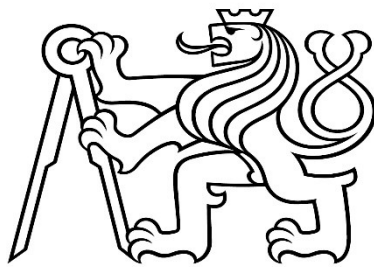


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Naklápečí robotický manipulátor



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Janouch** Jméno: **David** Osobní číslo: **437286**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Přístrojová a řídicí technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Naklápečí robotický manipulátor

Název diplomové práce anglicky:

Tilting robotic manipulator

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vypracujete rešerši možností pohyblivých plošin pro naklápečí robotický manipulátor se sériovou a paralelní kinematikou.
- 2) Zhodnoťte výhody a nevýhody vybraných typů konstrukcí naklápečích manipulátorů.
- 3) Proveďte konstrukční návrh vybraného typu manipulátoru.
- 4) Experimentálně ověřte vybrané mechanické parametry navrhované konstrukce.

Seznam doporučené literatury:

Kamarád J., Sládek, Z.: Základy přesné mechaniky I, ČVUT, 1987.
Kamarád J.: Základy přesné mechaniky II, ČVUT, 1988.
Neil Sclater, Nicolas P. Chironis, Mechanism and Mechanical Devices Sourcebook, McGraw Hill, 2007.
Larry T. Ross et al., Robotics: Theory and Industrial Applications, Goodheart-Willcox Company, 2010
Bruno Sicialno, Oussama Khatib, Springer Handbook of Robotics, Prisma Lab, 2008
James Carvill, Mechanical Engineers Data Handbook, Butterworth Heinemann, 2003.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D., odbor přesné mechaniky FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

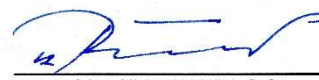
Datum zadání diplomové práce: **26.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **12.06.2019**

Platnost zadání diplomové práce:


doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

26-04-2019

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Dne.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomohli k vytvoření této diplomové práce. Osobně bych chtěl poděkovat firmě JettyRobot za zadání a podporu, dále pak Ing. Pavlovi Studenovskému za konstruktivní rady a připomínky a Lindě Hrdinové za korekturu.

Abstrakt

Teoretická část této diplomové práce se zabývá historií manipulátorů a jednotlivými druhy manipulátorů. Rozdělení jsou podle kinematické struktury na manipulátory sériové a paralelní. Dále jsou zde popsány jednotlivé druhy z obou kategorií. V praktické části byl vybrán jeden z námi navržených nebo už známých manipulátorů, který by byl schopen napodobit rotační pohyb, jelikož to bylo hlavním požadavkem. Výsledkem je funkční laboratorní vzorek manipulátoru.

Klíčová slova: sériový manipulátor, paralelní manipulátor, Šestiosý robot, Delta robot, Omni-wrist III, Canfield Joint

Abstract

The theoretical part of this thesis deals with the history of manipulators and individual types of manipulators. They are divided according to their kinematic structure into serial and parallel manipulators. Furthermore, examples of individual types from both categories are described. In the practical part a manipulator invented by us or otherwise already known was selected, one that would be able to mimic the rotational movement, as it was the main requirement. The result is a functional laboratory sample of the manipulator.

Keywords: serial manipulator, parallel manipulator, Six axis robot, Delta robot, Omni-wrist III, Canfield Joint

Obsah

1. Úvod	8
2. Teoretická část	9
2.1. Historie manipulátorů	9
2.2. Základní pojmy z robotiky.....	14
2.2.1. Stupně volnosti (DoF).....	14
2.2.2. Základna manipulátoru	15
2.2.3. Koncový efekt manipulátoru	15
2.2.4. Klouby manipulátoru.....	15
2.2.5. Kinematický řetězec	16
2.2.6. Aktuátory manipulátoru.....	16
2.2.7. Výchozí poloha manipulátoru	16
2.2.8. Pracovní prostor manipulátoru	16
2.2.9. Přímá a zpětná kinematická úloha	16
2.2.10. Přesnost a opakovatelnost	16
2.3. Sériové manipulátory	17
2.3.1. Šestiosý robot.....	18
2.4. Paralelní manipulátory	19
2.4.1. Delta robot	20
2.4.2. Stewartova platforma	22
2.4.3. Omni-wrist III.....	23
2.4.4. Canfield joint	25
2.5. Srovnání manipulátorů	26
3. Praktická část.....	28
3.1. Motivace a zadané parametry.....	28
3.2. Výběr mechanismu	30
3.2.1. Mechanismus podobný Stewartově plošině	30
3.2.2. Pavlův manipulátor	32
3.2.3. Omni-wrist III (Wide angle gimbal)	33
3.2.4. Canfield joint	36
3.2.5. Vybraný mechanismus	37

3.3.	Canfield joint – teorie	38
3.3.1.	Kinematika	38
3.3.2.	Poměr mezi R a L	44
3.3.3.	Průběhy otáčení motorů	45
3.3.4.	Silové poměry (dynamika)	46
3.3.5.	Ohyb hadice vedené středem	49
3.4.	Canfield joint – konstrukční část	53
3.4.1.	Prvotní návrh konstrukce (malý vzorek, bez pohonů)	53
3.4.2.	Návrh konstrukce pro laboratorní vzorek	54
3.4.3.	Výběr komponent	64
3.4.4.	Kalibrace	66
3.5.	Canfield joint – elektronika a software	67
3.5.1.	Zadání pro elektroniku a software	67
3.5.2.	Rámcové řešení	67
3.6.	Srovnání výsledného laboratorního vzorku s modelem	68
3.7.	Možné úpravy a vylepšení následného prototypu	68
3.7.1.	Kalibrace	68
3.7.2.	Mechanické vŕle	68
3.7.3.	Motory a převodovka	68
3.7.4.	Software pro jednodušší ovládání	69
4.	Závěr	70
5.	Seznam obrázků	71
6.	Seznam tabulek	73
7.	Seznam grafů	74
8.	Seznam příloh	75
9.	Seznam použité literatury	76

1. Úvod

Tato práce se zabývá manipulátory. Manipulátory patří do robotiky. První manipulátory měly pomoci lidem v situacích, kdy byl člověk na práci slabý nebo byla potřeba větší přesnosti. Manipulátor je v podstatě i jednoduchý kladkový či pákový mechanismus.

Díky automatizaci a sériové výrobě v minulém století jsou manipulátory v dnešní době neustále populárnější a je jen málo velkých fabrik či výrobních linek, kde bychom takového stroje nenašli. V průmyslové výrobě je už téměř nemyslitelné fungovat bez těchto strojů. Myslím si, že v budoucnosti budeme jen těžko hledat továrnu, kde by nebyl jediný manipulátor, který by nahrazoval člověka. Na jednu stranu je tomu dobře, jelikož robotický manipulátor může pracovat téměř v jakémkoli prostředí a téměř za jakýchkoli podmínek. Zvládne vyvinout daleko větší sílu než člověk, pracuje mnohdy rychleji a přesněji. Můžu říct, že v podstatě pracuje i bez chyb. Na druhou stranu množství lidí mluví o ztrátě zaměstnání. Musím však podotknout, že naopak vzniká velké množství dalších pracovních míst, jako jsou servisní technici, údržbáři a například programátoři těchto strojů.

V teoretické části diplomové práce Vám představím dvě skupiny manipulátorů, které rozdělím dle kinematické struktury na sériové a paralelní manipulátory. Uvedu a popíši hlavní zástupce jednotlivých kategorií a u paralelních manipulátorů zmíním dva mechanismy, které nejsou velmi známé.

Mým úkolem bylo najít nebo vymyslet manipulátor, který by dokázal napodobit rotační pohyb. Tímto se zabývám v praktické části. Motivací je nahradit těžké převody a ozubená kola takovým manipulátorem, který by mi přinesl přidanou hodnotu i při jiných aplikacích kromě rotačního pohybu. Hlavním důvodem je, že firma ve které pracuji, vyrábí roboty, kteří dokážou provádět inspekci, čištění a další dodatečné práce v potrubí. Tento manipulátor by byl dobrým příslušenstvím k tomuto produktu. Dokázal by čistit potrubí díky rotačnímu pohybu a k tomu by mohl provádět například HD inspekci pomocí speciální kamery, kontrolovat svary pomocí ultrazvukových senzorů anebo provádět v podstatě jakoukoli práci v potrubí, která by zrovna byla potřeba.

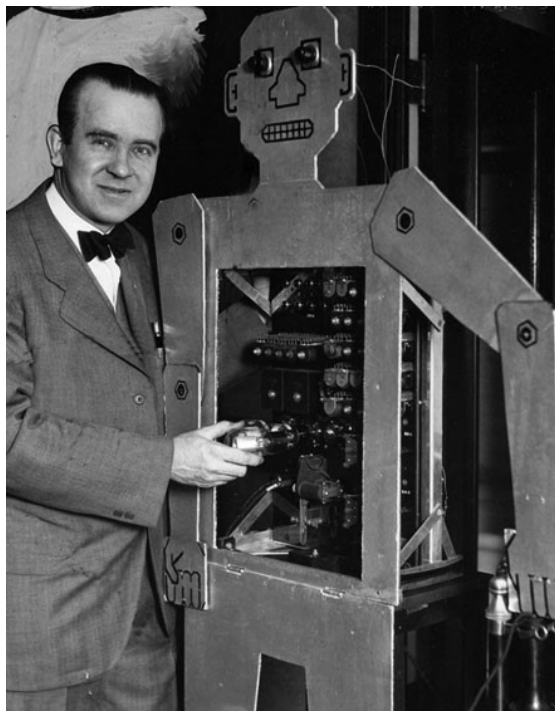
Z mnoha nápadů a už vymyšlených manipulátorů jsem si vybral jeden, který by nejlépe vystihoval určené požadavky. Vybraným manipulátorem jsem se zabíral blíže. Cílem bylo vytvořit laboratorní vzorek vybraného manipulátoru a odzkoušet jeho funkce.

2. Teoretická část

V teoretické části se budu zabývat obecně historií manipulátorů. Poté vyjmenuji základní parametry robotiky, které se úzce pojí s manipulátory. Dále se v teoretické části budu věnovat dvěma hlavním skupinám manipulátorů, které nazýváme sériové a paralelní. Jsou i další skupiny, například hybridní mechanismy, které obsahují jak paralelní část, tak i část sériovou. Je hodně možností, podle čeho se dají manipulátory dělit. Já je zde budu dělit podle kinematické struktury. Jednak z důvodu, že je toto dělení nejčastější, a také kvůli praktické části, kde bych chtěl využít manipulátoru s paralelní kinematickou strukturou. U každé skupiny vyjmenuji nejpoužívanější manipulátory v automatizaci a u paralelních se budu věnovat i těm, které nejsou známé z praxe, jelikož některý z nich by se mi mohl hodit v praktické části práce, kde bude hlavní náplní přizpůsobit a zkonstruovat vybraný manipulátor.

2.1. Historie manipulátorů

Manipulátory šly ruku v ruce s roboty. V podstatě manipulátory jsou podkapitolou samotné robotiky. Začnu historií robotiky jako takové. Se slovem robot, které se stalo později celosvětově uznávaným slovem, přišel Josef Čapek, který ho poradil svému bratrově Karlu Čapkovi a ten toto slovo použil ve své divadelní hře R.U.R., která byla prezentována v roce 1920. Tato divadelní hra nastolila i filosofické otázky ohledně robotiky. Ve 20. a 30. letech minulého století se na technických výstavách začaly objevovat první náznaky robotů. V roce 1927 vystavil na jedné výstavě Američan Roy James Wensley v podstatě prvního robota jménem Televox, který se dnešním průmyslovým robotům nepodobal. Dokázal dělat snadné pohyby a jeho vzhled se podobal člověku (obrázek 1).



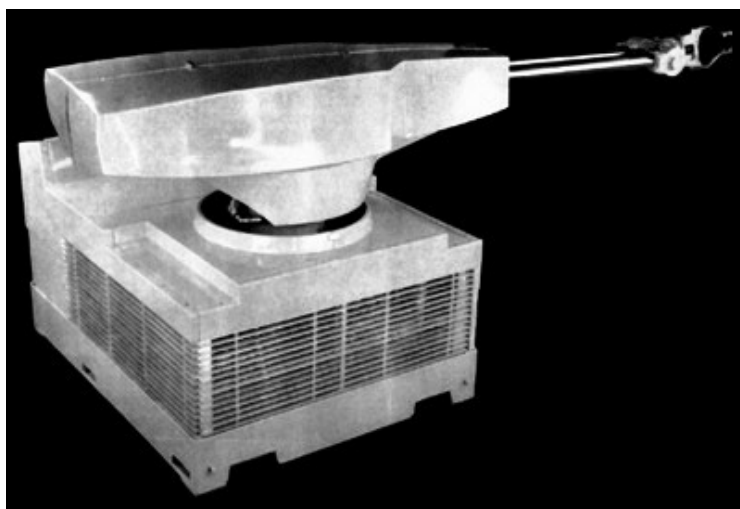
Obrázek 1: Ron James Wensley se svým robotem Televox [21]

Téměř všechny vystavované exempláře robotů měly lidskou podobu, tedy od dnešních průmyslových robotů nebo průmyslových manipulátorů se velmi lišily. Další pokračovatel, který se podobně jako Karel Čapek zabíral hlavně filosofickou stránkou věci, byl Američan ruského původu Isaac Asimov. Ten v roce 1942 vydal sbírku povídek, která se jmenovala Já robot a v této sbírce se nachází povídka Hra na honěnou (Runaround), kde zavádí tři robotické zákony, které jsou známy po celém světě a ty zní:

- 1) Robot nesmí ublížit člověku nebo svou nečinností dopustit, aby bylo člověku ublíženo.
- 2) Robot musí uposlechnout příkazů člověka, kromě případů, kdy jsou tyto příkazy v rozporu s prvním zákonem.
- 3) Robot musí chránit sám sebe před poškozením, kromě případů, kdy je tato ochrana v rozporu s prvním nebo druhým zákonem. [4]

Vše je úzce spojeno s průmyslovou výrobou a hlavně automatizací. V roce 1910 začala první pásová výroba na světě, kterou zavedl Henry Ford. Druhá světová válka přispěla k mnoha vynálezům při sériové výrobě, jelikož válčící mocnosti potřebovaly v co nejkratším čase vyrábět co největší možný počet zbraní, munice atd. Velký krok pro automatizaci znamenal vznik prvního počítače na světě, který vyvinuli v Americe v roce 1945, a zavedením pojmu „zpětné vazby“ v roce 1948 v knize Norberta Wienera, která se jmenuje Kybernetika aneb Řízení a sdělování u organismů a strojů (Cybernetics: or, Control and Communication in the Animal and the Machine). [4]

První roboti, kteří se podobali těm dnešním, byli vytvářeni a vyvíjeni hlavně na univerzitách po druhé světové válce. V této době převažovala poptávka nad nabídkou na celosvětovém trhu, což vedlo k růstu automatizace ve firmách a k zrychlení výroby. Georg Devol a Joseph Engelberger vyvinuli prvního průmyslového robota, kterého nasadili do své fabriky v roce 1961. Založili firmu Unimation a první robot nesl název Unimate 1900 (obrázek 2).



Obrázek 2: První průmyslový robot Unimate 1900 [22]

Jednalo se o první sériový manipulátor. Tento robot uvolňoval žhavé, velmi těžké odlitky z forem a nahradil lidskou práci. Byl velmi úspěšný a rozšířil se do celého světa.

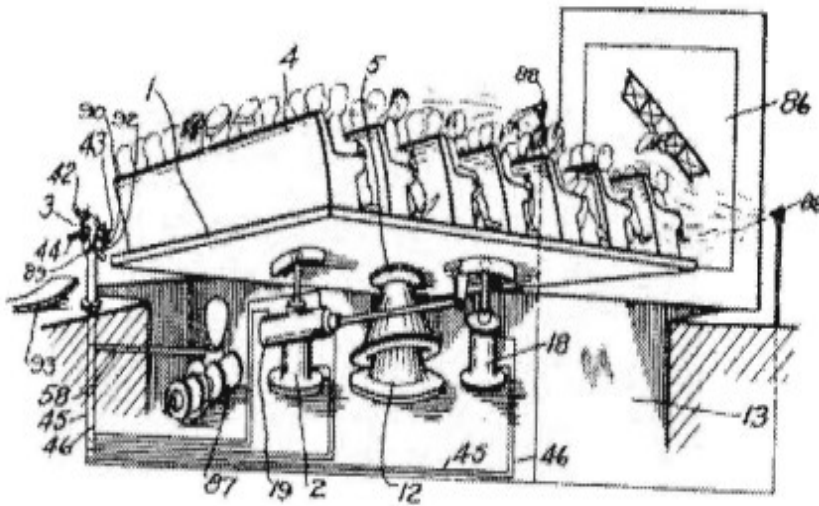
Další průmysloví roboti se začali objevovat po celém světě. Za zmínku stojí rok 1974 a představení robota IRB-6, který se velmi podobal dnešním šestiosým robotům (obrázek 3).



Obrázek 3: Sériový manipulátor IRB-6 [22]

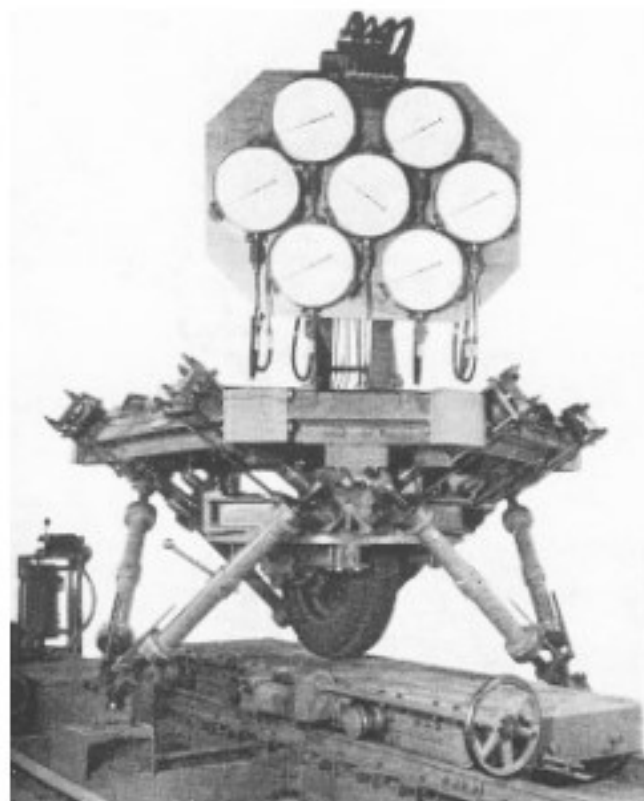
Hlavní odvětví, které se automatizovalo bylo odvětví automobilové, jelikož poptávka po automobilech i nadále rostla. Tento trend přetrvává i do dnešní doby. V České republice začala automatizace v oblasti svařování. [4]

Historie paralelních manipulátorů začíná detailními nákresoy paralelního manipulátoru, které vznikly už před druhou světovou válkou (obrázek 4). Tento manipulátor byl určen pro zábavní průmysl a nechal si ho patentovat James Gwinnett. [8]



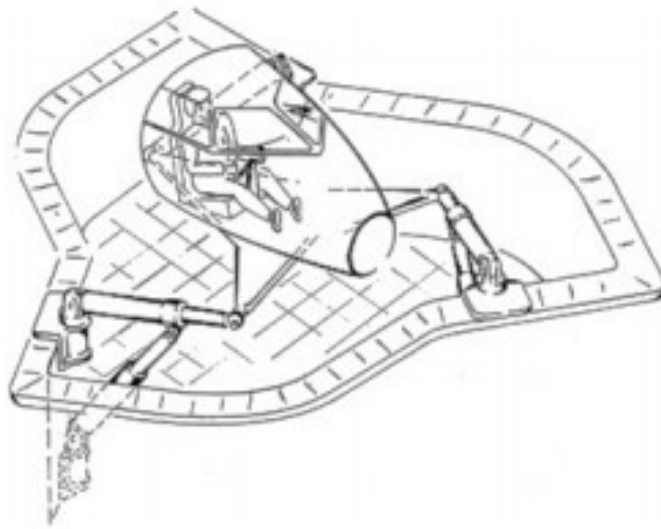
Obrázek 4: První paralelní mechanismus patentovaný Jamesem Gwinnettem [8]

V roce 1954 Eric Gough představil paralelní platformu, která sloužila k testování pneumatik letadlových podvozků pro firmu Dunlop Rubber Company (obrázek 5).



Obrázek 5: Goughova platforma pro testování pneumatik [8]

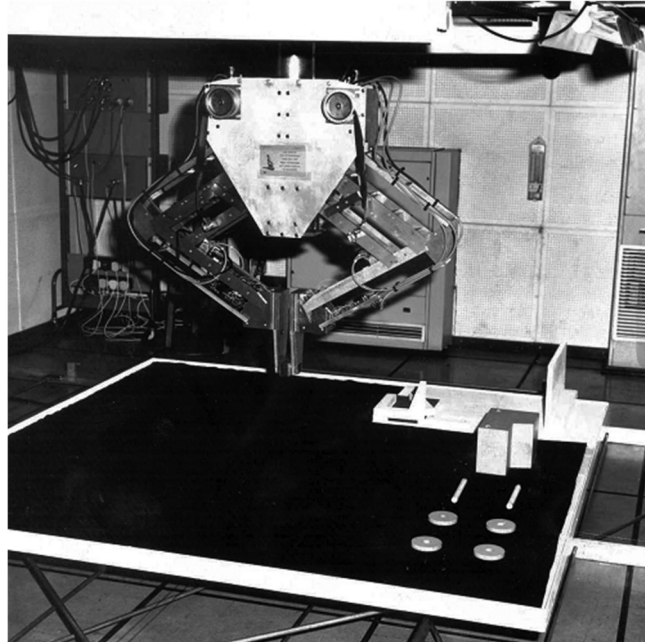
V roce 1965 D. Stewart na jedné konferenci prezentoval vynález své paralelní platformy pro letecký simulátor (obrázek 6).



Obrázek 6: Stewartova plošina pro letecký simulátor [8]

Z dobových fotografií je vidět, že dnes neznámější paralelní manipulátor Stewartova platforma by spíš měl nést název Goughova platforma, jelikož Stewartův manipulátor se Stewartově plošině (Goughovu manipulátoru) příliš nepodobá. Někdy se tedy uvádí název Gough-Stewartova plošina. [8]

V dnešní době se používá v automatizaci především Delta robot. Jeho předchůdce se objevil na univerzitě v Edinburghu a nesl název Freddy. Hlavní úlohou tohoto robota bylo skládání dřevěného autíčka (Obrázek 7). [22]



Obrázek 7: Paralelní předchůdce Delta robota Freddy [22]

Snažil jsem se zde vypíchnout to nejdůležitější, co se odehrálo v historii. Nakonec poznamenám, že nejvíce robotů se vyvíjelo na univerzitách po celém světě, často to bylo za přispění peněz nějaké větší firmy. Takto je to i v dnešní době.

2.2. Základní pojmy z robotiky

Zde uvedu a popíši základní pojmy, které se užívají v robotice, a které budu používat a zmiňovat i v mé práci.

2.2.1. Stupně volnosti (DoF)

Stupně volnosti jsou základem v mechanice ať se jedná o cokoli. Od statiky až po dynamiku. Nejprve zde uvedu rovnici pro dvojrozměrný svět.

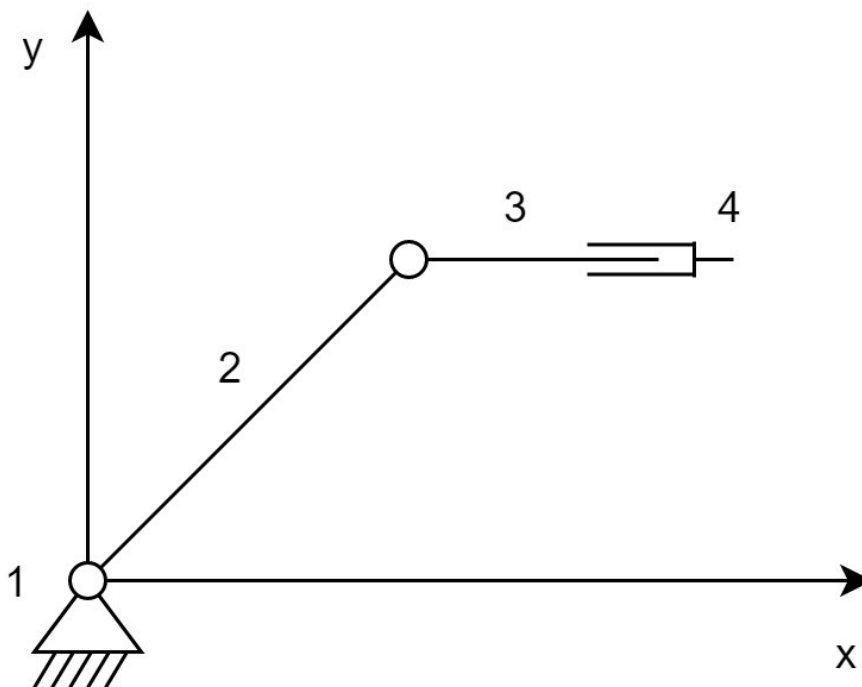
$$i = 3 * (n - 1) - 2 * (r + p + v) - o \quad (2.1)$$

Kde i je počet stupňů volnosti, n je počet členů, r je počet rotačních vazeb, p je počet posuvných vazeb, v je počet valivých vazeb a o je počet obecných vazeb.

Další rovnice je rovnicí pro třírozměrný svět:

$$i = 6 * (n - 1) - \sum_{j=1}^k j * P_j \quad (2.2)$$

V tomto případě pro třírozměrný svět je počet možných pohybů větší dvakrát. Poté n je opět počet členů, v sumě máme všechny vazby P_j a k nim j , které určuje kolik daná vazba odebírá stupňů volnosti. Jako příklad zde uvedu dvojrozměrný systém, který je na obrázku 8. [8]



Obrázek 8: Obrázek příkladu, jak počítat stupně volnosti

Zde je vidět, že máme tři tělesa a rám, který je pevný. Tedy naše n je 3. Vidíme i dvě vazby rotační mezi rámem a tělesem 2 a mezi tělesem 2 a tělesem 3. Také je tu jedna vazba posuvná, a to mezi tělesem 3 a tělesem 4. Rovnice vypadá takto:

$$i = 3 * (4 - 1) - 2 * (2 + 1 + 0) - 0 \quad (2.3)$$

$$i = 6 \quad (2.4)$$

Naše kinematická soustava má tedy šest stupňů volnosti.

2.2.2. Základna manipulátoru

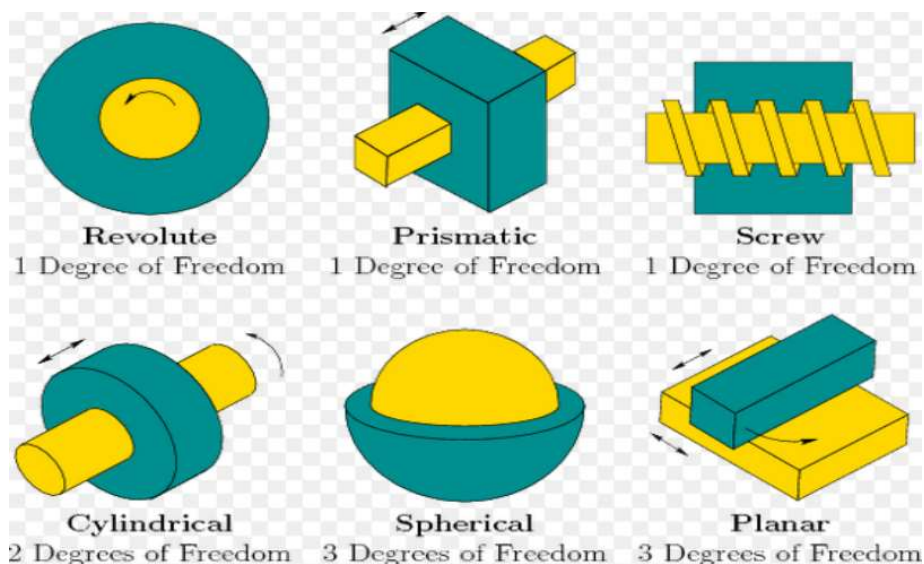
Je část manipulátoru, která je nepohyblivá a statická. Základna je počátek celého mechanismu a v základně bývá obsažen hlavní základní souřadný systém, který platí pro celý mechanismus. [8]

2.2.3. Koncový efekt manipulátoru

Jedná se o poslední pohyblivou část manipulátoru, která obsahuje pohyby všech dílčích uzlů. [8]

2.2.4. Klouby manipulátoru

Podle kloubu určujeme vazbu a stupně volnosti, jelikož v tom jsou hlavní rozdíly kloubů u manipulátorů. Kloub je jedna z hlavních částí, která spojuje dílčí uzly. Máme několik základních typů kloubů. P-kloub (Prismatic – posuvný kloub), R-kloub (Revolute – rotační kloub), U-kloub (Universal – Kardanův kloub), S-kloub (Spherical – sférický kloub), Screw (šroubový kloub), Cylindrical (cylindrický kloub) a Planar (planární kloub). Všechny je možné vidět na obrázku 9. [8]



Obrázek 9: Typy kloubů [16]

2.2.5. Kinematický řetězec

Základem řetězce je spojení dvou pevných reálných členů, například ramen vazbou. To nazýváme kinematickou dvojicí. Vazby jsou zde klouby, které jsem popisoval výše. Kinematické řetězce jsou popisovány pomocí kloubů. Například PRRP je řetězec, který má čtyři klouby a začíná posuvným kloubem. Většinou se používá podtržení jednoho z kloubů, aby se ukázalo, jaký kloub je aktivní (PRRP). [8]

2.2.6. Aktuátory manipulátoru

Jsou to pohonné jednotky manipulátoru. Obvykle se jedná o elektromotory rotační nebo lineární. Často se také používá stlačený vzduch, tedy pneumatické pohony. Opět mohou být rotační nebo lineární. Máme tedy aktivní klouby, které představují aktuátor. Jejich poloha je popisována vektorem aktivních kloubových souřadnic θ . [8]

2.2.7. Výchozí poloha manipulátoru

Výchozí nebo také domovská poloha manipulátoru je, pokud je θ nastaveno tak, že koncový člen je ve výchozí poloze. Tato poloha se často používá jako kalibrační poloha. [8]

2.2.8. Pracovní prostor manipulátoru

Pracovní prostor je velmi důležitý kvůli samotnému programování. Je to množina všech možných poloh daného manipulátoru. Velmi často se pracovní prostor omezuje koncovými podmínkami. [8]

2.2.9. Přímá a zpětná kinematická úloha

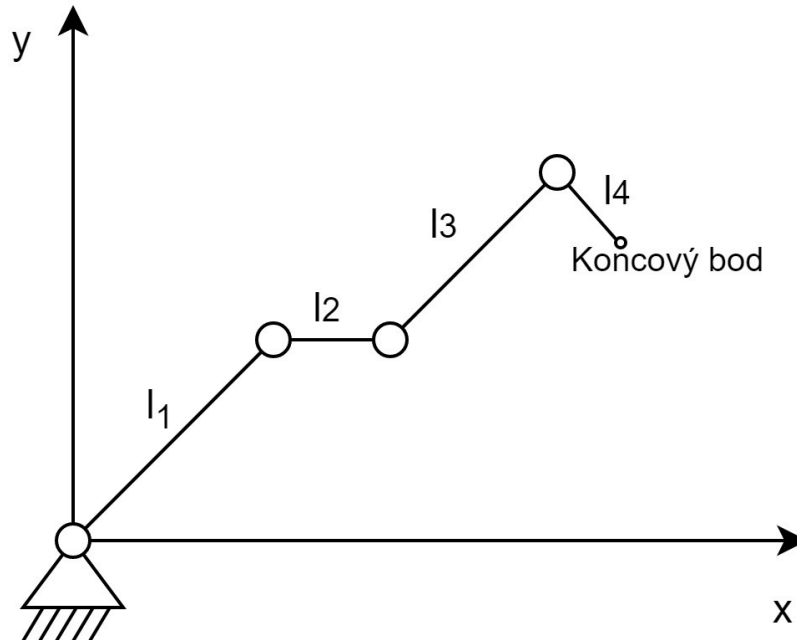
U přímé kinematické úlohy se jedná o nalezení zobecněných souřadnic X pro dané hodnoty kloubových souřadnic θ . Toto je v praxi téměř nemožné, proto se přišlo se zpětnou kinematickou úlohou, kde naopak pro dané zobecněné souřadnice X hledáme kloubové souřadnice θ . Zpětná kinematika je nejpoužívanější transformací v robotice. [8]

2.2.10. Přesnost a opakovatelnost

Toto se týká přesnosti a opakovatelnosti. Jinak řečeno, jde o to, jak se požadovaná poloha bude lišit od polohy ve které manipulátor skutečně bude. Lépe je to vidět u opakovatelnosti, jelikož opakovatelnost vychází z přesnosti a lze ji popsat, jako rozdíl reálné a požadované hodnoty, pokud budeme přejíždět z jedné výchozí polohy do jiné polohy několikrát za sebou a budeme pozorovat rozdíl. [8]

2.3. Sériové manipulátory

Definice sériových manipulátorů vychází z názvu. Tyto manipulátory spojuje jejich kinematická struktura. Všechny členy takových manipulátorů jsou za sebe zapojeny sériově. To znamená, že jednotlivé části na sebe nejsou nijak závislé. Základní mechanické schéma lze vidět na obrázku 10.

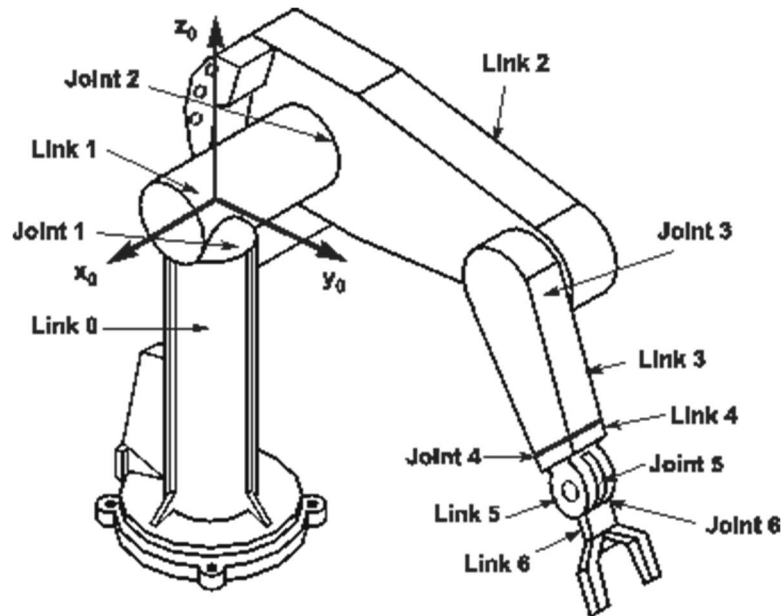


Obrázek 10: Kinematické schéma sériového manipulátoru

V podstatě nejpoužívanějším sériovým manipulátorem je šestiosý robot, na kterém se dá ukázat celá kinematika a mechanika všech sériových mechanismů. Sériové manipulátory jsou v dnešní době v automatizované průmyslové výrobě jedny z nejpoužívanějších strojů. Jedná se o spolehlivé stroje, které velmi dobře nahrazují lidskou práci, firmám se do nich vyplatí investovat. Velkou výhodou sériových manipulátorů je jejich lehká naprogramovatelnost. Ovšem i sériové manipulátory mají své nevýhody. Jednou z nich je, že díly jsou namáhány na ohyb. Z toho vyplývá, že díly jsou navrhovány masivní, jednotlivé členy mají vysokou hmotnost. Největší nevýhodou je, že čím delší budeme mít řetězec, tím více bude nepřesný. Každá část řetězce bude mít svoji nepřesnost a pokud je zapojíme do série, tak se tyto nepřesnosti sčítají. Když se podíváme, jak se tyto problémy řeší, tak vidíme, že jednotlivé řetězce se vyrábějí neustále lehčí a hlavně přesnější. S tím, jak dopředu jde přesnost ve výrobě, tak jsou celkové nepřesnosti stroje v řádech menších než milimetry.

2.3.1. Šestiosý robot

Šestiosý robot je v dnešní automatizaci vůbec nejpoužívanější. Jedná se o ideální uspořádání jednotlivých dílů do celého řetězce tak, aby dokázal dosáhnout téměř kamkoli. Jeho předností je obrovská flexibilita a možnost použít tento manipulátor téměř na cokoli. Na obrázku 11 je vidět kinematický model šestiosého robota.



Obrázek 11: Kinematické schéma šestiosého robota [4]

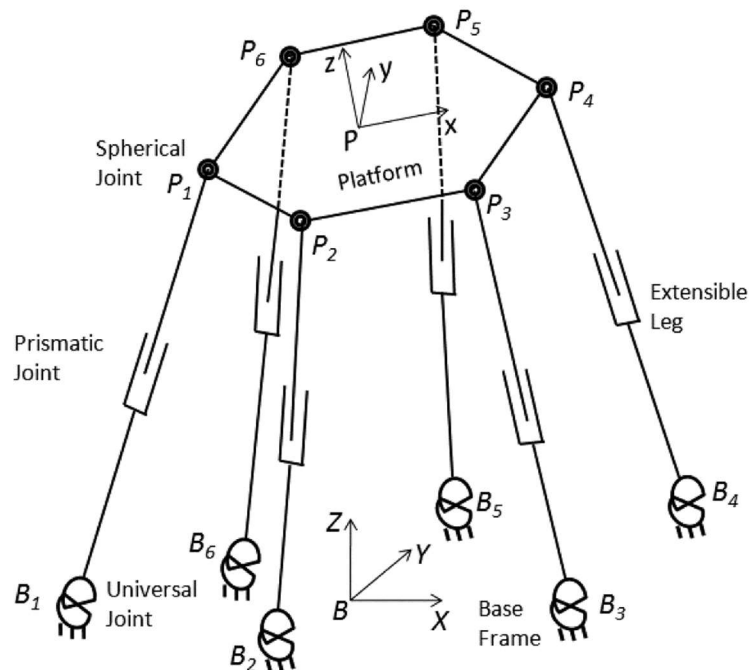
Podle základních pojmů, má tento mechanismus 6 stupňů volnosti. Klouby má tento robot rotační a pokud se podíváme na řetězec tohoto robota, tak se dá popsat jako RRRR. Jako příklad zde uvedu obrázek šestiosého robota firmy Fanuc (obrázek 12).



Obrázek 12: Šestiosý robot firmy Fanuc [18]

2.4. Paralelní manipulátory

Paralelními manipulátory se nazývají manipulátory takové, které mají svoji základnu, ze které vycházejí otevřené kinematické řetězce a se spojením s koncovým bodem vzniká uzavřený kinematický řetězec. Jinými slovy lze říci, že základní plošina s koncovou plošinou je propojena sériovými manipulátory a společně tak tvoří uzavřený kinematický řetězec, tedy paralelní manipulátor. Na obrázku 13 je dobře vidět základní schéma paralelních manipulátorů. Je dobré podotknout, že pohony jsou většinou pevně ukotveny k základně.

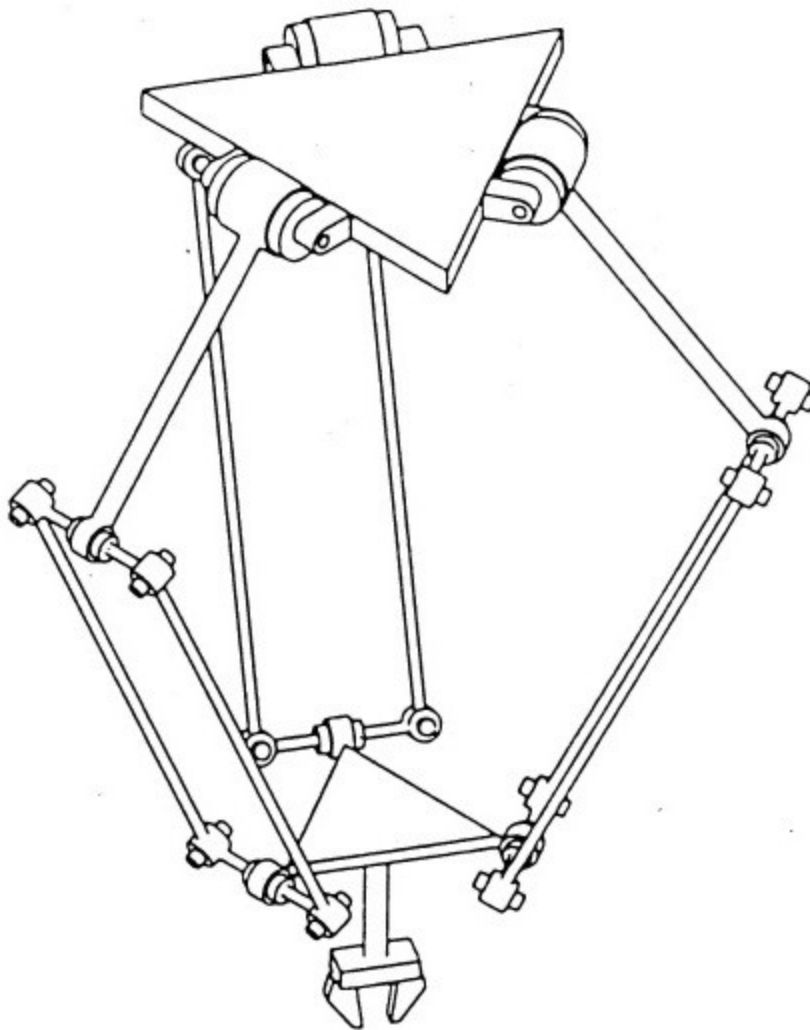


Obrázek 13: Kinematické schéma paralelního manipulátoru [3]

Paralelní manipulátory bývají velmi často opomíjeny z důvodu jejich složitosti. Jde o to, že popis takovýchto manipulátorů po dynamické stránce vede na složité diferenciální rovnice. Většina se jich řeší přes Lagrangeovy rovnice smíšeného druhu. To sebou nese horší programovatelnost a návrh pracovního prostředí. Je důležité podotknout, že téměř všechny paralelní manipulátory se většinou analyticky řeší inverzní kinematikou. Toto jsou nevýhody těchto manipulátorů, ovšem velkou výhodou je, že jsou mnohem přesnější než manipulátory sériové, a to přibližně o jeden řád. Další výhodou je, že části těchto manipulátorů jsou namáhány pouze na tah nebo na tlak. Členy paralelních manipulátorů nemusí být tak masivní jako u sériových manipulátorů. Kvůli své složitosti se s nimi stále setkáváme téměř jen na akademické půdě. Je však pravdou, že Delta robot je jedním z paralelních manipulátorů, který je hojně využíván v automatizaci a trochu vyrovnává velkou propast mezi sériovými a paralelními manipulátory v praxi. [8]

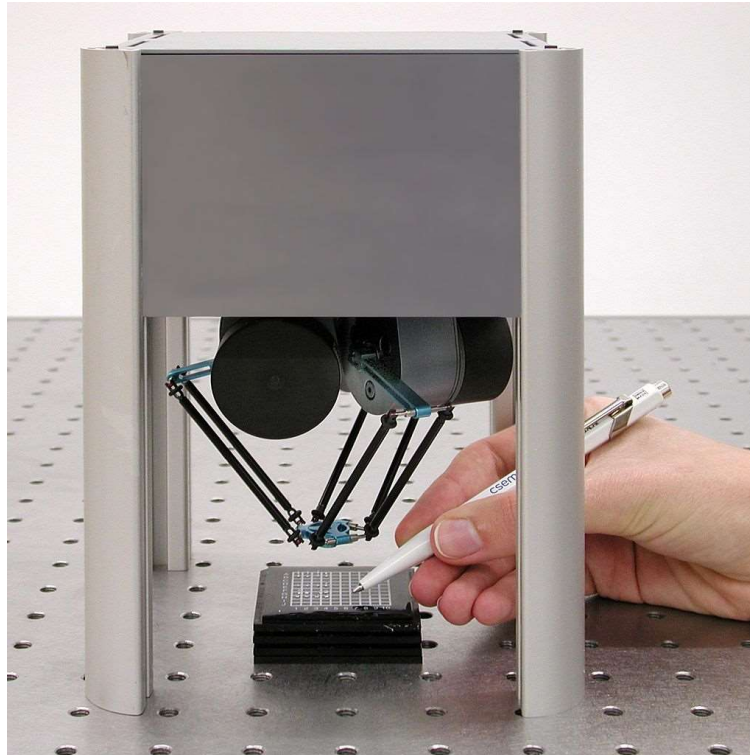
2.4.1. Delta robot

Delta robot je jedním z paralelních manipulátorů, který se dokázal ve velké míře prosadit i do automatizace výroby. Jedná se o paralelní manipulátor, který je otočen o 180 stupňů. Jeho základní plošina je nahoře. Ta je ukotvená k rámu a koncová plošina je zavěšena na třech otevřených řetězcích. Jako u všech manipulátorů i zde jsou různé formy delta robotů, které se přizpůsobují k svému účelu. Firmy, které je vyrábí, je přizpůsobují. Můžeme potkat různé varianty od těch, které mají šest stupňů volnosti až po ty, které mají pouze čtyři stupně volnosti. Kinematika je znázorněna na obrázku 14. [10]



Obrázek 14: Kinematické schéma Delta robota [6]

Hlavní důvod, proč se Delta robot využívá hojně v automatizaci, je díky své rychlosti. Je využíván pro balení a skládání produktů do krabic. Pro představu, rychlost takového robota je až 300 produktů za minutu. Zmíním zde ještě jednu verzi Delta robota, která mě zaujala. Jedná se o Pocketdelta robota. Už název nám říká, že se jedná o malou verzi Delta robota tzv. kapesní verzi. Byl vyvinut švýcarskou společností Asyriil AS a jeho rozměry jsou 120x120x200 mm. Je vidět na obrázku 15.

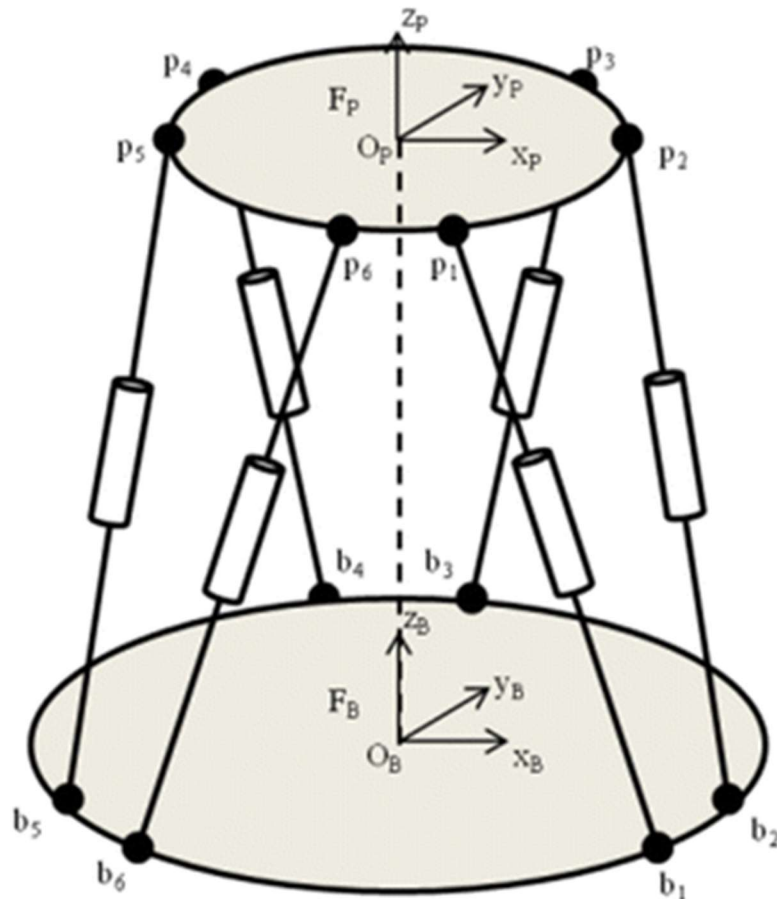


Obrázek 15: Pocketdelta robot společnosti Asyriil AS [16]

Poslední poznámkou u Delta robotů je, že se velmi často používají také v 3D tisku a například také v medicíně.

2.4.2. Stewartova platforma

Spíše by se měla tato platforma jmenovat Goughova, jak jsem zmiňoval v kapitole 2.1. Podívám se na tuto platformu blíže. Tato plošina je poháněna šesti aktuátory, jedná se o manipulátor, který má šest stupňů volnosti. Její podoba je vidět na obrázku 16.



Obrázek 16: Kinematické schéma Stewartovi platformy [11]

Jak už jsem uváděl v kapitole 2.1., první využití této platformy bylo v automobilovém průmyslu v padesátých letech minulého století. Testovali na ní pneumatiky společnosti Dunlop. V dnešní době se tato platforma nejvíce používá jako podvozek pro létající simulátory. (obrázek 18).



Obrázek 18: Létající simulátor využívající Stewartovu platformu [23]

Stewartova platforma byla použita k objevení Tylor Spatial Frame, který se používá v ortopedii k léčbě složitých zlomenin (obrázek 17). V neposlední řadě využívá tuto platformu i NASA.



Obrázek 17: Taylor Spatial Frame [19]

2.4.3. Omni-wrist III

Prvním ze dvou téměř neznámých paralelních manipulátorů, který zde uvedu je Omni-wrist III, který se snaží kopírovat pohyby lidského zápěstí.

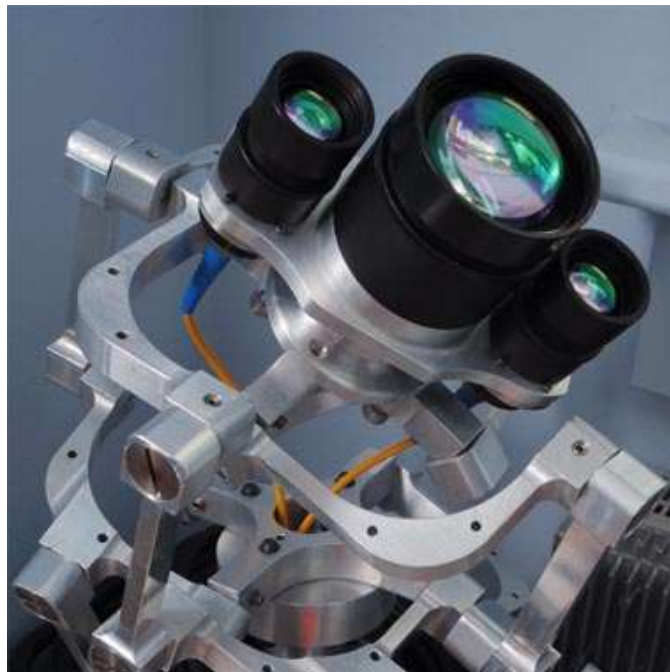
Tento manipulátor vymyslel a zkonstruoval Mark Rosheim. Ten si ho nechal v roce 1986 patentovat americkým patentovým úřadem.



Obrázek 19 a: Omni-wrist III [2]

Obrázek 19 b: detail Omni-wristu III [2]

Jak lze vidět na obrázcích 19, jedná se o paralelní manipulátor, který má dva stupně volnosti. Dle kinematiky dokáže udělat pohyb o 360 stupňů, kdy koncová platforma může být celou dobu natočena o 90 stupňů oproti základní platformě. Jeho konstrukce obsahuje 4 ramě. Vazby, které jsou zde obsaženy, jsou pouze rotační. Tuto platformu do pohybu uvádějí dva lineární aktuátory. Tento Omni-wrist III upravil a přejmenoval na Wide angle gimbal („širokouhlý kardanový kloub“) český student, který studoval v zahraničí, společně s kolegy. Lineární aktuátory vyměnili za klasické rotační motory (obrázek 20). Zamezil také dosáhnutí singulárních bodů (singularity free design). [24]

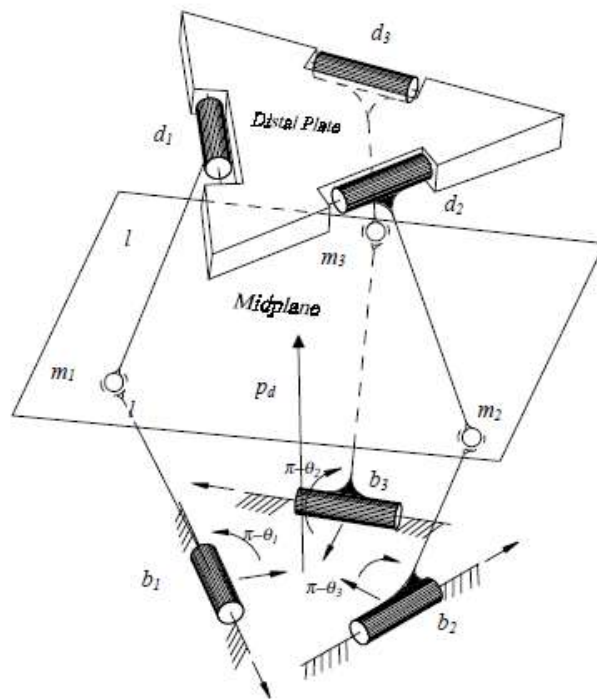


Obrázek 20: Wide angle gimbal

Omni-wrist III měl v podstatě nahradit Stewartovu platformu, jelikož dokáže dosáhnout sklopení větší než Stewartova plošina, která dosahuje sklopení 35 stupňů. Byl by použit v leteckých simulátorech, virtuální realitě a v dalších podobných aplikacích. Skutečné praktické využití tento manipulátor, hlavně díky své rychlosti, našel v jemné optice např. jako stabilizační platforma nebo jako sledovací systém.

2.4.4. Canfield joint

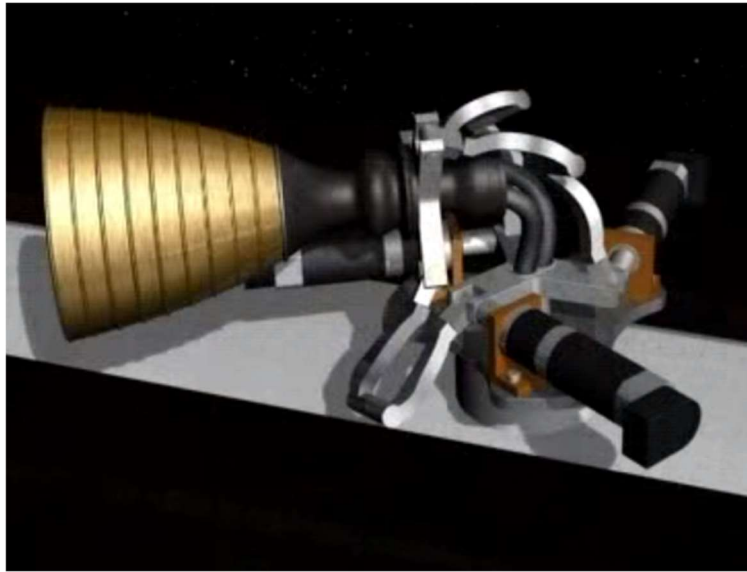
Druhým méně známým paralelním manipulátorem, který zde uvedu je Canfield joint. Tento manipulátor dosahuje podobných možností jako Omni-wrist III. Liší se v počtu stupňů volnosti. Tento manipulátor má navíc třetí stupeň volnosti, který nám poskytuje možnost nastavovat i výšku tohoto manipulátoru. Na kinematickém schéma jsou vidět sférické vazby. Nejedná se přímo o sférický kloub, ale o dva klasické rotační klouby, které nám v podstatě zajišťují podobný pohyb jako kloub sférický. Toto spojení nám omezí místa pohybu, která by nám zapříčinila nefunkčnost tohoto manipulátoru (obrázek 21).



Obrázek 21: Kinematické schéma Canfield jointu [12]

Tento manipulátor vytvořil Stephen Lee Canfield, který ho popsal ve své disertační práci na Technické univerzitě v Tennessee. Tento manipulátor si nechal patentovat. V roce 2016 tento patent vypršel z důvodu nezaplacení poplatků. O vypršení patentu se vědělo a mnoho lidí z celého světa očekávalo využití v mnoha odvětvích, ovšem mnoho reálných využití nenašlo. Předně byl tento manipulátor v podstatě vyvinut pro NASA, která chtěla tento

manipulátor použit ve svých vesmírných modulech k nastavování pohonů (obrázek 22). [24]



Obrázek 22: Použití Canfield jointu u NASA [17]

Nepodařilo se mi dohledat, zda se dnes tento manipulátor v NASA stále používá. Pokusy v minulosti ovšem proběhly úspěšně. Další vývoj byl začleněn do Programu Constellation, jehož cílem bylo vyvinutí nových kosmických dopravních prostředků. Na základě faktu, že se nedá dohledat více informací, jelikož množství stránek s touto problematikou již není funkčních, bych řekl, že se od tohoto nápadu upustilo. Další možností využití bylo v solárních panelech, které by se v podstatě otáčeli za sluncem podobně jako slunečnice. Zvýšila by se účinnost solárních elektráren. Velkou výhodou je to, že střed tohoto manipulátoru je volný, tedy může se jím vést kabeláž, kde nebude docházet k smotávání napájecích kabelů. Další aplikace nebo nápady na aplikace jsem nenalezl.

2.5. Srovnání manipulátorů

V této kapitole bych chtěl shrnout vše podstatné od obou skupin manipulátorů a vnést svůj názor.

Velké plus sériových manipulátorů je v jednoduchosti mechaniky. Lze u nich velmi jednoduše vypočítat přímou cestou kinematiku a dynamiku. Jelikož se používá přímá cesta, a ne cesta inverzní, lze řešení počítat analyticky. Zároveň se dá říci, že toto je největší zápor paralelních manipulátorů. Jejich mechanika je velmi složitá a většinou se používá inverzní kinematika. Celkově jsou paralelní manipulátory obtížnější na řízení a na samotný výpočet kinematiky a dynamiky. S tím se pojí říditelnost a obtížnější naprogramování paralelních manipulátorů. Dalším kladem sériových manipulátorů je jejich velký pracovní prostor. U paralelních manipulátorů je tento prostor menší a je závislý na dané mechanice a konstrukci. Důležité je zmínit, že u paralelních manipulátorů se v pracovním prostoru mohou velmi často

vyskytovat singulární body. V samotné konstrukci mají sériové manipulátory své velké nevýhody. Všechny díly jsou namáhány na ohyb, tedy všechny díly musí být nadimenzované na toto namáhání, z toho vyplývá, že jsou robustní, těžké a mají horší dynamické vlastnosti. Zde je velké plus u paralelních manipulátorů, které jsou namáhány pouze na tah, respektive tlak. Takže celý manipulátor je lehčí a má lepší dynamické vlastnosti. S tím souvisí i umístění pohonů, které jsou u sériových manipulátorů umístěny v každém kloubu. Narozdíl od paralelních, kdy jsou umístěny většinou pouze v základně a pouze v kloubech, které se pojí se základnou. To je další důvod, proč jsou sériové manipulátory daleko více robustní než paralelní. Dalším faktem je, že paralelní manipulátory dokážou pracovat o něco rychleji než sériové manipulátory. Poslední velká výhoda paralelních manipulátorů souvisí s opakovatelností a přesností. U paralelních manipulátorů se chyby jednotlivých členů průměrují. U sériových manipulátorů se chyby sčítají, jelikož jsou jednotlivé členy zapojeny do série. Paralelní manipulátory jsou daleko přesnější a díky tomu mají lepší opakovatelnost. Přesnost sériových manipulátorů je uváděna na desetiny milimetru. U paralelních jsou to řádově setiny milimetru, tedy minimálně o řád lepší.

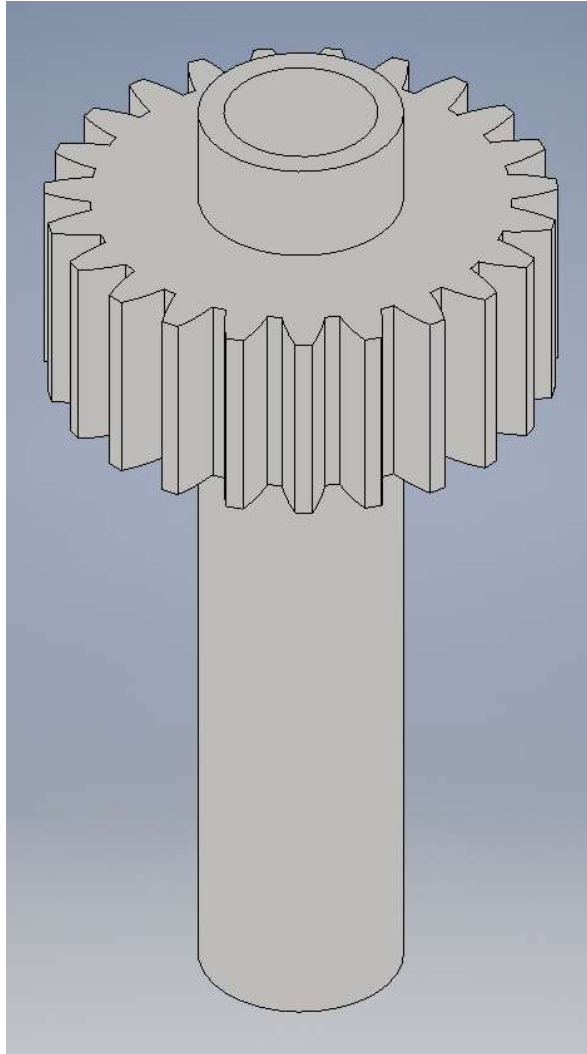
V dnešní době jsou v automatizaci velmi hojně využívány sériové manipulátory. Je totiž pravdou, že dnešní přesnost výroby není až tak špatná, tedy i přesnost na desetiny milimetrů samotných sériových manipulátorů je dostatečná. Větší robustnost a zástavbové rozměry pro dnešní fabriky nejsou také problémem, protože továrny jsou většinou obrovské haly, kde je spousta místa. Od paralelních manipulátorů se očekával velký příslib kvůli přesnostem, ovšem v normálních závodech se používají manipulátory sériové. Je to hlavně kvůli komplikovanému programování a komplikované mechanice. Tedy pro firmy je výhodnější používat manipulátory sériové. Manipulátory paralelní se využívají pouze u speciálních aplikací, jako například v optice, v přesných výrobcích, v měření přesnosti výroby a tak dále.

Do budoucna bude trend pokračovat. V automatizaci se bude hlavně pracovat se sériovými, jinými slovy se šestiosými roboty a paralelní se budou používat stále jen pro speciální aplikace a bude se do nich vkládat úsilí hlavně na akademické půdě, jako je tomu dnes.

3. Praktická část

3.1. Motivace a zadané parametry

Motivace a parametry vychází z potřeb. Věděli jsme, co je potřeba a co bychom chtěli a co už máme. Jinými slovy vylepšit to, co máme a k tomu mít nějakou přidanou hodnotu. Hlavní myšlenkou je mít manipulátor, který dokáže nahradit prostý rotační pohyb kolem své osy (obrázek 23).



Obrázek 23: Pohled na stávající řešení rotačního pohybu

Rotační pohyb nám nevyhovuje hned z několika důvodů. Prvním důvodem je, že se špatně utěsňují rotační spoje. Druhým je, že většina ozubených kol je mohutná a těžká. Pro naši aplikaci jsou tyto věci naddimenzovány tak, aby odpovídaly rozumné bezpečnosti a vydržely stálý a dlouhodobý chod. Snažíme se mít odlehčení všude, kde je to možné, ale i přesto jsou tyto převody těžké a zabírají mnoho místa, které je pro nás velmi cenné. Přidanou hodnotou je, že ozubená kola se mohou pouze točit, ovšem manipulátor dokáže i jiné typy pohybů, což je ve výsledku ta naše přidaná hodnota. Můžeme na něj připojit velké množství jiných

nástrojů, které mohou být přínosem v potrubí, pokud je od nás robot několik kilometrů daleko pod zemí.

Začnu s požadovanými parametry, které vycházejí z už hotového a používaného robota a je k nim dodána přidaná hodnota, kterou bych v ideálním případě chtěl dosáhnout a vylepšit tím tak stávající produkt. Zadané parametry:

- a) Plošina dokáže napodobit rotační pohyb a automaticky ho provádět po zadání parametrů rychlosti otáčení. V ideálním případě bude rychlost 0,5 s/ot. Dnes robot dosahuje 1 s/ot. Minimálně však je požadováno 1,5 s/ot. Plošina bude mít elevaci minimálně 80 stupňů, v ideálním případě až 90 stupňů. Tyto parametry pocházejí ze zkušeností s čištěním pomocí různých médií.
- b) Plošina bude mít i druhý režim, ve kterém se bude řídit pomocí joysticku. Bude moci dosahovat jakýchkoli míst v pracovním prostoru a bude moci přejíždět z jedné polohy do druhé.
- c) Plošina bude mít vlastní kameru. Budou zde univerzální připojovací rozměry pro jiné nástroje, například pro další kameru s HD rozlišením nebo například chapadlo, pro uchopení různých objektů v potrubí.
- d) Řídící deska a pohony budou implementovány do této plošiny v základně a personál s ní bude nejlépe komunikovat po bezdrátové komunikaci. Pokud bude potřeba většího dosahu, tak pomocí ethernetu nebo optického vlákna.
- e) Celá plošina má být voděodolná do 60 metrů hloubky (IP68k). Pokud tento bod nepůjde splnit, tak je možné akceptovat voděodolnou plošinu pouze do 1 m hloubky.
- f) Střed plošiny musí být volný, abychom jím mohli vést hadici, která bude mít v ideálním případě vnitřní průměr dva palce, tedy 50,8 mm. Nejmenší možný vnitřní průměr hadice musí být jeden palec, tedy 25,4 mm.
- g) Rozměry, jsou dány konstrukcí plošiny, ovšem základna by měla dosahovat maximálně 180 mm v průměru a délka by měla být kompromisem mezi samotnou délkou a pozvolným ohybem hadice, která povede osou této plošiny. Váha by měla být okolo 5-10 kg.
- h) Pohybové členy a pohony musí mít určitou nosnost, která se odvíjí od síly, kterou vytváří médium, které prochází hadicí. Například u suchého ledu se tryská tlakem 8-12 barů.

Úkolem je vymyslet nebo najít manipulátor, který by splnil tyto parametry. Spočítat kinematiku a silové poměry. Dalším krokem je takový manipulátor nakonstruovat, vybrat vhodné pohony. Pokud nebude možné najít vhodné pohony,

tak je navrhnout. Rozhodnout se pro vhodné součástky, nechat si od kolegů přes elektroniku a software navrhnout řídicí desku a ověřit funkčnost v praxi na laboratorním vzorku.

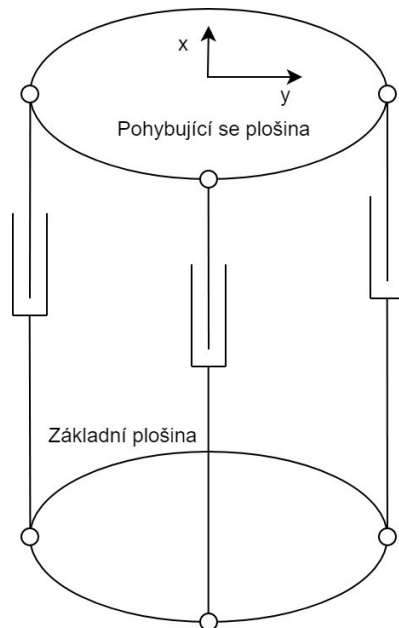
Cílem je dojít k závěru, zda je možné vydat se touto cestou. Pokud ano, tak přinést různé návrhy na vylepšení a použití poznatků z testování laboratorního vzorku tak, abych byl schopen vytvořit funkční prototyp, který by se už mohl využít v praxi.

3.2. Výběr mechanismu

Prvotní návrhy mechanismů byly nejdříve vlastní nápady nebo nápady kolegů. Později jsem při provádění rešerše objevil mechanismy, které vypadaly velmi vhodně pro naši aplikaci. Nejdříve rozvedu dva naše hlavní nápady na mechanismy. Zmíním dva další manipulátory, které jsem našel při rešerši. Vyberu jeden z nich, který se mi jevil jako nejvhodnější, a který by mohl splňovat zadané parametry.

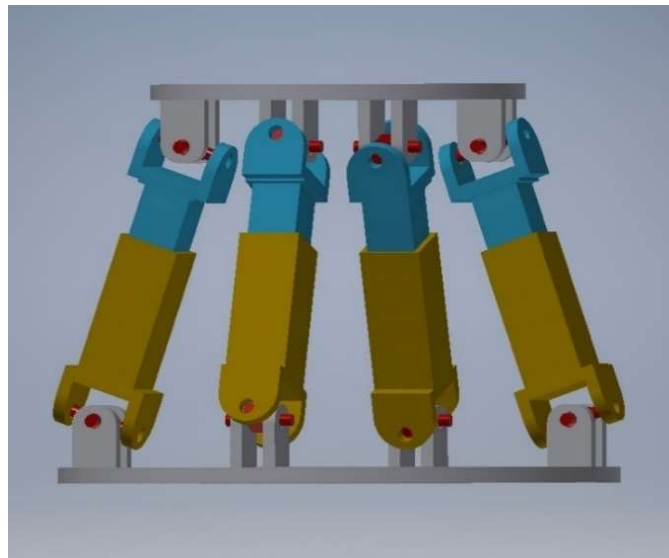
3.2.1. Mechanismus podobný Stewartově plošině

Prvotním nápadem byla plošina, která by stála na třech ramenech. Ramena by zároveň byla pohonnými jednotkami, tedy aktuátory. Ramena by byla tři nebo čtyři. Přikláněl jsem se ke třem ramenům, jelikož výpočet kinematiky by mohl být lehčí. Ovšem z kinematického hlediska bylo výhodnější použít čtyři. Hlavní požadavek na nahrazení rotačního pohybu by byl splněn. Pokud bychom mechanismus srovnali se Stewartovou plošinou, tak je vidět, že by tento mechanismu měl méně stupňů volnosti. Tento by měl tři, respektive čtyři, kdežto Stewartova plošina má šest stupňů volnosti. Kinematické schéma je vidět na obrázku 24.



Obrázek 25: Manipulátor podobný Stewartově plošině se třemi stupni volnosti

Hlavním problémem tohoto mechanismu je, že by mohl napodobení rotačního pohybu vykonávat jedině do naklonění pohyblivé plošiny 45 stupňů. Přišlo se s nápadem na napojení dvou stejných plošin nad sebe, ovšem zde by byl problém s nahrazením rotačního pohybu v ose. Tohoto symetrického mechanismu využívá Canfield joint, který pouze vynechává v rovině symetrie pevnou plošinu a místo aktuátorů v ramenech má pohonné členy v základní plošině. Model je vidět na obrázku 25.

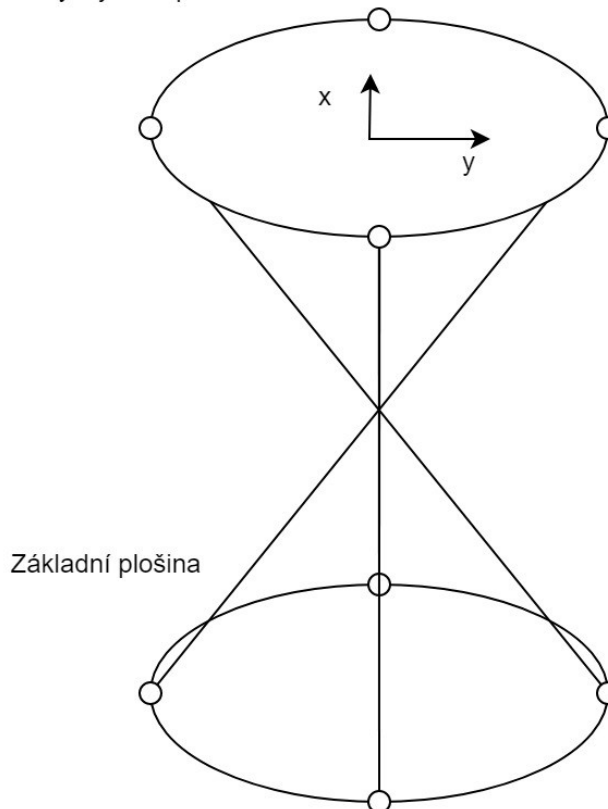


Obrázek 24: Mechanismus podobný Stewartově plošině, který má čtyři stupně volnosti

3.2.2. Pavlův manipulátor

Další mechanismus, který jsme vymysleli, byl v několika ohledech lepší než předchozí. Hlavní nápad vzešel od mého kolegy Pavla Studenovského a také po něm jsem zvolil název. Jedná se v podstatě o mechanismus, který by měl sférické vazby v základně a čtyři ramena by se křížila ve středu samotného mechanismu. Tento mechanismus jsme chtěli pohánět aktuátory, které by byly připojeny k ramenům. Tento manipulátor by dokázal jistě nahradit rotační pohyb a ohýbat se téměř do 90 stupňů, což byl hlavní požadavek. Manipulátor má dva stupně volnosti a byl by poháněn dvěma aktuátory. Kinematické schéma je vidět na obrázku 26.

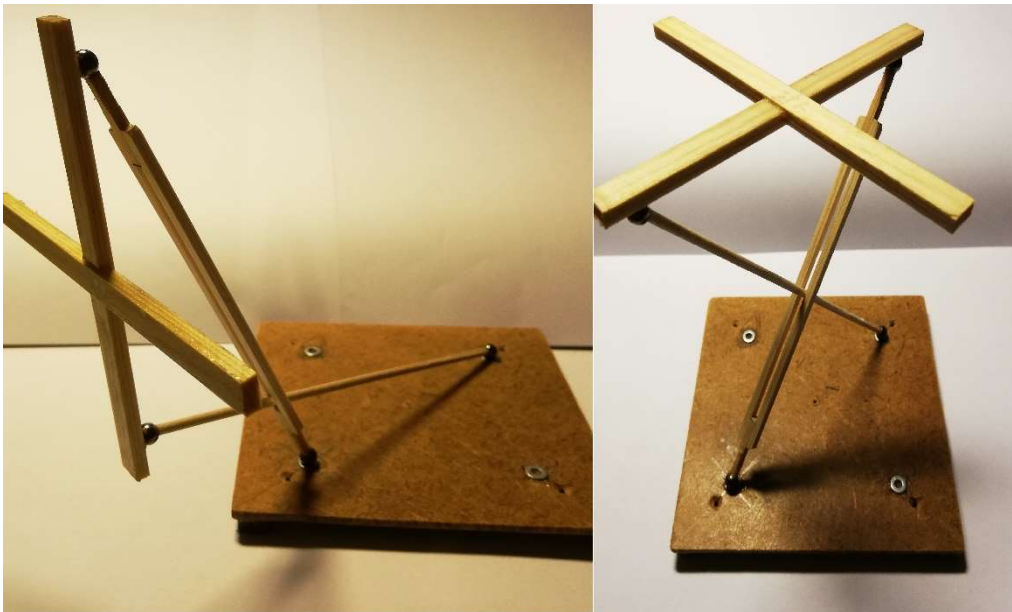
Pohybující se plošina



Obrázek 26: Pavlův manipulátor

Problémem tohoto manipulátoru je, že potřebujeme vést středem hadici o průměru minimálně jednoho palce a zde by byl střed neprůchozí kvůli křížení ramen. To by se dalo obejít navržením kinematiky a konstrukce tak, abychom měli „ohlá“ ramena. Dalším problémem by byly sférické vazby v základně, kvůli říditelnosti. Mohl bych se dostat do stavu singularity. Pokud bych si pohrál s konstrukcí a uvolnil střed tím, že jedno rameno bych rozdělil na dvě a spojil je k sobě spojkou, tak bych se velmi přiblížil následujícímu mechanismu, který se jmenuje Omni-wrist III a budu se mu věnovat v následující kapitole. Nakonec jsem tento mechanismus zamítl z výše uvedených důvodů a začal jsem více zkoumat Omni-wrist III a později i

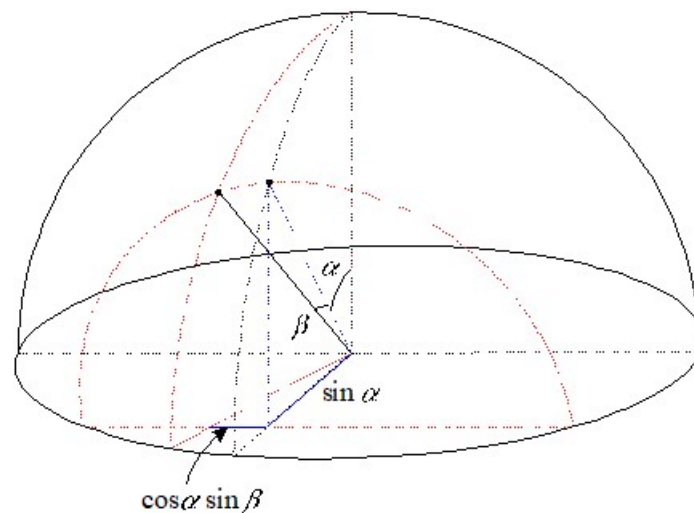
Canfield joint, který jsem objevil při řešení rešeršní části ještě později, než Omni-wrist III. Na obrázku 27 je vidět model, který vytvořil kolega k ověření funkce.



Obrázek 27: Model Pavlova manipulátoru

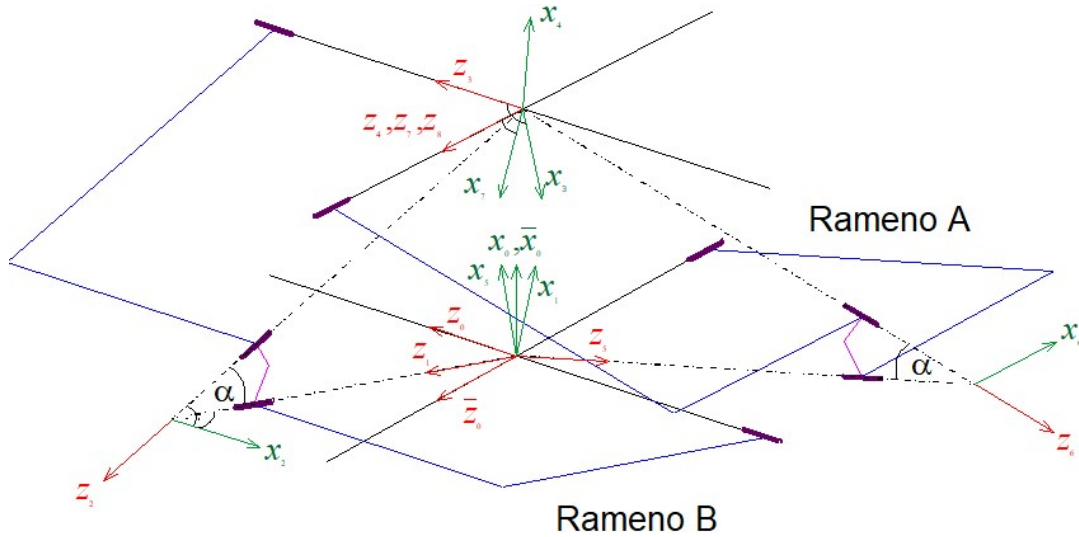
3.2.3. Omni-wrist III (Wide angle gimbal)

Omni-wrist III, respektive Wide angle gimbal, jsem popisoval v rešeršní části v kapitole 2.4.3. Zde popíši základní prvky mechaniky tohoto mechanismu. Pokud se podíváme na parametry, je tento mechanismus vymyšlen tak, aby dokázal nahradit rotační pohyb k*360 stupňů s úhlem natočení až 90 stupňů. Je to mechanismus se dvěma stupni volnosti, které jsou právě elevace a azimut. Toto je vidět na obrázku 28.



Obrázek 28: Azimut a elevace

Pokud se blíže podíváme na kinematiku, tak je potřeba si uvědomit, že je mechanismus v podstatě symetrický podle roviny symetrie, která je uprostřed spojek spojující horní a dolní rameno. Pokud budou aktuátory nebo motory pohánět dvě ramena proti sobě, lze si představit, že se tento mechanismus začne otáčet. Toto je možné vidět na obrázku 29.



Obrázek 29: Kinematické schéma Omni-wristu III

Na obrázku 30 je reálný model mechanismu.

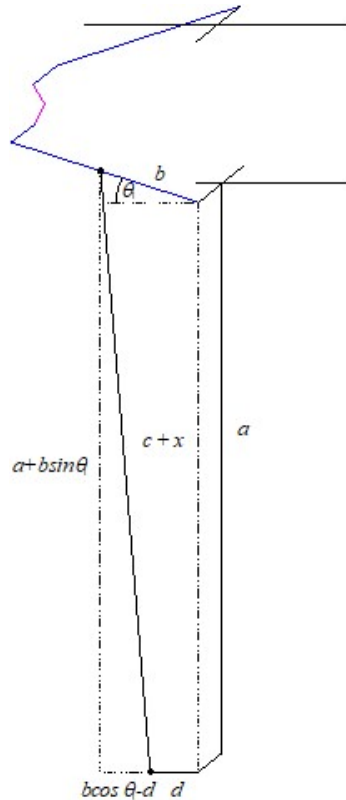


Obrázek 30: Omni-wrist III

Je potřeba si všimnout připojení aktuátorů (obrázek 31), které jsou připojeny pod daným úhlem. Toto vychází z kinematiky a z následujících rovnic:

$$(a + b * \sin(\theta_1))^2 + (b * \cos(\theta_1 - d))^2 = (c + A * x_1)^2 \quad (3.1)$$

$$(a + b * \sin(\theta_5))^2 + (b * \cos(\theta_5 - d))^2 = (c + A * x_2)^2 \quad (3.2)$$



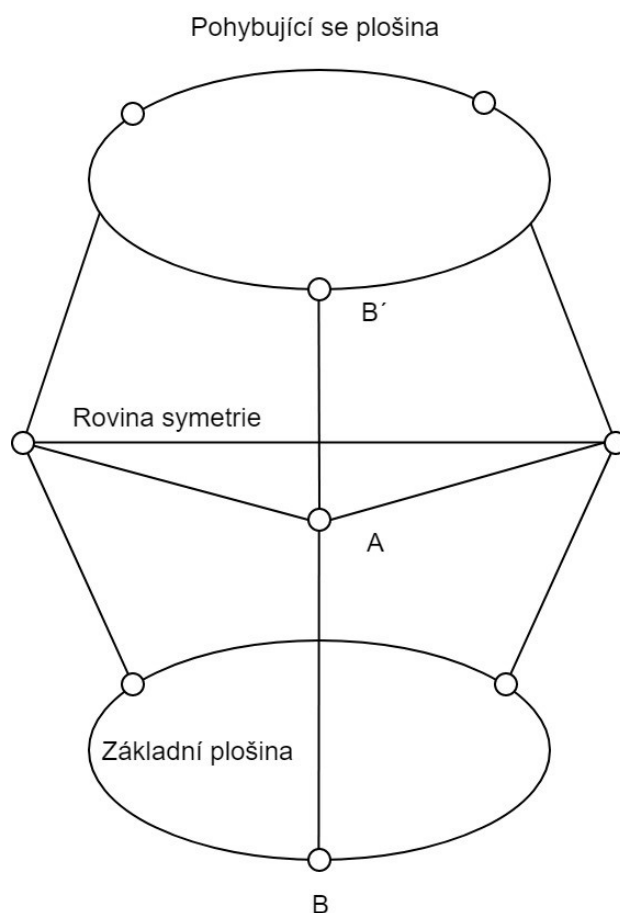
Obrázek 31: Připevnění aktuátorů k Omni-wristu III

U aktualizovaného konceptu od pana Josefa Sofky se používá klasických rotačních motorů namísto aktuátorů. Celý mechanismus je také lehčí a rychlejší. Důvodem nevydání se cestou toho manipulátoru bylo objevení Canfield jointu. Obával jsem se nízké výsledné síly. Při použití motorů Exlar GS-20-302, které dávají maximální sílu 1000 N, je výsledná síla na poháněných ramenech dvojnásobně zmenšena. Převod točivého momentu na pohybující plošinu je obdobně snížen. Další velkou nevýhodou je, že tento mechanismus spadá pod patent, který vlastní Mark Rosheim. Nesmíme opomenout složitost kinematických vlastností a nelineární dynamickou odezvu. Samotná pevnost mechanismu není dobrá kvůli sériovému propojení ramen. Mnoho informací, které zde uvádím, mám přímo od Josefa Sofky, kterého jsem zkontaktoval za účelem dozvědět se více informací, které by vedly k rozhodnutí o použití

tohoto mechanismu. Jak jsem již psal, tak po nalezení Canfield jointu jsem se zaměřil právě na něj.

3.2.4. Canfield joint

Paralelní manipulátor Canfield joint jsem zmiňoval výše v rešeršní části v kapitole 2.4.4. Jedná se o manipulátor, který má propojení mezi horní plošinou a spodní plošinou třemi rameny. Je symetrický dle roviny symetrie, viz obrázek 32.



Obrázek 32: Canfield joint s vyznačenou rovinou symetrie

Tento mechanismus má tři stupně volnosti, je tedy poháněn třemi aktuátory, respektive rotačními motory. Tyto tři stupně volnosti jsou výška roviny symetrie, azimutu a elevace. Stejně jako předchozí mechanismus dokáže nahradit rotační pohyb kolem dokola a dle konstrukce je s ním možné dosáhnout i více než 90 stupňů náklonu. Kinematické schéma je vidět na obrázku 32.

Tento manipulátor jsem si vybral pro praktickou část. Podrobnější popis bude v kapitole 3.3. V další kapitole shrnu, proč jsem si tento manipulátor vybral a co od něj očekávám.

3.2.5. Vybraný mechanismus

Jak jsem zmínil v kapitole předchozí, vybral jsem si Canfield joint. Jedná se o manipulátor, který by mohl splnit naše požadavky z kapitoly 3.1. Jedná se o paralelní manipulátor, který dokáže nahradit rotační pohyb. Než se začnu věnovat jednotlivým parametrům, které splňuje Canfield joint, a které ostatní návrhy manipulátorů nesplňují, tak zmíním důležitou poznámku, že se dnes už nejedná o zapatentovaný manipulátor, jelikož patent vypršel v roce 2016.

Nejvíce nás zajímal parametr azimutu a elevace. Tento manipulátor to, na rozdíl od prvního jmenovaného, dokáže bez problémů. Tedy elevace, dle konstrukce, může nabývat hodnot i přes devadesát stupňů a azimut je $k \cdot 360$. Podle zatížení a podle síly motorů, můžeme předpokládat, že je možné se přiblížit rychlosti otáčení až 1 s/ot. Což je kompromis mezi ideální a minimální rychlosti otáčení, která je stěžejní pro čištění potrubí a pro médium, kterým se čistí. Je dobré brát v potaz, že pokud plošinu zatížíme více, bude naše rychlost klesat.

Další požadavky typu univerzálních připojovacích rozměrů pro HD kamery nebo jiné senzory, implementace desky dovnitř plošiny a voděodolnost IP68k jsou problémy, které se dají vyřešit u všech typů vhodnou konstrukcí. V této kapitole je nemá cenu dále rozebírat, jelikož mi nepomůžou s volbou.

Pokračuji požadavkem, který je stěžejní a díky kterému jsem musel zamítnout další návrh. Byl to požadavek na volný střed tak, aby se tímto středem dala vést hadice, která bude mít vnitřní průměr alespoň 2 palce, v přepočtu je to 50,8 mm. Tímto požadavkem se mi jako vhodné manipulátory ukázaly pouze Canfield joint a Omni-wrist III.

Poslední požadavek byl ohledně rozměrů celé plošiny, včetně pohonů. Tento bod lépe vystihuje Canfield joint. Mám pro toto tvrzení několik důvodů. Prvním důvodem jsou pohony. Lineární aktuátory jsou většinou silné, ale pomalé. Další velkou nevýhodou je, že nedokáží pracovat v nepřetržitém provozu. Nejsou na to konstruovány. Většinou se uvádí parametr „duty cycle“, který uvádí hodnotu 10 %. Jinak řečeno aktuátor může pracovat 10 minut (10 % času) v kuse, ale poté musí být v klidu 90 minut (90 % času), pokud vezmu 100 minut jako 100 %. Omni-wrist III, neboli Wide angle gimbal, používá jako pohony klasické rotační motory. Tím se velmi navyšuje zástavbový rozměr. Toto se děje i u Canfield jointu, ovšem více než do průměru roste jeho rozměr do délky, která mi až tak nevádí. Při průjezdu zatáčkou v potrubí je totiž možné délku plošiny v podstatě zrušit tím, že se plošina dokáže natočit do směru zatáčky. To je velkou předností u Canfield jointu. Je potřeba myslet na to, že jsou určité poměry mezi délkou ramen a

jejich umístění v kloubech, tedy průměr kružnice, kde jsou klouby umístěny. Tomuto poměru se budu věnovat více v kapitole 3.3.2.

Kromě rozměrů mi u Canfield jointu vyhovuje fakt, že už není pod patentem na rozdíl od Omni-wristu III a fakt, že u Omni-wristu III se uvádí, že manipulátor pracuje dobře do elevace 75 stupňů, kdežto Canfield joint by mohl překročit i 90 stupňů. V tabulce je vidět přehled uvažovaných manipulátorů a splnění našich požadavků.

Parametry	Mechanismus první	Pavlovův manipulátor	Omni-wrist III	Canfield joint	Požadavky	Poznámky
Rotační pohyb (elevace)	0-45°	0-90°	0-75°(90°)	0-90°	0-90°	Důležité -> 2body
Rychlost otáčení	Ano	Ano	Ano	Ano	min. 0,5 s/ot - 1,5 s/ot	Záleží na síla/rychlost, 1 bod
Volný střed plošiny	Ano	Ne	Ano	Ano	Volný střed min. 25,4 mm	Důležité -> 2 body
Rozměry (konstrukce)	Ano	Spíše ne	Spíše ne	Ano	Průměr maximálně 180 mm	1 bod
Patent	Ne	Ne	Ano	Ne	Ideálně ne	1 bod
Bodové vyhodnocení	4	4,5	4,5	7		

Tabulka 1: Tabulka, která srovnává splnění požadavků u jednotlivých manipulátorů

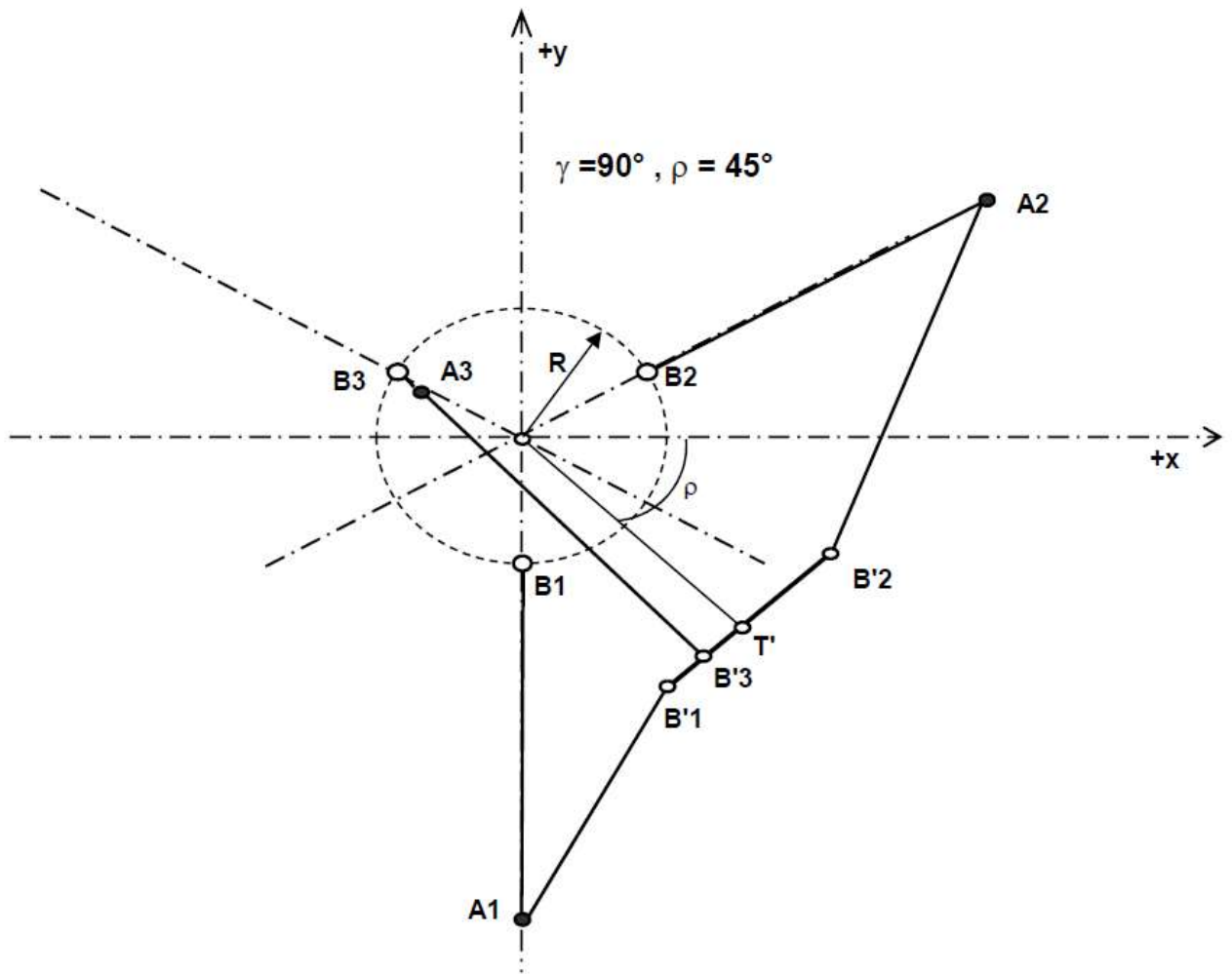
I z této tabulky je patrné, že nejlepší volbou pro mou aplikaci bude Canfield joint. Dále se tedy budu věnovat pouze Canfield jointu.

3.3. Canfield joint – teorie

Nejdříve jsem musel Canfield joint rozebrat po teoretické stránce. Abychom mohli odzkoušet tento mechanismus a vytvořit laboratorní vzorek, bylo zapotřebí mít rovnice kinematiky a rovnice, které by určily, jak se mají motory pohybovat. Začal jsem tedy kinematikou.

3.3.1. Kinematika

Nejprve zavedu značení, kterého se budu držet až do konce práce. Mám hlavní tři parametry plošiny. Prvním je R , což je poloměr roztečné kružnice kloubů (B_i) v rovině (x, y). Druhým je délka ramen L . Tyto dva parametry musí mít určitý poměr, aby bylo možné dosáhnout všech poloh. Tímto poměrem se budu zabývat později. Posledním důležitým parametrem je P_z . Tato proměnná je střed symetrie, tedy průsečík osy z s rovinou symetrie, která je tvořena A_1 , A_2 a A_3 . Tímto parametrem omezujeme třetí stupeň volnosti tohoto manipulátoru. Polohu stolku budu určovat polárními souřadnicemi a to azimutem, který budu označovat jako ρ . Jinými slovy je to úhel natočení v rovině základny (x, y), tedy od 0 stupňů až do 360 stupňů. Druhou souřadnicí je poté elevace, kterou budu značit γ , což je sklon stolku od kladného směru středové osy z . Na obrázku 33 je vidět pozice manipulátoru v souřadnicích $\rho = 45$ stupňů a $\gamma = 90$ stupňů.



Obrázek 33: Canfield joint, pohled osou z

Pozice kloubů A_1 , A_2 a A_3 ve zvolené souřadné soustavě (x, y, z) určují přímé funkce od úhlů β_1 , β_2 a β_3 měřených od základny (x, y) . Pro kloub A_1 :

$$A_{1x} = 0 \quad (3.3)$$

$$A_{1y} = -R - L * \cos(\beta_1) \quad (3.4)$$

$$A_{1z} = L * \sin(\beta_1) \quad (3.5)$$

pro kloub A_2 :

$$A_{2x} = (R + L * \cos(\beta_2)) * \cos(\pi/6) \quad (3.6)$$

$$A_{2y} = (R + L * \cos(\beta_2)) * \sin(\pi/6) \quad (3.7)$$

$$A_{2z} = L * \sin(\beta_2) \quad (3.8)$$

a pro kloub A_3 :

$$A_{3x} = -(R + L * \cos(\beta_3)) * \cos(\pi/6) \quad (3.9)$$

$$A_{3y} = (R + L * \cos(\beta_3)) * \sin(\pi/6) \quad (3.10)$$

$$A_{3z} = L * \sin(\beta_3) \quad (3.11)$$

Rovina symetrie mezi základnou a klouby plošiny je určena pozicí kloubů A_1 , A_2 a A_3 natočených v úhlech β_i v kloubech základny. Díky symetrii tohoto manipulátoru je jednoznačně určena pozice plošiny, a i její polární souřadnice ρ , γ a P_z , což je střed této symetrie, jinak řečeno průsečík osy z s rovinou symetrie, která je tvořena klouby A_1 , A_2 a A_3 . Volbou P_z omezíme jeden stupeň volnosti a tím pádem úhly natočení ramen θ_1 , θ_2 a θ_3 , k dosažení požadované pozice středu plošiny, nejsou zcela nezávislé.

Abych určil úhly natočení θ_1 , θ_2 a θ_3 potřebných pro nastavení pozice souřadnicemi ρ a γ , potřebuji tři inverzní funkce, kde $i = 1, 2, 3$:

$$\beta_i = f_i(\rho, \gamma) \quad (3.12)$$

Mám dvě možnosti, jak tyto funkce určit:

- Řešení soustavy algebraických rovnic, souřadnice průsečíku kružnice o poloměru L v rovině ramen s rovinnou symetrie.
- Analytické vyjádření deskriptivního řešení pomocí goniometrických funkcí.

Rovina symetrie prochází $P_z(Z_0)$ a její průsečíky s osami x a y jsou:

$$X_0 = \frac{P_z / \tan(\gamma/2)}{\cos(\rho)} \quad (3.13)$$

$$Y_0 = \frac{P_z / \tan(\gamma/2)}{\sin(\rho)} \quad (3.14)$$

Obecná rovnice pro rovinu symetrie je:

$$\frac{x}{X_0} + \frac{y}{Y_0} + \frac{z}{Z_0} = 1 \quad (3.15)$$

Popíši zde metodu pomocí deskriptivní geometrie:

Společný vztah pro všechny funkce je:

$$r = \frac{P_z}{\tan(\gamma/2)} \quad (3.16)$$

1) Pro úhel β_1 , rameno A_1

$$t_1 = r / \cos(\rho) \quad (3.17)$$

$$\tau_1 = \arctan(P_z / t_1) \quad (3.18)$$

$$(t_1 - R) * \sin(\tau_1) = L * \sin(\varepsilon_1) \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_1 = \arcsin((t_1 - R) * \sin(\tau_1) / L) \quad (3.20)$$

$$\beta_1 = \varepsilon_1 - \tau_1 \quad (3.21)$$

2) Pro úhel β_2 , rameno A_2

$$t_2 = r / \cos(\rho + \frac{\pi}{3}) \quad (3.22)$$

$$\tau_2 = \arctan(P_z / t_2) \quad (3.23)$$

$$(t_2 + R) * \sin(\tau_2) = L * \sin(\varepsilon_2) \quad (3.24)$$

$$\varepsilon_2 = \arcsin((t_2 + R) * \sin(\tau_2) / L) \quad (3.25)$$

$$\beta_2 = \varepsilon_2 + \tau_2 \quad (3.26)$$

3) Pro úhel β_3 , rameno A_3

$$t_3 = r / \cos(\rho - \frac{\pi}{3}) \quad (3.27)$$

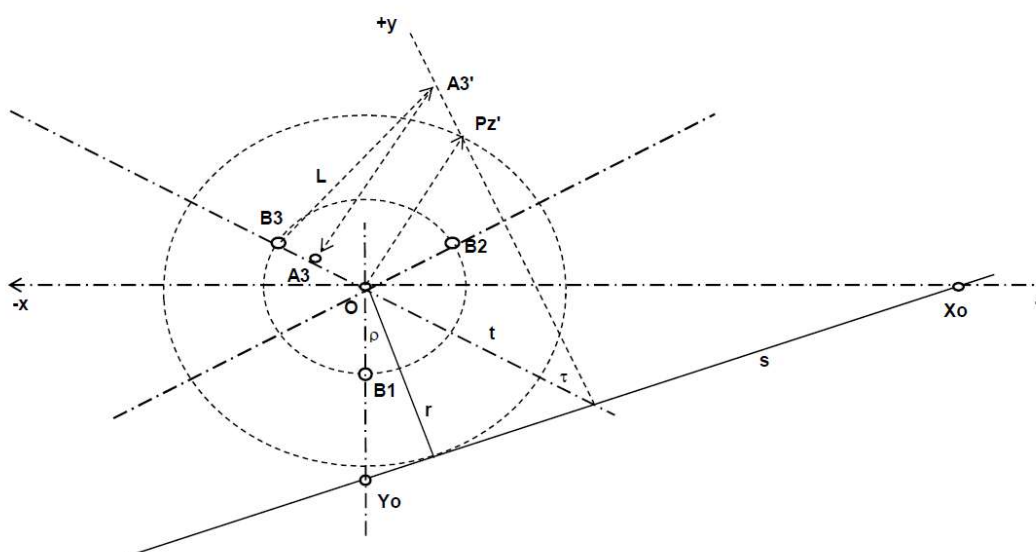
$$\tau_3 = \arctan(P_z / t_3) \quad (3.28)$$

$$(t_3 + R) * \sin(\tau_3) = L * \sin(\varepsilon_3) \quad (3.29)$$

$$\varepsilon_3 = \arcsin((t_3 + R) * \sin(\tau_3) / L) \quad (3.30)$$

$$\beta_3 = \varepsilon_3 + \tau_3 \quad (3.31)$$

Tyto vztahy jsou odvozeny pomocí deskriptivy, která je vidět na obrázku 34. Uvedu zde pouze obrázek pro rameno A_3 .



Obrázek 34: Deskriptiva pro A_3

Pro kontrolu výpočtu inverzních funkcí úhlů β_1 , β_2 a β_3 lze použít přímé funkce pro pozice kloubů A_1 , A_2 a A_3 ve zvolené souřadné soustavě (x, y, z) :

$$A_{1x} = 0 \quad (3.32)$$

$$A_{1y} = -R - L * \cos(\beta_1) \quad (3.33)$$

$$A_{1z} = L * \sin(\beta_1) \quad (3.35)$$

pro kloub A_2 :

$$A_{2x} = (R + L * \cos(\beta_2)) * \cos(\pi/6) \quad (3.35)$$

$$A_{2y} = (R + L * \cos(\beta_2)) * \sin(\pi/6) \quad (3.36)$$

$$A_{2z} = L * \sin(\beta_2) \quad (3.37)$$

a pro kloub A_3 :

$$A_{3x} = -(R + L * \cos(\beta_3)) * \cos(\pi/6) \quad (3.38)$$

$$A_{3y} = (R + L * \cos(\beta_3)) * \sin(\pi/6) \quad (3.39)$$

$$A_{3z} = L * \sin(\beta_3) \quad (3.40)$$

Souřadnice (x, y, z) bodů A_1, A_2 a A_3 určují obecnou rovinu (rovina symetrie):

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3.41)$$

Koeficienty A, B, C, D vyplývají z následující rovnice:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.42)$$

Pro kontrolu této rovnici musí také vyhovět souřadnice středu symetrie (P_z): $(0, 0, P_z)$. Následně podělením koeficientů A, B, C, D normalizačním koeficientem:

$$N = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \quad (3.43)$$

Získáme směrové cosiny normály zadané roviny (rovina symetrie):

$$\cos(\alpha) = A/N \quad (3.44)$$

$$\cos(\beta) = B/N \quad (3.45)$$

$$\cos(\gamma) = C/N \quad (3.46)$$

a také její vzdálenost od počátku:

$$d = -D/N \quad (3.47)$$

Kartézské souřadnice středu plošiny T jsou:

$$T_x = 2 * d * \cos(\alpha) \quad (3.48)$$

$$T_y = 2 * d * \cos(\beta) \quad (3.49)$$

$$T_z = 2 * d * \cos(\gamma) \quad (3.50)$$

Odtud polární souřadnice středu plošiny ρ a γ_s :

$$\gamma_s = 2 * \gamma \quad (3.51)$$

$$\sin(\rho) = \frac{T_x}{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}} \quad (3.52)$$

$$\cos(\rho) = \frac{T_y}{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}} \quad (3.53)$$

Příslušný kvadrant směrového úhlu plošiny ρ lze pak odvodit se znaménkem jeho goniometrických funkcí.

Pro záporné hodnoty sklonu ($\gamma < 0$) lze použít konverzi:

$$\gamma' = -\gamma \quad (3.54)$$

$$\rho' = \rho + \frac{\pi}{2} \quad (3.55)$$

Pro výjimečnou hodnotu $\gamma = 0$ jsou hodnoty sklonu ramen:

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \arcsin\left(\frac{P_z}{L}\right) \quad (3.56)$$

Na kinematiku naváže v kapitole 3.3.3., jelikož budu potřebovat tyto rovnice pro nastavení otáčení motorů.

3.3.2. Poměr mezi R a L

Tyto dva parametry jsou v podstatě jediné parametry, které je možné námi nastavit. Ještě se k tomu pojí bod P_z . Je důležité vědět, že pokud tyto parametry nenastavíme správně, tak se nám začínají v průběhu objevovat singulární body. Otázkou je, co je správné nastavení poměrů. Tyto hodnoty jsou důležité, jelikož se nám od toho odvíjí velikost celého mechanismu a také velikost pracovního prostoru. Podle poměru se nám mění i samotné průběhy. Nejprve jsem zvolil poměr $L/R = 3$, jelikož se mi jevily průběhy jako schůdné.

Nakonec jsem usoudil, že kvůli délce manipulátoru poměr změním a změním i bod P_z , což by mi mohlo zlepšit vlastnosti celého manipulátoru. Pro ukázkou je zde uvedena tabulka poměrů, kde jsem se snažil o optimalizaci stávajícího poměru. Jednalo se mi hlavně o snížení celkové výšky manipulátoru.

Ideální poměr								
L [mm]	R [mm]	L/R [-]	β_x [deg]	β_m [deg]	α_x [deg]	α_m [deg]	P_z [mm]	Poznámky
120,0	40,0	3,0	-29,6	92,4	30,8	94,9	85,0	Aktuální model
120,0	50,0	2,4	-29,6	103,7	30,8	117,4	95,0	Pavlova změna P_z
139,0	57,9	2,4	-34,1	96,1	21,8	102,2	95,0	Stejný poměr změna P_z
173,3	57,9	3,0	-38,6	80,7	12,7	71,3	85,0	Aktuální sestavený model
135,0	57,9	2,3	-33,8	98,2	22,4	106,4	95,0	
130,0	57,9	2,2	-33,3	101,3	23,3	112,5	95,0	
125,0	57,9	2,2	-32,9	104,9	24,2	119,8	95,0	
115,0	57,9	2,0	-31,8	115,1	26,4	140,2	95,0	
110,0	57,9	1,9	-29,6	92,4	30,8	94,9	95,0	Ideál ??
145,0	57,9	2,5	-34,6	93,2	20,9	96,4	95,0	
115,0	57,9	2,0	-30,0	121,1	30,0	152,3	100,0	Ideál ??
120,0	57,9	2,1	-30,6	113,5	28,7	137,0	100,0	
125,0	57,9	2,2	-31,2	108,3	27,6	126,6	100,0	
120,0	57,9	2,1	-28,9	118,7	32,2	147,4	105,0	
125,0	57,9	2,2	-29,5	112,1	30,9	134,3	105,0	
130,0	57,9	2,2	-30,1	107,4	29,7	124,8	105,0	

Tabulka 2: Tabulka možných poměrů L/R

3.3.3. Průběhy otáčení motorů

Jak jsem zmiňoval výše, použiji zde příslušné rovnice z kinematiky. Z výsledků a z grafů je patrné, že je stačí řešit pro hodnoty $\rho = 0-60$ stupňů, jelikož se průběhy začínají opakovat po této hodnotě. Pro větší hodnoty zadaného úhlu natočení lze dojít rekurentními vztahy vyplývající z tříosé symetrie konstrukce ramen, kloubů A_1, A_2, A_3 0 stupňů, 120 stupňů a 240 stupňů, ve zvolené soustavě souřadnic.

$$\beta_1(-\rho) = \beta_3(\rho) \quad (4.1)$$

$$\beta_2(-\rho) = \beta_3(\rho) \quad (4.2)$$

$$\beta_3(-\rho) = \beta_2(\rho) \quad (4.3)$$

$$\beta_1(\rho) = \beta_3(\rho - 120^\circ) \quad (4.4)$$

$$\beta_2(\rho) = \beta_1(\rho - 120^\circ) \quad (4.5)$$

$$\beta_3(\rho) = \beta_2(\rho - 120^\circ) \quad (4.6)$$

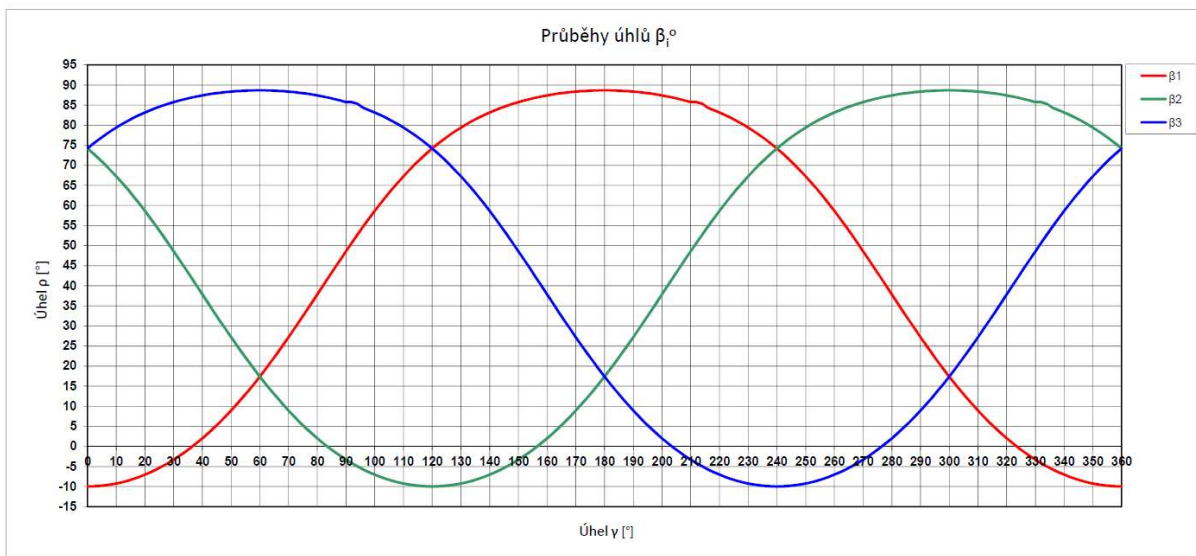
Pro jejich výpočet lze s výhodou použít například systém rekurzivních funkcí:

$\beta_1 = \text{if}(\rho > 120) \text{ then } \beta_3(\rho - 120) \text{ else if } (\rho > 60) \text{ then } \beta_2(120 - \rho) \text{ else calc. } \beta_1(\rho < 60)$

$\beta_2 = \text{if}(\rho > 120) \text{ then } \beta_1(\rho - 120) \text{ else if } (\rho > 60) \text{ then } \beta_1(120 - \rho) \text{ else calc. } \beta_2(\rho < 60)$

$\beta_3 = \text{if}(\rho > 120) \text{ then } \beta_2(\rho - 120) \text{ else if } (\rho > 60) \text{ then } \beta_3(120 - \rho) \text{ else calc. } \beta_3(\rho < 60)$

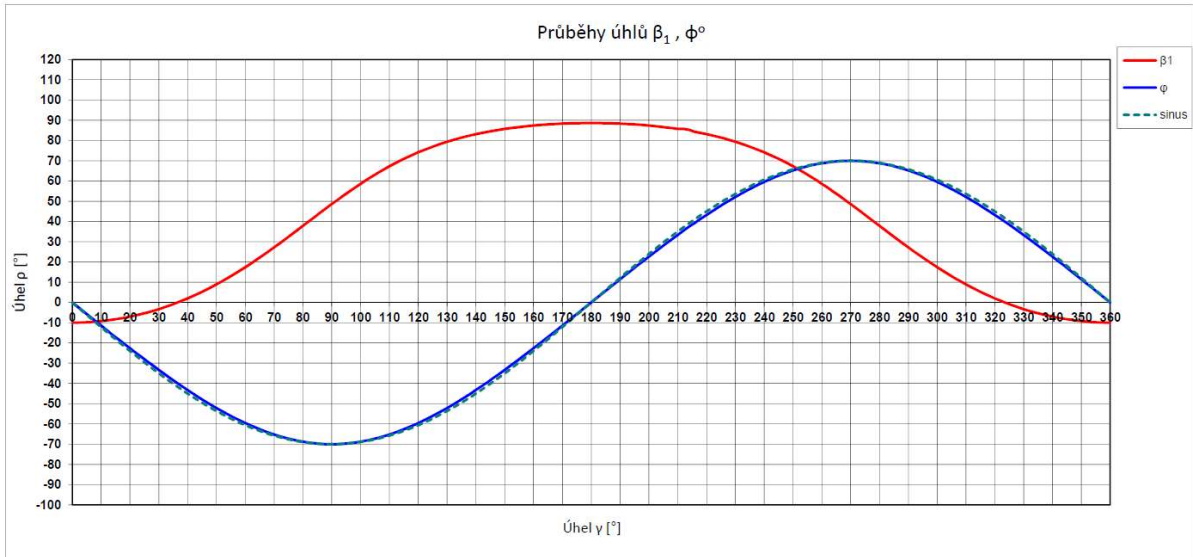
Na grafu 1 lze vidět tyto průběhy, kde $\rho = 0-360$ stupňů a $\gamma = 90$ stupňů



Graf 1: Průběhy úhlů $\beta_1, \beta_2, \beta_3$

S menším sklonem plošiny, tedy úhlu γ , se amplituda inverzních funkcí úměrně zmenšuje.

Při otáčení sklopené plošiny se také mění vzájemný úhel ϕ mezi osami kloubů B v základně a B' v horní plošině. Tento úhel se vyrovnává protočením os společného kloubu v uzlu A . V následujícím grafu je znázorněn jeho průběh pro rameno A_1 při maximálním sklopení plošiny, $\gamma = 90$ stupňů. Jeho extrémní amplituda je rovna úhlu sklopení γ , tuto hodnotu nabývá pro úhel natočení $\rho = 90$ stupňů a 270 stupňů a nezávisí na poměru L/R dané konstrukce.

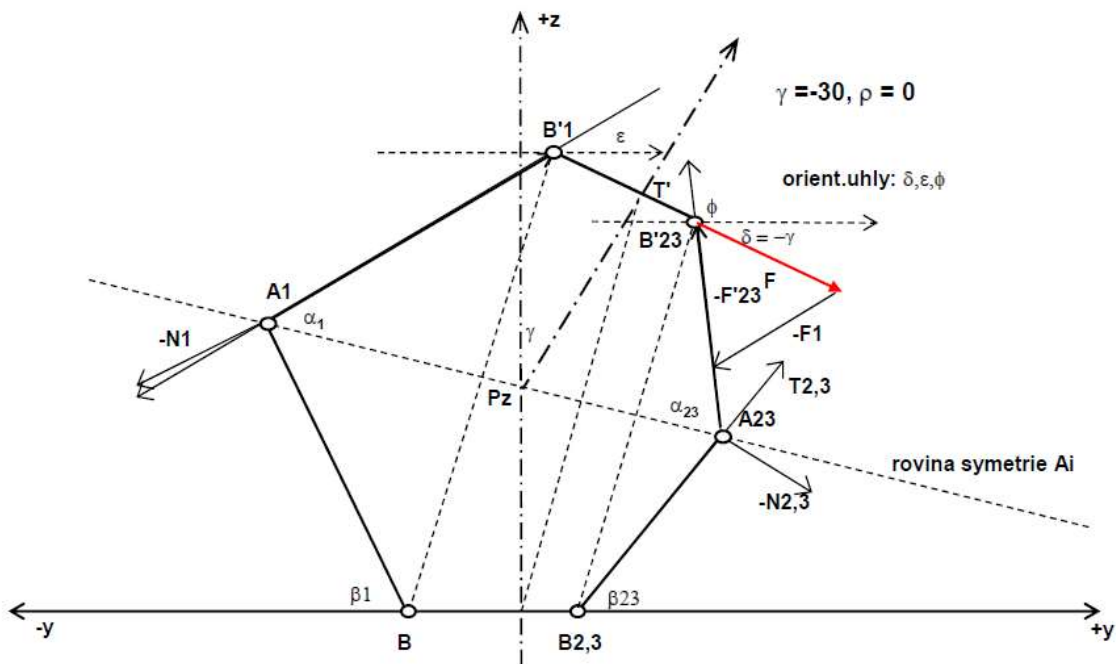


Graf 2: Průběhy úhlů β_1, ϕ

Zajímavostí je, že průběh úhlu ϕ připomíná průběh funkce sinus, ale jak lze vidět na grafu 2, nepatrné odlišnosti tu jsou.

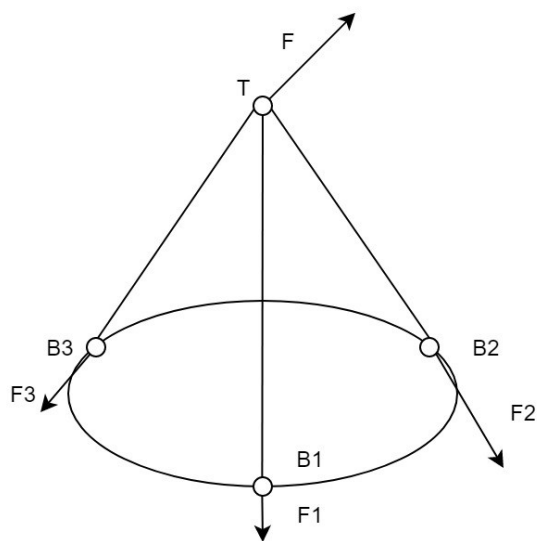
3.3.4. Silové poměry (dynamika)

Dynamika tohoto manipulátoru je pro nás podstatná k určení správných pohonů. Pravdou je, že samotná celková dynamika mechanismu až tak důležitá není. Ta by se řešila pomocí Lagrangeových smíšených rovnic, což není triviální. Také by se dala řešit, při zanedbání setrvačnosti, přes statiku. Takto ji budu řešit já. Ještě si ale celou úlohu zjednodušíme pomocí symetrie mechanismu.



Obrázek 36: Nezjednodušené dynamické schéma Canfield jointu

Potřebujeme znát pouze momenty jednotlivých motorů, pokud zatížíme plošinu nějakou vektorovou silou F , která bude vycházet ze středu plošiny, tak díky symetrii si můžeme říct, že v podstatě reakce, které vyvolá tato plošina v kloubech, se přenesou díky zákonu akce a reakce na motory. Pomocí skládání sil v prostoru můžeme složit rovnice, pomocí kterých tyto momenty vypočítáme. Na obrázku 35 je vidět zjednodušený model manipulátoru, který budeme řešit. Nejdříve jsem si ověřil, že se takto dá řešit mechanismus ve dvou rozměrech.



Obrázek 35: Zjednodušené schéma dynamiky

K určení momentů ramen A_i v kloubech základny B_i potřebných k vyrovnání zátěže plošiny, kterou představuje vektorová obecná síla F , je vhodné tuto sílu rozložit do reakcí v kloubech B_i . Ty lze určit například rozložením do složek souřadného systému (x, y, z) a následně řešit soustavu algebraických rovnic pro 3x3 neznámých F_{ix}, F_{iy}, F_{iz} :

$$\sum F_{ix} = F_x \quad (5.1)$$

$$\sum F_{iy} = F_y \quad (5.2)$$

$$\sum F_{iz} = F_z \quad (5.3)$$

Také platí:

$$F_{ix} = F_i * \cos(\alpha_i) \quad (5.4)$$

$$F_{iy} = F_i * \cos(\beta_i) \quad (5.5)$$

$$F_{iz} = F_i * \cos(\gamma_i) \quad (5.6)$$

Složením dostáváme:

$$F_{ix} = F_{iy} * \frac{\cos(\alpha_i)}{\cos(\beta_i)} \quad (5.7)$$

$$F_{iy} = F_{iz} * \frac{\cos(\beta_i)}{\cos(\gamma_i)} \quad (5.8)$$

$$F_{iz} = F_{ix} * \frac{\cos(\gamma_i)}{\cos(\alpha_i)} \quad (5.9)$$

Kde $i = 1, 2, 3$ a úhly $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ jsou směrové úhly spojnic působišť v těžišti horní plošiny T , síly F , s klouby B_i k osám x, y, z . Vzhledem k lineární závislosti složek F_x, F_y, F_z je pro složky F_{ix}, F_{iy}, F_{iz} k dispozici potřebných 9 nezávislých algebraických rovnic. Pro směrové úhly přímky v prostoru platí vztah:

$$\cos^2(\alpha) + \cos^2(\beta) + \cos^2(\gamma) = 1 \quad (5.10)$$

S využitím lineární závislosti složek F_x, F_y, F_z lze dojít ke třem soustavám tří algebraických rovnic o třech neznámých F_{ix}, F_{iy}, F_{iz} . S řešením kterékoli z nich lze následně získat hodnoty jednotlivých složek v kloubech B_i ve směru x :

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} \quad (5.11)$$

$$F_y = F_{1x} * \frac{\cos(\beta_1)}{\cos(\alpha_1)} + F_{2x} * \frac{\cos(\beta_2)}{\cos(\alpha_2)} + F_{3x} * \frac{\cos(\beta_3)}{\cos(\alpha_3)} \quad (5.12)$$

$$F_z = F_{1x} * \frac{\cos(\gamma_1)}{\cos(\alpha_1)} + F_{2x} * \frac{\cos(\gamma_2)}{\cos(\alpha_2)} + F_{3x} * \frac{\cos(\gamma_3)}{\cos(\alpha_3)} \quad (5.13)$$

Pro složky ve směru y :

$$F_x = F_{1y} * \frac{\cos(\alpha_1)}{\cos(\beta_1)} + F_{2y} * \frac{\cos(\alpha_2)}{\cos(\beta_2)} + F_{3y} * \frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\beta_3)} \quad (5.14)$$

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} \quad (5.15)$$

$$F_z = F_{1y} * \frac{\cos(\gamma_1)}{\cos(\beta_1)} + F_{2y} * \frac{\cos(\gamma_2)}{\cos(\beta_2)} + F_{3y} * \frac{\cos(\gamma_3)}{\cos(\beta_3)} \quad (5.16)$$

A pro složky ve směru z :

$$F_x = F_{1z} * \frac{\cos(\alpha_1)}{\cos(\gamma_1)} + F_{2z} * \frac{\cos(\alpha_2)}{\cos(\gamma_2)} + F_{3z} * \frac{\cos(\alpha_3)}{\cos(\gamma_3)} \quad (5.17)$$

$$F_y = F_{1z} * \frac{\cos(\beta_1)}{\cos(\gamma_1)} + F_{2z} * \frac{\cos(\beta_2)}{\cos(\gamma_2)} + F_{3z} * \frac{\cos(\beta_3)}{\cos(\gamma_3)} \quad (5.18)$$

$$F_z = F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} \quad (5.19)$$

Pro vyloučení extrémních hodnot koeficientů je vhodné se předem zbavit cosinů ve jmenovatelích, jelikož se mohou blížit nule, vynásobením příslušných řádků jejich součinem.

Po vyřešení některé z uvedených soustav lze zbývající dvě určit z jejich lineárních závislostí, například po určení F_{ix} :

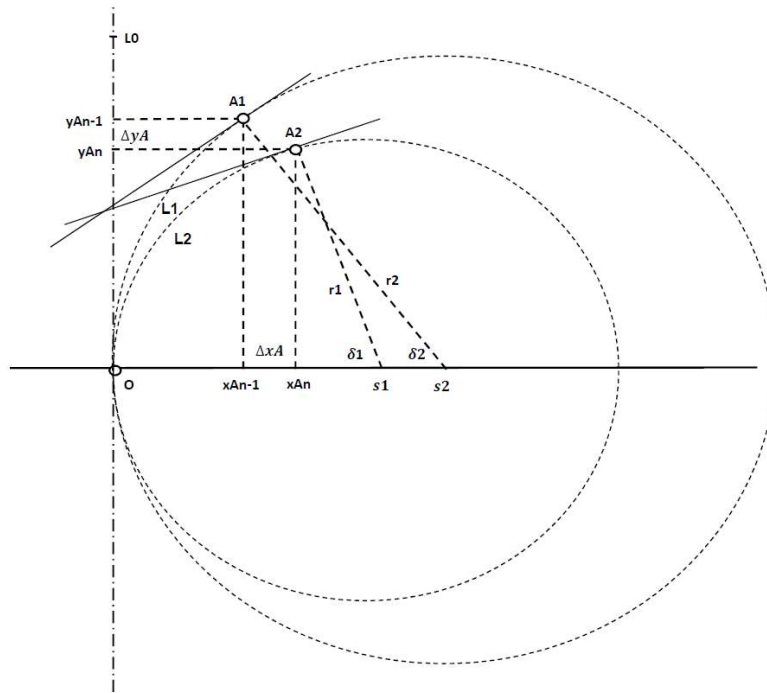
$$F_{iy} = F_{ix} * \frac{\cos(\beta_i)}{\cos(\alpha_i)} \quad (5.20)$$

$$F_{iz} = F_{ix} * \frac{\cos(\gamma_i)}{\cos(\alpha_i)} \quad (5.21)$$

3.3.5. Ohyb hadice vedené středem

Tento parametr je pro nás velmi důležitý, jelikož nám určuje, zda je náš cíl dosažitelný či nikoli. Je důležité podotknout, že pohony nedokážou vyvolat nekonečně velký moment a být nekonečně rychlé. Úsudkem lze říct, že jsme někde na hraně realizovatelnosti.

Zabýval jsem se výpočtem středu ohybu hadice, jelikož tento parametr je pro nás zajímavý z pohledu návrhu poměru L/R a celé konstrukce. Všechny použité parametry jsou vidět na obrázku 37.



Obrázek 37: Schéma výpočtu ohybu hadice

Budeme mít délku hadice L a úhel náklonu δ , poté dostávám poloměr křivosti r :

$$r = L/\delta \quad (6.1)$$

Dále můžu spočítat x_A a y_A a také Δx_A a Δy_A :

$$x_{A_n} = r * (1 - \cos(\delta)) \quad (6.2)$$

$$\Delta x_A = x_{A_n} - x_{A_{n-1}} \quad (6.3)$$

$$y_{A_n} = r * \sin(\delta) \quad (6.4)$$

$$\Delta y_A = y_{A_n} - y_{A_{n-1}} \quad (6.5)$$

Z toho dostávám koeficient k :

$$k = -\Delta x_A / \Delta y_A \quad (6.6)$$

Výsledná hodnota středu s se spočítá jako:

$$s = \frac{(y_{A_{n-1}} + y_{A_n})}{2} - k * \frac{(x_{A_{n-1}} + x_{A_n})}{2} \quad (6.7)$$

Hodnoty jsou vidět v tabulce:

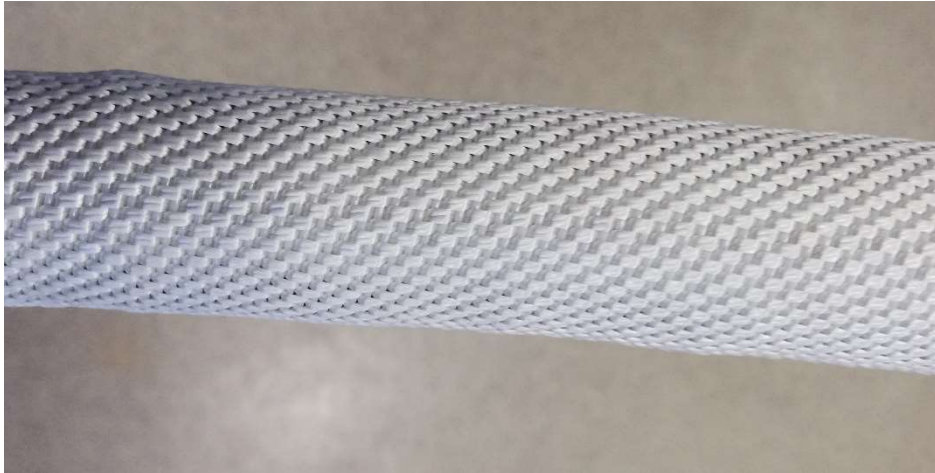
δ [°]	δ [-]	r [mm]	1/r [mm]	x _A [mm]	y _A [mm]	Δx_A [mm]	Δy_A [mm]	k [-]	s [mm]
0,0	0,000			0,00	100,00				
2,0	0,035	2864,8	0,000	1,75	99,980	1,745	-0,020	85,940	25,001
4,0	0,070	1432,4	0,001	3,49	99,919	1,744	-0,061	28,636	25,003
6,0	0,105	954,9	0,001	5,23	99,817	1,742	-0,101	17,169	25,007
8,0	0,140	716,2	0,001	6,97	99,675	1,739	-0,142	12,250	25,013
10,0	0,175	573,0	0,002	8,70	99,493	1,735	-0,182	9,514	25,021
12,0	0,209	477,5	0,002	10,43	99,271	1,729	-0,223	7,770	25,031
14,0	0,244	409,3	0,002	12,16	99,008	1,723	-0,263	6,560	25,043
16,0	0,279	358,1	0,003	13,87	98,705	1,715	-0,303	5,671	25,058
18,0	0,314	318,3	0,003	15,58	98,363	1,707	-0,342	4,989	25,074
20,0	0,349	286,5	0,003	17,28	97,982	1,698	-0,382	4,449	25,092
22,0	0,384	260,4	0,004	18,96	97,561	1,687	-0,421	4,010	25,113
24,0	0,419	238,7	0,004	20,64	97,101	1,676	-0,460	3,646	25,136
26,0	0,454	220,4	0,005	22,30	96,603	1,663	-0,498	3,339	25,160
28,0	0,489	204,6	0,005	23,95	96,067	1,650	-0,536	3,076	25,187
30,0	0,524	191,0	0,005	25,59	95,493	1,635	-0,574	2,849	25,216
90,0	1,571	63,7	0,016	63,6620	63,6620	0,825	-1,407	0,587	27,266

Tabulka 3: Tabulka středu ohybů hadice

Z tabulky lze vyčíst, že střed ohybu se na 100 mm v rozpětí úhlů 0-90 stupňů liší řádově v milimetrech. Lze říct, že střed ohybu bude vždy v jedné čtvrtině celkové délky hadice L .

Co se týká typu hadice, tak ta by měla být ideálně ohebná bez odporu, a tedy bez vzniku reakční síly. Měla by vydržet tlak alespoň 20 barů a velmi se neopotřebovat protékáním médiem. Tyto požadavky jsou v reálném světě nesplnitelné. Z pokusů je patrné, že toto by mohly splňovat dva typy hadic.

První typ hadice je ten, kde máme střed z gumy a horní oplet není do této gumy zalitý, tedy vlákna se dokážou lépe ohýbat (obrázek 38). Technické jméno této hadice je Industrial/SR.



Obrázek 38: Hadice s gumovým středem a volným opletem

Druhým typem by byla podobná hadice jako u sprchy. Měli bychom kroužkový (spirálový) oplet a uvnitř by byla gumová výplň (obrázek 39).



Obrázek 39: Spirálová hadice ke sprše

Experimentálně jsem testoval první zmiňovanou hadici. Natlakoval jsem ji na 8 barů a testoval její chování. Dle experimentu jsem kvalifikovaně odhadl, že aby bylo možné hadici ohnout, bude potřeba vynaložit přibližně o 20-30% větší sílu než u hadice nenatlakované.

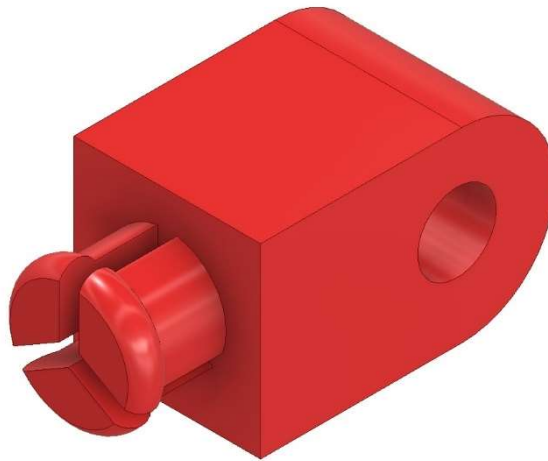
3.4. Canfield joint – konstrukční část

V této části popíši průběh konstruování laboratorního vzorku tohoto mechanismu. Celá výkresová dokumentace bude přiložena jako příloha.

3.4.1. Prvotní návrh konstrukce (malý vzorek, bez pohonů)

Nejdříve jsem si chtěl ověřit, zda tento mechanismus je funkční. Laicky řečeno, chtěl jsem si to „osahat“. Vzorek nebyl ani v měřítku a nesouhlasily ani poměry mezi rameny a ukotvením ramen (L/R). Chtěl jsem vědět, jestli má cenu pokračovat v úsilí a začít počítat kinematiku.

Nakonstruoval jsem manipulátor tak, aby ho bylo co nejjednodušší vytisknout na 3D tiskárně a ověřit princip. Nejhorším místem byl spoj dvou rotačních vazeb, který jsem vyřešil nerozebíratelným spojením, které lze použít pouze u plastu. Spojku lze vidět na obrázku 40.



Obrázek 40: Obrázek spojky u tištěného modelu Canfield jointu

Celý manipulátor jsem si „osahal“ a ověřil funkčnost. Začal jsem tedy s počítáním kinematiky a věnováním dalšího úsilí do této cesty. Na dalších snímcích lze vidět, jak celý manipulátor vypadal a že splňoval naše zadání.



Obrázek 41: Model vytisknutého manipulátoru Canfield joint

3.4.2. Návrh konstrukce pro laboratorní vzorek

Po ověření funkčnosti na vytisknutém vzorku, jsem začal konstruovat vzorek laboratorní. Bylo potřeba se v tomto ohledu podvolit všem náležitostem, které vyplývaly z kinematiky.

Zmíním pár podmínek, které jsem musel dodržet. První podmínkou bylo, že všechny části by měly být vyrobitelné na soustruhu konvenčním způsobem. Bylo to z důvodu co nejrychlejšího vyrobení a odzkoušení, jelikož konvenční soustruh máme k dispozici ve firmě.

Další podmínky vycházely ze samotné kinematiky. Bylo důležité zvolit si správný poměr L/R , se kterým souvisí i bod P_z . Více o tomto problému píše výše v kapitole 3.3.2.

Dále jsem musel mít rozmyšlenou kalibrační polohu. Bylo více možností, jak plošinu kalibrovat. Více je v kapitole 3.4.4. Dále bylo důležité zajistit dosažení úhlu $\gamma = 90$ stupňů. Na to jsem musel myslet při samotné konstrukci, jelikož limitace tohoto úhlu zřejmě souvisí pouze s konstrukcí.

Poslední podmínkou bylo myslet na vůle. Fixní pozice horní plošiny stolku je dána třemi komplexními klouby A_i a ložisky klouby B_i . A_i jsou komplexní klouby, které se skládají ze dvou rotačních vazeb v ose ramene a jedním rotačním pohybem kolmo k ramenu. To znamená, že i jejich malá vůle, jak axiální, tak radiální, může v důsledku dlouhých ramen výrazně ovlivnit stabilitu plošiny, a hlavně její přesnost. Proto by měly být všechny klouby

vyrobené s velkou přesností. Nesmím opomenout, že bylo důležité myslet i na samotnou montáž všech komponent.

Všechny jednotlivé komponenty rozeberu a popíší, proč jsem je konstruoval tak, jak jsem je konstruoval. Většina dílů je z duralu, dva tištěné díly jsou z PLA a hřídele jsou kvůli obrobitelnosti z mosazi. Chtěl jsem volit nerez, ovšem u té je obrobitelnost horší.

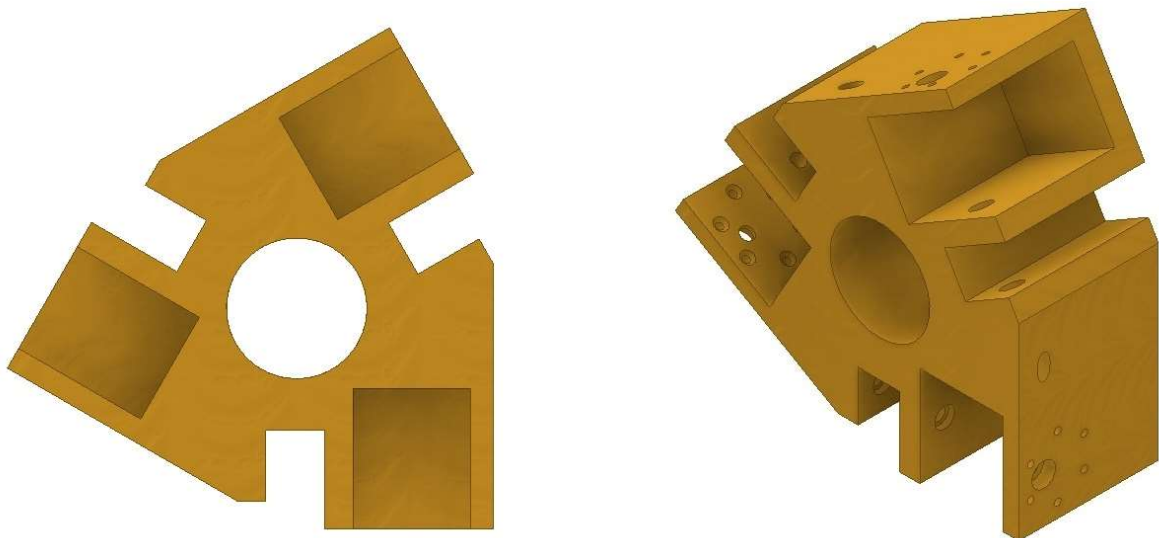
a) Základní plošina J1

Základní plošina byla asi nejkomplicovanějším dílem. Byla zkonstruována tak, aby byla vytisknutelná na 3D tiskárně. Byl to jeden ze dvou dílů, které byly tisknuty. Druhým dílem byla Horní plošina J2. Průběh tisku je vidět na obrázku 42.



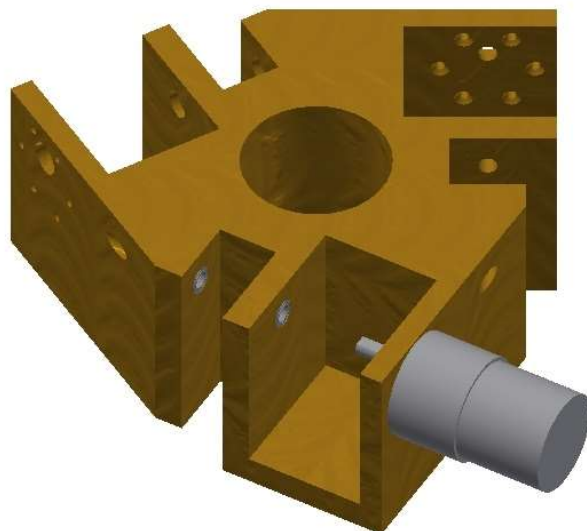
Obrázek 42: Průběh tisknutí Základní plošiny J1

Na obrázku 43 jsou vidět pohledy z různých úhlů na samotnou plošinu.



Obrázek 43: Základní plošina J1

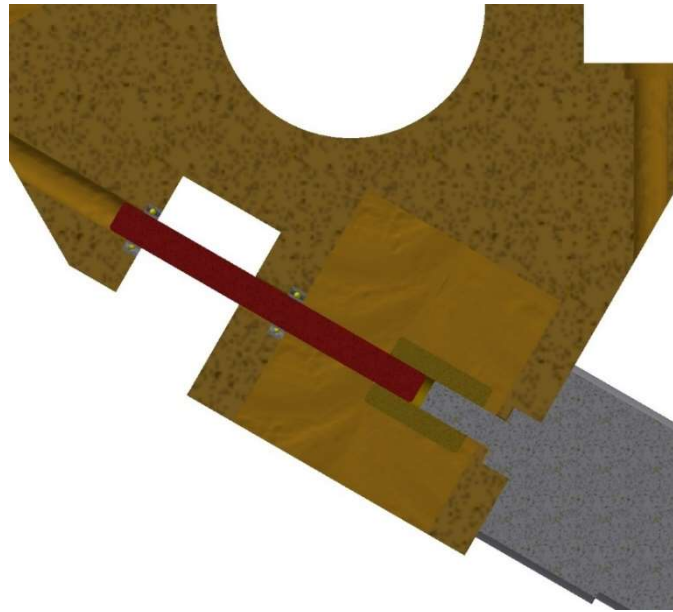
U tohoto dílu bylo hned několik úskalí, která byla potřeba vyřešit. Prvním z nich bylo uchycení motorů k základní plošině. Jedním z nápadů bylo vytvořit mezikus mezi motorem a plošinou. Ten by byl navržen, až ve chvíli, kdy by byly motory vybrány. Nakonec se od této varianty upustilo, jelikož před začátkem tisknutí byly motory už vybrány. Jedinou výhodou by to mělo, kdybychom chtěli motory vyměnit za jiné, aniž bychom museli vyměnit celou základní plošinu, která se tiskla bez mála dva dny. Takto bychom mohli vyměnit jen mezikus mezi motorem a základní plošinou. Motory s plošinou jsou vidět na obrázku 44.



Obrázek 44: Základní plošina J1 s motorem

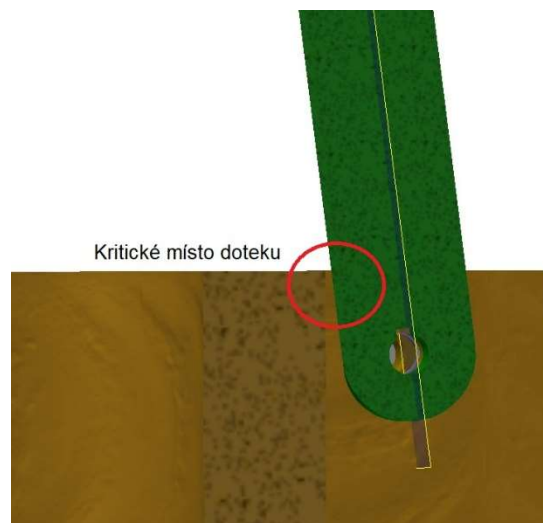
S tímto problémem se pojil problém další. Hřídel od motoru byla krátká. Pomohl jsem si tedy vlastní hřídelí a spojkou, která spojovala hřídel s motorem (obrázek 45).

Dalším problémem bylo vlisování ložisek. Ložiska se musela lisovat ze strany, tudíž jedno ze dvou ložisek se neopíralo přímo o stěnu, což se nakonec nejevilo jako problém. Větším problémem bylo vyvrtat díry tak, aby celá sestava byla v ose (obrázek 45).



Obrázek 45: Řez v ose hřídele

Posledním a asi nejdůležitějším problémem bylo vědět, do jakých záporných úhlů se mohou ramena vytočit při elevaci 90 stupňů. Tuto informaci jsem dostal výpočtem kinematiky a při konstrukci na to byl brán ohled (obrázek 46).

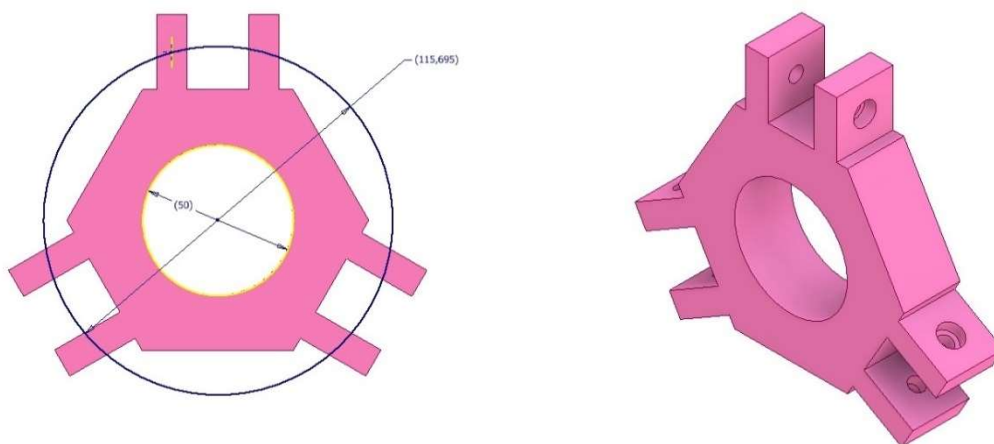


Obrázek 46: Kritické místo pro splnění požadavku elevace 90 stupňů

Byl samozřejmě dodržen poměr, který jsem si stanovil, tedy průměr ukotvení kloubů byl 115,7 mm a otvor pro hadici byl 50 mm.

b) Horní plošina J2

Horní plošinu jsem konstruoval tak, aby se dala také vytisknout na 3D tiskárně, jelikož to byl druhý díl, který se takto vyráběl. Je vidět, že jsem počítal s otvorem pro hadici, který je 50 mm. Zakotvení jednotlivých kloubů B_i' je 115,7 mm. Je tedy symetrická s plošinou základní. Plošina je vidět na obrázcích 47.

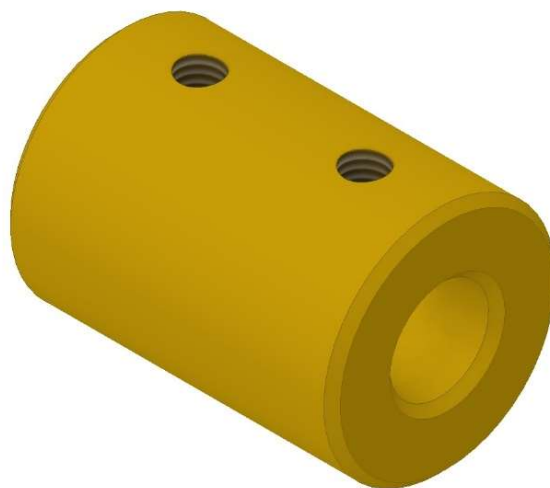


Obrázek 47: Horní plošina J2

Další důležitou věcí bylo uložení kuličkových ložisek. Jelikož tiskárna nedokáže vytisknout perfektně díru, pokud ji tiskne v ose z, tak jsem zde nechal menší otvory. Na testovacím vzorku jsem si vyzkoušel, jakým vrtákem díry vyvrtat tak, aby tam byla ložiska správně vlisována.

c) Spojka J1

Spojka je soustružený díl, který spojuje hřídel motoru s hřídelí pohánějící rameno. Volil jsem pevnou spojku z několika důvodů. Dle mého názoru nebylo nutné volit spojku pružnou a hlavním důvodem byla náročnost výroby vlastní pružné spojky, jelikož prodávané pružné spojky nesplňovaly mé požadavky. Na obou koncích hřídelí byla plocha. Zajištění bylo pomocí šroubů, přes které se přenášel také pohyb. (obrázek 48).



Obrázek 48: Spojka J1

d) Hřídel J1

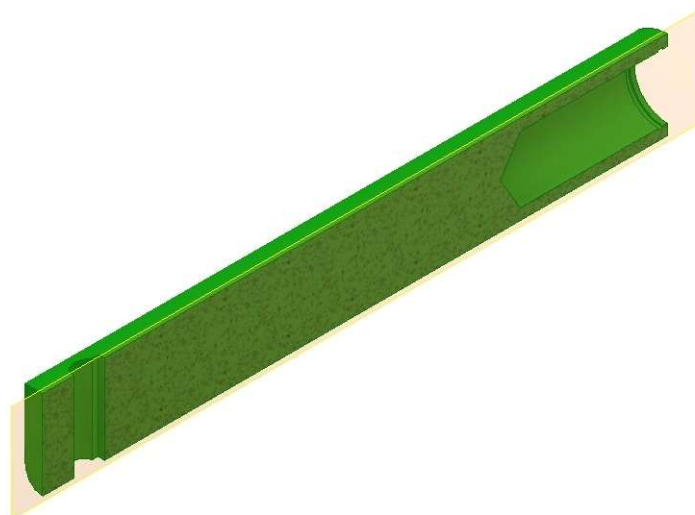
Hřídel měla na jednom konci zbrošenou plochu pro ukotvení pomocí šroubu a na druhé straně měla drážku pro pero. Pomocí pera přenášela pohyb na rameno (obrázek 49).



Obrázek 49: Hřídel J1

e) Rameno J1

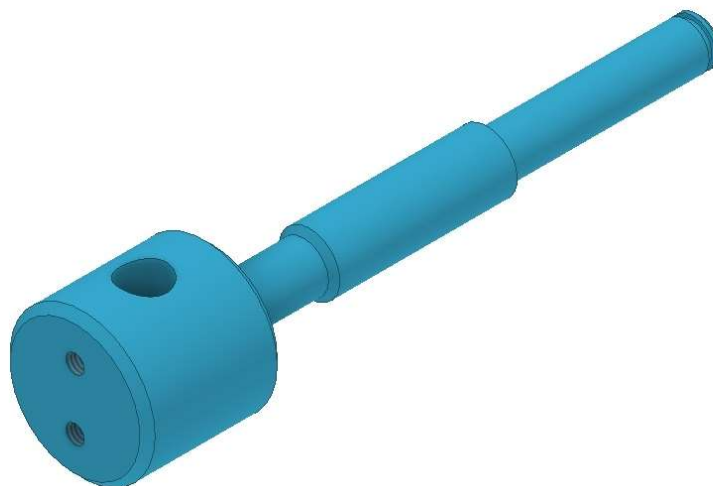
Rameno J1, ve kterém se nachází díra pro dvě ložiska. Dvě ložiska jsem zvolil z důvodu vůlí a únosnosti. Zajištění bylo pomocí pojistného kroužku. Na druhé straně je vidět díra s drážkou pro pera, pro přenos pohybu z Hřídele J1 (obrázek 50).



Obrázek 50: Řez ramenem J1

f) Spojka J2

Velmi komplikovaným dílem na výrobu byla Spojka J2 (obrázek 51). Na užší části byla nasunuta dvě ložiska rozdělná pomocí distanční trubky a zajištěna pojistným kroužkem. Druhá část se nasunula na hřídel a spojila se Spojkou J3. Přenos pohybu byl zajištěn pomocí šroubů.



Obrázek 51: Spojka J2

g) Spojka J3

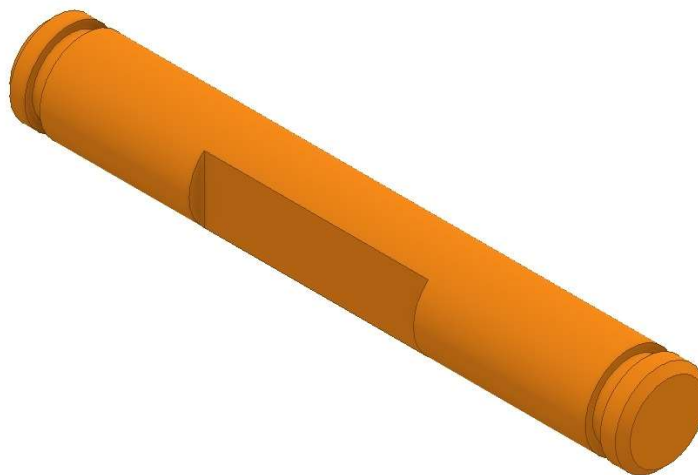
Spojka J3 byla nejkomplicovanější díl na výrobu. Velký problém zde byl s výřezem pro Spojku J2. Pokud by tam tento výřez nebyl, mechanismus by nemohl dosáhnout úhlu elevace 90 stupňů. Do otvorů se lisovaly ložiska. Na druhé straně byl naprosto stejný princip jako u Spojky J2 (obrázek 52).



Obrázek 52: Spojka J3

h) Hřídel J2

Hřídel J2 sloužila k propojení Spojek J2 a J3. Zajištění bylo pomocí pojistného kroužku a přenos pohybu pomocí šroubů (obrázek 53).



Obrázek 53: Hřídel J2

i) Hřídel J3

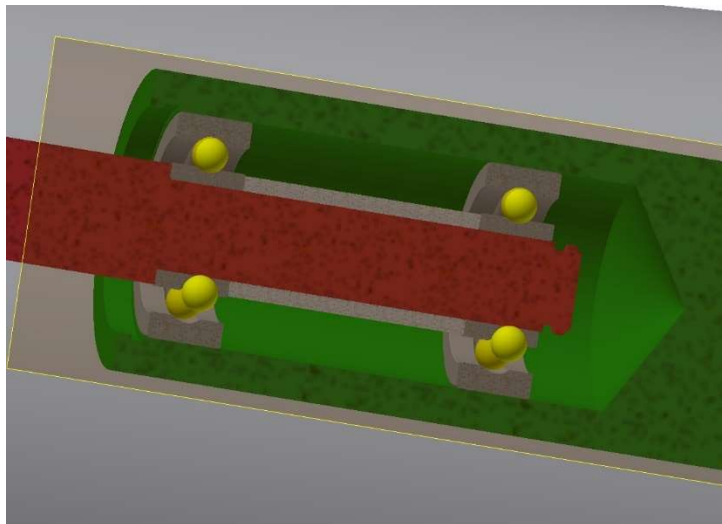
Hřídel J3 byla delší než Hřídel J2 a složila k propojení Spojky J2 s Horní plošinou J1. Princip je stejný jako u předchozí Hřídele J2. Jen přenos pohybu z Ramene J1 byl pomocí pera (obrázek 54).



Obrázek 54: Hřídel J3

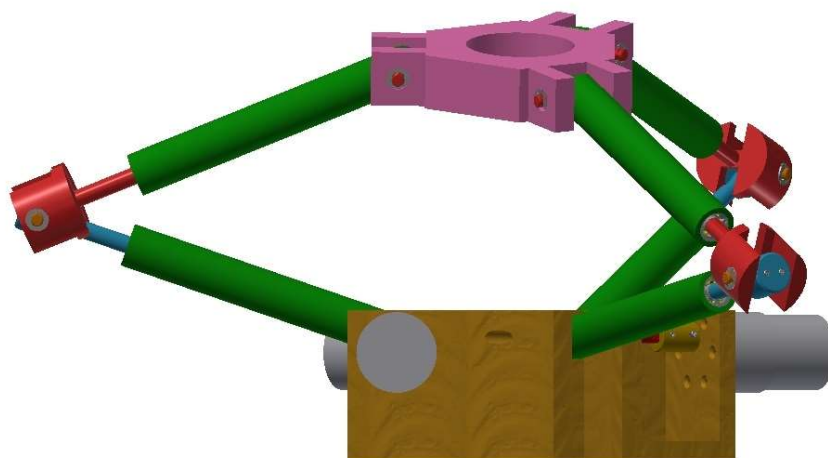
j) Distanční trubka J1

Distanční trubka sloužila k rozepření ložisek uvnitř Ramena J1. Čím větší by byla mezera mezi ložisky, tím vymezíme menší axiální vůli (obrázek 55).

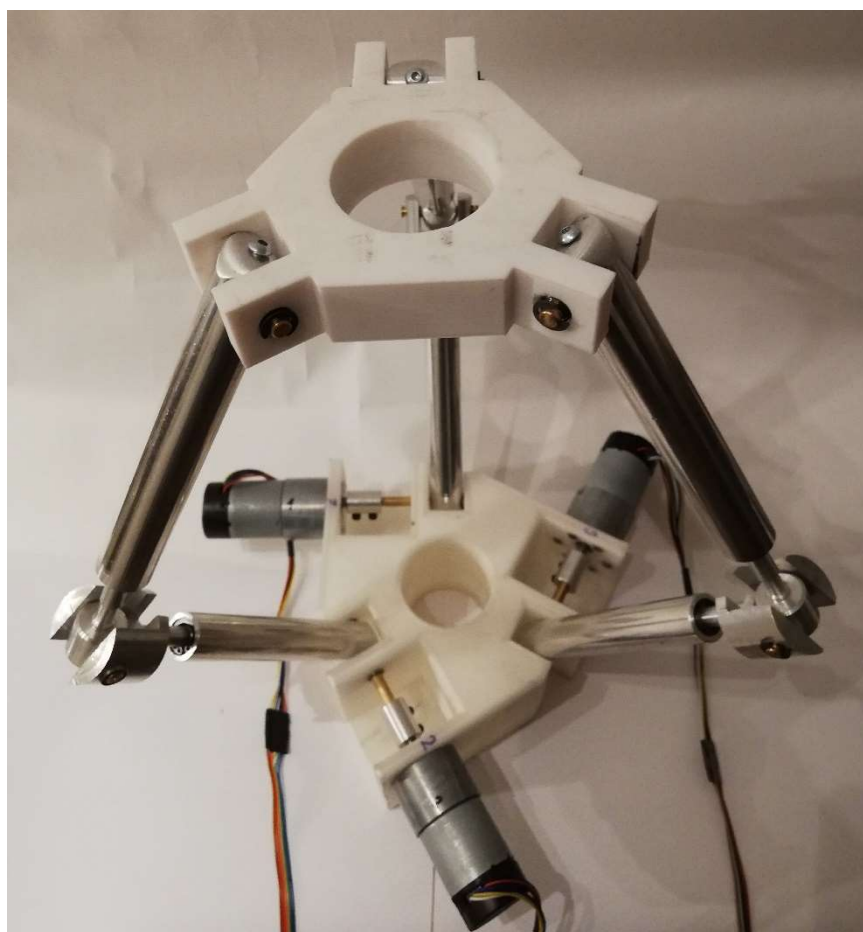


Obrázek 55: Uložení ložisek v Ramenu J1

Myslím si, že popis konstrukce je detailně popsán. Na obrázku 56 je vidět celý manipulátor v modelu a na obrázku 57 je manipulátor složený v reálu.



Obrázek 57: Model Canfield jointu



Obrázek 56: Laboratorní vzorek Canfield jointu

3.4.3. Výběr komponent

Na výběru komponent velmi záleželo. Nejtěžší bylo vybrat vhodné pohony. Od pohonů jsem očekával velký moment a přesné měření své pozice. Ideální by pro mě byly motory krokové. Také jsem chtěl dát přednost motorům s napětím 24 V. Dalším parametrem byl převod. Potřeboval jsem docílit 1 ot/s, což by znamenalo velký převodový poměr.

Nakonec kvůli časové náročnosti vývoje plošného spoje a ceně motorů, jsem dal přednost DC motorům s napájením 12 V a enkodérem, který měl 2096 impulsů na otáčku, tedy měl jsem 5,82 impulsu na úhlový stupeň. To určovalo přesnost našeho manipulátoru. Jednalo se o motory DF-FIT0185 (obrázek 58).



Obrázek 58: DF-FIT0185

Motory měly převodovku s převodovým poměrem 131:1. Převodovka se nakonec ukázala jako velmi slabé místo (obrázek 59).

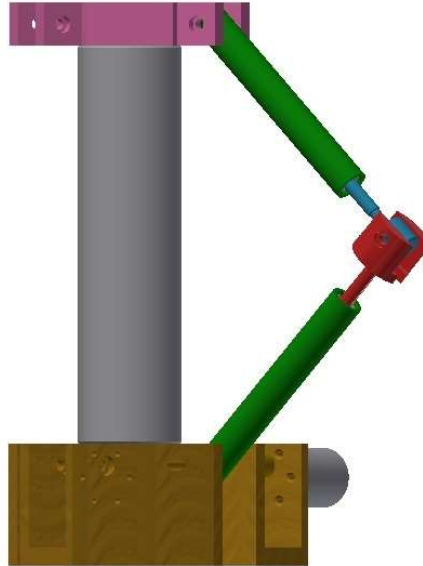


Obrázek 59: Převodovka u motoru DF-FIT0185

Dalšími komponenty byla ložiska a spojovací materiál. Ložiska jsem všude volil kuličková.

3.4.4. Kalibrace

Kalibrace byla jedna z nejdůležitějších věcí. U konstrukce jsem přemýšlel, jak plošinu po zapnutí kalibrovat. První možností bylo použít koncové spínače a provést kalibraci softwarově. Nakonec jsem se rozhodl tento laboratorní vzorek kalibrovat ručně, tedy podle kalibračního válce, který lze vidět na obrázku 60. Kalibrační poloha byla odvozena od výchozí polohy a



Obrázek 61: Výchozí kalibrační poloha, kalibrační válec je vyrobený ze silonu

bodů P_z . Ramena mezi sebou mají téměř pravý úhel. Kalibrace probíhá tak, že se plošina díky kalibračnímu přípravku navede do základní polohy a poté se zapne napájení a enkodéry počítají s tím, že jsou ve výchozí poloze. V programu je i pokyn načíst výchozí polohu, bez nutnosti vypnutí manipulátoru. Na obrázku 61 lze vidět laboratorní vzorek v kalibrační poloze.



Obrázek 60: Canfield joint kalibrační poloha

3.5. Canfield joint – elektronika a software

Elektroniku a software jsem přímo neřešil já sám, řešil jsem ho s kolegy. Těm jsem zadal, co od nich potřebuji. Posun a výsledek jejich práce jsem s nimi konzultoval.

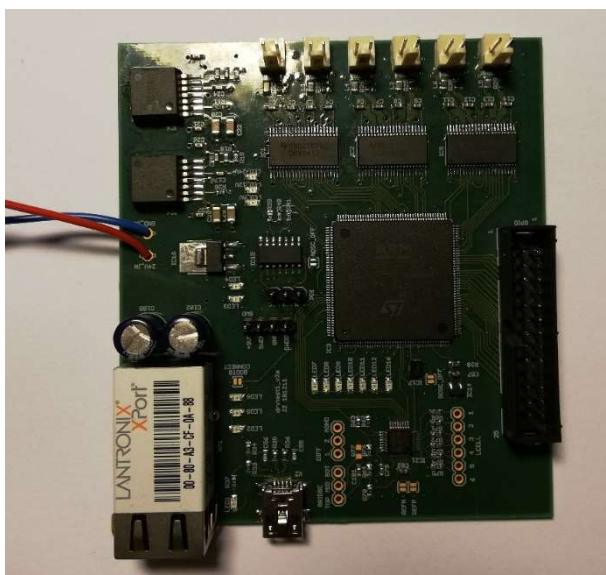
3.5.1. Zadání pro elektroniku a software

Zadání vycházelo z mých požadavků pro laboratorní vzorek. Požadavek byl vytvořit elektroniku, která dokáže ovládat a budít motor a bude mít slušný výpočetní výkon pro výpočet poloh pro plošinu, jelikož jsme se domluvili, že nebudeme zadávat do programu tabulkové hodnoty, ale budeme počítat hodnoty podle vzorců v reálném čase.

Dalším úkolem bylo naprogramovat základní program k ovládní plošiny. Jak jsem zmiňoval výše, hodnoty, jak se motory mají natáčet, jsme počítali v reálném čase. Dalším požadavkem bylo možné nastavování parametrů plošiny a konání samotného rotačního pohybu. Interpolace pohybu se provádí s frekvencí jedné milisekundy. Tato hodnota je nastavitelná. Motory byly testovány až na 10 ms, což stále regulátor zvládal regulovat. Co se týká možnosti nastavení do námi zvolené polohy a přejíždění z polohy do polohy, nebylo zatím předmětem zadání v tomto kole.

3.5.2. Rámcové řešení

Nakonec jsem své požadavky změnil z důvodu úspory času a financí. Jelikož se společně s mým projektem vyvíjelo řízení lineárních aktuátorů pro jiný projekt a plošný spoj se vyrobil jeden náhradní, tak jsem tento spoj využil. Přizpůsobil jsem výběr motorů. Vybral jsem DC motory, na které byla deska navrhnutá. Výpočetní výkon byl dostatečný. Deska je vidět na obrázku 62.



Obrázek 62: Navrhnutá deska pro řízení motorů

Následovalo oživení desky a seznámení se s enkodéry. Program byl naprogramován tak, že se zvolí parametry azimutu a elevace a rychlost otáčení. Nastavit lze i výchozí poloha, tedy provést kalibraci. Dalším příkazem je přejetí do výchozí polohy. Plošina se zatím ovládá pomocí příkazů z programu Tera term.

3.6. Srovnání výsledného laboratorního vzorku s modelem

Pokud budu srovnávat laboratorní vzorek s kinematickým modelem, tak laboratorní vzorek funguje dle představ. Ačkoli jsem konstruoval díly tak, aby zde docházelo k minimálním vůlím, i přesto jsou vůle natolik velké, že celý mechanismus se rozkalibrovává při pohybu. Jednak vůle způsobují ložiska, která jsou v plastových dílech a mnohdy v propojení hřídele motoru s Hřídélí J1. Největší vůle vzniká v zakoupených převodovkách u motoru. Zde vůle dosahují i několika stupňů. Způsob kalibrace není také vhodným řešením.

3.7. Možné úpravy a vylepšení následného prototypu

V předchozí kapitole jsem zmínil hlavní nedostatky a v této se pokusím nastínit, jak by se tyto nedostatky daly odstranit.

3.7.1. Kalibrace

Kalibrace je v podstatě tou nejdůležitější procedurou. Dle mého názoru, by se měla prvotní kalibrace provádět pomocí koncových spínačů, které by sloužily i jako bezpečnostní prvek, tudíž by manipulátor nemohl dojet do nějaké špatné polohy. V praxi se jednoduše může stát, že se manipulátor vypojí od napájení a bude se volně hýbat s rameny. Tento problém bych vyřešil kruhovými potenciometry. Jediná jejich nevýhoda je, že vydrží milion cyklů. Při přepočtu je to necelých 300 hodin práce při plném výkonu.

3.7.2. Mechanické vůle

Mechanických vůlí způsobených konstrukcí by se zamezilo, pokud by všechna ložiska byla lisovaná a zároveň lepená lepidlem. Všechny spoje by byly vyrobeny s maximální přesností, kterou dovoluje dnešní výroba. Dalším faktorem by byl výběr vhodnějších materiálů.

3.7.3. Motory a převodovka

U motorů bych byl pro zvolení krokových motorů, s velmi kvalitně vyrobenou planetovou převodovkou. Problémem je fakt, že za nějaký čas se v převodovce stejně vymezí malé vůle. Druhou možností je zvolit takzvané DC Flat motory, které samy o sobě točí do pomala a tudíž by převodovka k motorům nebyla potřeba.

3.7.4. Software pro jednodušší ovládání

Největší změny by byly v softwaru, kde je ještě mnoho nedostatků. Dá se říci, že software jako takový není žádný, kromě základních pokynů na desce. Manipulátor by měl samotný program, kde by byly dva režimy ovládaní.

První by byl rotační pohyb, kde by si uživatel nastavil elevaci a rychlost otáčení a tlačítko start. Druhý by byl režim manuální, kde by se dalo přejíždět manuálně pomocí joysticku z jedné polohy do druhé. Toto by se naprogramovalo jako přejezd po kulové ploše.

4. Závěr

Cílem práce bylo vybrat nebo vymyslet paralelní manipulátor, který dokáže napodobit rotační pohyb.

V teoretické části jsem začal historií robotiky a poté jsem rozdělil manipulátory do dvou skupin. Rozdělil jsem je podle kinematické struktury na sériové a paralelní. Zmínil jsem jejich hlavní zástupce. Nalezl jsem dva paralelní manipulátory, které splňovaly zadání. Jinými slovy mimo jiné dokážou nahradit rotační pohyb.

V praktické části jsem zmínil další dva manipulátory, které nás napadly s kolegy při hledání vhodného mechanismu. Z těchto čtyřech jsem si vybral Canfield joint. Bylo to z toho důvodu, že by nejlépe mohl splnit zadané parametry.

U Canfield jointu jsem popsal kinematiku a silové poměry. Nakonstruoval jsem všechny díly a složil dohromady laboratorní vzorek. Kolegové vyrobili a naprogramovali elektroniku. Na laboratorním vzorku jsem si ověřil funkčnost a ověřil jsem základní mechanické parametry. Prvními parametry byly elevace a azimutu. Canfield joint skutečně dokáže napodobit rotační pohyb, kde elevace je $k \cdot 360$ a azimut může nabývat hodnot 0-90 stupňů. Toto jsem ověřil pomocí řízení manipulátoru. Rychlost otáčení může být velmi vysoká. Zde je ovšem nutné vzít v potaz, že rychlost velmi záleží na síle, kterou budeme vyžadovat. Sílu, kterou je schopen manipulátor vynaložit, na tomto laboratorním vzorku nebylo možné ověřit.

Na svět se vynořilo mnoho problémů spojených s tímto mechanismem a s konstrukcí. Mechanismus je velmi náchylný na jakékoli vůle. Vůle byly způsobeny jednak konstrukcí a výrobou, ale hlavně nekvalitou převodovky u motoru. Dále je potřeba vymyslet přesnou kalibraci a doplnit mechanismus o kruhové potenciometry.

Pokud se podívám na software, tak na něm bude nejvíce práce. Bude potřeba vyvinout software, který bude podporovat dva režimy řízení. Prvním režimem bude režim rotační, druhým režimem bude přejíždění z polohy do polohy pomocí joysticku. Vše by mělo být v uživatelsky přehledném prostředí.

K vyvinutí prototypu použitelného v reálné úloze zbývá dost práce. Největším problémem této myšlenky jsou silové poměry a špatné ohybové vlastnosti hadice. Myslím si, že nahrazení rotačního pohybu v této míře, v jaké to požadujeme, není momentálně možné jednoduše dosáhnout. Na druhou stranu se tento manipulátor hodí pro ostatní práce v potrubí. Do budoucna bych chtěl překonat zmíněné problémy a vytvořit prototyp, který by byl využitelný pro naši aplikaci v praxi.

5. Seznam obrázků

Obrázek 1: Ron James Wensley se svým robotem Televox [21]	9
Obrázek 2: První průmyslový robot Unimate 1900 [22]	10
Obrázek 3: Sériový manipulátor IRB-6 [22]	11
Obrázek 4: První paralelní mechanismus patentovaný Jamesem Gwinnettem [8]	12
Obrázek 5: Goughova platforma pro testování pneumatik [8]	12
Obrázek 6: Stewartova plošina pro letecký simulátor [8]	13
Obrázek 7: Paralelní předchůdce Delta robota Freddy [22]	13
Obrázek 8: Obrázek příkladu, jak počítat stupně volnosti	14
Obrázek 9: Typy kloubů [16]	15
Obrázek 10: Kinematické schéma sériového manipulátoru	17
Obrázek 11: Kinematické schéma šestiosého robota [4]	18
Obrázek 12: Šestiosý robot firmy Fanuc [18]	18
Obrázek 13: Kinematické schéma paralelního manipulátoru [3]	19
Obrázek 14: Kinematické schéma Delta robota [6]	20
Obrázek 15: Pocketdelta robot společnosti Asyrl AS [16]	21
Obrázek 16: Kinematické schéma Stewartovi platformy [11]	22
Obrázek 17: Taylor Spatial Frame [19]	23
Obrázek 18: Létařící simulátor využívající Stewartovu platformu [23]	23
Obrázek 19 a: Omni-wrist III [2] Obrázek 19 b: detail Omni-wristu III [2]	24
Obrázek 20: Wide angle gimbal	24
Obrázek 21: Kinematické schéma Canfield jointu [12]	25
Obrázek 22: Použití Canfield jointu u NASA [17]	26
Obrázek 23: Pohled na stávající řešení rotačního pohybu	28
Obrázek 24: Mechanismus podobný Stewartově plošině, který má čtyři stupně volnosti	31
Obrázek 25: Manipulátor podobný Stewartově plošině se třemi stupni volnosti	31
Obrázek 26: Pavlův manipulátor	32
Obrázek 27: Model Pavlova manipulátoru	33
Obrázek 28: Azimut a elevace	33
Obrázek 29: Kinematické schéma Omni-wristu III	34
Obrázek 30: Omni-wrist III	34
Obrázek 31: Připevnění aktuátorů k Omni-wristu III	35
Obrázek 32: Canfield joint s vyznačenou rovinou symetrie	36
Obrázek 33: Canfield joint, pohled osou z	39
Obrázek 34: Deskriptiva pro A_3	42
Obrázek 35: Zjednodušené schéma dynamiky	47
Obrázek 36: Nejednodušené dynamické schéma Canfield jointu	47
Obrázek 37: Schéma výpočtu ohybu hadice	50
Obrázek 38: Hadice s gumovým středem a volným opletem	52
Obrázek 39: Spirálová hadice ke sprše	52
Obrázek 40: Obrázek spojky u tištěného modelu Canfield jointu	53
Obrázek 41: Model vytisknutého manipulátoru Canfield joint	54

Obrázek 42: Průběh tisknutí Základní plošiny J1.....	55
Obrázek 43: Základní plošina J1	56
Obrázek 44: Základní plošina J1 s motorem.....	56
Obrázek 45: Řez v ose hřídele	57
Obrázek 46: Kritické místo pro splnění požadavku elevace 90 stupňů.....	57
Obrázek 47: Horní plošina J2.....	58
Obrázek 48: Spojka J1.....	59
Obrázek 49: Hřídel J1.....	59
Obrázek 50: Řez ramenem J1	60
Obrázek 51: Spojka J2.....	60
Obrázek 52: Spojka J3.....	61
Obrázek 53: Hřídel J2.....	61
Obrázek 54: Hřídel J3.....	62
Obrázek 55: Uložení ložisek v Ramenu J1	62
Obrázek 57: Laboratorní vzorek Canfield jointu	63
Obrázek 56: Model Canfield jointu	63
Obrázek 58: DF-FIT0185	64
Obrázek 59: Převodovka u motoru DF-FIT0185	65
Obrázek 61: Canfield joint kalibrační poloha	66
Obrázek 60: Výchozí kalibrační poloha, kalibrační válec je vyrobený ze silonu	66
Obrázek 62: Navrhnutá deska pro řízení motorů.....	67

6. Seznam tabulek

Tabulka 1: Tabulka, která srovnává splnění požadavků u jednotlivých manipulátorů.....	38
Tabulka 2: Tabulka možných poměrů L/R.....	44
Tabulka 3: Tabulka středu ohybů hadice	51

7. Seznam grafů

Graf 1: Průběhy úhlů $\beta_1, \beta_2, \beta_3$	45
Graf 2: Průběhy úhlů β_1, ϕ	46

8. Seznam příloh

Příloha 1: 50076-J-00-01 Canfield joint J1

Příloha 2: 50076-J-01 Základní plošina J1

Příloha 3: 50076-J-02 Horní plošina J1

Příloha 4: 50076-J-03 Spojka J1

Příloha 5: 50076-J-04 Hřídel J1

Příloha 6: 50076-J-05 Rameno J1

Příloha 7: 50076-J-06 Spojka J2

Příloha 8: 50076-J-07 Spojka J3

Příloha 9: 50076-J-08 Hřídel J2

Příloha 10: 50076-J-09 Hřídel J3

Příloha 11: 50076-J-10 Distanční trubka J1

Příloha 12: 50076-J-12 Kalibrační přípravek J1

9. Seznam použité literatury

- [1] GALLARDO-ALVARADO, JAIME. Kinematic Analysis of Parallel Manipulators by Algebraic Screw Theory. Springer International Publishing AG. 399 p. ISBN: 978-3-319-31124-1.
- [2] J. SOFKA ; V. SKORMIN ; V. NIKULIN ; D.J. NICHOLSON. Omni-Wrist III - a new generation of pointing devices. Part II. Gimbals systems - control. 2006.
- [3] JIN HUANG, Y. H. CHEN. Udwadia-Kalaba Approach for Parallel Manipulator Dynamics. 2011.
- [4] JIŘÍ SKAŘUPA. Průmyslové roboty a manipulátory. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 p. URL <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf>.
- [5] JOSEF SOFKA. Wide Angle Gimbal. URL <<http://sofka.org/portfolio/gimbal/>>.
- [6] JOSEPH Q. OBERHAUSER. Design, Construction, Control, and Analysis of Linear Delta Robot. Ohio : Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, 2016-04.
- [7] JOZEF SOFKA. A New Generation of Gimbals Systems for Laser Positioning Applications. 2002-6.
- [8] MARTIN ŠVEJDA. Kinematika robotických architektur. Plzeň : ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. URL <<http://home.zcu.cz/~msvejda/URM/materialy/KinematikaRobotArchitektur.pdf>>.
- [9] MUSTAFA JABBAR HAYAWI. The Closed Form Solution of the Inverse Kinematics of a 6-DOF Robot. Computer Science Department Education College Thi - Qar University. URL <https://www.academia.edu/5947721/The_Closed_Form_Solution_of_the_Inverse_Kinematics_of_a_6-DOF_Robot>.
- [10] ROBERT L. WILLIAMS II. The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions. Ohio : Mechanical Engineering, Ohio University, 2016.
- [11] SAITHIP LIMTRAKUL. Supervised learning based on the self-organizing maps for forward kinematic modeling of Stewart platform. 2016-8.
- [12] STEPHEN LEE CANFIELD. Development of the Carpal Wrist; a Symmetric, Parallel-Architecture Robotic Wrist. Blacksburg, Virginia : Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997-05-21.
- [13] TOMÁŠ KOZÁK. Paralelní kinematické struktury. URL <http://mech.fsid.cvut.cz/wp-content/uploads/2015/11/BP_Zavrel_Kozak.pdf>.
- [14] VÁCLAV HLAVÁČ. ROBOT KINEMATICS. . Czech Technical University in Prague Faculty of Electrical Engineering, Department of Cybernetics Center for Machine Perception. URL <https://cw.fel.cvut.cz/old/_media/courses/a3m33iro/020kinematicsen.pdf>.
- [15] YOUSEF SHATNAWI. Robotic Industrial Manipulator

- [16] Asyriil. URL <<https://www.asyriil.com/fr/produits/robots-delta.html>>.
- [17] CEV Gimbal and Array Tracking Animation. URL <<https://www.dailymotion.com/video/x2zn94o>>.
- [18] FANUC. URL <<https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/%C5%99ada-m-900/m-900ib-360>>.
- [19] Limb lengthening and reconstruction: Taylor Spatial Frame. URL <<https://www.aboutkidshealth.ca/Article?contentid=2543&language=English>>.
- [20] Roboty a manipulátory. . Učební text VOŠ a SPŠ Kutná Hora. URL <http://www.edumat.cz/texty/Roboty_manipulatory.pdf>.
- [21] cyberneticzoo.com a history of cybernetic animals and early robots URL <<http://cyberneticzoo.com/robots/1927-televox-wensley-american/>>.
- [22] Prof. Ing. Petrovi Hubinskému, PhD. ENCYKLOPÉDIA POZNANIA URL <https://encyklopediapoznania.sk/clanok/6699/historia-robotiky-2-od-roku-1942-v-rokoch#_ftn16>
- [23] Flight simulator < http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Flight_simulator>
- [24] David Janouch. Výhody paralelních robotických manipulátorů. 2019