



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÉHO INŽINIERSTVA

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZÁCIE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

NÁVRH MIKROROBOTOV

DESIGN OF MICROROBOTS - BIOLOGICALLY INSPIRED

BAKALÁRSKA PRÁCA

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ADAM BENEDEK

VEDÚCI PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. SIMEON SIMEONOV, CSc.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Adam Benedek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce: **doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.**
Akademický rok: 2022/23

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

Návrh mikrorobotů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh a konstrukce mikrorobotů, které jsou inspirovány přírodou je poměrně nový přístup v robotice. Probíhá aktuální vývoj robotických komponentů, jako jsou umělé svaly, čidla, křídla, apod. Tyto komponenty jsou použity na vývoj prototypů subsystému, jako jsou robotické nohy, robotická křídla, apod. a potom jsou integrovány do komplexních robotických zařízení.

Cíle bakalářské práce:

1. Analýza problému a literární rešerše.
2. Zpracujte ideový návrh různých variant mikrorobotů
3. Vytvoření fyzikálního modelu mikrorobotu hada.

Seznam doporučené literatury:

BELLOUARD, Yves. *Microrobotics: Methods and Applications*, ISBN-10: 142006195X, CRC Press (12 Nov 2009).

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Bakalárska práca obsahuje prehľadnú rešerš, ktorá sa zaoberá metódami, systémami a rôznymi komponentmi, ktoré sa v praxi používajú pri návrhu a výrobe mikrorobotov. Následne sa práca venuje samotnému návrhu a výrobe kostry hada a pohybového ústrojenstva pre zväčšený a zjednodušený model plazúceho sa mikrorobota. Tento model je inšpirovaný živými zástupcami z ríše plazmov. Na záver sú spomenuté taktiež iné návrhy mikrorobotov inšpirovaných plazmami a ich využitie.

Abstract

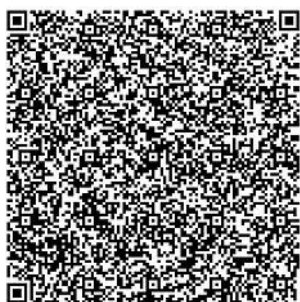
The bachelor's thesis contains a comprehensive research that deals with methods, systems and various components that are used in practice in the design and production of microrobots. Subsequently, the work is dedicated to the actual design and production of the snake skeleton and locomotor system for the enlarged and simplified model of the crawling microrobot. This model is inspired by living representatives from the reptile kingdom. At the end, other designs of micro-robots inspired by reptiles and their use are also mentioned.

Kľúčové slová

mikrorobot, robot, senzor, ohyb, aktuátor, had, model, pohyb, plaz, motor

Keywords

microrobot, robot, sensor, flexure, actuator, snake, model, movement, reptile, motor



2023

Bibliografická Citácia

BENEDEK, Adam. *NÁVRH MIKROROBOTOV*. Brno, 2023. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojného inžinierstva. Vedúci práce doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.

Čestné Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána doc. Ing. Simeona Simeonova, CSc. a uviedol som všetky literárne pramene, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som čerpal.

.....
Adam Benedek
26. mája 2023

Podakovanie

Ďakujem pánovi doc. Ing. Simeonovi, CSc, svojej priateľke, bratovi a rodine za pomoc pri písaní a zhotovení bakalárskej práce.

Obsah

1	Úvod	3
2	Prehľad základných poznatkov o mikrorobotoch	4
2.1	Aplikovaná fyzika v mikrorobotike	4
2.1.1	Efekty škálovania	4
2.1.2	Efekt zmeny veľkosti na povrchu a objeme	4
2.1.3	Účinky na fyzikálne vlastnosti	5
2.1.4	Štruktúra a vlastnosti materiálu	6
2.2	Ohyby	6
2.2.1	Definícia ohybu	6
2.2.2	Prečo používať ohyby v mikrorobotike	7
2.2.3	Ohybové systémy	7
2.3	Aktuátory	8
2.3.1	Zosilnenie pohybu	9
2.3.2	Aktuátory využívajúce teplotnú rozťažnosť	10
2.3.3	Aktuátory s tvarovou pamäťou	10
2.4	Senzory	12
2.4.1	Elektromagnetické senzory	12
2.4.2	Optické senzory snímajúce polohu	12
2.4.3	Sledovanie pohybu pomocou mikroskopov	13
3	Návrh modelu a konštrukcia hada	14
3.1	Kostra hada	14
3.1.1	Model	14
3.1.2	Rozmery komponentov častí skeletonu	15
3.2	Pohybové ústrojenstvo	15
3.3	Zdroj pohybu	16
3.4	Elektrický obvod	16
3.5	Implementácia pohybu	17
3.5.1	program v Arduino IDE	17
3.6	Montáž robota	18
3.6.1	Celkové rozmery hada	20
3.7	Testovanie pohybu	20
3.8	Cenová analýza	21
4	Iné typy modelov mikrorobota inšpirovaného plazmami	22
4.1	Stromolezecký robot	22

4.1.1	Mechanika robota	23
4.1.2	Modul hlavy	23
4.1.3	Riadenie pohybu	24
4.2	Robotický úhor	24
4.2.1	System fungovania robota	24
5	Záver	26
	Literatúra	30
A	Prílohy	32

Úvod

História mikrorobotiky sa datuje od začiatku 20. storočia, keď vedci začali experimentovať s malými robotmi, snahou zmenšovať elektronické a mechanické súčasti s cieľom zmenšiť objem, redukovať spotrebu materiálov, zrýchliť odozvu systému a zlepšiť presnosť merania. S plynutím času tieto roboty začali s rozmermi v milimetroch a teraz dosahujú rozmery v mikro a nano mierkach merania. Miniaturizácia technológií umožnila posúvať sa ďalej za hranice pri výstavbe menších a efektívnejších verzií týchto robotov a dokázala, že malé veci majú veľký význam. Keď sa tieto mikroroboty stávajú stále menšími, objavuje sa viac a viac spôsobov, ako ich aplikovať v rôznych oblastiach, vrátane medicíny, priemyslu, robotiky a výskumu. Mikrorobot môže byť tiež definovaný ako taký, ktorý má vlastnosti robota v makrosvetle, má nejakú formu programovateľného správania a je schopný sa prispôbiť. Jediný rozdiel oproti makrorobotom je mierka, na ktorej sú umiestnené. Termíny mikroroboty alebo mikrorobotika sú tiež spojené s robotmi, ktorí sú schopní manipulovať s objektami a vykonávať operácie v mikrometrovom rozsahu. [3] [5]

Výroba mikrorobotov a práca s nimi neprináša iba výhody, ale aj nevýhody z hľadiska problematiky zmenšovania rozmerov. Jedná sa napríklad o výrobu malých elektronických súčiastok alebo mechanických dielov, taktiež o pomer síl pôsobiacich na tieto mikro diely. Účinky gravitačných síl a momentov zotrvačnosti klesajú významne, ale zároveň dochádza k výraznému nárastu kontaktných síl, ktoré pôsobia na krátke vzdialenosti. Tieto sily sa považujú za zanedbateľné a neuvažuje sa nad nimi pri riešení silového pôsobenia v oblasti návrhu strojov a mechanizmov v makrosvetle. Avšak, v mikrosvetle majú tieto sily veľký význam, pretože obmedzujú použitie mnohých bežných mechanizmov, ktoré sa používajú v bežných rozmeroch. Medzi najzákladnejšie patria ložiská, ozubenie a bežné prevodovky, alebo použitie bežných rotačných motorov ako zdrojov pohybu. Medzi ďalšie významné rozdiely môžeme uvažovať prenos tepla, pôsobenie elektrického a magnetického poľa alebo miešanie kvapalín. [5]

Mikrorobotika je oblasť, ktorá dnes získava veľa pozornosti nielen od inžinierov špecializujúcich sa v tomto odbore, ale aj od iných oblastí inžinierstva, vedcov, nadšencov a dokonca aj širokej verejnosti. Ich použitie umožňuje riešenie mnohých problémov, napríklad v oblasti zdravotníctva, kde mikroroboti sú vstreknutí do tela pacienta na monitorovanie a liečbu rôznych chorôb, oblasť využitia mikrorobotov na skúmanie materialových vlastností nanoštruktúr a meranie ich mechanickej pevnosti. Ďalšia oblasť mikrorobotov, ktorej problematike je venovaná táto práca, je inšpirovaná plazmami, ktoré majú veľký význam v malých a nedostupných priestoroch, pretože sa skvele prispôbujú neznámym a meniacim sa prostrediam. Preto budú roboty inšpirované hadmi široko používané v priemyselných, vojenských, lekárskejších a po katastrofách pátracích a záchranných aplikáciách. [3]

Prehľad základných poznatkov o mikrorobotoch

2.1 Aplikovaná fyzika v mikrorobotike

2.1.1 Efekty škálovania

Zmenšenie rozmerov na úroveň mikrosveta má veľký vplyv na rozloženie silových pomerov pôsobiacich na objekty. Povrchové sily zanedbateľné na makroúrovni sa stávajú obzvlášť dôležitými v mikromeradle. Škálovanie ovplyvňuje nielen pomer medzi silami ale aj iné fyzikálne javy, ako prenos tepla a dynamika tekutín. [12]

Na ilustráciu zmien pomerov pôsobiacich síl sa používa tzv. mierkový faktor, ktorým sa násobia rozmery objektu. Vynásobením geometrie objektu číslom mierkového faktoru získame:

$$(v_0, \dots, v_n, w_0, \dots, w_n) \rightarrow f(v_0, \dots, v_n, w_0, \dots, w_n) = y \quad (1)$$

Zmenšením rozmerov o faktor k , dostaneme:

$$(kv_0, \dots, kv_n, w_0, \dots, w_n) \rightarrow f(v_0, \dots, v_n, w_0, \dots, w_n) = k^s y \quad (2)$$

Parameter s je škálovací faktor. Podľa zaužívanej konvencie používame L^s faktor na opísanie zmien vplyvov mierky na danú sledovanú vlastnosť. Týmto spôsobom môžeme jednoducho zistiť, ako sa menia vplyvy rôznych síl.

2.1.2 Efekt zmeny veľkosti na povrchu a objeme

Použitím dvojitého integrálneho súčtu je možné vyjadriť mierkový faktor, ktorý sa uplatňuje pri zmenšení povrchu a objemu súčiastok mikrorobotu.

Povrch je vyjadrený výrazom:

$$\iint_{\Omega} dS = \iint_{\Omega} dx dy \rightarrow \iint_{k\Omega} dS = \iint_{k\Omega} d(kx)d(ky) = k^2 \iint_{\Omega} dx dy \quad (3)$$

Aplikácia tej istej metódy na objem vyjadří mierkový faktor L^3

$$Dĺzka \Rightarrow L^1 \quad Povrch \Rightarrow L^2 \quad Objem \Rightarrow L^3 \quad (4)$$

Táto analýza ukazuje, že fyzikálne vlastnosti, ktoré sú úmerné objemu, budú oveľa menej významné ako vlastnosti povrchu.

2.1.3 Účinky na fyzikálne vlastnosti

Rovnakú metodiku ako na povrch a objem možno použiť na akúkoľvek vlastnosť, ktorá zahŕňa fyzické rozmery. Napríklad na vyhodnotenie elektrického odporu:

$$R = \rho \frac{l}{S} \xrightarrow{k} R' = \rho \frac{k^{+1}l}{k^{+2}S} = k^{-1} \rho \frac{l}{S} = k^{-1} R \quad (5)$$

kde

l je dĺžka uvažovaného vodičového prvku,

S je prierez povrchu,

ρ je odpor.

V tomto konkrétnom prípade je škálovací zákon L^{-1} , čo naznačuje, že tento odpor sa zväčšuje so znižovaním mierkového faktora. Malo by sa zdôrazniť, že sa vychádza za predpokladu, že elektrický odpor možno stále opísať vyššie formulovaný zákon. V nanometrových mierkach začínajú byť kvantové efekty pozorovateľné a preto vyššie uvedený zákon už nie je použiteľný. [3]

Nižšie, v tabuľke 1, sú uvedené mierkové faktory ďalších príslušných vlastností. Pomocou definícií rôznych síl pôsobiacich na teleso môžeme získať merítka pre všetky zaujímavé sily. Je veľmi dôležité však brať do úvahy podmienky, pre ktoré sú rovnice platné a či sú tieto podmienky splnené pre mikro rozmery.

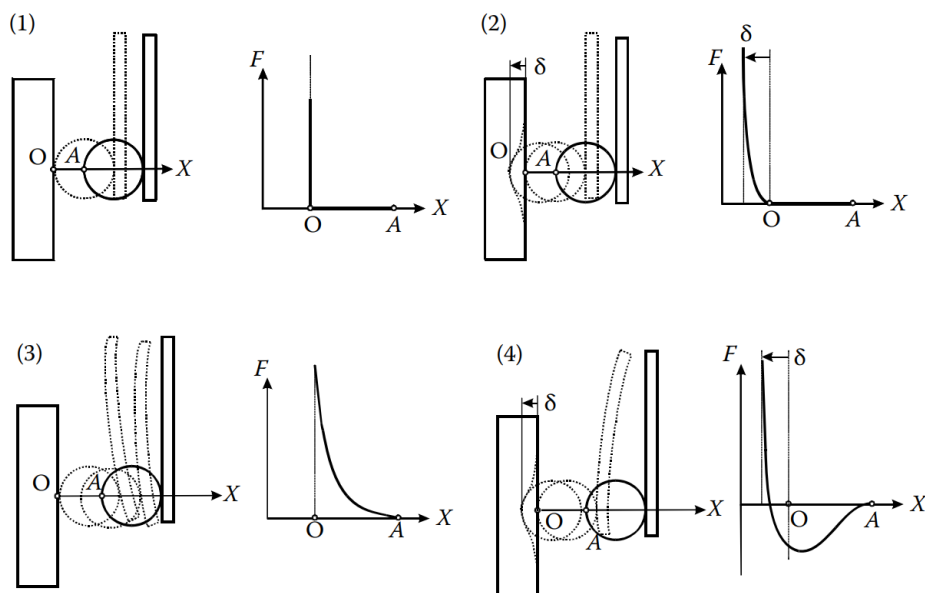
Tabuľka 1: Mierkové faktory

Vlastnosť	Mierkový faktor
Vlastná frekvencia	$L^{-3/2}$
Elektrický odpor	L^{-1}
Kapacita	L^1
Gravitačná sila	L^3
Moment zotrvačnosti	L^4

Správne rozhodnutie o tom, ktoré sily sú dôležité a ktoré sa dajú zanedbať, vyžaduje znalosť pomerov síl. Toto je obzvlášť kritické pri výrobe plazúcich sa mikrorobotoch, kde menej významné sily sú často ignorované počas návrhu prototypov a informácie sú získavané z pokusov a analýzy pohybu. [13]

2.1.4 Štruktúra a vlastnosti materiálu

Z vyššie navrhovanej škálovacej analýzy sa predpokladá, že povrchové interakcie zohrávajú zásadnú úlohu v mikromeradle. Bližšie je uvedená fyzika adhézie, ktorá určuje interakciu medzi objektmi v mikroskopickom meradle. [3]



Obr. 1: Rôzne situácie, keď sa dva predmety dostanú do kontaktu.

Pre lepšie pochopenie situácií, v ktorých dochádza k styku dvoch predmetov, si čitateľ môže predstaviť štyri typické prípady. Na konzolovom nosníku je umiestnená guľa, na ktorú pôsobí sila, ktorá sa meria na jej povrchu. Na obrázku 1 sú tieto situácie znázornené. V prvom prípade je povrch nekonečne tuhý a neexistujú žiadne povrchové sily. Druhý prípad zahŕňa deformovateľný materiál bez povrchových síl. Tretí prípad predstavuje tvrdý materiál s odpudivými silami s dlhým dosahom. V poslednom štvrtom prípade sú prítomné povrchové sily, ktoré priťahujú guľu pri dostatočne blízkom kontakte. V tejto situácii udržiavajú adhézne sily dva objekty v kontakte. [3]

2.2 Ohyby

Táto sekcia predstavuje koncept ohybu, základnej zložky mikrorobotov, ktoré nahrádzajú klasické kĺby v mikromeradle. Výroba a montáž malých dielov sa stáva obtiažnou a dominujú efekty prínavosti k povrchu. Dôsledkom je, že tradičná koncepcia spojov založená na zostavených častiach a povrchových kontaktoch sa stáva nepraktickou. Zmena mierky si vyžaduje novú koncepciu spojov, ktoré sa dajú ľahko robiť miniaturizované. [3] [11]

2.2.1 Definícia ohybu

Ohyb je definovaný ako monolitický pružinový spoj bez trenia alebo súbor pružinových spojov medzi pevnými časťami, tak, že pružina má nízku tuhosť pozdĺž vopred definovanej preferovanej osi deformácie.

2.2.2 Prečo používať ohyby v mikrorobotike

Používanie spojov v mikrorobotike je problémové a je možno im predchádzať pomocou ohybov. Bežné spoje majú problémy s trením a opotrebením a výroba viacdielných spojov v mikromeradle je ťažká kvôli montážnym krokom a výrobným toleranciam. Ohyby sa používajú v mikrorobotike na nahrádzanie tradičných kĺbov, pretože majú nižšiu vôľu a menej trecích účinkov. [6]

Ohyby sú pružiny ukladajúce energiu, ale majú obmedzenia v rozsahu pohybu kvôli elastickému limitu použitého materiálu. Hoci sa ohyby používajú na napodobňovanie správania spojov na makroúrovni, existujú značné rozdiely medzi ohybmi a viacdielnymi spojmi, ktoré sú uvedené v tabuľke 2. [6]

Tabuľka 2: Porovnanie medzi ohybmi a tradičnými kĺbmi

Mechanický spoj	Ohyb
Montovaný	Monolitický
Geometrické povrchy	Elasticita materiálu
Možnosť pohybu vo veľkom rozsahu	Rozsah pohybu je obmedzený
Protireakcia	Žiadna spätná odozva

2.2.3 Ohybové systémy

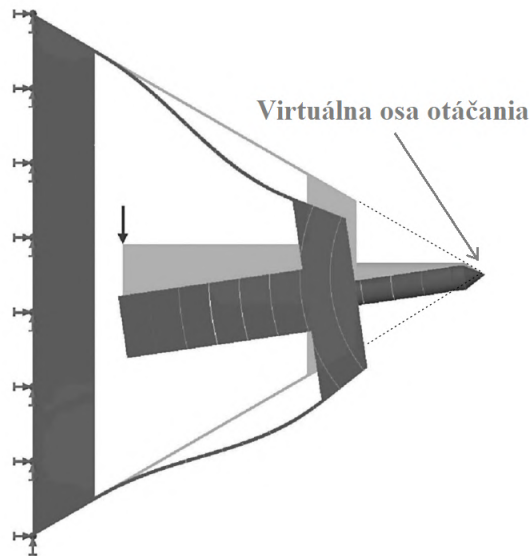
Počet možných ohybových systémov je nekonečný a v literatúre možno nájsť nespočetné množstvo príkladov. V tejto časti su uvedené niektoré bežne používané konfigurácie.

Systémy lineárneho vedenia

Systémy lineárneho vedenia valivých prvkov, bežnejšie označované ako systémy lineárneho vedenia, sú systémy translačného vedenia založené na princípe valivých prvkov (napr. guľôčky, valčeky, ihlové valčeky) medzi pohyblivými vodiacimi prvkami. Tieto navádzacie systémy sú zodpovedné za vedenie a prenos sily medzi časťami stroja, ktoré sa pohybujú v translačnom smere, a tak majú významný vplyv na celkovú výkonnosť a presnosť stroja. Medzi takéto systémy sa radia kompenzované lineárne navádzanie a navádzanie listovou pružinou. [13]

Vzdialený stred rotačného zariadenia

Zariadenie vzdialeného stredu otáčania je konštrukcia, ktorá sa otáča okolo virtuálneho bodu mimo svojej vlastnej konštrukcie. Toto zariadenie sa používa na orientáciu dielov na diaľku, najmä v prípade, keď nie je dostatok miesta na orientáciu okolo objektu. Kinematika RCR pozostáva z mechanizmu s dvoma tyčami rovnakého rozmeru, ale navzájom pod uhlom, a je možné ju realizovať pomocou dvoch lúčov (Obr. 2). Stred otáčania sa nachádza v priesečníku dvoch osí zarovnaných s dlhým okrajom lúčov. [3]



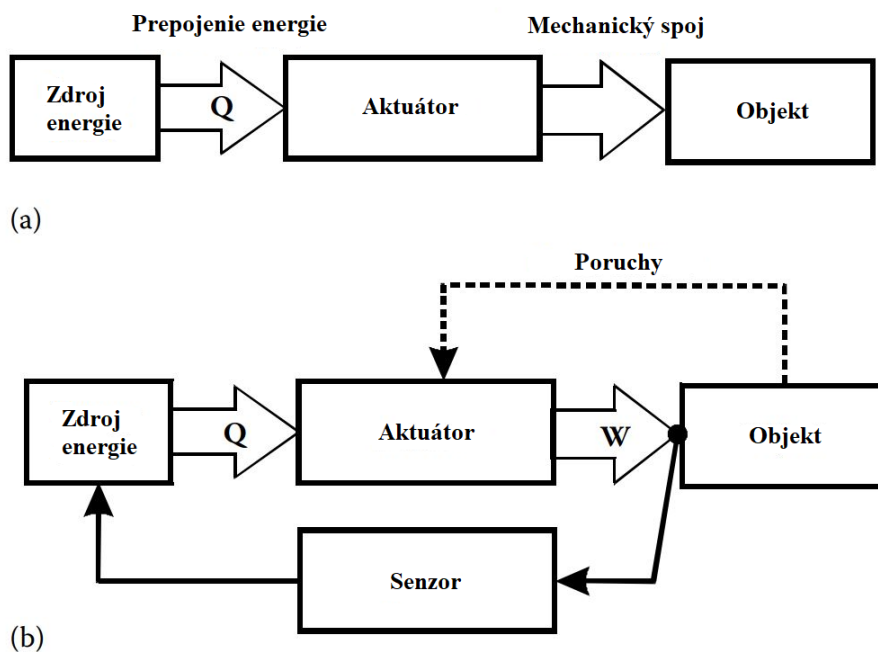
Obr. 2: Ilustrácia vzdialeného stredu otáčania vytvoreného s dvoma lúčmi

Analýza tuhosti vyššie uvedenej konštrukcie je podobná lineárnemu vedeniu s tým rozdielom, že pri výpočte tuhostí je potrebné otáčať jednotlivé súradnicové rámy tak, aby všetky tuhosti boli vyjadrené v rovnakom súradnicovom ráme a v tom istom bode. [3]

2.3 Aktuátory

Kľúčovým prvkom každého automatizovaného mechanizmu je ovládací mechanizmus. Zatiaľ čo sa elektromagnetické motory (jednosmerný alebo striedavý prúd) používajú vo väčšine robotov na makroúrovni, taxonómia možných aktuátorov na mikroúrovni je rozmanitejšia. V mikrorobotike je aktuátor konštrukčným prvkom, čo mu umožňuje pôsobiť silou alebo posunom na mechanické konštrukcie. [3]

Aktuátor premenia vstupnú energiu na mechanickú prácu. Energia poskytnutá na vstupe môže mať rôzny pôvod, napríklad tepelný, optický alebo elektrický. Rôznorodosť spôsobov premeny energie na mechanickú prácu je taká istá ako spôsobov dodávania energie do pohonu. Energia môže vzniknúť od vzniku napätia vyplývajúceho z tepelnej rozťažnosti materiálov, od elektrostatickej príťažlivej sily, alebo zo zložitých fázových premen materiálu. V tejto kapitole sa čitatelia zoznámia s princípmi práce aktuátorov vhodné pre miniaturizáciu a s uvedenými metódami, ako je tento princíp využívaný v praxi pre vykonávanie mechanickej práce. [6] [15]

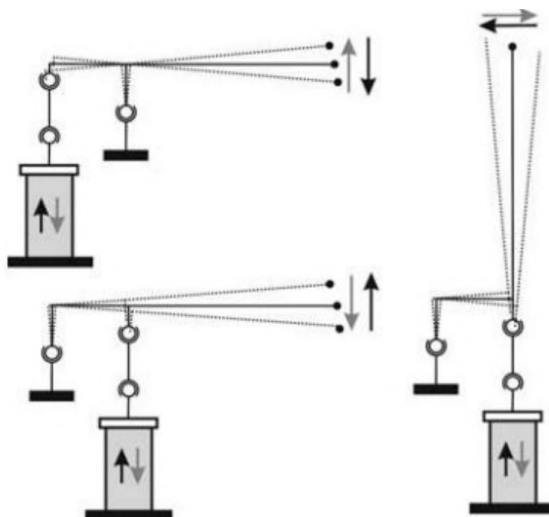


Obr. 3: Koncepčná ilustrácia aktuátora v sústave: (a) otvorený systém (b) uzavretý systém

2.3.1 Zosilnenie pohybu

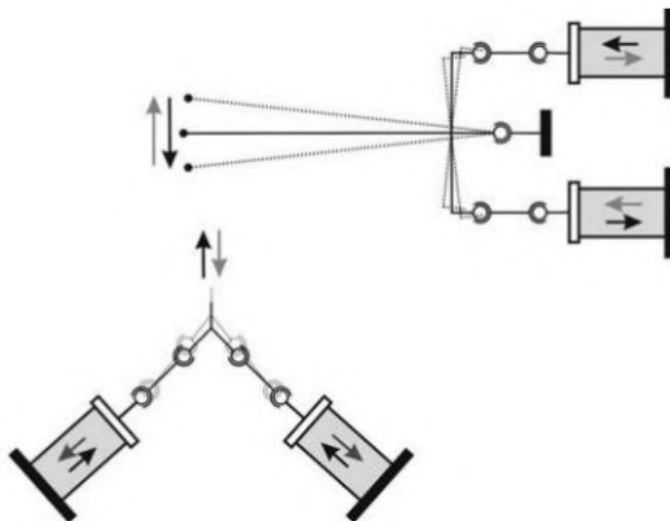
Niektoré aktuátory môžu mať veľmi obmedzený rozsah pohybu z dôvodu ich konštrukcie alebo princípu, na ktorom pracujú. Avšak existujú jednoduché a intuitívne spôsoby, ako zvýšiť, zväčšiť alebo zmeniť rozsah ich pohybu. [3]

Na zmenu výšky zdvihu sa využíva základný mechanizmus a to pákový mechanizmus (Obr. 4). Tento mechanizmus mení translačný pohyb na rotačný a používa sa v dvoch variantách, v závislosti od toho, či sa pohyb výstupu vykonáva súčasne s pohybom motoru alebo v opačnej fáze.



Obr. 4: Príklady pákových mechanizmov

Ďalším bežným prístupom je použitie kombinácie ovládačov v konfigurácii push-pull (Obr. 5). Push-pull konfigurácia má dva ovládače namontované tak, že keď sa jeden zmrští, druhý sa predĺži. Zosilnenie opäť zabezpečuje páka s čapom. Konštrukcia push-pull môže byť prispôbená akejkoľvek konfigurácii znázornenej na obrázku (Obr. 4). V push-pull konfigurácii sa dva ovládače pohybujú o rovnakú veľkosť a v rovnakom smere. [3]



Obr. 5: Push-pull konfigurácia

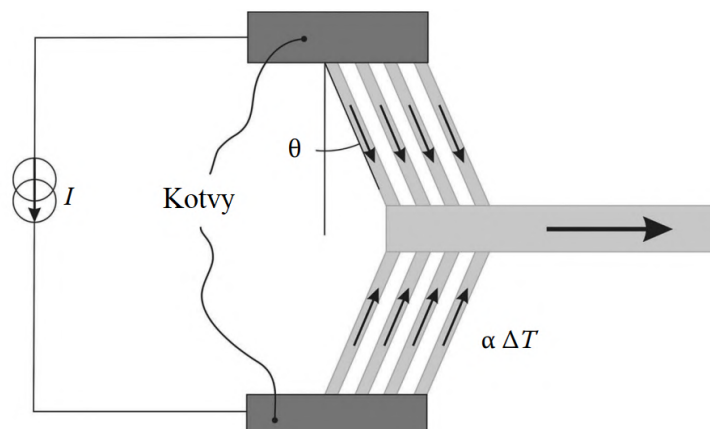
2.3.2 Aktuátory využívajúce teplotnú rozťažnosť

Spojenie dvoch materiálov s odlišnými teplotnými rozťažnosťami môže slúžiť ako zdroj pohybu. Bimetalové pásiky v teplomeroch sú klasickým príkladom. Avšak, pri pokuse o využitie tejto metódy na pohon mikrorobotov, sa ukazujú ťažkosti výroby a na takmer nemožné zahrievanie malých súčastí na presnom mieste. Na druhej strane, aktuátory, ktoré kombinujú dva materiály s rôznou teplotnou rozťažnosťou a rozdielnym elektrickým odporom, sa ukázali ako veľmi účinné a spoľahlivé. Tieto aktuátory umožňujú zahriať iba miesta, ktoré sú potrebné, čím sa rieši problém zahrievania malých súčastí na presnom mieste. Aktuátory sa vyrábajú postupným nanášaním vrstiev určitých materiálov, podobne ako elektronické súčiastky. [8]

2.3.3 Aktuátory s tvarovou pamäťou

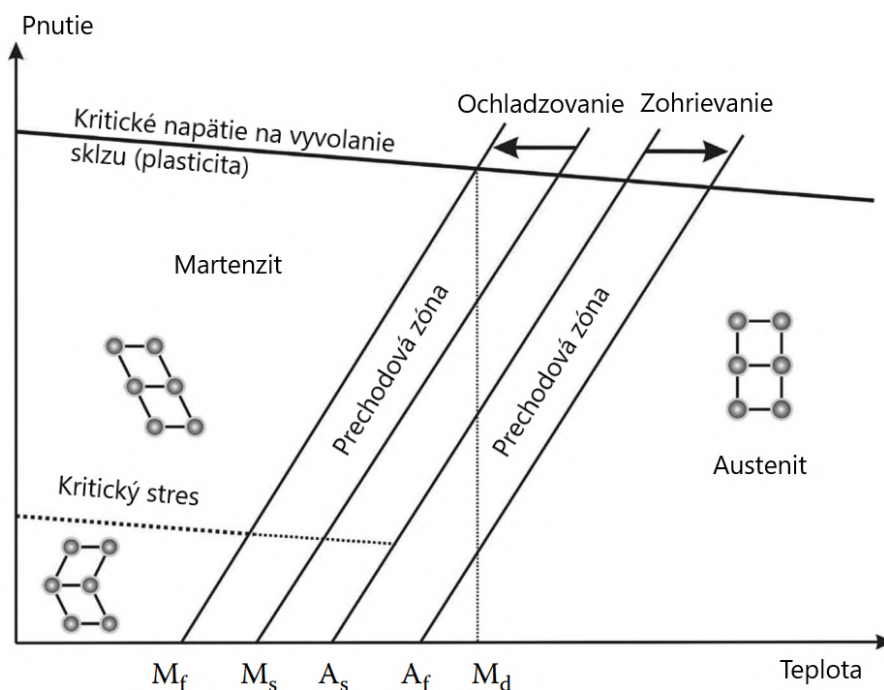
Zliatina s tvarovou pamäťou je materiál, ktorý sa vyznačuje schopnosťou zmeniť svoj tvar pri zahriatí na určitú teplotu (Obr. 6). Z pohľadu mechaniky sa materiál s tvarovou pamäťou správa veľmi podobne ako materiál, ktorý sa dá plasticky deformovať. Pri zahriatí sa materiál nezmení, pokiaľ nedosiahne určitú teplotu, potom sa začne pohybovať smerom k svojmu pôvodnému tvaru bez ohľadu na to, ako bol deformovaný. Pri ochladení sa materiál vráti k svojmu pôvodnému tvaru. Nitinol, ktorý je najčastejšie používanou pamäťovou zliatinou, má určitý rozsah teplôt, pri ktorých sa môže vrátiť k svojmu pôvodnému tvaru, zvyčajne medzi -50°C a 110°C v závislosti na jeho zložení. [17]

Materiálová únava u pamäťových zliatin sa často vyskytuje po ochladení aktuátoru, ktorý je stále pod záťažou. To znamená, že zahriaty materiál sa môže líšiť od ochladeného.



Obr. 6: Dvojtyčová konfigurácia zosilnenia pohybu aktuátorov na báze tepelnej rozťažnosti

Aby sa predĺžila životnosť aktuátorov, pružiny alebo závažia ich udržiavajú pod napätím. Pri ochladzovaní sa materiál vráti k svojmu pôvodnému tvaru, čím sa minimalizuje deformácia pružiny alebo závažia (Obr. 7). To umožňuje, aby sa dalo ovládať, do akého tvaru sa materiál vráti. Tento proces sa nazýva „trénovací proces“. Okrem toho treba pripomenúť fakt, že materiál má dva rôzne tvary pri rôznych teplotách. Aby sa dosiahol tento efekt, musí sa cyklicky ochladzovať a ohrievať materiál pod napätím. [15] [17]



Obr. 7: Diagram zobrazujúci dve hlavné fázy SMA. Každá fáza (tu martenzit a austenit) je stabilná za určitých podmienok teploty a napätia. Sú znázornené charakteristické teploty zodpovedajúce fázovej premene.

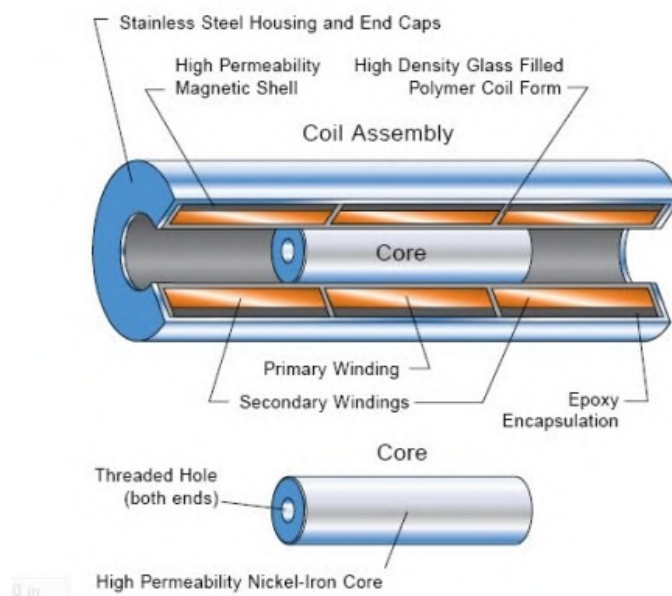
2.4 Senzory

Senzory sú zariadenia používané na meranie fyzického vstupu zo svojho prostredia a prevádzajú ho na údaje, ktoré môže interpretovať človek alebo stroj. Väčšina senzorov je elektronických (údaje sa prevádzajú na elektronické údaje), ale niektoré sú jednoduchšie, ako napríklad sklenený teplomer, ktorý zobrazuje vizuálne údaje. Senzory v mikrorobotike sú nevyhnutnou súčasťou konštrukcie mikrorobotov a pozornosť sa venuje predovšetkým na senzory snímajúce polohu alebo silové typy informácií. Tieto typy senzorov dovoľujú sledovať pracovnú oblasť robota a následne ho riadiť tak, aby plnil svoju funkciu. [3]

2.4.1 Elektromagnetické senzory

Indukčné senzory

Princípom snímania je meranie vzájomnej indukčnosti medzi dvoma jadrami spojenými magnetickým jadrom. Keď sa jadro pohybuje medzi pevnými magnetmi, mení sa indukčnosť. Diferenciálne meranie teda poskytuje meranie posunu.



Obr. 8: výrez LVDT senzoru

Kapacitné senzory

Kapacitný senzor spočíva v použití dvoch elektród otočených proti sebe, pričom jedna elektróda je nehybná a druhá elektróda je pripojená k mobilnej časti. V závislosti od usporiadania dosiek sa nachádzajú rôzne charakteristiky snímania.

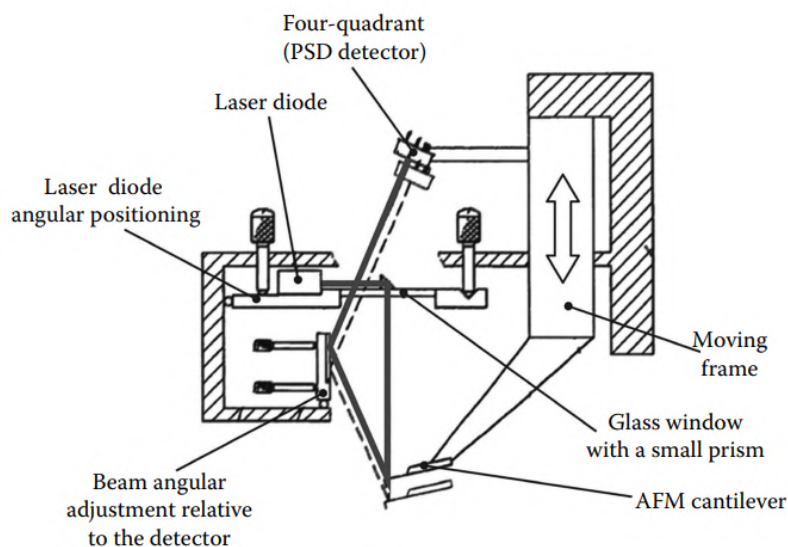
2.4.2 Optické senzory snímajúce polohu

Optické senzory sa stávajú viac a viac populárne v oblasti mikrorobotiky, ako zdroj svetla (napríklad LED, laserové diódy), kde komponenty sú miniaturizované a ďalej integrované do spoločnej platformy. Princípy snímania sa dajú rozdeliť do dvoch kategórií - optické snímače

pohybu, ktoré sledujú posunutie bodu lúča vyplývajúceho z posunutia objektu na meranie a snímače založené na modulácii intenzity stacionárneho svetelného lúča cez tienené efekty alebo interferencie vyplývajúce z pohybu objektu. [2]

Metóda sledovania lúča

Metóda sledovania lúča využíva ako bežný prvok kolimovaný svetelný lúč (napríklad laserový lúč), ktorý zasiahne pohybujúci sa cieľ. Odrazené svetlo lebo obraz miesta na cieľ sa potom použije na posúdenie toho, ako sa cieľ pohybuje. Druhý krok vyžaduje použitie zariadení pre snímanie polohy (PSD), ktorá dokážou určiť, ktorým smerom sa bod alebo jeho obraz pohybuje. Odraz svetla môže byť rozptylový alebo priamy. [3]



Obr. 9: Ilustrácia použitia triangulačného systému v AFM na meranie priehybu konzoly

Senzory s tieňovou projekciou

Zdroj laserového svetla je kolimovaný tak, že na obrazový snímač je premietaný takmer rovnobežný paprsek. Hneď ako je lúč prerušený objektom, vytvorí tieň na CCD obrázku. Sledovanie tieňa poskytuje meranie posunutia meraného objektu. Tento princíp je možné miniaturizovať napríklad pomocou integrovanej optickej technológie a miniaturizovaných fotodetektorov. [9]

2.4.3 Sledovanie pohybu pomocou mikroskopov

Jedna z ďalších metód na sledovanie posunu robotov je spracovanie obrazu. Tento spôsob sledovania pohybu nám dovoľuje v reálnom čase sledovať objekt a jeho interakciu s okolím. Spracovanie obrazu a špecifickejšie vzory metódy rozpoznávania sa používajú na lokalizáciu a sledovanie pohybu objektov v scéne zachytenej zobrazovacím zariadením. Medzi základné výhody tejto metódy patria oddelené snímacie prvky od pohyblivého zariadenia a schopnosť súčasne merať polohu a orientáciu dielu v rovine pre jeden vzor. [6]

Návrh modelu a konštrukcia hada

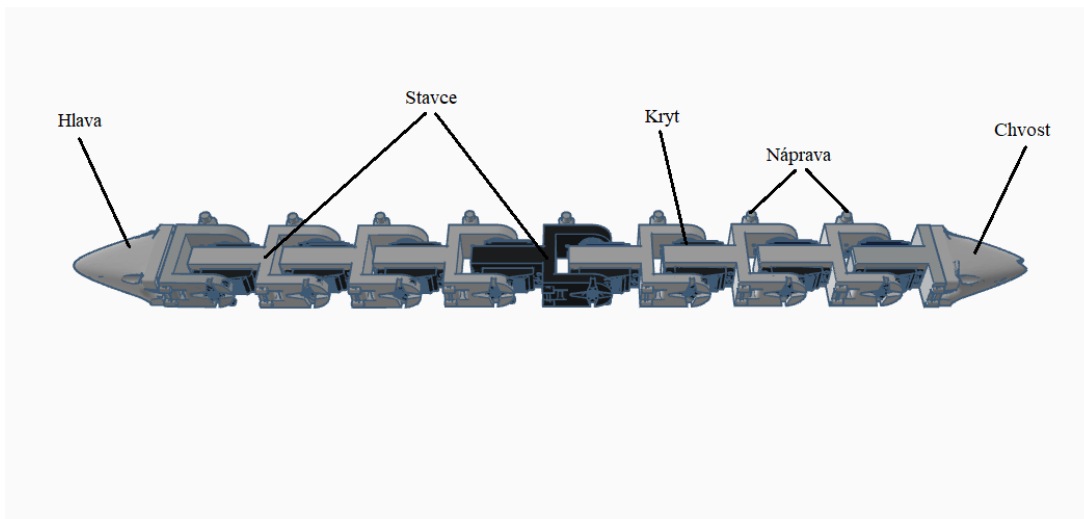
Tvorba mikrorobota inšpirovného hadom z hľadiska profesionálneho vybavenia a náročnosti konštrukcie bola limitovaná prostriedkami dostupnými k tejto tvorbe. Práve preto bola konštrukcia robota zväčšená niekoľkonásobne so snahou zachovať rovnaké myšlienkové postupy a metódy, aké by sa použili pri skutočnom mikrorobote. Pre zjednodušenie výberu bol zvolený jednoduchý klzavý pohyb. Niektoré z iných ponúkaných variant pohybov sú rozoberané v Kapitole 4.

3.1 Kostra hada

Z anatomického hľadiska sa telo hada skladá z troch hlavných častí: chrbtica, sval a koža. Pre účely konštrukcie mikrorobota hada je práca zameraná len na chrbticu a sval. Táto sekcia opisuje model chrbtice a jeho rozmery. [10]

3.1.1 Model

Model skeletu bol vytvorený v aplikácii TinkerCad. Táto aplikácia je online platforma, ktorá umožnila vytvorenie 3D modelu vzhľadom na obmedzenia výkonu pracovného počítača. Celkový skelet hada sa skladá z päť samostatných súčastí: hlavy a chvosta, stavcov pre uchytenie servo motorov, náprav pre uchytenie kolies a krytu pre servo motory s možnosťou uchytenia ložísk. Celý proces modelovania jednotlivých súčastí bol sústredený na presné rozmery a tvar servo motorov a na umiestnenie káblov. Vyhotovený 3D model bol následne vytlačený pomocou 3D tlače za použitia *1,75mm PLA* filamentu (Obr. 10). Táto metóda výroby bola zvolená pre svoju efektivitu a nízke náklady, presné rozmery a všeobecnú dostupnosť 3D tlačiarní.



Obr. 10: 3D model skeletónu hada vyhotovený v programe TinkerCad

3.1.2 Rozmery komponentov častí skeletónu

S ohľadom na možnosť výroby skeletónu prostredníctvom 3D tlače boli rozmery hada optimalizované v súlade s veľkosťou servo motorov s cieľom dosiahnuť najmenšiu možnú odchýlku pri montáži.

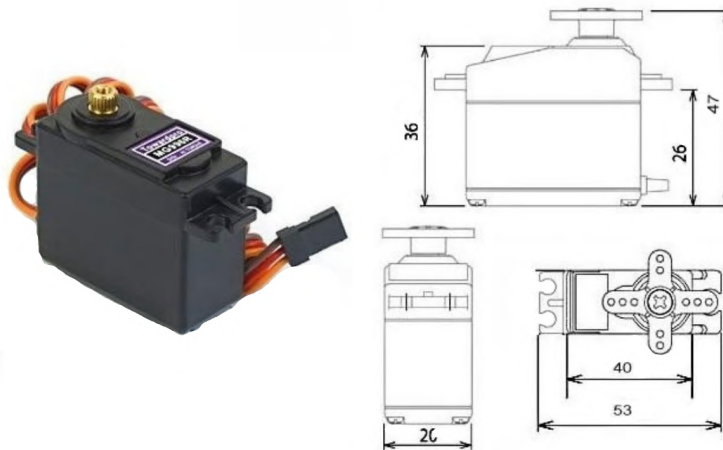
Tabuľka 3: Veľkosti rozmerov častí skeletónu

Názov časti	Rozmery (\check{s} x v x h)
Hlava a chvost	30mm x 75mm x 60mm
Stavce	30mm x 115mm x 60mm
Náprava	10mm x 13mm x 32mm
Kryt	20mm x 18mm x 40mm

3.2 Pohybové ústrojenstvo

Návrh a výber pohybového ústrojenstva sa najviac odvíjal od potenciometru, veľkosti a rozmedzia uhlu natočenia. Zameranie na tieto požiadavky bolo kvôli sile a spätnej väzbe o polohe. Všetky tieto kritéria splňuje množstvo druhov servo motorov, čo vyústilo k výberu servo motora *MG996R*, kvôli predošlým skúsenostiam s týmto typom a ďalším iným výhodám.

PWM servo motory sú často používané pri výrobe mikrorobotov, vrátane robota hada. Existuje niekoľko dôvodov, prečo práve tento typ motoru je použitý na konštrukciu. Prvý z dôvodov je, že PWM servo motory sú veľmi presné a spoľahlivé. To znamená, že môžu byť použité na ovládanie pohybu hada s vysokou presnosťou a účinnosťou. Tento typ motorov tiež umožňuje jednoduché riadenie rýchlosti a polohy, čo je dôležité pre presné pohyby a orientáciu robota. Okrem toho PWM servo motory sú relatívne malé a ľahké, čo z nich robí ideálnu voľbu pre mikroroboty. Tieto motory dokážu byť napájané pomocou batérií, čo je dôležité pre bezproblémový a plynulý chod robota. [1]



Obr. 11: Servo Motor typu MG996R s uhlom natočenia 0 až 180 stupňov

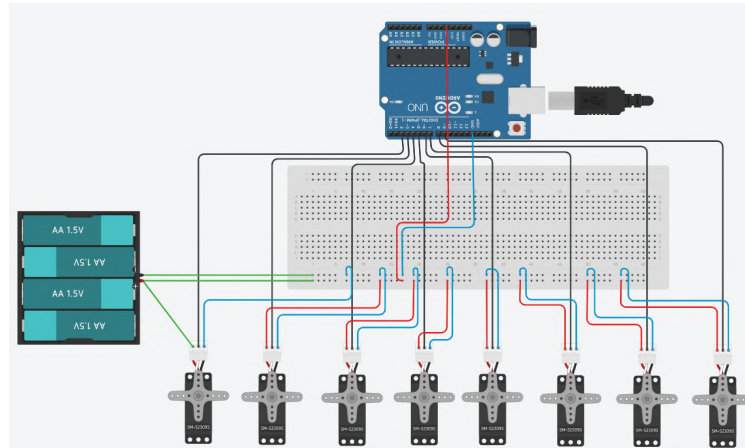
3.3 Zdroj pohybu

Jedným z hlavných problémov pri napájaní samostatne sa pohybujúcich mikrorobotov je nedostatok vhodných napájacích zdrojov s dostatočnou kapacitou a zároveň dostatočne malými rozmermi a hmotnosťou. Táto situácia predstavuje výzvu, pretože existujúce zdroje nedokážu plne pokryť potreby mikrorobotov.

Keďže model hada je zväčšený kvôli ekonomickým a praktickým dôvodom, môžeme o ňom hovoriť ako o robotovi. Ako zdroj elektrickej energie pre pohyb hada sú použité dve batérie typu 18650 poskladané do série s vybíjajúcim prúdom 10A. Tento typ batérií bol zvolený kvôli paralelne zapojeným servo motorom, kde každý motor odoberá až 900mA. Aj keď batérie majú výstupné napätie dokopy 8,4V, pri zaťažení napätie klesá a batérie majú zároveň len 80 percent kapacitu pri dodaní, tým pádom boli vhodnou voľbou ako zdroj energie.

3.4 Elektrický obvod

Vybrané komponenty boli zapojené do elektrického obvodu s ohľadom na ich jednotlivé parametre. Doska Arduino Nano má schopnosť spracovania vstupného napätia až 12V cez pripojenie na VIN pin. Servo motory typu MG996R majú operačné napätie až 7.2V a keďže sú zapojené paralelne, napätie je konštantné. Motory sú napojené priamo na piny A0 až A7 dosky Arduino Nano. Batérie ako zdroj pohybu sú zapojené sériovo a sú pripojené na dosku a servo motory spoločným vodičom typu 20 AWG. Tento typ vodiču zvláda prúd až 11 Ampérov. Pri zapájaní elektrického obvodu bolo zvažované aj zapojenie kondenzátoru. Keďže celý robot ma ako zdroj energie batérie, nebolo nutné sa postarať o prúdové špičky spôsobené pri spúšťaní servo motorov. Zobrazenie schémy elektrického obvodu obsahovalo komplikácie z hľadiska nedostupnosti dosky Arduino Nano a 18650 10A batérií v knižnici TinkerCad programu. Odstránenie týchto komplikácií vyžadovalo použitie podobných modelov z knižnice ako je napríklad doska Arduino UNO. Celý elektrický obvod je možné vidieť na obrázku 12.



Obr. 12: Schéma elektrického obvodu

3.5 Implementácia pohybu

Pre aplikáciu pohybu plaziaceho sa hada je v mikrorobotovi použitá programovateľná doska Arduino Nano s prednahratým programom, ktorý simuluje pohyb hada. Tento pohyb je docielený použitím viacerých parametrov ako sú posunutie motora, amplituda, rýchlosť a vlnovej dĺžky pohybu hada.

3.5.1 program v Arduino IDE

Celý kód pohybu hada je napísaný vo vývojovom prostredí Arduino IDE, ktoré je určené na programovanie a nahrávanie kódu do dosiek Arduino. Obsahuje knižnice a funkcie, ktoré uľahčujú prácu s rôznymi perifériami a komponentmi pripojenými k doske. Pri skúšaní nahratia programu na dosku Arduino Nano nastali komplikácie s chybovou hláškou. Prieskumom a testom rôznych oblastí výskytu chyby bolo zistené, že objednaná doska Arduino Nano nie je originál. Riešením daného problému bolo nainštalovanie niekoľkých typov ovládačov.

```

void slither(int offset, int Amplitude, int Speed, float Wavelengths) {
  MUN = abs(offset) + abs(Amplitude);
  while (MUN > 90) {
    Amplitude = abs(Amplitude) - 1;
    MUN = abs(offset) + Amplitude;
  }
  for (int i = 0; i < 360; i++) {
    radians = i * pi / 180.0;
    for (int j = 0; j < 10; j++) {
      myServos[j].write(90 + offset + Amplitude * sin(Speed * radians + j * Wavelengths * Shift));
    }
    delay(10);
  }
}

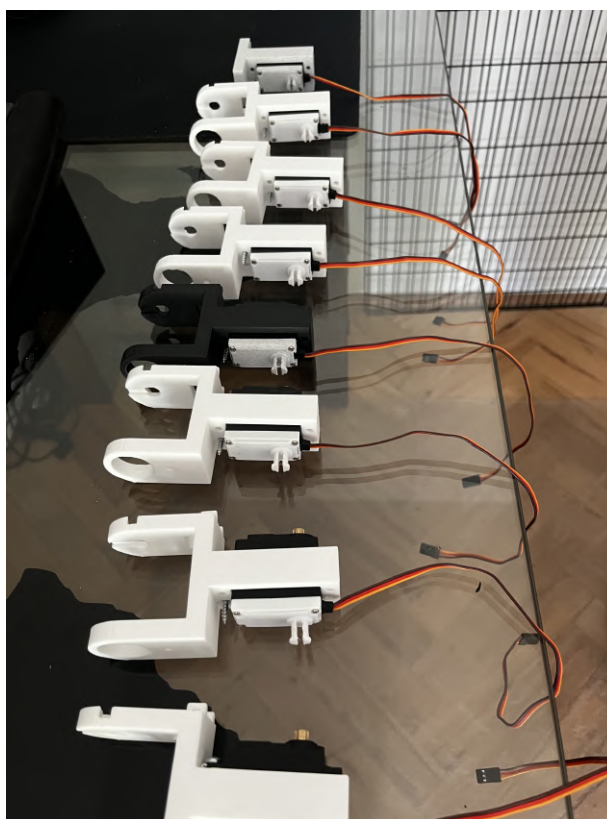
```

Obr. 13: Kód v programe Arduino IDE na simuláciu pohybu hada

Program využíva funkciu *Slither* definovanú štyrmi premennými. Vo funkcii sú použité dva *For* cykly, ktoré sú vnorené jeden do druhého. Prvý cyklus iteruje cez každý uhol od 0 do 360 stupňov, kde ich potom prevádza na radiány. Druhý cyklus iteruje cez 8 servo motorov, kde pre každý servo motor sa uskutoční operácia nastavenia uhlu servo motora pomocou funkcie *Write*. Uhol sa potom vypočíta na základe hodnôt premenných a známeho parametru uhla v radiánoch. Posledný krok je funkcia *Delay*, ktorá spôsobí 10 milisekundovú pauzu medzi každým krokom pohybu hada.

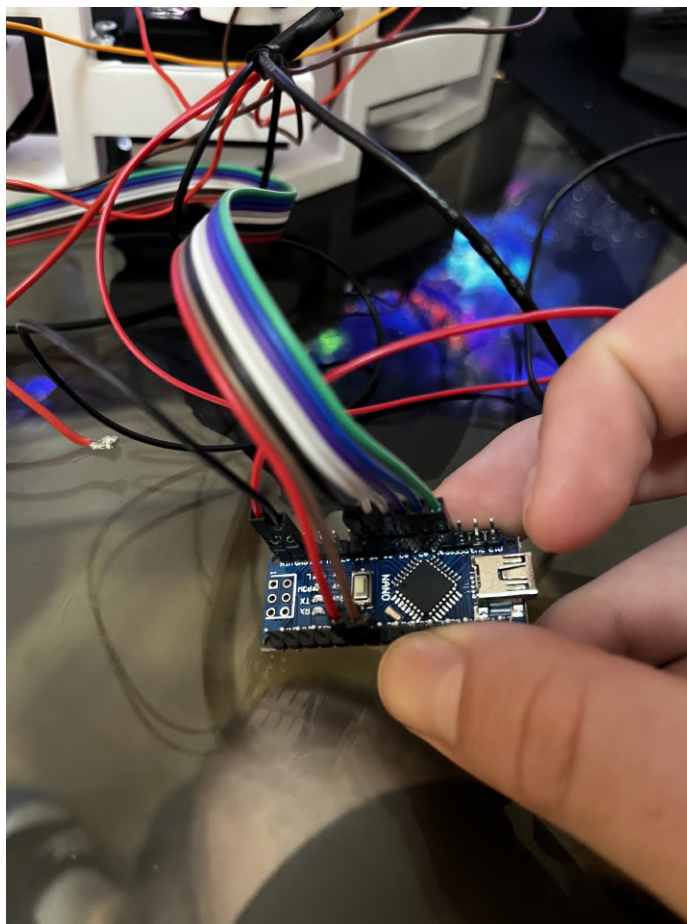
3.6 Montáž robota

Prvým krokom pri montáži robota bolo potrebné vymeniť kryt servo motora vytlačeným komponentom. Tento komponent obsahuje modul na uchytenie ložísk pre plynulé otáčanie servo motorov ako vidno na obrázku 14.



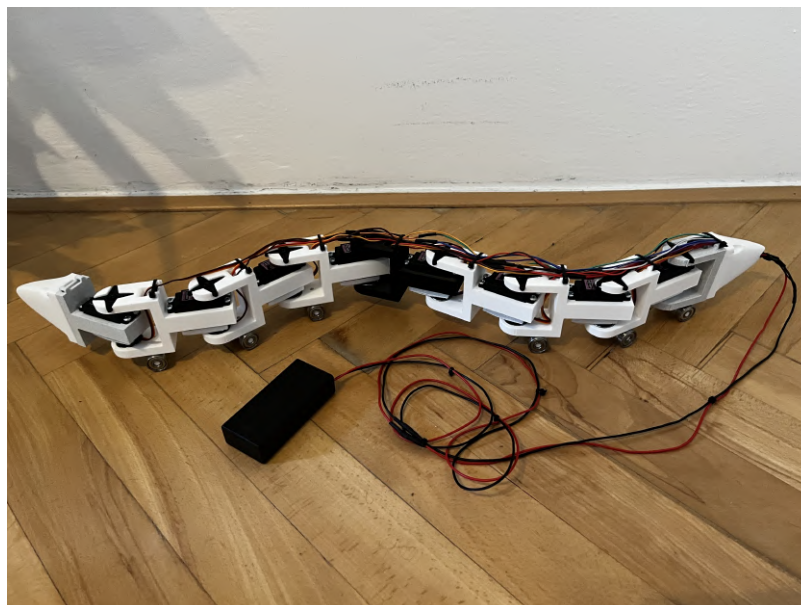
Obr. 14: Montáž servo motorov na vytlačené 3D komponenty

Následne boli takto upravené servo motory pripojené na jednotlivé časti skeletonu. Všetky časti skeletonu sú sériovo zapojené za sebou, kde z jednej strany sú servo motory napevno pripojené maticou a z druhej strany ložiskom. Ďalší krok zahŕňal zapojenie dosky Arduino Nano a prepojenie spojov vodičmi(Obrázok 15).



Obr. 15: Pripojenie vodičov na dosku Arduino Nano

Arduino Nano bolo následne pripojené na zdroj, kde 2 batérie sú uložené v kryte so spínačom pre jednoduché spúšťanie robota. Posledný krok je upevnenie chvosta a nosu pre lepšiu vizuálnu interpretáciu a uloženie Arduino Nano dosky. Výsledný model hada je možné vidieť na obrázku 16.



Obr. 16: Finálna podoba hada

3.6.1 Celkové rozmery hada

Finálny model hada po montáži všetkých komponentov a prepojení elektrického obvodu neodpovedá rozmerom mikrorobota. Hlavnými dôvodmi boli náročnosť výroby a cenová nedostupnosť komponentov. Preto sa pristúpilo k zväčšeniu modelu na veľkosť robota a výsledné rozmery su zobrazené v tabuľke 4.

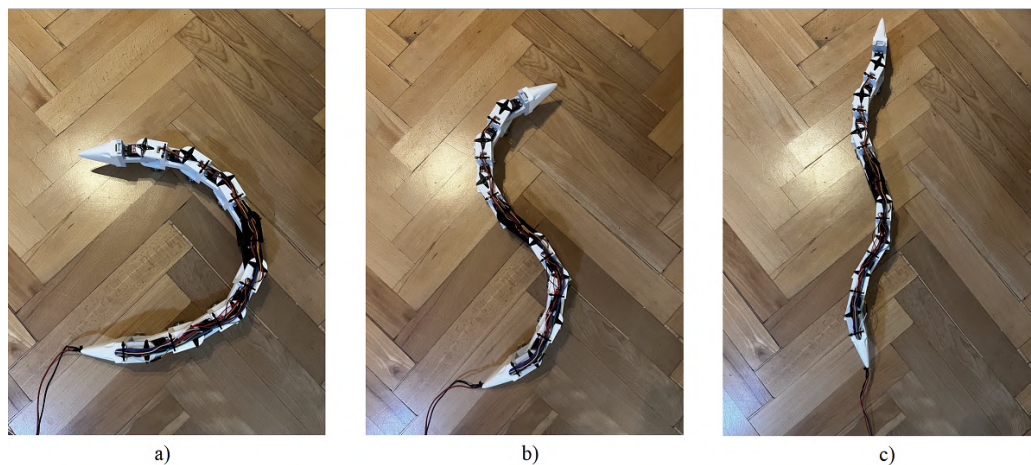
Tabuľka 4: Celkové Rozmery hada

Paramter	Hodnota
šírka	30mm
výška	80mm
dĺžka	810mm
váha	1100g

3.7 Testovanie pohybu

Pohyb hada bol testovaný s rôznymi veľkosťami parametrov. Celkovo bolo vykonaných 26 testovaní s rôznymi zmenami každého parametru. Paramter *Offset* určuje zmenu natočenia hada do ľavej alebo pravej strany. Aby sa had pohyboval rovno, tento parameter bol nastavený na hodnotu 0. Parameter *Amplitude* a parameter *Speed* boli po vhodnej kalibrácii nastavené na hodnoty 35 a 2, čo sa najviac približovalo k plynulému pohybu hada. Po vykonaní viacerých neúspešných testoch, bolo zistené, že pohyb najviac ovplyvňovala zmena parametru *Wavelength*, čiže vlnovej dĺžky, čo možno pozorovať na obrázku 17, kde a) má vlnovú dĺžku nastavenú na 0.5, b) vlnová dĺžka je 1 a c) vlnová dĺžka je 1,5. Pre optimálny pohyb napodobňujúcejmu pohybu hada, bola vlnová dĺžka stanovená na hodnotu 1.5, čiže varianta c) na obrázku 17. Aby sa had nehýbal stacionárne na mieste, bolo potrebné uchy-

tiť zo spodnej strany nápravu s kolesami. Tento krok spôsobil, že sa had hýbe kĺzavým pohybom dopredu.



Obr. 17: Testovanie pohybu hada

3.8 Cenová analýza

Pre realizovaný model bola zostrojená cenová analýza použitých komponentov a nákladov na výrobu skeletu. Všetky údaje spojené s výrobou modelu hada sú zobrazené v tabuľke číslo 5.

Tabuľka 5: Cenová analýza

Názov komponentu	Počet kusov	Cena / 1ks	Cena celkom
Arduino NANO	1	198 Kč	198 Kč
Servo motor MG996R	8	164 Kč	1312 Kč
20 AWG kábel	4	98 Kč	392 Kč
Baterie 345mAh Li-on	2	248 Kč	496 Kč
530g PLA - 1,75 mm filament	1	750 Kč	397 Kč
Bateriový box na dve baterie typu 18650	1	29 Kč	29 Kč
Ložisko typu 608 rs	8	35 Kč	280 Kč
Ložisko typu 626-2Z	12	39 Kč	468 Kč
Vodiče a spojovací materiál	1	300 Kč	300 Kč
Výsledná Cena			4010 Kč

Iné typy modelov mikrorobota inšpirovaného plazmami

Táto kapitola sa venuje modelovaniu a riadeniu ďalších typov hadích robotov pohybujúcich sa na súši aj pod vodou. Opisuje sa tiež nový smer výskumu v rámci hadej robotiky, kde sú podvodné hadie roboty vybavené špeciálnym materiálom reagujúcim na zmenu elektrického náboja a tým vytvárajú pohyb hada.

4.1 Stromolezecký robot

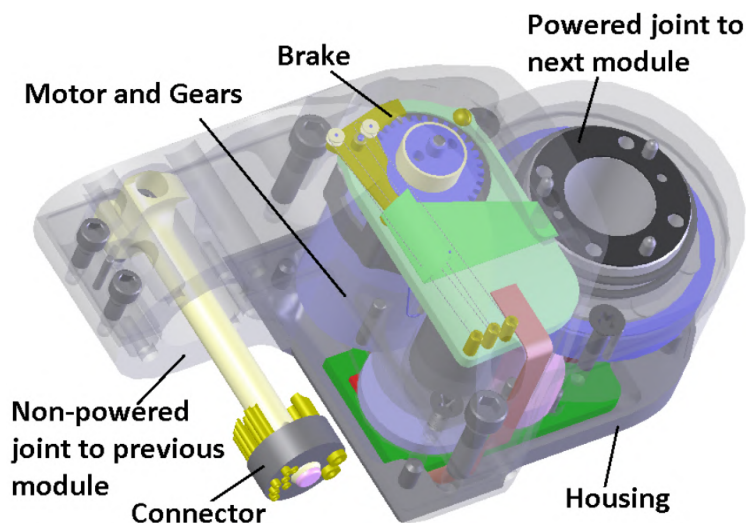
Jeden z ďalších modelov mikrorobota inšpirovaných plazmami je hadí robot (Obr. 18), ktorý dokáže liezť po stromoch. Tento typ robotov sa v princípe veľmi nelíši od hada, ktorý je opísaný v praktickej časti tejto práce, avšak disponuje pokročilým mechanickým dizajnom spolu s špičkovou elektronikou a softvérom a dvojosovým pohybom vďaka ktorému je schopný otáčať svoje moduly do rôznych uhlov, nezávisle jeden od druhého. Vďaka tomu je tento robot použiteľný na rôzne úlohy vyžadujúce zložitý typ pohybu pri záchranných akciách, priemyselnej inšpekcii a prieskume. [16]



Obr. 18: Stromolezecký robot vytvorený tímom z Biorobotics Lab

4.1.1 Mechanika robota

Každý modul je pevný a obsahuje dva polovičné spoje, z ktorých každý sa pripája k ďalšiemu a predchádzajúcemu modulu. Každý kĺb umožňuje úplné otočenie o 180° . Ovládaná os každého modulu sa otáča o 90° okolo chrbtice robota vzhľadom na ovládanú os predchádzajúceho modulu a ovládané osi sú striedavo zarovnané s bočnou a dorzálnou rovinou robota. [4] [16]

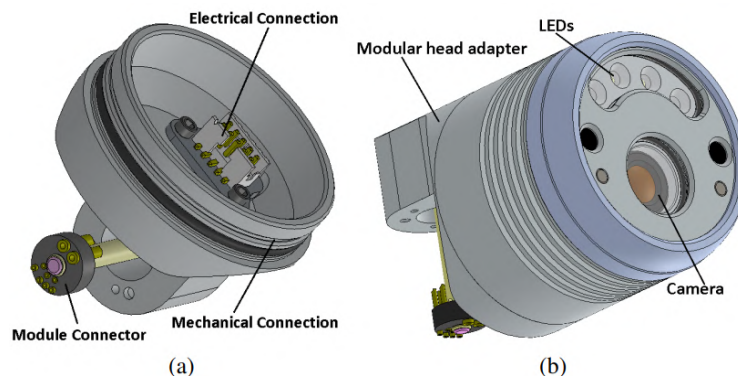


Obr. 19: Klúčové komponenty modulu

Na (Obr. 19) je možné pozorovať, že hlavnými súčasťami každého modulu sú kryt, motor s prevodovkou, bistabilná brzda a medzi-modulový konektor. Kryt je tvorený hliníkovým plášťom, ktorý obsahuje ostatné časti modulu. Krútiaci moment je poskytnutý motorom s prevodovkou pre polovičný kĺb, ktorý je ním poháňaný. V moduli je tiež zahrnutá bistabilná brzda, ktorá umožňuje udržať náboj na mieste bez nutnosti spotreby energie alebo vzniku tepla. Medzi-modulový konektor zabezpečuje elektrické spojenie medzi modulmi a obsahuje magnet, ktorý slúži na poskytovanie spätnej väzby polohy spojenia. [4]

4.1.2 Modul hlavy

Na hlave robota je modulárny adaptér hlavy (Obr. 20). Pozostáva z jedného nenapájaného polovičného spoja s intermodulovým konektorom k predchádzajúcemu modulu. Vnútri adaptéra hlavy je 10-kolíkový konektor, ktorý poskytuje napájanie, komunikáciu a video linky pre akékoľvek zariadenie pripojené k hlave. [16]



Obr. 20: (a) Modulárny adaptér hlavy a (b) kompletná zostava kamery.

4.1.3 Riadenie pohybu

Robot je v zásade vstavaná sieť v reálnom čase s dvoma hlavnými funkciami: vykonávať riadiace príkazy pre pohyb a poskytovať spätnú väzbu získanú zo senzorov. Pre kontrolu robota je kľúčová nízka latencia a vysoká presnosť informácií o ovládaní pohybu do modulov robota. Pre výskumné účely je potrebná flexibilná komunikačná architektúra, ktorá dokáže podporovať rôzne konfigurácie a spätnú väzbu, ktorá je dostatočne rozšíriteľná na pridanie nových typov informácií, keď sa do systému zavedú nové senzory alebo riadiace parametre modulov. [4]

4.2 Robotický úhor

Autonómne podmorské roboty umožňujú podrobnejší prieskum vodných oblastí ako kedykoľvek predtým. Plávajúci hadí robot umožňuje pristupovať a monitorovať ťažko dostupné oblasti ale aj skúmať podmorský život. Medzi takéto roboty patrí aj prototyp transparentného robotického úhora, ktorého vyvinuli inžinieri s morským biológom na Kalifornskej univerzite. Jednou z kľúčových inovácií bolo použitie slanej vody, v ktorej robot pláva, aby pomohla generovať elektrické sily, ktoré ho poháňajú. [7] [14]

4.2.1 Systém fungovania robota

Robot je vybavený káblami, ktoré privádzajú napätie do slanej vody, ktorá ho obklopuje, aj do vakov vodivej vody vo vnútri jeho umelých svalových komôr. Elektronika robota potom dodáva záporné náboje vo vode tesne mimo robota a kladné náboje vo vnútri robota, ktoré polarizujú materiál a aktivujú svalový pohon. Alternatívne zmeny týchto elektrických nábojov spôsobujú, že sa umelé svaly ohýbajú, čím sa generuje zvlnený plavecký pohyb robota. Náložie sú umiestnené tesne mimo povrchu robota a prenášajú veľmi malý prúd, takže sú bezpečné pre okolitý morský život. [7]



Obr. 21: Robotický úhor testovaný v nádrži Birch Aquarium v Scripps Institution of Oceanography v UC San Diego.

Robot bol testovaný v akváriách so slanou vodou s koralmi, rybami a medúzami. V súčasnosti je robot pripútaný k elektronickej doske, avšak výskumníci plánujú vytvoriť verziu bez pripútania a vybaviť ju hlavou obsahujúcou senzory pre zber údajov. Ďalšie vývojové kroky sa zamerajú na spoľahlivosť konštrukcie a systém závaží, ktoré umožnia hlbšie ponory. Robot by jedného dňa mohol poskytnúť nový pohľad na život v oceáne, keď sa robot potichu začlení do svojho podmorského prostredia. [7]

Záver

Mikrorobotika ako oblasť získavajúca veľa pozornosti od inžinierov aj širokej verejnosti nám v modernom svete umožňuje riešenie mnohých problémov v oblasti zdravotníctva, materiálového inžinierstva, poľnohospodárstva a ďalších iných oblastí. Jednou z oblastí ktorej sa venuje táto práca je problematika v malých a nedostupných priestoroch.

V prvej časti bakalárskej práce je obsiahnutá stručná rešerš zaoberajúca sa metódami, systémami a rôznymi komponentmi, ktoré sa v praxi používajú pri návrhu a výrobe mikrorobotov.

Ďalšia časť práce je venovaná konštrukciou modelu robota hada inšpirovaného plazmami, kde bol kladený dôraz vlastným návrhom pochopiť využiteľné metódy. Kvôli náročnosti výroby a výrobného vybavenia pre mikroroboty a vyžadovanie špecifických podmienok, musela byť práca ovplyvnená radou kompromisov a zjednodušení. Jedným z najvýznamnejších kompromisov je celková veľkosť modelu, ktorý je zameraný na rozmery v centimetroch. Aj keď použitý zväčšený model umožňoval využiť bežné metódy pri návrhu robotov, snaha bola zachovať čo najviac prístupov a konštrukčných metód používaných v mikrorobotike. Úsilie čo najviac sa priblížiť mechanizmu pohybu hada viedlo k mnohým neúspešným pokusom o napísanie optimálneho kódu a jeho testovania. Medzi prekážky pri konštruovaní hada sú zaradené aj financovanie komponentov a oneskorené doručenie týchto komponentov, čo vo veľkej miere obmedzilo vývoj plnohodnotného modelu hada s riadeným pohybom. Hlavným cieľom tejto práce bola konštrukcia modelu mikrorobota, čo korešponduje s výsledným funkčným modelom, ktorý je schopný simulovať pohyb hada s vopred definovaným pohybom. Značná rezerva v zdroji a vývojová doska Arduino ponúkajú možnosti ďalších úprav a implementácií ďalších funkcií. Jednoduchosť a možnosť rýchlej modifikácie konštrukcie skeletu 3D tlačou je možné využiť pre pridanie senzoru, akým je kamera alebo zavedenie autonómneho riadenia.

V poslednej časti bakalárskej práce sú opísané ďalšie varianty mikrorobotov inšpirovaných plazmami. Spomenutý je stromolezecký robot, ktorého hlavná výhoda spočíva v dvojsose pohybe, vďaka čomu vie otáčať svoje moduly do rôznych uhlov nezávisle od seba. Robot disponuje aj modulárnym modelom hlavy vďaka čomu poskytuje linky pre pripojenie rôznych zariadení. Druhý typ mikrorobota sa líši dvoma podstanými detailmi. Jeho autonómnosťou a schopnosť fungovania vo vodnom svete, konkrétnejšie v slanej vode. Tento typ robota sa pýši špeciálnym typom kabeláže, ktorá sa stará o pohyb hada. Pohyb je docieľený výmenou nábojov v robotovi a v prostredí okolo neho, čím polarizujú materiál, ktorý spôsobí ohyb umelých svalov. Takýto typ robota prešiel testom v akváriách so slanou vodou, čím priblížil mikrorobotiku k skúmaniu podmorského života.

V konečnom dôsledku si myslím, že som získal cenné skúsenosti a oboznámil sa s metódami a materiálmi používanými pri návrhu mikrorobotov, či už prakticky alebo teoreticky. Tieto skúsenosti by mi mali pomôcť v budúcnosti pri práci a návrhu a môžu mať vplyv

na ďalší výskum v oblasti mikrorobotiky, nielen pokiaľ ide o samostatne plazúce sa roboty. Využitie mikrorobotov v praxi ešte nie je bežnou záležitosťou, ale v odvetviach, kde už nájdu svoje miesto, umožnili významný pokrok (napríklad v oblasti medicíny).

Zoznam obrázkov

1	Rôzne situácie, keď sa dva predmety dostanú do kontaktu.	6
2	Ilustrácia vzdialeného stredu otáčania vytvoreného s dvoma lúčmi	8
3	Koncepčná ilustrácia aktuátora v sústave: (a) otvorený systém (b) uzavretý systém	9
4	Príklady pákových mechanizmov	9
5	Push–pull konfigurácia	10
6	Dvojtyčová konfigurácia zosilnenia pohybu aktuátorov na báze tepelnej rozťažnosti	11
7	Diagram zobrazujúci dve hlavné fázy SMA. Každá fáza (tu martenzit a austenit) je stabilná za určitých podmienok teploty a napätia. Sú znázornené charakteristické teploty zodpovedajúce fázovej premene.	11
8	výrez LVDT senzoru	12
9	Ilustrácia použitia triangulačného systému v AFM na meranie priehybu konzoly	13
10	3D model skeletonu hada vyhotovený v programe TinkerCad	15
11	Servo Motor typu MG996R s uhlom natočenia 0 až 180 stupňov	16
12	Schéma elektrického obvodu	17
13	Kód v programe Arduino IDE na simuláciu pohybu hada	17
14	Montáž servo motorov na vytlačené 3D komponenty	18
15	Pripojenie vodičov na dosku Arduino Nano	19
16	Finálna podoba hada	20
17	Testovanie pohybu hada	21
18	Stromolezecký robot vytvorený tímom z Biorobotics Lab	22
19	Kľúčové komponenty modulu	23
20	(a) Modulárny adaptér hlavy a (b) kompletná zostava kamery.	24
21	Robotický úhor testovaný v nádrži Birch Aquarium v Scripps Institution of Oceanography v UC San Diego.	25

Zoznam tabuliek

1	Mierkové faktory	5
2	Porovnanie medzi ohybmi a tradičnými kĺbmi	7
3	Veľkosti rozmerov častí skeletonu	15
4	Celkové Rozmery hada	20
5	Cenová analýza	21

Literatúra

- [1] *MG996R Servo Motor* [online]. components101, duben 2019 [cit. 2023-12-05].
Dostupné z: <https://components101.com/motors/mg996r-servo-motor-datasheet>.
- [2] *What are the types and uses of position sensors?* [online]. sensortips, červenec 2022 [cit. 2023-18-04]. Dostupné z: <https://www.sensortips.com/featured/what-are-the-types-and-uses-of-position-sensors-faq/>.
- [3] BELLOUARD, Y. *Microrobotics: Methods and Applications*. Boca Raton: Taylor Francis Group, 2009. ISBN 142006195X.
- [4] BUCHAN, A. a. i. d. Design and architecture of the unified modular snake robot. 2012. DOI: 10.1109/ICRA.
- [5] FATIKOW, S. *Microrobotics* [online]. Serious Science, červen 2018 [cit. 2023-13-05].
Dostupné z: <https://serious-science.org/microrobotics-9100>.
- [6] HAK, M. G. el. *MEMS Introduction and Fundamentals*. CRC Press Taylor Francis Group, 2006. ISBN 0-8493-9137-7.
- [7] KOOSER, A. *Soft and silent eel-like robot can sneak around underwater* [online]. cnet, duben 2018 [cit. 2023-16-04]. Dostupné z: <https://www.cnet.com/science/silent-robot-from-uc-san-diego-can-sneak-like-an-eel-underwater/>.
- [8] LARRY L. HOWELL a. iní. Techniques in the Design of Thermomechanical Microactuators, Chapter 7, MEMS/NEMS Handbook, Techniques and Applications. 2006, sv. 4.
- [9] LEE a. iní Gil-beom. Shadow Detection Based on Regions of Light Sources for Object Extraction in Nighttime Video. 2017. DOI: s17030659.
- [10] LI, Z. a. DU, R. Design and Analysis of a Bio-Inspired Wire-Driven Multi-Section Flexible Robot Regular Paper. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. Duben 2013, sv. 10, s. 209–220. DOI: 10.5772/56025.
- [11] LISETH PASAGUAYO, S. A. L. A. Degradation Modeling Analysis for Microrobots Flexure Hinges Using Intracorporeal Surgeries. 2022. DOI: hal-03549524.
- [12] PANÉ, W.-G. P. a. iní. Powering and Fabrication of Small-Scale Robotics Systems. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43154-021-00066-1>.
- [13] ROYSON DONATE D'SOUZA a. iní. MICROROBOTICS: TRENDS AND TECHNOLOGIES. 2016. ISSN 2320-0847.

- [14] TAO YANG a iní. *Reconfigurable microbots folded from simple colloidal chains* [online]. PNAS, červenec 2020 [cit. 2023-21-04]. Dostupné z: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2007255117>.
- [15] VYTAUTAS BUČINSKAS a iní. Robotic micromanipulation: a) actuators and their application. 2021. DOI: 2021.22071.
- [16] WU, K. J. *Let a Snake-Inspired Robot Be Your Hero Today* [online]. PBS, únor 2019 [cit. 2023-13-05]. Dostupné z: <https://www.pbs.org/wgbh/nova/article/let-snake-inspired-robot-be-your-hero-today/>.
- [17] ZHIJIAN REN a aní. Shape Memory Alloy (SMA) Actuator With Embedded Liquid Metal Curvature Sensor for Closed-Loop Control. 2021. DOI: 2021.599650.

Prílohy

1. Video ukážka pohybu hada
2. Zdrojový kód pre pohyb hada