



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

## ČLÁNKOVÉ ROBOTY

LINK ROBOTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MAREK VIDLÁK

VEDOUČÍ 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: 2014/15

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Marek Vidlák

který/která studuje v **magisterském 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:

### **Článkové roboty**

v anglickém jazyce:

#### **Link robots**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh kinematického modelu článkového robota

Zpracování 3D modelu a animace robotů.

Cíle diplomové práce:

1. Analýza konfigurace článkových robotů
2. Návrh kinematického modelu článkového robota
3. Zpracování 3D modelu a animace robotů.

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.

[www.abb.cz](http://www.abb.cz)

[www.fanucrobotics.cz](http://www.fanucrobotics.cz)

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](http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf)>. ISBN 978-80-248-1522-0.

PLŠEK, Ladislav. Stroje s paralelní kinematikou - přesnost polohování. Brno, 2004. 27 s. Pojednání ke státní doktorské zkoušce. VUT.

[www.festo.com](http://www.festo.com)

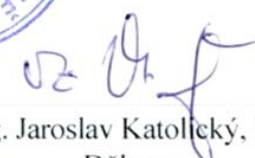
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 23.11.2014



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



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

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá návrhem konstrukce článkového robota a provedení simulace jeho pohybů. Diplomová práce je rozdělená na čtyři hlavní části. V první části jsou stručně vysvětleny základní informace o průmyslových robotech a manipulátorech, jejich stavba a struktura. Dále jsou uvedeny příklady konstrukce dnešních robotů a princip výpočtu kinematického řetězce. Na začátku druhé části je provedena analýza konfigurace článkových robotů, popis stavby a struktury, příklady konstrukcí článkových robotů a jejich aplikace. Ve třetí části je zvolena varianta konstrukčního řešení, vytvořen matematický a kinematický model. Dále je navržena a popsána konstrukce robota. Poslední část je věnována simulaci kinematiky robota, popisem simulačních programů a jejich užití pro požadované výsledky.

## **Klíčová slova**

Článkové roboty, Snake-arm roboty, simulace, SimMechanics, ADAMS, V-REP

## **Abstract**

Master's thesis deals with design the link robot and motion simulation. It is divided into four parts. In first part are briefly explained basic information of industrial robots and manipulators, their design and structure. Further it is listed some examples of design industrial robots and manipulators and principle of computation of kinematic chain. On beginning of the second part is performed analysis of configuration link robots, description of their designs and structures, examples of design link robots and their applications. In third part is selected option of design, created mathematical and kinematic model. Then it is designed and described construction of robot. The last section is devoted to simulation of robot's kinematics, description of simulation softwares and their use for required results.

## **Keywords**

Link robots, Snake-arm robots, Snakebot, simulation, SimMechanics, ADAMS, V-REP

## **Bibliografická citace**

VIDLÁK, M. *Článkové roboty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 77 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma Článekové roboty jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce doc. Ing. Simeona Simeonova, CSc. Prohlašuji také, že veškerou využitou literaturu jsem uvedl v seznamu literatury.

29. 5. 2015

.....  
Marek Vidlák



## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Simeonu Simeonovi, CSc. za pomoc při psaní této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu ve studiu.

29. 5. 2015

.....  
Marek Vidlák



## Obsah

1. Úvod.....	17
2. Roboty a manipulátory.....	17
2.1. Definice robota.....	17
2.2. Historie a vývoj.....	17
2.3. Důležité pojmy robotů a manipulátorů.....	18
2.4. Rozdělení robotů a manipulátorů .....	19
2.5. Generace robotů.....	19
2.6. Systémy robota .....	20
3. Stavba robota .....	20
3.1. Druhy kinematických dvojic (vazeb) .....	20
3.2. Kinematický řetězec .....	21
3.3. Typy kloubů .....	22
3.3.1. Nejčastěji užívané klouby.....	22
3.4. Pracovní prostory .....	23
3.5. Struktura robota.....	23
3.5.1. Roboty se sériovou kinematickou strukturou.....	23
3.5.1.1. Příklady konstrukce sériových robotů.....	24
3.5.1.1.1. Kartézský robot (TTT) .....	24
3.5.1.1.2. SCARA robot (RRT) .....	24
3.5.1.1.3. Šestiosý robot (Průmyslový robot).....	25
3.5.2. Roboty s paralelní kinematickou strukturou.....	25
3.5.2.1. Příklady konstrukce paralelních robotů .....	25
3.5.2.1.1. Stewartova plošina.....	25
3.5.2.1.2. Delta robot.....	26
3.5.2.1.3. RENISHAW Equator .....	26
3.5.3. Porovnání sériové a paralelní struktury [SM PM] .....	27
3.5.3.1. Sériová struktura.....	27
3.5.3.2. Paralelní struktura.....	27
4. Kinematický model .....	27
4.1.1. Přímá úloha kinematiky .....	28
4.1.2. Nepřímá úloha kinematiky .....	28
4.2. Reprezentace polohy.....	28
4.2.1. Matice rotace .....	29
4.3. Homogenní transformační matice.....	29
4.4. Úmluvy pro popis kinematiky robotů.....	29

4.4.1.	Denavit-Hartenbergova úmluva.....	29
4.4.2.	Khalil-Kleinfingerova úmluva.....	30
5.	Článkové roboty.....	31
5.1.	Mobilní článkové roboty (Snakebot) .....	31
5.2.	Článkové roboty a manipulátory (Snake-arm) .....	32
5.2.1.	Roboty se spojitou změnou zakřivení .....	32
5.2.1.1.	FESTO Bionic Handling Assistant .....	32
5.2.2.	Roboty s diskretní změnou zakřivení.....	33
5.2.2.1.	Robot s pohonem uvnitř článku .....	33
5.2.2.1.1.	Fraunhofer BROMMI .....	33
5.2.2.1.2.	BROMMI TAK .....	33
5.2.2.2.	Roboty s pohonem mimo články.....	34
5.2.2.2.1.	Portable snake-arm robot.....	34
5.2.2.2.2.	Ringhals snake-arm robot.....	35
5.2.2.2.3.	Explorer.....	35
5.2.3.	Koncové efekty.....	35
5.3.	Aplikace článkových robotů .....	36
5.3.1.	Inspekce prostředí.....	36
5.3.2.	Řezání a svařování předmětů v nedostupných prostorech .....	36
5.3.3.	Hledání výbušnin.....	36
5.3.4.	Nabíjení elektromobilů TESLA.....	37
5.4.	Stavba článkového robota OC Robotics .....	37
5.4.1.	Pohonová skříň .....	37
5.4.2.	Chapadlo .....	38
5.5.	Způsob řízení článkových robotů.....	38
6.	Simulační software .....	39
6.1.	V-REP (Virtual Robot Experimental Platform) .....	39
6.2.	Matlab Simulink SimMechanics .....	39
6.3.	ADAMS.....	40
7.	Návrh článkového robota.....	41
7.1.	Požadavky na článkového robota .....	41
7.2.	Volba varianty konstrukce.....	41
7.3.	Volba kinematického řetězce.....	41
7.3.1.	Paralelní manipulátor.....	42
7.3.2.	Stupně volnosti paralelního manipulátoru .....	43
8.	Kinematický řetězec.....	44

8.1. Výpočet nulových bodů jednotlivých článků .....	44
8.2. Transformace souřadnic pozice děr .....	46
8.2.1. Matice rotace .....	46
8.2.2. Pozice děr .....	47
8.2.3. Transformace .....	47
8.2.4. Pozice aktuátorů .....	47
9. Konstrukce .....	48
9.1. Robot.....	48
9.2. Pracovní prostor.....	48
9.3. Článek.....	49
9.4. Držák koncového efektoru .....	49
9.5. Křížový kloub .....	49
9.6. Držák chapadla .....	50
9.7. Pohonová jednotka.....	50
9.7.1. Požadavky na aktuátor .....	51
9.7.2. Aktuátor .....	51
9.7.2.1. Elektrický motor .....	51
9.7.2.2. Planetová převodovka.....	52
9.7.2.3. Hřídel .....	52
9.7.3. Ověření pohybu.....	53
9.8. Držák lana .....	53
9.8.1. Lana.....	53
9.9. Držák pružin .....	54
9.9.1. Pružiny.....	54
10. Simulace.....	55
10.1. Inverzní kinematika .....	55
10.2. V-REP PRO .....	55
10.2.1. Využívané funkce .....	55
10.2.2. Hierarchie komponent .....	55
10.2.3. Kinematický řetězec.....	56
10.2.4. Určení natočení kloubů.....	57
10.3. Matlab.....	57
10.3.1. Parametry modelu .....	58
10.3.2. Vstupy .....	58
10.3.3. Funkce.....	58
10.4. Matlab Simulink.....	58

10.4.1.	Využívané funkce .....	58
10.4.2.	Parametry .....	59
10.4.3.	Simulace.....	59
10.5.	ADAMS .....	60
10.5.1.	Využívané funkce .....	60
10.5.2.	Kinematický řetězec .....	60
10.5.3.	Simulace.....	60
10.5.4.	Odchylka pružin .....	61
11.	Porovnání simulačních programů .....	62
11.1.	Příklad 1 .....	62
11.2.	Příklad 2 .....	63
11.3.	Příklad 3 .....	64
11.4.	Postup simulace a animace .....	65
12.	Závěr.....	67
13.	Seznam použitých zdrojů .....	68
14.	Seznam příloh .....	72
14.1.	Seznam příloh na CD .....	72
14.1.1.	CAD .....	72
14.1.2.	Výkresová dokumentace.....	72
14.1.3.	Simulace.....	72
14.1.3.1.	V-REP PRO.....	72
14.1.3.2.	Matlab Simulink .....	72
14.1.3.3.	ADAMS.....	72
14.1.3.4.	Animace.....	72
14.2.	Seznam příloh .....	72
14.2.1.	Výkresová dokumentace.....	72
14.2.2.	Simulace.....	72
14.2.2.1.	V-REP PRO.....	72
14.2.2.2.	Matlab Simulink .....	72
15.	Seznam výkresů .....	73
16.	Seznam obrázků.....	74
17.	Seznam tabulek .....	76
18.	Seznam použitých symbolů .....	77

## 1. Úvod

Diplomová práce pojednává o tématu článkových robotů. Tyto roboty se skládají z jednotlivých článků spojených kinematickými klouby. Díky své konstrukci nachází využití v aplikacích, kde je omezujícím faktorem prostor. Zároveň jsou velice flexibilní a to jim umožňuje efektivně překonávat překážky a dostávat se do úzkých nebo špatně dostupných míst. Robot může být řízen dvěma způsoby. Přímé řízení vyžaduje pohon uvnitř článku a nepřímé má oddělený pohonný mechanismus, kde se sílová zatížení přenáší přes ocelová lana. Volba koncového efektoru ovlivňuje výslednou aplikaci robota (Inspekce, manipulace, svařování, atd.).

## 2. Roboty a manipulátory

### 2.1. Definice robota

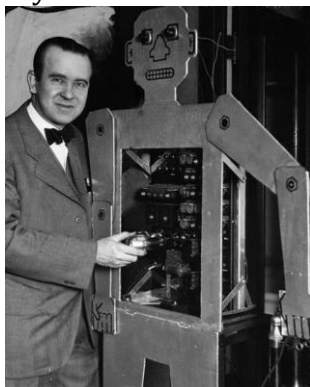
Existuje řada různých definic robota, proto je obtížné srovnávat počty robotů v různých zemích. Pro poskytnutí všeobecně přístupné definice stanovila Mezinárodní organizace pro standardizaci (ISO) definici robota v normě ISO 8373, kde je robot definován jako „Automaticky řízený, opětovně programovatelný, víceúčelový manipulátor pro činnost ve třech nebo více osách, který může být stacionární nebo mobilní k užití v průmyslových automatických aplikacích“. Tato podmínka je, ale poměrně omezující a zavedena spíše pro statistické účely. [2][5]

Jiná definice robota zní: „Robot je automatický nebo počítačem řízený integrovaný systém, schopný autonomní, cílově orientované interakce s přirozeným prostředím, podle instrukcí od člověka. Tato interakce spočívá ve vnímání a rozpoznávání tohoto prostředí a v manipulování s předměty, popř. v pohybování se v tomto prostředí.“ Autorem této definice je doc. Ing. Ivan M. Havel, CSc., Ph.D.. [3]

### 2.2. Historie a vývoj

Jeden z prvních dochovaných návrhů humanoidního robota je od Leonarda Da Vinciho přibližně z roku 1495. V dalším období se objevovaly další stroje napodobující lidskou činnost.

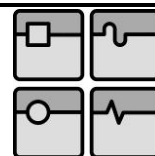
První užitečný robot (Televox) byl zkonstruován Robem Wensleyem ze společnosti Westinghouse Electric Company v roce 1926. Sloužil jako přepojovač telefonických hovorů. Samostatné elektronické roboty byly zkonstruovány v letech 1948 (Elmer) a 1949 (Elsie) v Burden Neurological Institute v Anglii vědcem Wiliamem Grayem. Tyto roboty reagovali na světlo a okolní objekty a to jim sloužilo k navigaci. V období 2. světové války byly při vývoji atomové bomby vyvinuty manipulátory založené na systému master-slave. [5][10][12]



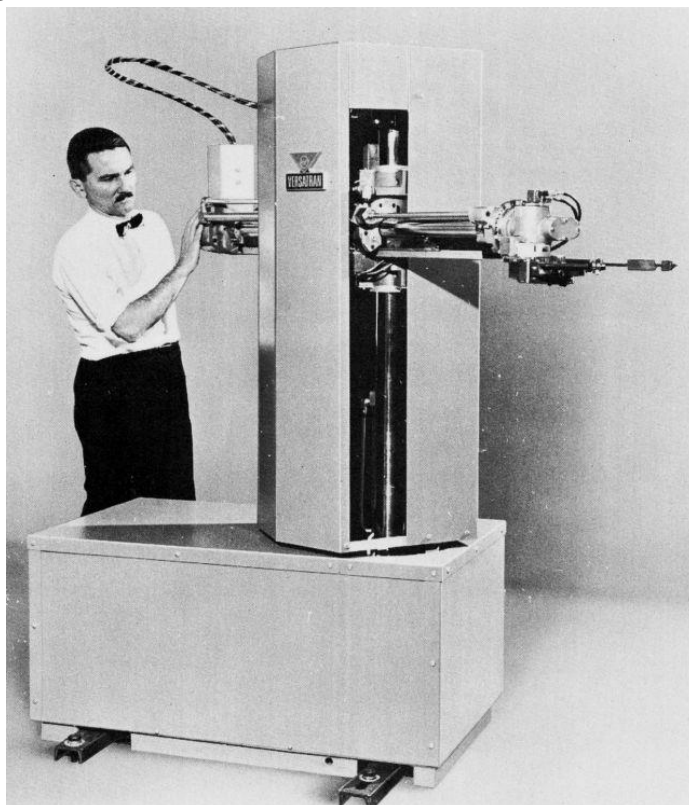
Obr. 2.1 – Televox s Robem Wensleyem [13]



Obr. 2.2 – Robot Unimate 2000 [14]



Zlom ve vývoji průmyslových robotů byl robot Unimate 1900 americké společnosti Unimation v roce 1958, využívající hydropohony. Tento robot byl jako první nasazen v provozu General Motors jako náhrada pracovníků, obsluhující stroje pro lití kovu. Unimate roboty se velmi osvědčily a začli být vyráběny licenčně v jiných zemích světa. Dalším významným robotem využívající hydropohony byl Versatran vyvinutý také v USA.



Obr. 2.3 – Robot Versatran [15]

V Československu bylo v od roku 1972 zřízeno vývojové pracoviště ve Vukovu u Prešova, které vyvíjelo pro československý trh manipulátory a roboty. Do roku 1990 jich vyrobil přibližně 7000. [10]

### 2.3. Důležité pojmy robotů a manipulátorů

- Počet stupňů volnosti DoF (Degrees of Freedom)

Minimální počet parametrů vymežující polohu bodu v rovině nebo prostoru.

- Základna (Base)

Pevná část robota, definující nulový bod globálního souřadného systému robota.

- Platforma (Platform)

Pohybující část robota, na kterém je uchycen koncový efektor.

- Kinematický řetězec

Skládá se ze soustavy kinematických dvojic, které definují vazby mezi tělesy.

- Aktuátor (Actuator)

Pohon zajišťující pohyb robota. Typické pohony jsou rotační nebo přímočaré.

- Pracovní prostor (Workspace)

Množina všech pozic koncového efektoru, které jsou dosaženy pohybem robota.

## 2.4. Rozdělení robotů a manipulátorů

Roboty lze rozdělovat podle několika kritérií. Ze začátku bylo preferováno rozdělení dle typu robota nebo manipulátoru. [5]

- Jednoúčelový manipulátor
- Synchronní manipulátor
- Robot (Manipulátor s pružným programem)
- Adaptivní robot (Robot schopný reagovat na okolí)
- Kognitivní robot (Robot s určitou formou umělé inteligence)

Roboty a manipulátory se dále rozdělují dle kritérií:

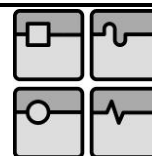
- Podle stupňů volnosti
  - Univerzální robot ( $6^\circ V$ , Kartézský SS)
  - Redundatní robot ( $>6^\circ V$ )
  - Deficitní robot ( $<6^\circ V$ )
- Podle kinematické struktury
  - Sériové (S otevřeným kinematickým řetězcem)
  - Paralelní (S uzavřeným kinematickým řetězcem)
  - Hybridní (Kombinující oba typy řetězců)
- Podle druhu pohonů
  - Elektrické
  - Hydraulické
  - Pneumatické
- Podle aplikací
  - Průmyslové roboty
  - Servisní roboty
- Podle geometrie pracovního prostoru
  - Kartézský
  - Cylindrický
  - Sférický
  - Angulární
  - Scara

## 2.5. Generace robotů

Vývojové generace robotů se určují podle míry inteligence. Třídění robotů není úplně jednoznačné a někdy se dnešní programovatelné roboty uvádí jako nultá generační skupina. [2]

### a) I. generace

Jedná se o skupinu programovatelných robotů, vykonávající pevně daný program. Díky jednoduché změně programu se i z těchto robotů stávají poměrně hodně univerzální roboty.



### b) II. generace

Tyto roboty obsahují vnímací systém, který umožňuje jeho řízení i mimo manipulační program robota. Oproti I. generaci využívá více senzorů a řídí se podle složitějšího programu. V závislosti na senzorech robot umí dělat některá rozhodnutí.

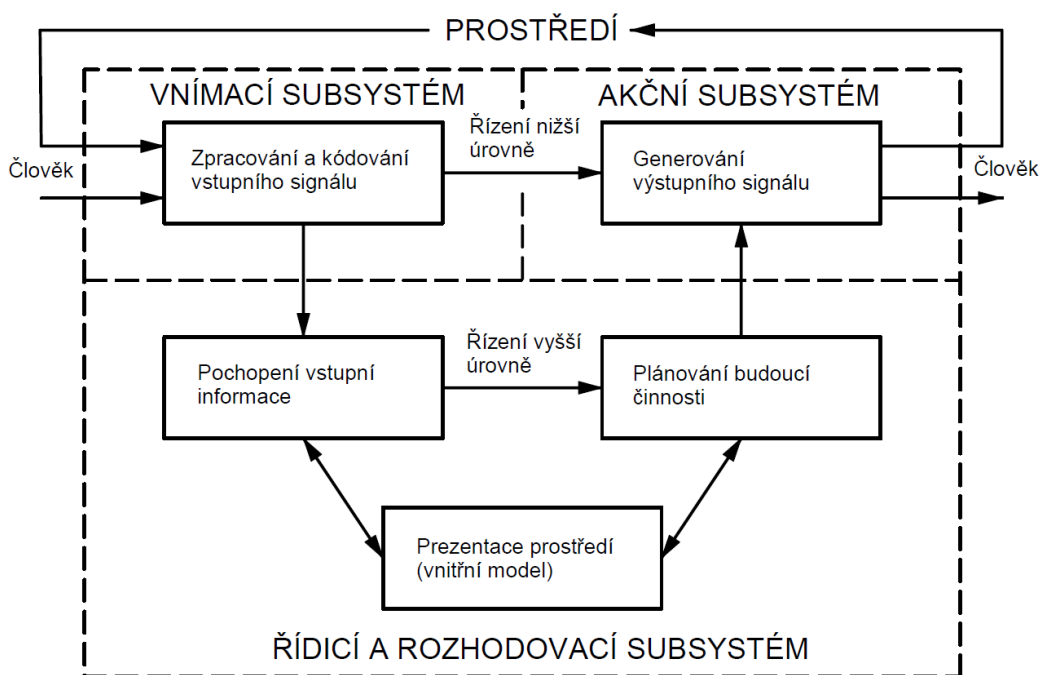
### c) III. generace

Roboty této generace se označují jako inteligentní (kognitivní) roboty. Od robotů II. generace se liší složitostí řídicího systému, který zahrnuje prvky umělé inteligence. Ta umožňuje robotu schopnost učení a jeho adaptivitu.

## 2.6. Systémy robota

Roboty se dělí na tři hlavní subsystémy: [5]

- Akční
- Řídicí
- Vnímací



Obr. 2.4 – Subsystémy robota [5]

## 3. Stavba robota

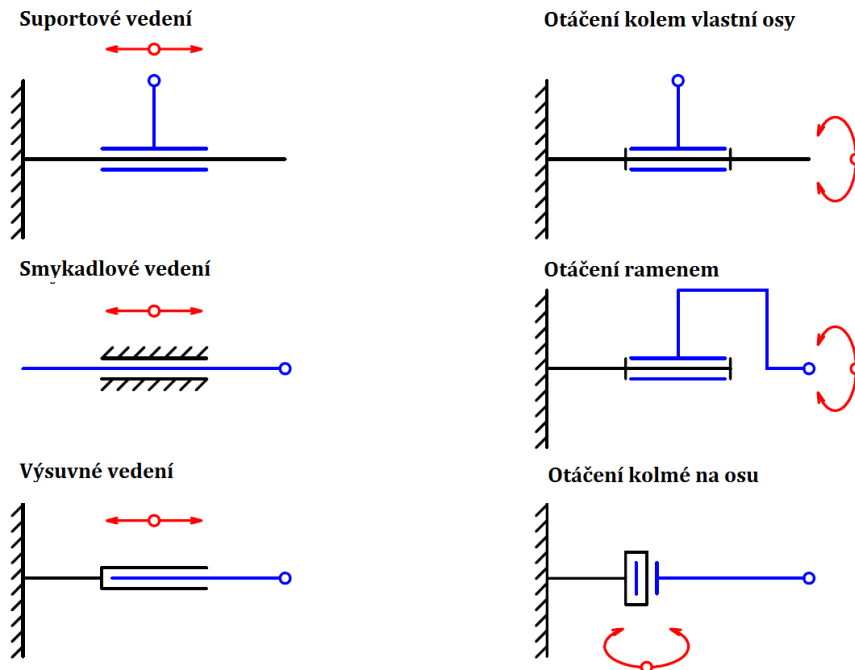
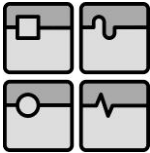
### 3.1. Druhy kinematických dvojic (vazeb)

Translační

- Suportové vedení
- Smykadlové vedení
- Výsuvně vedení

Rotační

- Otáčení kolem vlastní osy
- Otáčení ramenem
- Otáčení kolmé na osu

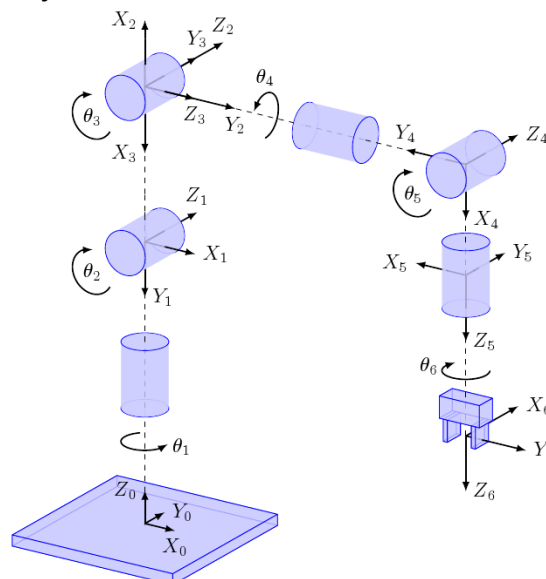


a) Translační kinematické dvojice      b) Rotační kinematické dvojice  
Obr. 3.1 – Druhy kinematických dvojic

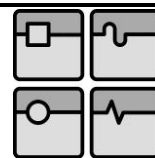
### 3.2. Kinematický řetězec

Kinematický řetězec průmyslového robota tvoří jeho akční systém. Průmyslové roboty využívají ve svých kinematických řetězcích jen dva druhy kinematických dvojic: Rotační (R) a translační (T). Podle toho, ke které ose souřadného systému se pohyb uskutečňuje, je dáno označení indexu. Třída kinematické dvojice udává počet odebírající stupňů volnosti z původních 6.

Kinematické řetězce se skládají z jednotlivých kinematických dvojic a mohou být otevřené nebo uzavřené, podle toho jak jsou jeho členy připojeny k rámu. Kombinací obou možností jsou řetězce smíšené. U řetězců je velmi důležité, aby byly jednotlivé vazby správně orientovány vůči osám kartézského souřadnicového systému. [5]



Obr. 3.2. Kinematický řetězec 6osého robota [16]



Pro zabezpečení obecné polohy a orientace v prostoru je zapotřebí 6 stupňů volnosti (3 k polohování a 3 k orientaci). Hlavním kritériem pro určení jednotlivých kinematických dvojic je celková tuhost celé konstrukce.

Akční systém průmyslového robota je možno rozdělit: [5]

- Pojezdové ústrojí (Globální pohyb)
- Polohovací ústrojí (Regionální pohyb)
- Orientovací ústrojí (Regionální pohyb)
- Koncové ústrojí (Lokální pohyb) [Efektor]

Významná kritéria ovlivňující konečný kinematický řetězec: [5]

- Tvar a velikost pracovního prostoru
- Požadovaná dráha manipulovaného objektu
- Požadovaná přesnost manipulovaného objektu
- Požadovaná orientace manipulovaného objektu
- Druhy pohonů jednotlivých os
- Konstrukční provedení kinematických dvojic z různých hledisek
  - Výrobní
  - Montážní
  - Ekonomické

Na základě těchto kritérií se využívají jen některé typy kinematických řetězců. Řetězec je popsán postupně od základu rámu až po koncový efektor.

### 3.3. Typy kloubů

Hlavním úkolem kloubů je udržení geometrické polohy. Charakteristikou odlišnosti kloubů je počet stupňů volnosti. Úlohy kloubů jsou přenášení sil a vzájemný pohyb. [6]

#### 3.3.1. Nejčastěji užívané klouby

- **P-kloub (Prismatic Joint)**

Posuvný kloub umožňuje jeden translační stupeň volnosti.

- **R-kloub (Revolute Joint)**

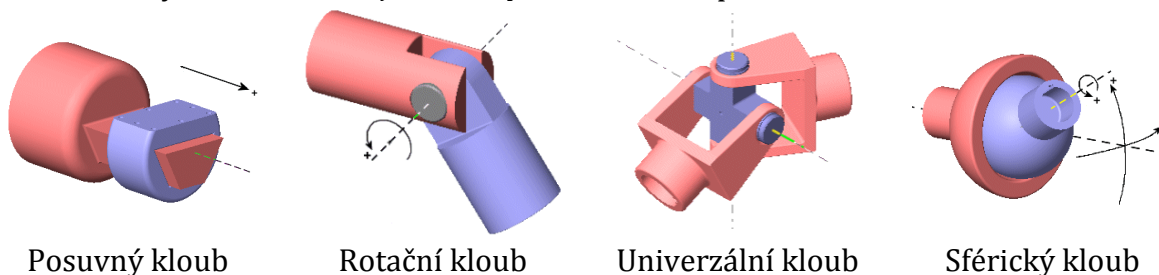
Rotační kloub umožňuje jeden rotační stupeň volnosti.

- **U-kloub (Universal Joint)**

Univerzální kloub umožňuje dva rotační stupně volnosti.

- **S-kloub (Spherical Joint)**

Sférický kloub umožňuje všechny tři rotační stupně volnosti.



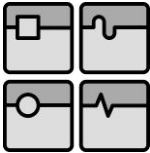
Posuvný kloub

Rotační kloub

Univerzální kloub

Sférický kloub

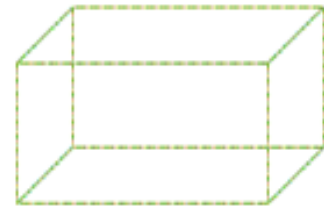
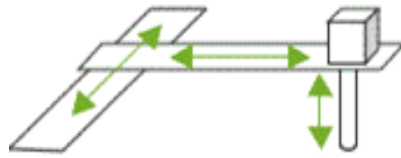
Obr. 3.3 - Nejčastěji užívané klouby [25]



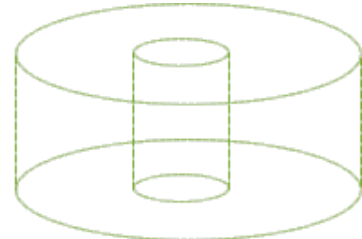
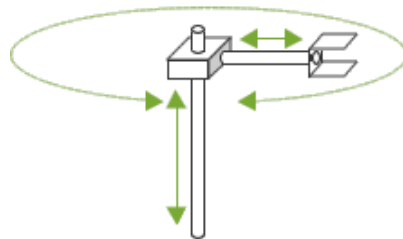
### 3.4. Pracovní prostory

#### Klasické konstrukce

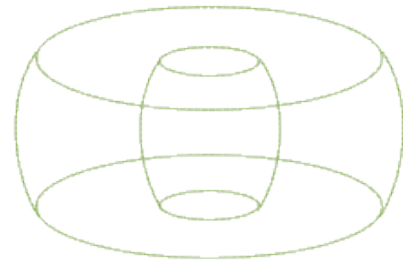
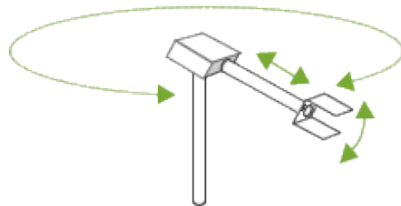
Kartézský robot



Cylindrický robot

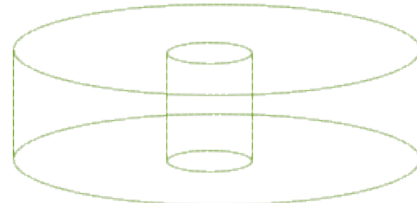
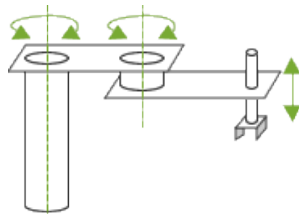


Sférický robot

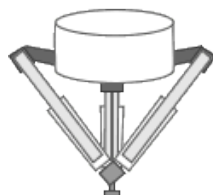


#### Specifické konstrukce

SCARA robot



DELTA robot

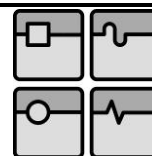


Obr. 3.4 – Pracovní prostory robotů. [17]

### 3.5. Struktura robota

#### 3.5.1. Roboty se sériovou kinematickou strukturou

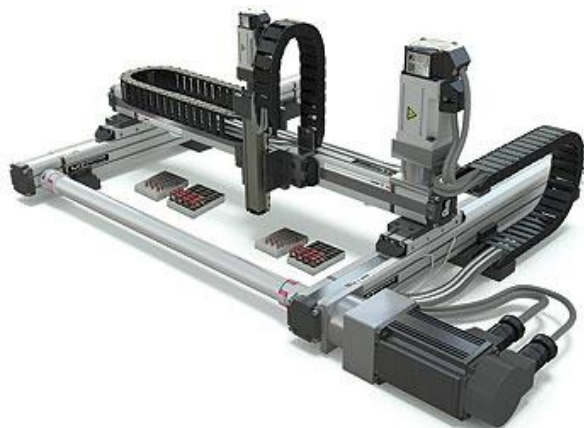
Sériové roboty se vyznačují otevřeným kinematickým řetězcem. U sériových robotů převažuje hybridní struktura pohonů, kde jsou některé pohony uloženy v kloubech a některé se vykytují mimo kloub. Důvodem pro uložení mimo kloub je samotný motor a jeho působení statickými a dynamickými účinky na soustavu robota. Z energetického hlediska je hybridní struktura nejvýhodnější, má však složitější řízení i samotnou konstrukci. [3]



### 3.5.1.1. Příklady konstrukce sériových robotů

#### 3.5.1.1.1. Kartézský robot (TTT)

Kartézský robot (nazývaný také portálový robot) využívá 3 translačních vazeb a jeho pracovní prostor má tvar kvádru. Robot díky použití translačních vazeb má jednoduché řízení. Jako pohonové jednotky mohou složit např. elektrické lineární motory nebo pohybové šrouby. Tyto roboty obecně dosahují vysoké přesnosti i rychlosti. Bez vhodného koncového efektoru nedochází ke změně orientace objektu. Vlastní užití nachází nejčastěji v oblasti manipulace, konkrétně paletizace jednotlivých dílů do palety.



Obr. 3.5 – Kartézský robot [18]

#### 3.5.1.1.2. SCARA robot (RRT)

SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arms) je libovolně polohovatelné robotické rameno. Využívá 2 rotační vazby a jednu translační. Základem robota je podstavec ke kterému je přes první rotační vazbu první rameno, na to je přes druhou rotační vazbu připojené druhé rameno. Na konci druhého ramene je vertikální osa, na které je uchycen koncový efektor. Pracovním prostorem je válcový prstenec.



Obr. 3.6 – SCARA robot výrobce EPSON G20 [19]

### 3.5.1.1.3. Šestiosý robot (Průmyslový robot)

Šestiosé roboty se skládají z 6 rotačních vazeb, které jsou seřazené, tak aby obsáhly co největší možný pracovní prostor. Pracovním prostorem pro tento typ robotů je angulární tvar. Díky více vazbám umožňuje možnost provádění více pohybů v prostoru než třeba roboty SCARA.

Díky své velké univerzálnosti a dostupnosti se v dnešní době se jedná o nejrozšířenější skupinu průmyslových robotů v automatizaci. Výrobci nabízejí velké množství variant, které se hodí na konkrétní aplikace. Tato skupina robotů má za sebou mnohaletý vývoj a výzkum, který se dokázal vypořádat s množstvím nepříznivých jevů způsobené sériovou kinematickou strukturou.



Obr. 3.7 – Robot KUKA KR60-3 [20]      Obr. 3.8 – Robot Fanuc R-2000 [21]

### 3.5.2. Roboty s paralelní kinematickou strukturou

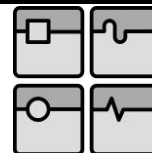
Paralelní roboty na rozdíl od sériových mají kinematický řetězec uzavřený. Paralelní mechanismy se skládají z báze, která slouží jako základna a z platformy, na které bývá připevněný koncový efektor. Platforma je ovládána zpravidla několika aktuátory. V závislosti na jejich pohybu se mění poloha i orientace platformy vůči bázi. Paralelní roboty mají vyšší tuhost díky více ramenům, na které působí silové účinky.

#### 3.5.2.1. Příklady konstrukce paralelních robotů

##### 3.5.2.1.1. Stewartova plošina

Spis Stewartovi plošiny se objevil v roce 1965. V tomto spisu je popsán mechanismus se 6 stupni volnosti a je zkonstruován jako simulátor letecké kabiny. Tento návrh měl důležitou roli v oblasti vývoje paralelních mechanismů. [26]

V zásadě se jedná o hexapod s šesti pohyblivými aktuátory. Aktuátory jsou uchycené na bázi a svým pohybem určují výslednou polohu platformy. V dnešní době tyto mechanismy nacházejí uplatnění i jako 3D tiskárny. [27]



Obr. 3.9 – Simulátor letecké kabiny [29]



Obr. 3.10 – Hexapod PI USA [30]

### 3.5.2.1.2. Delta robot

Delta robot je jeden z nejrozšířenějších typů paralelní konstrukce robota. V základní konfiguraci disponuje 3 stupni volnosti, ale může být doplněn čtvrtým stupněm volnosti v podobě rotace koncového efektoru. Je ovládán třemi motory uchycenými na bázi.



Obr. 3.11 – Robot ABB IRB-360[22]



Obr. 3.12 – Robot FANUC M-3iA/6S [23]

### 3.5.2.1.3. RENISHAW Equator

Zařízení RENISHAW Equator je komplexní systém měření, založený na paralelním mechanismu. Oproti klasickému kartézskému měřicímu stroji má řadu výhod. Má lepší krátkodobou opakovatelnost, snížený setrvační účinek mechanismu a nižší spotřebu. Equator se skládá ze tří lineárních pohonů umístěných v Hookových kloubech.



Obr. 3.13 – RENISHAW Equator [19]

### 3.5.3. Porovnání sériové a paralelní struktury [SM PM]

#### 3.5.3.1. Sériová struktura

##### Výhody:

- Jednoduché řízení
- Jednoduchá mechanická stavba
- Dlouhý vývoj (vyřešení množství problémů)
- Velké množství aplikací
- Příznivý poměr pracovního prostoru ke své velikosti

##### Nevýhody:

- Nízká tuhost (ramena jsou zatěžována na ohyb)
- Horší dynamické vlastnosti
- Vyšší hmotnost (hmotnosti podřadných členů působí na nadřazené)
- Na koncovém efektoru dochází ke sčítání všech chyb
- Horší přesnost a opakovatelnost

#### 3.5.3.2. Paralelní struktura

##### Výhody:

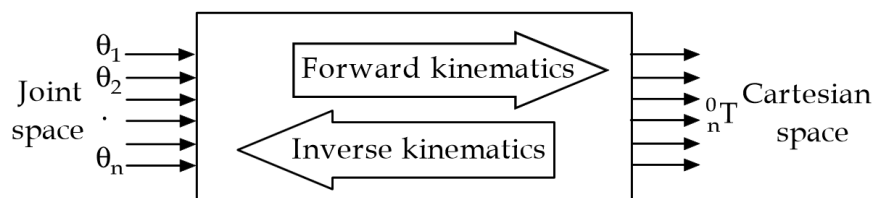
- Vyšší tuhost
- Nižší hmotnost
- Vysoké rychlosti i zrychlení
- Vysoká přesnost

##### Nevýhody:

- Složitější řízení
- Složitější mechanická stavba
- Možnost vzniku kolizí vazeb
- Náročnější systém odměřování polohy

## 4. Kinematický model

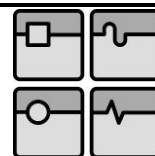
Kinematický model pro simulaci popisuje chování těles při pohybu. Neuvažuje se v něm silové ani momentové zatížení soustavy. Rychlost nebo zrychlení se určí z první, respektive druhé derivace polohy. Kinematická úloha sériové struktury je značně jednodušší než struktury paralelní.



Obr. 4.1 – Kinematická úloha [10]

$$\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \quad \text{Kloubové souřadnice} \quad (3.1) \quad [10]$$

$$X = [x \ y \ z]^T \quad \text{Kartézské souřadnice koncového efektoru} \quad (3.2) \quad [10]$$



#### 4.1.1. Přímá úloha kinematiky

Přímá úloha kinematiky vychází ze znalosti kloubových souřadnic a hledá polohu koncového nulového bodu. V praxi obvykle není možné měřit přímo polohu koncového efektoru často z důvodu neschopnosti umístění dostatečně přesných senzorů. Přímou kinematickou úlohu lze popsat:

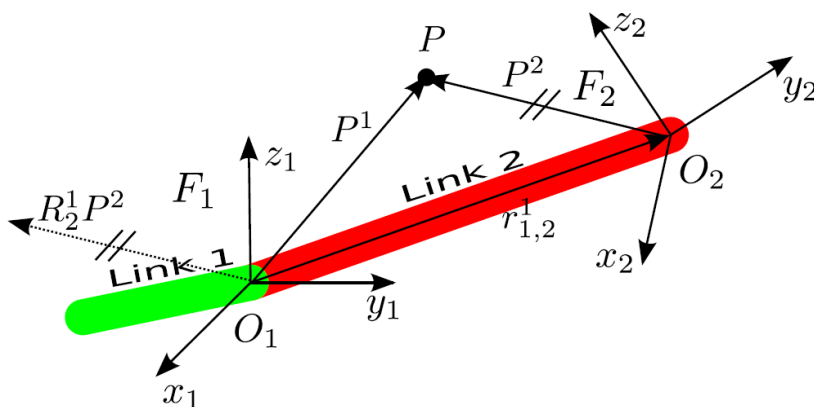
$$X = G(\Theta) \quad \text{Přímá úloha kinematiky} \quad (3.3) \quad [8]$$

#### 4.1.2. Nepřímá úloha kinematiky

Nepřímá nebo také inverzní kinematická úloha řeší nalezení kloubových souřadnic ze známých kartézských souřadnic koncového efektoru. Z důvodu, že je zpravidla požadovaná poloha koncového efektoru známa tvoří inverzní úloha kinematiky důležitou transformaci v robotice. Inverzní kinematickou úlohu lze popsat:

$$\Theta = G^{-1}(X) \quad \text{Nepřímá úloha kinematiky} \quad (3.4) \quad [8]$$

### 4.2. Reprezentace polohy



Obr. 4.2 – Reprezentace polohy [8]

V případě dvojice s.s. (Obr. 3.6), z nichž první s.s.  $F_1 = \{O_1 - x_1 y_1 z_1\}$  je pevně spojen ramenem *Link 1* a druhý s.s.  $F_2 = \{O_2 - x_2 y_2 z_2\}$  s ramenem *Link 2*. Vzájemná translace souřadných systémů je dána vektorem  $r_{1,2}^1 = O_2^1 - O_1^1 = O_2^1$ . Jejich vzájemná rotace je vyjádřena maticí  $R_2^1$ , pro kterou platí:

$$R_2^1 = [x_2^1 \ y_2^1 \ z_2^1] \quad \text{Matice se směrovými vektory} \quad (3.5) \quad [8]$$

$R_2^1$  je ortogonální matice, reprezentující souřadnice jednotkových směrových vektorů s.s.  $F_2$  v s.s.  $F_1$ , pro kterou platí:

$$(R_2^1)^T \cdot R_2^1 = I \Rightarrow (R_2^1)^{-1} = (R_2^1)^T = R_1^2 \quad \text{Ortogonalní matice} \quad (3.6) \quad [8]$$

$R_1^2$  je matice rotace, jejíž sloupce reprezentují souřadnice jednotkových směrových vektorů s.s.  $F_1$  v s.s.  $F_2$ .

$$R_1^2 = [x_1^2 \ y_1^2 \ z_1^2] \quad \text{Matice rotace} \quad (3.7) \quad [8]$$

### 4.2.1. Matice rotace

Rozlišujeme tři základní elementární rotace dvou souřadných systémů.

- Rotace kolem osy  $x_1$  s.s.  $F_1$  o úhel  $\alpha$

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad \text{Matice rotace kolem osy x} \quad (3.8) \quad [8]$$

- Rotace kolem osy  $y_1$  s.s.  $F_1$  o úhel  $\beta$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad \text{Matice rotace kolem osy y} \quad (3.9) \quad [8]$$

- Rotace kolem osy  $z_1$  s.s.  $F_1$  o úhel  $\gamma$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Matice rotace kolem osy z} \quad (3.10) \quad [8]$$

### 4.3. Homogenní transformační matice

K celkovému popisu polohy souřadných systémů lze využít tzv. homogenních souřadnic. Zavedení homogenních souřadnic souvisí s problematikou geometrické projekce. V podstatě se skládá z matice rotace a vektoru translace doplněné o nulový a jednotkový vektor. [8]

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} & R_2^1 & & r_1^2 \\ & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Transformační matice} \quad (3.11) \quad [8]$$

Tento zápis využívají další metody řešení geometrických projekcí.

### 4.4. Úmluvy pro popis kinematiky robotů

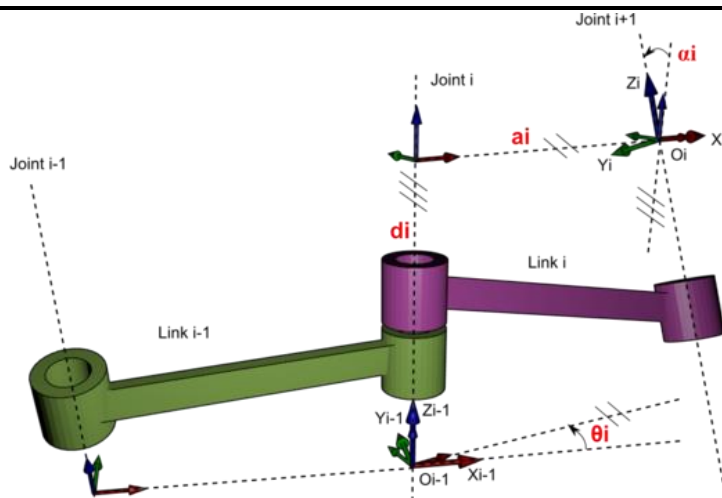
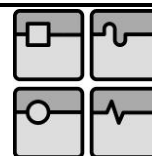
Pro popis uspořádání těles a kloubů robotů a manipulátorů bylo zavedeno mnoho metod řešení. Tyto metody usnadňují definování jednotlivých souřadných systémů a jejich vzájemnou polohovou transformaci. Mezi nejznámější takové úmluvy patří *Denavit-Hartenbergova úmluva* a *Khalil-Kleinfingerova úmluva*. [8]

#### 4.4.1. Denavit-Hartenbergova úmluva

Nejznámější úmluva sloužící pro popis geometrie sériových robotů. V případě dvojici těles *Link i - 1* a *Link i*, která jsou spojena kloubem s jedním stupněm volnosti v tomto případě (Obr. 4.2) se jedná o rotační vazbu. V praxi se, ale mohou vyskytovat oba případy kinematických dvojic (translace i rotace). [8]

Definice s.s.  $F_i = \{O_i - x_i y_i z_i\}$  je při znalosti s.s.  $F_{i-1} = \{O_{i-1} - x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}\}$  dle Denavit-Hartenbergovy úmluvy následující:

- Zvolení osy  $z_i$  podél rotace kloubu *Joint i + 1* a rovnoběžné osy  $z_i'$  podél osy rotace *Joint i*
- Určení počátku  $O_i$  ss  $F_i$  do průsečíku osy  $z_i$  a normály os  $z_{i-1}$  a  $z_i$  a určení počátku  $O_i'$  ss  $F_i = \{O_i' - x_i' y_i' z_i'\}$  do průsečíku osy  $z_{i-1}$  a normály
- Osy  $x_i, y_i$  a Osy  $x_i', y_i'$  se volí, aby výsledný s.s. byl pravotočivý



Obr. 4.3 – Denavit-Hartenbergova úmluva [28]

Vzájemná poloha s.s.  $F_{i-1}$  a  $F_i$  může být popsána pomocí čtyř parametrů.

- $a_i$ .....vzdálenost mezi počátky  $O_i$  a  $O_i'$
- $d_i$ .....vzdálenost mezi počátky  $O_{i-1}$  a  $O_i'$
- $\alpha_i$ .....úhel mezi osami  $z_{i-1}$  a  $z_i$  dané pootočením s.s.  $F_i'$  podél osy  $x'$
- $\theta_i$ .....úhel mezi osami  $x_{i-1}$  a  $x_i$  dané pootočením s.s.  $F_{i-1}$  podél osy  $z_{i-1}$

Pro základní typy kloubů platí:

- **Joint i je typu P**

Proměnná popisující chování kloubu je  $d_i$ , ostatní proměnné jsou konstanty definující uspořádání tělesa *Link i*.

- **Joint i je typu R**

Proměnná popisující chování kloubu je  $\theta_i$ , ostatní proměnné jsou konstanty definující uspořádání tělesa *Link i*.

Pro uvedený případ (Obr. 4.2) bude transformační vztah dle následujících rovnic.

$$T_i^{i-1} = T_i^{i-1} \cdot T_i^{i'} \cdot \text{Trans}(z, d_i) \cdot \text{Rot}(z, \theta_i) \cdot \text{Trans}(x, a_i) \cdot \text{Rot}(x, \alpha_i) \quad (3.12) \quad [8]$$

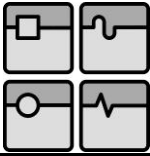
$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13) \quad [8]$$

$$T_i^{i'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14) \quad [8]$$

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Celková transformační matice} \quad (3.15) \quad [8]$$

#### 4.4.2. Khalil-Kleinfingerova úmluva

Khalil-Kleinfingerova úmluva představuje modifikaci D-H úmluvy. Liší se jiným definováním souřadných systémů v kloubech. Na rozdíl od D-H úmluvy, kde je souřadný systém pevně svázan s ramenem, je souřadný systém umístěn přímo na rotační ose kloubu. U K-K úmluvy dochází k větší přehlednosti popisu souřadných systémů. [8]



## 5. Člákové roboty

Člákové roboty jsou hyperredundantní roboty. Jsou složeny z jednotlivých článků řazených za sebou (sériově). Tato skupina robotů je poměrně nová a vychází z biomechanického přístupu v robotice. Příroda stále slouží jako velký zdroj inspirace pro konstrukci robotických zařízení. V tomto případě se jedná o docílení podobné konstrukce jakou má had nebo sloní chobot.

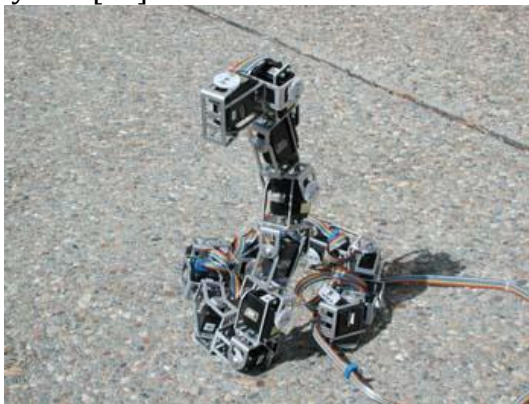
### 5.1. Mobilní člákové roboty (Snakebot)

Jedná se o skupinu robotů určených pro monitorování prostředí. Mají štíhlou a delší konstrukci, ideálně přizpůsobenou pro plazivý pohyb, inspirovaný hadím pohybem. Pohon i tvar článků je volen v závislosti na typu pohybu a aplikaci. Vyšší počet článků zvyšuje plynulost pohybů.

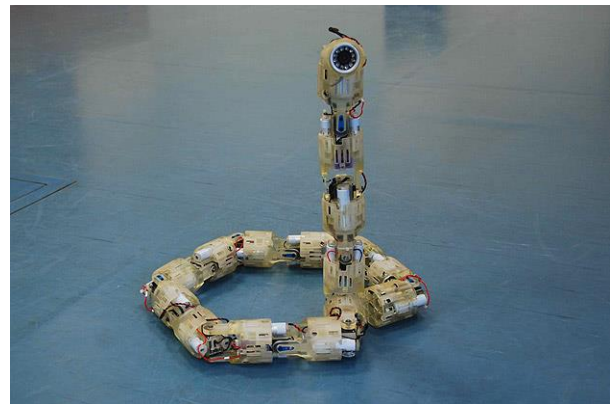
Pohony uvnitř článků nebo kloubů jsou napájeny buď akumulátory, nebo přívodním kabelem z externího zdroje.

Nejvyšší využití najdou při inspekci v úzkých a špatně dostupných prostorech nebo v místech, která jsou životu nebezpečná. Při inspekci potrubí se musí celková konstrukce robota přizpůsobit velikosti potrubí a typu pohybů. Z těchto důvodů mají zpravidla na hlavě robota umístěnou kameru s osvětlením.

Izraelská armáda tento typ robota testovala jako průzkumného robota. Díky své velikosti, možnosti pohybu a překonávání překážek se pro takové aplikace přímo vybízí. [33]



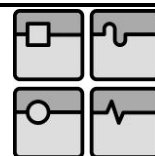
Obr. 5.1 – NASA Snakebot Gen2 [32]



Obr. 5.2 – Robot FANUC M-3iA/6S [33]



Obr. 5.3 – Průzkumný robot v jaderné elektrárně Fukušima [34]

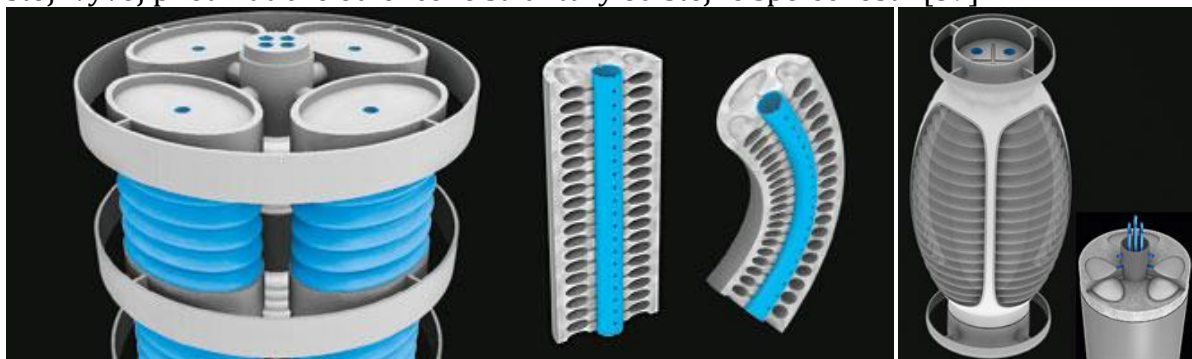


## 5.2. Článkové roboty a manipulátory (Snake-arm)

Tyto roboty na rozdíl od mobilních robotů jsou uchyceny buď pevně k rámu, nebo na mobilní platformě. Mobilní platformou může být posuvný manipulátor, průmyslový robot nebo pohyblivý podvozek. Dělí se na dvě hlavní kategorie a to podle jejich zakřivení. [38]

### 5.2.1. Roboty se spojitou změnou zakřivení

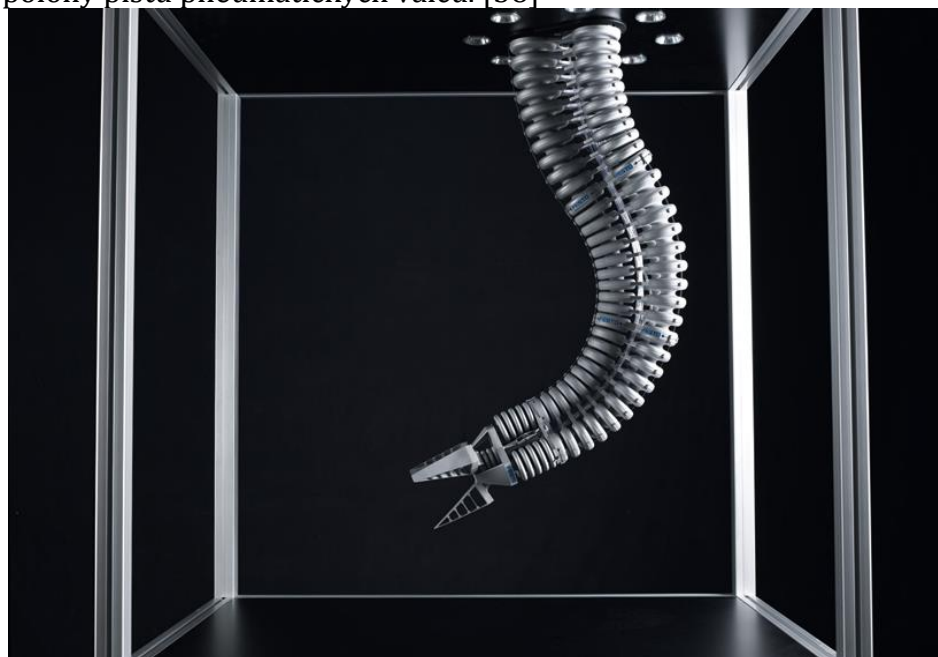
Roboty se spojitou změnou zakřivení využívají pneumatický pohon a pružné materiály s tvarovou pamětí. Tyto roboty jsou rozděleny na jednotlivé segmenty, kde řídicí systém reguluje tlak uvnitř těchto segmentů. Hlavním představitelem těchto robotů je Bionic Handling Assistant společnosti FESTO. Za úspěchem této konstrukce stojí vývoj pneumatické odlehčené struktury od stejné společnosti. [39]



Obr. 5.4 – Pneumatická odlehčená struktura FESTO [39]

#### 5.2.1.1. FESTO Bionic Handling Assistant

Hlavní inspirací tohoto manipulátoru byl sloní chobot. Manipulátor je přichycen k rámu směrem dolů. Dokáže efektivně přesouvat předměty v rámci svého pracovního prostoru. Jako uchopovací nástroj využívá adaptivní držák, který dokáže uchopit měkké a křehké předměty. Pro efektivní zpětnou vazbu využívá senzory pro zjištění aktuální polohy pístů pneumatických válců. [38]



Obr. 5.5 – FESTO Bionic Handling Assistant [38]

## 5.2.2. Roboty s diskretní změnou zakřivení

Roboty s diskretní změnou zakřivení obsahují zpravidla kinematické dvojice. Délku jednotlivých skoků určuje velikost článku. Menší velikosti článku pozitivně ovlivňuje křivku zakřivení. Pro orientaci robota v rovině postačuje pouze jeden rotační kloub, avšak prostoru se musí využít dvojice rotačních kloubů, univerzálního nebo sférického kloubu. Podle určující aplikace se rozhoduje mezi univerzálním (2 DOF) a sférickým kloubem (3 DOF). Podle aplikace se také musí určit celková délka robota a zní počet a velikost jednotlivých článků. Počet článků je určujícím atributem pro počet pohonů. Pro polohování a orientaci v prostoru je zapotřebí působení tří aktuátorů.

U robotů s diskretní změnou zakřivení rozlišujeme dva druhy a to, zda je pohon uvnitř článku nebo je umístěn externě a přenos sil je zajištěn jiným způsobem.

### 5.2.2.1. Robot s pohonem uvnitř článku

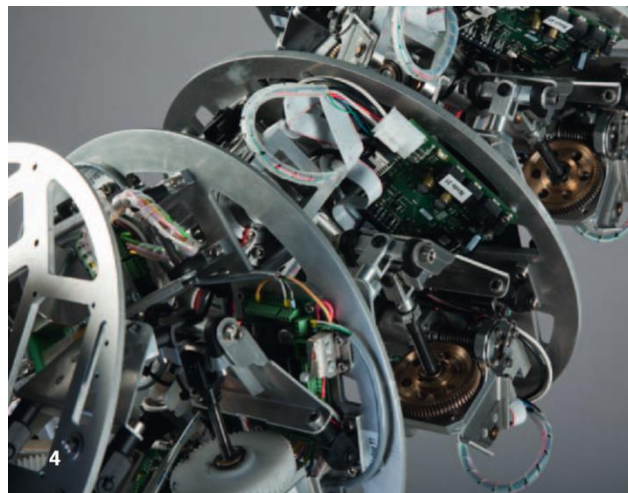
Zástavba pohonu uvnitř článku vyžaduje kompaktní rozměry všech podílejších komponent. Zároveň jsou na pohony kladeny nároky na jejich pohonnou sílu, proto se musí vytvořit mezi těmito požadavky kompromis. Platí tu stejné pravidlo jako u robotů se sériovou strukturou, že následující články působí silou i momentem na předešlé.

#### 5.2.2.1.1. Fraunhofer BROMMI

Článkový robot společnosti Fraunhofer má modulární strukturu. Dle požadované aplikace se určí počet potřebných modulů. Každý z těchto modulů má tři stupně volnosti, dvě rotace a jednu translaci. V jeho konstrukci je využíváno lehkých materiálů. [40]



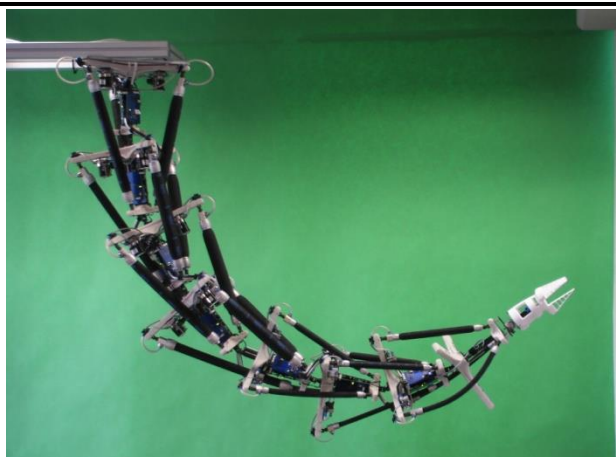
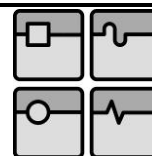
Obr. 5.6 – BROMMI [40]



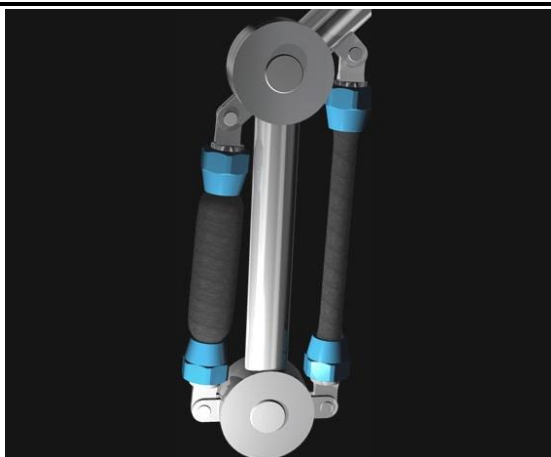
Obr. 5.7 – Detail modulu robotu BROMMI [40]

#### 5.2.2.1.2. BROMMI TAK

BROMMI TAK je článkový robot, který je poháněn výhradně fluidními svaly. Robot se skládá ze 7 dílčích segmentů manipulátorů seřazených sériově (za sebou). Segment v tomto případě má podobu paralelního manipulátoru se třemi aktuátory a univerzálním kloubem mezi bází a platformou. [41]



Obr. 5.8 – BROMMI TAK [41]



Obr. 5.9 – Fluidní svaly FESTO [42]

### 5.2.2.2. Roboty s pohonem mimo články

Průkopníkem této skupiny článkových robotů je společnost OC Robotics, která se zabývá vývojem a výrobou tohoto druhu robotů. Počet pohonů v pohonové skříni se odvíjí od počtu poháněných článků. K přenosu silových účinků od aktuátorů se využívají ocelová lana. Tyto roboty mají velmi složité řízení, protože se poloha a orientace navazujícího článku odvíjí od polohy a orientace předcházejícího článku.

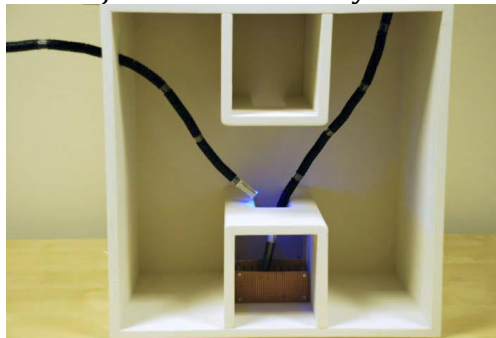
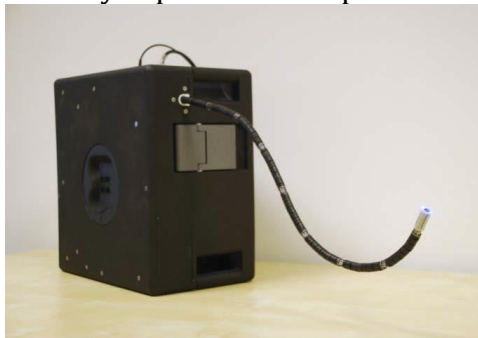
OC Robotics pokrývá velkou škálu typů a velikostí různých článkových robotů. Uvedu některé příklady konstrukce a jejich aplikace. [43]



Obr. 5.10 – Robot OC Robotics [44]

#### 5.2.2.2.1. Portable snake-arm robot

Nejmenší článkové roboty, které OC Robotics nabízí je skupina robotů flexibilních endoskopů nebo také boroskopů. Tyto roboty jsou užitečné pro inspekci malých a velmi stísněných prostorů. Chapadlo robota se navíjí na buben uložený ve skříni. [46]



Obr. 5.11 – Portable snake-arm robot a jeho využití [46]

#### 5.2.2.2.2. Ringhals snake-arm robot

Tento robot je určen do provozu jaderných elektráren. V elektrárně Ringhals ve Švédsku jsou k dispozici dvě velikostní třídy této řady. Menší z nich slouží k inspekci a monitorování vnitřního potrubí. Větší robot může odstranit nefunkční trubku a nahradit ji novou. Hlavní úlohou, ale zůstává monitorování prostředí.[46]



Obr. 5.12 – Ringhals snake-arm robot [46]

#### 5.2.2.2.3. Explorer

Základní řada robotů výrobce OC Robotics. Rozsah velikostí v této řadě je od 40 mm do 150 mm v průměru a od 1 m do 3,25 m na délku. Výhodou jsou některé modulární části, které se dají měnit. K těmto robotům existuje celá řada koncových efektorů. Robot umožňuje rychlé vyjmutí chapadla z pohonové skříně. Celý robot může být integrován do lineárního manipulátoru, průmyslového robota nebo na pohyblivý podvozek. [46]

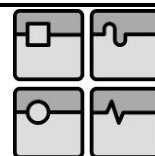


Obr. 5.13 – Příklady konstrukce řady Explorer [46]

#### 5.2.3. Koncové efekty



Obr. 5.14 – Příklady koncových efektorů OC Robotics [46]



### 5.3. Aplikace článkových robotů

#### 5.3.1. Inspekce prostředí

Robot vhodný pro inspekci prostředí je např. zmíněný Ringhals snake-arm robot. Tento robot využívá jako koncový efektor kameru s osvětlením. Svým pohybem dokáže nalézt ideální polohu pro pořízení záběru. Takto můžou být vybaveny i roboty řady Explorer.



Obr. 5.15 – Roboty řady Explorer s kamerou a osvětlením [44]

#### 5.3.2. Řezání a svařování předmětů v nedostupných prostorech

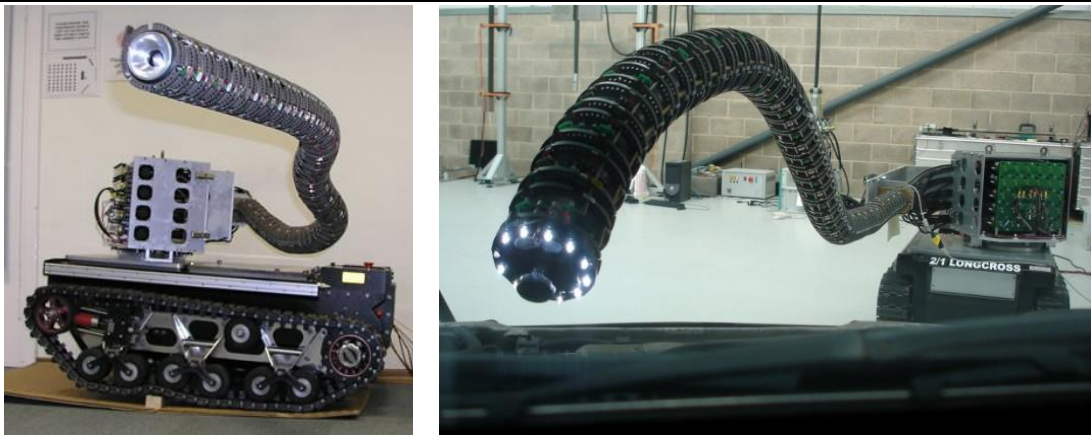
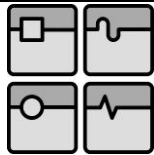
Robot vybavený vhodným koncovým efektozem integrovaný na mobilní platformě dokáže překonávat různé překážky a dostávat se do míst, kde se by se konvenčním robotům nepodařilo dostat. Při užití plazmového hořáku na konci chapadla robot může odřezávat určité části různých předmětů nebo při užití svařovací hlavy může provádět svařování. [44]



Obr. 5.16 – Řezání pomocí plazmového hořáku [44]

#### 5.3.3. Hledání výbušnin

Robot umístěný na pohyblivém pásovém podvozku může být užíván pro hledání výbušnin uvnitř automobilů. Tento robot používá na konci chapadla kameru s osvětlením. Má větší možnosti pohybu díky většímu množství článků.



Obr. 5.17 – Roboty vyhledávající výbušniny na pásovém podvozku [44]

### 5.3.4. Nabíjení elektromobilů TESLA

V současné době TESLA Motors vyvíjí svou vlastní konstrukci robotického ramene k určení nabíjení elektromobilů. Tento robot by měl podle senzorů najít polohu připojovací zásuvky a zapojit přívodní kabel. [47]



Obr. 5.18 – Stávající nabíjení elektromobilů TESLA [56]

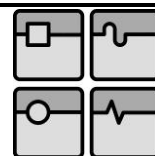
## 5.4. Stavba článkového robota OC Robotics

### 5.4.1. Pohonová skříň

V pohonové skříni jsou usazeny aktuátory, které řídí všechny pohyby robota. Mimo aktuátory se ve skříni nachází také řídicí elektronika.



Obr. 5.19 – Detail aktuátorů v pohonové skříni [43]



### 5.4.2. Chapadlo

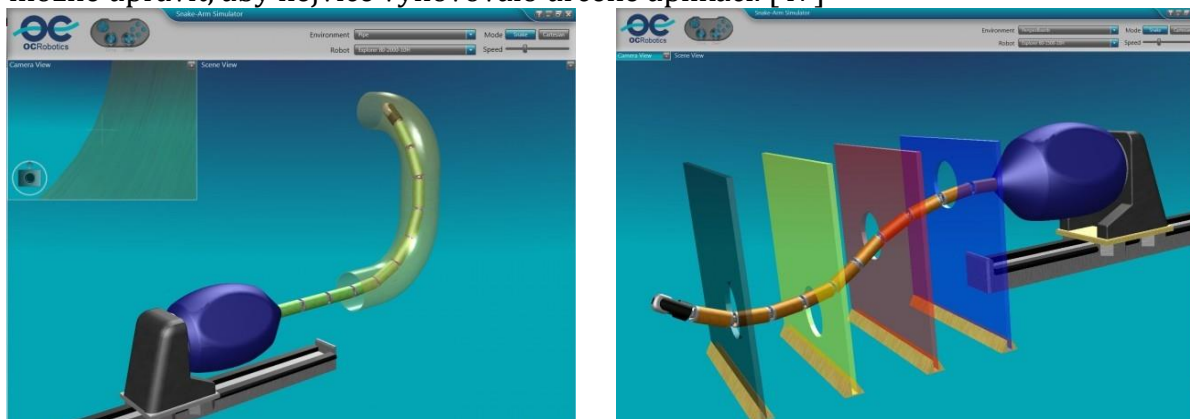
Jedná se o akční člen celého robota. Skládá se ze článků a křížových kloubů. Křížový kloub tvoří univerzální vazbu mezi články. Každý článek v řetězci je ovládán třemi ocelovými lany. Poslední článek je uzpůsoben pro držení koncového efektoru.



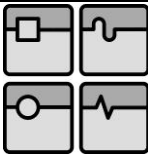
Obr. 5.20 – Detail chapadla robota OC Robotics [43]

### 5.5. Způsob řízení článkových robotů

Výrobce OC Robotics pro řízení robotů využívá pokročilé algoritmy pro výpočet požadované polohy a orientace jednotlivých článků. O řízení se stará speciálně vyvinutý software, který má intuitivní uživatelské rozhraní a umožňuje několik druhů řízení. Nejvhodnější ovládání je pomocí klávesnici nebo ovladače. Uživatelské rozhraní je možné upravit, aby nejvíce vyhovovalo určené aplikaci. [47]



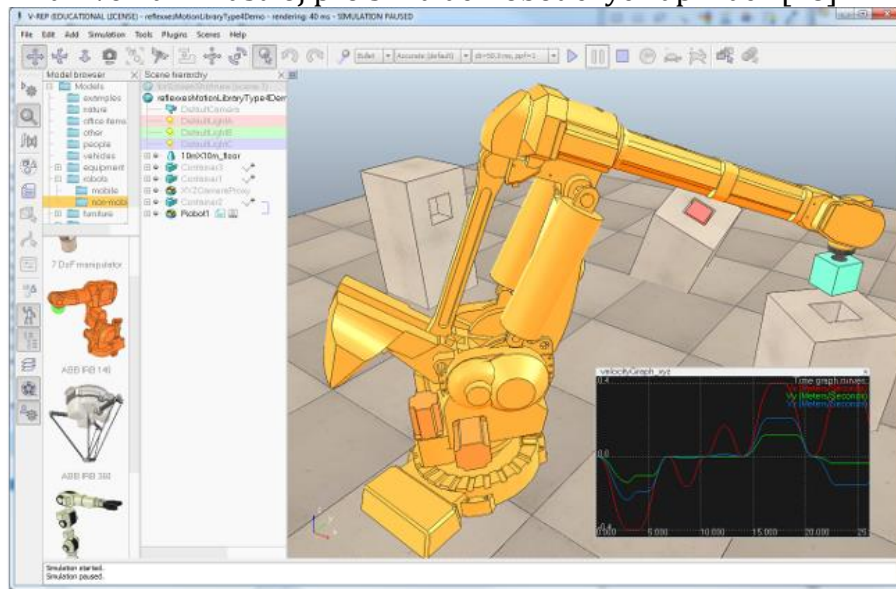
Obr. 5.21 – Ukázka uživatelského rozhraní programu OC Robotics [47]



## 6. Simulační software

### 6.1. V-REP (Virtual Robot Experimental Platform)

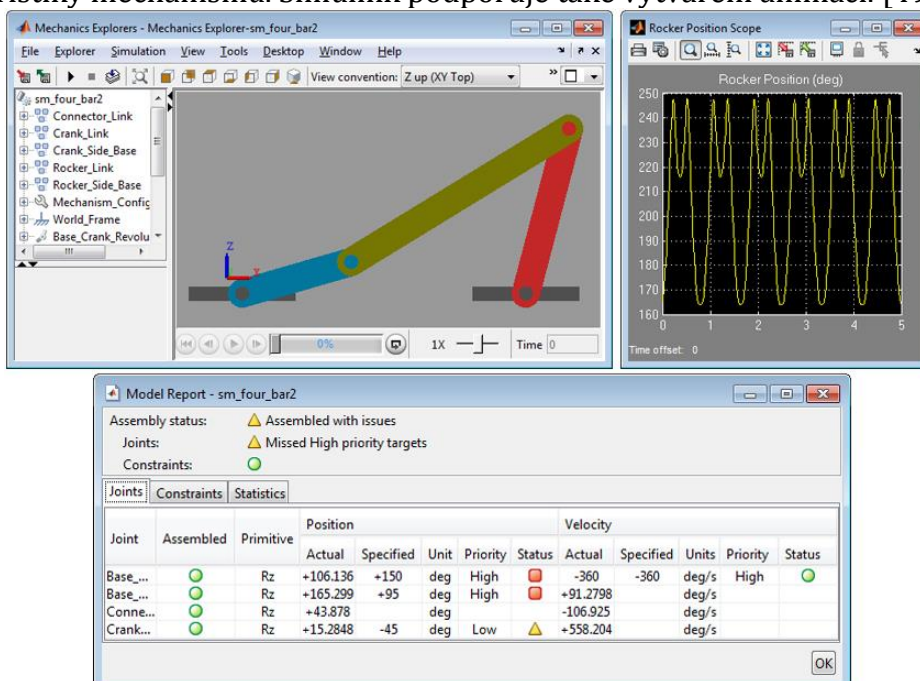
V-REP obsahuje integrované vývojové prostředí, kde každý objekt nebo model může být kontrolován a řízen pomocí scriptů, různých pluginů nebo API klientem. V-REP je velmi univerzální nástroj pro simulaci robotických aplikací. [48]



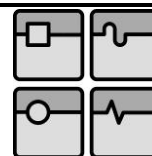
Obr. 6.1 – Ukázka uživatelského rozhraní V-REP PRO [48]

### 6.2. Matlab Simulink SimMechanics

SimMechanics je modul pro Simulink, který poskytuje multibody simulaci v trojrozměrném prostoru. Využívá se pro simulaci aplikací robotů, vozidel a jejich částí a různé konstrukční návrhy. Program je uzpůsoben pro silové nebo pohybové charakteristiky mechanismů. Simulink podporuje také vytváření animací. [49]

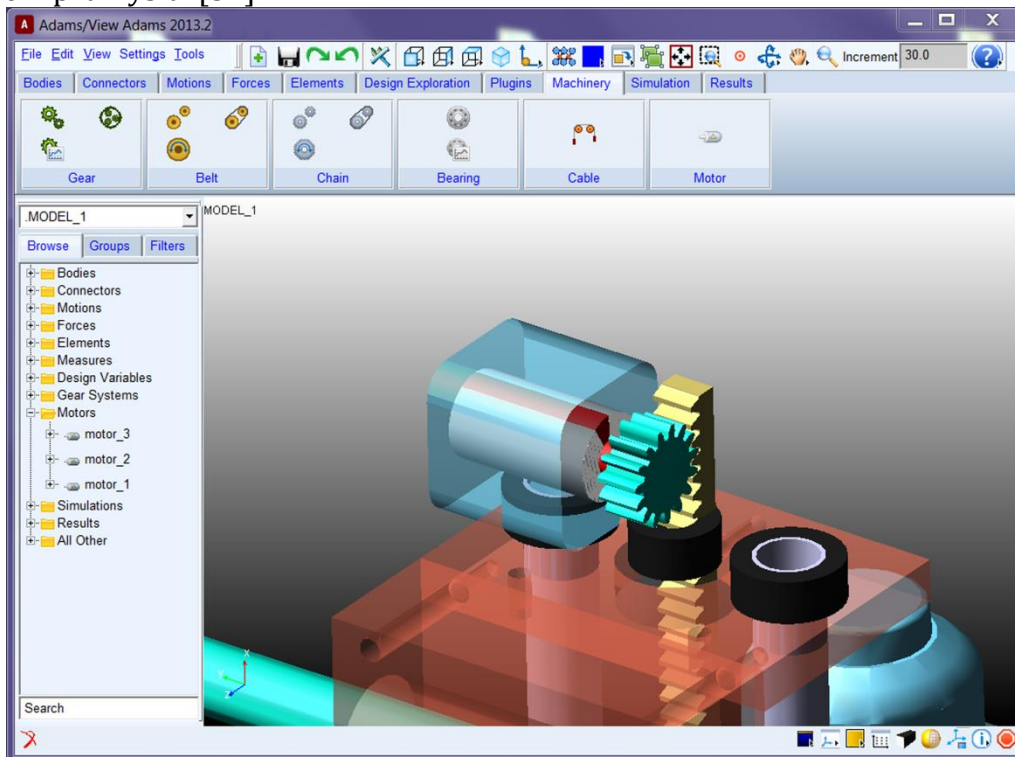


Obr. 6.2 – Ukázka uživatelského rozhraní SimMechanics [49]



### 6.3. ADAMS

Jedná se o světově nejužívanější software pro simulaci multibody dynamiky. Program se využívá pro určení kinematiky dynamiky mechanismů. Může určit z působících zatížení i síl kinematické vlastnosti. Velké uplatnění má v dopravním a leteckém průmyslu. [57]



Obr. 6.3 – Ukázka uživatelského rozhraní ADAMS [57]

## 7. Návrh článkového robota

### 7.1. Požadavky na článkového robota

- Možnost manipulace ve velkém pracovním prostoru
- Dostatečná tuhost konstrukce
- Malá hmotnost robota

Požadované parametry:		
Délka:	<b>1600-2000</b>	<b>mm</b>
Počet článků:	<b>9</b>	<b>-</b>
Rozteč natočení článků:	<b>30</b>	<b>deg</b>

Tab. 7.1 – Požadované parametry

### 7.2. Volba varianty konstrukce

Vybral jsem si konstruování článkového robota (manipulátora) typu Snake-arm. Pro konstrukci se spojitou změnou zakřivení jako je konstrukce Bionic Handling Assistant od společnosti FESTO je třeba využívání materiálů s tvarovou pamětí. Vzhledem k tomu, že tyto materiály jsou stále nákladnou záležitostí, zvolil jsem druhou možnost, a to robota s diskrétní změnou zakřivení. Ty pro svůj pohyb využívají kinematické vazby. Pohonové ústrojí jsem zvolil mimo akční člen robota, z důvodu snadnější a lehčí konstrukce. Nakonec jsem vybral jako pohon elektrické motory z důvodu větší univerzality a malým rozměrům.

Vycházel jsem z konstrukce robota OC Robotics řady Explorer.

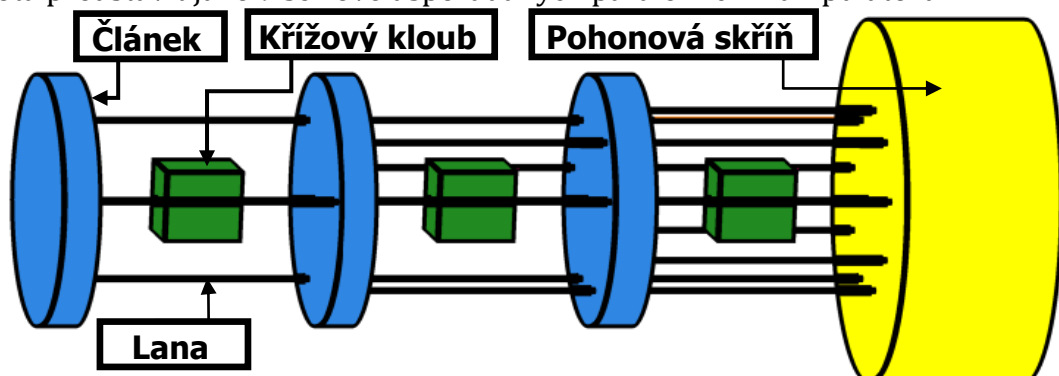
Typ robota	Snakebot robot	Snake-arm robot
Změna zakřivení	Spojitá změna zakřivení	Diskrétní změna zakřivení
Poloha pohonu	Pohon uvnitř článků	Pohon mimo články
Aktuátor	Elektrický	Pneumatický

Tab. 7.2 – Výběr varianty

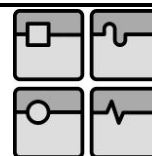
### 7.3. Volba kinematického řetězce

Každý článek musí být poháněn pohony (aktuátory). V rovině postačuje dvojice aktuátorů, ale v prostoru se využívá trojice pohonů. S každým dalším článkem proto roste dvojnásobně nebo trojnásobně počet aktuátorů.

Z důvodu správného pochopení chování kinematické struktury je třeba si celého robota představit jako 9 sériově uspořádaných paralelních manipulátorů..

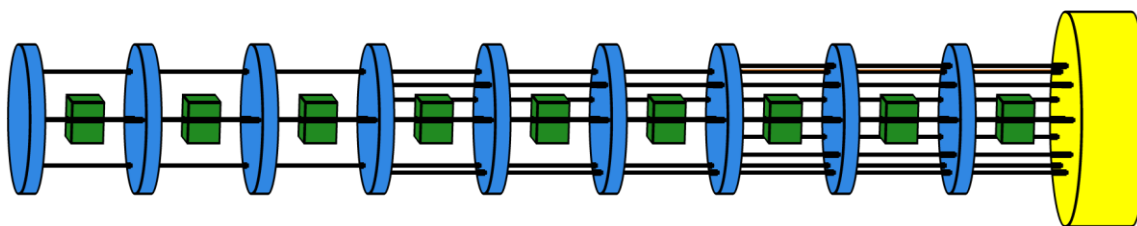


Obr. 7.1 – Návrh kinematického řetězce



Z obrázku (Obr. 7.1) vyplývá, že k trojici článků musíme přivést 9 pohonů. Z požadavků je patrný počet článků 9, to znamená, že by se muselo použít 27 pohonů. Z důvodu úspory počtu pohonů jsem zvolil jejich náhradu v podobě pružin. Poháněn bude každý třetí článek a mezi články bude v místě působících lan pružiny. Pružiny by měly rovnoměrně přenášet síly mezi články, ale v praxi se této rovnováhy nedá docílit. Tento problém zpřičňuje zhoršení celkové přesnosti robota. Kinematický řetězec celého robota bude vypadat následovně.

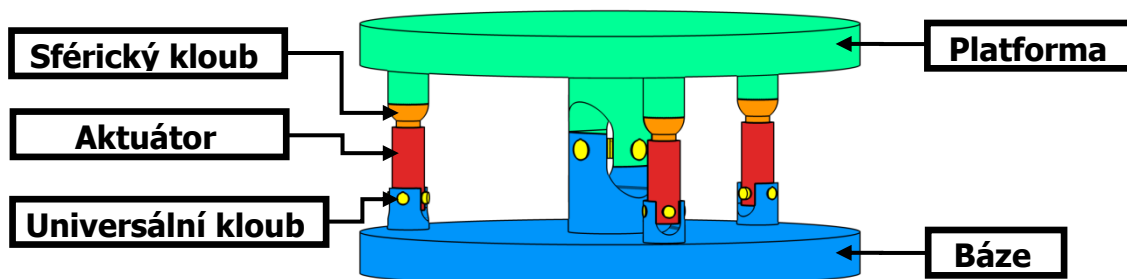
Z důvodu správného pochopení kinematické struktury je třeba si celého robota představit jako 9 sériově uspořádaných paralelních manipulátorů.



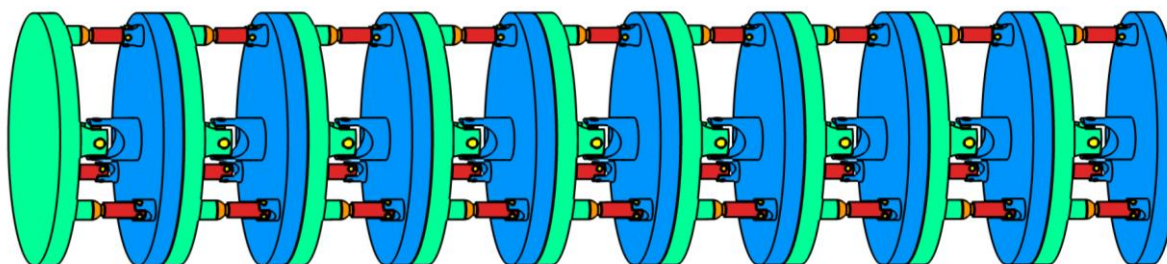
Obr. 7.2 – Návrh kinematického řetězce celého robota

### 7.3.1. Paralelní manipulátor

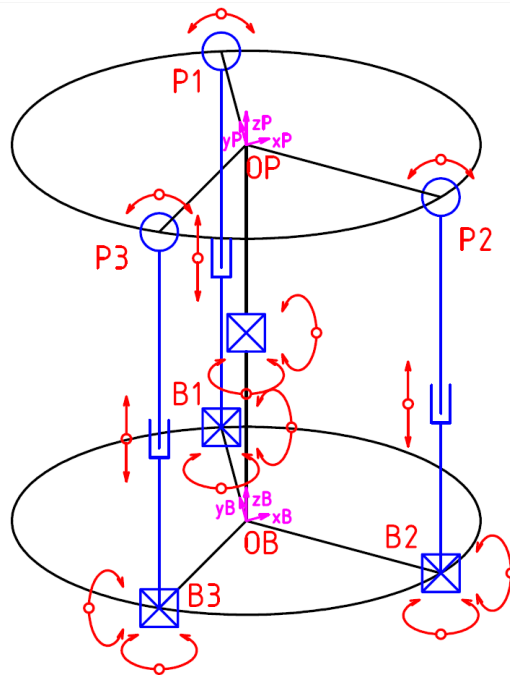
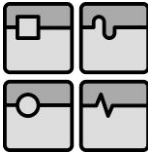
Pro nahrazení mechanismu polohování a orientace článků lze s výhodou využít nahrazení tohoto řetězce paralelním manipulátorem se dvěma stupni volnosti. Trojice lan je nahrazena trojicí aktuátorů, které jsou k bázi připevněny univerzálním kloubem a k platformě sférickým kloubem. Báze s platformou je dále spojena dalším univerzálním kloubem. Jedná se tedy o manipulátor typu UPS obohacený o jeden univerzální kloub navíc. Tato univerzální vazba zabraňuje posuvnému pohybu ve všech osách a dovoluje pouze rotace ve dvou osách. Z důvodu, že tento kloub neovlivňuje přímo výslednou polohu, jedná se o pasivní kloub.



Obr. 7.3 – Paralelní manipulátor UKS



Obr. 7.4 – Sériově seřazené paralelní manipulátory UKS



Obr. 7.5 – Schéma paralelního manipulátoru UKS

Střed báze je bod  $O_B$ . Na roztečné kružnici o poloměru  $R$  leží 3 body aktuátorů  $B_1, B_2, B_3$ , ve kterých je upevněn univerzální kloub. Střed platformy je bod  $O_P$ . Roztečná kružnice platformy je stejná jako u báze, body  $P_1, P_2, P_3$  mají stejnou orientaci vůči souřadnému systému jako body  $B_1, B_2, B_3$ . V bodech  $P_1, P_2, P_3$  jsou sférické vazby. O pohyb aktuátorů se stará přímočarý posuvný pohyb.

### 7.3.2. Stupně volnosti paralelního manipulátoru

$$F_M = \lambda \cdot (n - j - 1) + \sum_{i=1}^g f_i - f_d + s \quad \text{Výpočet stupňů volnosti} \quad (7.1) \quad [6]$$

$\lambda = 6$       Pohyb v rovině:  $\lambda = 3$  [6]  
                  Pohyb v prostoru:  $\lambda = 6$

$n = 1 + 3 \cdot 2 + 1 = 8$       Počet členů v mechanismu [6]

$j = 3 \cdot (1 + 1 + 1) + 1 = 10$       Počet kinematických dvojic [6]

$f_i = 3 \cdot (2 + 1 + 3) = 18$       Počet DOF kinematických dvojic [6]

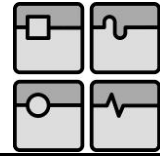
$f_{id} = 0$       Počet DOF kinematických dvojic [6]

$s = 2$       Počet DOF pasivních vazeb

$F_M = 6 \cdot (8 - 10 - 1) + 18 + 2 = 2$       Výpočet stupňů volnosti [6]

Jak bylo řečeno, článkový robot se skládá z devíti na sobě naskládaných paralelních manipulátorů, proto je celkový počet stupňů volnosti robota roven:

$F_R = F_M \cdot 9 = 2 \cdot 9 = 18$       Celkový počet stupňů volnosti (7.2)



## 8. Kinematický řetězec

Kinematický řetězec dvou článků připomíná řetězec paralelního sférického zápěstí, kde ale místo tří stupňů volnosti jsou jen dvě. Tento manipulátor je poháněn 3 translačními aktuátory. Platforma je k bázi připevněna čtyřmi nezávislými kinematickými řetězci, z nichž prostřední člen tvoří pasivní stabilizační element, který omezuje počet stupňů volnosti platformy. [8]

Definice veličin

$$\theta = [d_1 \ d_2 \ d_3]^T \quad \text{Kloubové souřadnice} \quad (8.1) \quad [8]$$

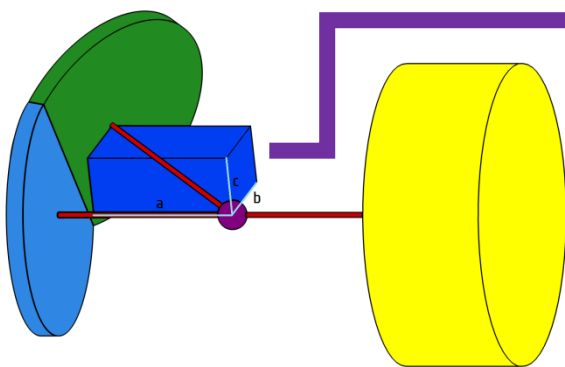
$$d_i = \|B_i C_i\| \quad \text{Vysunutí aktuátorů} \quad (8.2) \quad [8]$$

$$X = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T \quad \text{Zobecněné souřadnice} \quad (8.3) \quad [8]$$

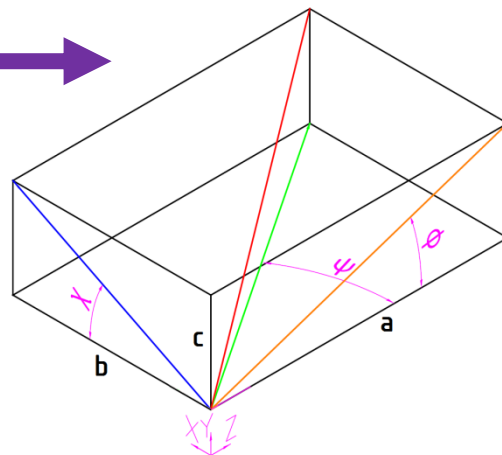
kde  $\alpha, \beta, \gamma$  jsou Eulerovy úhly natočení platformy v osách  $x, y, z$

### 8.1. Výpočet nulových bodů jednotlivých článků

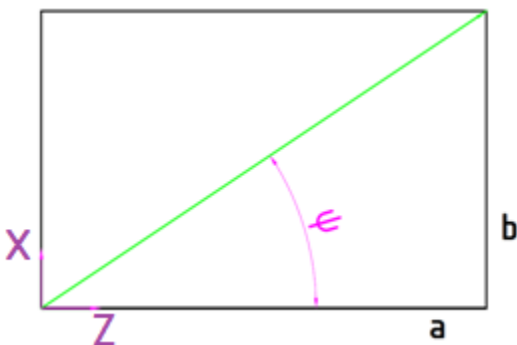
Vzdálenost mezi středy článků je díky univerzálnímu kloubu mezi články vždy stejná a je rovna vzdálenosti od čela článku po střed kloubu. Při natočení křížového kloubu v prostoru jsou známy hodnoty úhlů  $\varphi$  a  $\psi$ , které jsou potřebné pro získání směrového vektoru natočení. V prostoru jsou složky směrového vektoru dané kvádrem, kde vzdálenost od středu kloubu po začátek článku je tělesová úhlopříčka daného kvádru. Složky jsou dané velikostí jednotlivých stran.



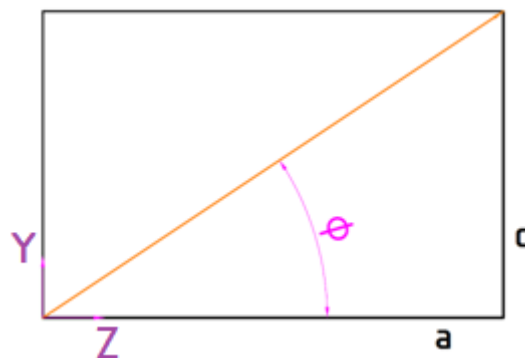
Obr. 8.1 – Natočení článku v prostoru



Obr. 8.2 – Kvádr s uvedenými úhly



Obr. 8.3 – Obdélník v rovině XZ



Obr. 8.4 – Obdélník v rovině YZ

Na velikosti úhlu  $\chi$  v rovině XY nezáleží z důvodu zamezení rotace v ose Z, díky křížovému kloubu mezi články.

Společná strana pro obě roviny je strana  $a$ . Při znalosti délky tělesové úhlopříčky  $u$ , úhlu v rovinách XZ, YZ a poměru všech tří stran se určí délky stran.

$$tg\psi = \frac{b}{a} \Rightarrow b = a \cdot tg\psi \quad \text{Strana } b \text{ v závislosti na } a \text{ a } \psi \quad (8.4)$$

$$tg\phi = \frac{c}{a} \Rightarrow c = a \cdot tg\phi \quad \text{Strana } c \text{ v závislosti na } a \text{ a } \phi \quad (8.5)$$

$$u^2 = a^2 + b^2 + c^2 \quad \text{Délka úhlopříčky} \quad (8.6)$$

$$a = \frac{u}{\sqrt{1 + tg^2\psi + tg^2\phi}} \quad \text{Výpočet délky strany } a \quad (8.7)$$

Po dopočítání stran  $b$ (3.4) a  $c$ (3.5) máme hodnoty souřadnic vrcholu kvádrů, kde se nachází střed následujícího článku. Pozice vektoru ze středu kloubu a vrcholem kvádrů je:

$$\vec{v} = [b \ c \ a] \quad \text{Směrový vektor natočení kloubu} \quad (8.8)$$

Pro počítání vektoru je vytvořena funkce `Vector.m`, kde se po zadání požadované délky (tělesová úhlopříčka kvádrů) a úhlů  $\phi, \psi$  dopočítá vektor  $v$ . Jako délka  $l_0$ , se uvažuje vzdálenost mezi středem kloubu a začátkem následujícího článku. Pro výpočet konce článku se využívá stejného natočení jako při natočení kloubu, jen jako délka se uvažuje délka článku od začátku článku po střed následujícího středu kloubu  $l$ .

$$U = \text{Vector}(l_0, \phi, \psi) \quad \text{Funkce výpočtu vektoru kloubu}$$

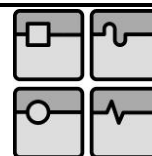
$$V = \text{Vector}(l, \phi, \psi) \quad \text{Funkce výpočtu vektoru článku}$$

Pokud je znám vektor natočení kloubu je možné dopočítat souřadnice středu následujícího článku.

$$O_0 = O_A = [0 \ 0 \ 0] \quad \text{Nulový bod začátku soustavy} \quad (8.9)$$

$$O_{1i} = \sum_{i=1}^9 O_{1i-1} + U_i \quad \text{Nulové body začátků článků} \quad (8.10)$$

$$O_{2i} = \sum_{i=1}^9 O_{2i-1} + V_i \quad \text{Nulové body konce článků} \quad (8.11)$$



Dle rovnic (3.10) a (3.11) lze dopočítat nulové body každého článku v soustavě.

Nulové body	
Nulové body začátku článků	Nulové body konce článků
$O_{B1} = O_A + O_H + U_{11}$	$O_{B2} = O_{B1} + V_{11}$
$O_{C1} = O_{B2} + U_{11} + U_{12}$	$O_{C2} = O_{C1} + V_{12}$
$O_{D1} = O_{C2} + U_{12} + U_{13}$	$O_{D2} = O_{D1} + V_{13}$
$O_{E1} = O_{D2} + U_{13} + U_{21}$	$O_{E2} = O_{E1} + V_{21}$
$O_{F1} = O_{E2} + U_{21} + U_{22}$	$O_{F2} = O_{F1} + V_{22}$
$O_{G1} = O_{F2} + U_{22} + U_{23}$	$O_{G2} = O_{G1} + V_{23}$
$O_{H1} = O_{G2} + U_{23} + U_{31}$	$O_{H2} = O_{H1} + V_{31}$
$O_{I1} = O_{H2} + U_{31} + U_{32}$	$O_{I2} = O_{I1} + V_{32}$
$O_{J1} = O_{I2} + U_{32} + U_{33}$	$O_{J2} = O_{J1} + V_{33}$

Tab. 8.1 – Výpočty nulových bodů

Nulové body v základní pozici	
Nulové body začátku článků	Nulové body konce článků
$O_{B1} = [0 \ 0 \ 60]$	$O_{B2} = [0 \ 0 \ 220]$
$O_{C1} = [0 \ 0 \ 260]$	$O_{C2} = [0 \ 0 \ 420]$
$O_{D1} = [0 \ 0 \ 460]$	$O_{D2} = [0 \ 0 \ 620]$
$O_{E1} = [0 \ 0 \ 660]$	$O_{E2} = [0 \ 0 \ 820]$
$O_{F1} = [0 \ 0 \ 860]$	$O_{F2} = [0 \ 0 \ 1020]$
$O_{G1} = [0 \ 0 \ 1060]$	$O_{G2} = [0 \ 0 \ 1220]$
$O_{H1} = [0 \ 0 \ 1260]$	$O_{H2} = [0 \ 0 \ 1420]$
$O_{I1} = [0 \ 0 \ 1460]$	$O_{I2} = [0 \ 0 \ 1620]$
$O_{J1} = [0 \ 0 \ 1660]$	$O_{J2} = [0 \ 0 \ 1760]$

Tab. 8.2 – Výpočty nulových bodů v základní pozici

## 8.2. Transformace souřadnic pozice děr

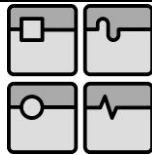
### 8.2.1. Matice rotace

Matice rotace slouží k transformaci souřadnic natočením o určitý úhel. V tomhle případě bude třeba k výpočtu souřadnic pozice děr při natočení článku v prostoru o úhly  $\varphi$  a  $\psi$ .

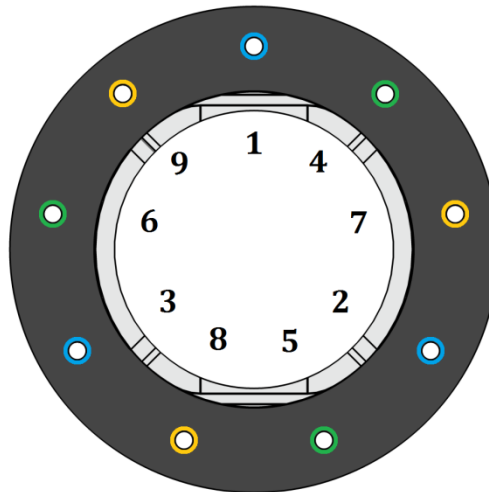
$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad \text{Matice rotace podle osy x} \quad (8.12) \quad [8]$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 & -\sin(\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\psi) & 0 & \cos(\psi) \end{bmatrix} \quad \text{Matice rotace podle osy y} \quad (8.13) \quad [8]$$

$$R_P = R_1 \cdot R_2 \quad \text{Celková matice rotace} \quad (8.14) \quad [8]$$



### 8.2.2. Pozice děr



Obr. 8.5 – Pozice a očíslování děr v článku

Pozice otvorů		
$M_1 = [0 \ 50 \ 0]$	$M_2 = [43.3 \ -25 \ 0]$	$M_3 = [-43.3 \ -25 \ 0]$
$M_4 = [32.1 \ 38.3 \ 0]$	$M_5 = [17.1 \ -47 \ 0]$	$M_6 = [-49.2 \ -8.7 \ 0]$
$M_7 = [49.2 \ 8.7 \ 0]$	$M_8 = [-17.1 \ -47 \ 0]$	$M_9 = [-32.1 \ 38.3 \ 0]$

Tab. 8.3 – Souřadnice pozice bodů

### 8.2.3. Transformace

Předpoklad pro získání transformace je nutné znát zobecněné souřadnice (8.3).

$$B_i = O_B + \sum_{i=1}^9 R_P \cdot M_i \quad \text{Souřadnice bodu po natočení} \quad (8.15)$$

Po přepočítání všech bodů ve všech člancích jsou známy všechny souřadnice bodů potřebné k výpočtu zkrácení nebo prodloužení lana, působící od aktuátoru.

### 8.2.4. Pozice aktuátorů

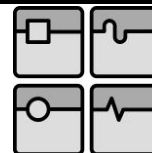
Délka lana mezi články se určí ze vzdálenosti mezi dvěma body v prostoru. Výpočet vzdálenosti je odvozen z Pythagorovy věty, kde se odečítají jednotlivé složky souřadnic bodů. Pro tento výpočet složí funkce `VDistance.m`.

$$L = \sqrt{(b_x - a_x)^2 + (b_y - a_y)^2 + (b_z - a_z)^2} \quad (8.16)$$

Při porovnání aktuální a původní délky lana je znám jejich rozdíl a ten určuje posunutí aktuátoru. Jestliže je jejich rozdíl záporné číslo, pozice aktuátorů se pohybuje ve směru (-Z) a při kladné hodnotě ve směru (+Z).



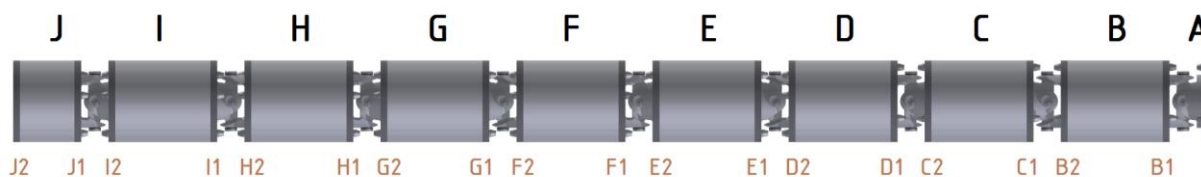
Obr. 8.6 – Pohyb aktuátoru



## 9. Konstrukce

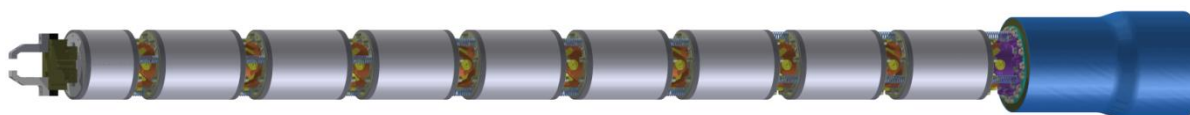
Jak bylo řečeno, celá konstrukce vychází ze stavby článkového robota společnosti OC Robotics řady Explorer.

Celý robot se skládá z devíti článků a články jsou mezi sebou spojeny křížovými klouby. Chapadlo je připojeno k pohonové skříni. Poslední článek je držák koncového efektoru. Jednotlivé články označeny písmen od *B*, do *J* držáku koncového efektoru. Nulový bod celé soustavy je bod *A*. Ovládací články jsou články *D*, *G*, *J*.



Obr. 9.1 – Označení článků robota

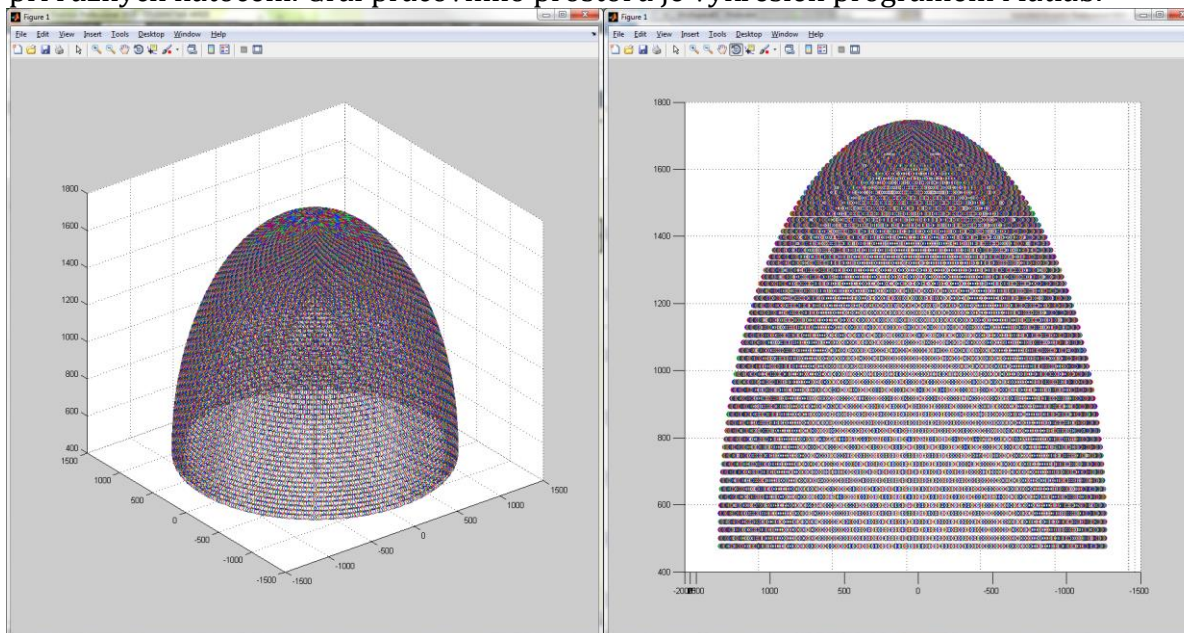
### 9.1. Robot



Obr. 9.2 – Pohled na sestavu robota s kleštěmi Schunk JGP 80 [58]

### 9.2. Pracovní prostor

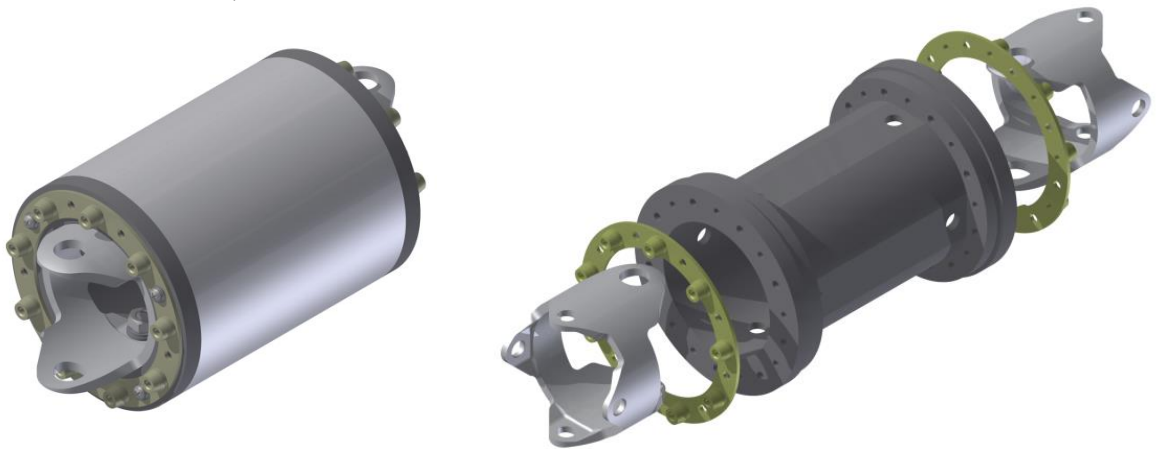
Pracovní prostor robota je definován množinou bodů koncového efektoru při všech možnostech natočení kloubů. Na obrázku je uveden maximální dosah chapadla při různých natočení. Graf pracovního prostoru je vykreslen programem Matlab.



Obr. 9.3 – Pracovní prostor robota

### 9.3. Článek

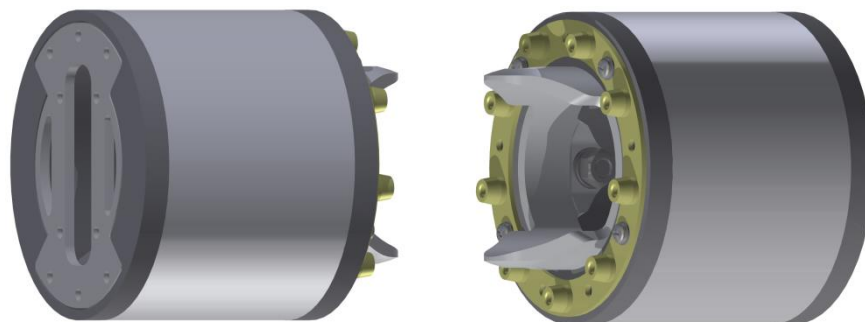
Článek má podobu dutého válcového tělesa, kde na přední a zadní straně jsou otvory pro vedení lan. Hlavní část článku tvoří duté plastové jádro. Dutina slouží k odlehčení celé konstrukce a zároveň umožňuje prostor k vedení pneumatické hadice nebo elektrického svazku kabelů ke koncovému efektoru. K jádru článku jsou na obou jeho stranách přišroubovány držáky. Držák slouží ke spojení s křížovým kloubem. Držák je zhotoven z hliníku. Další součástí je držák pružiny, který má kuželovitou plochu přizpůsobenou pro natáčení pružiny dle natočení kloubu. Součástí ovládacího článku je držák lana. Vzdálenost děr pro křížový kloub je 200 mm. Délka samotného článku bez držáku je 160 mm.



Obr. 9.4 – Článek vcelku a rozložený

### 9.4. Držák koncového efektoru

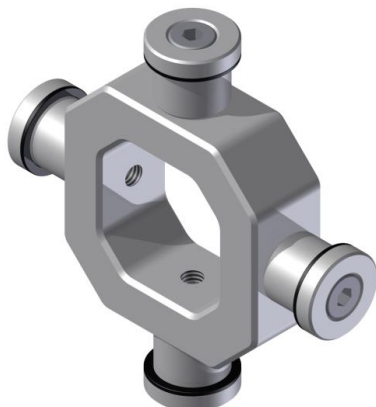
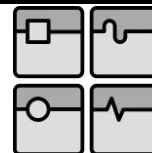
Držák koncového efektoru má stejnou stavbu jako článek, jen má délku 100 mm a na konci článku má upevňovací desku. Deska se může přizpůsobit koncovým efektorům přidáním dalších otvorů s požadovanou roztečí. Uprostřed desky musí zůstat otvor pro vedení hadice nebo elektrického vedení.



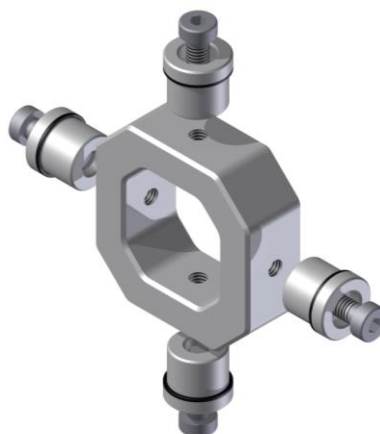
Obr. 9.5 – Držák koncového efektoru

### 9.5. Křížový kloub

Křížový kloub se skládá čtveřice čepů a kroužku. Kloubový kroužek má tvar nepravidelného osmiúhelníku a je z hliníku. Na funkčních plochách má díru se závitem pro zápusťný šroub. Po připojení čepu ke kroužku se musí čep zajistit šroubem s pružnou podložkou. Mezi držákem článku a čepem kloubu je gumová podložka.



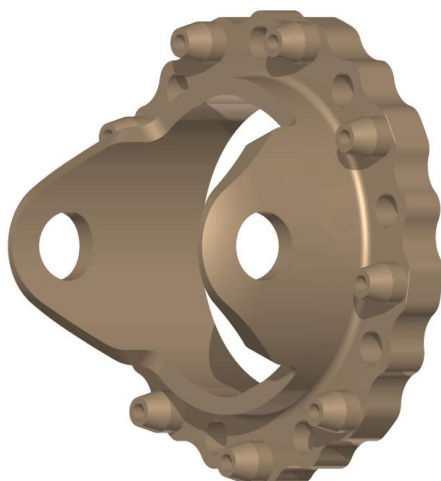
Obr. 9.6 – Křížový kloub



Obr. 9.7 – Rozložený křížový kloub

### 9.6. Držák chapadla

Držák chapadla je připevněn k pohonové skříni pomocí šroubů. Na druhé straně je držák křížového kloubu, který spojuje základnu a první článek. Ve středu čela držáku je definován nulový bod celé soustavy  $O_A$ .



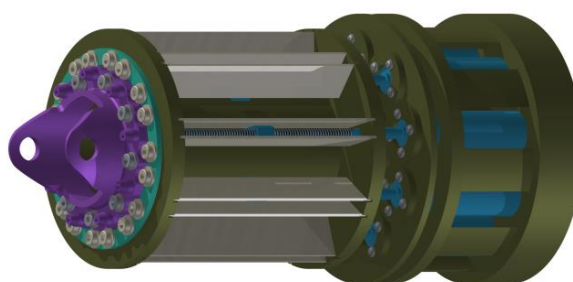
Obr. 9.8 – Držák chapadla



Obr. 9.9 – Držák pružin

### 9.7. Pohonová jednotka

Pohonová jednotka se skládá z devíti aktuátorů. Základem je hliníková skříň, ve které jsou uloženy všechny aktuátory. V zadní části se nachází místo pro uložení kontrolní elektroniky pro řízení DC motorů.



Obr. 9.10 – Pohonová skříň

### 9.7.1. Požadavky na aktuátor

Hlavní požadavky na aktuátor:

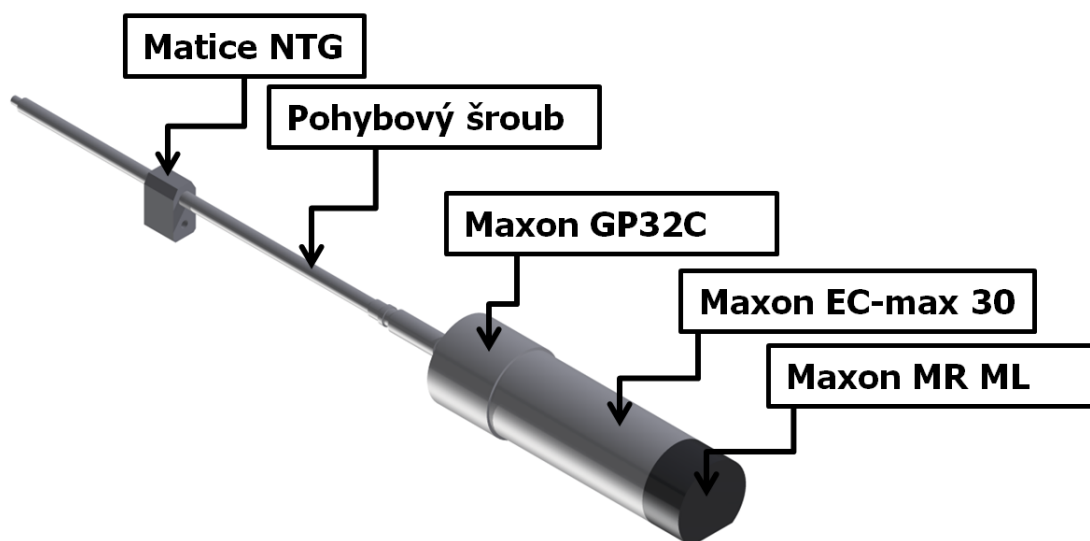
- Malá velikost
- Dostačující krouticí moment
- Dostatečný zdvih

### 9.7.2. Aktuátor

Aktuátor je pracovní část celého robota. Transformuje rotační pohyb elektrického motoru na přímočarý. Skládá se z elektrického motoru, planetové převodovky, hřídel s pohybového šroubu, NTG matice a snímačem odměřování polohy. Pohybový šroub je samosvorný, proto by při vypnutém proudu udržel pozici matice na stejném místě.

Sestava aktuátoru		
Motor:	Maxon	EC-max 30 60W
Převodovka:	Maxon	GP32 C
Snímač:	Maxon	MR ML
Pohybový šroub:	ServoDrive	Ø5,56x4,88 (78%)
Matice:	ServoDrive	NTG

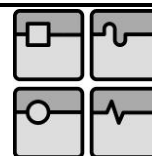
Tab. 9.1 – Sestava aktuátoru



Obr. 9.11 – Aktuátor

#### 9.7.2.1. Elektrický motor

Hlavní požadavky na motor jsou malá velikost, vysoké otáčky, dostatečný krouticí moment. Těmto požadavkům vyhovuje motor od výrobce Maxon, konkrétně stejnosměrný motor řady EC (Electronic Comumutation), tyto motory jsou bezkartáčkové. Výhodami těchto motorů jsou několikanásobná přetížitelnost, velký záběrový moment, nízká časová konstanta a malé rozměry. [50]



#### Motor EC-max 60 W

Výkon:	60	W
Nominální napětí:	12	V
Max. otáčky:	7980	ot./min
Nominální otáčky:	6590	ot./min
Účinnost:	80	%

Tab. 9.2 - Vlastnosti motoru [50]

### 9.7.2.2. Planetová převodovka

Výrobce Maxon nabízí modulární konstrukci těchto pohonných jednotek a dle katalogu jsem vybíral z řady GP32 C. Tyto převodovky mají oproti základním řadám keramická ozubená kola, která poskytují vyšší životnost. [51]

#### Planetová převodovka GP32 C

Převodový poměr:	4,8:1
Absolutní převodový poměr:	24/5

Tab. 9.3 - Vlastnosti převodovky [51]



Obr. 9.12 – Maxon EC-max 30 60W [50]



Obr. 9.13 – Maxon GP32 [51]

Dle katalogu Maxon se k motorům řady EC-max 30 dodává magnetické senzory řady MR ML. Tyto senzory využívají Hallové senzory a jsou dvoukanálové. [52]



Obr. 9.14 – Motor s odměřováním Maxon MR ML [52]

### 9.7.2.3. Hřídel

Hřídel je připojena k planetové převodovce přes pevnou spojku. Je uložena ve dvou radiálních ložiskách. Obě ložiska jsou kuličková s kosoúhlým stykem a pohlcují axiální zatížení způsobené pohonem. Na hřídeli se nachází samosvorný trapézový závit. [53]

Trapézový závit		
Průměr:	5,56	mm
Stoupání:	4,88	mm
Účinnost:	78	%

Tab. 9.4 - Vlastnosti pohybového závitu [53]



Obr. 9.15 – Hřídel s vyznačenými místy pro ložiska

### 9.7.3. Ověření pohybu

Při navrhování aktuátorů jsem uvažoval rychlost přímočarého pohybu 10 cm za 2 sekundy. Vybíral jsem pohon od výrobce Maxon, který nabízí modulární koncepci malých kompaktních motorů. Motor je uveden v kapitole. Pro určení převodovky bylo třeba určit konkrétní pohybový šroub.

$$n_N = 6590 \text{ min}^{-1} = 109,8 \text{ s}^{-1} \quad \text{Nominální otáčky motoru} \quad (9.1) \quad [50]$$

$$P_S = 4,88 \text{ mm} \quad \text{Stoupání trapézového závitu} \quad [53]$$

$$i_P = 4,8 \quad \text{Převodový poměr} \quad [51]$$

$$N_P = \frac{50}{P_S} = 10,3 \quad \text{Počet potřebných otáček za 1 s}$$

$$N_S = \frac{n_N}{i_P} = 22,8 \quad \text{Maximální počet otáček za 1 s}$$

$$N_S \geq N_P \rightarrow \text{Vyhovuje} \quad \text{Podmínka rychlosti otáčení závitu}$$

### 9.8. Držák lana

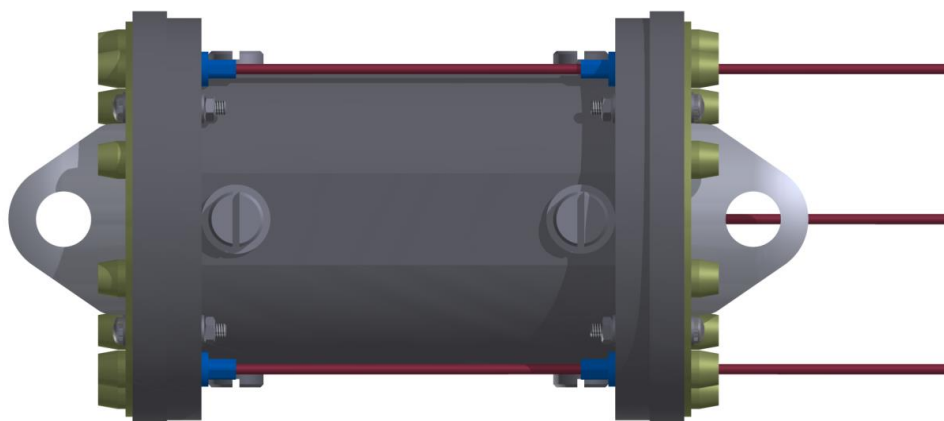
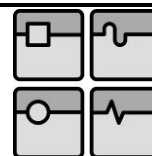
Na ocelovém laně jsou nalisovány dva držáky lana v určité vzdálenosti od sebe, aby při dopředném a zpětném pohybu aktuátoru působily síly na článek z většího průměru držáku. Tím pádem působí lano na článek nižším tlakem.

#### 9.8.1. Lana

Ocelové lano má průměr 3 mm. Maximální hodnota zatížení je 485 kg a pevnost tohoto lanka je 6,63 kN. [55]

Délka lan		
Lano 1:	698	mm
Lano 2:	1298	mm
Lano 3:	1738	mm

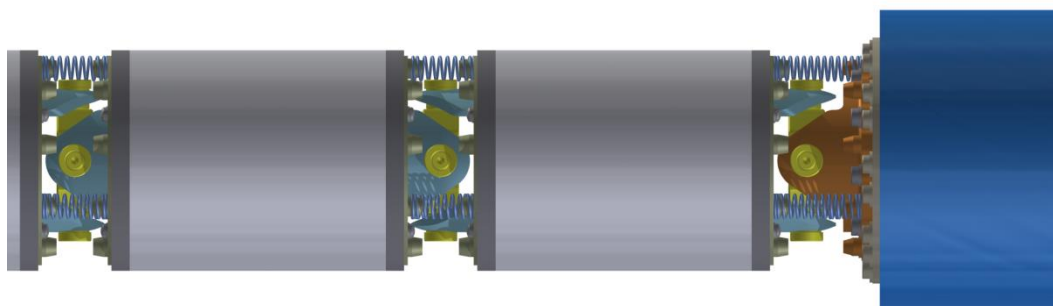
Tab. 9.5 – Délky jednotlivých lan



Obr. 9.16 – Článek s vyobrazenými držáky lana

## 9.9. Držák pružin

Držák pružin slouží k zajištění pružiny proti vybočení pružiny z daného tvaru (Obr. 9.9). Při natočení kloubu vede pružinu kuželová plocha. K článku je držák připevněn šroubem a maticí.



Obr. 9.17 – Pohled na články spojené pružinami

### 9.9.1. Pružiny

Zvolil jsem tlačné pružiny od výrobce Hennlich. Vyrobeny jsou z pružinové oceli a mají broušené konce závitu. [54]

d [mm]	D <sub>e</sub> [mm]	D [mm]	D <sub>i</sub> [mm]	L <sub>0</sub> [mm]	n	D <sub>e</sub> [mm]	D <sub>h</sub> [mm]	R [N/mm]	s <sub>n</sub> [mm]	L <sub>0</sub> [mm]	F <sub>n</sub> [N]	M [g]	Číslo zboží	▼▼▼	▶◀
				53,5	8,5			4,03	32,8	20,7	132,1	6,57	60/3/3	+	+
				78,0	12,5			2,74	48,2	29,8	132,1	9,08	60/3/4	+	-

Tab. 9.6 – Pružiny [54]

Vlastnosti pružin			
Označení pružiny:		<b>60/3/3</b>	<b>60/3/4</b>
Vnitřní průměr:	mm	10,9	10,9
Vnější průměr:	mm	14,1	14,1
Průměr drátu:	mm	1,6	1,6
Počáteční délka:	mm	53	78
Tuhost pružiny:	N/mm	4,03	2,74

Tab. 9.7 – Vlastnosti pružin [54]

## 10. Simulace

Simulaci pohybu robota jsem prováděl v následujících softwarech:

- Matlab Simulink
- ADAMS View Student Edition
- V-REP PRO EDU

### 10.1. Inverzní kinematika

Pro správné řešení kinematiky pohybu robota je nutné znát celkovou konfiguraci mechanismu, aby byl schopen koncovým manipulátorem přemísťovat na požadované místo v prostoru v rámci jeho pracovního prostoru.

Pro vyřešení tohoto problému slouží program V-REP PRO společnosti Copelia Robotics.

### 10.2. V-REP PRO

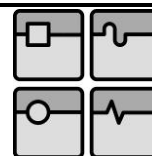
Program umožňuje používání prostorových těles ve formátu STL, což je velice výhodné pro představitost a následné prezentace. V prostředí tohoto programu jsem vytvořil kinematický řetězec z těles a jejich vazeb. Řetězec se sestavuje podle formátu PARENT-CHILD.

#### 10.2.1. Využívané funkce

- Import>Mesh (Import těles ve formátu STL)
- Add>Joint>Revolute (Přidání rotačních vazeb křížovým kloubům)
- Add>Dummy (Bod, který může mít polohovou vazbu)

#### 10.2.2. Hierarchie komponent

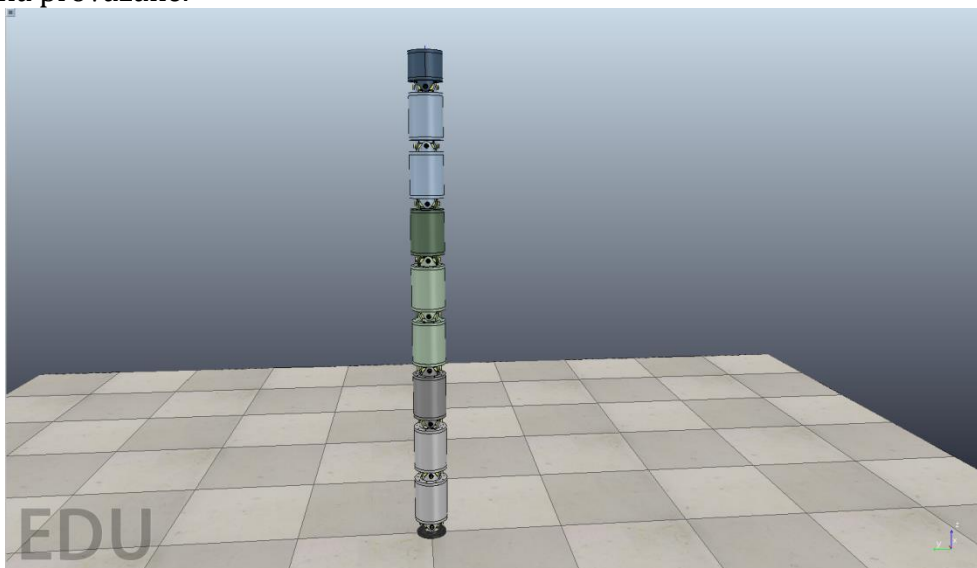
Strom jednotlivých komponent a vazeb je na obrázku (Obr. 10.1). Mezi body Dummy1 a Dummy2 je vytvořená vazba. Křížový kloub je v hierarchii rozdělen na dvě rotační vazby s navzájem kolmou osou. Jedna vazba je definovaná mezi předcházejícím článkem a kloubem, další je definovaná mezi kloubem a následujícím článkem.



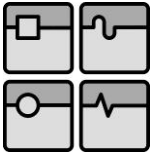
Obr. 10.1 – Hierarchie komponent a vazeb v programu V-REP PRO

### 10.2.3. Kinematický řetězec

Kinematický řetězec se skládá z těles a vazeb. Tělesa jsou importovány jako STL soubory a jsou spojeny rotačními vazbami. Vazby jsou definované pro výpočet inverzní kinematiky. Dovolená velikost úhlu rotace ve vazbě je  $30^\circ$ . Natočení úhlů je v rámci trojčlánku provázané.

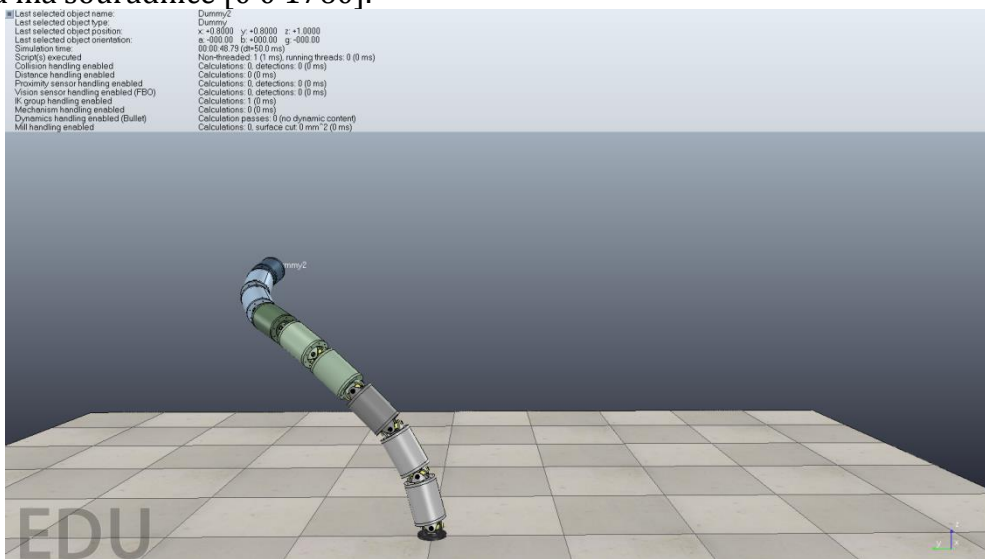


Obr. 10.2 – Základní poloha robota v prostředí V-REP PRO



### 10.2.4. Určení natočení kloubů

Pozice, definující bod koncového efektoru, je dána bodem [Dummy1], který spojen se středem koncového efektoru. Tento bod určuje konfiguraci robota. V případě, že je posunut do jiného místa uvnitř pracovního prostoru robota, pak se úhly jednotlivých vazeb přepočítávají, aby robot dosáhl požadované polohy. Pro přesun bodu jsem využil definování druhého bodu [Dummy2] a mezi nimi vytvořil vazbu v nastavení inverzní kinematiky. Po zadání souřadnic požadovaného bodu [Dummy2] a spuštění simulace se celý robot přetransformuje do určené polohy. Z následující konfigurace lze vyčíst natočení v jednotlivých vazbách. Základní poloha koncového efektoru má souřadnice [0 0 1760].



Obr. 10.3 – Příklad simulace V-REP PRO

Výstupem ze simulace jsou tedy hodnoty natočení jednotlivých kloubů.

#### Značení jednotlivých úhlů rotace

Číslo kloubu	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rotace kolem x	$\varphi_{11}$	$\varphi_{12}$	$\varphi_{13}$	$\varphi_{21}$	$\varphi_{22}$	$\varphi_{23}$	$\varphi_{31}$	$\varphi_{32}$	$\varphi_{33}$
Rotace kolem y	$\psi_{11}$	$\psi_{12}$	$\psi_{13}$	$\psi_{21}$	$\psi_{22}$	$\psi_{23}$	$\psi_{31}$	$\psi_{32}$	$\psi_{33}$

Tab. 10.1 Natočení jednotlivých kloubů

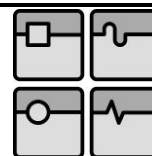
Úhly v trojčlánku jsou stejné, z toho vyplývá, že z trojice úhlů stačí znát jeden. Hodnoty těchto úhlů jsou důležité pro simulaci v Matlabu, kde se určí posuv aktuátorů.

Pozice otvorů			
Číslo trojčlánku	1	2	3
Rotace kolem x	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$
Rotace kolem y	$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_3$

Tab. 10.2 Natočení kloubů

### 10.3. Matlab

V programu Matlab je vytvořen matematický model celého robota, kde jsou provedeny výpočty z celé 3. kapitoly. Dále jsou v něm vytvořeny funkce pro dílčí výpočty. Program také obsahuje všechny parametry potřebné pro simulaci v modulu Simulink.



### 10.3.1. Parametry modelu

Program umožňuje měnit parametry modelu, aniž by to ovlivnilo výsledky výstupu.

Parametry modelu		
Délka článku	$l$	m
Délka od kloubu k článku	$l_0$	m
Délka držáku chapadla po kloub	$l_H$	m
Délka držáku koncového efektoru	$l_G$	m
Průměr roztečné kružnice pro díry	$D$	m
Počet děr v článku	$PD$	

Tab. 10.3 Parametry kinematického modelu

### 10.3.2. Vstupy

Vstupy v programu jsou hodnoty úhlu natočení kloubů z tabulky Tab. 3.5. Po zadání vstupů a spuštění se vykoná celý program. Výchozí hodnoty úhlů natočení jsou nulové, takže program vypočítá hodnoty pro robota ve výchozím stavu.

### 10.3.3. Funkce

Pro usnadnění a dosažení větší přehlednosti jsem sestavil dvě funkce.

- `VDistance.m`
- `Vector.m`

#### **VDistance.m**

Slouží pro výpočet vzdálenosti dvou bodů v prostoru. Funkce se volá příkazem `VDistance(A,B)`, kde  $A$  je výchozí bod a  $B$  je cílový bod. Vychází z rovnice (3.16).

#### **Vector.m**

Slouží pro určení vektoru, který je dán velikostí a úhly  $\varphi$  a  $\psi$ . Funkce se volá příkazem `Vector(l,phi,psi)`, kde  $l$  je velikost vektoru,  $phi$  je úhel natočení v ose  $X$  a  $psi$  v ose  $Y$ . Vychází z rovnic (3.4-3.8)

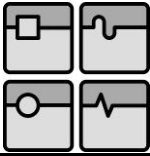
## 10.4. Matlab Simulink

V programu Simulink je zkonstruován kinematický model článkového robota. Model se skládá z těles a vzájemných vazeb. Simulink využívá všechny proměnné, které jsou načteny ve Workspace Matlabu.

Pro křížový kloub je využíváno dvou rotačních vazeb v osách  $X$  a  $Y$ .

### 10.4.1. Využívané funkce

- Machine Environment
- Ground
- Body
- Joint
- Body Sensor (Určuje pozici tělesa nebo bodu)
- Joint Actuator (Určuje natočení kloubu)
- Display (Odečítá hodnoty z Body Sensor)



### 10.4.2. Parametry

Parametry jsou definovány z matematického modelu. Jsou v něm zahrnuty úhly natočení kloubů. Dále všechny parametry definující tělesa jako hmotnost, moment setrvačnosti a rozměry.

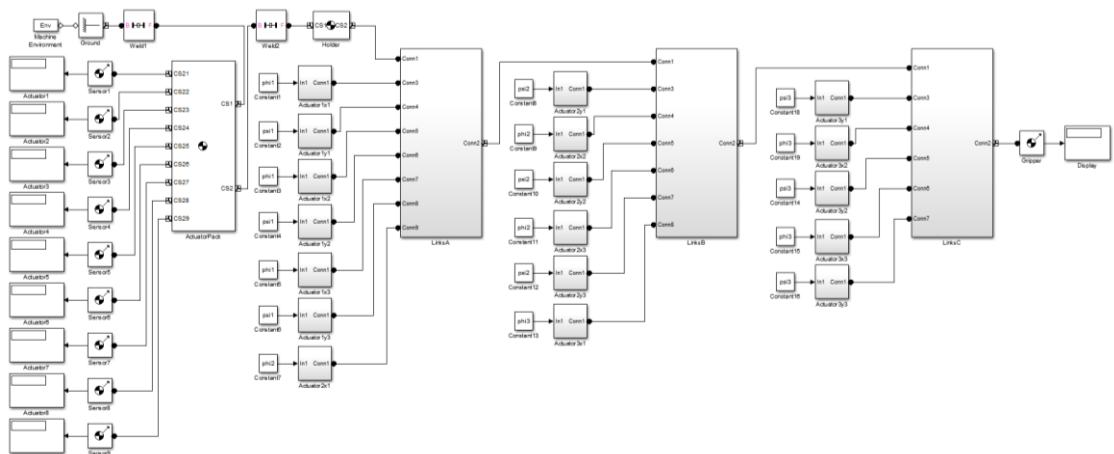
### 10.4.3. Simulace

Pro pohyb kloubů slouží funkce Joint Actuator, ta má dvě možnosti řízení. Buď silové, nebo pohybové. V tomto případě je řízení řešeno přes pohyb, kde musí být nastaveno požadovaný úhel, úhlová rychlost a úhlové zrychlení. Pro určení kinematiky stačí mít úhlovou rychlost i zrychlení rovné 1. Hodnota úhlu se načítá z Workspace. Pro přehlednost jsou v modelu vytvořeny subsystemy, které pro připojení využívají konektory (Connectors).

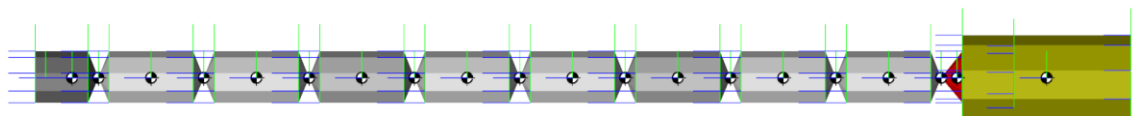
V tělese aktuatorové skříně jsou pozice matice NTG definovány jako body, které mění svou polohu. Pro vykreslení pozice těchto bodů je třeba v simulačním modelu mít zobrazené souřadné systémy. V modelu jsou k těmto bodům přiřazeny senzory (Body sensor), které pomocí displejů (Display) zobrazují hodnoty polohy. Důležitá je třetí hodnota, která reprezentuje posunutí aktuatoru v ose Z.

Na držáku koncového efektoru je také na displeji zobrazená hodnota koncového bodu robota.

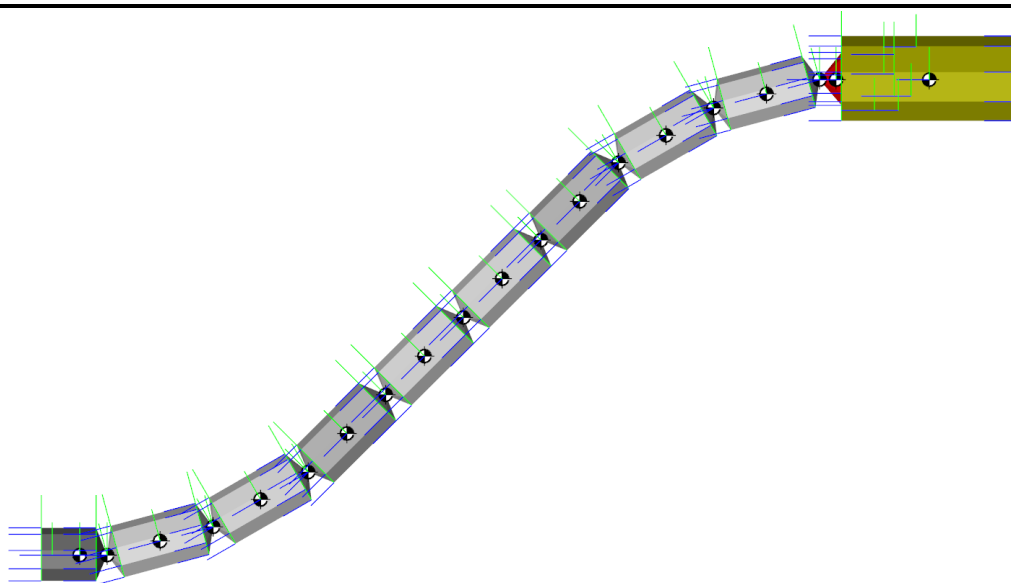
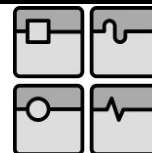
Stejně jako V-REP PRO Simulink umožňuje nahrazení těles STL tělesy. V simulačním modelu pohyb robota dostatečně názorný bez importu náhrady součástí. Simulační model tedy vychází z modelu kinematického definovaného v prostředí Simulink.



Obr. 10.4 – Schéma kinematického modelu v prostředí Matlab Simulink



Obr. 10.5 – Vizualizace kinematického modelu v prostředí Matlab Simulink



Obr. 10.6 – Vizualizace příkladu simulace pohybu

## 10.5. ADAMS

ADAMS umožňuje import těles více formátů. Využil jsem formátu Parasolid. Stejně jako v Simulinku je důležité uvést ke všem komponentám materiálové charakteristiky.

### 10.5.1. Využívané funkce

- Bodies
- Connectors>Revolute Joint
- Motions>Revolute Joint
- Forces>Spring-Damper
- Marker

### 10.5.2. Kinematický řetězec

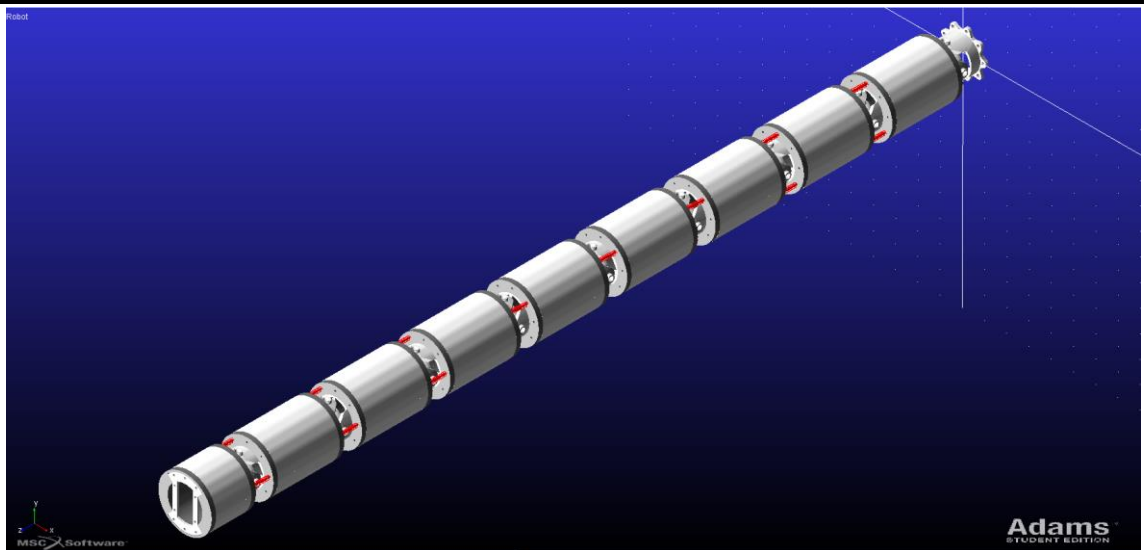
Tělesa se po importu musí transformovat a orientovat v přesně dané pozici. Při sestavování rotačních vazeb musí být označen jako střed otáčení střed daného čepu. Držák chapadla je svázan pevnou vazbou se základnou (GROUND). Pružiny se definují dvěma body ve středech otvorů pro lano. Parametry pružiny se nastavují v jejím nastavení. Ostatní pružiny mají provázané vlastnosti (tuhost, tlumení, předpětí a volná délka), a proto při změně pružiny stačí změnit vlastnosti první pružiny.

### 10.5.3. Simulace

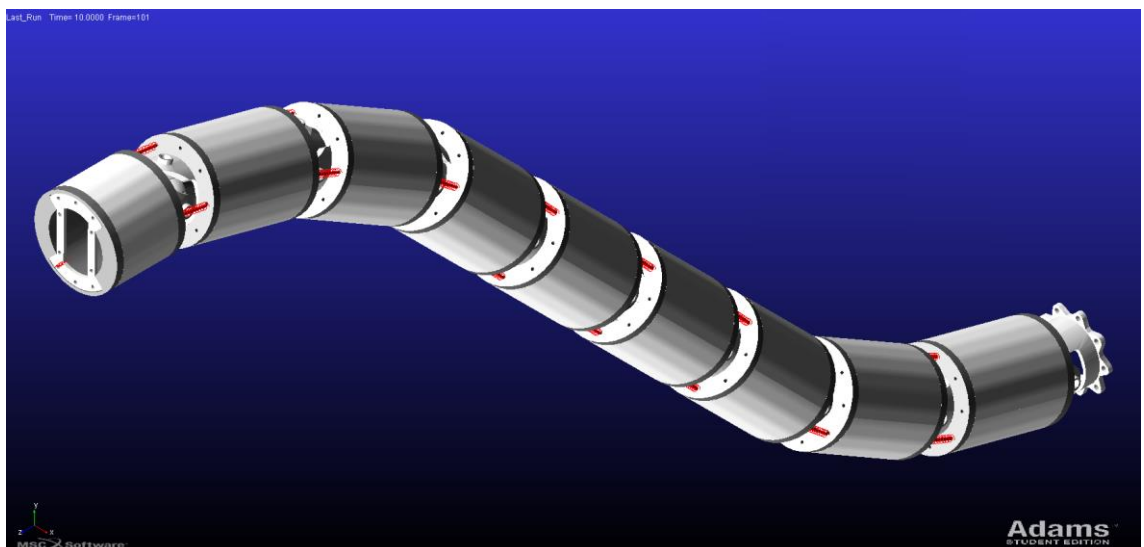
ADAMS pro pohyb využívá dvě funkce Motions, prismatickou a rotační. Pro určení natočení kloubů se užívá rotačních vazeb. Natočení se může definovat buď změnou úhlu, rychlost nebo zrychlení. Hodnoty natočení se udávají ve stupních a mohou se skládat s funkcí. Pro animaci lze využít funkce velikosti úhlu závislé na čase.

$$\varphi_U = \varphi \cdot \frac{time}{10} \quad \text{Funkce natočení kloubu} \quad (10.1)$$

Při délce simulace 10 s bude velikost natočení konkrétnímu úhlu.



Obr. 10.7 – Základní poloha robota v prostředí ADAMS

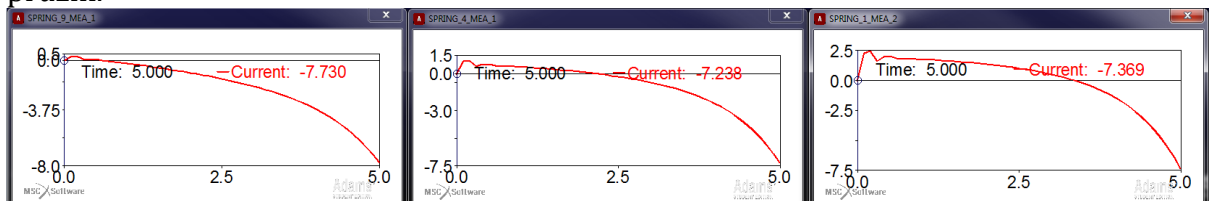


Obr. 10.8 – Příklad simulace ADAMS

#### 10.5.4. Odchylka pružin

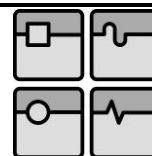
ADAMS umožňuje i silové zatížení soustavy. Využil jsem to pro určení odchylky pružin. Provedl jsem silové zatížení působící na třetí článek.

Při působení síly a následném natočení trojčláneku o  $30^\circ$  (každý kloub o  $10^\circ$ ). Deformace pružiny by měla být 7,8 mm. Výstupem jsou 3 grafy porovnání deformace pružin.



Obr. 10.9 – Odchylka pružin

Z uvedené odchylky 0,4 mm je přesnost natočení  $0,5^\circ$ .

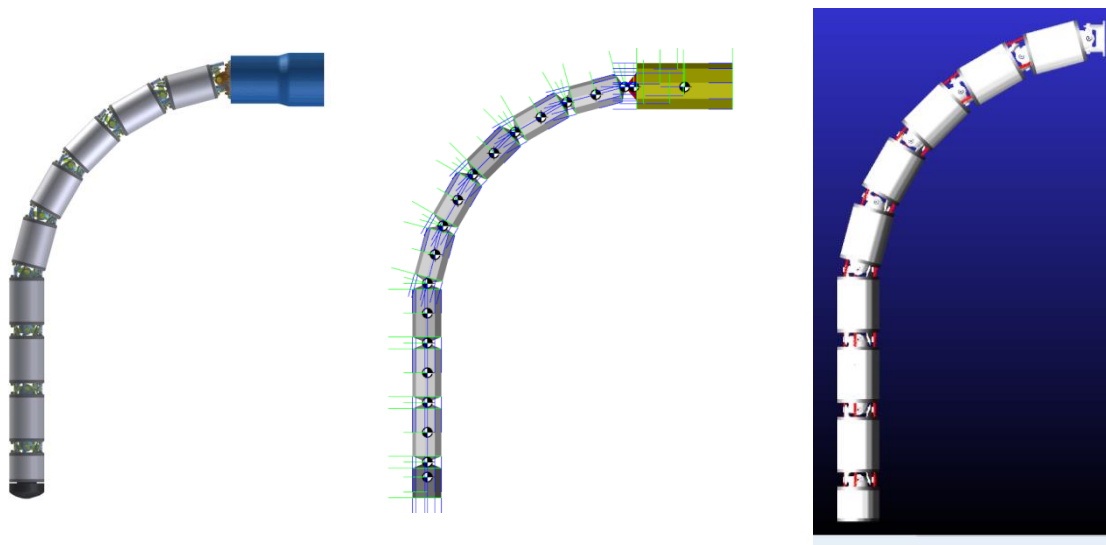


## 11. Porovnání simulačních programů

### 11.1. Příklad 1

Natočení kloubů			
Číslo trojčlenku	1	2	3
Rotace kolem x	15°	15°	0°
Rotace kolem y	0°	0°	0°

Tab. 11.1 - Natočení kloubů

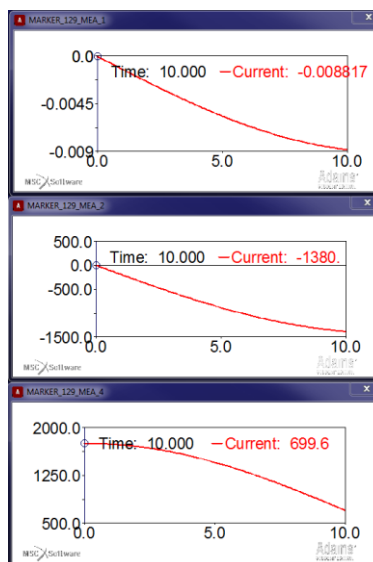
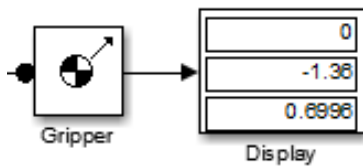


Obr. 11.1 – Vizualizace pohybu (Inventor, SimMechanics, ADAMS)

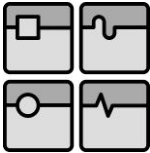
1546,814 mm

Poloha  
 X: 0 mm  
 Y: 0 mm  
 Z: 320 mm

Rozdíl X: 0 mm  
 Rozdíl Y: 1379,575 mm  
 Rozdíl Z: 699,575 mm



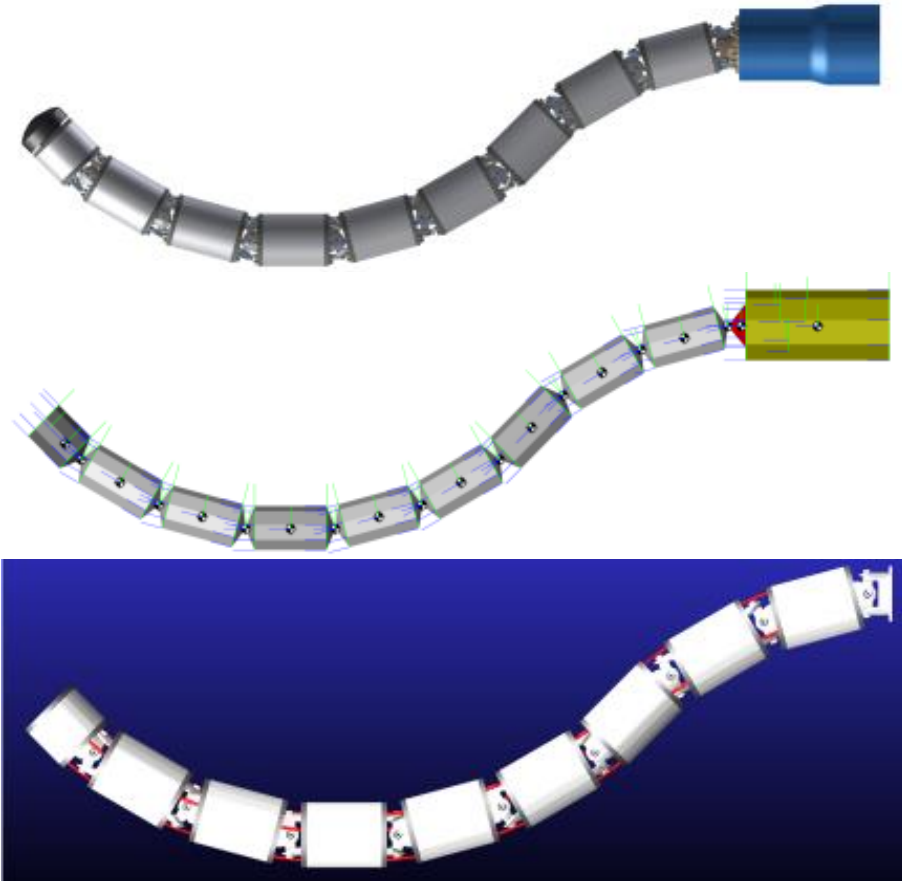
Obr. 11.2 – Poloha koncového efektoru (Inventor, SimMechanics, ADAMS)



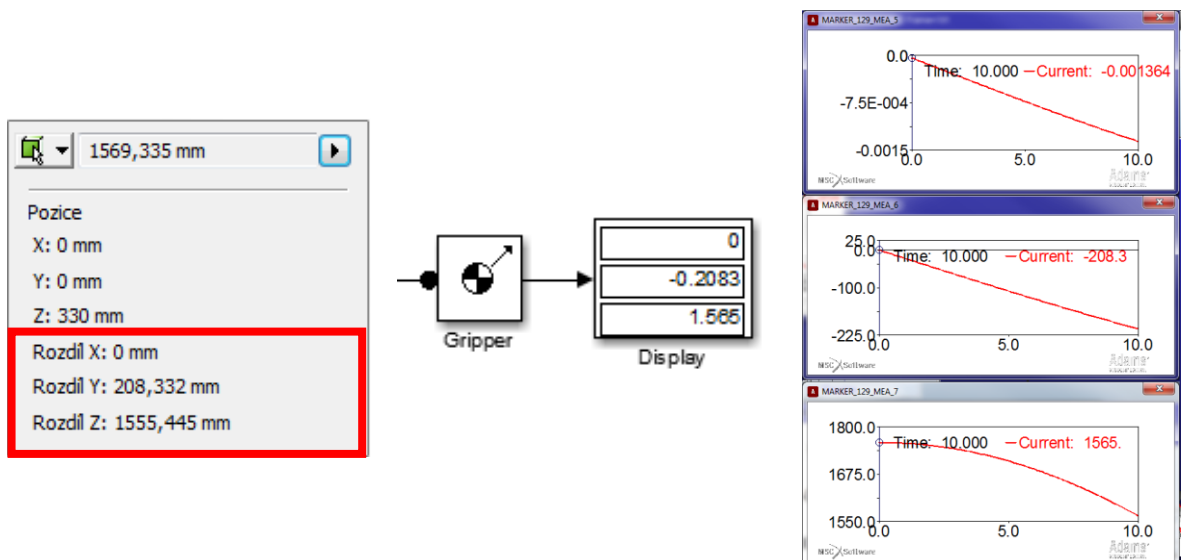
### 11.2. Příklad 2

Natočení kloubů			
Číslo trojčlenku	1	2	3
Rotace kolem x	15°	-15°	-15°
Rotace kolem y	0°	0°	0°

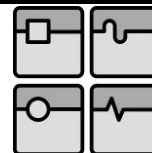
Tab. 11.2 - Natočení kloubů



Obr. 11.3 – Vizualizace pohybu (Inventor, SimMechanics, ADAMS)



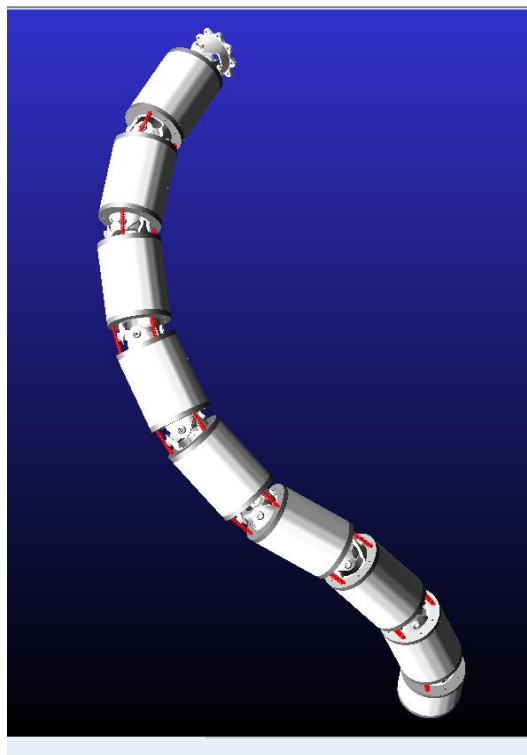
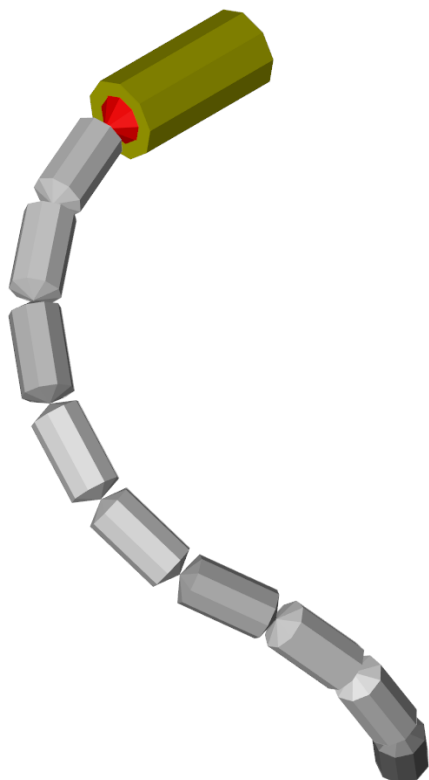
Obr. 11.4 – Poloha koncového efektoru (Inventor, SimMechanics, ADAMS)



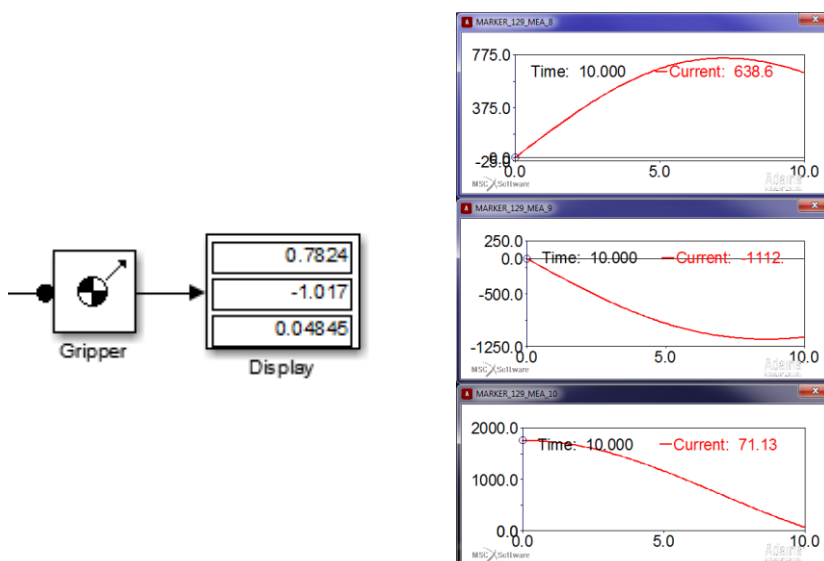
### 11.3. Příklad 3

Natočení kloubů			
Číslo trojčlenku	1	2	3
Rotace kolem x	15°	15°	15°
Rotace kolem y	15°	15°	-15°

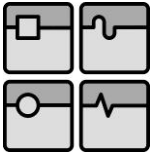
Tab. 11.3 - Natočení kloubů



Obr. 11.5 – Vizualizace pohybu (SimMechanics, ADAMS)



Obr. 11.6 – Poloha koncového efektoru (SimMechanics, ADAMS)

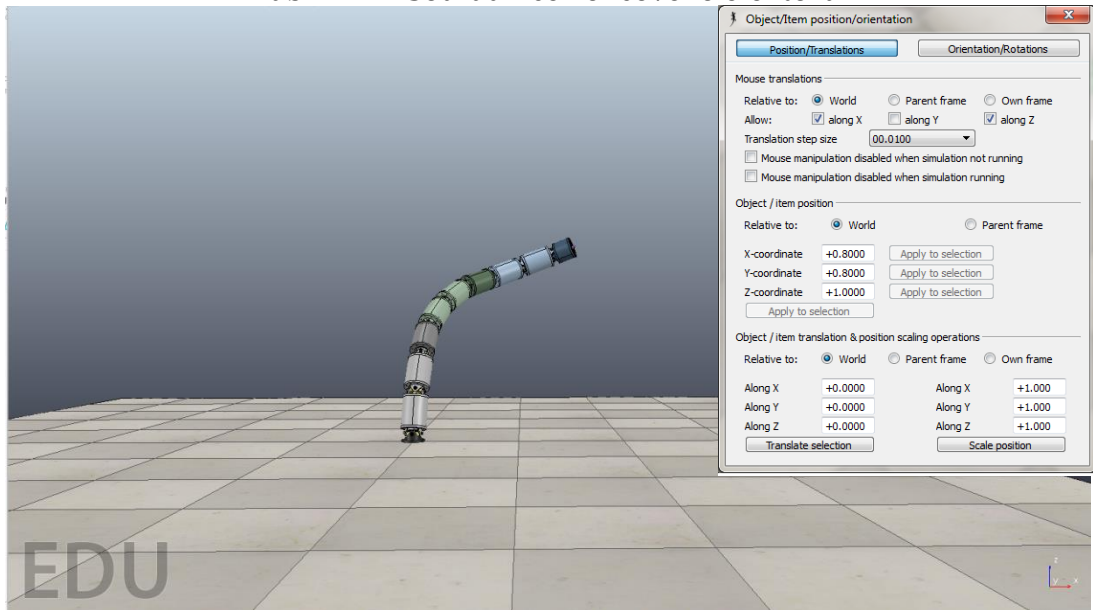


### 11.4. Postup simulace a animace

#### Souřadnice koncového efektoru

x:	800 mm
y:	800 mm
z:	1000 mm

Tab. 11.4 – Souřadnice koncového efektoru



Obr. 11.7 – Simulace pohybu V-REP PRO

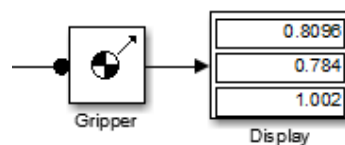
#### Natočení kloubů ze simulace V-REP

Číslo trojčlenku	1	2	3
Rotace kolem x	-15°	-5,15°	+11,64°
Rotace kolem y	+1,94°	-13,08°	-13,93°

Tab. 11.5 - Natočení kloubů ze simulace V-REP

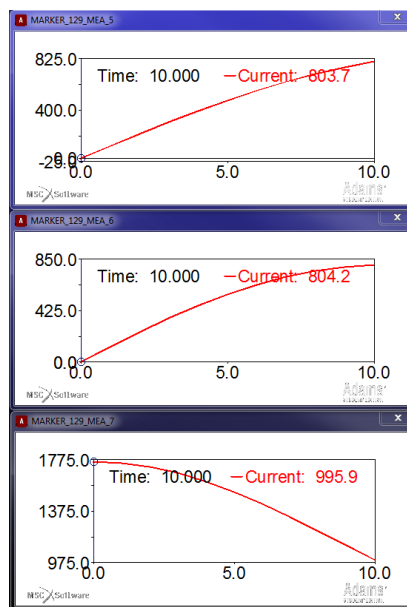
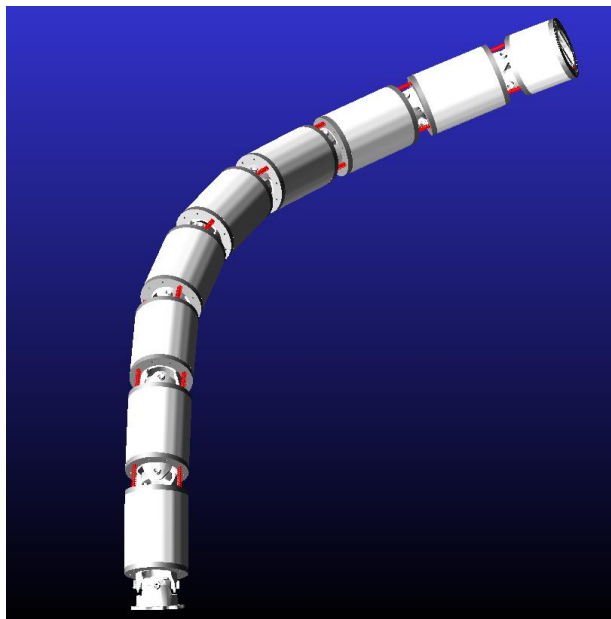
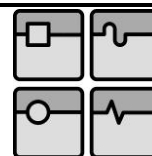


Obr. 11.8 – Vizualizace simulace SimMechanics v rovině (XZ) a (YZ)

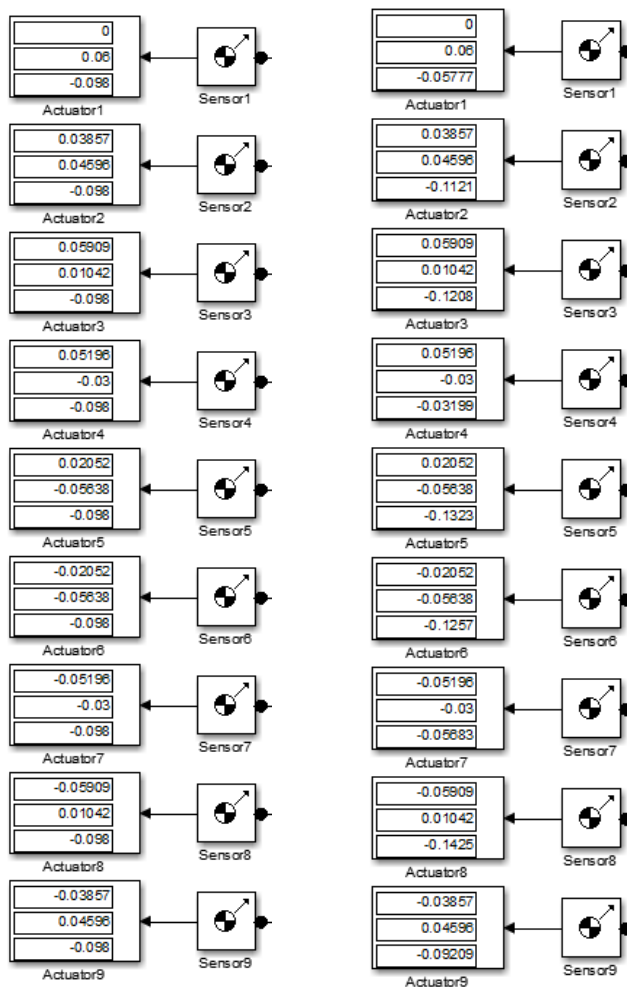


Obr. 11.9 – Souřadnice koncového efektoru (SimMechanics)

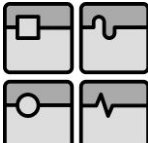
- Uvedená nepřesnost je způsobena zaokrouhlením úhlu natočení.



Obr. 11.10 - Vizualizace simulace ADAMS a souřadnice koncového efektoru



Obr. 11.11 - Polohy aktuátorů (před a po simulaci)

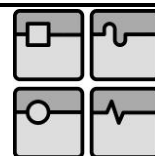
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 67
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## 12. Závěr

V této diplomové práci jsem v rešeršní části vypsals stručnou historii robotů a manipulátorů. Dále jsem uvedl jejich rozdělení a definice. V následující části je rozebrána vnitřní stavba robotů a jejich struktura. Dále jsou uvedeny některé příklady konstrukcí určité skupiny robotů a manipulátorů. V navazující části jsem se zabýval kinematickým problémem robotických struktur. Zde jsou uvedeny kinematické úlohy a metody řešení kinematických řetězců. Z těchto znalostí jsem následně čerpal při návrhu konstrukce a simulace robota. V další části jsem provedl analýzu konfigurace článkových robotů v dnešní době. Uvedl jsem různé typy konstrukce i různé aplikace použití článkových robotů. Krátce jsem dále vyjmenoval software využívaný v simulačních aplikacích mechanismů a robotů.

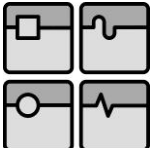
Vlastní návrh je rozdělen na dvě kapitoly, kde se v první kapitole zabývám samotným návrhem kinematické struktury a konstrukcí jednotlivých částí robota. Ve druhé pak simulací pohybů robota a kinematické charakteristiky soustavy. V této části jsem uvedl jednotlivé programy a zhotovení simulace v nich. Na závěr jsem vypracoval několik příkladů a porovnání mezi uvedenými programy pro simulaci. Je naznačen i postup samotné simulace pohybu robota od prvního kroku určujícím inverzní kinematiku soustavy, přes určení pohybu v následujících simulacích.

Při konstrukci robota jsem využíval lehké materiály jako plast a hliník, z důvodu dosažení nízké hmotnosti celé soustavy. Tento robot je konstruován a simulován jako manipulátor uložený na pevném rámu. Pravý potenciál tohoto robota je spojení s pohyblivou platformou. Připevněním robota na přímočarý manipulátor získá robot posuvnou osu Z, díky níž dokáže překonávat překážky a natáčet klouby podle prostředí. V příloze jsou připojeny animace pohybů robota, vytvořené programem ADAMS.

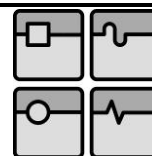


### 13. Seznam použitých zdrojů

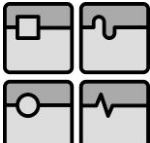
- [1] MAREK, Jiří; KNOFLÍČEK, Radek. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. 1. vyd. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [2] KOLÍBAL, Zdeněk; KNOFLÍČEK Radek. *Morfologická analýza stavby průmyslových robotů*. 1. vyd. Košice: Vienala, 2000, 178 s. ISBN 80-889-2227-5.
- [3] KOLÍBAL, Zdeněk; KNOFLÍČEK, Radek. *Průmyslové roboty I. Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů*. PRaM. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1993, 189 s. MM speciál. ISBN 80-214-0526-0.
- [4] EHRENBERGER, Zdeněk; KNOFLÍČEK, Radek. *Průmyslové roboty*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1993, 145 s. ISBN 80-214-0530-0.
- [5] SKAŘUPA, Jiří; KNOFLÍČEK, Radek. *Průmyslové roboty a manipulátory*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2007, 1 CD-R. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-248-1522-0.
- [6] KNOFLÍČEK, Radek; PLŠEK, Ladislav. *Paralelní kinematické struktury výrobních strojů a průmyslových robotů*. 2006. 43 s.
- [7] PLŠEK, Ladislav. *Stroje s paralelní kinematikou*. Brno, 2004. 27s. Práce ke státní doktorské zkoušce. VUT Brno.
- [8] ŠVEJDA, Martin. *Kinematika robotických architektur*. Plzeň, 2011. Práce ke státní doktorské zkoušce. Katedra kybernetiky FAV ZCU v Plzni.
- [9] PAUL, Richard P. *Robot manipulators: mathematics, programming, and control: the computer control of robot manipulators*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1981, 279 p. ISBN 02-621-6082-7.
- [10] KUCUK, Serdar; BINGUL, Zafer. *Robot Kinematics: Forward and Inverse Kinematics* [online]. [cit. 2015-04-14]. Dostupné z:<http://cdn.intechweb.org/pdfs/379.pdf>
- [11] *Automatizace I*. [online]. [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: [http://www.sps-ko.cz/documents/ARO\\_prorok/Pr%C5%AFmyslov%C3%A9%20roboty.pdf](http://www.sps-ko.cz/documents/ARO_prorok/Pr%C5%AFmyslov%C3%A9%20roboty.pdf)
- [12] *History of Industrial Robots* [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: <http://www.robots.com/education/industrial-history>
- [13] *The Robots of Westinghouse* [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: <http://history-computer.com/Dreamers/Elektro.html>
- [14] *Robot Drive Systems* [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: <http://www.roboticsbible.com/robot-drive-systems.html>
- [15] *VERSATRAN Industrial Robot* [online]. [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://cyberneticzoo.com/early-industrial-robots/1958-62-versatran-industrial-robot-harry-johnson-veljko-milenkovic>
- [16] *Robot kinematics diagram* [online]. [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://alexdu.github.io/sketch-lib>
- [17] *Types of Robots* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.loopotechnology.com/robotic-robot-types.asp>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 69
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

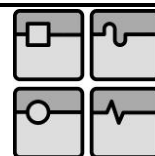
- [18] *Linear Actuators and the Advantages of Cartesian Robot Assemblies* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.pbcllinear.com/Blog/Linear-Actuators-and-the-Advantages-of-Cartesian-Robot-Assemblies>
- [19] *SCARA robot EPSON* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/epson-factory-automation/scara-robots-4-axis-industrial-13733-431846.html>
- [20] *KUKA KR 60-3* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: [http://www.kuka-robotics.com/czech\\_republic/cs/products/industrial\\_robots/medium/kr60\\_3/start.htm](http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/industrial_robots/medium/kr60_3/start.htm)
- [21] *FANUC R-2000iC/165F* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.fanuc.eu/cz/cs/robots/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/r-2000-series/r-2000ic-165f>
- [22] *ABB IRB 360 FlexPicker* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-360>
- [23] *FANUC M-3iA/6S* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.fanuc.eu/cz/cs/robots/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/m3-series/m-3ia-6s>
- [24] *Equator – Univerzální měřicí systém* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/equator-univerzalni-merici-system--13465>
- [25] *SimMechanics Blocks* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sm/blocklist.html>
- [26] *Historie hexapodů* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/historie-hexapodu.html>
- [27] *Stewart Platform 6-axis 3D printing* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <https://www.marginallyclever.com/blog/2013/10/stewart-platform-6-axis-3d-printing-around-the-outside-of-a-bottle/>
- [28] *Denavit–Hartenberg parameters* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: [http://www.wikiwand.com/en/Denavit%E2%80%93Hartenberg\\_parameters](http://www.wikiwand.com/en/Denavit%E2%80%93Hartenberg_parameters)
- [29] *Six DOF Hexapod* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://biotsavart.tripod.com/hexapod.htm>
- [30] *Hexapod 6-Axis Parallel Positioning Systems Stewart Platform 6-DoF Motion Systems* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: [http://www.pi-usa.us/products/Micropositioning\\_Stage\\_Hexapod/hexapod-6-axis-stage.php#Motion-Simu-Hex](http://www.pi-usa.us/products/Micropositioning_Stage_Hexapod/hexapod-6-axis-stage.php#Motion-Simu-Hex)
- [31] *Průmyslové roboty v praxi* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: [http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor\\_stud/VSZ\\_-\\_2351054/VSZ\\_-\\_Aplikace\\_Robotu.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/VSZ_-_2351054/VSZ_-_Aplikace_Robotu.pdf)
- [32] *NASA DEVELOPING "SNAKEBOT" TO EXPLORE AND BUILD IN SPACE* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.nasa.gov/centers/ames/news/releases/2000/00images/snakebot/snakebot.html>
- [33] *The Snakebot: Scarier Than Any Real Snake* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.bitrebels.com/technology/the-snakebot-scarier-than-any-real-snake>



- [34] *Japan to probe melted Fukushima reactor with 'snake' robot* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.pbs.org/newshour/rundown/japan-probe-melted-fukushima-reactor-finished-robot>
- [35] *Continuous Backbone "Continuum" Robot Manipulators* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/726506>
- [36] *Hyper Redundant Manipulators* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/12065.pdf>
- [37] *The Importance of Continuous and Discrete Elements in Continuum Robots* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/43722.pdf>
- [38] *Bionic Handling Assistant – flexible and compliant movement* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: [http://www.festo.com/cms/en\\_corp/9655.htm](http://www.festo.com/cms/en_corp/9655.htm)
- [39] *Pneumatic lightweight structures* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: [http://www.festo.com/cms/en\\_corp/9648\\_10150.htm#id\\_10150](http://www.festo.com/cms/en_corp/9648_10150.htm#id_10150)
- [40] *Bionic Robot Arm* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.iff.fraunhofer.de/en/business-units/robotic-systems/brommi.html>
- [41] *BROMMI:TAK* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: [http://www.biorobotiklabor.de/hardware\\_brommi.html](http://www.biorobotiklabor.de/hardware_brommi.html)
- [42] *Fluidic muscle* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: [http://www.festo.com/cms/en\\_corp/9790.htm](http://www.festo.com/cms/en_corp/9790.htm)
- [43] *OC Robotics: Technology & Innovation* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.ocrobotics.com/technology--innovation>
- [44] *OC Robotics: Applications & Solutions* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.ocrobotics.com/applications--solutions>
- [45] *OC Robotics: Explorer Catalogue* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: [http://www.ocrobotics.com/downloads/explorer\\_catalogue.pdf](http://www.ocrobotics.com/downloads/explorer_catalogue.pdf)
- [46] *OC Robotics: Nuclear Remote Handling* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.ocrobotics.com/downloads/OC%20Robotics%20-%20Nuclear%20Remote%20Handling.pdf>
- [47] *OC Robotics: Software* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.ocrobotics.com/products--services/software/>
- [48] *Coppelia Robotics V-REP* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.coppeliarobotics.com/>
- [49] *Multibody Simulation - SimMechanics Simulink* [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/simmechanics/>
- [50] *Maxon EC-max 30* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: [http://www.maxonmotor.com/medias/sys\\_master/root/8816804986910/15-227-EN.pdf](http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8816804986910/15-227-EN.pdf)
- [51] *Maxon GP32 C Planetary Gearhead* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: [http://www.maxonmotor.com/medias/sys\\_master/root/8816808984606/15-307-308-EN.pdf](http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8816808984606/15-307-308-EN.pdf)

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 71
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- [52] *Encoder MR Type ML - Maxon* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: [http://www.maxonmotor.com/medias/sys\\_master/root/8816813506590/15-355-EN.pdf](http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8816813506590/15-355-EN.pdf)
- [53] *Servo-Drive: Pohybové Trapézové šrouby* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: [http://www.servo-drive.cz/pohybove\\_trapezove\\_srouby.php](http://www.servo-drive.cz/pohybove_trapezove_srouby.php)
- [54] *Tlačné pružiny - Pružinová ocel* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: [http://www.hennlich.cz/uploads/cz\\_Tla%C4%8Dn%C3%A9\\_pru%C5%BEiny\\_-\\_tabulky\\_patent\\_1\\_6-2\\_8.pdf](http://www.hennlich.cz/uploads/cz_Tla%C4%8Dn%C3%A9_pru%C5%BEiny_-_tabulky_patent_1_6-2_8.pdf)
- [55] *Ocelové lanko galvanizované, pr. 3 mm* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://www.inaradi.com/ocelove-lanko-galv-3mm200m-p-2532.html>
- [56] *SuperAutoChargePark* [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://my.teslamotors.com/forum/forums/supercharger-robotic-arm-parking-que-superautochargepark>
- [57] *MSC Software - ADAMS* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.mscsoftware.com/product/adams>
- [58] *Schunk JGP 80 - Finger Parallel Gripper* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: [http://www.schunk.com/schunk\\_files/attachments/JGP\\_80\\_EN.pdf](http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/JGP_80_EN.pdf)



## **14. Seznam příloh**

### **14.1. Seznam příloh na CD**

#### **14.1.1. CAD**

#### **14.1.2. Výkresová dokumentace**

#### **14.1.3. Simulace**

##### **14.1.3.1. V-REP PRO**

- Snake-Arm.ttt

##### **14.1.3.2. Matlab Simulink**

- simulace.slx
- robot.m
- workspace.m
- Vector.m (Funkce)
- VDistance.m (Funkce)

##### **14.1.3.3. ADAMS**

- Robot.bin

##### **14.1.3.4. Animace**

- Animace robota 01.avi
- Animace robota 02.avi

### **14.2. Seznam příloh**

#### **14.2.1. Výkresová dokumentace**

#### **14.2.2. Simulace**

##### **14.2.2.1. V-REP PRO**

- Snake-Arm.ttt

##### **14.2.2.2. Matlab Simulink**

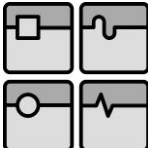
- simulace.slx
- robot.m
- workspace.m
- Vector.m (Funkce)
- VDistance.m (Funkce)

## 15. Seznam výkresů

02-01-00-00	SESTAVA	SNAKE-ARM ROBOT
02-02-00-00	SESTAVA	POHONOVÁ SKŘÍŇ
03-03-00-00	SESTAVA	ČLÁNEK
03-04-00-00	SESTAVA	DRŽÁK EFEKTORU
03-05-00-00	SESTAVA	KŘÍŽOVÝ KLOUB
04-01-00-01	SEZNAM POLOŽEK	SNAKE-ARM ROBOT
04-02-00-01	SEZNAM POLOŽEK	POHONOVÁ SKŘÍŇ
04-03-00-01	SEZNAM POLOŽEK	ČLÁNEK
04-04-00-01	SEZNAM POLOŽEK	DRŽÁK EFEKTORU
04-05-00-01	SEZNAM POLOŽEK	KŘÍŽOVÝ KLOUB

## 16. Seznam obrázků

Obr. 2.1	Televoxx s Robem Wensleyem [13]	str. 16
Obr. 2.2	Robot Unimate 2000 [14]	str. 16
Obr. 2.3	Robot Versatran [15]	str. 17
Obr. 2.4	Subsystémy robota [5]	str. 19
Obr. 3.1	Druhy kinematických dvojic	str. 20
Obr. 3.2	Kinematický řetězec 6osého robota [16]	str. 20
Obr. 3.3	Nejčastěji užívané klouby [25]	str. 21
Obr. 3.4	Pracovní prostory robotů. [17]	str. 22
Obr. 3.5	Kartézský robot [18]	str. 23
Obr. 3.6	SCARA robot výrobce EPSON G20 [19]	str. 23
Obr. 3.7	Robot KUKA KR60-3 [20]	str. 24
Obr. 3.8	Robot Fanuc R-2000 [21]	str. 24
Obr. 3.9	Simulátor letecké kabiny [29]	str. 25
Obr. 3.10	Hexapod PI USA [30]	str. 25
Obr. 3.11	Robot ABB IRB-360[22]	str. 25
Obr. 3.12	Robot FANUC M-3iA/6S [23]	str. 25
Obr. 3.13	RENISHAW Equator [19]	str. 26
Obr. 4.1	Kinematická úloha [10]	str. 29
Obr. 4.2	Reprezentace polohy [8]	str. 27
Obr. 4.3	Denavit-Hartenbergova úmluva [28]	str. 29
Obr. 5.1	NASA Snakebot Gen2 [32]	str. 30
Obr. 5.2	Robot FANUC M-3iA/6S [33]	str. 30
Obr. 5.3	Průzkumný robot v jaderné elektrárně Futušima [34]	str. 30
Obr. 5.4	Pneumatická odlehčená struktura FESTO [39]	str. 31
Obr. 5.5	FESTO Bionic Handling Assistant [38]	str. 31
Obr. 5.6	BROMMI [40]	str. 32
Obr. 5.7	Detail modulu robotu BROMMI [40]	str. 32
Obr. 5.8	BROMMI TAK [41]	str. 33
Obr. 5.9	Fluidní svaly FESTO [42]	str. 33
Obr. 5.10	Robot OC Robotics [44]	str. 33
Obr. 5.11	Portable snake-arm robot a jeho využití [46]	str. 33
Obr. 5.12	Ringhals snake-arm robot [46]	str. 34
Obr. 5.13	Příklady konstrukce řady Explorer [46]	str. 34
Obr. 5.14	Příklady koncových efektorů OC Robotics [46]	str. 34
Obr. 5.15	Roboty řady Explorer s kamerou a osvětlením [44]	str. 35
Obr. 5.16	Řezání pomocí plazmového hořáku [44]	str. 35
Obr. 5.17	Roboty vyhledávající výbušniny na pásovém podvozku [44]	str. 36
Obr. 5.18	Stávající nabíjení elektromobilů TESLA [56]	str. 36
Obr. 5.19	Detail aktuátorů v pohonové skříni [43]	str. 36
Obr. 5.20	Detail chapadla robotu OC Robotics [43]	str. 37
Obr. 5.21	Ukázka uživatelského rozhraní programu OC Robotics [47]	str. 37
Obr. 6.1	Ukázka uživatelského rozhraní V-REP PRO [48]	str. 38
Obr. 6.2	Ukázka uživatelského rozhraní SimMechanics [49]	str. 38
Obr. 6.3	Ukázka uživatelského rozhraní ADAMS [57]	str. 39
Obr. 7.1	Návrh kinematického řetězce	str. 40
Obr. 7.2	Návrh kinematického řetězce celého robota	str. 41
Obr. 7.3	Paralelní manipulátor UKS	str. 41

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 75
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Obr. 7.4	Sériově seřazené paralelní manipulátory UKS	str. 41
Obr. 7.5	Schéma paralelního manipulátoru UKS	str. 42
Obr. 8.1	Natočení článku v prostoru	str. 43
Obr. 8.2	Kvádř s uvedenými úhly	str. 43
Obr. 8.3	Obdélník v rovině XZ	str. 43
Obr. 8.4	Obdélník v rovině YZ	str. 43
Obr. 8.5	Pozice a očíslování děr v článku	str. 46
Obr. 8.6	Pohyb aktuátoru	str. 46
Obr. 9.1	Označení článků robota	str. 47
Obr. 9.2	Pohled na sestavu robota	str. 47
Obr. 9.3	Pracovní prostor robota	str. 47
Obr. 9.4	Článek vcelku a rozložený	str. 48
Obr. 9.5	Držák koncového efektoru	str. 48
Obr. 9.6	Křížový kloub	str. 49
Obr. 9.7	Rozložený křížový kloub	str. 49
Obr. 9.8	Držák chapadla	str. 49
Obr. 9.9	Držák pružin	str. 49
Obr. 9.10	Pohonová skříň	str. 49
Obr. 9.11	Aktuátor	str. 50
Obr. 9.12	Maxon EC-max 30 60W [50]	str. 51
Obr. 9.13	Maxon GP32 [51]	str. 51
Obr. 9.14	Motor s odměřováním Maxon MR ML [52]	str. 51
Obr. 9.15	Hřídel s vyznačenými místy pro ložiska	str. 52
Obr. 9.16	Článek s vyobrazenými držáky lana	str. 53
Obr. 9.17	Pohled na články spojené pružinami	str. 53
Obr. 10.1	Hierarchie komponent a vazeb v programu V-REP PRO	str. 55
Obr. 10.2	Základní poloha robota v prostředí V-REP PRO	str. 55
Obr. 10.3	Příklad simulace V-REP PRO	str. 56
Obr. 10.4	Schéma kinematického modelu v prostředí Matlab Simulink	str. 58
Obr. 10.5	Vizualizace kinematického modelu v prostředí Matlab Simulink	str. 58
Obr. 10.6	Vizualizace příkladu simulace pohybu	str. 59
Obr. 10.7	Základní poloha robota v prostředí ADAMS	str. 60
Obr. 10.8	Příklad simulace ADAMS	str. 60
Obr. 10.9	Odchylka pružin	str. 60
Obr. 11.1	Vizualizace pohybu (Inventor, SimMechanics, ADAMS)	str. 61
Obr. 11.2	Poloha koncového efektoru (Inventor, SimMechanics, ADAMS)	str. 61
Obr. 11.3	Vizualizace pohybu (Inventor, SimMechanics, ADAMS)	str. 62
Obr. 11.4	Poloha koncového efektoru (Inventor, SimMechanics, ADAMS)	str. 62
Obr. 11.5	Vizualizace pohybu (SimMechanics, ADAMS)	str. 63
Obr. 11.6	Poloha koncového efektoru (SimMechanics, ADAMS)	str. 63
Obr. 11.7	Simulace pohybu V-REP PRO	str. 64
Obr. 11.8	Vizualizace simulace SimMechanics v rovině (XZ) a (YZ)	str. 64
Obr. 11.9	Souřadnice koncového efektoru (SimMechanics)	str. 64
Obr. 11.10	Vizualizace simulace ADAMS a souřadnice koncového efektoru	str. 65
Obr. 11.11	Polohy aktuátorů (před a po simulaci)	str. 65

## 17. Seznam tabulek

Tab. 7.1	Požadované parametry	str. 40
Obr. 7.2	Výběr varianty	str. 40
Obr. 8.1	Výpočty nulových bodů	str. 45
Obr. 8.2	Výpočty nulových bodů v základní pozici	str. 45
Obr. 8.3	Souřadnice pozice bodů	str. 46
Obr. 9.1	Sestava aktuátoru	str. 50
Obr. 9.2	Vlastnosti motoru [50]	str. 51
Obr. 9.3	Vlastnosti převodovky [51]	str. 51
Obr. 9.4	Vlastnosti pohybového závitu [53]	str. 52
Obr. 9.5	Délky jednotlivých lan	str. 52
Obr. 9.8	Pružiny [54]	str. 53
Obr. 3.8	Vlastnosti pružin [54]	str. 54
Obr. 10.1	Natočení jednotlivých kloubů	str. 56
Obr. 10.2	Natočení kloubů	str. 56
Obr. 10.3	Parametry kinematického modelu	str. 57
Obr. 11.1	Natočení kloubů	str. 61
Obr. 11.2	Natočení kloubů	str. 62
Obr. 11.3	Natočení kloubů	str. 63
Obr. 11.4	Souřadnice koncového efektoru	str. 64
Obr. 11.5	Natočení kloubů ze simulace V-REP	str. 64

## 18. Seznam použitých symbolů

$\theta$	Kloubové souřadnice	°
$X$	Kartézské souřadnice koncového efektoru	mm
$R_2^1$	Matice se směrovými vektory	—
$R_1^2$	Matice rotace	—
$R_x(\alpha)$	Matice rotace kolem osy x	—
$R_y(\beta)$	Matice rotace kolem osy y	—
$R_z(\gamma)$	Matice rotace kolem osy z	—
$F_i$	Souřadný systém	—
$a_i$	Translace	mm
$d_i$	Translace	mm
$\alpha_i$	Rotace	°
$\theta_i$	Rotace	°
$T_i^{i'}$	Transformační matice	°
$F_M$	Počet stupňů volnosti	—
$\lambda$	Počet možných pohybů	—
$n$	Počet členů v mechanismu	—
$j$	Počet kinematických dvojic	—
$f_i$	Počet stupňů volnosti kinematických dvojic	—
$f_{iD}$	Počet stupňů volnosti kinematických dvojic	—
$s$	Počet stupňů volnosti pasivních vazeb	—
$F_R$	Počet stupňů volnosti robota	—
$\varphi$	Natočení kloubu podle osy x	°
$\psi$	Natočení kloubu podle osy y	°
$a$	Délka strany kváдру (z)	mm
$b$	Délka strany kváдру (x)	mm
$c$	Délka strany kváдру (y)	mm
$\vec{v}$	Směrový vektor natočení kloubu	—
$O_0$	Nulový bod začátku soustavy	—
$R_1$	Matice rotace podle osy x	—
$R_2$	Matice rotace podle osy y	—
$R_P$	Celková matice rotace	—
$n_N$	Nominální otáčky motoru	min <sup>-1</sup>
$P_S$	Stoupání trapézového závitu	mm
$i_P$	Převodový poměr	—
$N_P$	Počet potřebných otáček za 1 s	—
$N_S$	Maximální počet otáček za 1 s	—
$\varphi_U$	Funkce natočení kloubu (ADAMS)	—