



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

ZAŘÍZENÍ S MODELÁŘSKÝMI SERVY
SYSTEM WITH MODEL SERVOS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RADEK ŠVEC

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. PAVEL ZEMČÍK

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce



23215

Student: **Švec Radek**

Program: Informační technologie

Název: **Zařízení s modelářskými servy**
System with Model Servos

Kategorie: Uživatelská rozhraní

Zadání:

1. Prostudujte způsob řízení modelářských serv a možnosti jejich ovládání počítačem.
2. Navrhněte jednoduchý strojek sestrojený z modelářských serv a způsob jeho ovládání (jezdící model, robotek, mechanickou ruku apod.)
3. Popište a diskutujte možnosti ovládání modelářskými servy.
4. Navržený systém implementujte a demonstrujte.
5. Diskutujte dosažené výsledky a možnosti pokračování práce.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 až 3 zadání

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Zemčík Pavel, prof. Dr. Ing.**

Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2020

Datum odevzdání: 30. července 2021

Datum schválení: 30. října 2020

Abstrakt

Cílem této práce bylo nastudovat způsoby řízení modelářských serv, a následně navrhnout a vytvořit vlastní strojek využívající modelářská serva. Vytvořeným strojkem je šestinohý kráčející robot využívající 18 serv, kterého je možné dálkově ovládat pomocí aplikace pro mobilní telefony s operačním systémem Android. Řídící jednotkou robota je vývojová deska s modulem ESP32. Vytvořený robot je schopen chůze do všech směrů a otáčení se na místě s různými typy chůze. U robota je také možno měnit výšku a rychlosť chůze. Výsledkem práce je kompaktní kráčející robot se základními funkcemi, vhodný pro rozšíření např. o kameru či měřící senzory.

Abstract

The aim of this thesis was to study the ways of controlling hobby servos, and then to design and create small machine with hobby servos. The created machine is a six-legged walking robot - hexapod with 18 servos for movement. This robot can be remotely controlled using a mobile application for Android. Main control unit of the robot is ESP32 development board. The resulting hexapod is able to walk in all directions and rotate on spot with different walking gaits. It can also change its ground clearance and walking speed. The result of this thesis is a compact walking robot with basic functions, which is suitable for extensions, eg. adding a camera or measuring sensors.

Klíčová slova

servo, robot, ESP32, hexapod, robotický pavouk, bezdrátové ovládání, kráčející robot, inverse kinematika

Keywords

servo, robot, ESP32, hexapod, robotic spider, wireless control, legged robot, inverse kinematics

Citace

ŠVEC, Radek. *Zarízení s modelářskými servy*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce prof. Dr. Ing. Pavel Zemčík

Zařízení s modelářskými servy

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana prof. Dr. Ing. Pavla Zemčíka. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....
Radek Švec
27. července 2021

Poděkování

Tento cestou chci poděkovat prof. Dr. Ing. Pavlovi Zemčíkovi za vedení této práce, jeho cenné rady, tipy, ochotu a také volnost, kterou mi dal při návrhu a zpracování robota. Dále bych rád poděkoval Mgr. Janovi Koniarikovi za spolupráci při 3D tisku potřebných dílů. Na závěr děkuji své rodině a přátelům, kteří mi dali motivaci práci dokončit.

Obsah

1	Úvod	2
2	Existující řešení kráčejících robotů	3
2.1	Dvounozí – bipedal – roboti	3
2.2	Čtyřnozí – quadruped – roboti	5
2.3	Šestinozí roboti – hexapodi	6
2.4	Osminozí roboti - octapodi	10
3	Technologické prostředky ke stavbě malých robotů	11
3.1	Modelářská serva	11
3.2	Platformy pro řízení serv	15
3.3	Bezdrátová komunikace s robotem	19
3.4	Bateriové napájení robota	20
3.5	Mechanická konstrukce, 3D modelování dílů	22
4	Analýza současného stavu a plán práce	24
4.1	Analýza typů kráčejících robotů	24
4.2	Návrh řešení robota	25
4.3	Technické specifikace práce	26
5	Fyzické provedení robota	27
5.1	Robot jako celek	28
5.2	Mobilní aplikace pro dálkové ovládání robota	33
5.3	Dosažené cíle a možná zlepšení	36
5.4	Testování robota	37
6	Závěr	39
Literatura		40
A	Seznam použitých dílů	44
B	Schéma zapojení elektroniky	45

Kapitola 1

Úvod

Robotika je dnes důležitou technologickou oblastí a většina výrobních procesů je automatizována právě za pomocí různých robotických ramen. Navíc dnešní technologie dovolují i vývoj pokročilých kráčejících robotů, využitelných pro práci v nebezpečných, nepřístupných a náročných terénech.

Díky dostupnosti a cenám drobné modelářské elektroniky je dnes na světě čím dál více nadšenců do této oblasti. Mnoho začátečníků si pro vyzkoušení koupí sadu s odlišnými elektronickými díly - může se jednat o senzory, tlačítka, displaye, malé elektromotory apod. Po vyzkoušení těchto součástek zjistí, že ho některý typ dílů zaujal více a chtěl by s ním zpracovat nějaký projekt. V případě, že jej zaujmou právě díly, které se mechanicky pohybují, zaujmě ho dost možná zrovna robotika. Právě tato práce poskytuje přehled o tom, co obnáší návrh a sestavení menších kráčejících robotů.

Cílem této práce bylo nastudování dostupných prostředků vhodných pro sestavení vlastního zařízení využívajícího modelářská serva, navrhnout takové zařízení a sestavit jej. Jako toto zařízení byl v práci zvolen kráčející robot.

Téma spojené s roboty jsem si vybral za účelem vytvoření něčeho, co se skládá i z fyzické části a nejedná se tak jenom o program v počítači. Kromě toho se o tuto oblast zajímám delší dobu.

Kapitola 2 se zabývá jednotlivými typy kráčejících robotů a způsoby jejich pohybu. V této kapitole jsou také popsána některá existující řešení daných typů robotů. V kapitole 3 jsou popsány existující komponenty využitelné k dosažení výsledku této práce. Analýza současně dostupných technologií spolu s návrhem a specifikací řešení je popsána v kapitole 4. Kapitola 5 obsahuje popis důležitých částí a výsledků práce. Na konci této kapitoly jsou uvedeny výsledky experimentů s vytvořeným robotem.

Kapitola 2

Existující řešení kráčejících robotů

V této kapitole se nachází základní popis a důležité vlastnosti dvou a více nohých kráčejících robotů. Jelikož tato práce není encyklopedickým přehledem a její rozsah je omezený, u jednotlivých typů robotů se popisují pouze jejich klíčové vlastnosti, vybrané způsoby pohybu, případně konkrétní řešení robota.

V minulých letech se výzkum kráčejících robotů rychle rozšiřoval. Jak uvádí D. J. Todd ve své knize [37], v případě kráčejících robotů lze koordinovat pohyb velkého množství kloubů pomocí počítače, což zajíšťuje plynulý pohyb různorodým terénem. Díky moderním technologiím mohou být tyto řídící počítače umístěny i v malých strojích a robotech.

Jedním z důvodů vývoje kráčejících strojů je zájem o samotnou lokomoci nohou. Pokud je ovšem účelem doprava, je třeba prokázat, že jsou nohy lepší než kola nebo pásy. Dle knihy [37] mohou být výhody kráčejících robotů shrnuty do několika bodů:

- Možnost překročení překážek a chůze po schodech.
- Kráčející roboti umí dosahovat plynulého pohybu i po hrbotatém terénu.
- V principu mohou tito roboti přenášet náklad přes rozbítý terén nebo široké propasti.
- Konětinu poškozují povrch méně než pásy nebo spousta kol.
- V měkké půdě mají kola problém s hrabáním a mohou uváznout.

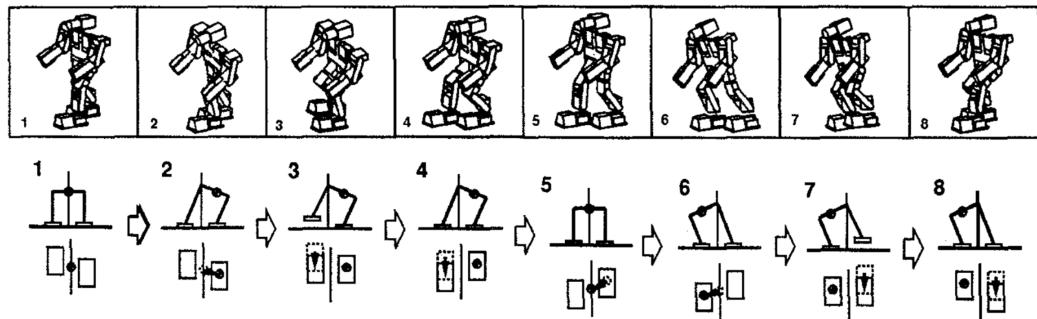
Z tohoto výčtu vlastností lze určit, zda je pro práci v daném terénu výhodnější použít kráčející roboty, nebo vozidla s pásy, případně koly. Obecně by šlo říci, že v případě hodně členitého a náročného terénu je lepší použít kráčející roboty.

2.1 Dvounozí – bipedal – roboti

Konstrukce dvounohých robotů je často inspirována anatomii člověka. Problematikou těchto robotů je jejich špatná stabilita jak v klidu, tak i v pohybu. Udržování rovnováhy u dvounohých robotů lze řešit většími chodidly, jenže ty snižují pohyblivost. Pokročilejší systémy používají akcelerometry nebo gyroskopy k poskytování zpětné vazby a korekci rovnováhy. V literatuře [17] se píše, že v praxi není tak důležité sestavit robota, který nebude padat, ale robota, který se po pádu dokáže zvednout.

Chůze bipedálních robotů

Podle literatury [17] by měl robot umět řídit své těžiště, aby mohl volně chodit (například robot, popsaný v literatuře [17], může naklánět kotníky doleva a doprava, díky čemuž dokáže staticky chodit). Pohybová sekvence jednoho cyklu bipedální chůze sestává celkem z osmi fází, jak je ukázáno na obrázku 2.1. Jeden krok sestává ze čtyř fází: přesunutí váhy na jednu nohu, nadzvednutí nohy, posun nohy dopředu a došlápnutí.



Obrázek 2.1: Chůze dvounohého robota [17]

ROBOTIS MINI

ROBOTIS MINI je stavebnice dvounohého robota od firmy ROBOTIS. Stavebnice obsahuje všechny díly ke kompletnímu sestavení funkčního robota. Dle specifikací v manuálu [24] je vybaven deskou OpenCM9.04-C, s 32bitovým procesorem ARM Cortex-M3 a servy Dynamixel XL-320. Tato serva mají vestavěný procesor a poskytují zpětnou vazbu polohy, teploty nebo točivé síly. Napájení je zajištěno dvěma Li-ion bateriemi. Robota lze doplnit o různé periferie jako například LED modul, tepoloměr, gyroskop nebo magnetický senzor. Zdrojové kódy i 3D modely dílů jsou open source a volně dostupné ke stažení z online manuálu [24]. Díky tomuto podrobně zpracovanému manuálu a hotové ovládací aplikaci je kit ROBOTIS MINI vhodný i pro začátečníky. Pokročilejší uživatelé si pak mohou vytisknout upravenné díly nebo doplnit robota různými senzory a přizpůsobit řídící aplikaci.

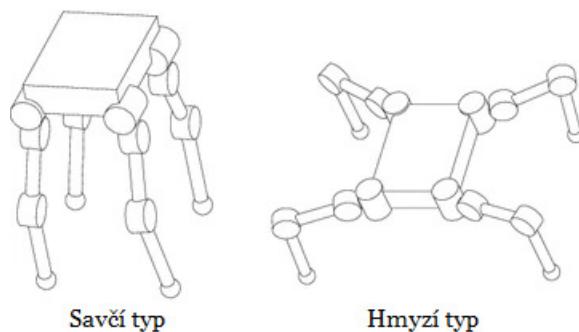


Obrázek 2.2: Sestavený robot ROBOTIS MINI [24]

2.2 Čtyřnozí – quadruped – roboti

Při srovnání s různými typy kráčejících robotů mají čtyřnozí roboti minimální počet nohou zajišťující statickou chůzi a přijatelnou stabilitu. Podle literatury [18] lze čtyřnohé roboty rozdělit na základě konfigurace nohou do dvou skupin: savčí typ a hmyzí typ. Jak ukazuje obrázek 2.3, u savčího typu je základní poloha nohou svislá, kdežto hmyzí typ má první segment nohy umístěn vodorovně a druhý i třetí segment vertikálně.

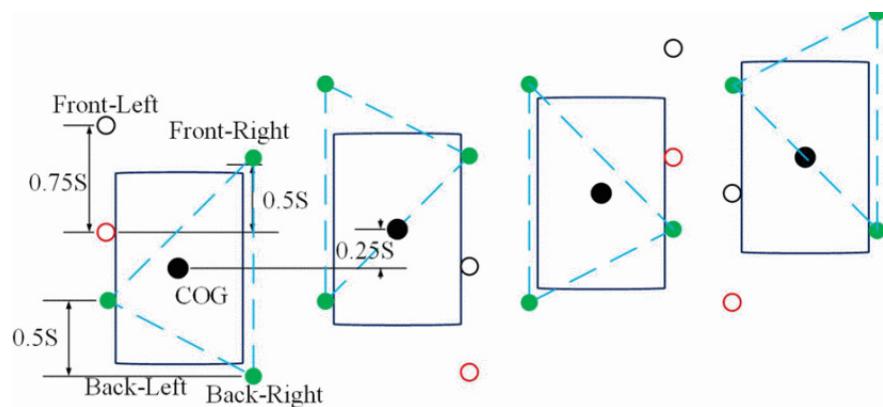
Jak uvádí literatura [18], čtyřnohý robot savčího typu má několik výhod. Dokáže se pohybovat rychleji než hmyzí typ a povahou konstrukce nohou je v každém kloubu vyžadován menší točivý moment, zvláště když robot stojí. Savčí typ je také mnohem užší a dokáže procházet stísněnými prostory. Na druhou stranu je hmyzí typ vysoko stabilní díky nízko položenému těžišti a širokému rozložení nohou. Hmyzí typ může navíc při pohybu použít své tělo jako pátou nohu v závislosti na terénu.



Obrázek 2.3: Základní typy čtyřnohých robotů [18]

Algoritmus chůze čtyřnohých robotů použitelný pro oba typy

Tento typ chůze je vhodný pro pomalý a stabilní pohyb, jelikož je při každém kroku zdvižena právě jedna noha a ostatní tři podpírají tělo. Těžiště robota se nachází vždy nad polygonem tvořeným podpěrnými nohami. Dle článku o chůzi čtyřnohých robotů [19] může být šest možných sekvencí nohou, které splňují podmínu, že se těžiště nachází vždy nad polygonem, přičemž se robot pohybuje rovně. Jedna možná sekvence je zobrazena na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Jeden cyklus algoritmu chůze čtyřnohých robotů [19]

Klus čtyřnohých robotů savčího typu

S tímto typem pohybu je možné dosahovat vyšších rychlostí za cenu nižší stability. Jak uvádí článek o pohybu čtyřnohých robotů [36], v jednom okamžiku slouží dvě protější nohy jako podpěra a další dvě jsou zdviženy. Na konci každého kroku se funkce dvojic protějších nohou prohodí. Protože v jeden moment stojí robot pouze na dvou nohách, vzniká zde neřízený stupeň volnosti náklonu těla. Tento stupeň volnosti je nutno řídit pomocí správného naplánování trajektorie pro každou zvedanou nohu.

Boston Dynamics Spot

Spot je nejnovější čtyřnohý robot připomínající psa od společnosti Boston Dynamics. Článek zabývající se vývojem čtyřnohých robotů [7] uvádí, že se jedná o nový přístup k dynamickému řízení robotů ve srovnání s předchozími modely od této společnosti (robot BigDog nebo LS3). Spot měří přibližně $110\text{cm} \times 50\text{cm} \times 84\text{cm}$ (délka x šířka x výška) a dokáže běžet rychlostí $5,76\text{km/h}$. Jeho celková hmotnost dosahuje 30kg a je schopen nést náklad o váze 14kg . Robota napájí baterie a všechny jeho klouby jsou ovládány elektrickými aktuátory (akčními členy). Konstrukce v kombinaci s vestavěnými počítači umožňuje chůzi i klus do všech směrů, sestup nebo výstup schodů, pohyb v nerovném terénu, vyvažování a přizpůsobení se vnějším vlivům.

Spot má zabudovaný systém 3D vidění se simultánní lokalizací a mapováním (SLAM). Tento systém poskytuje informace, pomocí nichž robot vnímá své okolí a umí se vyhýbat překážkám. Vestavěné počítače se starají o lokomoci a navigaci. Řízení robota probíhá dálkově operátorem, přičemž některé úkony jsou prováděny autonomně. Dle literatury [7] se Spot stal nejlehčím robotem, který je vhodný pro vnitřní i venkovní provoz.



Obrázek 2.5: Spot od Boston Dynamics¹

2.3 Šestinozí roboti – hexapodi

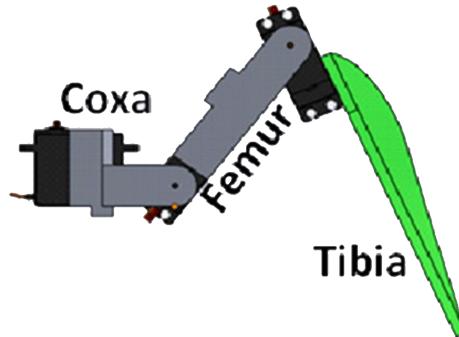
Konstrukce hexapodů se inspiruje mechanikou hmyzu. Počet šesti nohou je ideální pro dobrou stabilitu s nepříliš složitou konstrukcí. Vzhled a tvar hexapodů může být různý, ale obecně je lze rozdělit podle tvaru těla na hexagonální (kruhové) a obdélníkové. Obdélníkový hexapod má tělo ve tvaru obdélníku s končetinami rozmístěnými symetricky po jeho delších stranách. Hexagonální robot má nohy rozmístěny rovnoměrně po obvodu svého kruhového

¹Obrázek převzat z webové stránky <https://www.bostondynamics.com/spot>

těla. V článku o lokomoci hexapodů [38] se zmiňuje, že podle výzkumů je obdélníkové tělo zvýhodněno při přímé chůzi dopředu nebo chůzi do stran. Nicméně pro otáčení vyžaduje speciální model pohybu. Hexagonální tvar těla poskytuje lepší výsledky v určitých ohledech. Hexapodi s tímto tvarem mohou mít mnoho druhů chůze a snadno měnit její směr.

Design končetin a kinematika

Končetiny hexapodů byly navrženy tak, aby optimalizovaly pohyby jedné nebo více končetin současně. Současný koordinovaný pohyb více končetin je důležitý jak pro samotnou chůzi, tak i pro zdolávání různých překážek nebo změnu výšky robota pro manévrování v různých prostředích. Jak uvádí literatura [9], končetina hexapoda byla navržena jako třídílná struktura. Podle analogie s biologickými organismy se tyto části nazývají coxa (kyčel), femur (stehno) a tibia (holeň). Na obrázku 2.6 je ukázáno, že coxa spojuje nohu s tělem hexapoda ve vodorovné ose a femur spojuje coxu a tibii v ose svislé. Každá noha má tedy 3 stupně volnosti, což dává hexapodovi celkem 18 stupňů volnosti.



Obrázek 2.6: Struktura končetiny robota hmyzího typu [9]

Pro správnou koordinaci nohou je třeba použítí kinematiky. V robotice se bere v potaz přímá kinematika a inverzní kinematika. V případě přímé kinematiky jsou známy úhly jednotlivých kloubů a vypočítávají se souřadnice koncového bodu. Naopak inverzní kinematikou lze podle známých souřadnic koncového bodu vypočítat odpovídající úhly kloubů.

Přímá kinematika končetiny

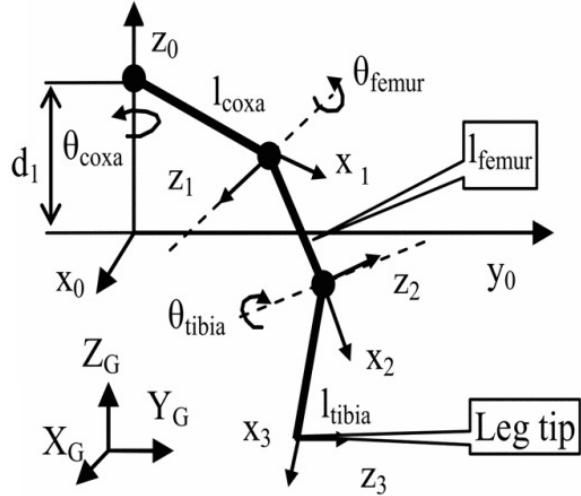
Kinematický řetězec mechanizmu nohy se třemi rotačními klouby je spolu s označením souřadnic a symbolů zobrazen na obrázku 2.7. Geometrický model z dokumentu o kinematice robotů [20] je formulován mezi pohyblivým souřadným systémem $O_i(x_i, y_i, z_i)$, $i = 0 \dots 3$ spojeným se základnou nohy, a pevným globálním souřadným systémem $O_G(x_G, y_G, z_G)$. Tento vztah se řídí přímým geometrickým modelem Denavit-Hartenberg. Pro určení celkové transformace od coxy ke špičce nohy lze použít rovnice:

$$\mathbf{T}_{coxa}^{tip} = \mathbf{T}_{coxa}^{femur} \mathbf{T}_{femur}^{tibia} \mathbf{T}_{tibia}^{tip} \quad (2.1)$$

Výsledné souřadnice špičky nohy lze vypočítat podle rovnic z literatury [20]:

$$\begin{aligned} x &= [l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 - \theta_3)] \cos \theta_1 \\ y &= [l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 - \theta_3)] \sin \theta_1 \\ z &= d_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 - \theta_3) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Význam jednotlivých symbolů v rovnicích (2.2): d_1 – vzdálenost kloubu coxy od souřadnice O_G v ose Z; l_i – délka segmentu nohy (1 – coxa, 2 – femur, 3 – tibia); θ_i – úhel kloubu (1 – coxa, 2 – femur, 3 – tibia).



Obrázek 2.7: Model končetiny s vyznačenými souřadnicemi a proměnnými [20]

Inverzní kinematika končetiny

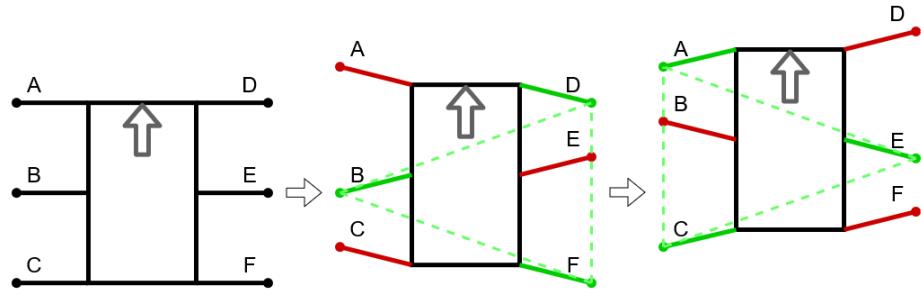
Inverzní kinematika je v případě hexapodů používanější a přináší přirozenější pohyb robota. Jednotlivých úhlů kloubů θ_1 , θ_2 a θ_3 (coxa, femur a tibia) lze dosáhnout pomocí výsledných vzorců (2.3) uvedených v literatuře [20]:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \begin{cases} \arctg\left(\frac{y}{x}\right) + \pi, & x < 0 \\ \arctg\left(\frac{y}{x}\right), & jinak \end{cases} \\ \theta_2 &= \arccos \frac{l_2^2 + x'^2 + y'^2 - l_3^2}{2l_2\sqrt{(x'^2 + y'^2)}} + \arctg \frac{y_3}{x_3} \\ \theta_3 &= \pi - \arccos \frac{l_3^2 + l_2^2 - (x'^2 + y'^2)}{2l_2l_3} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Nové proměnné x , y představují souřadnice špičky nohy v souřadnicovém systému nohy (x_G a z_G) a proměnné x' , y' souřadnice špičky nohy v souřadnicovém systému coxy (x_G a y_G).

Tripedální chůze “3+3”

Při tripodální chůzi se nohy hexapoda rozdělí do dvou skupin po třech, podle obrázku 2.8 na A, C, E (levá přední noha, levá zadní a pravá prostřední) a B, D, F (levá prostřední, pravá přední a pravá zadní). Jedna skupina nohou podepírá tělo robota a posune jej dopředu. Druhá skupina nohou je zdvižená a pohybuje se dopředu. Na obrázku 2.8 je vyznačena podpůrná skupina nohou zeleně a zdvižené nohy červeně. V každé periodě chůze se robot posune o dva kroky. V článku o chůzi hexapodů [38] je uvedeno, že doba styku se zemí je $1/2$ periody. Tripedální chůze představuje optimální stabilitu i rychlosť pro šestinohé roboty.

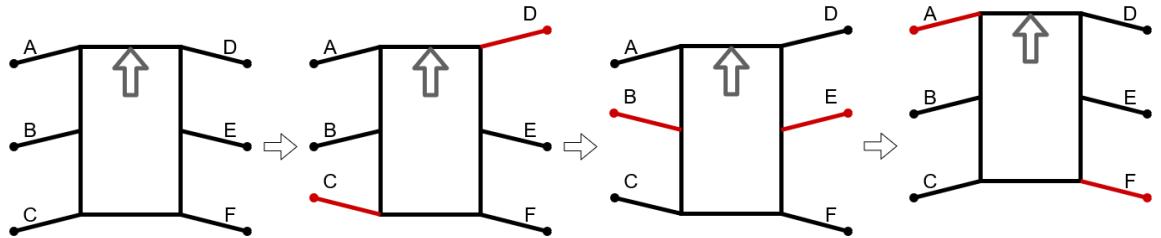


Obrázek 2.8: Základní perioda tripodální chůze hmyzího typu

Tripodální chůze má dva typy podle směru chůze. V literatuře [38] jsou tyto typy označeny jako savčí a hmyzí. Při savčí chůzi se nohy pohybují primárně ve svislé rovině, což vede k minimálnímu otáčení kloubů coxy. Při tomto typu chůze se robot pohybuje jako krab, tedy zleva doprava a zprava doleva. Na druhou stranu je hmyzí chůze využívána především k pohybu dopředu a dozadu, přičemž jsou klouby coxy namáhány nejvíce. Pro realizaci hmyzí chůze musí mít každá noha robota tři stupně volnosti.

Chůze “4+2”

Pro chůzi “4+2” jsou nohy rozděleny celkem do tří skupin po dvou. Tělo podepírají vždy čtyři nohy (dvě skupiny) stojící na zemi a zbylé dvě nohy se zdvižené pohybují dopředu. Jedna perioda se skládá ze tří kroků, ale robot se posune pouze o jeden krok vpřed. Doba styku se zemí jsou $2/3$ periody. Literatura [38] uvádí, že tento typ chůze je do jisté míry odolný vůči chybám, protože při poškození jedné nohy zůstávají další tři, které podepírají tělo.



Obrázek 2.9: Perioda chůze “4+2”

Vlnová chůze “5+1”

Při vlnové chůzi je v jednu chvíli zdvihána a posunována dopředu jen jedna noha. Ostatní nohy podepírají tělo a pomalu jím pohybují ve směru chůze. Vlnová chůze je nejstabilnější a nejlépe odolná vůči chybám. Nicméně je pomalá, protože robot je ve styku se zemí $5/6$ periody. Podle literatury [38] se tato chůze používá pro speciální případy pohybu, například otáčení tělem nebo zdolávání náročného terénu a překážek.

PhantomX AX Mark-III

Jedná se o třetí revizi populárního hexapoda od firmy Interbotix Labs. PhantomX AX Mark-III je dostupný ve formě stavebnice v několika variantách [16]. Tato sada se stala jednou z nejpokročilejších robotických platform vhodných pro výzkumné pracovníky i pro nadšence do robotiky.

Kompletně hliníková konstrukce přináší vysokou odolnost [16]. Pro otáčení pohyblivých částí (kloubů) jsou použita výkonná serva DYNAMIXEL AX-12A (případně AX-18A), přičemž každá končetina má tři stupně volnosti. Chod hexapoda řídí deska ArbotiX Robocontroller, která je kompatibilní s Arduinem. O napájení veškeré elektroniky robota se stará tříčlánková Li-Pol baterie s kapacitou 4500mAh. Pro robota jsou k dispozici různé manuály, ukázkové open source programy i kompletní řídicí aplikace.



Obrázek 2.10: Sestavený PhantomX AX Mark-III [16]

2.4 Osminozí roboti - octapodi

Oproti předchozím typům robotů přináší osminozí roboti nejlepší stabilitu při maximální rychlosti chůze. Dle literatury [23] jsou navíc méně náchylní k neschopnosti dalšího pohybu při selhání aktuátorů - mohou udržovat stabilitu a téměř plnou rychlosť i při poruše jedné až dvou končetin. Nicméně stavba a údržba osminohých robotů je složitější díky více pohyblivým částem. Osminozí roboti se svou konstrukcí těla i končetin dost podobají šestinohým robotům, takže i algoritmy jejich chůze jsou si podobné. Mezi komerční řešení osminohých robotů patří například robot T8X od firmy Robugtix [21].

Kapitola 3

Technologické prostředky ke stavbě malých robotů

Tato kapitola se zabývá popisem momentálně dostupných elektronických komponent, možností bezdrátové komunikace a způsobu výroby dílů, což lze využít právě při tvorbě malých robotů. Takových technologických prostředků je velké množství a pro každého robota se může hodit něco jiného. Tato sekce tedy není encyklopedickým přehledem všech dostupných technologií a z důvodu omezeného rozsahu této práce jsou zde popsány technologické prostředky bezprostředně spojeny s touto prací.

3.1 Modelářská serva

V modelářském časopisu [22] je servo zjednodušeně specifikováno jako motorizovaná převodovka, která se otáčí do určité polohy nebo se pohybuje specifikovanou rychlostí určenou vstupním signálem. Článek o modelářských servech [11] přesněji udává, že servo je elektromechanický zpětnovazební systém. Modelářská serva se běžně používají například v dálkově ovládaných letadlech nebo autech a malých robotech. Modelářská serva se vyrábí v několika provedeních pro různé případy použití: od miniaturních slabých serv s plastovou převodovkou až po silná a odolná serva s větším motorem, kuličkovými ložisky a plně kovovými převody [11].



Obrázek 3.1: Modelářské servo¹

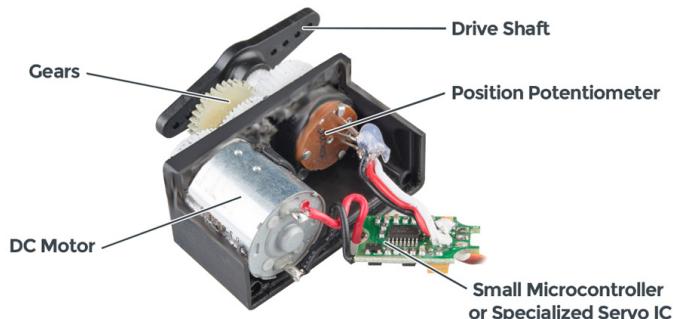
¹Obrázek převzat z: <https://www.pololu.com/product-info-merged/3426>

Serva lze obecně rozdělit podle typu použitého elektromotoru na AC serva – využívají elektromotor na střídavý proud a DC serva – použitý elektromotor potřebuje stejnosměrný proud. Protože se tato sekce zabývá modelářskými servy, která jsou vybavena elektromotorem na stejnosměrný proud, všechny následující informace se týkají DC serv.

Princip činnosti serva

Modelářské servo se skládá z těchto čtyř základních částí: stejnosměrný elektromotor, zařízení pro snímání polohy (potenciometr), převodovka a řídící obvod. Dle článku o modelářských servech [11] je princip činnosti serva shrnut v následujících větách.

Na vstupní pin serva je přiveden impulz (elektrický pulz proměnné šířky nebo signál pulzně šířkové modulace), který se převádí na vstupní napětí pro řídící integrovaný čip. Toto napětí je porovnáno se zpětnovazebním napětím odvozeným z polohy potenciometru. Potenciometr je přímo spojen s hřídelí serva, díky čemuž dokáže snímat mechanickou polohu hřídele. Chybový zesilovač detekuje, zda existuje rozdíl mezi vstupním a zpětnovazebním napětím. Rozdíl těchto dvou napětí je následně zesílen a aplikován jako vstup do servomotoru. Pokud je výstup zesilovače kladný, motor se točí jedním směrem a pokud záporný, motor se točí opačně. Chod motoru otáčí hřídelí serva a zároveň i potenciometrem tak, aby hřídel dosáhla polohy, jež odpovídá vstupnímu signálu. Po dosažení požadované polohy je zpětnovazební napětí shodné se vstupním napětím a jejich rozdíl je nulový. Nulový rozdíl napětí způsobuje zastavení servomotoru, který dále drží tuto polohu.



Obrázek 3.2: Vnitřní složení modelářského serva²

Pulzně šířková modulace - PWM

Digitální signál má dvě polohy: 1 (zapnuto) a 0 (vypnuto). Analogový signál může nabývat libovolné hodnoty od 0 do 1. Podle článku o PWM [33] se s těmito signály zachází v elektronice zcela odlišně, nicméně často je vyžadována práce s oběma typy současně. Analogový vstup se převádí na digitální signál pomocí analogově digitálního převodníku - ADC. Naopak pro řízení analogových zařízení pomocí digitálního výstupu je nutno použít právě PWM. Pomocí PWM lze mikrokontrolerem řídit zařízení, jež na vstupu očekávají analogový signál (například motory s proměnnou rychlostí nebo stmívatelná světla). U tohoto signálu se napětí vysílá v tzv. pulzech. U signálu PWM je klíčová frekvence (doba periody v Hz) a střída (angl. duty cycle) pulzů. Střída představuje v procentech část periody, kdy je signál v poloze logické 1. Průměrné výstupní napětí lze vypočítat vynásobením střídy

²Obrázek převzat z: https://cdn.sparkfun.com/assets/custom_pages/5/6/0/servo-parts-labeled.jpg

a hodnoty napětí v logické 1. Například pokud je střída 50% a napětí v log. 1 má hodnotu $24V$, výstupní napětí bude $24 * 0,5 = 12V$.

Typy serv podle pohybu hřídele a další parametry serv

Standardní polohově otáčivá serva mohou otáčet hřídelí v rozsahu zhruba 180 stupňů. Jak uvádí modelářský časopis [22], serva jsou proto vybavena mechanickými zarážkami (často se tato zarážka nachází na výstupním ozubeném kole), aby se zamezilo rotaci mimo rozsah. U některých serv je zase výstupní kolo ozubené pouze z poloviny.

Pro jiné případy použití existují i kontinuálně otáčivá a lineární serva. Kontinuálně otáčivá serva mají stejný vzhled jako polohově otáčivá, ale liší se interně. Nejsou u nich použity mechanické zarážky a dokážou nepřetržitě otáčet hřídelí v obou směrech. Místo polohy hřídele se u kontinuálně otáčivých serv řídí jejich rychlosť, která podle modelářského časopisu [22] typicky dosahuje 40 až 50 ot/min . Lineární servo nabízí více rychlostních stupňů a využívá hřebenový mechanismus pro pohyb z jedné strany na druhou, namísto otáčivého pohybu. Pro řízení lineárního serva se používá stejný signál jako pro standardní servo.

Modelářská serva se také vyrábějí v různých velikostech pro jednotlivé případy užití. Mezi základní velikosti patří serva s označením Micro, Standard a Giant.

Kromě typu otáčení a velikosti se mohou serva lišit v materiálu použitém při výrobě jejich převodovky. Převodovka může být plastová, kovová nebo hybridní. Hybridní slouží jako ochrana motoru před spálením - pokud se páka serva zasekne, plastové ozubené kolečko se ohlodá, díky čemuž se motor může otáčet a nedojde k jeho zničení.

Serva se také dělí na digitální a analogová. Oba typy se řídí stejně z pohledu uživatele, rozdíl je v jejich interní elektronice.

Digitální servo

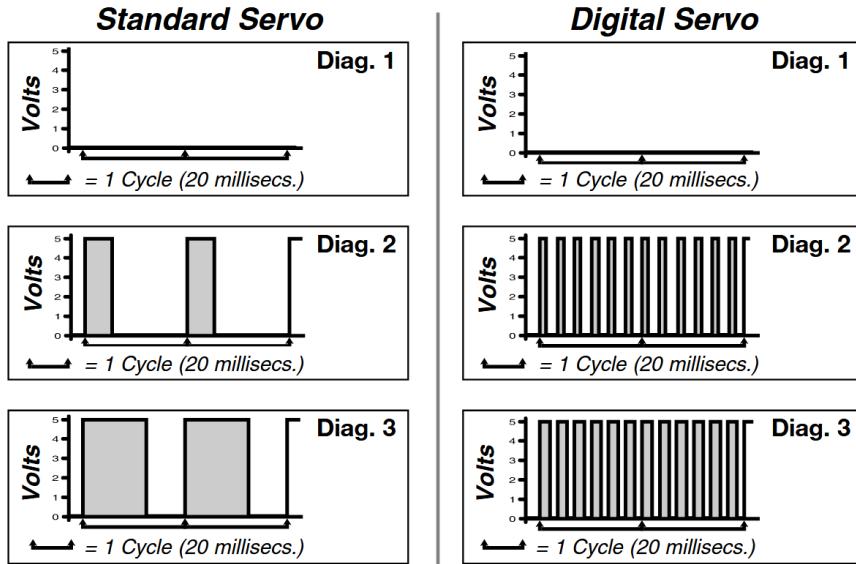
V literatuře [14] je uvedeno, že digitální servo je stejně jako standardní analogové servo, s výjimkou vestavěného mikroprocesoru, který zpracovává vstupní signál a ovládá motor serva. Digitální serva se tedy fyzicky neliší od těch analogových: mají stejný motor, převodovku i zpětnovazební potenciometr. V čem jsou digitální serva rozdílná, je způsob zpracovávání vstupního signálu a způsob řízení servomotoru. Digitální servo pomocí svého mikroprocesoru aplikuje parametry na příchozí signál, a následně posílá pulzy tohoto modifikovaného signálu na servomotor. Tímto je optimalizován celkový výkon serva. Mikroprocesor digitálního serva posílá na servomotor pulzy s mnohem vyšší frekvencí. To znamená, že servomotoru přichází až 300 pulzů za sekundu, místo 50. Délka pulzů se snižuje v přímém poměru vzhledem k vyšší frekvenci, což vede k častějšímu zapínání a vypínání servomotoru. Díky těmto vlastnostem má digitální servo skvělou odezvu, minimální odchylku mrtvé zóny (anglicky deadband), rychlejší a plynulejší zrychlení/zpomalení a lépe udrží svou polohu. Dle literatury [14] je jedinou nevýhodou digitálního serva jeho vysoká spotřeba elektrické energie.

Standardní/analogové servo

Analogové servo je vybaveno pouze vlastní logickou deskou, která nemodifikuje vstupní signál. V literatuře [14] je napsáno, že v nečinnosti není na servomotor posíláno žádné napájení. Napětí se na servomotor přivádí až tehdy, pokud je přijat vstupní signál pro změnu polohy hřídele nebo pokud na rameno hřídele působí vnější síla. Toto platí i pro digitální servo. V případě analogového serva je napětí na servomotor posíláno v pulzech s

konstantní rychlostí 50 pulzů za sekundu. Článek na webové stránce [31] uvádí, že analogové servo je levnější a má nižší spotřebu elektrické energie. Na druhou stranu má analogové servo pomalejší odezvu, vyšší odchylku mrtvé zóny a slabé držení polohy.

Na obrázku 3.3 jsou porovnány pulzy analogového a digitálního signálu. První diagram ukazuje signál, kdy je motor v nečinnosti, na druhém je zobrazen krátký signál – nízké napětí na servomotoru. Diagram 3 porovnává delší pulz – vyšší napětí na motoru.



Obrázek 3.3: Porovnání signálu analogového a digitálního serva [14]

Řízení modelářského serva uživatelem

Serva mají tři vývody, kterými se připojují k řídící platformě (např. k mikrokotroleru). Dva vývody slouží pro napájení (většina serv lze napájet pomocí napětí 4,6 – 6V). Třetím je posílaný vstupní signál. Barvy těchto vodičů se mohou lišit podle výrobce, často se však používá kombinace hnědá (minus), červená (plus) a oranžová (signálový vodič).

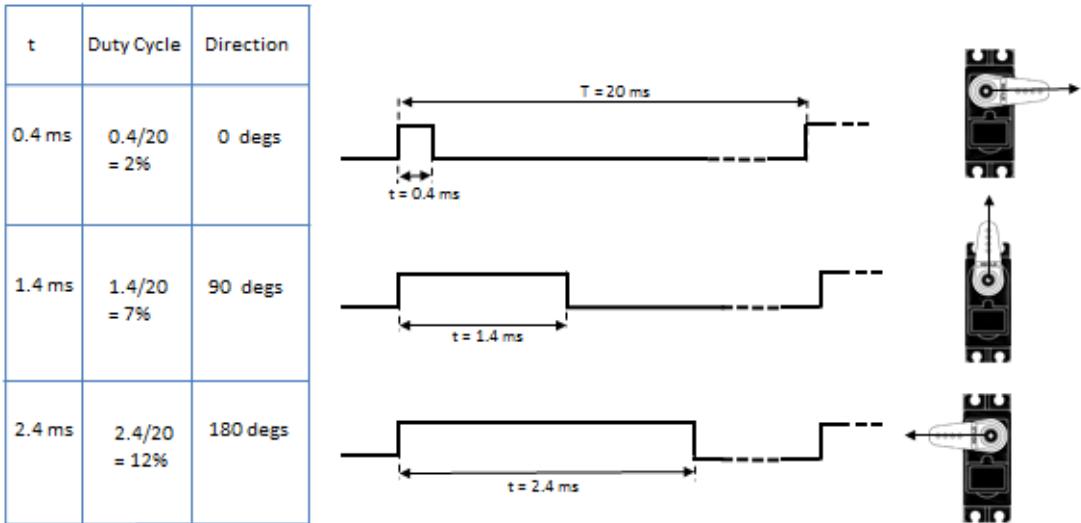
Kromě zapojení napájení je nutné připojit i signálový vodič serva, kde budou posílány pulzy proměnné délky (pro tento účel se často používá PWM). Servo očekává pulz každých 20ms a délka pulzu udává požadovanou polohu hřídele. Článek na webové stránce [32] uvádí, že výchozí pozici 90° odpovídá pulz o délce 1,5ms. Pro krajní pozici 0° je aplikován pulz dlouhý 1ms a pro 180° bude tento pulz trvat 2ms. V závislosti na výrobě serva se délka pulzu pro jednotlivé úhly může lišit. Pro generování signálů PWM a řízení serv jsou dostupné různé knihovny pro jednotlivé řídicí desky.

Řízení modelářského serva SG90

Servo SG90 patří mezi nejlevnější a nejrozšířenější modelářská serva. Pro jeho ovládání je potřeba určit střídu odpovídající danému úhlu. Ta lze vypočítat podle vzorce

$$\text{střída} = \frac{a}{180} * \alpha + b$$

kde a značí střídu odpovídající 180°, α požadovaný úhel, b je střída odpovídající 0°. U tohoto serva je $a = 10$, $b = 2$ [35].



Obrázek 3.4: Odpovídající poloha serva SG90 pro jednotlivé délky signálu³

Knihovna LedC pro ESP32

Knihovna LedC je wrapper⁴ knihovny LED Control pro platformu Arduino (C/C++). Dle dokumentace [34] je knihovna primárně navržena pro ovládání intenzity svitu LED diod, nicméně lze použít i pro generování signálů PWM pro jiné účely, například ovládání serva. Knihovna LedC umožňuje generovat až 16 na sobě nezávislých signálů PWM na tzv. kanálech. Pro každý kanál lze nastavit frekvenci a rozlišení signálu. Kanál je pak přiřazen na zvolený pin s podporou PWM a tímto pinem se bude vysílat generovaný signál. Délku generovaného pulzu je možné měnit podle potřeby.

Knihovna LED Control má kanály rozděleny do dvou skupin po osmi. Jedna skupina pracuje ve vysokorychlostním režimu. Ten je implementován v hardwaru a nabízí automatickou a bezproblémovou změnu střídy PWM. Druhá skupina kanálů pracuje v režimu nízké rychlosti a střída musí být změněna ovladačem v softwaru, což je pomalejší. Řadič PWM může automaticky plynule zvyšovat nebo snižovat střídu bez jakéhokoli rušení procesoru, takže nezpůsobuje jittering (třes) serva. U knihovny LedC režim zvolit nelze a všechny kanály pracují ve vysokorychlostním režimu.

3.2 Platformy pro řízení serv

Mikrokontrolerů a vývojových desek vhodných pro použití v malých robotech za účelem komunikace a ovládání periferií (například řízení serv, čtení dat ze senzorů) je celá řada a jejich výběr spíše záleží na preferenci uživatele. V této části se vyskytuje popis několika známých platform.

³Obrázek převzat z: <http://www.python-exemplary.com/raspi/rgifs/servomot1.png>

⁴Wrapper - vrstva kódu převádějící existující rozhraní knihovny na jiné kompatibilní rozhraní.

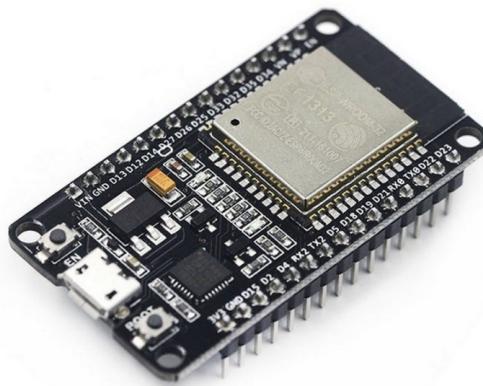
ESP32

ESP32 je řada SoC⁵ mikrokontrolerů vyvíjených firmou Espressif Systems. Dle datasheetu [13] se jedná o nástupce čipu ESP8266 a je dodáván v jednojádrových i dvoujádrových variantách 32bitového mikroprocesoru Tensilica Xtensa LX6 s integrovanou Wi-Fi (2.4GHz) a Bluetooth (v4.2 + BLE). Procesor pracuje s frekvencí 160 nebo 240MHz a je doplněn ko-procesorem s nízkou spotřebou. Čip disponuje 448 KiB ROM (paměť pro bootování a klíčové funkce), 520 KiB SRAM (data a instrukce) a interní FLASH pamětí 0/2/4 MiB podle verze čipu. ESP32 podporuje doplnění o externí QSPI FLASH paměť s kapacitou až 16 MiB.

Konektivita ESP32: 34 programovatelných GPIO pinů s hardwarovou podporou PWM (až 16 kanálů), 12bitový ADC a 8bitový DAC, SPI, I2C, I2S, UART.

ESP32 je dostupný jako samotný čip (např. ESP32-D0WDQ6) nebo PCB modul pro povrchovou montáž – SMD (např. ESP-WROOM-32). SMD moduly jsou navrženy pro zabudování do finálních produktů, a tak postrádají komponenty, které nejsou vhodné pro finální produkty, např. žádný USB-UART převodník ani programovací/reset tlačítka. Tímto se minimalizuje cena i velikost modulu. Pro účely prototypování a vývoje lze použít některou z dostupných vývojových desek.

Díky velkému množství open-source zdrojů podporuje ESP32 vývoj různými způsoby (například LUA, MicroPython, C/C++, AT příkazy atd.).



Obrázek 3.5: Vývojová deska s modulem ESP-WROOM-32⁶

ESP32 DOIT Devkit V1

Jedná se o vývojovou desku založenou na modulu ESP-WROOM-32 (s čipem ESP-D0WDQ6). Dle dokumentace [12] má integrovaný USB-UART převodník CP2102 a 2 tlačítka pro reset nebo uživatelem definované funkce. Všechny I/O piny modulu ESP-WROOM-32 jsou přístupné přes rozšiřující headery a mají logickou úroveň 3,3V. Na desce se nachází USB konektor pro napájení, programování firmwaru nebo debug UARTu. Zabudovaná FLASH má v tomto případě kapacitu 4MiB.

⁵System On Chip - čip nebo integrovaný obvod, který obsahuje hned několik částí počítače (obvykle CPU, RAM, I/O porty a paměť ROM)[15].

⁶Obrázek převzat z: <https://rpishop.cz/robotika-a-vzdelavani/1500-esp32-vyvojova-deska.html>

Arduino Uno R3

Arduino je open-source platforma založená na snadno použitelném hardwaru a softwaru (Arduino IDE). Desek Arduino je velké množství a právě Uno patří mezi nejznámější.

Uno je deska mikrokontroleru založená na čipu ATmega328P. Ve schématech [3] se uvádí, že Uno má k dispozici 14 digitálních vstupně výstupních pinů s logickou úrovní 5V (z nichž lze 6 použít jako výstupy PWM), 6 analogových vstupů, podporu I2C, krystal o frekvenci 16MHz, USB připojení pro nahrávání programu, napájecí konektor, záhlaví ICSP a tlačítko reset. Uno je vhodné pro úplné začátečníky díky své odolnosti vůči nesprávnému zacházení – v nejhorším případě lze vyměnit čip ATmega328P a začít znova.



Obrázek 3.6: Arduino Uno R3⁷

Raspberry Pi

Raspberry Pi je série jednodeskových počítačů vyráběných firmou Raspberry Pi Foundation. Od své první verze zveřejněné v roce 2012 bylo vydáno několik různých variant. Originální verze Pi měla jednojádrový procesor s frekvencí 700MHz a pouze 256MB RAM, přičemž poslední model je vybaven čtyřjádrovým procesorem s taktováním 1,5GHz a až 8GB RAM. Jak uvádí článek na webové stránce [30], cílová cenovka pro Raspberry Pi byla vždy pod \$100 (cca 2100Kč).

Na tomto levném počítači běží operační systém Linux nebo Windows IoT (u novějších verzí). Mimo to nabízí sérii GPIO (univerzálních vstupně výstupních) pinů, kterými je možno připojit různé elektronické periferie.

Raspberry Pi je momentálně k dispozici v různých provedeních, které se liší především výkonem. Klíčovými a společnými vlastnostmi všech variant je 40 GPIO pinů (z toho 4 mají hardwarové PWM, softwarové je dostupné na všech pinech [25]) s logickou úrovní 3,3V, slot pro paměťovou Micro SD kartu s operačním systémem a vyžadují vstupní napětí 5V. První a třetí generace je dodávána ve dvou verzích (Model A, který je levnější, a Model B) lišících se tvarem desky a uspořádáním konektorů.

21. ledna 2021 byl vydán mikrokontroler Raspberry Pi Pico, který se zcela liší od předchozích modelů [29]. Ten není jednodeskovým počítačem a vlastnostmi se spíše podobá Arduinu.

⁷Obrázek převzat z: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>

Raspberry Pi 4 Model B

Dosud nejvýkonnější model, nabízí možnost volby velikosti operační paměti – 2/4/8GB. Přechod na novější typ paměti (LPDDR4) také zvýšil její rychlosť. Dle specifikací na webové stránce [26] je Raspberry Pi 4B vybaveno 1.5GHz čtyřjádrovým procesorem ARM Cortex-A72. Díky přechodu na modernější 28nm technologii je zvýšen výkon procesoru, multimédií a I/O. Raspberry Pi 4B podporuje režim dvou monitorů s rozlišením 4k při 60Hz.

Raspberry Pi 4B je napájeno pomocí USB-C konektoru a vyžaduje proud minimálně 3A při napětí 5V. Lze také napájet přes GPIO nebo PoE.

Konektivita: 2,4GHz a 5GHz Wi-Fi, Bluetooth 5.0 (BLE), Gigabit Ethernet, 2x USB 2.0, 2x USB 3.0, 40GPIO pinů, 2x microHDMI 2.0, MIPI DSI pro připojení displeje, MIPI CSI pro kameru, čtyřpólový 3,5mm jack a slot na Micro SD kartu.



Obrázek 3.7: Raspberry Pi 4 Model B⁸

Raspberry Pi Zero/Zero W

Raspberry Pi Zero je menší a levnější model [28]. Je osazen starším čipsetem s jednojádrovým procesorem ARMv6 o taktu 1GHz, kterému sekunduje 512MB RAM. Tento model se vyznačuje svými malými rozměry a nízkou spotřebou. Rozložení GPIO pinů je stejné jako u modelu B. Raspberry Pi Zero W má navíc integrovanou Wi-Fi i Bluetooth 4.1.

Raspberry Pi Pico

Mikrokontroler Raspberry Pi Pico [27] je osazen čipem RP2040. Deska mikrokontroleru má Micro-USB B port pro napájení a data, 40 GPIO pinů s logickou úrovni 3,3V. Pico používá integrovaný spínaný zdroj, který umí generovat požadovaných 3,3V ze širokého rozsahu vstupních napětí (od 1,8V do 5,5V). Díky tomu lze desku napájet z různých zdrojů napětí, například z jednoho lithium-iontového článku nebo 3 sériově zapojených AA článků.

Čip RP2040 disponuje dvoujádrovým procesorem Cortex M0+ s frekvencí 133MHz a 256KB SRAM pamětí. Tento čip lze programovat v jazycích C/C++ nebo MicroPython, přičemž umožňuje i snadné ladění za běhu. Další vlastnosti čipu: 30 multifunkčních IO pinů (4 lze použít pro ADC), 12bitový ADC, 2x UART, 2x I2C, až 16 PWM kanálů.

⁸Obrázek převzat z: <https://www.conrad.cz/p/raspberry-pi-4-b-4-gb-4-x-15-ghz-raspberry-pi-2138865>

3.3 Bezdrátová komunikace s robotem

Klíčovou vlastností téměř každého pohybujícího se modelu je možnost jej dálkově ovládat. Bez této vlastnosti by modely ztrácely na praktičnosti a zábavním faktoru. To samé platí i o krájejících robotech.

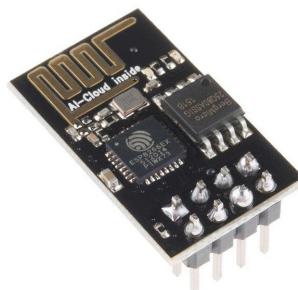
Pro tento účel je vhodná komunikace pomocí WiFi nebo Bluetooth. Každá z těchto dvou technologií s sebou přináší nové možnosti způsobu ovládání uživatelem.

WiFi

U tohoto řešení je možnost vytvoření webového serveru přímo na robotovi a realizace ovládací aplikace pomocí webového rozhraní. V tomto případě by bylo možné robota ovládat pomocí jakéhokoliv zařízení s Wi-Fi a internetovým prohlížečem (mobilní telefon, tablet, laptop, atd.).

Na vybavenějších řídících deskách určených pro IoT je Wi-Fi zabudována přímo. Pokud deska touto technologií nedisponuje, je možnost připojení Wi-Fi modulu.

Příkladem je Wi-Fi Modul osazen čipem ESP8266 [39], umožňující libovolnému mikrokontrolérovi přístup k internetu pomocí TCP/IP protokolu. Podporuje celkem 3 režimy – AP (přístupový bod), STA (stanice - je připojen k Wi-Fi) a AP + STA (kombinace obou režimů). Tento modul vyžaduje napájení 3,3V a využívá 3,3V logiku. Pro použití s Arduinem je proto nutné použít převodník logické úrovně.



Obrázek 3.8: Wi-Fi modul ESP8266⁹

Bluetooth

Druhou variantou je komunikace pomocí Bluetooth. V tomto případě je potřeba vytvořit vlastní aplikaci s uživatelským rozhraním pro zařízení, ze kterého je robot ovládán. Alternativně lze použít bezdrátových herních ovladačů.

Podobně jako u Wi-Fi může být Bluetooth čip vestavěn přímo na vývojové desce. Pro desky bez Bluetooth čipu lze použít například modul HC-05.

HC-05 [8] je sériový modul Bluetooth pro Arduino a další mikrokontrolery, s dosahem <100m. Provozní napětí modulu je 4 až 6V (typicky 5V). Funguje se sériovou komunikací USART a je kompatibilní s 5V logikou. HC-05 může pracovat v režimu Master, Slave nebo kombinovaném Master/Slave. Pro použití s mikrokontrolerem stačí připojit napájení a spojit Rx pin na modulu s Tx pinem na mikrokontroleru a Tx pin (HC-05) s Rx pinem (mikrokontroler).

⁹Obrázek převzat z: <https://dratek.cz/arduino/911-internet-veci-je-tady-tcp-ip-wifi-esp8266-esp-01.html>

3.4 Bateriové napájení robota

Důležitou částí pro správný chod robota je výběr vhodného bateriového napájení. Tato část popisuje nejpoužívanější typy baterií používaných v RC modelech a mimo jiné přibližuje i výhody a nevýhody vyskytující se při použití jednotlivých typů baterií.

Nikl-kadmiový akumulátor (NiCd)

Článek o niklových bateriích [4] uvádí, že nikl-kadmiový akumulátor byl původně vynalezen Waldemarem Jungerem v roce 1899. Jedná se o baterie s dlouhou historií a po celá desetiletí byly jedinou možností napájení mnoha RC modelů. Dnes jsou nahrazovány novějšími technologiemi. Jeden NiCd článek má nominální napětí 1,2V, pro vyšší napětí je nutné sériové zapojení více článků.

Mezi výhody NiCd akumulátorů patří: vysoký počet nabíjecích cyklů, pokud je dodržována správná údržba; možnost rychlého nabíjení s malým namáháním článku; vysoký vybíjecí proud; možnost dlouhodobého skladování ve vybitém stavu; dobrý výkon při nízkých teplotách; nabíjení je ekonomické; dostupnost v různých variantách (velikost, výkon).

Nevýhody nebo omezení mohou být: relativně nízká energie v porovnání s novějšími články – NiCd jsou těžší a objemnější; náchylnost k paměťovému efektu; toxicita kadmia, škodlivost pro životní prostředí; vysoké samovybíjení; pro dosažení vyššího napětí je nutno použít více článků.

Nikl-metal hydriový akumulátor (NiMH)

Nominální napětí NiMH akumulátorů je stejné jako u NiCd, tedy 1,2V. Dle literatury [4] jsou NiMH akumulátory nejdostupnější variantou pro koncové uživatele a vyrábějí se v různých velikostech (AA, AAA a jiné). Bohužel NiMH trpí rychlejším samovybíjením než jiné baterie.

Výhodami jsou: o 30 až 40% vyšší kapacita než u NiCd; menší náchylnost k paměťovému efektu, baterie lze obnovit; nepodléhají regulační kontrole – jednoduché skladování a přeprava; nejméně škodí životnímu prostředí; zisková recyklace díky obsahu niklu; provoz v různých teplotách.

Omezení: podvybití snižuje životnost; citlivost na přebíjení; vytváří teplo při rychlonabíjení nebo vybíjení s vysokou zátěží; vysoké samovybíjení.

Lithium-polymerový akumulátor (Li-Pol)

Li-Pol baterie [6] jsou široce používány v různé spotřebitelské elektronice. V posledních letech získaly na popularitě v RC modelech, nabízí dlouhou dobu provozu a vysoký výkon. Li-Pol baterie vyžadují k bezpečnému provozu dodržování různých pravidel při jejich zacházení.

Výhody: nízká váha a menší objem; vyrábí se v různých tvarech; mohou mít vysokou kapacitu; dobře snáší vysoké vybíjecí proudy – vysoký výkon.

Nevýhody: krátká životnost – nabízí 150 až 250 cyklů; nebezpečí vznícení při propíchnutí baterie; potřeba speciální péče při nabíjení, vybíjení a skladování.

¹⁰Obrázek převzat z: <https://www.peckamodel.cz/spmx40002s50h3-spektrum-smart-lipo-7-2v-4000mah-30c-ic3>



Obrázek 3.9: 2 článková Li-Pol baterie¹⁰

Základní parametry Li-Pol akumulátorů

Li-Pol baterie jsou definovány pomocí jejich parametrů, které je dobré znát pro výběr vhodného typu Li-Pol baterie. Význam jednotlivých parametrů je popsán v článku o Li-Pol bateriích [6] takto:

- **Napětí / Počet článků** – jeden Li-Pol článek má nominální napětí 3,7V. Pokud má baterie napětí 7,4V jedná se o dva sériově zapojené články. Používá se ozačení podle počtu sériově zapojených článků: 2S (dva články – 7,4V), 3S (tři články – 11,1V), atd.
- **Kapacita** – udává, kolik energie je schopna baterie uchovat. Udává se v mAh. To představuje proud, jakým by baterie byla vybita za jednu hodinu. Platí tedy čím vyšší kapacita, tím delší doba provozu.
- **Počet C** (angl. C Rating, kde C je zkratka pro Capacity) – pomocí této hodnoty je možno určit maximální vybíjecí proud baterie. Tento proud lze vypočítat, pokud známe kapacitu a počet C. Pokud je u baterie uveden maximální vybíjecí proud I_{max} , počet C a kapacita v Ampérech K, lze vypočítat I_{max} pomocí vzorce:

$$I_{max} = C * K$$

Pro baterii s kapacitou 5000mAh a 50C by platilo:

$$I_{max} = 50 * 5 = 250A$$

Z takové baterie lze dlouhodobě odebírat proud maximálně 250A.

Základy správného zacházení

Literatura [6] také popisuje zásady správného zacházení při nabíjení, vybíjení a skladování Li-Pol baterií:

- **Nabíjení** – pro nabíjení je důležité použití nabíječky pro Li-Pol baterie. Nabíjení baterie probíhá při konstantním proudu a konstantním napětí. Baterie je plně nabitá při dosažení napětí 4,2V na článku. Pro nabíjení vícečlánkových Li-Pol baterií je nutno použít nabíječky s balancerem. Ten zajišťuje stejné napětí na všech článcích.
- **Vybíjení (používání baterie)** – zahřívání nebo vybíjení baterie na méně než 3,0V baterii škodí a degraduje ji.
- **Skladování** – při delším skladování baterie je nutné uchovávat napětí 3,8V na článku. Plně nabitá baterie může být poškozena již po týdnu nepoužívání.

Při dodržování těchto zásad bude dosaženo maximální životnosti dané baterie i bezpečnosti při jejím používání.

Lithium-iontový akumulátor (Li-Ion)

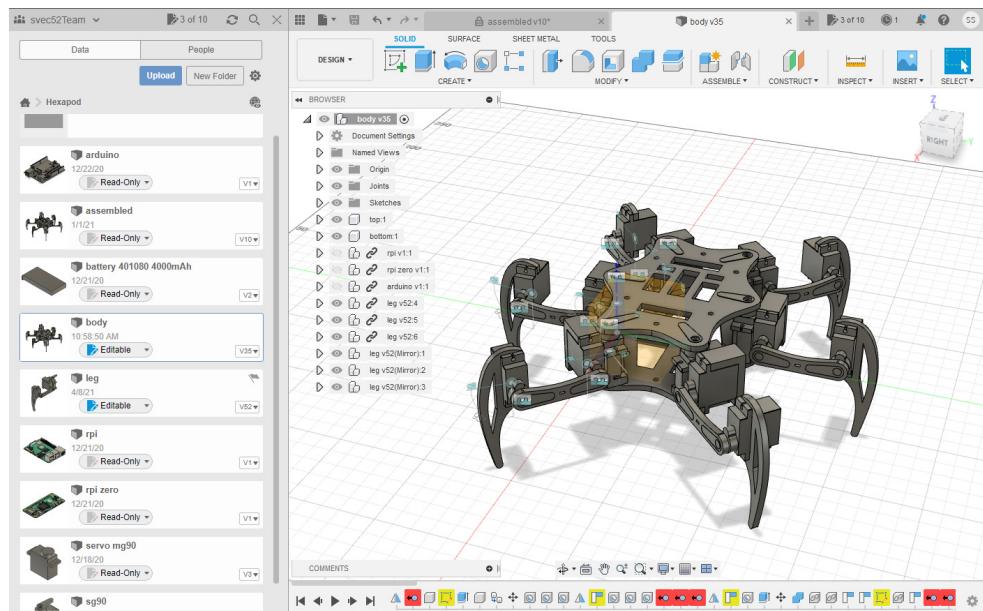
Li-Ion [5] akumulátor je hojně používán v RC modelech díky své příznivé ceně. Má vysokou kapacitu vzhledem k objemu a velikosti baterie. Samovybíjení u tohoto typu článku je nízké. Li-Ion lze dobíjet z libovolného stavu a kdykoliv nabíjení přerušit. Napěťový rozsah je podobný jako u Li-Pol, a to maximálně 4,2V a minimálně 2,8V. Při dlouhodobém skladování je nutné akumulátor alespoň jednou ročně nabít.

Výhody Li-Ion baterií: netrpí na paměťový efekt; nižší cena než Li-Pol; velká kapacita při malém objemu. Nevýhody: stárnutí; omezený počet nabíjecích cyklů.

3.5 Mechanická konstrukce, 3D modelování dílů

Mechanickou část robota lze sestavit z dílů dostupných v modelářských obchodech nebo případně pomocí kompletní sady pro specifický model robota. Nicméně tato řešení přináší některá omezení, jako je nutnost použití kompatibilních elektronických částí (například modelářských serv nebo elektromotorů, případně různých senzorů) a nemožnost větších úprav robota.

Pro eliminaci těchto omezení je možné vytvoření vlastních modelů jednotlivých dílů pomocí programů pro 3D modelování a následný tisk na 3D tiskárně. Pomocí této metody lze například vytvořit náhradu za nevyhovující nebo nedostupné díly, eventuálně vytvoření kompletní konstrukce robota. Pro 3D modelování a export dílů pro tisk lze využít některý z dostupných programů.



Obrázek 3.10: Uživatelské rozhraní programu Fusion 360 s modelem robota v perspektivním pohledu

Fusion 360

Fusion 360 je cloudová platforma pro 3D modelování, CAD, CAM a PCB od společnosti Autodesk. Jak uvádí článek o Fusion 360 [1], tento nástroj slouží pro vytváření 2D náčrtů

a 3D modelů včetně exportu do různých formátů. Mimo to umožňuje například animaci sestav, renderování objektů, simulování zátěže nebo přípravu modelů pro CNC obrábění. Díky možnosti bezplatné licence pro jednotlivce a studenty je Fusion 360 vhodným nástrojem pro začátečníky. Mimo omezenou licenci pro nekomerční použití lze za měsíční/roční poplatek získat plnou verzi se všemi funkcemi [2].

V článku o Fusion 360 [1] je také zmíněno, že program Fusion 360 neukládá modely lokálně do počítače, ale přímo na server. Takto uložené modely lze prohlížet pomocí libovolného zařízení s připojením k internetu – pro Android i iOS je dostupná aplikace umožňující zobrazení a posouzení modelů. Díky této vlastnosti se značně zjednoduší práce v týmu.

Kapitola 4

Analýza současného stavu a plán práce

Tato kapitola zahrnuje analýzu a zhodnocení jednotlivých typů kráčejících robotů a dostupných komponent. U analýzy kráčejících robotů jsou vyzdvíženy především výhody a nevýhody jednotlivých typů. Podle této analýzy jsem vyhodnotil optimální typ kráčejícího robota, jehož návrh se nachází v části návrhu řešení. U robota jsem nastudoval i potřebné komponenty a nastínil možnost uživatelského rozhraní.

4.1 Analýza typů kráčejících robotů

V kapitole 2 se vyskytuje popis jednotlivých typů kráčejících robotů jednotlivě. Tato část se zabývá složitostí konstrukce daných typů a porovnáním jejich vlastností.

Jedinou výhodou dvounohých robotů by mohl být snad malý počet potřebných serv – menší šance poruchovosti. Na druhou stranu mají velké množství nevýhod, jako je špatná stabilita jak při chůzi, tak při stání na místě. Samotná chůze těchto robotů je pomalá a jejich konstrukce neumožňuje implementaci více typů chůze. Konstrukce také vyžaduje návrh a použití složitějších dílů a správné vyvážení robota.

Čtyřnohý robot savčího i hmyzího typu poskytuje dostatečnou stabilitu. Nicméně zejména při klusu robota savčího typu se na serva vyvíjí větší zátěž, a proto je nutné použít odolná a silná serva. Serva při vysoké zátěži vyžadují také větší množství proudu, tím pádem by musela být použita výkonná baterie a případně regulátor napětí. Toto by značně zvýšilo cenové náklady. Při použití levnějších komponent by mohlo dojít k jejich zničení, zejména při pokusu o testování klusu robota. U čtyřnohých robotů s levnými komponenty tedy zůstává možnost implementace pouze jednoho typu chůze, který nedovoluje vyšší rychlosť.

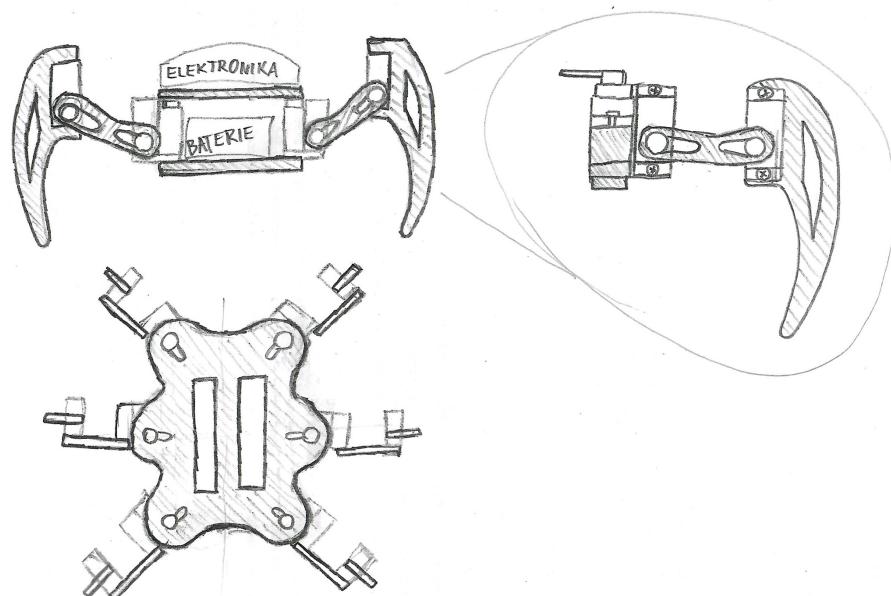
Jako správný výběr se tedy jeví šestinohý robot. Konstrukce nohou, která může být totožná jako u čtyřnohých a osminohých robotů hmyzího typu, lze navrhnut tak, aby se dala snadno vyrobit a zároveň poskytovala dobrou pevnost a stabilitu. U šestinohého robota je také možné naimplementovat hned několik druhů chůze i při použití levnějších a slabších serv. Nevýhodu šestinohých robotů vidím ve vysokém počtu potřebných serv (celkem 18), což může způsobit neočekávané potíže. Nicméně problematika šestinohých robotů je dobře zdokumentována a jejich konstrukce přináší možnosti více typů chůze.

Osminozí roboti jsou již překomplikovaní a z mého hlediska nepřináší oproti šestinohým žádné výhody. Také k nim není dostupných tolik článků a dokumentů jako k předchozím typům.

4.2 Návrh řešení robota

Na základě analýzy jednotlivých typů krácejících robotů jsem zvolil návrh a realizaci varianty šestinohého robota. Při návrhu robota je důležité si nejdříve určit, jak velký má robot ve výsledku být a tomuto faktoru přizpůsobit výběr jednotlivých komponent. V této práci jsem určil robota menších rozměrů z důvodu možnosti použití cenově dostupných modelářských serv.

Konstrukce robota bude složena z plastových dílů tištěných pomocí 3D tiskárny. U modelování těchto dílů bude dbáno na jejich jednoduchost a efektivitu, přičemž předlohou a inspirací může být kit robota Phoenix [10] od firmy Lynxmotion. Stejně, jako u kitu Phoenix, bude tělo navrženého robota kombinací mezi hexagonálním a obdélníkovým tvarem, a koněctiny budou hmyzího typu.

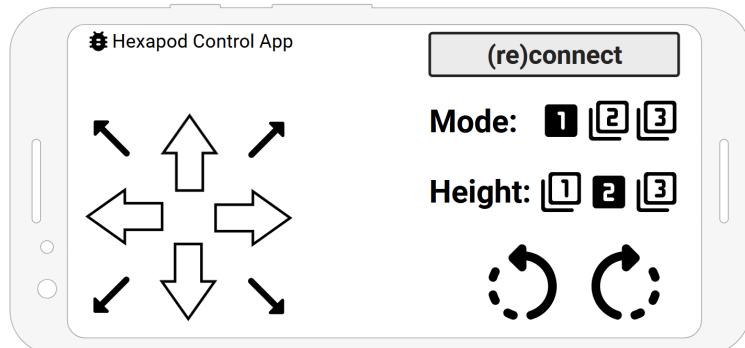


Obrázek 4.1: Nákres plánované konstrukce šestinohého robota

Jak je již zmíněno, robot má mít menší rozměry a kvůli tomu budou pro rozpohybování robota použita serva s označením velikosti micro. Ovládání celkem 18ti serv vyžaduje řídicí desku s dostatečným množstvím GPIO pinů podporujících PWM, případně použití rozšiřující desky pro tento účel. Hlavní řídicí platformou by pak mohlo být Raspberry Pi Zero W nebo některá z vývojových desek osazených modulem ESP32. Obě tyto platformy jsou vhodné hlavně díky své malé velikosti, nižší spotřebě a široké konektivitě. Vybraná řídicí platforma bude doplněna o rozšiřující desku z důvodu zajištění dostatečného množství pinů s podporou PWM. Jelikož desky vyžadují napájení 5V, je třeba zvolit baterii tak, aby při ideálních rozměrech a přijatelné kapacitě dosahovala minimálně tohoto napětí. Tyto vlastnosti splňují například dvoučlánkové lithiové akumulátory (Li-Pol nebo Li-Ion). Napětí dvoučlánkového lithiového akumulátoru je 7,4V, a proto se musí doplnit vhodným regulátorem napětí, aby bylo dosaženo výstupního napětí 5V.

Robota bude možné dálkově ovládat pomocí Bluetooth nebo WiFi. Při zvolení WiFi by bylo dosaženo kompatibility s vícero zařízeními při použití aplikace ve webovém rozhraní.

Alternativně lze vytvořit aplikaci a komunikovat s řídící deskou přes konkrétní síťový port. U varianty s použitím Bluetooth už je nutné naimplementovat vlastní aplikaci. Vytvořené uživatelské rozhraní bude v obou případech určeno primárně pro mobilní telefony.



Obrázek 4.2: Návrh uživatelského rozhraní ovládací aplikace

4.3 Technické specifikace práce

Z návrhu řešení v předchozí sekci lze sestavit specifické zadání práce, které bude realizováno. Výsledkem práce bude tedy dálkově ovládaný šestinohý robot. Tento robot bude disponovat celkem 18 stupni volnosti, bateriovým napájením a dálkovým ovládáním pomocí mobilní aplikace. V aplikaci bude na výběr z několika typů chůze společně s nastavením výšky chůze. Komunikace mezi řídící jednotkou robota a ovládací aplikací bude realizována pomocí technologie WiFi.

Aby bylo možno určit, zda zadání bylo splněno, jsou v následujících bodech shrnutý předpokládané vlastnosti výsledného robota:

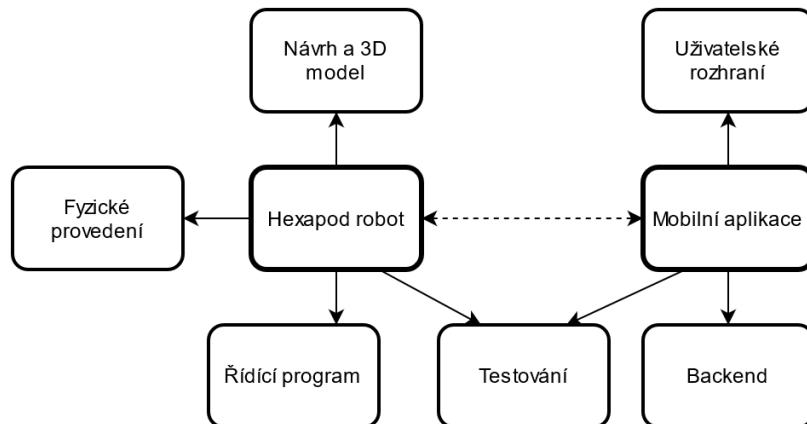
- Jednoduchá konstrukce s možností výměny dílů
- Cenová dostupnost použitých elektronických součástek
- Základní chůze “3+3” do všech směrů
- Jednoduché bezdrátové ovládání pomocí aplikace pro Android
- Bateriové napájení
- Schopnost otáčet se na místě
- Změna výšky chůze
- Možnost chůze “4+2” a “5+1”
- Pohyb v různých terénech

Tyto vlastnosti budou po dokončení implementační části práce ověřeny pomocí několika testů a experimentů, kterým bude robot podroben.

Kapitola 5

Fyzické provedení robota

Tato kapitola obsahuje popis jak celkové koncepce práce, tak jejích dílčích částí. Práci lze rozdělit na dvě rozdílné části, které spolu ve výsledku komunikují – samotného robota a mobilní aplikaci s uživatelským rozhraním. Sekce, věnující se robotovi, zahrnuje mechanickou konstrukci, zapojení elektroniky a klíčové vlastnosti řídícího programu. Podobně se úsek popisující mobilní aplikaci věnuje jak uživatelskému rozhraní, tak logické části aplikace. Celkovou práci lze tedy rozdělit do několika základních bloků, jak je ukázáno na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Blokové schéma dílčích částí práce

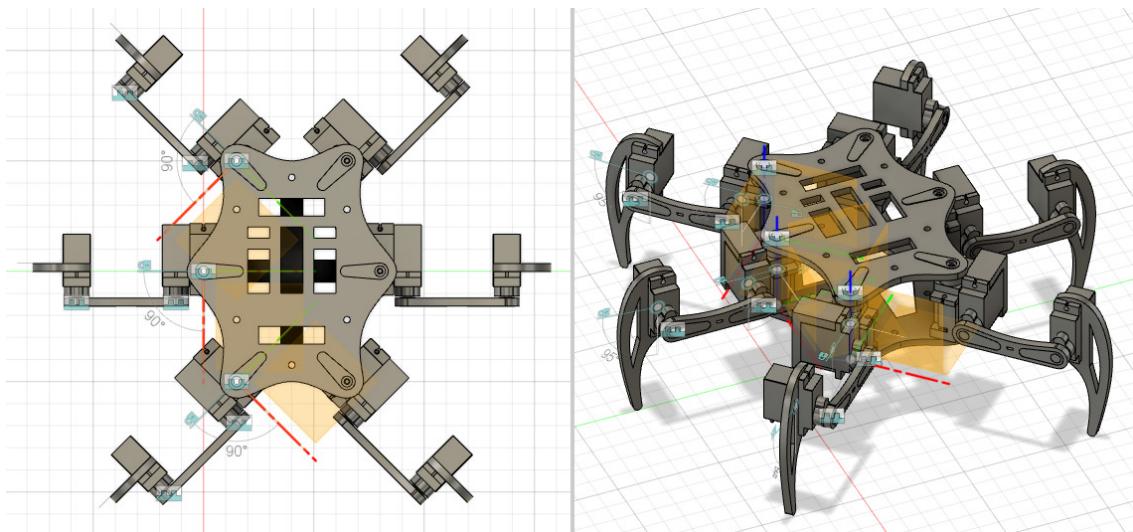
- **Hexapod robot** představuje robota jako celek a skládá se z následujících částí:
 - **Návrh a 3D model** – Základní a nejdůležitější částí každé práce je návrh. V této práci by bez návrhu nemohl robot nikdy vzniknout. Od návrhu se odvíjí samotné provedení – v tomto případě především konstrukce v podobě 3D modelu.
 - **Fyzické provedení** – S návrhem a představou o vlastnostech robota lze navrženého robota fyzicky sestavit. Tato část zahrnuje výběr použitých komponent, výrobu dílů – tisk na 3D tiskárně a celkové sestavení.
 - **řídící program** – Klíčovou částí robota je řídící program, díky kterému je zajištěna správná funkčnost všech komponent a robota celkově.

- **Testování** – Pro ověření funkčnosti je nutno otestovat jak jednotlivé části (kompatibilita jednotlivých dílů, správná funkcionalita elektronických komponent, dílčí části programu), tak i celkového robota.
- **Mobilní aplikace** je ve výsledku přímo spojena se sestaveným robotem, nicméně její samotné provedení je složeno z těchto částí:
 - **Uživatelské rozhraní** – tvoří vrstvu mezi uživatelem a logickou částí aplikace. Díky tomuto je uživateli umožněno pohodlné ovládání aplikace.
 - **Backend** – stará se o funkcionalitu aplikace, zpracovávání uživatelských vstupů a samotnou komunikaci mezi aplikací a robotem.
 - **Testování** – kvůli zajištění správného fungování aplikace je nutné otestovat uživatelské rozhraní i logickou část.

Po splnění všech bloků je ještě nutné otestovat celkový výsledek práce – to znamená komunikaci mezi robotem a aplikací, a korektní chování robota při dálkovém ovládání. Předešlé bloky jsou popsány podrobněji v následujících sekcích.

5.1 Robot jako celek

Základními prvky robota byly při jeho zhotovení 3D modely veškerých tisknutelných dílů vymodelovaných tak, aby svou velikostí seděly společně s použitou elektronikou (především u serv). Tyto modely byly vytvořeny v programu Fusion 360 a následně vytisknutы pomocí 3D tiskárny od společnosti Prusa Research. Na obrázku 5.2 je zobrazen 3D model celého robota včetně modelů použitých serv. Tělo se skládá ze dvou částí. Horní díl těla je vybaven výřezy pro vedení vodičů, kdežto výřezy na spodním dílu slouží k připevnění baterií. Končetiny jsou tvořeny třemi částmi. Coxu končetiny představuje držák pro dvě navzájem otočená serva a spojuje tělo s femurem. Na femuru jsou drážky pro vlepení pák serv a na tibii je servo připevněno pomocí šroubů.



Obrázek 5.2: Výsledný 3D model robota

Před tiskem všech dílů se nejprve vytiskly díly nutné k ověření správné velikosti. Po dodaňení detailů v příslušných 3D modelech a vyzkoušení, zda v nich serva sedí, byly vytisknuty všechny části potřebné k sestavení robota. Serva se do dílů připevnily pomocí šroubů kvůli zajištění možnosti výměny serv nebo jiných částí při případném poškození. Páky všech serv byly do jednotlivých dílů vlepeny vteřinovým lepidlem. Přichycení spodní a horní části těla proběhlo pomocí plastových distančních sloupků. Před upevněním serv k jejich pákám bylo nejprve nutné ověřit funkčnost každého serva a nastavit jeho polohu do středové pozice 90° . Přesná kalibrace serv se provedla až v kódu.

Zvolená elektronika robota

Základními součástmi, od kterých se odvíjel celý zbytek robota jsou bezpochyby modelářská serva. Podle jejich rozměrů a síly byl navržen 3D model i velikost robota a podle potřebného napájení byla zvolena deska pro ovládání i typ baterií pro napájení. U všech elektronických komponent byla před jejich aplikací otestována a ověřena správná funkčnost.

Modelářská serva – SG90

Pro pohyb robota byla zvolena generická modelářská serva s označením SG90 kvůli své nízké ceně. Jedná se o analogová serva s polohově otáčivou hřídelí v rozmezí 180° (u jednotlivých kusů se mohou krajní hodnoty lehce lišit). Velikostně lze servo SG90 zařadit do kategorie Micro. Převodovka je čistě plastová a při nesprávném zacházení může dojít k jejímu poškození. Tato serva vyžadují vstupní napětí v rozsahu od 4,2 do 6V a jejich točivý moment na páce je $1,5\text{kg}/\text{cm}$.

Některá serva s označením SG90 se mohou mírně lišit svými rozměry (viz obrázek 5.3, servo použité v této práci – na obrázku vlevo – je o pár milimetrů vyšší). V práci byla použita serva s rozměry $29\text{mm} \times 23\text{mm} \times 12\text{mm}$.

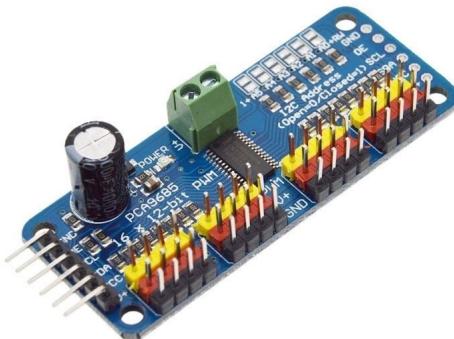


Obrázek 5.3: Porovnání dvou typů serv s označením SG90

Řídící jednotka a rozšiřující deska

Jako hlavní řídící jednotka byla použita generická deska s modulem ESP32 (konkrétně obdoba desky DOIT Devkit V1). Deska s modulem ESP32 poskytuje zejména velké množství GPIO pinů, dostatečný výkon a bezdrátovou konektivitu, přičemž si zachovává nižší spotřebu.

Řídící jednotka pak musela být doplněna o rozšiřující desku pro ovládání většího množství serv, konkrétně se jedná o 16-kanálovou PWM desku s driverem PCA9685. Řadič PCA9685 je primárně určen pro řízení RGBA světelných diod, ale lze jej použít i v kombinaci se servy.



Obrázek 5.4: Rozšiřující deska s řadičem PCA9685¹

Tyto dvě desky spolu komunikují přes sériovou sběrnici I2C propojením SDA pinu desky PCA9685 s pinem G21 na desce s modulem ESP32 a SCL (PCA9685) s pinem G22 (ESP32). Protože rozšiřující deska pojme maximálně 16 serv, zbylá dvě serva jsou řízena pomocí GPIO pinů řídící desky (konkrétně piny s označením G5 a G18).

Regulátor napětí a baterie

Nezbytným prvkem robota je vlastní napájení elektronických částí. Zde byla zvolena kombinace LiPol baterií a nastavitelného regulátoru napětí. Konkrétně se jedná o dvě sériově zapojené LiPol baterie s kapacitou 4000mAh a označením 104080. Nominální napětí takto spojených baterií je 7,4V. Použitá baterie je vybavena ochranným obvodem zabraňujícím poškození, pokud by došlo k příliš vysokému odběru proudu. Přestože počet C baterie se rovná 1, a tím pádem z ní lze odebírat proud maximálně 4A, je tato baterie pro robota dostačující.

Jelikož řídící i rozšiřující deska vyžadují napájecí napětí 5V (což je i v rozmezí pro napájení serv), bylo nutné doplnit baterie o regulátor napětí. Použitý regulátor napětí je osazen měničem XL4016 a maximální výstupní proud může dosahovat až 8A (při krátkodobé zátěži). Výstupní napětí tohoto regulátoru lze upravit potenciometrem na jeho desce.

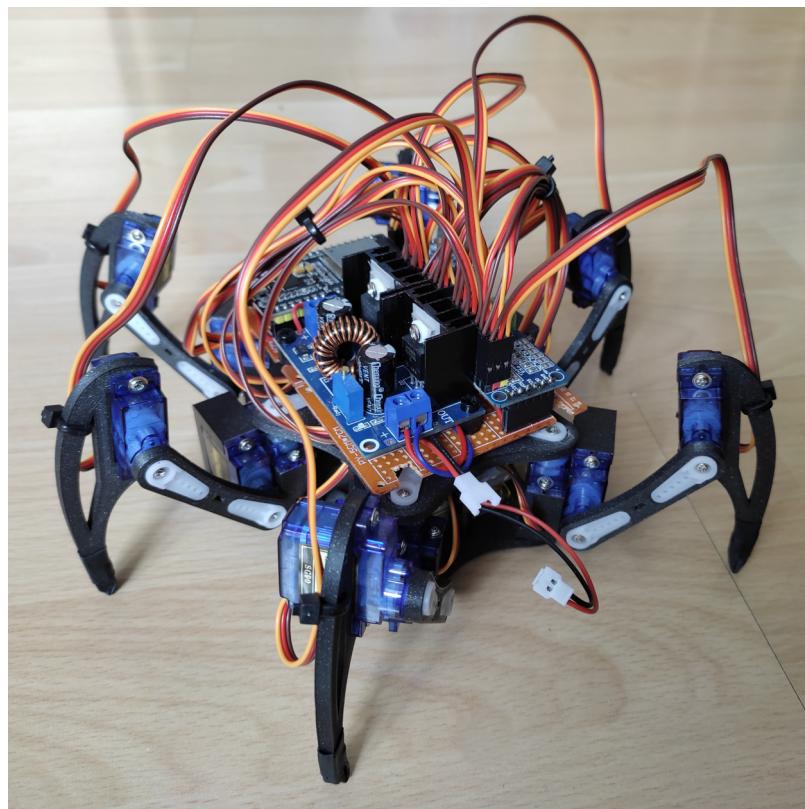
Způsob zapojení komponent a další úpravy

Pro zapojení bylo navrženo rozmístění komponent na pájivém poli a následné rozvržení propojovacích cest. Podle návrhu se na pájivé pole připájely piny/dutinky, do kterých se zapojily komponenty, a jako propojovací cesty posloužily vodiče. Tímto způsobem zapojení je snadné vyměnit jednotlivé elektronické části v případě jejich zničení. Deska s elektronikou byla k tělu robota připevněna pomocí distančních sloupek, které se použily i pro uchycení některých komponent k pájivému poli. Baterie byly umístěny mezi horní a spodní část těla robota, aby se zachovalo nízké těžiště a tím i zajistila vyšší stabilita.

Na závěr byly jednotlivé konce nohou obaleny stahovací bužírkou, což zabránilo podkluzování nohou. Díky tomu se robot může pohybovat po libovolném povrchu. Další nutnou úpravou bylo přichycení vodičů serv (na tibii) ke konstrukci stahovacími páskami, aby nedocházelo k namáhání této vodičů.

Schéma zapojení elektroniky společně s kompletním seznamem použitých dílů včetně jejich cen se nachází v přílohách B a A.

¹Obrázek převzat z: <https://hadex.cz/m534b-servo-shield-pca9685-pwm-16-ti-kanalovy/>



Obrázek 5.5: Vzhled výsledného robota (celková hmotnost je 550g)

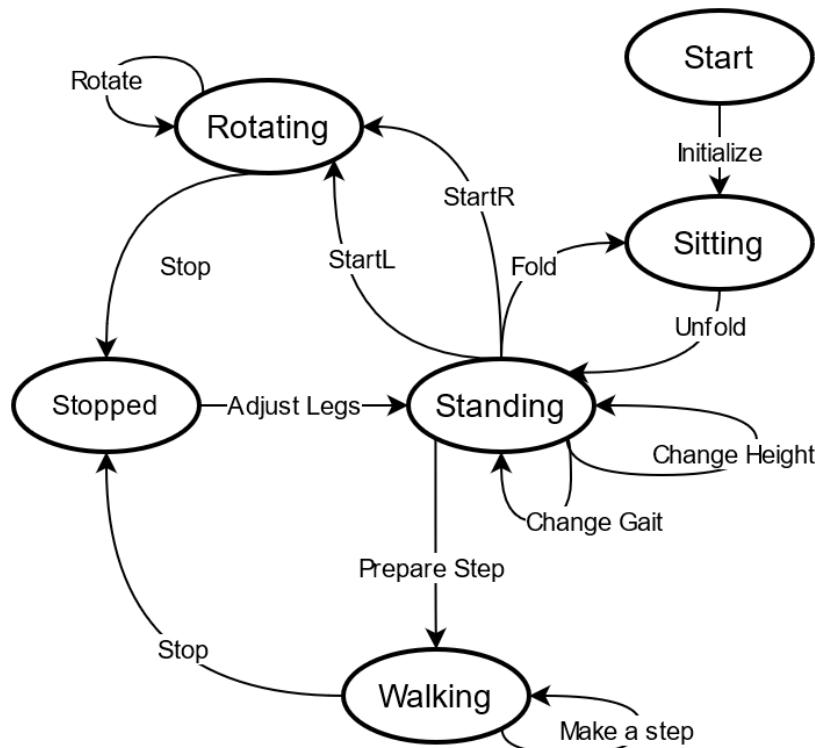
řídící program robota

Pro řízení hardwarových částí bylo třeba napsat program pro správné chování celkového robota. Modul ESP32 podporuje spouštění aplikací napsaných v různých programovacích jazycích jako je například C, C++ nebo Micropython. Kvůli zkušenostem a široké podpoře knihoven pro hardware jsem se rozhodl pro jazyk C++ v kombinaci s vývojovým prostředím Arduino IDE. Toto vývojové prostředí je kromě textového editoru vybaveno i nástroji pro správu různých vývojových desek nebo přímý překlad a nahrávání programu na zvolenou vývojovou desku. Arduino IDE také disponuje sériovým monitorem vhodným pro poskytování zpětné vazby při ladění programu. Při použití Arduino IDE musí mít každý napsaný program minimálně dvě funkce: `void setup()` – probíhá pouze jednou po spuštění kódu na desce, a `void loop()` – smyčka, která běží neustále, dokud nedojde k přerušení běhu programu například restartováním nebo nahráním nového kódu.

Inicializace a hlavní smyčka programu

Hlavní soubor programu obsahuje v první řadě definice používaných proměnných, objektů a některých funkcí. Po spuštění programu je zahájena komunikace s PWM deskou a inicializace serv včetně upřesnění jejich středové polohy. Pro obnovování polohy serv se na jádře 1 procesoru vytvoří task (vlákno/úloha) `TaskRefresh` s vyšší prioritou. Task běží na samostatném jádře a zaručuje synchronizovaný pohyb všech 18ti serv, což je pro koordinovaný pohyb robota klíčové. Na druhém jádře s identifikátorem 0 probíhá hlavní smyčka programu společně s obsluhou WiFi komunikace.

Hlavní smyčka je složena ze dvou částí. V první části se zpracovávají data, která vysílá uživatelská aplikace prostřednictvím WiFi, a přijaté hodnoty se přiřadí odpovídajícím proměnným. Druhou částí je stavový automat, jehož přechody mezi jednotlivými stavami jsou určovány těmito řídícími proměnnými. Po zapnutí a inicializaci se robot nachází ve stavu **Sitting**. Jakmile je uživatelem přepnuta poloha robota, dostává se do stavu **Standing**. **Standing** se dá považovat za hlavní stav robota, protože je v něm možné měnit výšku a typ chůze robota. Zvolením směru chůze nebo otáčení přechází robot do příslušného stavu - **Walking** nebo **Rotating**. Robot se pohybuje a otáčí podle vybraného typu chůze a výšky. Po zastavení otáčení nebo chůze je robot zastaven a probíhá úprava jeho končetin do výchozích poloh. Robot je nyní v hlavním stavu **Standing**.



Obrázek 5.6: Stavový automat ovládání robota

V kódu jsou použity následující externí knihovny: `Adafruit_PWM_Servo_Driver.h` - slouží pro řízení desky s řadičem PCA9685; `WiFi.h` a `WifiAP.h` - díky těmto knihovnám lze snadno implementovat WiFi komunikaci a nastavit mód WiFi na přístupový bod.

Třída pro práci se servy

Třída `MyServo` je základním stavebním kamenem programu robota. Díky této třídě lze serva jednoduše ovládat. Serva se zde řídí pomocí generovaných signálů PWM. Pro odpovídající úhel je vypočítána střída, jež se aplikuje na odpovídající kanál PWM.

Pro plynulost pohybů robota obsahuje tato třída frontu, kde je po dvojicích ukládána požadovaná pozice serva a doba, za kterou má být tato pozice dosažena. To je důležité zejména při implementaci algoritmů, kdy se při jednom kroku robota nastavuje více poloh serva.

Ovšem nejdůležitější a také klíčovou funkcí pro synchronizovaný pohyb robota je funkce `Refresh()`. Ve funkci `Refresh` dochází k aktualizaci polohy serva tak, aby bylo přesně za daný čas dosaženo požadované polohy. Jestliže dojde k přesázení tohoto času, je servu přímo nastavena požadovaná poloha a z fronty je načtena nová poloha společně s novou dobou trvání. Přesný úhel odpovídající danému času je vypočítáván pomocí vzorce:

$$angle = angle_{prev} + (angle_{des} - angle_{prev}) * \frac{time_{curr} - time_{start}}{duration}$$

kde $angle$ je výsledný úhel, $angle_{prev}$ – předchozí (současný) úhel, $angle_{des}$ – požadovaný úhel, $time_{curr}$ – aktuální čas, $time_{start}$ – čas začátku pohybu pro aktuální požadovaný úhel a $duration$ – doba za kterou má být dosaženo požadovaného úhlu.

Implementace končetiny

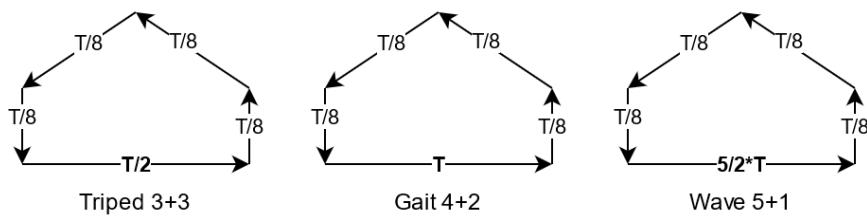
Samotná končetina se skládá ze tří serv a její hlavní funkcí je nastavení polohy špičky končetiny pomocí XYZ souřadnic, k čemuž byla použita inverzní kinematika. Díky této funkci lze s končetinami snadno pracovat.

Při zastavení chůze/otáčení robota je aktuální poloha končetiny dopočítána přímou kinematikou a následně již inverzní kinematikou položena na zem. To je z důvodu bezpečného položení zdvižené končetiny na zem.

Pohybové algoritmy robota

`Hexapod` je složen z šesti končetin a ukládá si aktuální stav do proměnné. Tato třída obsahuje všechny potřebné pohybové algoritmy pro různé typy chůze. Implementovány byly algoritmy pro pohyb i otáčení v režimu tripodální, "4+2" a vlnové chůze. Pro každou chůzi je napsána funkce pro přípravu kroku, kvůli plynulému přechodu z klidového stavu a funkce pro samotný krok.

Algoritmy pro různé typy chůze se liší pouze v časování jednotlivých končetin a době, po kterou se končetiny dotýkají země. Typický tvar pohybu zdvihání a pokládání jedné končetiny (na obrázku 5.7) při libovolném algoritmu zůstává stejný. Díky časování jednotlivých segmentů pohybu bylo dosaženo přirozenějšího pohybu robota.

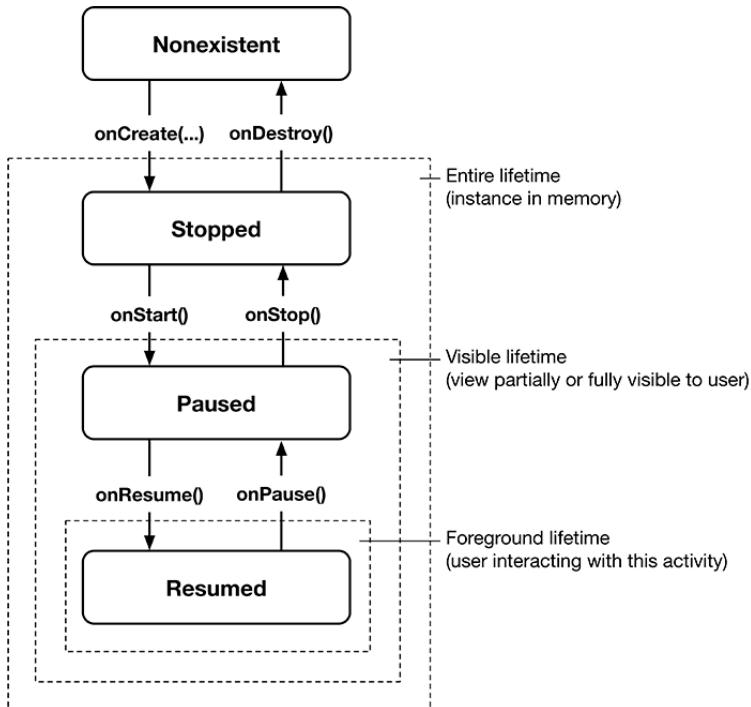


Obrázek 5.7: Časování a tvar pohybu špičky končetiny ve svíslé ose pro různé typy chůze

5.2 Mobilní aplikace pro dálkové ovládání robota

Robota lze dálkově ovládat prostřednictvím snadno použitelné uživatelské aplikace. Aplikace byla vytvořena pro telefony s verzí operačního systému Android 6.0 a novější. Pro vývoj aplikace jsem použil vývojové prostředí Android Studio, a programovací jazyk, ve kterém byla aplikace napsána je Java. Vývoj mobilní aplikace sestává ze dvou základních částí.

Jednou částí je uživatelské rozhraní a druhou samotná implementace funkčnosti logiky aplikace. Při vývoji aplikace pro Android je hlavní částí programu tzv. activity, bez níž by aplikace nešla spustit. Activity je prezenční vrstvou aplikace. Každá activity má daný svůj životní cyklus (obrázek 5.8) a má k dispozici několik callbacků. Povinná je implementace callbacku `onCreate()`, kde se vytváří základní logika aplikace (například propojení prvků GUI s objekty v kódu).



Obrázek 5.8: Zjednodušená ilustrace životního cyklu Activity²

Uživatelské rozhraní

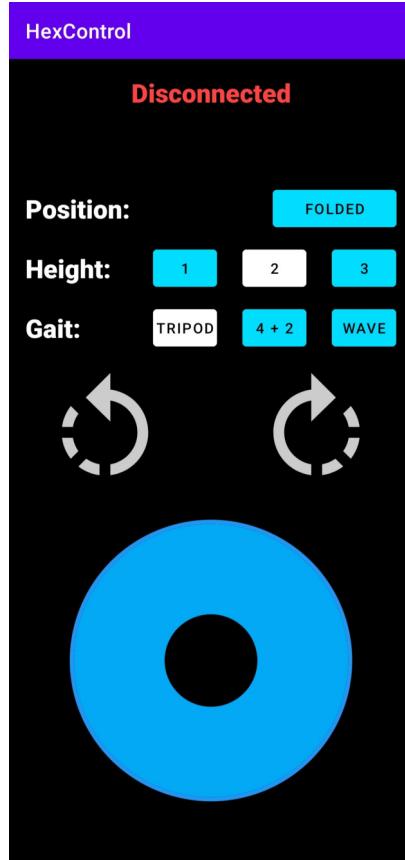
Uživatelské rozhraní tvoří jedna hlavní obrazovka se všemi potřebnými ovládacími prvky. Největší změnou proti původnímu návrhu je vertikální orientace obrazovky. Také bylo odstraněno tlačítko pro manuální připojování, protože aplikace se na určitý síťový port připojuje automaticky, pokud je telefon připojen k WiFi. O stavu úspěšného připojení, případně odpojení je uživatel informován pomocí textu `Connected/Disconnected`. Pro řízení pohybu robota byly nejprve navrženy šipky do osmi směrů. Tento způsob ovládání byl nahrazen všešměrovým virtuálním joystickem, obsaženým v externí knihovně³. Díky joysticku lze robotovi určit libovolný směr chůze a plynule jej měnit.

Ve finální verzi uživatelského rozhraní (obr. 5.9) přibylo jedno tlačítko na složení/rozložení robota – přepínání stavu robota mezi stavy `Sitting` a `Standing`. Tlačítka ve skupině `Height` lze přepínat výšku chůze robota, s čímž se zároveň mění i jeho rychlosť – pokud je robot nízko, končetiny nemusí být zvedány do velké výšky a proto se mohou pohybovat rychleji. Naopak pokud je robot vysoko, dělá vyšší kroky a pohybuje se pomaleji. Pro pře-

²Obrázek převzat z: <https://www.oreilly.com/library/view/android-programming-the/9780135257555/ch03s02.html>

³Knihovna je dostupná z: <https://github.com/controlwear/virtual-joystick-android>

pínání režimů chůze robota slouží tlačítka ve skupině **Gait**. Zde je na výběr mezi tripodální chůzí “3+3”, chůzí “4+2” a vlnovou chůzí “5+1”. Robota lze pak otáčet doleva nebo doprava za pomocí příslušné šipky znázorňující rotaci.



Obrázek 5.9: Grafické uživatelské rozhraní aplikace

Backend aplikace

V rámci životního cyklu activity je v aplikaci implementován pouze callback `onCreate()` a `onStart()`. V callbacku `onCreate()` probíhá přiřazení akcí provedených při stisku tlačítek/pohybu joysticku. Aby při pohybu joystickem nedocházelo k pohybu robota ve špatném směru, je úhel joysticku zaznamenáván, až pokud je jeho hodnota za polovinou maximálního rozsahu. Při každém stisku tlačítka/pohybu joystickem jsou pomocí socketu odesílána data nesoucí hodnoty všech ovládacích prvků. Tímto se zajistila aktualizace změněných hodnot. Tyto hodnoty jsou odesílány prostřednictvím TCP socketu na řídící desku robota.

Callback `onStart()` spouští úlohu, která běží periodicky a odesílá charakter pro kontrolu aktivního spojení. Program na modulu ESP32 kontroluje, zda byl přijat tento charakter a tím pádem přesně určuje, zda je spojení s uživatelem aktivní.

5.3 Dosažené cíle a možná zlepšení

Určení, zda bylo dosaženo cílů vytyčených v části 4.3, se věnuje tato část. Úvodní zadání jsem splnil, výsledkem práce je tedy šestinohý robot s 18 stupni volnosti a je možno jej dálkově ovládat pomocí mobilní aplikace. Kromě tohoto bylo třeba porovnat a ověřit předpokládané vlastnosti robota:

- **Jednoduchá konstrukce, výměna dílů** – 3D model robota obsahuje pouze nezbytné části a nedisponuje žádnými složitými díly. Serva byla do dílu připevněna pomocí šroubů, tudíž lze v případě poškození vyměnit jak serva, tak tištěné díly. Co se týče elektronických částí, jednotlivé moduly jsou zasazeny v dutinkách, a tak jdou snadno vyměnit kus za kus. Baterie lze vytáhnout po odšroubování spodní části těla robota. Tento bod považuji za splněný.
- **Cenová dostupnost** – celková cena použitých dílů je ~\$60, což je zlomek ceny, za kterou se dají pořídit komerční řešení obdobných robotů.
- **Všesměrová chůze “3+3”** – robot je schopný se pohybovat libovolným směrem v režimu tripodální chůze, přičemž lze tento směr plynule měnit při pohybu robota.
- **Bezdrátové ovládání** – robota lze dálkově ovládat pomocí aplikace z libovolného mobilního telefonu s operačním systémem Android ve verzi 6.0 a vyšší. Uživatelské rozhraní obsahuje pouze nutné prvky k ovládání a jednoduše se používá.
- **Bateriové napájení** – pro napájení byly použity 2 LiPo baterie s dostatečnou kapacitou pro dlouhý provoz robota. Baterie byly zapojeny sériově pomocí redukce. Při nabíjení baterií je nutné tuto redukci odpojit a nabíjet každou baterii zvlášť.
- **Otačení robota na místě** – robot se umí otáčet v obou směrech při různých režimech chůze v libovolně zvolené výšce.
- **Změna výšky chůze** – uživatel si může zvolit jednu ze tří možností výšky chůze robota. Konkrétní vzdálenosti mezi zemí a spodní částí těla robota jsou 15mm, 30mm a 50mm.
- **Varianty chůze “4+2” a “5+1”** – obě varianty byly implementovány a uživatel může přepínat mezi třemi režimy chůze.
- **Pohyb v různých terénech** – robot je schopen se pohybovat po více typech terénu, více v sekci testování 5.4.

Možného zlepšení by mohlo být dosaženo použitím kvalitnějších serv, protože použitá serva mají nepatrnu výhodu na páce. Kvůli tomuto dochází při chůzi k třasu některých zdvižených končetin. Nicméně tato vlastnost nemá žádný vliv na funkcionalitu robota. Také zvolený typ baterií je mírným omezením kvůli jejich nízkému počtu C. Výměnou za silnější baterie a mírnými úpravami kódu by bylo dosaženo svižnějšího a rychlejšího pohybu robota.

Nejvýznamnějšího zlepšení je možné docílit vybavením všech končetin senzory došlapu a přepracováním kódu. Tímto by se eliminovaly případy, kdy některé končetiny zůstávají ve vzduchu jakmile se robot nachází na nerovném povrchu.

5.4 Testování robota

Za účelem ověření klíčových vlastností robota jsem sestavil a realizoval testy. Nejvíce testovanou vlastností byla průchodnost rozdílnými terény při různém nastavení robota.

Pohyb v různých terénech

Tato sada experimentů testuje pohybové vlastnosti robota v různých terénech. Při testech byly vyzkoušeny různé kombinace nastavení výšky robota a typu chůze.

- **Chůze po hladkém povrchu (podlaha) – Úspěch** – robot se bez problémů dokáže pohybovat a otáčet v libovolném směru při každém nastavení výšky i typu chůze.
- **Chůze po hrubém povrchu (nízký koberec) – Úspěch** – pohyb robota je stejně bezproblémový jako na hladkém povrchu.
- **Pohyb v členitém terénu (rozsypané lego kostky) – Úspěch** – při nastavení nejnižší výšky nebyl robot schopen zdvihnout končetiny dostatečně vysoko, aby mohl překročit kostky. Robot se začal správně pohybovat až při nastavení nejvyšší polohy. V této poloze byly poté testovány jednotlivé typy chůze. Při tripodální chůzi se robot propadal mezi kostky a převažoval se do stran – pohyboval se velmi obtížně. Po přepnutí na chůzi “4+2” se robot dokázal pohybovat bez větších problémů. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo v kombinaci nejvyšší polohy společně s vlnovou chůzí. V tomto režimu se robot dokázal po kostkách bez problémů pohybovat.
- **Chůze po měkkém povrchu (postel) – Úspěch** – s nejnižší polohou se robot pohyboval dost problematicky nezávisle na typu chůze. Nicméně při středním nastavení výšky byl již schopen bezproblémové chůze i otáčení libovolného typu.
- **Pohyb v nízké trávě ~3cm – Úspěch** – s nejnižší polohou byl robot plnou vahou opřen o trávu a tak se prakticky nehnul z místa za použití libovolného režimu chůze. Po zvýšení na střední hodnotu se začal mírně pohybovat, nicméně byl stále opřen o trávu. Až při zvolení nejvyšší polohy byl robot schopen správného pohybu při všech typech chůze.
- **Pohyb ve svahovitém terénu ~25° (tráva) – Neúspěch** – kvůli výšce trávy musela být vybrána nejvyšší poloha robota. Bohužel při pokusu o chůzi se robot převrátil kvůli vysokému těžišti.
- **Pohyb ve svahovitém terénu ~25° (beton) – Úspěch** – robot sice jevil mírné problémy při stoupání do svahu, nicméně byl schopen jej vylézt s nejnižším i středním nastavením výšky ve všech režimech chůze. Nejvyšší poloha nebyla testována, protože hrozilo možné převrácení robota.

Z těchto testů vyplývá, že robot je bez větších potíží schopen pohybu v různě členitých terénech, které se příliš nesvažují. Tripodální chůze je ideální především k pohybu v rovnějších terénech, “4+2” a vlnová chůze umožňují robotovi překonávání náročnějších a členitých terénů. Robot není při současné implementaci vhodný do svažujících se povrchů.

Testy výdrže robota

Tyto experimenty jsou zaměřeny na vlastnosti zpracování robota, odolnost jeho konstrukce a elektroniky. Nicméně kvůli jejich povaze nebyla většina testů realizována, aby nedošlo ke zničení robota. Minimálně následující testy je nutné provést pro zajištění kvality robota před případným uvedením na trh.

- **Test nosnosti robota** – tento test by měl prověřit sílu robota a jak těžké těleso dokáže unést. Kvůli konstrukci robota a absenci nákladního prostoru nebyla testována chůze se zátěží. Test tedy proběhl experimentem, zda se robot s různě těžkými tělesy dokáže postavit a je schopen měnit svou výšku. Nejtěžší těleso, se kterým se robot zvládl postavit a změnit svou výšku, mělo váhu 460 gramů.
- **Pevnost konstrukce** – zde by měly být jednotlivé díly konstrukce podrobeny zátěžovým testům a měřen tlak/zátěž potřebný k jejich zničení. Tento test nebyl realizován z důvodu zničení robota.
- **Opotřebení serv** – protože serva jsou složena z mechanických prvků, může opakováním používáním dojít k jejich opotřebení a poruše. Z důvodu omezeného času této práce nebyla možnost test realizovat.
- **Opotřebení baterií** – u každé baterie časem dochází k její degradaci a poklesu celkové kapacity. Ze stejných důvodů jako v předchozím případě nebyl tento test realizován.
- **Kvalita elektroniky** – použité elektronické části nemám zcela vyzkoušené, a tak mohou z různých důvodů po delším čase přestat fungovat. Celkovou životnost jsem také z důvodu omezeného času této práce nemohl testovat.

Kapitola 6

Závěr

V této práci bylo cílem navrhnut a vytvořit robota sestrojeného z modelářských serv. Cíl byl splněn a výsledkem je dálkově ovládaný šestinohý robot, připomínající robotického brouka.

Nastudoval jsem princip činnosti modelářských serv, způsoby jejich řízení a vlastnosti. Na záladě těchto znalostí a dostupných technologiích byl navržen strojek s modelářskými servy, konkrétně se jednalo o šestinohého kráčejícího robota. Pro tento návrh byly zvoleny vhodné elektronické komponenty a vytvořeny mechanické díly. Následně proběhla realizace tohoto návrhu, přičemž byl robot doplněn o dálkové ovládání v podobě mobilní aplikace. V implementaci pohybu robota bylo využito inverzní kinematiky pro přirozený pohyb končetin. Po dokončení sestavení robota, implementace řídícího programu a ovládací aplikace jsem shrnul cíle, kterých bylo dosaženo a prodiskutoval možná zlepšení. Robot byl v závěru podroben několika experimentům, které testovaly zejména průchodnost rozdílnými terény.

Ke stavbě robota bylo použito celkem 18 serv, tím pádem má k dispozici 18 stupňů volnosti. Nákupní cena elektroniky a jiných součástek byla odhadnuta na \$60, přičemž 3D tisk dílů jsem neplatil. Robot má implementovány 3 režimy chůze, a je možné zvolit jednu ze tří výškových poloh robota.

Práce mi dala nové zkušenosti s ovládáním a synchronizací většího množství serv, která se pohybují nezávisle na sobě. Kromě toho jsem si vyzkoušel aplikaci inverzní i dopředné kinematiky na konkrétním příkladě.

V práci bylo možné pokračovat opatřením končetin robota vhodnými senzory pro určení, zda se dotýkají země, a přizpůsobením 3D modelu konkrétního dílu. Mimo to by mohl být robot vybaven výkonnější řídící deskou a doplněn kamerou, případně dalšími diagnostickými senzory (například pro měření vlhkosti, tlaku, teploty a jiných veličin v nepřístupných prostorách).

Literatura

- [1] IZGAREVIC, D. *What Is Fusion 360? – Simply Explained* [online]. Německo: ALL3DP, 2019 [cit. 2021-15-06]. Dostupné z:
<https://all3dp.com/2/what-is-fusion-360-simply-explained/>.
- [2] *Fusion 360 / 3D CAD, CAM, CAE & PCB Cloud-Based Software / Autodesk* [online]. Mill Valley, Kalifornie: Autodesk Inc., 2021 [cit. 2021-15-06]. Dostupné z:
<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/>.
- [3] *Arduino Uno Rev3* [online]. Mountain View, Kalifornie: Arduino, 2020 [cit. 2021-10-05]. Dostupné z: https://content.arduino.cc/assets/Pinout-UNOrev3_latest.pdf.
- [4] BUCHMANN, I. *Nickel-based Batteries* [online]. Richmond, Kanada: Cadex Electronics Inc., 2019 [cit. 2021-18-05]. Dostupné z:
<https://batteryuniversity.com/article/bu-203-nickel-based-batteries>.
- [5] *Baterie do RC modelů / jak vybrat vhodnou baterii* [online]. Česká republika: RCPROFI.cz, 2021 [cit. 2021-18-05]. Dostupné z:
<https://www.rcprofic.cz/poradna/jak-vybrat-baterie-do-rc-modelu>.
- [6] SCHNEIDER, B. *A Guide to Understanding LiPo Batteries* [online]. Saginaw, Michigan: Roger's Hobby Center, 2021 [cit. 2021-18-05]. Dostupné z:
<https://rogershobbycenter.com/lipoguide>.
- [7] BISWAL, P. a MOHANTY, P. K. Development of quadruped walking robots: A review. *Ain Shams Engineering Journal*. Egypt: Ain Shams University. 2021, sv. 12, č. 2, s. 2017–2031. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.11.005>. ISSN 2090-4479.
- [8] *HC-05 - Bluetooth Module* [online]. COMPONENTS 101, 2018 [cit. 2021-10-05]. Dostupné z: <https://components101.com/wireless/hc-05-bluetooth-module>.
- [9] DEEPA, T., ANGALAESWARA, S., SUBBULEKSHMI, D., KRITHIGA, S., SUJEETH, S. et al. Design and implementation of bio inspired hexapod for exploration applications. *Materials Today: Proceedings*. Velká Británie: Elsevier Ltd. 2021, sv. 37, s. 1603–1607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.165>. ISSN 2214-7853. International Conference on Newer Trends and Innovation in Mechanical Engineering: Materials Science. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320352585>.
- [10] *Lynxmotion - Phoenix* [online]. Swanton, Vermont: Robotshop Inc., 2021 [cit. 2021-18-06]. Dostupné z: <http://www.lynxmotion.com/c-117-phoenix.aspx>.

- [11] ELLIOTT, R. *Hobby Servos* [online]. Sydney, Austrálie: Elliott Sound Products, 2018. Dostupné z: <https://sound-au.com/articles/servos.htm>.
- [12] DOIT *Esp32 DevKit v1* [online]. Zerynth, 2021 [cit. 2021-10-06]. Dostupné z: https://olddocs.zerynth.com/latest/official/board.zerynth.doit_esp32/docs/index.html.
- [13] *ESP32 Series Datasheet* [online]. Šanghaj, Čína: Espressif Systems, 2021 [cit. 2021-10-06]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- [14] GLAVIN, M. *Understanding Servo Technology* [online]. Velká Británie: Scale Soaring UK, 2019. Dostupné z: <https://cevans.me/Articles/Articles/digitalservos.pdf>.
- [15] HARDING, S. *What Is an SoC? A Basic Definition* [online]. New York: Tom's Hardware, 2019 [cit. 2021-07-06]. Dostupné z: <https://www.tomshardware.com/reviews/glossary-soc-system-on-chip-definition,5890.html>.
- [16] *PhantomX AX Metal Hexapod Mark III* [online]. Downers Grove, Illinois: Trossen Robotics, 2021 [cit. 2021-07-06]. Dostupné z: <https://www.trossenrobotics.com/phantomx-ax-hexapod.aspx>.
- [17] INABA, M., KANEHIRO, F., KAGAMI, S. a INOUE, H. Two-armed bipedal robot that can walk, roll over and stand up. In: *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*. Pittsburgh, Pensylvánie: IEEE, 1995, sv. 3. DOI: 10.1109/IROS.1995.525899.
- [18] KITANO, S., Horigome, A., HIROSE, S. a ENDO, G. TITAN-XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking. *Robomech Journal*. Švýcarsko: Springer International Publishing AG. 2016, sv. 3, č. 8. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40648-016-0047-1>. Dostupné z: <https://robomechjournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40648-016-0047-1>.
- [19] LIU, M., XU, F., JIA, K., YANG, Q. a TANG, C. A Stable Walking Strategy of Quadruped Robot Based on Foot Trajectory Planning. In: *2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. Peking, Čína: IEEE, 2016, s. 799–803. DOI: 10.1109/ICISCE.2016.175.
- [20] NITUDESCU, M., IVANESCU, M., HAI NGUYEN, V. D. a MANOIU OLARU, S. Designing the legs of a hexapod robot. In: *2016 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*. Sinaia, Rumunsko: IEEE, 2016, s. 119–124. DOI: 10.1109/ICSTCC.2016.7790651.
- [21] *Robugtix* [online]. Hong Kong, Čína: Robugtix, 2021 [cit. 2021-08-06]. Dostupné z: <https://www.robugtix.com/>.
- [22] OSTENDORFF, E. Analog Servos for Robotics. *Servo Magazine*. Los Angeles, Kalifornie: T & L Publications, Inc. 2015, s. 68–72. Dostupné z: https://www.servomagazine.com/magazine/article/july2015_Ostendorff.
- [23] PARKER, G. B. Generating Arachnid Robot Gaits with Cyclic Genetic Algorithms. In: *Genetic Programming 1998: Proceedings of the Third Annual Conference*.

University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, USA: Morgan Kaufmann, 1998, s. 576–583.

- [24] *ROBOTIS MINI* [online]. Lake Forest, Kalifornie: ROBOTIS, 2021 [cit. 2021-26-05]. Dostupné z: <https://emanual.robotis.com/docs/en/edu/mini/>.
- [25] *GPIO - Raspberry Pi Documentation* [online]. Velká Británie: Raspberry Pi Foundantion, 2021 [cit. 2021-08-06]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/>.
- [26] *Raspberry Pi 4 Model B - Specifications* [online]. Velká Británie: Raspberry Pi Foundantion, 2021 [cit. 2021-10-06]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>.
- [27] *Raspberry Pi Pico - Specifications* [online]. Velká Británie: Raspberry Pi Foundantion, 2021 [cit. 2021-10-06]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-pico/specifications/>.
- [28] *Raspberry Pi Zero W* [online]. Velká Británie: Raspberry Pi Foundantion, 2021 [cit. 2021-10-06]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-zero-w/>.
- [29] *RaspberryPI models comparison* [online]. Francie: Social Compare, 2021 [cit. 2021-10-06]. Dostupné z: <https://socialcompare.com/en/comparison/raspberrypi-models-comparison>.
- [30] *What is a Raspberry Pi?* [online]. Raleigh, Severní Karolína: Red Hat, 2021 [cit. 2021-08-05]. Dostupné z: <https://opensource.com/resources/raspberry-pi>.
- [31] RYAN. *The Difference between Analog and Digital RC Servos* [online]. Radio Control Info, 2020 [cit. 2021-07-05]. Dostupné z: <https://www.radiocontrolinfo.com/the-difference-between-analog-and-digital-rc-servos/>.
- [32] APOORVE. *What is a Servo Motor? - Understanding the basics of Servo Motor Working* [online]. Jaipur, India: Circuit Digest, 2015 [cit. 2021-08-05]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/article/servo-motor-working-and-basics>.
- [33] HEATH, J. *PWM: Pulse Width Modulation: What is it and how does it work?* [online]. Cleveland, Ohio: WTHW Media LLC, 2017 [cit. 2021-08-05]. Dostupné z: <https://www.analogictips.com/pulse-width-modulation-pwm/>.
- [34] *LED Control* [online]. Šanghaj, Čína: Espressif Systems, 2021 [cit. 2021-08-05]. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/ledc.html>.
- [35] ARNOLD, J. a PLÜSS, A. *SERVOMOTORS* [online]. Bern, Německo: Python Exemplary, 2021 [cit. 2021-08-05]. Dostupné z: http://www.python-exemplary.com/drucken.php?inhalt_mitte=raspi/en/servomotors.inc.php.
- [36] TANG, C., XU, F. a ZOU, F. A Stable Trot Strategy of Quadruped Robot Based on Capture Point. In: *2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. Honolulu, Hawaii: IEEE, 2017, s. 427–431. DOI: 10.1109/CYBER.2017.8446191.

- [37] TODD, D. J. *Walking Machines: an Introduction to Legged Robots*. Springer US, 1985. ISBN 9781468468588.
- [38] WANG, Z., DING, X.-L. a ROVETTA, A. Analysis of typical locomotion of a symmetric hexapod robot. *Robotica*. Velká Británie: Cambridge University Press. 2010, sv. 28, s. 893–907. DOI: 10.1017/S0263574709990725.
- [39] *ESP-01 WiFi Module* [online]. Šen-čen, Čína: Ai-Thinker, 2015 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.microchip.ua/wireless/esp01.pdf>.

Příloha A

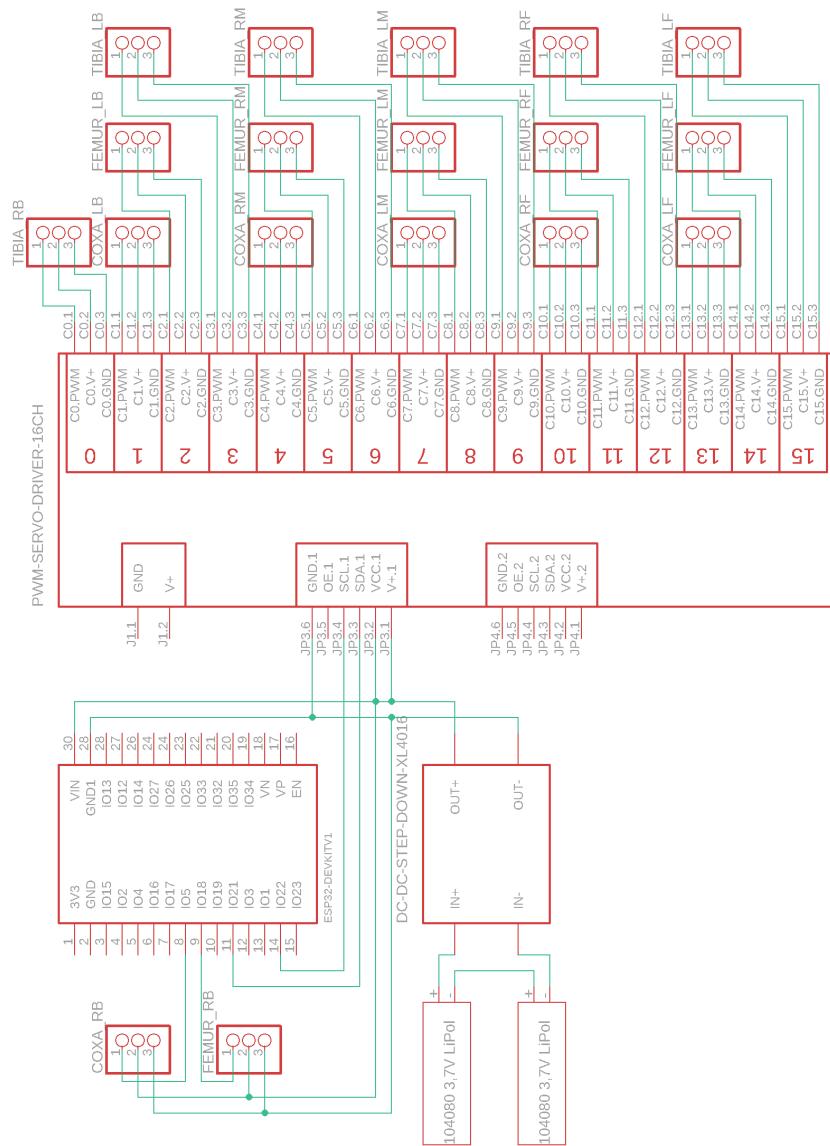
Seznam použitých dílů

Tabulka A.1: Použité díly a jejich nákupní cena

Název komponenty	Počet kusů	Cena celkem
ESP32 vývojová deska	1	\$4,30
XL4016 nastavitelný DC-DC step down regulátor napětí 8A 200W	1	\$2,74
Servo 9g SG90	18	\$19,25
TENSTAR ROBOT I2C 16 kanálový 12-bit PWM/Servo Driver PCA9685	1	\$2,04
3,7V 4000mAh 104080 LiPo baterie	2	\$16,98
Sada distančních sloupků, šroubů a matic	1	\$3,95
Sada pinů a dutinek	1	\$1,88
Stahovací bužírky, konektory, drátky a pájivá pole	-	~\$6
Cena celkem	-	~\$60

Příloha B

Schéma zapojení elektroniky



Obrázek B.1: Schéma zapojení elektroniky