



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH ŘEŠENÍ VNITŘNÍ MECHANICKÉ KONSTRUKCE PRO ROBOTA S MĚKKÝM POVRCHEM

SOFT ROBOT MECHANICAL DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jaromír Gamba

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Stanislav Věchet, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Jaromír Gamba
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Stanislav Věchet, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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 řešení vnitřní mechanické konstrukce pro robota s měkkým povrchem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mobilní roboty s měkkým povrchem jsou vhodné především k realizaci mechanismů s inspirací v živočišné říši. Jedná se zejména o roboty pohybující se ve vodě, které svým vnějším povrchem a způsobem pohybu napodobují vybrané vodní živočichy. Podstatou práce je rešerše aktuálních konstrukčních řešení umožňujících plynulý pohyb vybraných konstrukčních uzlů robota, při současném zachování integrity celého povrchu.

Cíle bakalářské práce:

Proveďte rešerši aktuálních konstrukčních řešení robotů s měkkým povrchem s inspirací v přírodě a aktuátorů využívaných pro změnu tvaru.

Navrhněte řešení, které umožňuje změnu objemu těla robota a vzájemnou rotaci alespoň dvou částí.

Navržené řešení ideově zpracujte ve vhodném simulačním prostředí.

Seznam doporučené literatury:

KULIC Dana, VENTURE Gentiane, YAMANE Katsu, DEMIRCAN Emel, MIZUUCHI Ikuo, MOMBAUR Katja, Anthropomorphic Movement Analysis and Synthesis: A Survey of Methods and Applications, Robotics IEEE Transactions on, vol. 32, pp. 776-795, 2016, ISSN 1552-3098.

GANESH Gowrishankar, SCHAFFER Alin Albu, HARUNO Masahiko, KAWATO Mitsuo, BURDET Etienne, Biomimetic motor behavior for simultaneous adaptation of force impedance and trajectory in interaction tasks, Robotics and Automation (ICRA) 2010 IEEE International Conference on, pp. 2705-2711, 2010, ISSN 1050-4729.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Práce pojednává o konstrukci robota s měkkým povrchem, který dokáže měnit objem a plavat pod vodou. Cílem práce je návrh mechanické konstrukce, která tuto změnu objemu umožňuje.

Summary

This thesis deals with construction of soft bodied robot which is able to change its volume and to float in water. The aim of this work is to design a mechanical construction providing modification of its volume.

Klíčová slova

Robot s měkkým povrchem, měkký robot, aktuátory.

Keywords

Soft robot, actuators.

Bibliografická citace

GAMBA, J. *Návrh vnitřní mechanické konstrukce robota s měkkým povrchem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 34 s. Vedoucí doc. Ing. Stanislav Věchet, Ph.D.

Prohlášení o originalitě

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Návrh vnitřní mechanické konstrukce robota s měkkým povrchem* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použité literatury.

V Brně, dne

.....

Jaromír Gamba

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Stanislavu Věchetovi, Ph.D. za udávání směru vývoje práce a poskytnuté rady.

Obsah

1	Úvod k robotům s měkkým povrchem	8
1.1	Definice	8
1.2	Srovnání s konvenčními roboty, vývoj měkké robotiky	8
1.3	Konstrukční uzly měkkých robotů, aktuátory	9
1.3.1	Definice	9
1.3.2	Obecné rozdělení	9
1.3.3	Aktuátory využívané v měkké robotice	9
1.3.4	Napájení aktuátorů	10
1.3.5	Ovládání aktuátorů	10
2	Existující roboty s měkkým povrchem	11
2.1	Ryba	11
2.2	Chobotnice	11
2.3	Medúza	12
2.4	Žížala	13
2.5	Sépie	14
2.6	Hlavonožec	15
2.7	Breathing friend	15
2.8	Multigait soft robot	16
2.9	Ant-roach	17
3	Návrh vnitřní mechanické konstrukce robota s měkkým povrchem	18
3.1	Popis těla robotu	18
3.2	Charakteristika robotu, vnějšího prostředí a spotřeba vzduchu	19
3.2.1	Geometrie robotu	19
3.2.2	Uvažované materiály, jejich vlastnosti a množství	20
3.2.3	Výpočet pevnosti a hloubky ponoru tělesa	20
3.2.4	Podmínka plování, určení hmotnosti	21
3.2.5	Trajektorie	22
3.2.6	Spotřeba vzduchu	22
3.3	Podoba vnitřní mechanické konstrukce	24
4	Závěr	26
5	Seznam použitých zdrojů	27
6	Seznam použitých zkratk a symbolů	29
7	Příloha: Výpočet objemových změn a spotřeby vzduchu	30

1 Úvod k robotům s měkkým povrchem

Tato práce se zabývá roboty s měkkým povrchem a věcmi s nimi spojenými. Na základě nalezených existujících konstrukčních řešení měkkých robotů bude navržen nový robot, který bude sloužit k nějakému speciálnímu účelu.

1.1 Definice

Robot s měkkým povrchem je takový robot, který je z velké části tvořen měkkým materiálem. Tímto měkkým materiálem bývá nejčastěji pružný silikon. Mohou to být ale i jiné elastické plastické hmoty.

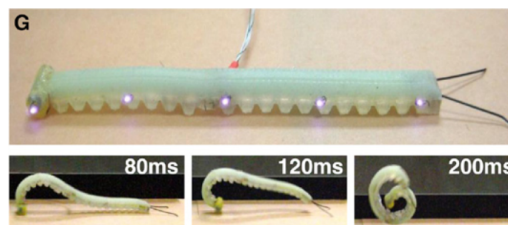
Jako roboty označujeme obecně všechny stroje, které jsou schopné ovlivňovat své okolí na základě získaných informací z tohoto okolí. Informace robot získává pomocí senzorů, zpracovává je, a po jejich vyhodnocení reaguje. Robot si zachovává jistou míru samostatnosti, využívá zpětnou vazbu a interaguje.

1.2 Srovnání s konvenčními roboty, vývoj měkké robotiky

Klasické roboty jsou vyráběny z pevných materiálů jako ocel, hliník, různé kovové slitiny a konstrukční plasty. Jejich pohon přímo zajišťuje elektromotor nebo čerpadlo tekutin, které jsou vháněny do systému tuhými trubicemi. Takovéto stroje jsou schopny vyvinout velké síly i vysokou přesnost, což je dělá efektivními v linkové tovární výrobě. Hůře se konvenční roboty uplatňují při práci v blízkosti člověka a při práci v přírodním prostředí. Nedokážou se dost dobře přizpůsobit rozmanitým okolnostem a materiálům, se kterými se v tomto prostředí setkávají.

Při snaze překonat nedostatky tuhých robotů se v posledním desetiletí rozvinulo nové odvětví robotiky, které se anglicky nazývá *soft robotic*. Česky lze odvětví označit jako měkkou robotiku, nebo robotiku robotů s měkkým povrchem. Tyto roboty disponují větší přizpůsobivostí ke svému okolí a za jejich typickou vlastnost se považuje, že jejich tělo se může deformovat za účelem vykonávání předurčené funkce.

Jedním z cílů měkké robotiky je výroba strojů, které svými schopnostmi dostihují živé tvory. Mnoho lidských úkonů jako například chůze, uchopování předmětů a orientaci v plných místnostech považujeme za jednoduché, ale pro stroje jakéhokoliv druhu jsou velmi obtížné. Roboty z tuhých materiálů jsou ovládány s velkou přesností, neustále sledují polohu a natočení svých součástí. To je nutné zejména proto, aby neponičily sebe nebo své okolí. Pokud mají mnoho kloubů nebo lineárních vazeb, aby byly pohybové možnosti větší, pak přesnost pohybu klesá a procesy vytvářející pohyb se komplikují. Řešení nabízí měkká robotika.



Obrázek 1: Měkký robot - housenka[1]

1.3 Konstrukční uzly měkkých robotů, aktuátory

Autonomní robot musí mít základní části jako rám, senzory, centrální kontrolní systém (mikroprocesor), aktuátory (motory), zásobárnu energie a program určující jeho chování.[1] Výroba rámu je poměrně jednoduchá. Měkké rámy se vyrábí odléváním, vstřikováním do forem nebo technologií 3D tisku. Senzory a mikroprocesor lze vyrobit tak malé, že se bez potíží vejdou do robota o velikosti lidské pěsti.

1.3.1 Definice

Aktuátor neboli akční člen („hybatel“) je mechanická nebo mechatronická součást stroje, která přímo vytváří (koná) pohyb.[2] Převádí nízkenergetický signál řídící jednotky na energeticky náročnější pohyb stroje nebo jeho části.

1.3.2 Obecné rozdělení

Akčnímu členu je třeba dodat pokyn k vykonání pohybu a také energii k jeho provedení. Pokyn i pohon se vyskytují v pěti základních podobách a to jako elektrický proud, tlak kapaliny, tlak plynu, mechanický pohyb a teplo nebo magnetické pole. Vzniká pět druhů pohonných systémů:

- a. elektrický - elektromotor mění elektrickou energii na mechanickou
- b. hydraulický - válec, píst a kapalina
- c. pneumatický - válec, píst a stlačený vzduch
- d. mechanický - vzájemná přeměna mechanických energií
- e. tepelný nebo magnetický - přeměna tepelné nebo magnetické energie

1.3.3 Aktuátory využívané v měkké robotice

Nové technologie umožňují výrobu pružných elektronických součástek. Největší výzvou při konstruování měkkého robotu je volba nejvhodnějšího aktuátoru, energetického zdroje a kontrolního obvodu robotu. Klasické elektromotory nemohou být tak dobře miniaturizovány jako senzory. Malé motory jsou slabé a neefektivní.

U některých robotů s měkkým povrchem jsou využívány hydraulické a pneumatické pohonné systémy, které bývají uloženy odděleně od měkké části robotu. Jinde se používají tzv. měkké aktuátory, které se stávají v dnešní době dostupnějšími. Jedná se o elektroaktivní polymery (EAPs), makroporézní gely a ostatní fázově-přechodné materiály. Některé z nejpoužívanějších aktuátorů v sobě mají zabudované miniaturní dráty a fólie ze slitin s tvarovou pamětí. Tyto slitiny mění při zahřátí svůj tvar. Pokud navineme tento drát do vlákna a necháme jím protékat elektrický proud, vlákno se smrští. Tato vlákna se chovají stejně jako živočišná svalová vlákna, ale oproti elektromotorům jsou nestabilní, energeticky neefektivní a lehce ovlivnitelné okolním prostředím. Ideálním lineárním měkkým aktuátorem je živý sval, jemuž se snažíme přiblížit. Některé výzkumné skupiny pracují na vývoji strojů s umělými svalovými vlákny.

1.3.4 Napájení aktuátorů

Druhým konstrukčním uzlem měkkých robotů je způsob skladování energie pro aktuátory. Elektrickou energii můžeme uložit do baterií nebo kondenzátorů. Přestože tyto součástky lze vyrobit poměrně ohebné, zatím není tento druh součástek komerčně dostupný, protože tyto díly mají nízkou energetickou hustotu a malému robotu vydrží dodávat energii nejdéle po dobu dvou hodin. Vyšší energetickou hustotu ale nabízí chemické vazby uhlovodíkových molekul. To je jeden z důvodů, proč moderní motory pohání benzín a tuk je hlavním zdrojem energie pohybujících se zvířat. Pracuje se na technologiích přeměny této chemické energie na mechanickou. Pokud by se podařilo nalézt dostatečně účinný způsob spalování organických látek jako jsou cukry, tuky a bílkoviny, spaliny robotu by méně ohrožovaly přírodní prostředí a zdroje by byly dostupnější. Nejlépe mají hospodaření s energií vyřešené živé organismy. Jejich dokonalosti a účinnosti se robotika může pouze přiblížit.

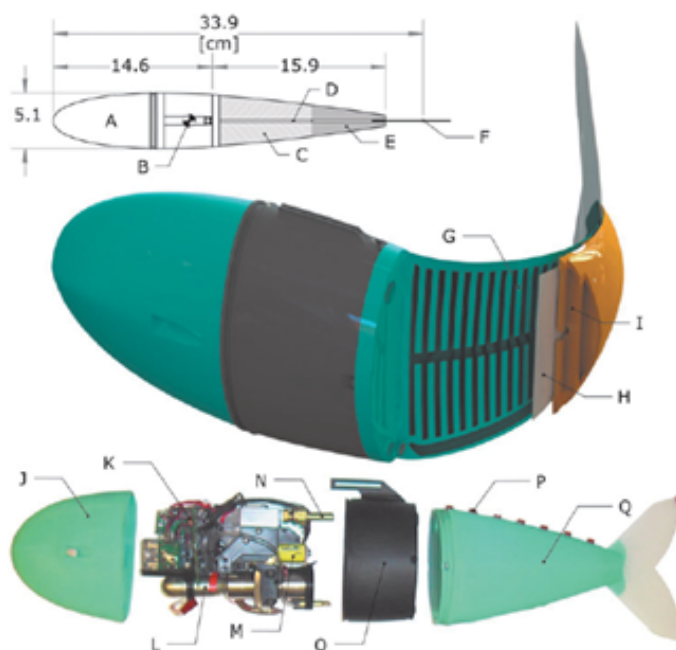
1.3.5 Ovládání aktuátorů

Třetí výzvou ve výrobě užitečných měkkých robotů je konstrukce ovládacího systému vhodného pro tvarově proměnné struktury. Většina existujících řešení neumožňuje ovládat zařízení s mnoha stupni volnosti. Tato oblast výzkumu vyžaduje nové přístupy. Zatím se snaží vycházet ze studia nervových soustav živočichů a vytváří tak nové vědecké odvětví zvané neuromechanika.[1]

2 Existující roboty s měkkým povrchem

2.1 Ryba

Spoluprací několika technických univerzit v Massachusetts byla vytvořena robotická ryba. Inženýři pozorovali chování biologických ryb a za cíl si stanovili, že by robot měl mít schopnost provádět rychlé únikové manévry stejně jako biologická ryba, která se snaží uniknout před predátorem.[3] Robot je autonomní a jeho pohyb zajišťuje tekutina proudící soustavou kanálků v elastickém materiálu.



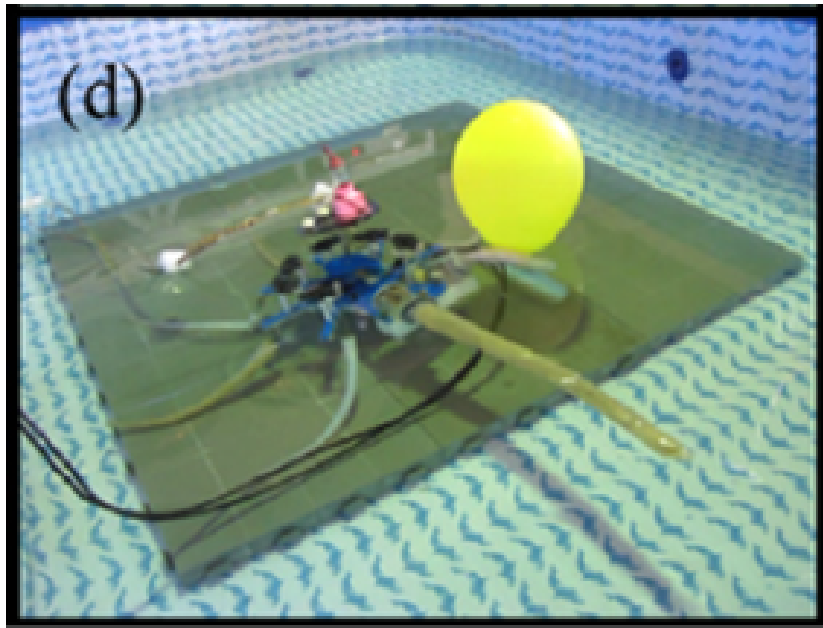
Obrázek 2: Robotická ryba[3]

Tabulka 1: Technické parametry robotické ryby

Délka	339 mm
Výška	51 mm
Maximální tlak v kanálcích	55,8 kPa
Tloušťka obalu	0,5 mm

2.2 Chobotnice

Institut biorobotiky v Pise se inspiroval chobotnicí a vyvinul její model schopný lezení ve vodě a uchopování i přemísťování předmětů různých velikostí. Dokáže překonávat různé druhy podvodního terénu a svou měkkou schránkou při kontaktu neníčí okolní prostředí.[4]



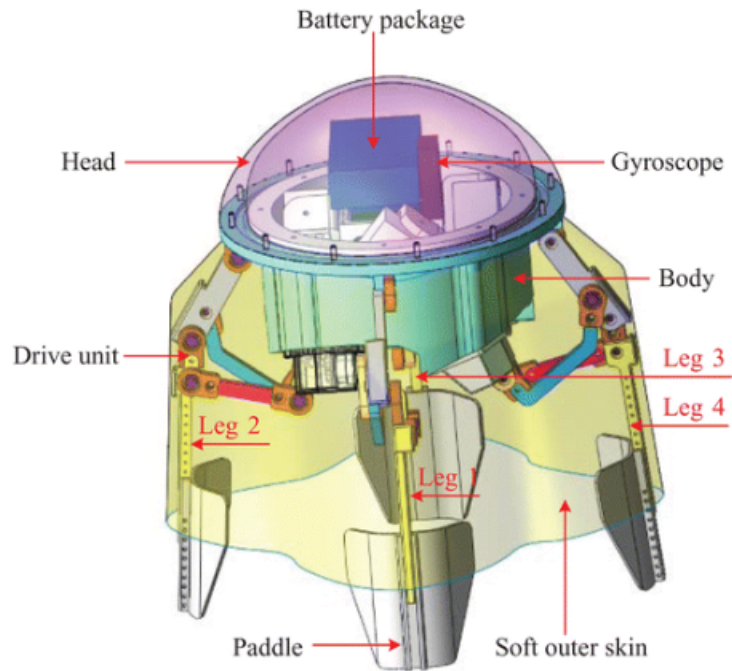
Obrázek 3: Robotická chobotnice[4]

Tabulka 2: Technické parametry robotické chobotnice

Počet chapadel	8
Délka a průměr chapadla	300 mm, 30 mm
Tloušťka obalu	<1 mm
Hustota robotu	$0,979 \cdot \rho_{H_2O}$

2.3 Medúza

V čínském Shihezi sestrojili v roce 2016 na strojírensko-elektrotechnické univerzitě napodobeninu medúzy. Pomocí čtyř ramen, která se vychylují silou servomotorů a nadzdvihávají měkký plášť, může medúza plavat podobně jako ta živá.[5] Podle autorů mohou být roboty s měkkým povrchem pracující pod vodou využity pro monitorování podmořského života.



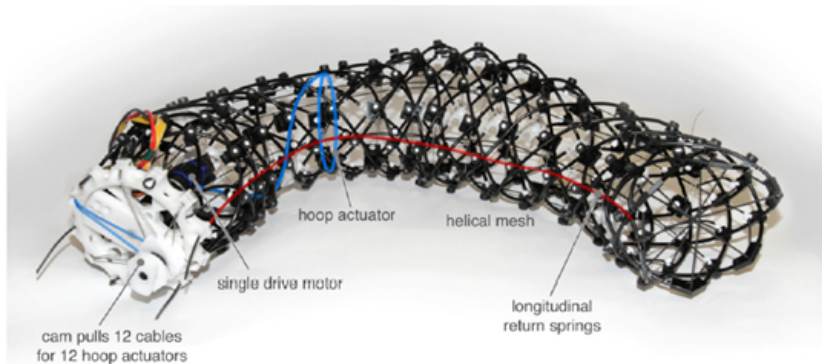
Obrázek 4: Robotická medúza[5]

Tabulka 3: Technické parametry robotické medúzy

Hmotnost	2,3 kg
Průměr těla robotické medúzy	174 mm
Výška těla	206 mm
Doba provozu na jednu Li-Po baterii	1,2 h
Maximální rychlost horizontálního pohybu ve vodě	92,5 mm/s
Maximální rychlost vertikálního pohybu ve vodě	10 mm/s

2.4 Žížala

Profesoři v Clevelandu vyvinuli robot schopný peristaltických pohybů. Síť pneumatických hadiček umožňuje robotu se po částech smršťovat a roztahovat. Aby se mohl posouvat, má po celé délce těla umístěny ještě kotvící elementy (přísavky).[6] Tento typ robotu je vhodný do úzkých prostor. Předpokládá se, že ve zmenšené podobě by mohl být využit v endoskopii jako sonda. Mohl by se dostat hlouběji do těla než klasický endoskop.



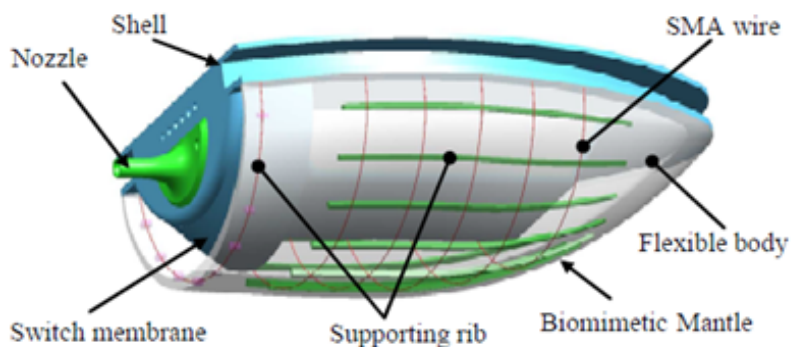
Obrázek 5: Robotická žížala[6]

Tabulka 4: Technické parametry robotické žížaly

Hmotnost	4 kg
Délka	800-1100 mm
Počet pohybových segmentů	12
Rychlost posunu během natahování	66 mm/s

2.5 Sépie

V čínském institutu robotiky v Hainglongjiang našli inspiraci v sépii. Pulzní proudový pohon robota zajišťuje tvarovatelný plášť se žebry, jež vytlačuje a nasává vodu. Pohyb vytváří proužky slitiny s tvarovou pamětí (SMA wires).[7] Účelem vývoje robotů s měkkým povrchem, které se pohybují ve vodním prostředí, je nahrazení klasických podvodních plavidel bez posádky (UUVs). Oproti nim roboty jako tato sépie nenarušují vodní prostředí svou hlučností, celkovým cizorodým zjevem a také se dokážou efektivněji pohybovat.



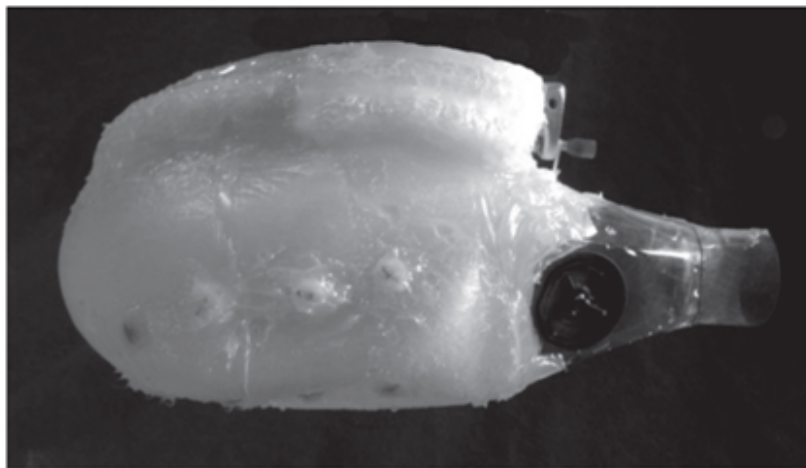
Obrázek 6: Robotická sépie[7]

Tabulka 5: Technické parametry robotické sépie

Hmotnost těla bez vody + hmotnost vody v komoře	728 g + 700 g = 1428 g
Délka	230 mm
Šířka	160 mm
Maximální rychlost pohybu ve vodě	45 mm/s

2.6 Hlavonožec

Stejný princip pohonu má i měkký robot inspirovaný hlavonožci. Komora z elastického materiálu se rozpíná a opět smršťuje a proud vody robota žene vpřed.[8] Trojice vědců z Arabských emirátů, Itálie a Francie prováděla experimenty, aby zjistila, jaká frekvence pulzů pohonu a jaký materiál elastické kapsy je nejvhodnější k efektivnímu rozpohybování robota.



Obrázek 7: Robotický hlavonožec[8]

Tabulka 6: Technické parametry robotického hlavonožce

Hmotnost	333,5 g
Délka	138 mm
Tloušťka obalu	1 mm
Objem vytlačené vody při jednom stažení	140 ml

2.7 Breathing friend

Na webu [DesignMag](#) se o robotu zvaném Breathing friend píše: „*Designérka Kateřina Pražáková vyvinula ve spolupráci s Miroslavem Macíkem z Katedry počítačové grafiky a interakce v Praze na ČVUT novou antistresovou pomůcku Breathing friend. Pomůcku se zkratkou Bf, jejímž cílem je naučit uživatele správně dýchat a lépe čelit stresu, uvidíte na designérské přehlídce Prague Design Week 2015 od 11. do 17. května v Kafkově domě.*“[9]

Tato relaxační pomůcka ve tvaru vejce má jemný srstnatý povrch, který má navozovat při dotyku pocit kontaktu s živým tvorem. Při zaznamenání pohybu začne vnitřní mechanická konstrukce zvětšovat a zmenšovat objem silikonového obalu a vyvolává dojem, že robot dýchá.



Obrázek 8: Breathing friend[9]

2.8 Multigait soft robot

Skupina univerzitních pracovníků z Harvardu a Cambridge sestrojila měkkého robota bez použití tuhých součástí. Podobu přejímá od bezobratlých živočichů jako například od olihní, hvězdic a červů. Technologií litografie byl vyroben pneumaticky poháněný robot schopný složitějších pohybů.[10] Kombinací lezení a vlnění končetin dokáže robot překonat i náročný terén.



Obrázek 9: Multigait soft robot[10]

Tabulka 7: Technické parametry Multigait soft robot

Délka	16 cm
Výška	2-5 cm
Rychlost dopředného pohybu	$92 \pm 4,3$ m/h
Tlak vzduchu v robotu	$<0,7$ atm

2.9 Ant-roach

V nezávislé laboratoři Otherlab v San Franciscu postavili nafukovacího chodícího robota jménem Ant-roach. Lehké tělo z textilu vyniká svým poměrem hmotnosti vůči únosnosti.[11] Aktuátory tohoto robota jsou nafukovací a hýbou jeho šesti nohama a jednou paží.



Obrázek 10: Ant-roach[11]

Tabulka 8: Technické parametry Ant-roach

Hmotnost	70 lbs
Výška	15 ft
Únosnost na hřbetě	<1000 lbs
Tlak vzduchu v robotu	50-60 psi

3 Návrh vnitřní mechanické konstrukce robota s měkkým povrchem

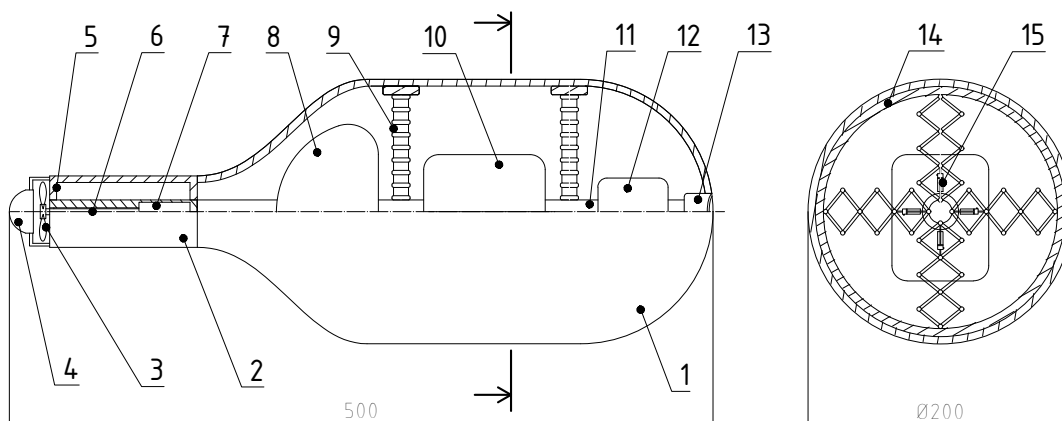
Po seznámení s existujícími roboty s měkkým povrchem přistupujeme k návrhu vlastního robota, který má splňovat dva hlavní požadavky: konstrukci umožňující změnu objemu těla robota a vzájemnou rotaci dvou součástí.

Robot, který dokáže měnit objem, mění závisle na něm i svoji hustotu. Této vlastnosti lze dobře využít ve vodním prostředí. Pokud bude robot mít střední hodnotu hustoty přibližně rovnou hustotě vody, nabízí se stavba robota, který by se volně vznášel pod vodní hladinou a pomocí změny objemu by se dokázal ve vodě pohybovat ve vertikálním směru. Pokud by byl takovýto robot ještě opatřen kamerou, mohl by být využit jako podvodní průzkumník. Mohl by se dostat do úzkých zatopených prostor, kam už potápěči nemohou. Například v zatopených jeskyních by plnil funkci „speleosondy“. V této práci se budeme zabývat návrhem právě takového robota.

3.1 Popis těla robota

Navrhovaný robot nechtě má tvar podobný tělu ryby. Kulová hlava je potažena pružným silikonovým pláštěm a pod ní se nachází nůžkový mechanismus, který mění její objem. Ocas, skrz který vede rotující hřídel s pohonným šroubem, je z tuhého materiálu a je zakončen kormidlem. Vnější tvar má robot rotačně symetrický. Na vrchol hlavy ústí kamera, světlo a snímače tlaku. V ose těla leží rotující hřídel se šroubem a kovová osa, která zajišťuje, aby se robot do sebe nezhroutil v podélném směru. Uvnitř jsou uloženy: speciální tlaková lahev zásobou stlačeného vzduchu k vyrovnávání tlaků a pohonu pneumatických pístů, elektrická baterie k pohonu elektromotoru a řídicího počítače a mechanická konstrukce zajišťující změnu objemu těla robota. Roztažná konstrukce se neopírá přímo do silikonového pláště, ale je uchycena mezi osou a ochranným pružným páskem. V obrázku 11 je uvažováno jako mechanismus, který zajišťuje rozpínání silikonového pláště, osm roztažných ramen. Ramena jsou tvořena čepy, na kterých se otáčí kovové příčky. Robot je řízen přes počítač dálkově, nebo přes kabel.

Rotační součástí robota je hřídel se šroubem, který umožňuje robotu dopředný pohyb, který je korigován kormidlem. Pohyb vertikální se realizuje změnou objemu těla, jež způsobí nerovnováhu síly vztlakové a tíhové.



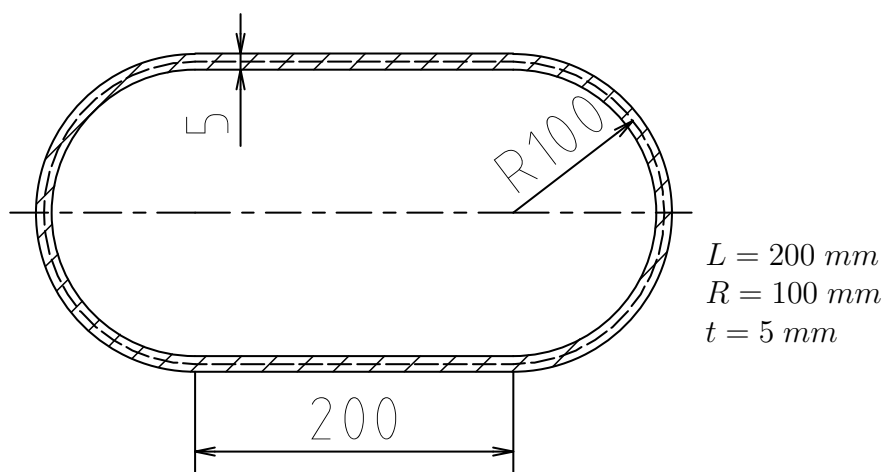
Obrázek 11: První návrh robotu

- | | | |
|---------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 měkká hlava | 6 hřídel | 11 kovová osa |
| 2 tuhý ocas | 7 elektromotor | 12 řídicí počítač |
| 3 pohybový šroub | 8 spec. tlaková lahev | 13 kamera a světlo |
| 4 kormidlo | 9 nůžkový mech. | 14 opěrný pružný pásek |
| 5 vypouštěcí ventil | 10 akumulátor | 15 pneumatické písty |

3.2 Charakteristika robotu, vnějšího prostředí a spotřeba vzduchu

3.2.1 Geometrie robotu

Jako výpočtový model robotu bude použita válcová skořepina s kulovými konci znázorněnou na obrázku 12. Ten je definován poloměrem zaoblení R , délkou rovné části L a tloušťkou stěny t .



Obrázek 12: Výpočtový model robotu

3.2.2 Uvažované materiály, jejich vlastnosti a množství

V modelu se vyskytují tři základní materiály: silikon, ocel a vzduch. Jejich vlastnosti jsou popsány v tabulce 9. Těchto hodnot bude využito ve výpočtech.

Tabulka 9: Fyzikální vlastnosti materiálů

Materiál	vzduch	silikon	ocel
Hustota ρ (kg/m^3)	1,29	2 000	7 850
Modul pružnosti E (kPa)	-	10	270 000
Mez pružnosti v tahu R_e (MPa)	-	5,5	200

3.2.3 Výpočet pevnosti a hloubky ponoru tělesa

Předpokládejme, že tělo robota je bezmomentová skořepina a tvar jejího silikonového pláště se s působením hydrostatického tlaku nemění, protože jej přidržuje mechanismus. Potom podle kotlového vzorce

$$\sigma = \frac{pR}{t}, \quad (1)$$

kde σ je napětí, p vnější tlak, R poloměr válce a t tloušťka stěny, vypočítáme maximální přetlak, který plášť robotu vydrží, než dojde k prvním plastickým deformacím.

$$\Delta p = \frac{t \cdot R_e}{R} = \frac{0,005 \cdot 5,5 \cdot 10^6}{0,2} = 137,5 \text{ kPa}$$

Pokud tento přetlak přepočítáme podle rovnice pro tlak v kapalině vyvolaný tíhovou silou

$$p_h = h\rho g, \quad (2)$$

kde p_h je hydrostatický tlak, h hloubka, ρ hustota kapaliny a g tíhové zrychlení, dojdeme k tomu, že bez vyrovnávání vnitřního tlaku se robot smí potopit pouze do hloubky 14 m.

$$h = \frac{\Delta p}{\rho_w \cdot g} = \frac{137\,500 \text{ Pa}}{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ kgm/s}^2} = 14 \text{ m}$$

Aby se robot mohl potápět do větších hloubek a přitom stále využíval roztažného mechanismu ke změnám vertikální polohy, umístíme do jeho těla ještě speciální tlakovou lahev, která dokáže vnější hydrostatický tlak vyrovnávat. Tuto vyrovnávací lahev lze spatřit na obrázku 11. Abychom vypočítali, jak hluboko se teoreticky těleso může potopit, musíme ještě určit objem robotu a vzduchu v něm.

$$\text{Vnější objem tělesa } V_{ex} = \pi \left(R + \frac{t}{2}\right)^2 + \frac{4}{3}\pi \left(R + \frac{t}{2}\right)^3 = 11,112 \text{ dm}^3$$

$$\text{Objem vzduchu v tlakové lahvi (obal zanedbávám) } V_l = 2 \text{ dm}^3$$

$$\text{Vnitřní objem vzduchu } V_{in} = \pi \left(r - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{4}{3} \pi \left(r - \frac{t}{2} \right)^3 - V_l = 7,855 \text{ dm}^3$$

Řekněme, že počáteční tlak v tlakové lahvi je 200 atmosfér ($p_{l0} = 200p_{atm}$) a jedna atmosféra má velikost $p_{atm} = 101\,325 \text{ Pa}$. Nyní spočteme, v jaké maximální hloubce je tato lahev ještě schopna vyrovnávat tlak okolí. Vyjdeme z rovnice pro izotermický děj (3) a rovnice (2) pro hydrostatický tlak.

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (3)$$

$$p_1 V_1 + p_2 V_2 = p_3 (V_1 + V_2)$$

$$p_3 = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2} = 4,19 \text{ MPa}$$

$$h_{max} = \frac{p_3}{\rho_w \cdot g} = 427 \text{ m}$$

$p_1 = p_{l0} = 200p_{atm}$ - tlak v lahvi

$p_2 = p_{atm}$ - počáteční tlak v těle

p_3 - nejvyšší možný tlak v těle

$V_1 = 2 \text{ dm}^3$ - objem lahve

$V_2 = V_{in}$ - objem vzduchu v těle

Tlaková lahev teoreticky zvládne vyrovnat tlak až v hloubce $h_{max} = 427 \text{ m}$. K tomu bychom ještě mohli přičíst hloubku $h = 14 \text{ m}$, kterou snese těleso v přetlaku, ale z tohoto bodu by potom už nebylo návratu ke hladině. Jako provozní hloubku robotu stanovujeme rozsah 0 až 50 m. Během své plavby bude ještě spotřebovávat vzduch na pohyb ve svislém směru, nejen na vyrovnávání tlaku.

3.2.4 Podmínka plování, určení hmotnosti

Archimédův zákon říká, že velikost vztlakové síly F_{vz} , kterou je těleso v kapalině nadlehčováno, je přímo úměrná hustotě ρ kapaliny a objemu V ponořeného tělesa. K tomu, aby robot plovat (volně se v kapalině vznášel), je nutné dodržet podmínku rovnosti sil

$$F_{vz} = F_g \Leftrightarrow \rho V g = m g, \quad (4)$$

která říká, že vztlaková síla se rovná tíhové. Z této podmínky vyplývá, že hmotnost m_w vody vytlačené se musí rovnat počáteční hmotnosti robotu m_{r0} , který je zcela ponořen do kapaliny. Hmotnosti vody, silikonu a vzduchu se spočítají jako násobek jejich objemu a hustoty. Neznámou zůstává hmotnost oceli m_o (a dalších součástí), kterou určíme právě z uvedené rovnosti hmotností.

$$m_w = m_1$$

$$m_w = m_o + m_s + m_v$$

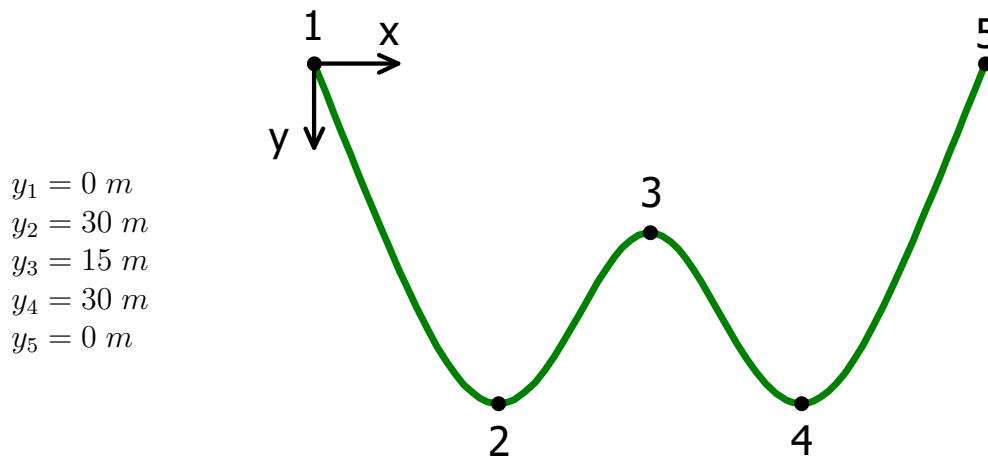
$$m_o = m_w - m_s - m_v$$

$$m_o = V_{ex} \cdot \rho_w - (V_{ex} - V_{in})\rho_s - (V_{in} - V_l)\rho_{atm} = 4,591 \text{ kg}$$

Sečtením jednotlivých hmotností nebo vypočtením hmotnosti vytlačené vody určíme ještě celkovou počáteční hmotnost robotu $m_1 = 11,112 \text{ kg}$.

3.2.5 Trajektorie

Abychom zjistili, jak dlouhý ponor robot zvládne, stanovíme ještě modelovou trajektorií, po které by se teoreticky mohl pohybovat. Výpočtem určíme, kolik spotřebuje vzduchu na ponor a pohyb skrz body 1 až 5. Na této dráze zároveň ověříme, že je výhodnější použít mechanickou změnu objemu než změnu objemu pomocí prostého nafukování a vyfukování těla jako balonu. Počátek souřadnicového systému leží na vodní hladině, robot koná dopředný pohyb po ose x a y je hloubka ponoru.



Obrázek 13: Modelová trajektorie ponoru

3.2.6 Spotřeba vzduchu

Po stanovení podmínek daných vnějším prostředím lze přistoupit k výpočtu spotřeby vzduchu po dráze bodů 1 až 5. Na počátku trajektorie se nachází zcela ponořený robot v bodě 1 (svislý rozměr zanedbáváme), který má hmotnost m_1 , tlak v lahvi p_1 a vnitřní objem V_1 . Klesání do bodu 2 zahájí zvýšením své hustoty. Objem robotu se zmenší buď pneumaticky - vyfouknutím vzduchu z těla ven přes jednocestný ventil, nebo stažením pláště silou vnitřní mechanické konstrukce. Míra zmenšení objemu je taková, aby dosáhl minimálního zrychlení $a_{min} = 0,1 \text{ m/s}^2$. V průběhu klesání robot vyrovnává okolní tlak dopouštěním vzduchu z tlakové lahve a tlaky a objemy se v cíli na okamžik vyrovnají. Pro cestu do bodu 3 musí robot stoupat, musí tedy snížit svoji hustotu. To provede roztažením mechanické konstrukce, nebo přepuštěním stlačeného vzduchu z lahve do těla. V průběhu stoupání musí robot vypouštět vzduch z těla do vody, aby nepraskl. V cílovém bodě 3 se opět vyrovnají tlaky a objem se na chvíli ustálí. Obdobným způsobem docestuje robot až do bodu 5, zpět na hladinu.

Všechny popsání přesuny provází stlačování, rozpínání a míšení plynů o různých tlacích a objemech. Vedle toho se mění tíhová a vztlaková síla. Tyto děje lze popsat rovnicemi 5 až 8 a ty použít na výpočet spotřeby vzduchu. Průběžné hodnoty výpočtu jsou zaznamenány v tabulce 10.

Newtonův druhý zákon

$$F = ma \rightarrow F_g = mg \quad (5)$$

Izotermický děj

$$p_1V_1 = p_2V_2 \quad (6)$$

Obecný děj ideálního plynu

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} \quad (7)$$

Vzorec pro výpočet hustoty

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (8)$$

Tabulka 10: Průběžné hodnoty výpočtu

Veličina \ n	1	2	3	4	5
y_n (m)	0	30	15	30	0
T_n (K)	293,15	277,15	277,15	277,15	293,15
p_n (kPa)	101,3	294,2	147,1	294,2	101,3
m_n (kg)	11,112	11,112	11,097	11,096	11,075
F_n (N)	1,111	1,111	1,110	1,110	-
Δm_{wn} (g)	113	113	113	113	-
$\Delta V_{n(n+1)}$ (dm ³)	0,113	0,113	0,113	0,113	-
V_n (dm ³)	-	2,521	15,937	3,984	24,472
ΔV_n (dm ³)	-	5,334	-8,082	3,871	-16,617
Δm_{tpn} (g)	0,146	-	0,424	-	-
Δm_{tvn} (g)	-	-	15,136	-	19,713
Δm_{lpn} (g)	-	0,424	-	0,424	-
Δm_{lvn} (g)	-	16,789	-	14,499	-
V_{Mn} (dm ³)	-	2,558	15,711	3,928	22,808
ΔV_{Mn} (dm ³)	-	5,298	-7,855	3,928	-14,953
Δm_{Mln} (g)	-	19,842	-	14,711	-
Δm_{Mtn} (g)	-	-	14,711	-	19,289

y_n - hloubka ponoru

T_n - teplota vody

p_n - hydrostatická tlak

m_n - hmotnost robotu

F_n - vztlaková, nebo tíhová síla nutná k udělení minimálního zrychlení

Δm_{wn} - změna hmotnosti vytlačené vody

$\Delta V_{n(n+1)}$ - změna objemu nutná ke zrychlení

V_n - teoretický objem po přesunu

ΔV_n - objem vzduchu k dopuštění/vypuštění pro vyrovnání tlaku

Δm_{tpn} - hmotnost vypuštěného vzduchu z těla pro zahájení klesání
 Δm_{tvn} - hmotnost vypuštěného vzduchu z těla pro vyrovnání tlaku
 Δm_{lpn} - hmotnost vypuštěného vzduchu z lahve pro zahájení stoupání
 Δm_{lvn} - hmotnost vypuštěného vzduchu z lahve pro vyrovnání tlaku
 V_{Mn} - teoretický objem po přesunu pomocí mechanické konstrukce
 ΔV_{Mn} - objem vzduchu nutný na vyrovnání tlaku
 Δm_{Mln} - hmotnost vzduchu vypuštěného z lahve při užití mechanické konstrukce
 Δm_{Mtn} - hmotnost vzduchu vypuštěného z těla při užití mechanické konstrukce

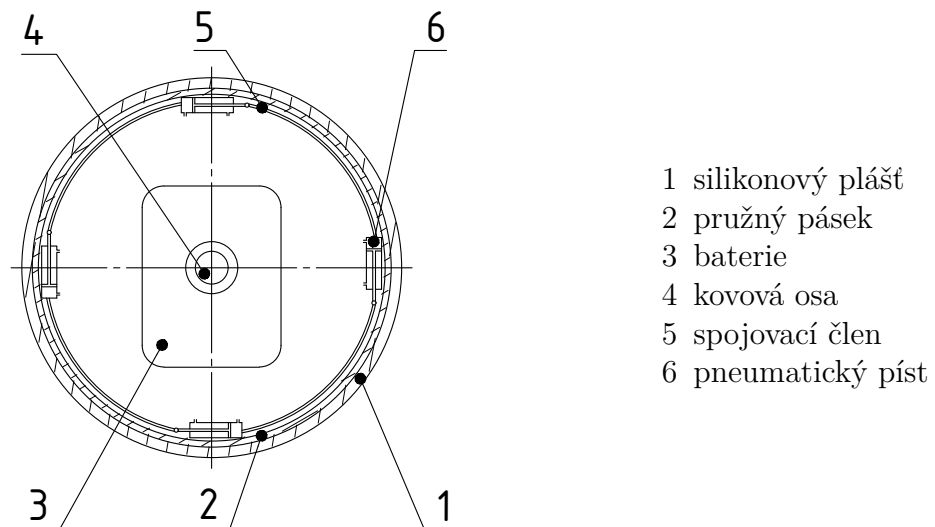
Pro každý přesun mezi body trajektorie byla vypočítána spotřeba vzduchu, který byl využit buď k vyrovnání tlaku, nebo k iniciaci pohybu vzhůru ke hladině. V dolní části tabulky 10 jsou uvedeny hodnoty, které platí při použití mechanické konstrukce k zahájení klesavého (konstrukce se stáhne), nebo stoupavého pohybu (konstrukce se roztáhne). Ať už bude mít mechanická konstrukce jakoukoli podobu, ušetří množství spotřebovaného vzduchu. Výsledky jsou shrnuty výpočtem hmotnosti spotřebovaného vzduchu z lahve pro oba způsoby iniciace vertikálního pohybu v tabulce 11.

Tabulka 11: Číselné zhodnocení spotřeby vzduchu na trajektorii

	Pneumatický princip	Mechanický princip
Spotřebovaný vzduch (g)	37,142	34,001
Procentuální spotřeba	7,20	6,59
Počet vykonatelných cest	14	15
Konečný tlak v lahvi (MPa)	18,806	18,930

3.3 Podoba vnitřní mechanické konstrukce

V obrázku 11 můžeme na pohledu vpravo vidět nůžkový mechanizmus, který rozpíná a smršťuje měkký povrch robotu. Jako lepší a finální variantu vnitřní mechanické konstrukce navrhujeme konstrukci s pneumatickými písty po obvodu znázorněnou na obrázku 14.



Obrázek 14: Finální návrh mechanické konstrukce

Na obrázku 14 můžeme vidět čtyři pneumatické písty, ale pro konstrukci robotu jich lze zvolit i jiný počet. Jsou spojeny spojovacími členy z pružného, ale dostatečně tuhého materiálu, aby nedošlo ke ztrátě vzpěrné stability. Podobají se členům, které má žížala popsaná v článku 2.4. Dvojčinné písty se mohou stahovat i roztahovat a pokud tyto soustavy pístů budou za sebou v těle robota umístěny dvě, nebo tři, tak efektivně poslouží jako rozpínací mechanická konstrukce. Stlačený vzduch je k pístům přiváděn z vyrovnávací tlakové lahve. Dále je na obrázku 14 znázorněn ocelový pružný pásek, o který se písty a spojovací členy opírají a kloužou po něm, aby nedošlo k poškození měkkého obalu zevnitř.

4 Závěr

Byla provedena rešerše existujících konstrukčních řešení robotů s měkkým povrchem. Většina z nich je určena k provozu ve vodním prostředí a inspiruje se podobou tvorů z oceánské říše. K aktuaci roboty používají servomotory nebo různé nekonvenční pohonné prvky jako například elektroaktivní polymery, dráty ze slitiny s tvarovou pamětí, makroporézní gely a další. Některé roboty slouží k zábavním účelům, některé jsou schopny přemísťovat předměty a jinak ovlivňovat své okolí, nebo zůstávají pouze mobilními pozorovateli.

Na základě znalostí existujících robotů byla navržena „speleosonda“. Tento robot má tvar podobný rybě a může se ve vodě pohybovat pomocí dvou druhů aktuátorů. Pohonným šroubem otáčí elektromotor a rozpínání měkké části schránky robota zajišťují pneumatické písty. Tím je splněn požadavek vzájemného pohybu dvou částí robotu a schopnosti měnit objem. Ve vnitřním prostoru robotu je umístěna vyrovnávací tlaková lahev, která dokáže vyrovnávat hydrostatický tlak až do hloubky několika stovek metrů. Ke změně vertikální polohy slouží vnitřní mechanická konstrukce s pneumatickými písty. Změna objemu těla robotu zapříčiní nerovnováhu vztahové a tíhové síly a robot se začne pohybovat. Kdyby bylo k iniciaci vertikálního pohybu užito pouze přímého přifukování do vnitřního prostoru těla, měla by „speleosonda“ větší spotřebu vzduchu než v případě použití mechanické konstrukce.

5 Seznam použitých zdrojů

- [1] TRIMMER, Barry. Soft robots. *Current Biology* [online]. Elsevier, 2013, 23(15), R639-R641 [cit. 2017-12-07]. DOI: 10.1016/j.cub.2013.04.070. ISSN 0960-9822. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0960982213005113>
- [2] Actuator. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Actuator>
- [3] MARCHESE, Andrew D., Cagdas D. ONAL a Daniela RUS. Autonomous Soft Robotic Fish Capable of Escape Maneuvers Using Fluidic Elastomer Actuators. *Soft Robotics* [online]. 2014, 1(1), 75-87 [cit. 2017-27-12]. DOI: 10.1089/soro.2013.0009. ISSN 2169-5172. Dostupné z: <http://online.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/soro.2013.0009>
- [4] CIANCHETTI, M., M., CALISTI, L., MARGHERI, M., KUBA a C., LASCHI. Bioinspired locomotion and grasping in water: the soft eight-arm OCTOPUS robot. *Bioinspiration & Biomimetics* [online]. 2015, 10(3), 035003 [cit. 2017-12-27]. DOI: 10.1088/1748-3190/10/3/035003. ISSN 1748-3182. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/1748-3190/10/3/035003/meta>
- [5] YU, Junzhi, Jundong XIAO, Xiangbin LI a Weibing WANG. Towards a miniature self-propelled jellyfish-like swimming robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems* [online]. SAGE Publications, 6107, 13(5), 1-9 [cit. 2017-12-17]. DOI: 10.1177/17298814166666796. ISSN 1729-8814. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/17298814166666796>
- [6] DALTORIO, Kathryn A, Alexander S BOXERBAUM, Andrew D., HORCHLER, Kendrick M., SHAW, Hillel J., CHIEL a Roger D., QUINN. Efficient worm-like locomotion: slip and control of soft-bodied peristaltic robots. *Bioinspiration & Biomimetics* [online]. 2013, 8(3), 035003 [cit. 2017-12-21]. DOI: 10.1088/1748-3182/8/3/035003. ISSN 1748-3182. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/1748-3182/8/3/035003/meta>
- [7] WANG, Yang Wei, Zhen Long WANG, Jian LI a Fei GAO. Novel Design for a Biomimetic Water-Jetting Propulsion Vehicle Actuated by SMA Wires. *Applied Mechanics and Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2011, 50-51(?), 73-77 [cit. 2017-12-21]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.50-51.73. ISSN 1660-9336. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/AMM.50-51.73>
- [8] RENDA, F., GIORGIO-SERCHI, F., BOYER, F. a CLASCHI, C. Modelling cephalopod-inspired pulsed-jet locomotion for underwater soft robots. *Bioinspiration & biomimetics* [online]. 2015, 10(5), 055005 [cit. 2017-12-27]. DOI: 10.1088/1748-3190/10/5/055005. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/1748-3190/10/5/055005/meta>

- [9] KRYNEK, Ondřej. DesignMag [online]. ČR: DesignMag, 2015 [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <http://www.designmag.cz/produkty/55218-breathing-friend-je-ceska-antistresova-pomucka.html>
- [10] SHEPHERD, R. F., F. ILIEVSKI, W. CHOI, et al. A multi-gait soft robot. Proceedings of the National Academy of Sciences [online]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(51), 20400-20403 [cit. 2017-11-22]. DOI: 10.1073/pnas.1116564108. ISSN 0027-8424. Dostupné z: <https://dash.harvard.edu/handle/1/12967832>
- [11] DEYLE, Travis. Inflatable Robots by Otherlab: A Walking Robot (named Ant-Roach) and a Complete Arm (Plus Hand) [online]. Standfort university: Hizook, robotics news for academics & professionals, 2011 [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <http://www.hizook.com/blog/2011/11/21/inflatable-robots-otherlab-walking-robot-named-ant-roach-and-complete-arm-plus-hand>

6 Seznam použitých zkratek a symbolů

EAPs	elektroaktivní polymery
Li-Po	lithium-polymer
SMA	slitina s tvarovou pamětí (shape memory alloy)
UUVs	podvodní vozidla bez lidské posádky (unmanned underwater vehicles)
ČVUT	České vysoké učení technické
R	zaoblení
L	délka rovné části výpočtového modelu robotu
t	tloušťka stěny
ρ	hustota
E	modul pružnosti
R_e	mez pružnosti v tahu
σ	napětí
p	vnější tlak
Δp	maximální přetlak
p_h	hydrostatický tlak
h	hloubka
g	tíhové zrychlení
ρ_w	hustota vody
V_{ex}	vnější objem tělesa
V_t	objem v tlakové lahvi
V_{in}	vnitřní objem vzduchu
p_{t0}	počáteční tlak v tlakové lahvi
p_{atm}	atmosférický tlak
h_{max}	maximální hloubka ponoru
F_{vz}	vztlková síla
F_g	tíhová síla
V	objem
m	hmotnost
m_w	hmotnost vody
m_{r0}	počáteční hmotnost robotu
m_o	hmotnost oceli
ρ_s	hustota silikonu
ρ_{atm}	hustota vzduchu při atmosférickém tlaku
m_1	celková počáteční hmotnost robotu
x	souřadnice polohy na ose dopředného pohybu
y	souřadnice polohy na ose vertikálního pohybu
p_{l1}	tlak v lahvi v bodě 1
V_1	vnitřní objem robotu v bodě 1
a_{min}	požadované minimální zrychlení
F	síla
a	zrychlení
p	tlak
T	teplota
n	číslo bodu na trajektorii

7 Příloha: Výpočet objemových změn a spotřeby vzduchu

Materiály

Vzduch

Atmosférický tlak

$$p_{\text{atm}} := 101325 \text{ Pa}$$

Hustota při atmosférickém tlaku

$$\rho_{\text{atm}} := 1.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Objem vzduchu v lahvi

$$V_1 := 0.002 \text{ m}^3$$

Tlak v lahvi

$$p_{10} := 200 \cdot p_{\text{atm}} = 20.265 \cdot \text{MPa}$$

Hmotnost vzduchu v lahvi

$$m_{\text{vzl}} := \rho_{\text{atm}} \cdot \frac{p_{10}}{p_{\text{atm}}} \cdot V_1 = 0.516 \text{ kg}$$

Silikon

Hustota

$$\rho_s := 2000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Youngův modul pružnosti

$$E_{\text{sil}} := 40 \text{ kPa}$$

Mez pružnosti

$$Re_s := 5.5 \text{ MPa}$$

Ocel- hustota $\rho_o := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Voda- hustota $\rho_w := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Parametry robota

Tloušťka silikonové stěny $t := 5 \text{ mm}$

Poloměr zaoblení tělesa $R := 100 \text{ mm}$

Délka rovné válcové části $L := 200 \text{ mm}$

Střední objem $V_0 := \pi \cdot R^2 \cdot L + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 = 10.472 \text{ L}$

Celkový objem $V_{\text{ex}} := \pi \cdot \left(R + \frac{t}{2}\right)^2 \cdot L + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(R + \frac{t}{2}\right)^3 = 11.112 \text{ L}$

Vnitřní objem vzduchu $V_{\text{in}} := \pi \cdot \left(R - \frac{t}{2}\right)^2 \cdot L + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(R - \frac{t}{2}\right)^3 - V_1 = 7.855 \text{ L}$

Objem silikonu $V_s := V_{\text{ex}} - V_{\text{in}} = 3.257 \text{ L}$

Hmotnost silikonu $m_s := V_s \cdot \rho_s = 6.514 \text{ kg}$

Vyvážení materiálů - plování

Archimédův zákon

Hmotnost vody vytlačené tělem robotu	$m_w := V_{ex} \cdot \rho_w = 11.112 \text{ kg}$
Vztlaková síla působící na objem robotu	$F_{vz} := m_w \cdot g = 108.973 \text{ N}$
Hmotnost vzduchu v těle	$m_{v0} := \rho_{atm} \cdot (V_{in} - V_1) = 7.553 \times 10^{-3} \text{ kg}$
Hmotnost oceli a dalších součástí	$m_o := m_w - m_s - m_{v0} = 4.591 \text{ kg}$
Celková počáteční hmotnost	$m_1 := m_o + m_s + m_{v0} = 11.112 \text{ kg}$

Spotřeba vzduchu

Bod 1 - hladina

Teplota 1	$T_1 := 293.15 \text{ K} \quad (20^\circ\text{C})$
Tlak	$p_1 := p_{atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$
Hloubka	$h_1 := 0 \text{ m}$
Počáteční objem	$V_1 := V_{in} = 7.855 \text{ L}$

Změny nutné k zahájení klesání o požadovaném zrychlení

Požadované minimální zrychlení	$a_{min} := 0.1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Nutný rozdíl sil k zahájení klesání	$F_1 := m_1 \cdot a_{min} = 1.111 \text{ N}$
Zmenšení hmotnosti vytlačené vody	$\Delta m_{w1} := \frac{F_1}{g} = 0.1133 \text{ kg}$
Zmenšení objemu	$\Delta V_{12} := \frac{\Delta m_{w1}}{\rho_w} = 0.113 \text{ L}$
Hmotnost vzduchu vypuštěného ven	$\Delta m_{tv1} := \rho_{atm} \cdot \Delta V_{12} = 1.462 \times 10^{-4} \text{ kg}$

Bod 2

Vyrovnání se s podmínkami

Teplota vody v hlubině	$T_2 := 277.15 \text{ K}$
Hloubka ponoru 2	$h_2 := 30 \text{ m}$
Tlak v hloubce 2	$p_2 := h_2 \cdot \rho_w \cdot g = 294.2 \cdot \text{kPa}$
Objem po ponoření	$V_2 := (V_1 - \Delta V_{12}) \cdot \frac{T_2 \cdot p_1}{T_1 \cdot p_2} = 2.521 \text{ L}$
Objem vzduchu k dopuštění pro vyrovnání tlaku	$\Delta V_2 := V_{in} - V_2 = 5.334 \text{ L}$

Hmotnost vzduchu spotřebovaného na dopuštění $\Delta m_{1v2} := \rho_{atm} \cdot \frac{p_2}{p_{atm}} \cdot \Delta V_2 = 0.01998 \text{ kg}$

Hmotnost robotu $m_2 := m_1 - \Delta m_{tv1} = 11.112 \text{ kg}$

MECHANIKA $V_{M2} := V_{in} \cdot \frac{T_2 \cdot p_1}{T_1 \cdot p_2} = 2.558 \text{ L}$ $\Delta V_{M2} := V_{in} - V_{M2} = 5.298 \text{ L}$

dopuštěno z lahve $\Delta m_{M2} := \rho_{atm} \cdot \frac{p_2}{p_{atm}} \cdot \Delta V_{M2} = 0.019842 \text{ kg}$

Změna stavu ke stoupání

Síla nutná k zahájení stoupání $F_2 := m_2 \cdot a_{min} = 1.111 \text{ N}$

Zvětšení hmotnosti vytlačené vody $\Delta m_{w2} := \frac{F_2}{g} = 0.113 \text{ kg}$

Zvětšení objemu $\Delta V_{23} := \frac{\Delta m_{w2}}{\rho_w} = 0.113 \text{ L}$

Vzduch k dopuštění $\Delta m_{1p3} := \rho_{atm} \cdot \frac{p_2}{p_{atm}} \cdot \Delta V_{23} = 4.244 \times 10^{-4} \text{ kg}$

Bod 3

Hloubka ponoru $h_3 := 15 \text{ m}$

Tlak v hloubce 3 $p_3 := h_3 \cdot \rho_w \cdot g = 147.1 \text{ kPa}$

Vyrovnání se s podmínkami

Teoretický objem $V_3 := (V_{in} + \Delta V_{23}) \cdot \frac{p_2}{p_3} = 15.937 \text{ L}$

Objemová změna $\Delta V_3 := V_{in} - V_3 = -8.082 \text{ L}$

Hmotnost vypuštěného vzduchu- vyrovnání tlaku $\Delta m_{tv3} := \rho_{atm} \cdot \frac{p_3}{p_{atm}} \cdot \Delta V_3 = -0.015136 \text{ kg}$

Hmotnost robotu $m_3 := m_2 + \Delta m_{tv3} = 11.097 \text{ kg}$

MECHANIKA $V_{M3} := V_{in} \cdot \frac{p_2}{p_3} = 15.711 \text{ L}$ $\Delta V_{M3} := V_{in} - V_{M3} = -7.855 \text{ L}$

vzduch vypuštěný z těla $\Delta m_{Mt3} := \rho_{atm} \cdot \frac{p_3}{p_{atm}} \cdot \Delta V_{M3} = -0.014711 \text{ kg}$

Změna stavu k opětovnému klesání

Síla nutná k zahájení klesání $\Delta F_3 := m_3 \cdot a_{min} = 1.11 \text{ N}$

Zmenšení hmotnosti vody $\Delta m_{w3} := \frac{\Delta F_3}{g} = 0.113 \text{ kg}$

Zmenšení objemu $\Delta V_{34} := \frac{\Delta m_{w3}}{\rho_w} = 0.113 \text{ L}$

Bod 4

Hloubka ponoru $h_4 := 30 \text{ m}$ Teplota $T_4 := T_2 = 277.15 \text{ K}$

Tlak 4 $p_4 := h_4 \cdot \rho_w \cdot g = 2.942 \times 10^5 \text{ Pa}$

Vzduch vypuštěný ven $\Delta m_{tp3} := \rho_{atm} \cdot \frac{p_4}{p_{atm}} \cdot \Delta V_{34} = 4.238 \times 10^{-4} \text{ kg}$

Vyrovnaní se s podmínkami

Teoretický objem $V_4 := (V_{in} + \Delta V_{34}) \cdot \frac{p_3}{p_4} = 3.984 \text{ L}$

Objemová změna $\Delta V_4 := V_{in} - V_4 = 3.871 \text{ L}$

Hmotnostní ztráta- vyrovnaní tlaku $\Delta m_{l4} := \rho_{atm} \cdot \frac{p_4}{p_{atm}} \cdot \Delta V_4 = 0.014499 \text{ kg}$

Hmotnost robotu $m_4 := m_3 - \Delta m_{tp3} = 11.096 \text{ kg}$

MECHANIKA $V_{M4} := V_{in} \cdot \frac{p_3}{p_4} = 3.928 \text{ L}$ $\Delta V_{M4} := V_{in} - V_{M4} = 3.928 \text{ L}$

vypuštěno z lahve $\Delta m_{Ml4} := \rho_{atm} \cdot \frac{p_4}{p_{atm}} \cdot \Delta V_{M4} = 0.014711 \text{ kg}$

Změna stavu ke konečnému stoupání

Síla $\Delta F_4 := m_4 \cdot a_{min} = 1.1096 \text{ N}$

Snížení hmotnosti vytlačené vody $\Delta m_{w4} := \frac{\Delta F_4}{g} = 0.113 \text{ kg}$

Zvětšení objemu $\Delta V_{45} := \frac{\Delta m_{w4}}{\rho_w} = 0.113 \text{ L}$

Dopuštění vzduchu $\Delta m_{lp4} := \rho_{atm} \cdot \frac{p_4}{p_{atm}} \cdot \Delta V_{45} = 4.238 \times 10^{-4} \text{ kg}$

Bod 5

Hloubka ponoru $h_5 := 0$ $T_5 := T_1 = 293.15 \text{ K}$

Tlak 5 $p_5 := p_{atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

MECHANIKA $V_{M5} := V_{in} \cdot \frac{p_4}{p_5} = 22.808 \text{ L}$ $\Delta V_{M5} := V_{in} - V_{M5} = -14.953 \text{ L}$

$\Delta m_{Mt5} := \rho_{atm} \cdot \frac{p_5}{p_{atm}} \cdot \Delta V_{M5} = -0.019289 \text{ kg}$

Vyrovnání se s podmínkami

Teoretický objem $V_5 := (V_{in} + \Delta V_{45}) \cdot \frac{p_4 \cdot T_5}{p_5 \cdot T_4} = 24.472 \text{ L}$

Objemová změna $\Delta V_5 := V_{in} - V_5 = -16.617 \text{ L}$

Hmotnost vypuštěného vzduchu $\Delta m_{tv5} := \rho_{atm} \cdot \frac{p_5}{p_{atm}} \cdot \Delta V_5 = -0.021436 \text{ kg}$

Hmotnost robotu $m_5 := m_4 + \Delta m_{tv5} = 11.075 \text{ kg}$

Celková ztráta vzduchu
- pneumatická změna $m_{zsum} := |\Delta m_{tv1}| + |\Delta m_{tv3}| + |\Delta m_{tp3}| + |\Delta m_{tv5}| = 0.037142 \text{ kg}$

Procentuální úbytek vzduchu z lahve $U_p := \frac{m_{zsum}}{m_{vzl}} = 7.198\%$

Počet vykonatelných cest 1-5
(přibližně) $n_p := \frac{m_{vzl}}{m_{zsum}} = 13.893$

Konečný tlak v lahvi $p_{p1f} := p_{10} \cdot (1 - U_p) = 18.806 \cdot \text{MPa}$

Celková spotřeba vzduchu
- mechanická změna $m_{Msum} := |\Delta m_{Mt3}| + |\Delta m_{Mt5}| = 0.034001 \text{ kg}$

Procentuální úbytek vzduchu z lahve $ub := \frac{m_{Msum}}{m_{vzl}} = 6.589\%$

Počet vykonatelných cest 1-5
(přibližně) $n := \frac{m_{vzl}}{m_{Msum}} = 15.176$

Konečný tlak v lahvi $p_{M1f} := p_{10} \cdot (1 - ub) = 18.93 \cdot \text{MPa}$