

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

ROBOTICKÝ HAD:
KONSTRUKCE MOBILNÍ ROBOTICKÉ PLATFORMY
SNAKE ROBOT DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ŠIMON HUBATKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. RADOMIL MATOUŠEK, PH.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Šimon Hubatka

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

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:

Robotický had: konstrukce mobilní robotické platformy

v anglickém jazyce:

Snake Robot Design

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je stručná rešerše robotických platforem ozn. jako snake-like robots, a dále celkový návrh a realizace mobilní robotické platformy hada (jako planární mechanismus). Požadován je 3D návrh realizovaný např. v aplikaci Autodesk Inventor a vlastní fyzická realizace hada s využitím aditivních technologií.

Cíle bakalářské práce:

1. Stručná rešerše problematiky konstrukce robotických hadů, vč. návaznosti k modelům pohybu biologických vzorů.
2. Vlastní návrh robotického hada pro planární platformu pohybu (realizace ve zvoleném 3D modelovacím programu, tvorba základní dokumentace, rendrovaný model hada, rozpis a zdůvodnění navržené elektroniky).
3. Fyzická realizace navrženého robotického hada (s využitím aditivních technologií).

Seznam odborné literatury:

M. Saito, M. Fukaya, T. Iwasaki: Modeling, analysis, and synthesis of serpentine locomotion with a multilink robotic snake, IEEE Control Systems Magazine, 2002

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 25.1.2015

L.S.

Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem robotického hada pro planární platformu pohybu. Práce je fakticky rozdělena do dvou částí. V první recenzní části je stručně pojednáno o základních pohybech biologických hadů. Dále je ukázáno základní rozdělení robotických hadů podle typu konstrukce, včetně příkladů a jsou uvedeny realizační týmy. Ve druhé části práce je popsán vlastní návrh robotického hada.

ABSTRACT

Bachelor's thesis deals with design of snake-like robot for planar motion platform. Thesis is divided into two sections. The first part briefly presents basic movements of biological snake, which is followed by a chapter with snake-like robots divided into categories according to the type of their design including characteristics of examples. Design of the robotic snake is described in the second part.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robotický had, planární mechanismus, laterální undulace, 3D tisk.

KEYWORDS

Snake-like robot, planar mechanism, lateral undulation, 3D printing.

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně dle pokynů vedoucího a s použitím uvedené odborné literatury.

V Brně, dne 5. 12. 2015

.....
Šimon Hubatka

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HUBATKA, Š. *Robotický had: konstrukce mobilní robotické platformy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 39 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu doc. Ing. Radomilu Matouškovi, Ph.D. za věnovaný čas a trpělivost při zpracování této bakalářské práce.

Obsah:

1	Úvod	13
2	Pohyby biologických hadů	15
2.1	Základní pohyby hadů	15
2.1.1	Pohyb vlněním do stran - <i>lateral undulation</i>	15
2.1.2	Přímočarý pohyb - <i>rectilinear locomotion</i>	15
2.1.3	Harmonikový pohyb - <i>concertina motion</i>	16
2.1.4	Boční ohýbání - <i>sidewinding</i>	16
3	Robotičtí hadi	17
3.1	Roboti s pasivními koly	17
3.1.1	Active Cord Mechanism - R3 (ACM-R3)	17
3.1.2	ACM-R5	18
3.2	Roboti s aktivními koly	19
3.2.1	ACM-R4	19
3.3	Roboti s aktivními pásy	20
3.3.1	OmniTread OT-4	20
3.3.2	JL-I	20
3.4	Roboti pohybující se pomocí vertikálního vlnění	21
3.4.1	Inchworm	21
3.5	Roboti pohybující se pomocí lineární expanze	21
3.5.1	Slim Slime Robot	22
3.6	Zvláštní kategorie - Trident snake robot	22
4	Návrh konstrukce robotického hada	23
4.1	Hlava hada	24
4.1.1	Arduino Uno	24
4.1.2	I/O Shield s komunikačním modulem	26
4.1.3	Alternativní řídicí jednotka hada	27
4.2	Ocas hada	27
4.3	Články hada	28
4.3.1	Akumulátor	28
4.3.2	Servomotor GO-17MG	30
4.3.3	UBEC	31
4.3.4	Pololu Wheel	31
4.4	Zapojení navržených elektronických komponentů	32
5	Realizace robotického hada	33
6	Závěr	35
7	Seznam použité literatury	37
8	Seznam obrázků	39

1 ÚVOD

Plazi se na této planetě vyskytovali už před více než 300 miliony lety a i přes několik událostí ohrožujících živočišné formy jsou zde i dnes. Díky evoluci se z nich stala za tu dobu stvoření, žijící v těch nejrůznějších podmínkách po celé Zemi mimo Antarktidu. Zajímavým podřádem plazů jsou hadi, vyznačující se svou jedinečnou stavbou těla. Hadi se dokázali adaptovat pro pohyb v různorodých podmínkách jak na souši, tak ve vodě a dokonce i ve vzduchu. Povrch jejich těla a aerodynamický tvar jim umožňuje se proplétat nepropustným terénem či hustou vegetací, klouzat se po hladkém povrchu nebo písku, plavat ve vodě či plachtit vzduchem ze stromu na strom.

Člověk pro snadnější přemísťování svých mechanismů stvořil kolo, jedinečnou věc, která nemá v živočišné říši obdoby. Je tedy přirozené, že k efektivnímu pohybu je potřeba nepřirozený povrch a tak vytvořil i zpevněné cesty a silnice. Bohužel tam, kde není možnost upravit terén, jsou kola méně vhodná, nevhodná, či nepoužitelná. Proto se lidé snaží najít jiná řešení a hledají inspiraci právě v přírodě, mimo jiné i u hadů. Ti jsou ve své podstatě pohybově hyper-redundantní. Robotičtí hadi jsou vyvíjeni pro záchranné práce například v oblastech zasažených ničivým zemětřesením či pro průzkum a sledování.

Mezi současné zajímavé projekty týkající se robotických hadů patří například SERPEX (Serpentine robots for planetary exploration) podporovaný Evropskou kosmickou agenturou, který je zaměřen na zkoumání využitelnosti robotických hadů pro planetární průzkum Marsu.

V rešeršní části práce jsou stručně popsány základní pohyby biologických hadů a v následující kapitole jsou uvedeny příklady robotických hadů rozříděné do podkapitol podle metody pohybu. Druhá část práce se zabývá návrhem robotického hada s pasivními koly.

2 POHYBY BIOLOGICKÝCH HADŮ

Hadi se dokáží snadno a elegantně pohybovat v různých prostředích. Jejich schopnosti pohybu inspirovaly mnohé vědce k bližšímu zkoumání pohybů hadů. Jako jedna z nejvýznamnějších osob v tomto oboru a v podstatě průkopníkem "robotických hadů" je Japonec *Shigeo Hirose*. Jako mladý inženýr na Tokyo Institute of Technology se zastavil v jedné tokijské restauraci, kde servírovali mimo jiné i hady. Namísto oběda si ale odnesl do své laboratoře krabičku plnou krouticích se hadů, kde se za použití kamer a senzorů snažil jejich pohyby analyzovat. Zde zjistil, že se pohybují ve variaci sinusoidy, kterou pojmenoval *serpenoid* (odvozeno od slova serpent - had). Po třech měsících postavil prvního robotického hada, který se dokázal uvést do pohybu pouze změnou úhlu mezi články. [1]

Obratnost biologických hadů spočívá ve stovkách obratlů a žeber a úzce souvisí s hadí kůží, resp. s pohybem hada po břišních šupinách (Obr. 1). Šupiny se mohou lišit tvarem i velikostí v závislosti na druhu hada. Pro robotické aplikace hadů se vlastnosti šupin modelují převážně pomocí kol. Ty mají ve směru pohybu minimální odpor, zatímco odpor v normálovém směru pohybu zabraňuje.



Obr. 1 Břišní šupiny hada [2]

2.1 Základní pohyby hadů

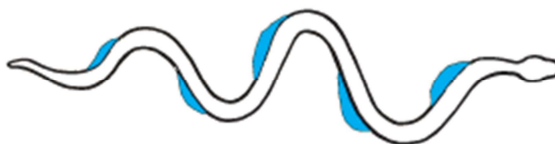
Hadi realizují mnoho druhů pohybů uzpůsobených k podmínkám okolí. Složitější pohyby se skládají z různých kombinací čtyř základních režimů:

2.1.1 Pohyb vlněním do stran - *lateral undulation*

Pohyb vlněním do stran (Obr. 2) je nejběžnější metoda pohybu hadů. Jak název napovídá, je to kombinace pohybu do stran s vlněním těla. Had se nejdříve pohne do strany vůči různým objektům, jako kameny či rostliny, o které se zapře, tím dále získá přilnavost k povrchu v bodech podél jeho těla. Poté se odráží pomocí svalů od kontaktních bodů. Jedná se o nejefektivnější pohyb, protože k pohybu kupředu využívá normálovou sílu, na rozdíl od ostatních třech metod, které využívají třecí sílu.

Na pevnině někteří hadi dokáží tímto způsobem vyvinout rychlost rovné dvojnásobku své délky za sekundu. Rychlost vlnění je navíc stejná jako rychlost hada, každý bod na těle hada tedy leží na jedné trajektorii a had je schopen se proplazit hustou vegetací nebo malými otvory. Při pohybu ve vodě se amplituda vlnění, jak postupuje tělem hada směrem od hlavy, zvětšuje a rychlost vlnění je vyšší než rychlost pohybu hada. [3]

Modré plochy v následujících čtyřech obrázcích značí místo zapření hada o povrch.



Obr. 2 Pohyb vlněním [4]

2.1.2 Přímočarý pohyb - *rectilinear locomotion*

Přímočarý pohyb (Obr. 3) je další ze základních metod pohybu hadů. Od pohybu vlněním do stran se liší tím, že je zde potřeba aplikovat sílu na spodní části těla, místo na boku, a pak pro efektivní

pohyb je zajistit tření mezi kůží hada a povrchem. Tento pohyb umožňuje hadovi postupovat v přímce. K tomu aby se had dostal do pohybu, přitlačí se několika body k povrchu a přesune části těla mezi těmito body těsně nad ním. Hnací síla k uvedení do pohybu je hlavně třecí síla mezi hadem a podložkou.

Jedná se o nejpomalejší metodu a také jedinou, kde se had neohýbá do stran. Většinou ji využívají převážně velké druhy krait, hroznýšů nebo zmijí při plížení za kořistí, neboť je tento pohyb nejméně nápadný. [3]

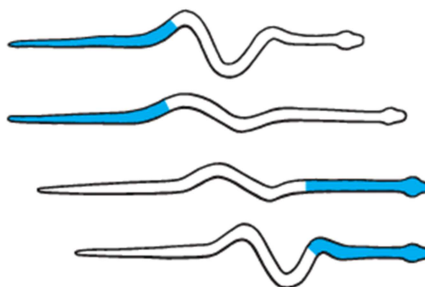


Obr. 3 Přímocháry pohyb [4]

2.1.3 Harmonikový pohyb - *concertina motion*

Harmonikový pohyb (Obr. 4) je metoda pohybu používaná hady v úzkých prostorách. Had se stlačí do „S“ křivky. Poté se zapře částí těla o podložku. Pohyb je vykonán, když had vymrští přední část těla vpřed. Přední část hada se přemístí na novou pozici, kde se zase zapře a přitáhne zbytek svého těla. Volně řečeno, had využívá třecí sílu k tomu, aby se částí těla odrazil a poté zase zpět přitáhl k sobě.

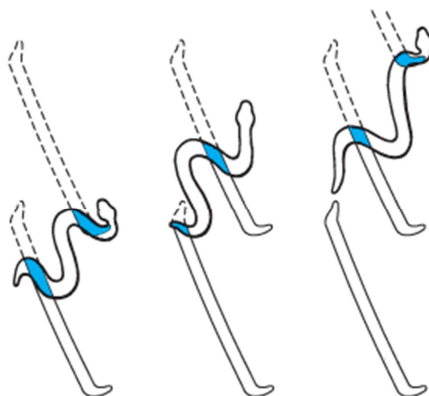
Tato metoda je pomalá a vyžaduje vynaložení až 7krát více energie pro uražení stejné vzdálenosti, než k tomu had potřebuje při vlnění do stran. [3]



Obr. 4 Harmonikový pohyb [4]

2.1.4 Boční ohýbání - *sidewinding*

Boční ohýbání (Obr. 5) umožňuje hadům využívat třecí sílu, aniž by ztratili rychlost. Tento pohyb kombinuje vlnění do stran s přenášením sil jako u harmonikového pohybu. Tato metoda je efektivně využívána v písčném nebo kluzkém prostředí hady čeledi korálovcovití, užovkovití a zmijovití. [3]



Obr. 5 Boční ohýbání [4]

3 ROBOTIČTÍ HADI

Způsob pohybu pomocí vlnění těla požívané hady a jejich fyzická architektura mohou nabídnout různé výhody v určitých podmínkách oproti klasickému způsobu pohybu pomocí noh nebo kol. Různé výzkumné skupiny se zabývají vývojem robotických hadů za účelem využití těchto výhod.

V této kapitole jsou rozřazeny různé typy robotů do kategorií podle typu jejich konstrukce a ke každé z nich jsou uvedené příklady s jejich vlastnostmi.

Tabulka 1 Přehled robotických hadů

Název	Developer	Původ	Rok	mp ¹	Zajímavosti
ACM-III	Tokyo Institute of Technology	Japonsko	1972	2D	1. pohyb vlněním
ACM-R3			2001	3D	
HELIX			2001	3D	obojživelný
ACM-R5			2001	3D	obojživelný
Slim Slime robot			1999	3D	pneumatický
ACM-R4			2011	3D	
Genbu			2002	3D	
Souryu			2006	3D	
Anna Konda			Norwegian University of Science and Technology	Norsko	2011
Wheeko	2D				
Aiko	2014	3D			
Kulko		2D			
AmphiBot I	Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne	Švýcarsko	2004	2D	obojživelný, CPG ²
AmphiBot II			2006	2D	obojživelný, CPG
AmphiBot III			2011	2D	obojživelný, CPG
S5	Dr. Gavin Miller	Velká Británie	1999	2D	
S6			2001	2D	jednomotorový
S7			2005	2D	břišní šupiny
OmniTread OT-8	The University of Michigan	USA	2005	3D	pásy
OmniTread OT-4			2006	3D	pásy
Uncle Sam	Carnegie Mellon University	USA	2010	3D	
Frostbite			2013	3D	
Inchworm	Dartmouth Robot. Lab.		1996	3D	magnetický
JL-I	Beihang University	Čína	2006	3D	rekonfigurovatelný, pásy
Perambulator-I	CAS		2005	2D	hudební teorie k řízení

¹ Možnosti pohybu

² Central pattern generator

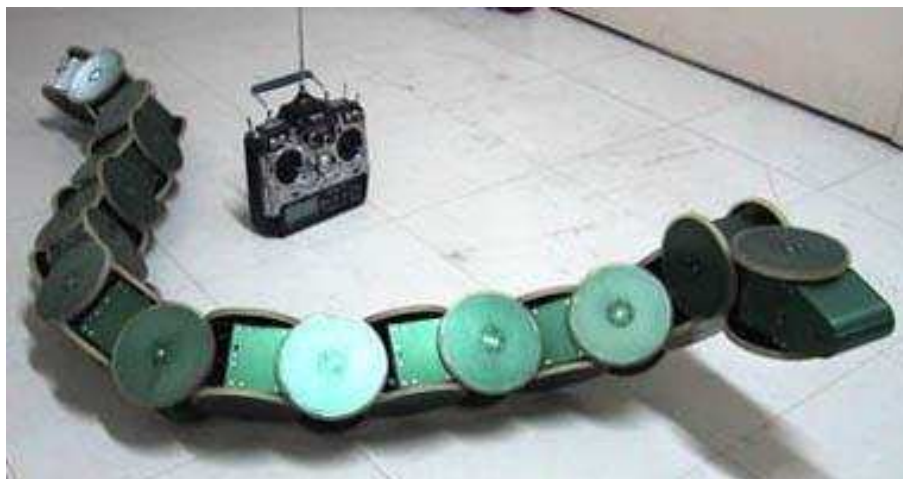
3.1 Roboti s pasivními koly

První a pravděpodobně i nejznámější kategorií robotů inspirovaných hady jsou roboti s pasivními koly. Tento typ využívá vlnění do stran, kdy je robot v pohybu zkroucen do „S“ křivky podobné sinusoidě. Ve většině případů je k dosažení tohoto pohybu využita křivka zvaná serpenoid s použitím pasivních kol k odporu proti pohybu článku do boku. [5]

3.1.1 Active Cord Mechanism - R3 (ACM-R3)

ACM-R3 (Obr. 6) byl představen profesorem Shigeo Hirose z Tokyo Institute of Technology v roce 2002. Robot byl schopen pohybu v trojrozměrném prostoru a měl velká kola na všech stranách svého těla. Kola o průměru 110 mm přesahovala konstrukci těla hada, čímž mu přidala schopnost přejíždět přes různé překážky. K překročení větších překážek dokázal robot zvednout část svého těla.

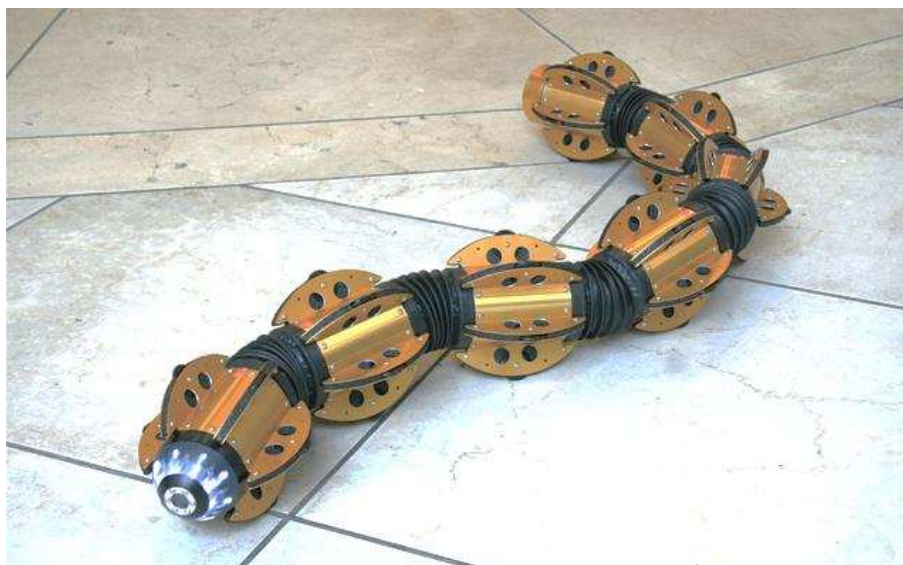
ACM-R3 měl výšku a šířku 110 mm kvůli jeho velkým pasivním kolům a délku 1755 mm. Celková hmotnost byla 12,1 kg. Maximální úhel natočení kloubů v obou směrech bylo $62,5^\circ$ s koly a 91° bez pasivních kol. Klíčovým prvkem ve vývoji tohoto robota bylo, aby byl schopen zdvihnout sám sebe. Toto bylo docíleno použitím servomechanismů, jejichž maximální krouticí moment dosahoval 19,1 Nm s rychlostí 36° za sekundu. Pomocí těchto servomotorů mohl robot zdvihnout až 8 článků. Na rozdíl od předchozích verzí robotů řady ACM, kteří byli připojeni ke zdroji kabelem, ACM-R3 měl svůj vlastní zdroj v podobě akumulátorů. Každý článek obsahoval vlastní baterii a řídicí jednotku, aby byl robot zcela modulární. Ačkoliv tento návrh poskytoval navíc stupeň volnosti směrem vzhůru, potřeboval ke svému pohybu rovný povrch, který by umožnil otáčení jeho pasivních kol k dosažení pohybu.[6]



Obr. 6 ACM-R3 [7]

3.1.2 ACM-R5

ACM-R5 (Obr. 7) byl další z robotů řady ACM od S. Hirose a jeho týmu. Jednalo se o obojživelného robota, který se skládal z devíti článků. Ty byly spojeny univerzálním kloubem se dvěma stupni volnosti. K vytvoření hnací síly potřebné k pohybu hada na pevném povrchu i pod hladinou, bylo zapotřebí docílit toho, aby se mohl volně klouzat v tečném směru a zároveň měl dostatečný odpor v normálovém směru. Toto bylo umožněno pomocí lopatek s pasivními koly rozmístěnými po obvodu článku.



Obr. 7 ACM-R5 [8]

ACM-R5 měřil 1750 mm v délce a měl 80 mm v průměru. Celková hmotnost robota byla 7,5 kg. Do pohybu byl uváděn pomocí dvou servomotorů v každém kloubu. Jednotlivé motory dosahovaly krouticího momentu 9 Nm. Maximální rychlost kloubu byla 70° za sekundu. Rychlost na pevném povrchu i ve vodě dosahovala 0,4 m/s. Měrná tíha hada byla přibližně stejná, jako má voda, takže mohl potápět pod hladinu. Robot se skládal z modulů (článek a kloub), které měly svoji vlastní výpočetní jednotku, baterii a motory tak, že mohly fungovat nezávisle na sobě. Každý tento modul dokázal automaticky rozpoznat, kolikátý byl v řadě od hlavy zapojen a z kolika dílů se had celkem skládal. Díky tomuto systému bylo možné jednoduše přidat, vyměnit nebo odebrat kterýkoliv modul, aniž by bylo třeba zasahovat do nastavení nebo ovládání robota. [6]

3.2 Roboti s aktivními koly

Ve druhé skupině robotů inspirovaných hady budou představeny typy, které pro uvedení do pohybu používají poháněná kola. Jelikož se skládají z více segmentů, tak stále konstrukčně i pohybově připomínají hady. Jednou z nejvýznamnějších výhod použití poháněných kol je schopnost simulovat hadovitý pohyb za použití méně článků a také jsou schopni se pohybovat po méně hladkém povrchu, než to bylo možné u robotů s pasivními koly. [5]

3.2.1 ACM-R4

Na základě úspěchu ACM-R3, byla vyvinuta další verze této řady. Pro ACM-R4 (Obr. 8) byla použita obdobná konstrukce jako v případě jeho předchůdce. Robot se skládal z 9 článků. Každý článek byl složen ze dvou jednotek, kde každá obsahovala jeden kloub s jedním stupněm volnosti a motorem poháněné kolo.

Tento robot byl navržen za účelem praktického použití v úzkém prostředí, jako je například potrubí. ACM-R4 byl 1100 mm dlouhý, 135 mm vysoký a 135 mm široký. Celková hmotnost robota byla 9,5 kg. Klouby byly poháněné elektrickými motory s maximálním krouticím momentem 20 Nm a maximální rychlostí 30° za sekundu. Konstrukce byla odolná vůči vodě a prachu. Robot byl také schopen projít pravoúhlým průchodem širokým pouze 240 mm a vylézt schod vysoký 400 mm. [6]



Obr. 8 ACM-R4 [6]

3.3 Roboti s aktivními pásy

Pro velmi složitý a nebezpečný terén, který může vzniknout při silném zemětřesení, bylo potřeba navrhnout roboty, schopné se pochybovat v takovém prostředí, pro pomoc při průzkumných a záchranných pracích. Výsledkem se stali roboti, kombinující vlastnosti pásů a výhody robotických hadů, jenž se dokáží pohybovat v úzkých prostorách mezi sutinami či troskami a pomocí kamer a mikrofonů vyhledávat možné přeživší. [5]

3.3.1 OmniTread OT-4

OmniTread byla řada robotů, která ke svému přesunu používala pásy podobné, jako se využívá u vojenských vozidel. Každý článek byl osazen na čtyřech stranách pásy, které pokrývaly co největší plochu, aby se maximalizoval jejich záběr. Další odlišností této řady od předešlých robotických hadů byly pneumatické měchy, které byly použity jako aktuátory. Mezi dvěma články se nacházely 4 aktuátory. Každý z nich byl řízen dvěma ventily.

OT-4 (Obr. 9) byla vylepšená verze OT-8 a byl označen číslovkou čtyři, kvůli jeho schopnosti projít otvorem o průměru 4 palců (101,6 mm), na rozdíl od jeho předchůdce, který prošel pouze otvorem větším než 8 palců (203,2 mm). Kromě toho, že byl menší, byl navíc oprostěn od kabelů. OT-8 potřeboval kabel pro přísun stlačeného vzduchu a elektrického proudu. OT-4 byl vybaven nádobami se stlačeným vzduchem a vlastními bateriemi. Robot také automaticky odpojoval individuální pásy od hřídele pomocí elektricky poháněné mikro-spojky pro snížení spotřeby, když pás nebylo potřeba. Ve výbavě také nechyběla sensorika uložená v prvním a posledním článku. Celková délka OT-4 dosahovala 940 mm, šířka a výška byla 82 mm. Hmotnost robota byla 3,6 kg. [9]

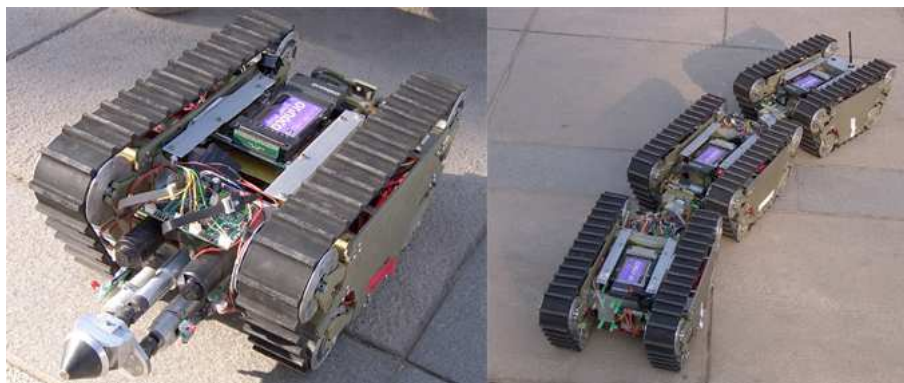


Obr. 9 OT-4 [10]

3.3.2 JL-I

JL-I (Obr. 10) byl robotický systém skládající se ze tří identických modulů. Každý modul byl schopný samostatného pohybu díky dvěma paralelním pásům. Ty mohly být spojeny unikátními kulovými klouby se třemi stupni volnosti pro překonávání složitého terénu nebo se mohly rozdělit a vykonávat různé úkoly nezávisle na sobě.

Modul měl délku 350 mm, šířku 250 mm a výšku 150 mm. Konstrukce byla převážně z hliníku a včetně baterií byla jeho hmotnost 7 kg. Robot využíval dva typy externích senzorů a to CCD (charge-coupled device) kameru a snímače dotyku. Dále byl ještě vybaven GPS, digitálním kompasem, gyroskopem a koncovými snímači pro zjištění polohy kloubů. Robot dokázal vyšplhat 280 mm vysoký schod, přemostit 500 mm široký příkop a vyvinout maximální rychlost 180 mm/s. [11]

Obr. 10 *JL-1* [12]

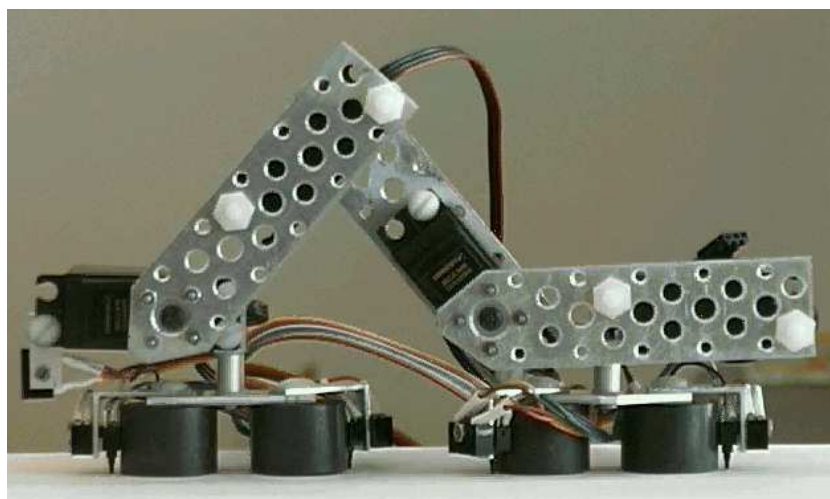
3.4 Roboti pohybující se pomocí vertikálního vlnění

Pohyb pomocí vertikálního vlnění může být popsán jako plazení, kde se první článek nadzvedne a posune, zatímco následující je ukotven k podložce. V dalším kroku je ukotven posunutý článek, který k sobě přitáhne článek za sebou. Tento proces se opakuje, dokud není celý robot posunutý o délku rovnou posunutí prvního článku. [5]

3.4.1 Inchworm

Inchworm (Obr. 11) byl inspirován pohybem housenky. Robot měl čtyři části. První a poslední částí byla „chodidla“ robota, která se skládala z elektromagnetů. Ty byly spojené pomocí tří kloubů, které zaručovaly tři stupně volnosti. Tyto klouby umožňovaly robotovi se natáhnout a pokrčit. Inchworm byl navržen za účelem prozkoumat možnosti robotů pro inspekce ocelových konstrukcí.

Stažený robot měl délku 180 mm a výšku 120 mm, zatímco plně roztažený byl 252 mm dlouhý a 52 mm vysoký. Jeho hmotnost byla 0,455 kg. Pohon kloubů byl docílen servomotory s maximálním krouticím momentem 0,52 Nm s rychlostí 140 stupňů za sekundu. Na každém chodidle byly umístěny dva 12voltové elektromagnety. Inchworm byl vybaven čtyřmi dotykovými a pěti infračervenými senzory. Rychlost robota dosahovala 4,2 mm za sekundu. Zdroj energie a signál pro ovládání byl přiveden kabelem. [13]

Obr. 11 *Inchworm* [14]

3.5 Roboti pohybující se pomocí lineární expanze

Přímočarý pohyb může být dosažen také pomocí lineárních expanzí a kontrakcí. Na rozdíl od ostatních způsobů pohybu nemá postranní vlnění a jeho odpor žádný význam vzhledem k pohybu hada. Ten je

umožněn pomocí svalových kontrakcí, které působí ve vlnách ve směru pohybu hada. Tyto kontrakce produkují napětí mezi páteří a břišní kůží. Povrch kůže poté působí proti odporu tření. [5]

3.5.1 Slim Slime Robot

Slim Slime robot (Obr. 12) byl ACM skládající se ze sériově spojených modulů, které byly poháněny pomocí pneumatických aktuátorů. Skládaly se ze třech měchů a hlavní trubice, kterou byl rozváděn stlačený vzduch. Každý měch měl vstupní a výstupní ventil. Mohl se tedy natahovat, stlačovat nebo udržovat stálou délku nezávisle na ostatních, takže se každý mohl aktivně natahovat a ohýbat ve všech směrech. Robot byl navržen pro inspekce potrubí v chemických či jaderných elektrárnách.

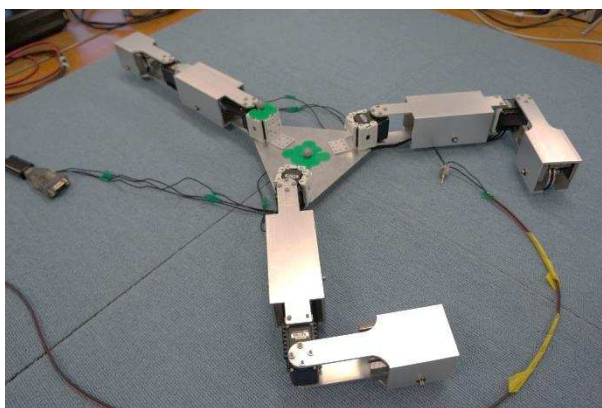
Jednotlivé moduly se mohly stlačit na délku 114 mm a roztáhnout do 177,6 mm. Celková délka robota byla 730 mm ve stlačeném stavu, respektive 1120 mm v plně roztaženém. Robot měl příčný průměr 128 mm a hmotnost 12 kg. Maximální rychlost dosahovala 60 mm/s. [6]



Obr. 12 Slim Slime robot [6]

3.6 Zvláštní kategorie - Trident snake robot

Trident snake (Obr. 13) je robotická platforma, sestavená z centrálního třícípého bloku, ke kterému jsou připojeny tři větve sériově spojených článků. Větve mají stejné mechanické vlastnosti jako robotičtí hadi s pasivními koly.



Obr. 13 Trident snake robot [15]

4 NÁVRH KONSTRUKCE ROBOTICKÉHO HADA

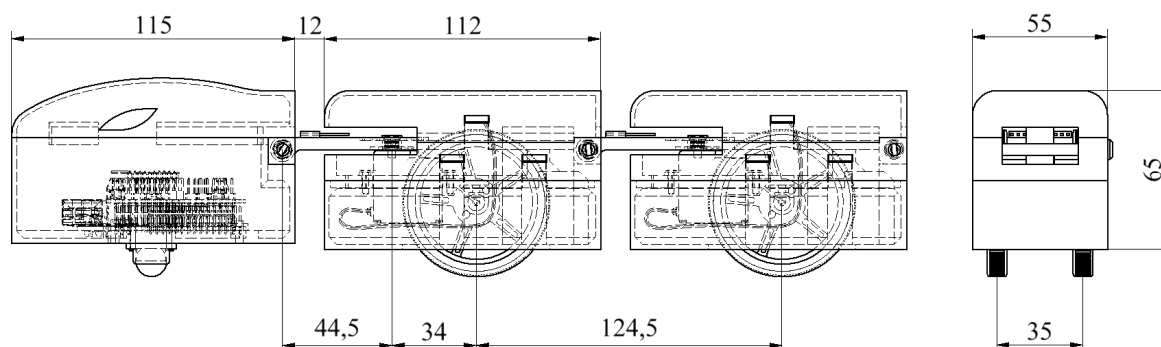
Cílem byl návrh 4-6 článkového planárního mechanismu schopného imitovat pohyb biologického hada, konkrétně metodu pohybu vlněním do stran. Pro tento pohyb je neefektivnější konstrukce s pasivními koly. Jednotlivé články tedy mají dvojici pasivních kol a jsou spojeny kloubem se dvěma stupni volnosti. Jeden stupeň aktivní, řízený servomotorem, a druhý pasivní. Pro hlavu byly použity všesměrové kuličky, aby byla schopna se natáčet do stran s minimálním dopadem na kinematiku pohybu celku. Pro detekci kolizí se uvažuje použití ultrazvukového senzoru v přední části hlavy a dvou infračervených snímačů vzdálenosti umístěných do boku hlavy.

Návrh robota (Obr. 14) byl vytvořen v 3D CAD aplikaci Autodesk Inventor Professional 2015.



Obr. 14 Navržený robot

Na (Obr. 15) jsou znázorněny základní rozměry robotického hada. Ten v případě 4 aktivních článku, tj. hlava, 4 články a ocas, měří skoro 750 mm s hmotností 907 g. Za použití 6 aktivních článku to je 975 mm o váze přibližně 1260 g.



Obr. 15 Základní rozměry

4.1 Hlava hada

Hlava robota (Obr. 17) se skládá z vrchního (1) a spodního (3) dílu, ve kterém je uložen čep (2) pro napojení navazujícího článku. Zespod jsou umístěny dvě všesměrové kuličky (4) značky Pololu o průměru ½ palce (12,7 mm). Uvnitř se skrývá vývojová deska Arduino Uno (7) s nástavbou pro rozšíření vstupů a výstupů, tzv. shield (6), který je rozšířen modulem pro bezdrátovou komunikaci přes bluetooth (5).

Tabulka 2 *Orientační hmotnost hlavy*

Hlava	Hmotnost [g]
Vrchní	30
Spodní	55
Čep	1
Pololu kulička 2x	4
Arduino	25
Shield	50
BT modul	4
UBEC 3A	7
Celkem	176

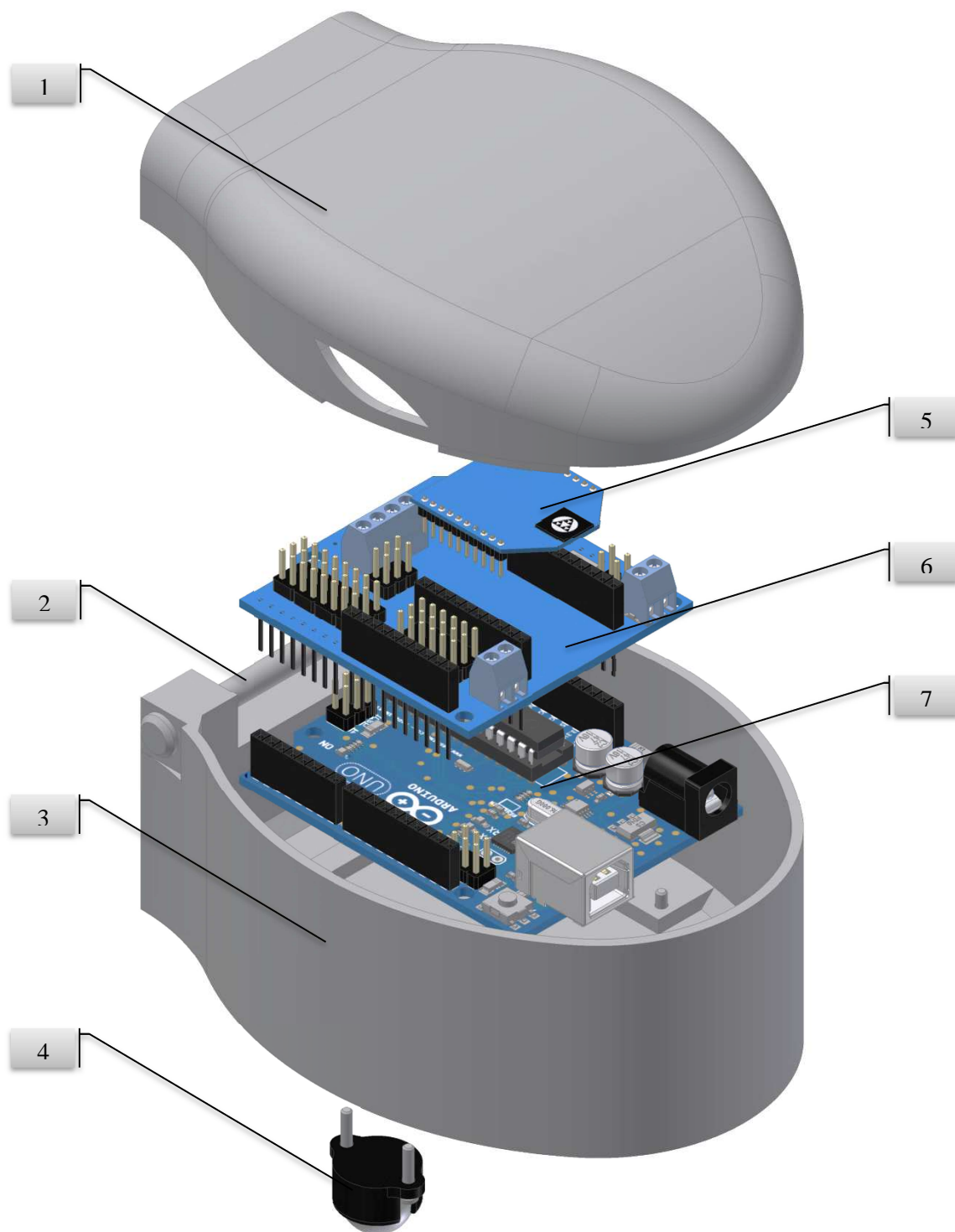
4.1.1 Arduino Uno

Arduino Uno (Obr. 16) je platforma založená na mikroprocesoru ATmega328P od firmy Atmel. Deska má 14 digitálních vstupů/výstupů, ze kterých může být šest použito pro PWM signál, 6 analogových vstupů, 16 MHz keramický rezonátor, USB konektor, napájecí konektor a tlačítko pro reset. Arduino Uno může být napájeno přes USB nebo z externího zdroje. Deska je schopná pracovat se stejnosměrným napájecím napětím 7 až 20 V. Pokud by bylo dodáno méně než 7 V (např. 6 V), tak 5 V výstup dodává méně voltů a deska se stane nestabilní (úbytek na stabilizátoru). Naopak při překročení 12 V může dojít k přehřátí obvodu regulátoru napětí, což může vést až k poškození. Z výše uvedeného vyplývá, že je vhodné používat napájecí zdroj s napětím 7 až 12 V. [16]

Arduino je možné programovat pomocí vlastního vývojového prostředí Arduino, přičemž programovací jazyk se podobá programovacímu jazyku C.



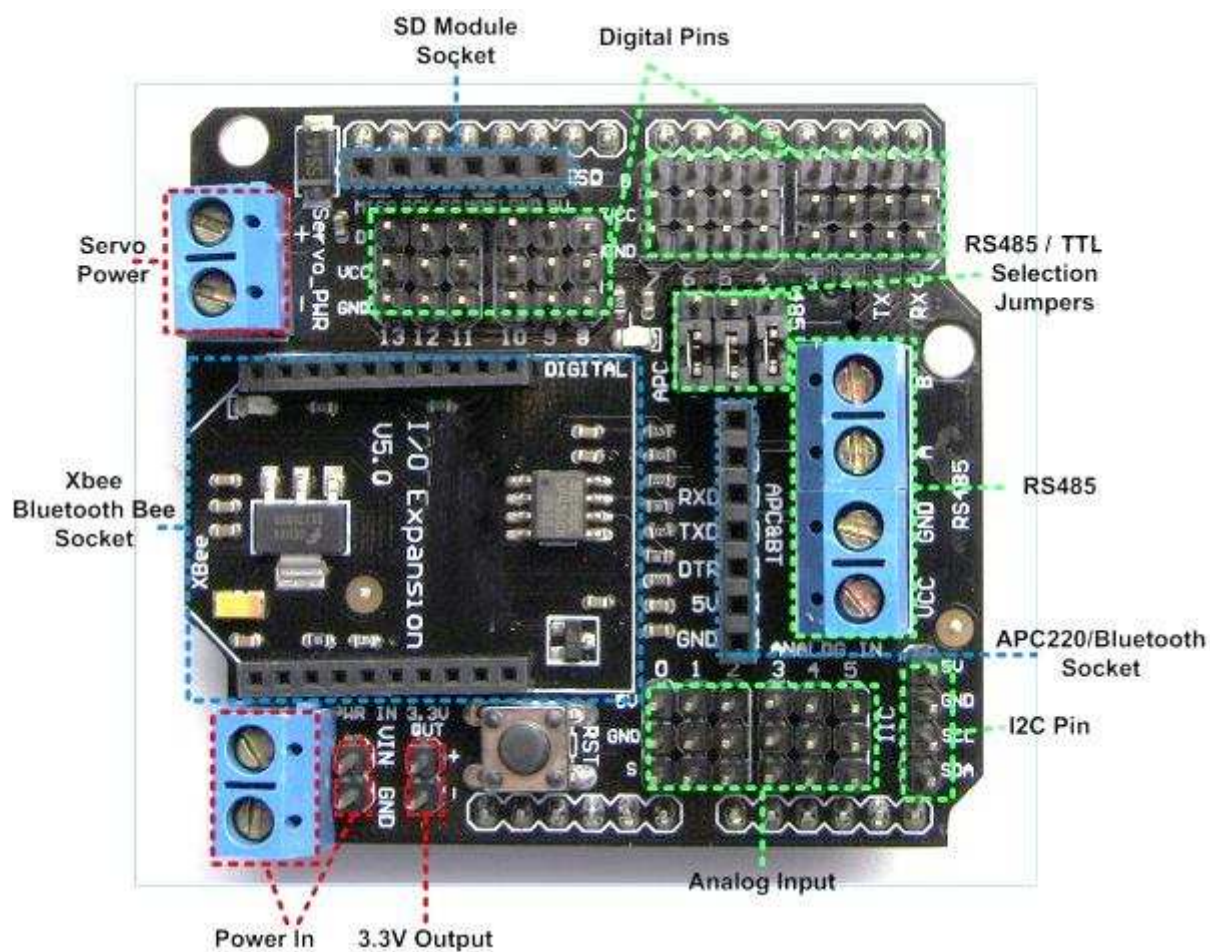
Obr. 16 *Arduino Uno*[16]



Obr. 17 Rozložená sestava hlavy hada

4.1.2 I/O Shield s komunikačním modulem

Shield DK I/O Expansion Shield V5.0 (Obr. 18) rozšiřuje Arduino Uno nebo jinou vývojovou desku, která je kompatibilní. Důležitou funkcionalitou zvoleného shieldu, je přivedení samostatného napájení pro řízení užitých modelářských serv (konektor ozn. Servo Power), včetně vhodně vyvedené svorkovnice (Digital Pins) pro jejich řízení (prostřednictvím PWM). V našem případě jsou využity piny 8 – 13, které umožňují připojení až 6 serv. Na shieldu rovněž nechybí svorkovnice pro napájení vývojové desky, zde ovšem musí být dodrženo napětí 5V. Dále jsou zde k dispozici rozhraní pro sběrnice RS485 a I²C. Deska obsahuje dokovací stanici s patičkou standardu Xbee, do které lze připojit XBee nebo Bluetooth modul. Zvolený Bluetooth modul využívá je standardu IEEE 802.15.4, tj. umožňuje komunikaci point-to-point, point-to-multipoint nebo spojení peer-to-peer. Užitý XBee-PRO má v uzavřených prostorech dosah do 90 metrů a při přímé viditelnosti až 1,6 km. [17][18]

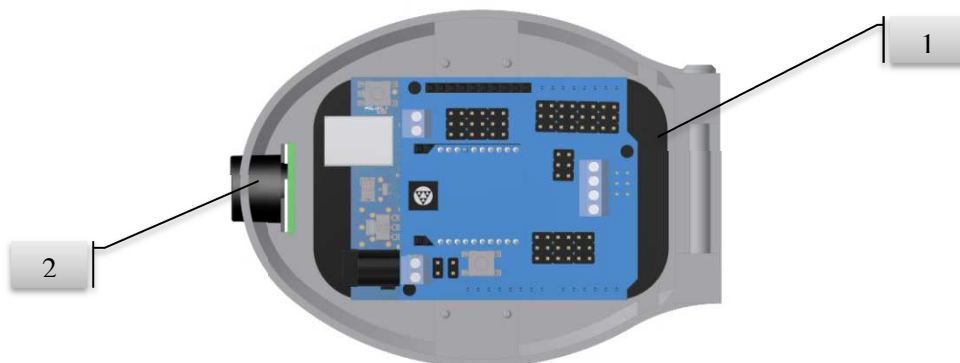


Obr. 18 Rozvržení rozšiřující desky (shieldu) [18]

4.1.3 Alternativní řídicí jednotka hada

Hlavu hada je možné v případě potřeby rozšířit o jiné MCU platformy. Jako alternativa k primárně zvolenému 8-bit Arduino byla zvolena výkonnější vývojová platforma f. Freescale, 32-bit FRDM-KL25Z (1), která je kompatibilní s I/O rozšiřujícím shieldem (viz výše). Hlava hada disponuje přesnými montážními otvory pro uvedené HW vývojové platformy. Hlava dále poskytuje dostatek prostoru pro rozmístění případné sensoriky, například zvoleného ultrazvukového senzoru vzdálenosti LV-MaxSonar-EZ1 (2).

Na (Obr. 19) je mimo jiné vidět porovnání velikosti Arduina (modrá) s Freescale (černá).



Obr. 19 Rozšíření hlavy

4.2 Ocas hada

Ocas hada (Obr. 20) je uvažován "doplňkově" z důvodu estetiky celkového designu. Tento typ článku hada je stejně jako hlava realizován na všesměrové kuličce. Tímto způsobem je minimalizován vliv na kinematiku pohybu. Ocas hada osazen zásuvkou (3) DC konektoru (2,1x5,5 mm), pro možnost přívodu externího napájení. Jedná se o konektor PC-GM2.1 od výrobce NINIGI.



Obr. 20 Návrh posledního článku hada (ocas hada)

4.3 Články hada

Pojem *aktivní článek hada* je užít v kontextu vlivu na generování pohybu hada. Článek (Obr. 22) se skládá z pěti konstrukčních dílů (využit 3D tisk). Vrchní díl (5) a spodní díl (10) plní funkci krytu. Prostřední a v podstatě nejdůležitější díl (3) slouží k připojení navazujícího článku prostřednictvím čepu (2). V tomto dílu jsou uložena dvě pasivní kola (4) Pololu. Prostřední díl nese Li-Pol akumulátor (1) a zvolený servomotor GO-17MG (9) třídy mikroservo. Servomechanismus přenáší krouticí moment motoru pomocí unašeče (6), který je zapuštěn v rameni (7), kterým je článek připojen k předcházejícímu článku. Tímto způsobem je realizován aktivní kloub hada ve smyslu otáčení serva a pasivní kloub ve smyslu roviny pohybu hada. Možným řešením propojení elektrických komponent hada je svorkovnice (8) umístěná na rameni kloubu.

Tabulka 3 *Orientační hmotnost článku*

Článek:	Hmotnost [g]
Vrchní díl	22
Prostřední díl	33
Spodní díl	34
Rameno	9
Čep	1
LiPo baterie	33
Servomotor	17
2x kolo	23
Celkem	172

4.3.1 Akumulátor

Jako vhodné baterie byly zvoleny lithium-polymerové akumulátory (Li-Pol akumulátory), tzv. lipolky. Konkrétně se jedná o třetí generaci akumulátoru RAY (Obr. 21). Je to sada dvou sériově zapojených 3,7 V článků. Sada baterií je opatřena silikonovými silovými kabely a servisním konektorem standardního typu JST-EH pro tzv. balancér. Li-Pol mají oproti jiným běžným druhům akumulátorů lepší poměr hmotnosti k výkonu, což lze ocenit především v leteckých modelech, na zemi jsou vítány kvůli jejich menším rozměrům. [19]

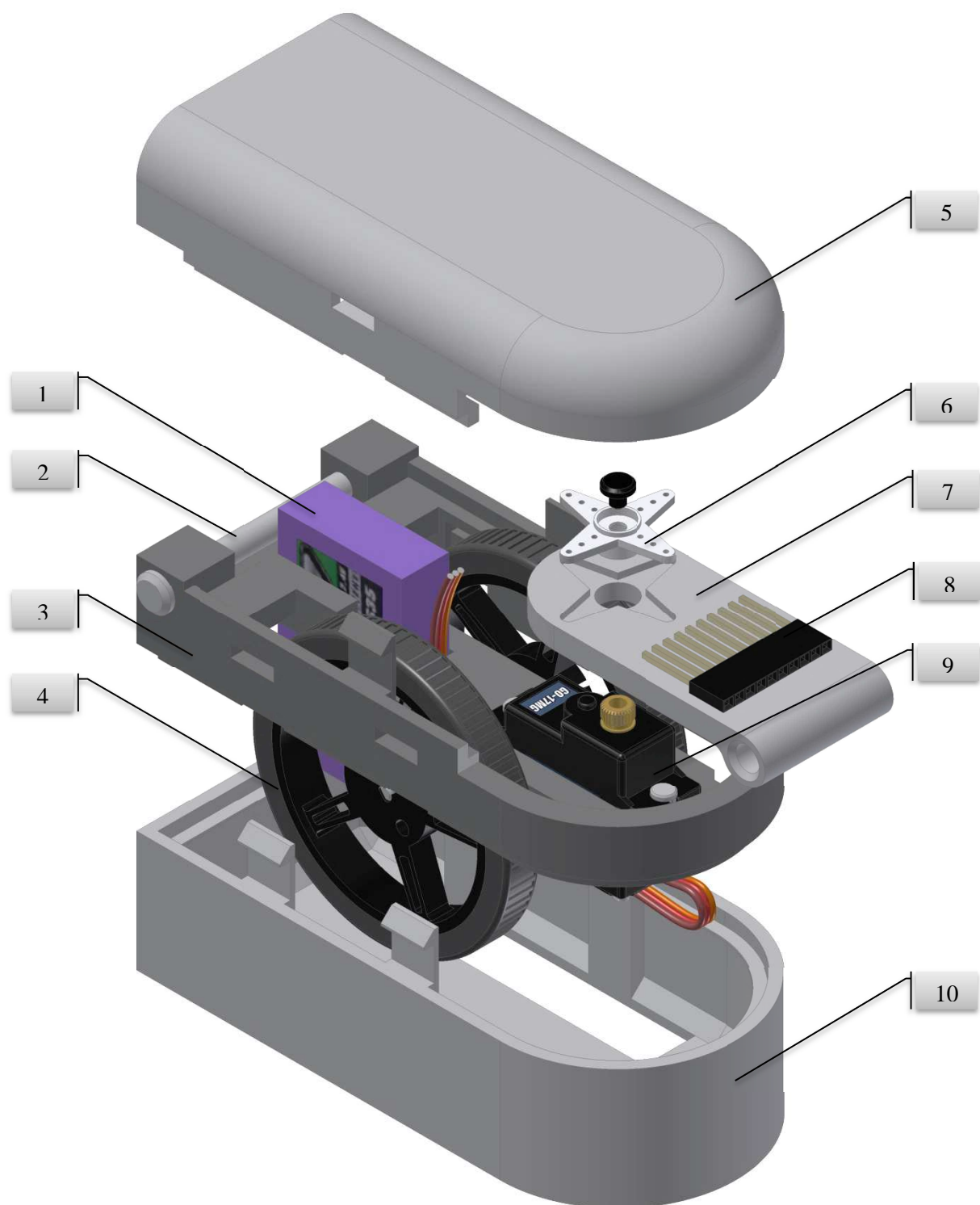
V našem případě jsou zapojeny paralelně. Při zapojování je důležité klást důraz na stav nabití a parametry jednotlivých akumulátorů, které by měly být v ideálním případě totožné. Při velkém skokovém vyrovnávacím proudu by totiž mohlo dojít k zničení, proto je vhodné před zapojením akumulátory proměřit, a případně propojit nejdříve přes odpor pro vyrovnání napětí.

Tabulka 4 *Parametry akumulátoru*

Kapacita [mAh]	450
Napětí [V]	7,4
Nabíjecí proud [mA]	450 - 900
Max. nabíjecí proud [mA]	900
Vybíjecí proud [A]	13,5
Max. vybíjecí proud [A]	27
Délka x Šířka x Výška [mm]	58x32x10
Hmotnost [g]	33



Obr. 21 G3 RAY Li-Pol [19]



Obr. 22 Rozložená sestava článku hada

Pro nabíjení dvou a vícečlánkových akupacků je potřeba použít nabíječky s tzv. balancerem, který zajistí, aby nedošlo k podvybití nebo přebití jednotlivých článků. V našem případě byla využita rychlonabíječka Imax B6AC Pro (Obr. 23) s mikroprocesorem a inteligentním softwarem pro snadnou obsluhu.



Obr. 23 Nabíječka Imax B6AC Pro [20]

4.3.2 Servomotor GO-17MG

Jako vhodné servo bylo vybráno GO-17MG (Obr. 24), kvůli jeho ceně, rozměrům a odolnějším kovovým převodům. Jedná se o analogové mikro servo značky PELIKAN s dobrým poměrem cena/výkon. Proud odebíraný servomotorem byl při zátěži naměřen v hodnotě cca 400 mA.

V tabulce 5 jsou uvedeny vhodné varianty aktuátorů – modelářských serv, které by bylo možné použít v případě požadavku většího výkonu. Poznamenejme, že při požadavku vyššího výkonu, než dle tabulky 5, by úprava konstrukce (3) článku hada byla možná i pro serva rozměru standard.



Obr. 24 Mikro servo GO-17MG [21]

Tabulka 5 Přehled alternativních – rozměrově vhodných servomechanismů

Název	Typ	Délka x šířka x výška	Hmotnost	Tah - 4,8/6 V	Cena [CZK]	Převody	Ložiska
S316 BB/MG	Analog	29,5x13,0x30,0	18g	2,4/3,5 kg.cm	749 (214)	kovové	ano
GO-17MG	Analog	28,3x13,3x29,7	17g	2,2/2,5 kg.cm	209 (84)	kovové	ne
SH-0350	Digital	22,8x12,0x25,4	12g	2,2/2,6 kg.cm	346 (133)	plastové	ano
SH-0257MG	Digital	22,8x12,0x25,4	14g	1,8/2,2 kg.cm	599 (272)	kovové	ano
HS-85BB	Analog	29,0x13,0x30,0	19g	3,0/3,5 kg.cm	499 (143)	plastové	ano
HS-5085MG	Digital	29,0x13,0x30,0	22g	3,6/4,3 kg.cm	999 (232)	kovové	ano
HS-85MG	Analog	29,0x13,0x30,1	22g	3,0/3,5 kg.cm	597 (171)	kovové	ano

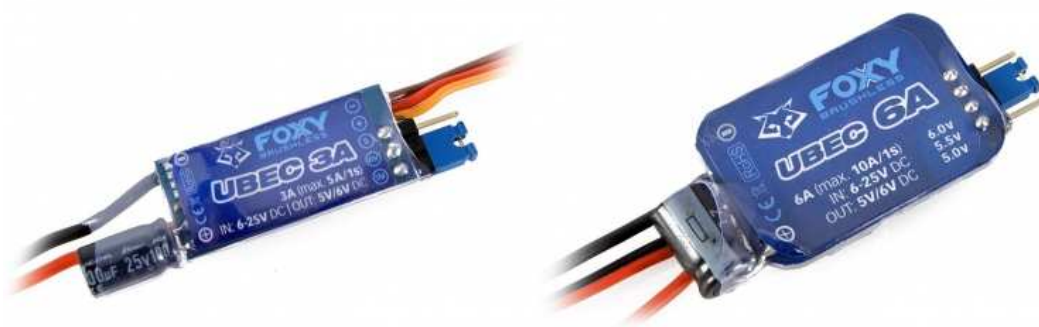
Hodnoty v závorkách u ceny uvádějí cenu za 1 kg.cm

4.3.3 UBEC

Spínaný stabilizátor napájení BEC pro napájení servomotorů. Napájecí napětí v rozsahu 6-25 V umožňuje UBEC používat až se šestičlánkovým Li-Pol akumulátorem. Výstupní napětí je volitelné pomocí zkratovací propojky, viz tabulka 6. Provozní stavy indikuje LED dioda. [22]

Tabulka 6 Základní technické údaje FOXY UBEC[22]

	FOXY UBEC 3A	FOXY UBEC 6A
Napájení	6-25 V(2-6s Li-Po / 5-18 NiXX)	6-25 V(2-6s Li-Po / 5-18 NiXX)
Výstupní napětí	5,0 V / 6,0 V přepínatelné	5,0 V / 5,5 V / 6,0 V přepínatelné
Výstupní proud	3 A trvalý / 6 A špičkový	6 A trvalý / 10 A špičkový
Rozměry	30x9x6 mm	45x23x10 mm
Hmotnost	7 g	18 g



Obr. 25 a) FOXY UBEC 3A, b) FOXY UBEC 6A[23]

4.3.4 Pololu Wheel

Kola (Obr. 26) byla zvolena větších rozměrů pro zajištění větší kontaktní plochy s podložkou. To nám zlepší dynamické vlastnosti pohybu a usnadní přejezd přes nesourodý povrch.

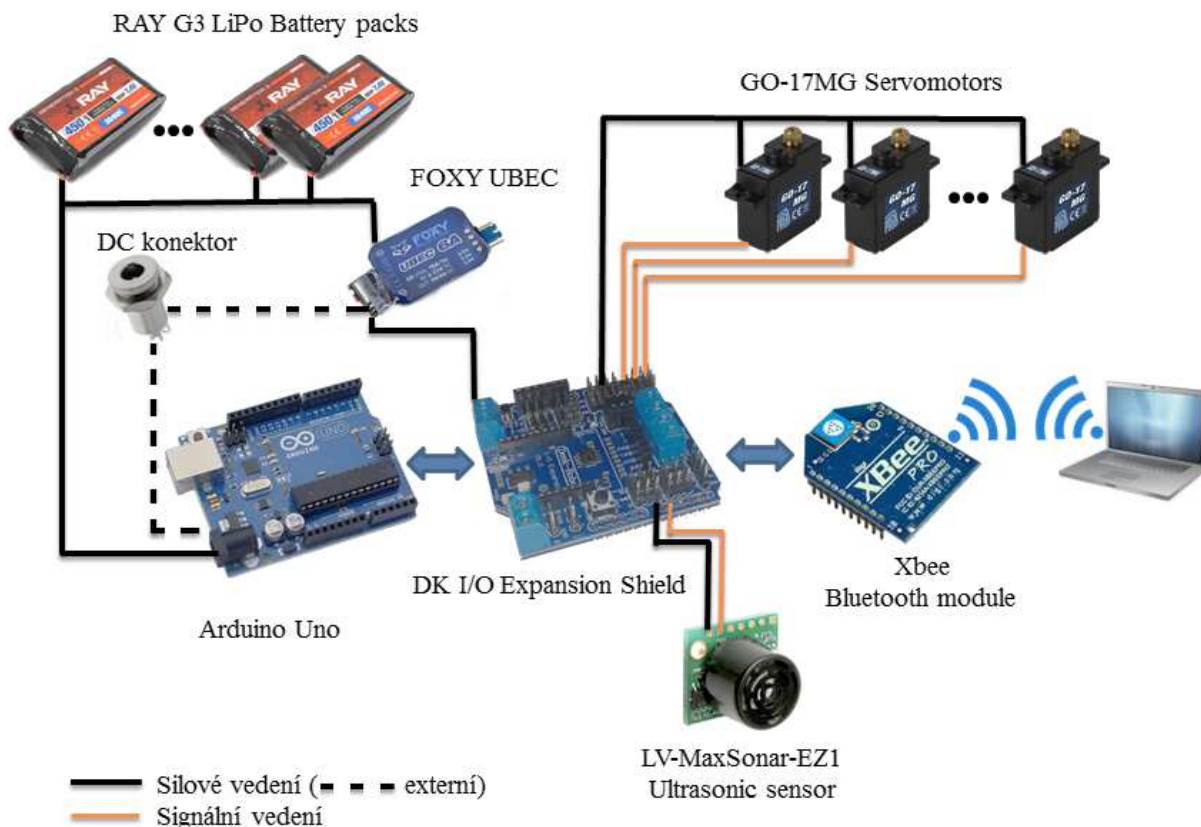
Tato kola byla navržena pro nalisování na „D“ čep hřídele o průměru 3 mm. Kola mají silikonové obutí s průměrem 60 mm a šířkou 8 mm. Dva další otvory slouží pro nasazení univerzálního náboje pro možnost použití 3-5 mm hřídele.[24]



Obr. 26 Pololu kolo s odejíratelnou gumou [24]

4.4 Zapojení navržených elektronických komponentů

Li-Pol akumulátory, paralelně zapojené, přivádějí silovými vodiči nominální napětí o hodnotě 7,4 V přímo do DC konektoru Arduino a do stabilizátoru napětí UBEC. UBEC těchto 7,4 V snižuje na pracovní napětí vhodné pro zvolená serva a přivádí jej na svorkovnici pro napájení servomotorů, která je umístěna na rozšiřujícím modulu Arduino (shieldu). Mimo využití Li-Pol akumulátorů lze využít externí zdroj napájení, připojením přes DC konektor. V uvedeném schématu je rovněž znázorněna komunikace s nadřazenou řídicí jednotkou (PC, tablet, telefon) prostřednictvím bluetooth modulu. Možnosti připojení dalších senzorů jsou širší, ve schématu je znázorněno zamýšlené čidlo vzdáleností, tj. ultrazvukový proximní senzor LV-MaxSonar-EZ1.



Obr. 27 Zapojení elektronických komponent

5 REALIZACE ROBOTICKÉHO HADA

Konstrukční díly byly navrženy pro výrobu s využitím aditivních technologií. Konkrétně technologií Fused Deposition Modeling (FDM). Tato metoda 3D tisku spočívá v nanášení materiálu ve vrstvách. Po dokončení jedné vrstvy se tisková hlava posune o tloušťku vrstvy nahoru a nanáší další vrstvu. Tento proces se opakuje, dokud není součást vyhotovena. FDM v případě složitějších součástí vyžaduje stavění podpor, což se ukázalo jako kritické při návrhu složitějších konstrukcí. Tyto tzv. podpory se po dokončení tisku mechanicky nebo chemicky odstraňují. Díly pro poslední verzi hada jsou vytištěny z materiálu ABSplus, který je o 40% pevnější než klasický ABS.

Sestava hlavy a článku hada (Obr. 28) je v pořadí již třetí verzí tisku a druhou vývojovou linií hada. V pozadí obrázku jsou mimo jiné vidět dva samostatné prostřední díly článku, kde ten více vlevo je novější verze. Jak je vidět, uprostřed přibyl otvor pro šroubové spojení se zavěšením kol a naopak byl odstraněn klín pro ukotvení horního dílu. Ten byl přebytný, neboť díky vysoké přesnosti tisku do sebe jednotlivé díly zapadají tak, že není potřeba dalších mechanických spojů. V současné verzi prezentované vývojové linie jsou předpokládány již jen drobné úpravy jako např. přidání konfiguračních tlačítek a změna vedení kabeláže.



Obr. 28 Otevřená sestava článků hada (nahore), resp. finální vzhled článků hada

V tabulce 7 je uveden počet, orientačně hmotnost a cena jednotlivých komponent použitých k sestavení robotického hada (kabeláž není uvedena).

Tabulka 7 Seznam použitých komponentů (4 aktivní články)

Položka	Počet	Hmotnost/kus [g]	Cena/kus [Kč]	Cena celkem [Kč]
ČlánekSpodní	4	34	475,95	1903,79
ČlánekProstřední	4	33	465,97	1863,89
ČlánekVrchní	4	22	314,30	1257,20
HlavaSpodní	1	55	771,57	771,57
HlavaVrchní	1	30	427,45	427,45
Rameno	5	9	133,07	665,35
Uložení kol	4	2	24,76	99,05
Čep	5	1	19,06	95,30
Servomotor	4	17	209,00	836,00
LiPol	4	33	199,00	796,00
Kola	8	12	97,11	776,87
Pin lišta	5	2	19,00	95,00
Arduino UNO	1	25	548,00	548,00
Shield	1	50	246,33	246,33
BT modul	1	4	274,00	274,00
UBEC 3A	1	7	239,00	239,00
Ultrasonic	1	4	731,68	731,68
Pololu ball 1/2"	2	2	48,62	97,23
DC konektor	1	8	43,96	43,96
Celkem	-	907	5287,83	11767,68

Uvedená cena tištěných součástí odpovídá ceně 15 Kč/cm³

6 ZÁVĚR

V bakalářské práci byly popsány základní pohyby biologických hadů a následně typy konstrukcí těch mechanických. Stručná rešerše robotických hadů uvedla popis jejich konstrukce a základní parametry, včetně fotografií. Robotičtí hadi byli rozřazeni do pěti skupin podle typu konstrukce, od které se odvíjí i způsob jejich pohybu.

Významným cílem práce byl vlastní návrh robotického hada. Navržený robot je schopný se pohybovat po planární ploše pomocí laterální undulace, která je zprostředkována natáčením kloubů servomechanismy. V práci prezentovaný návrh robota je již třetí vývojovou verzí a stále je na něm co zdokonalovat. Například je plánováno vhodnější vedení kabeláže po dně jednotlivých spodních dílů, kde je nyní nevyužitý prostor. S tím by bylo užitečné upravit hlavu pro možnost otočení vývojového kitu pro lepší přístup jak k pinům pro ovládání servomotorů, tak k napájení a USB portu. V současném stavu je totiž nutné vývojovou desku vytáhnout z hlavy, pokud je třeba nahrát nebo ladit program v Arduinu.

Do budoucna bych se robotickému hadovi rád věnoval. Kromě drobných konstrukčních úprav je potřeba ho naučit se „plazit“ pomocí vhodných povelů. K tomuto cíli vede cesta přes sofistikované matematické modely a počítačové simulace. Velký prostor představuje implementace autonomie, tj. využití umělé inteligence a příslušné senzorky tak, aby mohl had plnit příslušné úkoly.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ASEE PRISM - SUMMER 2011 – FEATURE, American Society for Engineering Education. [online]. [cit. 2015-05-27].
Dostupné také z: http://www.prism-magazine.org/summer11/feature_02.cfm
- [2] Glossy Crayfish Snake, Virginia Herpetological Society. [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: http://www.virginiaherpetologicalsociety.com/reptiles/snakes/glossy-crayfish-snake/glossy_crayfish_snake.php
- [3] SHAN, Y. a Y. KOREN. *Design and motion planning of a mechanical snake*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* [online]. 1993, 23(4): 1091-1100 [cit. 2015-05-25]. DOI: 10.1109/21.247890. ISSN 00189472.
Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=247890>
- [4] Snake : Locomotion. Encyclopædia Britannica [online]. 2004 [cit. 2015-05-26].
Dostupné z: <http://kids.britannica.com/comptons/art-171904/Snakes-move-in-different-ways-depending-on-their-species>
- [5] HOPKINS, J. K., SPRANKLIN, B. W., GUPTA, S. K. *A survey of snake-inspired robot designs*. *Bioinspiration & Biomimetics*, 4(2): 021001, 2009. Dostupné také z: <http://libra.msra.cn/Publication/12416474/a-survey-of-snake-inspired-robot-designs>
- [6] HIROSE, S. a H. YAMADA. *Snake-like robots*. *IEEE Robotics & Automation Magazine* [online]. 2009, 16(1): 88-98 [cit. 2015-05-25]. DOI: 10.1109/MRA.2009.932130. ISSN 10709932.
Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4799450>
- [7] ちゃぶたあ〜参, [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné také z: <http://www2.tokuyama.ac.jp/home/~kadowaki/top/ensyuex/2001/m3iio/souzou3/chapter%203.html>
- [8] APS, [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: <http://www.aps-web.jp/magazine/st/volume8/2.html>
- [9] BORENSTEIN, Johann a Adam BORRELL. *The OmniTread OT-4 serpentine robot*. In: *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation* [online]. IEEE, 2008, s. 1766-1767 [cit. 2015-05-26]. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543456. ISBN 9781424416462.
Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4543456>
- [10] Cool Omnitread Snake Robot Still Slithering, Singularity Education Group [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: <http://singularityhub.com/2010/01/29/cool-omnitread-snake-robot-still-slithering-video/>
- [11] ZHANG, Houxiang, Zhicheng DENG, Wei WANG, Jianwei ZHANG a Guanghua ZONG. *Locomotion Capabilities of a Novel Reconfigurable Robot with 3 DOF Active Joints for Rugged Terrain*. In: *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* [online]. IEEE, 2006, s. 5588-5593 [cit. 2015-05-26]. DOI: 10.1109/IROS.2006.282278. ISBN 1424402581.
Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4059322>
- [12] Arbeitsbereich Technische Aspekte Multimodaler Systeme, [online]. [cit. 2015-05-27].
Dostupné také z: <https://tams.informatik.uni-hamburg.de/personal/alumni/hzhang/projects/reconfigurablerobot/index.php>
- [13] KOTAY, K. and RUS, D. *The Inchworm Robot: A Multi-Functional System, Autonomous Robots 8* [online]. 2000, s. 53–69 [cit. 2015-05-27].
Dostupné také z: <https://groups.csail.mit.edu/drl/wiki/images/c/cd/fulltext.pdf>
- [14] The Inchworm Robot, DRLWiki [online]. [cit. 2015-05-27].
Dostupné také z: https://groups.csail.mit.edu/drl/wiki/index.php?title=The_Inchworm_Robot

- [15] Trident Snake Robot, Yuki Minami [online]. [cit. 2015-05-27].
Dostupné také z: <http://y373.sakura.ne.jp/minami/en/research/trident-snake-robot>
- [16] Arduino Uno. Arduino [online]. [cit. 2015-05-27].
Dostupné také z: <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [17] XBee 802.15.4 - Digi International, Digi International Inc. [online]. [cit. 2015-05-27].
Dostupné také z: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/point-multipoint-rfmodules/xbee-series1-module>
- [18] Play-Zone.CH DK I/O Expansion Shield V5.0, Play-Zone [online]. [cit. 2015-05-27].
Dostupné také z: <http://www.play-zone.ch/en/dk-i-o-expansion-shield-v5-0.html>
- [19] G3 RAY Li-Pol. Pelikandaniel.com [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z:
<http://www.pelikandaniel.com/?sec=product&id=55491>
- [20] B6AC PRO Imaxrc, IMAXRC CO.,LTD. [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z:
<http://www.imaxrc.com/B6AC-PRO.html>
- [21] GO-17MG servo 17g - Serva - Micro - Analogová. PELIKAN DANIEL [online].
[cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: <http://www.pelikandaniel.com/?sec=product&id=66574>
- [22] Manuál UBEC FOXY. Pelikandaniel.com [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z:
http://www.pelikandaniel.com/dld/FOXY_UBEC_manual_4L_104_143mm.pdf
- [23] FOXY UBEC. Pelikandaniel.com [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z:
<http://www.pelikandaniel.com/?sec=product&id=53495>
- [24] Pololu Wheel 60×8mm Pair. Pololu Robotics & Electronics [online]. [cit. 2015-05-27].
Dostupné také z: <https://www.pololu.com/product/1420>

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Břišní šupiny hada [2]	15
Obr. 2	Pohyb vlněním [4]	15
Obr. 3	Přímočarý pohyb [4]	16
Obr. 4	Harmonikový pohyb [4]	16
Obr. 5	Boční ohýbání [4]	16
Obr. 6	ACM-R3 [7]	18
Obr. 7	ACM-R5 [8]	18
Obr. 8	ACM-R4 [6]	19
Obr. 9	OT-4 [10]	20
Obr. 10	JL-I [12]	21
Obr. 11	Inchworm [14]	21
Obr. 12	Slim Slime robot [6]	22
Obr. 13	Trident snake robot [15]	22
Obr. 14	Navržený robot	23
Obr. 15	Základní rozměry	23
Obr. 16	Arduino Uno [16]	24
Obr. 17	Rozložená sestava hlavy hada	25
Obr. 18	Rozvržení rozšiřující desky (shieldu) [18]	26
Obr. 19	Rozšíření hlavy	27
Obr. 20	Návrh posledního článku hada (ocas hada)	27
Obr. 21	G3 RAY Li-Pol [19]	28
Obr. 22	Rozložená sestava článku hada	29
Obr. 23	Nabíječka Imax B6AC Pro [20]	30
Obr. 24	Mikroservo GO-17MG [21]	30
Obr. 25	a) FOXY UBEC 3A, b) FOXY UBEC 6A [23]	31
Obr. 26	Pololu kolo s odebíratelnou gumou [24]	31
Obr. 27	Zapojení elektronických komponent	32
Obr. 28	Otevřená sestava článků hada (nahore), resp. finální vzhled článků hada	33