



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

SIMULAČNÍ MODELOVÁNÍ A ŘÍZENÍ HADŮM PODOBNÝCH ROBOTŮ

SIMULAČNÍ MODELOVÁNÍ A ŘÍZENÍ HADŮM PODOBNÝCH ROBOTŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Paulína Motyčková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Studentka:	Bc. Paulína Motyčková
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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:

Simulační modelování a řízení hadům podobných robotů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Biologicky inspirovaní roboti typu had jsou v mnoha směrech jedineční. Diplomová práce se bude zabývat simulačním modelováním n-článekového hada v prostředí CoppeliaSim. Testováno bude řízení hada s pomocí generátoru vzorů pohybu (CPG) v definovaném simulačním prostředí.

Cíle diplomové práce:

- Stručná rešerše robotických hadů.
- Stručná rešerše metod řízení robotických hadů.
- Návrh řízení na principu CPG (případně komparovaný s dalším typem řízení – serpenoid, CGA aj.).
- Model hada v prostředí CoppeliaSim.
- Simulační modelování pro optimální nastavení serpenoid a CPG (rychlost pohybu, energie).
- Experimenty a vyhodnocení.
- Poster a video dokumentace dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

J. Hrdina, A. Navrat, P. Vasik, and R. Matousek, "Local Control of (4,5,7,8-10)-Filtration Snake Robot via CGA", mendel, vol. 23, no. 1, pp. 157-162, Jun. 2017.

T. Hůlka, R. Matoušek, L. Dobrovský, M. Dosoudilová, and L. Nolle, "Optimization of Snake-like Robot Locomotion Using GA: Serpenoid Design", mendel, vol. 26, no. 1, pp. 1-6, Aug. 2020.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá vlastným návrhom robotického hada, jeho zostavením a simuláciou v simulačnom programe CoppeliaSim a následným testovaním rôznych metód riadenia robotických hadov (Serpentinoid, CPG). U jednotlivých metód riadenia je pozorovaný vplyv vybraných parametrov na signály riadiace motorizované kĺby robotického hada, a ich vplyv na rýchlosť a energetickú spotrebu daného mechanizmu.

ABSTRACT

This paper deals with the design of a robotic snake, its assembly, simulation using CoppeliaSim, and the testing of various methods for the control of robotic snakes (Serpentinoid, CPG). For individual control methods, the influence of selected parameters on the signals controlling the motorized joints of the robotic snake is observed, and their influence on the speed and energy consumption of the given mechanism is described.

Kľúčové slová

riadenie robotických hadov, simulácia robotických hadov, Serpentinoid, Central Pattern Generator, optimálne nastavenie riadenia

KEYWORDS

Locomotion control of snake-like robots, simulation of snake-like robots, Serpentinoid, Central Pattern Generator, optimal control settings



2021

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MOTYČKOVÁ, Paulína. *Simulační modelování a řízení hadům podobných robotů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, 2021, 119 s. Diplomová práce. Vedúci práce: doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Prehlasujem, že táto diplomová práca je mojím pôvodným dielom, vypracovala som ju samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry.

Ako autorka uvedenej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto práce som neporušila autorské práva tretích osôb, predovšetkým som nezasiahla nedovoleným spôsobom so cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomá následkov porušenia ustanovenia § 11 nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov.

V Brna dňa 21. 5. 2021

.....

Paulína Motyčková

Podakovanie

Rada by som poďakovala vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Radomilovi Matouškovi, Ph.D za venovaný čas a ústretový prístup.

Obsah

1	Úvod	15
2	Analýza problému	17
2.1	Pohyb biologického hada	17
2.1.1	Bočné vlnenie (serpentine locomotion)	17
2.1.2	Harmonikový pohyb (concertina movement)	18
2.1.3	Bočný pohyb (sidewinding movement)	18
2.1.4	Priamočiary pohyb (Rectilinear movement)	18
2.2	Robotickí hadi	19
2.2.1	Roboti s pasívnymi kolieskami a aktívnymi ohybovými kĺbmi	20
2.2.2	Roboti s aktívnymi ohybovými a predĺžovacími kĺbmi	22
2.2.3	Roboti s aktívnymi kolieskami a aktívnymi ohybovými kĺbmi	22
2.2.4	Roboti s aktívnymi pásmi	23
2.3	Riadenie robotických hadov	24
2.3.1	Serpentinoid	25
2.3.2	CPG	28
2.3.3	CGA	34
2.4	Simulačný softvér	36
2.4.1	Webots	36
2.4.2	Gazebo	37
2.4.3	CoppeliaSim (V-REP)	38
3	Vlastné riešenie	41
3.1	Model robotického hada	41
3.2	Návrh siete CPG	42
3.2.1	Sieť CPG zložená z fázových oscilátorov	42
3.2.2	Sieť CPG zložená z Matsuoka oscilátorov	47
3.3	Simulačné modelovanie	52
3.4	Experimentálne meranie	60
3.4.1	Serpentinoid	62
3.4.2	CPG sieť fázových oscilátorov	70
3.4.3	CPG sieť Matsuoka oscilátorov	77
3.5	Hľadanie optimálneho nastavenia parametrov riadenia	85
3.5.1	Výsledky - Serpentinoid	86
3.5.2	Výsledky - CPG sieť fázových oscilátorov	88
3.5.3	Výsledky - CPG sieť Matsuoka oscilátorov	89
4	Zhodnotenie a diskusia	93
5	Záver	95
6	Zoznam použitej literatúry	97

7	Zoznam obrázkov a tabuliek	103
7.1	Zoznam obrázkov	103
7.2	Zoznam tabuliek	108
8	Zoznam príloh	111
A	Optimálne riadenie	113
A.1	Výsledky - Serpentinoid	113
A.2	Výsledky - CPG (fázové oscilátory)	115
A.3	Výsledky - CPG (Matsuoka oscilátory)	117
B	Zoznam digitálnych príloh	119

1 Úvod

Za posledné roky sa v robotike vo vysokej miere začali skúmať zvieratami inšpirovaní roboti. Had je jedným z najpopulárnejších skúmaných živočíchov v tejto oblasti, vďaka svojej výbornej mobilite na širokej škále terénov. V prírode možno pozorovať štyri základné typy pohybu biologických hadov, pohyb bočným vlnením, harmonikový pohyb, bočný pohyb a priamočiary pohyb. Had je schopný pohybovať sa v úzkych priechodoch, prekonávať stúpanie, či pohybovať sa po nerovnom povrchu. Snahou je dosiahnuť tieto vlastnosti mobility aj v robotike. Skúmanie robotických hadov započalo, keď v roku 1972 profesor Shigeo Hirose vyvinul prvý funkčný model robotického hada [16]. Išlo o jednoduchý model, schopný pohybu po rovinnom povrchu. Robot bol schopný pohybu vďaka pasívnym kolieskam upevneným na spodnej časti jeho tela, a motorizovaným rotačným kĺbom, spájajúcim jednotlivé články tela robota. V nasledujúcich rokoch bolo zostrojené pomerne veľké množstvo robotických hadov, s najrôznejšími konštrukciami. Pre zaručenie mobility robotického hada bola používaná nielen kombinácia pasívnych koliesok a motorizovaných kĺbov, ale taktiež kombinácie aktívnych koliesok a pasívnych kĺbov, či aktívnych pásov. Niektorí robotický hadi boli dokonca skonštruovaní bez akýchkoľvek koliesok či aktívnych pásov, a k pohybu tak využívali napríklad motorizované kĺby s aktívnym ohybom a predĺžením. Medzi týmito modelmi hadov sa vyskytovali hadi schopní dvoj-dimenzionálneho, či troj-dimenzionálneho pohybu, a niektorí robotický hadi, s konštrukciou odolnou voči prachu a tekutinám, boli schopní aj plávať. Biologicky inšpirovaní robotický hadi vynikajú pre ich flexibilnú pohyblivosť a vysokú stabilitu s nízkym ťažiskom. Tieto vlastnosti robia robotických hadov vhodnou voľbou pre množstvo úloh, ako sú napríklad prieskumy rôznych prostredí, záchranné operácie v nebezpečných oblastiach alebo aj kontrola a údržba tesných priestorov, či potrubí. V súčasnosti robotický hadi nie sú široko využívaní v praxi, pretože doposiaľ na trhu nie je žiaden lacný robotický had, ktorý by poskytoval vhodnú výskumnú platformu pre výskumy rôznych oblastiach.

V roku 1976 Hirose a Umetani [15] pozorovali, že tvar zakrivenia tela hada na povrchu s konštantným koeficientom trenia je veľmi blízky tvaru tzv. serpentínoidnej krivky, na ktorej princípoch je založená väčšina známych metód riadenia robotických hadov, predovšetkým metóda Serpentinoid. V súčasnosti poznáme tri spôsoby riadenia pohybu robotických hadov. Prvým z nich je metóda Serpentinoid [20], ktorá využíva princípy serpentínoidnej krivky, a spočíva na vhodnom návrhu jej tvaru, z ktorého sú počítané signály pre riadenie motorizovaných kĺbov robotického hada. Ďalšou metódou riadenia robotických hadov je metóda, pri ktorej sa využíva sieť CPG [22], a pre realizáciu rytmických vzorov pohybu robota generuje rytmické signály riadiace motorizované kĺby. Sieť CPG je neurónová sieť v miechach živočíchov,

ktorá generuje aktivačné signály pre svalové kontrakcie. Posledná metóda riadenia robotických hadov, je metóda založená na princípoch konformnej geometrickej algebry (CGA) [14]. Táto metóda je výpočtovo veľmi presná, avšak jej implementáciu na reálny problém znevýhodňuje predpoklad, že u koliesok robota nedochádza k šmýkaniu do strán.

Diplomová práca podrobne skúma rôzne prístupy k riadeniu robotických hadov, a ich implementáciu na reálne problémy. Práca sa zameriava predovšetkým na skúmanie metódy riadenia sieťou CPG. Cieľom je navrhnúť CPG sieť vhodnú pre riadenie modelu robotického hada zostaveného v simulačnom prostredí CoppeliaSim, a následné skúmanie vplyvu rôznych parametrov tejto siete na rýchlosť a energetickú spotrebu robota. Výstupom práce sú optimálne nastavenia parametrov riadenia pre maximalizáciu rýchlosti, minimalizáciu spotreby, a maximalizáciu pomeru rýchlosti a spotreby konkrétnych modelov robotických hadov a patričné porovnanie tejto metódy s metódou riadenia Serpentinoid.

2 Analýza problému

Robotický hadi sú roboti inšpirovaní biologickými hadmi, ktorý vynikajú v rôznych oblastiach. V posledných rokoch sa stal výskum robotov tohoto typu veľmi populárnym, a čím ďalej tým viac výskumov sa zaoberá ich konštrukciou či riadením. Táto kapitola bude zameraná na skúmanie súčasného stavu poznania.

2.1 Pohyb biologického hada

Zvieratá sa pohybujú rôznymi spôsobmi v závislosti na ich anatómii, prostredí a požadovanej rýchlosti pohybu. Anatómia hadov [39] im neumožňuje pohyb, aký poznáme u väčšiny suchozemských živočíchov s končatinami, ani pohyb aký využívajú vodné živočíchy bez končatín.

Hady sa vyznačujú dlhým, valcovitým telom, ktorého kostra sa skladá z lebky, a z dlhej chrbtice so stavcami a rebrami. V tele hada sa nachádza zložitú svalstvo, ktoré napomáha pohybu. Jedná sa najmä o medzirebrové svaly a väzy, umožňujúce natáčanie jednotlivých stavcov. Telo hada je pokryté pružnou kožou so šupinami, ktorých tvary a veľkosti sa líšia nielen v závislosti od veľkosti a druhu hada, ale aj od toho, na ktorej časti tela sa nachádzajú. Významnú úlohu majú najmä šupiny na spodnej strane tela, ktoré spolu s brušnými svalmi umožňujú hadom pohyb [4].

Hady sú známe najmä svojim ikonickým pohybom v tvare písmena S (bočné vlnenie), nejedná sa však o jediný druh pohybu ktorého sú schopní. U hadov môžeme pozorovať štyri základné druhy pohybu [4] [34],[5], ktoré väčšina hadov strieda podľa potreby. Druh pohybu hada závisí taktiež od hmotnosti jeho tela, rýchlosti a od povrchu, na ktorom sa had pohybuje.

2.1.1 Bočné vlnenie (serpentine locomotion)

Bočné vlnenie (Obr. 1) je pohyb, pri ktorom had natočením stavcov vo svojom tele vytvorí vlny bočného ohýbania v tvare písmena S, ktoré sa šíria pozdĺž tela od hlavy po chvost. Tento pohyb významne podporujú šupiny, ktorých tvar a štruktúra vytvára nízke trenie v smere pohybu, a naopak vysoké trenie v normálovom smere. Kedykoľvek sa ohyb dotýka nerovnosti povrchu alebo objektu na povrchu, vyvíja naň silu a lokálne sa deformuje. Ak had pôsobí na viacero nerovností či objektov súčasne, vektory bočnej sily sa navzájom vyrušia a výsledný vektor hada poháňa vpred. Bočné vlnenie je pohyb, ktorý je vhodný pri pohybe na povrchu s vysokým koeficientom trenia, a naopak je nevhodný pre pohyb na klzavých povrchoch, na ktorých by sa had kvôli nízkemu koeficientu trenia takmer nepohol.



Obr. 1: Bočné vlnenie [5].

2.1.2 Harmonikový pohyb (concertina movement)

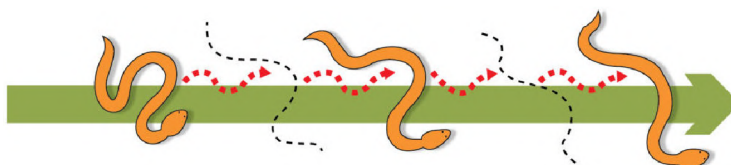
Harmonikový pohyb (Obr. 2) využíva statické trenie povrchu a je vhodný najmä pre pohyb v úzkych oblastiach, ako sú napríklad tunely alebo iné úzke priechody. Pri tomto pohybe sa had zvlní a ohybmi tlačí bočne proti stenám tunelu alebo zvisle proti povrchu zeme, čím sa zachytí o povrch. Následne postupne vyrovná prednú časť svojho tela, čím sa posunie na nové miesto, kde sa opäť zachytí. Rýchlosť hada pri tomto pohybe je veľmi nízka a závisí od dĺžky jeho tela.



Obr. 2: Harmonikový pohyb [5].

2.1.3 Bočný pohyb (sidewinding movement)

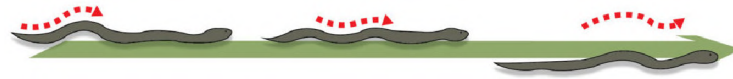
Bočný pohyb (Obr. 3) je vhodný pre hadov pohybujúcich sa po klzkých povrchoch, ako je napríklad piesok alebo sklo, u ktorých je koeficient dynamického trenia výrazne nižší ako koeficient statického trenia. Pri tomto pohybe had ohýba svoje telo do podobného tvaru ako pri bočnom vlnení a následne zdvíha segmenty svojho tela a ukladá ich o kúsok ďalej. Had sa pri tomto pohybe neposúva dopredu ale skôr v diagonálnom smere vzhľadom na stopu, ktorú vytvára.



Obr. 3: Bočný pohyb [5].

2.1.4 Priamočiary pohyb (Rectilinear movement)

Priamočiary pohyb (Obr. 4) využívajú najmä veľké hady. Pri tomto pohybe hady využívajú statické trenie tak, že striedavo zdvíhajú časti svojho tela mierne od povrchu a tie ťahajú dopredu, zatiaľ čo časti tela, ktoré ostávajú na povrchu zabraňujú kĺzaniu. Následne zdvihnuté časti tela stiahnu dole, a tlačia nimi dozadu. Tento pohyb je veľmi pomalý, ale zato najmenej nápadný, a preto ho hady často využívajú pri plazení za korisťou.



Obr. 4: Priamočiary pohyb [5].

2.2 Robotickí hadi

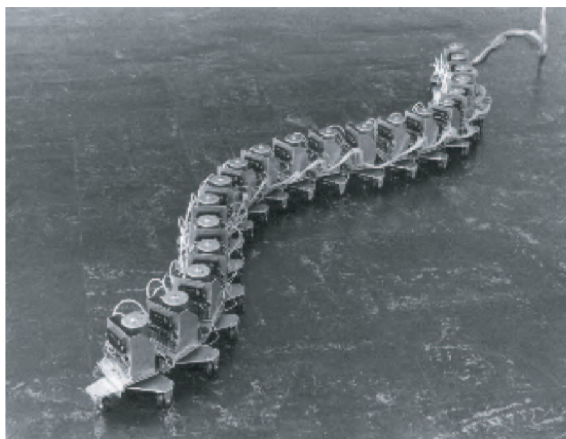
Robotickí hadi [30], [17] [16] vynikajú pre ich flexibilnú pohyblivosť a vysokú stabilitu s nízkym ťažiskom. Tieto vlastnosti robia robotických hadov vhodnou voľbou pre množstvo úloh, ako sú napríklad prieskumy rôznych prostredí, záchranné operácie v nebezpečných oblastiach, alebo aj kontrola a údržba tesných priestorov, ku ktorým ľudia nemajú prístup. V súčasnosti robotickí hadi nie sú široko využívaní v praxi, pretože doposiaľ na trhu nie je nijaký lacný robotický had, ktorý by poskytoval vhodnú výskumnú platformu pre výskumníkov rôznych oblastiach.

Základnou úlohou pri zostavovaní robotického hada je vytvorenie pohyblivého robota bez končatín tak, aby k svojmu pohybu využíval jednu alebo viacero metód pohybu, ktoré využívajú biologické hady. Okrem pohybu po súši pomocou napríklad harmonikového pohybu, či pohybu bočného vlnenia, sú niektorí obojživelní robotickí hadi schopní aj plávať vo vode. Roboti inšpirovaní biologickými hadmi sú realizovaní prepojením viacerých segmentov, ktorých vzájomné natočenie je vo väčšine prípadov riadené pneumaticky alebo elektrickými motormi poháňajúcimi aktívne súčiastky konštrukcie. Väčšina robotických hadov je vybavená aktívnymi alebo pasívnymi kolieskami pripojenými k jednotlivým segmentom tak, aby umožňovali hadovi požadovaný typ pohybu. Nie každý robotický had musí byť nutne vybavený kolieskami, niektorí robotickí hadi sú skonštruovaní bez akýchkoľvek koliesok, alebo majú namiesto koliesok aktívne pásy. Prepojenie jednotlivých segmentov môže byť realizované tromi spôsobmi. Prvým spôsobom je prepojenie segmentov kĺbmi schopnými ohybu len okolo zvislej osi, ktoré dovoľuje hadovi len pohyb bočným vlnením. Druhým spôsobom sú segmenty striedavo prepojené kĺbmi schopnými ohybu len okolo zvislej alebo vertikálnej osi. Pri tomto druhu zapojenia je had schopný omnoho komplexnejšieho pohybu. Tretím spôsobom je prepojenie jednotlivých segmentov univerzálnymi kĺbmi, ktoré umožňujú ohyb vo všetkých smeroch, čím zaručujú najkomplexnejšiu pohyblivosť. Univerzálny kĺb poskytuje dobrý prístup k trojrozmernému pohybu v mnohých prostrediach. U niektorých robotických hadov sa stretávame s kĺbmi, ktoré majú okrem schopnosti ohýbať sa, aj schopnosť predĺžiť sa. Použitie takýchto kĺbov má význam najmä u robotických hadov, u ktorých sa vyžaduje priamočiary pohyb.

2.2.1 Roboti s pasívnymi kolieskami a aktívnymi ohybovými klíbmí

Pri pohybe biologického hada hrá významnú úlohu práve jeho koža pokrytá šupinami. Štruktúra šupín hada zaisťuje nízke trenie pri doprednom smere pohybu a vysoké trenie v normálovom smere. V robotike je táto vlastnosť často zaistená pomocou pasívnych koliesok, ktoré sú pripevnené k jednotlivým segmentom robotického hada.

Robot s názvom ACM-III (Obr. 5) [16] je prvým známym predstaviteľom tejto skupiny robotov. Vyvinul ho profesor Shigeo Hirose v roku 1972. Tento robot realizuje pohyb bočného vlnenia, pre ktorého napodobnenie využíva pasívne kolieska umiestnené na spodnej strane jeho tela. Had ACM-III bol celkovo 2 metre dlhý, vážil 28kg a pozostával z 20 motorizovaných klíbv, ktoré generovali rytmický pohyb okolo vertikálnych osí. ACM-III realizoval plynulý plazivý pohyb prenášaním ohybového signálu pre klbový servomechanizmus spredu dozadu (od hlavy po chvost), pričom dosahoval rýchlosť 0.5m/s. Robot bol taktiež doplnený o senzory, ktoré boli pripevnené na oboch stranách tela, čo umožňovalo robotovi realizovať pohyb pri ktorom sa automaticky obmotá okolo objektu. Robot bol riadený pomocou neurónovej siete, ktorá pripomína nervový systém zvierat.



Obr. 5: Robot ACM-III. [16]

V roku 2001 profesor Shigeo Hirose vyvinul ďalšieho známeho robotického hada s pasívnymi kolieskami, robota ACM-R3 (Obr. 6) [35], [36]. Tentokrát išlo o bezdrôtového robota schopného pohybu v trojrozmernom priestore. Robot ACM-R3 sa skladá z 20-tich klíbv, má dĺžku 1.8m a hmotnosť 12kg. Jednotlivé segmenty robota ACM-R3 sú prepojené aktívnymi ohybovými klíbmí, ktoré majú rôzne osi ohybu pripojené striedavo pod uhlom 90°, čo mu umožňuje trojrozmerný pohyb. Robot ACM-R3 je vybavený veľkými pasívnymi kolieskami, ktoré obopínajú celé jeho telo. Na rozdiel od robota ACM-III, ktorý má kolieska upevnené v strede jednotlivých článkov, robot ACM-R3 má kolieska upevnené v stredoch klíbv. Každá

jednotka ACM-R3 sa skladá z veľmi jednoduchej konštrukcie, batérií a elektronických obvodov riadenia, čo ho robí vhodným prostriedkom pre výskum robotických hadov. ACM-R3 môže vykonávať plazivý pohyb pri maximálnej rýchlosti asi $1m/s$ a tiež dokáže zdvihnúť hlavu až do výšky približne $0.5m$.



Obr. 6: Robot ACM-R3. [16]

Ďalším známym predstaviteľom hadích robotov s pasívnymi kolieskami je robot ACM-R5 (Obr. 7) [42], vyrobený v roku 2005. Robot ACM-R5 je obojživelný robotický had, ktorý sa vyznačuje svojou konštrukciou odolnou voči prachu a tekutinám. V roku 2001 bol vyrobený podobný model, ktorý bol pomenovaný HELIX [45], robot ACM-R5 je upravenou verziou tohoto robota. Robot ACM-R5 môže byť zložený z ľubovoľného počtu článkov prepojených motorizovanými kĺbmi. Na rozdiel od robotov ACM-III a ACM-R3 sú jednotlivé články prepojené univerzálnymi kĺbmi poháňanými dvojicou prevodových motorov. Vonkajšie časti týchto mechanizmov univerzálneho kĺbu sú utesnené pružnými vlnovcami a hliníkovým vonkajším plášťom.



Obr. 7: Robot ACM-R5. [16]

Ďalšími známymi predstaviteľmi robotických hadov tohoto druhu sú obojživelní roboti AmphiBot I [9] a Amphibot II [10]. AmphiBot I a AmphiBot II sú robotickí hadi schopní 2-dimenzionálneho pohybu, a sú zložené z ôsmich identických segmentov a siedmich motorizovaných kĺbov prepájajúcich jednotlivé segmenty.

2.2.2 Roboti s aktívnymi ohybovými a predlžovacími kĺbmi

Robotickí hadi tohoto typu sa vyznačujú tým, že ich jednotlivé články sú prepojené kĺbmi, ktoré sa môžu súčasne ohýbať aj predlžovať. Takáto konštrukcia hadím robotom umožňuje vykonávať priamočiary pohyb, čo môže byť veľkou výhodou v prípade, že sa požaduje, aby bol robot schopný pohybu v úzkych priestoroch, ako sú napríklad trubice, alebo tam, kde plazivý pohyb nie je možný.

Jedným z predstaviteľov tejto skupiny robotov je robot Slim Slime (Obr. 8) [37], ktorý sa skladá zo sériovo zapojených pneumatických modulov. Vo vnútri každého modulu sa nachádzajú tri paralelne usporiadané kovové vlnovce, do ktorých sa privádza a vypúšťa stlačený vzduch, čo spôsobuje pneumatické ohýbanie a predlžovanie jednotlivých modulov. Každý modul má priemer 128mm , dĺžku od 114mm do 178mm a hmotnosť 1.7kg . Maximálny uhol ohybu modulu je 30° .



Obr. 8: Robot Slim Slime. [16]

Ďalším známym predstaviteľom tejto skupiny robotických hadov je robot ACM-S1 [43].

2.2.3 Roboti s aktívnymi kolieskami a aktívnymi ohybovými kĺbmi

Robotickí hadi tohto typu sa vyznačujú konštrukciou, v ktorej kolieska aj kĺby sú aktívnymi súčiastkami. Výhodou takýchto robotov, rovnako ako u robotov s aktívnymi ohybovými a predlžovacími kĺbmi, je ich pohyblivosť aj vo veľmi úzkych priestoroch a v priamych či ohnutých trubicach, kde plazivý hadí pohyb nie je možný. Na-

vyše roboti tohoto typu dokážu realizovať plynulý hadí pohyb aj s menším počtom segmentov, a sú schopní pohybu aj v menej rovných terénoch.

Jedným z najznámejších predstaviteľom tejto skupiny hadích robotov je robot ACM-R4 (Obr. 9) [49]. Tento robot, odolný voči vode a prachu, sa skladá z 9-tich aktívnych ohybových kĺbov striedavo prepojených s rozdielnym natočením o 90° , má dĺžku $1.1m$ a hmotnosť $9.5kg$. Robot ACM-R4 má veľké aktívne kolieska, obopínajúce celé jeho telo. Kolieska tohoto robota sú pripojené ku jednotlivým kĺbom tak, ako to bolo u robota ACM-R3. Vo vnútri každého kĺbu sú umiestnené motory, ktoré poháňajú kĺby a kolesá. Robot ACM-R4 je schopný okrem trojdimenzionálneho pohybu, ako u robota ACM-R3, aj priamočiareho pohybu, čo mu umožňuje prechod úzkymi priestormi a potrubiami, a je schopný prekonávať prekážky.



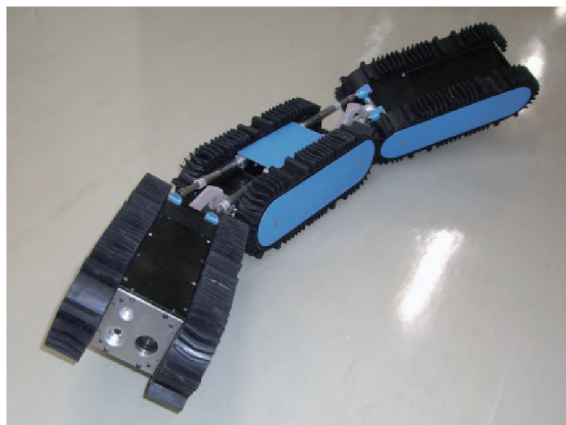
Obr. 9: Robot ACM-R4. [16]

Ďalšími známymi predstaviteľmi robotov tohoto typu sú roboti GMD-Snake2 [26] a NTUA robotický had [28].

2.2.4 Roboti s aktívnymi pásmi

Roboti tohoto typu sú charakteristickí tým, že namiesto koliesok majú k jednotlivým článkom pripojené aktívne pásy, ktoré im umožňujú pohyb. Takíto roboti boli vyvinutí na využitie pre pomoc pri prírodných katastrofách na záchranné akcie, či skúmanie terénu, a to vďaka ich schopnosti prekonávať extrémne nerovné terény.

Predstaviteľmi takýchto robotov sú roboty Souryu, ktoré boli vyvinuté pre využitie pri záchranných akciách na prehľadávanie trosiek zrútených budov po zemetrasení. Bolo vyvinutých šesť typov robotov Souryu počínajúc robotom Souryu-I [44]. Najznámejší z tejto rady robotov je robot Souryu-IV (Obr. 10) [1], ktorý sa skladá z troch článkov, pričom každý z článkov je vybavený pásmi po oboch stranách. Jednotlivé články sú prepojené aktívnymi ohybovými kĺbmi, schopnými ohybu v dvoch smeroch. Robot Souryu-IV má celkovú dĺžku $1.21m$, šírku $0.16m$ a hmotnosť $11.9kg$.



Obr. 10: Robot Souryu-IV. [16]

Ďalším predstaviteľom robotov tohoto druhu je robot OmniTread OT-8 (Obr. 11) [2]. Robot OmniTread OT-8 pozostáva z piatich segmentov prepojených štyrmi aktívnymi univerzálnymi pneumatickými kĺbmi. Aktívne pásy pokrývajú jednotlivé články robota zo štyroch strán, čo spolu s malou veľkosťou medzery medzi článkami zaisťuje maximalizáciu pomeru povrchovej plochy aktívnej pri pohone k povrchovej ploche neaktívnej pri pohone. Rozmery segmentov tohoto robota sú $200\text{mm} \times 185\text{mm} \times 185\text{mm}$, celková dĺžka robota je 1.27m a hmotnosť robota je 13.6kg .



Obr. 11: Robot OmniTread OT-8. [17]

Ďalšími predstaviteľmi robotických hadov s aktívnymi pásmi sú robot OmniTread OT-4 [3] (vylepšená verzia robota OmniTread OT-8) a robot JL-I [50].

2.3 Riadenie robotických hadov

Vďaka mnohým stupňom voľnosti a jedinečným formám pohonu predstavujú robotickí hadi množstvo zaujímavých výziev v oblasti riadenia. Výskum riadenia robotických hadov prebieha už niekoľko desaťročí a skúma množstvo rôznych prístupov.

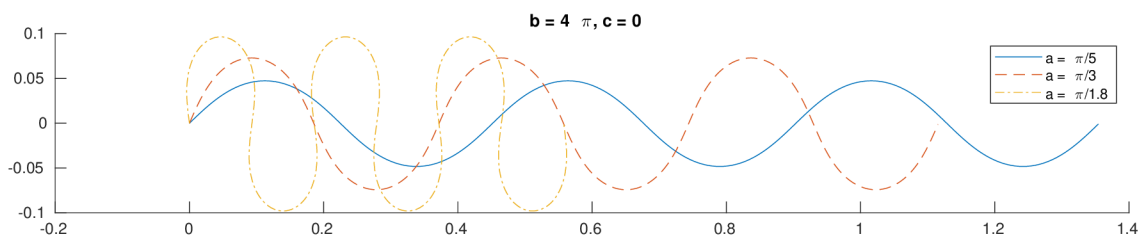
2.3.1 Serpentinoid

Bočné vlnenie je považované za najekonomickejšiu formu rovinného pohybu hada, čo robí tento druh pohybu veľmi populárnym pre najrôznejšie výskumy a aplikácie v robotike.

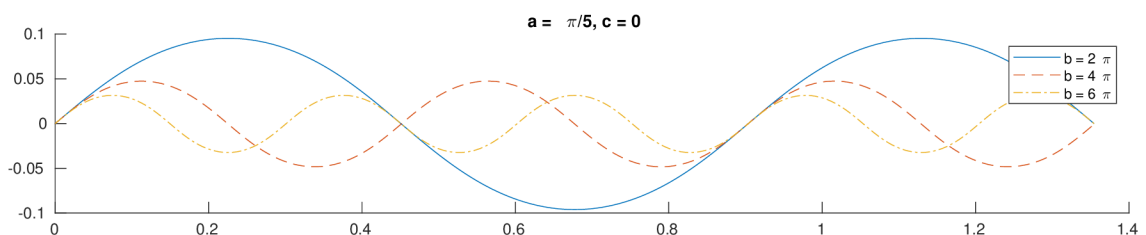
Hirose ako prvý definoval krivku, ktorá je blízkou aproximáciou tvaru biologického hada pri pohybe bočným vlnením. Jedná sa o rovinnú krivku so sínusovým zakrivením, ktorá dostala pomenovanie serpentinoidná krivka. Serpentinoid je metóda riadenia pohybu robotického hada, pri ktorej sa využíva serpentinoidná krivka a spočíva na sínusovo sa meniacom zakrivení tela robotického hada pozdĺž jeho chrbtice [20]. Hirose pozoroval, že takéto riadenie odráža celotelové cyklické zmeny polohy tiel biologických hadov [15]. Spojitú serpentinoidnú krivku možno popísať rovnicami:

$$\begin{aligned} x(s) &= \int_0^s \cos(a \cos(b\sigma) + c\sigma) d\sigma \\ y(s) &= \int_0^s \sin(a \cos(b\sigma) + c\sigma) d\sigma \end{aligned} \quad (1)$$

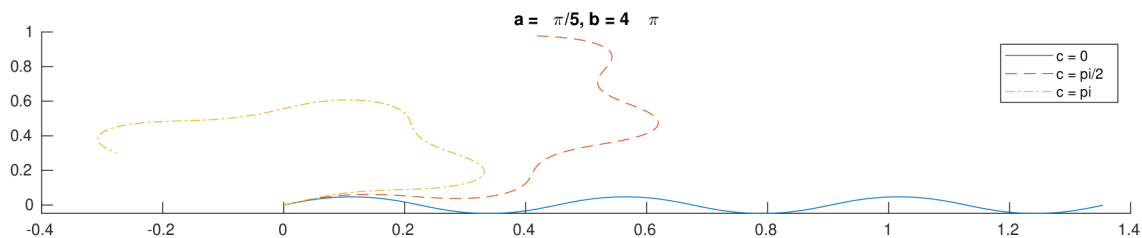
kde a , b , c sú parametre serpentinoidnej krivky, ktoré sú považované za základné vlastnosti pohybu robotického hada definujúce tvar vlny, a je možné ich meniť. Vplyv jednotlivých parametrov na tvar serpentinoidnej krivky môžeme vidieť na obrázkoch Obr. 12, Obr. 13 a Obr. 14.



Obr. 12: Vplyv parametra a na serpentinoidnú krivku



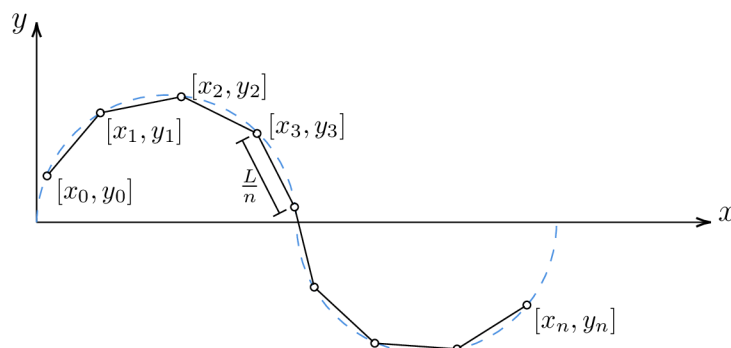
Obr. 13: Vplyv parametra b na serpentinoidnú krivku

Obr. 14: Vplyv parametra c na serpentinoidnú krivku

Pri robotickom hadovi je vhodné hovoriť o diskkrétnej aproximácii spojitely serpentinoidnej krivky, ktorú možno popísať rovnicami:

$$\begin{aligned} x_i &= \sum_{k=1}^i \frac{L}{n} \cos \left(a \cos \left(\frac{kLb}{n} \right) + \frac{kLc}{n} \right) \\ y_i &= \sum_{k=1}^i \frac{L}{n} \sin \left(a \cos \left(\frac{kLb}{n} \right) + \frac{kLc}{n} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

kde parameter n je celkový počet článkov robotického hada, L je jeho celková dĺžka a $\frac{L}{n}$ je dĺžka jedného článku, pričom uvažujeme hada, ktorého články majú jednotnú dĺžku. Bod $[x_i, y_i]$, pre $i = 1, \dots, n-1$ je poloha kĺbu, spájajúceho články s indexmi i a $i+1$, pričom bod $[x_0, y_0]$ považujeme za počiatok (resp. hlavu) hada a bod $[x_n, y_n]$ považujeme za koniec (resp. chvost) hada, ako môžeme vidieť na obrázku Obr. 15.



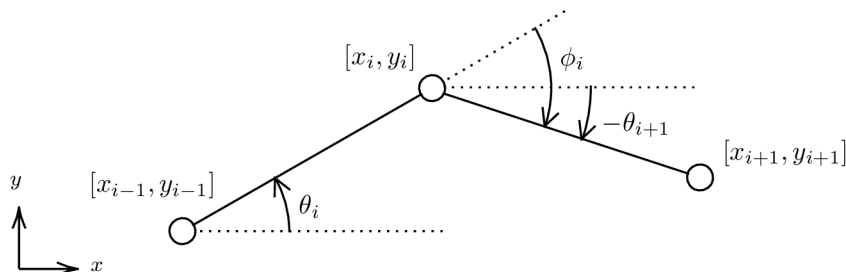
Obr. 15: Diskrétna serpentinoidná krivka.

V literatúre sa často vyskytujú aj rôzne iné modifikácie rovníc spojitely či diskkrétnej serpentinoidnej krivky [29].

Návrh serpentinoidnej krivky ovplyvňuje rýchlosť pohybu robotického hada, teda cieľom takéhoto riadenia je voľba optimálnej krivky pre požadovanú rýchlosť. Pri navrhovaní serpentinoidnej krivky je nutné brať v úvahu fyzikálne vlastnosti hada, hmotnosť, trenie koliesok, atď., ktoré výrazne ovplyvňujú jeho rýchlosť.

Aby sa robotický had dostal do požadovaného tvaru, opisujúceho serpentinoidnú krivku, je nutné riadiť motorizované kĺby, ktoré prepájajú jednotlivé články.

Pri riadení motorizovaného kĺbu nás zaujíma najmä vzájomné natočenie dvojice článkov, prepojených týmto kĺbom. Pri natočení i -teho článku môžeme hovoriť buď o absolútnom uhle θ_i alebo o relatívnom uhle ϕ_i . Absolútny uhol θ_i je uhol, ktorý zvierá i -ty článok s osou x a relatívny uhol ϕ_i je uhol, ktorý zvierá i -ty článok s článkom s indexom $i + 1$, ako možno vidieť na obrázku Obr. 16.



Obr. 16: Absolútny a relatívny uhol.

Výpočet absolútneho uhla θ_i popisuje rovnica:

$$\theta_i = a \cos\left(\frac{iLb}{n}\right) + \frac{iLc}{n}. \quad (3)$$

Relatívny uhol ϕ_i je rozdielom absolútnych uhlov θ_i a θ_{i+1} a popisuje ho rovnica:

$$\phi_i = \theta_i - \theta_{i+1} = 2a \sin\left(\frac{iLb}{n} + \frac{iLc}{2n}\right) \sin\left(\frac{Lb}{2n}\right) - \frac{Lc}{n} \quad (4)$$

Pre zjednodušenie práce s rovnicou relatívneho uhla, môžeme rovnicu 4 vyjadriť v tvare:

$$\phi_i = \alpha \sin\left(i\beta + \frac{\beta}{2}\right) + \gamma \quad (5)$$

kde $\alpha = 2a \sin\frac{Lb}{2n}$, $\beta = \frac{Lb}{n}$ a $\gamma = -\frac{Lc}{n}$ [31]. Výpočet relatívnych uhlov je nevyhnutná fáza riadenia robotického hada, keďže práve tieto uhly určujú natočenia jednotlivých motorizovaných kĺbov, bez ktorých by pohyb nebol možný. Pri pohybe robotického hada bočným vlnením, sa tvar serpentinoidnej krivky postupne šíri telom hada od hlavy k chvostu, je teda vhodné vyjadriť rovnicu výpočtu relatívneho uhla ako funkciu času :

$$\phi_i(t) = \alpha \sin(\omega t + (i - 1)\beta) + \gamma, \quad i = 1, \dots, n - 1, \quad (6)$$

kde ω je uhlová frekvencia.

2.3.2 CPG

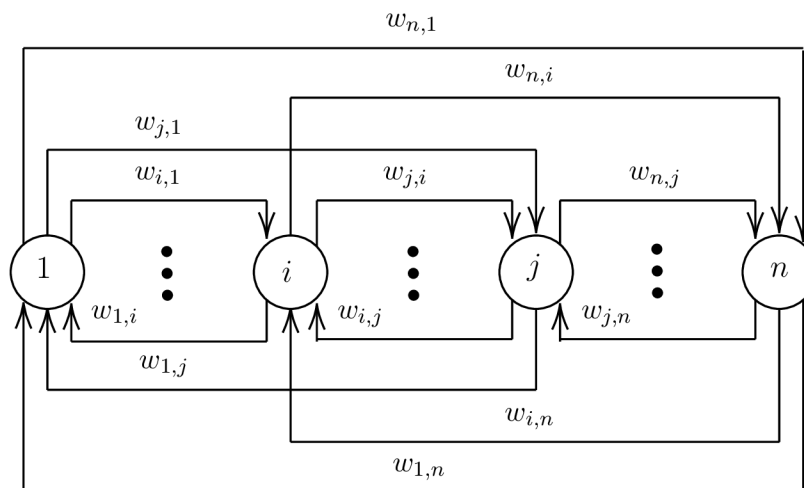
Mechanismy plánovania pohybu na vyššej úrovni u zvierat sú predmetom skúmania už niekoľko desaťročí. Evolúcia vytvorila u živočíchov efektívny mechanizmus zjednodušenia veľmi zložitých vzorov pohybu na jednoduché riadiace signály, ktoré sú pre mozog ľahko spracovateľné, čo umožňuje živočíchom dýchať, kráčať či lietať bez akéhokoľvek plánovania jednotlivých pohybov. Tieto stereotypné pohyby sa vyznačujú svojou periodicitou, čo naznačuje, že nemusia byť realizované explicitným riadením polohy každého členenia, ale môžu byť modulované parametrami vyššej úrovne ako napríklad amplitúda, či frekvencia daného periodického pohybu.

Väčšina týchto rytmických pohybov je riadená mechanizmom, ktorý sa nazýva CPG (Central Pattern Generator). CPG je neurónová sieť v miechach živočíchov, ktorá generuje aktivačný signál pre svalové kontrakcie. V robotike sieť CPG generuje aktivačný signál pre mechanické kĺby. Neurónová sieť CPG je zložená z viacerých oscilačných neurónov, ktoré sa vzájomnou interakciou ovplyvňujú a generujú rytmický výstup. Tieto oscilačné neurálne obvody boli študované na mnohých zvieratách, ako sú napríklad hmyz a šváby [27], ryby [13], salamander [23], mačky [12] a mnoho ďalších. Metóda riadenia robotov pomocou neurónovej siete CPG je relatívne nová metóda, a je čoraz viac skúmaná a využívaná pre riadenie mnohých prevedení biologicky inšpirovaných robotov, napríklad pre riadenie plazivého pohybu obožživelného robotického hada, či pre riadenie kráčania humanoidného robota.

V závislosti na skúmanom jave boli navrhnuté modely CPG na rôznych úrovniach abstrakcie, od podrobných biofyzikálnych modelov, cez spojenecké modely až po abstraktné oscilátorové modely [22]. Väčšina biofyzikálnych modelov skúma problém generovania rytmickej aktivity v malých nervových okruhoch alebo vlastnosti jednotlivých neurónov, zatiaľ čo väčšina modelov sietí CPG sa zameriava na dynamiku väčšej populácie neurónov, ako napríklad generovanie cestujúcich vln.

Spojenecké modely neurónových sietí využívajú zjednodušené neurónové modely, ktoré sa zameriavajú na to, ako rytmická aktivita generuje vlastnosti siete, a ako sa synchronizujú rôzne oscilačné neurálne obvody prostredníctvom medzineurónových spojení. Príkladom spojeneckých modelov neurónových sietí je biologická neurónová sieť, ktorej základnou jednotkou je polovičný-stredový oscilátor (half-centre oscillator), pozostávajúci z dvoch neurónov, ktoré individuálne nemajú schopnosť generovať rytmus, ale pri vzájomnom prepojení dokážu generovať rytmické výstupy. Tieto dva neuróny môžu pracovať v akomkoľvek relatívnom fázovaní, napríklad aj v synchronnom, či v antifáze, alebo môžu fungovať v režime úniku (escape), či v režime uvoľnenia (release). Ak polovičný stredový oscilátor pracuje v režime úniku, tak sa vypnutý neurón zapne únikom inhibície, a podobne režim uvoľňovania znamená, že sa vypnutý neurón zapne uvoľnením inhibície [46].

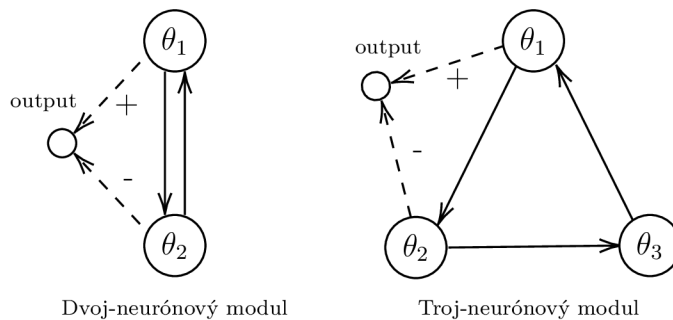
Oscilátorové modely CPG sú založené na skúmaní populačnej dynamiky matematických modelov spojených nelineárnych oscilátorov. Účelom takýchto sietí nie je skúmanie schopnosti neurónov generovať rytmus (predpokladajú existenciu schopnosti neurónov generovať rytmus), ale skúmanie toho, ako prepojenia medzi jednotlivými oscilátormi a rozdiely interných frekvencií ovplyvňujú synchronizáciu a fázové rozdiely v populácii oscilačných centier. Myšlienka oscilátorových modelov je postavená na skutočnosti, že dynamika populácií oscilačných centier závisí predovšetkým na topológii prepojení oscilátorov. Obecne môže byť oscilátorový model CPG zložený z ľubovoľného počtu oscilátorov. Prepojenia medzi oscilátormi môžu byť tiež ľubovoľné, a je možné ich nastaviť pomocou váh prepojenia tak, že váha $w_{i,j} = 0$, ak prepojenie i -teho s j -tym oscilátorom neexistuje, a $w_{i,j} \neq 0$, ak prepojenie i -teho s j -tym oscilátorom existuje. Hodnoty $w_{i,j}$ značia silu pôsobenia j -teho oscilátora na i -ty neurón pričom váhy $w_{i,j}$ a $w_{j,i}$ sa nemusia rovnať. Ak váha $w_{i,j} = 0$, a váha $w_{j,i} \neq 0$, hovoríme o jednostrannom prepojení oscilátorov i a j . Obecná schéma oscilátorového modelu CPG je znázornená na obrázku Obr. 17.



Obr. 17: Oscilátorový model CPG.

Oscilátorový model môže byť zložený z jedného modulu, alebo z reťazca viacerých modulov CPG, pričom jeden modul CPG zodpovedá jednému výstupu siete CPG. Jeden CPG modul môže byť zložený z dvoch alebo viacerých navzájom prepojených neurónov. Kvôli komplikovanej štruktúre a množstvu výpočtov, modely CPG so štyrmi a viac neurónmi v jednom CPG module nie sú často využívané pre praktické aplikácie. Najčastejšie používané moduly CPG sú moduly zložené z dvoch neurónov, ktoré sú navzájom prepojené tak, že platí $w_{1,2} = w_{2,1} \neq 0$. Ďalším často používaným modelom CPG modulu je model zložený z troch neurónov. Najčastejšie využívaný spôsob prepojenia troch neurónov je cyklické prepojenie také, že $w_{1,3} = w_{2,1} = w_{3,2} \neq 0, w_{1,2} = w_{2,3} = w_{3,1} = 0$.

Väčšina oscilátorov má pre danú frekvenciu fixný priebeh, u niektorých oscilátorov je možné trvanie fázy nezávisle upravovať. Medzi široko používané oscilátory patria napríklad fázové oscilátory [6]. Fázový oscilátor je model oscilátora, u ktorého stav systému obieha jednotkovú kružnicu. Pri tomto type oscilátora je možné priamo zadávať amplitúdy, frekvencie, či fázové rozdiely. Takýto model oscilátora môže byť zložený z dvoch alebo viacerých oscilačných neurónov, pričom najčastejšie sa používa dvojica navzájom prepojených neurónov alebo trojica cyklicky prepojených neurónov (Obr. 18).



Obr. 18: Fázové oscilátorové modely.

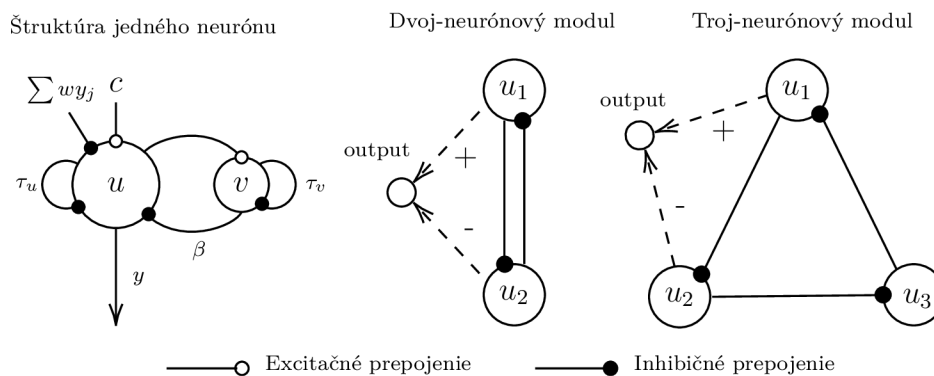
Výstupy neurónov fázového oscilátora sú vždy kladné, a majú periodický charakter (funkcia sínus). Fázový oscilátor je modelovaný súborom diferenciálnych rovníc rovnice:

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta}_i &= \omega + \sum_{s=1}^m w_{is} \sin(\theta_s - \theta_i - \phi_{is}), \quad i = 1, \dots, m \\
 \ddot{r}_i &= a_i \left(\frac{a_i}{4} (R_i - r_i) - \dot{r}_i \right) \quad i = 1, \dots, m \\
 y_i &= r_i (1 + \cos(\theta_i)) \quad i = 1, \dots, m \\
 y_{out} &= y_1 - y_2
 \end{aligned} \tag{7}$$

kde θ_i a r_i predstavujú fázu a amplitúdu i -teho oscilátora v danom okamihu, ω a R_i sú vlastná frekvencia a amplitúda i -teho oscilačného neurónu, w_{is} predstavuje váhu prepojenia i -teho neurónu s s -tým neurónom, y_i je kladný rytmický výstup i -teho oscilačného neurónu, m je počet neurónov v module, ϕ_{is} je fázový rozdiel medzi i -tým a s -tým neurónom.

Ďalším populárnym typom oscilátorov sú Matsuoka oscilátory [25], [33], ktoré oscilujú na princípe schopnosti prispôsobenia sa sensorickému vstupnému signálu. Pre tvorbu Matsuoka oscilátora sa najčastejšie využíva dvojica inhibične prepojených neurónov, z ktorej jeden neurón funguje ako flexor, a druhý ako extenzor. Štruktúra Matsuoka oscilátora nie je obmedzená na počet neurónov, avšak väčšinou

sa stretávajú s modelmi s dvojicou navzájom prepojených neurónov, alebo s trojicou cyklicky prepojených neurónov. Na obrázku Obr. 19 je zobrazená ako štruktúra jedného neurónu, tak aj dvojica základných prepojení jednotlivých neurónov v CPG module.



Obr. 19: Matsuoka oscilátorové modely.

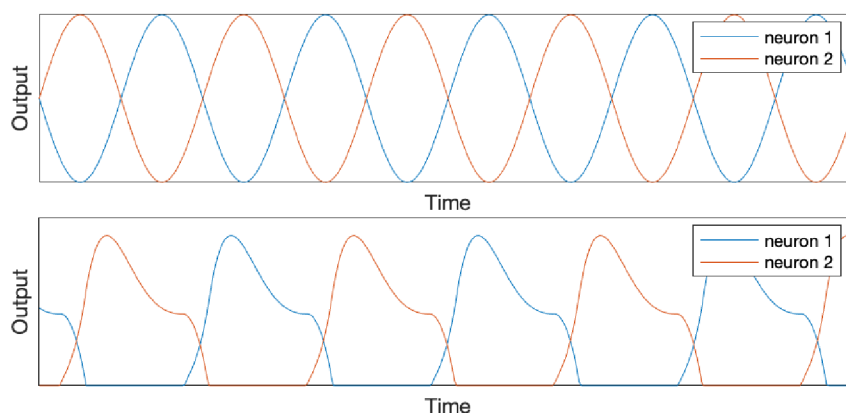
Výstupy jednotlivých neurónov sú kladné alebo nulové a majú periodický charakter. Na rozdiel od výstupov neurónov fázových oscilátorov, výstupy Matsuoka oscilátorov neimitujú tvar sínusoidy a tvar výstupov je daný parametrami oscilátora. Samotný neurón, ktorý nie je súčasťou m -tice prepojených neurónov nie je schopný oscilácie. Matsuoka oscilátor má jednoduchú štruktúru a je modelovaný súborom diferenciálnych rovníc:

$$\begin{aligned}
 \tau_u \dot{u}_i &= c_i - \beta v_i + \sum_{s=1}^m w_{is} y_s - u_i, \quad i = 1, \dots, m \\
 \tau_v \dot{v}_i &= y_i - v_i, \quad i = 1, \dots, m \\
 y_i &= g(u_i) = \max(0, u_i), \quad i = 1, \dots, m \\
 y_{out} &= y_1 - y_2,
 \end{aligned} \tag{8}$$

kde m je počet neurónov v module CPG, u_i je membránový potenciál i -teho neurónu, v_i je premenná reprezentujúca stupeň adaptácie i -teho neurónu, c_i je tonický vstup i -teho neurónu, τ_u a τ_v sú časové konštanty, β je adaptačný koeficient, w_{is} je váha medzi-neurónového prepojenia i -teho a s -tého neurónu v module, y_i je výstup i -teho neurónu v module CPG a y_{out} je výstup celého modulu CPG. Matsuoka oscilátor má niekoľko parametrov, ktoré musia byť správne naladené, aby bol systém schopný generovať rytmické výstupy. Pri ladení týchto parametrov je nutné držať sa obmedzení:

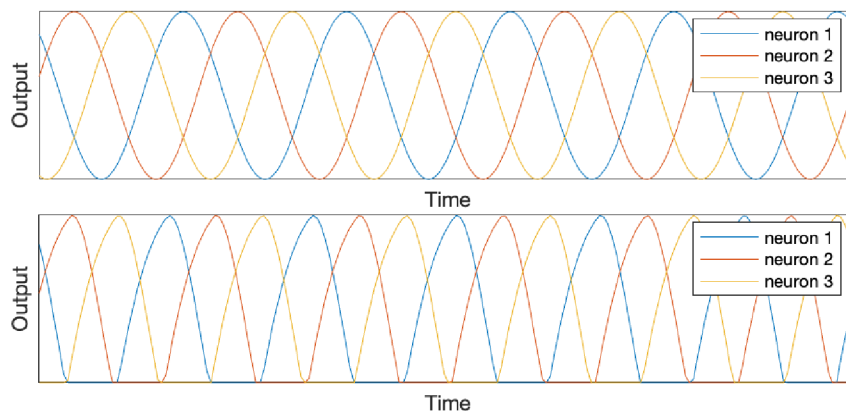
$$w/(1 + \beta) \leq 1, \quad \tau_u/\tau_v < w. \tag{9}$$

Porovnanie výstupov jednotlivých neurónov fázových oscilátorov a Matsuoka oscilátorov v module zloženom z dvojice navzájom prepojených neurónov je zobrazené na obrázku Obr. 20.



Obr. 20: Porovnanie výstupov fázových oscilátorov (hore) a Matsuoka oscilátorov (dole) v module zloženom z dvoch navzájom prepojených neurónov.

Porovnanie výstupov jednotlivých neurónov fázových oscilátorov a Matsuoka oscilátorov v module zloženom z trojice cyklicky prepojených neurónov je zobrazené na obrázku Obr. 21.



Obr. 21: Porovnanie výstupov fázových oscilátorov (hore) a Matsuoka oscilátorov (dole) v module zloženom z troch cyklicky prepojených neurónov.

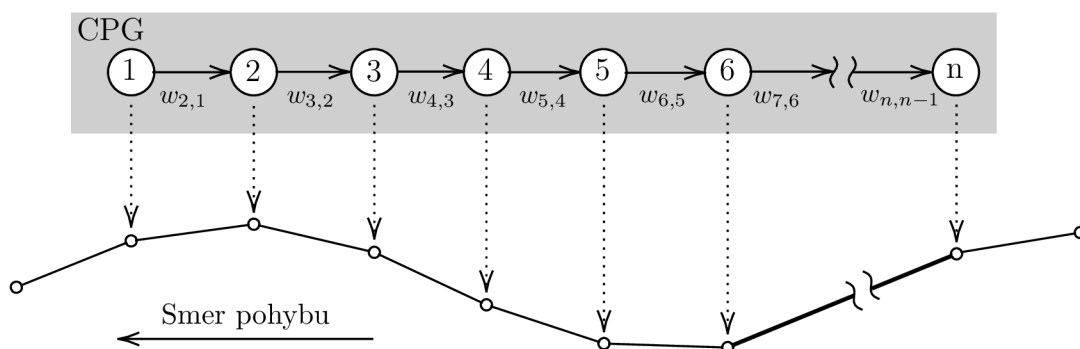
Siete CPG sa často využívajú pre riadenie pohybu robotických hadov. Keďže všetky druhy pohybov biologických hadov majú rytmický charakter, vhodným rytmickým generovaním vzorov pohybu môžeme dosiahnuť ľubovoľný požadovaný pohyb mechanizmu. Rytmické signály, ovládajúce rytmické natáčanie jednotlivých kĺbov, možno jednoducho generovať pomocou siete CPG.

Riadeniu polohy jedného motorizovaného kĺbu robotického hada zodpovedá jeden výstup modulu CPG. Pre riadenie pohybu robota je potrebných niekoľko po

sebe nasledujúcich rytmických signálov s určitým fázovým posuvom. Je teda nevyhnutné použiť sieť zloženú z viacerých modulov CPG na skonštruovanie neurónovej siete, napodobňujúcej nervový systém hada. Je nutné, aby táto sieť mala minimálne n výstupov, tak že n je počet motorizovaných kĺbov daného robotického hada. Doposiaľ bolo uskutočnených viacero výskumov riadenia robotických hadov pomocou CPG, pričom väčšina týchto štúdií využívala oscilátorový model CPC zložený z fázových oscilátorov [7], [21] [32], [40] alebo Matsuoka oscilátorov [24], [48].

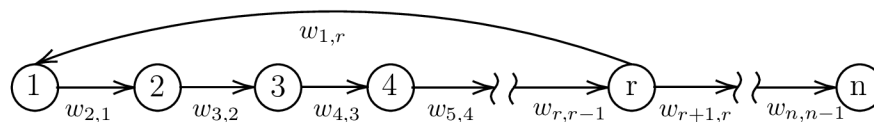
Základnou úlohou pre riadenie robotického hada pomocou modelu CPG je návrh vhodnej topológie prepojení jednotlivých CPG modulov tak, aby výstupmi siete boli rytmické signály s jednotnou amplitúdou a s jednotným fázovým rozdielom medzi dvomi susednými výstupmi.

Pri oscilátorových modeloch využívajúcich Matsuoka oscilátorov sa často využíva jednostranné prepojenie modulov s otvorenou slučkou. Výstupom siete s takouto štruktúrou nezískame jednotné amplitúdy a fázové rozdiely, preto sa pre získanie vhodnejších rytmických signálov vyžaduje ďalší výpočet na výstupe. Schematické znázornenie implementácie takejto siete je zobrazené na obrázku Obr. 22.



Obr. 22: Implementácia siete CPG s jednostranným prepojením s otvorenou slučkou.

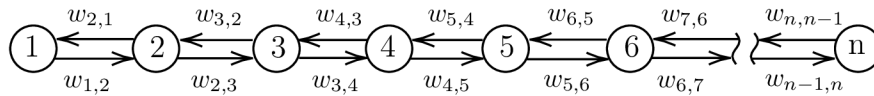
Pre získanie vhodnejšieho výstupného signálu, bez nutnosti akýchkoľvek ďalších výpočtov, bola navrhnutá sieť so spätnoväzobným prepojením, ktoré generuje rytmický výstup s jednotnou amplitúdou a fázovým rozdielom. Príklad siete CPG so spätnoväzobným prepojením môžeme vidieť na obrázku Obr. 23.



Obr. 23: Sieť CPG so spätnoväzobným prepojením.

Pri použití oscilátorového modelu CPG zloženého z fázových oscilátorov sa často využíva taká topológia prepojení medzi modulmi, že i -ty modul je prepojený

s modulom $i + 1$ a s modulom $i - 1$ pre $i = 1, \dots, n$. Takýto oscilátorový model CPG zložený z n modulov môžeme vidieť na obrázku Obr. 24



Obr. 24: Sieť CPG zložená z i fázových oscilátorov.

Vhodným nastavením amplitúd a fázových rozdielov medzi jednotlivými oscilačnými neurónmi v CPG sieti je možné dosiahnuť rytmických výstupov s jednotnou amplitúdou, vhodných pre riadenie robotického hada. Takéto modely sú veľmi populárne pre rôzne aplikácie, vďaka svojej flexibilitě pri nastavovaní amplitúd a fázových rozdielov.

2.3.3 CGA

Metóda riadenia robotických hadov založená na konformnej geometrickej algebre (CGA) [14] je relatívne nová, vysoko efektívna metóda riadenia. Nevýhodou tejto metódy je predpoklad, že kolieska sa len kotúľajú, šmyková sila je teda nekonečná, čo znevýhodňuje fyzikálnu realizáciu (napríklad narovnaný had sa nedokáže ohnúť do tvaru serpentinoidnej krivky). Myšlienkou tejto metódy je interpretovanie kinematiky robotických hadov do jazyku algebry CGA, kde lineárne objekty sú sféry dimenzie 2, 1 a 0. Pre lineárne modely robotických hadov je obzvlášť používaná Cliffordova algebra $Cl(3, 1)$, kde dvoj-dimenzionálny Euklidov priestor je mapovaný ako $x \rightarrow x + \frac{1}{2}x_\infty^2 + e_0$. Pre modelovanie robotických hadov pohybujúcich sa v 3-dimenzionálnom priestore sa zvyčajne využíva Cliffordova algebra $Cl(4, 1)$ [18]. Keďže je táto metóda riadenia robotických hadov relatívne nová, doposiaľ nebolo uskutočnených mnoho výskumov v tejto oblasti.

Uvažujme robotického hada zloženého z n tuhých článkov prepojených pomocou $n - 1$ motorizovaných kĺbov. K jednotlivým článkom tohoto robotického hada je pripojená dvojica pasívnych koliesok, ktorá robotovi umožňuje pohyb v 2-dimenzionálnom prostredí. Pre zjednodušenie práce s rovnicami budeme uvažovať robota s článkami konštantnej dĺžky 1, a s kolieskami pripojenými v ľubovoľných bodoch jednotlivých článkov.

Bodmi $p_i = (x_i, y_i)$, $i = 0, \dots, n$ rozumieme koncové body článkov hada tak, že bod p_{i-1} značí počiatok i -teho článku a bod p_i značí jeho koniec. Body Q_i popisujú polohu koliesok i -teho článku a platí $r_i p_i + (1 - r_i) p_{i-1}$, $r_i \in \langle 0, 1 \rangle$, $i = 0, \dots, n$. Popísanie skutočnej polohy takéhoto robotického hada v Euklidovskej rovine je možné pomocou súradníc:

$$q = (x, y, \theta, \Phi_1, \dots, \Phi_{n-1}), \quad (10)$$

kde súradnice x a y popisujú polohu hlavy hada v 2-dimenzionálnom priestore, uhol θ je uhol ktorý zvierá prvý článok hada s osou x , a súradnice ϕ_i reprezentujú uhol, ktorý zvierajú články i a $i + 1$. Pomocou súradníc (10) získame súradnice polohy koliesok pripojených k jednotlivým článkom podľa rovníc:

$$\begin{aligned} Q_{x,i} &= P_{x,0} + \sum_{j=1}^{i-1} \cos \theta_j + r_i \cos \theta_i, \\ Q_{y,i} &= P_{y,0} + \sum_{j=1}^{i-1} \sin \theta_j + r_i \sin \theta_i, \end{aligned} \quad (11)$$

kde θ_i je absolútny uhol natočenia i -teho článku a platí:

$$\theta_i = \theta + \sum_{j=1}^{i-1} \phi_j. \quad (12)$$

Pre popísanie robotického hada pomocou algebry CGA uvažujeme jednotlivé články ako párové body $P_i, i = 1, \dots, n$, pre ktoré platí:

$$P_i = p_{i-1} \wedge p_i. \quad (13)$$

Poloha koncových bodov p_{i-1} a p_i môže byť dopočítaná podľa vzorcov:

$$\begin{aligned} p_{i-1} &= \frac{-\sqrt{P_i \cdot P_i} + P_i}{e_\infty \cdot P_i}, \\ p_i &= \frac{\sqrt{P_i \cdot P_i} + P_i}{e_\infty \cdot P_i}. \end{aligned} \quad (14)$$

Kinematika robotického hada je v algebre CGA daná postupnosťou rotácií R_i a translácií T_i , ktorá sa uvádza ako motor M_i [19]. Poloha bodu p_i môže byť v každom stave $q = (x, y, \theta, \Phi_1, \dots, \Phi_{n-1})$ dopočítaná z jeho počiatočnej polohy $p_i(0)$ podľa vzťahu:

$$p_i(q) = M_i p_i(0) \tilde{M}_i, \quad i = 0, \dots, n, \quad (15)$$

kde motor M_i je definovaný ako:

$$\begin{aligned} M_0 &= T = 1 - \frac{1}{2}(xe_1 + ye_a)e_\infty, \\ M_i &= R_i \dots R_1 T, \quad i \neq 0. \end{aligned} \quad (16)$$

kde R_i je rotácia podľa vzťahu:

$$\begin{aligned} R_{i+1} &= e^{-\phi_i L_i} = \cos \frac{\phi_i}{2} - \sin \frac{\phi_i}{2} L_i, \\ L_i &= M_i L_i(0) \tilde{M}_i. \end{aligned} \quad (17)$$

Pokiaľ je počiatočná poloha robotického hada popísaná súradnicami $q_0 = (0, \dots, 0)$, potom:

$$\begin{aligned} P_i(0) &= ie_1 + \frac{1}{2}i^2e_\infty + e_0, \\ L_i(0) &= ie_2 \wedge e_\infty - e_1 \wedge e_2. \end{aligned} \quad (18)$$

Výsledkom je kinematický reťazec ekvivalentný s rovnicami (11). Diferenciálna kinematika robotického hada je získaná diferenciáciou tohoto kinematického reťazca a pre polohy jednotlivých koliesok platí:

$$\dot{Q}_i = Q_i \cdot (e_1 \wedge e_2)\dot{x} + Q_i \cdot (e_2 \wedge e_\infty)\dot{y} + \sum_{j=1}^{i-1} (Q_i \cdot L_j)\dot{\phi}_j. \quad (19)$$

2.4 Simulačný softvér

Simulátory hrajú vo výskume robotiky dôležitú úlohu ako nástroje na testovanie účinnosti, bezpečnosti a odolnosti nových algoritmov. Robotické simulátory sa líšia v rôznych funkciách a možnostiach simulácie, majú však spoločný cieľ, a to čo najvernejšie replikovať robotické aplikácie v reálnom svete v požadovaných aspektoch. Niektoré softvéry umožňujú iba jednoduchú simuláciu v 2-dimenzionálnom prostredí a berú v úvahu len niektoré aspekty robotiky, zatiaľ čo iné umožňujú komplexnú simuláciu v realistickom 3-dimenzionálnom prostredí so zložitými fyzikálnymi vlastnosťami a motormi. Väčšina simulačných softvérov je kompatibilná s jedným alebo viacerými známymi programovacími jazykmi ako sú jazyky C/C++, Python, Java, MATLAB a množstvo ďalších.

2.4.1 Webots

Webots [11] je užívateľsky príjemný open-source simulátor mobilných robotov, ktorý vyvinula švajčarska spoločnosť Cyberbotics ako nástroj na skúmanie rôznych riadiacich algoritmov v mobilnej robotike.

Simulátor Webots využíva kombináciu moderného GUI, fyzického enginu ODE (Open Dynamics Engine) a renderovacieho enginu OpenGL 3.3 na simuláciu v realistickom 3D prostredí. Robot môže byť programovaný v jazykoch C/C++, Python, Java, MATLAB alebo ROS pomocou jednoduchého API pokrývajúceho všetky základné robotické potreby.

Webots umožňuje zostavenie scén z rôznych voľne modifikovateľných komponentov stiahnutelných z Webots knižnice (roboty, senzory, akčné členy, objekty, materiály). Podporované je aj importovanie vlastných modelov (CAD, Blender, URDF) a importovanie vlastných máp a informácií o teréne (OpenStreetMap). Softvér berie

do úvahy nielen grafické vlastnosti, ako sú napríklad tvary, rozmery, polohy, orientácie, farby a textúry, ale aj fyzikálne vlastnosti ako je hmotnosť, súčiniteľ trenia či pružinové a tlmiace konštanty.

Simulátor Webots má široké využitie pri simulácii dvojkoľosových stolových robotov, modulárnych robotov, dvojných robotov, viacnohých robotov, pásových robotov, priemyselných ramien, automobilov, lietajúcich dronov, kozmických dopravných prostriedkov, autonómnych dopravných prostriedkov a mnohých ďalších (Obr. 25).



Obr. 25: Príklady simulácie robotov vo Webots (vľavo robot Robotics-Op3, v strede model robota Salamander, vpravo robot Pioneer 3-AT). [47]

Simulátor Webots poskytuje presné modelovanie kolízií a kontaktov, čo umožňuje simuláciu širokej škály scenárov. Za chodu simulácie je možné robotmi a inými modelmi pohybovať pomocou myši, a so simuláciou je možné kedykoľvek komunikovať. Simuláciu je možné exportovať ako video, interaktívne HTML scény, animácie alebo ich možno streamovať vo webových prehliadačoch pomocou WebGL.

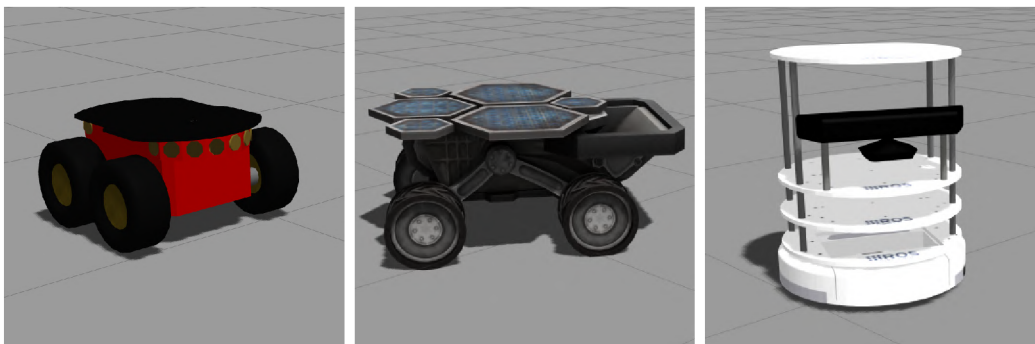
2.4.2 Gazebo

Gazebo [38] je lídrom v oblasti simulácie robotov. Ide o open-source 3D robotický simulátor poskytujúci platformu pre návrh, vývoj, testovanie a vizualizáciu takmer všetkých druhov robotov v najrôznejších prostrediach. Gazebo funguje na systémoch Linux, Windows a Mac a má zabudovanú podporu pre ROS a Player.

Gazebo môže pre dynamickú simuláciu využívať integráciu viacerých vysoko výkonných fyzikálnych enginov ako sú ODE, Bullet, Simbody či DART. Vďaka technológii ORGE 3D Graphics poskytuje kvalitné vykreslenie trojrozmerných prostredí s veľmi dobrým osvetlením, tieňmi a textúrami.

Gazebo ponúka schopnosť presne a efektívne simulovať populácie stoviek jednoduchých robotov alebo malého množstva zložitých robotov v zložitých vnútorných alebo vonkajších prostrediach. Tento simulátor poskytuje niekoľko už vytvorených modelov robotov (PR2, Pioneer2 DX, iRobot Create, TurtleBot, atď.) (Obr. 26), a taktiež umožňuje zostavenie vlastných robotov použitím formátu SFD (Simulation

Description Format), ktorý popisuje objekty a prostredia pre robotické simulátory, vizualizáciu a riadenie. Simulátor Gazebo podporuje širokú škálu senzorov (laserové zameriavače, fotoaparáty, atď.), pričom môže simulovať aj šum a ich zlyhanie, čím umožňuje simuláciu problémov, ktoré môžu nastať v reálnom svete.



Obr. 26: Príklady simulácie robotov v prostredí Gazebo (vľavo robot Pioneer 3-AT, v strede robot Mars Rover, vpravo robot TurtleBot).

2.4.3 CoppeliaSim (V-REP)

CoppeliaSim [8] je nástupcom populárneho robotického simulátora V-REP [41]. Simulátor CoppeliaSim je 100% kompatibilný s V-REP, má však viac funkcií a je rýchlejší. Ide o simulačný softvér založený na architektúre distribuovaného riadenia, čo znamená, že každý objekt či model je možné ovládať samostatne pomocou pridruženého skriptu. Softvér je kompatibilný s Windows, Mac a Linux a plne podporuje šesť rôznych často používaných programovacích jazykov (C/C++, Python, Java, MATLAB, Lua alebo Octave), má tiež podporu ROS a BlueZero. Softvér je k dispozícii na stiahnutie buď s bezplatnou študentskou licenciou, s bezplatnou obmedzenou licenciou alebo s platenou licenciou určenou na komerčné účely.

CoppeliaSim využíva pre dynamickú simuláciu štyri výkonné fyzikálne enginy (ODE, Bulet Physics, Newton a Vortex Dynamics), ktoré umožňujú rýchle a prispôbitelné výpočty dynamiky dodržiujúcej fyzikálne zákony. Softvér dokáže presne zvládnuť interakcie objektov ako sú kolízie, kontaktné body a uchopenie. Tento simulačný softvér taktiež podporuje prispôbitelné častice, ktoré možno použiť na simuláciu prúdov vzduchu alebo vody, prúdových motorov, vrtúl a mnoho ďalších.

CoppeliaSim poskytuje stále sa rozširujúcu knižnicu, ktorá poskytuje nielen množstvo základných súčiastok, senzorov, akčných členov ale aj viacero komplexných modelov robotov a prostredí. V rámci simulátora CoppeliaSim je možné zostaviť širokú škálu modelov, od senzorov a akčných členov až po komplexné robotické systémy použitím kombinácie súčiastok z poskytnutej knižnice. Simulátor CoppeliaSim taktiež podporuje importovanie vlastných modelov, ktoré však musia byť vo

formáte, ktorý popisuje objekty pomocou trojuholníkových sietí (OBJ, DXF, STL, COLLADA, URDF).

Simulačný softvér CoppeliaSim má široké využitie pre simuláciu kamerových senzorov s mnohými možnosťami spracovania obrazu, plánovanie cesty, plánovanie pohybu, testovanie rôznych algoritmov a simuláciu širokej škály robotov (Obr. 27). CoppeliaSim umožňuje plnú interakciu so scénou aj počas behu simulácie. Počas simulácie je možné modely a scény posúvať, otáčať, kopírovať, prilepovať, meniť mierku, mazať atď. bez potreby upravovania akéhokoľvek kódu.



Obr. 27: Príklady simulácie robotov v prostredí CoppeliaSim (vľavo robot ACM-R5, v strede robot Pioneer 3-DX, vpravo robot rollerWalker).

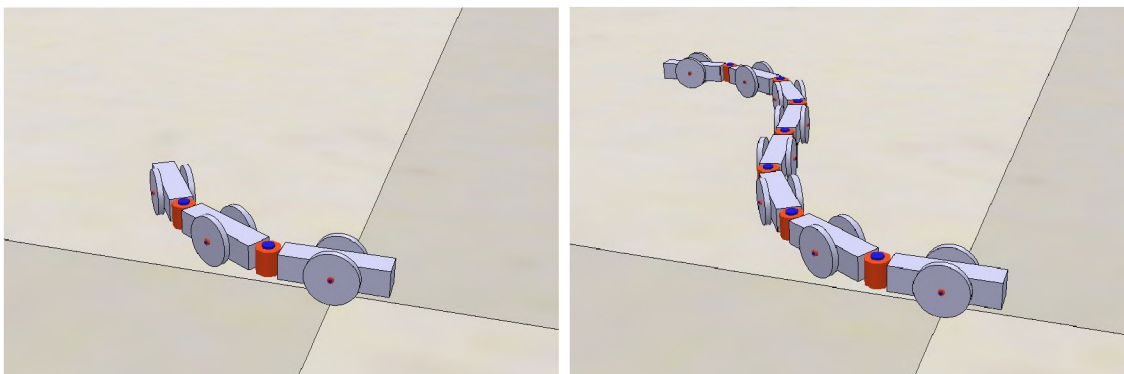
3 Vlastné riešenie

V tejto kapitole sa budeme zaoberať vlastným návrhom robotického hada, jeho zostavením a simuláciou v programe CoppeliaSim a jeho následným riadením trojicou rôznych metód (Serpentinoid, CPG(fázové oscilátory), CPG(Matsuoka oscilátory)). Cieľom tejto kapitoly je vytvoriť mobilný model robotického hada v simulačnom prostredí, ktorý bude následne ovládaný pomocou spomenutých metód riadenia. U jednotlivých metód riadenia bude pozorovaný vplyv rôznych parametrov na signály riadiace motorizované kĺby robotického hada, a ich vplyv na rýchlosť a energetickú spotrebu daného mechanizmu. Na záver budú prehľadávacím algoritmom nájdené optimálne nastavenia parametrov riadenia pre maximalizáciu rýchlosti, minimalizáciu spotreby, a maximalizáciu pomeru rýchlosti a spotreby konkrétnych modelov robotických hadov.

3.1 Model robotického hada

Táto práca sa zaoberá robotickým hadom zloženým z pasívnych koliesok a aktívnych kĺbov, pohybujúcim sa v 2-dimenzionálnom priestore. Obecne môže ísť o robota zloženého z ľubovoľného počtu článkov, avšak pre účely tejto práce sa budeme zaoberať modelom zloženým z troch článkov a modelom zloženým z ôsmich článkov. Návrh týchto modelov je inšpirovaný robotmi popísanými v kapitole 2.2.

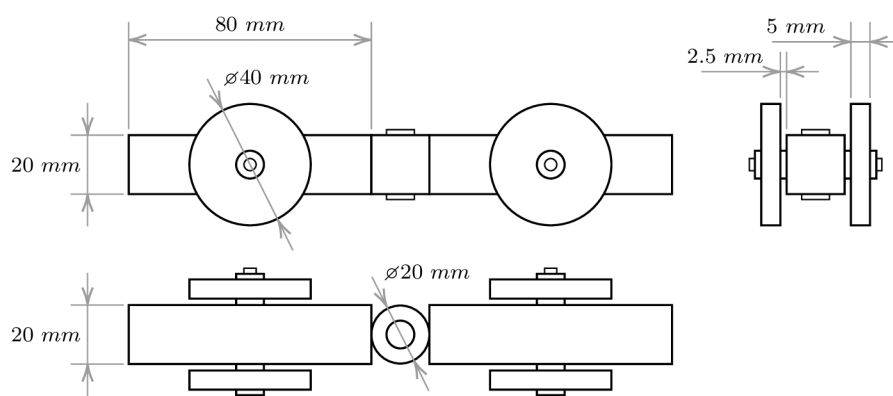
Na simuláciu modelov robotických hadov bol použitý simulačný softvér CoppeliaSim, ktorý ponúka niekoľko základných objektov a súčiastok, z ktorých boli vymodelované modely robotov (Obr. 28).



Obr. 28: Model 3-článkového a 8-článkového robotického hada v prostredí simulačného programu CoppeliaSim.

Na vymodelovanie jednotlivých článkov boli použité jednoduché kvádre s rozmermi $0.08m \times 0.02m \times 0.02m$ a s hmotnosťou $150g$, ku ktorým bolo pomocou pasívnych rotačných kĺbov pripojené kolieska vymodelované z valcov s výškou $0.005m$,

s priemerom $0.04m$ a s hmotnosťou $30g$. Aby sa kolieska nešúchali o články robotického hada, a nezabraňovali tak pohybu, je nutné ich od tela miene odsadiť. Ku každému článku boli pripojené dve kolieska, každé z jednej bočnej strany, v strede článku a jednotlivé články boli prepojené motorizovanými kĺbmi (Obr. 29). Model zložený z troch článkov má celkovú dĺžku $0.28m$ a váži $0.63kg$ a model zložený z ôsmich článkov má celkovú dĺžku $0.78m$ a váži $1.68kg$.



Obr. 29: Geometria robotického hada.

Aby bolo hada možné riadiť, je nutné nastaviť kĺby spájajúce jednotlivé články na režim “Torque/force mode” a nastaviť ich parametre, ako napríklad maximálny krúťivý moment, či maximálne povolené natočenie. V našom prípade bol maximálny krúťivý moment motora kĺbov bol nastavený na $1Nm$, čo je pre robota týchto rozmerov a váh postačujúce. Maximálny uhol natočenia kĺbov bol nastavený na hodnotu 90 deg . Krútiaci moment kĺbu je riadený P regulátorom s proporcionálnou konštantou nastavenou na hodnotu $K_p = 0.1$.

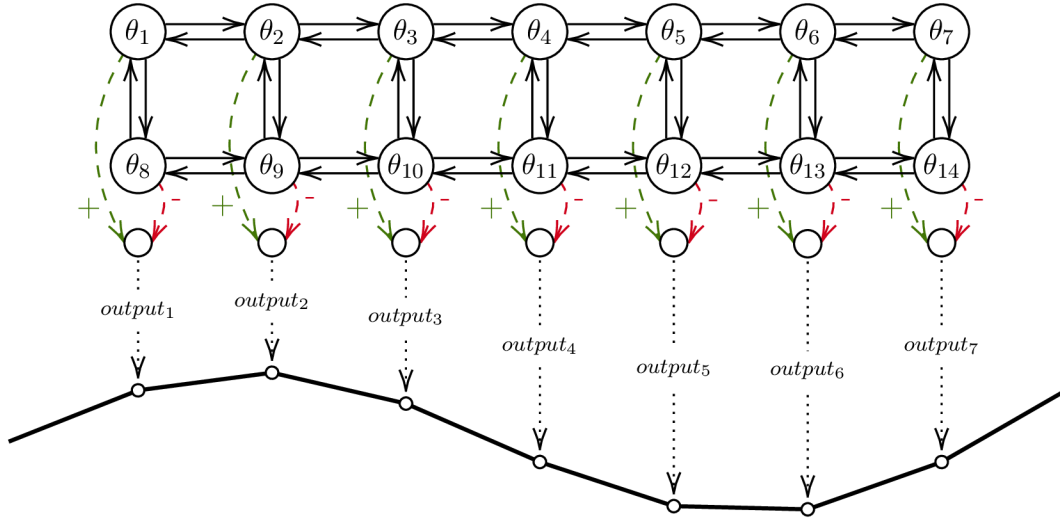
3.2 Návrh siete CPG

Pri riadení robotického hada budú použité dva populárne typy sietí CPG. V tejto kapitole sa zameriame na návrh siete CPG zloženej z fázových oscilátorov a na návrh siete zloženej z Matsuoka oscilátorov, predovšetkým na ich topológiu prepojenia a nastavenie jednotlivých váh prepojení a ich vplyv na výstupy siete.

3.2.1 Sieť CPG zložená z fázových oscilátorov

Sieť CPG pre riadenie 8-článkového robotického hada sa skladá zo siedmich modulov CPG, pričom každý z týchto modulov je zložený z dvoch obojstranne prepojených fázových oscilátorov oscilujúcich v antifáze. Moduly CPG sú prepojené tak, že každý modul je obojstranne prepojený so susednými modulmi. Výstupom modulov je rozdiel medzi prvým oscilátorom a druhým oscilátorom v danom module, pričom tieto

výstupy riadia natáčanie jednotlivých motorizovaných kĺbov robotického hada tak, že určujú jeho cieľovú polohu. Schematické zobrazenie tejto siete je znázornené na obrázku Obr. 30.



Obr. 30: Návrh siete CPG pre riadenie 8-článkového robotického hada.

Dynamiku populácie neurónov tohoto modelu siete CPG popisujú rovnice:

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta}_i &= \omega + \sum_{j=1}^{2N} w_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i - \phi_{ij}), \quad i = 1, \dots, 2N, \\
 \ddot{r}_i &= a_i \left(\frac{a_i}{4} (R_i - r_i) - \dot{r}_i \right) \quad i = 1, \dots, 2N, \\
 y_i &= r_i (1 + \cos(\theta_i)) \quad i = 1, \dots, 2N, \\
 y_{out,i} &= y_i - y_{i+N} \quad i = 1, \dots, N,
 \end{aligned} \tag{20}$$

kde N je počet modulov v sieti, θ_i a r_i predstavujú fázu a amplitúdu i -teho neurónu siete v danom okamihu, ω je frekvencia kmitania oscilačného neurónu a budeme uvažovať jednotné hodnoty pre všetky neuróny, R_i je vlastná amplitúda i -teho oscilačného neurónu siete, a platí, $R_1 = \dots = R_N = A_L$ a $R_{N+1} = \dots = R_{2N} = A_R$. Hodnota w_{ij} predstavuje váhu prepojenia i -teho neurónu s j -tým neurónom, y_i je výstup i -teho oscilačného neurónu a ϕ_{ij} je fázový rozdiel medzi i -tým a j -tým neurónom siete, a budeme uvažovať jednotné veľkosti medzi dvojicami susedných modulov. Dvojica neurónov v spoločnom module bude kmitať v antifáze, a veľkosť fázového rozdielu $\phi_{i,N}$ tak bude rovná π .

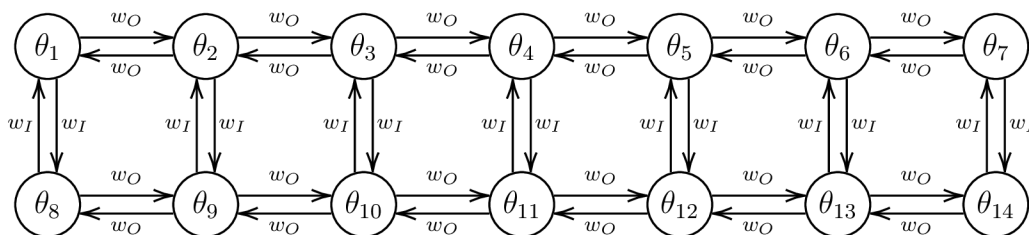
Vzťah medzi i -tým výstupom siete a požadovaným natočením i -teho motorizovaného kĺbu ϕ_i robotického hada je daný rovnicou:

$$\phi_i = \alpha y_{out,i}, \tag{21}$$

kde α je nenulová konstanta, a budeme uvažovat $\alpha = 1$.

Tento model siete CPG umožňuje intuitívne riadenie zmien smeru pohybu robotického hada upravovaním amplitúd jednotlivých oscilátorov, pričom platí, že $A_1 = \dots = A_N = A_L$ a $A_{N+1} = \dots = A_{2N} = A_R$, kde N je celkový počet modulov v danej sieti a A_i je amplitúda i -teho oscilátora pre $i = 1, \dots, 2N$. Pre dosiahnutie priamočiareho pohybu musia byť amplitúdy A_L a A_R rovné. V prípade že $A_L > A_R$ (resp. $A_L < A_R$) dochádza k zmene smeru pohybu natáčaním doľava (resp. doprava). Takýto model CPG zaručuje jednotnú amplitúdu $A = A_L + A_R$ a jednotný fázový rozdiel na výstupe, čo robí tento model vhodným prostriedkom riadenia robotických hadov.

Pri úlohe riadenia robotického hada je žiadúce, aby jednotlivé kĺby mali rovnaký charakter správania, a preto je vhodné zvoliť váhy prepojenia medzi jednotlivými neurónmi v jednom module CPG rovnaké pre všetky moduly. Váhy prepojenia neurónov v rámci jedného modulu sa zvyčajne volia taktiež jednotné, aj keď to nie je nutnosťou. V nami navrhutej sieti CPG (Obr. 30) sa jeden modul skladá z dvojice navzájom prepojených oscilačných neurónov a budeme uvažovať váhy jednotlivých medzi-neurónových prepojení také, pre ktoré platí, že $w_{i,i+N} = w_{i+N,i} = w_I \neq 0$ kde i značí index neurónu v sieti CPG. Váhy prepojenia jednotlivých modulov sú dané topológiou siete CPG. Pre dosiahnutie vhodného výstupu siete CPG pre riadenie robotického hada je nutné, aby boli váhy medzi jednotlivými dvojicami susediacich modulov CPG rovnaké. Ak sú moduly CPG prepojené jednostranne platí $w_{j,i} = w_O \neq 0$ a $w_{i,j} = 0$ pre $i = j - 1$ a ak sú moduly prepojené obojstranne, potom platí $w_{j,i} = w_{i,j} = w_O \neq 0$ pre $i = j - 1$ kde $w_{j,i}$ je váha prepojenia i -teho modulu CPG do j -teho modulu CPG. Pre účely tejto práce budeme uvažovať model, v ktorom sú susediace moduly prepojené obojstranne. Jednotlivé váhy prepojení oscilátorov v sieti CPG z obrázku Obr. 30 sú zaznačené v schéme na obrázku Obr. 31.



Obr. 31: Váhy prepojení medzi jednotlivými oscilátormi v sieti CPG.

Podľa rovníc (20) bol vytvorený algoritmus pre výpočet výstupov modulov CPG v programe MATLAB:

```

for i = 1 : 2 * N
    theta_d = omega;
    for j = 1 : 2 * N
        theta_d = theta_d + w(i,j) * sin(theta(j) - ...
            theta(i) - phi(i,j));
        new_theta(i) = theta(i) + dt * theta_d;
        r_dd = a(i) * ((a(i)/4) * (R(i) - r(i)) - r_d(i));
        new_r_d(i) = r_d(i) + dt * r_dd;
        new_r(i) = r(i) + dt * new_r_d(i);
    end
end

for j = 1 : 2 * N
    theta(j) = new_theta(j);
    r(j) = new_r(j);
    r_d(j) = new_r_d(j);
    y(j) = r(j) * (1 + cos(theta(j)));
end

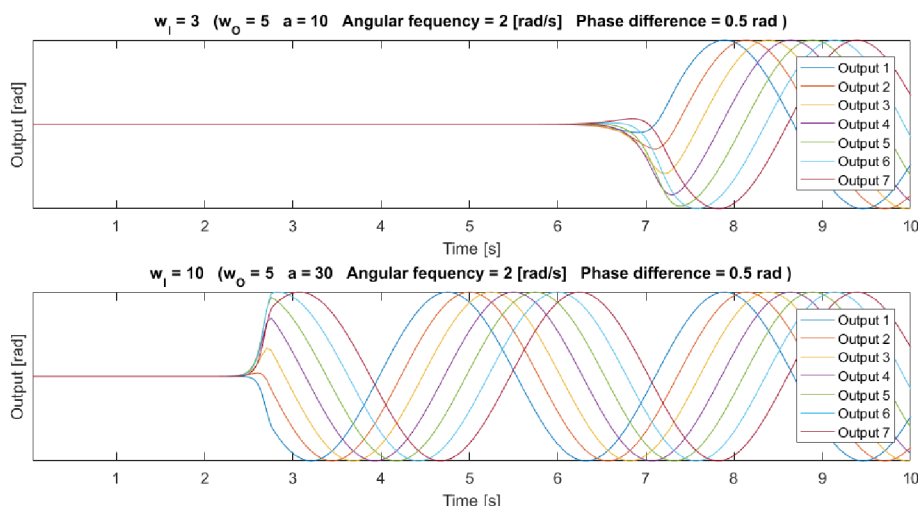
for i = 1 : N
    y_out(i) = y(i) - y(N + i);
end

```

Tento algoritmus taktiež možno použiť k riadeniu 3-člankového modelu robotického hada bez nutnosti akýchkoľvek úprav.

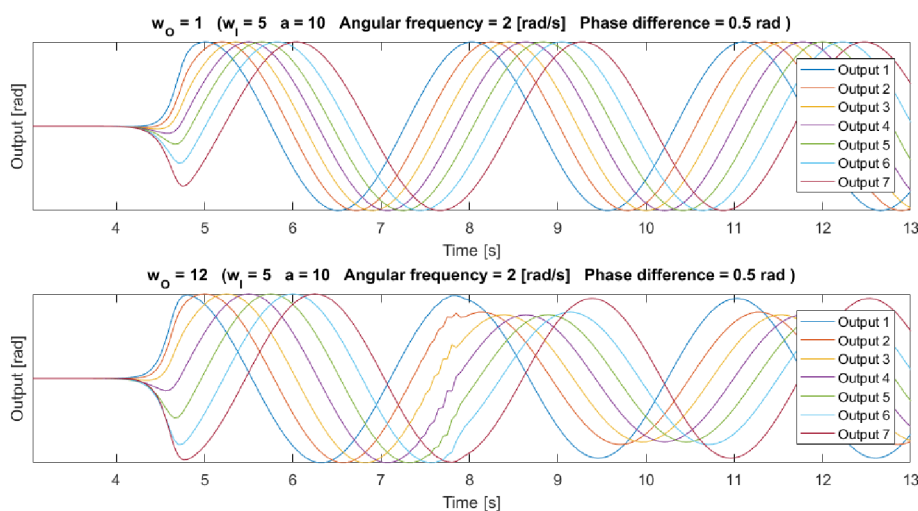
Dôležitú úlohu pri návrhu siete CPG hrá vhodné nastavenie váh prepojení medzi modulmi a jednotlivými oscilátormi v moduloch. Tieto váhy ovplyvňujú rýchlosť stabilizácie systému, a je teda nevyhnutné zvoliť také hodnoty, aby sa výstup siete stabilizoval za priateľne krátku dobu.

Voľba parametra w_I (váhy prepojenia oscilátorov vo vnútri modulu CPG) hrá významnú úlohu najmä vo hodnote amplitúdy výstupu modulu CPG v danom okamihu čím ovplyvňuje dĺžku trvania prechodu systému do ustáleného stavu, kedy amplitúdy výstupov dosiahnú žiadanej hodnoty. Z grafov na obrázku Obr. 32 môžeme pozorovať, že čím je hodnota w_I nižšia, tým je doba potrebná na dosiahnutie očakávaných výstupov siete dlhšia.



Obr. 32: Vplyv váh medzi-neurálních prepojení na výstupy siete CPG zloženej z fázových oscilátorov.

Volba parametra w_O (váhy prepojenia modulov CPG) má výrazný vplyv na rýchlosť ustálenia fázových rozdielov medzi výstupmi CPG. Na grafoch na obrázku Obr. 33 možno pozorovať, že čím je hodnota w_O menšia, tým je doba potrebná na ustálenie fázových rozdielov dlhšia.

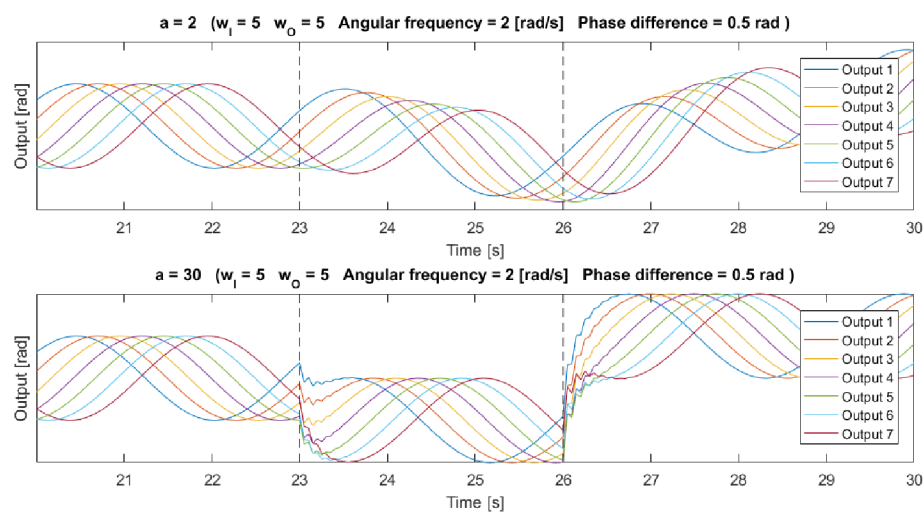


Obr. 33: Vplyv váh medzi-modulových prepojení na výstupy siete CPG zloženej z fázových oscilátorov.

Ďalšou dôležitou úlohou je nastavenie konštant a_i , $i = 1, \dots, 2N$, ktoré ovplyvňujú rýchlosť adaptácie amplitúd jednotlivých oscilátorov, čo určuje rýchlosť stabilizácie systému po zmene riadenia. Čím sú tieto konštanty vyššie, tým je rýchlosť odozvy systému na zmenu riadenia vyššia, to však neznamená, že čím sú konštanty a_i vyššie, tým je nastavenie systému lepšie. Príliš vysoké hodnoty a_i majú

na svedomí príliš vysoké zrýchlenie zmeny amplitúd r_i , čo znamená, že pri zmene riadenia robotického hada je potrebné vyvinúť veľmi vysoký krúťivý moment, ktorý by prekračoval možnosti motorizovaného kĺbu, alebo by dochádzalo k príliš vysokej spotrebe energie. Cieľom nastavenia týchto hodnôt je získanie takých výstupných funkcií siete, u ktorých nedochádza k príliš veľkej alebo príliš malej zmene za malú zmenu času, a pohyb hada tak zostáva plynulý. Pri riadení robotického hada pomocou siete CPG je žiadúce, aby všetky výstupy mali rovnaký charakter, a preto budeme uvažovať $a_1 = a_2 = \dots = a_{2N} = a$.

V grafoch na obrázku Obr. 34 možno pozorovať, že pri príliš nízkej hodnote konštanty a sa výstupy CPG siete ustália až po niekoľkých sekundách, čo je zvyčajne veľmi nežiadúce. V opačnom prípade, kedy hodnota konštanty a je veľmi vysoká, dochádza k ustáleniu výstupov siete CPG na požadovaných hodnotách v priebehu niekoľkých desiatok milisekúnd, avšak pohyb robota v čase prechodu nemusí byť plynulý. Vhodné nastavenie parametra a je také nastavenie, pri ktorom sa výstupy po zmene riadenia ustália za dostatočne krátku dobu, a zároveň počas doby prechodu je pohyb robota plynulý a nedochádza k nadmernej spotrebe energie.

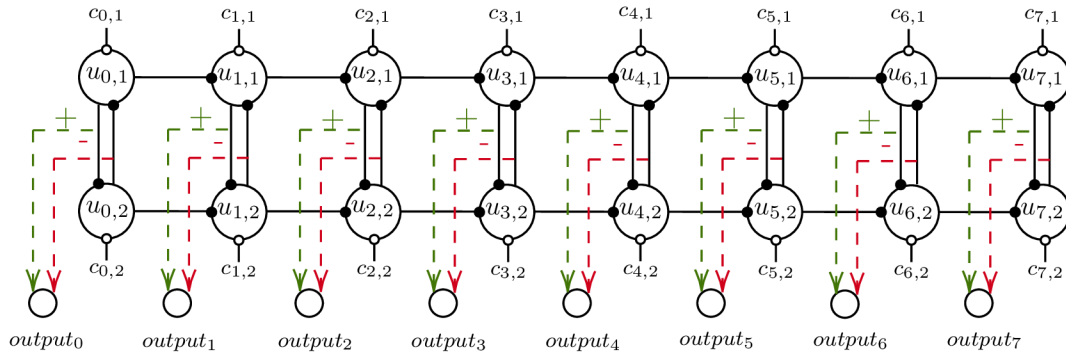


Obr. 34: Vplyv adaptačných koeficientov na výstupy siete CPG zloženej z fázových oscilátorov.

3.2.2 Sieť CPG zložená z Matsuoka oscilátorov

Pre riadenie 8-článkového robotického hada bola ďalej navrhnutá sieť z ôsmich jednostranne prepojených CPG modulov, Matsuoka oscilátorov, zložených z dvojice inhibične prepojených neurónov (Obr. 35). Ide o sieť CPG s otvorenou slučkou, čo je pre menej-článkové mechanizmy vhodnejší prístup, než sieť so spätnoväzobným prepojením, pretože umožňuje lepšie nastavenie fázových rozdielov. Pre zachovanie jednotného charakteru správania modulov, budú váhy medzi jednotlivými modulmi

(resp. neurónmi v module) jednotné a rovné w_O (resp. w_I), podobne ako u modelu z fázových oscilátorov.



Obr. 35: CPG sieť zložená z Matsuoka oscilátorov.

Ako možno vidieť na obrázku Obr. 35, stavy jednotlivých neurónov nie sú závislé len na neuróne, s ktorým spoločne tvoria i -ty modul CPG, ale sú ovplyvnené aj výstupom jedného neurónu zo susedného modulu s indexom $i - 1$. Takýto druh siete sa nazýva sieť CPG s otvorenou slučkou a jej dynamiku popisujú rovnice :

$$\begin{aligned}
 \tau_u \dot{u}_{0,j} &= c_{0,j} - \beta v_{0,j} + w_I y_{0,s} - u_{0,j}, \\
 \tau_u \dot{u}_{i,j} &= c_{i,j} - \beta v_{i,j} + w_I y_{i,s} - w_O y_{i-1,j} - u_{i,j}, \quad i = 1, \dots, n-1, \quad j = 1, 2, \\
 \tau_v \dot{v}_{i,j} &= y_{i,j} - v_{i,j}, \quad i = 0, \dots, n-1, \quad j = 1, 2, \\
 y_{i,j} &= g(u_{i,j}) = \max(0, u_{i,j}), \quad i = 0, \dots, n-1, \quad j = 1, 2 \\
 y_{out,i} &= y_{1,i} - y_{2,i}, \quad i = 0, \dots, n-1,
 \end{aligned} \tag{22}$$

$$s = \begin{cases} 2, & \text{ak } j = 1, \\ 1, & \text{ak } j = 2 \end{cases}$$

kde n je celkový počet modulov v sieti, $u_{i,j}$, $v_{i,j}$ a $z_{i,j}$ sú membránový potenciál, únavový efekt a výstup j -teho neurónu v i -tom module CPG, $c_{i,j}$ je tonický vstup j -teho neurónu v i -tom module. Pre zachovanie jednotného charakteru výstupov je nutné aby platilo $c_{k,j} = c_{k,j}$, $k = 1, \dots, n-1$. Parameter β je adaptačný koeficient, w_I je váha prepojenia medzi neurónmi v jednom module, w_O váha prepojenia medzi modulmi, τ_u a τ_v sú časové konštanty a $y_{out,j}$ je výstup i -teho modulu.

Kedže ide o model s otvorenou slučkou, výstup nultého modulu nemá rovnaký charakter ako výstupy ostatných modulov (Obr. 36). Tento jav je dôsledkom toho, že nultý modul nie je ovplyvňovaný žiadnym iným modulom zo siete a jeho výstup je daný len vzájomnou interakciou dvojice neurónov (na ostatné moduly i , $i = 1, \dots, n-1$ vplýva aj modul $i-1$).

Podľa rovníc 22 bol vytvorený algoritmus pre výpočet výstupov tejto siete v programe MATLAB:

```

for i = 1 : N

    for j = 1 : 2
        if j == 1
            s = 2;
        else
            s = 1;
        end

        d_u = c(j) - u(i,j) - b * v(i,j) - w_i * y(i,s);
        for l = 1 : N
            if i == l + 1
                d_u = d_u - w_o * y(l,k);
            end
        end

        d_u = d_u/T_u;
        d_v = (y(i,j) - v(i,j))/T_v;

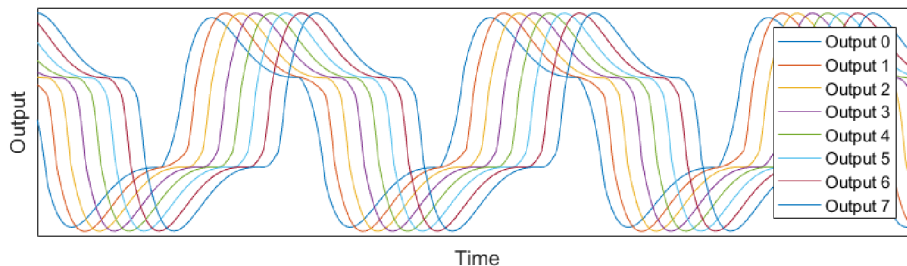
        u(i,j) = u(i,j) + (dt * d_u);
        v(i,j) = v(i,j) + (dt * d_v);
    end
end

for i = 1:N
    for j = 1:2
        y(i,j) = max(0,u(i,j));
    end
end

for i = 2 : N
    y_out(i-1) = y(i,1) - y(i,2);
end

```

Tento algoritmus je taktiež implementovateľný pre riadenie 3-článkového robotického hada bez potreby akýchkoľvek zmien.

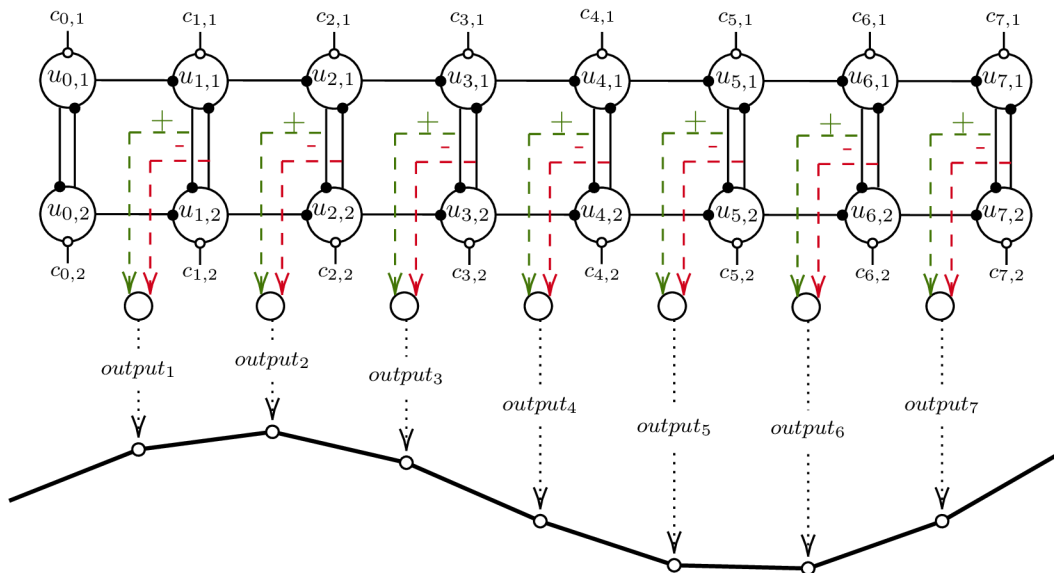


Obr. 36: Výstupy CPG modulov siete na obrázku 35.

Sieť CPG zobrazenú na obrázku (Obr. 35) implementujeme na úlohu riadenia robotického hada tak, že výstup i -teho modulu siete bude použitý na riadenie i -teho motorizovaného kĺbu robota, tak že určuje jeho požadované natočenie θ_i pre $i = 1, \dots, n - 1$ (Obr. 37). Pre riadenie robotického hada tak požadujeme, aby mali všetky výstupy siete jednotný charakter. Výstup nultého modulu túto podmienku nespĺňa, a preto sa tento modul bude používať len ako hnací prvok a jeho výstup nebude použitý na riadenie. Vzťah medzi i -tym výstupom a požadovaným natočením $\phi_i[\text{rad}]$ popisuje rovnica:

$$\phi_i = \alpha y_{out,i}, \quad (23)$$

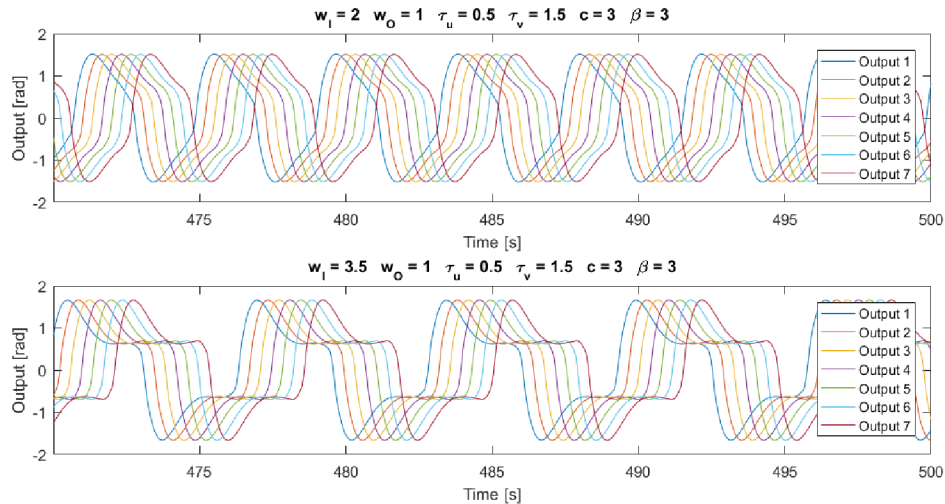
kde α je nenulová konštanta. Pre účely tejto práce a jednoduchosti interpretácie výsledkov, budeme ďalej uvažovať $\alpha = 1$.



Obr. 37: Implementácia siete CPG z obrázku (Obr. 35) na riadenie robotického hada.

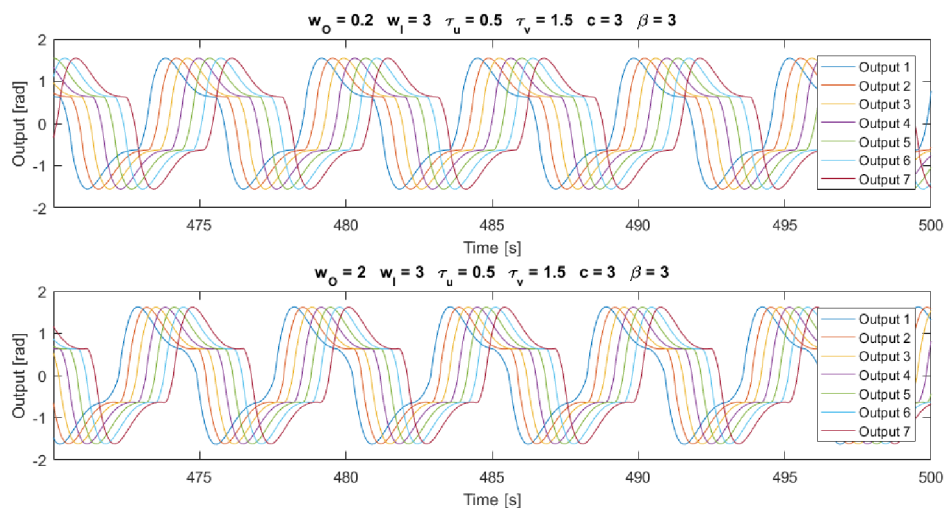
Aby bola sieť schopná oscilovať, je nutné pri nastavovaní parametrov siete dodržať obmedzenia $w_I/(1 + \beta) \leq 1$ a $\tau_u/\tau_v < w_I$.

Ako možno vidieť na grafoch na obrázku Obr. 38, veľkosť váhy prepojenia medzi neurónmi v rámci jedného modulu má najvýraznejší vplyv frekvenciu a tvar vlny. Taktiež je zjavné, že hodnota parametra w_I má vplyv aj na fázové rozdiely. Nižšia hodnota parametra w_I vedie k vyšším fázovým rozdielom a vyššej frekvencii.



Obr. 38: Vplyv váh medzi-neurálnych prepojení na výstupy siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov.

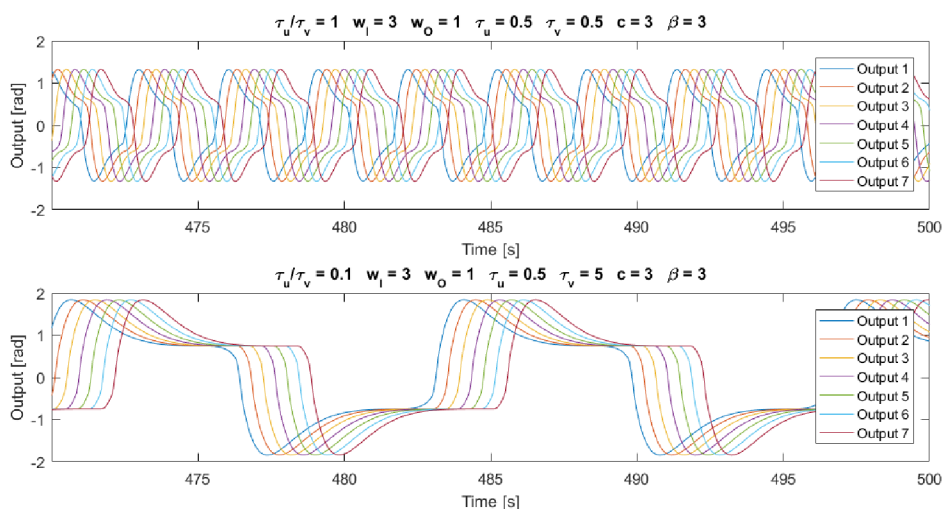
Hodnota váh prepojení medzi jednotlivými modulmi vplyva na fázové rozdiely (Obr. 39), podobne ako hodnota w_I . Hodnota w_O nemá vplyv na tvar vlny, frekvenciu ani amplitúdu v ustálenom stave.



Obr. 39: Vplyv váh medzi-modulových prepojení na výstupy siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov.

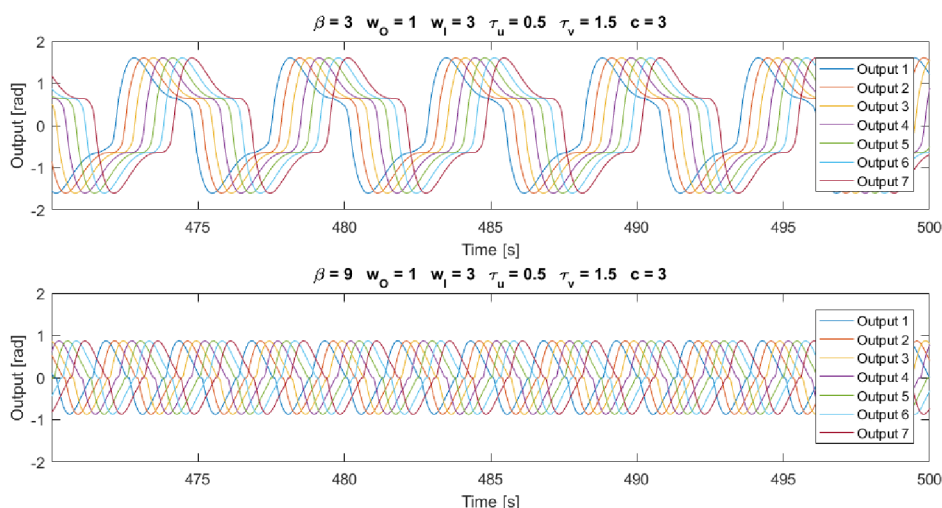
Pomer časových konštánt τ_u a τ_v vplyva na frekvenciu a fázový rozdiel. Na grafoch na obrázku Obr. 40 možno pozorovať, že čím je hodnota τ_u/τ_v nižšia, tým

je nižšia aj frekvencia a fázový rozdiel. Pomer τ_u/τ_v nemá vplyv na tvar vlny, a jeho vplyv na amplitúdu je badateľný iba pre veľké zmeny τ_u/τ_v . Pomer τ_u/τ_v nemá vplyv na tvar vlny.



Obr. 40: Vplyv pomeru τ_u/τ_v na výstupy siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov.

Ako vidieť na obrázku Obr. 41, pri zvyšovaní adaptačného koeficientu β dochádza ako k zvýšeniu frekvencie, tak aj k zvyšovaniu fázových rozdielov a k znižovaniu amplitúdy vln. Tvar vlny však zostáva nezmenený.



Obr. 41: Vplyv parametra β na výstupy siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov.

3.3 Simulačné modelovanie

Táto kapitola je zameraná na skúmanie riadenia modelu robota v simulačnom prostredí CoppeliaSim požadovanou riadiacou metódou. Simulačný program CoppeliaSim ponúka voľbu dĺžky kroku z hodnôt $dt = 10ms$, $dt = 25ms$, $dt = 50ms$,

$dt = 100ms$, $dt = 200ms$, alebo umožňuje užívateľovi zvoliť vlastnú hodnotu. Ďalej taktiež ponúka nastavenie presnosti výpočtov a rýchlosť simulácie, a umožňuje sledovanie simulácie v spomalenom či zrýchlenom režime, alebo v reálnom čase. Pre riadenie robotického hada budeme voliť krok výpočtu $dt = 50ms$ a presnosť výpočtov ako “accurate”. CoppeliaSim taktiež ponúka výber zo štyroch výkonných fyzikálnych enginov. Pre simuláciu bude používaný fyzikálny engin ODE, keďže tento engin simuloval správanie mechanizmu najdôvernejšie reálu. Väčšina ostatných dostupných fyzikálnych enginov preukazovala viac nekonzistentné, či nerealistické správanie, ako napríklad vibrovanie neriadeného mechanizmu a poháňanie ho vpred bez akéhokoľvek natáčania motorizovaných kĺbov. Simulácia je riadená pomocou MATLABu, prostredníctvom nástroja Remote API, ktoré zaistuje buď dočasnú alebo nepretržitú komunikáciu medzi MATLABom a simulačným programom CoppeliaSim. Pre účely tejto práce budeme využívať nepretržité prepojenie, ktoré umožňuje spúšťanie a zastavovanie simulácie priamo v prostredí MATLABu, na rozdiel od dočasného prepojenia, kedy je nutné simuláciu najskôr spustiť v prostredí CoppeliaSim, a až potom je komunikácia s MATLABom možná. Prepojenie MATLABu a simulačného programu CoppeliaSim je realizované pomocou kódu v MATLABe:

```
sim = remApi('remoteApi'); % using the prototype file (remoteApiProto.m)
sim.simxFinish(-1); % just in case, close all opened connections
clientID = sim.simxStart('127.0.0.1', 19997, true, true, 5000, 5);

if (clientID>-1)

    disp('Connected to remote API server');

    ...

    sim.simxFinish(-1); % close the connection to CoppeliaSim

else
    disp('connection failed');
end

sim.delete(); % call the destructor
```

Výpočty radiacích signálov sú realizované v MATLABe a prostredníctvom Remote API riadia simuláciu v programe CoppeliaSim. Späťne sú v každom kroku získavané rôzne informácie o simulácii, ako informácie o polohách kĺbov, či členkov robota a natočení a krúťvom momente jednotlivých motorizovaných kĺbov. Zo

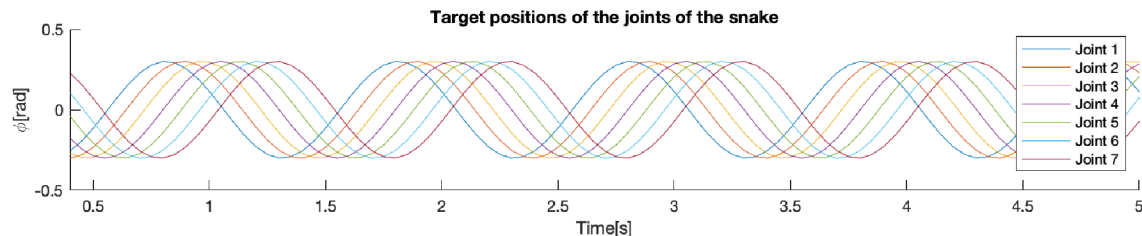
získaných informácií sú pomocou MATLABu vyvedené závery hodnotiace priebeh simulácie a sú vygenerované príslušné grafy.

Ako príklad riadenia budeme uvažovať model 8-článkového robotického hada na nekĺzkom povrchu, riadeného sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov s parametrami podľa tabuľky Tab. 1.

Názov parametra	Značenie	Hodnota
Váha medzi-neurónového prepojenia	w_I	$w_I = 5$
Váha medzi-modulového prepojenia	w_O	$w_O = 5$
Adaptačný koeficient	a	$a = 10$
Uhlová frekvencia	ω	$\omega = 2\pi rad/s$
Amplitúda oscilačných neurónov	A_L, A_R	$A_L = A_R = 0.15 rad$
Fázový rozdiel	$\Delta\phi$	$\Delta\phi = 0.5 rad$

Tab. 1: Nastavenie parametrov siete CPG zloženej z fázových oscilátorov.

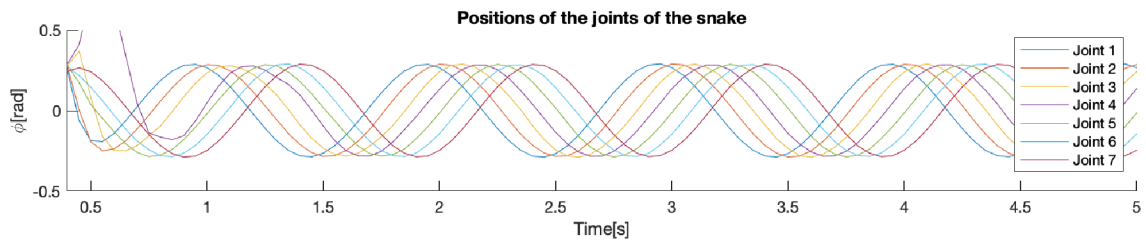
Výstupmi tejto siete sú periodicky sa meniace riadiace signály, ktoré prostredníctvom Remote API riadia cieľové polohy motorizovaných kĺbov robota v simulačnom prostredí CoppeliaSim. Signály určujúce požadované polohy kĺbov sú zobrazené na grafe na obrázku Obr. 42.



Obr. 42: Cieľová poloha motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom tvaru funkcie sínus.

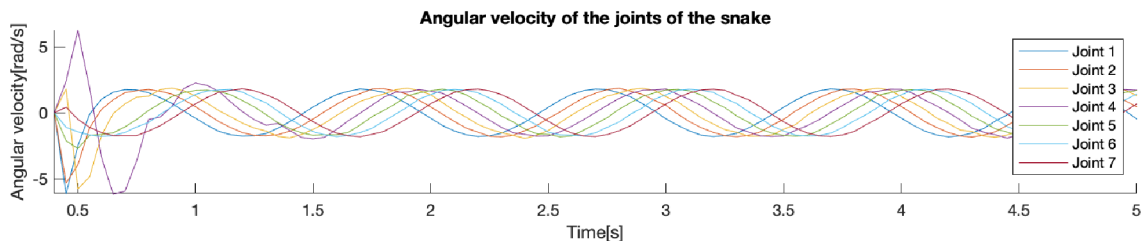
Ako možno vidieť na obrázku Obr. 43, skutočné polohy motorizovaných kĺbov dôverne imitujú požadované polohy motorizovaných kĺbov, dochádza u nich však k malému časovému omeškaniu. V prvých niekoľkých sekundách simulácie možno pozorovať, že skutočné polohy motorizovaných kĺbov sa od cieľových líšia výraznejšie, čo je dôsledkom toho, že had musí výrazne zmeniť zakrivenie jeho tela pri prechode z počiatočnej polohy do polohy požadovanej, teda z vystretej polohy kedy natočenie každého motorizovaného kĺbu je nulové, do polohy takej, že telo hada bude opisovať tvar serpentínoidnej krivky príslušnej danému riadeniu. Ako možno vidieť na obrázku, robotický had dosiahne tejto polohy v priebehu niekoľkých desiatok či stoviek milisekúnd. Rýchlosť takéhoto ustálenia je závislá predovšetkým od maximálneho krúťivého momentu, ktorý sú jednotlivé kĺby schopné vyvinúť. Pri použití

príliš slabého motora, robotický had požadovaného zakrivenia tela nemusí dosiahnuť nikdy.



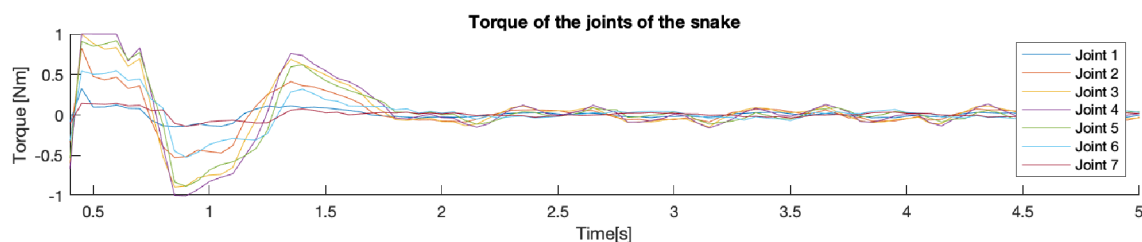
Obr. 43: Skutočná poloha motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom tvaru funkcie sínus.

Na začiatku simulácie možno vidieť veľké zrýchlenie otáčania jednotlivých motorizovaných kĺbov, po niekoľkých sekundách sa rýchlosť rotácie motorizovaných kĺbov ustáli a mení sa periodicky v tvare funkcie sínus s rovnakou uhlovou frekvenciou a fázovým rozdielom ako je riadiaci signál. Amplitúda sínusových vln je však rozdielna. Toto správanie možno vidieť na obrázku Obr. 44.



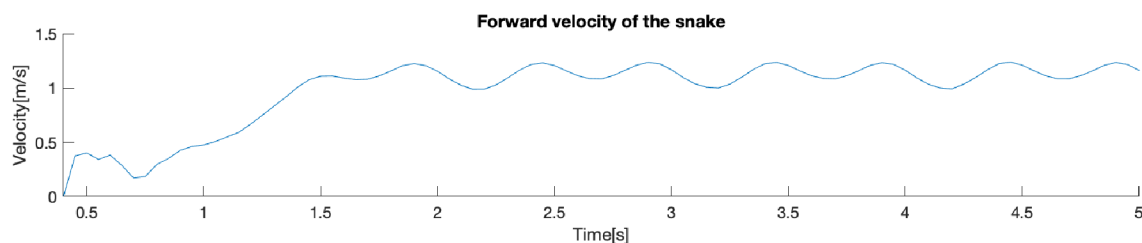
Obr. 44: Rýchlosť rotácie motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom tvaru funkcie sínus.

Na obrázku Obr. 45 sú zobrazené hodnoty krútivých momentov jednotlivých motorizovaných kĺbov počas priebehu simulácie. Ako možno vidieť, na začiatku simulácie, kedy sa robot snaží dostať z počiatočnej polohy do polohy opisujúcej tvar serpentínoidnej krivky príslušnej riadeniu, sú krútivé momenty maximálne a dosahujú až krajných hodnôt, ktoré možnosti motorizovaného kĺbu dovoľujú (v tomto prípade je maximálny krútivý moment jednotlivých motorizovaných kĺbov obmedzený na hodnotu $1Nm$). Krútivý moment sa v prvých momentoch simulácie periodicky mení s amplitúdou úmernou zrýchleniu robota. Po niekoľkých sekundách amplitúda výrazne klesne, a to práve vtedy, keď robotický had dosiahne svojej konečnej rýchlosti. Ako možno vidieť na obrázku, čím je motorizovaný kĺb bližšie k hlave či chvostu robota, tým je jeho krútivý moment nižší. Najvyšší krútivý moment je teda vždy v kĺbe nachádzajúcom sa v strede tela robotického hada.



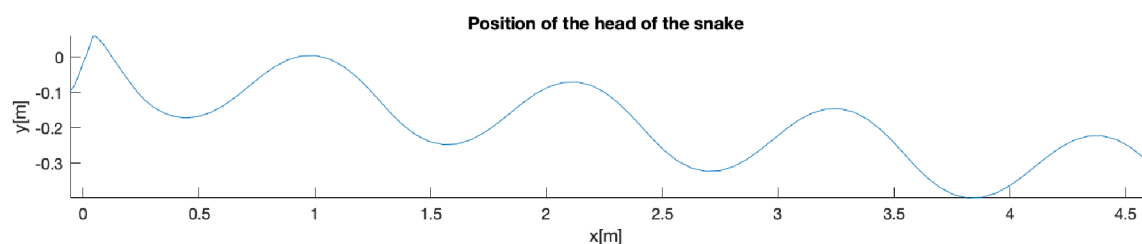
Obr. 45: Krútvý moment motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom tvaru funkcie sínus.

Na grafe na obrázku Obr. 95 je znázornená rýchlosť pohybu robotického hada v smere osi x v priebehu simulácie. Ako možno vidieť na obrázku, počiatočná rýchlosť robota je nulová, a s plynúcim časom postupne stúpa, až po niekoľkých sekundách sa rýchlosť ustáli a periodicky kmitá okolo konečnej hodnoty (v tomto prípade je to približne 1m/s) s dvojnásobnou frekvenciou ako frekvencia riadiaceho signálu.



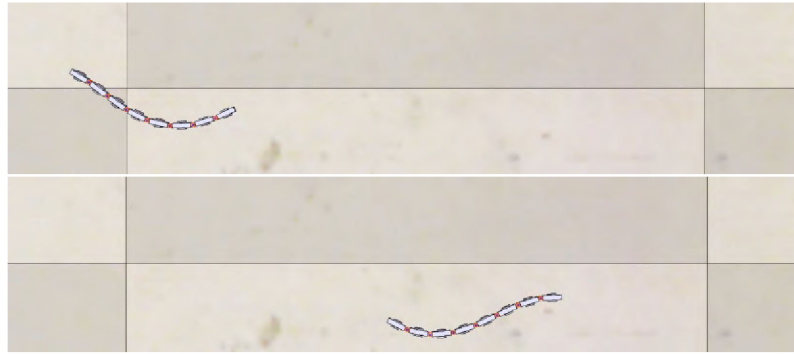
Obr. 46: Rýchlosť robotického hada riadeného signálom tvaru funkcie sínus v smere osi x .

Na grafe na obrázku Obr. 47 je zobrazená trajektória, ktorú opisuje hlava hada počas simulácie. Z tvaru trajektórie je zjavné, že robotický had pri pohybe bočným vlnením riadeným sínusoidnou krivkou sa skutočne efektívne posúva vpred, a pri jeho pohybe nedochádza k výraznému šmýkaniu do strán.



Obr. 47: Poloha prvého článku (hlavy) robotického hada riadeného signálom tvaru funkcie sínus.

Na obrázku Obr. 48 možno vidieť priebeh simulácie robotického hada v prostredí CoppeliaSim. Je zjavné, že zakrivenie tela hada skutočne opisuje tvar serpentinoidnej krivky.



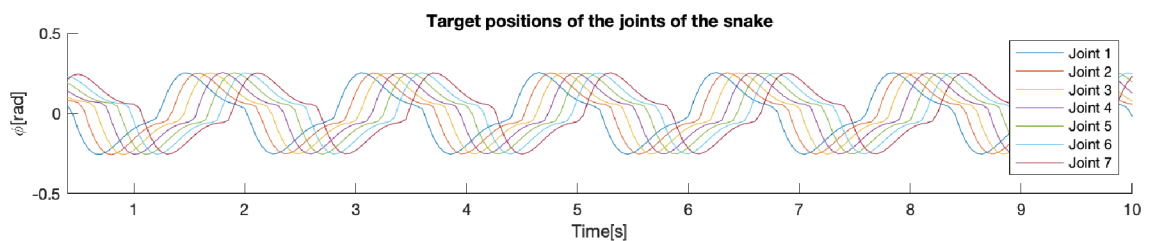
Obr. 48: Simulácia robotického hada riadeného sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov. (Hore $t = 1s$, dole $t = 2s$.)

Pokiaľ robotický had nie je riadený signálmi dôverne imitujúcimi sínusoidnú vlnu, môže dochádzať k miernym odlišnostiam v niektorých aspektoch simulácie. Ako príklad takéhoto riadenia budeme uvažovať model 8-článkového robotického hada na nekľzkom povrchu riadeného sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov s parametrami popísanými v tabuľke Tab. 2.

Názov parametra	Značenie	Hodnota
Váha medzi-neurónového prepojenia	w_I	$w_I = 3$
Váha medzi-modulového prepojenia	w_O	$w_O = 1$
Časové konštanty	τ_u, τ_v	$\tau_u = 0.2, \tau_v = 0.6$
Adaptačný koeficient	β	$\beta = 4$
Tonický input	$c_{i,1}, c_{i,2}$	$c_{i,1} = c_{i,2} = 0.5$

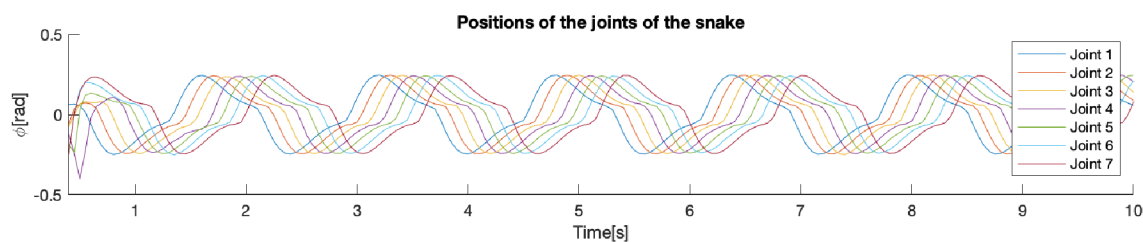
Tab. 2: Nastavenie parametrov siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov.

Výstupmi tejto siete sú riadiace signály, ktoré prostredníctvom Remote API riadia cieľové polohy motorizovaných kĺbov robota v simulačnom prostredí CoppeliaSim. Signály určujúce požadované polohy kĺbov sú zobrazené na grafe na obrázku Obr. 49.



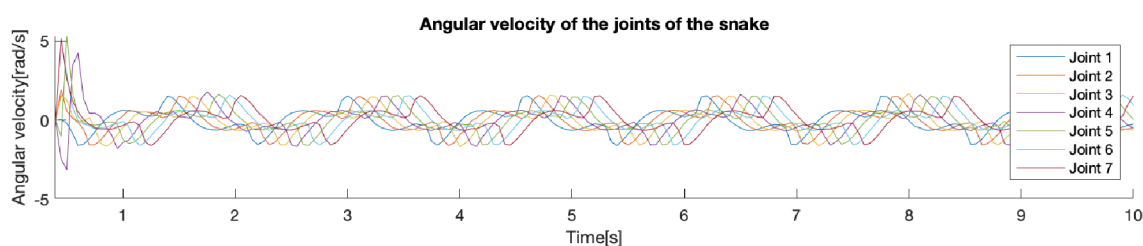
Obr. 49: Cieľová poloha motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom neimitujúcim tvar funkcie sínus.

Pri sledovaní skutočného natočenia motorizovaných kĺbov (Obr. 50) možno konštatovať, že správanie týchto funkcií vo vzťahu s riadiacimi signálmi je podobné ako v prípade, že riadiacimi signálmi boli sínusoidné vlny. Je teda podobne možno vidieť, že priebeh skutočných natočení motorizovaných kĺbov dôverne imituje priebeh požadovaných natočení, a rovnako ako pri riadení sínusoidnými signálmi, dochádza k malému časovému omeškaniu.



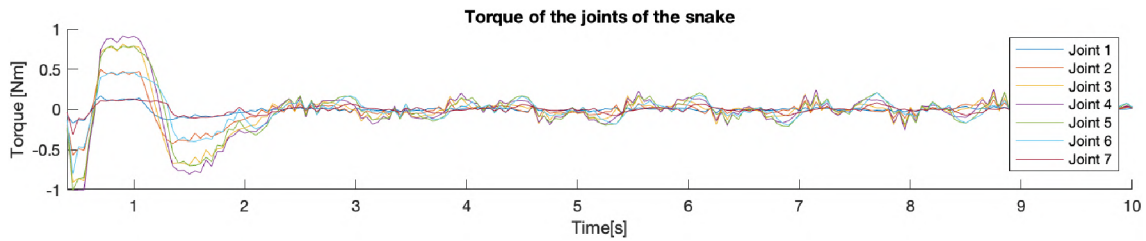
Obr. 50: Skutočná poloha motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom neimitujúcim tvar funkcie sínus.

Najväčšie rozdiely v riadení signálom neimitujúcim tvar funkcie sínus, boli pozorované v rýchlostiach rotácie jednotlivých motorizovaných kĺbov. Tieto hodnoty nenapodobňujú tvar riadiaceho signálu, naopak sú veľmi rozdielne. Ako možno vidieť na obrázku Obr. 51 pri takomto riadení dochádza k rýchlym zmenám v rýchlostiach rotácie motorizovaných kĺbov, čo môže mať na priebeh simulácie významný vplyv, a môže mať za následok vyššiu energetickú spotrebu robota.



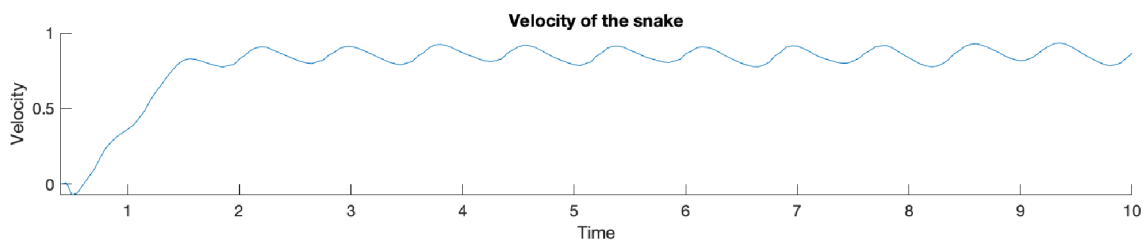
Obr. 51: Rýchlosť rotácie motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom neimitujúcim tvar funkcie sínus.

Ako už bolo spomenuté, pri takomto riadení dochádza aj k výraznejším zmenám rýchlosti rotácie motorizovaných kĺbov za malú zmenu času, a to po celú dobu simulácie. Krúťivý moment (Obr. 52) sa síce ustáli na nižších veľkostiach, avšak tieto hodnoty budú niečo vyššie, než keby bol robot riadený sínusovými signálmi.



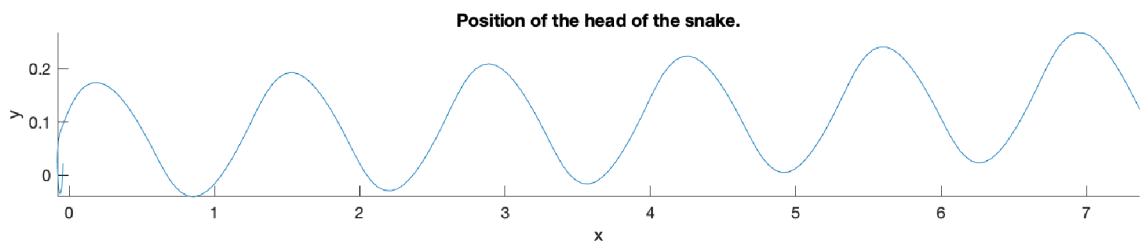
Obr. 52: Krútvý moment kĺbov robotického hada riadeného signálom neimitujúcim tvar funkcie sínus.

Rýchlosť (v smere osi x) robota riadeného týmto spôsobom, podobne ako rýchlosť robota riadeného sínusovými signálmi, je v počiatku simulácie nulová, postupne stúpa a po určitej dobe sa ustáli na konečnej hodnote, okolo ktorej periodicky kmitá s dvojnásobnou frekvenciou ako je frekvencia riadiaceho signálu. Toto kmitanie však nemá sínusový charakter (Obr. 53), čo je dôsledkom toho, že jednotlivé úseky trajektórie robota nie sú prechádzané v jednotnej rýchlosti.



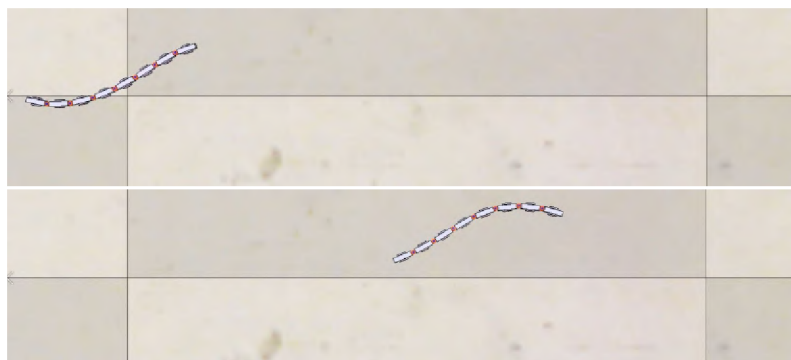
Obr. 53: Rýchlosť robotického hada riadeného signálom neimitujúcim tvar funkcie sínus v smere osi x .

Ako možno vidieť na obrázku Obr. 54, zobrazujúcom polohu hlavy hada v priebehu simulácie, had sa pohybuje vpred, avšak dochádza u neho k miernemu šmýkaniu koliesok do strán. Pri takomto riadení je had podstatnejšie ovplyvnený štruktúrou povrchu, a pri nižších koeficientoch trenia dochádza k výraznejšiemu šmýkaniu do strán a pohyb je tak menej efektívny.



Obr. 54: Rýchlosť rotácie motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom neimitujúcim tvar funkcie sínus.

Na obrázku Obr. 55 možno vidieť priebeh simulácie robotického hada v prostredí CoppeliaSim. Je zjavné, že zakrivenie tela hada opisuje tvar serpentínoidnej krivky aj v tomto prípade, kedy riadiace signály nemajú tvar serpentínoidnej vlny.



Obr. 55: Simulacia robotického hada riadeného sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov. (Hore $t = 1s$, dole $t = 2s$.)

3.4 Experimentálne meranie

V tejto kapitole sa budeme zaoberať vplyvom parametrov riadenia na rýchlosť a energetickú spotrebu robotického hada. Pre riadenie hada budeme používať dve známe metódy riadenia robotických hadov a to metódu riadenia serpentínoidnou krivkou a metódu riadenia pomocou siete CPG. Pohyb robotického hada je daný tvarom postupujúcej vlny signálov riadiacich motorizované kĺby od hlavy po chvost hada, ktorá môže byť reprezentovaná jej amplitúdou, frekvenciou a fázovým rozdielom. Pri použití serpentínoidnej krivky pre generovanie riadiacej vlny a pri použití siete CPG zloženej z fázových oscilátorov je tvar vlny daný funkciou sínus, ktorá zaisťuje plynulý pohyb robotického hada, zatiaľ čo pri použití siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov výstupná vlna funkciu sínus neimituje a môže sa stať, že pohyb robotického hada plynulý nebude. Vhodným nastavením parametrov siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov je možné dosiahnuť výstupu pripomínajúceho funkciu sínus a umožniť tak plynulý pohyb robota.

Pre úlohu experimentálneho merania bola náhodne vygenerovaná množina trojíc parametrov, následne boli jednotlivé trojice parametrov použité k riadeniu robotického hada po dobu 30s v simulačnom prostredí CoppeliaSim. Výpočty riadenia boli realizované v prostredí MATLABu a riadili simuláciu v simulačnom programe CoppeliaSim. Dĺžka kroku výpočtov bola nastavená na konštantnú hodnotu $dt = 50ms$. Pre účely tejto práce je takáto dĺžka kroku vhodná a umožňuje dosiahnutie dostatočne presných výsledkov pri uspokojivej výpočtovej náročnosti, avšak čím je dĺžka kroku dlhšia, tým dochádza k vyšším prekmitom motorizovaných kĺbov do strán, ktoré je potrebné kompenzovať a energetická spotreba sa tak zvyšuje a rých-

losť robota môže byť taktiež skreslená. Preto je nevhodné porovnávať spotrebu pri takomto meraní so spotrebou pri meraní s kratšou, či naopak dlhšiu dĺžkou kroku. Po dobu trvania simulácie boli MATLABom zaznamenané informácie o polohách článkov, natočeniach a krúživých momentoch motorizovaných kĺbov a po ukončení simulácie boli získané informácie vyhodnotené v MATLABe a uložené do súboru typu matfile určenému pre ďalšie spracovanie.

Na začiatku a na konci simulácie bola zaznamenaná poloha prvého článku hada a po ukončení simulácie bola vypočítaná celková vzdialenosť $dist[m]$ o ktorú sa tento článok posunul z počiatočnej polohy (vzdialenosť ktorú had precestoval po priamke) podľa vzorca:

$$dist = \sqrt{(xpos_t - xpos_s)^2 + (ypos_t - ypos_s)^2}, \quad (24)$$

kde $Pos_s = [xpos_s, ypos_s]$ je poloha hlavy hada v čase $t_s = 0$ a $Pos_t = [xpos_t, ypos_t]$ je poloha hlavy hada v čase $t_t = 30$. Zo získanej hodnoty je ďalej dopočítaná priemerná rýchlosť robotického hada $vel[m/s]$ v časovom intervale $[t_s, t_t]$ podľa vzťahu:

$$vel = \frac{dist}{t_t}. \quad (25)$$

Počas celého priebehu simulácie sú zaznamenané hodnoty krútiacich momentov $\tau[Nm]$ všetkých motorizovaných kĺbov, z ktorých je vypočítané celkové množstvo spotrebovanej energie $E[J]$ v časovom intervale $[t_s, t_t]$ podľa rovnice:

$$E = \sum_{i=1}^{N-1} \int_{t_s}^{t_t} \tau_i dt, \quad (26)$$

kde N je počet článkov robotického hada. Z celkového množstva spotrebovanej energie je ďalej dopočítaná priemerná spotreba energie $cons[J/m]$, ktorá značí množstvo energie potrebnej k posuvu hada o vzdialenosť $1m$ v priamom smere pohybu. Priemernú spotrebu energie popisuje vzťah:

$$cons = \frac{E}{dist}. \quad (27)$$

Cieľom experimentálneho merania je pozorovať, ako jednotlivé parametre rôznych typov riadenia vplývajú na rýchlosť a energetickú spotrebu robotického hada, a odhadnúť optimálne nastavenia riadenia pre 3-článkového a 8-článkového robotického hada pohybujúceho sa na klzkom, či neklzkom planeárnom povrchu. Pre model hada na neklzkom povrchu bol nastavený koeficient trenia medzi kolieskami robota a terénom na hodnotu $\mu = 0.5$ a pre simuláciu mechanizmu na klzkom povrchu bola nastavená hodnota $\mu = 0.03$. V simulačnom programe CoppeliaSim je pri využívaní fyzikálneho enginu ODE, koeficient trenia medzi dvoma objektami daný súčinom dielčích koeficientov trenia daných objektov (takýto výpočet nezodpovedá tomu,

ako je koeficient trenia počítaný u reálnych modelov). Pre dosiahnutie požadovaného koeficientu trenia boli tak nastavené koeficienty trenia tak, že koeficient trenia koliesok je rovný jednej a koeficient trenia terénu je rovný príslušnej požadovanej hodnote.

3.4.1 Serpentinoid

Metóda riadenia serpentinoidnou krivkou je najjednoduchšia metóda riadenia robotických hadov, akou sa táto práca zaoberá. Výstupy tejto metódy určené na riadenie robota sú dané výlučne parametrami a , b , c , ω a dĺžkami článkov hada l . Výhodou tejto metódy je to, že tieto parametre môžu byť skutočne ľubovoľné (pri riadení robota pomocou sietí CPG majú jednotlivé parametre obmedzenia). Hodnoty výstupov takéhoto riadenia sú dané pre ľubovoľný časový úsek, a nie sú závislé na hodnotách výstupov v predchádzajúcom čase. Výstupom riadenia serpentinoidnou krivkou sú sínusoidné vlny navzájom posunuté o určitý fázový rozdiel. Sériu sínusoidných vln možno charakterizovať ich uhlovými frekvenciami, amplitúdami a fázovými rozdielmi medzi jednotlivými vlnami. Pri takomto riadení budú amplitúdy a uhlové frekvencie jednotné, a fázové rozdiely budú jednotné medzi dvojicami susedných signálov.

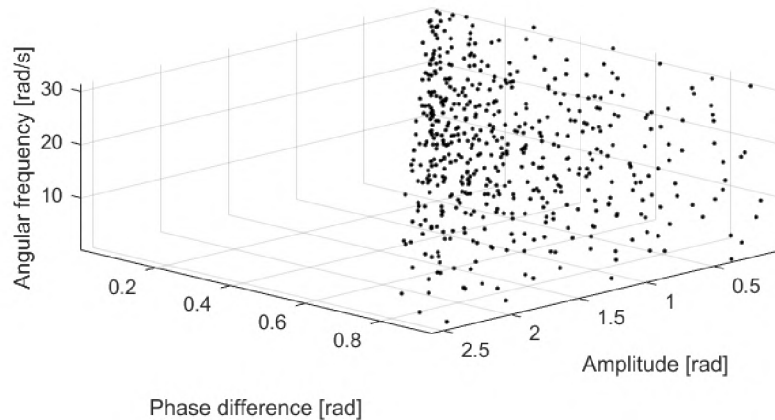
Zo vzťahov v kapitole 65 je zjavné, že amplitúda A výstupov je daná kombináciou parametrov a a b a dĺžkou článku hada a fázový rozdiel $\Delta\phi$ je daný parametrom b a dĺžkou článku hada. Vzťahy pre výpočet týchto hodnôt sú:

$$A = 2a \sin \frac{lb}{2}, \quad \Delta\phi = lb. \quad (28)$$

V tejto kapitole sa budeme zaoberať vplyvom parametrov a , b , ω a ich kombinácií na rýchlosť a energetickú spotrebu 8-článkového a 3-článkového robotického hada na neklzkom a klzkom povrchu. Ako už bolo ukázané v kapitole 2.3.1, parameter c určuje smer a uhol natáčania robota, čo pri nenulových hodnotách nemá priaznivý vplyv na pohyb robota po priamke. Preto tento parameter budeme uvažovať nulový pre všetky experimenty a nebudeme sa zaujímať jeho vplyvom na rýchlosť ani na energetickú potrebu.

Aj keď parametre a , b a ω môžu byť skutočne ľubovoľné, pre účely tejto práce budeme uvažovať parameter a v interval $[0, \pi]$, parameter b v intervale $[0, 3\pi]$ a parameter ω v intervale $[0, 10\pi]$. Pre experimentálne meranie bolo náhodne vygenerovaných 500 trojíc parametrov v daných intervaloch. Pri prepočte jednotlivých kombinácií parametrov na uhlovú frekvenciu, amplitúdu a fázový rozdiel, dostaneme množinu bodov pokrývajúcu časť priestoru tak, ako je zobrazené na obrázku Obr. 56. Je zrejmé, že prehľadávané body sú rovnomerne rozmiestnené po rovinách kolmých na osu reprezentujúcu uhlovú rýchlosť, zatiaľ čo kombinácie vyššej amplitúdy

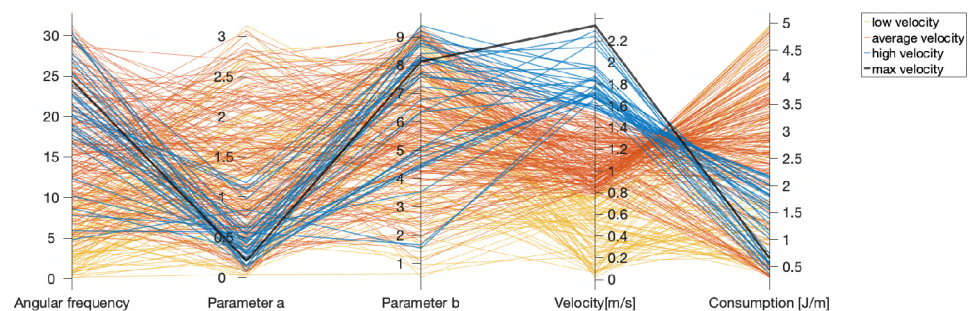
a nižšieho fázového rozdielu nie sú pokryté vôbec a táto oblasť tak prehľadávaná nebude.



Obr. 56: Pokrytie priestoru množinou testovaných vektorov parametrov ω , a a b .

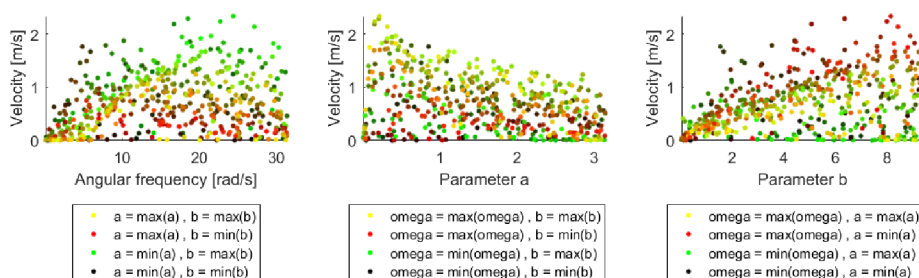
Pre účely experimentálneho merania boli postupne vyberané vektory parametrov z množiny skúmaných vektorov a boli použité k riadeniu simulácie pohybu robotického hada pre všetky skúmané modely.

Najlepšie výsledky v dosahovaní rýchlosti boli získané pri skúmaní správania 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu. Had dosahoval najvyššie rýchlosti (2.34m/s) pri nastavení parametrov $\omega = 24.4\text{rad/s}$, $a = 0,21$ a $b = 8.13$, čo odpovedá amplitúde $A = 0.17\text{rad}$ a fázovému rozdielu $\Delta\phi = 0.81\text{rad}$. Energetická spotreba robotického hada pri tomto riadení bola 0.65J/m . Najvyššie rýchlosti boli dosiahnuté pri použití relatívne vysokých hodnôt parametra ω , nízkych hodnôt parametra a a stredných až stredne vysokých hodnôt parametra b . Túto skutočnosť možno vyčítať z grafu na obrázku Obr. 57 (pre zvýšenie prehľadnosti, graf nezobrazuje riešenia, ktoré viedli k priveľmi vysokej spotrebe energie).



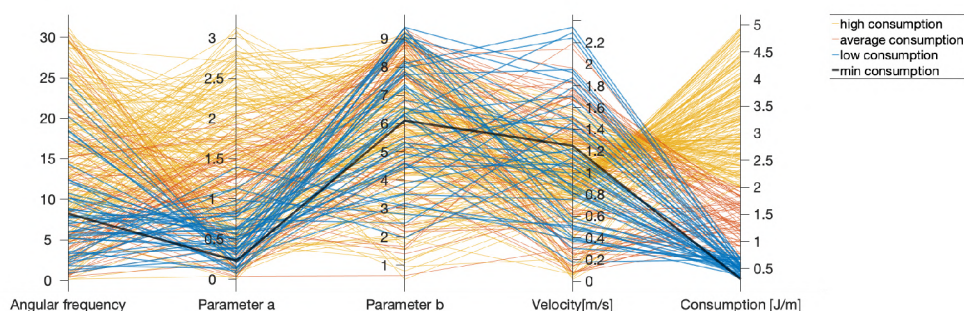
Obr. 57: Vplyv kombinácií parametrov ω , a , b na rýchlosť 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.

Vplyv rôznych kombinácií parametrov možno lepšie pozorovať na grafoch na obrázku Obr. 58. Je zjavné, že na rýchlosť robota majú najvýznamnejší vplyv hodnoty parametrov a a b . Ďalej možno pozorovať, že pri nízkych frekvenciách má na rýchlosť robota pozitívny vplyv kombinácia nízkej hodnoty parametra a a nízkej hodnoty parametra b , zatiaľ čo pri vyšších frekvenciách je vhodnejšie voliť nízke až stredné hodnoty parametra a a vyššie hodnoty parametra b .



Obr. 58: Vplyv parametrov ω , a , b na rýchlosť 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.

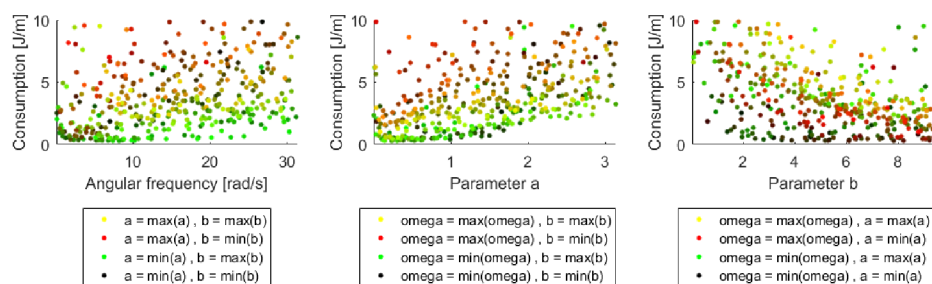
Ak chceme kvalitu nastavenia parametrov hodnotiť v závislosti od dosiahnutej energetickej spotreby, dôjdeme k záveru, že je vhodné voliť omnoho nižšiu uhlovú frekvenciu (Obr. 59). Vhodnosť voľby parametrov a a b zostáva približne rovnaká. Najnižšia spotreba ($0.3J/m$) robotického hada bola nameraná pri riadení s parametrami $\omega = 8.22rad/s$, $a = 0.23$ a $b = 6.1$. Takéto riadenie zodpovedá riadeniu sínusoidnou vlnou s amplitúdou $A = 0.14rad$ a s fázovým rozdielom $\Delta\phi = 0.61$. Robotický had pri takomto riadení dosahoval rýchlosti $1.25m/s$.



Obr. 59: Vplyv kombinácií parametrov ω , a , b na spotrebu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.

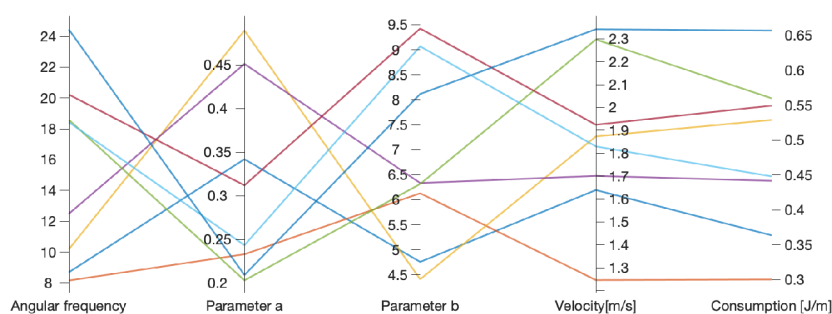
Vplyv rôznych kombinácií parametrov riadenia na spotrebu robota možno pozorovať na grafoch na obrázku Obr. 60. Je zjavné, že najlepších výsledkov dosahovali nastavenia s kombináciou nízkej hodnoty parametra a a nízkej uhlovej frekvencie

ω . Pri takýchto nastaveniach parametrov ω a a sa ukázalo, že parameter b nemá na energetickú spotrebu robota až taký významný vplyv ako pri vyšších uhlových frekvenciách ω , či vyšších hodnotách parametra a , kedy je vhodné voliť parameter b vyšší. Táto skutočnosť je daná tým, že pri príliš vysokej amplitúde a príliš nízkemu fázovému rozdielu dochádza ku kolízií hlavy hada s časťami jeho tela a pri príliš vysokej uhlovej frekvencii, príliš vysokej amplitúde a nízkom fázovom rozdiel had pri natáčaní svojho tela musí vyvíjať skutočne veľký krúťivý moment.



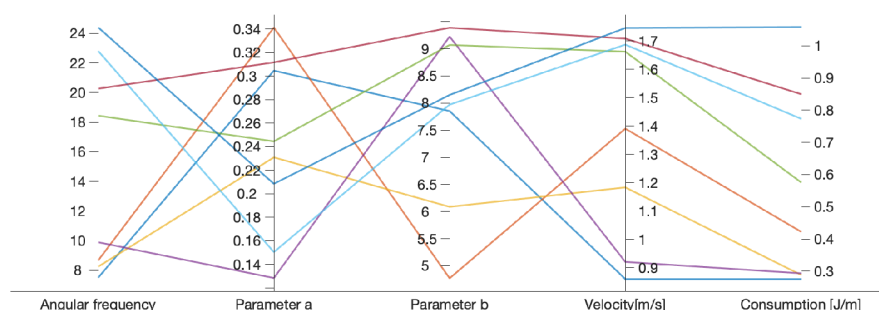
Obr. 60: Vplyv parametrov ω , a , b na spotrebu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.

Pokiaľ budeme nastavenia riadenia hodnotiť s ohľadom na oba parametre, výsledkom nebude len jedno najlepšie riešenie, ale dostaneme množinu najlepších riešení (nedominovaných riešení). Ide o množinu obsahujúcu všetky riešenia, ku ktorému nebolo nájdené žiadne také riešenie, čo je od neho lepšie v oboch kritériách. Pri skúmaní riadenia 8-článkového robotického hada bolo nájdených 8 rôznych nedominovaných riešení (Obr. 61). Za najzaujímavejšie riešenie možno považovať to, ktoré má pri čo najvyššej rýchlosti, čo najmenšiu energetickú spotrebu. Toto riešenie nemusí byť nutne to, pri ktorom je dosiahnutá najvyššia rýchlosť, ani to pri ktorom má robotický had najnižšiu spotrebu energie.



Obr. 61: Nedominované vektory parametrov pre riadenie 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu metódou Serpentinoid nájdené na testovanej množine.

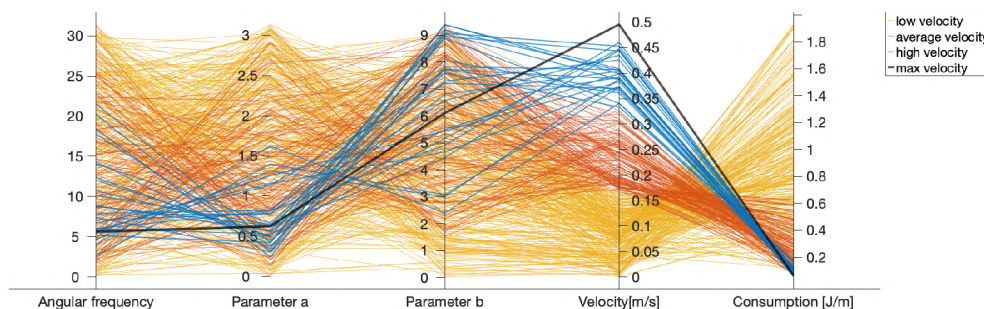
Ďalej bola množina nastavení testovaná na riadení 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu, u ktorého bolo zistené, že najvhodnejšie nastavenia (Obr. 62) dôverne imitujú najvhodnejšie nastavenia pre rovnaký model na neklzkom povrchu. Najvyššia rýchlosť (1.75m/s) bola dosiahnutá pri použití parametrov $\omega = 24.43\text{rad/s}$, $a = 0.21$, $b = 8.13$, čo zodpovedá amplitúde $A = 0.17\text{rad}$ a fázovému rozdielu $\Delta\phi = 0.81\text{rad}$. Nameraná energetická spotreba pri takomto pohybe bola 1.06J/m . Najnižšia dosiahnutá energetická spotreba bola (0.28J/m) pri pohybe s rýchlosťou (0.86m/s), čo bolo dosiahnuté nastavením parametrov $\omega = 7.4\text{rad/s}$, $a = 0.3$, $b = 7.8$, čo zodpovedá amplitúde $A = 0.23\text{rad}$ a fázovému rozdielu $\Delta\phi = 0.78\text{rad}$.



Obr. 62: Nedominované vektory parametrov pre riadenie 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou Serpentinoid nájdené na testovanej množine.

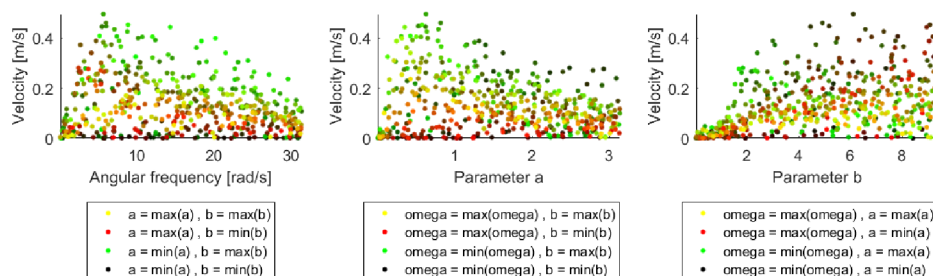
Najhoršie rýchlosti robotického hada boli dosiahnuté pri skúmaní modelu 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu, energetická spotreba v tomto prípade bola však najnižšia.

Najvyššia dosiahnutá rýchlosť (0.5m/s) 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu bola dosiahnutá použitím parametrov riadenia $\omega = 5.66\text{rad}$, $a = 0.62$, $b = 6.11$. Takémuto riadeniu zodpovedá amplitúda $A = 0.37\text{rad}$ a fázový rozdiel $\Delta\phi = 0.61\text{rad}$. Energetická spotreba robota pri tomto riadení bola 0.06J/m . Ako možno vidieť na grafe na obrázku Obr. 63, najvyššie rýchlosti boli dosiahnuté pri relatívne nízkej uhlovej frekvencii ω a pri použití nízkej hodnoty parametra a a strednej až vysokej hodnote parametra b . Najväčší rozdiel vhodného riadenia tohoto modelu a modelu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu je v uhlovej frekvencii. Na klzkom povrchu dochádza pri príliš vysokej frekvencii ku klzaniu do strán a nedochádza k poháňaniu robota vpred, a to predovšetkým pri nižších fázových rozdieloch. Pri vyšších fázových rozdieloch môže tak dochádzať k nepredikovatelnému smeru pohybu a had sa tak nedokáže dostať ďaleko od počiatocnej polohy.



Obr. 63: Vplyv kombinácií parametrov ω, a, b na rýchlosť 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.

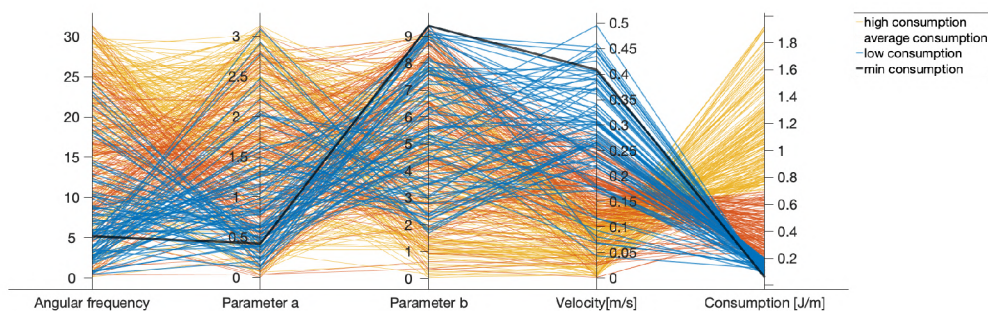
Ako možno vidieť na grafoch na obrázku Obr. 64, vhodné nastavenia riadenia tohoto modelu sa skutočne výrazne líšia od vhodných nastavení riadenia 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu. Možno pozorovať, že vhodným nastavením uhlovej frekvencie ω je skutočne omnoho nižšia hodnota. Pri ostatných parametroch rozdiel nie je až taký markantný. Možno však taktiež pozorovať, že ak je hodnota parametra a nižšia, je vhodné zvoliť vyššiu hodnotu parametra b a naopak. Najhoršie výsledky boli dosiahnuté pri kombinácií veľmi nízkej hodnoty parametra a a veľmi nízkej hodnoty parametra b , a to nezávisle od voľby uhlovej frekvencie, čo je následkom toho, že systém nie je dostatočne citlivý na veľmi malé zmeny polohy natočenia hada kvôli nízkemu koeficientu trenia medzi terénom a kolieskami robota.



Obr. 64: Vplyv parametrov ω, a, b na rýchlosť 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.

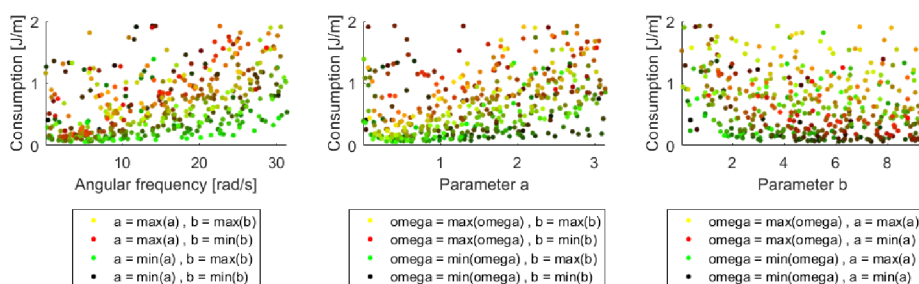
Spotreba robotického hada v niektorých prípadoch dosahovala skutočne veľmi nízkych hodnôt, pričom najnižšia nameraná hodnota ($0.05 J/m$) bola dosiahnutá použitím parametrov $\omega = 5.17 rad/s$, $a = 0.42$ a $b = 9.39$ čo zodpovedá amplitúde $A = 0.38 rad$ a fázovému rozdielu $\Delta\phi = 0.94 rad$. Rýchlosť ($0.41 m/s$), ktorú had pri tomto riadení dosahoval, bola taktiež uspokojivá, avšak ani zďaleka sa nepribližovala najlepšej nameranej hodnote 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu. V grafe na obrázku Obr. 65 možno pozorovať to, že vhodné nastavenia parametrov

pre minimalizáciu spotreby energie približne imituje vhodné nastavenia parametrov pre maximalizáciu rýchlosti, čo je dôsledkom toho, že s ľubovoľnými nastaveniami parametrov riadenia had pri pohybe nevyvíja vysoký krúťivý moment. Keďže k prekonaniu trenia medzi terénom a kolieskami hada na klzkom povrchu nie je potrebné vyvinúť vysokú silu, krúťivý moment jednotlivých kĺbov je vždy veľmi nízky a jeho spotreba je tak daná predovšetkým rýchlosťou pohybu mechanizmu.



Obr. 65: Vplyv parametrov ω, a, b na spotrebu 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.

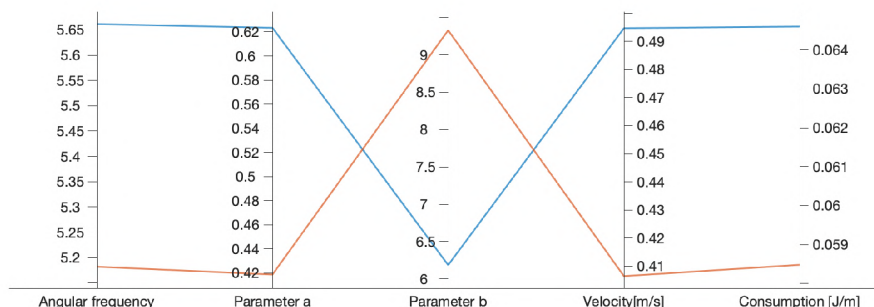
Podrobnejšiu vizualizáciu výsledkov merania a vplyvu parametrov riadenia na energetickú spotrebu robota možno vidieť na grafoch na obrázku Obr. 66. Podobne ako pri nastavovaní parametrov pre maximalizáciu rýchlosti robota, aj pri minimalizácii energetickej spotreby je vhodné voliť nižšie uhlové frekvencie ω a kombináciu parametrov a a b tak, že pre nižšiu hodnotu a je vhodné zvoliť vyššiu hodnotu b a naopak.



Obr. 66: Vplyv kombinácie parametrov ω, a, b na spotrebu 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.

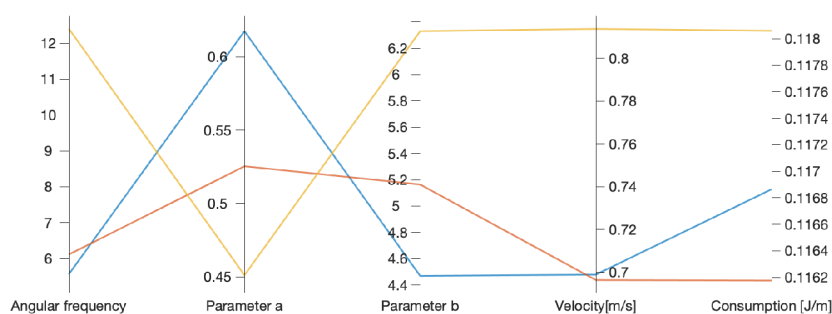
Vhodnosť nastavení parametrov podľa spomenutých princípov dokazuje aj graf na obrázku Obr. 67, na ktorom je dvojica najlepších nájdených riešení. Ako

môžeme vidieť, jedno z týchto riešení reprezentuje nastavenie, pri ktorom bola dosiahnutá najvyššia rýchlosť, a druhé predstavuje nastavenie, pri ktorom bola nameraná najnižšia spotreba. Iné nedominované riešenia na testovanej množine nájdené neboli.



Obr. 67: Nedominované vektory parametrov pre riadenie 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou Serpentinoid nájdené na testovanej množine.

Pri riadení 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu bola nameraná najvyššia rýchlosť 0.81m/s pri nastavení parametrov $\omega = 12.4\text{rad/s}$, $a = 0.45$, $b = 6.34$, čo zodpovedá amplitúde $A = 0.28\text{rad}$ a fázovému rozdielu $\Delta\phi = 0.63\text{rad}$. Spotreba robota pri tomto riadení bola 0.118J/m , čo sa od najnižšej nameranej hodnoty líšilo iba minimálne. Najnižšia spotreba (0.116J/m) bola dosiahnutá použitím parametrov $\omega = 6.03\text{rad/s}$, $a = 0.53$, $b = 5.18$, čo zodpovedá amplitúde $A = 0.27\text{rad}$ a fázovému rozdielu $\Delta\phi = 0.63\text{rad}$. Had pri tomto riadení dosahoval rýchlosti 0.7m/s . Čo je na tomto meraní zaujímavé je to, že u dvoch nájdených nedominovaných riešení (Obr. 68) s podobnými hodnotami parametrov a , b a výrazných rozdieloch v uhlových frekvenciách boli dosiahnuté takmer identické výsledky, čo poukazuje na to, že v oblasti medzi týmito dvomi uhlovými frekvenciami je systém na hodnotu ω parametra citlivý len minimálne.



Obr. 68: Nedominované vektory parametrov pre riadenie 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu metódou Serpentinoid nájdené na testovanej množine.

3.4.2 CPG sieť fázových oscilátorov

Sieť CPG zložená z fázových oscilátorov je populárnym nástrojom riadenia robotických hadov. Ide o metódu, ktorá umožňuje priame nastavenie parametrov rytmických výstupných signálov imitujúcich sériu po sebe idúcich sínusoidných vln. Pri tejto metóde riadenia je možné priamo zadať ako uhlovú frekvenciu, tak aj amplitúdu a fázový rozdiel výstupov.

Tato kapitola je zameraná na skúmanie vplyvov jednotlivých parametrov siete CPG zloženej z fázových oscilátorov na rýchlosť a energetickú spotrebu robotického hada riadeného touto sieťou.

Pri riadení robotického hada pomocou siete CPG zloženej z fázových oscilátorov majú na výstupy riadenia vplyv predovšetkým uhlová frekvencia ω , veľkosť amplitúdy A a veľkosť fázového rozdielu $\Delta\phi$. Váhy prepojenia modulov CPG w_O a váhy prepojenia jednotlivých neurónov v module w_I majú na výstupy siete taktiež významný vplyv, avšak len pri začiatku simulácie, kým sa výstupy siete ustália. Adaptačný koeficient a ovplyvňuje jedine rýchlosť ustálenia systému po zmene riadenia. Keďže k riadeniu robotického hada budeme používať len ustálené výstupy, hodnoty parametrov w_I , w_O a a nie sú veľmi podstatné, budú teda pevne zadané a ich vplyv na rýchlosť a spotrebu robotického hada skúmať nebudeme. Keďže cieľom bude merať rýchlosť a spotrebu robota pri pohybe po priamke, preto budeme uvažovať jednotné amplitúdy všetkých oscilačných neurónov, tak, že $A_R = A_L = A/2$, aby sme eliminovali zmeny smeru a vyhli sa tak skresleniu výsledkov. Pevne zadané hodnoty týchto parametrov, ktoré budú použité pri riadení, sú popísané v tabuľke 3.

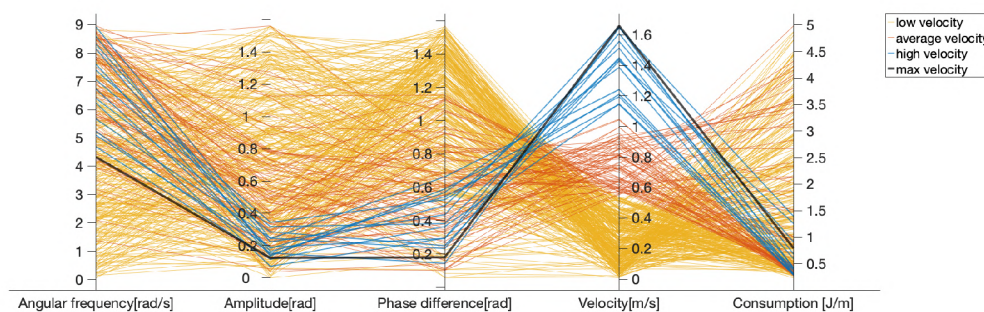
Názov parametra	Značenie	Hodnota/Vzťah
Váha medzi-neurónového prepojenia	w_I	5
Váha medzi-modulového prepojenia	w_O	5
Adaptačný koeficient	a	10
Amplitúda oscilačných neurónov	A_L, A_R	$A_R = A_L = A/2$

Tab. 3: Pevne zvolené parametre siete CPG z fázových oscilátorov.

Pre experimentálne meranie budeme uvažovať uhlovú frekvenciu ω v intervale $[0, 9]$, amplitúdu A v intervale $[0, \pi/2]$ a fázový rozdiel $\Delta\phi$ v intervale $[0, \pi/2]$. V rámci zadaných intervalov bola náhodne vygenerovaná množina 500 trojíc parametrov ω , A a $\Delta\phi$, a postupne boli jednotlivé vektory z tejto množiny použité k riadeniu 8-článkového robotického hada na neklzkom a klzkom povrchu, a k riadeniu 3-článkového robotického hada na neklzkom a klzkom povrchu v simulačnom programe CoppeliaSim. Pre dosiahnutie relevantných výsledkov, budú výstupy siete CPG použité k riadeniu robotického hada až po ustálení. Takýmito výstupmi siete

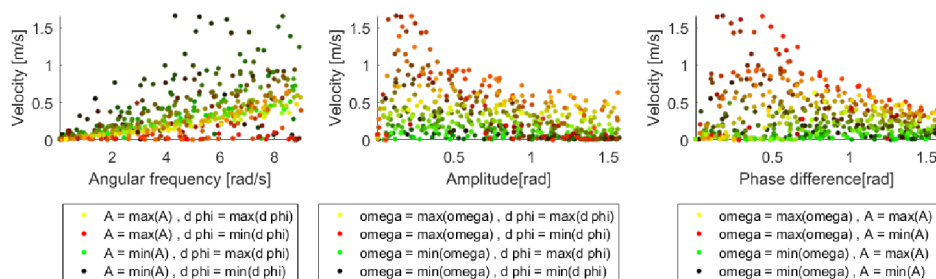
sú periodické sínusoidné signály s jednotnou frekvenciou, amplitúdou a fázovými rozdielmi medzi dvojicami susedných riadiacich signálov. Možno teda tvrdiť, že výstupy tejto siete sú ekvivalentné s riadiacimi signálmi, získanými metódou Serpentinoid, a pri vhodných voľbách parametrov je možné dosiahnuť identického riadenia.

Podobne ako pri riadení robota metódou Serpentinoid, najvyššie rýchlosti boli dosiahnuté pri riadení 8-článkového robotického hada na nekľzkom povrchu. Na grafe na obrázku Obr. 69 možno pozorovať, že skúmaný systém je skutočne veľmi citlivý aj na menšie zmeny jednotlivých parametrov. Vysoké rýchlosti boli dosiahnuté len pri použití stredných až vyšších uhlových frekvencií v intervale $[4, 9]$, nízkych amplitúd v intervale $[0.1, 0.4]$ a nízkych fázových rozdielov v intervale $[0.1, 0.7]$. Najvyššia nameraná rýchlosť 1.66m/s bola dosiahnutá pri použití parametrov $\omega = 4.33\text{rad/s}$, $A = 0.12\text{rad}$ a $\Delta\phi = 0.18\text{rad}$. Pri takomto nastavení parametrov mal robotický had spotrebu 0.79J/m . Je zjavné, že najvyššia dosiahnutá rýchlosť pri použití tejto metódy riadenia sa zďaleka nepribližuje najvyššej nameranej hodnote pri použití metódy Serpentinoid, čo môže byť následkom obmedzení siete CPG, ktorá pri veľmi vysokých frekvenciách nedokáže oscilovať, alebo následkom veľmi vysokej citlivosti riadenia na malú zmenu parametrov, čoho dôsledkom môže byť to, že množina všetkých testovaných nastavení neobsahovala nastavenie, ktoré by viedlo k dosiahnutiu vyššej rýchlosti.



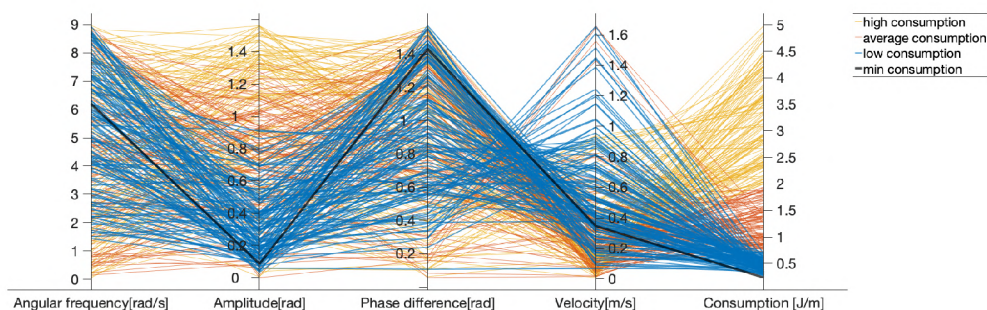
Obr. 69: Vplyv kombinácií parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na rýchlosť 8-článkového robotického hada na nekľzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.

V grafoch na obrázku Obr. 70 možno pozorovať, že všetky parametre riadenia majú na rýchlosť robota približne rovnako významný vplyv. Na grafe taktiež možno vidieť, že pri kombinácií vysokej amplitúdy a malého fázového rozdielu je rýchlosť robota takmer nulová, čo je následkom toho, že pri takomto nastavení dochádza ku kolízií hlavy hada a jeho tela, čo mu nielenže znemožňuje pohyb, ale taktiež má za následok extrémne vysokú spotrebu energie. Ako možno vidieť, so stúpajúcou amplitúdou na intervale $[0.3, 1.5]$ a fázovým rozdielom na intervale $[0.5, 1.5]$ exponenciálne klesá rýchlosť robota.



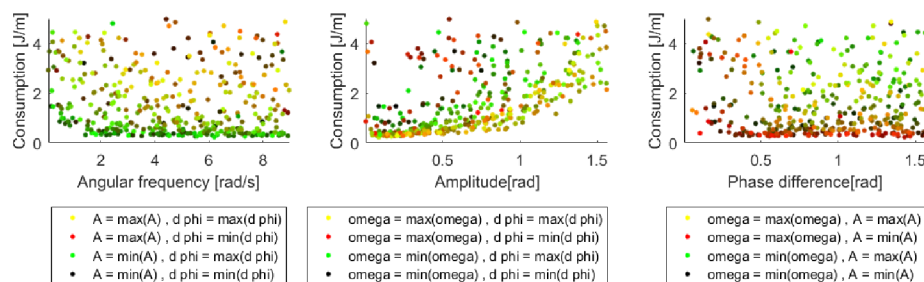
Obr. 70: Vplyv parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na rýchlosť 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.

Pri hľadaní minimálnej spotreby bolo nájdené veľké množstvo relatívne dobrých riešení (Obr. 71). Najnižšia nameraná spotreba $0.23J/m$ bola dosiahnutá pri uhlovej frekvencii $\omega = 6.19rad/s$, amplitúde $A = 0.08rad$ a fázovom rozdieli $[1.43rad]$. Pri takomto nastavení parametrov riadenia, had dosahoval rýchlosti $0.35m/s$, čo nie je veľmi uspokojivá hodnota, avšak ako možno vidieť na grafe na obrázku Obr. 71, boli nájdené aj také nastavenia ktoré viedli k nízkej spotrebe energie a zároveň vysokej rýchlosti pohybu robota. Nízke hodnote energetickej spotreby boli nájdené predovšetkým pri nízkych amplitúdach a stredných až vysokých uhlových frekvenciách a fázových rozdieloch.



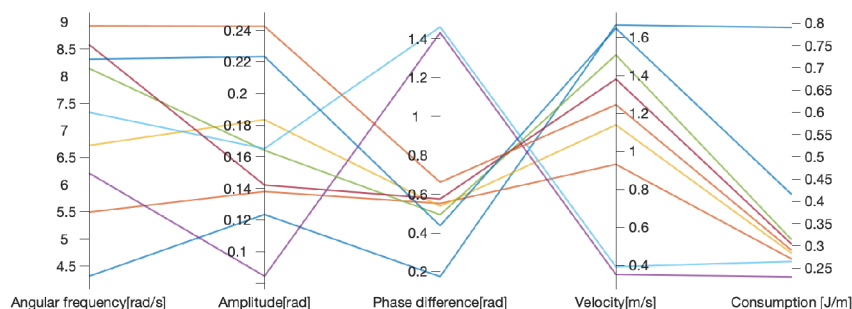
Obr. 71: Vplyv kombinácií parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na spotrebu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.

Ako možno vidieť na grafoch na obrázku Obr. 72, energetická spotreba je závislá predovšetkým na voľbe veľkosti amplitúdy, a to tak, že čím je amplitúda menšia, tým je aj energetická spotreba nižšia. Pri príliš nízkej amplitúde sa však môže stať, že sa robot buď nedokáže rozbehnúť, alebo sa bude rozbiehať len veľmi pomaly a spotreba tak môže byť relatívne vysoká. Táto situácia však nastáva len pri extrémne nízkych hodnotách A . Parametre ω a $\Delta\phi$ na spotrebu nemajú až taký významný vplyv.



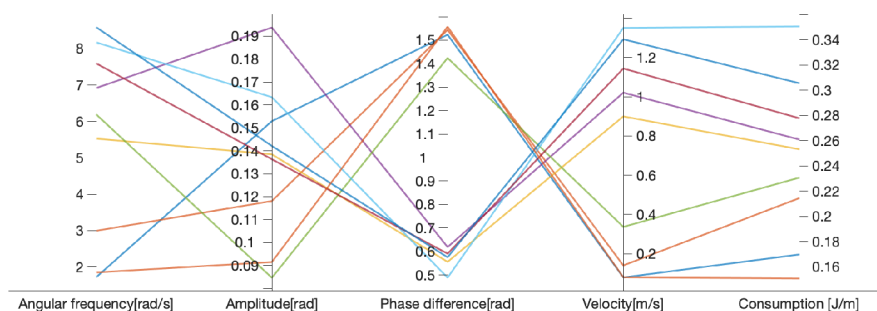
Obr. 72: Vplyv parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na spotrebu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.

Všetky dobré riešenia boli nájdené pri uhlových frekvenciách v rozsahu [4, 9] a amplitúdach v rozsahu [0.08, 0.25]. Na grafe Obr. 73 možno vidieť, že najvyššie fázové rozdiely viedli k najnižším spotrebám energie, ale zato aj k najnižším rýchlostiam pohybu. Lepšie riešenia boli nájdené pri fázových rozdieloch v intervale [0.4, 0.7], kedy bola dosiahnutá rýchlosť výrazne vyššia, zatiaľ čo energetická spotreba bola len minimálne vyššia.



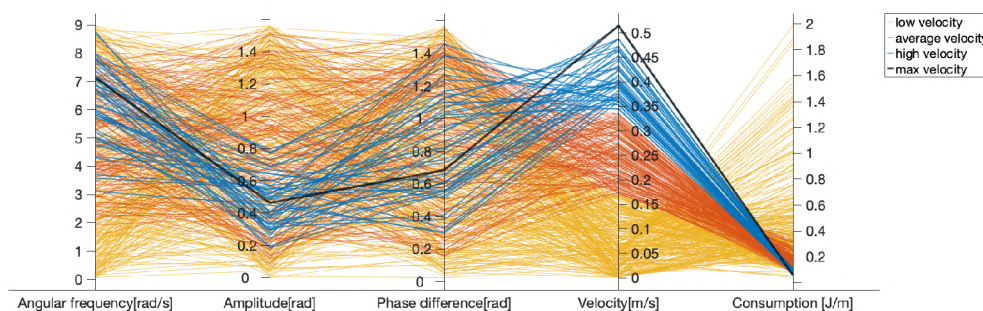
Obr. 73: Nedominované vektory parametrov pre riadenie 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z fázových oscilátorov.

Množina trojíc parametrov bola rovnako testovaná aj na modele 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu, kedy bolo možné pozorovať podobné závislosti parametrov riadenia na výslednú rýchlosť a spotrebu robota, ako pri modelovaní modelu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu. Najvyššia nameraná rýchlosť tohto modelu bola o niečo nižšia a najnižšia nameraná spotreba bola taktiež nižšia. Najvyšších rýchlostí bolo dosiahnutých pri vysokých uhlových frekvenciách a naopak najnižších spotrieb bolo dosiahnutých pri nízkych frekvenciách (Obr. 74). Medzi niekoľkými najvyššími nameranými rýchlosťami bol relatívne veľký rozdiel, čo naznačuje to, že rýchlosť robota je výrazne ovplyvnená aj menšími zmenami v riadení. Možno tak predpokladať, že pri podrobnejšom prehľadaní priestoru vektorov nastavení by teoreticky mohlo byť nájdené aj omnoho lepšie riešenie.



Obr. 74: Nedominované vektory parametrov pre riadenie 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z fázových oscilátorov nájdené na testovanej množine.

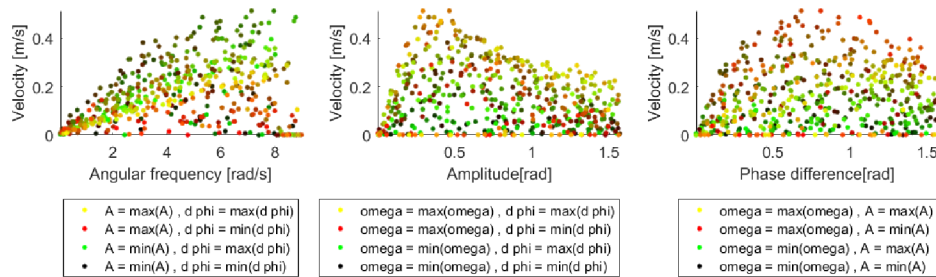
Po testovaní rôznych nastavení parametrov siete CPG zloženej z fázových oscilátorov na modeli 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu prichádzame k zisteniu, že najvyššia dosiahnutá rýchlosť robota sa ani zďaleka nepribližovala k najvyššej dosiahnutej rýchlosti v predošlom modeli. Ako možno vidieť na grafe na obrázku Obr. 75, robot dosahoval najvyšších rýchlostí pri o niečo vyššej amplitúde, než u modelu s 8-článkovým hadom, vhodné veľkosti amplitúd sa však stále pohybovali v nízkych hodnotách v intervale približne $[0.2, 0, 8]$. Veľkosť fázového rozdielu bolo naopak vhodnejšie voliť vyššiu, v intervale približne $[0.4, 1.2]$. Najvyššej nameranej rýchlosti (0.51m/s) bolo dosiahnuté pri uhlovej frekvencii $\omega = 7.13\text{rad/s}$, amplitúde $A = 0.46\text{rad}$, a fázovom rozdiel $\Delta\phi = 0.68\text{rad}$. Spotreba hada pri takomto nastavení bola 0.06J/m .



Obr. 75: Vplyv kombinácií parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na rýchlosť 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.

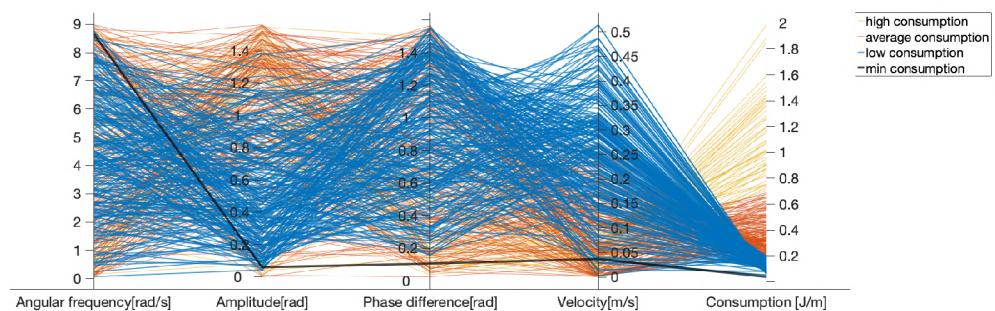
Pri pohľade na grafy na obrázku Obr. 76 je zjavné, že rýchlosť robota je výrazne ovplyvnená všetkými tromi parametrami. Pri riadení modelu 3-článkového robotického hada nedochádza ku kolíziám hlavy hada s jeho telom, ako to bolo u 8-článkového robota, dokonca ani pri veľmi vysokých amplitúdach a nízkych fázových

rozdieloch. Nízke rýchlosti pri takomto nastavení sú spôsobené tým, že robotický had kmitá telom do strán, no k pohonu hada nedochádza kvôli príliš nízkemu koeficientu trenia. Z grafov možno usúdiť, že pri nízkej uhlovej frekvencii je vhodné zvoliť nízku amplitúdu a relatívne nízky fázový rozdiel, zatiaľ čo pri vyšších frekvenciách sa preukázal vhodnejší o niečo vyšší fázový rozdiel. Pri nízkej amplitúde je lepšie voliť nižšiu uhlovú frekvenciu a stredne veľký fázový rozdiel, a pri vyššej amplitúde je rovnako výhodnejšia vysoká uhlová frekvencia ale nižší fázový rozdiel.



Obr. 76: Vplyv parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na rýchlosť 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.

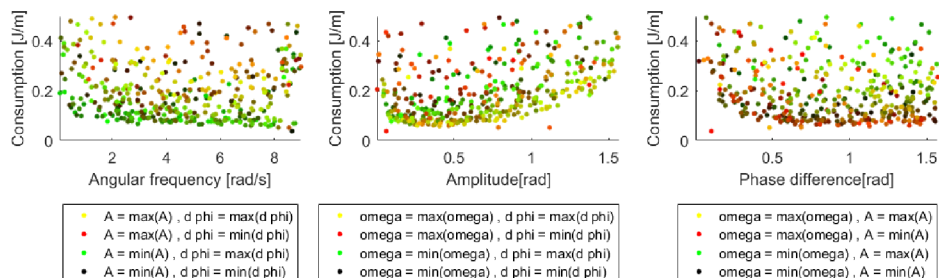
Hoci namerané rýchlosti nedosahovali veľmi vysoké hodnoty, bolo nájdené veľké množstvo riešení, u ktorých bola veľmi nízka energetická spotreba (Obr. 77). Zdanlivo najlepšia nájdená spotreba bola takmer nulová, avšak bola dosiahnutá pri takmer nulovej amplitúde a takmer nulovej rýchlosti, nemôžeme tak tvrdiť, že toto riešenie je relevantné. Ostatné dobré riešenia sú rovnomerne rozložené po takmer celých intervaloch parametrov.



Obr. 77: Vplyv kombinácií parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na spotrebu 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.

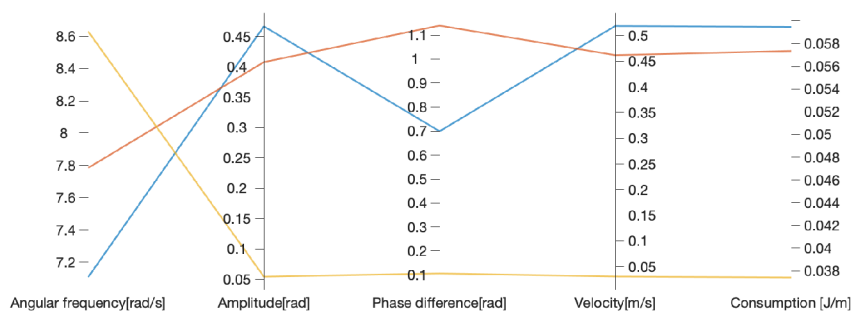
Na grafoch na obrázku Obr. 78 možno vidieť, že veľkosť amplitúdy je najväčším faktorom pri hľadaní nastavenia pre minimalizáciu spotreby. najlepšie výsledky boli dosiahnuté pri amplitúdach v intervale $[0.25, 0.75]$ Pri priveľmi nízkych fázových

rozdieloch dochádzalo k relatívne vysokej spotrebe, čo je následkom už spomínaného kĺzania do strán, a to nezávisle od uhlovej frekvencie či amplitúdy. Takéto správanie u 8-článkového mechanizmu na neklzkom povrchu pozorované nebolo.



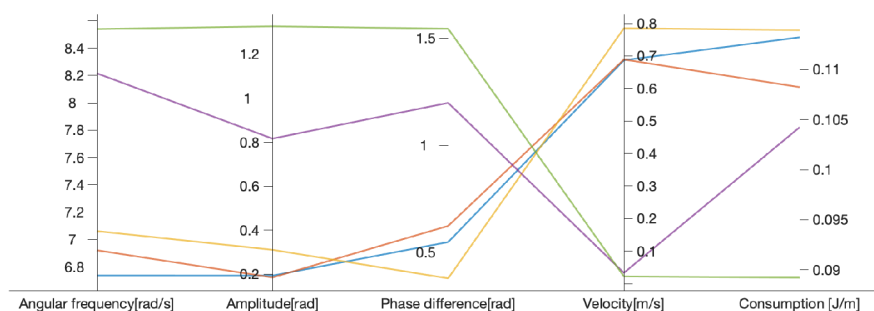
Obr. 78: Vplyv parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na spotrebu 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.

Všetky nájdené nedominované vektory nastavenia, nájdené na testovanej množine, možno vidieť na obrázku Obr. 79. Ako možno vidieť, táto množina obsahuje aj nastavenie, ktoré vedie k takmer nulovej spotrebe, ale zároveň k takmer nulovej rýchlosti, toto riešenie tak nemožno považovať za dobré. Zvyšné dve nájdené nedominované riešenia predstavujú o mnoho výhodnejšiu situáciu, kedy je spotreba o niečo vyššia, avšak dosiahnutá rýchlosť je násobne vyššia. Je zjavné že obe tieto riešenia boli dosiahnuté približne rovnakým nastavením parametrov. Možno tak predpokladať, že najlepšie nastavenia parametrov riadenia budú také, kde uhlová frekvencia [rad/s] sa pohybuje v intervale $[7, 8]$, amplitúda [rad] v intervale $[4, 4.7]$ a fázový rozdiel [rad] v intervale približne $[0.7, 1.2]$. Pri porovnaní s najlepšimi nastaveniami parametrov riadenia 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, možno vidieť, že v tomto prípade je vhodnejšie voliť výrazne vyššiu amplitúdu a o niečo väčší fázový rozdiel.



Obr. 79: Nedominované vektory parametrov pre riadenie 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z fázových oscilátorov.

Podobne pri testovaní parametrov riadenia na modele 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, bolo možné pozorovať, že vhodné nastavenia riadenia pre tento model približne imitujú vhodné nastavenia riadenia pre model 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu. Had dosahoval o niečo vyšších rýchlostí, no ani zďaleka sa nepribližoval rýchlostiam ani jedného modelu 8-článkového robotického hada (Obr. 80).



Obr. 80: Nedominované vektory parametrov pre riadenie 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z fázových oscilátorov nájdené na testovanej množine.

3.4.3 CPG sieť Matsuoka oscilátorov

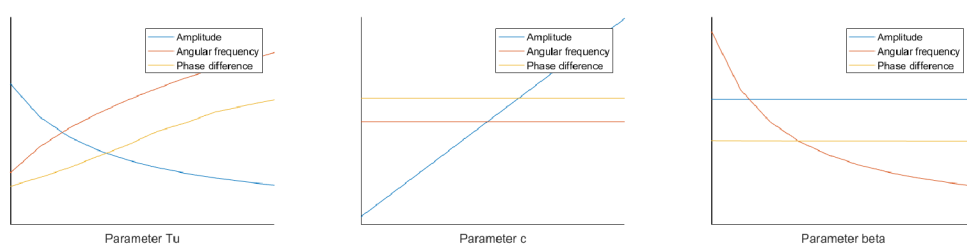
Táto kapitola je zameraná na pozorovanie vplyvu parametrov siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov na rýchlosť a spotrebu 8-článkového a 3-článkového robotického hada na neklzkom a klzkom povrchu.

Výstupy siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov sú dané množstvom parametrov, ako sú váhy prepojení modulov CPG, či prepojení jednotlivých neurónov v sieti, topológia ich prepojení, časové konštanty, adaptačné koeficienty, či tonické vstupy. Pre účely experimentálneho merania budú niektoré z týchto parametrov pevne dané, a budeme sa venovať len trojici parametrov, časová konštantu τ_u , tonický vstup c a adaptačný koeficient β , a ich vplyvom na rýchlosť a energetickú spotrebu robotického hada. Sieť CPG, ktorá bude použitá pre experimentálne meranie je popísaná v kapitole 3.2.2. Pevne dané parametre siete CPG sú popísané v tabuľke Tab. 4.

Názov parametra	Značenie	Hodnota / Vzťah
Váha medzi-neurónového prepojenia	w_I	3
Váha medzi-modulového prepojenia	w_O	1
Časová konštantu	τ_v	$\tau_u/3$

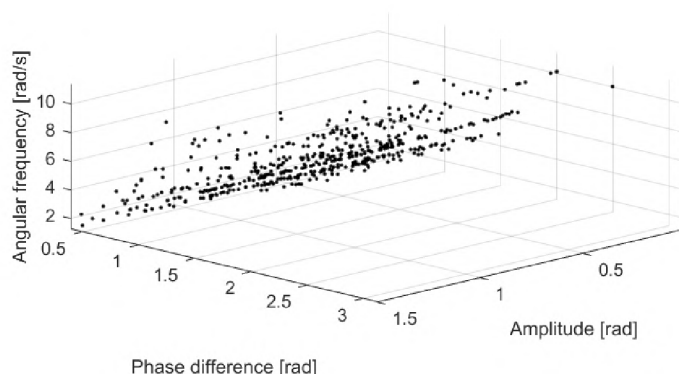
Tab. 4: Pevne zvolené parametre siete CPG z Matsuoka oscilátorov.

O výstupoch siete CPG z Matsuoka oscilátorov možno uvažovať ako o sérii rytmických signálov postupujúcej vlny od prvého modulu po posledný. Aby bol pohyb robotického hada plynulý, je nevyhnutné aby vlna výstupných signálov jednotlivých modulov siete dostatočne dôverne napodobňovala funkciu sínus, ktorú možno reprezentovať jej frekvenciou a amplitúdou. Dynamiku výstupov viacerých po sebe idúcich modulov je možno reprezentovať fázovým rozdielom. Na rozdiel od siete CPG zloženej z fázových oscilátorov, sieť CPG zložená z Matsuoka oscilátorov nie je riadená priamym zadaním týchto hodnôt. Frekvencia, Amplitúda a fázový rozdiel sú funkciou parametrov siete CPG, v našom prípade časovou konštantou τ_u , tonickým vstupom c a adaptačným koeficientom β . Vplyv jednotlivých parametrov na frekvenciu, amplitúdu a fázový rozdiel možno vidieť na obrázku Obr. 81.



Obr. 81: Vplyv parametrov τ_u , c , β na amplitúdu, uhlovú frekvenciu a fázový rozdiel.

Pre experimentálne meranie budeme uvažovať parameter τ_u v intervale $[0, 0.3]$, parameter c v intervale $[0, 3]$ a parameter β v intervale $[3, 15]$. Bola vygenerovaná množina 500 náhodných vektorov (τ_u, c, β) . Po prepočte týchto vektorov na vektory uhlovej frekvencie, amplitúdy a fázového rozdielu dostávame čiastočne pokrytý priestor, tak ako možno vidieť na obrázku Obr. 82.

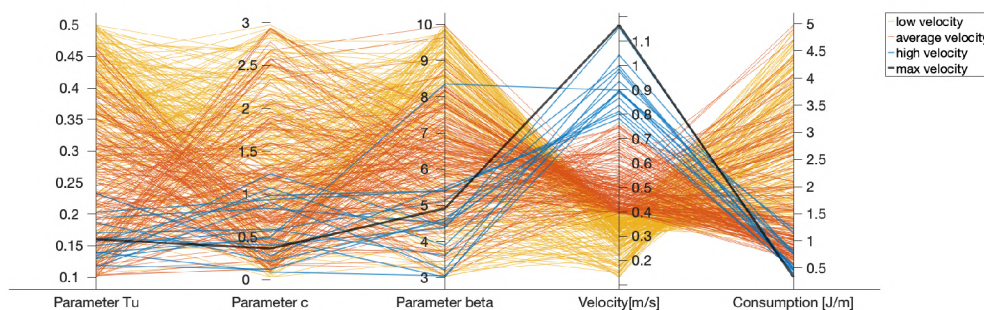


Obr. 82: Pokrytie priestoru množinou testovaných vektorov kombinácií parametrov τ_u , c a β .

Postupne boli jednotlivé vektory použité ako parametre siete. Pre každé nastavenie bola spustená simulácia v simulátore CoppeliaSim pre 4 rôzne mechanizmy

(8-článkový robotický had na neklzkom povrchu, 8-článkový robotický had na klzkom povrchu, 3-článkový robotický had na neklzkom povrchu a 3-článkový robotický had na klzkom povrchu), a po jej ukončení boli výsledky vyhodnotené v MATLAB-e. Aby boli dosiahnuté výsledky merania relevantné, boli k riadeniu robotického hada použité ustálené výstupy siete CPG.

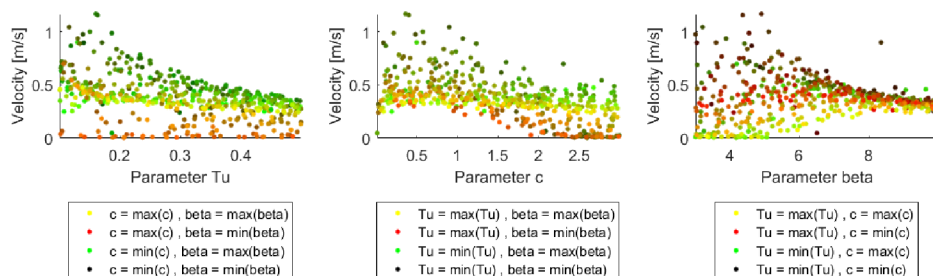
Zo všetkých meraní boli najlepšie výsledky v meraní rýchlosti robotického hada, dosiahnuté pri riadení 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu Obr. 83. Had dosahoval najvyššej rýchlosti ($1.17m/s$) pri nastavení parametrov $\tau_u = 0.16$, $c = 0.36$ a $\beta = 4.91$. Pri takomto nastavení riadenia bola spotreba energie $0.33J/m$. Charakter výstupov siete pri riadení s týmito parametrami môže byť popísaný amplitúdou $A = 0.18rad$ uhlovou frekvenciou $\omega = 5.98rad/s$ a fázovým rozdielom $\Delta\phi = 0.6rad$. Ako možno vidieť, tieto hodnoty nie sú ani zďaleka tak dobré, ako hodnoty namerané pri riadení metódou Serpentinoid, či sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov. Ako možno vidieť na grafe, niekoľko najvyšších nameraných hodnôt sa od seba navzájom veľmi líši, čo napovedá, že systém je skutočne veľmi citlivý aj na veľmi malé zmeny parametrov riadenia. Nemožno tak tvrdiť, že táto metóda je horšia ako dve predošle skúmané metódy. Nie veľmi dobré výsledky merania sú s veľkou pravdepodobnosťou dôsledkom toho, že oblasť, kde nachádzajú parametre riadenia, ktoré by viedli k dobrým výsledkom, je veľmi úzka a nebola dostatočne prehľadaná.



Obr. 83: Vplyv parametrov τ_u , c a β na rýchlosť 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.

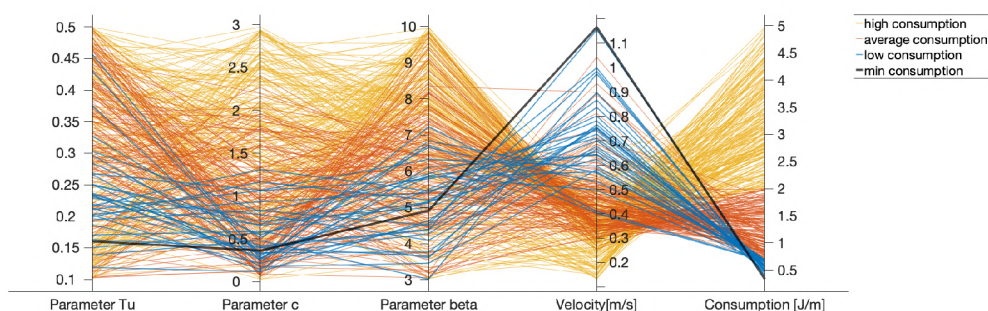
Z dát zobrazených na grafoch na obrázku Obr. 86 je zjavné, že na rýchlosť hada má skutočne významný vplyv každý z trojice parametrov riadenia. Celkovo najhoršie výsledky boli dosiahnuté pri použití vysokých hodnôt jednotlivých parametrov alebo príliš nízkeho parametra τ_u ($\tau_u \approx 0$) a parametra c ($c \approx 0$). Na grafoch možno vidieť exponenciálny nárast rýchlosti, s klesajúcou hodnotou τ_u , pri použití nízkej hodnoty c a nízkej hodnoty β . Podobne správanie možno pozorovať aj u vplyvu parametra β , z ktorého je zjavné, že s klesajúcou hodnotou β , rýchlosť exponenciálne narastá, a zdá sa tak, že pre hodnotu $\beta \in [3, 5]$ nie je prehľadané

dostatočné množstvo vektorov parametrov riadenia. Zaujímavé správanie možno pozorovať aj pri zmenách parametra c , kedy pri jeho nízkych hodnotách, had nikdy nedosahuje príliš nízkej rýchlosti, nezávisle od hodnôt parametrov τ_u a β .



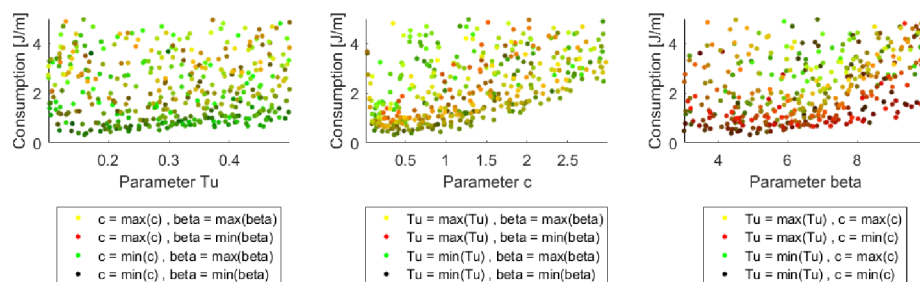
Obr. 84: Vplyv parametrov τ_u , c a β na rýchlosť 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov.

Pokiaľ je snahou minimalizovať energetickú spotrebu robota, vhodná voľba parametrov sa priveľmi nelíši od voľby parametrov pre maximalizáciu rýchlosti. Rozdiel v trende vplyvu parametrov na požadované kritéria vidíme predovšetkým u parametra β , kde dochádza v priemere k lepším výsledkom pri voľbe o niečo vyšších hodnôt. Túto skutočnosť možno pozorovať na grafe na obrázku Obr. 85. Najnižšia nameraná spotreba ($0.33J/m$) bola dosiahnutá pri použití rovnakých parametrov riadenia ako ako pri maximalizácii rýchlosti.



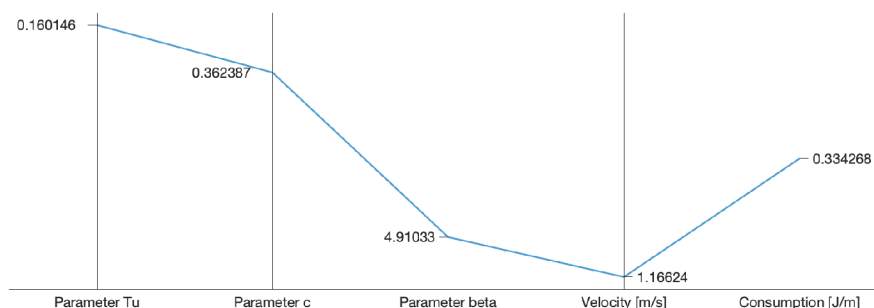
Obr. 85: Vplyv kombinácií parametrov τ_u , c a β na spotrebu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov.

Ako možno vidieť na grafoch na obrázku Obr. 86, najväčší vplyv na energetickú spotrebu robota má práve parameter c , a pre hodnoty v intervale $[0.5, 3]$ možno tvrdiť, že čím je hodnota c vyššia, tým je vyššia aj spotreba. Príliš nízka hodnota c nie je taktiež vhodnou voľbou, keďže pri hodnotách blízkyh nule, robot nie je schopný sa rozpochybovať.



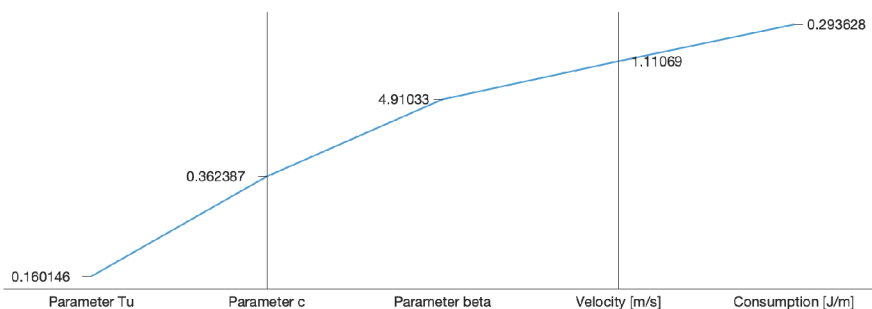
Obr. 86: Vplyv parametrov τ_u , c a β na spotrebu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov.

Keďže rozdiely medzi minimálnou a maximálnou nameranou rýchlosťou a medzi minimálnou a maximálnou energetickou spotrebou sú nulové, je zjavné, že bude nájdené len jedno nedominované riešenie, ako možno vidieť na grafe na obrázku Obr. 87. Toto je dôsledkom už spomínanej vysokej citlivosti systému na malú zmenu parametrov riadenia.



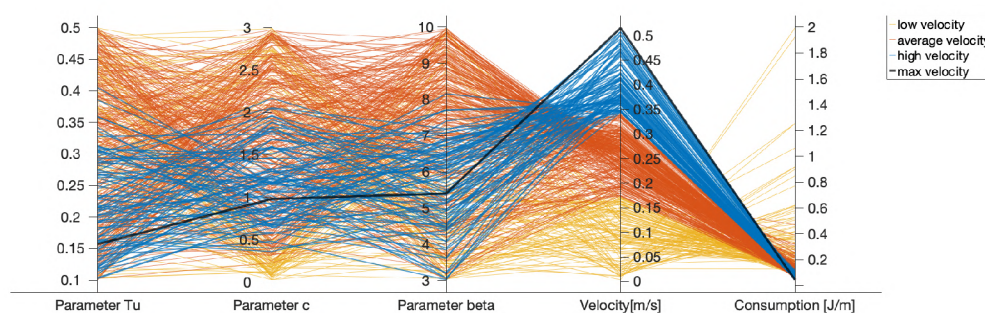
Obr. 87: Nedominované vektory parametrov pre riadenie 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov nájdené na testovanej množine.

Pri skúmaní riadenia modelu 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu bolo možné pozorovať takmer identické správanie, dokonca bolo taktiež nájdené jediné nedominované riešenie (Obr. 88), a to pre rovnakú voľbu parametrov τ_u , c a β ako pri riadení 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu. Pri takejto identickej voľbe parametrov sa však líšila rýchlosť (1.11m/s) aj spotreba 0.29J/m , ale len minimálne. Tieto hodnoty taktiež zodpovedali najlepším nameraným hodnotám.



Obr. 88: Nedominované vektory parametrov pre riadenie 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou siete CPG zlozenej z Matsuoka oscilátorov nájdené na testovanej množine.

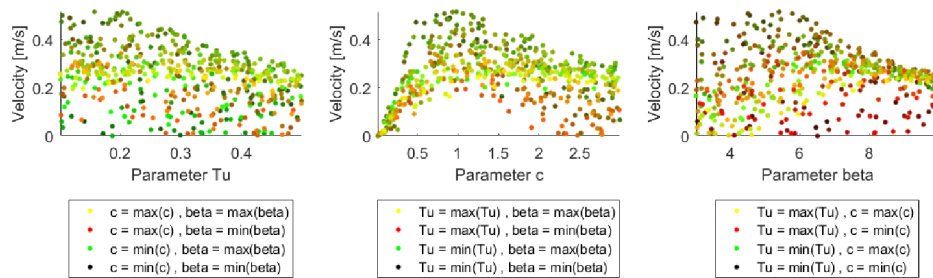
Najhoršie výsledky v dosahovanej rýchlosti boli namerané pri simulácii 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu, rovnako ako pri ostatných riadiacich metódach. Výsledky experimentálneho merania možno vidieť na grafe na obrázku Obr. 89. Najvyššia nameraná rýchlosť (0.52m/s) bola dosiahnutá pri riadení s parametrami $\tau_u = 0, 16$, $c = 0.98$ a $\beta = 5.4$, čo zodpovedá frekvencii $\omega = 6.28\text{rad/s}$, amplitúde $A = 0.45\text{rad}$ a fázovému rozdielu $\Delta\phi = 0.94\text{rad}$. Spotreba robota pri tomto riadení bola 0.04J/m . V porovnaní s riadením 8-článkových mechanizmov, môžeme vidieť, že tento systém nie je priveľmi citlivý na malé zmeny parametrov riadenia, a možno tak predpokladať, že najlepšie namerané hodnoty budú blízke skutočným najlepším hodnotám.



Obr. 89: Vplyv kombinácií parametrov τ_u , c a β na rýchlosť 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zlozenej z Matsuoka oscilátorov.

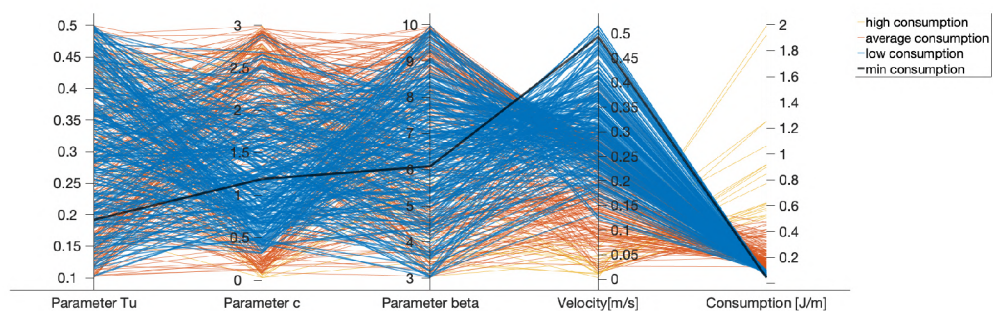
Vplyv jednotlivých parametrov má podobný charakter ako pri riadení 8-článkového mechanizmu, avšak nedochádza u neho k takému výraznému exponenciálnemu zvýšeniu rýchlosti pri menších zmenách parametrov. Túto skutočnosť možno vidieť na grafoch na obrázku Obr. 90. Je zjavné, že v tomto prípade hrá významnú úlohu pri riadení parameter c , a pri jeho vyššej hodnote je vhodné zvoliť vyššiu

hodnotu parametra β v kombinácii s nižšou hodnotou parametra τ_u , zatiaľ čo pri nižších hodnotách c , je vhodné zvoliť oba parametre τ_u a β nižšie.



Obr. 90: Vplyv parametrov τ_u , c a β na rýchlosť 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov.

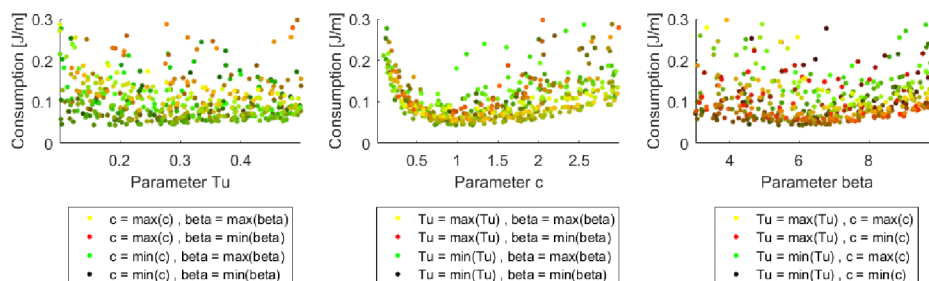
Keďže ide o pomerne malý a ľahký model na klzkom povrchu, je možno predpokladať, že energetická spotreba takéhoto modelu bude relatívne nízka v porovnaní s ostatnými modelmi, keďže pri natáčaní článkov nie je potrebné vyvinúť veľký krútiaci moment. Túto domnienku potvrdzuje graf na obrázku Obr. 77, kde možno vidieť veľké množstvo nastavení, ktoré vedú k veľmi nízkej spotrebe. Najnižšia nameraná spotreba ($0.04J/m$) bola dosiahnutá použitím parametrov $\tau_u = 0.19$, $c = 1.19$ a $\beta = 6.1$, čo zodpovedá uhlovej frekvencii $\omega = 5.46rad/s$, amplitúde $A = 0.49rad$ a fázovému rozdielu $1.09rad$. Rýchlosť, ktorú robot dosahoval pri tomto riadení, bola $0.49m/s$. Ako možno vidieť na grafe, dobré nastavenia boli nájdené pre parametre v hodnotách takmer po celom ich intervale.



Obr. 91: Vplyv kombinácií parametrov τ_u , c a β na spotrebu 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov.

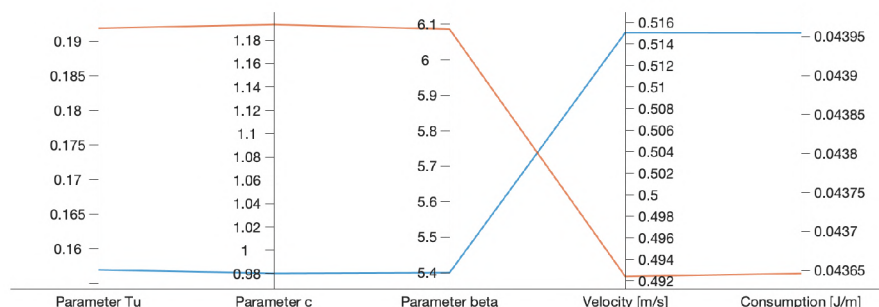
Na grafoch na obrázku Obr. 78 možno vidieť, že najvýznamnejší vplyv na spotrebu má hodnota parametra c , u ktorej možno pozorovať exponenciálne klesanie spotreby s rastúcou hodnotou c na intervale $[0, 1]$. V tomto intervale hodnoty

ostatných parametrov majú len minimálny vplyv. Ďalej možno vidieť, že najnižšej spotreby je dosiahnuté voľbou kombinácie relatívne nízkych hodnôt parametrov τ_u a c a stredne vysokej hodnoty parametra β .



Obr. 92: Vplyv parametrov τ_u , c a β na spotrebu 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov.

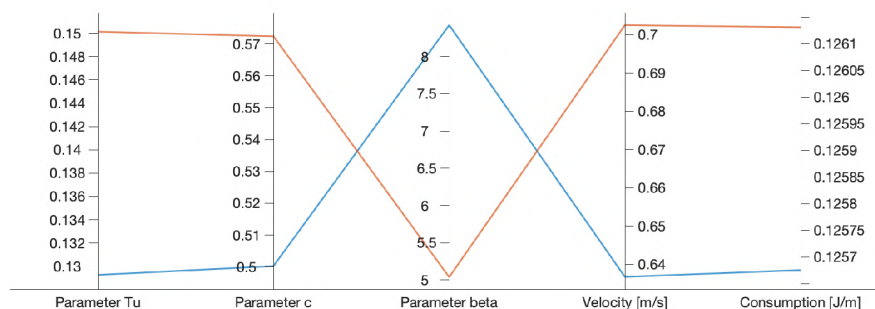
Na testovanej množine bola nájdená dvojica nedominovaných riešení (Obr. 79), z ktorých jedno riešenie predstavuje nastavenie parametrov pre maximalizáciu rýchlosti, a druhé riešenie predstavuje nastavenie parametrov pre minimalizáciu spotreby.



Obr. 93: Nedominované vektory parametrov pre riadenie 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov nájdené na testovanej množine.

Pri riadení 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu sme mohli pozorovať podobný vplyv parametrov na rýchlosť robota (Obr. 94). Pri skúmaní vplyvu parametrov na spotrebu robota sme došli k záveru, že je vhodné voliť omnoho nižšej hodnoty parametra c a o málo nižších hodnôt parametrov τ_u a b . Takéto správanie je spôsobené tým, že pri otáčaní článkov robotického hada na neklzkom povrchu je potrebné, aby jednotlivé kĺby vyvíjali vyšší krúťivý moment. Prílišné natáčanie tela robotického hada má tak nepriaznivý vplyv na spotrebu. Najvyššia nameraná rýchlosť (0.7m/s) bola dosiahnutá pri parametroch $\tau_u = 0.15$, $c = 0.57$ a

$\beta = 5.12$, čo zodpovedá uhlovej frekvencii $\omega = 6.61rad/s$, amplitúde $A = 0.27rad$ a fázovému rozdielu $\Delta\phi = 0.99rad$ Spotreba hada pri tomto riadení bola $0.126J/m$ Najnižšia nameraná spotreba ($0.125J/m$) bola dosiahnutá použitím hodnôt $\tau_u = 0.13$, $c = 0.5$, $\beta = 8.35$, čo zodpovedá uhlovej frekvencii $\omega = 8.98rad/s$, amplitúde $A = 0.2rad$ a fázovému rozdielu $\Delta\phi = 1.35rad/s$. Tieto dve riešenia boli taktiež jedinými nedominovanými riešeniami nájdenými na testovanej množine.



Obr. 94: Nedominované vektory parametrov pre riadenie 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov nájdené na testovanej množine.

3.5 Hľadanie optimálneho nastavenia parametrov riadenia

V tejto kapitole sa zameriame na hľadanie čo najlepších nastavení parametrov riadenia 8-článkového a 3-článkového robotického hada na neklzkom a klzkom povrchu. Pri hľadaní optimálneho nastavenia parametrov riadenia nebude cieľom nájsť všetky nedominované riešenia, čo by viedlo k vysokému počtu riešení a samotné hľadanie by bolo veľmi výpočtovo náročné. Zameriame sa teda len na hľadanie takých parametrov riadenia, ktoré maximalizujú rýchlosť robota, minimalizujú energetickú spotrebu robota a maximalizujú pomer rýchlosti a spotreby robota. Výsledkom prehľadávania oblasti vektorov budú tak tri vektory, z ktorých každý jeden bude optimálnym nastavením v jednej záujmovej oblasti (maximálna rýchlosť, minimálna spotreba, maximálny pomer rýchlosť/spotreba). Je zrejmé, že energetická spotreba je závislá od rýchlosti a ľahko sa teda môže stať, že niektoré z trojice nájdených vektorov budú zhodné. Po získaní vhodných nastavení, budú výsledky porovnané s hodnotami nájdenými pri experimentálnom meraní, kedy bolo náhodne vybraných 500 vektorov parametrov a následne boli tieto hodnoty použité pre simuláciu, ktorá bola po ukončení vyhodnotená. Predpokladáme, že pri použití prehľadávacieho algoritmu budú nájdené lepšie riešenia pri prehľadaní menšieho počtu vektorov parametrov.

Na hľadanie optimálnych nastavení parametrov (p, q, r) pre jednotlivé metódy riadenia bude použitá priama prehľadávacia metóda Pattern Search. Ide o metódu

numerickej optimalizácie, ktorá nevyžaduje gradient, a možno ju použiť pre funkcie, ktoré nie sú spojité alebo diferencovateľné. Metóda je popísaná algoritmom:

S1. Zvoľ náhodný vektor parametrov $P = (p, q, r)$, $p \in P$, $q \in Q$, $r \in R$ a prirad' $P_{old} = P$. Nastav hodnotu $UPPER = f(P_{old})$. Zvoľ vektor dĺžok krokov $d = (d_1, d_2, d_3)$.

S2. Prehľadaj všetky vektory P , ktoré sa od vektoru P_{old} líšia v práve jednej súradnici o hodnotu prvku z vektoru d v tej istej súradnici. Hodnote P_{new} prirad' súradnice bodu P , pre ktorý je $f(P)$ minimom z množiny týchto vektorov.

S3. Ak $\min(f(P_{new})) < UPPER$, nastav $UPPER = \min(f(P_{new}))$ a za bod P_{old} zvol bod P z množiny bodov P_{new} , ktorého hodnota $f(P)$ je minimálna. Ak $\min(f(P_{new})) \geq UPPER$, $d = d/2$.

S4. Ak $d < \epsilon$, ukonči hľadanie a optimálnym riešením je bod P_{old} . Ak $d > \epsilon$ opakuj kroky S1 - S4.

Vzhľadom na to, že energetická spotreba je závislá na rýchlosti, môžeme predpokladať, že pri prehľadávaní vektorového priestoru súčasne pre všetky záujmové oblasti, počet iterácií potrebný k nájdeniu všetkých troch vektorov bude výrazne nižší, než keby bol vektorový priestor prehľadávaný zvlášť pre každú jednu záujmovú oblasť. Pri takomto prehľadávaní nebudeme pracovať len s jedným najlepším doposiaľ nájdeným riešením, ale s množinou doposiaľ najlepších nájdených riešení, v ktorej budú v každej iterácii maximálne tri vektory a minimálne jeden vektor, pričom každý jeden vektor v tejto množine bude predstavovať doposiaľ najlepšie nájdené riešenie minimálne v jednej záujmovej oblasti. Pri každom novom najlepšom nájdenom vektore parametrov v ľubovoľnej záujmovej oblasti budú z množiny doposiaľ najlepších nájdených riešení vylúčené všetky vektory, ktoré nový vektor prevyšuje. Množina doposiaľ najlepších nájdených vektorov musí v každom kroku obsahovať práve jeden vektor pre každú záujmovú oblasť. Prehľadávané oblasti budú obmedzené rovnako, ako boli pri experimentálnom meraní. Na začiatku hľadania bude nastavená dĺžka kroku na tretinu veľkosti intervalu jednotlivých parametrov a zložky vektoru ϵ budú pre prehľadávanie nastavené na stotinu veľkosti intervalu jednotlivých parametrov.

3.5.1 Výsledky - Serpentinoid

Hľadaním optimálnych nastavení parametrov serpentinoidnej krivky metódou Pattern Search boli nájdené riešenia veľmi blízke najlepším riešeniam, nájdeným na množine náhodných nastavení (kapitola 3.4.1). Všetky nájdené optimálne nastavenia sú popísané v tabuľkách Tab. 5, Tab. 6, Tab. 7 a Tab. 8. Riadiace signály zodpovedajúce nájdeným optimálnym nastaveniam možno nájsť v prílohe A.1. Pri úlohe

maximalizácie rýchlosti sa preukázali ako vhodné nastavenia také, kde uhlová rýchlosť bola omnoho vyššia a hodnoty parametra a a b boli nižšie, než v prípade, kedy bolo cieľom minimalizovať spotrebu. Pri riadení 8-článkového mechanizmu boli tieto rozdiely v hodnotách parametrov omnoho výraznejšie, ako pri riadení 3-článkového robotického hada, nezávisle od štruktúry povrchu. Pri úlohe maximalizácie rýchlosti 8-článkového robotického hada sme pozorovali, že optimálnym nastavením uhlovej frekvencie je skutočne veľmi vysoká hodnota. Pohyb s takouto vysokou uhlovou frekvenciou je možný len pre dostatočne ľahkého robota s dostatočne silnými a rýchlymi motormi v kĺboch. Pri takto vysokej frekvencii je smer pohybu často nepredvídateľný najmä pri nerovnom povrchu, alebo pri výskyte nepresností vo výpočtoch. Takéto nastavenie malo za následok to, že spotreba robota bola extrémne vysoká. Keďže vektory parametrov v daných intervaloch dôkladne pokrývajú oblasť vhodných riešení, je možné predpokladať, že nájdené optimálne nastavenia sú blízke skutočným optimálnym nastaveniam, a pri malých zmenách hodnôt jednotlivých parametrov by nedochádzalo k výrazne odlišným výsledkom.

	ω	a	b	vel	$cons$	$vel/cons$
<i>max vel</i>	15.855	0.22996	4.926	2.3342	0.61798	3.7771
<i>min cons</i>	6.6916	0.36085	5.7114	1.0873	0.28936	3.7577
<i>max vel/cons</i>	11.928	0.29541	5.7114	1.8592	0.3796	4.8979

Tab. 5: Nájdené optimálne nastavenia parametrov serpentínoidnej krivky riadiacej 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.

	ω	a	b	vel	$cons$	$vel/cons$
<i>max vel</i>	28.296	0.28399	9.4248	1.8963	1.2178	1.5572
<i>min cons</i>	3.4247	0.41489	4.8223	0.64866	0.2539	2.5548
<i>max ratio</i>	8.0062	0.28399	5.6077	1.2441	0.29128	4.2712

Tab. 6: Nájdené optimálne nastavenia riadenia 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou Serpentinoid pre dané kritéria.

	ω	a	b	vel	$cons$	$vel/cons$
<i>max vel</i>	9.9956	0.36322	7.0686	0.85726	0.097914	8.7552
<i>min cons</i>	7.3776	0.36322	7.0686	0.79265	0.072913	10.871
<i>max ratio</i>	7.3776	0.36322	7.0686	0.79265	0.072913	10.871

Tab. 7: Nájdené optimálne nastavenia parametrov serpentínoidnej krivky riadiacej 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.

	ω	a	b	vel	$cons$	$vel/cons$
<i>max vel</i>	6.8337	0.51988	7.0686	0.5326	0.057221	9.3077
<i>min cons</i>	4.2157	0.51988	9.4248	0.32445	0.054281	5.9772
<i>max ratio</i>	6.8337	0.51988	7.0686	0.5326	0.057221	9.3077

Tab. 8: Nájdené optimálne nastavenia parametrov serpentinoidnej krivky riadiacej 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu.

3.5.2 Výsledky - CPG sieť fázových oscilátorov

Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z fázových oscilátorov sú popísané v tabuľkách Tab. 9, Tab. 10, Tab. 11 a Tab. 12. Riadiace signály zodpovedajúce týmto optimálnym nastaveniam možno nájsť v prílohe A.2. Nájdené riešenia boli výrazne lepšie od najlepších nájdených riešení pri prehľadávaní náhodnej množiny parametrov (kapitola 3.4.2) takmer vo všetkých ohľadoch, predovšetkým v maximálnej dosahovanej rýchlosti. Pre maximalizáciu rýchlosti sa preukázali vhodnejšie nastavenia parametrov také, kde uhlová frekvencia je veľmi vysoká, a amplitúda a fázový rozdiel je nižší, v porovnaní s riešeniami pre minimalizáciu spotreby robota. Najlepšie zlepšenie vidíme v optimálnom nastavení pre maximalizáciu rýchlosti 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, kde nameraná rýchlosť presahovala najvyššiu nameranú rýchlosť na množine náhodných riešení o takmer $0.5m/s$. Takéto výrazné zlepšenie je dôsledkom veľkej citlivosti systému na malé zmeny v riadení.

	ω	A	$\Delta\phi$	vel	$cons$	$vel/cons$
<i>max vel</i>	8.1866	0.13222	0.27268	2.1129	0.69825	3.0259
<i>min cons</i>	6.4991	0.16494	0.53448	1.1326	0.27533	4.1136
<i>max ratio</i>	7.9991	0.16494	0.50176	1.4669	0.29955	4.8969

Tab. 9: Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z fázových oscilátorov riadiacej 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.

	ω	A	$\Delta\phi$	vel	$cons$	$vel/cons$
<i>max vel</i>	8.625	0.11306	0.48711	1.2388	0.4235	2.9252
<i>min cons</i>	6.75	0.11306	1.4399	0.34931	0.20059	1.7414
<i>max ratio</i>	7.125	0.17851	0.61801	1.0036	0.27433	3.6583

Tab. 10: Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z fázových oscilátorov riadiacej 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu.

	ω	A	$\Delta\phi$	vel	$cons$	$vel/cons$
<i>max vel</i>	8.5187	0.25061	0.56362	0.80788	0.10514	7.6839
<i>min cons</i>	8.5187	0.25061	0.56362	0.80788	0.10514	7.6839
<i>max ratio</i>	8.5187	0.25061	0.56362	0.80788	0.10514	7.6839

Tab. 11: Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z fázových oscilátorov riadiacej 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.

	ω	A	$\Delta\phi$	vel	$cons$	$vel/cons$
<i>max vel</i>	7.8798	0.29975	0.8154	0.55661	0.054279	10.255
<i>min cons</i>	6.0048	0.29975	1.0118	0.4219	0.040142	10.51
<i>max ratio</i>	6.3798	0.29975	0.9463	0.47656	0.042736	11.151

Tab. 12: Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z fázových oscilátorov riadiacej 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu.

3.5.3 Výsledky - CPG sieť Matsuoka oscilátorov

Pri hľadaní optimálnych nastavení parametrov CPG siete z Matsuoka oscilátorov metódou Pattern Search boli zaznamenané celkovo najvýraznejšie zlepšenia zo všetkých metód, a to predovšetkým v oblasti maximalizácie rýchlosti, v porovnaní s výsledkami nájdenými na náhodnej množine nastavení (kapitola 3.4.3). Najvýraznejšie zlepšenie bolo zaznamenané pri maximalizácii rýchlosti 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, kedy rýchlosť presahovala najvyššiu nameranú hodnotu na náhodnej množine nastavení o viac ako $1.1m/s$. U ostatných modelov boli výsledky porovnateľne dobré. Vo všetkých troch záujmových oblastiach sa optimálne nastavenia parametrov líšia len minimálne alebo vôbec. Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov sú popísané v tabulkách Tab. 13, Tab. 14, Tab. 15 a Tab. 16. Riadiace signály zodpovedajúce týmto optimálnym nastaveniam možno nájsť v prílohe A.3.

	τ_u	c	β	vel	$cons$	$vel/cons$
<i>max vel</i>	0.094579	0.19049	3.4454	2.2786	0.72941	3.124
<i>min cons</i>	0.11333	0.25299	3.4454	1.5648	0.37098	4.218
<i>max ratio</i>	0.10083	0.25299	3.2996	1.9304	0.40381	4.7804

Tab. 13: Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov pre riadenie 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.

	τ_u	c	β	vel	$cons$	$vel/cons$
<i>max vel</i>	0.12328	0.20589	4.2367	1.4574	0.55539	2.6242
<i>min cons</i>	0.12328	0.33089	4.82	0.89972	0.30414	2.9582
<i>max ratio</i>	0.11078	0.26839	4.2367	1.2809	0.31784	4.03

Tab. 14: Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov pre riadenie 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu.

	τ_u	c	β	vel	$cons$	$vel/cons$
<i>max vel</i>	0.13978	0.55995	4.7829	0.789	0.10926	7.2213
<i>min cons</i>	0.13978	0.55995	4.7829	0.789	0.10926	7.2213
<i>max ratio</i>	0.13978	0.55995	4.7829	0.789	0.10926	7.2213

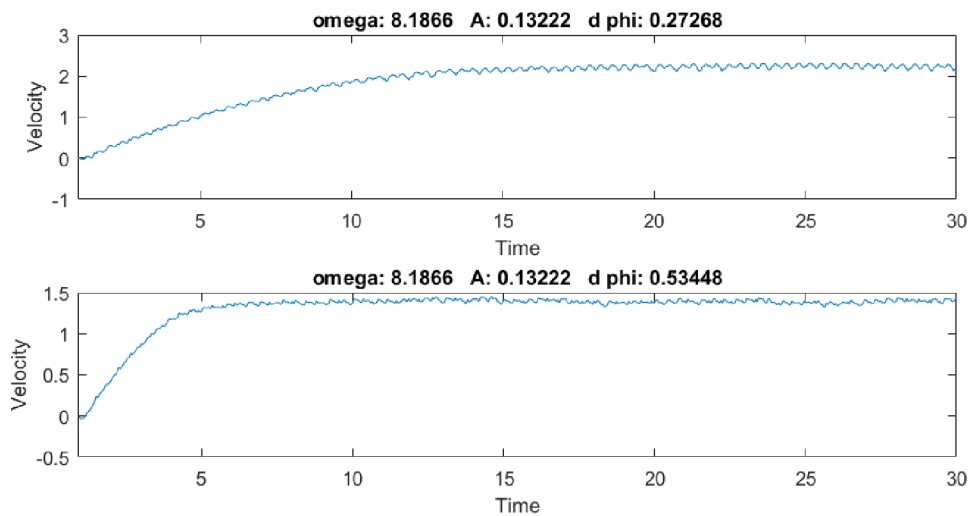
Tab. 15: Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov pre riadenie 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.

	τ_u	c	β	vel	$cons$	$vel/cons$
<i>max vel</i>	0.17209	0.80845	5.571	0.55331	0.044909	12.321
<i>min cons</i>	0.16584	0.80845	5.571	0.5525	0.040876	13.517
<i>max ratio</i>	0.16584	0.80845	5.571	0.5525	0.040876	13.517

Tab. 16: Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov pre riadenie 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu.

Pri sledovaní správania robota riadeného použitím nájdených optimálnych nastavení bolo možné pozorovať, že v prvých niekoľkých sekundách simulácie bola vo väčšine prípadov rýchlosť robota najnižšia, pokiaľ boli použité nastavenia pre maximalizáciu rýchlosti. Toto správanie možno pozorovať takmer vo všetkých situáciách modelujúcich správanie 8-článkového robotického hada. Pri simulácií 3-článkových mechanizmov sa toto správanie taktiež vyskytuje, nie je však až také zjavné. Obecne možno pozorovať, že doba potrebná na zrýchlenie robota na jeho konečnú rýchlosť pri riadení s malým fázovým rozdielom je omnoho vyššia, ako pri vyšších hodnotách tohoto parametra, kedy had dosahuje svojej konečnej rýchlosti takmer okamžite, alebo v priebehu niekoľkých sekúnd. Na obrázku Obr. 95 možno pozorovať toto správanie pri riadení 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov. Ako možno vidieť na obrázku, v prvých niekoľkých sekundách rýchlosť hada s nastavením s nižším fázovým rozdielom mierne presahuje rýchlosť hada s nastavením s vyšším fázovým rozdielom, po niekoľkých sekundách

simulácie sa táto situácia obracia. Keďže pri hľadaní optimálnych nastavení riadenia sme uvažovali dobu simulácie $t_{sim} = 30s$, doba na zrýchlenie robota na dostatočne vysokú rýchlosť bola postačujúca a had s riadením nastaveným pre maximalizáciu rýchlosti skutočne dosahoval predtým namerané hodnoty, dokonca v čase $t = 30s$ túto hodnotu presahoval. Pokiaľ sa pozrieme na nájdené optimálne nastavenia pre maximalizáciu rýchlosti, možno skutočne konštatovať, že vo väčšine prípadov išlo o nastavenia, ktoré viedli k nižším fázovým rozdielom výstupov riadiacich motorizované kľby hada, ako nastavenia pre minimalizáciu spotreby, či maximalizáciu pomeru rýchlosti a spotreby, čím je spomenuté správanie objasnené. Pri rozdieloch vo veľkosti amplitúdy, či uhlovej frekvencie, toto správanie pozorované nebolo.



Obr. 95: Doba potrebná na dosiahnutie konečnej rýchlosti robotického hada.

4 Zhodnotenie a diskusia

Pre riadenia robotických hadov bola navrhnutá dvojica sietí CPG. Tieto siete modelujú využitie dvoch známych, často používaných typov oscilátorov, a to fázových oscilátorov a Matsuoka oscilátorov. Každá z týchto sietí je modelovaná iným setom diferenciálnych rovníc, a ich výstupy závisia od voľby niekoľkých rôznych parametrov. Na množine náhodne vybraných vektorov parametrov boli pozorované vplyvy jednotlivých parametrov na rýchlosť a energetickú spotrebu robotického hada. Bolo tak možné overiť, či sa najlepšie riešenia skutočne nachádzajú na nami vymedzenom priestore parametrov. U oboch metód CPG bolo možné pozorovať, že nájdené najlepšie riešenia, predovšetkým v oblasti rýchlosti robota, nedosahovali porovnateľných hodnôt s hodnotami nameranými pri riadení robota metódou Serpentinoid, a preto sa dalo predpokladať, že dôvodom takýchto výsledkov môžu byť ako obmedzenia parametrov metódy, tak aj prílišná citlivosť systému na malé zmeny v parametroch a nedostatočné prehľadanie oblastí s najlepšimi výsledkami. Táto domnienka bola overená podrobnejším prehľadaním priestoru parametrov prehľadávacím algoritmom Pattern Search, vďaka ktorému bolo možné ukázať, že oblasť parametrov pri týchto dvoch metódach riadenia skutočne nebola dostatočne prehľadaná. Na tento fakt poukazovalo to, že nájdené riešenia optimálneho riadenia výrazne prevyšovali najlepšie namerané hodnoty na množine náhodných riešení.

Metóda prehľadávania Pattern Search sa preukázala ako vhodná metóda pri riešení problému hľadania optimálnych nastavení parametrov riadenia robotického hada pre všetky tri skúmané metódy riadenia. U všetkých troch metód boli nájdené buď omnoho lepšie riešenia, alebo riešenia podobné najlepším riešeniam nájdeným testovaním náhodných vektorov parametrov.

Dobré výsledky boli nájdené pri riadení robotických hadov všetkými tromi metódami, každá však prevyšovala ostatné v inom kritérií. Napríklad najlepšie výsledky v hľadaní nastavení maximalizujúcich rýchlosť 8-článkového robotického hada boli dosiahnuté pri riadení metódou Serpentinoid, nie je však vhodné tvrdiť, že táto metóda pre riadenie konkrétneho modelu je lepšia ako ostatné. Najlepšie nastavenia pre maximalizáciu rýchlosti boli nájdené len vďaka tomu, že parametre riadenia touto metódou nie sú obmedzené, a bolo tak možné prehľadať výrazne širšiu oblasť, predovšetkým vo veľkosti uhlovej frekvencie, a práve tam, kde nájdené vysoké rýchlosti boli dosiahnuté. Môžeme predpokladať, že pri vhodnom vymedzení priestoru parametrov metódy Serpentinoid a pri dostatočne veľkom počte iterácií, by boli nájdené identické riešenia ako pri riadení metódou siete CPG zloženej z fázových oscilátorov, keďže riadiace signály týchto metód sú ekvivalentné a majú tvar sínusoidy. Metóda riadenia sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov sa od ostatných dvoch metód výrazne líši v tvare vlny výstupných signálov, no trend v optimálnom

riadiacom signále pre dané záujmové oblasti zostáva rovnaký. Mohli sme pozorovať, že signál vhodný pre maximalizáciu rýchlosti robota má v porovnaní so signálom minimalizujúcim energetickú spotrebu vždy nižšiu amplitúdu a fázový rozdiel a vyššiu frekvenciu. Jedinou výnimkou tohoto zistenia je signál, získaný nájdeným optimálnym nastavením riadenia maximalizujúcim rýchlosť 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou Serpentinoid. Pri tomto nastavení mal riadiaci signál priveľmi vysokú frekvenciu, ktorá by v reálnych aplikáciách bola nevhodná. Nemožno tak toto nastavenie považovať za relevantné. Za vhodné nastavenia riadenia je možné považovať predovšetkým tie, ktoré maximalizujú pomer rýchlosti a spotreby robota. U takýchto nastavení had dosahuje relatívne vysokej rýchlosti, väčšinou veľmi blízkej maximálnej nameranej rýchlosti a jeho spotreba je pri takomto nastavení prijateľná a často veľmi blízka najnižšej nameranej hodnote.

Konkrétne hodnoty sa pri rôznych výkonoch počítačov a nastaveniach simulácie môžu líšiť, pomery rýchlostí a spotrieb by však mali byť zachované. Je nevyhnutné podotknúť, že nami namerané hodnoty pri experimentálnom meraní, a nájdené optimálne nastavenia sú korektné len pre konkrétne dva modely robotických hadov, ktorými sa táto práca zaoberá.

Pre budúce práce by bolo vhodné skonštruovať reálny model robotického hada, či doplniť simulovaných robotov o rôzne senzory a zamerať sa na riadenie pohybu robotického hada sledovaním zvolenej trajektórie alebo implementáciou autonómneho riadenia.

5 Závěr

V diplomovej práci boli popísané rôzne modely robotických hadov a podrobne preskúvané tri základné metódy riadenia takýchto robotov. Taktiež sme sa zoznámili s niekoľkými výkonnými simulačnými softvérmi, v ktorých je možné takýchto robotov zostaviť a riadiť.

V prostredí simulačného programu CoppeliaSim boli zostavené dva modely robotických hadov, 8-článkový model a 3-článkový model. Konštrukcia vymodelovaných robotov sa skladala z ôsmich (resp. troch) článkov s veľkými pasívnymi kolieskami, pripojenými z bočných strán jednotlivých článkov. Články robota boli prepojené pomocou aktívnych kĺbov schopných ohýbania doľava a doprava. Takáto konštrukcia robotickým hadom umožňovala pohyb po planeárnom povrchu, riadením natočenia jednotlivých motorizovaných kĺbov.

Pre riadenie robota bola navrhnutá dvojica sietí CPG, pričom jedna z týchto sietí realizovala prepojenie fázových oscilátorov, a druhá realizovala prepojenie Matsuka oscilátorov. Pri návrhoch jednotlivých sietí bol pozorovaný vplyv jednotlivých parametrov siete na výstupy siete, bolo tak možné nájsť nastavenia, ktoré by mohli viesť ku generovaniu vhodných periodických signálov určených pre riadenie polohy motorizovaných kĺbov robotického hada.

Použitím navrhnutých sietí CPG a s ohľadom na získané poznatky boli parametre siete nastavené tak, aby výstupy siete mali charakter vhodný pre riadenie skonštruovaných robotických hadov v prostredí simulačného softvéru CoppeliaSim. Vďaka nástroju Remote API bolo možné zahájiť komunikáciu medzi modelom hada v CoppeliaSim a MATLABom. Jednotlivé výpočty sietí boli realizované pomocou MATLABu, a získané výstupy boli použité na riadenie robotických kĺbov simulovaného mechanizmu. Robotických hadov sme boli schopní úspešne rozpohybovať a počas simulácie sme zaznamenávali informácie o polohách jednotlivých článkov či motorizovaných kĺbov, informácie o natočení kĺbov a krúťivý moment kĺbov v daných časových okamihoch. Zo získaných informácií boli vyvedené závery o rýchlosti a energetickej spotrebe robota, a boli vygenerované grafy zobrazujúce rôzne aspekty priebehu simulácie.

Ďalej sme sa zamerali na vplyv jednotlivých parametrov riadenia robotických hadov metódou Serpentinoid a nami navrhnutými CPG sieťami, na rýchlosť a energetickú spotrebu robota. Testovaním množiny náhodných vektorov parametrov sme tak boli schopní určiť parametre, ktoré majú na dané záujmové oblasti najvýraznejší vplyv, a mohli sme vymedziť intervaly, na ktorých by sa mali jednotlivé parametre nachádzať, aby boli dosahované dobré výsledky v oblasti rýchlosti robotického hada a jeho energetickej spotreby. Takáto analýza bola prevedená na štvorici modelov, model 8-článkového robotického hada na nekľzkom povrchu, model 8-článkového

robotického hada na klzkom povrchu, model 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu a model 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu. Na koniec bol priestor parametrov podrobne prehľadovaný prehľadávacou metódou Pattern Search, za účelom nájdenia optimálnych nastavení parametrov riadenia pre maximalizáciu rýchlosti, minimalizáciu spotreby a maximalizáciu pomeru rýchlosti a spotreby. Táto metóda bola úspešná, a skutočne sme boli schopní nájsť nastavenia veľmi blízke optimálnym.

6 Zoznam použitej literatúry

- [1] Arai, M.; Tanaka, Y.; Hirose, S.; aj.: *Development of “Souryu-IV” and “Souryu-V:” Serially connected crawler vehicles for in-rubble searching operations: Research Articles. Journal of Field Robotics*, ročník 25, 01 2008: s. 31–65, doi: 10.1002/rob.v25:1/2.
- [2] Borenstein, J.; Granosik, G.; Hansen, M.: *The OmniTread serpentine robot: design and field performance*. In *Unmanned Ground Vehicle Technology VII*, ročník 5804, editace G. R. Gerhart; C. M. Shoemaker; D. W. Gage, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2005, s. 324 – 332, doi: 10.1117/12.601486.
URL <https://doi.org/10.1117/12.601486>
- [3] Borenstein, J.; Hansen, M.; Nguyen, H.: *The OmniTread OT-4 Serpentine Robot for Emergencies and Hazardous Environments*. In *2006 International Joint Topical Meeting: “Sharing Solutions for Emergencies and Hazardous Environments,” February 12-15, 2006*.
- [4] CAD.CZ: *Robot, nebo had?* 2001, [Online; accessed 10-January-2021].
URL <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/1914-robot-nebo-had.html>
- [5] Carter, E.: *All About Snakes*. [Online; accessed 10-January-2021].
URL <https://www.howitworksdaily.com/all-about-snakes/>
- [6] Cohen, A. H.; Holmes, P. J.; Rand, R. H.: *The nature of the coupling between segmental oscillators of the lamprey spinal generator for locomotion: A mathematical model. Journal of Mathematical Biology*, ročník 13, 1982: str. 345–369, ISSN 1432-1416, doi:<https://doi.org/10.1007/BF00276069>.
- [7] Conradt, J.; Varshavskaya, P.: *Distributed Central Pattern Generator Control for a Serpentine Robot*. In *Proceedings of the Joint International Conference on Artificial Neural Networks and Neural Information Processing.*, June 2003, s. 338–341.
- [8] Coppelia Robotics: *CoppeliaSim User Manual*. [Online; accessed 3-February-2021].
URL <https://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/index.html>
- [9] Crespi, A.; Badertscher, A.; Guignard, A.; aj.: *AmphiBot I: an amphibious snake-like robot. Robotics and Autonomous Systems*, ročník 50, č. 4, 2005: s.

- 163–175, ISSN 0921-8890, doi:<https://doi.org/10.1016/j.robot.2004.09.015>, bio-mimetic Robotics.
- [10] Crespi, A.; Ijspeert, A.: *AmphiBot II: An Amphibious Snake Robot that Crawls and Swims using a Central Pattern Generator. Proceedings of the 9th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2006)*, 01 2006.
- [11] Cyberbotics Ltd.: *Webots Reference Manual*. [Online; accessed 3-February-2021].
URL <https://cyberbotics.com/doc/reference/index>
- [12] Eckert, P.; Spröwitz, A.; Witte, H.; aj.: *Comparing the effect of different spine and leg designs for a small, bounding quadruped robot*. In *Dynamic walking*, June 10, 2014 – June 13, 2014.
- [13] Örjan Ekeberg: *A combined neuronal and mechanical model of fish swimming. Biological Cybernetics.*, ročník 69(5-6), 1993: str. 363–374, ISSN 0340-1200.
URL <https://doi.org/10.1007/BF01185408>
- [14] Hildenbrand, D.: *Introduction to Geometric Algebra Computing*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019, ISBN 9781498748384, doi:<https://doi.org/10.1201/9781315152172>.
- [15] Hirose, S.; Cave, P.; Goulden, C.: *Biologically Inspired Robots: Serpentine Locomotors and Manipulators*. USA: Oxford University Press, Inc., 1993, ISBN 0198562616.
- [16] Hirose, S.; Yamada, H.: *Machine Design of Biologically Inspired Robots*. 2009.
- [17] Hopkins, J. K.; Spranklin, B. W.; Gupta, S.: *A survey of snake-inspired robot designs. Bioinspiration biomimetics*, ročník 4 2, 2009: str. 021001.
- [18] Hrdina, J.; Navrat, A.; Vasik, P.; aj.: *Local Control of (4,5,7,8-10)-Filtration Snake Robot via CGA. MENDEL*, ročník 23, č. 1, Jun. 2017: s. 157–162, doi: [10.13164/mendel.2017.1.157](https://doi.org/10.13164/mendel.2017.1.157).
URL <https://mendel-journal.org/index.php/mendel/article/view/67>
- [19] Hrdina, J.; Návrat, A.; Vašík, P.; aj.: *CGA-based robotic snake control. Advances in Applied Clifford Algebras*, ročník 27, 2017: str. 621–632, ISSN 1661-4909, doi: <https://doi.org/10.1007/s00006-016-0695-5>.
- [20] Hůlka, T.; Matoušek, R.; Dobrovský, L.; aj.: *Optimization of Snake-like Robot Locomotion Using GA: Serpenoid Design. MENDEL*, ročník 26, č. 1, Aug. 2020: s. 1–6, doi:[10.13164/mendel.2020.1.001](https://doi.org/10.13164/mendel.2020.1.001).
URL <https://mendel-journal.org/index.php/mendel/article/view/113>

- [21] Ijspeert, A.; Crespi, A.: *Online trajectory generation in an amphibious snake robot using a lamprey-like central pattern generator model*. 05 2007, s. 262 – 268, doi:10.1109/ROBOT.2007.363797.
- [22] Ijspeert, A. J.: *Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review*. *Neural Networks*, ročník 21, č. 4, 2008: s. 642–653, ISSN 0893-6080, doi:<https://doi.org/10.1016/j.neunet.2008.03.014>, robotics and Neuroscience.
- [23] Ijspeert, A. J.; Crespi, A.; Ryczko, D.; aj.: *From Swimming to Walking with a Salamander Robot Driven by a Spinal Cord Model*. *Science*, ročník 315, č. 5817, 2007: s. 1416–1420, ISSN 0036-8075, doi:10.1126/science.1138353.
URL <https://science.sciencemag.org/content/315/5817/1416>
- [24] Inoue, K.; Ma, S.; Jin, C.: *Neural oscillator network-based controller for meandering locomotion of snake-like robots*. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, ročník 5, 2004, s. 5064–5069, doi:10.1109/ROBOT.2004.1302520.
- [25] Kimura, H.; Akiyama, S.; Sakurama, K.: *Realization of Dynamic Walking and Running of the Quadruped Using Neural Oscillator*. *Autonomous Robots*, ročník 7, 1999: str. 247–258, ISSN 1573-7527, doi:<https://doi.org/10.1023/A:1008924521542>.
- [26] Klaassen, B.; Paap, K.: *GMD-SNAKE2: a snake-like robot driven by wheels and a method for motion control*. 05 1999, ISBN 0-7803-5180-0, s. 3014 – 3019 vol.4, doi:10.1109/ROBOT.1999.774055.
- [27] Klein, M. A.; Szczecinski, N. S.; Ritzmann, R. E.; aj.: *Simulated neural dynamics produces adaptive stepping and stable transitions in a robotic leg*. In *Biomimetic and Biohybrid Systems*. Milan, Italy: Springer, 2014, ISBN 978-3-319-09434-2, 166–177 s.
- [28] Kyriakopoulos, K. J.; Migadis, G.; Sarrigeorgidis, K.: *The NTUA snake: Design, planar kinematics, and motion planning*. *Journal of Robotic Systems*, ročník 16, č. 1, 1999: s. 37–72, doi:[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4563\(199901\)16:1<37::AID-ROB4>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4563(199901)16:1<37::AID-ROB4>3.0.CO;2-V).
- [29] Lim, J.; Yang, W.; Shen, Y.: *Analysis and Validation of Serpentine Locomotion Dynamics of a Wheeled Snake Robot Moving on Varied Sloped Environments*. In *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2020)*, May 2020.

- [30] Maity, A.; Majumder, S.: *Serpentine robots: A study of design philosophy. IEEE 15th International Conference on Advanced Robotics: New Boundaries for Robotics, ICAR 2011*, 06 2011, doi:10.1109/ICAR.2011.6088572.
- [31] Majid, M. H. A.; Khan, M. R.; Sidek, S. N.: *Development of Wheel-less Snake Robot with Two Distinct Gaits and Gait Transition Capability. International Journal of Automation and Computing.*, ročník 10, 2013: s. 534–544, ISSN 1751-8520, doi:<https://doi.org/10.1007/s11633-013-0751-8>.
- [32] Matsuo, T.; Ishii, K.: *Development of neural oscillator based motion control system and applied to snake-like robot. In 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, s. 3697–3702, doi: 10.1109/IROS.2007.4399615.
- [33] Matsuoka, K.: *Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation. Biological Cybernetics*, ročník 52, 1985: str. 367–376, ISSN 1432-0770, doi:<https://doi.org/10.1007/BF00449593>.
- [34] Moon, B.: *Snake Locomotion*. [Online; accessed 10-January-2021].
URL <https://userweb.ucl.ac.uk/~brm2286/locomotn.htm>
- [35] Mori, M.; Hirose, S.: *Three-dimensional serpentine motion and lateral rolling by active cord mechanism ACM-R3. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, ročník 1, 2002: s. 829–834.
- [36] Mori, M.; Yamada, H.; Hirose, S.: *Design and Development of Active Cord Mechanism “ACM-R3” and its 3-dimensional Locomotion Control. Journal of the Robotics Society of Japan*, ročník 23, 2005: s. 886–897.
- [37] Ohno, H.; Hirose, S.: *Design of slim slime robot and its gait of locomotion. In Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No.01CH37180)*, ročník 2, 2001, s. 707–715 vol.2, doi: 10.1109/IROS.2001.976252.
- [38] Open Source Robotics Foundation: *Gazebo Documentation Index*. [Online; accessed 3-February-2021].
URL <https://osrf.github.io/gazebo-doc-index/>
- [39] Pollock, C.: *Snake anatomy basics*. 2020, [Online; accessed 10-January-2021].
URL <https://lafeber.com/vet/snake-anatomy-basics/>
- [40] Qiao, G.; Zhang, Y.; Wen, X.; aj.: *Triple-layered central pattern generator-based controller for 3D locomotion control of snake-like robots. International Journal*

- of Advanced Robotic Systems*, ročník 14, č. 6, 2017: str. 1729881417738101, doi: 10.1177/1729881417738101.
- [41] Rohmer, E.; Singh, S.; Freese, M.: *V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework*. 11 2013, s. 1321–1326, doi:10.1109/IROS.2013.6696520.
- [42] Shuntaro, C.; Makoto, M.; Hiroya, Y.; aj.: *Design and control of amphibious Snake-like Robot "ACM-R5"*. 2005.
- [43] Sugita, S.; Ogami, K.; Michele, G.; aj.: *A Study on the Mechanism and Locomotion Strategy for New Snake-Like Robot Active Cord Mechanism – Slime model 1 ACM-S1*. *Journal of Robotics and Mechatronics*, ročník 20, č. 2, 2008: s. 302–310, doi:10.20965/jrm.2008.p0302.
- [44] Takayama, T.; Hirose, S.: *Development of Souryu-I connected crawler vehicle for inspection of narrow and winding space*. In *2000 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2000. 2000 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. 21st Century Technologies*, ročník 1, 2000, s. 143–148 vol.1, doi:10.1109/IECON.2000.973140.
- [45] Takayama, T.; Hirose, S.: *Amphibious 3D active cord mechanism "HELIX" with helical swimming motion*. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, ročník 1, 2002: s. 775–780 vol.1.
- [46] Wikipedia contributors: *Central pattern generator* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2020, [Online; accessed 2-April-2021].
URL https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Central_pattern_generator&oldid=992612067
- [47] Wikipedia contributors: *Webots* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2021, [Online; accessed 13-April-2021].
URL <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Webots&oldid=1010030316>
- [48] Wu, X.; Ma, S.: *CPG-based control of serpentine locomotion of a snake-like robot*. *Mechatronics*, ročník 20, č. 2, 2010: s. 326–334, ISSN 0957-4158, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.01.006>.
- [49] Yamada, H.; Hirose, S.: *Development of Practical 3-Dimensional Active Cord Mechanism ACM-R4*. *Journal of Robotics and Mechatronics*, ročník 18, č. 3, 2006: s. 305–311, doi:10.20965/jrm.2006.p0305.

- [50] Zhang, H.; Wang, W.; Deng, Z.; aj.: *A Novel Reconfigurable Robot for Urban Search and Rescue. International Journal of Advanced Robotic Systems*, ročník 3, č. 4, 2006: str. 48, doi:10.5772/5719.

7 Zoznam obrázkov a tabuliek

7.1 Zoznam obrázkov

1	Bočné vlnenie [5].	18
2	Harmonikový pohyb [5].	18
3	Bočný pohyb [5].	18
4	Priamočiary pohyb [5].	19
5	Robot ACM-III. [16]	20
6	Robot ACM-R3. [16]	21
7	Robot ACM-R5. [16]	21
8	Robot Slim Slime. [16]	22
9	Robot ACM-R4. [16]	23
10	Robot Souryu-IV. [16]	24
11	Robot OmniTread OT-8. [17]	24
12	Vplyv parametra a na serpentinoidnú krivku	25
13	Vplyv parametra b na serpentinoidnú krivku	25
14	Vplyv parametra c na serpentinoidnú krivku	26
15	Diskrétna serpentinoidná krivka.	26
16	Absolútny a relatívny uhol.	27
17	Oscilatorový model CPG.	29
18	Fázové oscilátorové modely.	30
19	Matsuoka oscilátorové modely.	31
20	Porovnanie výstupov fázových oscilátorov (hore) a Matsuoka oscilátorov (dole) v module zloženom z dvoch navzájom prepojených neurónov.	32
21	Porovnanie výstupov fázových oscilátorov (hore) a Matsuoka oscilátorov (dole) v module zloženom z troch cyklicky prepojených neurónov.	32
22	Implmentácia siete CPG s jednostranným prepojením s otvorenou slučkou.	33
23	Sieť CPG so spätnoväzobným prepojením.	33
24	Sieť CPG zložená z i fázových oscilátorov.	34
25	Príklady simulácie robotov vo Webots (vľavo robot Robotics-Op3, v strede model robota Salamander, vpravo robot Pioneer 3-AT). [47]	37
26	Príklady simulácie robotov v prostredí Gazebo (vľavo robot Pioneer 3-AT, v strede robot Mars Rover, vpravo robot TurtleBot).	38
27	Príklady simulácie robotov v prostredí CoppeliaSim (vľavo robot ACM-R5, v strede robot Pioneer 3-DX, vpravo robot rollerWalker).	39

28	Model 3-článkového a 8-článkového robotického hada v prostředí simulačního programu CoppeliaSim.	41
29	Geometria robotického hada.	42
30	Návrh siete CPG pre riadenie 8-článkového robotického hada.	43
31	Váhy prepojení medzi jednotlivými oscilátormi v sieti CPG.	44
32	Vplyv váh medzi-neurálnych prepojení na výstupy siete CPG zloženej z fázových oscilátorov.	46
33	Vplyv váh medzi-modulových prepojení na výstupy siete CPG zloženej z fázových oscilátorov.	46
34	Vplyv adaptačných koeficientov na výstupy siete CPG zloženej z fázových oscilátorov.	47
35	CPG sieť zložená z Matsuoka oscilátorov.	48
36	Výstupy CPG modulov siete na obrázku 35.	50
37	Implementácia siete CPG z obrázku (Obr. 35) na riadenie robotického hada.	50
38	Vplyv váh medzi-neurálnych prepojení na výstupy siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov.	51
39	Vplyv váh medzi-modulových prepojení na výstupy siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov.	51
40	Vplyv pomeru τ_u/τ_v na výstupy siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov.	52
41	Vplyv parametra β na výstupy siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov.	52
42	Cieľová poloha motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom tvaru funkcie sínus.	54
43	Skutočná poloha motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom tvaru funkcie sínus.	55
44	Rýchlosť rotácie motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom tvaru funkcie sínus.	55
45	Krúťivý moment motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom tvaru funkcie sínus.	56
46	Rýchlosť robotického hada riadeného signálom tvaru funkcie sínus v smere osi x	56
47	Poloha prvého článku (hlavy) robotického hada riadeného signálom tvaru funkcie sínus.	56
48	Simulácia robotického hada riadeného sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov. (Hore $t = 1s$, dole $t = 2s$.)	57
49	Cieľová poloha motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom neimitujúcim tvar funkcie sínus.	57

50	Skutočná poloha motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom neimitujúcim tvar funkcie sínus.	58
51	Rýchlosť rotácie motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom neimitujúcim tvar funkcie sínus.	58
52	Krúťivý moment kĺbov robotického hada riadeného signálom neimitujúcim tvar funkcie sínus.	59
53	Rýchlosť robotického hada riadeného signálom neimitujúcim tvar funkcie sínus v smere osi x	59
54	Rýchlosť rotácie motorizovaných kĺbov robotického hada riadeného signálom neimitujúcim tvar funkcie sínus.	59
55	Simulacia robotického hada riadeného sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov. (Hore $t = 1s$, dole $t = 2s$.)	60
56	Pokrytie priestoru množinou testovaných vektorov parametrov ω , a a b	63
57	Vplyv kombinácií parametrov ω , a , b na rýchlosť 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.	63
58	Vplyv parametrov ω , a , b na rýchlosť 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.	64
59	Vplyv kombinácií parametrov ω , a , b na spotrebu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.	64
60	Vplyv parametrov ω , a , b na spotrebu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.	65
61	Nedominované vektory parametrov pre riadenie 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu metódou Serpentinoid nájdené na testovanej množine.	65
62	Nedominované vektory parametrov pre riadenie 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou Serpentinoid nájdené na testovanej množine.	66
63	Vplyv kombinácií parametrov ω, a, b na rýchlosť 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.	67
64	Vplyv parametrov ω, a, b na rýchlosť 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.	67
65	Vplyv parametrov ω, a, b na spotrebu 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.	68
66	Vplyv kombinácie parametrov ω, a, b na spotrebu 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení metódou Serpentinoid.	68
67	Nedominované vektory parametrov pre riadenie 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou Serpentinoid nájdené na testovanej množine.	69

68	Nedominované vektory parametrov pre riadenie 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu metódou Serpentinoid nájdené na testovanej množine.	69
69	Vplyv kombinácií parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na rýchlosť 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.	71
70	Vplyv parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na rýchlosť 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.	72
71	Vplyv kombinácií parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na spotrebu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.	72
72	Vplyv parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na spotrebu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.	73
73	Nedominované vektory parametrov pre riadenie 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z fázových oscilátorov.	73
74	Nedominované vektory parametrov pre riadenie 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z fázových oscilátorov nájdené na testovanej množine.	74
75	Vplyv kombinácií parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na rýchlosť 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.	74
76	Vplyv parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na rýchlosť 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.	75
77	Vplyv kombinácií parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na spotrebu 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.	75
78	Vplyv parametrov ω , A a $\Delta\phi$ na spotrebu 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov.	76
79	Nedominované vektory parametrov pre riadenie 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z fázových oscilátorov.	76
80	Nedominované vektory parametrov pre riadenie 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z fázových oscilátorov nájdené na testovanej množine.	77

81	Vplyv parametrov τ_u , c , β na amplitúdu, uhlovú frekvenciu a fázový rozdiel.	78
82	Pokrytie priestoru množinou testovaných vektorov kombinácií parametrov τ_u , c a β	78
83	Vplyv parametrov τ_u , c a β na rýchlosť 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.	79
84	Vplyv parametrov τ_u , c a β na rýchlosť 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov.	80
85	Vplyv kombinácií parametrov τ_u , c a β na spotrebu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov.	80
86	Vplyv parametrov τ_u , c a β na spotrebu 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov.	81
87	Nedominované vektory parametrov pre riadenie 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov nájdené na testovanej množine.	81
88	Nedominované vektory parametrov pre riadenie 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov nájdené na testovanej množine.	82
89	Vplyv kombinácií parametrov τ_u , c a β na rýchlosť 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov.	82
90	Vplyv parametrov τ_u , c a β na rýchlosť 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov.	83
91	Vplyv kombinácií parametrov τ_u , c a β na spotrebu 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov.	83
92	Vplyv parametrov τ_u , c a β na spotrebu 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu pri riadení sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov.	84
93	Nedominované vektory parametrov pre riadenie 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov nájdené na testovanej množine.	84
94	Nedominované vektory parametrov pre riadenie 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu metódou siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov nájdené na testovanej množine.	85

95	Doba potrebná na dosiahnutie konečnej rýchlosti robotického hada. . .	91
96	Signály riadiace 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, generované metódou Serpentinoid.	113
97	Signály riadiace 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, generované metódou Serpentinoid.	113
98	Signály riadiace 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu, generované metódou Serpentinoid.	114
99	Signály riadiace 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu, generované metódou Serpentinoid.	114
100	Signály riadiace 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, generované metódou CPG (fázové oscilátory).	115
101	Signály riadiace 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu, generované metódou CPG (fázové oscilátory).	115
102	Signály riadiace 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, generované metódou CPG (fázové oscilátory).	116
103	Signály riadiace 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu, generované metódou CPG (fázové oscilátory).	116
104	Signály riadiace 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, generované metódou CPG (Matsuoka oscilátory).	117
105	Signály riadiace 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu, generované metódou CPG (Matsuoka oscilátory).	117
106	Signály riadiace 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, generované metódou CPG (Matsuoka oscilátory).	118
107	Signály riadiace 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu, generované metódou CPG (Matsuoka oscilátory).	118

7.2 Zoznam tabuliek

1	Nastavenie parametrov siete CPG zloženej z fázových oscilátorov. . . .	54
2	Nastavenie parametrov siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov. . .	57
3	Pevne zvolené parametre siete CPG z fázových oscilátorov.	70
4	Pevne zvolené parametre siete CPG z Matsuoka oscilátorov.	77
5	Nájdené optimálne nastavenia parametrov serpentinoidnej krivky riadiacej 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.	87
6	Nájdené optimálne nastavenia riadenia 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu metódou Serpentinoid pre dané kritéria.	87
7	Nájdené optimálne nastavenia parametrov serpentinoidnej krivky riadiacej 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.	87

8	Nájdené optimálne nastavenia parametrov serpentínoidnej krivky riadiacej 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu.	88
9	Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z fázových oscilátorov riadiacej 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.	88
10	Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z fázových oscilátorov riadiacej 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu.	88
11	Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z fázových oscilátorov riadiacej 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.	89
12	Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z fázových oscilátorov riadiacej 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu.	89
13	Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov pre riadenie 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.	89
14	Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov pre riadenie 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu.	90
15	Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov pre riadenie 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu.	90
16	Nájdené optimálne nastavenia parametrov siete CPG zloženej z Matsuoka oscilátorov pre riadenie 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu.	90

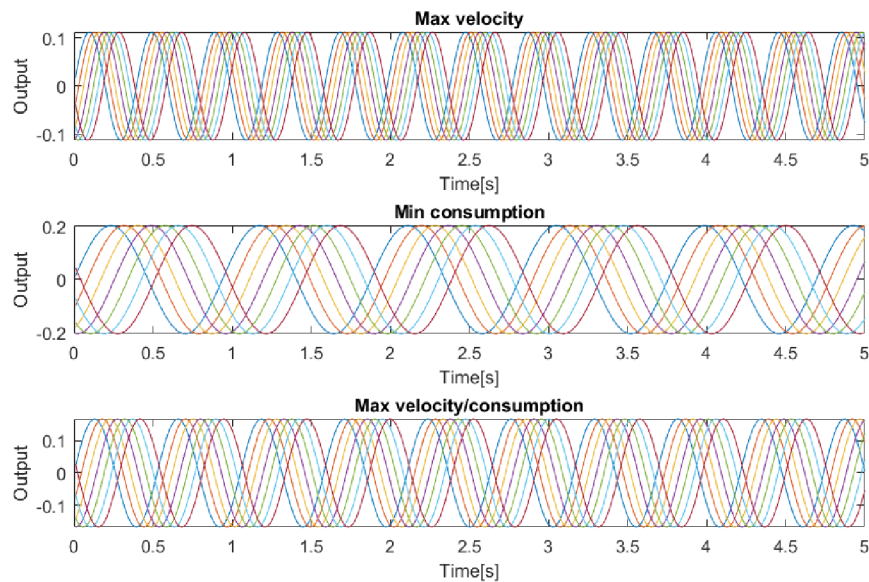
8 Zoznam príloh

A	Optimálne riadenie.....	113
B	Zoznam digitálnych príloh.....	119

A Optimálne riadenie

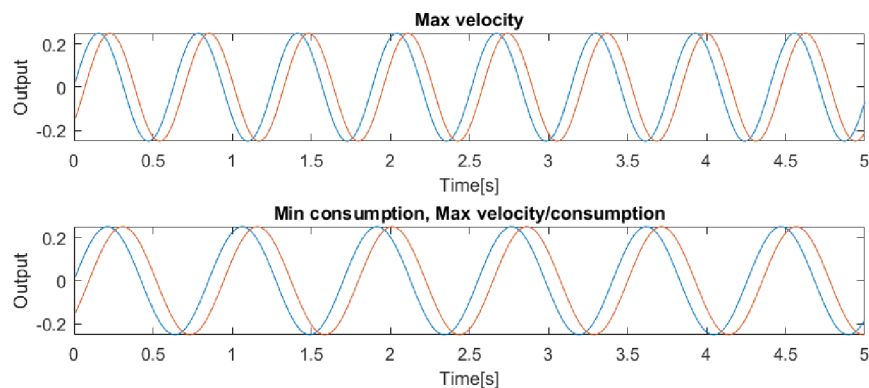
A.1 Výsledky - Serpentinoid

Optimálne riadiace signály generované metódou Serpentinoid pri riadení 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu (Obr. 96).



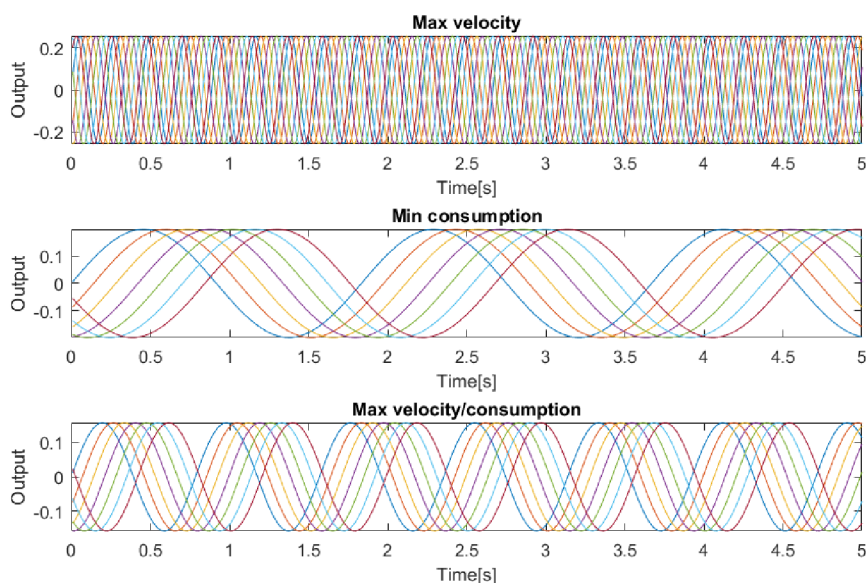
Obr. 96: Signály riadiace 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, generované metódou Serpentinoid.

Optimálne riadiace signály generované metódou Serpentinoid pri riadení 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu (Obr. 97).



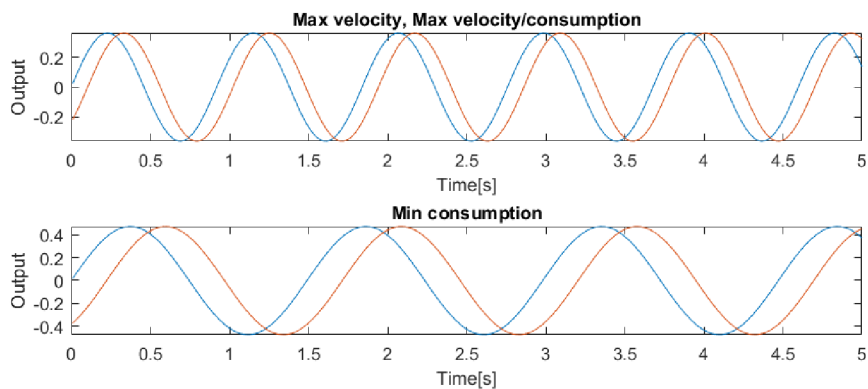
Obr. 97: Signály riadiace 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, generované metódou Serpentinoid.

Optimálne riadiace signály generované metódou Serpentinoid pri riadení 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu (Obr. 98).



Obr. 98: Signály riadiace 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu, generované metódou Serpentinoid.

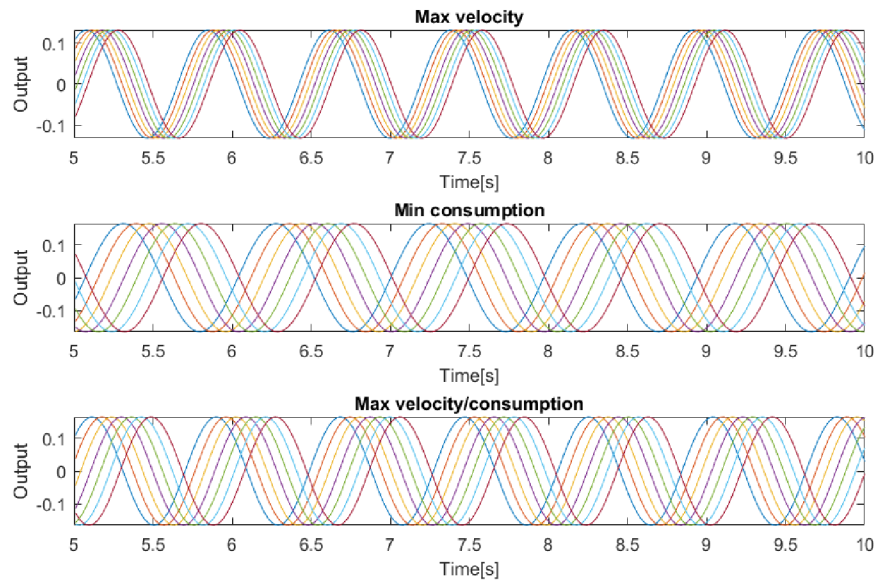
Optimálne riadiace signály generované metódou Serpentinoid pri riadení 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu (Obr. 99).



Obr. 99: Signály riadiace 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu, generované metódou Serpentinoid.

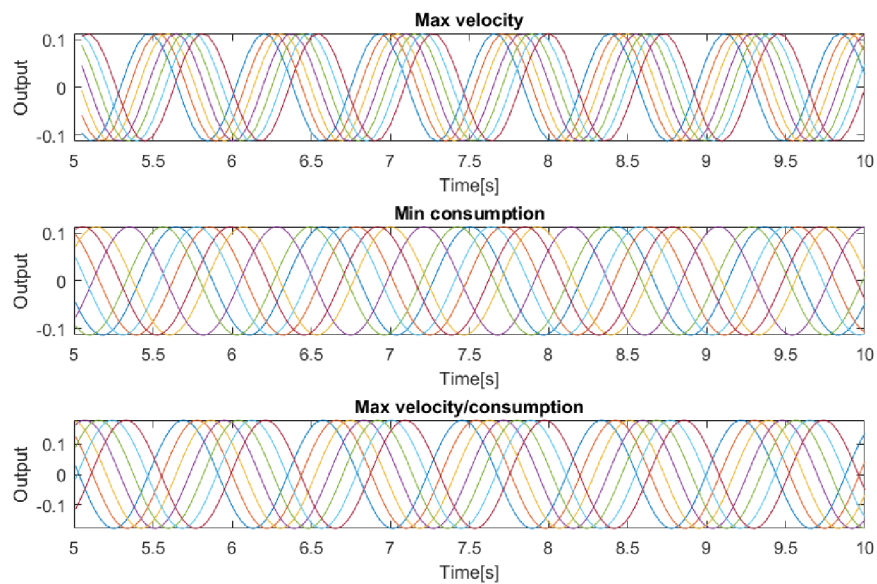
A.2 Výsledky - CPG (fázové oscilátory)

Optimálne riadiace signály generované sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov pri riadení 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu (Obr. 100).



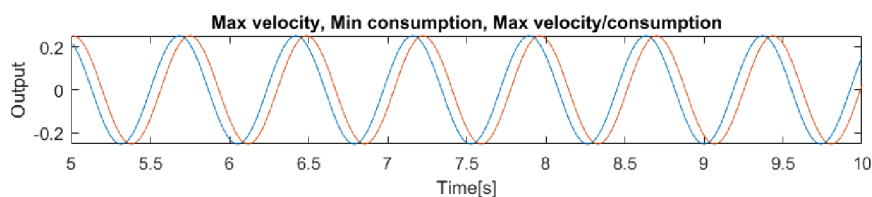
Obr. 100: Signály riadiace 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, generované metódou CPG (fázové oscilátory).

Optimálne riadiace signály generované sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov pri riadení 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu (Obr. 101).



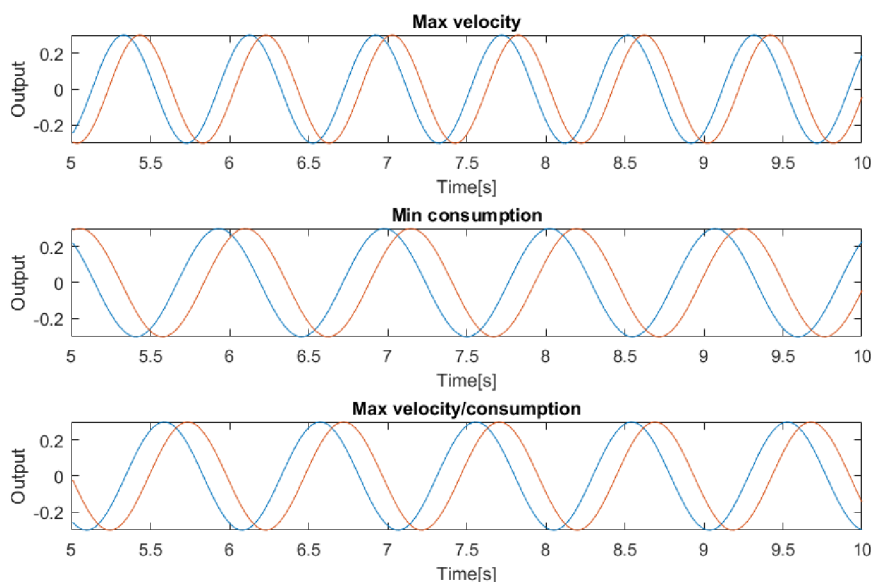
Obr. 101: Signály riadiace 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu, generované metódou CPG (fázové oscilátory).

Optimálne riadiace signály generované sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov pri riadení 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu (Obr. 102).



Obr. 102: Signály riadiace 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, generované metódou CPG (fázové oscilátory).

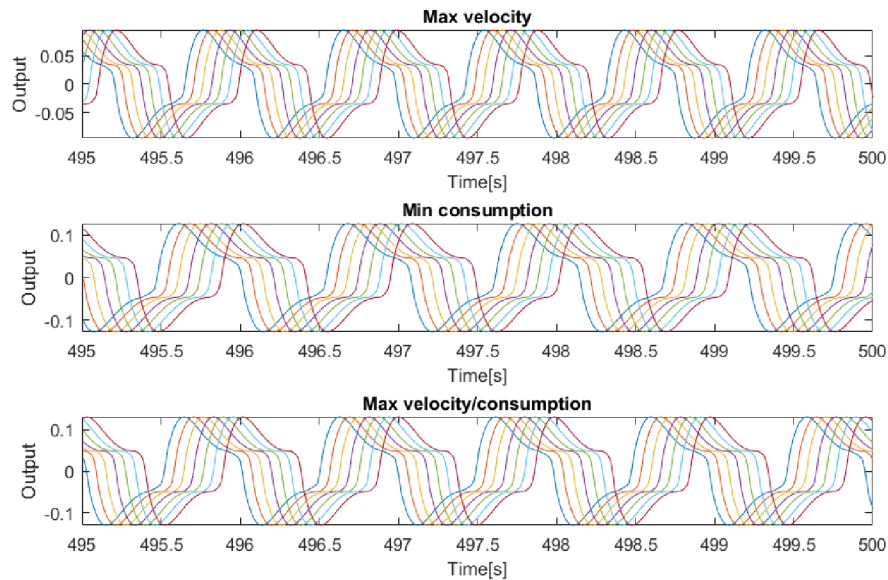
Optimálne riadiace signály generované sieťou CPG zloženou z fázových oscilátorov pri riadení 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu (Obr. 103).



Obr. 103: Signály riadiace 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu, generované metódou CPG (fázové oscilátory).

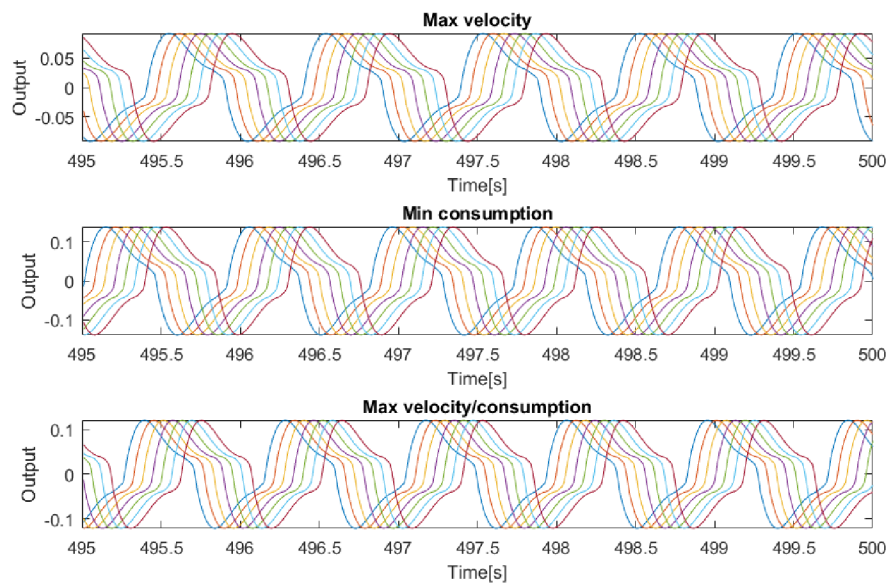
A.3 Výsledky - CPG (Matsuoka oscilátory)

Optimálne riadiace signály generované sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov pri riadení 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu (Obr. 104).



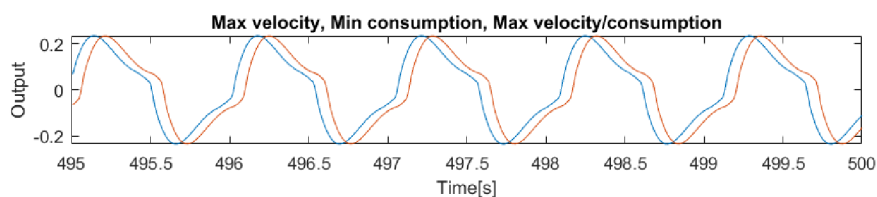
Obr. 104: Signály riadiace 8-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, generované metódou CPG (Matsuoka oscilátory).

Optimálne riadiace signály generované sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov pri riadení 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu (Obr. 105).



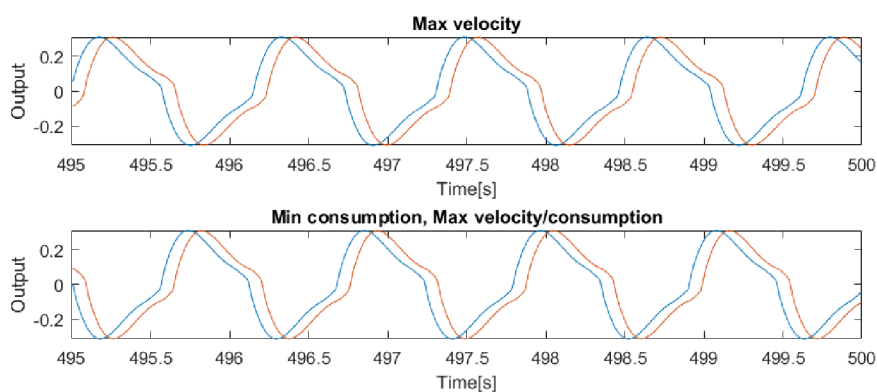
Obr. 105: Signály riadiace 8-článkového robotického hada na klzkom povrchu, generované metódou CPG (Matsuoka oscilátory).

Optimálne riadiace signály generované sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov pri riadení 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu (Obr. ??).



Obr. 106: Signály riadiace 3-článkového robotického hada na neklzkom povrchu, generované metódou CPG (Matsuoka oscilátory).

Optimálne riadiace signály generované sieťou CPG zloženou z Matsuoka oscilátorov pri riadení 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu (Obr. 107).



Obr. 107: Signály riadiace 3-článkového robotického hada na klzkom povrchu, generované metódou CPG (Matsuoka oscilátory).

B Zoznam digitálnych príloh

1. 3link.ttt - CoppeliaSim - Model 3-článkového robotického hada
2. 8link.ttt - CoppeliaSim - Model 8-článkového robotického hada
3. videoreults.mp4 - video-dokumentácia dosiahnutých výsledkov
4. SERPsim.m - MATLAB - riadenie metódou Serpentinoid
5. CPG1sim.m - MATLAB - riadenie metódou CPG (fázové oscilátory)
6. CPG2sim.m - MATLAB - riadenie metódou CPG (Matsuoka oscilátory)
7. poster.pdf - poster