



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŠESTINOHÝ KRÁČEJÍCÍ ROBOT

SIX-LEGGED WALKING ROBOT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Kotrík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Lukáš Kotřík

ID: 174220

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Šestinohý kráčejíci robot

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Navrhnete kinematickou koncepci šestinohého robotu.
- 2) Vyberte vhodné pohony a proveďte funkční návrh mechanické konstrukce. Využijte 3D tisk.
- 3) Navrhnete řídicí elektroniku.
- 4) Realizujte jednotlivé moduly.
- 5) Napište řídicí software pro PC.
- 6) Ověřte a vyhodnoťte výsledky Vaší práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

SATO, Ryuki, et al. Development of robot legs inspired by bi-articular muscle-tendon complex of cats. In: Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2015. p. 1552-1557.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 29.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto práca sa zaoberá návrhom a následnou konštrukciou šesťnohého kráčajúceho robota. Práca pozostáva z niekoľkých častí, ktoré nám priblížia, akým spôsobom bolo postupované pri návrhu a konštrukcii robota. Práca začína opisom problematiky kráčajúceho robota. Pokračuje návrhom skeletu robota, prepočítaním jednotlivých momentov síl pôsobiacích na potenciálne vybrané servomotory v kĺboch končatín robota. Ďalšia časť sa zaoberá výberom vhodného servomotoru, tvorbou plošného spoja riadiacej dosky robota a programovou časťou robota. Pre bezdrôtové riadenie robota bola navrhnutá a naprogramovaná aplikácia ConnectMe. V závere práce je objasnený postup pri konštrukcii robota do jedného funkčného celku.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Robot, ESP8266, Atmega328-PU, PCA9685, servomotor, PWM, I2C, 3D tlač, PLA, mikrokontrolér, skelet, Arduino, ConnectMe

ABSTRACT

This thesis focuses on design and construction of a walking six-legged robot. It consists of several parts which are exploring the process of design and construction of this robot. The thesis begins with the explanation of problematics of walking robots and then moves on to description of designing the robot. Further, the skeleton of robot is designed and the torque in each leg joint for every hypothetical servomotor is calculated. In next part, suitable servomotor is picked according to specific criteria and after that, the main board for robot and program microcontroller are created on same board with programme which we also created. In addition, an application named ConnectMe was created for wireless communication with robot. In the end, the entire construction process of robot is clarified.

KEYWORDS

Robot, ESP8266, Atmega328-PU, PCA9685, servomotor, PWM, I2C, 3D print, PLA, microcontroller, skeleton, Arduino, ConnectMe

PREHLÁSENIE

„Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Šestinohý kráčejší robot som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, obzvlášť som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb

V Brne dňa

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu svojej bakalárskej práce Ing. Lukášovi Kopečnému, Ph.D. za ochotu a odbornú pomoc počas celej doby riešenia bakalárskej práce.

V Brne dňa

.....

(podpis autora)

Obsah

1	Úvod	7
1.1	Cieľ práce	7
2	Problematika šesťnohého robota	8
2.1	Kinematický návrh robota	8
2.2	Možnosti pohybu šesťnožca	9
3	Servomotory	10
3.1	Výber servomotoru.....	10
3.2	Zaťaženie servomotorov momentmi síl.....	11
3.2.1	Samostatná končatina vo vzduchu	11
3.2.2	Rovnovážny stav robota	12
3.2.3	Presun robota	14
4	Skelet robota.....	17
4.1	Návrh skeletu robota	17
4.1.1	Materiál na výrobu skeletu	18
4.2	3D tlač skeletu robota.....	18
5	Elektronika robota	20
5.1	Riadiaca elektronika	20
5.1.1	Návrh plošného spoja	20
5.1.2	Využitie komunikačné rozhrania	21
5.1.3	Mikrokontrolér Atmega328-PU.....	21
5.1.4	Riadenie servomotorov.....	22
5.1.5	Wi-Fi modul.....	23
5.2	Napájanie	23
6	Programová časť	24
7	Výroba a konštrukcia robota	33
	Záver.....	35
	Literatúra.....	36
	Zoznam skratiek	37
	Zoznam obrázkov	38
	Zoznam tabuliek	39
	Zoznam príloh	40
	Príloha A.....	41
	Príloha B	42
	Príloha C	43
	Príloha D.....	44
	Príloha E	45

1 ÚVOD

Projekt „Šesťnohý kráčajúci robot“ je inšpirovaný predošlým projektom „Štvornožec“, ktorý som vypracoval počas predošlého semestra do predmetu „Základy robotiky“. V tejto práci sa sústredíme na tvorbu šesťnohého robota, ktorý bude v ďalšej fáze použitý na riešenie najrôznejších úloh, ako je napríklad pohyb v teréne na nerovnom povrchu, v plytkej vode, v piesku a podobne. Robot by mal byť vo finálnej fáze plne funkčný, s vlastnou riadiacou elektronikou optimalizovanou presne pre tohto robota, napájaný batériou a s možnosťou bezdrôtovej komunikácie.

1.1 Cieľ práce

Cieľom tejto práce je navrhnúť a skonštruovať šesťnohého kráčajúceho robota pomocou najmodernejších technológií s prihliadnutím na ekonomickú stránku problému. Ako už názov napovedá, skelet robota bude rozšírený o ďalšie dve končatiny, čo značne zjednoduší pohyb robota a zvýši jeho stabilitu. Na skelete robota prídajú ďalšie drobné úpravy ako odľahčenia, prvky zvyšujúce stabilitu a v neposlednom rade estetickú stránku robota.

Práca je rozdelená na niekoľko častí, ktoré po ich úspešnom dokončení budú viesť ku vytvoreniu funkčného šesťnohého kráčajúceho robota. V počiatočnej fáze navrhнем kinematický návrh robota, ktorý následne prepočítam na reálnu kostru modelu robota. Model robota budem vytvárať pomocou programu Solidworks. V prípade potreby optimalizujem skelet robota tak, aby neprekročil hmotnostný a veľkostný limit, ktorý udávajú maximálne momenty síl generované vybranými servomotormi. Ďalej navrhнем plošný spoj s riadiacou elektronikou a Wi-Fi modulom, pomocou ktorého bude možné bezdrôtovo komunikovať s robotom. Všetka elektronika spolu so servomotormi bude napájaná vhodne zvolenou batériou.

2 PROBLEMATIKA ŠEŠŤNOHÉHO ROBOTA

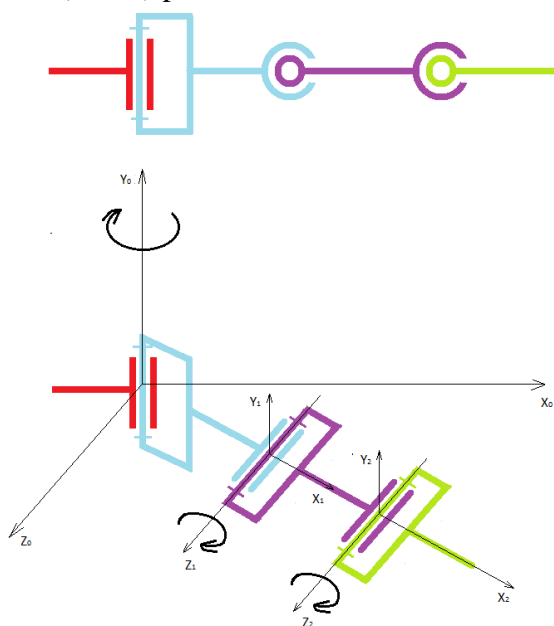
Ak sa rozhodneme zostorjiť robota, ktorého pohyb bude realizovaný končatinami, musíme rozhodnúť, aký počet končatín pre robota zvolíme. V prípade, že by sme zvolili tri a menej končatín, musíme si byť vedomí, že v prípade nadvihnutia ktorejkoľvek končatiny prichádzame o stabilitu, teda na presun robota musíme využiť dynamický pohyb. V tejto práci sa ďalej budeme zaoberať práve pohybom statickým.

V minulom projekte sme riešili pohyb robota pomocou štyroch končatín. Tento pohyb síce zabezpečil stabilitu robota pri statickom pohybe, no pre pohyb robota o jeden krok bolo potrebné presunúť vždy práve jednu končatinu tak, aby ostatné tri končatiny boli položené na zemi. Z tohto dôvodu sa robot pohyboval veľmi pomaly.

Koncept šesťnohého robota umožňuje značne zvýšiť rýchlosť celkového pohybu robota po zemi. Taktiež sa zvyšuje jeho stabilita v dobe, keď je robot v rovnovážnom stave robota – robot stojí na nohách a nehýbe sa. V neposlednom rade sme vďaka tomu schopní eliminovať potrebu nakláňať telo robota na rovnom povrchu za účelom udržiavania ťažiska v prípustných medziach tak, aby sa robot nezrútil.

2.1 Kinematický návrh robota

Každá končatina šesťnožca sa bude skladať z troch článkov. Tieto články budú k sebe upevnené pomocou klbového systému. Každý klb umožní v danom spoji rotačný pohyb v intervale 0 až 180°. Rotačný pohyb v danom klbe bude umožnený v osách tak, ako je to znázornené na obrázku (Obr.1) pod textom:



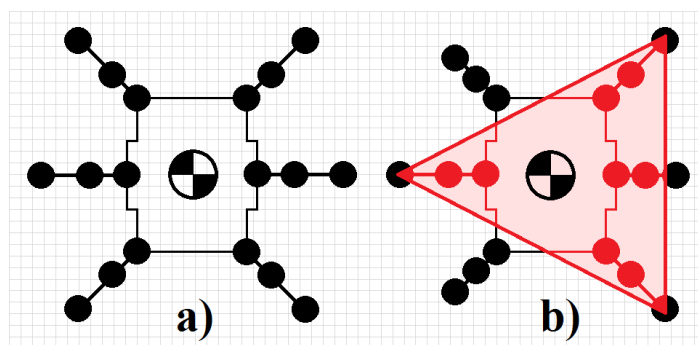
Obrázok 2.1: Kinematický návrh končatiny

2.2 Možnosti pohybu šesťnožca

V tejto kapitole sa budeme zaoberať pohybom šesťnožca. Je potrebné si uvedomiť akým spôsobom sa taký šesťnožec môže pohybovať. Jedným zo spôsobov je dynamický pohyb, ktorý môžeme pozorovať napríklad pri behu ľudí. Tento pohyb je špecifický tým, že môže dochádzať k momentu, kedy sa ani jedna noha nenachádza položená na zemi, čo by značne komplikovalo výpočet spolu s mechanickým a programovým návrhom.

Z tohto dôvodu som si zvolil riešiť chôdzu šesťnožca za pomoci statického pohybu. Na rozdiel od štvornohého predchodcu nie je potrebné prenášať ťažisko robota pomocou náklonu jednotlivých končatín. Voľba šiestich končatín nám pri správnom návrhu zabezpečuje pri pohybe robota jeho stabilitu aj bez náklonu.

Statický pohyb rozdelím na dva druhy – na pomalý a na rýchly pohyb. Pri pomalom pohybe bude dochádzať ku zdvihu práve jednej končatiny, pričom ostatných päť končatín bude v kludovej polohe položených na zemi. Tento pohyb je vhodný pre pohyb na nerovnom teréne, v plytkej vode a všade tam, kde je potrebné udržiavať maximálnu možnú stabilitu robota. V prípade rýchleho pohybu bude robot dvíhať zároveň tri končatiny tak, aby zvyšné tri tvorili oporné body, ktoré triangulujú ťažisko. Pohyb je vhodný používať v prostredí s rovným terénom. Vďaka tomuto pohybu dokážeme zniesť niekoľkonásobnú obratnosť a rýchlosť presunu robota v danom prostredí. Bez ohľadu na to, ktorý z týchto dvoch pohybov si vyberieme, budeme dodržiavať to, že aspoň tri končatiny, ktoré sa budú nachádzať na zemi po prepojení myšlenými úsečkami budú uzatvárať oblasť, v ktorej sa bude nachádzať ťažisko robota (Obr. 2-b). Ak táto podmienka bude splnená, môžeme robota prehlásiť za stabilného.



Obrázok 2.2: Teoretická Stabilizácia robota – umiestnenie ťažiska

3 SERVOMOTORY

V tejto kapitole si objasníme, akým spôsobom by sa malo postupovať pri výbere vhodného servomotoru podľa najrôznejších kritérií. Je potrebné dbať na moment sily, ktorý musia jednotlivé servomotory vedieť generovať. Z tohto dôvodu budeme počítat' potrebné momenty sily pre najviac zaťažované servomotory pri vzorových situáciách, v ktorých by boli dané servomotory najviac namáhané.

3.1 Výber servomotoru

Pri výbere servomotorov prihliadam na niekoľko základných kritérií. Postupne prejdeme tie najpodstatnejšie kritéria, na ktoré som dbal pri výbere.

- Cena - Nesmieme zabúdať na fakt, že na konštrukciu robota je potrebné obstarat' až osemnásť servomotorov. Výsledná cena je teda do značnej miery ovplyvnená touto položkou.
- Moment sily - Od momentu sily, ktorý dokáže servo generovať sa odvíja aj schopnosť robota udržať sa v kľudovej polohe a rovnako aj pri kráčaní.
- Hmotnosť – Budeme uvažovať nad rozumným kompromisom medzi hmotnosťou a spracovaním servomotoru. Je logické, že kovové servomotory budú pevnejšie a kvalitnejšie spracované. No na druhú stranu budú rozhodne drahšie a ťažšie, čo sa opäť premietne do celkovej hmotnosti robota, a tým aj do potrebného momentu sily, ktorý budú musieť servomotory generovať.
- Napájacie napätie – V tomto bode sme obmedzovaní hlavne batériou, ktorú budeme používať ako zdroj elektrickej energie pre robota.
- Spôsob riadenia – Hľadáme servomotor, ktorý bude umožňovať riadenie natáčania jeho hriadele pomocou PWM signálu. Toto riadenie nám značne uľahčí celý proces riadenia pohybu robota.
- Veľkosť – Výsledná veľkosť servomotoru nám bude určovať ako náš robot bude zostrojený. Pri výbere budeme hľadať čo najmenší servomotor, ktorý bude spĺňať kritérium potrebného momentu sily.

Po zvážení všetkých kritérií som sa rozhodol využiť celkom osemnásť servomotorov značky TowerPro SG90. Na jednu končatinu teda pripadajú až tri servomotory, ktoré budú spájať jednotlivé časti skeletu robota v jeden celok a zároveň budú predstavovať kĺbový systém robota.



Obrázok 3.1: Servomotor TowerPro - SG90

Hriadeľ každého servomotoru sa dokáže pootočiť o 180° a jeho natočenie je regulované PWM signálom. Každý servomotor môže byť pri napätí 4.8V až 6.0V namáhaný až $2.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ čo v prepočte predstavuje približne $0.245 \text{ N} \cdot \text{m}$.

$$M_{\max} = 2.5 \cdot 10^{-2} \cdot \vec{g} = 0.025 \cdot 9.81 \doteq 0.245 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (1)$$

M_{\max} ... maximálny moment sily, ktorým môže byť servomotor namáhaný [$\text{N} \cdot \text{m}$]
 \vec{g} ... tiažové zrýchlenie [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

Z výpočtu vyplýva, že ak na hriadeľ servomotoru pripevníme nehmotné rameno s ľubovoľnou dĺžkou, tak na toto rameno môžeme pôsobiť maximálnym momentom sily $M_{\max} \doteq 0.245 \text{ N} \cdot \text{m}$. Pokiaľ neprekročíme tento moment sily tak bude servomotor schopný zotrvať v nami nastavenej polohe. Aby som zaistil čo najväčší moment sily, ktorý dokáže servomotor generovať, tak ho budeme napájať zdrojom elektrického prúdu s napätím 6V, ktoré odpovedá hornej hranici predpísaného napájacieho napätia.

3.2 Zat'azenie servomotorov momentmi síl

V predošlej podkapitole sme si dopočítali maximálny moment sily pre servomotor. Ďalej musíme prepočítať zaťaženia servomotorov v jednotlivých pózach. Vďaka tomu zistíme, či bude robot schopný stáť, prípadne sa pohybovať bez toho, aby boli jeho servomotory preťažované väčším momentom sily, než je maximálny moment sily M_{\max} , ktorým môže byť servomotor namáhaný.

3.2.1 Samostatná končatina vo vzduchu

Výpočet potrebného momentu sily pre samostatnú končatinu vo vzduchu je potrebný na to, aby sme vedeli či obe servá nebudú namáhané väčšou silou pôsobiacou na servomotor než je maximálny moment sily, ktorý dokáže servo samotné generovať. Výpočet je možné značne zjednodušiť tým, že budeme počítať iba pózu končatiny, kedy je servomotor najviac namáhaný (keď tiažová sila pôsobí kolmo smerom nadol vzhľadom k ramenu). Je vhodné poznamenať, že výpočet stačí vykonať iba pre servomotor, ktorý sa nachádza najďalej od pôsobiska výslednej tiažovej sily (ťažiska samostatnej končatiny). Ak má tento servomotor väčší maximálny moment sily M_{\max} než potrebný moment sily M_{zdvih} , tak potom môžeme tvrdiť, že oba servomotory nebudú

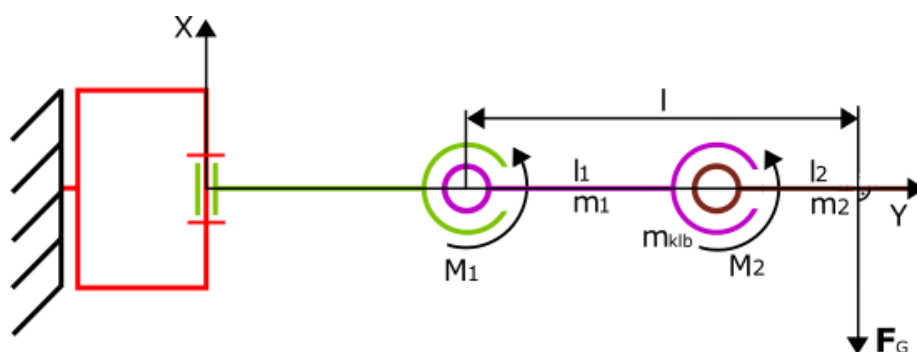
preťažované. Pri výpočte počítame s tým, že ťažisko jednej končatiny sa nachádza v polovici celkovej dĺžky končatiny. Tento predpoklad je pre naše potreby viac než postačujúci. Výpočet momentu sily jednej končatiny podľa vzťahu:

$$M_{\text{zdvih}} = l \cdot \frac{1}{2} \cdot \vec{F}_G \cdot \sin(\theta) = l \cdot \frac{1}{2} \cdot (m_{\text{zdvih}} \cdot \vec{g}) \cdot \sin(90^\circ) \quad (2)$$

$$M_{\text{zdvih}} = (l_1 + l_2) \cdot \frac{1}{2} \cdot ((m_1 + m_2 + m_{\text{kľb}}) \cdot \vec{g}) \cdot \sin(90^\circ) \quad (3)$$

$$M_{\text{zdvih}} = (0.068 + 0.12) \cdot \frac{1}{2} \cdot ((9 \cdot 10^{-3} + 7 \cdot 10^{-3} + 0.011) \cdot 9.81) \cdot \sin(90^\circ)$$

$$M_{\text{zdvih}} = 0.025 \text{ N} \cdot \text{m}$$



Obrázok 3.2: Zdvihnutá končatina - Rovnovážny stav robota

Ďalej porovnáme maximálny moment sily M_{max} a moment sily potrebný pre zdvih končatiny M_{zdvih} :

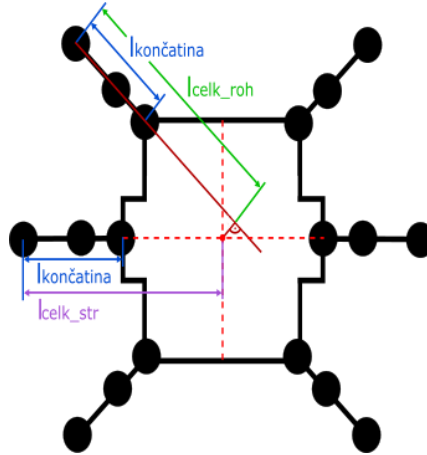
$$M_{\text{max}} \geq M_{\text{rovnov}} \\ 0.245 \geq 0.025$$

Tým sme potvrdili, že zdvih samostatnej končatiny nebude preťažovať servomotory tej danej končatiny.

3.2.2 Rovnovážny stav robota

Je potrebné zdôrazniť to, že sa jedná o pózy, ktoré sú z hľadiska momentov síl a stability robota extrémne a z toho dôvodu predpokladáme, že ak robot bude schopný podľa výpočtov zotrvať v týchto “extrémnych” pózach, tak nebude žiadny servomotor prílišne namáhaný pri bežnej prevádzke. Za rovnovážny stav robota budeme považovať pózu, z ktorej bude robot vždy pri pohybe vychádzať. Končatiny robota sa budú nachádzať v rovnomernom rozložení od ťažiska a zároveň aj od stredu robota. Každá noha bude zvierat uhol 90° medzi pazúrom a zvyšnou časťou skeletu štvornožca. V tejto polohe by malo dochádzať k najväčšiemu zaťaženiu práve tých servomotorov, ktoré sa nachádzajú v kĺbe medzi pazúrom a strednou časťou končatiny. Na obrázku Obr.4 je znázornené, akým spôsobom sa bude určovať celková vzdialenosť od spomínaných servomotorov. Po premeraní týchto vzdialeností zistíme, že celková vzdialenosť rohových končatín ku ťažisku $l_{\text{celk_roh}}$ je väčšia než $l_{\text{celk_str}}$ bočných končatín. Na základe tejto skutočnosti som učinil záver, že spomínané servomotory budú v tejto

póze viac namáhané v rohových končatinách. Z tohto dôvodu zúžime náš výpočet iba pre výpočet potrebného momentu sily pre zmieňovaný servomotor.



Obrázok 3.3: Rovnovážny stav robota – pohľad zhora

Ďalej je dôležité poznamenať, že:

$$l_{celk_roh} \neq l_{celk_str}$$

Aby sme boli schopní zistiť akým spôsobom sú jednotlivé končatiny namáhané, je potrebné určiť, akú časť celkovej hmotnosti robota bez pazúrov máme jednotlivej končatine prideliť. Pre zrýchlenie výpočtu budem vychádzať z predpokladu, že každá končatina podopiera jednu šestinú celkovej hmotnosti robota. Podľa nasledujúceho vzťahu dopočítame moment sily M_{rovnov} , ktorý tento servomotor musí byť schopný generovať:

$$M_{rovnov} = l_{celk_roh} \cdot \vec{F}_G \cdot \sin(\theta) = l_{celk_roh} \cdot (m \cdot \vec{g}) \cdot \sin(90^\circ) \quad (4)$$

$$M_{rovnov} = l_{celk_roh} \cdot \left(\frac{m_{robot} - 6 \cdot m_{fang}}{6} \cdot \vec{g} \right) \cdot \sin(90^\circ) \quad (5)$$

$$M_{rovnov} = 0.175 \cdot \left(\frac{0.710 - 6 \cdot 0.019}{6} \cdot 9.81 \right) \cdot 1$$

$$M_{rovnov} = 0.171 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Ďalej porovnáme maximálny moment sily M_{max} a moment sily serva v kĺbe medzi pazúrom a strednou časťou končatiny pre zdvih končatiny M_{rovnov} :

$$\begin{aligned} M_{max} &\geq M_{rovnov} \\ 0.245 &\geq 0.171 \end{aligned} \quad (6)$$

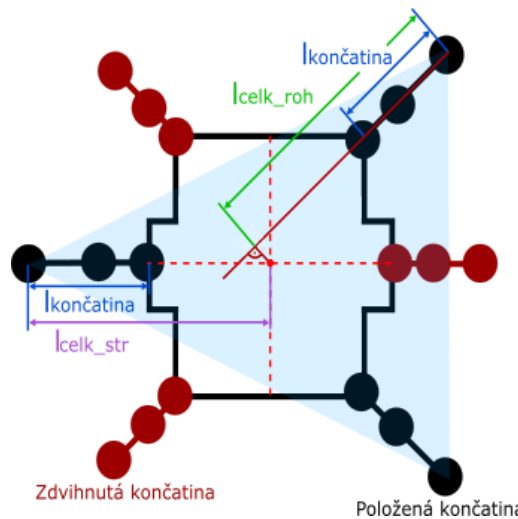
Nakoľko je M_{max} väčší než M_{rovnov} , tak môžeme rovnovážnu pózu považovať za skutočne stabilnú polohu.

3.2.3 Presun robota

Robot sa môže presúvať rýchlym a pomalým pohybom. Tieto pohyby sme si v predošlej kapitole bližšie priblížili. Čo sme si však nepriblížili, je problematika zaťaženia servomotorov jednotlivých končatín pri týchto pohyboch.

Kritické zaťaženie pri rýchlom presune robota

V istom bode rýchleho pohybu bude ťažisko robota stabilizované iba tromi končatinami. Vďaka tomu bude hmotnosť rozložená iba na tri končatiny, čo výrazne zvýši potrebné momenty sily ktoré budú musieť jednotlivé servomotory na zemi položených končatín generovať. Pri výpočte zohľadňujem rovnomerné rozloženie hmotnosti na všetky tri končatiny s ťažiskom nachádzajúcim sa v približnom strede priamkami triangulovaného trojuholníka tak, ako je to znázornené na obrázku Obr. 5. Je treba zdôrazniť, že problematika rozloženia hmotnosti v tomto a v ďalších prípadoch je značne obsiahlejšia a nemusí zodpovedať presnému rozloženiu hmotnosti na jednotlivých končatinách robota. Z tohto dôvodu sa snažím nájsť kompromis medzi komplexnosťou výpočtu a postačujúcim počtom podmienok, ktoré v návrhu problematiky pohybu robota dodržiavam.



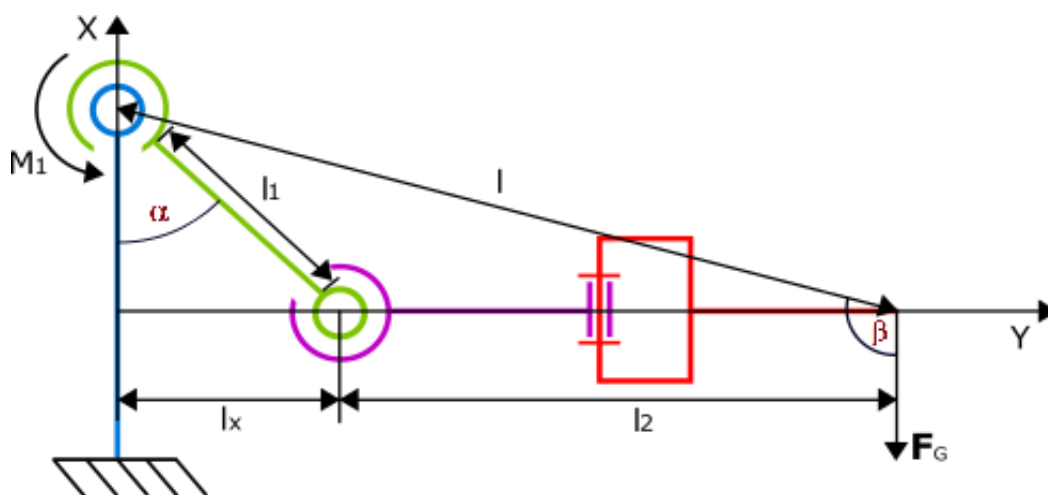
Obrázok 3.4: Kritické zaťaženie pri rýchlom presune – pohľad zhora

$$\begin{aligned}
 M_{\text{rychly}} &= l_{\text{celk_roh}} \cdot \vec{F}_G \cdot \sin(\theta) = l_{\text{celk_roh}} \cdot (m \cdot \vec{g}) \cdot \sin(90^\circ) \\
 M_{\text{rychly}} &= l_{\text{celk_roh}} \cdot \left(\frac{m_{\text{robot}} - 3 \cdot m_{\text{fang}}}{3} \cdot \vec{g} \right) \cdot \sin(90^\circ) \quad (7) \\
 M_{\text{rychly}} &= 0.175 \cdot \left(\frac{0.710 - 3 \cdot 0.019}{3} \cdot 9.81 \right) \cdot 1 \\
 M_{\text{rychly}} &= 0.374 \text{ N} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

Aj v tomto prípade porovnáme maximálny moment sily M_{max} a moment sily serva v kĺbe medzi pazúrom a strednou časťou končatiny pre pózu našej modelovej situácie M_{rychly} :

$$\begin{aligned} M_{\max} &\geq M_{\text{rychly}} & (8) \\ 0.245 &< 0.374 \end{aligned}$$

Keďže je v tomto prípade je M_{rychly} o $0.118 \text{ N} \cdot \text{m}$ väčší než M_{\max} tak hrozí, že by sa mohol jeden zo servomotorov poškodiť. Z tohto dôvodu je potrebné zvoliť odlišnú pózu, ktorú budeme považovať za kritickú. Pri hľadaní tejto pózy budeme postupovať tak, že budeme znižovať zvieraný uhol α medzi pazúrom a strednou časťou všetkých troch končatín, ktoré sú položené na zemi. Znižovaním zvieraného uhlu bude dochádzať ku skracovaniu celkovej dĺžky l . Ďalej sa bude zväčšovať uhol β , pod ktorým pôsobí tiažová sila F_G na konci ramena. Je potrebné poznamenať, že súčet l_x a l_2 sa rovná vzdialenosti od pazúru ku bodu, kde by sa malo nachádzať ťažisko robota.



Obrázok 3.5: Kinematický návrh končatiny pre zistenie kritického zaťaženia

Postupným menením hodnoty uhlu α sme boli schopní znížiť moment sily M_{rychly} :

$$M_{\text{rychly}} = l \cdot \vec{F}_G \cdot \sin(\beta) \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (9)$$

$$M_{\text{rychly}} = 0.162 \cdot \left(\frac{0.710 - 3 \cdot 0.019}{3} \cdot 9.81 \right) \cdot \sin(112^\circ) \quad (10)$$

$$M_{\text{rychly}} = 0.321 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Nakoľko nie je z konštrukčného hľadiska možné viac zmenšiť uhol α , tak túto hodnotu považujeme za najmenšiu možnú, ktorú môžeme s našou konštrukciou dosiahnuť. Moment sily M_{rychly} je v tomto prípade približne o 31% väčší než je maximálny moment sily M_{\max} . Použitím presnejších metód určovania ťažiska a rozloženia hmotnosti na jednotlivé končatiny by som bol schopný výrazne znížiť výpočtom dosiahnutý moment sily M_{rychly} .

Aby sme predišli poškodeniu servomotorov, je nutné zotrvať v tejto póze čo najkratší možný čas.

Kritické zaťaženie pri pomalom presune robota

Táto póza je špecifická tým, že akonáhle sa práve jedna končatina presunie do polohy, kedy už naďalej nie je vo fyzickom kontakte so zemou, tak hmotnosť tej danej končatiny sa pripočíta do hmotnosti ktorú musí ostatných päť končatín uniesť. Stručne povedané, v tomto prípade musí byť robot schopný udržať túto hmotnosť na zvyšných piatich končatinách.

$$M_{\text{pomaly}} = l_{\text{celk_roh}} \cdot \overrightarrow{F_G} \cdot \sin(\theta) = l_{\text{celk_roh}} \cdot (m \cdot \vec{g}) \cdot \sin(\alpha) \quad (11)$$

$$M_{\text{pomaly}} = l_{\text{celk_roh}} \cdot \left(\frac{m_{\text{robot}} - 5 \cdot m_{\text{fang}}}{5} \cdot \vec{g} \right) \cdot \sin(90^\circ) \quad (12)$$

$$M_{\text{pomaly}} = 0.175 \cdot \left(\frac{0.710 - 5 \cdot 0.019}{5} \cdot 9.81 \right) \cdot 1$$

$$M_{\text{pomaly}} = 0.211 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Porovnáme dopočítaný maximálny moment sily M_{max} a moment sily serva v kĺbe medzi pažúrom a strednou časťou končatiny pre zdvih končatiny M_{pomaly} :

$$\begin{aligned} M_{\text{max}} &\geq M_{\text{pomaly}} \\ 0.245 &\geq 0.211 \end{aligned} \quad (13)$$

M_{max} väčší než M_{pomaly} . Táto skutočnosť znamená, že pomalý pohyb zabezpečuje stabilitu robota a nijako nepreťažuje servomotory.

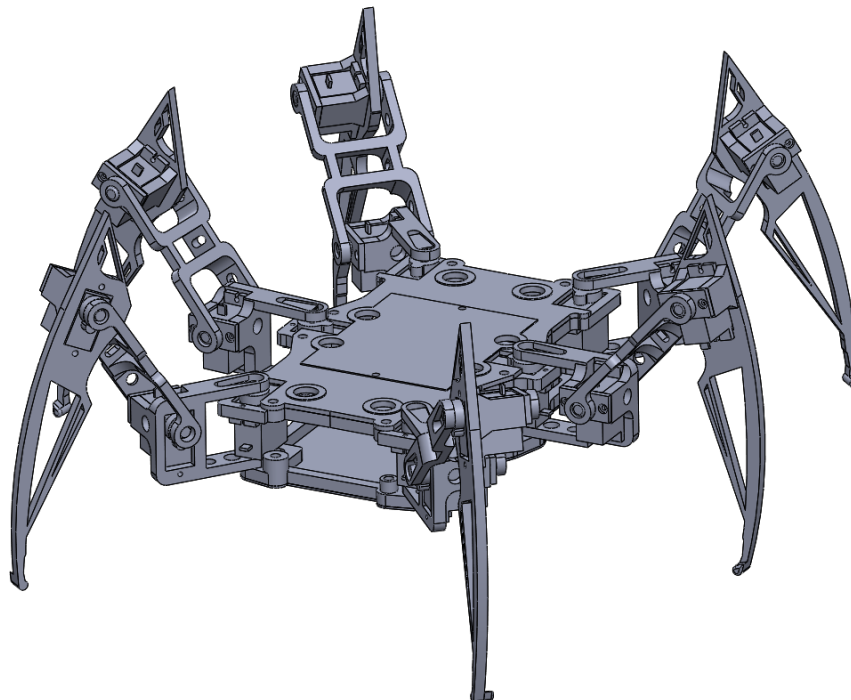
4 SKELET ROBOTA

4.1 Návrh skeletu robota

Skelet robota ako taký bude tvoriť podstatnú časť hmotnosti robota a preto je veľmi dôležité aby sa na to dbalo už počas návrhu. Všetky časti robota boli navrhnuté pomocou 3D CAD software SOLIDWORKS. Takto pripravené časti budú neskôr skomprimované do formátu STL a následne budú pripravené na výrobu pomocou technológie 3D tlače.

Tabuľka 4.1: Súhrn Častí robota namodelovaných v prostredí SOLIDWORKS

Časti robota	Počet kusov
Kryt – spodná časť	1
Kryt – vrchná časť	1
Rám - vrchná časť	1
Rám - spodná časť	1
Časť končatiny - Pazúr	6
Časť končatiny - Stred	6
Časť končatiny - Rameno	6
Spojovací kĺb	12



Obrázok 4.1: 3D model skeletu šesťnožca

4.1.1 Materiál na výrobu skeletu

Materiál, z ktorého bude skelet robota vyrobený, musí spĺňať niekoľko základných kritérií, ako napríklad požiadavky na pevnosť materiálu, jeho vlastnosti pri namáhaní, možnosť dodatočného opracovania, cena, hmotnosť a iné.

Výber materiálov, ktoré môžeme využiť na tvorbu skeletu sa nám ďalej zužuje tým, že som sa rozhodol využiť na prototypovanie rýchlu a pomerne lacnú technológiu 3D tlače. Táto technológia spočíva v postupnom vrstvení materiálu až kým nedôjde k úplnému vyhotoveniu výslednej časti skeletu. Výrobca 3D tlačiarne, ktorú budem používať na výrobu častí skeletu uvádza iba možnosť tlače pomocou ABS a PLA materiálu.

Z tohto dôvodu porovnáme práve tieto dva materiály:

PLA

Výhody:

- Nižší bod tavenia
- Krajší výsledný produkt

Nevýhody:

- Cena materiálu
- Potreba chladiť tlačенý materiál
- Menšia ohybnosť

ABS

Výhody:

- Cena materiálu
- Vysoká odolnosť materiálu voči vonkajším vplyvom
- Tuhosť materiálu

Nevýhody:

- Vyšší bod tavenia
- Potreba ohrevnej dosky 3D tlačiarne
- Často problematická tlač
- Vyššia toxicita plynov pri tavení ABS materiálu v porovnaní s PLA

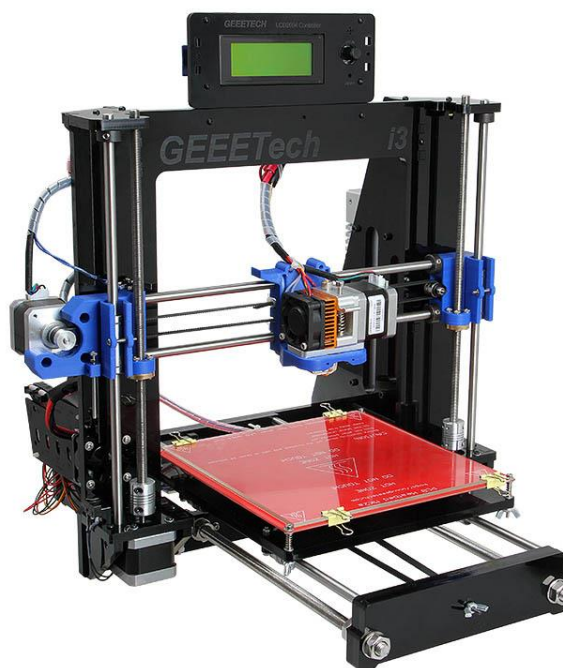
Po zvážení všetkých možností som sa rozhodol použiť PLA materiál. Nakoľko tlač bude prebiehať v domácom prostredí bez špeciálnych odvetrávacích prvkov, tak pri rozhodovaní som do značnej miery prihliadal na toxicitu plynov, ktoré sa môžu uvoľňovať pri zahriati materiálu nad bod tavenia.

4.2 3D tlač skeletu robota

Výroba všetkých častí skeletu bude prebiehať na 3D tlačiarňi Acrylic Prusa Mendel I3 od firmy Geeetech. Program Repetier-Host využívame na pripojenie počítača ku 3D tlačiarňi. Ďalej je možné pomocou tohto programu konfigurovať počítačové nastavenie a odosielať inštrukcie 3D tlačiarňi. Tento program nám ďalej umožňuje previesť STL formát časti skeletu do dátového formátu G-Code. Takto spracované STL dáta vo formáte G-Code spolu s hlavičkou konfigurácie tlačiarne uložíme napríklad na SD

kartu, ktorú vložíme do 3D tlačiarne. Po spustení nami pripraveného súboru z SD karty, začne 3D tlačiareň vyrábať časť skeletu. Pred tým než vôbec spustíme nami pripravený súbor, tak na dosku, na ktorú budeme vrstviť PLA materiál, nanesieme tenkú vrstvu lepidla. Tlačiareň začne na nahriatu podložku cez rozžhavenú trysku s priemerom otvoru 0.2 mm nanášať PLA materiál, ktorý bude po opustení trysky okamžite chladený pomocou ventilátora. Takýmto spôsobom sa bude vrstviť materiál od najspodnejšej, až po najvyššie postavenú vrstvu.

Po ukončení tlače sa tryska presunie mimo tlačiacu plochu kde vychladne. Po vychladnutí dosky z nej v tejto chvíli už môžeme odobrať finálny produkt. Názornú ukážku výsledku tlače môžete dohľadať v [Prílohe C](#).



Obrázok 4.2: Acrylic Prusa Mendel I3¹

¹ http://www.geeetech.com/wiki/images/7/75/IMG_2077.jpg

5 ELEKTRONIKA ROBOTA

5.1 Riadiaca elektronika

Riadiacu jednotku môžeme rozdeliť na niekoľko myslených blokov. Tieto bloky rozdeľujeme podľa toho, akú funkciu budú zastávať:

- Riadiaci blok
- Komunikačný blok
- Výkonový blok

Riadiaci blok – je blok obsahujúci 8-bitový mikrokontrolér ATmega328-PU; 16 MHz kryštál, ktorý udáva frekvenciu, s ktorou bude mikrokontrolér operovať; kontroléry PCA9685 ovládajúce pomocou PWM signálu servomotory. Tento blok vyžaduje napájacie napätie 5V. Logická úroveň reprezentujúca hodnotu TRUE je v tomto obvode reprezentovaná napätím 5V.

Komunikačný blok – pozostáva z Wi-Fi modulu ESP8266. Blok vyžaduje napájacie napätie 3,3V. Logická úroveň s ktorou pracuje modul je taktiež 3,3V. Aby nedošlo ku poškodeniu modulu, je potrebné zabezpečiť konverziu logických úrovní pri komunikácii s mikrokontrolérom ATmega328-PU.

Výkonový blok – je prioritne určený na prevod napätových úrovní a na distribúciu elektrickej energie z batérie do jednotlivých častí riadiacej elektroniky robota a servomotorov. Plošný spoj pracuje s tromi napätovými úrovňami 6V, 5V a 3,3V. Tieto napätové úrovne sú zabezpečené stabilizátormi napätia vhodne rozmiestnenými na DPS.

5.1.1 Návrh plošného spoja

Celkový návrh plošného spoja bol vyhotovený pomocou programu CadSoft EAGLE. Tento software je optimalizovaný na rýchly a prehľadný návrh. V prvotnej fáze som si navrhol schému zapojenia tak, ako je to znázornené v [Prílohe A](#). Väčšina súčiastok, ktoré budeme osadzovať, sa nenachádzajú v základných knižniciach. Z tohto dôvodu som si musel vytvoriť vlastnú knižnicu, kde som si vytvoril puzdrá a schematické značenie pre špecifické súčiastky. Pri výrobe jednotlivých schematických značiek a puzdier som využíval nákresy z katalógových listov. V prípade, že sa v katalógovom liste nenachádzal dostatočný grafický opis puzdra alebo schematickej značky, prihliadal som na to, ako boli vytvorené knižnice pre súčiastky podobných tvarov a veľkostí.

Po navrhnutí celej schémy zapojenia som pristúpil ku rozmiestneniu súčiastok na plošnom spoji. V tomto bode je dôležité dbať na to, ako budú vedené cesty. Po

preskúmaní finančných a technologických možností som sa rozhodol, že najlepšou voľbou bude zvoliť jednovrstvový plošný spoj. Nosným materiálom tohto plošného spoja je laminát Nanya FR4 0/35, splňujúci RoHS [4]. Pri výbere plošného spoja je dôležité vziať do úvahy maximálny prúd, ktorý bude vedený jednotlivými cestami. Aby nedošlo ku nadmernému zvýšeniu teploty plošného spoja, je potrebné optimalizovať hrúbku a šírku medenej vrstvy. Hrúbku medenej vrstvy som zvolil $70\mu\text{m}$. Vzhľadom na vznik úbytku napätia na cestách je vhodné nenavrhopvať ich zbytočne dlhé. V neposlednom rade je vhodné oddeliť VCC a hlavne GND cesty výkonovej časti (servomotory) od logickej časti (mikrokontrolér, Wi-Fi modul, kontroléry).

5.1.2 Využitie komunikačné rozhrania

Aby boli jednotlivé časti schopné komunikovať, je potreba dôkladne sa zoznámiť s problematikou komunikačného rozhrania, ktoré daný modul, mikrokontrolér alebo kontrolér využíva. V mojom prevedení budeme využívať nasledovné komunikačné rozhrania:

UART – je asynchrónne sériové rozhranie, ktorého dátový formát a rýchlosť posielania dát je nastaviteľný. Dáta, ktoré sú v pamäti uložené paralelne prekonvertuje na seriálový prúd dát, ktorý je následne preposlaný do druhého zariadenia, kde je spätne preskladaný do dát paralelného formátu. Rýchlosť posielania dát pomocou tohto rozhrania sa udáva v jednotke Baud [Bd]. Baud je jednotka modulačnej rýchlosti udávajúcej počet zmien stavov prevodového média za jednu sekundu. Nakoľko predpokladáme, že množstvo dát, ktoré bude prenášané pomocou tohto rozhrania nebude veľké, tak tzv. Baud rate nastavíme na hodnotu odpovedajúcu 9600 bps.² Týmto spôsobom znížime pravdepodobnosť znehodnotenia dát pri prenose pomocou tohto rozhrania. Toto rozhranie využívame na komunikáciu mikrokontroléru ATmega328-PU s Wi-Fi modulom ESP8266. Keďže mikrokontrolér pracuje s vyššou napäťovou úrovňou, je potrebné napätie znížiť na odpovedajúcu napäťovú úroveň pre Wi-Fi modul. Túto konverziu zabezpečíme deličom napätia tvoreným tromi rezistormi. Komunikácia pomocou tohto rozhrania vyžaduje dvojvodičové zapojenie.

I²C – je zbernica definovaná firmou Philips, ktorá zabezpečuje jednoduchú komunikáciu medzi mikrokontrolérom a ďalšími zariadeniami. Tento druh komunikácie vyžaduje dvojvodičové pripojenie. Na rozdiel od rozhrania UART je výhodou možnosť zapojenia viacerých zariadení do jednej zbernice. Túto zbernicu využívame na komunikáciu mikrokontroléru s kontrolermi PCA9685.

5.1.3 Mikrokontrolér Atmega328-PU

Je 8-bitový mikrokontrolér s veľkým výpočtovým výkonom od firmy Atmel. Je založený na pokročilej RISC architektúre, vďaka ktorej disponuje až 131 inštrukciami

² bits per second – bity za sekundu

pričom väčšina z nich je vykonávaná v jedinom hodinovom cykle. Disponuje pamäťou typu EEPROM s veľkosťou 1 kB, 2kB SRAM a až 32kB flash pamäťou. Počet možných zapisovacích a vymazávacích cyklov pre flash pamäť je približne 10 000. Pre EEPROM pamäť je to až 100 000 cyklov.

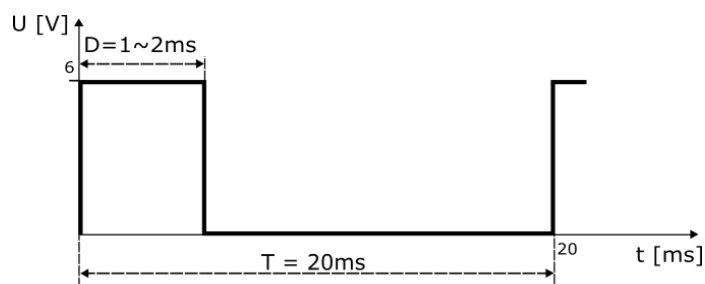
Maximálny možný počet programovateľných vstupno-výstupných vývodov je 23. V [Prílohe B](#) máme možnosť nahliadnúť do návrhu rozloženia vývodov tohto mikrokontroléru.

Vnútrošná logika mikrokontroléru je napájaná jednosmerným prúdom s napätím 4.5 V až 5.5 V pri takte mikrokontroléru od 0 MHz až do 20 MHz V našom prípade využívame pre takt na 16 MHz a napájanie jednosmerným prúdom z lineárneho stabilizátora so stabilizovaným napätím 5 V.

Do tohto mikrokontroléru bude nahratý kód, ktorý bude riadiť všetky elementárne procesy robota. Ďalej bude komunikovať s ďalšími perifériami na plošnom spoji ako napríklad ovládačmi PCA9685 a WI-FI modulom ESP8266.

5.1.4 Riadenie servomotorov

Servomotory použité v projekte budeme riadiť pomocou Impulzovej šírkovvej modulácie (ďalej PWM) signálu s konštantnou periódou opakujúceho sa signálu $T = 20 \text{ ms}$ a meniacou sa striedou D v intervale 1 ms až 2 ms. Šírka striedy sa bude meniť v závislosti od potreby natočenia servomotoru.

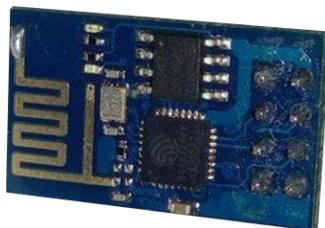


Obrázok 5.1: veľkosť riadiaceho PWM signálu

Na samotný proces riadenia využívame dva ovládače PCA9685, ktoré riadime pomocou I²C zbernice mikrokontrolérom Atmega328-PU. Tento 16-kanálový ovládač dokáže na výstup každého z jeho kanálov privádzať nami definovaný PWM signál s rovnakou periódou. Veľkou výhodou tohto ovládaču je možnosť naprogramovať frekvenciu (resp. periódu) signálu v rozmedzí 24 Hz až 1 526 Hz s prispôsobiteľnou striedou v rozsahu od 0 % do 100%. Výstupný signál má a 12-bitové rozlíšenie, vďaka čomu máme možnosť jednu periódu vzorkovať až na 4 096 krokov. Ovládače ďalej disponujú vstupmi piatimi vývodmi, pomocou ktorých je možné definovať adresu jednotlivých ovládačov tak, aby bolo možné rozpoznať komunikáciu na zbernici medzi mikrokontrolérom a jednotlivými kontrolérmi. Napájacie napätie ovládaču PCA9685 je potrebné udržiavať v intervale 2.3V až 5.5V.

5.1.5 Wi-Fi modul

V ďalšej fáze tohto projektu predpokladáme využitie robota na rôzne účely. Z tohto dôvodu je potrebné už pri návrhu dbať na to, aby robot dokázal prijímať dáta alebo ich odosielať na ďalšie spracovanie. Ako spôsob komunikácie robota s prípadným užívateľským rozhraním som si vybral čip ESP8266EX osadený na samostatnej doske ako modul. Tento čip podporuje štandard 802.11 b/g/n a umožňuje komunikáciu s mikrokontrolérom pomocou sériového rozhrania UART. Jednou z možností modulu je prepnúť sa do módu AP (Access Point), v ktorom je možné pripojiť sa na daný modul s iným zariadením. Pripojenie sa na modul je ošetrené tak, že je vždy možné nadviazať trvalé spojenie práve s jedným zariadením na napevno zadaný port. Toto riešenie je vyhovujúce, nakoľko predpokladáme, že je potrebné mať nadviazanú komunikáciu vždy maximálne s jedným zariadením. V ďalšom návrhu bude možné pomocou takto nadviazaného spojenia posielat' príkazy na pohyb robota, sledovať stav jeho batérie, prenášať dáta zo senzorov na spracovanie do výkonnejšej výpočtovej jednotky, atp.



Obrázok 5.2: Wi-Fi modul ESP8266

5.2 Napájanie

Ako zdroj napájania som zvolil tri Líthium-ionové batérie Sanyo 18 650. Výhoda zvolených batérii spočíva v možnosti opakovaného nabíjania s počtom až 1 000 nabíjacích cyklov. Výrobcom udávaná kapacita batérie je 3 400 mAh. Hmotnosť jednej batérie je približne 46 g. Priemerné merateľné napätie jednej batérie sa pohybuje medzi hodnotami 3.6 V až 3.7 V. Pri plnom nabití výrobca udáva merateľné napätie až 4.2 V. Na konci vybíjacieho cyklu napätie na batérii klesne na hodnotu 2.75 V. V mojom prípade batérie využívam v sériovom zapojení. Týmto zapojením som schopný napájať robota napätím v rozsahu 8.25 V až 12.6 V. Pri bežnej prevádzke je merané napätie sériového zapojenia batérii ustálené v okolí hodnoty napätia 11 V.



Obrázok 5.3: Sériové zapojenie troch batérii Sanyo 18 650 v púzdre

6 PROGRAMOVÁ ČASŤ

Programová časť bola písaná pomocou vývojového prostredia Visual Studio a Arduino IDE. V tomto projekte bolo taktiež potrebné využívať znalosti niekoľkých programovacích jazykov na to, aby som sa prispôbil požiadavkám na rýchlosť, kompaktnosť a v neposlednom rade kompatibilitu kódu s danou platformou, pre ktorú je kód určený. V nasledujúcej časti tejto kapitoly sa sústreďíme na bližší rozbor jednotlivých častí programu:

- Knižnica pre riadenie servomotorov

-je knižnica, v ktorej sa nachádzajú funkcie spravujúce komunikáciu medzi mikrokontrolérom a ovládačmi PCA9685. Program bol písaný vo Visual Studio IDE za pomoci programovacieho jazyka C++. Skladá sa z dvoch častí – zo zdrojového kódu s príponou „.cpp“ a hlavičkového súboru s príponou „.h“.

- Hlavný program

-na tvorbu tohto programu som použil Arduino IDE, ktoré je prispôbené na programovanie vývojových dosiek od firmy Arduino. Program je tvorený pomocou programovacieho jazyka Arduino, ktorý pozostáva z množstva C/C++ funkcií, ktoré sú volané v mojom kóde. Takto vytvorený kód si IDE čiastočne upraví, a prepošle priamo C/C++ kompilátoru (avr-g++). Skompilovaný kód je nahratý do mikrokontroléru.

- Aplikácia ConnectMe

-táto aplikácia bola vytvorená vo Visual Studio IDE. Pre správny chod programu sa odporúča spúšťať program v operačnom systéme Windows 10. Ďalej je potrebné, aby zariadenie disponovalo plne funkčnou bezdrôtovou kartou splňujúcou špecifikácie IEEE 802.11b/g/n, s ktorou bude pripojené do bezdrôtovej siete robota. Aplikácia ConnectMe ponúka širokú funkcionálnosť po stránke komunikácie s ďalšími zariadeniami. Návrh tejto aplikácie sa sústreďoval hlavne na testovanie komunikácie a vývoj komunikačného protokolu pre robota. Vo finálnej verzii môžeme túto aplikáciu využívať na testovanie komunikácie a riadenie rôznych robotov podľa našich požiadavkov.

6.1 Hlavný program

Je program, ktorý bol nahraný do mikrokontroléru a riadi veškeré procesy riadiace chod robota. Tento program sa skladá celkovo z štyroch častí:

- Inicializačná časť
- Funkcia setup()
- Funkcia loop()
- Pohybové funkcie

Inicializačná časť

Na úplnom začiatku tejto časti si nainkludujeme knižnicu, ktorú sme vytvorili za účelom komunikácie medzi mikrokontrolérom a ovládačmi PCA9685. Ďalej inkludujeme knižnice, ktoré využívame na volanie funkcií, ktoré podporujú seriálovú komunikáciu.

V tejto časti ďalej inicializujeme a následne pridelujeme prvotnú hodnotu premenným, ktoré reprezentujú hodnotu počiatočného natočenia servomotorov. V kóde rovnako definujeme pomocné premenné, ktoré sú využívané ako konštanty pre pohybové funkcie.

Tabuľka 6.1: Hodnoty základnej polohy (počiatočné natočenie servomotorov)

	Časť končatiny	Pazúr			Stred			Rameno		
		Pohyb nahor	Zákl. poloha	Pohyb nadol	Pohyb nahor	Zákl. poloha	Pohyb nadol	Pohyb vzad	Zákl. poloha	Pohyb vpred
Ľavá strana robota	Predná končatina	+	325	-	-	200	+	-	420	+
	Stredná končatina	-	370	+	+	475	-	-	350	+
	Zadná končatina	-	335	+	+	490	-	-	250	+
Pravá strana robota	Predná končatina	-	350	+	+	480	-	+	270	-
	Stredná končatina	+	325	-	-	0	+	+	310	-
	Zadná končatina	+	245	-	-	210	+	+	370	-

Funkcia setup()

V tejto funkcii vytvárame seriálovú komunikáciu medzi mikrokontrolérom, a Wi-Fi modulom ESP8266. Ďalej nastavujeme baud rate tejto komunikácie na hodnotu 9600 bitov za sekundu.

Následne natáčame končatiny robota do počiatočnej polohy, z ktorej bude vychádzať pri akomkoľvek ďalšom pohybe. Pri tomto nastavovaní použijeme premenné, ktoré sme si za týmto účelom vytvorili v inicializačnej časti.

Na záver začneme komunikovať s Wi-Fi modulom ESP8266. Modul vyresetujeme a nastavíme ho do AP módu. V tomto móde bude ďalej čakať na práve jedno zariadenie, ktoré sa naň má pripojiť. Číslo portu na ktorom bude počúvať nastavujeme na hodnotu „9999“. Základná IP adresa tohto zariadenia je výrobcom nastavená na „192.168.4.1“.

Funkcia loop()

Táto funkcia je ekvivalentnou náhradou funkcie while(TRUE) v iných programovacích jazykoch. Funkcia loop() sa začne vykonávať hneď po tom, čo program prejde inicializačnú časť a ukončí funkciu setup(). Táto časť programu sa následne vykonáva opakovane od začiatku do konca, po celú dobu trvania kódu.

Vo vnútri tohto uzavretého cyklu dochádza ku odchyťávaniu jednotlivých znakov, ktoré sú po seriálovej komunikácii odosielané z Wi-Fi modulu ESP266. Akonáhle tento modul odošle správu vo formáte reťazcu znakov, tak sú tieto znaky z reťazca zaznamenané. Ďalej sú porovnávané so zadanými reťazcami reprezentujúcimi jednotlivé pohyby robota. Vďaka tomu sme schopný rozpoznať to, aký pohyb robota je vyvolávaný aktuálnou správou, ktorá bola zaznamenaná komunikáciou medzi Wi-Fi modulom robota a aplikáciou ConnectME.

V tejto časti ďalej neusále prebieha aj opačný druh komunikácie. To znamená, že v procese odlaďovania chýb na robotovi je možné do Wi-Fi modulu ESP8266 poslať pomocou seriálovej komunikácie reťazec znakov. Týmto spôsobom môžeme vyvolávať potrebné nastavenia tohto modulu.

Pohybové funkcie

V tejto časti programu sa nachádzajú funkcie, ktoré spravujú pohyb robota. Funkcie su koncipované takým spôsobom, aby každá funkcia obstarávala prave jeden dôležitý pohyb. Takéto funkcie nazývame „jednoduchými“.

Prehľad jednoduchých funkcií pohybu:

- rotLeft() -

Pootočí robota doľava. Stred robota sa v priestore nachádza na rovnakej pozícii pred začiatkom a aj po ukončení tejto funkcie. Počas tohto úkonu dochádza ku zdvihu a natočeniu troch končatín v rovnakom smere o rovnaký uhol smerom doľava, pričom ostatné tri končatiny sa nachádzajú položené na zemi. Ďalej sa zdvihnuté končatiny položia na zem a dochádza ku zdvihnutiu a natočeniu zvyšných troch končatín o rovnaký uhol ako predošlé tri končatiny. Aj tieto končatiny sa položia na zem. Následne dochádza ku natočeniu všetkých ramenných častí končatín tak, aby sa robot opäť vrátil do stabilizovanej polohy.

- rotRight() -

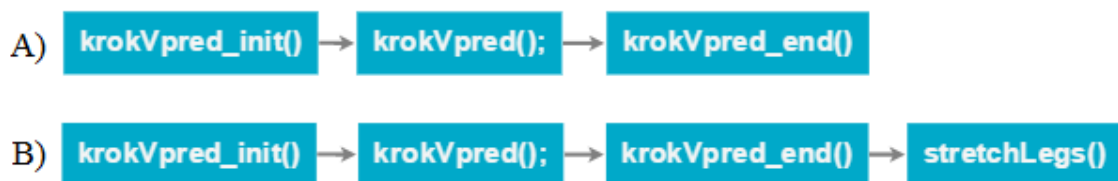
Pootočí robota doprava. Stred robota sa v priestore nachádza na rovnakej pozícii pred začiatkom a aj po ukončení tejto funkcie. Počas tohto úkonu dochádza ku zdvihu a natočeniu troch končatín v rovnakom smere o rovnaký uhol smerom doprava, pričom ostatné tri končatiny sa nachádzajú položené na zemi. Ďalej sa zdvihnuté končatiny položia na zem a dochádza ku zdvihnutiu a natočeniu zvyšných troch končatín o rovnaký uhol ako predošlé tri končatiny. Aj tieto končatiny sa položia na zem. Následne dochádza ku natočeniu všetkých ramenných častí končatín tak, aby sa robot opäť vrátil do stabilizovanej polohy.

- `stretchLegs()`-

Táto funkcia bola vytvorená z dôvodu potreby prípadného poupravenia končatín do stabilizovanej polohy. Počas pohybu robota môže dôjsť k tomu, že sa jedna z jeho končatín pošmykne alebo zachytí. Takáto situácia by mohla viesť ku zvýšenému prúdovému zaťaženiu niektorých servomotorov, čo by malo za následok skracovanie výdrže batérie a spôsobovalo by to výrazný nárast teploty vo vnútri servomotoru pri dlhšom pôsobení tohto zaťaženia.

Za pomoci tejto funkcie postupne nadvihujeme vždy práve jednu končatinu a pokladáme ju opäť na zem. Takýmto spôsobom dochádza ku postupnému nadvihnutiu všetkých šiestich končatín, čo v ideálnom prípade postaví robota do jeho pôvodnej stabilizovanej polohy.

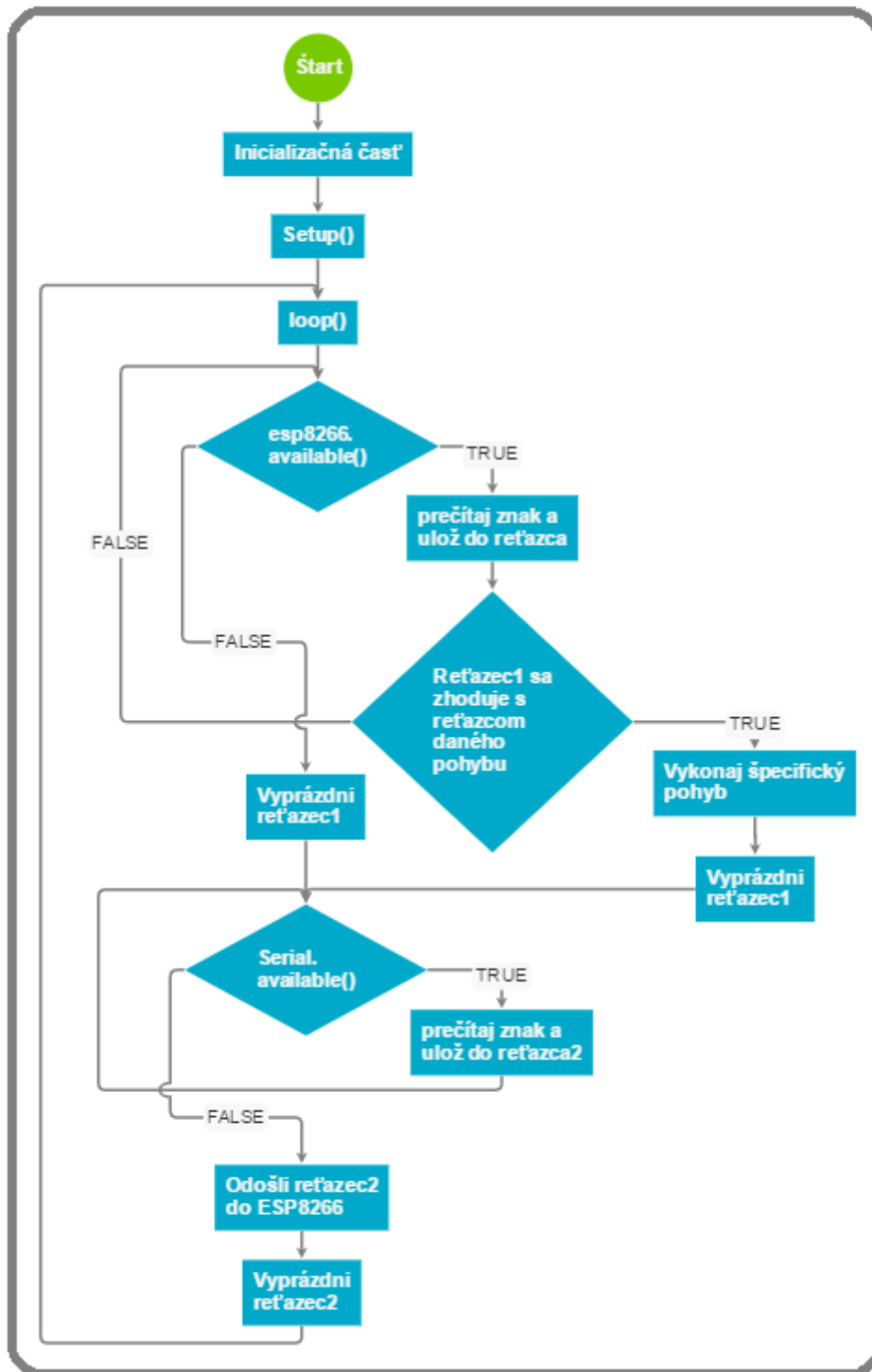
Pohyb vpred sa na rozdiel od tzv. „jednoduchých“ pohybov líši tým, že sa skladá z viacerých funkcií. Táto sekvencia si vyžaduje inicializačný a ukončovací pohyb na to, aby sa krok vpred mohol začať a ukončiť v rovnakej počiatočnej polohe. Na to aby sa tento pohyb správne vykonal je potrebné zavolať tieto funkcie v správnom poradí. (viď. Obrázok 6.1: A). Pri tomto pohybe dochádza ku nadvihovaniu práve troch končatín, pričom zvyšné tri končatiny sa nachádzajú na zemi. Z toho dôvodu môžeme túto sekvenciu označiť ako „rýchly pohyb“.



Obrázok 6.1: Flowchart – A) sekvencia jedného kroku vpred; B) sekvencia jedného kroku vpred s popravením končatín

Aby sme minimalizovali namáhanie servomotorov, ktoré vzniká nechceným prešmykovaním končatín, tak na konci každej sekvencie pohybu vpred zavoláme funkciu „`stretchLegs()`“ (viď. Obrázok 6.1: B). Toto softwarové riešenie znižuje prúdové zaťaženie, čím predlžuje výdrž batérií robota a zároveň výrazne potlačuje prehrievanie servomotorov

Na obrázku 6.1 sa nachádza vyobrazený vývojový diagram, ktorý stručne popisuje, akým spôsobom pracuje celý program robota od jeho počiatku. Je vhodné povšimnúť si, že program robota vlastne nikdy nie je ukončený, nakoľko robot vždy po vykonaní pohybu zotrváva v stave čakania na ďalší príkaz.



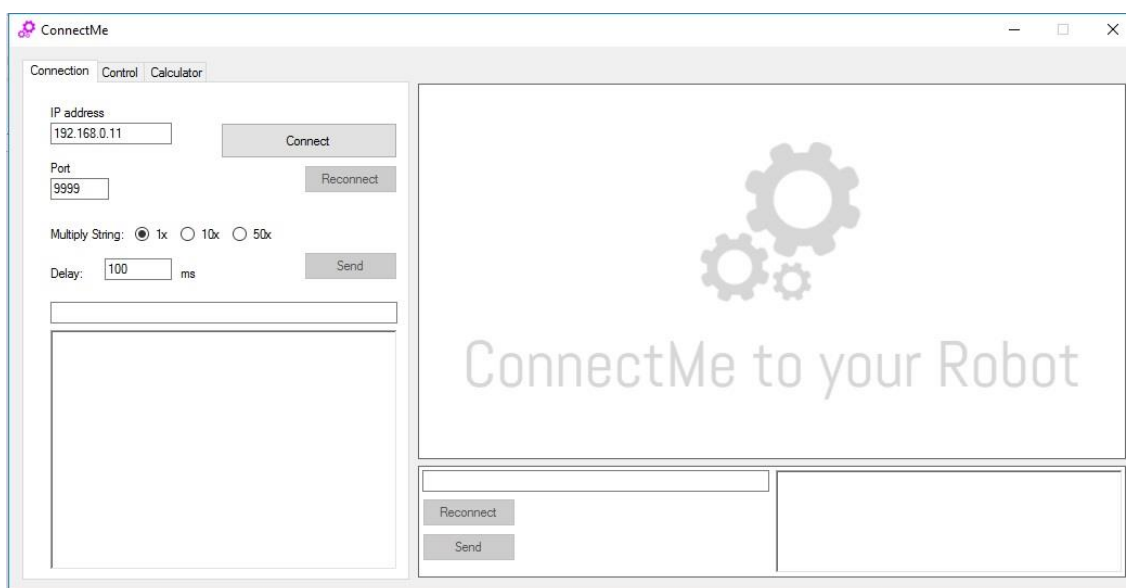
Obrázok 6.2 Flowchart – Program robota

6.2 Aplikácia ConnectMe

Ako je možné vidieť na obrázku 6.1, aplikácia sa skladá z troch hlavných panelov. Každý z týchto panelov ponúka určitú funkcionality, vďaka ktorej je užívateľ schopný naplno využiť potenciál aplikácie ConnectMe.

Rozdelenie okna aplikácie na 3 hlavné panely:

- Hlavný panel (vľavo)
- Interaktívny panel (vpravo hore)
- Panel komunikácie (vpravo dole)

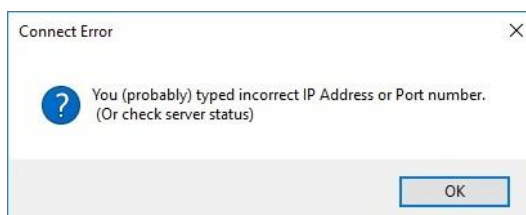


Obrázok 6.3: Aplikácia ConnectMe – Connection

Hlavný panel

Tento panel slúži na ovládanie základných vlastností aplikácie. Vo vrchnej časti panelu sa nachádza záložka „Connection“, „Control“ a „Calculator“.

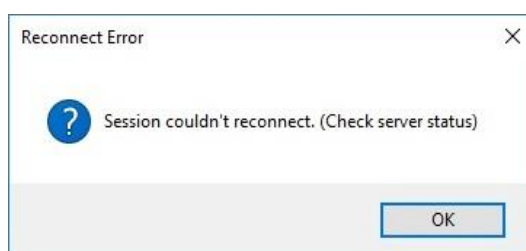
Záložka Connection ponúka možnosť pripojiť sa v sieti na daný port na nami zadanej IP adrese. Po odkliknutí tlačidla „Connect“ sa aplikácia pokúsi o nadviazanie spojenia so zariadením (v našom prípade s robotom). Je možné, že sa nepodarí nadviazať spojenie. V tomto prípade sa na obrazovke zobrazí informačné okno podľa obrázku 6.2, ktoré indikuje, že je treba prekontrolovať správnosť zadaných údajov a dostupnosť pripojenia na čajakúce zariadenie (robotu).



Obrázok 6.4: Aplikácia ConnectMe – Connect Error

Po úspešnom pripojení sa tlačidlo „Connect“ a polia na zadávanie IP adresy a portu stanú blokovými. Tlačidlá „Reconnect“ a „Send“ budú sprístupnené. Následne si môžeme zvoliť počet odosielaných správ, oneskorenie, s ktorým budú jednotlivé správy za sebou odosielané a dáta v reťazovom formáte. Po nastavení všetkých parametrov a napísaní správy klikneme na tlačidlo „Send“. V tomto momente začneme nami zadané dáta prijímať pomocou Wi-Fi modulu ESP8266 na strane nášho zariadenia, s ktorým komunikujeme. Po ukončení odosielacej sekvencie sa nami zobrazené dáta vypíšu v textovom okne v spodnej časti aplikácie. Všetky správy sú v tomto textovom okne uchovávané od počiatku spustenia programu, až do doby ukončenia jeho chodu.

Počas pripojenia môže dôjsť ku prerušeniu komunikácie s robotom. Táto udalosť je ošetrená možnosťou opätovného pripojenia ku rovnakému zariadeniu pomocou tlačidla „Reconnect“. V prípade, že stlačíme tlačidlo „Reconnect“ a aplikácia nie je možná opätovne nadviazať toto spojenie, tak dôjde ku zobrazeniu informačného okna podľa obrázku 6.3. Následne sa zablokuje tlačidlo „Send“, ktoré sa sprístupní až po úspešnom opätovnom nadviazaní komunikácie.



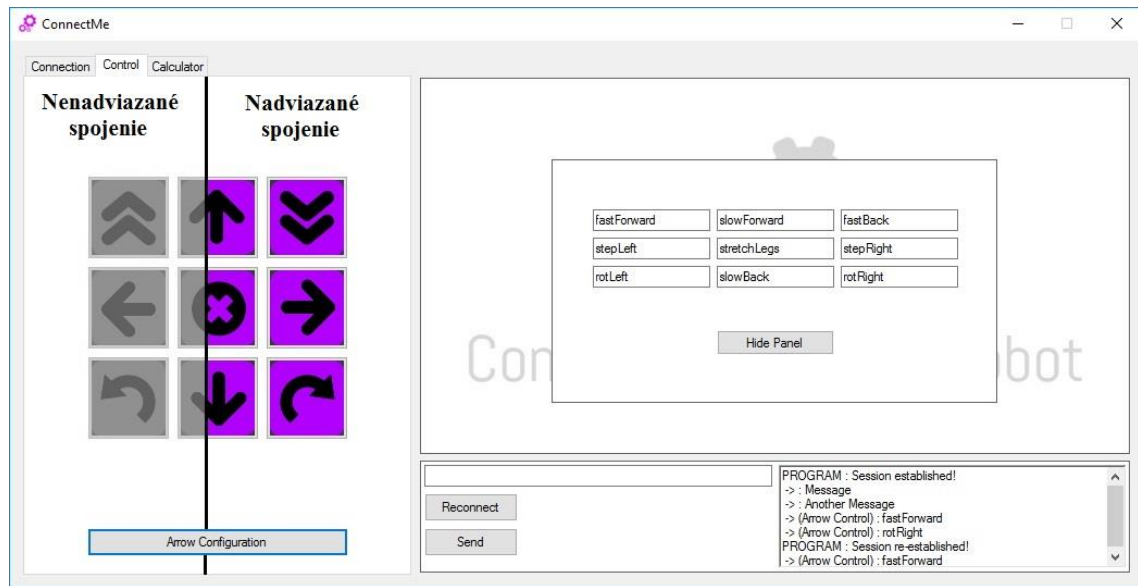
Obrázok 6.5: Aplikácia ConnectMe – Reconnect Error

Ďalej sa presunieme do záložky „Control“, ktorá sa nachádza vo vrchnej časti hlavného panelu. Táto záložka slúži na rýchle a intuitívne ovládanie zariadenia pomocou tlačidiel, ktoré si môže užívateľ prispôbiť podľa svojej potreby, tak aby dokázalo čo najviac zefektívniť ovládanie prípadného robota. V tejto záložke môžeme nájsť deväť nastaviteľných tlačidiel a tlačidlo „Arrow Configuration“. Po stlačení tlačidla „Arrow Configuration“ sa nám v oblasti interaktívneho panelu zobrazí okno, pomocou ktorého môžeme jednotlivým tlačidlám priraďovať reťazec znakov. Pri každom spustení aplikácie sa do jednotlivých textových polí uloží predefinovaný znakový reťazec. Toto nastavenie si môže užívateľ ľubovoľne pozmeniť podľa vlastnej potreby. Reťazce znakov sú následne podľa pozície priradené ku prislúchajúcemu nastaviteľnému tlačidlu. Opätovným stlačením tlačidla „Arrow Configuration“ alebo tlačidla „Hide Panel“ môžeme zneviditeľniť toto okno.

V prípade, že sme ešte nenadviazali spojenie so zariadením alebo sa nám pomocou tlačidla „Reconnect“ nepodarilo opätovne pripojiť ku zariadeniu, tak tlačidlá zostávajú zablokované. V tomto stave je každé z týchto tlačidiel zašednuté a nie je možné ho stlačiť. V prípade nadviazaného spojenia so zariadením je pozadie tlačidiel jasne fialové, čo indikuje možnosť využiť ich na odosielanie užívateľom prednastavených hodnôt. Po stlačení tlačidla dôjde ku zablokovaniu stlačenia ostatných

tlačidiel po dobu dvoch sekúnd. Toto opatrenie počíta s maximálnym potrebným časom vykonania pohybu robota a tým pádom by malo zabrániť nechcenému viacnásobnému zadaniu rovnakého, prípadne iného príkazu po dobu tohto intervalu.

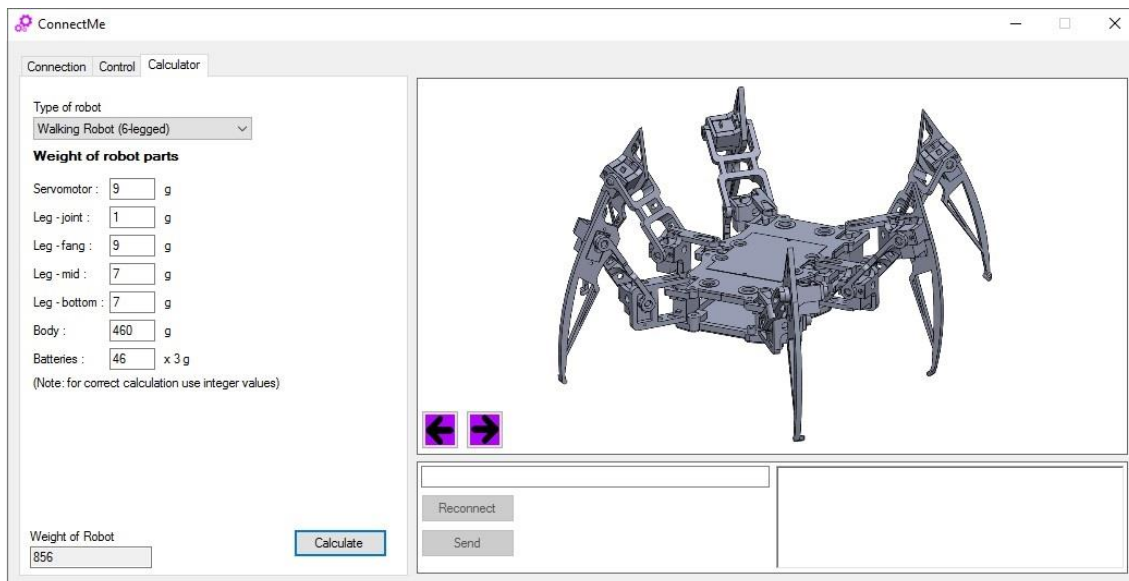
Je možné si všimnúť, že správy, ktoré sme odoslali týmto spôsobom sa vypisujú do textového poľa odoslaných správ s hlavičkou „(Arrow Control)“. Vďaka tomuto indikátoru dokážeme jednoducho odlišiť, akým spôsobom sme v danej chvíli odoslali znakový reťazec.



Obrázok 6.6: Aplikácia ConnectMe – Control

V záložke „Calculator“ si môžeme pomocou rozbaľovacieho zoznamu vybrať, s ktorým robotom budeme interagovať. V tejto verzii aplikácie ConnectMe, sa vo výbere nachádza iba položka „Walking Robot (6-legged)“ a „Your Next Robot“. Možnosť voľby položky „Your Next Robot“ reprezentuje, že je aplikácia plne pripravená na jednoduchú implementáciu ďalších rozšírení pre inú verziu alebo typ robota. Ďalej sa budeme zaoberať položkou „Walking Robot (6-legged)“. Po zakliknutí tejto voľby sa nám interaktívny panel zmení z úvodného loga na galériu obrázkov, ktoré je možné prepínať pomocou šípok v ľavej dolnej časti interaktívneho panelu. Galéria ponúka pohľad na zobrazenie 3D modelu robota, reálneho robota a na vyobrazenie predpokladaného ťažiska robota pri pohľade zhora pri rýchlom pohybe.

Ďalej je možné využiť poznatkov o hmotnosti jednotlivých častí robota a stlačením tlačidla „Calculate“ prepočítať tieto hmotnosti do celkovej hmotnosti robota. Tento triviálny prepočet slúži ako demonštrácia poteciálu záložky „Calculate“ v prípade ďalšieho rozšírenia tejto aplikácie o komplexnejšie výpočty pre jednotlivých robotov.



Obrázok 6.7: Aplikácia ConnectMe – Calculator

Interaktívny panel

Ako vyplýva z predošlého textu, tak aktuálnou funkciou interaktívneho panelu v tejto verzii aplikácie je možnosť zobrazovať dodatočné informácie o robotovi alebo o jeho riadení (Obrázky, zobrazovanie panelu znakových reťazcov).

Panel komunikácie

Aktívne prvky na tomto paneli majú totožné vlastnosti ako tie z hlavného panelu v záložke „Connection“. Výhodou tohto panelu je, že aj v prípade, ak sa užívateľ nachádza v ktorejkoľvek inej záložke, tak je schopný odosielať správy, sledovať odoslané správy (včetně v minulosti odoslaných) a prípadne obnoviť spojenie so zariadením.

Výhodou aplikácie ConnectMe oproti iným voľne dostupným komunikačným aplikáciám je, že bola vytvorená tak, aby bola jednoducho rozšíriteľná o ďalšiu funkcionálnosť s možnosťou využitia pre rôzne zariadenia. Vďaka tomuto sa podarilo vytvoriť nástroj, ktorý je vhodný a priamo určený pre vývojové, a edukatívne účely v oblasti robotiky.

7 VÝROBA A KONŠTRUKCIA ROBOTY

1. Po namodelovaní skeletu a prepočítaní všetkých potrebných momentov síl som mohol pristúpiť ku 3D tlači. Všetky časti skeletu, z ktorých sa skladá robot boli vytlačené na mojej vlastnoručne postavenej 3D tlačiarni Acrylic Prusa Mendel I3 od firmy Geeetech.
2. Dĺžka tlače presahovala 24 hodín. Po nadobudnutých skúsenostiach s tlačou predošlej štvornohej verzie robota vyrobeného z ABS som sa rozhodol využiť PLA materiál. Vďaka tomuto rozhodnutiu som dokázal doceliť kvalitnejší vzhľad a počet vadných výtlačkov sa podstatne znížil. Po vytlačení všetkých častí došlo k tomu, že niektoré diely nedosahovali potrebnú presnosť spôsobenú nepresným krokom 3D tlačiarnie a nežiadanou zvýšenou rozťažnosťou materiálu čo miestami spôsobovalo zlé doliehanie spojov alebo malé rozmery dier. V tomto prípade už nebolo potrebné všetky časti vytlačiť nanovo ako v minulej verzii robota. Niektoré časti, ktoré bolo potrebné popraviť, sa nahradili upravenými a nanovo vytlačenými kusmi tak, aby sa čo najviac zvýšila kvalita kostry robota. Takto vytlačené časti skeletu sú plne pripravené na stavbu šesťnožca.
3. Po úspešnom dokončení všetkých častí skeletu do každého kĺbu umiestnime a následne upevníme dvomi skrutkami servomotor TowerPro SG90 Servo. Takto pripravené články pospájame a nastavíme náklon jednotlivých servomotorov do ich maximálnych hodnôt aby neskôr nedošlo k tomu, že sa nebude možné dostať do určitej polohy (nakoľko servomotor sa pohybuje iba v intervale 0° až 180°). Takto nastavenú polohu servomotorov zafixujeme plastovým ramenom a následne ho uchyťme skrutkou ku hriadeli servomotora. Každé takto upevnené plastové rameno zalejeme silikónom tak, aby sme zabránili nechcenému voľnému pohybu v jednotlivých kĺboch každej z častí. Zo zadnej strany kĺbu medzi pazúrom a strednou časťou článku upevníme spojovací kĺb dvomi skrutkami do plastu. Posledným krokom tohto bodu je uloženie vodičov zo servomotorov do čiernej, špirálovej pásky. Týmto krokom sme dokončili stavbu končatín.
4. Pred tým, než budeme schopní dokončiť robota, potrebujeme vyhotoviť nami navrhnutý plošný spoj s riadiacou elektronikou. Neosadený plošný spoj bol vyrobený v externej firme. Na túto DPS následne napájame jednotlivé prvky podľa schémy zapojenia, ktorú sme vopred navrhli. Na dosku upevníme nami predpripravené moduly. Na záver do päťice umiestnenej v strede dosky vložíme naprogramovaný mikrokontrolér ATmega328-PU

5. V tomto bode pristúpime ku konštrukcii robota do finálnej podoby. Každé rameno upevníme ku spodnej časti rámu a položíme na tento celok vrchnú časť. Na spodnú časť rámu priložíme spodnú časť krytu. Do vnútra robota vložíme riadiacu elektroniku. Ďalej si na vrchnú časť krytu upevníme krabičku s batériami a cez jeden z otvorov krytu prevlečíme a vyvedieme vodiče. Vodiče pripojíme na kolíky, ktoré sú určené pre zemniaci a napájací vodič. Cez väčšie kruhové otvory vyvedieme príslušné konektory zo servomotorov, ktoré následne pripojíme na dosku riadiacej elektroniky. Vrchnú časť krytu priložíme na vrchnú časť rámu a takto zostavené telo robota upevníme k sebe maticovými skrutkami, ktoré vkladáme do dier po obvode robota. Takto zostavený robot je plne funkčný, a pripravený na okamžité použitie.

ZÁVER

- Navrhol som kinematický návrh končatín a vyriešil problém so stabilitou, a presunom ťažiska robota. Ďalej som navrhol dve možnosti riešenia pohybu robota vpred, pričom výber daného pohybu som odôvodnil na základe rôznych kritérií.
- Vytvoril som modely každej z častí skeletu štvornožca pomocou 3D CAD software SOLIDWORKS a následne každú časť vytlačil na 3D tlačiarňi Acrylic Prusa Mendel I3 od firmy Geeetech. Diskutoval som klady a zápory rôznych materiálov, ktoré by mohli byť použité na výrobu skeletu robota. Ako stavebný materiál na skelet robota som použil čierny PLA materiál.
- Vďaka dopočítaniu momentov síl, ktorými sú namáhané jednotlivé servomotory vo vybraných pózach som zistil, že podľa výpočtu pri rýchlom pohybe robota môže na krátky čas dochádzať ku preťažovaniu servomotorov o 31 % väčším momentom sily než je maximálny prípustný moment sily servomotoru. Tento údaj môže byť skreslený tým, že sila ktorá pôsobí na vybratý servomotor nebude pôsobiť presne v ťažisku robota. Ostatné riešené pózy sa z hľadiska stability robota javia ako stabilné.
- Navrhol som DPS, ktorý bude slúžiť ako riadiaca jednotka robota. DPS som upravil do takej podoby, aby spĺňala kritéria po stránke vedenia výkonových logických ciest. Odôvodnil som hrúbku zvolenej medenej vrstvy $70\mu m$. Na túto dosku som upevnil všetku elektroniku a moduly, tak aby bola plne pripravená na použitie.
- Naštudoval som si problematiku riadenia ovládačov PCA9685 a následne som vytvoril knižnicu v programovacom jazyku C++ na ich riadenie pomocou mikrokontroléru. Vytvoril som program obsahujúci základný kód pre mikrokontrolér Atmega328-PU, ktorý umožňuje spracovanie základnej komunikácie robota a jednoduchý pohyb končatín. Tento vytvorený kód som pomocou vývojovej dosky Arduino Uno nahral do mikrokontroléru Atmega328-PU, ktorý som následne osadil do päťice umiestnenej na riadiacej doske robota.
- Vytvoril som aplikáciu ConnectMe, pomocou ktorej je možné komunikovať s robotom a následne ovládať jeho pohyb. Vďaka možnosti jednoduchej konfigurácie tejto aplikácie je možné ju použiť ako edukatívny alebo vývojový komunikačný nástroj aj pre iné zariadenia v oblasti robotiky.
- V [Prílohe E](#) je možné vidieť, zostaveného a plne funkčného šesťnohého robota, s ktorým je možné komunikovať a ovládať ho pomocou bezdrôtového štandardu Wi-Fi. Komunikáciu som otestoval pomocou aplikácie Connect-Me.

LITERATÚRA

- [1] *ATmega328P: DATASHEET COMPLETE* [online]. 1600 Technology Drive, San Jose, CA 95110 USA: © 2016 Atmel Corporation, 2016 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_datasheet.pdf
- [2] *I2C MANUAL: AN10216-01* [online]. San Jose, CA: Philips Semiconductors, 2003 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: http://www.cs.unc.edu/~stc/FAQs/Interfaces/I2C-AN10216_1.pdf
- [3] *PCA9685: 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller* [online]. The Netherlands, Eindhoven: © NXP Semiconductors N.V. 2015., 2015 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/PCA9685.pdf>
- [4] *RoHS - Restriction of Hazardous Substances* [online]. 158 Changxiang road Nanxiang Shanghai, China: Shanghai Nanya Copper Clad Laminate Co., 2016 [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: http://www.plosnaky.cz/download/NANYA_FR-4_rohs.pdf
- [5] *SG90: 9 g Micro Servo* [online]. Taiwan: TowerPro, 2016 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1_EE/stores/sg90_datasheet.pdf
- [6] PRATA, Stephen, Borik SOKOL, David VOZÁK, Libor BEROUN, Petr DOKOUPIL, Libor PTÁČEK a Jiří HUF. *Mistrovství v C++: Kompletní průvodce vývojáře*. 4. aktualizované vydání. Brno, Czech Republic: Computer Press, 2013. ISBN 9788025138281.
- [7] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Praha, Czech Republic: VUTIUM a PROMETHEUS, 2000. ISBN 81-7196-214-7.
- [8] *Acrylic Prusa Mendel I3* [online]. Shenzhen, China: Shenzhen Getech Co., 2015 [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: http://www.geeetech.com/wiki/index.php/Acrylic_Prusa_Mendel_I3
- [9] 3D Tisk: VUT - BROB. *Robotika: VUT - BROB* [online]. Brno, Czech Republic: Vysoké učení technické v Brně, 2015 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/vutrobotika/navody/3d-tisk>
- [10] Solc F., Zalud L., *Robotika, Vysoke uceni technicke v Brne*, 2006, Brno (cs)
- [11] HANÁK, Pavel. *Návrh plošných spojů v Cadsoft Eagle v6*. Technická 12, 616 00 Brno, Czech Republic: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. ISBN 978-XXXXXXXXXX.

ZOZNAM SKRATIEK

CD	Compact disc - Kompaktný disk
DC	Direct current - Jednosmerný prúd
CAD	Computer-aided design - Počítačom podporované projektovanie
STL	Stereolithography - Stereolitografický formát
3D	Three-dimensional (object) - Trojrozmerný (objekt)
PWM	Pulse-width modulation – Impulzová šírková modulácia
DPS	Doska plošných spojov
RoHS	Restriction of Hazardous Sybstances
PLA	Polylactid acid
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
IDE	Integrated Development Environment – Vývojové prostredie
IP	Internet Protocol – Internetový Protokol
SD	Secure Digital – Pamäťová karta používaná v prenosných zariadeniach
AP	Access Point – Prístupový bod

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 2.1: Kinematický návrh končatiny	8
Obrázok 2.2: Teoretická Stabilizácia robota – umiestnenie ťažiska	9
Obrázok 3.1: Servomotor TowerPro - SG90	11
Obrázok 3.2: Zdvihnutá končatina - Rovnovážny stav robota	12
Obrázok 3.3: Rovnovážny stav robota – pohľad zhora.....	13
Obrázok 3.4: Kritické zaťaženie pri rýchlom presune – pohľad zhora.....	14
Obrázok 3.5: Kinematický návrh končatiny pre zistenie kritického zaťaženia	15
Obrázok 4.1: 3D model skeletu šesťnožca	17
Obrázok 4.2: Acrylic Prusa Mendel I3.....	19
Obrázok 5.1: veľkosť riadiaceho PWM signálu	22
Obrázok 5.2: Wi-Fi modul ESP8266	23
Obrázok 5.3: Sériové zapojenie troch batérií Sanyo 18 650 v púzdre	23
Obrázok 6.1: Flowchart – A) sekvencia jedného kroku vpred; B) sekvencia jedného kroku vpred s popravením končatín	27
Obrázok 6.2 Flowchart – Program robota	28
Obrázok 6.3: Aplikácia ConnectMe – Connection	29
Obrázok 6.4: Aplikácia ConnectMe – Connect Error	29
Obrázok 6.5: Aplikácia ConnectMe – Reconnect Error.....	30
Obrázok 6.6: Aplikácia ConnectMe – Control	31
Obrázok 6.7: Aplikácia ConnectMe – Calculator.....	32

ZOZNAM TABULIEK

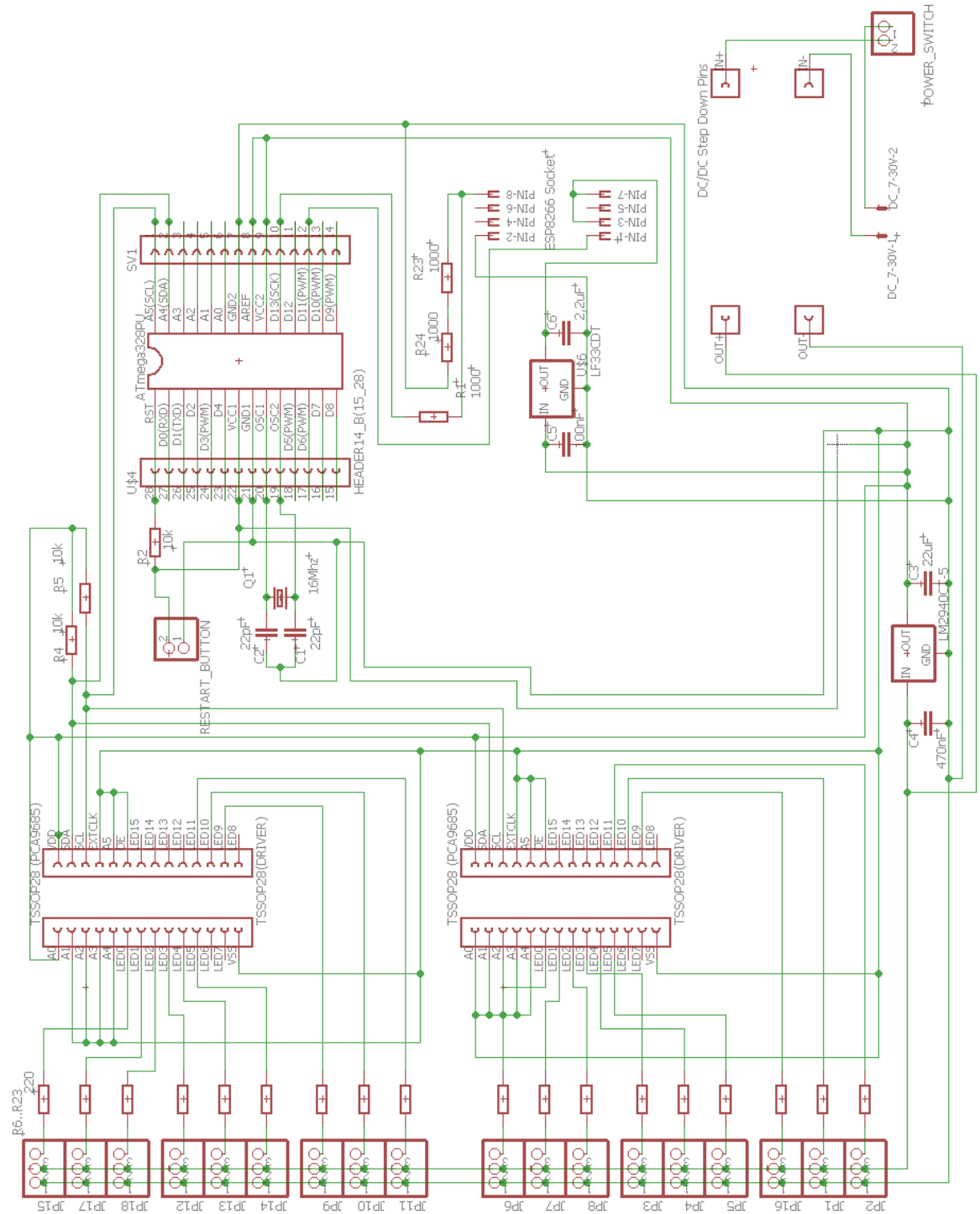
Tabuľka 4.1: Súhrn Častí robota namodelovaných v prostredí SOLIDWORKS	17
Tabuľka 6.1: Hodnoty základnej polohy (počiatočné natočenie servomotorov)	25

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A	41
Príloha B	42
Príloha C	43
Príloha D	44
Príloha E	45

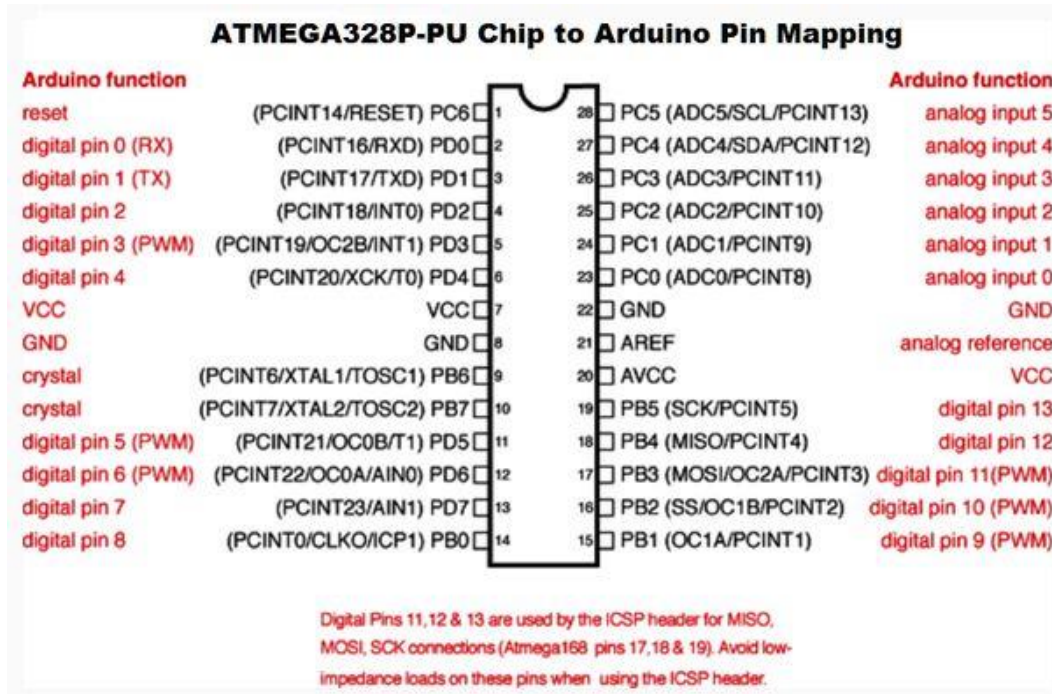
PRÍLOHA A

Schéma zapojenia riadiacej jednotky robota



PRÍLOHA B

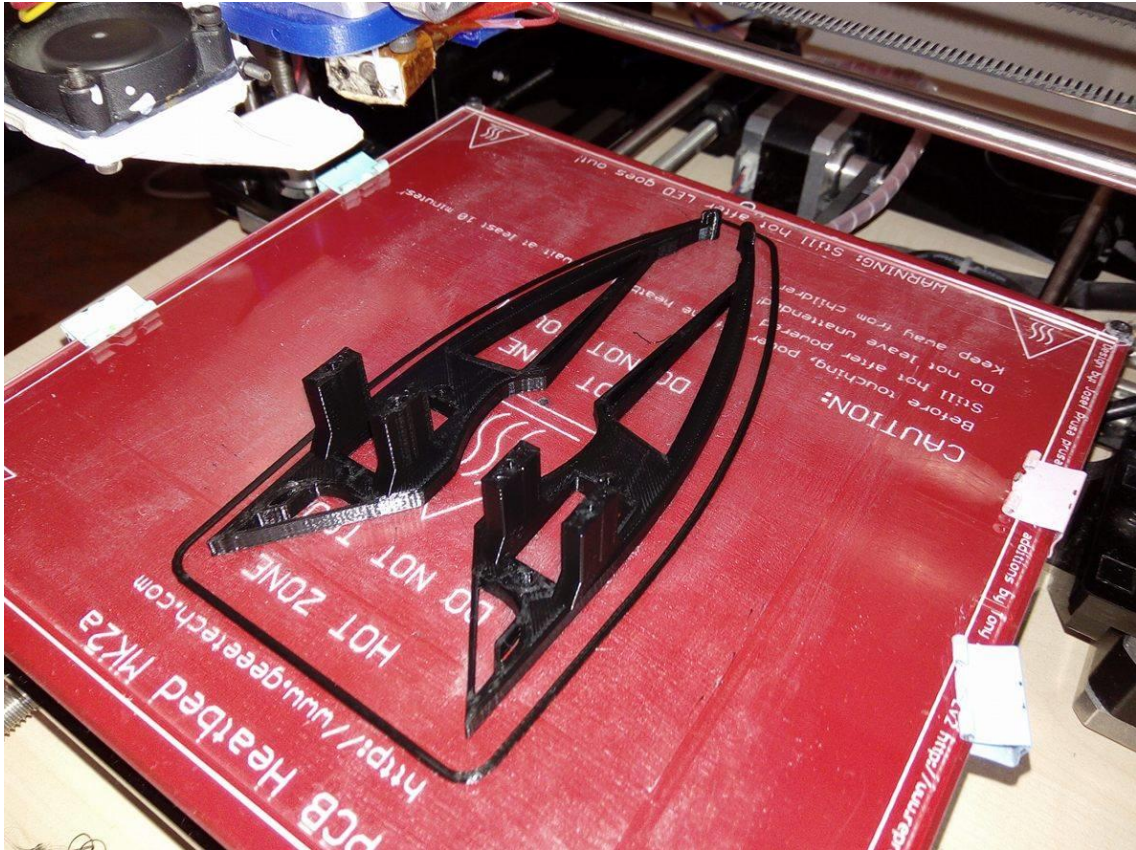
Obrázok rozloženia vývodov mikrokontroléru Atega328-PU³



³ <https://cdn.instructables.com/F2S/FHSD/H3Z3V3P4/F2SFHSDH3Z3V3P4.MEDIUM.jpg>

PRÍLOHA C

Obrázok ukážky výsledku tlače dvoch pazúrov na 3D tlačiarňi Acrylic Prusa Mendel I3 od firmy GEEETech



PRÍLOHA E

Obrázok zostaveného robota vo finálnej podobe

