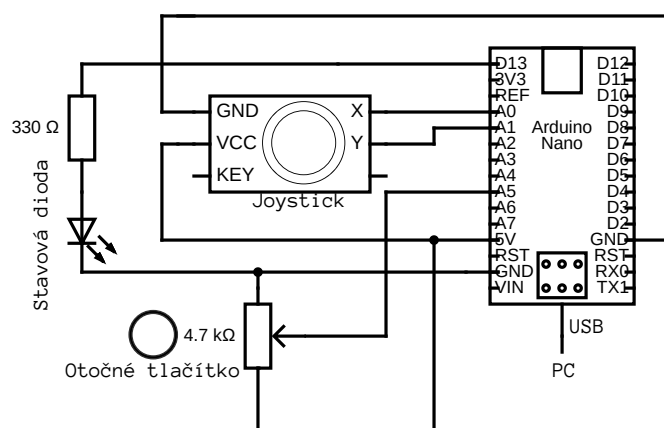
Na obrázku 4.15 můžeme vidět zbytek zapojení na ovladači (na obrázku pro přehlednost bez bluetooth modulu). Máme zde otočné tlačítko, což je ve skutečnosti lineární potenciometr (lineární přírůstek odporu po celé odporové dráze). Upravujeme jím sílu tahu, přesněji rychlost otáčení obou vrtulí, které se otáčejí stejnou rychlostí, ale v opačném směru. Prostřední svorka potenciometru je analogovým vstupem pro Arduino. Softwarově je také nastavená pojistka – v případě, že se ovladač spojí s robotem a potenciometr nebude nastaven na nulové hodnotě, se BLDC motory nerozběhnou, protože se automaticky posílá nula. Tedy po prvním připojení ovladač vždy čeká na uživatele, aby nastavil otočné tlačítko do nulové polohy.

Zároveň pak poloha potenciometru ovládá stavovou diodu, která je na ovladači rovněž přítomná. Dioda byla zavedena z toho důvodu, že lidským okem těžko rozeznáme nastavení potenciometru. Proto LED dioda bliká. Pokud je zhasnutá, je potenciometr v nulové pozici. Pokud bliká pomalu, BLDC běží pomaleji. A pokud bliká rychle, resp. svítí nepřetržitě, BLDC běží rychleji, resp. naplno.

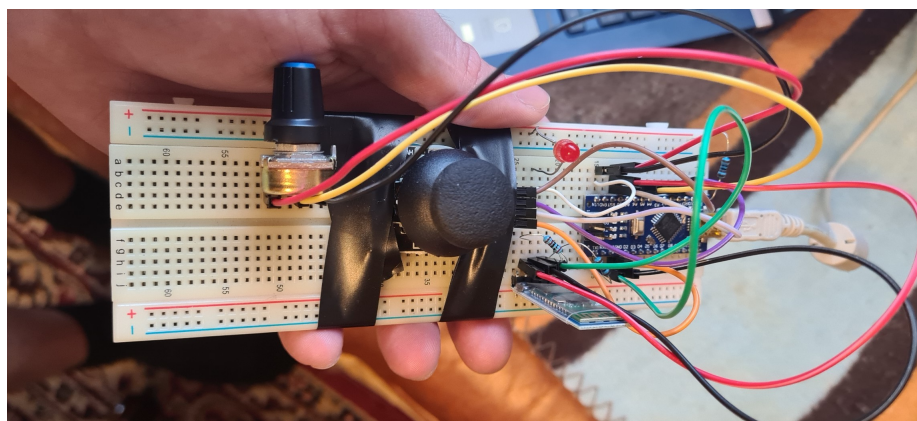
Další funkcí ovladače je přítomnost joysticku. Joystick ve skutečnosti není nic jiného než dva potenciometry – jeden pro osu x a druhý pro osu y . Výhoda joysticku je ta, že pokud se ho nedotýkáme, automaticky se vrátí do nulové pozice. O to je pak ovládání robota bezpečnější. Výstupní piny joysticku X a Y jsou připojeny k analogovým pinům Arduino. Arduino tyto hodnoty přečte svým ADC převodníkem v rozsahu od 0-1023. Arduino na ovladači tyto dvě hodnoty vydělí čtyřmi, aby ji bluetooth modul (master) mohl poslat robotovi po bytech.

Je důležité si uvědomit, že nulová hodnota joysticku zde není (0, 0), nýbrž (512, 512). Pokud jsou hodnoty menší, pohybujeme se v záporném směru a naopak. Softwarově nastavíme určitou rezervu kolem nulové pozice: záporný směr bereme od 0 do 470 a kladný směr bereme od 550 do 1023. Tyto hodnoty pak namapujeme na PWM signál a zároveň nastavíme správně

směr signálovými piny do motorového řadiče (viz následující kapitola). Myšlenka je taková, že y-ová souřadnice (tedy rychlost dopředu/dozadu) oběma motorům buď přidá nebo ubere (na střídě PWM). Naopak x-ová souřadnice (tedy pokud má robot zatačet) jednomu motoru přidá a druhému ubere (v závislosti na směru). Střída má softwarově hodnoty od 0 do 255 (ve skutečnosti je to poměr). Když se při výpočtu dostaneme do záporných hodnot, nastaví se automaticky 0. Pokud se naopak dostaneme nad hodnotu 255, hodnota se zaokrouhlí právě na 255. V praxi se ukázalo, že hodnoty od 0-60 motory neroztočí, ale přesto vydávají zvuk, proto jsou tyto hodnoty zaokrouhleny na 0. Celý kód je pak dostupný v příloze. Celý ovladač se všemi popsány komponentami je na obrázku 4.16.



Obrázek 4.15: Zapojení joysticku, potenciometru a stavové diody



Obrázek 4.16: Ovladač

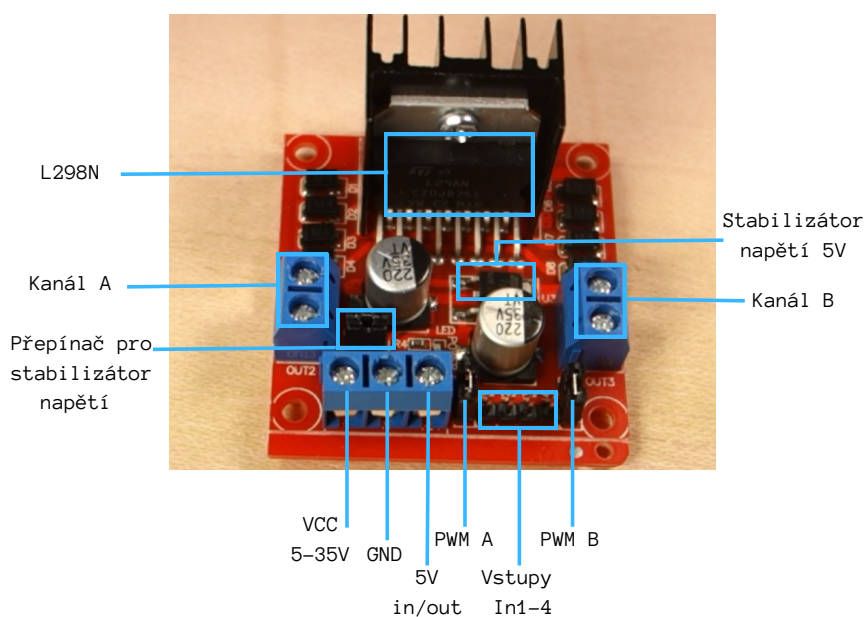
4.6 DC Driver Shield

Abychom mohli správně ovládat motor, potřebujeme k tomu komponentu řadiče (anglicky driver). Pokud bychom se chtěli obejít bez této komponenty, mohli bychom udělat náhradní

obvod s MOSFET tranzistorem, kdy by na gatu byl PWM signál, který by tak ovládal průchozí proud motorem. Problém je ten, že bychom nemohli měnit polaritu a tedy směr otáčení motoru. Proto existují řadiče, které v sobě mají zabudovaný H-můstek, který dokáže měnit polaritu na svorkách motoru.

Čip L298N v sobě právě takový H-můstek integruje. Je to kombinace logických AND gatů (4x pro jeden motor) a bipolárních tranzistorů (rovněž 4x pro jeden motor). Logické gaty spínají bipolární tranzistory, které podle toho jak jsou sepnuté, tak mění polaritu napětí na svorkách motoru. Na logické gaty jsou přivedeny 3 signály: *PWM* a vstupní signály *In1* a *In2*, které jsou vždy nastavené s opačnou logickou hodnotou (pokud jsou obě logické úrovně nízké, pak jsou tranzistory zavřené a motorem neprochází žádný proud).

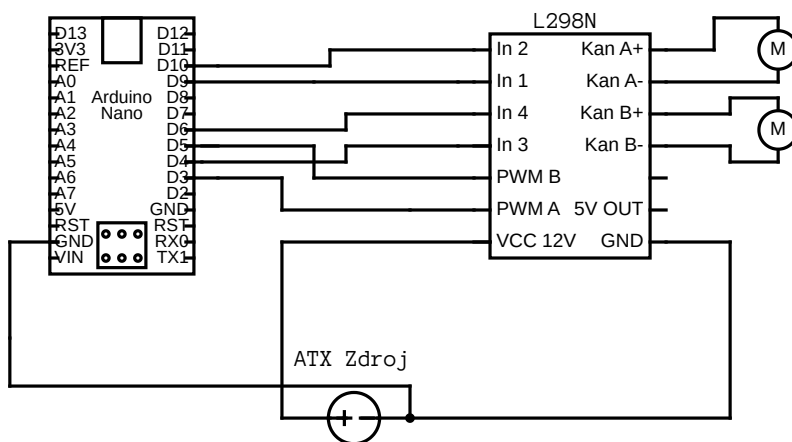
Pro správnou funkci integrovaného obvodu je na desce přítomen stabilizátor napětí. Pokud desku napájíme napětím do 12 V, pak přepínač pro stabilizátor (anglicky jumper) necháme v pozici. Stabilizátor napětí pak dokáže s tímto napětím pracovat a napájí obvod napětím 5 V. Tato hodnota je pak dostupná na svorce *in/out* pro další použití. Pokud desku napájíme napětím vyšším (pro silnější motory), pak přepínač musíme vypnout, jinak bychom zničili vnitřní obvody stabilizátoru a případně celého integrovaného obvodu. Logiku bychom potom museli napájet externě 5 V – tedy svorka *in/out* by měla funkci zdroje napětí. V našem případě používáme motor, který pracuje s napětím 12 V, proto budeme desku napájet 12 V a jumper necháme v pozici.



Obrázek 4.17: Motorový řadič L298N

Na obrázku 4.17 vidíme řadič, který robot používá. Vidíme 2 kanály, které slouží k napájení dvou motorů a jejichž polarita je přepínána čipem L298N s chlazením popsaným výše. Řadič napájíme z externího ATX zdroje. Měli bychom zmínit, že piny *PWM A*, resp. *PWM B*, také obsahují jumpery. Ty pokud necháme v pozici, je na piny přiváděno napětí 5 V a motor A, resp. B, poběží naplno.

Na obrázku 4.18 vidíme celkové zapojení řadiče na robotovi. Vidíme, že zabírá poměrně dost pinů. Proto se v praxi muselo dávat pozor na správné pájení, protože jsou výstupní digitální piny velmi blízko sebe. Za povšimnutí rovněž stojí, že bylo nutné propojit zem Arduina se zemí řadiče. Pokud se to takto neprovede, řadič nefunguje správně – motory se rozběhnou, ale na velmi pomalou rychlost. Na tomto obrázku je pro přehlednost znázorněna pouze část s DC motory. Na robotovi je k Arduinu pak připojena ještě ESC část, která zároveň Arduino napájí.



Obrázek 4.18: Zapojení L298N s Arduinem a motory

Nyní si ještě zmiňme, jakým způsobem a podle čeho byly vybrány DC motory. Bylo vycházeno ze simulace provedené v kapitole 2.3. Aby se robot rozjel na kolmé zdi, tak potřebuje vyvinout třecí sílu cca 4 N na každém kolečku. Bylo počítáno s poloměrem 40 mm . Potřebný moment síly je tedy $T = 4 \cdot 40 = 160\text{ Nmm}$. Tento moment musíme vynásobit dvěma, protože jeden DC motor pohání dvě kola. Tedy $160 \cdot 2 = 320\text{ Nmm}$. Zároveň podle obrázku 2.6 musíme brát ohled na maximální třecí sílu, která na kolmé stěně není o moc vyšší než potřebná třecí síla. Dalším faktorem při výběru motoru bylo zjištění, že na motorovém řadiči dochází k úbytku napětí 2 V . Tím bude ovlivněn proud procházející motorem a tedy i točivý moment motoru (viz 3.2.1). Z těchto důvodů byl nakonec zvolen DC motor série SG370 s čelní převodovkou. Jeho točivý moment je podle výrobce 6 kgfcm , tedy 588 Nmm . Převodový poměr $200 : 1$ díky čelní převodovce redukuje rychlost výstupní hřídele na 26 RPM . S koly o poloměru 40 mm by tak robot měl ujet $26 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 40 = 6534\text{ mm/min}$, tedy cca 10 cm/s .

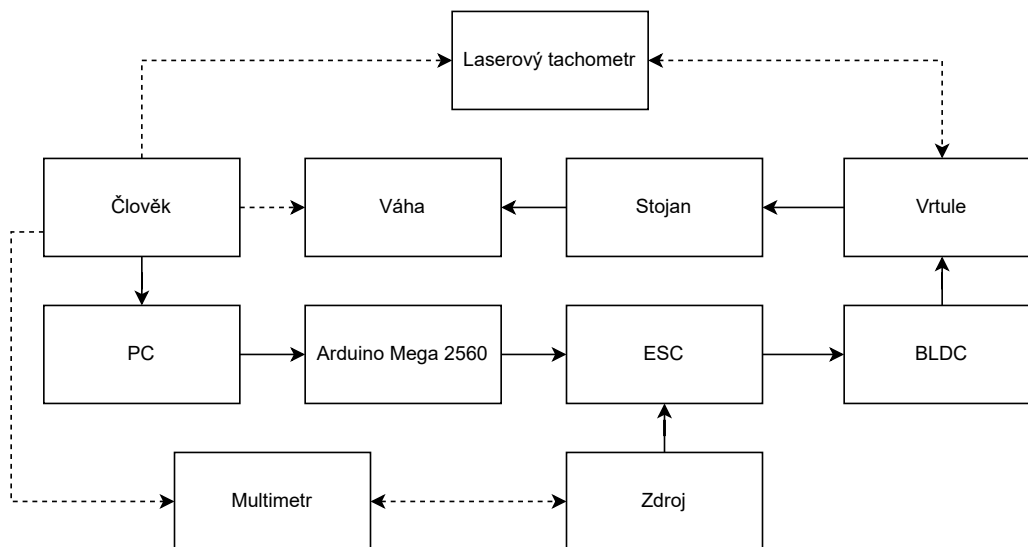
Kapitola 5

Experimentální ověření

5.1 Testování tahu na testovacím stojánku

Cílem tohoto testování je najít nejlepší a nejhodnější kombinaci vrtule a BLDC motoru pro našeho robota.

Na následujícím obrázku je vývojový diagram, který graficky znázorňuje průběh celého měření. Pomocí počítače ovládáme otáčky rotoru. Přes sériovou linku pošleme údaj do Arduina, na kolik procent se má rotor otáčet. Arduino vysílá signál do elektronického regulátoru otáček (jeho kalibrace je představena v kapitole 4.2). Ten ovládá BLDC motor, který roztočí vrtuli. V reakci na tah vrtule začne stojánek otáčením kolem pivotu působit silou na váhu, ze které jsou odečteny údaje. Dále změříme digitálním laserovým tachometrem otáčky vrtule a celé měření opakujeme s vyššími otáčkami (až do maxima). Celou dobu zároveň kontrolujeme odběr proudu, aby nevyhořel zdroj.



Obrázek 5.1: Vývojový diagram měření na testovacím stojánku

Nejprve tedy na testovacím stojánku s pivotem měříme, jak se různé vrtule chovají v kombinaci s různými motory. Pro měření máme k dispozici celkem 3 typy BLDC motorů:

■ AXI 2820/12

Otáčky na volt KV: 990; Napájení - Počet Lixx článků: 3-5; Max. špičkový proud: 38 A; Hmotnost: 148 g; Regulátor ESC: 40-60 A;

■ T-Motor AS2820

Otáčky na volt KV: 880; Napájení - Počet Lixx článků: 3-4; Max. špičkový proud: 45 A; Hmotnost: 136 g; Regulátor ESC: 40-60 A;

■ MK 3644/24

Otáčky na volt KV: 490; Napájení - Počet Lixx článků: 3-7; Max. špičkový proud: 30 A; Hmotnost: 125 g; Regulátor ESC: 40 A;

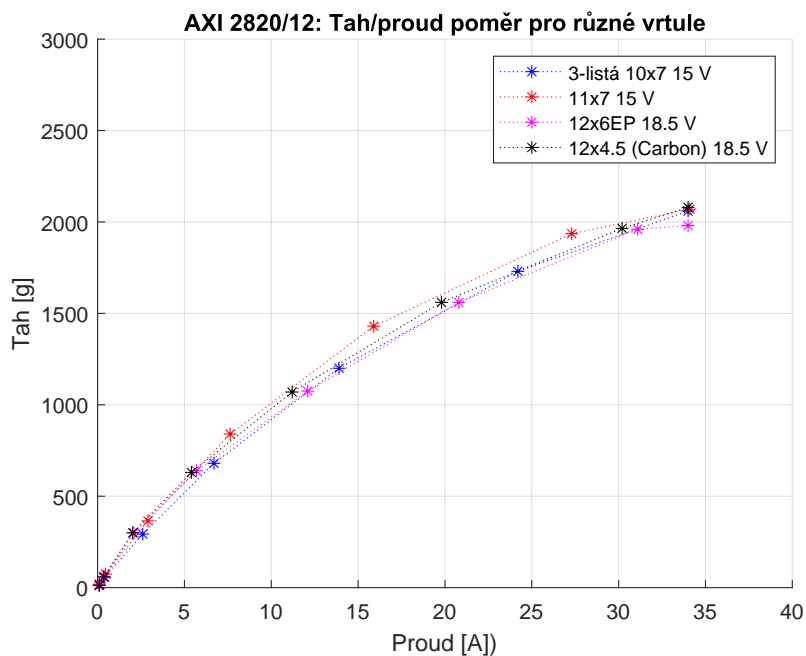
A měříme se čtyřmi vrtulemi:

- 11x7: Dvoulistá nylonová vrtule s průměrem 279.4 mm, stoupáním 178 mm a hmotností 23 g.
- 10x7: Třílistá nylonová vrtule vystužená skleněnými vlákny s průměrem: 254 mm, stoupáním 178 mm a hmotností 28 g.
- 12x6: Dvoulistá nylonová vrtule s průměrem 304.8 mm, stoupáním 152 mm a hmotností 27 g.
- 12x4.5: Dvoulistá lehká vrtule z uhlíkových vláken s průměrem 304.8 mm, stoupáním 114.3 mm a hmotností 20 g.

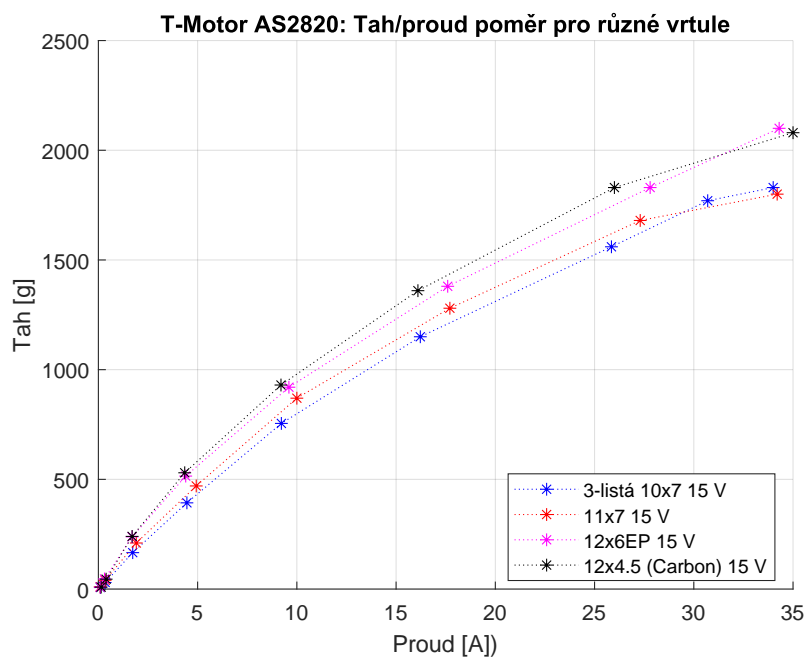
Z jednotlivých grafů je patrné, že ve všech případech produkuje nejvyšší tah karbonová vrtule 12x4.5. To bude pravděpodobně dané za prvé materiálem, který dělá vrtuli pevnější, a za druhé profilem křídla, který může být o něco tenčí díky materiálu – a tak se tato vrtule lépe a efektivněji prořízne skrz vzduch. Ačkoliv jsme pro testování neměli k dispozici hlukoměr, lze od poslechu říci, že je tato vrtule ze všech nejméně hlučná.

Co se motoru týče, nejlépe si jednoznačně vedl poslední motor (MK3644/24 490 KV). Dokázal z karbonové vrtule vytěžit téměř o 500 g více tahu než předchozí motory. Jeho další nespornou výhodou je schopnost pracovat s větším napětím a tedy menším proudem. Díky tomu se vrtulový systém tolik nezahřívá. Všimněme si, že při maximálních otáčkách se dostal zhruba na něco málo přes 20 A. To je téměř o 15 A méně než ostatní motory. Je potřeba brát v úvahu náš 1000W zdroj. Máme-li dva BLDC motory a napájíme je 25 V, potřebujeme příkon $2 \cdot 20 \cdot 25 = 1000 \text{ W}$. Kdybychom použili ostatní motory, dostali bychom se přes tuto hodnotu (např. pro motor AXI 2820/12 při napětí 18.5 V bychom potřebovali $2 \cdot 35 \cdot 18.5 = 1295 \text{ W}$). Další výhodou námi vybraného motoru je délka jeho kabeláže, kde je každý z kabelů dlouhý 50 cm.

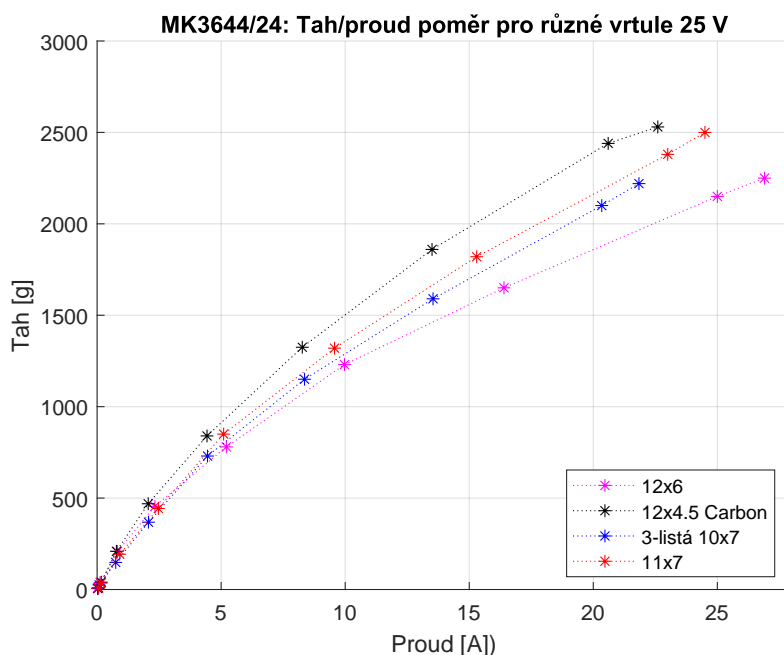
Na následujících třech grafech (5.2, 5.3 a 5.4) jsou vyneseny hodnoty z jednotlivých měření. Grafy představují produkovaný tah daného typu vrtule při určitém odběru proudu.



Obrázek 5.2: Graf znázorňující tah/proud různých vrtulí s motorem AXI 2820/12 990 KV



Obrázek 5.3: Graf znázorňující tah/proud různých vrtulí s motorem T-Motor AS2820 880 KV



Obrázek 5.4: Graf znázorňující tah/proud různých vrtulí s motorem MK3644/24 490 KV

V tabulce 5.1 vidíme naměřené RPM při maximálním možném výkonu daného motoru. Je patrné, že u zvoleného motoru MK3644/24 jsou otáčky nejvyšší ze všech. Pořád se tedy naše obvodová rychlost nachází pod kritickou hodnotou rychlosti zvuku (viz kapitola 2.5).

| Vrtule \ Motory | Motory | | |
|-----------------|-------------|----------------|-----------|
| | AXI 2820/12 | T-Motor AS2820 | MK3644/24 |
| 12x4.5 (Carbon) | 9072 | 9010 | 10010 |
| 10x7 3-listá | 9856 | 9300 | 10055 |
| 11x7 | 9068 | 8680 | 9780 |
| 12x6 | 8637 | 8950 | 9500 |

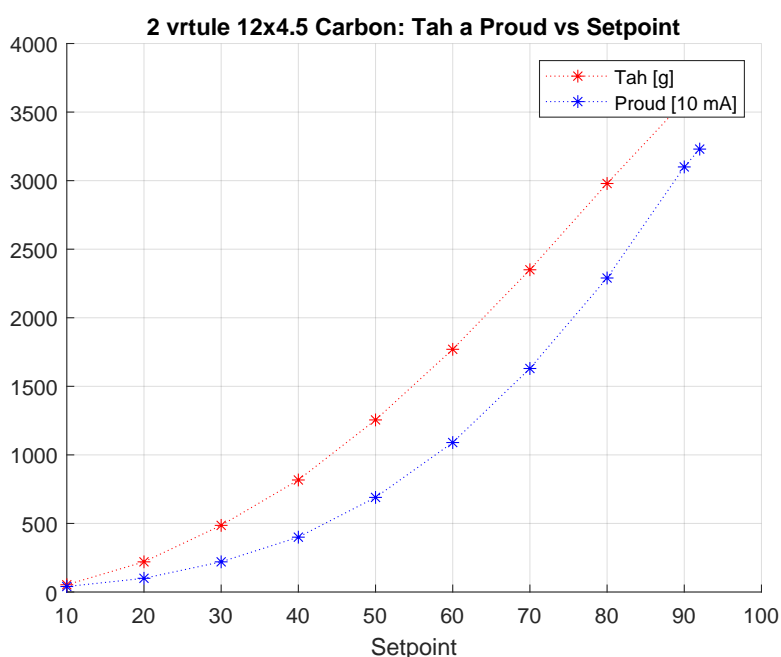
Tabulka 5.1: Maximální RPM kombinace vrtule a motoru

Dále jsme měřili na stojánku pro dvě vrtule (viz obrázek 4.3). Zde bylo úkolem zjistit, jak moc velký tah produkuje kombinace dvou vrtulí (vždy pár levotočivé a pravotočivé vrtule). Velikost stojánku se snaží být věrná velikosti můstku na robotovi, aby se co nejlépe nasimulovaly stejné podmínky. V tabulce 5.2 je vidět, že karbonová vrtule si vedla nejlépe. Je ovšem třeba říct, že dobré výsledky má i vrtule s větším stoupáním 12x6, i když za cenu o něco většího proudu.

| | 12x4.5 Carbon | 10x7 3-listá | 11x7 | 12x6 |
|-----------|---------------|--------------|------|------|
| Proud [A] | 32.3 | 32.0 | 34.5 | 34.9 |
| Tah [g] | 3640 | 3080 | 3350 | 3500 |

Tabulka 5.2: Maximální tah a proud dvou vrtulí

Protože si vedla karbonová vrtule v kombinaci s motorem MK3644/24 nejlépe, použijeme je na samotného robota. Na obrázku 5.5 pak vidíme graf vybrané kombinace vrtulí a motorů, znázorňující tah a proud vzhledem k nastavené rychlosti motoru. Graf si zde uvádíme proto, abychom věděli, jak se náš systém chová. Proud je zde uveden v jednotkách 10 mA , tedy např. hodnota 3000 na grafu symbolizuje $30000\text{ mA} = 30\text{ A}$. Vidíme, že produkovaný tah ani odebíraný proud nemají lineární charakteristiku.



Obrázek 5.5: Graf představující tah a proud vzhledem k nastavené rychlosti motorů (v procentech)

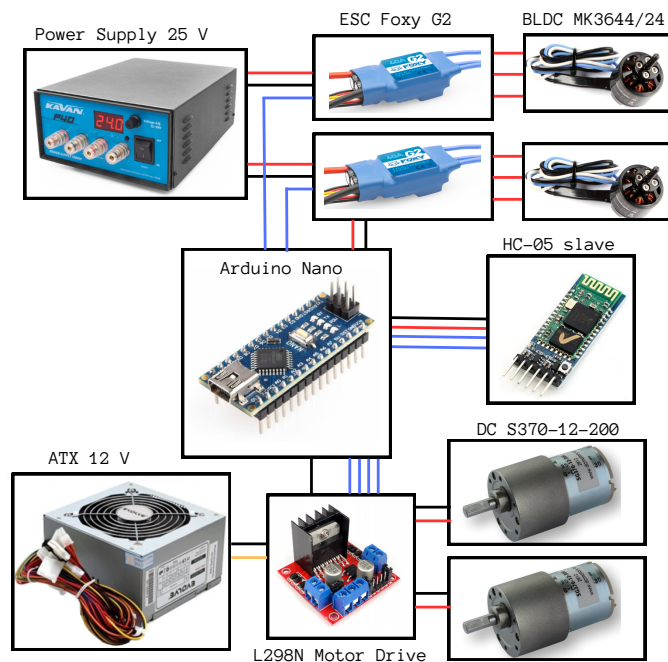
5.2 Celkové zapojení pro měření

Abychom mohli robota testovat (nejdříve na zemi), je potřeba vše správně zapojit. Jak je vidět na obrázku 5.6, jsou použity dva zdroje napětí. Prvním z nich je zdroj Kavan P40, který má regulovatelné výstupní napětí. Zároveň má dva páry banánkových svorek, což je ideální pro naši aplikaci, kdy potřebujeme napájet oba elektronické regulátory otáček. Tento zdroj zároveň ukazuje na svém digitálním displeji po stisknutí tlačítka celkový odběr proudu. Výrobce uvádí, že je zdroj 1000 W , což by mělo tak akorát stačit pro napájení ESC (viz dále).

Regulátor ESC má v sobě zabudovaný výkonný spínaný stabilizátor napětí BEC s výstupním nastavitelným napětím od 5.2 V do 7.4 V schopný dodávat až 8 A . Tento obvod tedy využijeme a budeme jím napájet mikrokontrolér Arduino Nano.

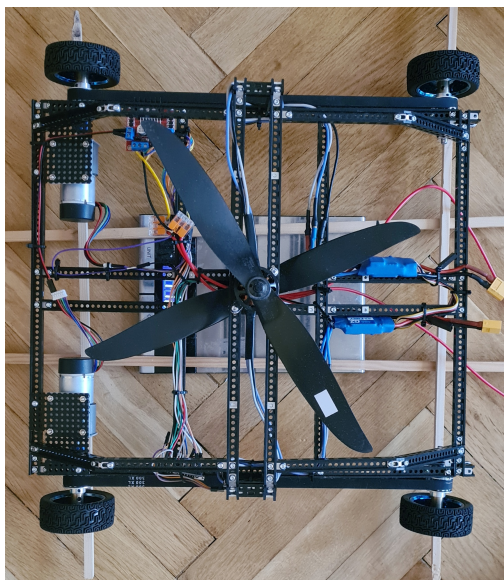
Řadič motoru (a tedy DC motory) budeme napájet externím počítačovým zdrojem ATX. Výstupní žluté 12 V kabely byly spojeny do jednoho pomocí Wago svorky, aby bylo možné bezpečně odebírat větší proud. Pupeční šňůrou pak napájíme řadič motoru (s Wago svorkou pro snazší zapojování a odpojování).

5. Experimentální ověření



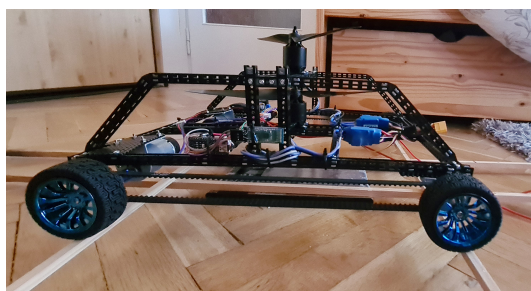
Obrázek 5.6: Zapojení během testování

Na robotovi je rovněž přítomen Bluetooth modul HC-05 v roli *slave* pro komunikaci s ovladačem.

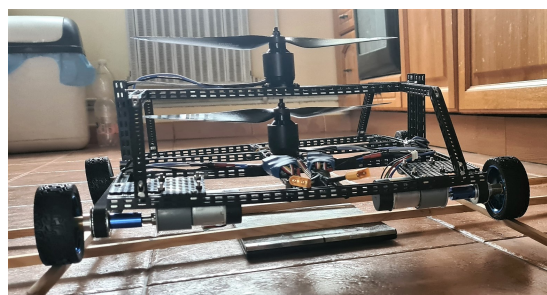


Obrázek 5.7: Pohled ze shora

Na obrázcích 5.7 a 5.8 můžeme vidět celého robota ze shora, z boku a zepředu. Robot na těchto fotkách je posazen na váze – přesněji na dřevěných tyčích, které nám pomohou robota zvážit (viz následující kapitola).



(a) : Z boku



(b) : Zepředu

Obrázek 5.8: Pohled na robota

5.3 Testování různých konstrukčních návrhů

Pro sestavení kostry robota používáme, jak bylo popsáno v kapitole 4.3, konstrukční systém Totem. Od začátku jsme vycházeli z myšlenky, že robot bude obdélníkového tvaru. To plyne hlavně z konstrukčního systému jako takového, který není navržen na design obloukovitých prototypů. Na spodní části (dále "základna") bude umístěna většina elektroniky spolu s podvozkem. Nad touto spodní obdélníkovitou základnou bude můstek, který bude držet vrchní část vrtulového systému (BLDC motor a vrtuli). Kabely od horního BLDC motoru budou vedeny podél můstku na okraj robota, kde sestoupají dolů na základnu a zamíří do ESC. Díky tomu tyto kabely nebudou překážet spodní vrtuli a nemůže se stát, že by je spodní vrtule roztrhala. Tento můstek je složen ze dvou paralelních tyčí. Na nich je přichycen speciální stojánek, který drží BLDC motor na těchto tyčích. Protože můstek reaguje reakčním momentem na otáčení vrtulí, aby nedošlo ke zhroucení, je potřeba, aby byl co nejpevněji přichycen k základně. Mluvíme zde tedy o závětrování. To přidá můstku potřebnou tuhost a brání v jeho vychylování na jednu stranu.

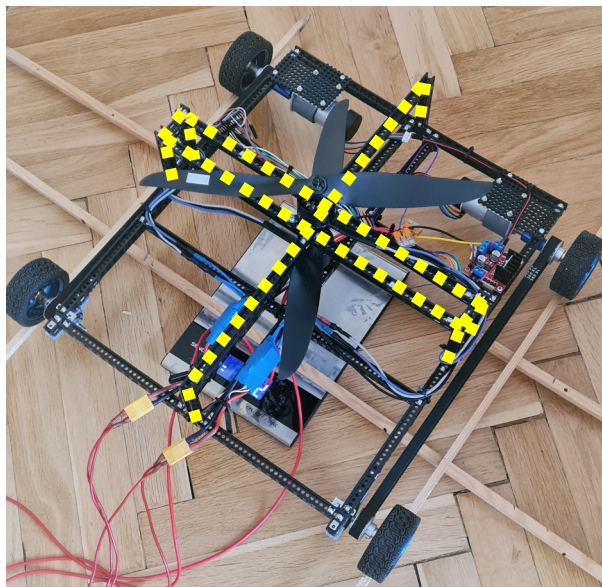
Původní design robota se lišil od toho výsledného. Závětrování bylo zamýšleno tak, že spolu s můstkem bude vytvářet pomyslný kříž. Tedy jinak řečeno, závětrování bude uprostřed můstku/robota. Směrem od můstku až ke krajům bude ve stejné výšce jako můstek a na krajích bude spojeno se základnou. Tento způsob měl snížit celkovou váhu robota. Zároveň závětrování vytvářelo konstrukční smyčku uprostřed, což by mělo dále vylepšit mechanické vlastnosti robota.

Uvedený design robota je na obrázku 5.9. Žlutou barvou je znázorněn můstek spolu se závětrováním.

Robota jsme zapojili tak, jak je popsáno v kapitole 5.2. Během postupného testování tahu (v tomto případě pomocí příkazů v sériové konzoli) se však ukázalo něco poměrně nečekaného.

Při nastavení zhruba 20 % otáček motoru začal robot poměrně dost vibrovat. Až do té míry, že robot nezůstal staticky ve stejné poloze, ale začal se posunovat. Testování bylo přerušeno a začala se hledat příčina problému. V příloze této práce je přiložené video.

První nápad bylo zkontrolovat všechny šrouby a matice, zda-li je vše na doraz. Myšlenka totiž byla, že by se vlivem nedotažení části konstrukce celý robot rozkmital. Nakonec se ukázalo, že na některých místech byl skutečně povolný šroub – v části u spoje můstku se základnou a poté u držáku pro DC motor. Všechno se tedy poctivě utáhlo, zkontrolovalo a testovalo se znovu. Bohužel problém s vibrací setrval. Po následné kontrole robota jsme zjistili, že jsou opět na několika místech povolené šrouby. To znamenalo jediné možné – že se konstrukce vlivem vibrací povoluje.



Obrázek 5.9: Design se závětrováním uprostřed. Vibrace systému při nastavení BLDC na 20 %

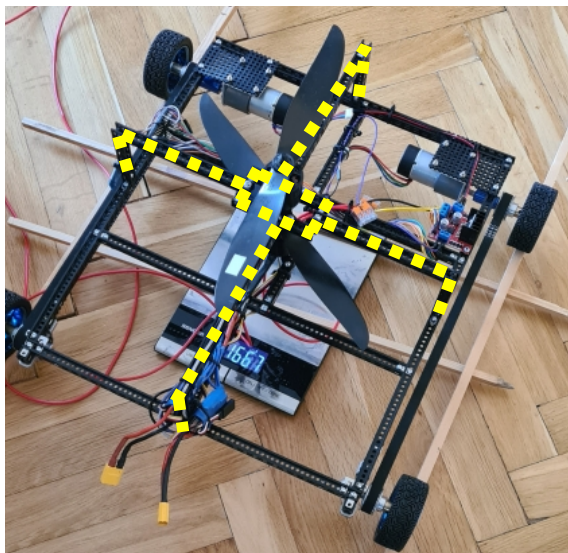
Protože jsme chtěli dále testovat a hledat příčinu problému, muselo se zavést bezpečnostní opatření. Mezi robota a testera se vždy dala překážka (většinou kus kartonové desky), tlačítko pro napájení BLDC motorů bylo hned u nohy a zjednodušily se příkazy pro sériovou konzoli k okamžitému zastavení.

Další potenciální možností byly špatně připájené konektory mezi BLDC a ESC – možná sebou motor vlivem špatného spoje jenom cukal. Ještě před ověřením těchto konektorů jsme zkusili otestovat oba BLDC motory zvlášť. Z toho vzešlo zajímavé zjištění, že dolní vrtulový systém vibrace vůbec neprodukuje. Příčina problému tedy musela být u horní části. Zmíněné konektory jsme tedy znovu připájeli. Bohužel ani zde nebyl problém, špatným připájením to tedy také nebylo.

Poslední variantou tedy bylo to, že se jednalo o konstrukční problém. Nezbyvalo tedy nic jiného, než poupravit konstrukci a zaměřit se na horní část.

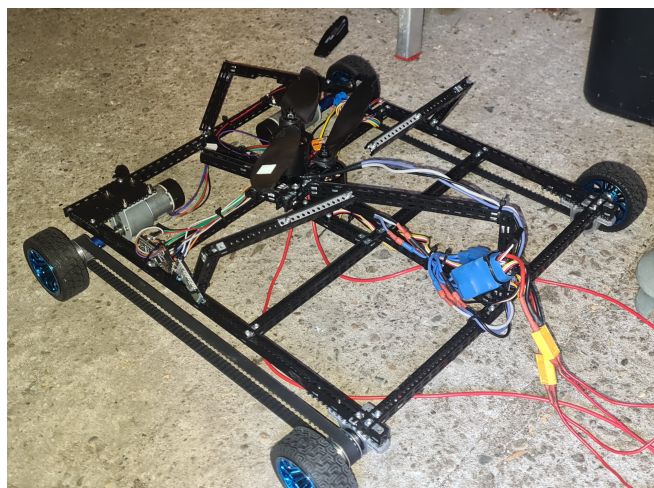
Design horní části robota jsme tedy trochu pozměnili. Snažili jsme se můstek udělat symetrický na všechny strany. Zároveň jsme v tomto designu vedli kabely od horního BLDC motoru jinou, kratší cestou. Tyto změny měly také za následek snížení váhy robota o necelých 100 g. V naději na lepší výsledek jsme tedy znovu testovali přítomnost vibrací. Bohužel vibrace se opět dostavily, tentokrát ale až při 35 %. Tím jsme si ověřili, že je problém opravdu konstrukčního charakteru.

S tímto designem jsme zkusili dále pracovat. Např. jsme se pokusili můstek vyztužit hliníkovými tyčemi v místě, kde se tyče během tahu nejvíce prohýbají – tedy uprostřed pod vrtulovým systémem.



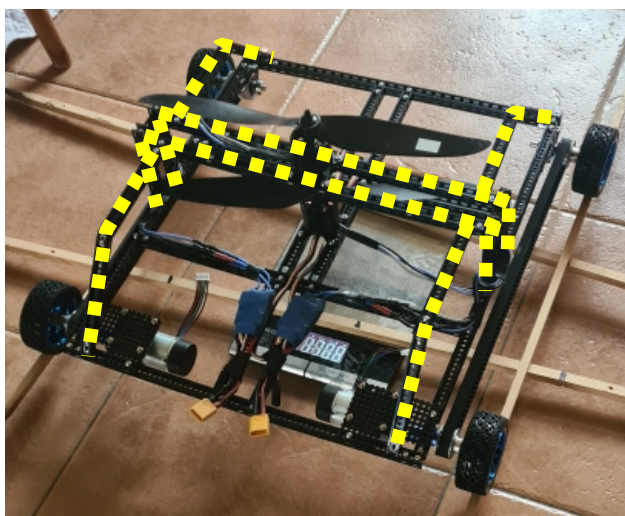
Obrázek 5.10: Upravený design - symetrický můstek na všechny strany. Vibrace systému při nastavení BLDC na 35 %

Bohužel při jedné takové změně při stejném testování došlo k selhání. Konstrukce to nevydržela a robot se během testování roztrhl. Dokonce se zničila i jedna karbonová vrtule a hliníková výztuž. Naštěstí vlivem bezpečnostních opatření nedošlo ke zranění.



Obrázek 5.11: Destrukce robota při testování

Pokračovalo se tedy dál s designováním a zkoušením. Nakonec se dospělo k designu s podélným závětrováním a dvojitým centrálním můstkem vyztuženým uhlíkovými tyčemi. Opatrným testováním se ukázalo, že problém s vibracemi byl tímto designem vyřešen.



Obrázek 5.12: Design se závětrováním po stranách

Co bylo přesnou příčinou problému s vibracemi nelze se stoprocentní jistotou říci. Lze se ale oprávněně domnívat, že byl problém s přirozenou frekvencí systému, která rezonovala s frekvencí vrtulového systému. Tyto vlivy se dají simulovat v některých programech (např. Ansys [24]) pomocí tzv. Metody konečných prvků. Tato analýza je ovšem nad rámec naší práce.

Druhou možností může být aerodynamika. Existuje tzv. "Vortex shedding", což je oscilace pohybujícího se vzduchu za překážkou (v našem případě plastovými tyčemi můstku), pokud jsou splněny podmínky rychlosti vzduchu a určitého tvaru překážky. Překážka pak v důsledku oscilace vzduchu začne kmitat také. Naše tyče však mají H-profil, ve kterém jsou drobné otvory. Ty by teoreticky měly sloužit k vyrovnávání tlaků na obou stranách profilu a díky tomu by k tomuto jevu nemělo docházet.

■ 5.4 Váha všech komponent

Jak bylo popsáno v kapitole 2.4, původní odhad hmotnosti robota byl 1645 g. Naměřené hmotnosti jednotlivých komponentů jsou uvedeny v tabulce A.1. Původní plán bylo použít jako konstrukci uhlíkovou nosnou desku. Maximum hmotnosti této konstrukce bylo spočítáno na 330 g. S naší konstrukcí z plastových tyčí jsme se vešli na hodnotu 250 g. Co ovšem do původního výpočtu nebylo zahrnuto, je mechanismus podvozku robota. Ukázalo se, že váží ze všech komponent úplně nejvíce, protože je složen z kovových dílů. To dohromady přidává 550 g. Nakonec se ukázala být dvakrát těžší i kolečka. Navzdory původním odhadům, které byly v kapitole výpočtu váhy zahrnuty ve formě rezervy, se projevilo, že je těžší i samotná kabeláž spolu s pupeční šňůrou. Jak by celková váha šla vylepšit, bude diskutováno v závěrečné kapitole.

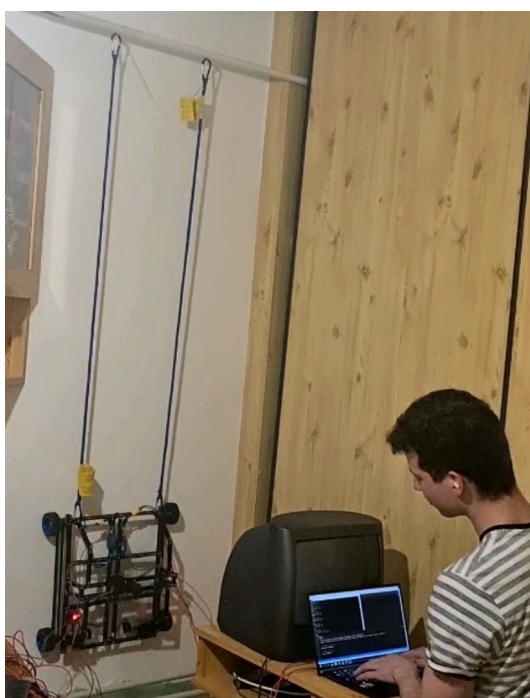
| Komponenta | Váha | Množství | Celková váha |
|------------------------|-------|----------|--------------|
| BLDC motor, kabel, hub | 148 g | 2 | 296 g |
| vrtule | 20 g | 2 | 40 g |
| ESC | 44 g | 2 | 88 g |
| Arduino Nano | 7 g | 1 | 7 g |
| BT Module | 4 g | 1 | 4 g |
| DC motor | 75 g | 2 | 150 g |
| mechanismus 1 | 200 g | 2 | 400 g |
| mechanismus 2 | 75 g | 2 | 150 g |
| řemen | 45 g | 2 | 90 g |
| kolo | 34 g | 4 | 136 g |
| wago svorka | 2 g | 1 | 2 g |
| konstrukce | 250 g | 1 | 250 g |
| kabeláž | 140 g | 1 | 140 g |
| Celkem | | | 1753 g |

Tabulka 5.3: Tabulka hmotností komponent

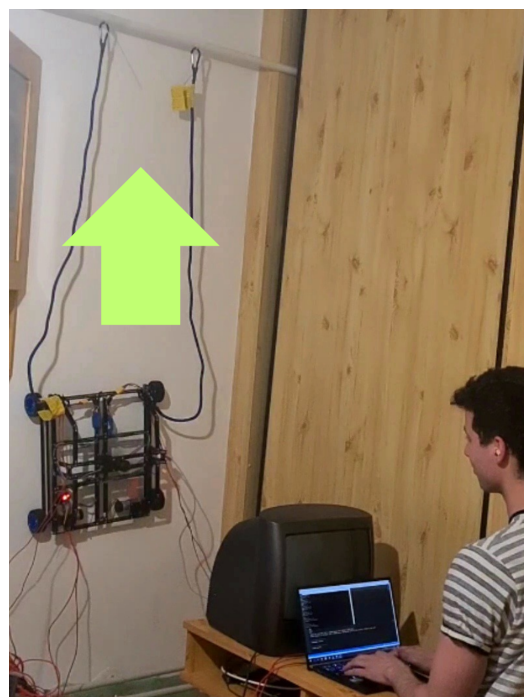
5.5 Testování robota na zdi

Samotné šplhání robota bylo testováno na omítkové stěně. Testovací stanoviště muselo být upraveno tak, aby bylo bezpečné zároveň pro nás i pro robota. Proto byl po celou dobu testování robot upevněn na 2 metry dlouhých lanech. Ta jsou důležitá i z toho důvodu, že robot neumí v této podobě přecházet mezi zemí a stěnou. Proto potřebuje být při vypnutí motorů nějakým způsobem upevněn. Jedna z dalších variant by bylo použití nájezdové rampy opřené o stěnu. Lana byla z obou stran opatřena karabinou pro snazší upevnění. Na jedné straně byl připevněn robot – karabiny byly přichyceny na podélné závětrování můstku (viz předchozí podkapitola 5.3). Zároveň byly karabiny přichyceny k robotovi plastovými stahovacími páskami, aby se nestalo, že se karabina dostane do prostoru s vrtulí. V horní části jsou karabiny přichyceny k tyči, která je ve vodorovné pozici a je z obou stran ukotvena, aby se nehýbala. I nahoře jsou karabiny ještě utaženy stahovací páskou k tyči pro zamezení pohybu. Pod robotem na zemi jsou pro jistotu umístěné měkké deky.

Musí být bráno v úvahu, že vrtule na robotovi produkují velký tah a v důsledku toho poměrně silný vítr - proud vzduchu, který míří směrem kolmo od stěny. Proto se mezi testera a robota umístila těžká překážka (se kterou proud vzduchu nepohne). Za tuto překážku se umístil notebook (bez překážky by se notebook silou větru sklopil). Dále si tester vzal pro ochranu brýle a špunty do uší. To z toho důvodu, že robot je hlavně v uzavřeném prostoru velmi hlasitý. Dále je hned vedle testera umístěn zdroj, aby mohl kdykoliv robota v případě nouze odpojit od napájení pomocí tlačítka. U tohoto testu byl robot ovládán pomocí sériové konzole.



(a) : Robot v dolní poloze, přitisknutý na zdi



(b) : Robot drží na stěně a jede nahoru

Obrázek 5.13: Testování robota na zdi s jemnou omítkou

Postup měření byl následující:

- Byly zapnuty všechny systémy, tedy sériová konzole, napájení BLDC a napájení DC.
- Pokud je navázaná komunikace s robotem, v sériové konzoli dostaneme potvrzení OK. Zároveň se poslouchá a čeká se na potvrzující trylek od motoru. Je zkontrolováno, že svítí dioda na DC řadiči. Pokud ano, napájení DC řadiče je OK.
- Jsou spuštěny DC motory a je ověřeno, že se oba točí. Pak jsou oba DC motory vypnuty.
- Pomalu pomocí sériové konzole je zvyšován tah celého vrtulového systému stejnoměrným navyšováním rychlosti obou BLDC motorů po 10 %. Znázorněno na obrázku 5.13a.
- Poté jsou vždy zapnuty DC motory a je sledováno, jestli se robot rozjede nahoru.
- Pokud ano, nechá se robot povyjet nahoru tak, aby ho lana už nedržela (viz obrázek 5.13b). Pak jsou DC motory vypnuty.
- Následně je ubíráno na tahu a je sledováno, kdy robot začne sklouzávat dolů. Jakmile k tomu dojde, je zase zvýšen tah.
- Poté jsou zapnuty DC motory (na opačnou stranu) a sjede se s robotem až dolů do pozice, kdy lana robota drží.
- Je vypnuto napájení. Pak se může odpojit sériové spojení.

Bylo zjištěno, že robot se udrží na zdi bez toho, aniž by sklouzával dolů, při nastavení BLDC motorů na 70 %. Pokud má jet robot vzhůru, musí být BLDC motory nastaveny na alespoň 90 %. Poté robot stoupá nahoru.

Co se týče tohoto měření, je zde trochu problém ověřit, jak robot zatáčí. Lana, která robota jistí, by se totiž mohla při zatáčení připlést do vrtulového systému a mohlo by dojít k velkým škodám. Z tohoto důvodu jsme vytvořili další stanoviště. Oproti předchozímu měření se v tomto případě jedná o zeď s hrubou omítkou. Lana jsme tedy prodloužili a obtočili je (protáhli) kolem mříže (které suplují tyč z předchozího měření). Zde byla potřeba asistenta. Jeho úkolem bylo lana držet a natahovat tak, aby robotovi nepřekážela, ale zároveň aby robota netáhla nahoru (a robot tak držel na stěně bez jejich pomoci). Vždy tedy musela být aspoň trochu povolena. Díky tomu jsme mohli vyzkoušet, jak robot dokáže na zdi zatáčet.

Nyní jsme však nepoužívali sériovou konzoli k zadávání příkazů, ale robota jsme řídili přes vytvořený ovladač. Hodnoty posílané do robota jsme si do konzole vypisovali. Postupovali jsme stejně jako při předchozím pokusu. Postupně jsme zvyšovali tah (potenciometrem na ovladači) až na hodnotu 90 % a poté jsme s robotem jeli nahoru. Pak jsme zkoušeli zatáčet. Vyšlo najevo, že s robotem je nejjednodušší zatáčet, když jede dolů. S robotem zatočíme a poté může jet nastaveným směrem dopředu. Pokud zatáčíme při jízdě nahoru, jde to poměrně obtížně. Z tohoto testu tedy vyšlo najevo, že dynamika robota není úplně optimální a ačkoliv je možné s robotem zatočit, a robot se v natočené pozici udrží, vyžaduje to specifické řízení. V závěrečné kapitole budou popsány možná vylepšení. Na obrázcích 5.14a a 5.14b je zachycen robot, jak jede doleva a doprava.



(a) : Robot zatáčí doleva



(b) : Robot zatáčí doprava

Obrázek 5.14: Testování robota na zdi s hrubší omítkou

5.6 Testování na dřevěném povrchu

Jako další pokus bylo zvoleno testování na nakloněné dřevěné rovině. Myšlenka byla taková, že by robot mohl použít právě nakloněnou rovinu jako nájezdovou rampu na stěnu. Bylo tedy ověřováno, jestli je robot schopen se na dřevěném povrchu udržet, případně pod jakým úhlem. Uspořádání experimentu bylo podobné jako v předchozím případě, opět vyžadovalo pomoc asistenta. Na obrázku 5.15 vidíme, jak byl experiment navržen.



(a) : Pohled zepředu



(b) : Pohled z boku

Obrázek 5.15: Testování robota na dřevěné nakloněné rovině

Experiment probíhal tak, že jsme dřevěnou paletu postupně nakláněli až do vertikální roviny (0°). Začínali jsme od náklonu 49° (úhel mezi stěnou a rovinou dřevěné palety). V tabulce 5.4 je zapsáno, na kolik procent nejméně jsme museli spustit BLDC motory, aby byl robot ještě schopen šplhat po nakloněné rovině nahoru. Vidíme, že do náklonu 7° se robot dokázal pohybovat nahoru. Při náklonu rovnoběžném se stěnou se robot po dřevěném povrchu už nedokázal efektivně pohybovat, ačkoliv se na povrchu udržel.

| Náklon | 49° | 38° | 30° | 26° | 23° | 14° | 7° | 0° |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| Setpoint | 0 % | 52 % | 77 % | 78 % | 80 % | 96 % | 100 % | — |

Tabulka 5.4: Potřebný tah pro schopnost pohybovat se po nakloněné dřevěné rovině

Kapitola 6

Závěr

Tato práce se zabývala návrhem robota schopného šplhat po zdi, jeho sestavením a implementací jeho řízení. Jedná se o poměrně neprozkoumanou oblast robotiky, v České republice jde pravděpodobně o unikát. Motivací této práce tedy zároveň bylo, aby se možná stala předmětem dalšího výzkumu. Potenciál těchto robotů je totiž obrovský.

Nejdříve bylo provedeno seznámení s dostupnými nejnovějšími roboty šplhajícího typu. Bylo zjištěno, že existují roboti tvrdí i měkkí, roboti schopní dostat se ze země na stěnu nebo dokonce roboti, kteří dokáží z letící fáze přistát na stěně. Existuje několik principů, jak se dokáží roboti na stěně udržet – např. pomocí přísavek, elektroadheze nebo vrtulovým systémem.

V našem návrhu bylo rozhodnuto použít vrtulový typ adheze používající dvě koaxiální vrtule točící se opačným směrem. Takový typ se zdá být nejjednodušší na řízení, ale přináší s sebou další výzvy. Bylo totiž potřeba provést důkladnou analýzu kinematiky robota, aby bylo rozhodnuto, jak by měl vrtulový systém vypadat. Ve skutečnosti bylo zjištěno, že je to poměrně složitý problém, protože pro výběr vrtulového systému je potřeba znát hmotnost robota. Ale hmotnost robota také vychází z vrtulového systému. Z tohoto důvodu byly odvozeny kinematické rovnice a v Matlabu byly simulovány jednotlivé varianty.

Na základě této simulace byly zvoleny jednotlivé komponenty. U BLDC motorů a vrtulí bylo pořízeno několik podobných variant. Byl vytvořen test-bench pro testování tahu jejich různých kombinací, aby mohla být vybrána ta nejlepší pro robota. Ukázalo se, že při dvou soustředně se točících vrtulích dochází k určitým ztrátám produkce tahu vlivem turbulentního proudění vzduchu.

Dále při konstrukci samotného robota bylo zjištěno, že tvar kostry robota má zásadní vliv. Byl objeven problém – při určitých otáčkách horní části vrtulového systému dochází k poměrně výrazným vibracím. To bylo pravděpodobně způsobené rezonancí či aerodynamikou robota. Bylo tedy zkušeno kostru robota pozměnit. Nakonec se povedlo problém eliminovat přidáním podélného závětrování k můstku, který drží horní část vrtulového systému.

Další výzvou bylo vymyslet podvozek robota. Volba padla na mechanický systém čítající dva DC motory, kde každý pohání dvě kola pomocí soustavy ozubených řemenic a řemene. Musela

být řešena kompatibilita a z toho vyplývající nedostatek některých komponent. Nakonec se podařilo podvozek sestrojít. Celkově se tedy robot pohybuje tzv. diferenciálním pohonem.

Aby mohl být robot ovládán, byly sestrojeny dva typy řízení. První byl software komunikující s robotem pomocí sériové konzole. Byla vytvořena jednoduchá příkazová notace, která umožňuje precizní ovládání jednotlivých komponent. Dále byl sestrojen a naprogramován ovladač, který dokáže s robotem komunikovat na dálku pomocí Bluetooth připojení. Součástí bylo navrhnout ochranné prvky, které zabrání nepozornému uživateli např. nechtěnému roztočení vrtulí.

Nakonec byl robot testován na třech površích. Bylo potřeba dbát na bezpečnost robota i testera. Proto tomu byla jednotlivá stanoviště náležitě přizpůsobena. Z testování vyšlo najevo, že se robot udrží na zdi a je schopen se pohybovat, pokud běží vrtulový systém naplno. Robot dokáže zatačet, ale ukázalo se, že to zvládne nejlépe, když se pohybuje směrem dolů. To je zapříčiněno celkově podprůměrnou dynamikou robota. Bohužel i kvůli zhoršené dynamice se už nepodařilo vytvořit plnohodnotné plánování pokrytí. Robot je schopen se na omítkové zdi dostat prakticky kamkoliv, ale musí ho ovládat uživatel. Nejlepší možností, jak se dostat z jednoho místa na druhé je, pokud se robot při pohybu směrem dolů natočí tak, aby čelem mířil k cílovému bodu, který pak dosáhne jízdou po zdi směrem vpřed.

Navázání na tuto práci vidím nejdříve v podobě vylepšení dynamiky robota. Toho bychom mohli docílit dvěma způsoby. Prvním je zvýšení produkovaného tahu a druhým je celkové snížení váhy robota. Tah by šlo možná zvýšit, pokud bychom použili vrtule s rozdílným a větším stoupáním. Dále pokud by se např. spodní vrtule točila rychleji než ta vrchní. To by ovšem vyžadovalo upravit celkové řízení, aby se kompenzoval parazitní moment, který by pravděpodobně vznikal. Hmotnost robota by možná šla snížit zmenšením rozměrů robota. Nyní je robot koncipován tak, aby konstrukce byla větší než jsou samotné vrtule. To je hlavně kvůli bezpečnosti, protože jakmile se vrtule roztočí, jsou jen stěží vidět. Pokud by se podařilo hmotnost zmenšit, stálo by za to zkusit robota napájet bateriemi, které by byly na robotovi přítomné. Zároveň by se dalo uvažovat o nějakém složitějším plánování pokrytí.

Celkově lze tedy říci, že se podařilo sestrojít robota, který se i přes jistá omezení dokáže udržet na stěně a je schopen po ní šplhat. Zároveň je dobrým základem pro budoucí vylepšení.

Příloha A

Cenový rozbor

V tomto cenovém rozboru jsou zmíněny pouze potřebné komponenty pro samotného robota (včetně zdroje). Není zde započítáno vybavení určené k testování, měřicí přístroje, či ochranné pomůcky. Pokud byla nějaká komponenta zničena a zakoupena znovu, není to zde uvedeno.

| Komponenta | Popis | Cena | Množství | Celková Cena |
|----------------------------|----------------------|----------|----------|--------------|
| BLDC motor | MK3644/24 5mm | 1 410 Kč | 2 | 2 820 Kč |
| vrtule | CAMcarbon 12x4,5 | 149 Kč | 2 | 298 Kč |
| ESC | FOXY G2 R-40SB | 1 090 Kč | 2 | 2 180 Kč |
| Arduino Nano | ATmega328 Klon | 208 Kč | 2 | 416 Kč |
| BT Module | HC-05 | 117 Kč | 2 | 234 Kč |
| DC motor | SG370-12-200-E | 1 250 g | 2 | 2 500 g |
| Ozubená řemenice | Modelcraft, hliník | 259 Kč | 4 | 1 036 Kč |
| Upínací kroužek | Modelcraft, 6 mm | 65 Kč | 2 | 130 Kč |
| Ozubený řemen | Modelcraft, 150 zubů | 199 Kč | 2 | 398 Kč |
| kolo | gumové, 68 mm | 55 Kč | 4 | 220 Kč |
| Náboj na kole | 6 mm | 34 Kč | 4 | 136 Kč |
| DC stojánek | - | 80 Kč | 2 | 160 g |
| Spojka | hliníková, 6 mm | 75 Kč | 2 | 150 Kč |
| Ložiskový stojánek | . | 55 Kč | 2 | 110 Kč |
| Konstruční systém | Totem . | 4 000 Kč | 1 | 4 000 Kč |
| Spínaný zdroj | Kavan P40 . | 3 299 Kč | 1 | 3 299 Kč |
| Kabeláž, konektory, svorky | - | 500 Kč | 1 | 500 Kč |
| Celkem | | | | 18 587 Kč |

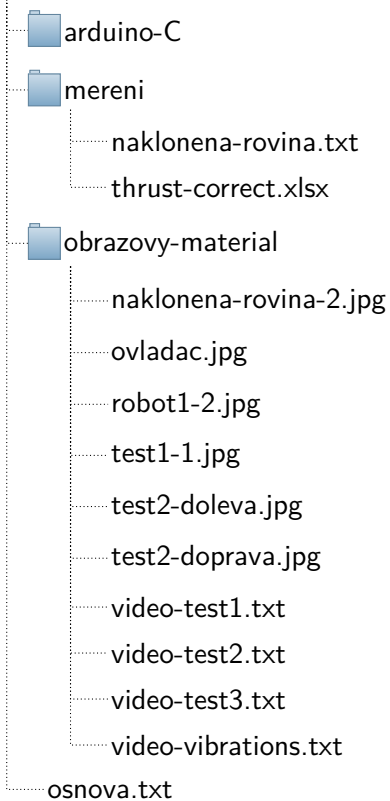
Tabulka A.1: Tabulka hmotností komponent

Příloha B

Přiložené soubory

K diplomové práci je přiložena složka obsahující různé relevantní soubory. Jsou zde přítomny obrazové materiály (videoukázky ve formě odkazů), zdrojové soubory pro Arduino či Excelové tabulky naměřených hodnot. Je zde přítomný i kód ze simulace v Matlabu.

PRILOHA



Příloha C

Literatura a Reference

- [1] S. HIROSE. “Ceiling walking of quadruped wall climbing robot NINJA-II”. In: *Proc. 1st Int. Conf. on Climbing and Walking Robots, Brussels, 1998* (), s. 143–147. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10027464716/en/>.
- [2] P Dutkiewicz, K Kozłowski a W Wroblewski. “Inspection robot SAFARI–construction and control”. In: *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* (2004), s. 119–129.
- [3] Guoying Gu et al. “Soft wall-climbing robots”. In: *Science Robotics* 3 (pros. 2018), eaat2874. DOI: 10.1126/scirobotics.aat2874.
- [4] P. Beardsley a M. Bischoff. “VertiGo - a Wall-Climbing Robot including Ground-Wall Transition”. In: (pros. 2015).
- [5] Kanjanapan Sukvichai, Pruttapon Maolanon a Konlayut Songkrasin. “Design of a double-propellers wall-climbing robot”. In: *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. 2017, s. 239–245. DOI: 10.1109/ROBIO.2017.8324424.
- [6] Mohamed Alkalla et al. “EJBot-II: an optimized skid-steering propeller-type climbing robot with transition mechanism”. In: *Advanced Robotics* 33 (srp. 2019), s. 1–18. DOI: 10.1080/01691864.2019.1657948.
- [7] Saif Mahmood, Sadeq Bakhy a Mauwafak Tawfik. “Novel Wall-Climbing Robot Capable of Transitioning and Perching”. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 881 (srp. 2020), s. 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/881/1/012049.
- [8] Simon Kalouche. “Design of a Gecko Adhesive Climbing Robot”. In: (2014).
- [9] RibbonSoft. *QCAD*. Ver. 3.27.1. 13. pros. 2021. URL: <https://www.qcad.org/en/>.
- [10] Tomáš Werner. “Optimalizace”. Pros. 2019.
- [11] Sam Daley. *Robotics: What Are Robots? Robotics Definition Uses*. Written by Sam Daley, updated by Jessica Powers. 2022. URL: <https://builtin.com/robotics>.
- [12] Boston Dynamics. *Atlas*. 2023. URL: <https://www.bostondynamics.com/atlas>.
- [13] Stuart J Russell. *Artificial intelligence a modern approach*. Pearson Education, Inc., 2010.

- [14] Bolton W. *Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering*. Pearson Education, 2019, Seventh edition, s. 232–234.
- [15] The Clemson University Vehicular Electronics Laboratory. *Brushed DC Motors*. URL: <https://cecas.clemson.edu/cvel/auto/actuators/motors-dc-brushed.html>.
- [16] Hassan Moghbeli, Abolfazl Halvaei Niasar a Mozhgan Behzadi Shahrababak. “Direct power control of brushless DC motor drive”. In: *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. IEEE. 2014, s. 789–794.
- [17] Elliott Wertheimer. *Design and Simulate the Aerodynamics of Propellers in MATLAB*. <https://www.udemy.com/course/aerodynamics-propeller-matlab-simulate-design-wing/>. 2019.
- [18] Bart Theys et al. “Influence of propeller configuration on propulsion system efficiency of multi-rotor Unmanned Aerial Vehicles”. In: *2016 international conference on unmanned aircraft systems (ICUAS)*. IEEE. 2016, s. 195–201.
- [19] Jonathan Elliot Holzsager. *The effects of coaxial propellers for the propulsion of multi-rotor systems*. Rutgers The State University of New Jersey, School of Graduate Studies, 2017.
- [20] Wikipedia. *Mecanum wheel*. https://en.wikipedia.org/wiki/Mecanum_wheel. 2021.
- [21] CSc. Ing. Libor Přeučil. *Kinematics of a mobile robot, trajectory control*. https://cw.fel.cvut.cz/b211/_media/courses/b3m33mkr/mkr_kinematicstrajcontr_en_v2.pdf. Accessed: 2023. 2020.
- [22] Xiaodong Wu, Min Xu a Lei Wang. “Differential speed steering control for four-wheel independent driving electric vehicle”. In: *2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. IEEE. 2013, s. 1–6.
- [23] "Foxy G2 R-20SB...R-160HV". "produkt Foxy G2 R-40SB". "FOXY". "2022".
- [24] ANSYS Inc. *Ansys Workbench*. Ver. 2023 R1. URL: <https://www.ansys.com/products/ansys-workbench>.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Běloch** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **465919**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra kybernetiky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Robot se schopností jezdit po zdi

Název diplomové práce anglicky:

A Wall-Climbing Robot

Pokyny pro vypracování:

1. Nastudujte problematiku robotů určených pro pohyb po zdi [1,2,3]. Navrhněte schéma robota, který bude pro jízdu po zdi využívat vrtulový pohon [4]. Kromě schopnosti udržet se na zdi musí být robot schopen řídit svoji pozici a orientaci.
2. Robota (návrh z předchozího bodu) sestavte, navrhněte a implementujte potřebné řízení.
3. Implementujte vybranou metodu pro tzv. plánování pokrytí s uvažováním překážek (např. [6]).
4. Demonstrujte schopnosti reálného robota v úloze plánování pokrytí [5].

Seznam doporučené literatury:

- [1] Jose, J. A. I. S. E., et al. "A Survey on Magnetic Wall-Climbing Robots for Inspection." *Transst. J 8* (2018): 59-68.
- [2] Nansai, Shunsuke, and Rajesh Elara Mohan. "A survey of wall climbing robots: recent advances and challenges." *Robotics 5.3* (2016): 14.
- [3] Liu, Yanwei, et al. "A wheeled wall-climbing robot with bio-inspired spine mechanisms." *Journal of Bionic Engineering 12.1* (2015): 17-28.
- [4] The VertiGo project, <https://la.disneyresearch.com/publication/vertigo/>
- [5] Chen, Ke, and Yong Liu. "Optimal complete coverage planning of wall-climbing robot using improved biologically inspired neural network." 2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). IEEE, 2017.
- [6] Galceran, Enric, and Marc Carreras. "A survey on coverage path planning for robotics." *Robotics and Autonomous systems 61.12* (2013): 1258-1276.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vojtěch Vonásek, Ph.D. Multirobotické systémy FEL

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **07.02.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

Ing. Vojtěch Vonásek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Svoboda, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta