

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra technologie staveb



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Motorika robotů ro pohyb po ocelových
konstrukcích

Bc. VÁCLAV KROPÁČEK

2020

Vedoucí diplomové práce: Ing Michal Kovářik

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne

.....

Bc. Václav Kropáček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval katedře K122 za umožnění zpracování diplomové práce a především děkuji Ing. Michalovi Kováříkovi za odborné vedení a připomínky k mé diplomové práci. Dále pak mé rodině a přítelkyni za pevné nervy a pochopení.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Kropáček</u>	Jméno: <u>Václav</u>	Osobní číslo: <u>440869</u>
Zadávací katedra: <u>K122 - Katedra technologie staveb</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Příprava, realizace a provoz staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Motorika robotů pro pohyb po ocelových konstrukcích</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Motorics of robots for movement on steel structures</u>	
Pokyny pro vypracování: 1) Rešerše robotických technologií ve stavebnictví s důrazem na specifika motoriky robotů. 2) Návrh způsobu pohybu robota po ocelové konstrukci 3) Návrh konceptu upínacího prvku 4) Výroba a sestavení funkčního prototypu upínacího prvku 5) Provedení zkoušek prototypu upínacího prvku při pohybu po konstrukci. 6) Zhodnocení výsledků.	
Seznam doporučené literatury: BOCK, Thomas a Thomas LINNER. Construction robots: elementary technologies and single-task construction robots. New York, NY: Cambridge University Press, 2016. ISBN isbn978-1-107-07599-3hardback. BERNS, Karsten a R. DILLMANN. Proceedings of the Fourth International Conference on Climbing and Walking Robots: CLAWAR 20001 [sic], 24-26th September 2001. Bury St Edmunds: Professional Engineering Pub., c2001. ISBN isbn1860583652. Learn.trossenrobotics.com [online]. 2854 Hitchcock Ave Downers Grove [cit. 2019-09-25]. Dostupné z: https://learn.trossenrobotics.com/projects/172-phantomx-hexapod-metal-assembly-guide.html	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Michal Kovářik</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>26.9.2019</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>5.1.2020</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
..... Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

.....
Datum převzetí zadání

.....
Podpis studenta(ky)

Anotace

Diplomová práce se zabývá vývojem nového upínacího mechanismu, který má umožnit nový způsob pohybu hexapodického minibota. V teoretické části je rešerše současného stavu robotické technologie, dále je popsán hexapodický minibot s jeho současnými způsoby pohybu. Pro lepší pochopení magnetismu je v práci vysvětlen magnetický jev. Praktická část pojednává o samostatném návrhu upínacího mechanismu, který využívá permanentních magnetů. Tento mechanismus umožňuje přeměrovat tok magnetické indukce tak, aby v jedné poloze magnety reagovaly s okolím a ve druhé nikoliv. Následují funkční zkoušky, zmínění možností uplatnitelnosti a shrnutí nákladů na zhotovení funkčního prototypu.

Klíčová slova

Hexapodický minibot, robot, magnetická indukce, upínací mechanismus, feromagnetická konstrukce, roboty, roboti

Anotation

This thesis deals with the development of a clamping mechanism, which should enable a new way of movement for the hexapodic minibot. The theoretical part includes an overview of modern robotic technology and the description of the current movement of the hexapodic minibot. For better understanding of magnetism, the magnetic phenomenon is explained in the thesis. The practical part concerns the design of the clamping mechanism, which makes use of permanent magnets. This mechanism allows to redirect the flux of magnetic induction so that in one position the magnets react with their surroundings and in the second position they do not. The thesis then describes functional tests, possible applications and a cost summary of functional prototype.

Key words

Hexapodic minibot, robot, magnetic induction, clamping mechanism, feromagnetick construction, robots

Obsah

1. Úvod.....	11
1.1. Výškové práce.....	12
2. Teoretická část	13
2.1. Současné trendy ve stavebnictví	13
2.1.1. Tradiční způsoby výškových prací.....	13
2.1. Vybrané příklady robotů ve stavebnictví.....	17
2.1.1. Automatic Climbing Formwork (Automatické šplhavé bednění).....	17
2.1.2. Minibuilders.....	18
2.1.3. On-Site Construction Robot (OSCR) Series for Masonry Construction (Série stavebních robotů pro zdění)	21
2.1.4. Concrete Floor Compaction System (Systém pro zhutnění betonových podlah).....	22
2.1.5. Screeding Robot	23
2.1.6. Flight-Assembled Architecture (letová architektura).....	25
2.1.7. PolyBot	26
2.1.8. Automatic Modular Assembly System (AMAS) (Automatický modulární montážní systém)	27
2.1.9. TERMES – Termite-Inspired Robot Construction Team (Termity inspirované stavební roboty)	29
2.1.10. Welding Robot for Steel Girders (Svářecí robot pro ocelové nosníky)	30
2.1.11. Facade Coating and Painting Robot (fasádní nátěrové a stříkací roboty)	32
2.1.12. Robot for Painting Exterior Walls (Roboty pro nástřik vnějších stěn).....	33

2.1.13.	HRP Robot Series (Roboty imitující člověka)	35
2.1.14.	Bio-Inspired Facade Inspection Robot C-Bot (Roboty inspirovány přírodou pro kontrolu fasád)	36
2.1.15.	Google's crabot	38
2.2.	Roboty pro stavbu lodí	38
2.2.1.	Svářecí roboty v otevřeném prostoru	38
2.2.2.	Svářecí roboty v uzavřeném prostoru	39
2.3.	Experimentální roboty	40
2.3.1.	Particle robots	40
2.3.2.	Cubli	41
2.4.	Hexapodické miniboty	42
2.4.1.	Typy hexapodických minibotů dle tvaru	42
2.4.2.	Typy hexapodických minibotů dle stupňů volnosti	42
2.4.3.	Typy chůze hexapodických minibotů	43
2.5.	Magnetický jev	46
2.5.1.	Vliv magnetického pole na feromagnetické látky	47
2.5.2.	Typy magnetů	47
2.5.3.	Způsoby demagnetizace	52
2.5.4.	Patent EP1243006B1	54
3.	Praktická část	56
3.1.	Cíl práce	56
3.2.	Hypotéza	56
3.3.	Návrh architektury systému pro pohyb po ocelových konstrukcích	57
3.4.	Návrh upínacího zařízení	58
3.4.1.	Prototypizace	65

3.4.2. Zkoušky upínacího prototypu.....	69
3.7. Zhodnocení výsledků.....	74
3.8. Návrhy pro optimalizaci.....	74
3.9. Možnosti využití.....	75
3.10. Shrnutí nákladů.....	76
4. Závěr.....	78
Seznam tabulek.....	79
Seznam obrázků.....	79
Citovaná literatura.....	82

Seznam symbolů a zkratek

H_{CB} [kA/m]	Vnější koercivita
H_C [kA/m]	Vnitřní koercivita
B_r [mT]	Remanence
BH_{max} [kJ/m ³]	Maximální energetický součin
B [T]	Magnetická indukce
H [A/m]	Intenzita magnetického pole

Seznam pojmů

DoF	Stupeň volnosti (Degree of Freedom)
Efektor	Koncová činná část robotu
Interní zdroj materiálu	Materiál si robot nese/podává sám
Externí zdroj materiálu	Přísun materiálu je zajištěn jiným strojem
Hejno	Skupina více spolupracujících robotů
Dokovací stanice	Stanice určená pro údržbu, nabíjení a zásobování elektronických zařízení
Orbit	Neboli orbital, je funkce popisující prostorové rozložení možného výskytu
Spin částice	Jde o vnitřní moment hybnosti
Remanence	Magnetická remanence je zbytková magnetizace, kterou si podrží feromagnetický materiál, když na něj přestane působit vnější magnetické pole
Maximální energetický součin	Nejvyšší možná hodnota součinu hodnot magnetické indukce B a intenzity magnetického pole H v oblasti demagnetizační křivky
Curieova teplota	Curieova teplota je teplota, nad kterou zcela zmizí magnetismus feromagnetických materiálů
Vnitřní koercivita	Síla pole vyžadovaná ke snížení polarizace magnetického materiálu na nulu
Vnější koercivita	Síla pole vyžadovaná ke snížení magnetické indukce magnetického materiálu na nulu

1. Úvod

K sepsání diplomové práce na téma motorika robotů pro pohyb po ocelových konstrukcích jsem se rozhodl na základě zkušenosti s prací ve výškách. Náročnost těchto prací je specifická především z důvodu splnění zákonných podmínek o dodržení BOZP. Pro dodržení BOZP je zapotřebí, aby pracovníci byli řádně proškoleni a zároveň vybaveni stroji a zařízeními pro ochranu proti pádu z výšky, nebo do prohlubně. V případě vývoje nové technologie, která by nahradila lidské pracovníky roboty schopnými samostatného pohybu po ocelových konstrukcích, by došlo k redukci nákladů spojených s BOZP a ke snížení počtu úrazů při údržbě ocelových konstrukcí.

Cílem této diplomové práce je navrhnout a sestavit jednu z klíčových komponent systému, kterou je upínací mechanismus, umožňující za pomoci permanentních magnetů překonávat pohyb po negativní rovině, a dokonce i svislý, nebo zavěšený pohyb po ocelových (feromagnetických) konstrukcích a provedení zkoušek tohoto mechanismu.

Práce je členěná do několika teoretických částí, kde jsou uvedeny současné trendy ve stavebnictví, popis hexapodického minibota a vysvětlení magnetického jevu společně s popisem různých druhů magnetů. V praktické části je popsán návrh, výroba a testování mechanismu, umožňujícího svislý i zavěšený pohyb po ocelových konstrukcích za použití hexapodického minibota. V závěru diplomové práce jsou zhodnoceny výsledky práce, provedeno finanční zhodnocení a nastíněny náměty pro další výzkum.

1.1. Výškové práce

Pojem výškové práce je definován jako činnost, při které je zaměstnavatel povinen přijmout technická a organizační opatření k zabránění pádu zaměstnanců z výšky nebo do hloubky, propadnutí nebo sklouznutí nebo k jejich bezpečnému zachycení. O výškové práce se jedná tehdy, pokud se pracoviště, nebo přístupové komunikace nachází v libovolné výšce nad vodou nebo nad látkami ohrožujícími v případě pádu život nebo zdraví osob a dále na všech pracovištích a přístupových komunikacích, pokud leží ve výšce nad 1,5 m nad okolní úrovní, případně pokud je pod nimi volná hloubka 1,5 m. [Nařízení vlády č. 362/2005 Sb.]

2. Teoretická část

2.1. Současné trendy ve stavebnictví

2.1.1. Tradiční způsoby výškových prací

Lešení

Nejrozšířenější způsob, jak vykonávat práce ve výškách nebo nad prohlubní, je za použití lešeňových konstrukcí. Tyto konstrukce se nejčastěji skládají z tyčových kusových prvků. Druhů lešení je opravdu



Obrázek 1 - Pojízdné lešení (28)

mnoho, avšak nejčastěji se v dnešní době používají tzv. pojízdná lešení, která jsou jednoduchá na montáž i údržbu. Avšak dle BOZP už to tak jednoduché není. Během montáže musí být dodrženy požadavky na BOZP s důrazem na ochranu proti pádu z výšky nebo do prohlubně. Lešení je zapotřebí podrobovat pravidelným odborným prohlídkám, a to způsobem a v intervalech stanovených v průvodní dokumentaci dle NV č. 362/2005 Sb. Ceník pojízdného lešení je převzat od společnosti Pelikán S&D, spol. s r. o.

CENÍK POJÍZDNÉHO LEŠENÍ	
2101.....	214,-Kč/den
2102.....	300,-Kč/den
2103.....	342,-Kč/den
2104.....	369,-Kč/den
2105.....	491,-Kč/den
2106.....	582,-Kč/den
2107.....	645,-Kč/den
2108.....	662,-Kč/den
2109.....	781,-Kč/den
2110.....	798,-Kč/den
2111.....	861,-Kč/den
Doprava místní: 500,- Kč /cesta	
Doprava meziměstská: 20,- Kč/ km	

Obrázek 2 - Ceny společnosti Pelikán S&D, spol. s.r.o. část 1

Výškové plošiny

Výškové plošiny jsou dalším, dnes už tradičním způsobem, jak vykonávat práce ve výškách. Jejich výhodou je, že jsou univerzální, a to



Obrázek 3 - Vysokozdvížený vozík (29)

ve smyslu, že mohou velmi rychle měnit své pracovní místo, a dokonce i výšku ve které operují. Pokud se bavíme o BOZP, tak je zapotřebí mít vždy platnou revizi o technické způsobilosti stroje pro výkon dané funkce. Dále je obsluha povinná používat OOPP proti pádu z výšky nebo do prohlubně (úvazek proti pádu). Jednotlivé ceny za pronájem jsou uvedeny níže v ceníku společnosti Pelikán S&D, spol. s r. o. Pro bližší informace o konkrétních strojích jsou k nalezení na jejich webových stránkách.

**CENÍK PRACOVNÍCH PLOŠIN
ELEKTRICKÉ NŮŽKOVÉ, SLOUPOVÉ**

Optimum 6.....	1.400,-Kč/den 26,-Kč/km
Optimum 8.....	1.400,-Kč/den 26,-Kč/km
Compact 8.....	1.500,-Kč/den 26,-Kč/km
Compact 10.....	1.600,-Kč/den 26,-Kč/km
Compact 12.....	1.700,-Kč/den 26,-Kč/km
Compact 14.....	2.100,-Kč/den 26,-Kč/km

DIESELVÉ NŮŽKOVÉ

Compact 12DX.....	2.000,-Kč/den 26,-Kč/km
GENIE 3369	2.000,-Kč/den 26,-Kč/km
H 12 SX.....	2.200,-Kč/den 26,-Kč/km
H 15 SX.....	2.400,-Kč/den 29,-Kč/km
GENIE 4390.....	2.500,-Kč/den 29,-Kč/km
H 18 SX.....	2.600,-Kč/den 29,-Kč/km
GENIE 5390.....	2.700,-Kč/den 29,-Kč/km

DIESELVÉ KLOUBOVÉ

H16RTJ.....	3.000,-Kč/den 29,-Kč/km
H18PX.....	3.300,-Kč/den 29,-Kč/km
H20RTJ PRO	3.600,- Kč/den 32,-Kč/km

ELEKTRICKÉ KLOUBOVÉ

DINO 112.....	2.100,-Kč/den 26,-Kč/km
Z33/18.....	2.300,-Kč/den 26,-Kč/km
H12CJ+.....	2.500,-Kč/den 29,-Kč/km
HA 15 IP.....	2.700,-Kč/den 29,-Kč/km
H20 LE PRO.....	3.600,-Kč/den 32,- Kč/km

ELEKTRICKÉ SLOUPOVÉ

STAR 10.....	2.100,-Kč/den 26,-Kč/km
--------------	-------------------------

Manipulace plošin: 400,- Kč / 1 stroj

Manipulace HTL 3510/ 4014: 500,- Kč / 1 stroj

Doprava místní: 1.200,- Kč do 6 t, 1.500,- Kč do 8 t

Obrázek 4 - Ceny společnosti Pelikán S&D, spol. s.r.o. část 3

Horolezecká činnost

Posledním tradičním způsobem práce ve výškách nebo nad prohlubní je za pomoci horolezecké techniky. Tyto práce patří mezi nejnáročnější a nejnákladnější, a proto se tento způsob prací uvažuje až jako poslední možnost. Ceník pro vybrané výškové práce je převzat od společnosti Výškové služby CZ.



Obrázek 5 - Horolezec (30)

Tabulka 1 (1)

Ceník	Měrná jednotka	Cena za jednotku bez DPH
Výškový pracovník	Osoba/hodina	Od 450 Kč
Výškové nátěry, okapových žlabů a svodů	bm	Od 250 Kč
Výškové montáže	Osoba/hodina	Od 450 Kč
Výškové klempířské práce	Osoba/hodina + materiál	Od 450 Kč + materiál
Výškové nátěry fasád	m ²	Od 190 Kč
Nátěry kovových prvků, antény, zábradlí...	m ²	Od 220 Kč
Nátěry plechových střech	m ²	Od 190 Kč
Doprava po Praze a Středočeském kraji	Jednorázová sazba	400 Kč

Ceny jsou uvedeny bez DPH. Sazba činí 15% pro domácnosti a 21% pro firmy

2.1. Vybrané příklady robotů ve stavebnictví

V této kapitole je provedena rešerše dostupných robotů, umožňujících nezávislý pohyb po konstrukcích s cílem prověřit jejich konstrukční řešení a nalézt optimální řešení, vhodné pro návrh robotického minibota pro pohyb po ocelových konstrukcích.

2.1.1. Automatic Climbing Formwork (Automatické šplhavé bednění)

Příkladem může být SKE Plus série bednění od společnosti Doka, která se používá pro velké železobetonové konstrukce, jako jsou například jádra výškových budov, mol, stožárů a věží bez použití jeřábů. Hydraulický zvedací proces vyžaduje dva důležité kroky. V prvním kroku jsou zvednuty šplhavé vodící profily za pomoci hydraulických válců šplhavou patkou, která je připevněna k již vybetonované konstrukci, a to až do výšky další sekce. Ve druhém kroku je šplhavé lešení vytlačeno vzhůru po vodících profilech stejnými hydraulickými válci. (2)



Obrázek 6 - SKE Plus

Tabulka 2

Automatic Climbing Formwork		
	celek	efektor
DoF	1	1
Vertikální pohyb	Hydraulickými válci	Hydraulickými válci
Horizontální pohyb	x	x
Všesměrný pohyb	x	x
Zdroj energie	Elektrický proud	
Zdroje materiálu	x	

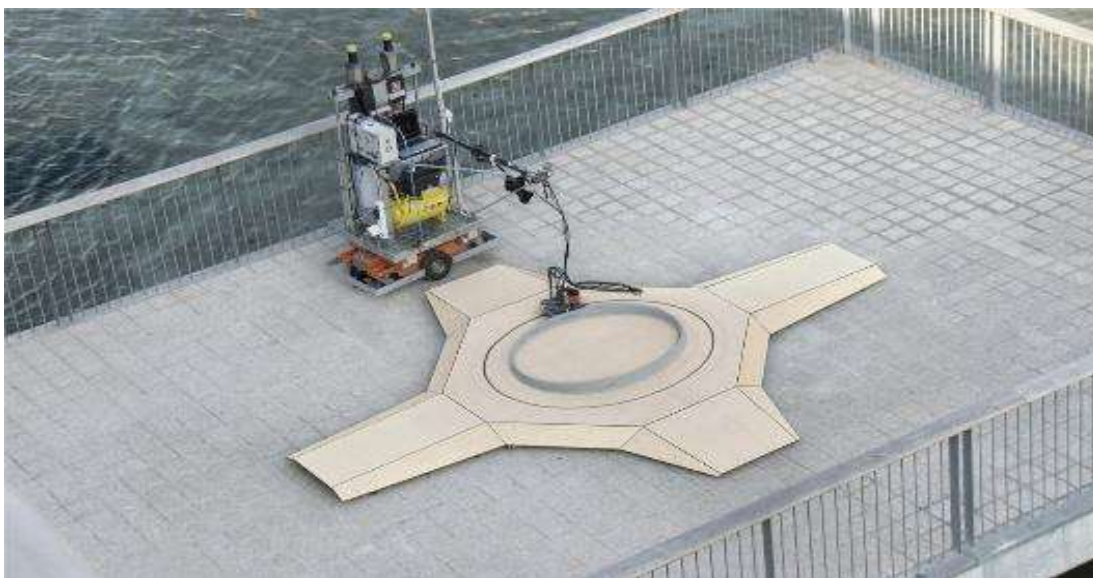
2.1.2. Minibuilders

Minibuilders jsou robotické jednotky, které za použití 3D tisku jsou schopni vytisknout nové stavební konstrukce. Ve větším počtu mají potenciál ke stavbě nových budov.

Jedna z největších slabin 3D tisku je, že nemají dostatečnou efektivitu vzhledem k rozměrům dnešních staveb a obvykle mají malou rychlost tisku. Minibuilders používají princip hejna, ve kterém více malých robotů a relativně jednoduchých robotů spolupracují pro konkrétní činnosti. Roboty mohou pracovat současně vedle sebe, což zvyšuje efektivitu. Printing robots se dají rozčlenit do 3 skupin:

1. Základový robot (může se pohybovat po zemi a je určen k založení první, stabilní vrstvě).
2. Jezdec (je schopen se pohybovat po hraně konstrukce a je specializován na tisknutí a prodlužování konstrukce).
3. Přísavný robot (má schopnost se pohybovat po vnější straně konstrukce a také přidávat další vrstvy a tím dodatečně vyztužit, nebo jinak upravit povrch konstrukce).

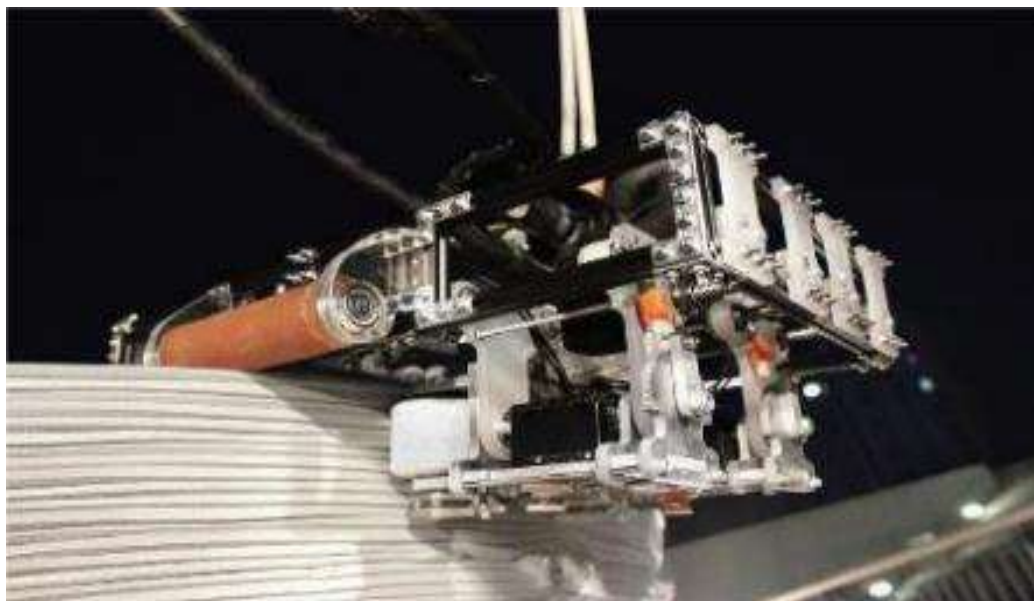
Všechny Minibuilders vycházejí ze stejného základu, a jejich rám je uzpůsoben tak, aby vzhledem k prostředí mohl být vybaven správným typem konstrukce pro pohyb. (2)



Obrázek 7 - Základový robot

Tabulka 3

Minibuilders - Základový robot		
	celek	efektor
DoF	3	1+
Vertikální pohyb	x	Servomotory
Horizontální pohyb	Kolový/pásový pohyb	Servomotory
Všesměrný pohyb	x	x
Zdroj energie	Baterie/elektrický proud	
Zdroje materiálu	Externí	



Obrázek 8 - Jezdec

Tabulka 4

Minibuilders - Jezdec		
	celek	efektor
DoF	2	1+
Vertikální pohyb	X (zajištěn nanášením tištěného materiálu, výsledný pohyb je po spirále vzhůru)	X
Horizontální pohyb	Kolový pohyb	X
Všesměrný pohyb	X	X
Zdroj energie	Baterie/elektrický proud	
Zdroje materiálu	Externí	



Obrázek 9 - Přísavný robot

Tabulka 5

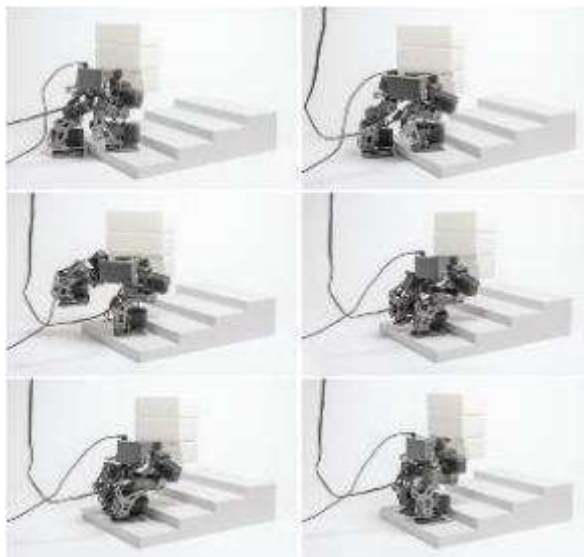
Minibuilders - Přísavný robot		
	celek	efektor
DoF	2	0+
Vertikální pohyb	Pásový pohyb	Servomotory
Horizontální pohyb	Pásový pohyb	Servomotory
Všesměrný pohyb	x	x
Zdroj energie	Baterie/elektrický proud	
Zdroje materiálu	Externí	

2.1.3. On-Site Construction Robot (OSCR) Series for Masonry Construction (Série stavebních robotů pro zdění)

OSCR series for masonry construction jsou tzv. bipedi (stroje pohybující se za pomoci dvou končetin) určeni pro transport materiálu přímo na místo zpracování materiálu. Tyto stroje jsou schopni překonávat i schodišťové stupně.

OSCR series for masonry construction reprezentují nový přístup k automatizaci a robotizaci staveb z cihel a kamenů. Na rozdíl od většiny stavebních robotů, kde jsou paže robota umístěny na mobilní platformu nebo zdvihací zařízení, jsou úplně zautomatizované a očekává se, že budou pracovat bez větších zásahů člověka. Dále se očekává, že OSCR

series roboty budou fungovat jako hejno robotů úzce spolupracujících s lidmi, a to za předpokladu dynamicky se měnícího prostředí. (2)



Obrázek 10 - OSCR

Tabulka 6

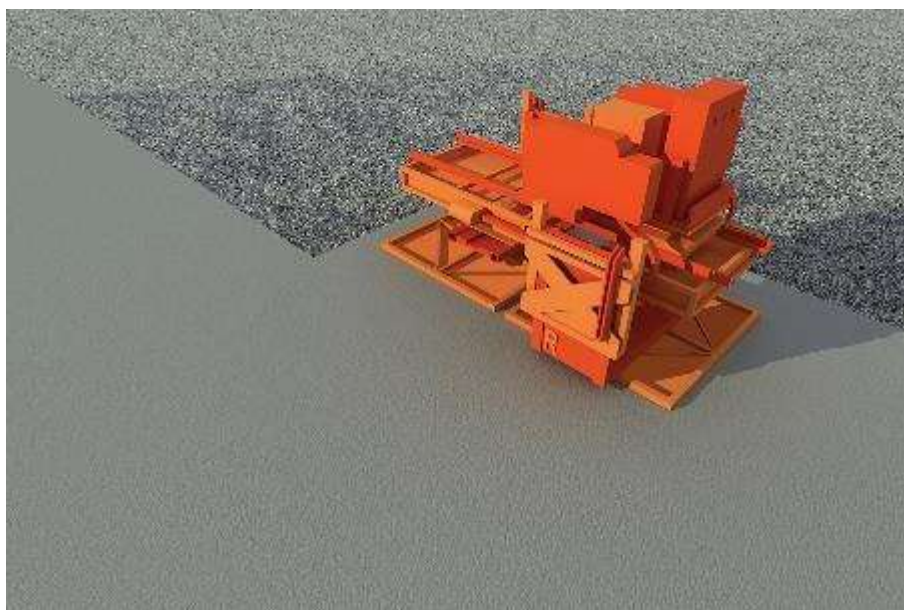
On-Site Construction Robot (OSCR) Series for Masonry Construction		
	celek	efektor
DoF	4	0+
Vertikální pohyb	Servomotory	Servomotory
Horizontální pohyb	Servomotory	Servomotory
Všesměrný pohyb	Servomotory	Servomotory
Zdroj energie	Elektrický proud/baterie	
Zdroje materiálu	Interní	

2.1.4. Concrete Floor Compaction System (Systém pro zhutnění betonových podlah)

Concrete floor compaction systém je robotický systém, který automatizovaně zhutňuje betonové podlahy. Jeho pohyb je zaručen pomocí vibrací, které jsou současně využité i pro samotný proces hutnění.

Hutnění betonových podlah je kritický proces, který je zapotřebí udělat do určitého času po vylití betonu. Proto jsou rychlost a síla dva důležité

faktory, pokud se zamyslíme nad automatizací a robotizací takového procesu. Systém zhutnění betonových podlah byl vyvinut společností Takenaka, kde skrze hlavní části robota prochází dva ocelové pláty, které mírně vibrují, a tím na povrch působí vyhrazeným tlakem. Robot je také schopný vytlačit z betonu vodu, následně zhutnit, čímž podpoří tvrdnoucí proces. (2)



Obrázek 11 - Concrete Floor Compaction System

Tabulka 7

Concrete Floor Compaction System		
	celek	efektor
DoF	3+	1+
Vertikální pohyb	Oscilace	Oscilace
Horizontální pohyb	Oscilace	x
Všesměrný pohyb	Oscilace	x
Zdroj energie	Fosilní paliva	
Zdroje materiálu	x	

2.1.5. Screeding Robot

Screeding robot je robot, který automatizovaně hutní a srovnává rovinu čerstvě provedených betonových podlah. Screeding robot je robot, který automatizovaně hutní a srovnává rovinu čerstvě provedených

betonových podlah. Jedná se o inovativní řešení, které v současné době nemá obdoby.

Robot se skládá z mobilní naváděcí platformy (na pásovém podvozku) s nasaditelným manipulátorem. Manipulátor obsahuje stěrkový end effector, stejně jako součást pro laserově naváděný systém pro základní určení výšky a pohybu manipulátoru. Manipulátor provádí jednoduchou, ale robustní a přesnou boční chůzi. Dráha mobilní platformy je zodpovědná za pohyb manipulátoru a koncového efektoru kupředu. Robot je dostatečně malý na to, aby se s ním dalo projít bez problémů dveřmi, nebo jinými stavebními otvory. V případě potřeby lze sundat manipulátor z mobilní platformy. (2)



Obrázek 12 - Screeding Robot

Tabulka 8

Screeding Robot		
	celek	efektor
DoF	2+	1
Vertikální pohyb	Hutněním materiálu pod sebou	x
Horizontální pohyb	Pásový pohyb	x

Všesměrný pohyb	x	x
Zdroj energie	Baterie	
Zdroje materiálu	x	

2.1.6. Flight-Assembled Architecture (letová architektura)

Systém byl vyvinut a demonstrován jako experimentální (v modelovém měřítku) pro zkoumání proveditelnosti postavení výškových budov za pomoci vzdušných vozidel, cílem bylo prozkoumat možné strategie a přístupy. V experimentu byla skupina kvadrokoptér, kdy jedna po druhé vzala odlehčené stavební bloky (polystyrenové pěnové cihly) ze speciálně uspořádaného stolu a kladla stavební bloky standardizovaným způsobem pro kvadrokoptéry. Kvadrokoptéry na konci experimentu postavily věž dle předdefinovaných požadavků. (2)



Obrázek 13 - Flight-Assembled Architecture

Tabulka 9

Flight-Assembled Architecture		
	celek	efektor
DoF	4+	2
Vertikální pohyb	Pomocí rotorů	Servomotory

Horizontální pohyb	Pomocí rotorů	Servomotory
Všesměrný pohyb	Pomocí rotorů	servomotory
Zdroj energie	Baterie	
Zdroje materiálu	Interní	

2.1.7. PolyBot

PolyBot je modulární multirobotický systém složený z individuálních robotických částí a uzlů. Tyto robotické části se mohou připnout, nebo odepnout k sobě navzájem do podoby hadí, kulaté, anebo pavoučí pro zaručení jejich pohyblivosti, nebo pro manipulační účely.

Systém byl zamýšlen jako robotický systém pro provádění stavebního servisu a údržbových činností ve vesmíru, stejně tak jako pro mise typu najdi a zachraň, nebo také pro poskytnutí úkrytu pro oběti přírodní katastrofy. Tento systém s možností samostatné rekonfigurace by dovoľoval různé možnosti použití, aniž by se musely vyvíjet další typy robotů pro konkrétní práce. Spoje jsou tzv. hermafroditické, což znamená, že není klasický spoj typu „samec“ a „samička“. Toto je velkou výhodou pro rekonfiguraci, každý jednotlivý robot pasuje do druhého. (2)



Obrázek 14 - PolyBot Assembly



Obrázek 15- PolyBot

Tabulka 10

PolyBot		
	celek	efektor
DoF	2+	Dle typu
Vertikální pohyb	Servomotory	Servomotory
Horizontální pohyb	Servomotory	Servomotory
Všesměrný pohyb	Servomotory	Servomotory
Zdroj energie	Baterie/elektrický proud	
Zdroje materiálu	Interní	

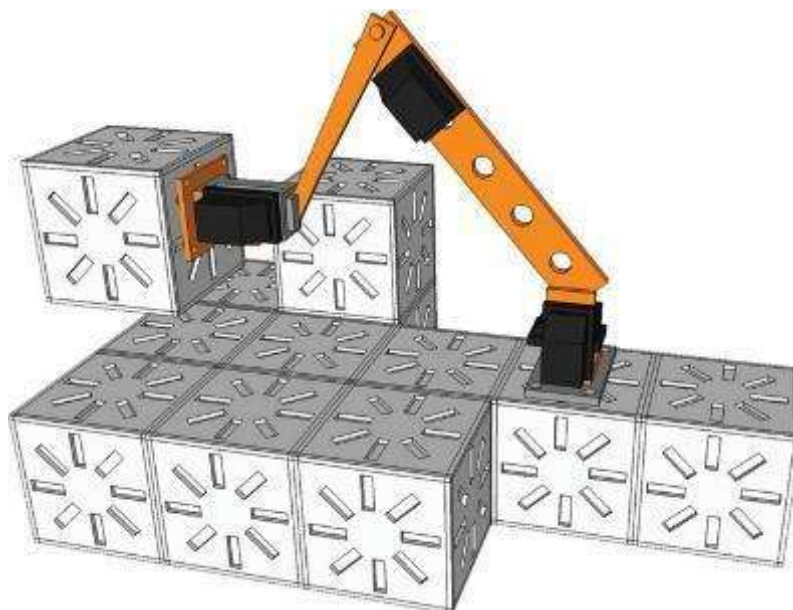
2.1.8. Automatic Modular Assembly System (AMAS) (Automatický modulární montážní systém)

AMAS je multirobotický systém, který využívá principy inteligence rojů. Tento systém byl vyvinut pro stavbu velkých modulárních staveb. Jeho klíčovým prvkem jsou standardizované robotické stavební bloky.

Montážní roboty se skládají ze dvou koncových efektorů s každým na jednom konci. Každý koncový efektor pracuje odlišně: jeden (nesoucí základnu) může hýbat se stavebními moduly. Druhý se může spárovat se sestavenými stavebními bloky pro zajištění fixace robota pro pohybové

úkoly po budově a použít budovu klezení a pohybu (tzv. červím způsobem). Stavební bloky mohou být také považovány jako robotické prvky, kde každý obsahuje mikroprocesor, senzory a komplexní konektory. Očekává se, že AMAS bude mít využití ve stavbách větších rozměrů, jako jsou vesmírné stavby, mostní pilíře, velké pilíře a přehrady.

(2)



Obrázek 16 - AMAS

Tabulka 11

Automatic Modular Assembly System (AMAS)		
	celek	efektor
DoF	1+	1+
Vertikální pohyb	Servomotory	Servomotory
Horizontální pohyb	Servomotory	Servomotory
Všesměrný pohyb	Servomotory	Servomotory
Zdroj energie	Baterie/elektrický proud	
Zdroje materiálu	Interní	

2.1.9. TERMES – Termite-Inspired Robot Construction Team (Termity inspirovány stavební roboty)

TERMES je decentralizovaný robotický systém, který byl vyvinut na Harvardské univerzitě. Návrh je inspirován organizací, chováním a komunikací termitů při stavbě termitiště. Tento systém je unikátní tím, že všechny roboty pracují nezávisle na sobě. Z toho plyne, pokud má některý robot poruchu a nemůže dál pokračovat v pracovní činnosti, tak jeho práci nahradí jiný robot. Systém se skládá ze skupiny jednotlivých nezávislých robotů vybavených mikroprocesory, senzory, aktivátory a pasivním stavebním blokem s pasivním mechanickým nastavením. Senzory mohou být zařazeny do těchto čtyř typů: infračervené, ultrasonické, akcelerometry a kontaktní čidla. K poskytnutí zpětné vazby o poloze je každý robot vybaven šesti aktivními infračervenými senzory pro určení pozice cihel a navigací pro pohyb po konstrukci. Každý robot je také vybaven manipulační paží a koncovým efektozem tak, aby byli schopni manipulovat s přesně určenými bloky s přidanými pasivními mechanickými prvky (např. pro spojení do jiných částí), které pomáhají robotům řádně uchytit a bezpečně zarovnat každý blok na správné místo na konstrukci. Roboti se pohybují po speciálně navržených kolech, umožňujících pohyb po rovné zároveň i po stupňovité rovině, díky kterým mohou také lehce šplhat po konstrukci. Roboty nekomunikují s vnějším prostředím, ani se stavebními bloky, mají pouze informaci o tom, jak má daná stavba vypadat. Roboty interagují s jejich prostředím v reálním čase. Proto se používají senzory na jejich základové desce (není zapotřebí žádný globální senzor), které určí, co by roboty měli dělat vzhledem k nové situaci. Každý robot jedná nezávisle a přidáním dalších robotů do procesu se zajistí, že projekt bude dříve hotový, protože roboty mohou pracovat i paralelně. (2)



Obrázek 17 - TERMES

Tabulka 12

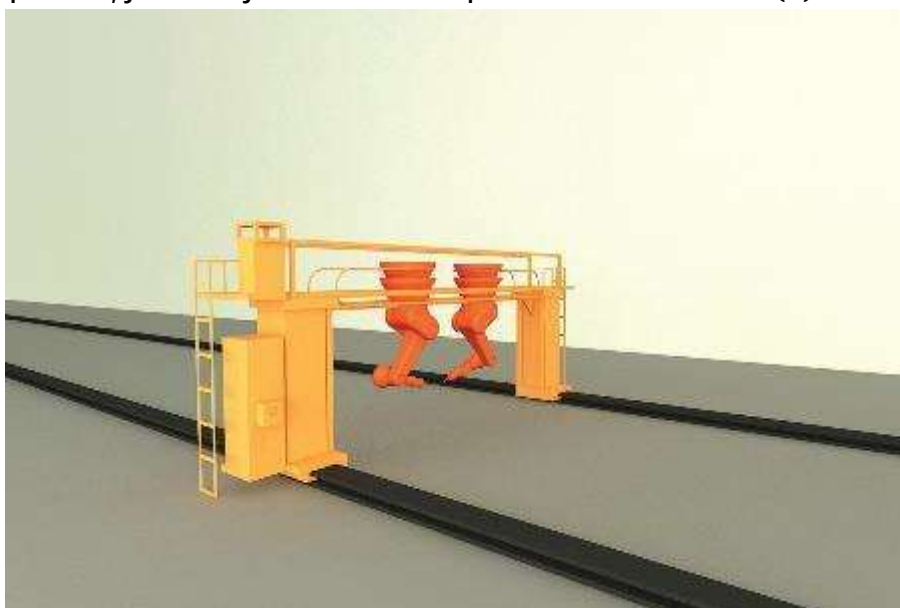
TERMES – Termite-Inspired Robot Construction Team		
	celek	efektor
DoF	2+	1+
Vertikální pohyb	Servomotory	Servomotory
Horizontální pohyb	Servomotory	Servomotory
Všesměrný pohyb	x	Servomotory
Zdroj energie	Baterie	
Zdroje materiálu	Interní	

2.1.10. Welding Robot for Steel Girders (Svářecí robot pro ocelové nosníky)

Sváření za pomoci svářecích robotů je dnes běžný způsob provádění těchto prací v kontrolovaném prostředí. Pro sváření dlouhých prvků je zapotřebí zajistit i pohyb robotů ve směru delší strany svařovaného prvku.

Svářecí roboty pro ocelové nosníky od společnosti Kawasaki jsou používány převážně pro přivaření výztuh do ocelových nosníků. Systém se skládá ze dvou velkých svářecích robotů zavěšených na konstrukci portálového jeřábu, který jim umožňuje pohyb. Portálový jeřáb dovoluje robotům pohyb ve dvou směrech (X a Y). Dva Kawasaki Js-6 svářecí

roboty jsou vybaveny svářecími koncovými efekty, které poskytují další DoF a zároveň sváří. Systém je vybaven několika senzory, které aktivně detekují pozici svářeného materiálu a robotů. Mezi tyto senzory patří kamery pro detekci hran a okrajů a laserové senzory pro aktivní detekci pozice. Světelné senzory dovolují detekci začátku a konce pohybu. Jako základ pro kvalitu se používá obloukový senzor, který sleduje, zda je svár proveden v dostatečné kvalitě. Bezpečnostní systém zastaví proces, jakmile je detekována přítomnost člověka. (2)



Obrázek 18 - Welding Robot for Steel Girders

Tabulka 13

Welding Robot for Steel Girders		
	celek	efektor
DoF	3+	6+
Vertikální pohyb	Servomotory	Servomotory
Horizontální pohyb	Hydraulické válce/ Kolový po kolejích	Servomotory
Všesměrný pohyb	x	Servomotory
Zdroj energie	Elektrický proud	
Zdroje materiálu	externí	

2.1.11. Facade Coating and Painting Robot (fasádní nátěrové a stříkací roboty)

Systém nátěrů a výmaleb fasádních konstrukcí je výjimečný díky inovativnímu přístupu k vertikálnímu pohybu, který doposud nebyl ve stavebnictví použit na automatizované stroje.

Tento robotický systém byl vyvinut k automatizaci dokončování povrchů, jako například mytí, leštění, příprava povrchů a nátěru. Robot se skládá z autonomně řízené jednotky, která je vybavena systémem vakuového sání (který zajišťuje dostatečnou adhezi pro vertikální pohyb po stěně), koncovým efektem, střešní jednotkou (sloužící jako záloha v případě selhání vakuového systému a pro horizontální přemístění) a podavačem nátěrové/čistící hmoty, který je umístěn na zemi. Robot může být vybaven různými koncovými efekty, včetně brusek, leštícími hroty a rozprašovači nástřiků. Robot je pod dohledem operátora, který dálkově ovládá robota ze stanoviště, a zároveň používá kamerový systém, jenž je nainstalován na robotu. Robot se může pohybovat po různých površích fasád, jako například skleněných, betonových, a dokonce se může pohybovat po i po površích lehce nepravidelných. Robot je také schopný detekovat větší překážky na povrchu a přerušit automaticky operaci, pokud je to za potřebí. (2)



Obrázek 19 - Facade Coating and Painting Robot

Tabulka 14

Facade Coating and Painting Robot		
	celek	efektor
DoF	2+	1+
Vertikální pohyb	Kolový pohyb	Dle typu efektoru
Horizontální pohyb	x	x
Všesměrný pohyb	x	x
Zdroj energie	Elektrický proud	
Zdroje materiálu	Externí	

2.1.12. Robot for Painting Exterior Walls (Roboty pro nástřik vnějších stěn)

Další systém pro povrchové úpravy fasádních konstrukcí, který má předem stavebně definované dráhy pohybu. Využívá kolejnic a závěsných lan pro pohyb po konstrukci.

Tento typ robotů se používá pro automatizovaný nástřik fasád na výškových budovách. Systém zaručuje zvýšení efektivity, přesnosti a zároveň snížení počtu manuálně prováděných prací se zvýšeným rizikem pád z výšky/do hloubky. Systém se sestává ze tří hlavních částí:

1. Mobilní kolejnicemi vedená řídicí jednotka, která je vybavena mechanismem, který ovládá konkrétní nástřikový efektor v horizontálním směru.
2. Střešní jednotka, ze které je robot zavěšený (tato jednotka zahrnuje kontrolní kabinu a nádrž s barvivem/krycím materiálem).
3. Komponent, pro dodávku barviva/krycího materiálu.

Robot se pohybuje vertikálně po vodících kolejnicích, které byly dříve namontovány do fasády. Nástřikové efektory jsou v nečinné pozici zadokovány tak, že nemůže unikat žádný přebytečný materiál. Množství senzorů umožňuje provést nástřik velmi přesně kolem fasádních prvků, jako jsou např. okna. Po dokončení každé vertikální sekce je robot vyzdvihnut na střechu, kde ho střešní jednotka horizontálně přesune na další vertikální úsek. (2)



Obrázek 20 - Robot for Painting Exterior Walls

Tabulka 15

Robot for Painting Exterior Walls		
	celek	efektor
DoF	7	6
Vertikální pohyb	Lanový naviják	Servomotory/hydraulické válce
Horizontální pohyb	X	Pohyb po vodící kolejnici
Všesměrný pohyb	x	Kombinace výše zmíněných
Zdroj energie	Elektrický proud	
Zdroje materiálu	Interní	

2.1.13. HRP Robot Series (Roboty imitující člověka)

HRP je robot, který umožňuje zastoupení komplexní lidské činnosti robotem. Tento druh robota může být využit i v dynamickém prostředí.

Jeden z hlavních účelů, proč byly vyvinuty HRP roboti je, aby mohli spolupracovat s člověkem na staveništi. Vzhledem k jejich vývoji a zdokonalování jsou tyto roboti schopni vydržet v provozu až 120 minut. Jsou poháněni sérií baterií a umí provádět lehké práce dle naprogramování. Tito roboti jsou vyráběni ve velmi malém množství, což se značně promítá na jejich pořizovacích nákladech. Nicméně se předpokládá, že masová produkce v budoucnu sníží náklady na přijatelnou hodnotu. Zatím jsou však tyto roboti demonstrováni pouze jak nosí, nebo drží stavební materiál, spolupracují při montáži sádkartonových stěn, a řídí stavební stroje jako jsou rypadla a vysokozdvizné vozíky. (2)



Obrázek 21 - HRP Robot Series

Tabulka 16

HRP Robot Series		
	celek	efektor
DoF	Až 42	3+
Vertikální pohyb	Servomotory/Hydraulické válce	Servomotory/Hydraulické válce
Horizontální pohyb	Servomotory/Hydraulické válce	Servomotory/Hydraulické válce
Všesměrný pohyb	Servomotory/Hydraulické válce	Servomotory/Hydraulické válce
Zdroj energie	Baterie	
Zdroje materiálu	Interní	

2.1.14. Bio-Inspired Facade Inspection Robot C-Bot (Roboty inspirovány přírodou pro kontrolu fasád)

C-Bot je robot inspirován přírodou, a je zamýšlený jako koncept pro inspekci fasád budov. Hlavní tělo může být vybaveno senzory například ultrasonickými senzory, které umožňují detekci netěsností, škod a koroze uvnitř železobetonových konstrukcí. Konstrukce těla a končetin umožňuje všesměrný pohyb robota, kolem překážek, nebo rohů fasády.



Obrázek 22 - Bio-Inspired Facade Inspection

Současný návrh přísavných koncových efektorů se inspiroje opět v přírodě, a to konkrétně u gekonů. Adheze mezi materiály a koncovým efektozem by byla zajištěna bez potřeby externího zdroje energie, a to na principu Van der Waalsových sil. (2)



Obrázek 23 - Foottop of Bio-Inspired Facade Inspection

Tabulka 17

Bio-Inspired Facade Inspection		
	celek	efektor
DoF	15+	2+
Vertikální pohyb	Servomotory	Servomotory
Horizontální pohyb	Servomotory	Servomotory
Všesměrný pohyb	Servomotory	Servomotory
Zdroj energie	Baterie	
Zdroje materiálu	Interní	

2.1.15. Google's crabot

Jedná se o koncepční návrh kombinace robotů a jeřábů. Předpokládá se, že v budoucnu by nové budovy disponovaly těmito roboty, které by byly schopny přestavět interiér téměř jako nábytek. Nebavíme se zde však jen o nábytku, ale bavíme se zde o modulárních částech budovy (například podlaží), které by mohly být přeskupeny, když by bylo zapotřebí. (3)



Obrázek 24 - Google's crabot

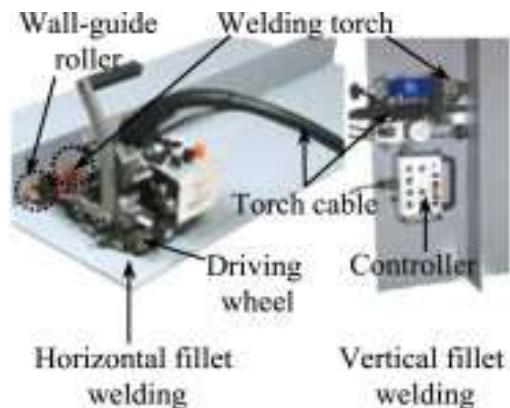
2.2. Roboty pro stavbu lodí

Pro stavbu ocelových lodí se dnes používají zejména svářecí roboty. Díky této technologii lze dosáhnout vyšší přesnosti a kvality, než kdyby byla prováděna manuálně. (4)

2.2.1. Svářecí roboty v otevřeném prostoru

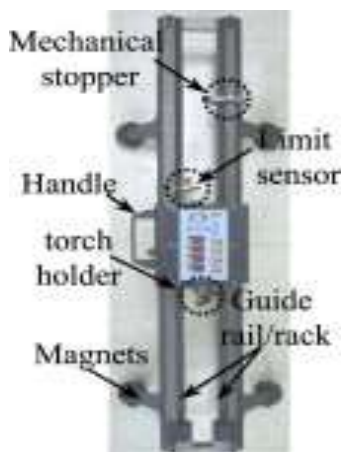
Trupy ocelových lodí jsou vytvořeny z několika svařených ocelových plátů. Pro velký počet svárů a zvýšení jejich kvality byly vyvinuty tyto roboty (2):

1) Pro horizontální sváry



Obrázek 25 - Horizontal welding bots

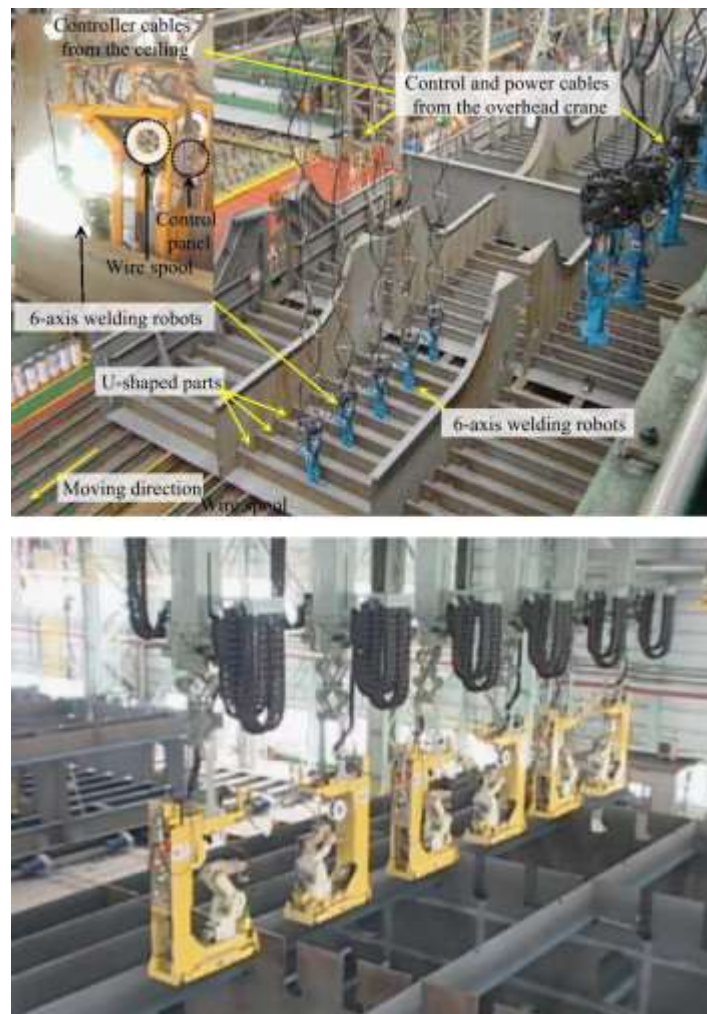
2) Pro vertikální sváry



Obrázek 26 - Vertical welding bots

2.2.2. Svářecí roboty v uzavřeném prostoru

Po vyhotovení hrubé konstrukce trupu je zapotřebí tento trup dodatečně vyztužit. Při přidání výztuh již není možné použít roboty z předchozích kapitol, ale je zapotřebí použít roboty, které mají více DoF a jsou mobilní i ve vertikální rovině. Jako řešení se prokázal Welding Robot for Steel Girders, kde je možné docílit přesných svarů i ve velmi komplikovaných styčnicích. (4)



Obrázek 27 - Shipwelding robots

2.3.Experimentální roboty

V této kapitole jsou zmíněny experimentální roboty, které řeší pohyb zcela odlišnými způsoby, než je běžné.

2.3.1. Particle robots

Tyto roboty jsou výsledkem alternativního přístupu k dnešním robotům. Cílem projektu bylo vyvinout roboty, které budou mít co nejméně DoF a budou co nejvíce využitelné v různých odvětvích. Princip jejich pohybu byl inspirován v biologii, a to na buněčné úrovni. Pohyb je možný pouze pokud počet robotů v systému je větší než 1 a pohybují se tak, že se skupina robotů „roztáhne“ (zvětší svou velikost) a druhá skupina je tímto pohybem posunuta, následně se pohyb opakuje v opačném pořadí. Tento typ robotů má velký potenciál, a to především díky jeho

soběstačnosti (pokud se jeden z robotů porouchá, neohrožuje to zbytek systému) (5)



Obrázek 28 - Particle robots

2.3.2. Cubli

Tento experimentální robot funguje na principu obráceného kyvadla, je schopná se sama pohybovat, a to díky schopnosti překlápět se, nebo dokonce skákat. Kostka je schopná balancovat na jakékoliv její hraně, nebo dokonce i vrcholu, a to i za vlivu vnějšího prostředí (dokonce i když se do ní zatlačí prstem, tak se dokáže opět stabilizovat) (6)



Obrázek 29 - Cubli

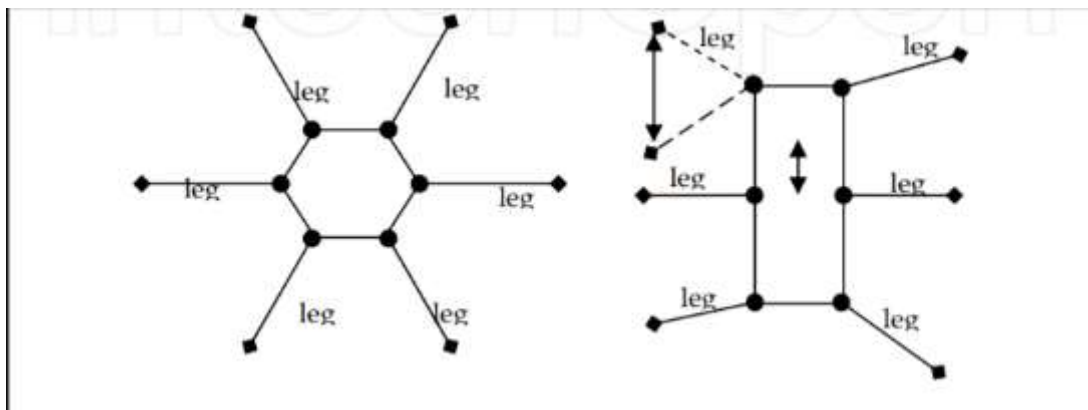
Z výše vypracované rešeršní studie je patrné, že pro vertikální pohyb po konstrukcích se používají především roboty za použití vakuového sání, nebo předem připravené konstrukce. Pohyb po ocelových konstrukcích není doposud řešen robotickými systémy, a to především z důvodu velké tvarové rozmanitosti ocelových konstrukcí.

2.4.Hexapodické miniboty

Hexapodický minibot je robot, který disponuje šesti končetinami. Hexapody, kvadrupedy a bipedy se řadí mezi kráčivé miniboty. Kráčiví miniboti mají unikátní vlastnosti, které jim dovolují překonat kolové roboty v náročných a obtížnějších terénech. Tato výhoda vyplývá ze zvýšené mobility, tím pádem jsou vhodnější do užití v reálném světě. Nevýhodou kráčivých robotů je jejich menší rychlost a obtížnější ovladatelnost. (7)

2.4.1. Typy hexapodických minibotů dle tvaru

Typické hexapodické miniboty mohou být rozděleny do dvou typů, a to rektangulárního a hexagonálního typu. Rektangulární hexapody jsou inspirovány z hmyzu, který má nohy rozmístěné symetricky po dvou stranách. Každá strana má tři nohy. Hexagonální hexapody mají šest nohou, které jsou rozděleny symetricky dle svého středu těla (čili může být hexagonální, nebo kruhový). (8)



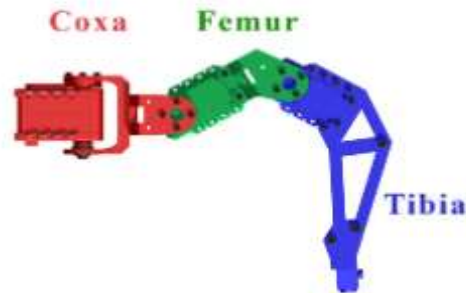
Obrázek 30 - Tvary hexapodických minibotů (8)

2.4.2. Typy hexapodických minibotů dle stupňů volnosti

Hexapodické miniboty můžeme dělit i podle stupňů volnosti jejich končetin. "Počet stupňů volnosti robota je nejmenší počet reálných parametrů potřebných k reprezentaci jeho konfigurace." (9)

Končetiny jsou rozděleny na části, které jsou pojmenovány dle biologické terminologie na coxa, femur a tibia. Tyto části jsou spolu spojeny jednotlivými klouby. Počet a možnosti pohybu kloubů nám

určuje kolika stupni volnosti daná končetina disponuje. Při popisu hexapodických minibotů se udává, kolik stupňů volnosti má jedna končetina, nebo celý robot.



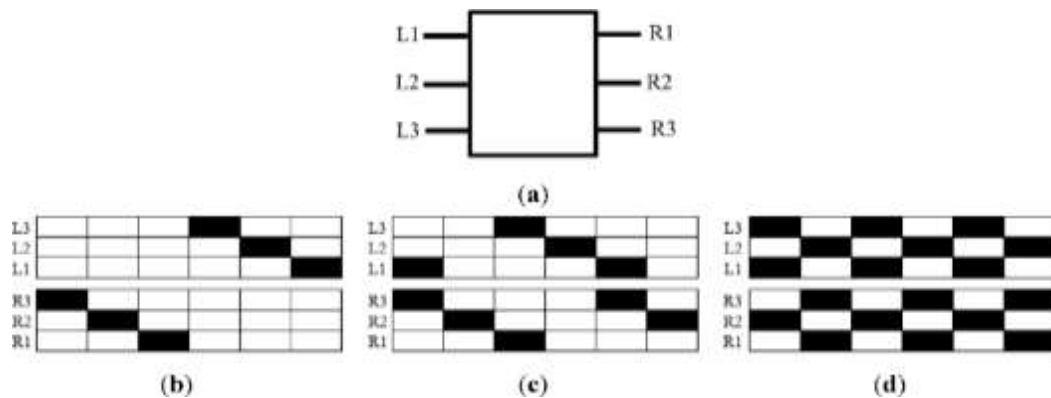
Obrázek 31 - Noha hexapodického minibota (25)

K umožnění pohybu je zapotřebí alespoň jeden stupeň volnosti na končetině, který umožní nepřetržité otáčení o 360°. Tyto roboty se nazývají RHex. (10) Hexapodické miniboty mohou mít až šest stupňů volnosti na jednu nohu, jakýkoliv další stupeň volnosti již není zapotřebí, protože při šesti stupních volnosti je dosah robota limitován pouze délkou jeho prvků. Hexapodické miniboty mají nejčastěji dva až tři stupně volnosti na jednu končetinu.

2.4.3. Typy chůze hexapodických minibotů

Hexapodické miniboty mají mnoho typů stabilní chůze, jako je pravidelná, nepravidelná a opakující se chůze.

Opakující se chůze může být klasifikována dle počtu nohou, které slouží jako podpora ve fázi pohybu stroje. A to jako 3 + 3, kde 3 slouží jako podpory a 3 nohy se pohybují, 4 + 2 kde 4 nohy slouží jako podpory a 2 jsou použity pro chůzi, 5 + 1, kde se pohybuje v jednom okamžiku pouze jedna noha a zbylých 5 slouží jako podpory a tzv. vlna.



Obrázek 32 - a) Model hexapodického minibota, b) chůze 5+1, c) vlna, d) chůze 3+3 (11)

Pro vyhodnocení efektivity chůze jsou stanoveny tyto indikátory

Faktor střídání

Faktor střídání určuje, jaká část pohybu ještě zbývá provést, aby bylo dosaženo jednoho $\beta = \frac{\text{support period}}{\text{cycle time}}$ celého kroku (11)

Freudovo číslo

$F_{r2} = \frac{V^2}{gh}$ kde V je rychlost chůze. G je gravitační zrychlení a h je výška kyčelního kloubu od země (12)

Specifická odolnost

$\varepsilon = \frac{E}{Mgd}$ Je bezrozměrná hodnota, která vyhodnocuje energetickou účinnost robota, kde E je celková spotřeba energie na překonání vzdálenosti d, M je celková hmotnost robota/vozidla a g je gravitační zrychlení. (13)

Velikost stability

Pro dynamicky se pohybující roboty můžeme definovat velikost stability jako minimální vzdálenost bodu s nulovým momentem k hraničním podpůrného polygonu. (14)

5+1 (Vlna)

Každá noha je v jiné fázi, tudíž je ve vzduchu pouze jedna noha, zatímco zbylých pět slouží jako stabilní podpory. Tento typ chůze je ze všech

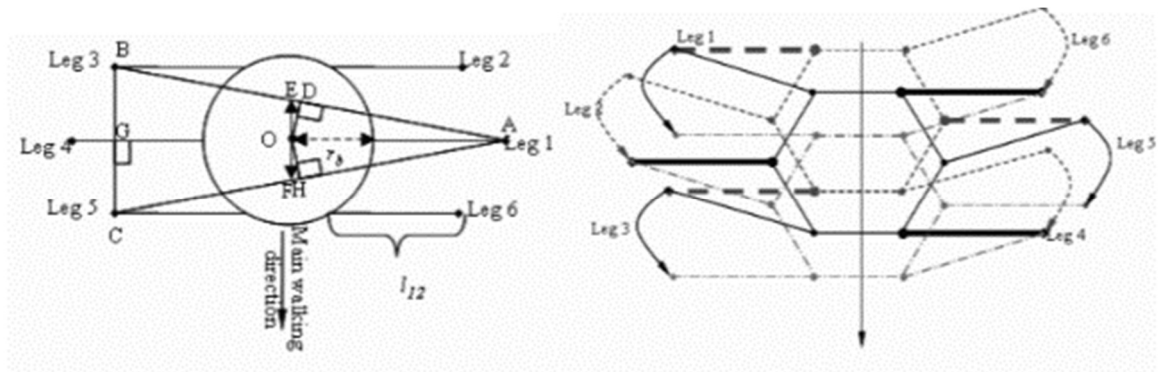
výše uvedený nejstabilnější, a tím pádem i nejvhodnější do náročného terénu. Faktor střídání činí $\beta=5/6$.

Vlnění

Způsob chůze je charakteristický tím, že nohy jsou rozděleny do čtyř skupin – L1R3, R2, L3R1, L2. Vždy, když je zvednuta jedna skupina nohou, tak zbylé zaručují dostatečnou stabilitu a zároveň pomocí servomotorů se pohne tělo ve směru pohybu. Pohyb o jednu jednotku se skládá z pěti fází. Čili faktor střídání činí $\beta=5/8$. Tento způsob pohybu je u obdélníkových hexapodů.

3+3 tripodí chůze

Tripodí chůze je charakteristická tím, že má tři nohy stojící na zemi a tyto nohy tlačí tělo robota ve směru chůze (obvykle dopředu), zatímco zbylé tři nohy se zvednou a pohnou se ve směru chůze. V každé fázi chůze se



Obrázek 33 - Pohyb hexapodického minibota způsobem 3+3 (8)

tělo pohne ve dvou krocích čili faktor střídání $\beta=1/2$. (15)

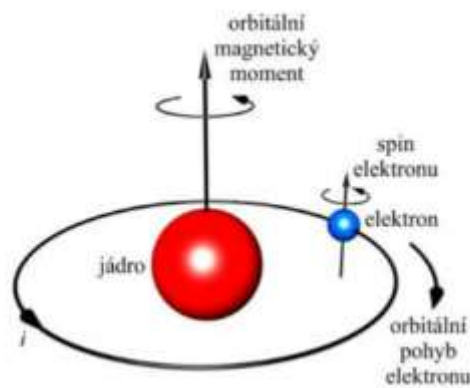
Z obrázku je patrné, že skupiny nohou, které se střídají ve dvou fázích jsou rozděleny do skupin L1P2L3 a P1L2P3, jinak by došlo k nestabilnímu pohybu robota.

4 + 2

Způsob chůze je charakteristický tím, že nohy jsou rozděleny do párů L1P1, L2P2, L3P3. Vždy, když dva páry nohou stojí na zemi, aby držely tělo robota, tak zbylý pár udělá pohyb dopředu. Pohyb o jednu jednotku se skládá ze tří fází. Čili faktor střídání činí $\beta=2/3$. Tento způsob pohybu je u obdélníkových hexapodů.

2.5. Magnetický jev

V této kapitole je věnována pozornost teoretickému pozadí magnetismu, typologii magnetů a způsobům demagnetizace s cílem získat znalosti nutné k návrhu zařízení, umožňujícího pevného



Obrázek 34 - Orbitální pohyb elektronu (překresleno z (16))

přichycení k ocelové konstrukci.

Pro lepší pochopení magnetického jevu a také jeho vlastností nám poslouží model atomu. Elektron obíhá kolem jádra atomu po orbitální dráze.

Pohyb elektronu podle osy jádra vytváří magnetický moment, který nazýváme orbitální magnetický moment. (16) Magnetický moment vzniklý od vlastního otáčivého pohybu elektronu kolem své osy nazýváme spin elektronu. Tomuto magnetickému momentu říkáme spinový moment. Spinový moment je zároveň elementární magnetický moment atomu. Je také nazýváme Bohrov magnetron. Hodnota

spinového momentu je $m_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$. Orbitální moment je násobkem této hodnoty. I jádro atomu má svůj vlastní magnetický moment. Ten lze však pro svoji malou hodnotu u výsledného magnetického momentu atomu zanedbat. (16)

2.5.1. Vliv magnetického pole na feromagnetické látky

Feromagnetické materiály se vyznačují tím, že jejich magnetické momenty mají stejný směr, a tím se navzájem podporují. Mají magnetický moment, aniž by na ně působilo jakékoliv vnější magnetické pole. Feromagnetický stav vzniká při poměru mřížkové soustavy (a) a poloměru orbitu 3d (r). Pokud se podíl a/r pohybuje v intervalu 2,8 až 6,2, tak nastává feromagnetický stav. Feromagnetismus nemůže nastat u látek v plynném nebo kapalném stavu, protože vzdálenost jednotlivých atomů je příliš velká. Vlastnosti feromagnetických látek mají prvky železo (Fe), nikl (Ni), kobalt (Co) a kovy ze vzácných zemin gadolinium (Gd) a dysprosium (Dy). (17) (18)

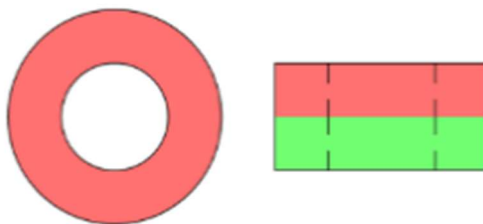
2.5.2. Typy magnetů

Dle rozdělení tvaru a polarizace

Každý magnet má minimálně dva póly, jižní (S) a severní (N). V dnešní době lze vyrobit magnety různých tvarů s různou polohou jejich polarizace. Nejčastějšími typy jsou tyto:

Axiální magnetizace

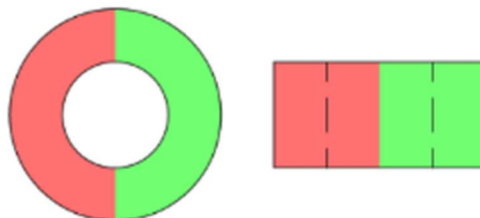
Nejběžnější typ magnetu, plochá podstava válce má adhezní funkci.



Obrázek 35 - Axiální magnetizace (26)

Diametrální magnetizace

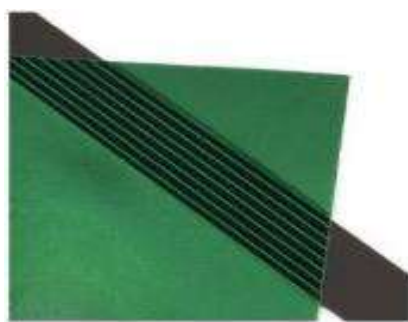
Stěny válce mají adhezní funkci.



Obrázek 36 - Diametrální magnetizace (26)

Multipólová magnetizace

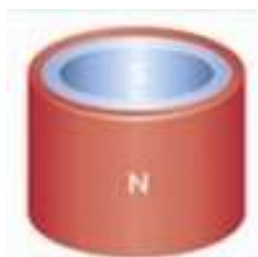
Využití především ve skladovacích prostorách, skládá se z několika pólů spojených v řadě za sebou.



Obrázek 37 - Multipólová magnetizace (26)

Radiální magnetizace

Použití zejména ve strojírenství, robotice a v chirurgii. Nejznámější zástupci: **Bipolární radiální magnetizace**



Obrázek 38 - Bipolární radiální magnetizace (26)

Multipolární radiální magnetizace



Obrázek 39 - Multipolární radiální magnetizace (26)

Dle materiálu

Feritové permanentní magnety

Nejběžnější typ magnetů, vyrábí se z keramických oxidů (80 % oxidu železa a 20 % oxidu baria nebo stroncia). (19) Jejich vlastnosti lze dohledat níže viz tabulka (Tabulka 18 Tabulka 18)

Tabulka 18 (19)

Třída	Koercivita		Remanence B_r [mT]	Max. součin $(BH)_{max}$ [kJ/m ³]	Curieova teplota °C
	H_{cB}	H_{cj}			
	[kA/m]				
Y10T(C1)	125~160	210~280	200~235	6.5~9.5	≤250
Y22H	220~250	280~320	310~360	20.0~24.0	≤250
Y25	135~170	140~200	360~400	22.5~28.0	≤250
Y28	175~210	180~220	370~400	26.0~30.0	≤250
Y28H-1	240~260	250~280	380~400	27.0~30.0	≤250
Y30(C5)	191~210	199~220	380~385	26.0~28.0	≤250
Y30BH	223~235	231~245	380~390	27.0~30.0	≤250
Y33	220~235	225~240	410~420	31.5~33.0	≤250
Y35	175~195	180~200	400~410	30.0~32.0	≤250
C8	235~255	242~265	385~390	27.8~30.0	≤250
C10	288~300	280~287	400~410	30.4~31.9	≤250
Y38	285~305	294~310	440~460	36.6~40.6	≤250
Y40	330~354	340~360	450~460	37.6~41.8	≤250

Alnico

Jedná se o magnety na bázi slitiny Al-Ni a Al-Ni-Co. Tyto magnety jsou zejména výhodné do prostředí s velmi vysokými teplotami. (20) Jejich vlastnosti lze dohledat níže viz tabulka (Tabulka 19)

Tabulka 19 (21)

1. Třída	Koercivita	Remanence	Max. součin	Curieova teplota
	H_{cB} [kA/m]	B_r [mT]	$(BH)_{max}$ [kJ/m ³]	°C
LNG12 ¹⁾	45	720	12.4	810
LNG 37	48	1200	37.0	860
LNG 40	48	1250	40.0	860
LNG 60	59	1350	60.0	860
LNGT 32	100	800	32.0	860
LNGT 40	110	800	40.0	860
LNGT 60	110	900	60.0	860
LNGT 72	112	1050	72.0	860

Permanентní magnety ze vzácných zemin

a) Samariové permanentní magnety

Jsou magnety s poměrně vysokou remanencí a zároveň vyšší koercivitou, než je u feritů. Jedná se o sloučeniny materiálů železa (Fe), niklu (Ni), a kobaltu (Co) s jedním nebo dvěma vzácnými prvky. (21) Jejich vlastnosti lze dohledat níže viz tabulka (Tabulka 20)

Tabulka 20 (22)

Třída	Koercivita	Remanence	Max. součin	Max. teplota použití
	H_{cB} [kA/m]	B_r [mT]	$(BH)_{max}$ [kJ/m ³]	°C
YX-18	620-648	850-900	127-143	250
YX-20	653-717	920-960	150-167	250
YX-24	730-770	960-1000	175-190	250
YXG-24	637-732	950-1020	175-190	300

YXG-26	748-796	1020-1050	195-215	300
YXG-28	756-796	1050-1080	205-220	300

b) Neodymové permanentní magnety

Neodymové magnety jsou relativně nové (vyvinuty v 80. letech dvacátého století). Tyto magnety mají při pokojové teplotě nejvyšší energetický součin, vysokou remanentní indukci (okolo 1,2 T) a zároveň vysokou koercivní sílu (okolo 800 kAm⁻¹). Díky těmto vlastnostem je možné výrazně zmenšit jejich velikost oproti klasickým feritovým magnetům. Jedná se o sloučeniny materiálů železa (Fe), neodymu (Nd) a boru (B).

Nevýhodou neodymových magnetů je jejich citlivost na korozi a mechanická poškození. Tento druh magnetů oproti ostatním je také nejméně tepelně odolný, z počátku ztrácely svou schopnost okolo 100 °C, ale dnes již vydrží teploty kolem 200 °C. (22) Jejich vlastnosti lze dohledat níže viz tabulka (Tabulka 21).

Tabulka 21 (20)

Třída	Koercivita		Remanence	Max. součin	Max. teplota použití
	H _{C_B}	H _{C_i}	B _r [mT]	(BH) _{max} [kJ/m ³]	°C
	[kA/m]				
N35	≥868	≥955	1170-1210	263-287	90
N38	≥868	≥955	1210-1250	287-310	90
N40	≥835	≥955	1260-1290	318-324	90
N42	≥835	≥955	1290-1320	324-342	80
N45	≥835	≥955	1330-1370	342-366	80
N50	≥842	≥876	1400-1440	324-342	70
N52	≥842	≥876	1440-1470	394-414	70
N30H	≥810	≥1353	1080-1120	232-239	120
N33H	≥842	≥1353	1140-1170	247-263	120
N35H	≥868	≥1353	1170-1210	263-279	120
N38H	≥915	≥1353	1220-1260	287-303	120

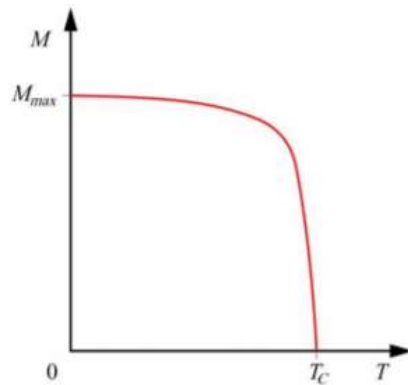
N40H	≥915	≥1353	1260-1290	303-318	120
N42H	≥899	≥1353	1290-1320	318-334	120
N44H	≥923	≥1274	1330-1360	334-350	110
N30SH	≥804	≥1592	1080-1120	223-239	150
N33SH	≥844	≥1592	1140-1170	247-263	150
N35SH	≥860	≥1592	1170-1210	263-279	150
N38SH	≥860	≥1592	1210-1250	287-302	150
N40SH	≥860	≥1592	1260-1290	303-318	150
N42SH	≥907	≥1512	1300-1330	318-334	140
N30UH	≥804	≥1990	1080-1120	223-239	180
N35UH	≥836	≥1990	1170-1210	263-278	180
N38UH	≥907	≥1990	1220-1260	287-303	180
N30EH	≥804	≥2388	1080-1120	223-239	200
N33EH	≥820	≥2388	1140-1170	247-263	200
N35EH	≥860	≥2388	1170-1210	263-279	200

2.5.3. Způsoby demagnetizace

Vlivem teploty

Všechny druhy magnetů mají svá teplotní maxima, a to teplotu T_c při které nedochází k metalurgickým změnám. Při dosažení této teploty lze materiál znovu zmagnetizovat na původní vlastnosti. Dále jsou náchylné na teploty, při kterých dochází k metalurgickým změnám. Po dosažení této teploty je návrat k původním hodnotám nemožný z důvodu přeskupení struktury molekul. Zvýšení teploty materiálu způsobí oscilační pohyb atomů v krystalické mřížce okolo své střední hodnoty. Tím, že atomy oscilují, se naruší seřazení magnetických momentů. Narušením této rovnováhy dochází ke snižování magnetizace. (16)

Při teplotě T_c se paralelní uspořádání momentů zcela ztratí a momenty se uspořádají náhodně. Tato teplota je označována jako Curieova teplota. Například pro železo je Curieova teplota 770 °C. Nejmenší Curieovu teplotu mají vzácné kovy. (16)



Obrázek 40 - Průběh magnetizace při zvyšování I
(16)

Průměrné teploty ocelových konstrukcí v halách (kde není hutní, slévárenská, případně jiná činnost s velmi vysokými teplotami) se pohybují kolem 35 °C, takže vliv teploty na magnetické vlastnosti je malý. Maximální naměřené teploty ocelových střeš dosahují 100 °C. Avšak u magnetů ze vzácných zemin je tato teplota důležitá, neboť maximální teplota použitelnosti může být i pod touto teplotou. (16)

Vystavení jinému magnetickému poli

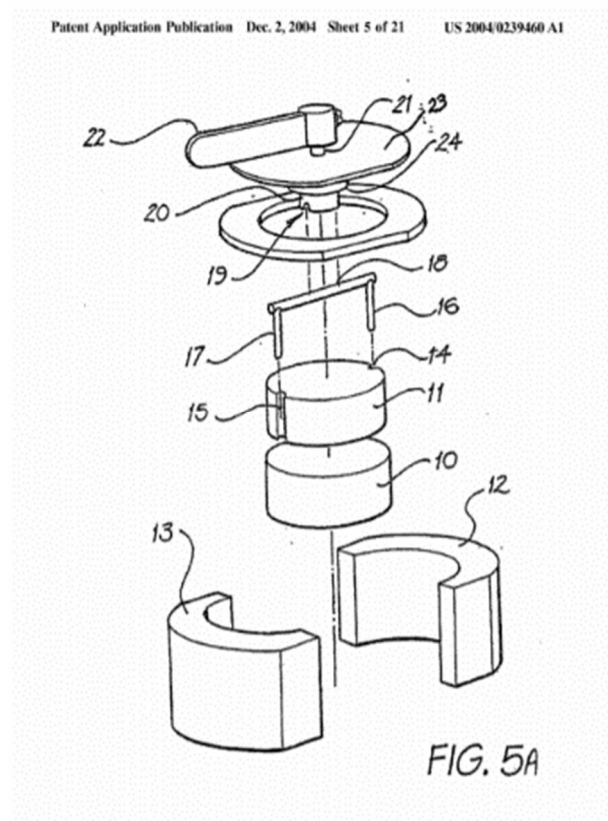
Magnetické vlastnosti lze snížit vystavením magnetu jinému magnetickému poli s opačnou orientací. (16)

Radioaktivní záření

Vlivem záření může docházet k narušení struktury molekul, tudíž se naruší krystalická mřížka a postupně se narušuje seřazení magnetických momentů. Tím pádem se můžou snižovat vlastnosti jako je koercivita, magnetická indukce a remanentní magnetická indukce, a nepřímo mohou být ovlivněny vnitřní vlastnosti jako Curieova teplota. K těmto změnám může docházet až po dosažení určité intenzity záření, která se různí dle druhu materiálu. (16)

2.5.4. Patent EP1243006B1

V průběhu hledání využitelné technologie jsem vyhledal patent, který pojednává o vypínatelných magnetech. Uvědomil jsem si, že tento princip by bylo možné využít při návrhu upínacího mechanismu. Tento patent pojednává o zařízení, které umožňuje „vypínat“ magnety. Jedná se o zařízení, jehož hlavní části jsou dva samostatné permanentní



Obrázek 41 - Patent EP1243006B1 (23)

magnety, schránka a páčka pro změnu polohy jednoho z magnetů. (23)

Popis objektů:

Ad 10 Permanentní magnet (s diametrální magnetizací, nepohyblivý)

Ad 11 Permanentní magnet s výliskem (s diametrální magnetizací, pohyblivý)

Ad 12 První část schránky (feromagnetický materiál)

Ad 13 Druhá část schránky (feromagnetický materiál)

- Ad 14 Výlisek pro zachycení objektu 16)
- Ad 15 Výlisek pro zachycení objektu 17)
- Ad 16 Kolík pro zachycení objektu 11 z jedné strany
- Ad 17 Kolik pro zachycení objektu 11 z druhé strany
- Ad 18 Spojka objektů 16 a 17)
- Ad 19 Drážka pro objekt 18)
- Ad 20 Čep s vylisovanou drážkou
- Ad 21 Vyčnívající čep pro osazení páčky na měnu polohy objektu 11)
- Ad 22 Páčka pro změnu polohy objektu 11)
- Ad 23 Horní kryt zařízení
- Ad 24 Prachotěsné a vodotěsné těsnění (24)

Při bližším zkoumání tohoto mechanismu jsem si ovšem všiml řady výhod, ale i nevýhod, které jsem rozepsal níže do tabulky.

Tabulka 22

Výhody	Nevýhody
Kompaktní řešení	Magnet s výlisky (nestandardní řešení)
	Při porušení prachotěsného těsnění může dojít k „zadření“ mechanismu
	Nemožnost upravovat přídržnou sílu mechanismu
	Příliš mnoho komponentů

Z těchto výše zmíněných důvodů jsem se rozhodl pro zhotovení vlastního mechanismu.

3. Praktická část

3.1. Cíl práce

Cílem diplomové práce je navrhnout a sestavit upínací mechanismus, který umožní pohyb hexapodickému minibotu po feromagnetických konstrukcích v nekonvenčních směrech, jako je svislé a šikmé stoupání i klesání a zavěšený pohyb. Tento mechanismus má umožnit úsporu energie oproti běžným elektromagnetům. Cílem je osadit tento mechanismus na hexapodického minibota a následně ověřit, zda umožňuje pohyb po feromagnetické konstrukci.

3.2. Hypotéza

Návrh pohybu robota po ocelových konstrukcích předpokládá využití fyzikálních vlastností těchto látek, konkrétně jejich feromagnetických vlastností. První výzvou bylo, jaký typ magnetů by vyhovoval vertikálnímu, nebo i horizontálnímu (myšleno závěsným způsobem) pohybu. Zda použít elektromagnety, anebo permanentní magnety.

Nevýhodou permanentních magnetů je, že jejich magnetickou energii nelze nikterak dočasně a zároveň efektivně snížit na tolik, aby její účinky byly zanedbatelné, nebo dokonce nulové. Z toho důvodu se začaly používat elektromagnety, které jsou ovšem vcelku energeticky nákladné a z toho důvodu je nelze používat pro šplhací roboty. Zatímco ze soustavy dvou permanentních magnetů je možné sestrojít tzv. vypínatelný magnet, kde dochází ke změně toku magnetické indukce. Magnety mají dva póly N (sever) a S (jih), přičemž se souhlasné póly odpuzují a opačné přitahují. Správným uspořádáním magnetů a umístěním do mechanismu, který jim umožní změnit svou polohu tak, aby se tyto póly „setkávaly“ v polohách N-S, S-N a N-S, N-S docílíme toho, že upravíme tok magnetické indukce. V jedné poloze (N-S, S-N) nám bude tok magnetické indukce znemožňovat interakci s vnějším prostředím a v opačné poloze (N-S, N-S) nám naopak umožní interakci s vnějším prostředím. (24)

3.3.Návrh architektury systému pro pohyb po ocelových konstrukcích

Na základě teoretické části s rešerší jsem se rozhodl využít pro pohyb po ocelových konstrukcích kombinace volně dostupného hexapodického



Obrázek 42 - PhantomX AX Metal Hexapod Mark III

minibota s upínacím zařízením vlastní konstrukce, jehož návrh, výroba a experimentální ověření je předmětem praktické části.

Pro účely této práce jsem využil hexapod typu PhantomX AX Metal Hexapod Mark III, který mi byl laskavě zapůjčen Dr. Gaëlem Ecochardem z CIIRC ČVUT. Tento model má vyměnitelné koncové součástky tzv. foottips, které jsem nahradil vlastním upínacím zařízením. Ovládat robota je možné za pomoci dálkového ovládání. Minibot neobsahuje žádná čidla zpětné kontroly ani detekci chyb pro opravu programu, tudíž se nejedná o kognitivního robota, který by byl schopný samostatné chůze.

Po nahrazení foottips upínacím mechanismem bylo zapotřebí přeprogramovat způsob pohybu robota. Programování pohybu, které bylo díky nutné odbornosti i zkušenostem nad rámec této diplomové práce zajišťoval Dr. Gaël Écorchard z CIIRC ČVUT.

3.4.Návrh upínacího zařízení

Před samostatným návrhem jsem spočítal úsporu elektrické energie, která by vznikla nahrazením elektromagnetů za upínací mechanismus. Jedná se pouze o hrubý výpočet, který má výslednou hodnotu nižší, než je skutečná úspora energie. Pro modelovou situaci pohybu 5+1 jsem jako zástupce elektromagnetů zvolil Elektromagnet Intertec ITS-MSM-



Obrázek 43- Elektromagnet Intertec ITS-MSM-1515-12VDC (31)

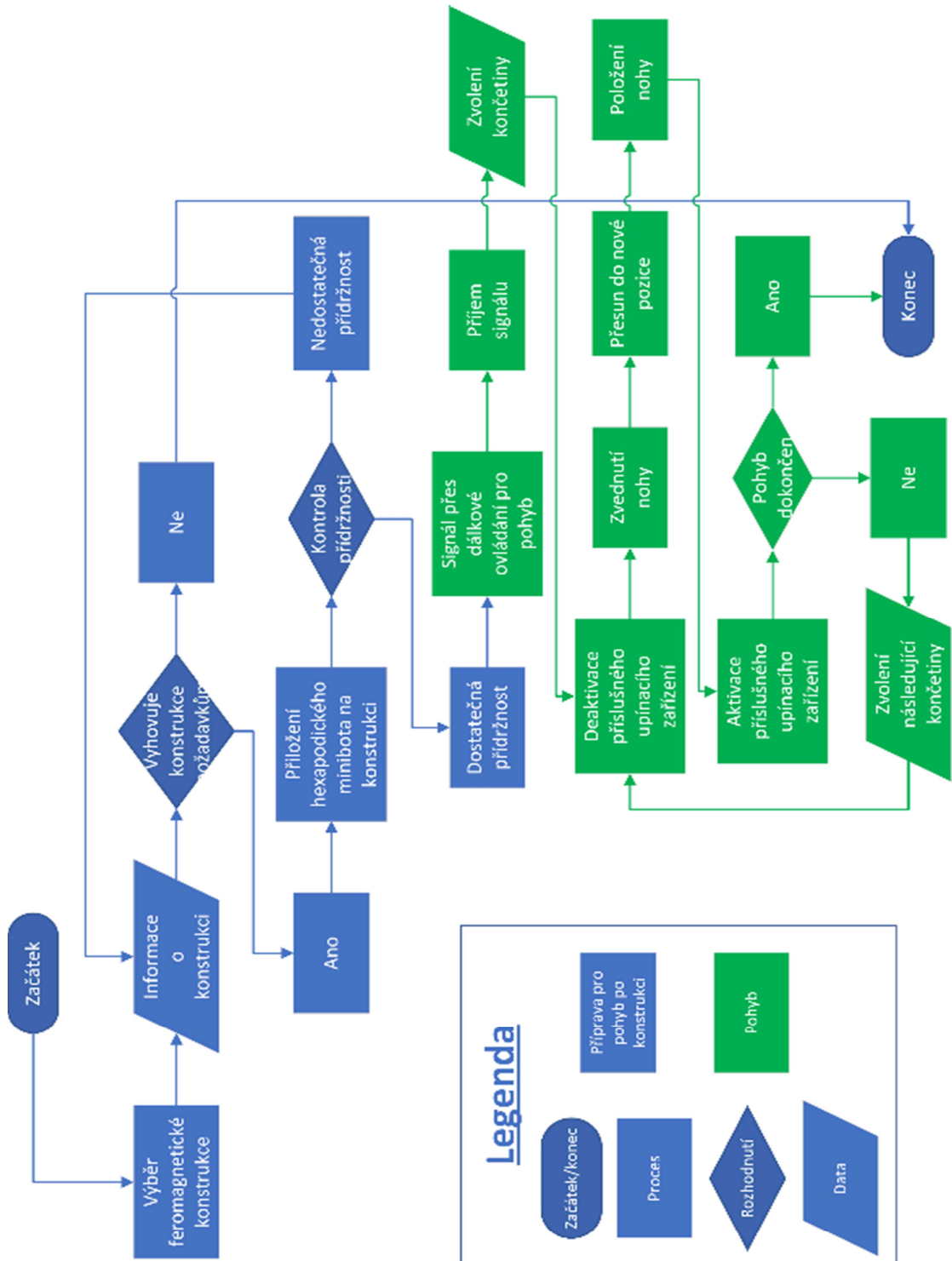
1515-12VDC, 20 N, 12 V/DC, 1.4 W, který má přídržnou sílu 20 N a výkon 1,4 W. V modelové situaci 5+1 lze prohlásit, že je vždy pět elektromagnetů v činné fázi a tím pádem je celková spotřeba energie tedy činí 7 Wh. Zatímco u upínacího mechanismu při pohybu 5+1 lze uvažovat, že aktivní bude vždy jeden servomotor MG996R. Servomotor spíná při napětí 6 V a proudu 0,9 A.



Obrázek 44 - MG996R

Jednoduchým vynásobením těchto dvou hodnot získáme hodnotu spotřeby energie, a to 5,49 Wh. Tato hodnota je nahodnocena, protože zanedbává dobu nutnou pro přemístění nohy do nové pozice a v této fázi servomotor nespíná. Z porovnání těchto dvou hodnot plyne, že

úspora energie činí cca 21,6 %. Další výhodou upínacího mechanismu je, že v klidové pozici (pokud se minibot nehýbe) nespotřebává žádnou elektrickou energii.



Obrázek 45 - Vývojový diagram pro pohyb hexapodického minibota po feromagnetické konstrukci

Návrh vypínatelného magnetu spočívá v principu přesměrování magnetické indukce do polootevřeného mechanismu, který za pomoci servomotoru dokáže měnit svou polohu. Servomotor bude napájený z baterie hexapodického minibota a bude otáčet mechanismem o 180° kolem jeho osy. Mechanismus je v klidovém stavu „zapnutý“, to znamená, že přitahuje feromagnetické materiály na spodním líci. Pohybem o 180° kolem své osy se mechanismus dostane do polohy „vypnuté“, kde reakce s vnějším okolím jsou nulové, nebo zanedbatelné. Následným pohybem o 180° zpět (bylo by možné otáčet ve stejném směru, avšak z hlediska dostupnosti servomotorů jsem zvolil servomotor MG996R, který má kroutící moment 15 kg*cm při napětí 6 V) se mechanismus dostane opět do polohy „zapnuté“.

Díky výše zmíněnému patentu jsem si byl jistý, že vydat se touto cestou bylo správné rozhodnutí, které vedlo k úspěšnému sestavení funkčního upínacího mechanismu.

Způsob pohybu hexapodického minibota bude určen dle naměřených hodnot přídržnosti magnetického mechanismu k podkladu.

Z výše zmíněných informací je patrné, že nejvhodnější druh magnetu pro tento mechanismus je neodymový magnet, a to díky jeho maximálnímu energetickému součinu. Avšak nevýhodou těchto magnetů je již zmíněná nižší teplotní odolnost, ta však při stavebních pracích nedosahuje takových hodnot s výjimkou prací s otevřeným ohněm, nebo při sváření. Teploty stavebních konstrukcí dosahují maximálně 100 °C.

Pro sestavení funkčního prototypu jsem zvolil poniklovaný neodymový magnet třídy N42, válcového tvaru o průměru 12 mm a výšce 6 mm, a to z důvodu jeho rozměrů, magnetizaci (diametrální magnetizace) a magnetické síle (cca 18,6 N).

Jeden z prvních problémů, se kterým jsem se při návrhu upínacího zařízení setkal, byla potřeba otáčivého pohybu kolem své vlastní osy.

Tento pohyb je zapotřebí ke změně polohy jednotlivých pólů magnetů vůči sobě do požadovaných poloh. Čili obdobně jako ve výše zmíněném patentu byl zapotřebí diametrálně rozdělený magnet. Avšak v mém návrhu nejsou zapotřebí výlisky v pohyblivém magnetu, protože jejich fixní poloha je zajištěna geometrií přilehlých částí, případně svěrným šroubem.

Z důvodu snížení hmotnosti zařízení téměř na minimum jsem zvolil otevřenou schránku pohyblivého permanentního magnetu a polootevřenou pro nepohyblivý permanentní magnet. Z obrázku (Obrázek 46 - Prototyp úchytky č. 1) je patrné, že pohyblivý magnet je ukotven mezi dvěma volnými plíšky a nepohyblivý v uzavřeném prstenci, ze kterého vyčnívají dva plechy o stejném půdorysném tvaru jako výše zmíněné plíšky.

Prototyp úchytky č. 1, ačkoliv byl vyroben v domácích podmínkách na hobby frézce, zcela předčil očekávání, protože magnetická síla na spodní straně zařízení byla větší, než kterou garantoval výrobce u jednoho magnetu. Síla byla 25 N a vnější vzdálenost magnetů byla 32 mm.



Obrázek 46 - Prototyp úchytky č. 1

Vzhledem k úspěchu při prvním pokusu následoval proces návrhu vhodnějšího tvaru feromagnetické schránky. Její výška činí 41 mm a vzdálenost vnějších stran magnetů je 37 mm. Tyto rozměry jsem zvolil

z důvodu proveditelnosti dalších komponentů a stále dostačující velikosti magnetické síly zařízení ($F_m = 22 \text{ N}$).

Z níže uvedených výpočtů jsou patrná omezení pro použití takto navrženého upínacího zařízení. Posuzované stavy jsou uvažovány při pohybu po svislé konstrukci, při zavěšeném pohybu a při pohybu po obecně nakloněné rovině. Všechny tyto stavy uvažují s jednou nohou neaktivní, což simuluje pohyb 5+1.

Při přídržné síle mechanismu F_m platí, že třecí síla F_t lze spočítat jako

$$F_t = \mu \times F_m$$

kde μ je činitel smykového tření a je to bezrozměrná veličina.

V případě, že robot volně stojí na svislé rovině platí, že je gravitační síla F_G , kterou v tomto případě lze uvažovat jako

$$F_G = m_H \times g$$

$$F_G = 2,67 \times 9,81 = 26,2 \text{ N}$$

kde m_H je hmotnost hexapodického minibota včetně upínacích mechanismů na jeho končetinách, g je gravitační zrychlení.

Pro situaci při pohybu po svislé konstrukci platí pro případ A) svislá silová podmínka a to $5 \times F_t - F_G \geq 0$ po jednoduchých úpravách dostaneme rovnici

$$5 \times F_m \geq \frac{F_G}{\mu}$$

aby v tomto konkrétním případě byla tato podmínka splněna, tak po dosazení jednotlivých činitelů zjistíme, že $\mu \geq 0,238$

$$5 \times 22 \geq \frac{26,2}{\mu}$$

$$\mu \geq 0,238$$

Pro případ B) momentová podmínka kolem bodu A ve tvaru

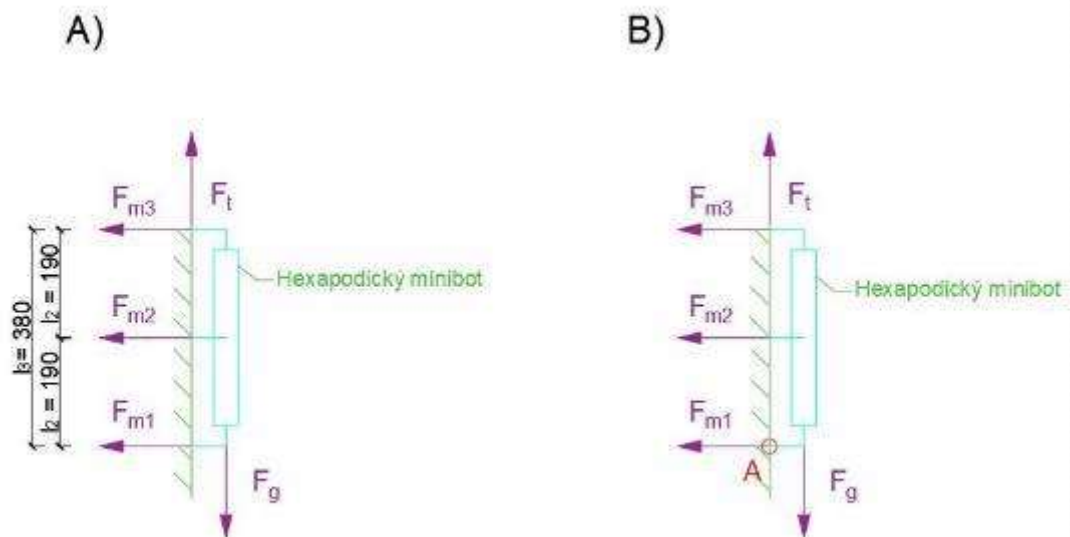
$$1 \times F_{m3} \times l_3 + 2 \times F_{m2} \times l_2 - F_g \times l_g \geq 0$$

$$l_g = \frac{125}{\sin \alpha} \times (1 - \cos^2 \alpha) + l_2 \times \cos \alpha ; \text{ pro } \alpha = 0 + k \times 180^\circ \Rightarrow l_g = 125 \text{ mm}$$

$$1 \times 22 \times 380 + 2 \times 22 \times 190 - 26,2 \times 125 \geq 0$$

$$13445 \text{ Nmm} \geq 0$$

kde l_g je vzdálenost od výslednice síly F_m k bodu A a l_3 a l_2 jsou vzdálenosti upínacích mechanismů od bodu A.

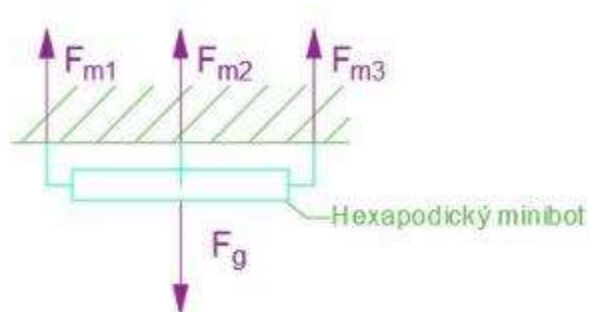


Obrázek 47 - Schéma minibota při svislém pohybu

Po překročení podmínky pro případ A dojde ke smýkání magnetického mechanismu po styčné ploše, tudíž nebude možné se pohybovat po svislé konstrukci.

Po překročení podmínek pro případ B dojde k odtržení magnetického mechanismu od styčné plochy. Vlivem následných tzv. domino efektů dojde k odtržení zbylých magnetických mechanismů, což bude vést k celkovému kolapsu robota a jeho následným zřícením.

Pro situaci při zavěšeném pohybu po konstrukci nelze daný problém přídržnosti rozdělit na dva případy, jelikož se v této situaci vyskytuje pouze přímý tah viz obrázek níže.



Obrázek 48 - Schéma minibota při zavěšeném pohybu

Pro situaci A) platí svislá silová podmínka, a to ve tvaru

$$5 \times F_m - F_G \geq 0$$

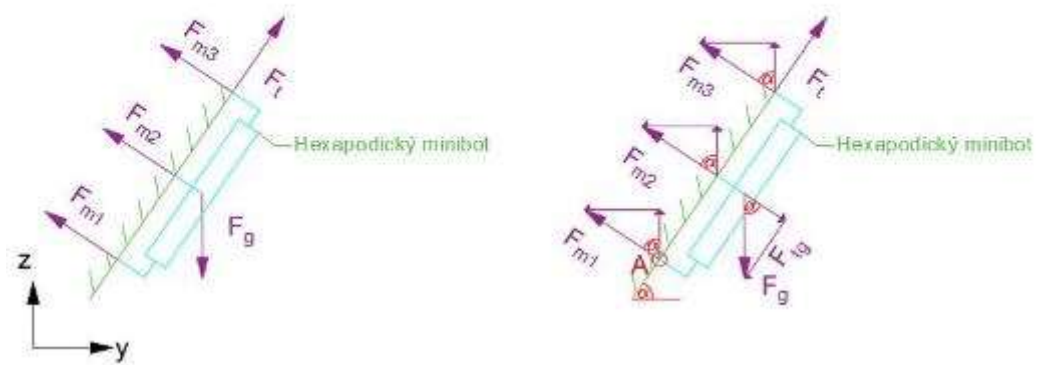
$$5 * 22 - 26,2 \geq 0$$

$$83,8 N \geq 0$$

Nyní je ještě zapotřebí stanovit podmínky pro obecný pohyb po konstrukci. Tyto výpočty jsou uvedeny pouze v obecných tvarech z důvodu jejich proměnlivosti, avšak jejich kritické stavy (svislý pohyb a zavěšený pohyb) jsou vysvětleny výše.

Z obrázku je patrné, že při obecném pohybu po konstrukci je zapotřebí splnit tři podmínky najednou a to podmínky pro tahovou, smykovou a momentovou únosnost. Jednotlivé tyto podmínky jsou vysvětleny v rovnicích viz následující strana.

Schéma působení sil



Obrázek 49 - Obecné schéma působení sil na minibota

Obecný tah

$$5 \times F_m \times \cos \alpha - F_G \geq 0 ; \text{ tato rovnice neplatí pro } \alpha = 90 + k \times 180^\circ$$

Obecný smyk

$$5 \times F_m \times \mu - F_G \times \sin \alpha \geq 0 ; \text{ tato rovnice neplatí pro } \alpha = 0 + k \times 180^\circ$$

Obecný moment

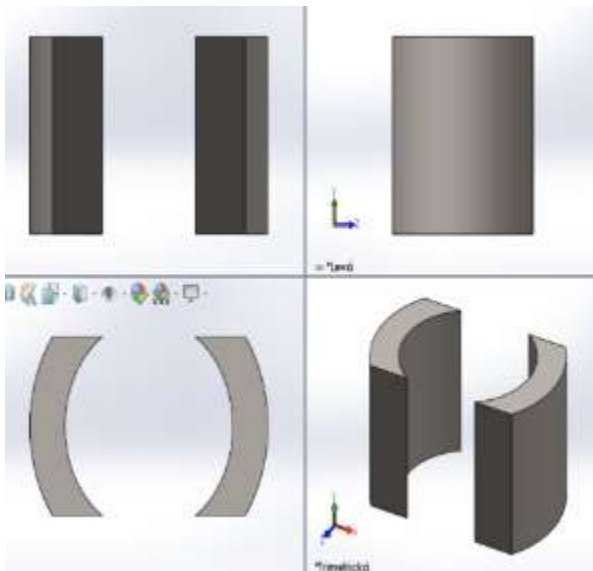
$$1 \times F_{m3} \times l_3 + 2 \times F_{m2} \times l_2 - F_G \times l_g \geq 0$$

$$1 \times F_{m3} \times l_3 + 2 \times F_{m2} \times l_2 - F_G \times \left[\frac{125}{\sin \alpha} \times (1 - \cos^2 \alpha) + l_2 \times \cos \alpha \right] \geq 0$$

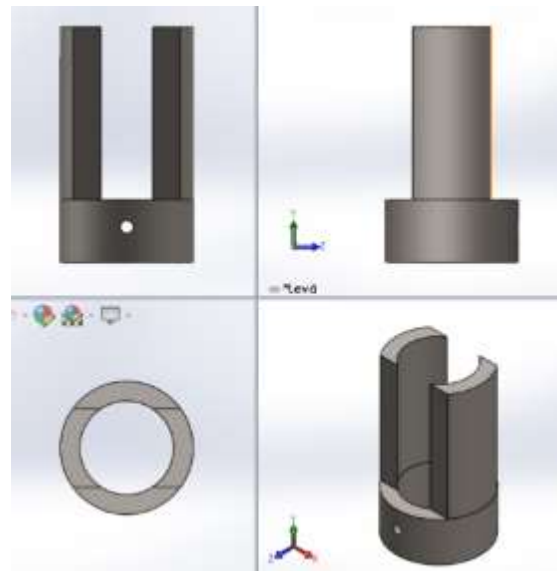
$$\text{pro } \alpha = 0 + k \times 180^\circ \Rightarrow l_g = 125 \text{ mm}$$

3.4.1. Prototypizace

Nejprve bylo zapotřebí vymodelovat feromagnetické prvky. Tyto prvky byly vyrobeny za pomoci CNC stroje DMU 50 5-Axis Champion DECKEL MAHO. Díky tomuto způsobu výroby bylo dosaženo mnohem větší přesnosti. Vzhledem k větší přesnosti a hladkým řezům bylo dosaženo snížení součinitele tření na styčné ploše mezi pohyblivými a nepohyblivými částmi feromagnetické schránky.



Obrázek 50 - Prototyp č. 2 - pohyblivá část

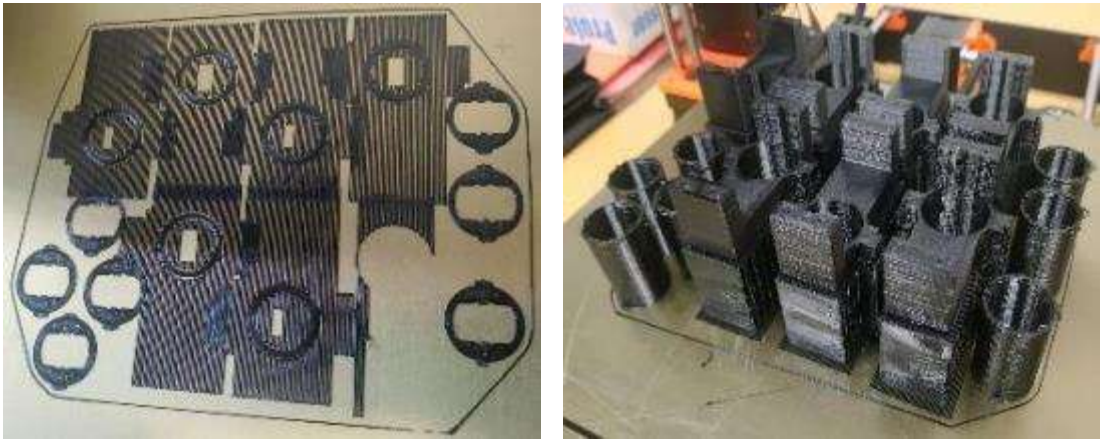


Obrázek 51 - Prototyp č. 2 - nepohyblivá část

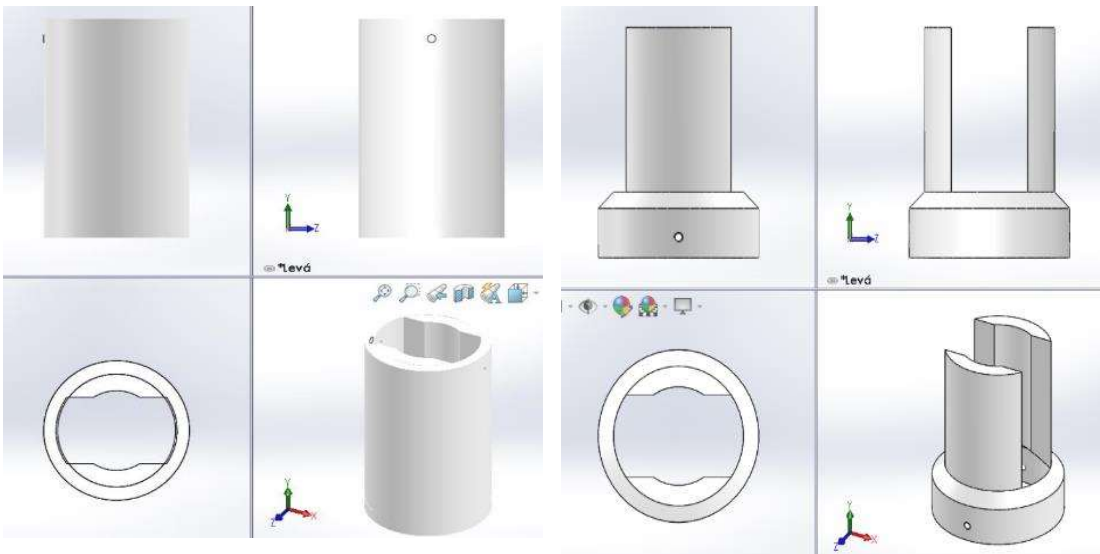
Po navrhnutí feromagnetické schránky bylo dalším krokem navrhnout vnější schránku tak, aby byla umožněna rotace potřebných prvků kolem své osy.

Schránka byla navržena z pohyblivé a nepohyblivé části. Tyto části do sebe zapadají a zároveň slouží jako podpory styčné plochy feromagnetické schránky, aby při jejich pohybu nedocházelo k jejich zaseknutí nebo jiným nežádoucím efektům způsobeným jejich pohybem. Tyto součástky jsem vymodeloval tak, že byly navrženy jako unikátní, nejsou tedy běžně dostupné a bylo nutno vyrobit a ověřit funkčnost návrhu.

Vzhledem ke komplikovanosti a minimalizaci hmotnosti částí se jako nejvhodnější řešení jevil 3D tisk z plastů metodou FFF, která je díky nízké ceně, rychlosti a tvarové volnosti nejpoužívanější metodou pro rapid prototyping, tedy pro rychlou tvorbu prototypů. Všechny plastové prototypy včetně nastavení tiskových parametrů a generování tiskových skriptů Gcode v programu SlicerPE byly zhotoveny vedoucím práce ing. Michalem Kovářikem na 3D tiskárně Prusa i3 Mk.3 v majetku Katedry technologie staveb na FSv ČVUT. Pro finální verzi součástí jsem zvolil materiál CPE, který má dostatečné mechanické vlastnosti a zároveň je snadno tisknutelný a umožňuje i jistou opracovatelnost.



Obrázek 54 - 3D tiskové sestavy součástek po vytištění

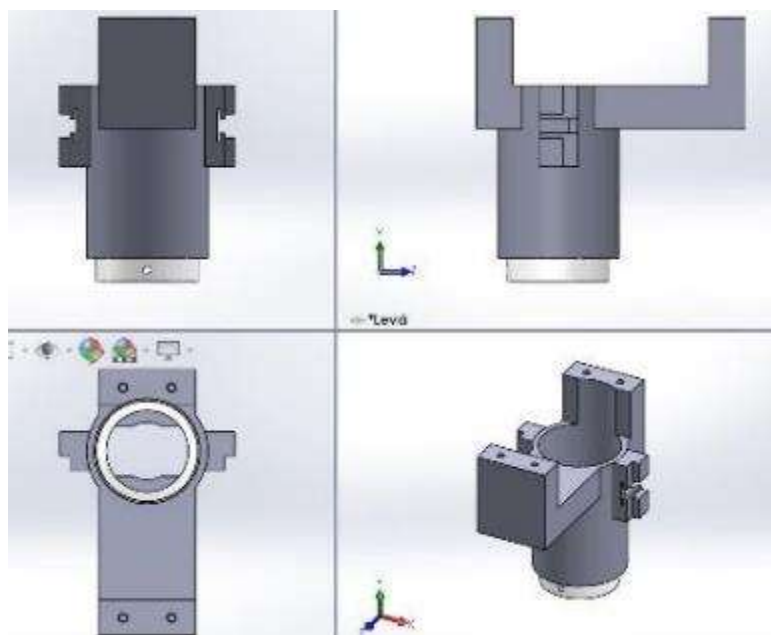


Obrázek 53 - Prototyp č.1 - vnější schránka pohyblivá

Obrázek 53 - Prototyp č.2 - vnější schránka nepohyblivá

Prototyp č. 3 spočíval v návrhu kotevního mechanismu na tibiú hexapodického minibota. Pro návrh této části bylo třeba zachovat minimální tření při pohybu vnější pohyblivé části. Toto tření se zcela eliminovalo vložením vzduchové mezery, která činí 0,5 mm od vnější stěny vnější pohyblivé schránky k vnitřní stěně ukotvení.

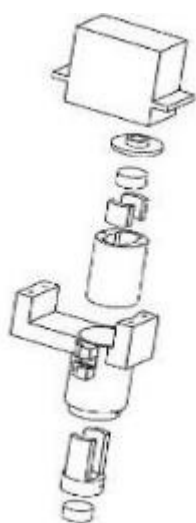
U prototypu č. 4 jsem z důvodu dodatečného snížení tření návrh upravil tak, že jsem odstranil z prototypu č. 2 vnější schránky nepohyblivé výběžky, které měly sloužit jako vodící plocha pro rotační pohyb kolem své osy. Pro účel vodící plochy nadále slouží pouze výběžky z prototypu č. 2 nepohyblivé části. Tato upravená část byla následně sloučena s prototypem č. 3.



Obrázek 55 - Prototyp č. 4

Další součástí tohoto prototypu je návrh kotvení servomotorku, které je řešeno dvěma hranolovitými výběžky se závitovými otvory.

Prototyp č. 5, je složený z prototypů č. 2 nepohyblivá část, pohyblivá část, vnější schránka pohyblivá a z prototypu č. 4. Do feromagnetických částí je následně osazen neodymový magnet ve správné poloze (tak, aby bylo možno měnit polohy do z N-S, N-S do N-S, S-N). Po sestavení mechanismu bude namontován servomotor, který se přikotví do předem připravených děr se standardním závitem.



Obrázek 576 - Prototyp č. 5



Obrázek 57 - Osazený upínací mechanismus na tibi

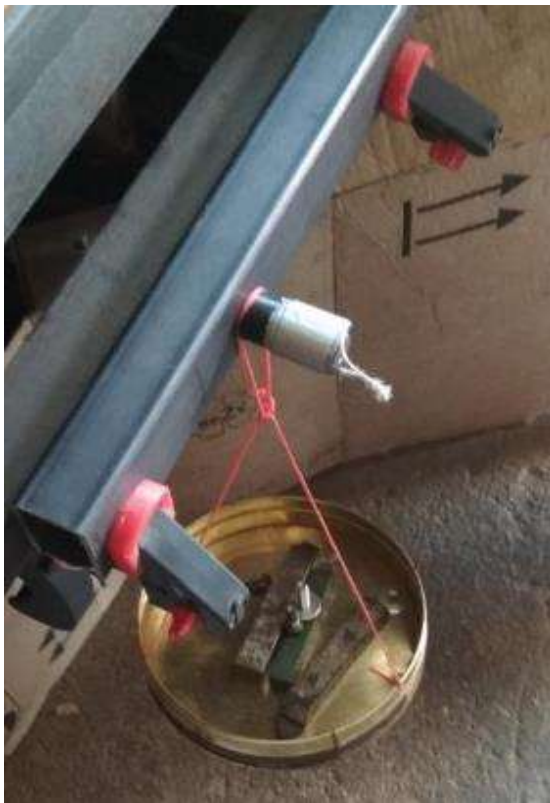
3.4.2. Zkoušky upínacího prototypu

Po sestavení prvního prototypu jsem provedl další řadu testů přídržnosti, které zkoumaly především přímý tah a smyk po konstrukci. Měření probíhalo pomocí centricky zavěšené misky, kdy se průběžně přidávalo závaží až do překonání magnetické síly, kterou se mechanismus držel na zkušebním tělese. Zkušebním tělesem byla obdélníková trubka o rozměrech 50 x 30 x 300 mm a tloušťce stěny 2,9 mm. Měřicí zařízení bylo KK50 Kapesní závěsná váha s platnou kalibrací dle ČSN EN 45501.

Průběh měření

Měření probíhalo při vzdálenosti vnějších stran magnetů 39 mm. Nejprve byl měřen přímý tah a jeho hodnota činila 22 N.

Následovala smyková síla, která byla při zkoušce výrazně menší a činila 12 N. Tato hodnota je přímo úměrná činiteli smykového tření, který byl na zkušebním tělese po jeho dopočtení roven 0,522.



Obrázek 598 - Zkouška smykové únosnosti



Obrázek 59 - Zkouška tahové únosnosti

Určení potřebné síly servomotoru

Další hodnota, která byla zapotřebí změřit, byla velikost momentu M_S pro samotné otočení mechanismu o 180° , aby magnety uvnitř mechanismu mohly měnit svou polohu pólů vůči sobě. Tato hodnota byla zjištěna za připevnění tyče, která sloužila jako rameno sil a siloměru. Vzdálenost silového účinku na tyči od osy otáčivého mechanismu byla $l = 75$ mm a síla potřebná k pootočení daným mechanismem byla $\vec{F} = 2$ N. Klasickým výpočtem momentu sil (při zanedbání vlastní tíhy tyče) lze vypočítat, že moment pro otočení mechanismu je roven výrazu $M_S = \vec{F} \times l$. Po dosazení vyjde hodnota $M_S = 15$ Ncm, což je moment, který musí servomotor bezpečně zajistit.

Funkční zkouška

Bylo nutné ověřit, zda upínací zařízení zvládne udržet hexapodického minibota na feromagnetické ploše, pokud se bude pohybovat. Z důvodu nepředpokládané poruchy SW robota a tím vzniklé časové tísně, nebylo možné hexapodického minibota přeprogramovat tak, aby jeho chůze byla synchronizována se servomotory, které ovládají upínací mechanismus. Kvůli této skutečnosti se odzkoušela přídržnost za stavu, kdy minibot očekává klidovou pozici (v tomto stavu je všech šest upínacích mechanismů aktivováno) a kdy dvě magnetické úchytky nejsou namontovány, což představuje situaci, kdy je robot v pohybu a má dvě nohy neaktivní.

Funkční zkouška přídržnosti hexapodického minibota proběhla na plechové konstrukci tlusté 1 mm. Tato konstrukce byla dlouhodobě (20 let) vystavena vnějším vlivům počasí.

Nejprve byl hexapodický minibot aktivován, aby se jeho končetiny dostaly do výchozí pozice a zároveň aby se jednotlivé servomotory aktivovaly a kladly provozní odpor. Je nutné podotknout, že přiléhavá plocha upínacího prototypu nedoléhala celou plochou ke konstrukci.

Tento jev vyplývá ze dvou příčin, jednou z nich je nerovnost zkušební plochy a druhou je, že tibia na nohou L2 a P2 není nastavena v kolmé pozici vůči spodnímu líci robota.

Následně byl tento minibot přiložen ke zkušební ploše, a to jak pro svislou, tak i zavěšenou polohu. Obě tyto polohy byly stabilní.

Při zkoušce, kdy se robot pohybuje, byly dva upínací mechanismy odebrány a minibot opět nehybně držel na zkušební ploše. Zkušební plochou bylo následně otáčeno tak, aby se minibot dostal do všech možných poloh o samotného zavěšení po svislé držení na kolmé stěně.



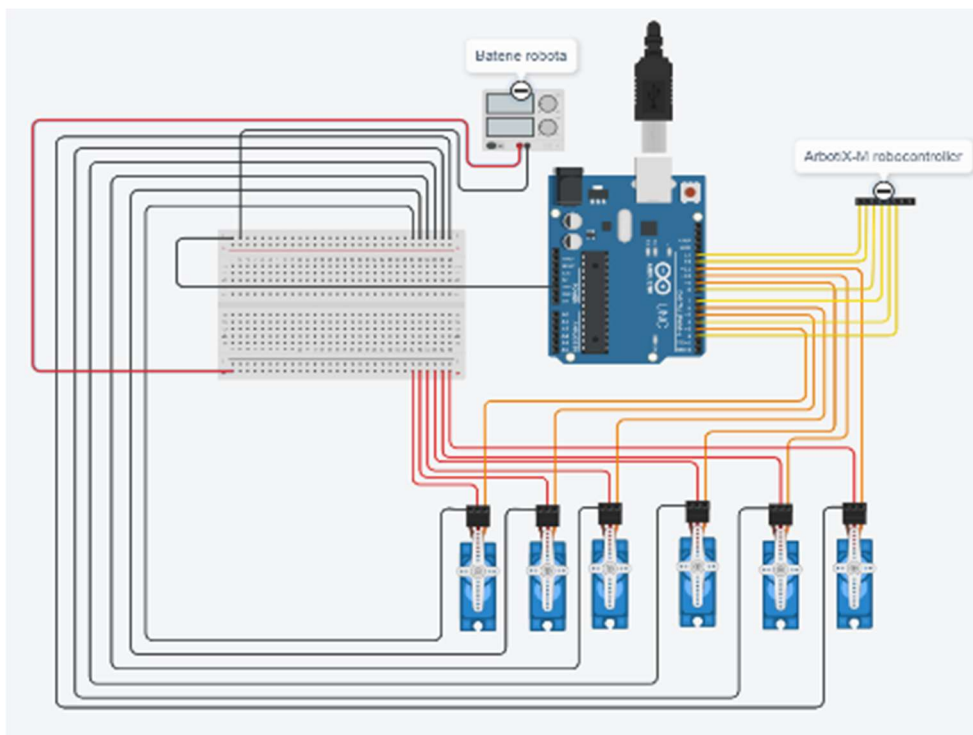
Obrázek 60 - Zkouška přidrženosti hexapodického minibota v zavěšené pozici



Obrázek 61 - Zkouška přidrženosti hexapodického minibota na svislé rovině

Zapojení servomotorů

Pro zakomponování upínacího mechanismu bylo zapotřebí navrhnout způsob zapojení elektrických obvodů. V níže přiloženém schématu jsou některé součástky nahrazeny jinými komponenty z důvodu malé knihovny aplikace Tinkercad, sloužící k programování robota? Stejným způsobem jako je znázorněno na schématu jsem zapojil všechny servomotory k ArbotiX-M robocontrolleru. Tento elektrický obvod je plně funkční.



Obrázek 632 - Schéma zapojení elektrických obvodů



Obrázek 623 - Zapojení elektrických obvodů

3.7. Zhodnocení výsledků

Výsledky magnetického upínacího mechanismu předčily očekávání z hlediska velikosti jejich magnetické síly, která byla větší, než udával výrobce. Výrobce udává přídržnou sílu magnetů 18,6 N, avšak za pomoci dvou magnetů a feromagnetické schránky byla naměřena přídržná síla 22 N. V tomto ohledu je výsledek upínacího mechanismu více než uspokojivý. Avšak je zde nutné zmínit i fakt, že velikost přídržné síly přímo závisí na tloušťce feromagnetického materiálu a zároveň i na vnější vzdálenosti magnetů.

Z výše uvedené funkční zkoušky je patrné, že hexapodický minibot by měl být schopný pohybu 4+2, ale vzhledem k potížím, které doprovázely programování nebylo možné odzkoušet tento způsob chůze minibota při dynamickém zatížení. Tudíž nebylo zjištěno, jaký typ kráčivého pohybu by byl pro minibota nejvhodnější.

Velikost maximálního zatížení případného efektoru, který by hexapodický minibot nesl na „zádech“ nemůže být stanoven, vzhledem k neznámé geometrii daného efektoru.

Dobu výdrže baterie 11.1v 3S 4500mAh LiPo Battery, nebylo možné zjistit. Tento čas nelze přesně určit, protože plně závisí na způsobu pohybu minibota, a to ve smyslu rychlosti i způsobu chůze. Toto chování robota je možné ovlivnit při programování robota.

3.8. Návrhy pro optimalizaci

Jako v téměř každém mechanismu, i zde jsou nemalé prostory k vylepšení. Tento mechanismus lze vylepšit použitím vyšší třídy neodymových magnetů, aby lépe odolávaly vyšším teplotám a zároveň se zvýšila přídržná síla.

Dále by bylo možné využít jiného materiálu pro získání nižšího součinitele tření pro změnu polohy. Díky tomu vylepšení lze docílit následné úspory na volbě servomotorku, který by mohl být podstatně

slabší. Výběrem vhodnějších materiálů by došlo také ke zvýšení pevnosti (např. silon, hliník), avšak jejich výroba by mohla být nákladnější než za pomoci 3D tisku.

Za současného stavu je zapotřebí mít rovnou plochu, po které bude robot kráčet, ale za použití různých druhů senzorů a následného programování by bylo možné dospět také k řešení, které by automaticky bylo schopné rozhodnout, zda překážku obejít nebo překročit. Tímto způsobem je možné dospět k plně autonomní verzi, kde by bylo pouze zapotřebí přemístit miniboty z jedné stavby na druhou. Tímto řešením by došlo i k případné úspoře za značné náklady za dopravu tradičních lešeňových konstrukcí, které jsou často velmi objemné a musí se tedy většinou převážet nákladními vozidly.

Dalším návrhem na optimalizaci je zavedení různých druhů nástavců, které by rozšířily možnosti použití. Jednalo by se například o klešťové mechanismy pro ukotvení ocelových lan či tyčí. Dále by bylo možné provést uchopovací mechanismus, který by zvládl překonat členitější povrchy, jako jsou například rošty, plechové prvky s výlisky různých tvarů atd.

Dalším velkým obohacením je možnost zřídit dokovací stanici pro tento druh robota. Dokovací stanice by obsahovala především nabíječku a případně i další možné efektory, které by byly automaticky měněny dle potřeby. S touto optimalizací by bylo možné dosáhnout i velkých finančních úspor, a to už jen za předpokladu ušetřeného množství kabeláže například pro kamerové systémy.

3.9. Možnosti využití

Možností využití robota, který se může pohybovat po ocelových konstrukcích všemi směry, je mnoho. Jedná se především o monitoring různých konstrukcí, nebo dokonce i prostorů. V tomto případě by se na robota připevnila kamera, která by bezdrátově komunikovala s mobilním telefonem nebo počítačem. Tento monitoring by se uplatnil při ochraně

objektů, anebo při servisních kontrolách, například ropovodů, různých potrubí, ocelových mostů a lávek, mýtných bran či plechových střech. Nabízí se také monitoring nového krytu Černobylské jaderné elektrárny, který je vytvořený z ocelové schránky. Jelikož je v Černobylské jaderné elektrárně zvýšený výskyt radioaktivních látek, bylo by zapotřebí zjistit maximální hodnoty a porovnat je s odolností neodymových magnetů.

Možné využití pro nátěr ocelových konstrukcí, kde by bylo možné za použití 3D modelu a senzorů, tento proces plně automatizovat.

Tyto roboty by také mohly sloužit jako kooperativní roboty při výškových pracích jako je například sváření, nebo jakákoliv montáž, kde by zajišťovaly dopravu materiálu.

S osazenou termální kamerou by se tyto roboty mohly účastnit různých tepelně technických zkoušek, nejpravděpodobněji u halových konstrukcí v místech, která jsou hůře přístupná.

Dalším způsobem využití může být i defektoskopie, kde by bylo možné za použití více minibotů s různými efekty tento komplikovaný úkon provést.

V neposlední řadě lze tyto roboty přeprogramovat a vybavit koncovými efekty tak, aby mohly fungovat na principu hejna a zvládat tak i náročnější stavební práce.

3.10. Shrnutí nákladů

V následující tabulce jsou znázorněny jednotlivé pořizovací náklady na funkční prototyp hexapodického minibota, který by zvládal pohyb po feromagnetických konstrukcích po negativní rovině.

Tabulka 23

Náklady na pořízení hexapodického minibota včetně funkčního upínacího mechanismu.			
Položka	Počet	Jednotková cena [Kč]	Cena celkem
PhantomX AX Metal Hexapod Mark III Kit	1x	27 414	27 414 Kč
Neodymový magnet válec D 12x6 mm, Neodym, N42, poniklovaný, diametrálně magnetizován	12x	60,03	720,36 Kč
CNC obrábění pohyblivé části	6x	700	4 200 Kč
CNC obrábění statické části	6x	1 800	10 800 Kč
Servomotor MG996R	6x	293	1 758 Kč
3D tisk prototypu č.1 - vnější schránka pohyblivá	6x	200	1 200 Kč
3D tisk prototypu č.4	6x	300	1 800 Kč
Šroubky, matičky, podložky	84x		Cca 50 Kč
Programátorské práce	Nezapočítány, protože ceny se v tomto případě mohou lišit a program není vyvíjen ke každému hexapodickému minibotu zvlášť, nýbrž je uniformní.		
Celková cena	47 942,36 Kč		

Náklady na upínací mechanismy činily 20 528,36 Kč, tyto náklady lze výrazně snížit za použití sériové výroby a vhodnějších materiálů.

4. Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a sestavit upínací mechanismus umožňující pohyb hexapodickému minibotu po feromagnetických konstrukcích v nekonvenčních směrech, jako je svislé a šikmé stoupání i klesání a zavěšený pohyb. Tento mechanismus byl úspěšně navržen. Návrh se opírá o výpočty, které prokazují schopnost upínacího mechanismu bezpečně stabilizovat hexapodického minibota v pozicích, při kterých není možné dosáhnout gravitační stabilizace. Na základě těchto výpočtů byly sestaveny funkční prototypy upínacích mechanismů, které byly následně podrobeny statickým zkouškám. Provedení zkoušek prototypu upínacího mechanismu při pohybu nebylo možné dosáhnout z důvodů poruchy SW a časové tísně, kdy se nepodařilo minibota naprogramovat tak, aby byly jednotlivé servomotory synchronizovány s jeho pohybem. Vzhledem k úspěšným statickým zkouškám lze předpokládat, že hexapodický minibot bude schopen překonávat pohyb v nekonvenčních směrech po feromagnetické podložce při chůzi typu 5+1.

Návrh a sestavení tohoto mechanismu je velkým přínosem z hlediska minimální energetické náročnosti, kde úspora energie činí minimálně 21,6 % oproti běžným elektromagnetům při pohybu 5+1.

Tento nový způsob pohybu robota lze uplatnit také na jiné kráčivé roboty jako jsou bipodi, tripodi a další. Díky této technologii bude možné provádět řadu výškových prací, na které doposud i myšlenka byla pouze vědeckou fantazií.

Seznam tabulek

Tabulka 1 (1)	16
Tabulka 2	18
Tabulka 3	19
Tabulka 4	20
Tabulka 5	21
Tabulka 6	22
Tabulka 7	23
Tabulka 8	24
Tabulka 9	25
Tabulka 10	27
Tabulka 11	28
Tabulka 12	30
Tabulka 13	31
Tabulka 14	33
Tabulka 15	34
Tabulka 16	36
Tabulka 17	37
Tabulka 18 (19)	49
Tabulka 19 (21)	50
Tabulka 20 (22)	50
Tabulka 21 (20)	51
Tabulka 22	55
Tabulka 23	77

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Pojízdne lešení (28).....	13
Obrázek 2 - Ceny společnosti Pelikán S&D, spol. s.r.o. část 1	14
Obrázek 3 - Vysokozdvihný vozík (29).....	14
Obrázek 4 - Ceny společnosti Pelikán S&D, spol. s.r.o. část 3	15
Obrázek 5 - Horolezec (30).....	16

Obrázek 6 - SKE Plus	17
Obrázek 7 - Základový robot.....	19
Obrázek 8 - Jezdec	20
Obrázek 9 - Přísavný robot	21
Obrázek 10 - OSCAR.....	22
Obrázek 11 - Concrete Floor Compaction System.....	23
Obrázek 12 - Screeding Robot.....	24
Obrázek 13 - Flight-Assembled Architecture	25
Obrázek 14 - PolyBot Assembly.....	26
Obrázek 15- PolyBot	27
Obrázek 16 - AMAS	28
Obrázek 17 - TERMES	30
Obrázek 18 - Welding Robot for Steel Girders.....	31
Obrázek 19 - Facade Coating and Painting Robot	32
Obrázek 20 - Robot for Painting Exterior Walls.....	34
Obrázek 21 - HRP Robot Series.....	35
Obrázek 22 - Bio-Inspired Facade Inspection	36
Obrázek 23 - Foottop of Bio-Inspired Facade Inspection.....	37
Obrázek 24 - Google's crabot.....	38
Obrázek 25 - Horizontal welding bots	39
Obrázek 26 - Vertical welding bots.....	39
Obrázek 27 - Shipwelding robots	40
Obrázek 28 - Particle robots.....	41
Obrázek 29 - Cubli	41
Obrázek 30 - Tvary hexapodických minibotů (8).....	42
Obrázek 31 - Noha hexapodického minibota (25).....	43
Obrázek 32 - a) Model hexapodického minibota, b) chůze 5+1, c) vlna, d) chůze 3+3 (11)	44
Obrázek 33 - Pohyb hexapodického minibota způsobem 3+3 (8)	45
Obrázek 34 - Orbitální pohyb elektronu (překresleno z (16)).....	46
Obrázek 35 - Axiální magnetizace (26).....	47
Obrázek 36 - Diametrální magnetizace (26)	48

Obrázek 37 - Multipólová magnetizace (26).....	48
Obrázek 38 - Bipolární radiální magnetizace (26).....	48
Obrázek 39 - Multipolární radiální magnetizace (26).....	49
Obrázek 40 - Průběh magnetizace při zvyšování 1 (16).....	53
Obrázek 41 - Patent EP1243006B1 (23).....	54
Obrázek 42 - PhantomX AX Metal Hexapod Mark III.....	57
Obrázek 43- Elektromagnet Intertec ITS-MSM-1515-12VDC (31).....	58
Obrázek 44 - MG996R	58
Obrázek 45 - Vývojový diagram pro pohyb hexapodického minibota po feromagnetické konstrukci	59
Obrázek 46 - Prototyp úchytky č. 1	61
Obrázek 47 - Schéma minibota při svislém pohybu.....	63
Obrázek 48 - Schéma minibota při zavěšeném pohybu	64
Obrázek 49 - Obecné schéma působení sil na minibota	65
Obrázek 50 - Prototyp č. 2 - pohyblivá část.....	66
Obrázek 51 - Prototyp č. 2 - nepohyblivá část.....	66
Obrázek 53 - Prototyp č.1 - vnější schránka pohyblivá	67
Obrázek 53 - Prototyp č.2 - vnější schránka nepohyblivá	67
Obrázek 54 - 3D tiskové sestavy součástí po vytištění.....	67
Obrázek 55 - Prototyp č. 4.....	68
Obrázek 56 - Prototyp č. 5.....	68
Obrázek 57 - Osazený upínací mechanismus na tibiú.....	68
Obrázek 58 - Zkouška smykové únosnosti.....	69
Obrázek 59 - Zkouška tahové únosnosti.....	69
Obrázek 60 - Zkouška přídržnosti hexapodického minibota v zavěšené pozici.....	71
Obrázek 61 - Zkouška přídržnosti hexapodického minibota na svislé rovině.....	72
Obrázek 62 - Zapojení elektrických obvodů	73
Obrázek 63 - Schéma zapojení elektrických obvodů.....	73

Citovaná literatura

1. vyskovesluzby. *vyskovesluzby*. [Online] <http://www.vyskovesluzby.cz/cenik>.
2. BOCK, Thomas a Thomas LINNER. *Construction robots: elementary technologies and single-task construction robots*. New York, NY : Cambridge University Press, 2016. 978-1-107-07599-3.
3. DONATO-WEINSTEIN, Nathan. Meet Google's 'crabot' — part crane, part robot, all Google. *bizjournals*. [Online] 9. 10 2015. <https://www.bizjournals.com/sanjose/news/2015/03/01/meet-googles-crabot-part-crane-part-robot-all.html>.
4. LEE, Donghun. Robots in the shipbuilding industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. [Online] 2014. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584514000131>. 7365845.
5. LI, Shuguang, Richa BATRA, David BROWN, Hyun-Dong CHANG, Nikhil RANGANATHAN, Chuck HOBERMAN, Daniela RUS a Hod LIPSON. Particle robotics based on statistical mechanics of loosely coupled components. *Nature*. [Online] 2015. <http://www.nature.com/articles/s41586-019-1022-9>. 0028-0836.
6. *The Cubli: A Cube that can Jump Up and Balance*. M. Gajamohan, M. Merz, I. Thommen, and R. D'Andrea. Algarve, Portugal, 2012. 3722-3727.
7. Bjelonic M, Kottege N, Homberger T, Borges P, Beckerle P, Chli M. Weaver. *Hexapod robot for autonomous navigation on unstructured terrain*. *J Field Robotics*.
8. DING, Xilun, Zhiying WANG, Alberto ROVETTA a J.M. ZHU. *Locomotion Analysis of Hexapod Robot*. MIRIPOUR, Behnam, ed. *Climbing and Walking Robots*. 978-953-307-030-8.
9. Lynch, K. M. a Park, F. C. *Modern Robotics*. Cambridge : Cambridge University Press, 2017. 978-1-107-15630-2.
10. Tedeschi, F. a Carbone, G. *Design Issues for Hexapod Walking Robots*. stránky 181–206. 2218-6581.

11. Song, S.M. a Choi, B.S. Mechanism and Machine Science: Proceedings of ASIAN MMS 2016 & CCMMS 2016. *Mechanism and Machine Science: Proceedings of ASIAN MMS 2016 & CCMMS 2016*. Springer, 2016.
12. Alexander, R. McN. *Exploring Biomechanics—Animals in Motion*. W H Freeman & Co, 1992. 978-0716750352.
13. Gabrielli, G. a von Karman, T. *What price speed—Specific power required for propulsion of vehicles*. 1950. 436870769.
14. McGhee, R.B. a Frank, A.A. *On the stability properties of quadruped creeping gaits*. Los Angeles : Mathematical Biosciences, 2002. 0025-5564.
15. By Xilun Ding, Zhiying Wang, Alberto Rovetta and J.M. Zhu. Locomotion Analysis of Hexapod Robot. [Online] 2010. <https://www.intechopen.com/books/climbing-and-walking-robots/locomotion-analysis-of-hexapod-robot>. 10.5772/8822.
16. HRABOVCOVÁ V., L. JANOUŠEK, P. RAFAJDUS, a M. LIČKO. *Moderné elektrické stroje*. Žilina : Žilinská univerzita v Žilině, 2000. 80-7100-809-5.
17. MENTLÍK V., M. BEČKA, V. BOČEK, V. KOČOVÁ, Z. KRAUS, E. KUČEROVÁ, a J. RAIS. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň : Fakulta elektrotechnická, Plzeň, 1996. 80-7082-227-9.
18. KRAUS, DUBSKÝ J. a Z. *Kovy a magnetické materiály*. Plzeň : VŠSE, 1965.
19. abcmagnet. *abcmagnet.cz*. [Online] 2012. <https://www.abcmagnet.cz/druhy-magnetu.php?druh=ferity>.
20. abcmagnet. *abcmagnet.cz*. [Online] 2012. <https://www.abcmagnet.cz/druhy-magnetu.php?druh=alnico>.
21. abcmagnet. *abcmagnet.cz*. [Online] 2012. <https://www.abcmagnet.cz/druhy-magnetu.php?druh=samariove-magnety>.
22. abcmagnet. *abcmagnet.cz*. [Online] 2012. <https://www.abcmagnet.cz/druhy-magnetu.php?druh=neodymove-magnety>.

23. Perry John, Franz. *SWITCHABLE PERMANENT MAGNETIC DEVICE*. 00982763.5 Rakousko, 27. 7 2011. Zařízení.
24. *Switchable magnets for robotics applications*. TAVAKOLI, Mahmoud, Carlos VIEGAS, Jose Carlos ROMAO, Pedro NETO a Anibal T. DE ALMEIDA. místo neznámé : International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2015. 978-1-4799-9994-1.
25. Grove, Hitchcock Ave Downers. Learn.trossenrobotics.com . [Online] <https://learn.trossenrobotics.com/projects/172-phantomx-hexapod-metal-assembly-guide.html>.
26. unimagnet. [Online] <https://www.unimagnet.cz/blog/axialni-diametralni-i-jine-ktere-typy-magnetizace-existuji-n113>.
27. ABC magnety. [Online] <https://www.abcmagnet.cz/druhy-magnetu.php?druh=ferity>).
28. zebrikyleseni-krause. *zebrikyleseni-krause*. [Online] <https://www.zebrikyleseni-krause.cz/images/product/66/11.jpg>.
29. letni-dekorace. *letni-dekorace*. [Online] <https://letni-dekorace.cz/wp-content/uploads/2015/05/plosiny-praha-300x192.jpg>.
30. alpskyklub. *alpskyklub*. [Online] <https://www.alpskyklub.cz/images/indexfoto/prace.jpg>.
31. velkoobchod.conrad. *velkoobchod.conrad*. [Online] <https://velkoobchod.conrad.cz/elektromagnet-intertec-its-msm-1515-12vdc-20-n-12-v-dc-1-4-w.k1602464>.