



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

## NÁVRH KONSTRUKCE ROBOTICKÉHO HADA

DESIGN OF A ROBOTIC SNAKE CONSTRUCTION

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Pollák

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Hůlka

BRNO 2023



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky  
Student: **Bc. Jakub Pollák**  
Studijní program: Aplikovaná informatika a řízení  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Hůlka**  
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Návrh konstrukce robotického hada

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem studenta bude navrhnout konstrukci modelu robotického hada s využitím konceptu ROBOTIS, tu zrealizovat, otestovat a vyhodnotit výsledky.

### Cíle diplomové práce:

Stručná rešerše problematiky robotických hadů.

Návrh konstrukce robotického hada primárně pro pohyb ve 2D s ambicí pro pohyb ve 3D.

Praktická realizace navržené konstrukce.

Otestování funkčnosti konstrukce v reálném prostředí a následné srovnání rychlosti pohybu v závislosti na parametrizaci modelu, prostředí, řízení apod.

### Seznam doporučené literatury:

WORST, Rainer, and Ralf LINNEMANN. "Construction and operation of a snake-like robot." Proceedings IEEE International Joint Symposia on Intelligence and Systems. IEEE, 1996.

HOPKINS, James K., BRENT W. Spranklin, and SATYANDRA K. Gupta. "A survey of snake-inspired robot designs." Bioinspiration & biomimetics 4.2 (2009): 021001.



Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Táto diplomová práca nadväzuje na autorovu bakalársku prácu „Návrh modelu robotického hada“. Jej cieľom bola simulácia robota vytvoreného z dielcov sady Bioloid a ukážka možných pohybov v simuláciách. Cieľom tejto práce je fyzická konštrukcia daného robota a experimentálne overiť pohyblivosť testovaním na rôznych povrchoch. Prvá časť práce je zameraná na zhrnutie poznatkov biologických hadov a využitie robotických hadov v robotike. V druhej časti je opísaný spôsob riadenia a konštrukcia robotického hada. Posledná časť je zameraná na testovanie limitov a prekonávanie prekážok, z ktorých je vyvodенý záver.

## ABSTRACT

This master's thesis is a continuation of the author's bachelor's thesis "Design of a model of a robotic snake", a goal of which was the simulation of a robot created from parts of the Bioloid set and a demonstration of possible movements in the simulations. The aim of this thesis is the physical construction of the given robot and the experimental verification of its mobility by testing it on different surfaces. The first part of the thesis is focused on a summary of information about biological snakes and the use of robotic snakes in robotics. The second part describes the control method and the construction of the robotic snake. The last part deals with testing limits and overcoming obstacles. A conclusion is drawn from the results of the last part of the thesis.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

Robotický had, Arduino, Dynamixel, serpenoida

## KEYWORDS

Robotic snake, Arduino, Dynamixel, serpenoid curve









ÚSTAV AUTOMATIZACE  
A INFORMATIKY



2023

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

POLLÁK, Jakub. Návrh konstrukce robotického hada. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/153087>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Tomáš Hůlka.



## **POĎAKOVANIE**

Chcem poďakovať vedúcemu práce a vedúcemu Ústavu za pomoc, ochotu a trpezlivosť, študentskému tímu strojLAB za nadobudnuté skúsenosti.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 20. 5. 2023

.....  
Jakub Pollák



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA</b> .....	<b>19</b>
2.1	Biologické hady .....	19
2.1.1	Laterálna undulácia (Lateral undulation) .....	20
2.1.2	Bočné vlnenie (Side winding) .....	20
2.1.3	Harmonikový pohyb (Concertina progression) .....	20
2.1.4	Priamočiary pohyb (Rectilinear/caterpillar movement) .....	21
2.2	Robotické hady .....	22
2.2.1	Lietajúci had DRAGON .....	23
2.2.2	Obojživelný robot HiBot .....	24
2.2.3	Had s hnanými plutvami .....	24
2.2.4	Had s hnanými kolesami.....	25
<b>3</b>	<b>VLASTNÉ RIEŠENIE</b> .....	<b>26</b>
3.1	Použiteľný hardware a software .....	26
3.2	Stavebnica Bioloid.....	29
3.2.1	Aktuátory .....	30
3.3	Riadenie .....	31
3.4	Komunikácia.....	33
3.4.1	Štruktúra paketu.....	33
3.4.2	Zariadenie na komunikáciu č.1 .....	34
3.4.3	Zariadenie na komunikáciu č.2.....	35
3.4.4	Zariadenie na komunikáciu č.3 .....	36
3.5	Konštrukcia.....	36
3.6	Napájanie .....	39
3.7	Ovládanie .....	40
3.7.1	Fyzická ovládačka .....	40
3.7.2	Príkazový riadok Matlab-u .....	43
3.7.3	Stavový automat .....	45
3.7.4	GUI v Matlab-e.....	46
<b>4</b>	<b>ZHODNOCENÍ A DISKUZE</b> .....	<b>47</b>
4.1.1	Testovanie.....	47
4.1.2	Výsledky testovania.....	48
<b>5</b>	<b>ZÁVER</b> .....	<b>51</b>
	<b>ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY</b> .....	<b>53</b>
	<b>ZOZNAM SKRATIEK, OBRÁZKOV A TABULIEK</b> .....	<b>55</b>





# 1 ÚVOD

„Příroda, nekonečná inspirace vědy“ je název knihy [1] která výstižně opisuje túto prácu. Ľudstvo sa snaží napodobniť mechanizmy vyvinuté prírodou po milióny rokov evolúcie. Konvenčné pozemné roboty používajúce kolieska majú problém pri použití mimo upravených povrchov, ciest, a chodníkov. Ďalším problémom sú úzke miesta a inak neprístupné miesta.

Pohyb zvierat je často napodobňovaný v robotike za účelom zlepšenia priechodnosti neprístupného terénu. Medzi najčastejšie pohyby hadov patrí pohyb harmonikový, bočný, priamočiary a pohyb bočným vlnením. Väčšina pohybov má spoločný opis krivky ktorú vytvárajú. Jej aproximácia sa nazýva serpenoida a bola popísaná profesorom Shigeo Hirose.[2] V praxi sa používajú rôzne kombinácie koliesok a pásov, hnaných aj poháňaných.

V prvej časti práce oboznamuje čitateľa s pohybmi biologických hadov, existujúcimi robotickými hadmi ako aj ich použitím. Súčasťou tejto práce je oboznámenie s problémom, zhrnutie predchádzajúcich skúseností zo simuláciou, využitie poznatkov nadobudnutých počas štúdia v danej problematike a skonštruovanie robotického hada. Had je vyrobený zo stavebnice Bioloid, ktorá je dostupná v dielni ÚAI FSI VUT. Sada Bioloid obsahuje konštrukciu hada, ktorý sa pohybuje planárne, resp. všetky osi rotácie sú v jednej rovine. Toto znižuje priechodnosť robota členitým terénom a obmedzuje použitie na jeden typ pohybu. Otočenie každej druhej osi o  $90^\circ$  okolo pozdĺžnej osi umožňuje pohyb v 3D priestore, čo má za následok zlepšenie priechodnosti terénom. Robota je možné ovládať manuálne v reálnom čase. Nadobudnuté poznatky môžu byť použité pre ďalšie vylepšenia modelu.



## 2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

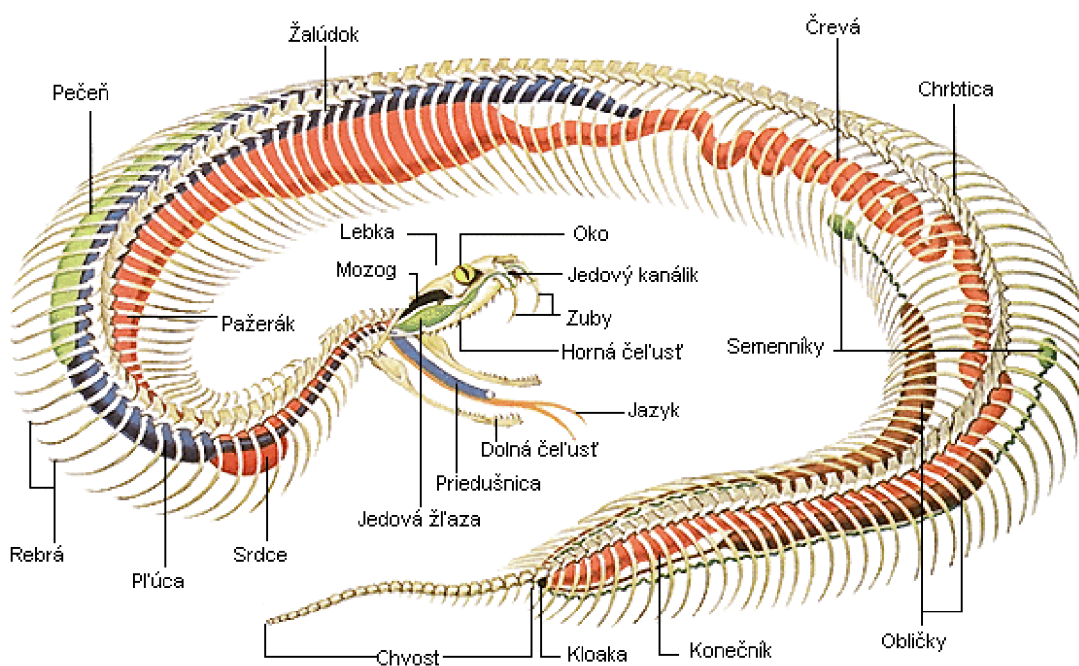
Na prvý pohľad sa môžu hady byť v nevýhode kvôli chýbajúcim končatinám, ktoré by im pomáhali pri pohybe. Napriek tomuto predsudku sú hady schopné pohybovať sa rýchlo, efektívne po súši aj vo vode. Niektoré druhy sú dokonca schopné plachtiť vzduchom.



Obr. 1: Pozostatok končatín [3]

### 2.1 Biologické hady

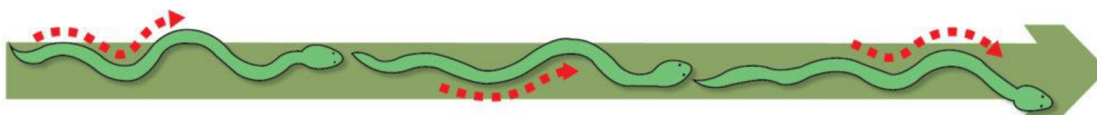
Z anatómie hada nás najviac zaujíma kostra, ktorá definuje tvar tela a povoľuje možné stupne voľnosti. Na obrázku nižšie (Obr.2) môžeme vidieť že had interaguje s okolím stykom s rebrami kostry. Rebrá sú spojené množstvom zložitých svalov a pokryté šupinatou kožou. Nasledujúce podkapitoly priblížia najtypickejšie pohyby.



Obr. 2: Anatómia hada [3]

### 2.1.1 Laterálna undulácia (Lateral undulation)

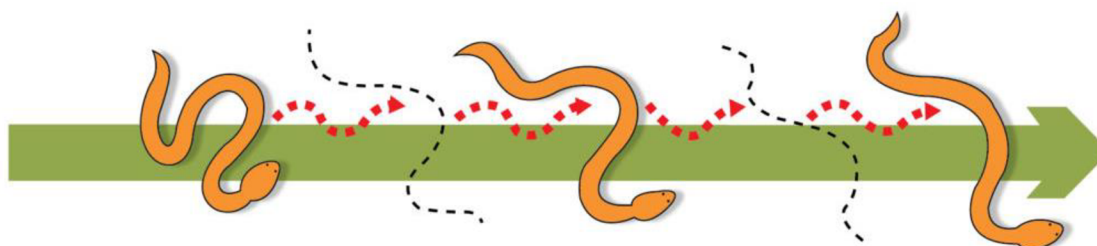
Typ pohybu pri ktorom sa telo vychýľuje zo strany na stranu a opisuje pri tom krivku pripomínajúcu písmeno „S“. Pohyb sa dá matematicky opísať funkciou zvanou serpenoida. Celé telo sa pohybuje po jednej stope, hlava vedie ostatné články za sebou ako by boli na koľajničkách. Tento pohyb je jednoduchý z konštrukčného hľadiska a dá sa použiť pre pohyb po rovnom povrchu, v sypkých materiáloch a pri plávaní.



Obr. 3: Laterálna undulácia [4]

### 2.1.2 Bočné vlnenie (Side winding)

Pohyb pozostáva z použitia serpenoidy v dvoch na seba kolmých rovinách. Výsledný pohyb je diagonálny na pozdĺžnu os robota a dotýka sa povrchu len časťou tela. Pohyb je efektívny pre klzký pohyb, ako aj pre pohyb v horúcom piesku. Minimálna styčná plocha pomáha minimalizovať prenos tepla.



Obr. 4: Bočné vlnenie [4]

### 2.1.3 Harmonikový pohyb (Concertina progression)

Pohyb pripomína naťahovanie a skracovanie harmoniky.

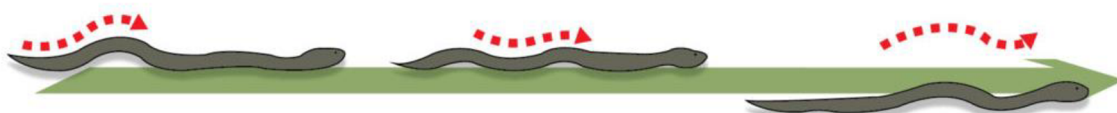
Predná časť sa nadvihne, natiahne vpred, potom zaprie o povrch a následne sa zadná časť tela nadvihne a pritiahne ku zvyšku tela. Tento pohyb je známy hlavne pre dážďovky.



Obr. 5: Harmonikový pohyb [4]

#### 2.1.4 Priamočiary pohyb (Rectilinear/caterpillar movement)

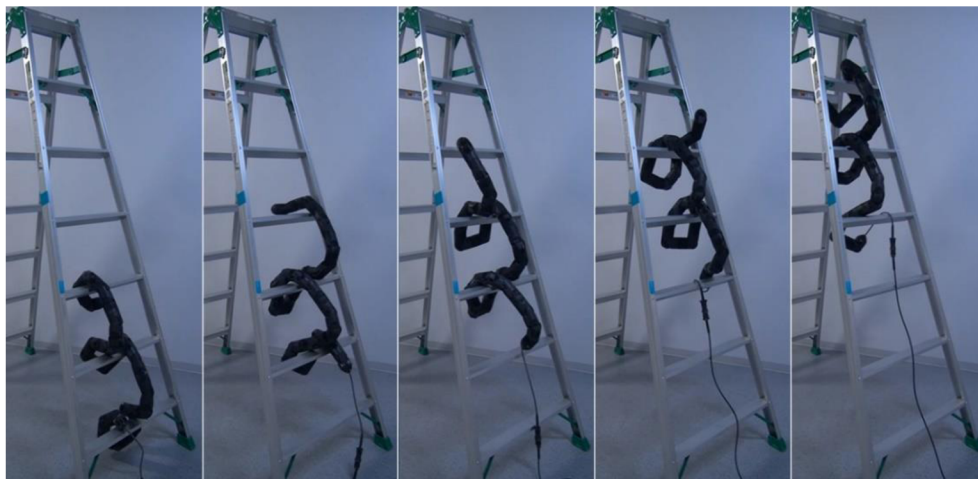
Veľmi pomalý pohyb pri ktorom had používa kožu na bruchu a poháňa sa vpred. Vlna vytvorená sťahovaním svalov je podobná chôdzi mnohonožiek, postupuje odzadu vpred. Tento typ pohybu bol podrobne vysvetlený len pred pár rokmi. Pohyb používajú hady pri love pretože vytvára najmenej hluku. Okrem lovu je pohyb používaný málo, napríklad keď sa necítia ohrozené a nepotrebujú sa rýchlo presunúť. Na tento typ pohybu had používa dva protíahlé svaly pre každé rebro, ktoré je spojené s kožou pod ním. Najskôr sa časť kože nadvihne, presunie vpred, položí opäť na zem a posunie dozadu, vytvárajúc efekt krokov, zatiaľ čo had sa plynule posúva vpred. Nemá rozsiahle využitie v robotike, pretože je potrebná elastická koža so šupinami a množstvo malých pohonov.



Obr. 6: Priamočiary pohyb [4]

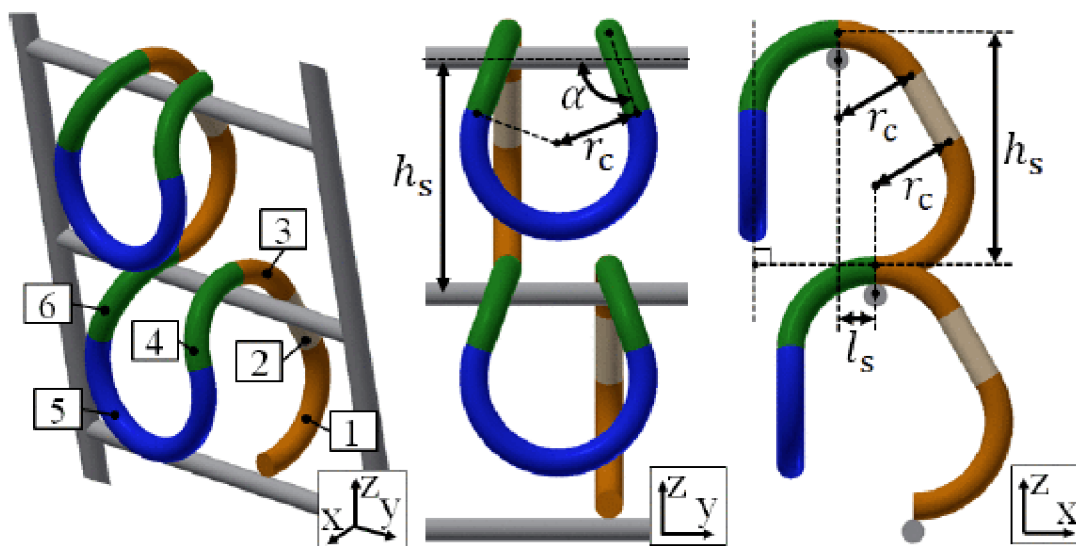
## 2.2 Robotické hady

Robotické hady sa snažia napodobniť pohyb biologických hadov, prípadne ich kombinujú s inou formou pohonu, pre ešte širšie možnosti ako prekonať prekážky. Schopnosť zdolávania náročných prekážok ako aj ukážku obratnosti dokázal robot predstavený na výstave „International Conference on Intelligent Robots and Systems“ v Španielsku, ktorého autorom je Tatsuya Takemori.



Obr. 7: Lezenie po rebríku [5]

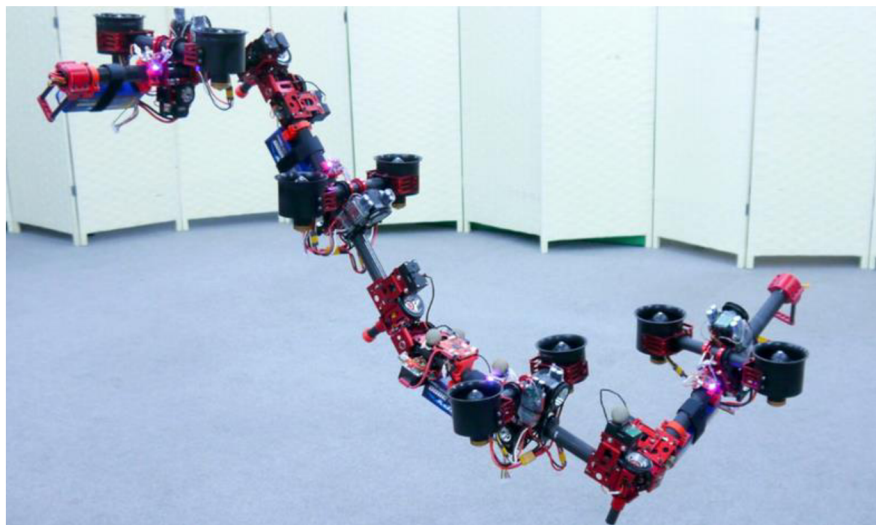
Had používa zložité metódy spájania tvarov ktoré sa potom snaží napodobniť. Tieto tvary majú parametre pre prispôbenie rôznym vzdialenostiam priečok a sklonu rebríka.



Obr. 8: Vizualizácia vstupných dát [5]

### 2.2.1 Lietajúci had DRAGON

Robot vzhľadom pripomína hada, ale je kategorizovaný ako lietajúci dron s meniteľnou konfiguráciou. Na každom článku je pár motorov s vrtuľami ktoré vytvárajú ťah.



Obr. 9: DRAGON [6]

Ovládanie je výpočtovo náročné pretože vplyv motorov sa mení s konfiguráciou. Robot je schopný prejsť cez malé otvory a poskladať sa do tesných miest, následne rozložiť do situácie vhodnej konfigurácie. Konfigurácia v tvare písmena L poskytuje robotovi dlhé rameno, vďaka čomu dokáže vyvinúť krútiaci moment 2 Nm potrebné pre uzavretie ventilu. Robot je zložitý a relatívne ťažký, čo spôsobuje že batéria vydrží len na tri minúty letu.



Obr. 10: Konfigurácia pri uzatváraní ventilu [7]

### 2.2.2 Obojživelný robot HiBot

Robot HiBot schopný podvodného prieskumu, má modulárnu konštrukciu, ktorá umožňuje pridať špecializované články a senzory. Každý článok má šesť radiálne symetrických krídelok, ktoré majú v špičke voľne otáčajúce sa koliesko. Robot je schopný pohybu vo vode aj po súši.



Obr. 11: HiBot ACM-R5H [8]

### 2.2.3 Had s hnanými plutvami

Existujú aj roboty kombinujúce pohon článkov a prídavného pohonu. Vzorom pre tohto robota je salamandra. Konštrukcia je jednoduchá, dokáže plávať na vode a používa typ pohybu „lateral undulation“ v kombinácii s plutvami.

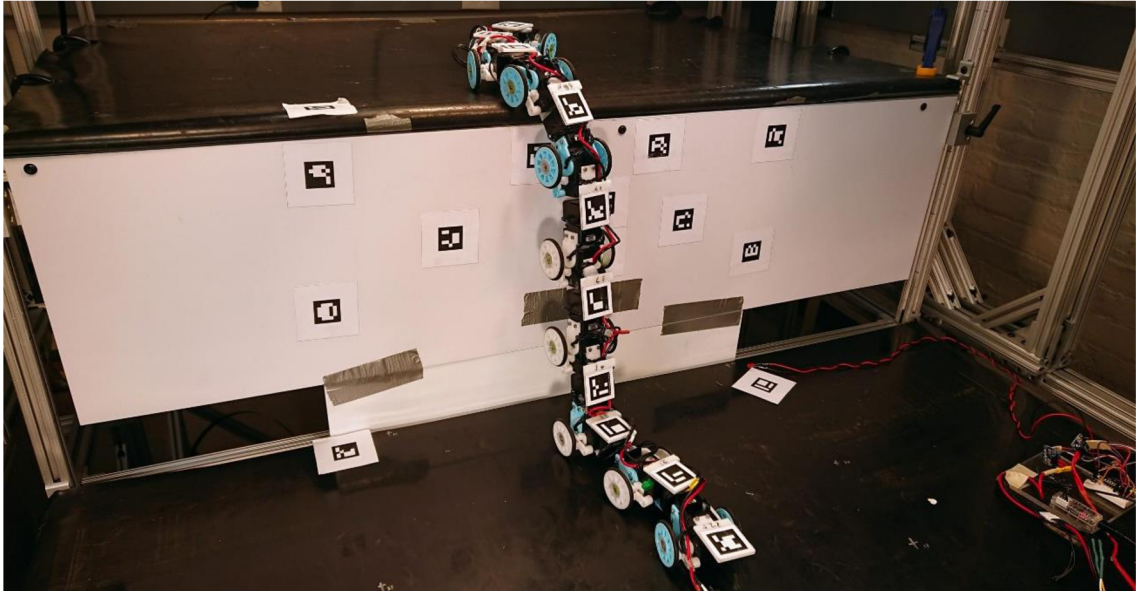


Obr. 12: HiBot ACM-R5H [9]



### 2.2.4 Had s hnanými kolesami

Tento had používa hnané kolesá pre rýchlo a energeticky efektívny presun po nenáročnom teréne. Jeho článkovitá konštrukcia mu umožňuje prechod aj ťažkým terénom, alebo výstup po schodoch, ako je možno vidieť na obrázku nižšie.



Obr. 13: Robotický had s kolieskami [10]

Kolieska môžu byť nahradené pásmi pre lepšie rozloženie váhy pozdĺž tela hada.



Obr. 14: Robot pre kontrolu kanalizácie, Soryu-C [11]

## 3 VLASTNÉ RIEŠENIE

### 3.1 Použitelný hardware a software

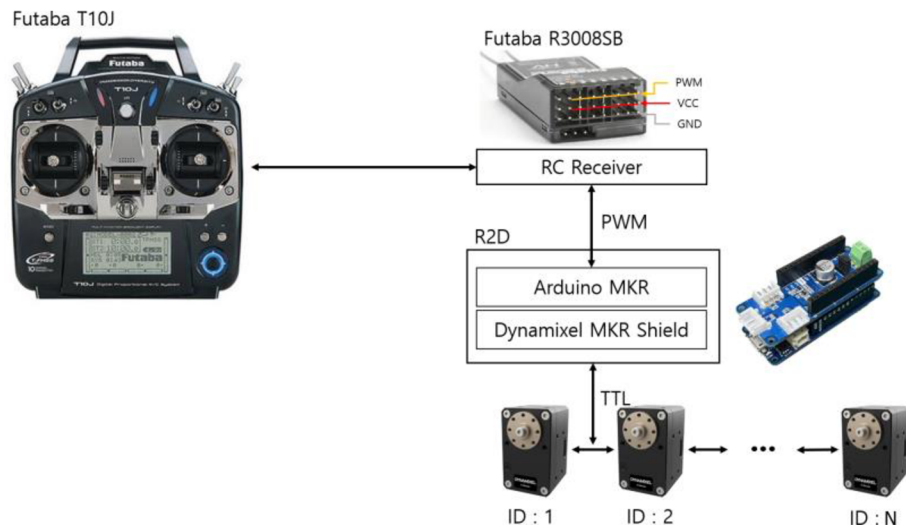
Zadanie práce vyžaduje návrh a konštrukciu hada z výukových stavebníc Dynamixel Bioloid, dostupných v dielňach Ústavu automatizácie. Robot využíva pohyby získané zo simulácií z predošlej autorovej bakalárskej práce. Výber komponentov bol volený s ohľadom na kompatibilitu, ako fyzickú tak aj softvérovú. V zozname sa nachádzajú kombinácie softvéru a hardvéru, ktoré boli zvažované pre riadenie a komunikáciu medzi jednotlivými komponentami. Všetky uvedené možnosti boli otestované a porovnané.

Možnosti:

- Použitie RC vysielača/prijímača spolu s Arduino mikro-kontrolérom a Dynamixel shield-om pre komunikáciu s aktuátormi. (Obr.15)  
Výhody: Plug and play riešenie, jednoduché a kompaktné riešenie  
Nevýhody: **Veľmi vysoká cena, zložitejšie debugovanie. Nutnosť externého zdroja prúdu.**
- Vytvorenie vlastnej ovládačky s Arduino mikro-kontrolérom, umiestneným v ovládačke. Arduino by spracovalo vstupy a priamo vysielalo výstupy jednotlivým aktuátorom robotického hada. (Obr.16)  
Výhody: Jeden mikro-kontrolér, celý program na jednom mieste  
Nevýhody: **Použitie Arduino (Leonardo) nemá dostatočný výkon a počet portov aby dokázalo ovládať všetky potrebné súčasti naraz. Nutnosť externého zdroja prúdu.**
- Použitie dvoch Arduino mikro-kontrolérov. Jeden mikro-kontrolér (Leonardo) použitý v ovládačke pre spracúvanie vstupu, druhý kontrolér (MKR) pre generovanie výstupných signálov za pomoci dodatočného shield-u pre komunikáciu s dynamixel aktuátormi. (Obr.17)  
Výhody: Možnosť bezdrôtovej komunikácie.  
Nevýhody: **Zložité debugovanie. Nutnosť externého zdroja prúdu.**
- Použitie Arduina a mikro-kontroléru CM-530 v sade Bioloid. (Obr.18)  
Výhody: Arduino spracúva vstupy a CM-530 generuje inštrukcie pre servá a zabezpečuje napájanie.  
Nevýhody: **Arduino a CM-530 nekomunikuje priamo medzi sebou.**
- Vytvorenie vlastnej ovládačky s Arduino mikro-kontrolérom, umiestneným v ovládačke. Arduino by vstupy vysielalo do počítača, kde by zvolený program výstupy spracuje a generuje inštrukcie jednotlivým aktuátorom robotického hada cez adaptér USB2Dynamixel. (Obr.19)  
Výhody: Najlacnejšie riešenie, možnosť použitia viacerých vstupov, viacero programov pre generovanie inštrukcií: Matlab, Simulink, C++, Python, LabView, Scratch, Scratch 2, ROS, ROS 2 a iné.  
Nevýhody: **Externý zdroj napájania. Komunikácia káblom.**

Posledná možnosť bola navyše vhodná pre naše potreby a preto bola najviac preferovaná. Použitý bol program MatLab s knižnicami pre komunikáciu s vlastnou ovládačkou a adaptérom USB2Dynamixel.

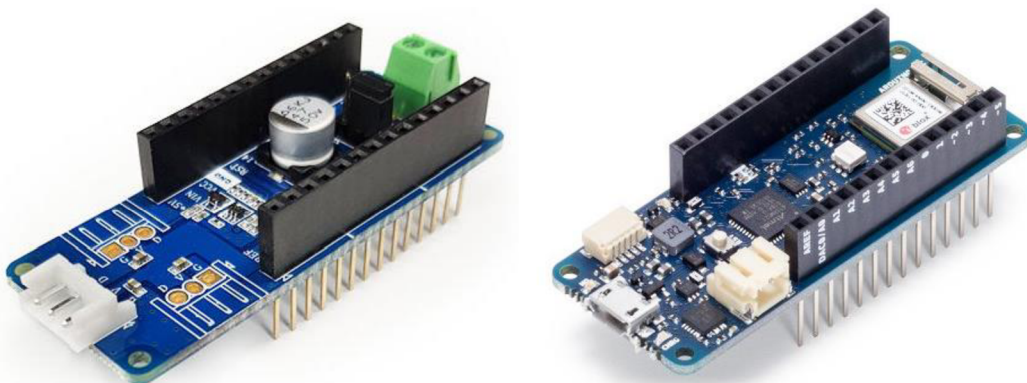
Príloha obrázkov súvisiaca s predošlou stránkou:



Obr. 15: Schéma zapojenia RC 2 Dynamixel [12]



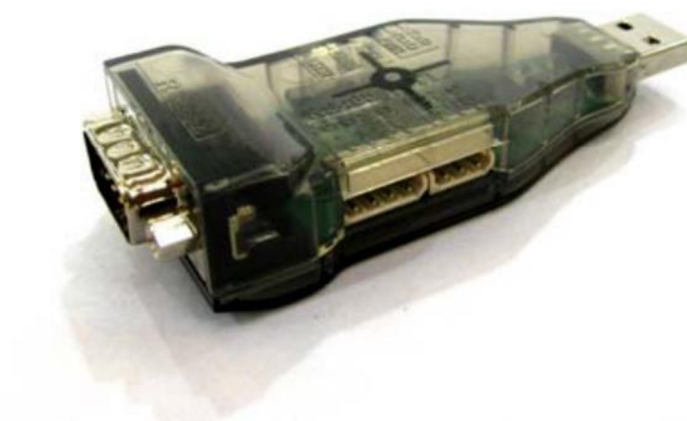
Obr. 16: Vlastná ovládačka a obvod pre komunikáciu



Obr. 17: Arduino MKR 1010 (vľavo) a dynamixel shield (vpravo) [13]



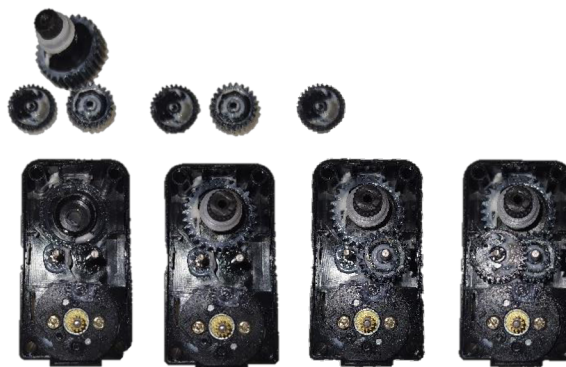
Obr. 18: Dynamixel CM-530 [14]



Obr. 19: USB2Dynamixel [15]

### 3.2 Stavebnica Bioloid

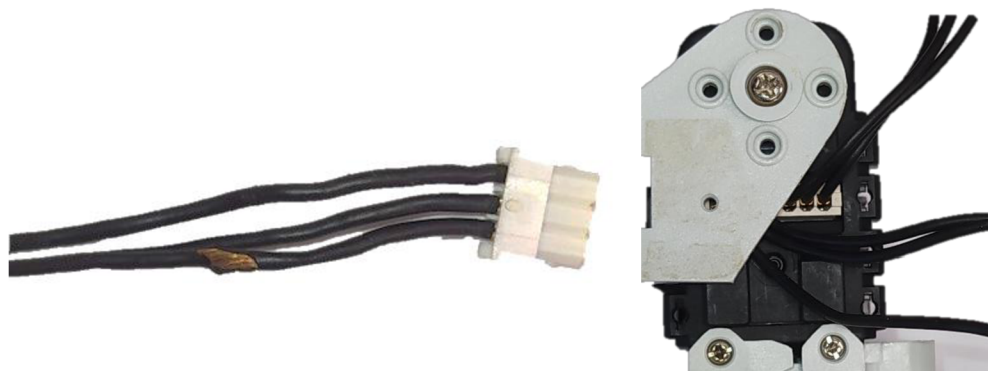
Pri príprave a oboznamovaní sa s dielcami sady Dynamixel Bioloid Pro, bola vykonaná inventarizácia setov. Bolo nájdených niekoľko poškodených káblov (Obr. 21) a nefunkčný aktuátor AX-12. Nefunkčnosť aktuátora bola preskúmaná. Poškodená časť sa nachádzala za predným krytom. Jedno plastové koliesko prevodovky bolo prasknuté, čo spôsobovalo zlyhanie prenosu krútiaceho momentu na výstupnú osku. Náhradná prevodovka bola nájdená aj na stránkach Českého dodávateľa súčiastok. Na obrázku (Obr. 20) je zobrazený priebeh rozoberania prevodovky. Podľa týchto obrázkov je skladanie prevodovky jednoduchšie a po zložení dá sa vizuálne porovnať s obrázkom.



Obr. 20: Prevodovka aktuátora AX-12

Poškodené káble nie sú úplne nefunkčné a dajú sa jednoducho opraviť izolačnou páskou. Izolácia po čase krehne a pri pohybe aktuátora môže dostať k stretu rámu s káblami. Rám potom strhne izoláciu na jednej z krajných žíl kábla. (Obr. 21) Vďaka konštrukcii kábla a nízkeho napájacieho napätia (12V) je odhalenie krajných žíl bezpečné. Žila s kladným napätím sa nachádza v strede, medzi žilou s uzemnením a žilou komunikácie ktorá pracuje s napätím 5V. Prípadný skrat medzi krajnými žilami s okolím spôsobí rušenie komunikácie, ale nezničí zdroj ani aktuátor.

Jeden z poškodených káblov bol použitý pre úpravu na vytvorenie adaptéra pre napájanie.



Obr. 21: Poškodený kábel a príčina vzniku

### 3.2.1 Aktuátory

Aktuátory použité pre zostavenie robotického hada sa nazývajú AX-12+. Pochádzajú zo série Dynamixel, nahradenej sériou Dynamixel-X. Dokumentácia je dostupná online na stránkach výrobcu. Aktuátor sa skladá z motora, prevodovky a riadiaceho obvodu. Aktuátory AX-12+ majú plastové prevody, ktoré boli vylepšené na oceľové prevody v aktuátoroch AX-12A. Vonkajší kryt motora bol taktiež vylepšený a obsahuje otvory pre lepšie vedenie káblov. Pohon aktuátora zabezpečuje DC motor. Prevodový pomer prevodovky je 254:1, pre vyšší krútiaci moment. (Obr. 22)

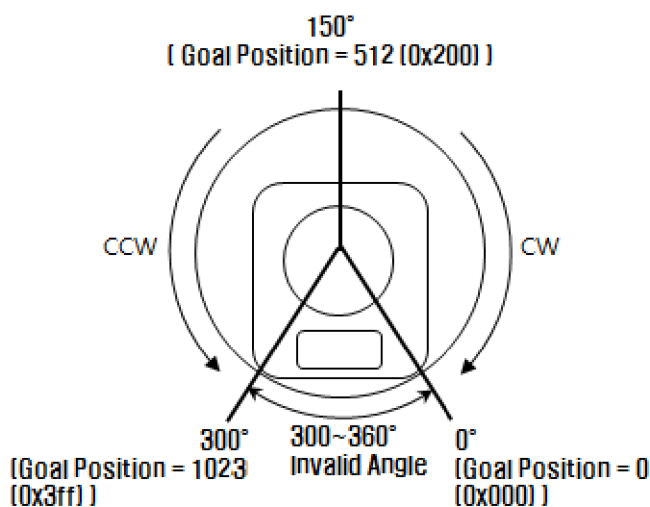


Obr. 22: Aktuátor Dynamixel AX-12 [16]

Výstupný hriadeľ je uložený v potenciometri, snímajúci aktuálne natočenie, ktorý je použitý pri riadení zo spätnou väzbou, vytvárajúc servo motor. Riadenie vykonáva vstavaný mikro-kontrolér ATmega 128. Aktuátor má dva módy pohybu, zo spätnou väzbou a bez spätnej väzby.

Bez použitia spätnej väzby sa motor otáča ako obyčajný DC motor. Potenciometer sníma natočenie, ale nie je možné použiť ho pre polohovanie v reálnom čase. Pre naše potreby je tento mód nepoužiteľný a preto sa oň nebudeme viac zaujímať.

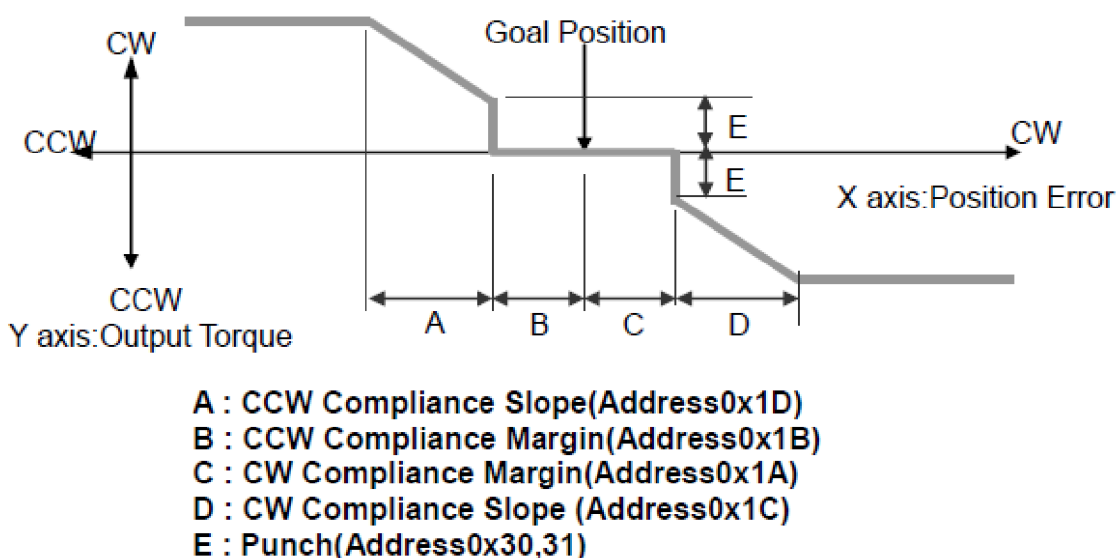
Pri použití spätnej väzby vzniká z aktuátora servo motor. Rozsah otáčania je mechanicky obmedzený 300° rozsahom potenciometra snímajúcim polohu výstupnej hriadele (Obr. 23). Natočenie výstupnej hriadele je kvantované AD prevodníkom na 10 bitov. Z týchto parametrov vyplýva rozlíšenie natočenia približne 0.29 stupňa.



Obr. 23: Pracovný rozsah aktuátora Dynamixel AX-12 [16]

### 3.3 Riadenie

Rozdielom medzi aktuálnym uhlom a žiadaným uhlom vzniká odchýlka „e“, použitá pre vstup regulácie. Na obrázku (Obr. 24) je znázornený vzťah medzi odchýlkou a výstupným prúdom. Zmenou parametrov je možné meniť charakteristiku spätnej väzby.



Obr. 24: Spätná väzba aktuátora Dynamixel AX-12 [16]

Zmenou parametrov (Obr.24 kóta A,B,C,D,E) je možné upravovať spätnú väzbu každého aktuátora zvlášť. Parametre sú uložené v pamäti RAM. Parameter „A“ a „D“ mení proporcionálne zložku, parameter „B“ a „C“ mení pásmo necitlivosti. Parameter E nastavuje minimálny prípustný prúd. Tento skok pomáha pri prekonaní statického trenia prevodovky a mechanizmu.

Vhodnou voľbou parametrov je možné zlepšenie priedehodnosti terénom. Väčšie pásmo necitlivosti sa prejaví menšou presnosťou v polohovaní servo-motorov. Príliš úzke pásmo spôsobí kmitanie okolo žiadanej hodnoty. Zmenou proporcionálnej zložky je možné nastavovať tuhosť aktuátorov. Táto vlastnosť dá použiť pre lepšie kopírovanie povrchu terénu. Pri nižších hodnotách sa robot správa pružnejšie. Príliš nízka tuhosť má za následok nepresné pohyby a pomalé reakcie na zmeny žiadanej hodnoty.



Obr. 25: Vysoký parameter proporcionálnej zložky



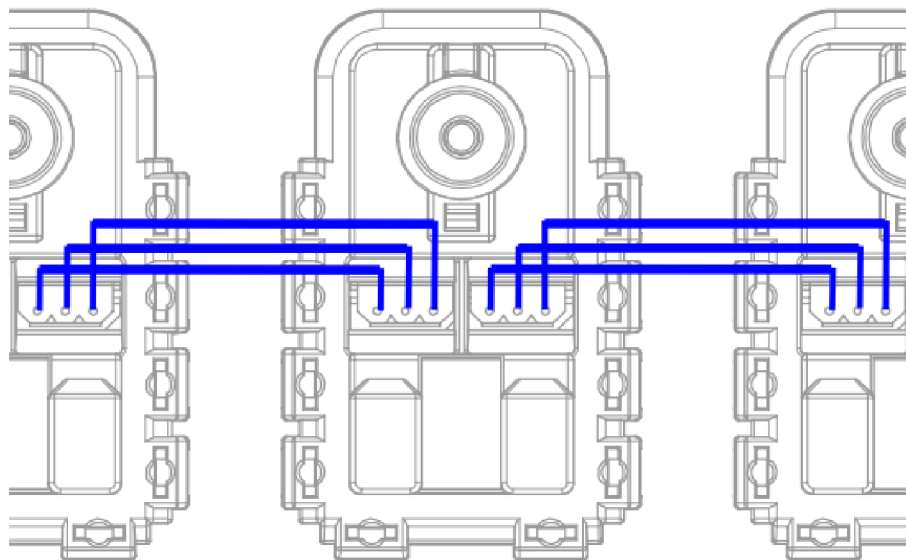
Obr. 26: Nízky parameter proporcionálnej zložky

Medzi obrázkom (Obr.25) a (Obr.26) je zmenený len parameter proporcionálnej zložky, ostatné parametre sú nezmenené. Na obrázku (Obr.25) je robot prehnutý len kvôli vôli v prevodovke a spojených súčasti. Na obrázku (Obr.26) sa robot dotýka podložky pod vlastnou váhou. Po zložení hada na rovný povrch sa pomaly vráti do pôvodného stavu ako pružina.



### 3.4 Komunikácia

Tranzistorovo-tranzistorová logika je použitá pre asynchrónnu seriálovú komunikáciu. Všetky zariadenia sú na spoločnej sieti, pospájané stromovou štruktúrou. V konkrétnom prípade robotického hada stačí jedna vetva pozdĺž celej dĺžky hada (Obr.27). Dáta posielané zariadeniam musia odpovedať protokolu Protocol 1.0. Protokol určuje štruktúru posielaných paketov. Každý paket obsahuje hlavičku, ID zariadenia a inštrukcie.



Obr. 27: Zapojenie typu „Daisy chaining“ [17]

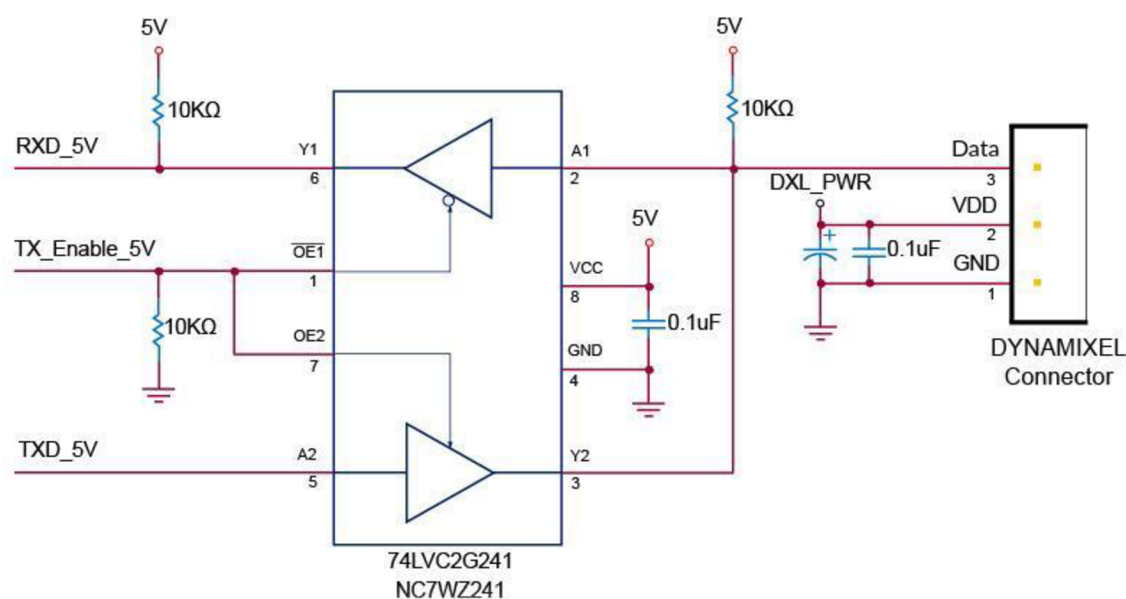
#### 3.4.1 Štruktúra paketu

Hlavička značí začiatok prichádzajúceho paketu. Pokiaľ by došlo ku problému s komunikáciou, zariadenie prestane vykonávať inštrukcie a čaká na ďalší paket.

O nezávisle riadenie viacerých aktuátorov na spoločnej sieti sa stará časť paketu obsahujúca ID zariadenia. Ak sa ID zariadenia nezhoduje s ID číslom v prijatom pakete, inštrukcia sa ignoruje. Pokiaľ sa ID zhoduje, inštrukcia sa vykoná a zariadenie spätne odošle paket obsahujúci chybové hlásenia. Výnimku tvoria pakety s ID číslom 254, ktoré sa nazývajú „broadcast“ pakety (všeobecný obežník). Tento paket prijme každé zariadenie, inštrukciu vykoná, ale neposiela odpoveď, ktorá by spôsobila kolíziu pri viacerých zariadeniach v sieti (Obr.28). Kolíziu môžu spôsobiť aj dve rôzne zariadenia v spoločnej sieti s rovnakým ID. Pred pripojením zariadenia do siete je nutné overiť či ID už nie je obsadené. ID je možné zmeniť na hodnotu medzi 0–253.

Inštrukcie väčšinou prepisujú adresy v zariadeniach (žiadané natočenie), alebo žiadajú o preposielanie hodnoty niektorej adresy kontroléru (aktuálne natočenie). Existujú aj špeciálne inštrukcie pre identifikáciu (Ping), resetovanie (Factory Reset) a reštartovanie (Reboot).

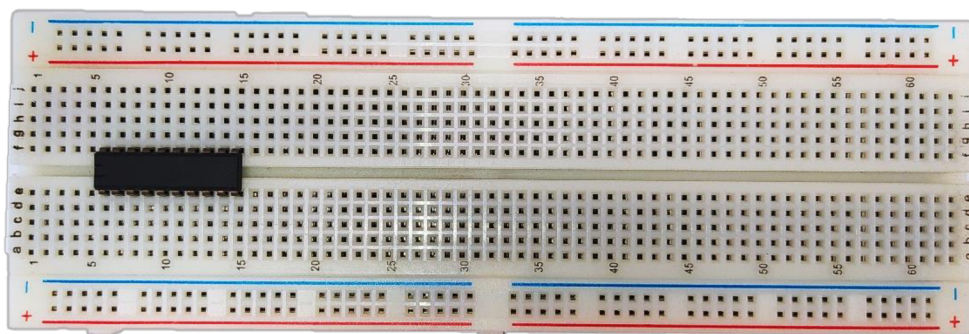
### TTL Communication Circuit



Obr. 28: Schéma asynchrónnej komunikácie aktuátora Dynamixel AX-12 [16]

#### 3.4.2 Zariadenie na komunikáciu č.1

Prvým pokusom o komunikáciu bolo vytvorenie vlastného konvertora medzi rozhraním USB a Protokolom 1.0. O prevod inštrukcií sa mal postarať čip „74LS241N“ (Obr.29). Ide o troj-stavový zásobník, zapojený na nespájkovacie pole medzi Arduinoom a aktuátorom. Tento typ komunikácie sa nepodarilo uskutočniť ani po týždni testovania. Výsledným produktom by bol malý plošný spoj.



Obr. 29: Nespájkové pole a čip „74LS241N“

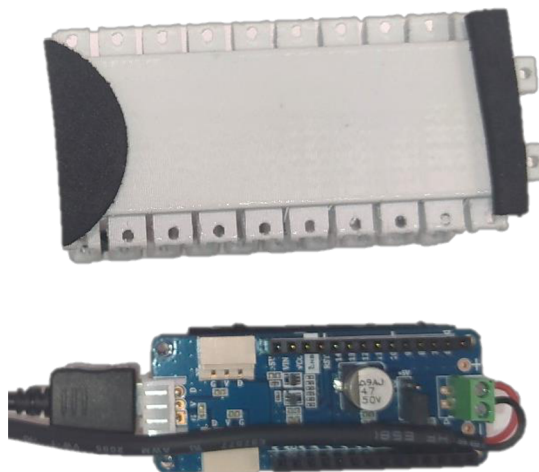
### 3.4.3 Zariadenie na komunikáciu č.2

Po neúspešnom vytvorení vlastného prevodníka bol pokus o komunikáciu cez oficiálny Arduino Dynamixel shield, s Arduino MKR 1010. Arduino MKR je jedným z najnovších Arduino dosiek, obsahujúce rôzne periférie. MKR 1010 má vstavanú bezdrôtovú komunikáciu cez Wi-Fi a Bluetooth. V ideálnom prípade by mal robot v strede tela mikro-kontrolér s batériou a nemusel by byť obmedzený fyzickým dosahom kábla.



Obr. 30: Arduino MKR 1010 a shield Dynamixel

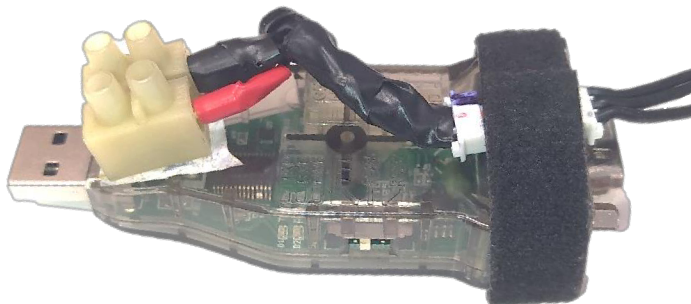
Počas testovania bol za posledný článok pripojená krabička vyrobená na 3D tlačiarňami, v ktorej bol Arduino a shield umiestnený (Obr.31). Napájací a komunikačný kábel bol vyvedený dozadu. Pri pokuse o komunikáciu so shield-om, sa Arduino kód zrútil a prestal komunikovať aj s počítačom. Debugovanie tohto problému bolo časovo náročné a dokumentácia neobsahovala potrebné informácie pre riešenia problému.



Obr. 31: 3D tlačenná krabička

### 3.4.4 Zariadenie na komunikáciu č.3

Komunikácia s aktuátormi sa podarila až pri použití USB2Dynamixel adaptéra, väčšinou používaného pre debugovacie účely. Adaptér je viac-účelový a je schopný pracovať s tromi protokolmi. Keďže išlo o jediný spoľahlivý spôsob komunikácie, bol použitý pre zvyšok práce, aj napriek tomu, že vyžadoval externý zdroj napájania pre aktuátory. Z poškodeného kábla bola vytvorená „T“ spojka. Spojka používala jednu vetvu pre prívod napätia, druhú pre komunikáciu a tretia vetva viedla do aktuátora (Obr.32).



Obr. 32: USB2Dynamixel s pripojením na zdroj napätia

Dosah robota je aktuálne obmedzený dĺžkou kábla, ktorý slúži na napájanie a komunikáciu. Komunikácia je vedená cez 3m dlhý USB kábel, ku ktorému je paralelne vedený dvoj-žilový kábel pre napájanie. Celá zostava bola uzavretá do väčšej, 3D tlačenej krabičky, ktorá chráni pred poškodením pri pohybe. (Obr.33)



Obr. 33: Porovnanie veľkostí 3D tlačených krabičiek

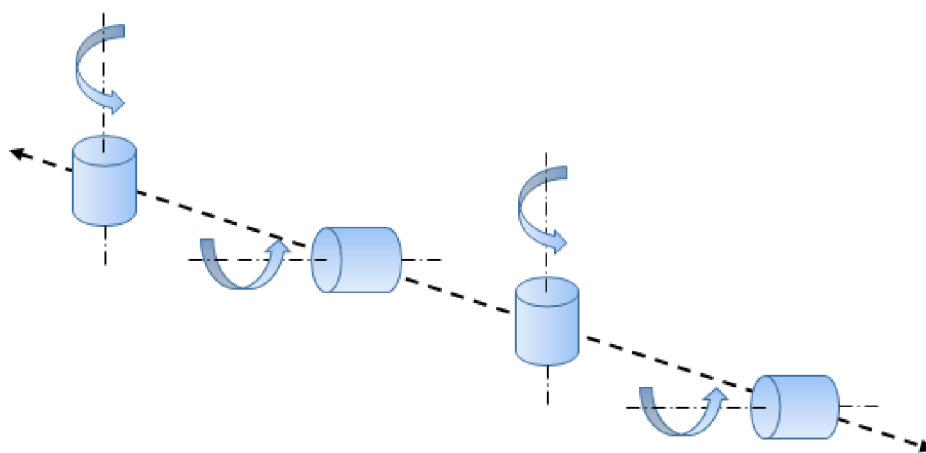
## 3.5 Konštrukcia

Stavebnica Dynamixel Bioloid je produktom kórejskej firmy Robotis. Rám sa skladá zo štyroch typov dielcov na obrázku nižšie.



Obr. 34: Dielce rámu [18]

Prvé tri dielce (Obr. 34 a, b, c) sú použité na vytvorenie pohyblivého spoja medzi aktuátormi hada. Ich vzájomné osi rotácie sú otočené o  $90^\circ$ , aby vytvorili kardanový kĺb (Obr. 35).



Obr. 35: Kinematická schéma štyroch článkov

Kardanový kĺb (Obr.37) umožňuje natočenie v osách kolmých na pozdĺžnu osu, v ktorej prenáša krútiaci moment. Vďaka týmto vlastnostiam sa môže konštrukcia natáčať v 3D priestore, avšak bez rizika zamotania alebo pretrhnutia káblov. Stredový kríž kardanového kĺbu tvorený rámom s pripevnenými aktuátormi umožňujúcimi kontrolované natáčanie. Články sú spojené štvrtým dielcom rámu (Obr. 34, dielec c). Články sú identické a je ich možné pospájať pre vytvorenie dlhšieho robota (Obr. 36).

Limitom je odber motorov. Kabeláž je vedená pozdĺž robota, spája všetky aktuátory a je prichytená plastovými plátmi o konštrukciu. Na miestach kde dochádza ku styku s povrchom boli pridané penové nálepky, chrániace káble a konštrukciu pred odieraním a poškodením.



Obr. 36: Kardanový kĺb vytvorený zo sady Bioloid



Obr. 37: Kardanový kĺb z Gola sady pre porovnanie mechanizmu (19)

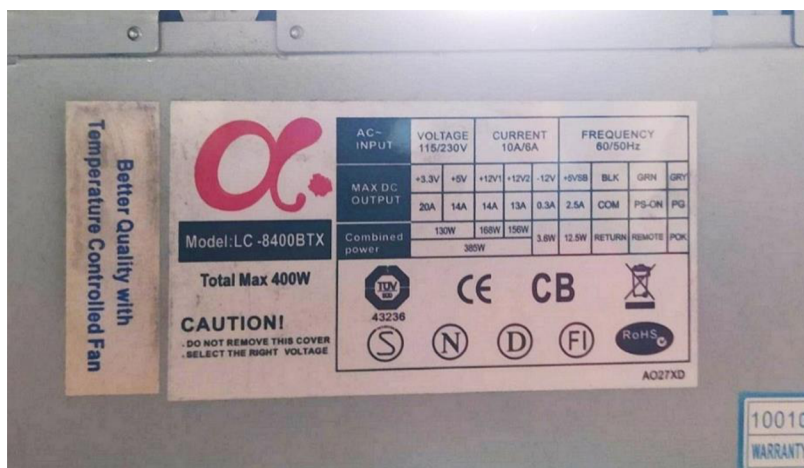
### 3.6 Napájanie

Robot za sebou ťahá dvoj-žilový kábel pre napájanie. Napájacie napätie musí byť v rozsahu 7-14V a každý motor vyžaduje prúd 1.2A.

Aktuátory v móde serva vyžadujú tvrdý zdroj napätia. Časté zmeny rotácie a rozbeh servo-motorov vytvára vysoké odbory prúdu, ktoré je treba vyhladiť. Následný pokles napätia slabého zdroja spôsobí resetovanie mikro-kontroléru a prepísaní RAM na pôvodné hodnoty. Najväčší problém je resetovanie maximálneho limitu rýchlosti, krútiaceho momentu a parametrov ovplyvňujúcich charakteristiku spätnej väzby. Po resetovaní je motor schopný komunikovať normálne, ale resetované parametre spôsobia prudké a trhané pohyby, spôsobujúce ďalšie poklesy napätia a resetovanie okolitých motorov. Je možné, že preťažovaný motor resetuje len svoj mikro-kontrolér a okolité motory ostatnú neovplyvnené. V najhoršom prípade jeden preťažovaný motor spôsobí reťazovú reakciu, ktorá resetuje všetky motory. Robot sa stane neovládateľný, pretože všetky limity sú resetované a akýkoľvek pohyb je trhaný, rýchly a môže spôsobiť ďalšie výpadky.

Použitím výkonného tvrdého zdroja prúdu (napr. počítačový zdroj, Obr.38), vyvarovaniu sa preťažovaniu aktuátorov a nepoužívaním náhlych pohybov je možné predísť výpadkom.

Rázové odbory prúdu možno znížiť úpravou spätnej odozvy. Nastavenie nižšieho maximálneho limitu odoberaného prúdu znižuje aj maximálny krútiaci moment. Menej agresívna charakteristika spätnej väzby taktiež dokáže znížiť prudké odbory. Ak aj napriek tomu dôjde k výpadku, ukončením sekvencie vykonávaných pohybov a opätovným nastavením limitov, je možné pokračovať bez väčších problémov. Ak by došlo ku problémom, kolízií alebo zaseknutí a je program je nutné ukončiť náhle, port pre komunikáciu ostane obsadený. Manuálnym vypnutím zdroja a odpojením USB kábla na pár sekúnd vyrieši a resetuje aktuátory do pôvodného stavu.



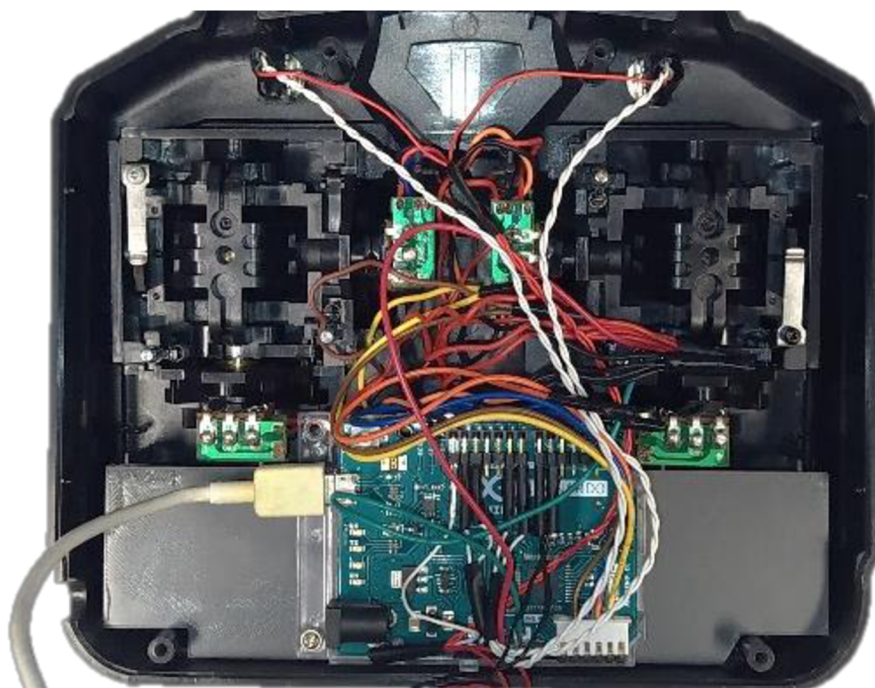
Obr. 38: Počítačový zdroj pre napájanie robota

## 3.7 Ovládanie

### 3.7.1 Fyzická ovládačka

Ovládačka určená pre modely rádiovo ovládaných lietadiel a helikoptér, bola prerobená pre potreby testovania simulácií a robota. Pôvodná elektronika bola nahradená novou, jediné zachované komponenty sú potenciometre a mechanizmus pákového ovládača s mechanickým ladením. Modernejšie ovládače používajú zložitejšie softvérové metódy pre ladenie potenciometra a vyžadujú zapojenie dvoch potenciometrov pre jednu osu. Softvéry ovládačiek sú vyrábané, aby komunikovali len s továrensky nastaveným prijímačom rovnakej značky a nie sú vhodné pre prototypovacie použitie. Do softvéru nie je možné zasahovať a parametre osí je možno meniť len čiastočne pri drahších ovládačkách. Výroba vlastnej ovládačky bola preto nevyhnutná.

Najdôležitejšou súčasťou je mikro-kontrolér Arduino Leonardo. Mikro-kontrolér obsahuje 10-bitový AD prevodník, ktorý prevedie polohu páky na binárnu postupnosť s rozlíšením je  $2^{10}$  (1024 rôznych polôh). Základ ovládačky je totožný s verziou použitou v bakalárskej práci. Bola vylepšená o viacero digitálnych konfigurovateľných vstupov. Pridané tlačidlá a prepínače umožňujú prepínanie medzi módmí pohybu bez použitia dodatočného vstupného hardvéru ako klávesnica. Vnútorne komponenty a zapojenie bolo zosilnené, pre zabránenie vypojenia a vzájomného rušenia drôtov zapojených do Arduina. Celkovo sa informácie o stave 4 osí, 2 tlačidiel a 2 troj-polohových prepínačoch cez USB rozhranie posielajú do počítača. (Obr. 39)



Obr. 39: Kabeláž a elektronika ovládačky

Mikro-kontrolér Arduino Leonardo je menší ako pôvodná doska plošných spojov a preto bolo nutné vyrobiť podložku (Obr.40), ktorá rozmermi tvarom a polohou dier odpovedá predošlej doske. Plast PLA je mäkký a na vystuženie bolo na zadnej strane pridané rebro. Arduino má vlastný plastový obal ktorý sa jedným šrôbom prichytí o podložku. Jeden šrôb je dostačujúci, o ostatné stupne voľnosti sa stará materiálový styk. Káble pre napájanie sa pripoja do Arduina cez mikro USB konektor a vstupy z tlačidiel a potenciometrov sú pripojené cez hrebeň pinov do odpovedajúcich portov.





Obr. 40: 3D tlačená podložka

Troj-polohové prepínače nie sú vhodné pri chode programu, pulzy vytvorené tlačidlami sú vhodnejšie, ale poskytujú len dva možné stavy. V programe bol výstup spracovaný jednoduchými binárnymi operáciami výrokovej logiky.

Vznikli dve tabuľky (tab. 1, tab.2), ktoré sa odlišujú množstvom výstupov. Vstupy logickej tabuľky odpovedajú polohe a stlačenie tlačidiel na obrázku (Obr.41).



Obr. 41: Predný panel ovládačky

Pravdivostné tabuľky (Tab.1) pre 6 výstupov. Ľavý a pravý prepínač je nezávislý, tak ako aj tlačidlá. Každá strana je riešená samostatne, jednoduchými AND a NOT funkciami. Prepínače sa správajú ako selektor funkcie a stlačené tlačidlo ako potvrdenie vybranej funkcie.

Tab. 1: Pravdivostné tabuľky

Vstup				Výstup		
L	1	2	3	A	B	C
0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0
1	1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0	1

Vstup				Výstup		
R	4	5	6	D	E	F
0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0
1	1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0	1

V prípade nutnosti je možné vytvoriť kombináciami všetkých vstupov až 35 rôznych stavov. Takáto ovládacia schéma by bola pre užívateľa náročnejšia pre používanie, a našťastie ju nebolo nutné použiť. (Tab.2)

Tab. 2: Pravdivostná tabuľka pre 35 stavov

Vstupy								Výstupný stav
R	L	1	2	3	4	5	6	-
0	0	1	0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0	0	1
0	1	1	0	0	1	0	0	2
1	1	1	0	0	1	0	0	3
0	0	0	1	0	1	0	0	4
1	0	0	1	0	1	0	0	5
0	1	0	1	0	1	0	0	6
1	1	0	1	0	1	0	0	7
0	0	0	0	1	1	0	0	8
1	0	0	0	1	1	0	0	9
0	1	0	0	1	1	0	0	10
1	1	0	0	1	1	0	0	11
0	0	1	0	0	0	1	0	12
1	0	1	0	0	0	1	0	13
0	1	1	0	0	0	1	0	14
1	1	1	0	0	0	1	0	15
0	0	0	1	0	0	1	0	16
1	0	0	1	0	0	1	0	17
0	1	0	1	0	0	1	0	18
1	1	0	1	0	0	1	0	19
0	0	0	0	1	0	1	0	20
1	0	0	0	1	0	1	0	21
0	1	0	0	1	0	1	0	22
1	1	0	0	1	0	1	0	23
0	0	1	0	0	0	0	1	24
1	0	1	0	0	0	0	1	25
0	1	1	0	0	0	0	1	26
1	1	1	0	0	0	0	1	27
0	0	0	1	0	0	0	1	28
1	0	0	1	0	0	0	1	29
0	1	0	1	0	0	0	1	30
1	1	0	1	0	0	0	1	31
0	0	0	0	1	0	0	1	32
1	0	0	0	1	0	0	1	33
0	1	0	0	1	0	0	1	34
1	1	0	0	1	0	0	1	35

### 3.7.2 Príkazový riadok Matlab-u

Ovládanie robota cez príkazový riadok je najnižšia úroveň ovládania v tejto práci. Poskytuje najvyššiu kontrolu nad aktuátormi a má prístup ku všetkým nastaveniam. Táto metóda je vhodná pre vytváranie polôh a tvorbe nových pohybov. Príkazy dostupné na tejto úrovni dokážu len prepisovať a čítať adresy aktuátorov. Pre vykonanie žiadaného pohybu je nutné používať dokumentáciu, v ktorej je opis adres, dátový typ a prípustný rozsah hodnôt. Príkladom takejto komunikácie je obrázok (Obr.42). Ako môžeme vidieť, bez podrobných znalostí o konkrétnom modeli aktuátora, je kód nečitateľný. Prepísaním nesprávnej adresy alebo zadaním hodnoty mimo rozsah môže aktuátor prestať fungovať. Pracovanie na tejto úrovni je zdĺhavé, rizikové a vyžaduje nutnosť dokumentácie.

```
write2ByteTxRx('COM 3', 1.0, 13, 32, 90);
write1ByteTxRx(port, PROTOCOL, ID, ADDR, data);
```

Obr. 42: Príkazy Dynamixel knižnice

Pre zníženie rizík a zjednodušenia práce s aktuátormi boli vytvorené vlastné funkcie pre posielanie paketov. Funkcia vyžaduje pre spracovanie vstupu aj maticu hodnôt, podľa ktorej je použitá funkcia „write2ByteTxRx()“ alebo funkcia „write1ByteTxRx()“. Použitie funkcie závisí na dátovom type dát v adrese aktuátora. Každá adresa v pamäti aktuátora má 1B (8 bitov). Endianita označuje spôsob zapisovania bitov do pamäte. Aktuátory používajú „Little endian“, čo znamená že na pamäťové miesto s najnižšou adresou sa uloží najmenej významný bajt.

Ak je potrebný väčší číselný rozsah ako 0 – 255 ( $2^8$  bitov), je nutné použiť dve adresy. Dva bajty poskytujú rozsah 0 – 65535 ( $2^{16}$ ). Príkladom je žiadaná hodnota natočenia, limity natočenia, ktoré sú v rozsahu 0–1024 ( $2^{40}$  bitov).

Oba prípady vyžadujú rozdielnu funkciu pre úspešnú komunikáciu. Pre uľahčenie práce bol vytvorený vektor, vychádzajúci z dokumentácie. Vektor obsahuje nuly, jednotky a dvojky pre príslušné údajové typy používajúce adresy. Nuly značia adresy, ktoré nie je možné prepísať, napríklad adresy meniace ID aktuátora. Jednotky označujú adresy pre ktoré je nutné použiť funkciu „write1ByteTxRx“ a dvojky značia nutnosť použitia funkcie „write2ByteTxRx“.

Ďalším zjednodušením je typ použitého protokolu. Aktuátory série AX dokážu používať pre komunikáciu len protokol 1.0. Z tohto dôvodu nie je nutné tento parameter požadovať pri volaní funkcie. Ukážka výslednej funkcie je na obrázku (Obr. 43).

```
function AX_12_send_data(port,ID,ADDR,input,ADDR_TABLE)
    if ADDR_TABLE(ADDR)==0
        disp("Prístup zamietnutý");
    elseif ADDR_TABLE(ADDR)==1
        write1ByteTxRx(port, 1, ID, ADDR, input);
    elseif ADDR_TABLE(ADDR)==2
        write2ByteTxRx(port, 1, ID, ADDR, input);
    end
end
```

Obr. 43: Vlastná funkcia pre komunikáciu

Ďalším krokom bolo vytvorenie polohy pri inicializácii komunikácie a nastavení limitov. Funkcia „start\_communication()“ sa stará o načítanie potrebných knižníc, vytvorenie komunikačného kanálu cez USB rozhranie a overenie funkčnosti komunikácie. V prípade problému vráti chybu a zvyšok programu sa preskočí. Väčšinou ide o problém s alokovaným USB portom, po predchádzajúcom páde programu. Riešením je odpojenie opätovné pripojenie USB kábla.

Po úspešnom pripojení sa vyšle broadcast paket (ID 254) pre nastavenie limitov. Ide o limity maximálneho natočenia, limity rýchlosti a minimálneho krútiaceho momentu (Obr.44).

```
AX_12_send_data(port,254,6,0,ADDR_TABLE); %nastavenie limitu natočenia
AX_12_send_data(port,254,8,1024,ADDR_TABLE); %nastavenie limitu natočenia
AX_12_send_data(port,254,30,512,ADDR_TABLE); %vycentrovanie aktuátora
AX_12_send_data(port,254,32,90,ADDR_TABLE); %nastavenie maximálnej rýchlosti
AX_12_send_data(port,254,48,0,ADDR_TABLE); %nastavenie minimálneho prúdu
```

Obr. 44: Nastavenie limitov aktuátora

Aktuátory sú pripravené pre použitie a program sa dostane do slučky pri ktorej čaká na vstup užívateľa. Vstupom môže byť pred-definovaná funkcia alebo v prípade stavového automatu pred-programovaný príkaz pohybu.

Pre správne ukončenie komunikácie je nutné zavolať príkaz „stop\_communication()“, pre ukončenie komunikácie a zrušenie alokácie portu (Obr.45).

```
function stop_communication(port,lib_name)
    fprintf('Turning OFF...');
    write1ByteTxRx(port, 1, 254, 24, 0);    % broadcast vypnutie motorov
    closePort(port);                        % uzavretie portu
    unloadlibrary(lib_name);                % uvoľnenie knižnice
    fprintf('Turned OFF\n');
end
```

Obr. 45: Funkcia pre ukončenie komunikácie

### 3.7.3 Stavový automat

Použitie stavového automatu zjednodušuje testovanie robotického hada a ovládanie pri experimentoch. Pred-programované príkazy obsahujú sériu polôh tvoriace pohyby, alebo zložitejší algoritmus pre generovanie pohybu.

```
%% načítanie vstupu užívateľa
user_input=split(input('Čakám na vstup: \n','s')," ");
user_text = char(user_input(1));
if length(user_input)==2
    user_data = str2num(cell2mat(user_input(2)));
else
    user_data = [];
end
```

Obr. 46: Začiatok nekonečného cyklu stavového automatu

Používanie tejto metódy vstupu je časovo menej náročné ako priame písanie funkcií, ale povoľuje vstup parametrov ovplyvňujúcich pohyb. Aktuálne je pred-pripravených 20 príkazov. Niektoré príkazy sú bez prídavných parametrov, napríklad príkaz vycentrovania aktuátorov. Väčšina príkazov vyžaduje dodatočný parameter, napr. natočenie vľavo/vpravo vyžaduje amplitúdu natočenia. Celý zoznam príkazov je možné vyvolať slovom „pomoc“.

#### Command Window

```
Napiste prikaz do prikazoveho riadku, napr.: up 100
on -> zapne aktuátory
off -> vypne aktuátory
s -> vyrovnaj aktuátory
set -> pošle príkaz natočenia aktuátoru
array -> pošle príkaz natočenia aktuátorom
a -> pošle príkaz aktuátorom
up ? -> všetky horintálne aktuátory zdvihne o ? hodnotu
left ? -> všetky vertikálne aktuátory otočí o ? hodnotu
```

Obr. 47: Časť výstupu po príkaze „pomoc“

### 3.7.4 GUI v Matlab-e

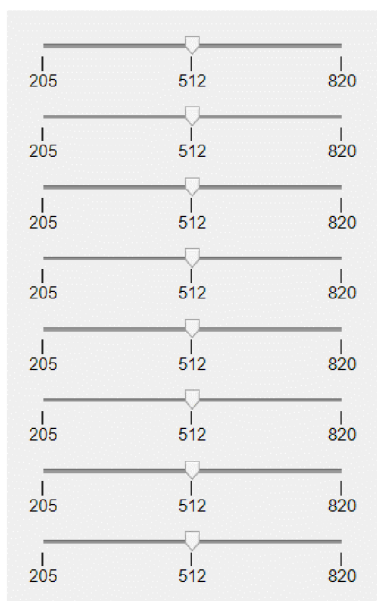
Užívateľ môže jednotlivé aktuátory ovládať pomocou posúvačov cez Matlab GUI, alebo vykonávať príkazy stlačením tlačidiel. Je možné použiť kombináciu vstupov, pretože GUI beží paralelne s príkazovým riadkom Matlab-u. GUI je užívateľsky jednoduchšie pre porozumenie a používanie, odpadá nutnosť ovládania príkazov, alebo bližšej znalosti komunikácie. GUI nepovoľuje zadávanie nepodporovaných príkazov ani pohybov mimo limit. Vďaka tomu je aj menšie riziko poškodenia robota neodbornou manipuláciou. Nevýhodou tohto prístupu je nemožnosť vytvárania nových pohybov a zmena parametrov. Výroba GUI je časovo náročná pre programátora a správne vykresľovanie na rôznych monitoroch nie je zaručené.

GUI s tlačidlami vykonáva volanie funkcií popísaných v predchádzajúcej podkapitole. Tlačidlá „END“ ukončia komunikáciu a zatvoria všetky GUI okná. (Obr. 48)



Obr. 48: GUI s tlačidlami

Samostatné natáčanie motorov je možné cez GUI s posúvačmi. Vhodné pre polohovanie robota. (Obr. 49)



Obr. 49: GUI s posúvačmi, rozsah pohybu 180°

## 4 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

### 4.1.1 Testovanie

Pohyb robota bol otestovaný na rovine ktorej uhol bolo možné meniť vypoďložením. Na pevnú dosku bol pripevnený plát kartónu, na ktorom boli prilepené značky s roztečou 10 mm. Pohyb bol nahrávaný na mobilný telefón, ktorý slúžil aj na odmeranie sklonu podložky. Vizuálnym porovnaním polohy robota s časom záznamu bolo možné odčítať rýchlosť robota a odhadnúť prešmykovanie. Namerané hodnoty boli spriemerované a zobrazené do grafu. Uhlov bol postupne zvyšovaný o  $5^\circ$  z  $0^\circ$  až do  $25^\circ$ . Robot spomaľoval postup zo zvyšujúcim sa sklonom roviny a pri  $\sim 23^\circ$  boli straty vzniknuté prešmykovaním približne podobné pohybu vpred.



Obr. 50: Testovacia rovina so značkami



Obr. 51: Značky na testovacej rovine, rozteč 10 mm

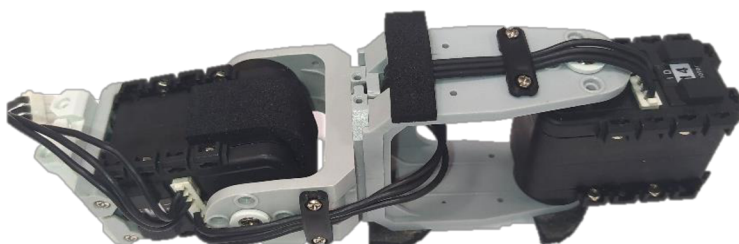
Výsledné rýchlosti vypočítané z videá sú znázornené v tabuľke (tab.3).

#### 4.1.2 Výsledky testovania

Prvotne robot používal kolieska pre uľahčenie pohybu po rovnom povrchu. Pri experimentoch sa ukázalo, že kolieska majú malý priemer. Väčší priemer koliesok by zmenšil rozsah pohybu, pretože články by pri vychýlení tlačili na kolieska. Zmena ich polohy nie je bez zložitejšej zmeny do konštrukcie možná. Robot je konštruovaný pre zložitejšie terény, a kolieska pomáhajú len pri základnom pohybe použiteľným na rovnom povrchu. Pri ostatných typoch pohybu robota boli prekážkou a preto boli nahradené za penové podložky. Penové podložky sú nalepené obojstrannou páskou na dielcoch, ktoré najčastejšie prichádzajú do kontaktu s povrchom. Pena pohlcuje nárazy, čím chráni rám, zakrýva káble pred poškodením a zvyšuje trenie čo pomáha pri pohybe.



Obr. 52: Články s kolieskami



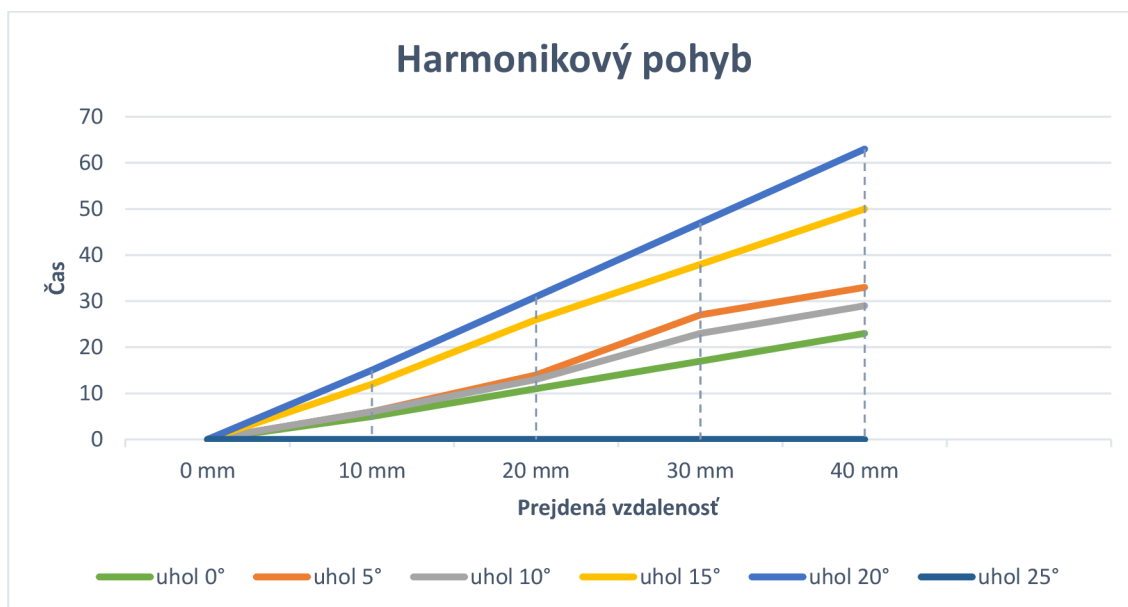
Obr. 53: Články bez koliesok



Obr. 54: Detail na penové podložky zospodu



Efektívnosť pohybov bola porovnaná pri šplhaní po naklonenej rovine. Harmonikový pohyb je stabilnejší, ale priechodnosť terénom je nízka. Záver sa dal predpokladať, pretože vertikálny pohyb je obmedzený na minimum. Robot nedokázal prejsť cez hranu medzi podlahou a naklonenou rovinou vytvorenou skokovou zmenou náklonu. Pri testovaní sklonu preto začínal na naklonenej rovine. Čas prejdenej vzdialenosti bol odčítaný z video záznamu pohybu. Had bol položený na prvú značku a zo snímku, na ktorom hlava pretla značku bol odčítaný čas záznamu (Obr. 55).

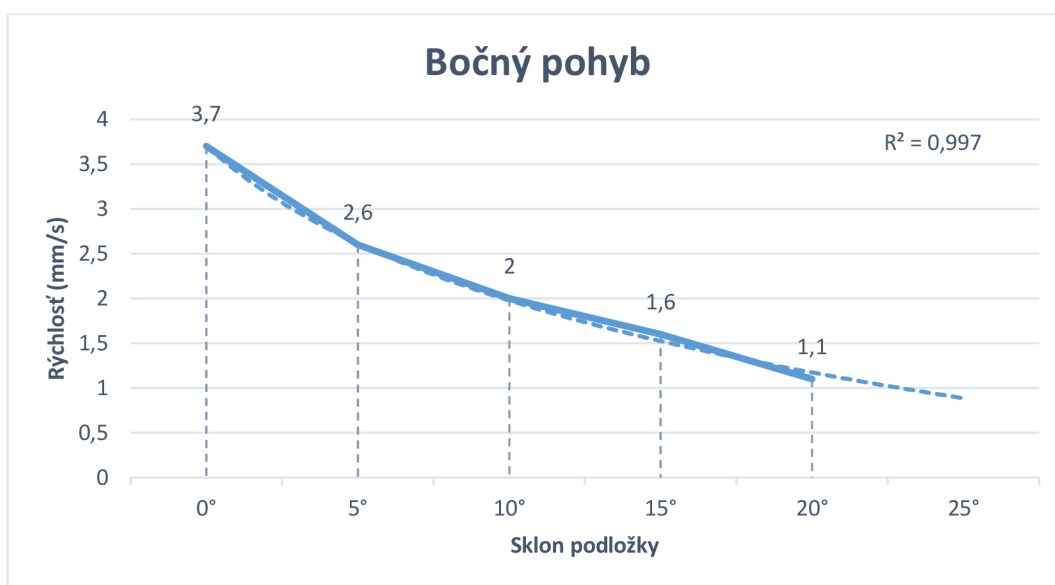


Obr. 55: Meraný čas

Bočný pohyb je menej stabilný z dôvodu vyššieho dvíhania článkov. Priechodnosť terénom je zlepšená, robot dokáže bez problémov prejsť po ~5 cm schode a prekonávať malé nerovnosti. Robot dokázal prejsť rozhranie medzi podlahou a naklonenou rovinou napriek skokovej zmene náklonu. V niekoľkých prípadoch došlo k prevráteniu robota z dôvodu nestability. Spomalením pohybov a zvýšením amplitúdy horizontálneho pohybu sa podarilo zlepšiť šplhanie. Väčšia základňa a pomalé pohyby znížili rýchlosť pohybu, napriek tomu je pohyb rýchlejší ako harmonikový (Obr. 56 a Obr.57). Maximálny sklon, po ktorom sa had dokázal plaziť zostal nezmenený, čo naznačuje, že limitom je koeficient trenia medzi robotom a povrchom.



Obr. 56: Graf závislosti rychlosti na sklone



Obr. 57: Graf závislosti rychlosti na sklone

## 5 ZÁVER

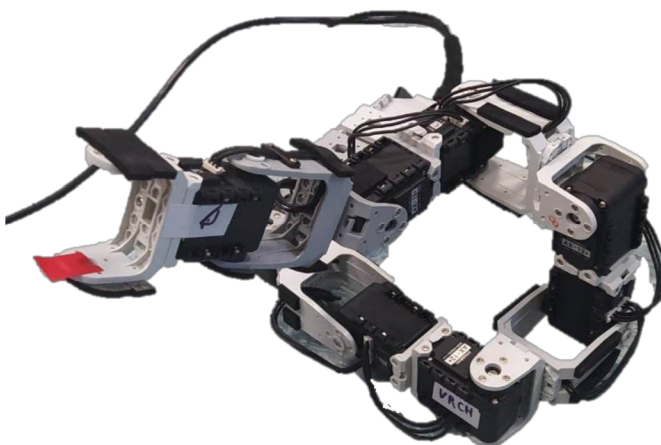
Funkčnosť kódu bola overená na dvoch rôznych modeloch robotického hada.

Robotický had schopný planárneho pohybu (Obr.58) bol použitý pre otestovanie pohybu laterálnej undulácie. Jeho konštrukcia povoľuje len použitie jedného typu pohybu a má kolieska, ktoré pomáhajú pri pohybe na rovnom povrchu. Nemožnosť ovládania v tretej ose a nízka svetlá výška obmedzujú použitie v teréne. Z týchto dôvodov bol použitý len pre ukážku schopnosti kódu fungovať aj na obecných robotoch používajúcich aktuátory série AX. Robot používa aktuátory AX-18, ktoré sa odlišujú od AX-12 vyšším výkonom.



Obr. 58: Detail konštrukcie planárneho robotického hada

Robotický had skonštruovaný autorom (Obr.59) je schopný pohybu v 3D priestore, a z experimentov bolo dokázané, že je schopný skokového prechodu z roviny podlahy na rovinu pod sklonom  $20^\circ$ . Robot je ovládaný pomocou programu Matlab, vstupy možno písať do príkazového riadku Matlab-u, použiť stavový automat a užívateľom pred-definované príkazy, alebo GUI.



Obr. 59: Robotický had v polohe predvádzajúca pohyblivosť

Najväčším problémom ostáva napájanie. Jedna z možností je použitie dodatočných kondenzátorov. Ich kapacita pomáha vyhladzovať prudké nárazy prúdu, spôsobených rýchlymi pohybmi. Toto riešenie môže byť nedostatočné ak je vyžadovaný trvalý odber prúdu, napríklad pri šplhaní. V tomto prípade pomôže výkonnejší zdroj alebo silnejšia batéria.

Limitom pri zdolávaní prekážok je aj koeficient trenia medzi povrchom a robotom. Jeho nedostatok na klzkých povrchoch môže mať za následok uviaznutie robota aj pri najmenších prekážkach. Veľmi vysoký koeficient trenia zbytočne namáha aktuátory a plytvá krútiacim momentom. To môže mať za následok prehrievanie aktuátorov a zníženie priechodnosti terénom.

Pri použití vode-odolných aktuátorov je možné, aby robotický had plával na hladine alebo sa potápal do hĺbok. Pohyby pod vodou sú podobné pohybom po súši a bude možné použiť existujúce funkcie. Bezdrôtová komunikácia pod vodou je zložitá, preto je odporúčané použitie aktuálneho riešenia napájania, kedy had za sebou ťahá kábel pre napájanie aj komunikáciu. V prípade problému bude možné robota vytiahnuť z vody za kábel. Pre navigáciu pod vodou bude nutné použiť senzory ako lidar a radar, prípadne ultrazvukový senzor. Použitie kamery ju možné len vo veľmi čistej vode.

## ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY

- [1] FOURNIER, Mat. *Příroda: nekonečná inspirace vědy : historie technických vynálezů, k nimž nás přivedlo zkoumání živých organismů*. Čestlice: Rebo, 2013. ISBN 978-80-255-0736-0.B
- [2] HIROSE, Shigeo, Peter CAVE a Charles GOULDEN. *Biologically Inspired Robots: Serpentine Locomotors and Manipulators*. USA: Oxford University Press, 1993. ISBN 978-0-19-856261-0.
- [3] Moje hady. *Moje hady* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://mojehady.webnode.sk/news/anatomia-hada/>
- [4] How it works. *How it works: All about snakes* [online]. 25.10.2018 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.howitworksdaily.com/all-about-snakes/>
- [5] TATSUYA, Takemori, Tanak MOTOYASU a Matsuno FUMITOSHI. *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS): Ladder Climbing with a Snake Robot*. 1-9. Dostupné z: doi:10.1109/IROS.2018.8594411
- [6] JSK: *Multi-Link Aerial Robot* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/research/multilink.html>
- [7] *Forceful Valve Manipulation*. Youtube [online]. 30.8.2022 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=zKnxCX9RVDU>. Kanál uživatele Moju Zhao
- [8] *Hibot* [online]. 2004 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.hibot.co.jp/about/>
- [9] EPFL: *Salamandra robotica* [online]. 2013 [cit. 2023-05-25]. Dostupné: [https://www.epfl.ch/labs/biorob/research/amphibious/salamandra/?utm\\_source=robots.iii.org](https://www.epfl.ch/labs/biorob/research/amphibious/salamandra/?utm_source=robots.iii.org)
- [10] *Unusual locomotion: tracked and snake like robots* [online]. 2022 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.unusuallocomotion.com/pages/more-documentation-v/244-tracked-and-snake-like-robots-5.html>
- [11] *Hibot: Soryu-C* [online]. 2022 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.hibot.co.jp/products>
- [12] *Robotis e-manual: DYNAMIXEL Shield for Arduino MKR Series* [online]. 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: [https://emanual.robotis.com/docs/en/parts/interface/mkr\\_shield/](https://emanual.robotis.com/docs/en/parts/interface/mkr_shield/)

- [13] *ROBOTIS e-manual: DYNAMIXEL Shield for Arduino MKR Series* [online]. 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/dynamixel-shield-for-arduino-mkr-series>
- [14] *ROBOTIS: CM-530* [online]. 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.robotis.us/cm-530/>
- [15] *ROBOTIS e-manual: USB2DYNAMIXEL* [online]. 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://emanual.robotis.com/docs/en/parts/interface/usb2dynamixel>
- [16] *ROBOTIS e-manual: AX-12* [online]. 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/ax/ax-12a/>
- [17] *Generationrobots: AX-12 user manual* [online]. 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.generationrobots.com/media/Dynamixel-AX-12-user-manual.pdf>
- [18] *ROBOTIS: bioloid frames* [online]. 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.robotis.us/dynamixel-ax-bioloid-frames/>
- [19] *Wurth: general tools* [online]. 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://shop.wurth.ca/general-tools/professional-hand-tools/ratchets-sockets-sets/sockets/connectors-joints-extensions/1-2-inch-cardan-joint/712.138301/>
- [20] *WORST, RAINER, and RALF LINNEMANN. "Construction and operation of a snake-like robot." Proceedings IEEE International Joint Symposia on Intelligence and Systems. IEEE, 1996.*
- [21] *HOPKINS, JAMES K., BRENT W. SPRANKLIN, and SATYANDRA K. GUPTA. "A survey of snake-inspired robot designs." Bioinspiration & biomimetics 4.2 (2009): 021001*

## ZOZNAM SKRATIEK, OBRÁZKOV A TABULIEK

- Obr. 1: Pozostatok končatín [3]
- Obr. 2: Anatómia hada [3]
- Obr. 3: Laterálna undulácia [4]
- Obr. 4: Bočné vlnenie [4]
- Obr. 5: Harmonikový pohyb [4]
- Obr. 6: Priamočiary pohyb [4]
- Obr. 7: Lezenie po rebríku [5]
- Obr. 8: Vizualizácia vstupných dát [5]
- Obr. 9: DRAGON [6]
- Obr. 10: Konfigurácia pri uzatváraní ventilu [7]
- Obr. 11: HiBot ACM-R5H [8]
- Obr. 12: HiBot ACM-R5H [9]
- Obr. 13: Robotický had s kolieskami [10]
- Obr. 14: Robot pre kontrolu kanalizácie, Soryu-C [11]
- Obr. 15: Schéma zapojenia RC 2 Dynamixel [12]
- Obr. 16: Vlastná ovládačka a obvod pre komunikáciu
- Obr. 17: Arduino MKR 1010 (vľavo) a dynamixel shield (vpravo) [13]
- Obr. 18: Dynamixel CM-530 [14]
- Obr. 19: USB2Dynamixel [15]
- Obr. 20: Prevodovka aktuátora AX-12
- Obr. 21: Poškodený kábel a príčina vzniku
- Obr. 22: Aktuátor Dynamixel AX-12 [16]
- Obr. 23: Pracovný rozsah aktuátora Dynamixel AX-12 [16]
- Obr. 24: Spätná väzba aktuátora Dynamixel AX-12 [16]
- Obr. 25: Vysoký parameter proporčionalnej zložky
- Obr. 26: Nízky parameter proporčionalnej zložky
- Obr. 27: Zapojenie typu „Daisy chaining“ [17]
- Obr. 28: Schéma asynchrónnej komunikácie aktuátora Dynamixel AX-12 [16]
- Obr. 29: Nespájkové pole a čip „74LS241N“
- Obr. 30: Arduino MKR 1010 a shield Dynamixel
- Obr. 31: 3D tlačená krabička
- Obr. 32: USB2Dynamixel s pripojením na zdroj napätia
- Obr. 33: Porovnanie veľkostí 3D tlačených krabičiek
- Obr. 34: Dielce rámu [18]
- Obr. 35: Kinematická schéma štyroch článkov

- Obr. 36: Kardanový kĺb vytvorený zo sady Bioloid
- Obr. 37: Kardanový kĺb z Gola sady pre porovnanie mechanizmu [19]
- Obr. 38: Počítačový zdroj pre napájanie robota
- Obr. 39: Kabeláž a elektronika ovládačky
- Obr. 40: 3D tlačaná podložka
- Obr. 41: Predný panel ovládačky
- Obr. 42: Príkazy Dynamixel knižnice
- Obr. 43: Vlastná funkcia pre komunikáciu
- Obr. 44: Nastavenie limitov aktuátora
- Obr. 45: Funkcia pre ukončenie komunikácie
- Obr. 46: Začiatok nekonečného cyklu stavového automatu
- Obr. 47: Časť výstupu po príkaze „pomoc“
- Obr. 48: GUI s tlačidlami
- Obr. 49: GUI s posúvačmi, rozsah pohybu 180°
- Obr. 50: Testovacia rovina so značkami
- Obr. 51: Značky na testovacej rovine, rozteč 10 mm
- Obr. 52: Články s kolieskami
- Obr. 53: Články bez koliesok
- Obr. 54: Detail na penové podložky zospodu
- Obr. 55: Meraný čas
- Obr. 56: Graf závislosti rýchlosti na sklone
- Obr. 57: Graf závislosti rýchlosti na sklone
- Obr. 58: Detail konštrukcie planárneho robotického hada
- Obr. 59: Robotický had v polohe predvádzajúca pohyblivosť
- Tab. 1: Pravdivostné tabuľky
- Tab. 2: Pravdivostná tabuľka pre 35 stavov