



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

KONFIGURACE ROBOTICKÉ STRUKTURY ZA POUŽITÍ MOLECUBES

ROBOTIC STRUCTURE CONFIGURATION USING MOLECUBES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. FILIP VÍTEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. SIMEON SIMEONOV, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Filip Vítek

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)**

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

Konfigurace robotické struktury za použití MOLECUBES

v anglickém jazyce:

Robotic structure configuration using MOLECUBES

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracujte metodologii vytváření konfigurací robotické struktury za použití MOLECUBES

Cíle diplomové práce:

- Analýza problému
- Vytvoření 3D modelů základních elementů
- Vytvoření konfigurací robotické struktury za použití MOLECUBES

Seznam odborné literatury:

KOLÍBAL, Zdeněk; KNOFLÍČEK, Radek. Morfologická analýza stavby průmyslových robotů. Vydání 1. Košice : Viena, 2000. 185 s. ISBN 80-88922-27-5.

EHRENBERGER, Zdeněk; KOLÍBAL, Zdeněk. Průmyslové roboty III : Robotické systémy vyšších generací. 1. vydání. Brno : VUT Brno, 1993. 145 s. ISBN 80-214-0530-0.

KOLÍBAL, Zdeněk. Průmyslové roboty I : Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů. 1. vydání. Brno : VUT Brno, 1993. 189 s. ISBN 80-214-0526-0.

SKAŘUPA, Jiří. Průmyslové roboty a manipulátory [online]. 1. vydání. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007 [cit. 2010-04-17]. Dostupné z WWW: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf>. ISBN 978-80-248-1522-0.

www.festo.com

www.abb.cz

www.fanucrobotics.cz

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.

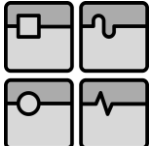
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 23.11.2014

L.S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu

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

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 4
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na sebe-rekonfigurovatelné modulární robotické systémy. Nejprve je proveden jejich popis a poté jsou uvedeny možnosti jejich využití. Další kapitola pojednává o modulárním systému Molecubes. Následuje návrh podobného systému, kde je popsána konstrukce jednotlivých modulů. Na závěr práce jsou popsány transformace souřadných systémů v jednotlivých modulech a proveden výpočet přímé kinematiky a simulace inverzní kinematiky.

Klíčová slova

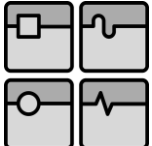
Molecubes, modulární robotika, seberekonfigurovatelné modulární robotické systémy, přímá kinematika, inverzní kinematika

Abstract

This master thesis is focused on Modular Self-Reconfigurable Robotic Systems. Their description is made at first and then possibilities of their use are listed. The next chapter concerns Molecubes modular system. The design of similar system where the construction of the individual modules is described follows. The transformations of coordinated systems in the individual modules are described and the calculation of forward kinematics and simulation of inverse kinematics is made at the end of the thesis.

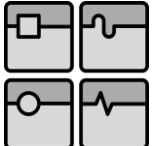
Key words

Molecubes, modular robotics, selfreconfigurable modular robotics systems, forward kinematice, inverse kinematics

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Bibliografická citace

VÍTEK, F. *Konfigurace robotické struktury za použití MOLECUBES*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 55 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc..

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

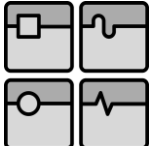
Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a použil pouze prameny uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 28. 05. 2015

.....

Podpis

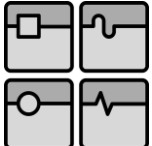
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Simeonu Simeonovi, CSc. za odborné vedení při jejím zpracování.

Obsah

1.	Úvod	9
2.	Modulární roboty	10
2.1.	Modulární roboty na trhu	11
2.2.	Spojování modulů	13
2.3.	Využití modulární robotiky v praxi	14
3.	Molecubes	16
3.1.	Moduly	16
3.2.	Spojování modulů	20
3.3.	Software	21
3.4.	Programování molecube	21
3.5.	Cyklus sestavení MOLECUBE robotu	22
4.	Konstrukce	23
4.1.	Návrh modulu	23
4.2.	Konstrukce modulu	24
4.2.1.	Servomotor	24
4.2.2.	Ložisko	26
4.2.3.	Krytování	26
4.2.4.	Nosná konstrukce	27
4.2.5.	Podpěry	28
4.2.6.	Konektory připojení modulů	28
4.3.	Sestavení modulu	29
4.4.	Konstrukce základny	30
5.	Popis pohybů	31
5.1.	Přímá úloha kinematiky	32
5.2.	Denavit – Hantenbergův princip rozmístění souřadných systémů [1]	33
5.2.1.	Transformace souřadných systémů v modulech	34
5.2.2.	Přímá úloha kinematiky aplikovaná na rameno	39
5.2.2.1.	Pracovní prostor	43
5.3.	Inverzní úloha kinematiky aplikovaná na rameno	44
6.	Závěr	49
	Seznam použitých zdrojů	50
	Seznam obrázků	52
	Seznam tabulek	53
	Seznam grafů	54
	Seznam příloh	55

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 9
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

1. Úvod

Všechny organismy, ať už jsou to rostliny, zvířata nebo lidé se skládají z molekul a buněk, které jsou geneticky naprogramovány tak, aby spolu tvořily orgány. Tomuto procesu se říká modularizace a je základním principem živé přírody. Své využití má také v jiných odvětvích. Je základem pro stavbu složitých technických zařízení a strojů, ať se jedná o elektroniku, informační technologie, dopravní systémy nebo mechatroniku a robotiku.

Modulární robotika z tohoto principu také vychází. Typické modulární roboty jsou složeny z několika samostatných modulů, které se mohou pohybovat a vzájemně se k sobě připojovat. V ideálním případě by se modulární robot skládal z velkého počtu velmi malých stejných jednotek, které by se mohly přeskládat do libovolného tvaru, což by umožňovalo zvýšení jeho variability a flexibility. [12][15]

2. Modulární roboty

Modulární seberekonfigurovatelné roboty se skládají z velkého počtu shodných nezávislých jednotek, které mezi sebou komunikují a jsou poskládány do struktury, která nejlépe vyhovuje danému prostředí nebo zadanému úkolu. Jsou schopny záměrně přeskládat svůj tvar přeskupením částí do různých podob, jako je například robot kolový, kráčející, nebo ve tvaru hada. Díky tomu, že se skládají ze zaměnitelných částí, je zde výhoda při jejich porušení, kdy se poškozená jednotka nahradí jednotkou funkční. Každá jednotka je vybavena připojovacími konektory, přes které jsou mezi moduly přenášeny mechanické síly, momenty, elektrická energie a komunikace.

Modulární seberekonfigurovatelné robotické systémy se dělí do několika architektonických skupin podle uspořádání svých jednotek. Ovládání může být centrální nebo distribuované mezi moduly a zapojení sériové nebo paralelní. [6]

Mřížová architektura

V mřížové architektuře jsou moduly uspořádány a zapojeny do pravidelného trojrozměrného vzoru, nejčastěji do kubického tvaru nebo hexagonální mřížky. [1] [6]

Řetězová/stromová architektura

V této architektuře jsou moduly zapojeny do řetězové nebo stromové topologie. Moduly jsou zapojeny sériově a v trojrozměrném prostoru dokáží v podstatě dosáhnout na libovolné místo. Nevýhodou této architektury je výpočetní náročnost, složitost softwaru a řetězení nepřesností. [1] [6]

Mobilní architektura

U mobilní architektury moduly manévrují v dané oblasti a v případě potřeby se mohou spojit do řetězů nebo mříží. [1] [6]

Další rozdělení modulárních robotických systémů je dle způsobu, jakým se jednotky přemísťují na své místo.

Deterministická rekonfigurace

U tohoto způsobu rekonfigurace je počítáno s pohyby jednotek nebo je přímo manipulováno do jejich cílového umístění. Přesná poloha každého modulu je vždy známa nebo vypočítána za běhu. Časy rekonfigurace jsou přesně známy. [6]

Stochastická rekonfigurace

Při stochastické rekonfiguraci známe časy s určitou pravděpodobností. Jednotky se zde pohybují pomocí statistických postupů (např. Brownův pohyb). Přesné umístění každé jednotky je známo pouze v případě, že je připojen na hlavní strukturu. [6]

2.1. Modulární roboty na trhu

Na trhu se vyskytuje velké množství různých modulárních systémů. Výčet některých z nich dle literatury [6] a [16] je zapsán v tabulce č. 1, kde je uveden jejich název spolu s dalšími informacemi, jako je autor, rok vydání atd. Ve sloupci DOF je pak vypsán počet stupňů volnosti modulu a zda se jedná o pohyb rovinný (2-D) nebo prostorový (3-D).

Popis vybraných modulárních robotů:

V této podkapitole jsou stručně popsány tři z modulárních robotických systémů, které se vyskytují na trhu.

PolyBot G3 (2002)

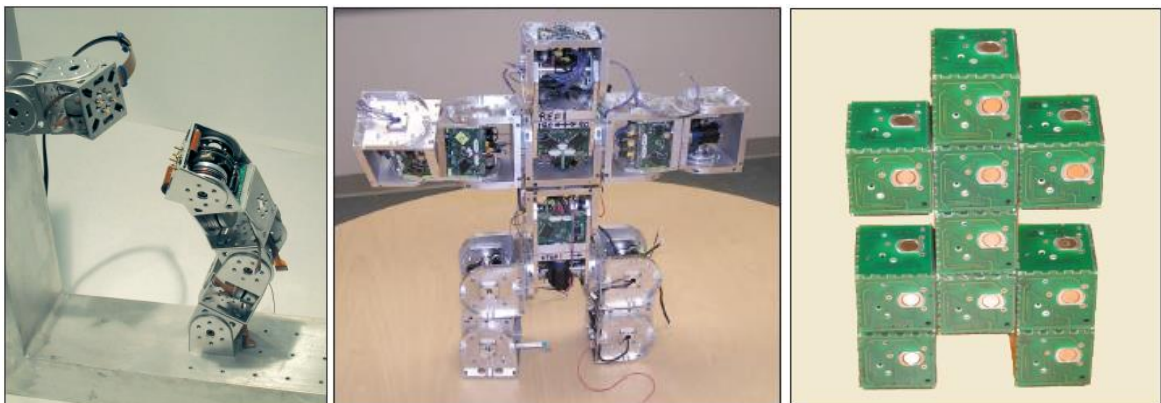
Jedná se o robotický systém z rodiny PolyBot vytvořený v Palo Alto Research Center (PARC) roku 2002. Moduly s jedním stupněm volnosti jsou zhruba krychlového tvaru o hraně 50 mm. Jsou vybaveny střídavými plochými motory s harmonickým převodem, senzory točivého momentu, dotykovými a infračervenými senzory. Pro spojování využívají konektory se zámky ovládanými paměťovou slitinou. [6]

SuperBot (2006)

SuperBot byl vyvinut na University of Southern California v roce 2006. Moduly jsou dlouhé 168 mm a skládají se ze dvou spojených kostek o rozměrech 84x84x84 mm. Mají tři stupně volnosti a mohou se k sobě spojovat pomocí jednoho ze šesti stejných konektorů. Pro pohon slouží DC motory napojené na planetovou a vnější převodovku. [1] [6]

Miche (2006)

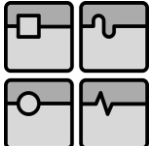
Miche byl vyvinut na MIT v roce 2006. Jedná se o mřížový modulární systém, který je schopen vytvořit libovolné formace v mřížové architektuře. Moduly jsou tvaru kostky a jejich spojování je vytvořeno pomocí přepínatelných magnetů. [6]



Obr. 1: PolyBot G3, SuperBot, Miche [6]

Tab. 1: Modulární robotické systémy [6] [16]

Název	Třída	DOF	Autor	Organizace	Rok
CEBOT	mobilní	různé	Fukuda et al.	Nagoya	1988
Polypod	řetěz	2 3-D	Yim	Stanford	1993
Metamorphic	mříž	3 2-D	Chirikjan	JHU	1993
Fracta	mříž	3 2-D	Murata	MEL	1994
Tetrobot	řetěz	1 3-D	Hamlin et al.	RPI	1996
3D Fracta	mříž	6 3-D	Murata et al.	MEL	1998
Molecule	mříž	4 3-D	Kotay & Rus	Dartmouth	1998
CONRO	řetěz	2 3-D	Will & Shen	USC/ISI	1998
PolyBot	řetěz	1 3-D	Yim et al.	PARC	1998
TeleCube	mříž	6 3-D	Suh et al.	PARC	1998
Vertical	mříž	2-D	Hosakawa et al.	Riken	1998
Crystal	mříž	4 2-D	Vona & Rus	Dartmouth	1999
I-Cube	mříž	3-D	Unsal	CMU	1999
Pneumatic	mříž	2-D	Inoue et al.	TiTech	2002
Uni Rover	mobilní	2 2-D	Hirose et al.	TiTech	2002
MTRAN II	hybridní	2 3-D	Murata et al.	AIST	2002
Atron	mříž	1 3-D	Stoy et al.	U.S Denmark	2003
Swarm-bot	mobilní	3 2-D	Mondada et al.	EPFL	2003
Stochastic 2D	stochastická	0 2-D	White et al.	Cornell U.	2004
Superbot	hybridní	3 3-D	Shen et al.	USC/ISI	2005
Stochastic 3D	stochastická	0 3-D	White et al.	Cornell U.	2005
Catom	mříž	0 2-D	Goldstein et al.	CMU	2005
Prog.parts	stochastická	0 2-D	Klavins	U. Washington	2005
Molecube	řetěz	1 3-D	Zykov et al.	Cornell U.	2005
YaMoR	řetěz	1 2-D	Ijspeert et al.	EPFL	2005
Miche	mříž	0 3-D	Rus et al.	MIT	2006
GZ-I Modules	řetěz	1 3D	Zhang & Gonzalez-Gomez	U. Hamburg, UAM	2006
The Distributed Flight Array	mříž	6 3D	Oung & D'Andrea	ETH Zurich	2008
Evolve	řetěz	2 3D	Chang Franxi, Francis	NSU	2008
Odin	hybridní	3 3D	Lyder et al.	USD	2008
EM-Cube	mříž	2 2D	An	Dran Computer Science Lab	2008
Roombots	hybridní	3 3D	Sproewitz, Moeckel, Ijspeert	EPFL	2009
Sambot	hybridní	0 3D	HY Li, HX Wei, TM Wang et al.	Beihang University	2010
Moteins	řetěz	1 3D	Center for Bits and Atoms	MIT	2011
ModRED	řetěz	4 3D	C-MANTIC Lab	UNO/UNL	2011
SMORES	hybridní	4 3D	Davey, Kwok, Yim	UNSW, Upenn	2012
ReBiS	řetěz	1 3D	Rohan, Ajinkya, Sachin, Chiddarwar, Bhurchandi	VNIT, Nagpur	2014

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 13
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

2.2. Spojování modulů

Spoje mezi moduly mohou být mechanické, automatické nebo jejich kombinace.

Při návrhu automatické spojky pro připojování a odpojování modulů se vyskytuje řada technických problémů. Mechanismus musí mít tyto vlastnosti:

- Energetická úspornost: nesmí spotřebovávat energii robotu (v případě bateriového napájení)
- Spolehlivost: spoj musí vydržet různé operace
- Kompaktnost: nesmí zabírat velký prostor uvnitř modulu
- Flexibilita: snadné připojení a odpojení

Symetrie připojovacích ploch

V běžné praxi se mechanické spoje navrhují nesymetricky (samec a samice). V případě seberekonfigurovatelných robotů by takovéto spojení bylo silně omezující. Proto se zde používá symetrické konstrukce konektorů, kde spojovací kolíky a otvory jsou rozmístěny tak, aby do sebe zapadaly v určeném natočení modulu. Počet natočení je pak závislý na počtu a pozici kolíků a otvorů na připojovací ploše. [2]

Západka

Elektromagnety

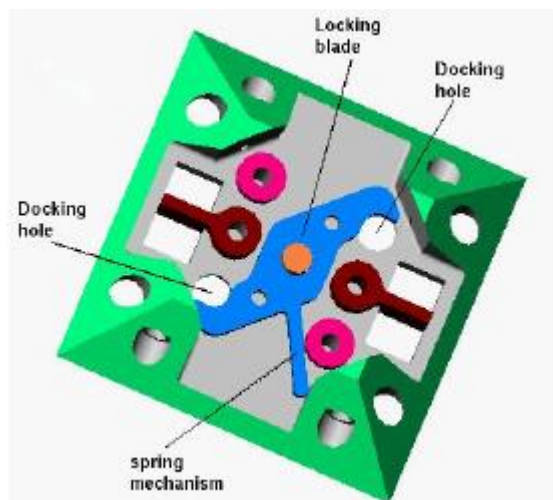
U tohoto způsobu spojování je zapotřebí dodávání energie elektromagnetům po celou dobu připojení. V případě přerušení její dodávky dojde k porušení spojení.

Elektromagnet a permanentní magnet

Zde je využití elektromagnetu pro zlepšení průběhu spojování. Po spojení je elektromagnet odpojen a spoj je zajištěn permanentními magnety. Výhodou tohoto mechanismu je snížení energie. Nevýhodou je pak odpojování, kde se musí překonat přitažná síla permanentních magnetů. V případě navržení velké síly bude odpojení problematické, v případě síly malé nebude spojení dostatečně pevné.

Pasivní mechanismus

U tohoto typu spoje je využití pohon pouze pro odpojování modulů. Spojování může být provedeno například odpruženým západkovým mechanismem, kde je k odpojení využit drát ze slitiny s tvarovou pamětí, která táhne za západku. Množství spotřebované energie je tak velmi malé a mohou být krátké i doby aktivace. [2]



Obr. 2: Pasivní mechanismus [2]

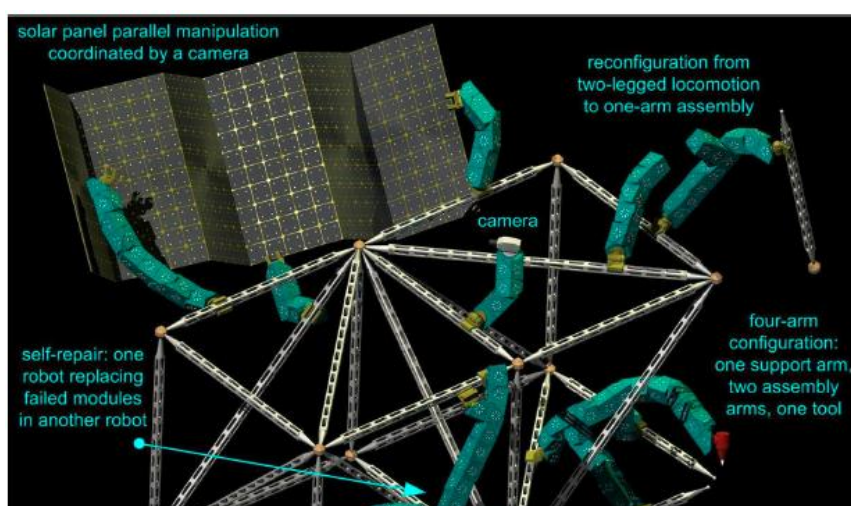
2.3. Využití modulární robotiky v praxi

Ve srovnání s průmyslovými roboty jsou modulární seberekonfigurovatelné roboty flexibilní a mohou se přizpůsobovat změnám prostředí. Tato schopnost však může vést k navýšení jejich ceny. Pevné systémy jsou optimalizovány pro konkrétní známou úlohu, zatímco u modulárních seberekonfigurovatelných robotů předem neznáme provozní podmínky ani požadavky. [5]

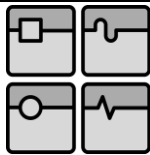
Modulární roboty tedy nachází uplatnění především u úloh, ve kterých nejsou předem známy nebo dobře specifikovány provozní podmínky a požadavky na jejich schopnosti.

Použití v kosmu

Dlouhodobé vesmírné mise vyžadují systémy, které jsou soběstačné, zvládnou nepředvídatelné situace a dokáží se sami opravit. Také je zde kladen důraz na minimální objem a nízkou hmotnost zařízení. [6]



Obr. 3: Použití modulární robotiky v kosmu [7]



Vyhledávání a záchrana v oblastech zasažených živelnými pohromami

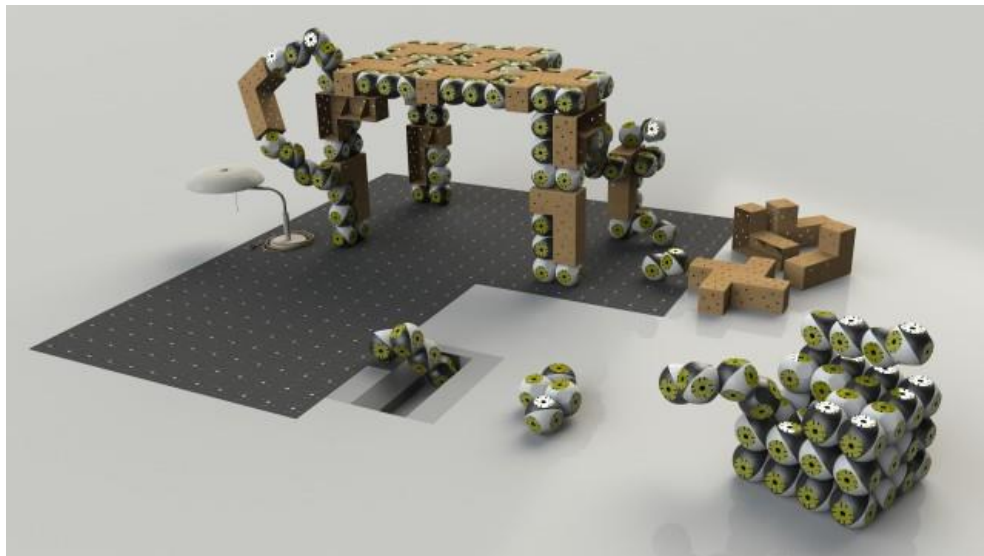
Protože se seberekonfigurovatelné modulární systémy mohou zapojit do různých struktur, mohou být využity k vyhledávání osob ve zřícených budovách nebo při jiných katastrofách. Robot se například sestaví do tvaru hada, a tak snadněji proleze malými otvory. Při nálezu oběti by pak záchranář informoval o její poloze pomocí lokátoru. Navíc může nést doplňkové moduly, jako je kamera, mikrofon a reproduktory, což zlepší záchranářský postup. [5]

„Bucket of Stuff“

Jedná se o futuristickou ideu od Davida Duffa z Palo Alto Reserch Center. Uživatel by měl kontejner, který by obsahoval seberekonfigurovatelné moduly. V případě potřeby by se robot sestavil do vhodného tvaru a vykonal libovolné domácí práce, jako například čištění okapů, skládání prádla nebo výměna oleje v automobilu. [5]

Robotický nábytek

Jedná se o projekt RoomBots vytvořen v Biorobotics Laboratory ve škole inženýrství na EPFL roku 2009. Jde o modulární roboty, které mají být použity jako stavební jednotky pro nábytek v domácnosti. Skupina jednoduchých robotických modulů, které se mohou připojovat a odpojovat, by pak tvořila různé druhy nábytku, jako jsou stoličky, židle, sedací soupravy nebo stoly. Ty by pak v průběhu času měnili svůj tvar v závislosti na požadavcích uživatele. V případě potřeby se mohou moduly pohybovat nebo může být vytvořena statická struktura v podobě zdi nebo krabice. RoomBots roboty lze využít například jako pomocný nábytek pro seniory a lidi s motorickým postižením nebo mohou tvořit programovatelné obytné, popřípadě konferenční místnosti. [10]

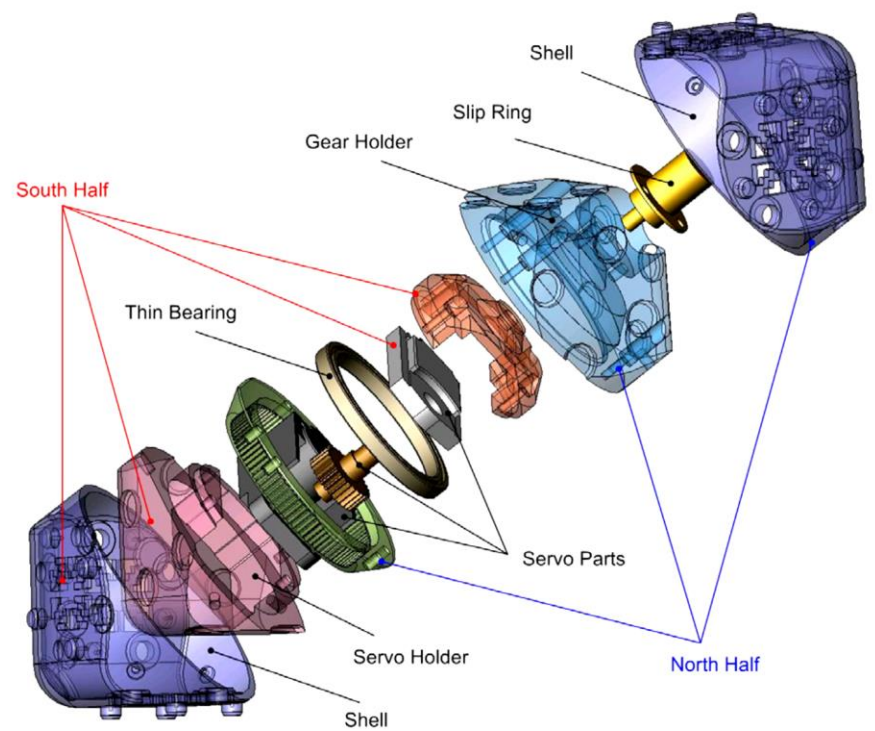


Obr. 4: Robotický nábytek (RoomBots) [17]

3. Molecubes

Molecubes je modulární robotický systém, který je vyvíjen společností Festo. Moduly mají tvar krychle se zaoblenými rohy s délkami hran 66 mm a hmotností 200 g. Tato krychle je rozdělena na dvě přibližně pyramidové části, které se vůči sobě mohou otáčet s osou rotace rovnoběžnou s nejdelsí úhlopříčkou (1,1,1). Tímto rozdělením je získáno šest stran, na které je možnost připojit další moduly.

Na obrázku č. 5 jsou průsvitně zobrazeny hlavní konstrukční části MOLECUBE, které mohou být vytištěny z ABS plastu pomocí technologie 3D tisku. Zbývající komponenty, jako jsou servomotor, ložisko a elektrický sběrač, jsou standardní sériové díly. [7] [9]

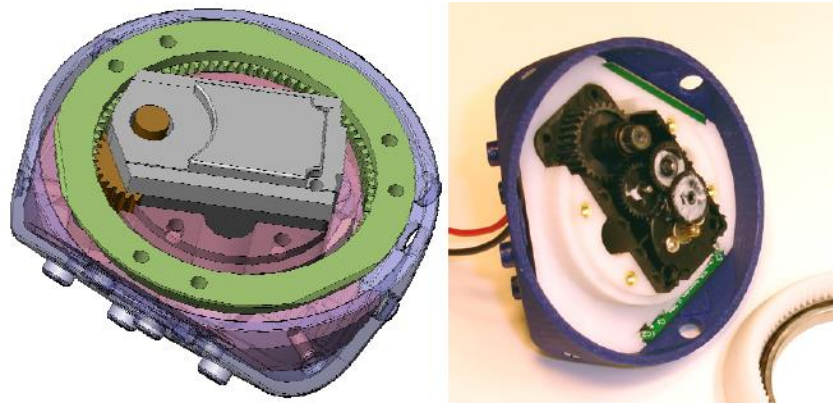
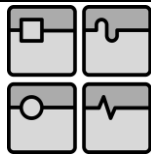


Obr. 5: Mechanické části MOLECUBES [7]

3.1. Moduly

Poháněcí modul

Pro pohon se používá upravený servomotor AX-12 s vnitřním ozubením. Protože tento servomotor zabírá v modulu největší rozměr, byly jeho rozměry upraveny tak, jak je znázorněno na obrázku č. 6. Po odstranění čelní stěny je pak v záběru čelní ozubené kolo servomotoru a vnitřní ozubené kolo molecube. [9]



Obr. 6: Upravený servomotor AX-12 [7]

Řídící modul

Nezbytnou součástí pro sestavení potřebné struktury je řídicí modul, který slouží pro komunikaci s uživatelským PC. Tento modul rozdává příkazy pro ostatní moduly a řídí celou sestavu. Základem je ARM mikroprocesor, který se stará o potřebný výpočetní výkon. Pro nahrání ovládacího programu do tohoto modulu slouží USB rozhraní, nebo technologie bluetooth. Dále je modul vybaven slotem pro paměťovou kartu, která umožňuje nahrání systémových logů a sekvencí příkazů. Z důvodů využití jedné stěny jako USB port lze na tento modul připojit pouze pět dalších kostek. [9]

Bateriový modul

Pro zajištění pohybu soustavy bez potřeby napojení na elektrickou síť se využívá bateriový modul. Je zde použita běžně dostupná baterie z videokamery o rozměrech 50x50x50 mm. Tato baterie by měla stačit pro pohon šesti až deseti modulů pod středním až těžkým zatížením po dobu v rozsahu 30 až 60 minut. [9]

Napájecí modul

Pro statická ramena se využívá napájecí modul. Tento modul slouží jako pevná základna a napájí soustavu z elektrické sítě. [9]

Modul chapadlo

Tento modul se skládá z poloviny poháněcího modulu se třemi stranami sloužícími pro připojení k jiným modulům. Je vybaven servomotorem AX-12, který otáčením centrální zakřivené struktury v druhé polovině otevírá nebo zavírá rukojeti. Chapadlo se dá využít jak pro sestavení do tvaru ramene tak i pro mobilního robota. [9]



Obr. 7: Otevřené a zavřené chapadlo [9]

Modul kolo

Stejně jako předchozí modul je složen z jedné poloviny modulu pohonu. Servomotor AX-12 je zde připojen k náboji kola s pneumatikou. [9]



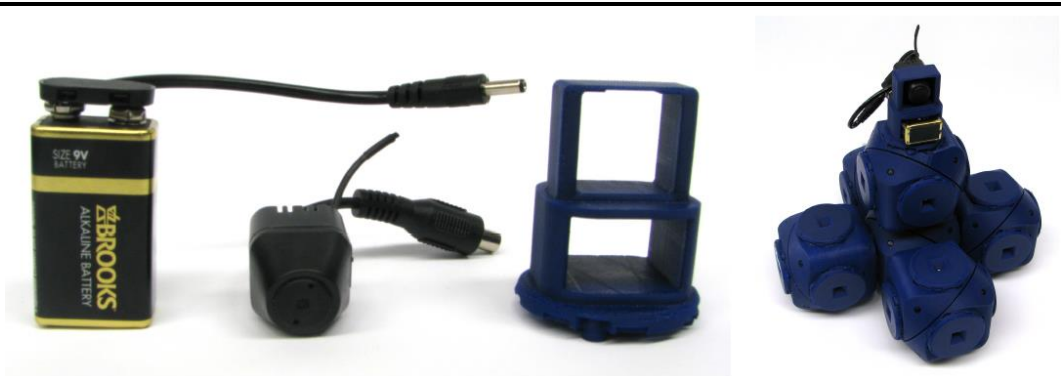
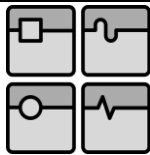
Obr. 8: Modul kolo [9]

Pasivní moduly

Tyto moduly neobsahují pohon a nejsou vybaveny elektronikou, proto je ovládací modul nemůže detekovat. Používají se kvůli snížení nákladů jako různé prodloužení sestavy nebo její nohy. [9]

Kamerový modul

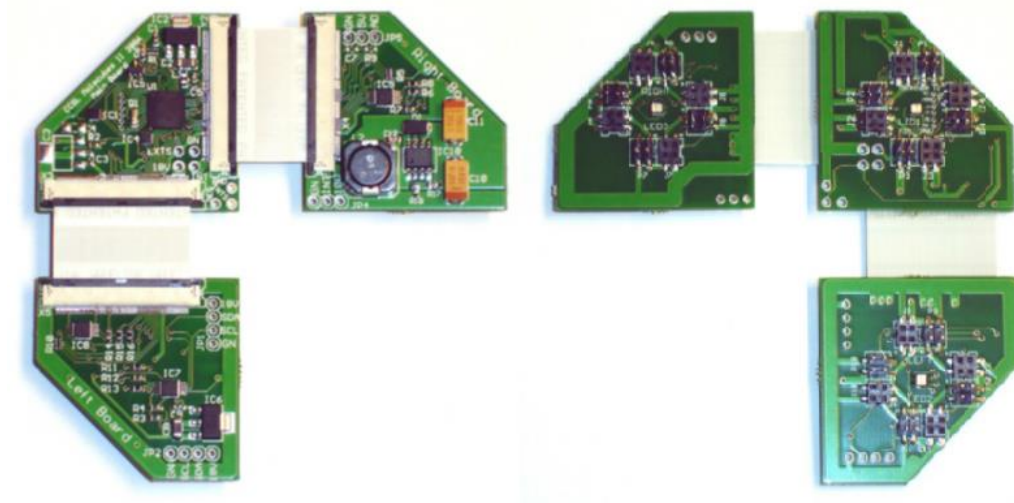
Tento modul je složen z malé bezdrátové kamery a 9V baterie umístěné ve speciálním plastovém pouzdře. Obraz z kamery je přenášen v reálném čase pomocí Wi-fi nebo bluetooth do řídicího počítače. [9]



Obr. 9: Modul kamera [9]

Plošné spoje

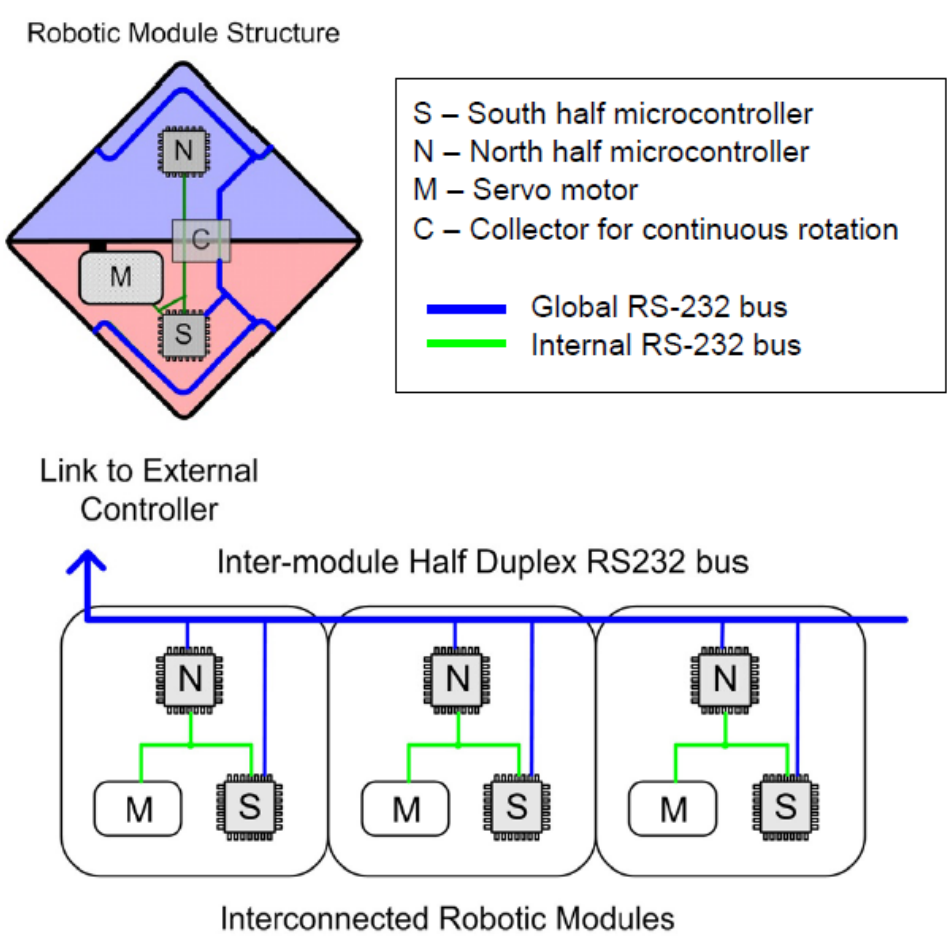
Všechny moduly molecubes jsou vybaveny sadou plošných spojů, které umožňují programovat jejich funkce, jako je otočení pohonu do požadovaného úhlu, nastavení rychlosti a kroučícího momentu, ovládání digitálních vstupů a vyhodnocování výstupů. K zjednodušení konstrukce byla navržena jednotná sada plošných spojů, která je použita u všech typů molecubes a pro jednotlivé moduly je pak naprogramována dle potřeby. Tyto desky jsou ve tvaru diamantu a jsou spojeny plochými flexibilními kabely o padesáti drátech. Dvě sady desek jsou spojeny přes kružkový sběrač, což umožňuje nekonečnou rotaci modulů. [9]



Obr. 10: Plošné spoje v Molecubes [9]

Procesor

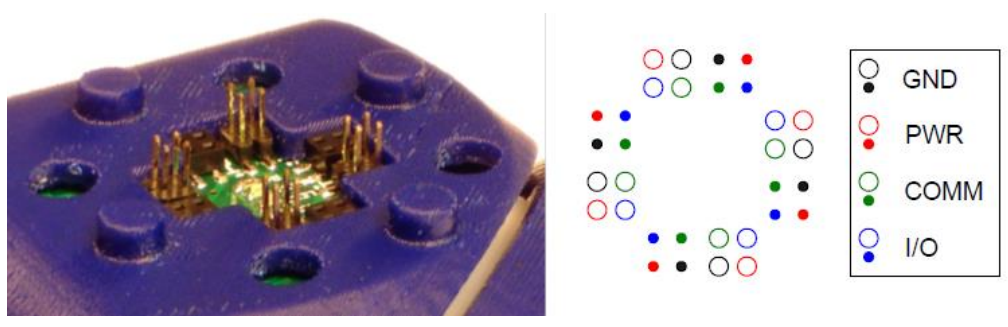
Každý modul obsahuje procesor ATmega324P s pracovní frekvencí 16 MHz, který zajišťuje ovládání a komunikační schopnosti. Pro výměnu příkazů a dat mezi vnitřními procesory, stejně jako mezi procesory jednotlivých molecubes, byl navržen speciální komunikační protokol. Jedná se o poloviční duplex sériový protokol se signály Rx (přijímaný signál) a Tx (vysílaný signál) modulovanými na jedné sběrnici, který je kompatibilní s protokolem, který využívají servomotory AX-12. [7] [9]



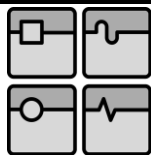
Obr. 11: Schéma interní a externí komunikace [7]

3.2. Spojování modulů

Propojovací plochy jsou vybaveny elektromechanickým konektorem, který slouží k propojení dvou modulů k sobě. Tento konektor je symetrický a umožňuje čtyři možné orientace připojení. Mechanické propojení je zajištěno pomocí osmi vzájemně spojených párů kolíků a zásuvek z ABS plastu. Elektrické spojení pak tvoří šestnáct párů kolíků a zásuvek, které poskytují osm redundantních kanálů pro propojení země, energie, komunikačních signálů a vstupů a výstupů pro snímání sousedního modulu. [7]

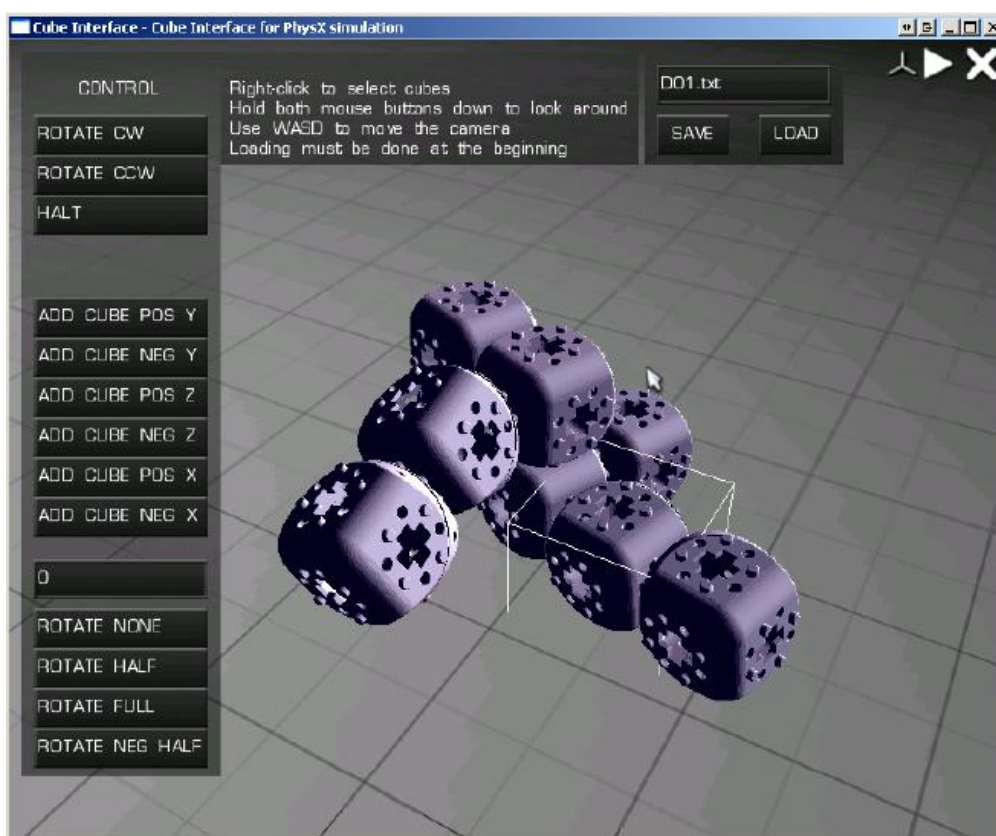


Obr. 12: Elektromechanický spoj [7]



3.3. Software

Pro simulaci molecubes robotů bylo vyvinuto Grafické rozhraní, které používá fyzikální engine AGEIA PhysX pro simulaci pohybu a grafický engine Orge pro vykreslení grafiky. Toto rozhraní poskytuje uživateli prostředky pro sestavení modulů molecubes v jakékoli konfiguraci a jejich začlenění do virtuálního světa napodobujícího realitu. Tento software umožňuje simulovat a vyhodnotit situace pro dané uspořádání před jeho fyzickou stavbou. [7] [9]



Obr. 13: Simulační program MOLECUBES [7]

3.4. Programování molecubes

Molecubes mohou být programovány čtyřmi způsoby, a to od ručního až po plně automatické.

High-level programování

Jedná se o numerické počítání matic v rozhraní podobnému programu MATLAB. Umožňuje naprogramování pohybu z bodu do bodu, reakcí na výstupy ze senzorů, používání interních proměnných a datových příkazů řízení toku dat. [12]

Přímé programování

Zkušenější uživatelé mohou programovat robot přímo v programovacím jazyce C++ prostřednictvím rozhraní ARM procesoru. Knihovna umožňuje přímou komunikaci akčních členů a všech čidel. [12]

Grafická emulace

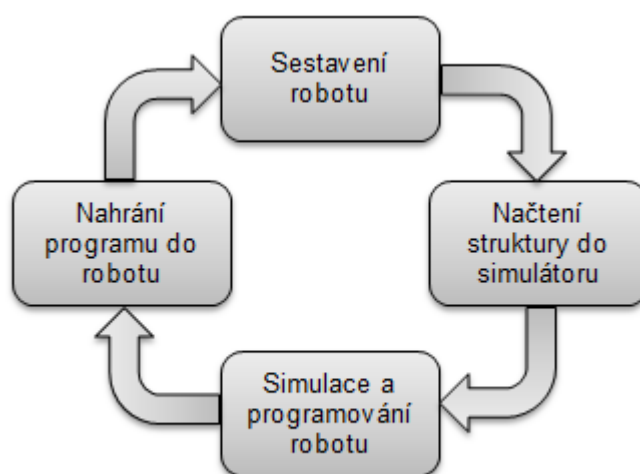
Realistická grafická a fyzikální emulace umožňuje robot otestovat a provozovat ve virtuální realitě. Uživatel zde může ovládat geometrické a fyzikální parametry, sledovat chování a detekovat kolize. Při kooperaci mohou být údaje předávány mezi několika roboty. [12]

Strojové učení

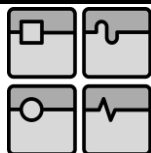
Jedná se o plně automatické programování prostřednictvím mechanických procesů učení na nejvyšší úrovni určené pro výzkumné účely. [12]

3.5. Cyklus sestavení MOLECUBE robotu

Tento cyklus zahrnuje čtyři kroky. Prvním krokem je návrh robotu a vybrání potřebných modulů. Každý robot by se měl skládat z minimálně jednoho řídicího modulu a napájecího, popřípadě bateriového modulu. Další části se potom volí podle potřebné funkce. Poté se vytvořená struktura načte z řídicího modulu do simulačního programu, kde se naprogramuje chování robotu. Vytvořený program se nahraje zpět do robotu. V případě nevyhovujícího programu se vrací k prvnímu kroku, kde se provede vylepšený návrh a cyklus se zopakuje. [9]

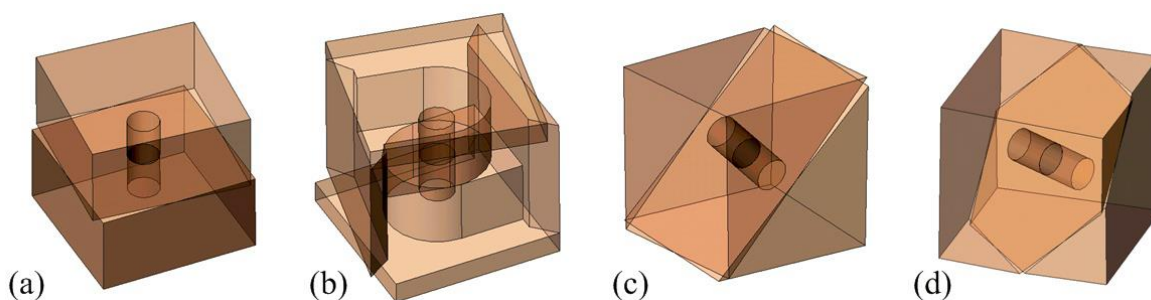


Obr. 14: Cyklus sestavení MOLECUBES robotu [1]



4. Konstrukce

V této kapitole se zabývám návrhem konstrukce poháněcího modulu a základny pro rameno robotu. Před samotným návrhem je dobré si uvědomit, proč byl pro Molecubes volen jeho atypický tvar. Při koncepčním návrhu tohoto systému bylo hledáno takové řešení, které poskytne řadu možností rekonfigurace. Při vybírání takového tvaru byly uvažovány symetrické moduly, které budou zabírat jednotku objemu v trojrozměrné síti. Na obrázku č. 15 jsou znázorněna možná provedení modulů, přičemž pro Molecubes byl vybrán tvar vyobrazen na obrázku č. 15(d). Tento tvar je jediný, který umožňuje, aby jeden modul mohl provádět mimo-rovinnou rekonfiguraci a také budování husté sítě. [8]



Obr. 15: Koncepty symetrických modulárních robotů [8]

4.1. Návrh modulu

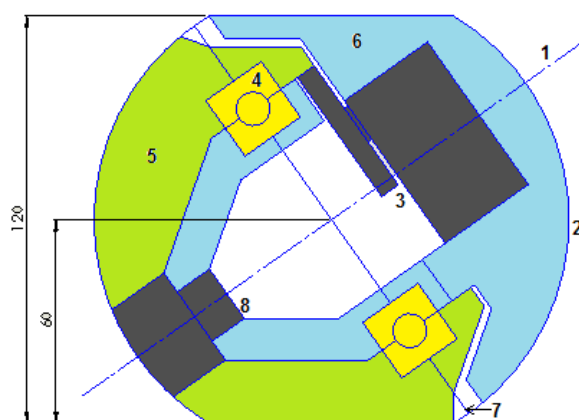
Při návrhu modulárního systému jsem vycházel z poháněcího modulu Molecubes. Jedná se tedy o identické moduly, které mají jeden stupeň volnosti a osu rotace totožnou s nejdelší úhlopříčkou krychle. Každý modul bude obsahovat ložisko, servomotor, přenos energie a signálu, nosnou konstrukci a šest konektorů pro připojení dalších modulů.

Jako tvar jsem zvolil kouli o poloměru 140 mm, na které je vytvořeno šest připojovacích ploch, vzdálených od středu otáčení 60 mm. Tyto rozměry jsou dostatečné pro umístění všech vnitřních částí.

Na obrázku č. 16 a 17 jsou znázorněny návrhy vnitřního uspořádání modulu. Modrou a zelenou barvou je zde oddělena nosná konstrukce horní a spodní poloviny modulu. Číslem **1** je označena osa rotace, číslem **7** rovina rotace. Plášť (**2**) bude sloužit jako krytování vnitřních částí modulu. Motor (**3**) přišroubovaný k nosné konstrukci (**6**) bude pohánět druhou polovinu modulu přes konstrukci (**5**). Obě tyto konstrukce budou připevněny k ložisku (**4**), čímž bude zajištěna jejich vzájemná pohyblivost. U obou variant je zamýšlena možnost nekonečné rotace.

První varianty návrhu

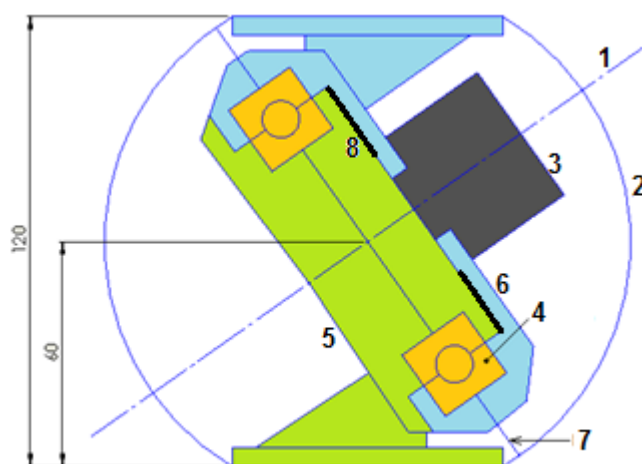
U první varianty jsem volil umístění osy motoru mimo osu otáčení. Pohon by byl realizován přes ozubený převod mezi pastorkem servomotoru a vnitřním ozubením na konstrukci spodní poloviny modulu. K převodu energie a datových signálů přes rotační vazbu by sloužil rotační převaděč (**8**).



Obr. 16: První varianta návrhu modulu

Druhá varianta návrhu

U druhého návrhu je servomotor umístěn do osy otáčení. K převodu energie a datových signálů přes rotační vazbu by taktéž sloužil rotační převaděč, který by byl plochého prstencového tvaru (platter separate slip ring) (8).



Obr. 17: Druhá varianta návrhu modulu

4.2. Konstrukce modulu

V této podkapitole jsou detailněji popsány všechny díly, které bude obsahovat poháněcí modul. Pro jeho návrh jsem zvolil druhou variantu.

4.2.1. Servomotor

Jako pohonnou jednotku modulu jsem zvolil servomotor AX-12A od firmy Dynamixel, který je v současnosti jedním z nejoblíbenějších servomotorů mezi výzkumnými pracovníky, studenty vysokých škol i průmyslem. Tento motor se skládá z pohonné jednotky, malé převodovky, řídicí jednotky a z měřicího členu. Pohonnou jednotku tvoří stejnosměrný motor.

Pro řízení je určen jednočipový procesor ATmega128, který zajišťuje jak řízení motoru, tak i komunikaci s okolím pomocí asynchronního sériového rozhraní s TTL úrovní komunikačního signálu. Parametry servomotoru AX-12A jsou uvedeny v tabulce č. 2. [14]

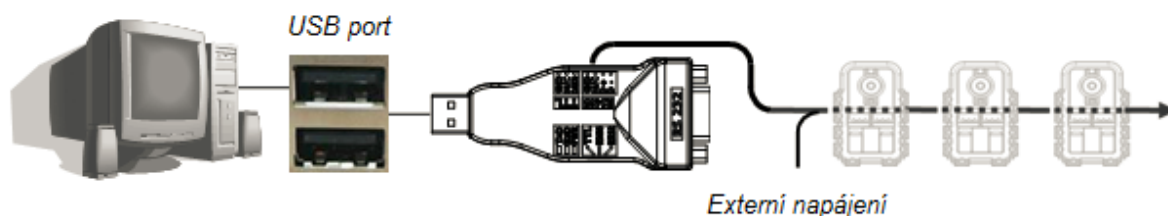
Tab. 2: Parametry servomotoru AX-12A [14]

Název	DYNAMIXEL AX-12A
Váha [g]	54.6
Rozměry [mm]	32 x 50 x 40
Rozlišení [°]	0.29
Převodový poměr	254:1
Vstupní napětí [V]	12
Krouticí moment [Nm]	1.5
Rychlost [ot/min]	59
Přesnost [°]	0.29
Operační úhel [°]	0 – 300 nebo nekonečná rotace
Provozní teplota [°C]	-5 až +70
Řízení	Digitální
Protokol	TTL
Šířka komunikace [Mbps]	1
Materiál převodovky	plast
Cena [Kč]	1 392

Řízení servomotoru

U tohoto typu servomotoru je možné provádět řízení se zpětnou vazbou. Měřící člen je tvořen snímačem pozice a snímačem elektrického proudu, odebíraného motorem. Řídící jednotka pak umožňuje předávání informací z měřícího členu nadřazenému řídicímu systému. Informace ze snímače elektrického proudu mohou být také využity při prevenci přehřátí či poškození modulu. Díky nim může nadřazený systém správně zareagovat, pokud například dojde ke kolizi s překážkou. [15]

Firma Dynamixel dodává k servomotorům svůj freeware, kterým lze servomotory detailně řídit. Pro komunikaci s počítačem slouží USB2Dynamixel převodník. Ten je vybaven USB rozhraním pro připojení PC a 3 nebo 4 pinovými konektory pro různé modelové řady. Při použití tohoto převodníku je potřeba dodat servomotorům externí napájení. [1] [11]



Obr. 18: Schéma připojení USB2Dynamixel k PC [11]

Obrázek č. 19 znázorňuje využití pinů u třípinového konektoru určeného pro modelovou řadu AX, do které spadá mnou vybraný servomotor AX-12A.

3 Pin Cable		
Pin No.	Signal	Pin Figure
1	GND	
2	NOT Connected	
3	DATA (TTL)	

Obr. 19: Třípinový konektor [11]

Pro ovládání je využit protokol, který je založený na paketové komunikaci. Řídící jednotka odesílá instrukční paket do servomotorů a ty vrací paket zpětné vazby. Rychlost komunikace je v rozsahu 7343 bps až 1 Mbps. [11]

Tab. 3: Struktura paketů [1]

Instrukční paket							
0xFF	0xFF	ID	LENGHT	INSTRUCTION	PARAMETR 1	PARAMETER N	CHECK SUM
Paket zpětné vazby							
0xFF	0xFF	ID	LENGHT	ERROR	PARAMETR 1	PARAMETER N	CHECK SUM

4.2.2. Ložisko

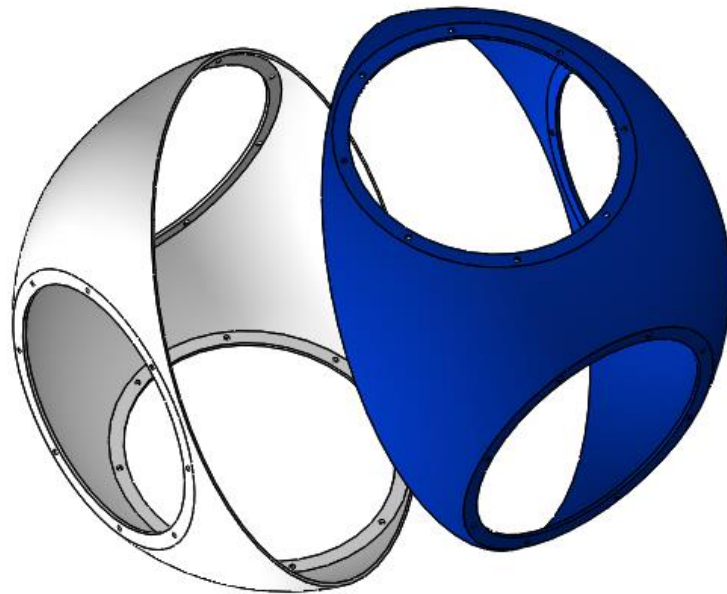
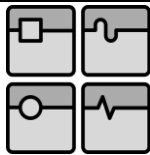
Ložisko jsem vybral KO6020XPO od firmy KAYDON. Jedná se o tenké kuličkové ložisko typu X (čtyřbodové). Toto ložisko je schopno přenášet axiální zatížení v obou směrech, radiální zatížení, moment, a to jednotlivě, nebo v jakékoli kombinaci. [13]

Tab. 4: Parametry ložiska [13]

Číslo	Vnitřní průměr [mm]	Vnější průměr [mm]	Radiální únosnost [kg]		Axiální únosnost [kg]		Momentová únosnost [Nm]		Hmotnost [kg]
			Stat.	Dyn.	Stat.	Dyn.	Stat.	Dyn.	
KO6020XPO	60	100	1906	1887	4363	2562	685	556	0.59

4.2.3. Krytování

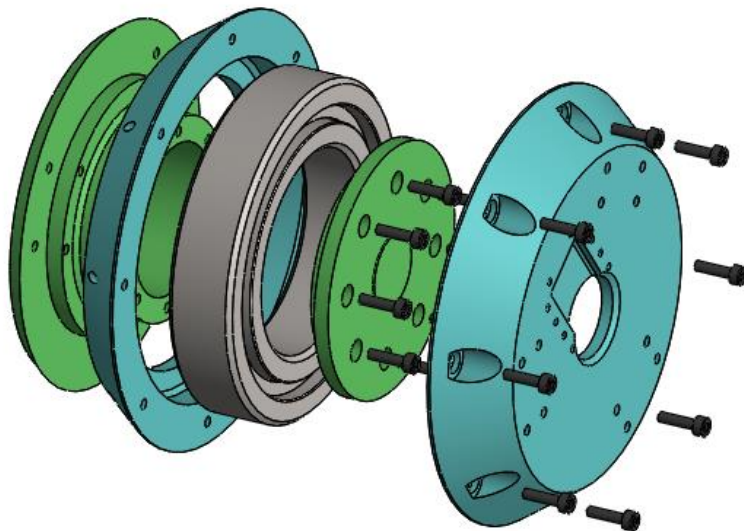
Krytování vnitřního prostoru modulu je vytvořeno pomocí dvou stejných skořepin tvaru polokoule a tloušťky 1 mm. Na každé polokouli jsou tři otvory o průměru 70 mm, určené pro přípojovací konektory. Kolem těchto otvorů jsou vytvořeny plochy, které slouží pro uchycení krytu k nosné části modulu. To je provedeno pomocí osmi šroubů M 1,4x3 na každé z nich. Kryt neslouží jako nosná konstrukce, proto je navržen z plastu.



Obr. 20: Model krytování modulu

4.2.4. Nosná konstrukce

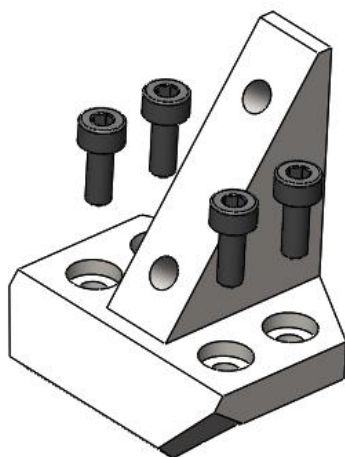
Základem nosné konstrukce modulu je ložisko KO6020XPO, které je popsáno výše. K němu jsou přidělané čtyři díly, jak je znázorněno na obrázku č. 21. Konstrukce je vytvořena tak, aby se mohly desky obou polovin modulu proti sobě otáčet. Toho je docíleno tak, že zeleně znázorněna deska poloviny modulu, který se otáčí je přidělána k vnitřnímu kroužku ložiska a modře znázorněna deska neotáčející se poloviny modulu s motorem ke kroužku vnějšímu. Díly tvořící desky jsou k sobě přišroubovány pomocí osmi šroubů M3x12. Na obou deskách jsou vytvořeny otvory se závitem sloužící pro uchycení podpěr.



Obr. 21: Model nosné konstrukce

4.2.5. Podpěry

Podpěry jsou součásti nosné konstrukce modulu, které budou přenášet zatížení z přípojovacího konektoru do nosné desky. Každý modul obsahuje šest stejných podpěr po třech na každou jeho polovinu. Připojení podpěry je provedeno pomocí čtyř šroubů M3x8.



Obr. 22: Model podpěry

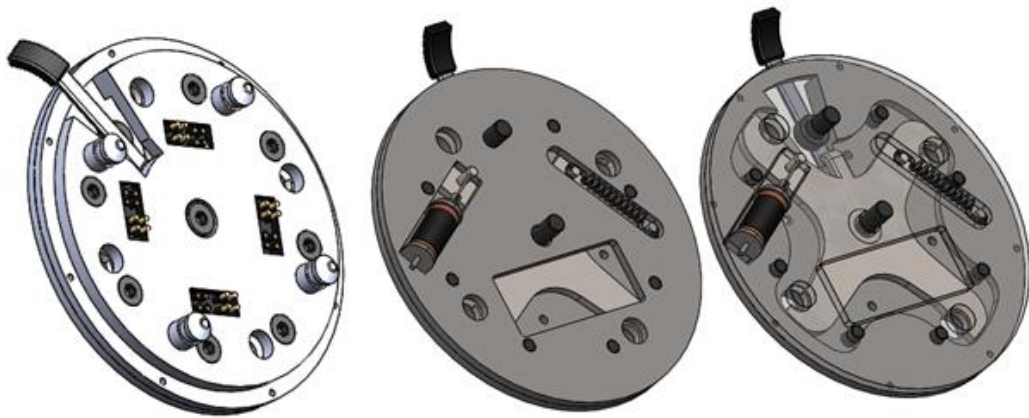
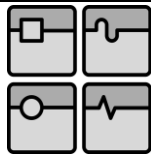
4.2.6. Konektory připojení modulů

Při návrhu spojení dvou modulů k sobě jsem chtěl vytvořit takovou konstrukci, která bude fungovat jak automaticky, tak i manuálně. Dále jsem vycházel z toho, aby nebyla nutná dodávka energie pro připojení ani pro následné držení. Proto jsem vybral variantu spojky s odpruženým západkovým mechanismem.

Přípojovací plocha konektoru má průměr 70 mm a jsou na ní čtyři kolíky a čtyři otvory. Ty jsou symetricky umístěny na kružnici o průměru 55 mm a navrženy tak, aby do sebe protikusy zapadaly. Při spojení dvou konektorů zapadnou kolíky do protilehlých otvorů a dojde k jejich zajištění pomocí zamykacího mechanismu. Ten je umístěn ve tvarovém vybrání předního dílu a otáčí se na čepu v jeho středu. Do zamčené polohy je přitahován pomocí tažné pružiny.

Pro manuální odpojení je navržena páčka, pomocí které se mechanismus odemkne a moduly bude možno následně oddělit. K automatickému odpojení slouží miniaturní solenoid o rozměrech 15x7x8 mm, s pracovní délkou 3 mm a jmenovitým napětím 12V.

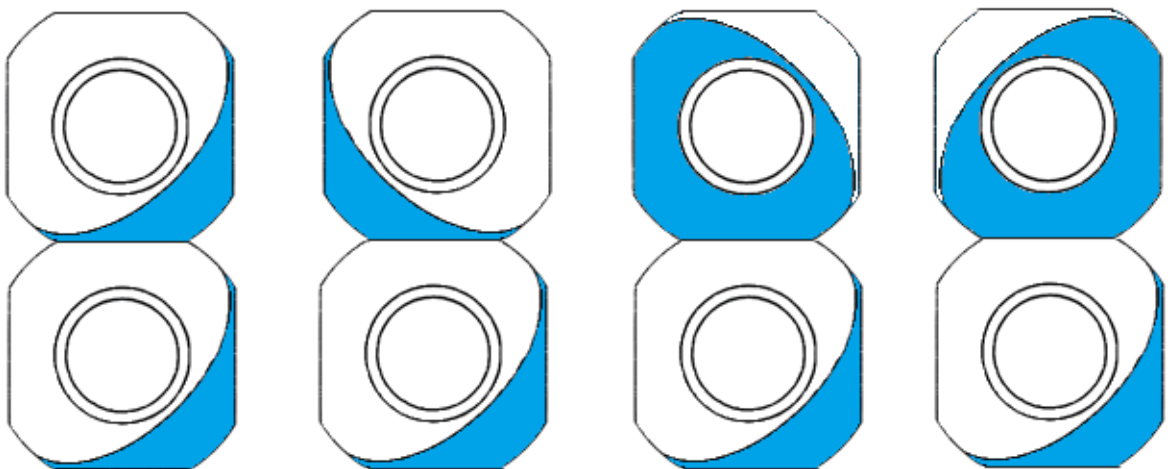
Přenos energie, uzemnění a datových signálů mezi jednotlivými moduly budou zajišťovat čtyři čtyř-pinové konektory symetricky umístěné na přípojovací ploše na kružnici o průměru 35 mm.



Obr. 23: Model připojovacího konektoru

Možnosti zapojení

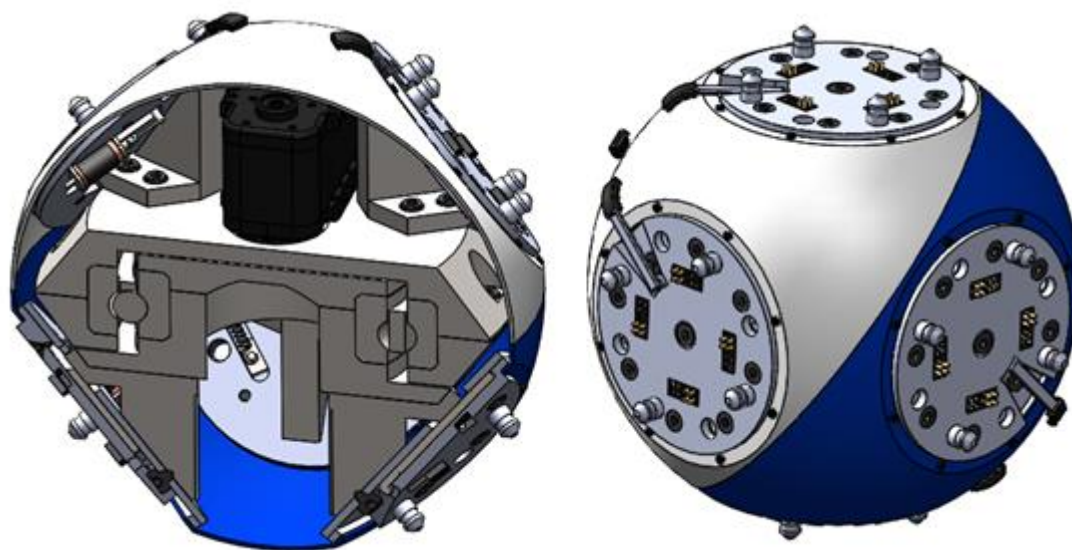
Na obrázku č. 24 jsou znázorněny čtyři možnosti sestavení modulů pro takovýto symetrický konektor, kde páry kolíků a děr jsou od sebe posunuty o úhel 90°.



Obr. 24: Čtyři základní typy spojení modulů

4.3. Sestavení modulu

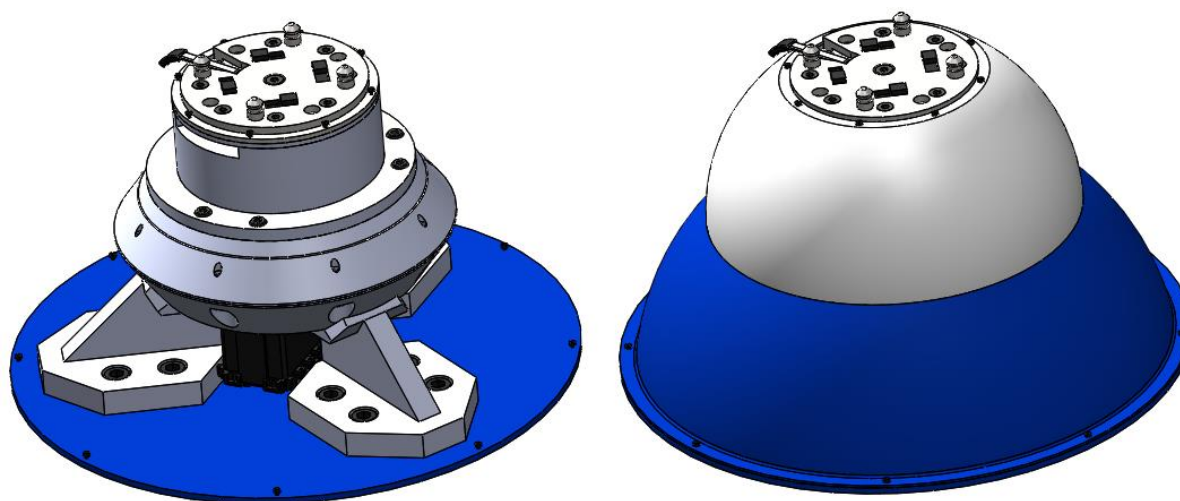
Při sestavení modulu se nejprve na ložisko nasadí spodní část horní nosné desky. Poté se nasadí obě části spodní desky a přišroubují se k sobě. Přišroubováním horní části horní desky se uzavře část nosné konstrukce. Následuje umístění servomotoru na určené místo, jeho upevnění a přišroubování otočné desky. Jako poslední část nosné konstrukce se přišroubují podpěry. Na ně se namontují připojovací konektory a zapojí se všechna vnitřní kabeláž. Jako poslední se nasadí a přišroubuje krytování. Řez a konečná podoba modulu jsou znázorněny na obrázku č. 25. Aby byla hmotnost modulu co nejmenší, všechny nenakupované části jsou navrženy z lehkého a odolného ABS plastu. Pokud by se při testování prokázal jako nevyhovující, nahradil by se slitinou hliníku.



Obr. 25: Model poháněcího modulu

4.4. Konstrukce základny

Tento modul bude tvořit pevnou základnu pro rameno statického robotu s jedním připojovacím konektorem. Má jednu rotační vazbu, která ramenu umožní rotaci kolem svislé osy. Tím se značně zlepší jeho pohyblivost v prostoru. Tvar a rozměry jsem volil tak, aby se co nejvíce podobala předchozímu návrhu. Horní připojovací plocha je od podstavy vzdálena 120 mm, stejně jako jsou rozměry poháněcího modulu. Nosná konstrukce se skládá ze stejných dílů, které jsou použity v poháněcím modulu. Výjimku tvoří pouze podpěry, které jsou v horní části nahrazeny mezikusem upraveným pro připojení konektoru. Pro zvýšení stability slouží spodní podpěry, které také mohou být přišroubovány k pevné podložce. Jejich tvar je upraven tak, aby mohla být osa rotace základny vertikální.

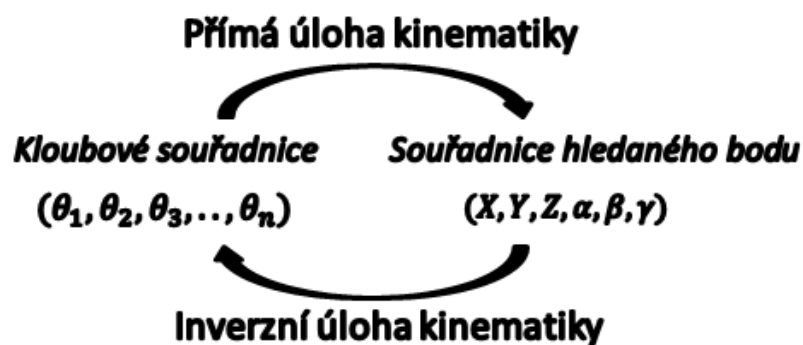


Obr. 26: Model základny

5. Popis pohybů

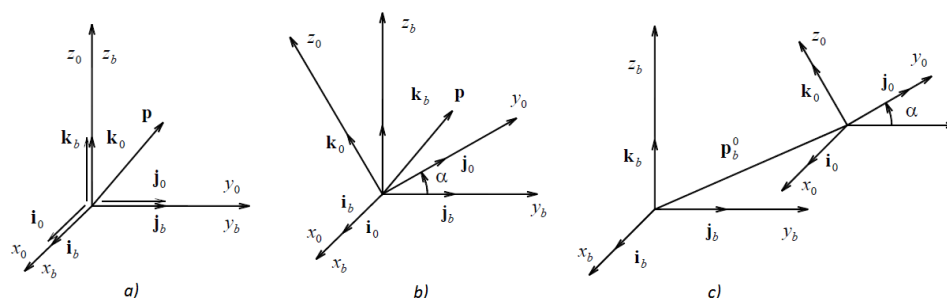
V této kapitole jsou nejprve popsány transformace souřadných systémů v jednom modulu a základně. To je provedeno pomocí Denavit–Hantenbergova principu rozmístění souřadných systémů. Dále je popsána přímá úloha kinematiky aplikovaná na rameno robotu. Na závěr kapitoly je popsána inverzní úloha kinematiky, která byla vytvořena v simulačním programu V-REP.

V kinematice prostorových mechanismů existují dvě základní úlohy, a to přímá a inverzní úloha kinematiky. Přímá úloha kinematiky je snadno řešitelná pomocí goniometrických vztahů mezi jednotlivými články nebo pomocí lokálních souřadných systémů článků a transformačními maticemi pro přepočítání souřadnic mezi nimi. Jsou tedy známy jednotlivé zobecněné souřadnice a hledá se poloha a orientace koncového bodu. U inverzní úlohy kinematiky je řešení opačné, kdy je známa poloha a orientace koncového bodu a hledají se jednotlivé zobecněné souřadnice. Tato úloha má obtížnější řešení, zejména pro kinematické struktury s více stupni volnosti. Pro přepočítání souřadnic lokálních systémů v jednotlivých člancích a souřadnic globálního souřadného systému se využívá maticového počtu. [3]



Obr. 27: Přímá a inverzní kinematika

5.1. Přímá úloha kinematiky



Obr. 28: a) Souřadné systémy, b) Otočení souřadného systému, c) Natočení a posunutí souřadného systému [3]

Transformace souřadnic [3]

Využívá se pro přepočítání souřadnic mezi globálním souřadným systémem (GCS) spojeným s pracovním prostorem a jednotlivými lokálními souřadnými systémy (LCS) článků mechanismu. Vztah pro přepočítání souřadnic x_b, y_b, z_b (GCS) do x_0, y_0, z_0 (LCS) je vyjádřen v maticové formě:

$$\begin{bmatrix} p_{xb} \\ p_{yb} \\ p_{zb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_b i_0 & i_b j_0 & i_b k_0 \\ j_b i_0 & j_b j_0 & j_b k_0 \\ k_b i_0 & k_b j_0 & k_b k_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{x0} \\ p_{y0} \\ p_{z0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Nebo symbolicky:

$$(p)_b = [R]_{b0} \cdot (p)_0 \quad (2)$$

Rotace souřadných systémů [3]

Rotační matice umožňuje přepočítání souřadnic vektorů dvou souřadných systémů, které jsou vůči sobě pootočený. Při uvážení, že skalární součin kolmých vektorů je roven nule, skalární součin totožných jednotkových vektorů je roven jedné a skalární součin různoběžných jednotkových vektorů je roven $\cos\alpha$ a při uvažování vzorce (3) dostaneme transformační matice pro rotaci kolem osy x (4), osy y (5) a osy z (6).

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} \pm \alpha\right) = \mp \sin\alpha \quad (3)$$

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_{y,\varphi} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R_{z,\vartheta} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta & -\sin\vartheta & 0 \\ \sin\vartheta & \cos\vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

5.2. Denavit–Hartenbergův princip rozmístění souřadných systémů

Účelem Denavit–Hartenbergova principu je vytvoření transformační matice v univerzálním tvaru mezi dvěma sousedními lokálními souřadnými systémy tak, aby bylo možno provést snadnou algoritmicizaci. Transformační vztah mezi sousedními souřadnými systémy LCS_{i-1} a LCS_i je dán čtyřmi jednoduchými pohyby, a to rotací, translací, translací a opět rotací. [3]

Nejprve se provede natočení osy x_{i-1} kolem osy z_{i-1} o úhel ϑ_i tak, že osy x_{i-1} a x_i jsou rovnoběžné:

$$A_{z_{i-1}, \vartheta_i} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta_i & -\sin\vartheta_i & 0 & 0 \\ \sin\vartheta_i & \cos\vartheta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Následuje posunutí osy x_{i-1} ve směru osy z_{i-1} o vzdálenost d_i tak, že osy x_{i-1} a x_i jsou totožné:

$$A_{z_{i-1}, d_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dále se posune počátek souřadného systému LCS_{i-1} podél osy x_i o vzdálenost a_i tak, že dojde k sjednocení počátků souřadných systémů LCS_{i-1} a LCS_i :

$$A_{x_i, a_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Posledním krokem je natočení osy z_{i-1} kolem x_i o úhel α_i , čímž dojde k sjednocení souřadných systémů LCS_{i-1} a LCS_i :

$$A_{x_i, \alpha_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Výsledná transformační matice mezi souřadnými systémy vznikne vynásobením jednotlivých dílčích transformačních matic v pořadí tak, jak byly prováděny pohyby:

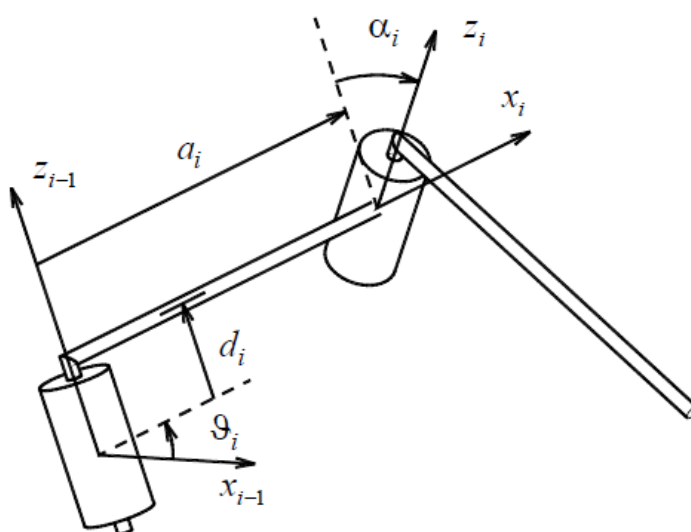
$$A_{i-1, i} = A_{z_{i-1}, \vartheta_i} \cdot A_{z_{i-1}, d_i} \cdot A_{x_i, a_i} \cdot A_{x_i, \alpha_i} \quad (11)$$

Po vynásobení v obecném tvaru dostaneme vzorec (12), kde tzv. Denavit–Hartenbergovy parametry ϑ_i , d_i , a_i , α_i , plně charakterizují goniometrické vztahy mezi sousedními články spojenými rotační nebo translační vazbou.

$$A_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta_i & -\sin\vartheta_i \cos\alpha_i & \sin\vartheta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\vartheta_i \\ \sin\vartheta_i & \cos\vartheta_i \cos\alpha_i & -\cos\vartheta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\vartheta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Homogenní transformační matice mezi dvěma sousedními souřadnými systémy článků, které jsou spojeny rotační nebo translační pohybovou jednotkou má tvar:

$$A_{i-1,i} = \left[\begin{array}{ccc|c} R & & & p \\ - & - & - & + \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (13)$$



Obr. 29: Denavit–Hartenbergův princip [3]

Parametry ϑ_i , d_i , a_i , α_i se dají poměrně snadno odečíst po rozmístění souřadných systémů.

ϑ_i úhel mezi osami x_{i-1} a x_i při otáčení kolem z_{i-1}

d_i nejkratší vzdálenost (normála) mezi osami x_{i-1} a x_i , kladný směr ve směru z_{i-1}

a_i nejkratší vzdálenost (normála) mezi osami z_{i-1} a z_i , kladný směr ve směru x_i

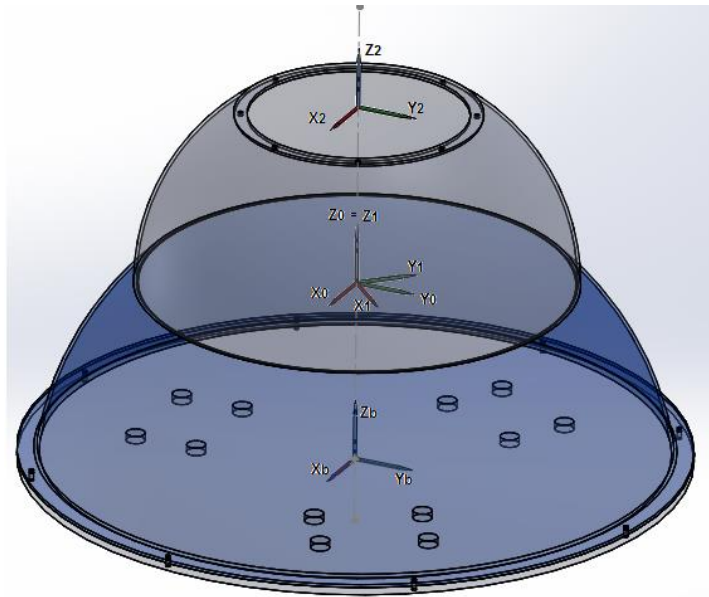
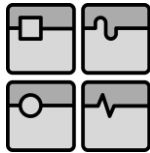
α_i úhel mezi osami z_{i-1} a z_i při otáčení kolem x_i

5.2.1. Transformace souřadných systémů v modulech

Při popisu transformací souřadných systémů v základně a jednom modulu jsem postupoval dle Denavit–Hartenbergova principu.

Základna

Nejprve jsem si zvolil základní souřadný systém, který se nachází na spodku základny a je umístěn v ose otáčení. Ten bude sloužit jako výchozí bod, ke kterému se budou počítat pozice a orientace ostatních souřadných systémů.



Obr. 30: Transformace souřadných systémů základny

Tab. 5: Denavit–Hartenbergovy parametry pro základnu

i	ϑ_i	d_i	α_i	α_i
0	0	60 mm	0	0
1	ϑ_1	0	0	0
2	0	60 mm	0	0

Transformační matice pro modul základny budou složeny z posunutí v ose Z o 60 mm do roviny rotace, otočení o potřebný úhel (natočení pohonu) a druhé posunutí v ose Z o 60 mm.

$$Z_{b0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 60 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Z_{01} = \begin{bmatrix} \cos(q) & -\sin(q) & 0 & 0 \\ \sin(q) & \cos(q) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$Z_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 60 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Po vynásobení těchto tří matic v pořadí, jak jdou za sebou, dostaneme matici udávající polohu a natočení přípojovacího konektoru v závislosti na natočení pohonu.

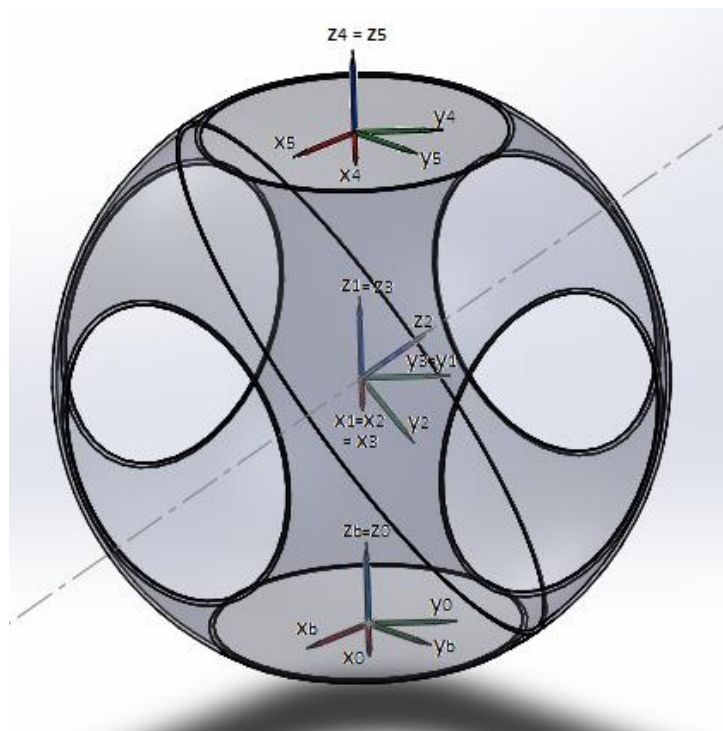
$$Z_{b2} = Z_{b0} \cdot Z_{01} \cdot Z_{12} \quad (17)$$

Po dosazení:

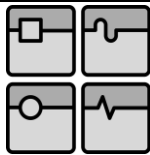
$$\begin{aligned}
 Z_{b2} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 60 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(q) & -\sin(q) & 0 & 0 \\ \sin(q) & \cos(q) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 60 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(q) & -\sin(q) & 0 & 0 \\ \sin(q) & \cos(q) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 120 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (18)$$

Poháněcí modul

Souřadné systémy budou transformovány ze spodního přípojovacího konektoru modulu do přípojovacího konektoru horního. Jednotlivé hodnoty posunutí a natočení jsou vypsány v tabulce č. 6. Hodnota úhlu $\text{atan}\sqrt{2}$ vyplývá ze ztotožnění osy otáčení s nejdelší úhlopříčkou krychle.



Obr. 31: Transformace souřadných systémů v jednom modulu



Tab. 6: Denavit–Hartenbergovy parametry pro poháněcí modul

i	ϑ_i	d_i	a_i	α_i
0	$-\pi/4$	0	0	0
1	0	60 mm	0	0
2	0	0	0	$-\text{atan}\sqrt{2}$
3	ϑ_1	0	0	0
4	0	0	0	$\text{atan}\sqrt{2}$
5	0	60 mm	0	0
6	$\pi/4$	0	0	0

První transformační matice po dosazení parametrů je:

$$A_{b0} = \begin{bmatrix} \cos(-45) & -\sin(-45) & 0 & 0 \\ \sin(-45) & \cos(-45) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,707 & 0,707 & 0 & 0 \\ -0,707 & 0,707 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Druhá transformační matice:

$$A_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 60 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Třetí transformační matice:

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-54,74) & -\sin(-54,74) & 0 \\ 0 & \sin(-54,74) & \cos(-54,74) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,57735 & 0,8165 & 0 \\ 0 & -0,8165 & 0,57735 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Čtvrtá transformační matice:

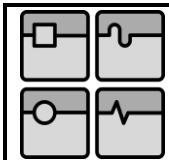
$$A_{23} = \begin{bmatrix} \cos(q) & -\sin(q) & 0 & 0 \\ \sin(q) & \cos(q) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Pátá transformační matice:

$$A_{34} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 54,74 & -\sin 54,74 & 0 \\ 0 & \sin 54,74 & \cos 54,74 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,57735 & -0,8165 & 0 \\ 0 & 0,8165 & 0,57735 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Šestá transformační matice:

$$A_{45} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 60 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Sedmá transformační matice:

$$A_{56} = \begin{bmatrix} \cos 45 & -\sin 45 & 0 & 0 \\ \sin 45 & \cos 45 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,707 & 0,707 & 0 & 0 \\ -0,707 & 0,707 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

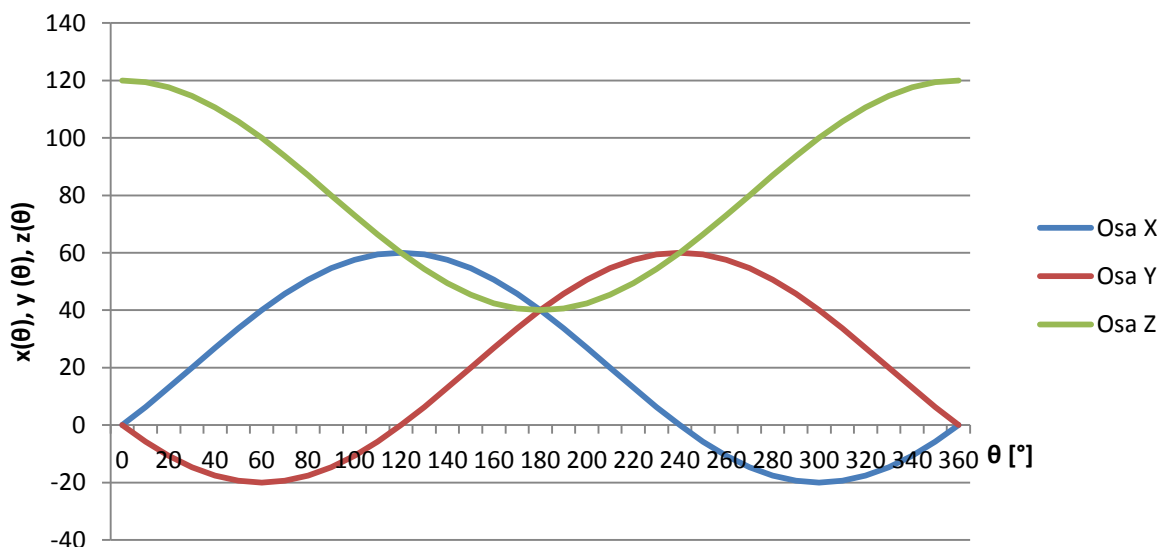
Celková transformační matice:

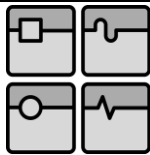
$$A_{b6} = A_{b0} \cdot A_{01} \cdot A_{12} \cdot A_{23} \cdot A_{34} \cdot A_{45} \cdot A_{56} \quad (26)$$

Po dosazení:

$$A_{b6} = \begin{bmatrix} 0,707 & 0,707 & 0 & 0 \\ -0,707 & 0,707 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 60 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,57735 & 0,8165 & 0 \\ 0 & -0,8165 & 0,57735 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(q) & -\sin(q) & 0 & 0 \\ \sin(q) & \cos(q) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,57735 & -0,8165 & 0 \\ 0 & 0,8165 & 0,57735 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 60 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$
$$\cdot \begin{bmatrix} 0,707 & 0,707 & 0 & 0 \\ -0,707 & 0,707 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

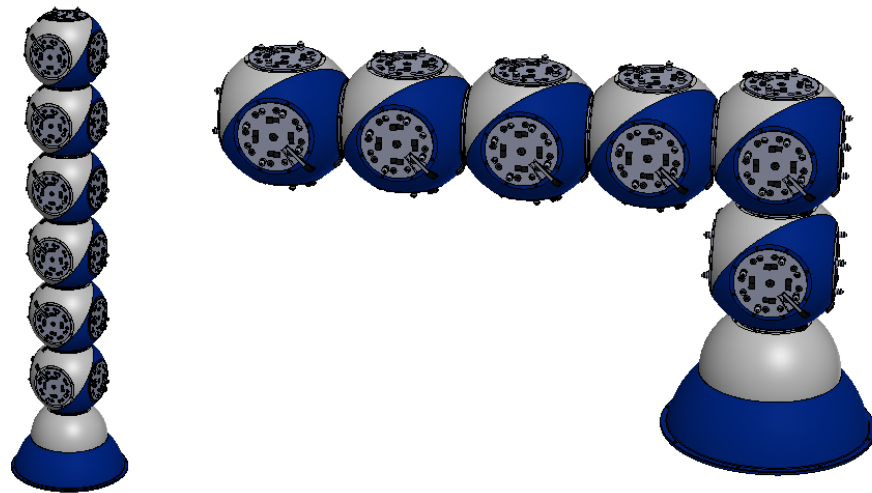
Graf 1: Vykreslení souřadnic v osách X, Y, Z





5.2.2. Přímá úloha kinematiky aplikovaná na rameno

Aby mohly být popsány pohyby modulů v prostoru, musí se nejprve spojit do určité struktury. Pro tento účel jsem volil sestavení ramene, které se skládá ze základny a šesti poháněcích modulů. Ty jsou zapojeny tak, že v základním tvaru jsou jejich osy rotace rovnoběžné. Takto sestavený robot bude mít sedm rotačních vazeb. První rotaci zajišťuje základna, která umožňuje natáčení kolem vertikální osy. Šest dalších je umístěno po jedné v každém modulu. Výsledná podoba ramene je znázorněna na obrázku č. 32.



Obr. 32: Model sestavení ramene robotu

Pro výpočet přímé kinematiky jsem použil program MATLAB, který je určen pro práci s maticemi. Pozice a orientace souřadných systémů ramene, jak jednotlivých modulů, tak i koncového bodu, se vypočítají násobením transformačních matic jednotlivých modulů popsaných výše. Pro můj případ to tedy bude základna a šestkrát modul.

$$Z_{b0} \cdot A_{b6} \cdot B_{b6} \cdot C_{b6} \cdot D_{b6} \cdot E_{b6} \cdot F_{b6} = \begin{bmatrix} R & | & p \\ - & - & - & + & - \\ 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Kde Z_{b0} je matice 4x4 pro základnu a A_{b6} až F_{b6} jsou matice 4x4 pro poháněcí moduly.

Pro tyto výpočty jsem vytvořil jednoduchý program, který po zadání natočení pohonů do hlavního skriptu vypočítá a vykreslí pozice a orientace jednotlivých připojovacích bodů modulů ramene. To je provedeno pomocí funkce DHmatice pro výpočet a několika funkcí vykreslení.

Funkce DHmatice - vstupem do ní jsou Denavit–Hartenbergovy parametry a výstupem je Denavit–Hartenbergova matice.

Ukázka zápisu v MATLABU

```
function [ MaticeDH ] = DHmatice( theta,d,a,alpha )

MaticeDH = [cosd(theta) -sind(theta)*cosd(alpha) sind(theta)*sind(alpha)
a*cosd(theta);
sind(theta) cosd(theta)*cosd(alpha) -cosd(theta)*sind(alpha) a*sind(theta);
0,sind(alpha),cosd(alpha),d;
0,0,0,1];

end
```

Funkce *vykresleniMatice* – slouží pro vykreslení souřadných systémů jednotlivých modulů.

Ukázka zápisu v MATLABU

```
function vykresleniMatice( A )

xx=A(1,1)*60;
yx=A(2,1)*60;
zx=A(3,1)*60;
xy=A(1,2)*60;
yy=A(2,2)*60;
zy=A(3,2)*60;
xz=A(1,3)*60;
yz=A(2,3)*60;
zz=A(3,3)*60;

bodX=A(1,4);
bodY=A(2,4);
bodZ=A(3,4);
hold on
grid on
%-----
%vykresleni pozice bodu
%-----
plot3(bodX,bodY,bodZ,'ro');
xlabel('osa x');
ylabel('osa y');
zlabel('osa z');
%-----
%vykresleni souřadného systému
%-----
line([bodX,bodX+xx],[bodY,bodY+yx],[bodZ,bodZ+zx],'LineWidth',2,'Color','red','Tag','x');
line([bodX,bodX+xy],[bodY,bodY+yy],[bodZ,bodZ+zy],'LineWidth',2,'Color','green','Tag','y');
line([bodX,bodX+xz],[bodY,bodY+yz],[bodZ,bodZ+zz],'LineWidth',2,'Color','blue','Tag','z');
title('pozice a orientace koncového bodu');
hold on
end
```

Funkce *vykresleniModulu* – slouží pro vykreslení zjednodušených modulů.

Ukázka zápisu v MATLABU

```
function vykresleniModulu(A)

xx=A(1,1)*20;
yx=A(2,1)*20;
zx=A(3,1)*20;
xy=A(1,2)*20;
yy=A(2,2)*20;
zy=A(3,2)*20;
xz=A(1,3)*20;
yz=A(2,3)*20;
zz=A(3,3)*20;

bodX=A(1,4);
bodY=A(2,4);
bodZ=A(3,4);
hold on
grid on
%-----
%vykresleni modulu
%-----
[X,Y,Z] = sphere();
r = 60;
surf( r*X+bodX, r*Y+bodY, r*Z+bodZ )
colormap([0 0 1])
hold on

end
```

Hlavní skript

Hlavní skript je nazván ‚molecubes‘ a slučuje předchozí vypsání funkce. Také slouží pro zadávání úhlů natočení jednotlivých pohonů, které jsou zde reprezentovány úhly *pohon0* až *pohon6*.

pohon0 – natočení základny okolo osy Z.

pohon1, ..., pohon6 – natočení jednotlivých modulů kolem svých os rotace.

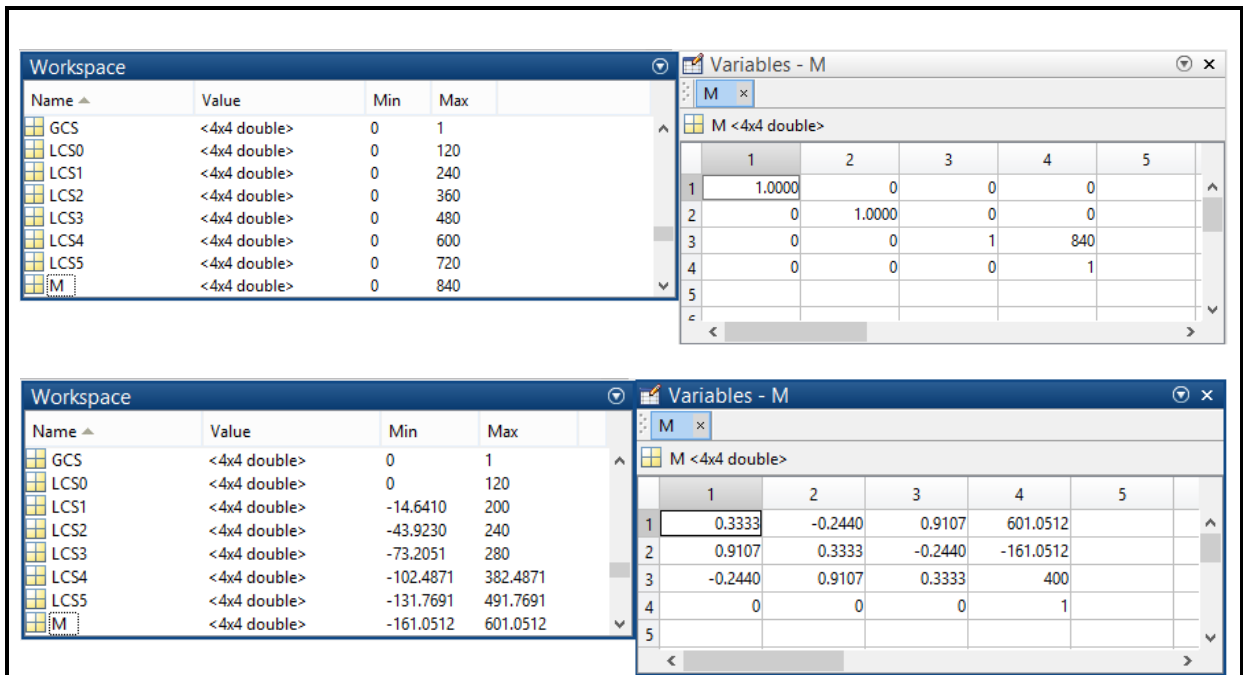
Po zadání požadovaných úhlů a spuštění skriptu dojde k vynásobení transformačních matic. Jednotlivé výsledky jsou ukládány do pracovního prostoru (Workspace). Na obrázku č. 33 je zobrazen jeho snímek, kde jsou vypsány výsledné matice pro jednotlivé souřadné systémy.

GCS – globální souřadný systém, který je volen v 0.

LCS0, ..., LCS5 – lokální souřadné systémy připojovacích konektorů modulů

M – souřadný systém koncového bodu

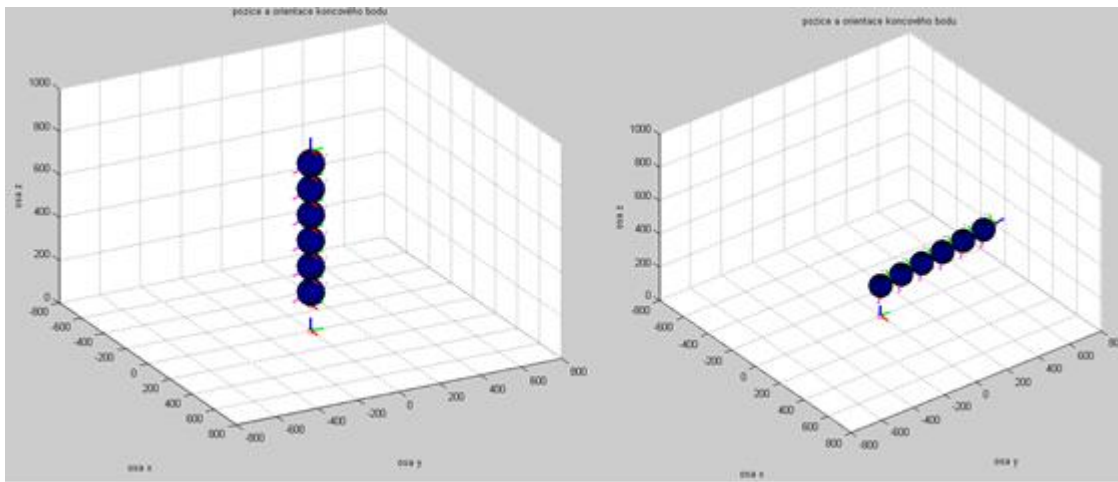
Výpočty jsou provedeny pro rameno v základní poloze, kde *pohon1, ..., pohon6* = 0 a pro natočení pohonu prvního poháněcího modulu o 90° (*pohon1* = 90°)



Obr. 33: Výsledné matice

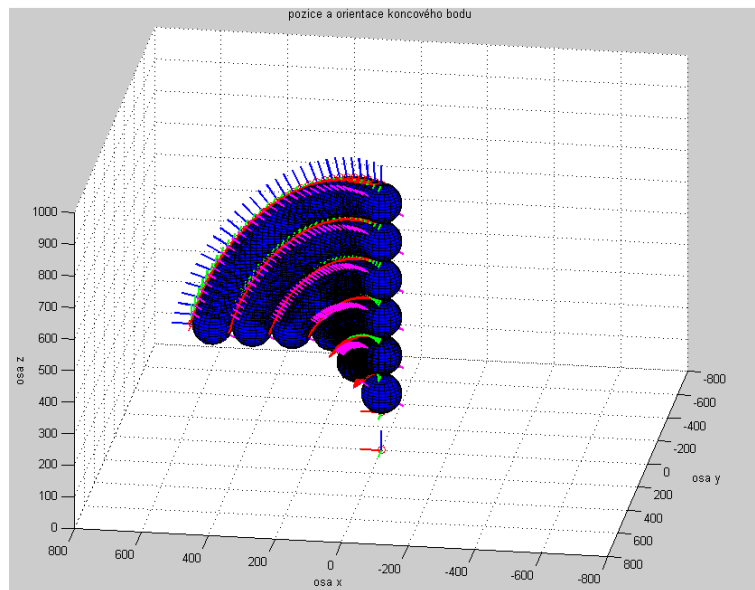
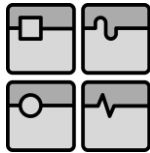
Z jednotlivých matic lze jednoduše vyčíst pozici a orientaci všech souřadných systémů včetně koncového bodu. První tři sloupce reprezentují směrové vektory (i, j, k), čtvrtý sloupec označuje souřadnice (x, y, z).

Grafické znázornění výsledků slouží pro zlepšení představy o poloze vytvořeného ramene v 3D prostoru.



Obr. 34 Grafické znázornění výsledku

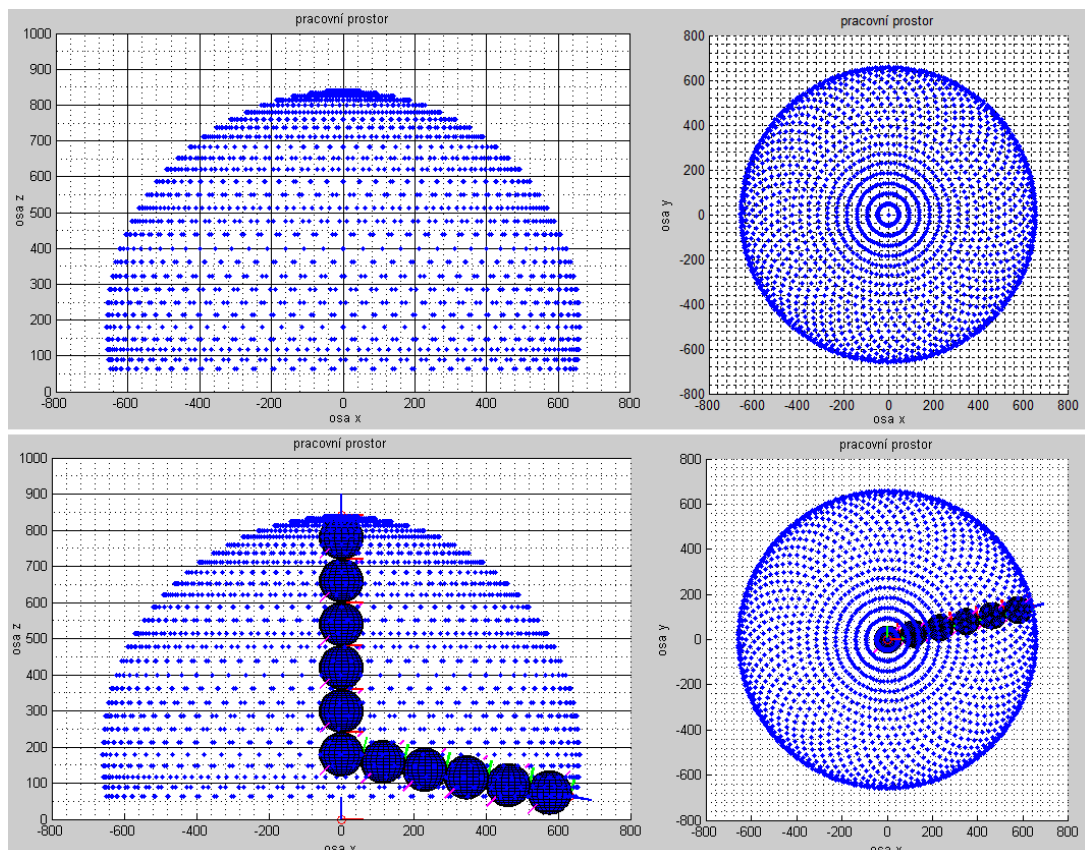
Pokud chceme vykreslit trajektorii soustavy, zadáme úhlovou rychlost a definujeme časový úsek.



Obr. 35: Vykreslení trajektorie

5.2.2.1. Pracovní prostor

Pracovní prostor pro takto sestavené rameno je vykreslen na obrázku č. 36. Rozsah v osách X a Y je od -660 mm do 660 mm. V ose Z je rameno schopno dosáhnout do výšky 840 mm.



Obr. 36: Pracovní prostor ramene

5.3. Inverzní úloha kinematiky aplikovaná na rameno

Výpočet inverzní kinematiky je na rozdíl od přímé relativně komplikovaný. Jedná se o inverzní transformaci komplexního vektoru polohy w (poloha a orientace bodu v prostoru) na vektor obecné souřadnice q (natočení nebo posuv jednotlivých kinematických dvojic). Je to základní výpočet kinematiky mechanismů, který je nezbytný pro polohování jednotlivých článků mechanismu. [3]

$$w = \begin{bmatrix} p \\ o \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{inverzní transformace}} q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (29)$$

Výpočet inverzní transformace by měl být univerzální, aby se mohl stejný algoritmus využít pro jakoukoli strukturu s libovolným počtem stupňů volnosti. Tyto univerzální metody jsou využívány zejména u velkých CAD systémů. Pro řízení mechanismu je také důležité, aby výpočet v ideálním případě probíhal v reálném čase. Obecně se metody řešení inverzní úlohy z hlediska principu dají rozdělit na: [3]

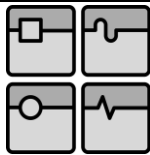
- Vektorová metoda – pro konkrétní kinematickou strukturu
- Numerické metody – univerzální metody
 - Numerické řešení soustavy transcendentních rovnic
 - Aproximační
 - Optimalizační
 - Heuristické
 - Gradientní

Pro simulaci inverzní kinematiky jsem si vybral výukovou verzi švýcarského robotického simulátoru V-REP, který je vybaven mnoha funkcemi a propracovaným rozhraním API (Application Programming Interface). Tento simulátor je založen na distribuované řídicí architektuře, kde každý objekt/model lze ovládat pomocí vloženého skriptu. [4] [11]

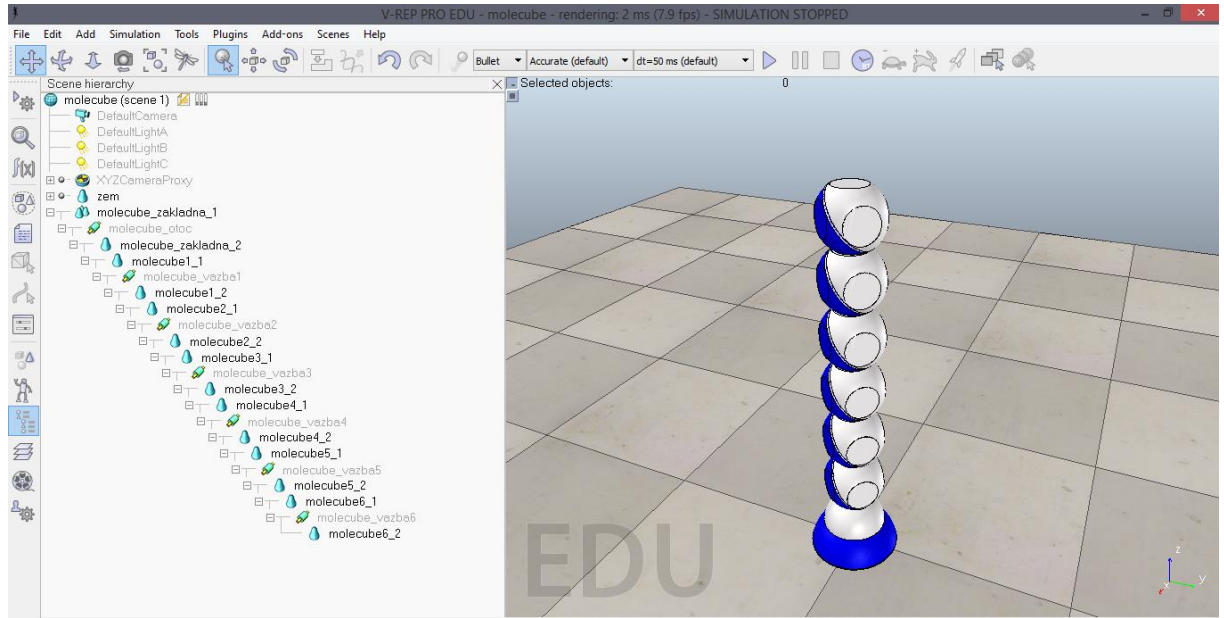
Vytvoření modelu ramene

Pro vytvoření vlastního modelu ramene máme dvě možnosti. První je modelování pomocí základních tvarů, jako je krychle, koule, válec a jiné. To se provede v záložce *Add* → *Primitive shape* kde si vybereme potřebné objekty a nastavíme jejich rozměr. Druhou možností je přes záložku *File* → *Import* → *Mesh* importování vytvořených modelů v CAD systémech. V-REP umožňuje vložení souborů s příponami *.obj, *.dxf, *.3ds, a *.stl. V mém případě jsem volil druhou možnost a vložil jsem zjednodušené modely modulů vytvořené v programu SolidWorks.

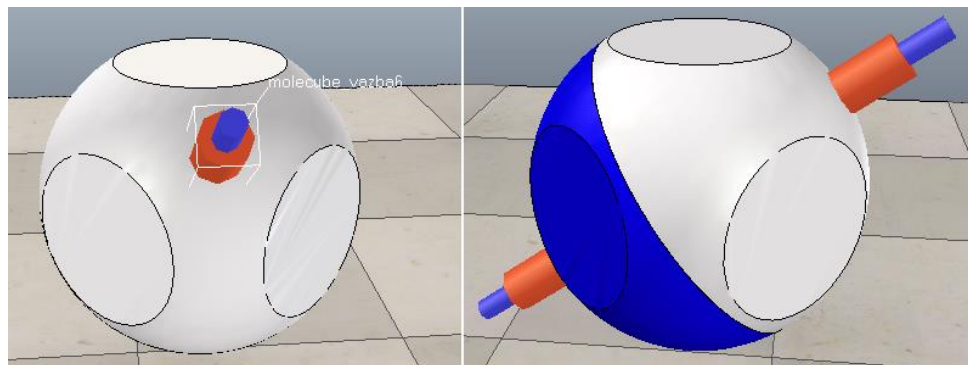
Po importování se jednotlivé elementy zobrazí v hierarchii scény. Aby se mohli vůči sobě otáčet, je nutno vložit rotační vazby přes *Add* → *Joint* → *Revolute*.



Všechny vytvořené objekty se pojmenují a vytvoří se vztahy mezi nimi (nadřazený/podřazený). Nakonec se pomocí *Object / Item position/ orientation* přesunou a orientují v prostoru tak, aby vytvořily výsledný tvar ramene s potřebným umístěním kloubových spojů. Hierarchie scény a model molecube robotu vytvořený dle tohoto postupu je znázorněn na obrázku č. 37. Detail umístění rotační vazby je na obrázku č. 38.



Obr. 37: Hierarchie scény a model molecubes v programu V-REP



Obr. 38: Detail vazby

Inverzní kinematika

Nejprve se pro všechny rotační vazby nastaví v *Scene Object Properties* → *Joint mode* → *joint is in inverse kinematic mode*. Tím dojde k jejich upravení pro použití při výpočtu inverzní kinematiky.

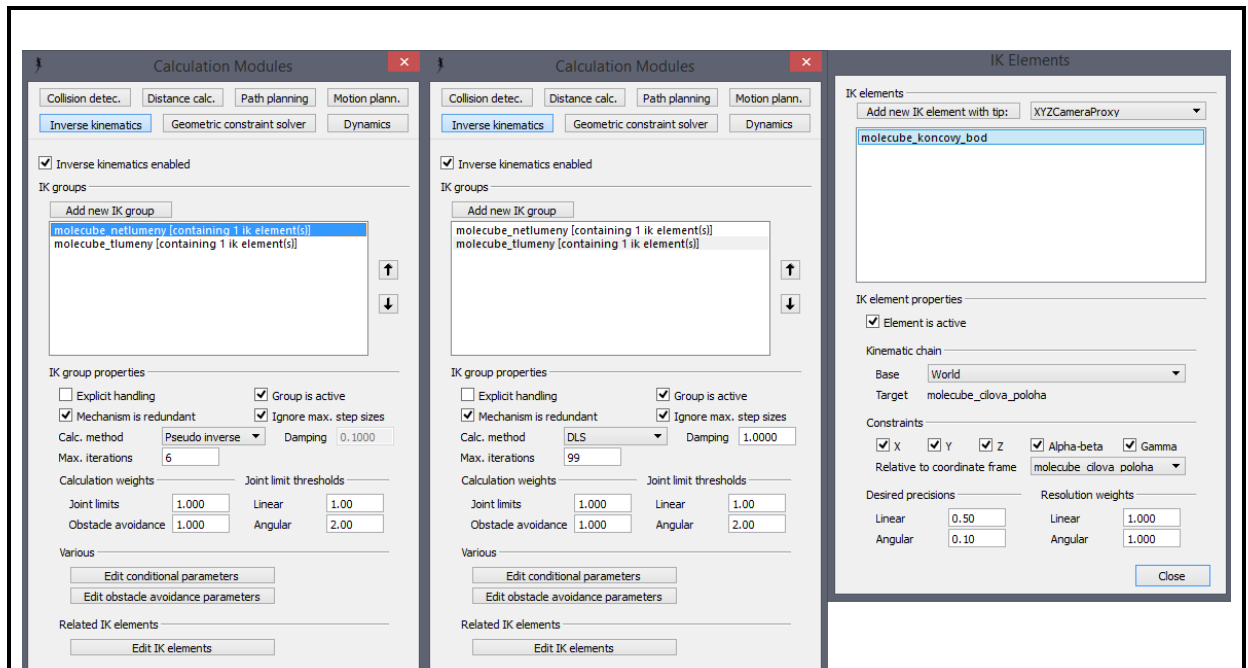
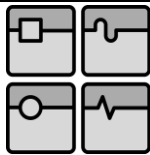
Jako další V-REP vyžaduje definování dvou fiktivních objektů. To se provede přidáním *Add* → *Dummy*. První z nich je pevně svázan s ramenem a slouží jako jeho koncový bod (*molecube_koncovy_bod*), v tomto případě umístěn na horní připojovací konektor. V hierarchii scény se přiřadí na poslední článek. Druhý (*molecube_cilova_poloha*) určuje cílový bod, ke kterému se bude inverzní kinematika počítat.

Pro spojení koncového a cílového bodu se ve vlastnostech *molecube_koncovy_bod* nastaví *Linked dummy* → *molecube_cilova_poloha*. Tím se uzavře smyčka přes všechny členy, pro které bude proveden výpočet.



Obr. 39: Hierarchie scény s uzavřenou smyčkou

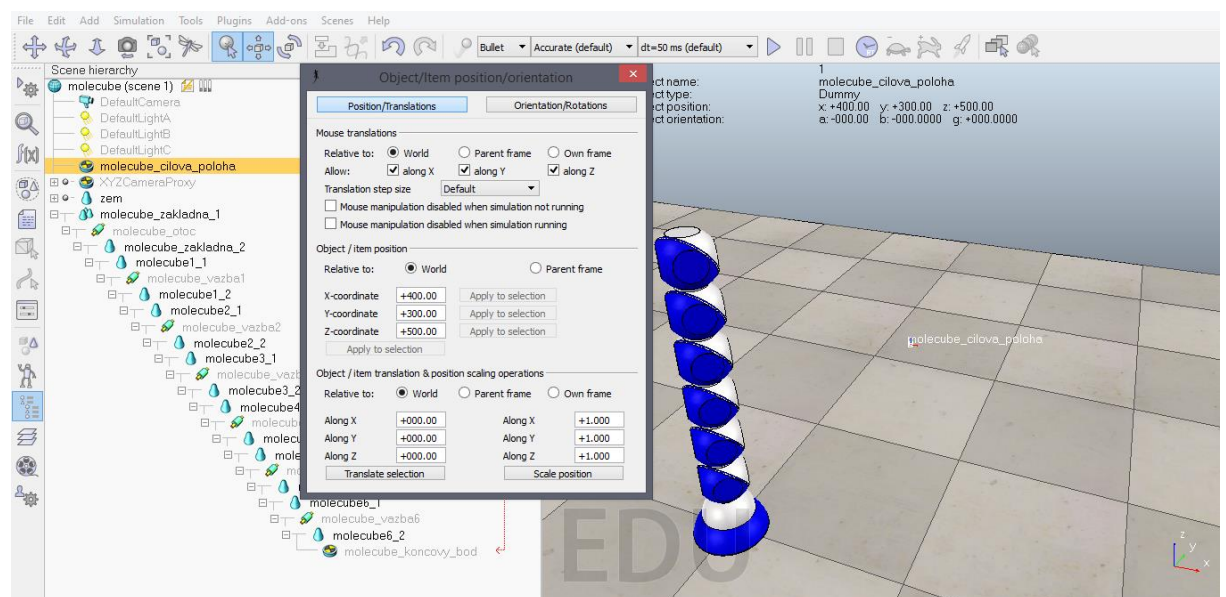
V této fázi jsou všechny prvky připraveny na výpočet inverzní kinematiky. Ten se provede v záložce *Calculation module properties* → *Inverse kinematics*. Zde přidáme dvě IK skupiny, kde jedna je nazvána *molecube_netlumeny* a druhá *molecube_tlumeny*. Pro netlumenou metodu je vybrána metoda pseudoinverze s maximálním počtem 6ti interakcí. Tato metoda je nejrychlejší na výpočet, ale může být nestabilní. V nabídce *Edit IK elements* je přidán nový element *molecube_koncovy_bod* u kterého jsou nastaveny parametry dle obrázku. V části *Constraints* jsou vybrány všechny možnosti, což slouží pro to, aby byla uvažována nejen poloha, ale i orientace hledaného bodu. To samé je provedeno i pro tlumenou metodu, kde pro kalkulaci je vybrána pomalejší, ale stabilnější metoda DSL s maximálním počtem 99ti interakcí a faktorem tlumení 1. Čím se nastaví vyšší hodnota tlumení, tím je řešení stabilnější, ale na druhou stranu to značně zpomaluje výpočet.



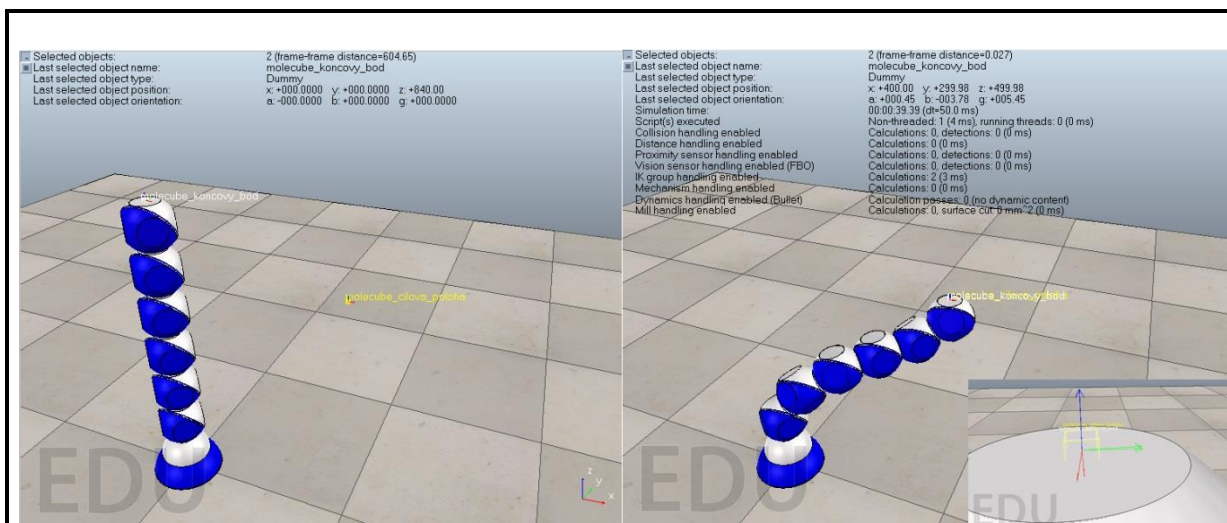
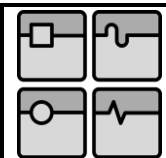
Obr. 40: Nastavení inverzní kinematiky

Simulace

Pro simulaci jsem zvolil polohu cílového bodu v prostoru v ose $X = +400$ mm, v ose $Y = +300$ mm a v ose $Z = +500$ mm. Koncový bod umístěn na připojovacím konektoru má počáteční souřadnice v ose $X = 0$ mm, v ose $Y = 0$ mm a v ose $Z = 840$ mm. Po spuštění program V-REP provede výpočet inverzní kinematiky a natočí jednotlivé vazby tak, aby došlo ke ztotožnění těchto bodů. Původní a výsledný stav jsou znázorněny na obrázku č. 42.



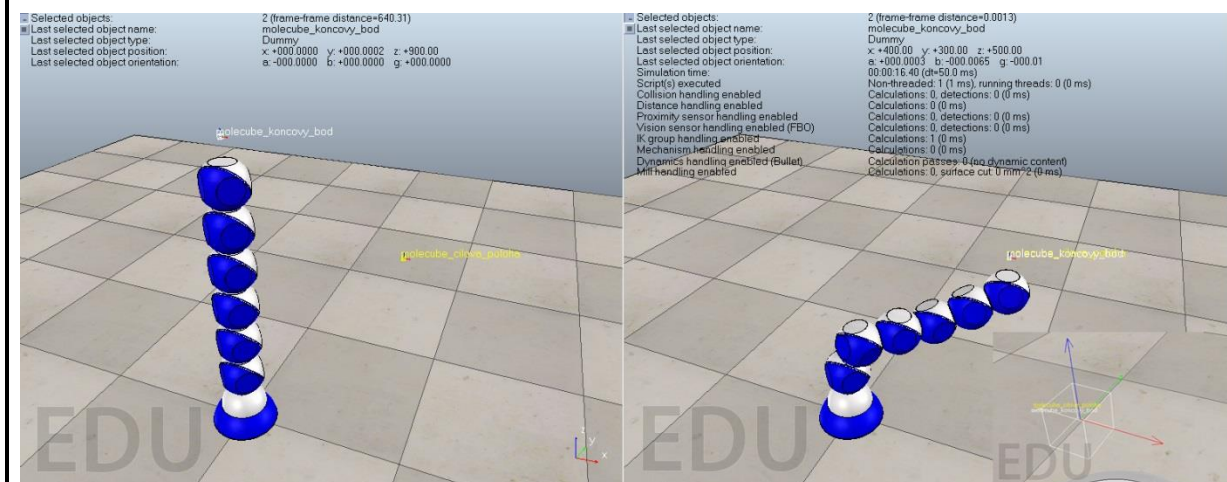
Obr. 41: Nastavení cílové polohy



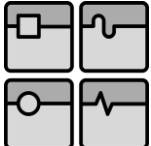
Obr. 42: Původní a výsledný stav simulace 1

V tomto případě sice došlo k najetí do požadované polohy, ale nedošlo ke ztotožnění natočení souřadných systémů. Aby tomu taky bylo, přidal jsem jednu rotační vazbu a umístil ji do vzdálenosti 60 mm od plochy konektoru. Tím se zajistí poslední rotace kolem osy Z. Na ní se umístí koncový bod. Takto vytvořená varianta by odpovídala koncovému efektoru s možností rotace, připojenému na konci ramene. Po spuštění simulace je patrné, že na rozdíl od předchozího případu, dojdeme ke správnému výsledku.

Program také umožňuje propojení simulace a reálného robota, což by se dalo využít při jeho řízení a následném experimentování.



Obr. 43: Původní a výsledný stav simulace 2

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 49
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

6. Závěr

Prvním cílem diplomové práce bylo analyzovat problematiku modulárních seberekonfigurovatelných robotů s hlavním zaměřením na Molecubes. Popsal jsem jejich základní charakteristiky a provedl výčet modulárních robotů, které jsou na trhu. Dále jsem se podrobněji věnoval systému molecubes, ze kterého vycházím v návrhu vlastní konstrukce.

Druhým cílem bylo vytvoření 3D modelů. Zde jsem provedl návrh konstrukce poháněcího modulu a základny pro statické rameno. Při návrhu poháněcího modulu jsem uvažoval ‚nekonečnou‘ možnost rotace polovin modulu a vytvořil jsem dva možné návrhy, z nichž jsem vybral vhodnější a dále ho zpracoval. Při návrhu základny jsem se konstrukcí a vzhledem snažil co nejvíce přiblížit základním modulům. Pro oba moduly jsem také navrhl automatický konektor pro jejich vzájemné spojení.

Posledním cílem bylo sestavení navržených modulů do struktury. Nejdříve jsou popsány transformace souřadných systémů v jednotlivých modulech, ze kterých dále vycházím při popisu přímé úlohy kinematiky. Tato úloha je provedená na ramenu složeném z jedné základny a šesti modulů. Na závěr jsem provedl simulace inverzní kinematiky pomocí programu V-REP.

Seznam použitých zdrojů

- [1] FABIÁN, P. Aplikace technologie MOLECUBES v robotice. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 53 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc..
- [2] KHOSHNEVIS, B., R. KOVAC, Wei-Min SHEN, P. WILL a . Reconnectable joints for self-reconfigurable robots. *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No.01CH37180)* [online]. 2001 [cit. 2015-05-10]. DOI: 10.1007/springerreference_60506. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=973419>
- [3] SKAŘUPA, Jiří. Průmyslové roboty a manipulátory [online]. 1. Ostrava: Ediční středisko VŠB - TUO, 2007 [cit. 2015-03-15]. ISBN 978-80-248-1522-0. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf
- [4] ŠŤASTNÝ, M. SW pro simulaci autonomních robotů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Zuth, Ph.D
- [5] YIM, Mark, Paul WHITE, Michael PARK a Jimmy SASTRA. *Modular Self-Reconfigurable Robots* . 2009, : 19-32 [cit. 2015-05-10].
- [6] YIM, Mark, Wei-Min SHEN, Behnam SALEMI, Daniela RUS, Mark MOLL, Hod LIPSON, Eric KLAVINS a Gregory S. CHIRIKJIAN. *Modular Self-Reconfigurable Robot Systems: Challenges and Opportunities for the Future* [online]. : 43 - 52 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://isites.harvard.edu/fs/docs/icb.topic1514669.files/papers/Yim-selfreconfigreview2007.pdf>
- [7] ZYKOV, Victor, Andrew CHAN a Hod LIPSON. *Molecubes: An Open-Source Modular Robotics Kit*[online]. Self-Reconfigurable Robotics Workshop, 2007, s. 4 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://creativemachines.cornell.edu/papers/IROS2007_Zykov.pdf
- [8] ZYKOV, Viktor. *Morphological and behavioral resilience against physical damage for robotic systems* [online]. 2008 [cit. 2015-05-10]. ISBN 05-494-6085-3.
- [9] ZYKOV, Victor, Williams PHELPS a Nicolas LASSABE. Molecubes Extended: Diversifying Capabilities of Open-Source Modular Robotics. Computational Synthesis Laboratory Sibley School of Mechanical & Aerospace Engineering Cornell University, Ithaca, NY 14853, USA. 2005, s. 12. Dostupné z: http://creativemachines.cornell.edu/papers/IROS2008_Zykov.pdf
- [10] *Biorobotics Laboratory, EPFL: Roombots* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://biorob.epfl.ch/roombots>
- [11] COPPELIAROBOTICS. *Virtual Robot Experimentation Platform: USER MANUAL* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/welcome.htm>
- [12] FESTO. *Molecubes: A programmable robot system: info* [online]. : 4 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: https://www.festo.com/rep/en_corp/assets/pdf/Molecubes_en.pdf

		Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 51
		DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- [13] *KAYDON: Kaydon Bearings - Reali-Slim MM metric bearings Kaydon Bearings - 20 mm series Kaydon Bearings - type X, four point contact bearings* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://www.kaydonbearings.com/RealiSlim_metric_bearings_20mm_typeX.htm
- [14] *MEGAROBOT.NET: DYNAMIXEL AX-12A* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.megarobot.net/www-megarobot-net/eshop/3-1-Servomotory/0/5/5-DYNAMIXEL-AX-12A>
- [15] Robotics/Exotic Robots/Modular and fractal robots. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://en.wikibooks.org/wiki/Robotics/Exotic_Robots/Modular_and_fractal_robots
- [16] Self-reconfiguring modular robot. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Self-reconfiguring_modular_robot
- [17] *SUPPORT.ROBOTIS. AX Series: ROBOTIS e-Manual v1.25.00* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/dxl_ax_main.htm

Seznam obrázků

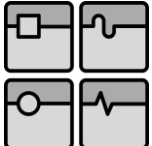
Obr. 1	PolyBot G3, SuperBot, Miche [6]	11
Obr. 2	Pasivní mechanismus [2]	14
Obr. 3	Použití modulární robotiky v kosmu [8]	14
Obr. 4	Robotický nábytek (RoomBots) [10].....	15
Obr. 5	Mechanické části MOLECUBES [7]	16
Obr. 6	Upravený servomotor AX-12 [7].....	17
Obr. 7	Otevřené a zavřené chapadlo [9]	18
Obr. 8	Modul kolo [9].....	18
Obr. 9	Modul kamera [9]	19
Obr. 10	Plošné spoje v Molecubes [9]	19
Obr. 11	Schéma interní a externí komunikace [7]	20
Obr. 12	Elektromechanický spoj [7]	20
Obr. 13	Simulační program MOLECUBES [7].....	21
Obr. 14	Cyklus sestavení MOLECUBES robotu [1]	22
Obr. 15	Koncepty symetrických modulárních robotů [8].....	23
Obr. 16	První varianta návrhu modulu	24
Obr. 17	Druhá varianta návrhu modulu	24
Obr. 18	Schéma připojení USB2Dynamixel k PC [11]	25
Obr. 19	Třípinový konektor [11].....	26
Obr. 20	Model krytování modulu	27
Obr. 21	Model nosné konstrukce	27
Obr. 22	Model podpěry	28
Obr. 23	Model připojovacího konektoru	29
Obr. 24	Čtyři základní typy spojení modulů.....	29
Obr. 25	Model poháněcího modulu	30
Obr. 26	Model základny	30
Obr. 27	Přímá a inverzní kinematika	31
Obr. 28	a) Souřadné systémy, b) Otočení souřadného systému, c) Natočení a posunutí souřadného systému [3].....	32
Obr. 29	Denavit–Hartenbergův princip [3].....	34
Obr. 30	Transformace souřadných systémů základny	35
Obr. 31	Transformace souřadných systémů v jednom modulu	36
Obr. 32	Model sestavení ramene robotu	39
Obr. 33	Výsledné matice.....	42
Obr. 34	Grafické znázornění výsledku	42
Obr. 35	Vykreslení trajektorie.....	43
Obr. 36	Pracovní prostor ramene	43
Obr. 37	Hierarchie scény a model molecubes v programu V-REP	45
Obr. 38	Detail vazby.....	45
Obr. 39	Hierarchie scény s uzavřenou smyčkou	46
Obr. 40	Nastavení inverzní kinematiky.....	47
Obr. 41	Nastavení cílové polohy	47
Obr. 42	Původní a výsledný stav simulace 1	48
Obr. 43	Původní a výsledný stav simulace 2	48

Seznam tabulek

Tab. 1	Modulární robotické systémy [6] [16]	12
Tab. 2	Parametry servomotoru AX-12A [14]	25
Tab. 3	Struktura paketů [1]	26
Tab. 4	Parametry ložiska [13]	26
Tab. 5	Denavit–Harterbergovy parametry pro základnu.....	35
Tab. 6	Denavit-Hartenbergovy parametry pro poháněcí modul	37

Seznam grafů

Graf. 1 Vykreslení souřadnic v osách X, Y, Z38

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 55
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

Seznam příloh

Příloha 1: Disk CD-ROM obsahující:

Elektronická verze diplomové práce 2015_DP_VITEK_FILIP_130697.pdf

3D modely ve formátu *.STEP

Soubory k programu MATLAB

Soubor k programu V-REP