



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ**  
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

# **ŘÍZENÍ ROBOTY TYPU HEXAPOD**

HEXAPOD ROBOT CONTROL

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ZDENĚK PELZ**

**Ing. MAREK ŽÁK**

BRNO 2016

## Abstrakt

Tato práce popisuje obecnou problematiku robotů s kráčivým podvozkem. Zaměřuje se na roboty se šesti končetinami, tedy hexapody. Součástí práce je i srovnání kráčivých podvozků s pojízdnými. Práce dále popisuje stavbu těla hexapodů, umístění končetin na těle a analýzu končetin. Obsahem práce je také popis jednotlivých druhů chůze pro pohyb po rovném povrchu a volnou chůzi pro pohyb v členitém terénu. Dále jsem popsal jednotlivé druhy kinematik. Součástí práce je i popis senzorů a proč jsou důležité pro orientaci hexapoda. Popsal jsem i způsoby, kterými se hexapod může vyhnout a obcházet překážky. Také jsem popsal svoji implementaci pohybu hexapoda a způsob jakým detekuje překážky a jakým způsobem je obchází. Při práci na této práci jsem pracoval s robotem typu PhantomX AX Hexapod Mark II a vybavil jsem ho senzory SRF08 pro dálkovou detekci překážek.

## Abstract

This thesis contains definition of general problematics of robots with legged chassis. It is focused on six-legged robots, hexapods. Part of this thesis is also comparison of legged chassis with wheeled chassis. Thesis also contains design of hexapod robots, placement of its limbs and limb analysis. Part of this thesis also describes types of gaits for movement in flat terrain and for ragged terrain. I have also described individual kinematics and their usage for movement of hexapod. There is also detailed description of sensors I used for orientation of hexapod and means for walking around obstacles using described sensors. I have also described implementation of this movement. When I was working on this thesis, I was working with PhantomX AX Hexapod Mark II robot. I equipped this robot with sensors SRF08 for long range obstacle detection.

## Klíčová slova

Hexapod, PhantomX AX Hexapod Mark II, inverzní kinematika, přímá kinematika, tripod, vlna, vlnění.

## Keywords

Hexapod, PhantomX AX Hexapod Mark II. inverse kinematics, forward kinematics, tripod, wave, ripple.

## Citace

PELZ, Zdeněk. *Řízení robota typu hexapod*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Žák Marek.

# Řízení robota typu hexapod

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Marka Žáka. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....  
Zdeněk Pelz  
18. května 2016

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Marku Žákovi za jeho odborné vedení, ochotu a konstruktivní kritiku při práci.

© Zdeněk Pelz, 2016.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.*

# Obsah

<b>1 Kráčivé podvozky</b>	<b>4</b>
1.1 Výhody kráčivých podvozků . . . . .	4
1.2 Nevýhody kráčivých podvozků . . . . .	5
<b>2 Hexapod</b>	<b>6</b>
2.1 Druhy hexapodů . . . . .	6
2.2 Původ hexapodů . . . . .	6
<b>3 Historie</b>	<b>8</b>
3.1 Masha . . . . .	8
3.2 OSU . . . . .	8
3.3 Odex I . . . . .	9
3.4 NMIIIA . . . . .	9
3.5 Adaptive Suspension Vehicle . . . . .	10
3.6 AMBLER . . . . .	10
<b>4 Výkonostní parametry hexapodů</b>	<b>11</b>
4.1 Duty factor . . . . .	11
4.2 Froudovo číslo . . . . .	11
4.3 Měrný odpor . . . . .	11
<b>5 Stavba hexapoda</b>	<b>13</b>
5.1 Stavba končetiny . . . . .	13
5.2 Postavení končetin . . . . .	14
<b>6 Výpočet pozic pro servomotory</b>	<b>15</b>
6.1 Přímá kinematika . . . . .	15
6.2 Inverzní kinematika . . . . .	16
6.3 Algebraické metody . . . . .	16
<b>7 Pohyb hexapoda</b>	<b>18</b>
7.1 Typy pohybu . . . . .	18
7.1.1 Tripod . . . . .	18
7.1.2 Vlna . . . . .	19
7.1.3 Vlnění . . . . .	19
7.2 Rychlost . . . . .	19
7.3 Stabilita . . . . .	20
7.4 Volná chůze . . . . .	21

<b>8</b>	<b>Senzory</b>	<b>22</b>
8.1	Senzory pro měření vzdálenosti . . . . .	22
8.2	Kontaktní senzory . . . . .	22
8.3	Senzor SRF08 . . . . .	23
8.4	Umístění senzorů na robotovi . . . . .	24
<b>9</b>	<b>PhantomX AX Hexapod Mark II</b>	<b>26</b>
9.1	Servomotory Dynamixel AX-12A . . . . .	26
9.2	Knihovna NUKE . . . . .	27
9.3	Problémy spojené s robotem Phantom X AX Hexapod Mark II . . . . .	27
<b>10</b>	<b>Pohyb robota</b>	<b>28</b>
10.1	Základní postoj . . . . .	29
10.2	Pohyb dopředu . . . . .	31
10.3	Pohyb stranou . . . . .	32
10.4	Výpočet pozic servomotorů . . . . .	33
	<b>Literatura</b>	<b>35</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>37</b>
	Seznam příloh . . . . .	38
<b>A</b>	<b>Obsah CD</b>	<b>39</b>
<b>B</b>	<b>Manuál</b>	<b>40</b>

# Úvod

Výzkum nových technologií a robotika jdou ruku v ruce, není se tedy čemu divit, že s příchodem nových technologií přichází i nové způsoby řízení a konstrukce nových druhů robotů. To se týká hlavně robotů s kráčivým podvozkem. Oproti robotům s kolovým nebo pásovým podvozkem mají roboti s kráčivým podvozkem tu výhodu, že mohou přelézat překážky, které by roboti s jiným typem podvozku museli objet nebo překonat jiným způsobem a tím si prodloužit cestu k cíli. Tato vlastnost jim dává větší přizpůsobivost danému terénu a dělá je vhodnějším pro pohyb ve členitém terénu [15]. Jedním z případů jsou i roboti typu hexapod. Hexapodi, ze všech robotů s kráčivým podvozkem, poskytují největší rychlost a stabilitu v poměru k počtu končetin. Proto je tedy značná většina výzkumů, které se zabývá kráčivými podvozky, orientovaná právě na hexapody.

Pro pohyb hexapoda slouží servomotory umístěné na jeho končetinách. Každá končetina má tři servomotory, což dává dohromady celkem 18 pohonných jednotek. Při řízení je tedy třeba spočítat všech 18 nových hodnot pro jednotlivé servomotory. Tyto hodnoty se musí před samotným provedením kroku spočítat, což může být bez správného postupu problematické. Je také potřeba, aby mohl hexapod s jednotlivými servomotory pohybovat nezávisle na sobě, jinak by mohlo při chůzi dojít k zakopnutí nebo ke klopýtání, popřípadě k ujíždění podkluzování končetin.

V této práci budou popsány jednotlivé typy chůzí, které může robot typu hexapod používat pro pohyb po rovném terénu. Tyto chůze je možné periodicky opakovat, což je výhodné, protože se hexapod může naučit pouze jeden krok a ten pak opakovat. Dále budou zmíněny způsoby, jakými je možné vypočítat hodnoty, na které je potřeba nastavit servomotory, aby hexapod při chůzi využíval všech končetin a nenechával některé zbytečně viset ve vzduchu.

# Kapitola 1

## Kráčivé podvozky

Kráčivými podvozky se označují podvozky, které při pohybu napodobují chůzi. Ať už lidí, nebo zvířat. Mají proměnlivý počet končetin, ale experimentálně bylo zjištěno, že od šesti končetin výše se nezvyšuje rychlost pohybu [17]. Při větším počtu končetin stačí k udržení stability pouze některé z těchto končetin. V případě hexapoda stačí k udržení rovnováhy, aby stál pouze na třech končetinách. Tato vlastnost dělá kráčivé podvozky unikátní a dovoluje zbylým třem končetinám, aby byly použity jako ruce a tím pádem provádět jiné úkony, které mohou a nemusí souviset se samotným výkonem chůze. Například hledání nového místa, vhodného pro umístění končetiny při dalším kroku, nebo, pokud je tomu končetina uzpůsobena, sbírání předmětů a vzorků. Pro takové operace je ovšem vhodnější přidělit samostatné rameno a ostatní končetiny používat pouze k chůzi.



Obrázek 1.1: Příklad kráčivého a pojízdného podvozku.

### 1.1 Výhody kráčivých podvozků

Oproti robotům s kolovým nebo pásovým podvozkem roboti s kráčivým podvozkem (viz obr. 1.1) mají tu výhodu, že mohou přelézat překážky, které by roboti s jiným typem podvozku museli objet nebo překonat jiným způsobem a tím si prodloužit cestu k cíli. Tato vlastnost jim dává větší přizpůsobivost danému terénu a dělá je vhodnějším pro pohyb ve členitém terénu [15]. Také je možné, že překážku nebude možné nijak objet a tím bude znemožněno se přes ni robotům s pojízdným podvozkem dostat. Roboti s kráčivým podvozkem se dokážou dostat přes překážku daleko větší, než roboti s jiným typem podvozku. Pro kolové podvozky je limitována velikost překážky, přes kterou se mohou dostat, poměrem velikosti překážky a průměru kola po kterých jezdí. Kolový podvozek tak může přejet překážku, která má maximální výšku menší než je polovina průměru kola [20]. I tak se ovšem může stát, že se robot při přejezdu zasekne na mrtvém bodě, například když se zasekne s

koly ve vzduchu, nebo když se převrátí. Naproti tomu roboti s kráčivým podvozkem mohou přejít překážku, která se rozměry může rovnat délce samotné končetiny robota. Tímto značně zvyšují svoji pohyblivost ve členitém terénu, přes který by se roboti s pojízdným podvozkem nedostali. Proto se v dnešní době vědci zaměřují stále více a více na vývoj robotů s kráčivým podvozkem a upouštějí od robotů s pojízdným podvozkem.

Další výhodou je vliv, který má robot při pohybu na terén kterým se pohybuje. Kráčivé podvozky se dotýkají povrchu terénu pouze na určitých bodech vybraných pro umístění končetiny. Na rozdíl od pojízdných podvozků, které vyžadují pro pohyb stálý kontakt s povrchem terénu. Tato vlastnost se stává faktorem například pokud je potřeba nechat terén co nejméně porušen.

## 1.2 Nevýhody kráčivých podvozků

Je zřejmé, že roboti s kráčivým podvozkem byly navrženi pro členitý terén a pojízdné podvozky byly navrženy pro málo členitý nebo rovný povrch. Končetiny robotů s kráčivým podvozkem jsou uzpůsobené tak, aby pro ně byl co nejjednodušší pohyb v členitém terénu, kde je pohyb pro roboty s pojízdným podvozkem prakticky nemožný. Proto je rychlost robotů s kráčivým podvozkem, na málo členitém terénu nebo na rovině, ve srovnání s pojízdnými podvozky, na stejném terénu, naprosto nesmyslná. Pojízdné podvozky jsou schopny dosáhnout daleko větší rychlosti, než které kdy budou schopny kráčivé podvozky. Speciálně konstruovaní hexapodi, kteří jsou stavěni více na běh, než na chůzi, se této rychlosti alespoň blíží.

Další nevýhoda robotů s kráčivým podvozkem je jejich cena. Protože jsou kráčivé podvozky složitější a energeticky náročnější, nemají zatím moc široké využití. Kromě samotných servomotorů, umístěných v končetině a umožňujících pohyb, je také potřeba řada senzorů a další podpůrná technika, která jim dává možnost bezchybně vykonávat úkony, pro které byly navrženy. Proto zatím nejsou nijak výrazně rozšířeni a možnost jejich využití není zatím plně zmapována.



## Kapitola 2

# Hexapod

Jako hexapod se v robotice označuje robot, který k chůzi využívá šest končetin. Takový počet dělá hexapody velmi stabilní, protože k udržení stability není zapotřebí kontaktu všech šesti končetin s povrchem terénem, jako je tomu u robotů s kolovým nebo pásovým podvozkem. Existuje několik výhod, které má hexapod oproti robotům se dvěma končetinami, robotům se čtyřmi končetinami nebo robotům s menším počtem končetin:

- Hexapodům stačí k udržení rovnováhy při stání pouze tři končetiny.
- Díky šesti končetinám mají velkou volnost pohybu při kterém jsou schopni udržet statickou stabilitu.
- Šest končetin je nejúčinnější při chůzi, vyšší počet končetin dále již nezvyšuje rychlost pohybu.
- Při chůzi se vyrovná se ztrátou několika končetin.
- Díky stabilitě, kterou mu poskytuje počet končetin, může některé končetiny používat jako ruce k provádění různých operací [11].

### 2.1 Druhy hexapodů

Hexapody můžeme rozdělit na 2 typy. Osově a středově symetrické (viz obr. 2.1). Osově symetrickí hexapodi mají prodloužené tělo a na každé straně mají tři končetiny. Tělo osově symetrických hexapodů poskytuje větší dosah předních a zadních končetin při pohybu, což může být výhodou při pohybu v členitém terénu. Také mohou mít v přední části umístěné čelisti nebo ramena pro manipulaci s objekty, na rozdíl od středově symetrických hexapodů, kde musí být prostředky pro manipulaci s objekty umístěné na těle robota.

Středově symetrickí hexapodi mají končetiny rozmístěné pravidelně po obvodu těla po  $60^\circ$ . Mají většinou hexagonální tvar těla a končetiny umístěné na vrcholech. Protože nemají žádnou část která by se dala označit jako přední a zadní, středově symetrickí hexapodi se v některých případech nemusí otáčet, aby mohli změnit směr, ale stačí zvolit chůzi potřebným směrem.

### 2.2 Původ hexapodů

Hexapod byl původně inspirován hmyzem. Hmyz využívá šest končetin a tím pádem jsou velmi stabilní. Typičtí představitelé hexapoda v hmyzí říši jsou mravenci. Mohou také



Obrázek 2.1: Příklad osově a středově souměrného hexapoda.

používat jednu či dvě končetiny pro jiné úkony a držet stabilitu na zbylých čtyřech. Toto platí jak pro pohyb, tak pro samotný postoj na místě. Kvůli inspiraci hmyzem jsou také všichni hexapodi symetričtí. Hmyzem je také inspirovaný styl chůze a také jednotlivé typy chůze.

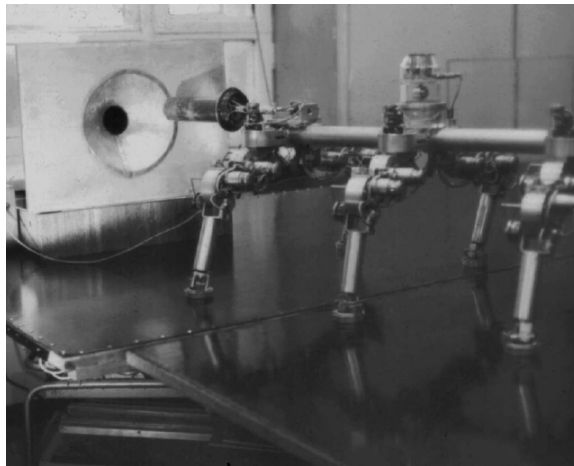
## Kapitola 3

# Historie

V polovině 50. let 20. století se začalo zajímat velké množství vědců o roboty využívající kráčivý podvozek. Asi o deset let později byli hexapodi vyvíjeni v laboratořích po celém světě.

### 3.1 Masha

V roce 1976 byl v Moskvě vytvořen robot zvaný Masha (viz obr. 3.1). Robot měl deskový podvozek a kloubové končetiny se třemi stupni volnosti. Robot byl schopen se vyhýbat překážkám pomocí kontaktních senzorů na končetinách a senzorem měřícím vzdálenost [19].

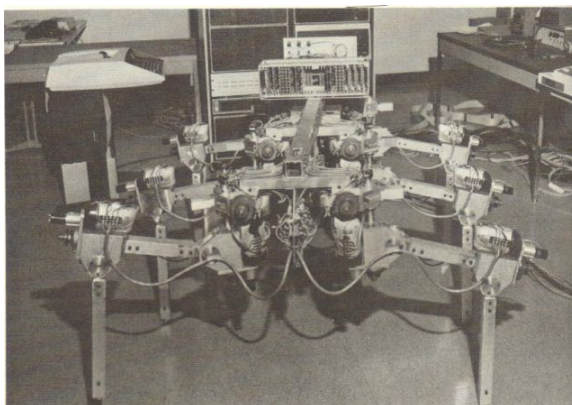


Obrázek 3.1: Hexapod Masha<sup>1</sup>.

### 3.2 OSU

Roku 1977 vytvořila univerzita ve státě Ohio robota se šesti končetinami inspirovaného hmyzem zvaného OSU (viz obr. 3.2) za účelem výzkumu různých typů chůze. Tento robot byl schopen ujít krátké vzdálenosti přes překážky, vážil asi 140 kg a byl externě napájen kabelem [16].

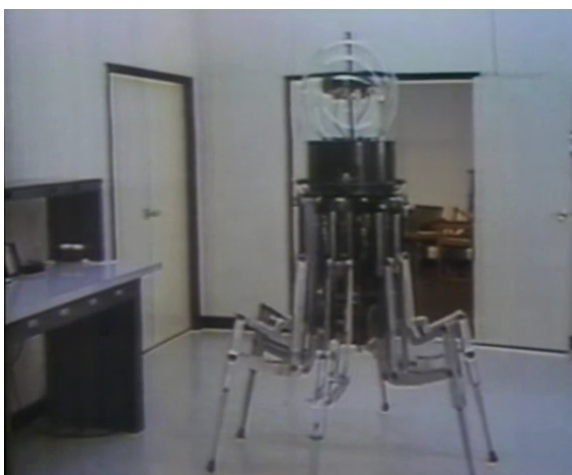
<sup>1</sup>Převzato z <http://cyberneticzoo.com/walking-machines/1976-masha-hexapod-gurfinkel-et-al-russian>



Obrázek 3.2: Hexapod OSU<sup>2</sup>.

### 3.3 Odex I

Roku 1983 byl v Kalifornii vyroben hexapod s názvem Odex I (viz obr. 3.3). Osově souměrný hexapod, který měl na těle připevněný počítač a mohl být ovládaný dálkově. Robot mohl překonávat překážky, jako například schody. Vážil 136 kg a každá končetina byla schopna zvednout zátěž o váze 180 kg. Dohromady mohl nést břemeno o celkové váze více než 400 kg [13].



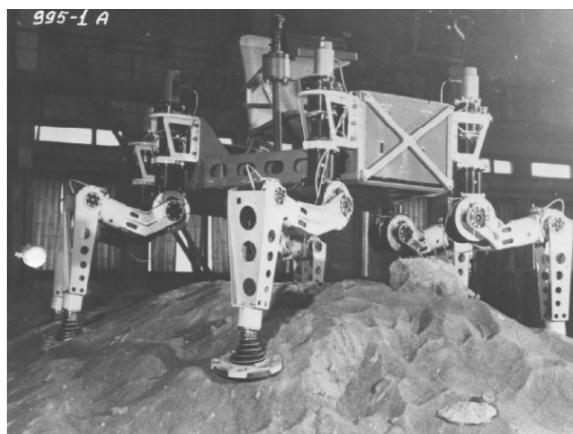
Obrázek 3.3: Hexapod Odex-I<sup>3</sup>.

### 3.4 NMIIIA

V roce 1985 byl v Rusku vyroben hexapod s názvem NMIIIA (viz obr. 3.4). Byl vybaven generátorem, záložními bateriemi, kontrolním systémem, a křeslem pro operátora. Byl navíc vybaven i počítačovým ovládáním. Vážil 750 kg a mohl nést zátěž o váze 80 kg. Jeho rychlost byla 0,7 km/h [13].

<sup>2</sup>Převzato z <http://cyberneticzoo.com/walking-machines/1976-osu-hexapod-mcgee-american/>

<sup>3</sup>Převzato z <http://hackaday.com/2012/12/11/retrotechtacular-a-1983-walking-robot-called-odex-1/>



Obrázek 3.4: Hexapod NMIIIA<sup>4</sup>.

### 3.5 Adaptive Suspension Vehicle

Roku 1989 byl na univerzitě v Ohiu zahájen projekt s názvem Adaptive Suspension Vehicle [21]. Hexapod používal hydraulické ovládání a byl poháněn vznětovým motorem. Směr pohybu byl řízen člověkem, zatímco o pohyb jednotlivých končetin se staral počítač. Mohl překonat příkopy o šířce 1,8 m a vylézt na schody vysoké až 1,65 m. Ve stejném roce byl také zkonstruován robot s označením Aquarobot. Byl používán pro podvodní měření a výstavbu přístavů [3]. Stejněho roku byl zkonstruován hexapod jménem Genghis. Měřil 35 cm a vážil 1 kg [7].

### 3.6 AMBLER

V polovině devadesátých let byl vytvořen robot s názvem AMBLER (Autonomous MoBiLe Exploration Robot). Byl vytvořen v laboratořích Jet Propulsion Laboratory pro operace ve výjimečných podmínkách. Robot byl asi 5 metrů vysoký, 7 metrů široký a vážil 2500 kg. Zatímco většina robotů při chůzi otáčí končetiny k provedení kroku AMBLER měl končetiny neustále ve vertikální pozici a používal teleskopická serva [6].

---

<sup>4</sup>Převzato z <http://cyberneticzoo.com/walking-machines/1985-nmiiia-hexapod-manned-rover-russian/>

## Kapitola 4

# Výkonostní parametry hexapodů

### 4.1 Duty factor

Duty factor je označován jako  $\beta$ . Podle Songa [18] je definován podle rovnice 4.1.

$$\beta = \frac{a}{\text{čas cyklu}} \quad (4.1)$$

Kde  $a$  je čas po který hexapod stojí pevně na zemi a čas cyklu je doba trvání jednoho cyklu chůze. Pokud je  $\beta \geq 0,5$  říkáme, že robot chodí a pokud je  $\beta < 0,5$  můžeme tvrdit, že se jedná o běh.

### 4.2 Froudovo číslo

Podle Alexandera [4] je Froudovo číslo definováno podle rovnice 4.2.

$$Fr = \frac{V^2}{g * h} \quad (4.2)$$

Kde  $V$  je rychlost pohybu,  $g$  je tíhové zrychlení a  $h$  je výška kyčelního kloubu hexapoda od povrchu terénu. Místo  $V$  můžeme použít také  $h * f$ , kde  $f$  je frekvence kroku. Tím dostaneme vztah v rovnici 4.3.

$$Fr = \frac{(h * f)^2}{g * h} = \frac{h * f^2}{g} \quad (4.3)$$

Froudovo číslo se používá pro charakterizování zvířecího pohybu. Ukázalo se, že zvířata různých velikostí používají podobné typy chůze při podobných hodnotách Froudova čísla. Většina zvířat přechází z chůze do běhu, když se hodnota jejich Froudova čísla pohybuje okolo hodnoty 1.

### 4.3 Měrný odpor

Měrný odpor je hodnota používaná pro měření energetické účinnosti mobilního robota. Tato účinnost může být definována jako poměr energetické spotřeby robota k uražené vzdálenosti [12]. Můžeme jej vypočítat podle rovnice 4.4.

$$\epsilon = \frac{E}{M * g * d} \quad (4.4)$$

Kde  $E$  je celková energetická spotřeba,  $M$  je celková váha robota,  $g$  je gravitační zrychlení a  $d$  je celkově uražená vzdálenost.

## Kapitola 5

# Stavba hexapoda

Samotný design hexapoda je inspirován hmyzem. Proto není žádným překvapením, že jak stavba jeho těla, tak i stavba končetiny je hmyzu velmi podobná. Podle toho kolik je pro pohybování s končetinou využíváno servomotorů říkáme, že hexapod má tolik stupňů volnosti, kolik má jedna končetina servomotorů. Pro volný pohyb po povrchu terénu stačí, když má hexapod tři servomotory na jedné končetině, celkem tedy 18 servomotorů. Ovšem můžeme se setkat i s více stupni volnosti.

Aby při pohybu nedocházelo k nechtěnému zvedání končetin z povrchu terénu nebo klouzání jednotlivých končetin je potřeba, aby končetina měla alespoň tři stupně volnosti, čili tři servomotory na jedné končetině. První servomotor, který bude s končetinou pohybovat v horizontální rovině tj. dopředu a dozadu, druhý servomotor, který bude pracovat ve vertikální rovině a pohybovat s končetinou nahoru a dolů a třetí servomotor, který bude kompenzovat pohyb dvou předchozích servomotorů a zabraňovat styčnému bodu, na kterém končetina stojí, v nechtěném pohybu a klouzání po povrchu terénu.

### 5.1 Stavba končetiny

Jeden servomotor je vždy umístěn v blízkosti těla hexapoda a je určen pro pohyb končetiny v horizontální rovině dopředu a dozadu. Na samotných končetinách jsou tedy umístěné pouze pouze dva servomotory. Tyto dva servomotory rozdělují končetinu na tři části: coxa, femur a tibia.

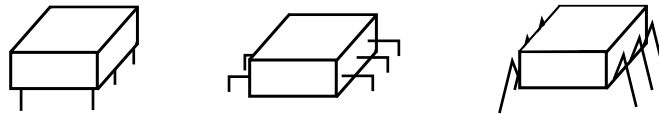
Při přirovnání k lidské noze můžeme říct, že serva ovládající coxu a femur u člověka představují kyčelní kloub a tibia je kolenní kloub. Protože hexapodu stačí ke stání pouze jeden bod, je kyčelní kloub a celé chodidlo zbytečné. Může ovšem při pohybu členitým terénem zlepšovat stabilitu celého robota tím, že celá váha nebude soustředěna v jednom bodě, ale rozprostřená po celé ploše chodidla. Tímto se například zabrání uskakování malých částic rozmístěných po povrchu terénu. Zejména malých kamínků apod.

Můžeme se ovšem setkat s modely hexapodů, které mají více než tři servomotory na každé končetině. Pro pohyb po rovném terénu je ovšem přidáný čtvrtý stupeň zbytečný a tři stupně stačí. Čtvrtý stupeň je určený spíše pro větší volnost nastavení končetiny při pohybu ve členitém terénu.



## 5.2 Postavení končetin

Samotné končetiny mohou být k tělu hexapoda připojeny různými způsoby (viz obr. 5.1) a mohou být vůči tělu tvarované jiným způsobem. Můžeme například uvažovat končetiny přímo připojené ke spodku těla hexapoda tak, jak je tomu u většiny savců. Končetiny savců jsou umístěny přímo pod tělem. Tímto je zvýšené těžiště, což zmenšuje stabilitu, ale snižuje spotřebu energie potřebné ke stání a pohybu. To napovídá, že savci jsou schopni urazit velké vzdálenosti, aniž by potřebovali odpočinek. Další způsob připojení končetin k tělu můžeme vidět například u plazů. Ti mají končetiny připojené k boku těla s koleny vytočenými směrem od těla. Tímto zvyšují svoji stabilitu, protože mají končetiny dále od sebe a tím pádem širší postoj a nižší těžiště. Takovým umístěním končetin ovšem musí vyvinout větší energii, jak při stání, tak při pohybu. Plazi tedy překonávají vzdálenosti po menších kusech prokládaných pauzami pro načerpání energie. Další způsob připojení končetin k tělu můžeme vidět u hmyzu. Hmyz má končetiny připojené k boku těla podobně jako plazi, ovšem jejich kolena nemají vytočené směrem od těla jak je tomu u plazů, ale jsou vytočená společně s celou částí končetiny směrem nahoru. Při takové pozici končetiny tělo na končetinách téměř visí. Tímto postojem je zvýšena stabilita nižším těžištěm a širším postojem. Energie potřebná k chůzi je menší než u plazů, ale stále větší, než kterou potřebují savci [10].



Obrázek 5.1: Příklad připojení končetin jak je tomu u savců, plazů a hmyzu.

## Kapitola 6

# Výpočet pozic pro servomotory

Tato kapitola popisuje jednotlivé způsoby, které jsou běžně používány pro výpočty pozic, na které se mají přesunout jednotlivé servomotory. Jedná se tedy o výpočet konečných pozic pro servomotory. V této kapitole budou popsány způsoby pro výpočet souřadnic konečných bodů končetin z délky nohy a z natočení jednotlivých kloubů. Dále také způsob výpočtu natočení kloubů podle souřadnic koncových bodů končetin.

### 6.1 Přímá kinematika

Používá se pro zjištění polohy koncového bodu končetiny, na kterém hexapod stojí, na základě poloh servomotorů a souřadnic, na kterých je napojena končetina k tělu. Vstupem jsou tedy pozice servomotorů a souřadnice, kde je končetina napojena k tělu, a výstupem jsou pozice jednotlivých styčných bodů  $[x,y,z]$ . Pro výpočet přímé kinematiky ovšem neexistuje jedno univerzální řešení. Je tedy nutné pro každý případ vytvořit rovnice založené na počtu servomotorů, počtu stupňů volnosti jednotlivých servomotorů atd. V praxi se pro výpočet používá notace Denavit-Hartenberg [9].

I když je přímá kinematika užitečná, v praxi se používá spíše u pohybu členitým terénem. Pokud je robot stavěn k tomu, aby chodil po rovném terénu, většinou vykonává a opakuje předem známý pohyb. Robot pro pohyb dopředu umí jeden krok, který potom stále dokola opakuje a tím provádí chůzi. Protože hexapod i bez sensorů zná povrch terénu, předpokládá, že na rovině nebude žádná překážka, tudíž si může dovolit tento krok opakovat bez obav, že končetinou o něco zavadí.

Pro pohyb ve členitém terénu se algoritmus pro výpočet pozic končetiny orientuje hlavně podle tlakového senzoru na konci končetiny. Posune končetinu dopředu, pokud není v cestě překážka, kterou by odhalily dálkové senzory pro orientaci v prostoru, a dokud nemá od tlakového senzoru potvrzeno, že končetina stojí pevně na zemi, dále pokládá končetinu dolů. Jakmile je končetina připravena na pozici a podpírá hexapoda, tehdy se využije přímá kinematika. Pomocí přímé kinematiky se s pomocí dat o natočení servomotorů vypočítá samotná pozice končetiny, aby se mohl provést další krok. Tento styl chůze, bez předem daného periodického kroku, se nazývá volná chůze. Hexapod neprovádí pouze předem dané kroky, ale modifikuje tyto kroky na základě informací o povrchu terénu.

## 6.2 Inverzní kinematika

Pro pohyb hexapoda slouží servomotory umístěné na jeho končetinách. Každá končetina má tři servomotory, což dává dohromady celkem 18 pohonných jednotek. Při řízení je tedy třeba spočítat všech 18 nových hodnot pro jednotlivé servomotory. Tyto hodnoty se musí před samotným provedením kroku spočítat, což může být bez správného postupu problematické. Je také potřeba, aby mohl hexapod s jednotlivými servomotory pohybovat nezávisle na sobě, jinak by mohlo při chůzi dojít k zakopnutí nebo ke klopýtání, popřípadě k uždění nebo podkluzování končetin.

Abyste mohl hexapod volně pohybovat, musí být schopen pohybovat všemi servomotory nezávisle na sobě. Inverzní kinematika umožňuje najít takové polohy servomotorů, které vyhovují dané poloze robota a tímto také volně kontrolovat celý jeho pohyb [14]. Když jediné nad čím má programátor kontrolu jsou servomotory, tak nelze jinak určit na jaké místo má robot nastavit končetinu.

Pro počítání těchto hodnot se používá inverzní kinematika. Počítá se různými způsoby, ale všechny způsoby mapují vstupní souřadnice styčného bodu s povrchem terénu v prostoru na výstupní množinu poloh, do kterých se mají otočit jednotlivé servomotory.

Díky malému počtu stupňů volnosti používám algebraické metody pro zjištění vhodných poloh servomotorů. Algebraickou metodou dostanu soustavu rovnic s takovým počtem rovnic jako je počet servomotorů ovládajících jednu končetinu. Toto řešení je ideální pro menší počet servomotorů, protože obtížnost algebraického řešení stoupá s každým dalším servomotorem. Řešení je pak možné aplikovat na všechny ostatní končetiny, ovšem s jinými vstupními parametry. V mém případě jsou to tři rovnice, protože mám tři servomotory na končetině. Algebraické metody je možné aplikovat až do šesti stupňů volnosti, ale záleží to na každém konkrétním případě. Pro vyšší stupně již není možné takto triviálním způsobem najít řešení nebo zjistit, zda vůbec existuje [8].

Pokud není možné použít algebraické řešení, pak je nutné použít některou z numerických metod. Jedna z možností řešení tohoto problému je například použít Jacobiho inverzní metodu. Pro použití Jacobiho inverzní metody musí být ovšem splněno několik předpokladů. Jedním z problémů může být, že metoda používá inverzi matic. V některých případech nemusí být možné tuto matici invertovat. Tato matice taky roste s každým dalším stupněm volnosti, takže se může stát, že metoda bude časově velmi náročná [8].

Další možnost řešení inverzní kinematiky je CCD (Cyclic coordinate descend). Metoda je vhodná pro jednoduché objekty. Pozice se počítají od počátku tělesa, v našem případě končetiny, takže může zbytečně přepočítat polohu celého tělesa místo pohybu pouze jedním servomotorem. Pokud není možné použít Jacobiho inverzní metodu, je možné použít Jacobiho transpozici. Tato metoda má podobné nedostatky jako původní Jacobiho metoda, ale nemusí se u této metody invertovat matice, což je velkou výhodou [5].

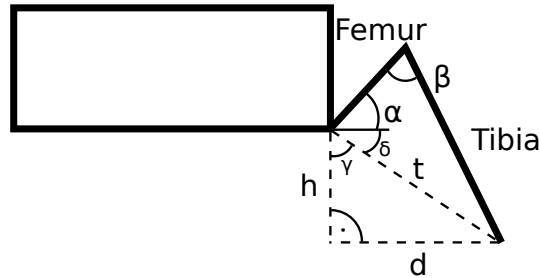
Výsledných hodnot se dá dosáhnout několika způsoby. Každá z těchto možností má své výhody a nevýhody a typ výpočtu se určuje podle typu robota. Inverzní kinematika nemusí nutně sloužit pouze pro výpočet pozic servomotorů hexapodů. Používá se kdekoli, kde je potřeba získat pozice servomotorů podle cílového bodu. Inverzní kinematiku mohou využívat například i průmyslová konstrukční ramena a jim podobná robotická zařízení.

## 6.3 Algebraické metody

Jedná se o metodu, kdy se na základě tvaru končetiny sestaví rovnice, pomocí kterých je možné vypočítat jednotlivé polohy, do kterých se musí nastavit servomotory, aby styčný

bod končetiny stál na požadovaném místě. Tato metoda není iterativní a pro danou soustavu rovnic poskytne řešení, které je možné rovnou aplikovat. Na jeden stupeň volnosti připadá jedna rovnice. Algebraické rovnice pro výpočet inverzní kinematiky můžeme dostat například vyjádřením neznámých úhlů z rovnic pro výpočet přímé kinematiky. Někdy to ovšem není možné a rovnice se musí sestavit pomocí goniometrických funkcí a rozměrů končetin.

Za účelem výpočtu pozic, na které se mají přesunout jednotlivé servomotory jsem vytvořil rovnice 6.1 až 6.9. Rozdělil jsem oblast pod končetinou hexapoda na dva trojúhelníky (viz obr. 6.1), podle kterých pak stačilo pouze pomocí trigonometrie vypočítat jednotlivé parametry trojúhelníků.



Obrázek 6.1: Rozdělení na dva trojúhelníky pro výpočet hodnot.

Pro výpočet jsem naměřil délky hodnot *femur*, *tibia*, *h* a *d*. Dále tedy pro výpočet hodnot  $\alpha$  a  $\beta$  dostaneme následující rovnice:

$$t = \sqrt{h^2 + d^2} \quad (6.1)$$

$$\cos(\beta) = \frac{femur^2 + tibia^2 - t^2}{2 * femur * tibia} \quad (6.2)$$

$$\beta = \arccos(\cos(\beta)) \quad (6.3)$$

$$\cos(\alpha + \delta) = \frac{femur^2 + t^2 - tibia^2}{2 * t * femur} \quad (6.4)$$

$$\alpha + \delta = \arccos(\cos(\alpha + \delta)) \quad (6.5)$$

$$\sin(\gamma) = \frac{d}{t} \quad (6.6)$$

$$\gamma = \arcsin(\sin(\gamma)) \quad (6.7)$$

$$\gamma + \delta = 90^\circ \quad (6.8)$$

$$\alpha = \alpha + \delta + \gamma - 90^\circ \quad (6.9)$$

# Kapitola 7

## Pohyb hexapoda

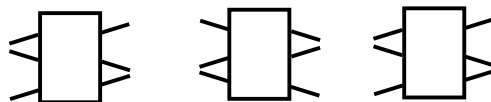
Tak jako stavba těla, i pohyb je inspirován hmyzem, takže hexapod je stavěn tak, aby napodoboval chůzi hmyzu. Hexapod má mnoho typů chůzí rozdělených podle toho na kolika končetinách zrovna stojí a podle toho kolik končetin se současně pohybuje. U těchto rozdělení je důležitá zejména rychlost samotného robota a také jeho stabilita při pohybu.

### 7.1 Typy pohybu

Roboti typu hexapod mají tři základní typy pohybu, tripod, vlna a vlnění [11]. Tyto typy se používají zejména při pohybu po rovině. Pro pohyb na členitém terénu se většinou volí pozice končetiny dynamicky, podle okolního terénu a podle toho kam je zrovna možné nakročit.

#### 7.1.1 Tripod

Pro udržení rovnováhy stačí, aby hexapod stál na třech končetinách. Tripod spočívá v rozdělení končetin na tři, na kterých stojí, a tři se kterými se pohybuje. Končetiny jsou rozdělené do dvou trojúhelníků. Přední a zadní končetina na jedné straně a prostřední končetina na straně druhé. Hexapod na jedné skupině končetin v trojúhelníku stojí a provede na nich samotný krok a končetiny v druhém trojúhelníku přesouvá na pozice, na kterých bude stát v příštím kroku (viz obr. 7.1). Potom po ukončení jednoho kroku přenesse váhu na nakročené končetiny a zbylé tři končetiny zvedá a přesouvá pro další krok. Pro přenesení váhy je nutné, aby hexapod stál na všech šesti končetinách, aby nedocházelo k zakolísání. Při opakování tohoto pohybu potom dochází k chůzi.



Obrázek 7.1: Pohyb typu tripod.

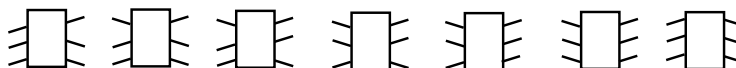
Tripod je nejrychlejším chodícím algoritmem, ale nejméně stabilním. Tři končetiny jsou

minimum pro udržení rovnováhy a další typy pohybu stojí na více končetinách. Krok provádí na třech končetinách, což bohatě stačí pro pohyb po rovném terénu, a pokud neprovádí moc velké, nebo dlouhé kroky, je riziko upadnutí nebo uklouznutí, bez vnějšího vlivu, minimální.

### 7.1.2 Vlna

Tento typ chůze, se zaměřuje na co největší stabilitu. Pohybuje pouze jednou končetinou v daný okamžik. Teprve až dokončí nakročení na pozici, začne hýbat další končetinou. Je také nejpomalejší pro situace, kde stabilita není prioritou např. při pohybu po rovině nebo po méně členitém terénu. Využívá se více při pohybu ve velmi členitém, těžko přístupném terénu, kde je riziko upadnutí nebo uklouznutí větší.

Vlna je nejstabilnějším typem pohybu, ale je také značně pomalá. Tripod může, při stejných parametrech končetin a rychlostí servomotorů, vyvinout až trojnásobnou rychlost, aniž by zakolísal. Stačí mít pouze vhodně zvolenou délku a frekvenci jednotlivých kroků.



Obrázek 7.2: Pohyb typu vlna.

### 7.1.3 Vlnění

Typ chůze, který je podobný vlně. Při této chůzi stojí hexapod současně na čtyřech končetinách. V okamžiku kdy dokračuje končetinou na pozici, tak již začíná vykračovat další končetina. Současně tedy provádí nakračování dvěma končetinami. Vždy jsou ve vzduchu zároveň končetiny protějších stran, což zvyšuje stabilitu. Když rozdělíme končetiny na levou a pravou stranu, tak při chůzi jsou končetiny na jedné straně fázově posunuté o  $180^\circ$  oproti končetinám na druhé straně, cyklus končetin na levé straně začíná přesně v půlce průběhu cyklu končetin na straně pravé.

## 7.2 Rychlost

Nejrychlejší ze zmíněných algoritmů je tripod, který dokončí jeden krok za dva cykly. Nejpomalejším algoritmem je vlna, která potřebuje k vykonání jednoho kroku šest cyklů. Vlnění díky překrývání jednotlivých nakračování dokončí jeden krok za tři cykly.

Stejně jako u zvířat, tak i u hexapodů, obecně u všech robotů s kráčivým podvozkem, rozlišujeme rozdíl mezi chůzí a během. Pro rozlišení, zda se ještě jedná o chůzi, nebo zda už robot běží se používá následující rovnice:  $b = \frac{a}{t}$  kde  $a$  je doba po kterou robot stojí na zemi tj. nenachází se právě všechny jeho končetiny ve vzduchu, jako je tomu například u skoku. A  $t$  je čas trvání jednoho cyklu kroku. Pokud je  $b < 0,5$  znamená to, že robot stojí pevně na zemi méně než polovinu času cyklu a můžeme říci, že se jedná o běh. Pokud je

$b > 0,5$  robot více než polovinu cyklu stojí končetinami pevně na zemi a provádí chůzi, ať už jakkoliv rychle.

Rychlost může být ovlivněna dvěma způsoby. První způsob je prodloužení délky kroku. To může mít ale za důsledek zmenšení stability celého robota, zejména se zvyšuje riziko převážení robota na jednu stranu a upadnutí. Upadnutí hrozí zejména u pohybu typu tripod, kde robot stojí na nejmenším počtu končetin potřebných pro udržení rovnováhy. Takže i když jen jedna končetina uklouzne, tak robot ztratí rovnováhu a může buď upadnout úplně, nebo se dostat do stavu kdy ztratí rovnováhu a váha bude na jiných končetinách, než bylo původně zamýšleno, takže může například třít spodní částí těla o povrch terénu. Pro ostatní typy pohybu tento problém není tak velký, protože stojí na více než minimálním počtu pro udržení rovnováhy tj. na více než třech končetinách. Vlna stojí na pěti končetinách a vlnění stojí na čtyřech končetinách, takže v případě, že se robot moc široce rozkročí, další končetiny mají možnost jeho tělo zachytit před dopadem. Robot tedy neupadne na svoje tělo, ale na končetinu, která, pokud se touto náhlou vahou nepoškodí, je schopná jej zachytit a zabránit pádu. Také samozřejmě záleží na tom, jestli je vhodně umístěná, nebo jestli pádu dokonce nepomůže. Prodloužení délky kroku má tu výhodu, že pro zachování původní rychlosti není nutná tak velká frekvence kroků, a tím pádem bude na tělo hexapoda působit menší setrvačnost z pohybu končetin.

Druhá možnost, jak zrychlit pohyb, je zvýšení frekvence pohybu končetin. Za předpokladu, že zůstane původní délka kroku, dojde ke zrychlení pohybu hexapoda o tolik, o kolik zvýšíme frekvenci pohybu. Ačkoliv se u tohoto způsobu zrychlení pohybu nemusíme bát příliš dlouhých kroků a následného uklouznutí, s vyšší frekvencí se zvyšuje i rychlost pohybu jednotlivých servomotorů a tím i jejich kinetická energie. Potom při následném zastavení pohybu serva a části končetiny jím ovládané, se veškerá kinetická energie přeneše přes servomotor na tělo robota a může dojít například k nechtěnému otočení robota na jednu, nebo druhou stranu. Pro zachování původní rychlosti robota ovšem můžeme při zvednutí frekvence snížit délku kroku a tím zvýšit celkovou stabilitu hexapoda.

Při zvolení jednotlivých způsobů zrychlování pohybu hexapoda musíme vzít v úvahu také typ jeho chůze. Například vlna se vypořádá s prodloužením kroku lépe než tripod nebo vlnění. Na druhou stranu při zvýšení frekvence, a tím i rychlosti servomotorů, je jednodušší nechtěně pohnout s hexapodem, který bude pro pohyb používat tripoda a stát pouze na třech končetinách.

### 7.3 Stabilita

Nejstabilnější z algoritmů je vlna, která zvedá vždy pouze jednu končetinu. Při pohybu tedy stojí na pěti zbývajících končetinách. Takový počet končetin minimalizuje jakoukoliv možnost uklouznutí, nebo dokonce upadnutí. Vlna, pro svůj důraz na stabilitu, našla svoje uplatnění při pohybu vysoce členitým terénem, kdy je na stabilitu kladen velký důraz.

Vlnění je druhým nejstabilnějším druhem pohybu, kdy jsou ve vzduchu dvě končetiny, ale vždy když se jedna končetina začíná zvedat do vzduchu, tak předchází končetina už dokračuje. Stojí tedy vždy pevně na zemi na čtyřech končetinách. Vlnění je kompromisem mezi rychlostí tripoda a stabilitou vlny. Je to vhodný způsob chůze jak do členitého terénu, tak na rovný terén.

Tripod je nejméně stabilní z těchto tří způsobů pohybu. Stojí pevně na zemi pouze na třech končetinách, což jej dělá pro pohyb v terénu, v porovnání se zbylými dvěma způsoby chůze, nejméně vhodným. Protože stojí pevně na zemi pouze třemi končetinami, nemá žádnou další končetinu, která by fungovala jako záchranná končetina zabraňující

upadnutí nebo uklouznutí, proto se musí velmi pečlivě volit parametry pohybu. Zejména délka kroku, frekvence a rychlost pohybu jednotlivých servomotorů.

## 7.4 Volná chůze

Volnou chůzí se nazývá typ pohybu, kdy robot předem neví jaký krok bude provádět. O pozici končetiny rozhoduje tvar povrchu terénu okolo něj, který se nedá určit pomocí jeho senzorů pro orientaci v terénu. Pokud je např. deformace povrchu terénu taková, že ji senzory nezachytí. Jedná se především o nepravidelnosti tvaru povrchu terénu a menší překážky, které je schopen překročit, nebo je použít jako oporu pro končetinu. I menší nerovnosti povrchu terénu mohou totiž způsobit, že hexapod, který používá předem definovaný krok, který opakuje, nebude stát pevně na všech končetinách, které má pro to, v dané fázi kroku, určené. Takže některé jeho končetiny budou viset ve vzduchu. Pro kompenzaci tohoto problému se používají tlakové senzory na konci končetiny. Pomocí nich je robot schopen určit, zda některé z jeho končetin již stojí na zemi a mohou poskytnout oporu, jsou prozatím ve vzduchu, nebo již dokročila, ale povrch terénu není natolik stabilní, aby mohl poskytnout hexapodovi oporu. Jedná se zejména o typ povrchu, který je tvořen sypkým materiálem a končetina po něm může ujíždět (písek, štěrk apod.).



# Kapitola 8

## Senzory

Senzory slouží pro detekování překážek v prostoru a celkovou orientaci v prostoru. Proto, pokud se má robot orientovat v prostoru, tak jsou pro něj senzory nezbytné. Pokud je terén, ve kterém se bude hexapod pohybovat, předem známý, jako např. rovina, bez jakýchkoliv překážek, hexapod se nemá čemu vyhýbat, takže senzory nejsou nutné. Senzory mají využití pokud není terén předem známý a hexapod se těmito překážkami musí vyhýbat. Pokud hexapod nepoužívá senzory a narazí na překážku, může do ní nevědomky narazit a pokračovat v pohybu směrem do překážky, nebo o ni zavadit končetinou a nevědomky změnit směr trasy. Senzory můžeme rozdělit na dva druhy, dálkové a kontaktní.

### 8.1 Senzory pro měření vzdálenosti

Dálkové senzory nepotřebují kontakt s překážkou. Používají se pro detekování větších překážek, které hexapod buď nemůže žádným způsobem překonat a bude je muset obejít, jedná se třeba o sloupy, nebo překážky natolik strmé, že na ně hexapod není schopen vylézt a jediný způsob jak je překonat je obejít. Další typ překážek jsou menší překážky, například kopce, nebo překážky natolik malé, že na ně může hexapod vylézt, pokračovat v pohybu na překážce a poté z překážky zase slézt.

Senzory můžeme rozdělit na dva typy, optické, laserové, a ultrazvukové, sonary. Dálkové senzory ovšem někdy nejsou schopné detekovat nerovnosti v terénu, protože tyto nerovnosti mohou být tak malé, že je možné je považovat za šum nebo za odchylku senzoru. Jedná se zejména o různé prohlubně v povrchu terénu, které jsou dost malé na to, aby je senzory nezachytily, ale dostatečně velké na to, aby jim musel hexapod přizpůsobit styl pohybu. Pro kompenzaci takových nerovností terénu se používají kontaktní senzory.

### 8.2 Kontaktní senzory

Kontaktní senzory potřebují být pro zachycení překážky v kontaktu s danou překážkou. Bývají umístěné na končetinách hexapoda v místě styku končetiny s povrchem terénu. Tento typ senzorů se používá při chůzi členitým terénem, zajišťuje lepší postavení končetin a tím celou stabilitu hexapoda. Samotné senzory tedy nedělají nic jiného, než že informují robota o tom, že končetina již stojí pevně na povrchu terénu, nebo zda-li je nutné ji přesunout na jinou pozici.

Na rozdíl od kontaktních senzorů, dálkovým senzorům je nutno vybrat směr, který budou snímat. Při pohybu po rovině stačí pouze snímat oblast před hexapodem, kvůli pří-

padným překážkám. Při pohybu terénem je ovšem třeba snímat i povrch před hexapodem, kde se můžou vyskytnout například díry, nebo trhliny. V tomto případě je nutné, kvůli omezenému prostoru, který jsou schopny dálkové senzory snímat, senzory nastavit takovým způsobem, aby mohli snímat povrch před hexapodem. Musí být tedy na hexapoda namontované pod úhlem, aby byly schopné snímat povrch terénu před ním. Celkově tedy musí být, pro úplnou orientaci v daném terénu, na hexapodovi dostupný větší počet senzorů, pokud nejsou senzory umístěny na otočných kloubech. Ideálně by měl mít hexapod senzor pro každý ze čtyř směrů dopředu, dozadu, doleva a doprava. Tyto senzory ovšem nezachytí překážku, pokud se hexapod bude pohybovat po diagonále. Je tedy nutné mít další čtveřici senzorů, pro všechny čtyři diagonální směry. Pokud terén není známý a je možné, že bude mít zdeformovaný povrch, bylo by dobré mít sadu dalších osmi senzorů, které budou detekovat povrch před hexapodem. Zejména se jedná o překážky jako jsou útesy, hluboké trhliny a díry v povrchu terénu, které by senzory určené pro detekci větších překážek, které snímají prostor před hexapodem, nemuseli zachytit. Tedy šestnáct dálkových senzorů a dalších šest kontaktních senzorů na každé končetině. Tato soustava senzorů ovšem počítá se značně členitým povrchem terénu.

### 8.3 Senzor SRF08



Obrázek 8.1: Senzor SRF08.

Senzor SRF08 je sonar (viz obr. 8.1) určený pro dálkové snímání. Standardně je jeho maximální dosah jedenáct metrů, ale je možné tuto hodnotu zvýšit nebo snížit podle hodnoty v registru. Potom je senzor schopný podle hodnoty měřit s větší nebo menší frekvencí. Sonar komunikuje s mikrokontrolérem pomocí I2C sběrnice. Na sběrnici funguje vždy jako slave, nikdy jako master [2]. Celá režie spojená s ovládáním a dotazováním senzoru tedy musí být implementována v mikrokontroléru. Jedná se o ultrazvukový senzor, snímající zvuk odražený od překážky. Je tedy nutné několik milisekund počkat před čtením hodnot. Vzdálenost se potom počítá podle času, za který zvuk ze sonaru dorazil k překážce, odrazil se a vrátil zpět k sonaru. Pokud v dosahu není žádná překážka, sonar po nějaké době končí timeoutem.

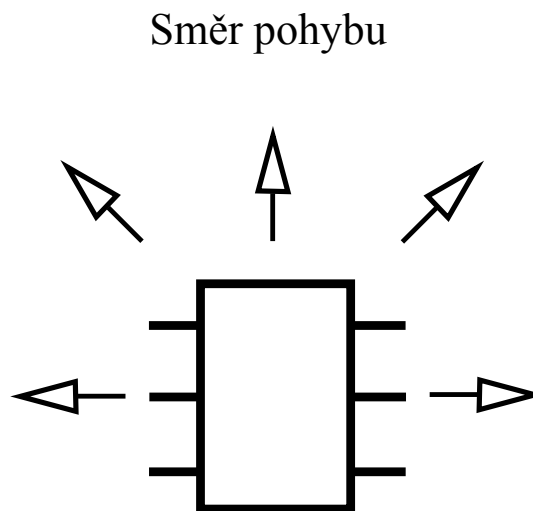
V tomto případě jsem nechal původní dosah, na který byly senzory nastaveny. Nepotřebuji totiž měřit terén dále, než je základní vzdálenost. Tato vzdálenost mi bohatě postačí pro účely této práce a nepotřebuji měřit s větší frekvencí než kterou senzory s tímto nastavením poskytují. Hexapod se nepohybuje natolik rychle, abych musel měřit s větší frekvencí.

Protože jsou senzory umístěné na I2C sběrnici nemám k dispozici hodnoty všech senzorů naráz a musím tyto hodnoty číst se sběrnice postupně jednu po druhé. Rychlost hexapoda ale není velká a tento problém tedy nepředstavuje pro hexapoda žádné riziko, jako je například vrazení do případné překážky.

## 8.4 Umístění senzorů na robotovi

Kvůli nedostatku senzorů je na hexapodovi umístěn menší počet senzorů, než který je potřeba. Budeme-li ale uvažovat, že se hexapod bude pohybovat pouze dopředu a nebude se muset vracet, pokud narazí na situaci, kdy již pohyb dopředu nebude možný, senzory monitorující překážky za hexapodem nejsou natolik nutné. Hexapodu tedy stačí senzory monitorovat pouze terén před ním a vedle něj (viz obr. 8.2), aby poznal, že obcházená překážka již skončila aniž by se musel celý otáčet.

Umístění senzorů je naznačeno na následujícím obrázku. Zvolil jsem počet senzorů, který je nezbytný pro detekci překážek, které se nacházejí před ním (tři senzory monitorující terén před hexapodem) a vedle něj (dva senzory monitorující právě obcházenou překážku, aby hexapod věděl kdy skončila a mohl se vrátit zpět na původní trasu).



Obrázek 8.2: Umístění senzorů na hexapodovi.

Senzory jsou na hexapodově těle umístěné pomocí stavebnice Merkur. Tato stavebnice je vyrobená z kovu a je možné ji tedy různým způsobem tvarovat, aniž by se jakýmkoliv způsobem poškodila. Jednotlivé díly se k sobě přidělávají šroubky a maticemi. To ji dělá ideální pro držení senzorů na těle hexapoda. Samotné tělo hexapoda má v sobě díry vhodné pro uchycení těchto senzorů šroubky. Není tedy nutný žádný další zásah do těla hexapoda např. vyvrtání dalších děr sloužících pro uchycení senzorů. Není nutný ani žádný další držák jiný než ten, který je určený pro uchycení senzorů.

Protože hexapod není schopen přecházet překážky a udržovat při tom stabilitu těla, je nutné, aby senzory umístěné na těle hexapoda detekovali každou překážku, ať už je jakkoliv

malá. Toto detekování je problematické, pokud jsou senzory umístěné tak, aby měřily vodorovně s povrchem terénu. Senzory tedy musí být umístěné tak, aby mohli měřit pod určitým úhlem. Tento úhel byl experimentálně zvolen tak, aby byl úhel pod kterým jsou senzory přídělané dostatečně velký na to, aby senzory dokázali zachytit co nejmenší překážky, ale aby byly tyto senzory schopné měřit na takovou vzdálenost, aby byl hexapod schopný se včas vyhnout případné překážce. Jako velikost tohoto úhlu jsem zvolil 20 stupňů. Tento úhel umožňuje hexapodu detekovat překážky na dostatečně velkou vzdálenost, aby byl schopen zareagovat na případnou překážku včas. Senzory jsou také schopné odhalit i relativně malé překážky. Případné zvětšení tohoto úhlu již nepřidá hexapodu možnost detekovat extrémně malé překážky, protože takto malé překážky mohou být brány i jako šum, nebo odchylka senzorů. Hexapod tedy není schopný detekovat a tím pádem se ani vyhnout překážkám, které jsou extrémně malé. I tyto překážky jsou ovšem schopné ovlivnit pohyb hexapoda natolik, aby alespoň jedna, nebo více jeho končetin nestálo pevně na povrchu terénu. Díky tomu, že jsou senzory umístěné pod úhlem je hexapod schopen detekovat i takové překážky jako je např. hrana stolu popř. jiné překážky tohoto typu.

## Kapitola 9

# PhantomX AX Hexapod Mark II

Jedná se o výrobek firmy Trossen Robotics, která jej prodává jako jeden ze své kolekce robotických kitů dostupných pro širokou veřejnost. Hexapod je poháněn tříčlánkovou baterií LiPo o napětí 11.1 V a s kapacitou 2200 mAh. Končetiny hexapoda jsou poháněny osmnácti servomotory Dynamixel AX-12A. Hexapod má tři stupně volnosti na každé končetině. Jednu jeho končetinu tedy ovládají tři servomotory.

Rozměry jednotlivých částí končetiny jsou následující. Délka coxy: 30 mm, délka femur: 65 mm a délka tibia: 145 mm. Protože je ale tibia zahnutá, je tato vzdálenost měřena od pozice servomotoru ke styčnému bodu s povrchem terénu. Tyto délky jsem použil při výpočtu hodnot, na které je potřeba nastavit jednotlivé servomotory, aby se mohl hexapod pohybovat bez klouzání končetin po povrchu terénu.

### 9.1 Servomotory Dynamixel AX-12A

Servomotor AX-12A má možnost měřit svoji vlastní rychlost, teplotu, úhel natočení, napětí a zatížení. Servomotor má vlastní mikrokontrolér, který se stará o výše zmíněné hodnoty, které za běhu aktualizuje, a také může měnit rychlost pohybu servomotoru. Hlavní mikrokontrolér se tedy může zabývat jinými výpočty a může nechat vykonávání jednotlivých rozkazů na samotných servomotech. Mají rozsah otáček až 300 stupňů. Doporučené napětí je 11.1 V [1]. Typu AX-12A je všech 18 servomotorů ovládajících hexapodovy končetiny.

Tyto servomotory jsou schopny vykonávat svoji funkci autonomně a díky mikroprocesoru, který má každé z nich v sobě umístěné mohou být zapojena sériově. Díky této funkci není potřeba mít na základní desce tolik výstupních pinů, jako kdyby se musel každý servomotor ovládat samostatně. Můžeme říct, že výstupy těchto servomotorů jsou umístěné na pomyslné sběrnici, kdy je povel vyslán všem sensorům, ale povel provede jen ten sensor, pro který je tento povel určen. To je možné díky interní identifikaci servomotorů. Servomotor, pro který je tento signál určený to pozná tak, že porovná číslo cílového servomotoru se svým identifikačním číslem. Jestli se shodují, servomotor provede daný úkol, který je vždy pouze pootočení servomotoru o určitý počet stupňů.

Ze všech hodnot, které je servomotor AX-12A schopný měřit žádnou přímo nepoužívám. O tyto hodnoty se stará knihovna NUKE, kterou jsem při realizaci pohybu hexapoda použil.

## 9.2 Knihovna NUKE

Jedná se o knihovnu, která byla vyvinuta firmou Trossen robotics, která byla určena pro robota PhantomX AX Hexapod Mark II. Pomocí této knihovny jsem nastudoval jak ovládat servomotory, pomocí kterých se hexapod pohybuje. Knihovna také obsahuje funkce pomocí kterých se dá hexapod ovládat kontrolérem, který je také obsahem kitu. Nyní je knihovna zastaralá, protože je určena pro robota PhantomX AX Hexapod Mark III.

## 9.3 Problémy spojené s robotem Phantom X AX Hexapod Mark II

Při práci s robotem Phantom X AX Hexapod Mark II jsem narazil na několik problémů, které jsem musel před, nebo při práci řešit.

Jedním z problémů bylo číslování jednotlivých servomotorů. Servomotory musí mít identifikační číslo, protože příkaz pro jeden servomotor se kvůli sériovému zapojení rozešle všem osmnácti servomotorům. Je tedy potřeba, aby každý servomotor měl svoji identifikaci, aby poznal, že je adresován právě on a mohl vykonat obsah zprávy. V první řadě tedy bylo potřeba přiřadit jednotlivá ID jednotlivým servomotorům. Pro tuto potřebu byl použit program dynaManager, který je poskytován firmou Trossen Robotics jako jedno z volně šiřitelných příslušenství při koupení servomotorů AX od této firmy.

Další problém je energetický zdroj hexapoda. Hexapod je poháněn baterií LiPo. Jedná se o Lithium-polymerový akumulátor. Pokud ovšem klesne napětí baterie LiPo pod úroveň 3 V na jeden článek, může být baterie nenávratně zničena. Pro potřeby kontroly stavu baterie je v knihovně pro ovládání hexapoda funkce, která je schopna kontrolovat napětí v baterii. Stačilo tedy udělat kontrolu při startu robota nebo tuto hodnotu kontrolovat v průběhu používání robota.

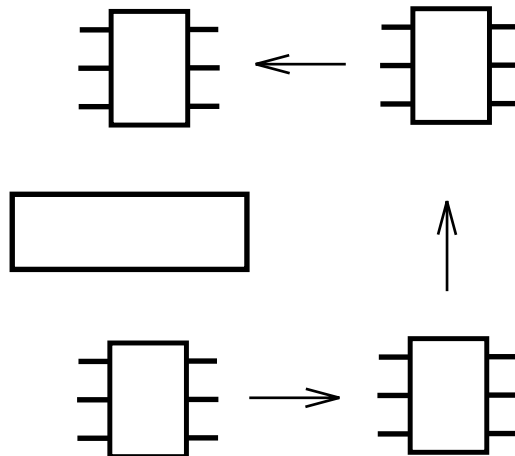
Další problém se kterým jsem se setkal byly zastaralé knihovny pro ovládání robota Phantom X AX Hexapod Mark II. Firma Trossen Robotics totiž vydala hexapoda Phantom X AX Hexapod Mark III a společně s jeho vydáním změnila i knihovny pro jeho ovládání tak, aby byly použitelné s novým modelem. Protože se Phantom X AX Hexapod Mark II již neprodává a byl nahrazen jeho zástupcem, tyto knihovny již nebyly potřeba. Nejnovější verze knihoven se ale dala použít i s hexapodem Phantom X AX Hexapod Mark II.

## Kapitola 10

# Pohyb robota

Senzory umožňují hexapodovi detekovat a tím obcházet některé překážky, které jsou dost velké na to, aby je senzor zachytil. Protože nemá hexapod žádné tlakové senzory na konci končetin, je pro něj nemožné přecházet překážky a udržovat při tom celkovou stabilitu těla. Hexapod tedy musí všechny překážky, které jeho senzory zachytí, obcházet.

Samotný pohyb hexapoda je nastaven tak, že hexapod bude pokračovat v pohybu dopředu, dokud senzory nezachytí překážku. Pokud se taková překážka objeví, hexapod zvolí cestu okolo dané překážky podle toho, zda je vůbec možné tuto překážku obejít zleva nebo zprava tj. zda mu v pohybu okolo překážky jedním nebo druhým směrem nebrání další překážky. Pokud nalezne takovou cestu, bude pokračovat v chůzi podél překážky, dokud tato překážka neskončí. Pokud narazí na konec obcházené překážky, za překážkou se pohne o takový počet kroků, který byl nutný vykonat při obcházení překážky doleva nebo doprava, ale opačným směrem (viz obr. 10.1). Po ukončení pohybu okolo překážky se bude tedy nacházet v takové pozici, jako kdyby prošel přímo přes překážku.



Obrázek 10.1: Příklad pohybu hexapoda okolo překážky.

Pokud hexapod narazí na překážku, může ji obejít tak, že se nebude nijak otáčet a půjde bokem na jednu nebo druhou stranu, podle toho která je vhodnější, dokud překážka neskončí, nebo nebude nutné změnit směr. Také se může hexapod, při detekci překážky,

otočit o určitý počet stupňů a pokračovat v cestě podél hrany překážky, dokud překážka neskončí, nebo dokud nebude nutné znovu změnit směr. Někdy se může stát, že senzory překážku nezachytí, např. proto, že je překážka moc nízká. V takovém případě může dojít k nežádoucí změně směru pohybu hexapoda a hexapod tedy nebude pokračovat v pohybu původním směrem, ale jeho pohyb se bude lišit o úhel o který jej pootočila daná překážka.

## 10.1 Základní postoj

Základní postoj hexapoda je postoj, který hexapod zaujme pokud je hexapod zapnutý a nachází se v klidové poloze (viz obr. 10.2). Při tomto postoji tedy stojí na místě a nehýbe se. Hexapod tento postoj zaujme těsně před začátkem chůze, při nárazu na překážku nebo při ukončení chůze, kdy již není možné dále pokračovat v pohybu. Jedná se o univerzální postoj, ze kterého je možné přejít jak do pohybu dopředu, tak do pohybu stranou. Hexapod je naprogramovaný tak, že pokud bude chtít změnit typ chůze z pohybu do boku na pohyb dopředu a nebo naopak, musí jako přechod mezi těmito druhy pohybu použít tento počáteční postoj. Znamená to, že pokud hexapod provádí např. chůzi dopředu nebo chůzi bokem, musí dokročit z právě prováděné fáze kroku místo aby přešel do další fáze kroku. Vykonáním tohoto dokročení přejde z chůze do polohy pro postoj, ze které potom může změnit směr pohybu. Je tedy nutné, aby hexapod včas dokázal detekovat překážku, protože samotným dokročením se také posune o kousek dopředu. Pokud tuto překážku včas neodhalí je možné, že v průběhu tohoto dokročení narazí do překážky a pokud mu bude překážka bránit v dalším pohybu ve směru chůze, provede tento půl krok na místě. Hexapod tedy bude stát na místě, ale jeho končetiny budou prokluzovat ve snaze o pohyb dopředu, který bude v dané situaci kvůli překážce nemožný. V průběhu obcházení překážky je možné, že bude při pohybu stranou ve snaze obejít překážku ve stálém kontaktu s překážkou a bude směr jeho pohybu neúmyslně změněn.

Hodnoty do kterých je potřeba umístit servomotory, aby se dosáhlo této pozice, byly experimentálně zjištěny tak, aby poskytovali hexapodu co největší volnost při pohybu. Tyto hodnoty byly zvoleny tak, aby splňovali následující požadavky: hexapod při tomto postoji musí udržet stabilitu těla tj. hexapod musí stát všemi šesti končetinami pevně na povrchu terénu, tělo hexapoda musí být ve vodorovné pozici, uvažujeme-li pro tento případ, že hexapod bude chodit po rovném povrchu, který se žádným směrem nesvažuje, musí být jeho tělo rovnoběžné s povrchem terénu, tyto hodnoty musí být vhodně umístěné, aby servomotorům nebránily ve volném pohybu koncové hodnoty otočení těchto servomotorů, které slouží jako zarážka pro otočný úhel  $300^\circ$  a tělo hexapoda i s končetinami musí být souměrné podle os, které dělí tělo hexapoda na pravou a levou polovinu. Jedná se o osy, kterými můžeme rozdělit tělo hexapoda na dvě zrcadlově souměrné poloviny při pohledu shora a při pohledu zepředu. Pokud rozdělíme končetiny hexapoda do párů, kdy pár tvoří vždy končetiny levé a pravé strany umístěné ve stejné části hexapoda tj. pár předních končetin, pár středových končetin a pár zadních končetin, musí jednotlivé části těchto párových končetin svírat stejný úhel s osou těla hexapoda. Při pohledu zepředu je patrné, že servomotory ovládající části končetin femur a tibia musí svírat s osou hexapoda stejný úhel, jinak se bude tělo hexapoda naklánět, což je při pohybu po rovném povrchu nežádoucí. Rozdílnými úhly je také možné způsobit, že všechny končetiny hexapoda nebudou pevně dosedat na povrch terénu a některé končetiny tedy nebudou poskytovat hexapodu oporu a budou viset ve vzduchu. Takové případy jsou nežádoucí a mohou ohrozit celkovou stabilitu hexapoda.

Při pohledu na hexapoda shora je více případů, do kterých můžeme nastavit hodnoty servomotorů, ze kterých vychází část končetiny zvaná coxa. Pokud máme vyhovující pozice





Obrázek 10.2: Příklad hexapoda v základním postoji.

servomotorů ovládajících femur a tibií, máme zajištěno, že hexapod bude stát všemi končetinami pevně na povrchu a tyto končetiny budou poskytovat hexapodu oporu. Tyto hodnoty, na které jsou nastavené servomotory ovládající pohyb končetin dopředu a dozadu, mohou být u všech končetin stejné a svírat s osou hexapoda úhel  $90^\circ$ . Končetiny tedy budou při pohledu shora rovnoběžné. Můžeme ale také přední pár končetin natočit o určitý úhel směrem od prostředního páru končetin (viz obr. 10.3), na rozdíl od středového páru, který by měl být vždy kolmý k ose hexapoda. Podobně můžeme nastavit i zadní pár končetin, který bude ale otočený opačným směrem, než byl pár předních končetin. Je vhodné, aby tento úhel byl u předního a zadního páru končetin stejný, ale pokud hexapod udrží rovnováhu, tento úhel může být odlišný. Výhodou takového natočení předního a zadního páru končetin je zejména větší stabilita hexapoda. Nevýhodou je, že se při horizontálním posunu nohy musí vhodně zvolit úhel o který se končetina bude pohybovat dopředu a dozadu. Pokud jsou tyto končetiny rovnoběžné, úhel o který se budou otáčet může být stejný.



Obrázek 10.3: Hexapod s rovnoběžným a různoběžným postavením končetin.

Při pohybu po rovném terénu ovšem není nutné klást takový důraz na stabilitu, rozhodl jsem se tedy všechny natočit servomotory ovládající coxu do takové polohy, aby při pohledu na hexapoda shora všechny končetiny svíraly s osou hexapoda úhel  $90^\circ$  a byly tedy

všechny rovnoběžné. Jednoznačnou výhodou je, že úhel o který se končetina posune při kroku dopředu bude u všech končetin stejný. Tímto způsobem také stačí vypočítat úhel, o který se mají servomotory pootočit, pro servomotory ovládající femur a tibií pouze dvakrát. Jeden pro přední a zadní pár nohou a druhý pro středový pár. Pokud by tělo hexapoda byl dokonalý kvádr a začátky jeho končetin by byly rovnoměrně rozmístěné po stranách jeho těla a měli by jejich počátky stejnou vzdálenost od jeho osy, stačilo by aby se tyto hodnoty vypočítaly pouze jednou a byly by použitelné pro všechny končetiny. Toto ovšem není můj případ. Končetiny u hexapoda PhantomX AX Hexapod Mark II nemají stejnou vzdálenost od osy hexapoda, musím tedy vypočítat tyto hodnoty dvakrát. Jednou pro přední a zadní pár končetin a podruhé pro středový pár končetin, jejichž počátek má od osy hexapoda větší vzdálenost.

## 10.2 Pohyb dopředu

Hexapod se dopředu pohybuje typem chůze zvaným tripod. Tento typ chůze jsem vybral proto, že má nejkratší periodu kroku, tedy není potřeba naprogramovat tolik částí kroku jako u vlny nebo u vlnění.

Chůzi tripod jsem při implementaci rozdělil na šest částí. Pokud hexapod vykračuje z východního postoje, samotné nakročení je rozděleno na tři části. V první části hexapod zvedne končetiny 1, 3 a 5, kterými bude vykračovat, do vzduchu. Pracuje tedy pouze servomotor ovládající femur. V druhé části posune tyto končetiny u půl krok dopředu servomotorem, který ovládá část končetinu zvanou coxa. Při samotné chůzi se tento úhel zdvojnásobí a hexapod bude provádět celé kroky. Ve třetí části položí tyto končetiny zpět na povrch terénu. Posune je o stejný úhel o který je v první části zvedl. Opět pracuje pouze servomotor ovládající část končetiny zvanou femur. Touto částí končí nakračování a začíná samotná chůze.

Pokud je nakročení dokončeno hexapod přechází do chůze. Hexapod už je v pozici, kdy má nakročeno končetinami 1, 3 a 5. V první části kroku tedy před samotným krokem musí zvednout končetiny 2, 4 a 6. Jinak by tyto končetiny posunoval po povrchu terénu, což je nežádoucí, protože by drhnutí těchto končetin po povrchu mohlo změnit směr chůze hexapoda. Zvláště pokud má hexapod chodit po povrchu který má vysoké tření jako např. koberec. Samotný krok je rozdělen na dvě části. Hexapod provádí krok ve dvou půl krocích. Krok se tedy provede v částech tři a čtyři. Krok je rozdělen na dvě části protože servomotor ovládající část nohy zvanou tibia musí kompenzovat otáčení nohy po kružnici. V první půlce kroku tedy servomotor úhel mezi femur a tibií zmenšuje a ve druhé půlce opět zvětšuje na původní velikost. Touto kompenzací se zajistí, aby bod na kterém končetina stojí neklouzal. Nyní byl proveden jeden krok chůze skupinou končetin 1, 3 a 5. Ten stejný krok teď musí udělat i končetiny 2, 4 a 6. V páté části kroku se tedy musí posunout končetiny 2, 4 a 6 pomocí servomotoru ovládajícího coxu na pozici pro počátek kroku. Protože jsou končetiny 2, 4 a 6 již ve vzduchu stačí je pouze posunout do pozice ze které je pak možno udělat krok. Toto posunutí se nemusí dělat ve dvou krocích, protože končetiny jsou zvednuté a není tedy nutné nic kompenzovat. Nyní máme končetiny 2, 4 a 6 nakročené a připravené k udělení dalšího kroku. Je ale potřeba je položit dolů tak, aby stály na povrchu terénu. V šesté části tedy posuneme končetiny 2, 4 a 6. Tuto práci vykoná servomotor ovládající femur. V sedmé části kroku musíme zvednout končetiny 1, 3 a 5, aby nedrhlly o povrch terénu. Tuto práci opět vykoná servomotor ovládající femur. Dále je potřeba vykonat druhou část kroku, tedy krok na končetinách 2, 4 a 6. Ten bude vykonán v osmé části kroku. V deváté části kroku je potřeba posunout končetiny 1, 3 a 5 na pozici pro nakročení. Opět

pracuje pouze servomotor ovládající femur. V poslední desáté části kroku položí hexapod končetiny 1, 3 a 5 na povrch terénu a přejde opět do první části kroku. Opakováním těchto kroků pak dochází k chůzi. Opakování je možné díky znalosti povrchu terénu. Hlavně kvůli tomu, že povrch terénu je rovný a nenachází se na něm žádné nerovnosti. Není tedy nutné jakýmkoliv způsobem měnit délku kroku nebo jiným způsobem měnit pozici končetiny tak, aby se přizpůsobila daným nerovnostem v povrchu terénu.

Tento typ chůze se nazývá tripod. Pohybové algoritmy vlna a vlnění potom fungují na stejném principu. Není ale nutné mít končetiny rozdělené do dvou skupin, ale musí se s každou končetinou hýbat zvlášť. Krok, který je možné periodicky opakovat, tedy bude rozdělen na více částí.

## 10.3 Pohyb stranou

Do strany se hexapod také pohybuje typem chůze zvaným tripod. Při pohybu stranou se hexapod neotáčí daným směrem, ale jde opravdu bokem. Přední část hexapoda tedy při chůzi nemění směr a je pořád otočena směrem kterým se hexapod původně měl pohybovat, než narazil na překážku.

Při pohybu stranou hexapod nevykonává krok ve dvou částech. Končetiny při kroku neposouvá před a za počáteční hodnoty na kterých se nachází v počátečním postoji. Při pohybu stranou tedy dělá pouze půl kroky do počátečních pozic končetin. Jediné co musí hexapod udělat při pohybu ze základního postoje je zvednutí končetin se kterými bude vykračovat a umístit je na pozici, ve které již je nakročen a připraven udělat krok.

Podobně jako u chůze dopředu je chůze stranou rozdělena na několik částí, které může hexapod opakovat. Oproti pohybu dopředu je při pohybu stranou těchto částí méně.

Pokud začíná hexapod chůzi stranou z počátečního postoje musí pro nakročení vykonat pouze dvě části. Hexapod musí prvně zvednout končetiny 1, 3 a 5 aby s nimi mohl dále provést nakročení. Ve druhé části potom přesune tyto končetiny na pozice ze kterých udělá krok. Tímto končí nakročení a hexapod může opakovat krok pomocí kterého bude docházet k chůzi.

V první části umístí končetiny 1, 3 a 5 na pozice ze kterých provede krok. Tato část není rozdělena na dvě části jako u chůze dopředu, kdy se končetiny prvně přesunuli na pozici a pak teprve postavily na zem. Na pozice pro provedení kroku posune jen končetiny na straně na kterou hexapod má v plánu jít. Ve druhé části musí hexapod zvednout končetiny 2, 4 a 6 do vzduchu, aby s nimi nemohl drhnout po povrchu terénu. Ve třetí části potom provede samotný krok (půl krok). Krok provádí tak, že končetiny, kterými měl nakročeno přitáhne zpět k tělu a končetinu která mířila opačným směrem než byl směr chůze od těla odtáhne. Ve čtvrté části musí hexapod umístit zvednuté končetiny na pozice na kterých započne krok. Musí tedy přemístit zvednuté končetiny 2, 4 a 6 na dané pozice. Jakmile jsou tyto končetiny umístěné, hexapod přejde do další části. V páté části musí hexapod zvednout končetiny 1, 3 a 5. Samotný krok na končetinách 2, 4 a 6 provede hexapod v šesté části. Krok provede stejným způsobem jako v první části kdy končetiny ve směru chůze přitáhne k tělu a končetiny v opačném směru od těla odtáhne. Tímto hexapod skončil jeden krok a pro vykonání dalšího kroku pokračuje zase od první části.

Stejně jako u pohybu dopředu bude i pohyb stranou, při typu chůze vlna a vlnění, rozdělen na více částí, kvůli tomu, že budu muset s každou končetinou pohybovat zvlášť.

## 10.4 Výpočet pozic servomotorů

Pro výpočet jednotlivých úhlů do kterých se mají nastavit jednotlivé servomotory jsem použil trigonometrii a Pythagorovu větu pro výpočet úhlů a jednotlivých stran v trojúhelníku. Vypočítat stačilo pouze pozice servomotorů ovládajících femur a tibií, úhel pro servomotor ovládající coxu jsem vybral experimentálně tak, aby hexapod při chůzi neztrácel rovnováhu. Pro tento výpočet jsem rozdělil oblast končetiny na dva trojúhelníky. Potom stačilo akorát vypočítat jednotlivé strany a úhly v trojúhelnících abych dostal požadované hodnoty. Tyto hodnoty jsem dále převedl do interní reprezentace pro jednotlivé servomotory. Servomotory jako vstup nepředpokládají stupně ani radiány, ale mají interní reprezentaci otáčení. Pro převod radiánů do interní reprezentace jsem použil vztah z knihovny NUKE. Tento vztah popsán v rovnici 10.1.

$$pozice = \frac{rads * 100}{51} * 100 \quad (10.1)$$

I přesto, že je knihovna NUKE zastaralá, experimentálně jsem ověřil správnost tohoto vztahu.

Pro výpočet jednotlivých pozic jsem použil rovnice 6.1 až 6.9 zmíněné v kapitole 6.2. Z těchto vztahů jsem zjistil hodnoty, na které mám nastavit jednotlivé servomotory. V implementaci jsem ovšem řešil chůzi tak, že jsem přičítal a odečítal hodnoty k hodnotám, ve kterých byly servomotory v základním postoji. Servomotory jsem tedy posouval pouze o offset, který jsem vypočítal odečtením vypočítaného úhlu od základního úhlu. Tento offset mohl být i záporný. V případě, že byl záporný, převedl jsem tento úhel na kladný a pouze jej odečítal od základního úhlu. Vypočítaný úhel jsem prvně musel převést do interní reprezentace servomotorů vztahem, který jsem uvedl výše.

# Závěr

Za účelem řešení této práce jsem podrobně nastudoval problematiku kráčivých podvozků. Také jsem srovnal kráčivé a pojízdné podvozky. Dále jsem se zaměřil pouze na hexapody. Popsal jejich výhody a nevýhody a zmínil jejich historii. Uvedl jsem i parametry, podle kterých se dá odhadnout výkonnost hexapodů. Dále jsem uvedl stavbu těla hexapodů, a možnosti postavení jejich končetin. Také je obsahem také řešení problémů týkajících se výpočtu pozic, na které se mají postavit jednotlivé servomotory, pomocí inverzní kinematiky. K tomuto účelu jsem vytvořil rovnice, které jsem také detailně popsal. Popsal jsem také jednotlivé základní typy pohybu hexapoda a také chůzi používanou pro pohyb ve členitém terénu. Tyto základní typy jsem srovnal a navrhl jak je možné zvýšit celkovou stabilitu nebo rychlost hexapoda. Popsal jsem také základní rozdělení senzorů a důvody proč jsou nutné pro orientaci hexapoda v prostoru. Také jsem popsal robota, který byl použit při řešení této práce, jeho servomotory a problémy na které jsem narazil při implementaci jednotlivých pohybů. Popsal jsem i způsob implementace pohybu mezi překážkami a problémy s tím spojené.

Pro pohyb hexapoda jsem implementoval všechny tři typy pohybu tj. tripoda, vlnu a vlnění. Primárně ovšem hexapod používá pouze jeden typ pohybu, tripod. Dále jsem jej vybavil sadou senzorů pro měření vzdálenosti. Sensory jsou typu SRF08 a umožňují hexapodovi orientovat se v prostoru. Podle informací ze senzorů je hexapod schopen detekovat a také i obcházet některé překážky, které mu stojí v cestě.

Jako jedna z možností jakým směrem by tato práce mohla pokračovat je například vybavení hexapoda kontaktními senzory, pomocí kterých by mohl překonávat překážky tak, že je přejde a nemusel by je tedy všechny obcházet. Stačilo by upravit zdrojový kód a přidat šest senzorů na končetiny hexapoda. Na desce je velké množství nevyužitých pinů, mohly by tedy všechny senzory být připojené přímo na desku, bez jakékoliv mezivrstvy. Další možností je například přidání senzoru pro zachycení obrazu. Hexapod by potom byl schopen orientovat se podle obrazu, pokud by byl vhodně zpracován. Nebylo by tedy potřeba tolik senzorů pro měření vzdálenosti.

# Literatura

- [1] ROBOTIS e-Manual. [http://support.robotis.com/en/techsupport\\_eng.htm#product/dynamixel/ax\\_series/dxl\\_ax\\_actuator.htm](http://support.robotis.com/en/techsupport_eng.htm#product/dynamixel/ax_series/dxl_ax_actuator.htm), [Online; navštíveno 16.4.2016].
- [2] SRF08 Ultra sonic range finder Technical Specification. <http://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf08tech.html>, [Online; navštíveno 4.5.2016].
- [3] Akozono, J.; Iwasaki, M.; Asakura, O.: Development on a walking robot for underwater inspection. In *Proceedings of the International Conference on Arabidopsis Research*, 1989.
- [4] Alexander, R. M.: *Exploring Biomechanics: Animals in Motion*. Scientific American Library, 1992, ISBN 071675035X.
- [5] Bařinka, L.; Berka, R.: Inverse Kinematics - Basic Methods. Technická zpráva, 2002.
- [6] Bares, J.; Hebert, M.; Kanade, T.; aj.: Ambler: An autonomous rover for planetary exploration. Technická zpráva, 1989.
- [7] Brooks, R. A.: A robot that walks; emergent behaviors from a carefully evolved network. Technická zpráva, 1989.
- [8] Buss, S. R.: Introduction to Inverse Kinematics with Jacobian Transpose, Pseudoinverse and Damped Least Squares methods. October 2009.
- [9] Corke, P.: Denavit-Hartenberg notation for common robots. 2014.
- [10] Delcomyn, F.; Nelson, M. E.: Architectures for a Biomimetic Hexapod Robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000.
- [11] Ding, X.; Wang, Z.; Rovetta, A.; aj.: *Locomotion Analysis of Hexapod Robot*. 2010.
- [12] Gabrielli, G.; von Karman, T.: What price speed?: Specific power required for propulsion of vehicles. *American Society for Naval Engineers*, 1950.
- [13] Habib, M. K.: *Handbook of Research on Advancements in Robotics and Mechatronics*. IGI Global, 2014.
- [14] Hayat, A. A.; Sadanand, R. O. M.; Saha, S. K.: Robot Manipulation through Inverse Kinematics. In *Proceedings of the 2015 Conference on Advances In Robotics*, 2015.
- [15] Hunt, M. L.: Robotic walking in the real world. *Science*, ročník 339, č. 6126, 2013: s. 1389–1390.

- [16] Nonami, K.; Barai, R. K.; Irawan, A.; aj.: *Hydraulically Actuated Hexapod Robots*. Springer Japan, 2014, ISBN 978-4-431-54348-0.
- [17] Preumont, A.; Alexandre, P.; Ghuys, D.: Gait Analysis and Implementation of a Six Leg Walking Machine. In *Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Robotics: Robots in unstructured Environment*, ročník 2, 1991, s. 941–945.
- [18] Song, S. M.; Choi, B. S.: The optimally stable ranges of 2n-legged wave gaits. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, ročník 20, č. 4, 1990: s. 888–902.
- [19] Sumesh, A. S.; Ramkumar, R.; Balamurugan, S.: Design Analysis and Simulation of Hexapod. *International Journal of Emerging Technology in Computer Science and Electronics (IJETCSE)*, ročník 14, č. 1, 2015.
- [20] Udengaard, M.; Iagnemma, K.: Design of an Omnidirectional Mobile Robot for Rough Terrain. Technická zpráva, 2007.
- [21] Waldron, K. J.; McGhee, R. B.: The Adaptive Suspension Vehicle. *IEEE Control Systems Magazine*, 1986.

# Přílohy



## Seznam příloh

<b>A Obsah CD</b>	<b>39</b>
<b>B Manuál</b>	<b>40</b>

# Příloha A

## Obsah CD

Na přiloženém CD je kopie arduino prostředí ve kterém jsem pracoval. Jedná se o prostředí zdarma poskytované firmou Arduino. V prostředí je obsažen překladač pro zdrojové texty. Dále jsou obsaženy knihovny a zdrojové texty potřebné pro překlad. Dále je na CD obsažen zdrojový text bakalářské práce, samotná bakalářská práce ve formátu pdf.

Adresářová struktura:

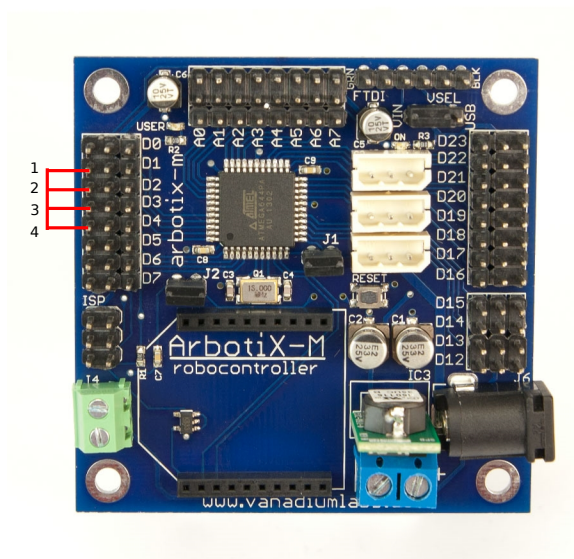
- ./src - zdrojové texty
- ./arduino - instalační program Arduino IDE (IDE třetí strany)
- ./xpelzz00.pdf - tato práce ve formátu pdf
- ./prace\_latex - tato práce v latexových zdrojových textech
- ./README - soubor readme s popisem struktury a programu

## Příloha B

# Manuál

Pro běh programu je nutné jej nahrát do paměti základní desky robota. Pro nahrání lze použít například vývojové prostředí od firmy Arduino a FTDI kabel. Dále je potřeba zapojit kabely od servomotorů do základní desky a propojit desku s baterií. Pak už stačí jen zapnout robota.

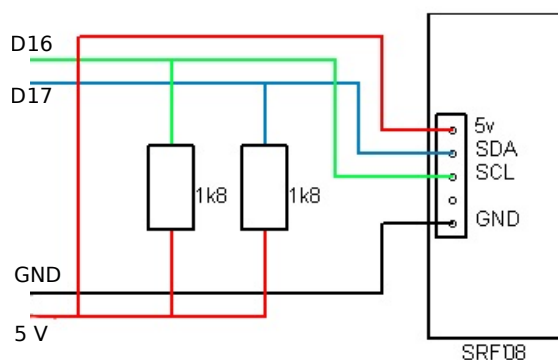
Pro správnou funkci hexapoda je potřeba vybrat typ chůze. Styl chůze je potřeba vybrat propojením dvou pinů na desce hexapoda (viz obr. B.1). Pin 1 je nastaven na output a je třeba jej propojit s pinem číslo 2, 3 nebo 4. Číslo 2 je chůze typu tripod, pin číslo 3 je vlna a pin číslo 4 je vlnění. Pokud tyto piny nebudou propojeny, hexapod použije chůzi tripod.



Obrázek B.1: Propojení pinů<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Převzato z <http://www.trossenrobotics.com/p/arbotix-robot-controller.aspx>

Senzory jsou napojené na I2C sběrnici, pro kterou jsou vyhrazeny piny D16 a D17 (viz. obr. B.2).



Obrázek B.2: Zapojení senzoru SRF08<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Převzato z <http://playground.arduino.cc/Main/SonarSrf08>