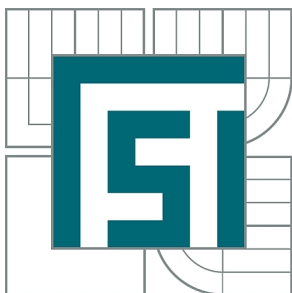


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

STEWARTOVA PLATFORMA – MODEL

STEWART PLATFORM – MODEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUKÁŠ TĚŠICKÝ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ BŘEZINA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lukáš Těšický

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

Stewartova platforma – model

v anglickém jazyce:

Stewart platform – model

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stewartova platforma je paralelní manipulátor (tedy s uzavřeným kinematickým řetězcem) s šesti stupni volnosti. Využití nachází například jako platforma pro letecké simulátory nebo platforma pro manipulaci s velkými anténami a podobně. Cílem práce bude sestavit řešerši popisující možné využití paralelních mechanismů (včetně Stewartovy platformy) v průmyslu a sestavit multi-body mechatronický model Stewartovy platformy v MSC Adams vhodný pro pozdější návrh stavového řízení.

Cíle bakalářské práce:

- 1) sestavit řešerši popisující možné využití paralelních manipulátorů (včetně Stewartovy platformy) v průmyslu
- 2) sestavit multi-body mechatronický model Stewartovy platformy v MSC Adams vhodný pro pozdější návrh stavového řízení

Seznam odborné literatury:

Merlet, J. P.: Parallel robots, 2nd Edition. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2005

Siciliano, B., et al.: Robotics: Modelling, planning and control. Springer. 2009

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Březina, Ph.D.

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

V Brně, dne 18.11.2014

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vytvořením multi-body mechatronického modelu Stewartovy platformy v softwaru MSC Adams. Dále je také zaměřena na možnosti využití Stewartovy platformy a dalších paralelních mechanismů v průmyslu.

Klíčová slova

Stewartova platforma, Paralelní robot, Multi-body model, MSC Adams, Co-simulace

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the creation of a multi-body mechatronic model of a Stewart platform in MSC Adams. There are also analyzed possibilities of utilization of the Stewart platform and other parallel manipulators in the industry.

Keywords

Stewart platform, Parallel robot, Multi-body model, MSC Adams, Co-simulation

Bibliografická citace

TĚŠICKÝ, L. *Stewartova platforma – model*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Březina, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Stewartova platforma – model* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu použité literatury.

V Brně dne 28.5.2015

Lukáš Těšický

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Březinovi, Ph.D. za vedení, odborné konzultace a cenné rady poskytnuté při zpracovávání bakalářské práce.

Obsah

Obsah	4
1 Úvod	6
2 Průmyslové roboty	7
2.1 Historie průmyslových robotů	7
2.2 Sériové roboty	8
2.2.1 Nevýhody	8
2.2.2 Výhody	8
2.3 Paralelní roboty	8
2.3.1 Nevýhody	9
2.3.2 Výhody	9
2.4 Historie paralelních robotů	10
2.4.1 První patenty	10
2.4.2 Goughova, Stewartova, nebo Cappelova platforma ?	11
3 Využití v průmyslu	14
3.1 Obráběcí stroje	14
3.2 Tvářecí stroje	14
3.3 Polohování	15
3.4 Delta robot	16
3.5 Tricept	17
3.6 Simulátor	18
3.7 Kabelový robot	19
4 Popis mechanismu	20
4.1 Základní popis	20
4.2 Určení počtu stupňů volnosti	20
5 Tvorba modelu v SolidWorks	22
5.1 Výběr vhodné konstrukce	22
5.1.1 Lineární aktuátor	22
5.1.2 Klouby	22
5.1.3 Platforma a báze	23
5.2 Finální model	24
5.2.1 Model aktuátoru	24
5.2.2 Model platformy a báze	25

6	Inverzní kinematika	26
6.1	Výpočet inverzní kinematiky	26
6.1.1	Souřadné systémy	26
6.1.2	Určení polohy bodů	26
6.1.3	Transformace	28
7	Adams model	30
7.1	Sestavení modelu	30
7.1.1	Import geometrie	30
7.1.2	Popis vazeb	30
7.1.3	Model ramena	32
7.2	Co-simulace	34
7.2.1	Definování proměnných	34
7.2.2	Export Adams bloku	35
7.2.3	Import do Simulinku	36
7.3	Stavový model	38
7.3.1	Stavový popis systému	38
7.3.2	Generování stavového modelu	38
8	Závěr	40
	Seznam použité literatury	41
	Seznam příloh	44

1 Úvod

V dnešní době žijeme ve světě, který se neustále zrychluje. S tím souvisí i nahrazování lidské pracovní síly stroji. V poslední době se velice rozvíjí používání průmyslových (automatizovaných) robotů ve všech odvětvích průmyslu, ty jsou schopny nahradit i větší počet pracovníků a zvýšit produktivnost i efektivnost daného výrobního procesu.

Tento trend nutí výrobce robotů vyvíjet efektivnější, ekonomičtější i bezpečnější zařízení v čím dál kratším čase, což je velice nákladné jak z hlediska potřebných zaměstnanců, tak finančně. Řešením těchto problému je využití virtuálních modelů.

Virtuální model je počítačový model, který simuluje reálné navrhované zařízení ve všech možných aspektech. Jeho výhodou je v šetření času i peněz běžně potřebných na výrobu prototypu daného zařízení a také možnost reagovat na změny v návrhu v reálném čase.

Za účelem tvorby virtuálních modelů vzniklo velké množství softwarů, které se většinou zaměřují na jeden aspekt simulace. Jejich propojením lze však docílit lepších výsledků. Tím dojde k přiblížení k reálnému chování navrhovaného zařízení.

Tato práce je zaměřena na vytvoření modelu jednoho z automatizovaných robotů a to konkrétně Stewartovy platformy v MSC Adams, což je jeden ze světově nejpoužívanějších MBD (Multi-body Dynamics) softwarů. Tvorbě modelu bude předcházet rešerše mapující vývoj a využití Stewartovy platformy a dalších paralelních mechanismů v průmyslu.

2 Průmyslové roboty

2.1 Historie průmyslových robotů

Slovo robot poprvé použil Karel Čapek ve své divadelní hře Rosumovi Univerzální Roboti (R.U.R) v roce 1920. Od té doby se toto slovo velice rychle rozšířilo po celém světě a používá se pro pojmenování mechanických, automatizovaných zařízení, které nahrazují lidskou činnost. Přesná definice pojmu robot neexistuje, jelikož se jedná o velice rozmanité a komplexní technické zařízení.

Podle normy ISO 8373 je průmyslový robot definován jako: *"automaticky řízený, reprogramovatelný, víceúčelový manipulační stroj, stacionární nebo umístěný na vozíku, určený k použití v průmyslové automatizaci."* [1]

Od vzniku slova robot se lidé snaží sestavit zařízení, které by napodobilo člověka. V roce 1927 se na New Yorkské výstavě objevil robot Telovex, který uměl pár základních pohybů. Jeho příkladu následovalo spoustu dalších robotů. Vždy měli podobu člověka a jejich konstrukce byla na špičce tehdejší úrovně.

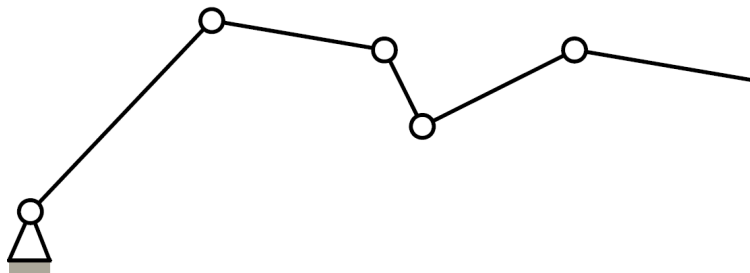
Po druhé světové válce, kdy poptávka těžce převyšovala nabídku, vznikala potřeba rychlé výroby ve velkých sériích. Z tohoto důvodu začal vývoj prvních průmyslových robotů. Američtí inženýři George Devol a Joseph Engelberg začali v roce 1956 s vývojem svého robotu Unimate 1000, který byl již roku 1961 úspěšně zařazen do provozu ve firmě General Motors, jako náhrada pracovníků obsluhujících stroje na tlakové lití. V roce 1962 jej následoval druhý model Versatran. Roboty se velice osvědčily a po jejich patentování byly licenčně vyráběny ve vyspělých státech po celém světě jako, např. VB, Švédsko a Japonsko. U nás se začalo s vývojem průmyslových robotů v roce 1972 ve specializovaném výzkumném pracovišti VUKOV Přerov. Po mechanické stránce byly tyto roboty v dobrém stavu, ale jejich elektronika a řídicí systémy byly příčinou nízké spolehlivosti [1],[2],[3].

Podrobnější rozdělení a popis PRAm (Průmyslové roboty a manipulátory) nalezneme v [1] a [3]. Nás však bude zejména zajímat rozdělení podle kinematické struktury na:

- Sériové roboty
- Paralelní roboty

2.2 Sériové roboty

Roboty se sériovou kinematikou jsou charakteristické svou stavbou podobnou lidské končetině, jsou tedy tvořeny ze sériově uspořádaných kinematických dvojic, které tvoří otevřený kinematický řetězec (open-loop chain). Výsledný pohyb se potom skládá z translace nebo rotace jednotlivých členů, kde každý člen se pohybuje nezávisle, jak lze vidět na schématu otevřeného řetězce (obr. 2.1).



Obr. 2.1 – Otevřený řetězec [1]

2.2.1 Nevýhody

Roboty se sériovou kinematikou jsou ve vývoji již desítky let a jejich vlastnosti se neustále zdokonalují. Postupně se však naráží na limity, které nelze překonat pro jejich základní konstrukci. Jeden z hlavních nedostatků tohoto typu konstrukce je, že většina součástí robotu je namáhána na ohyb a také, že každý předešlý člen nese hmotnost všech následujících členů. Aby byla zachována tuhost celé konstrukce, musí být velice robustní. V důsledku této velké pohybující se hmoty je omezena dynamika os, tedy rychlost a zrychlení. Další nechtěnou vlastností je, že chyba v poloze koncového efektoru je dána součtem chyb všech předchozích členů. Kvůli tomu se při výrobě kladou vysoké požadavky na přesnost [4],[5].

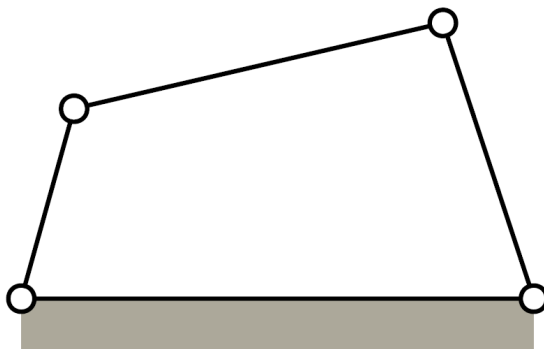
2.2.2 Výhody

Výhodou tohoto typu konstrukce je velká pracovní oblast a možnost přiblížení koncového efektoru k žádanému objektu pod různými úhly. Společně s jednoduchým řízením a kalibrací dávají tyto vlastnosti sériové kinematice vysokou univerzálnost použití. Přibližně 90% robotů používaných v průmyslu má konstrukci založenou na sériové kinematice [4],[5].

2.3 Paralelní roboty

Roboty s paralelní kinematikou jsou, na rozdíl od sériových, tvořeny uzavřeným kinematickým řetězcem. Obecně lze paralelního robota definovat takto: *"Je to mechanismus s uzavřeným kinematickým řetězcem, jehož koncový efektor je spojen s bází přes několik na sobě nezávislých kinematických řetězců."* [6] Tato definice však není úplně přesná, jelikož v sobě zahrnuje například i redundantní mechanismy, které mají větší počet aktuátorů, než ovládaných stupňů volnosti

koncového efektoru. Na (obr. 2.2) můžeme vidět uzavřený řetězec paralelního robota [6].



Obr. 2.2 – Uzavřený řetězec [1]

Pro přesnější vymezení pojmu paralelní robot byly zavedeny následující charakteristiky uvedeny v [6]:

- alespoň dva řetězce podporují koncový efektor, kde každý z těchto řetězců obsahuje minimálně jeden jednoduchý aktuátor (člen umožňující pohyb s jedním stupněm volnosti)
- počet aktuátorů je stejný jako počet stupňů volnosti koncového efektoru (platformy)
- pokud jsou všechny aktuátory zablokovány (je zamezeno jejich pohybu), je počet stupňů volnosti roven nule

2.3.1 Nevýhody

Tak jako každý mechanismus i paralelní robot má své nevýhody. Řetězce jsou namáhané hlavně na tah a tlak, takže s rostoucí délkou ramen hrozí ztráta vzpěrné stability. Velká délka ramen v kombinaci s vyššími otáčkami vřetena (pouze u obráběcích center) způsobuje nepřesnost koncového efektoru, jako důsledku tepelné dilatace ramen. Je tedy nutné monitorovat změnu délky ramen a kompenzovat tyto chyby v řídicím programu robota. Další nevýhodou je malý pracovní prostor v poměru s velikostí zařízení. Posledním závažným problémem jsou vyšší nároky na řízení [4],[5].

2.3.2 Výhody

Díky tomu, že je platforma podepřena několika rameny je schopen paralelní robot unést těžší břemeno a dosáhnout větší rychlosti a zrychlení, než sériový robot při celkové nižší hmotnosti zařízení. Také chyba koncového efektoru je nižší než u sériového robota. Zde je chyba dána průměrem chyb v jednotlivých ramenech. Tento typ zařízení má výhodu také v tom, že má unifikované díly (všechna ramena jsou identická), takže jejich výroba, případně oprava, je jednodušší [4],[5].

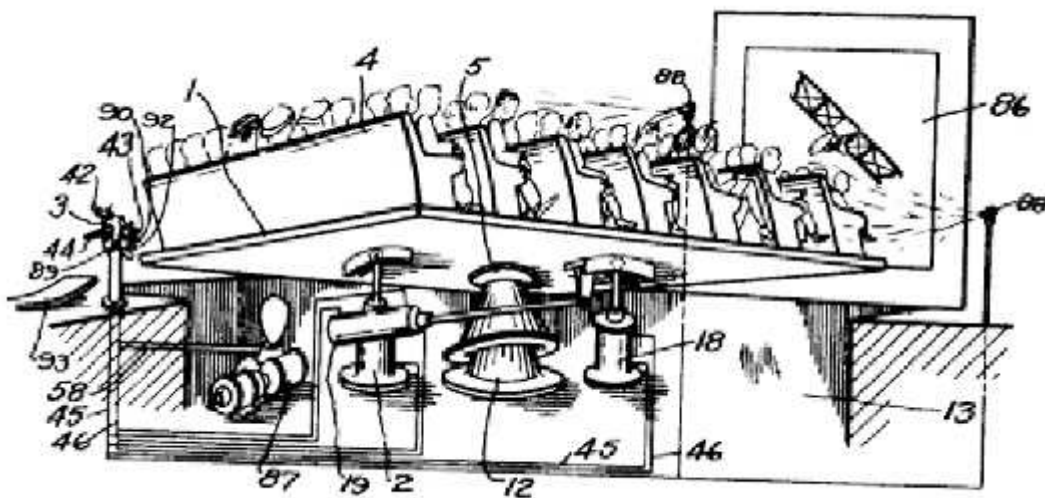
2.4 Historie paralelních robotů

V následující kapitole je popsána historie paralelních robotů tak jak je uvedena v [6],[7],[8].

Historie paralelních robotů sahá dál, než by se na první pohled dalo čekat. Nevíme sice kdo a kdy poprvé přemýšlel nad konstrukcí paralelního mechanismu, avšak první zmínka pochází již z roku 1645 a to od anglického architekta a geometra Christophera Wrena. Jednalo se však jen o teoretické problémy spojené s paralelní strukturou. V 19. století se touto problematikou zabývali L.A. Cauchy, H. Lebesgue, R. Bricard. Každý z nich publikoval práce spojené s paralelním mechanismem.

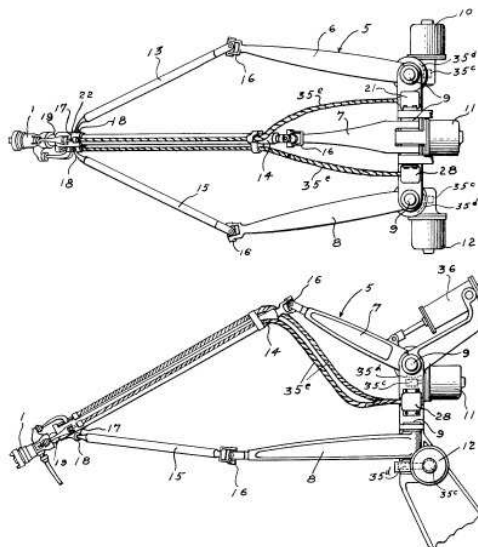
2.4.1 První patenty

V roce 1928 si J. E. Gwinnet nechal patentovat pohyblivou plošinu. Byla upevněna na sférickém kloubu a pohyb měly zajistit tři pneumotory. Jak je vidět z (obr. 2.3), zařízení mělo sloužit v zábavném průmyslu jako platforma v kině. Patent byl v roce 1931 přijat, avšak není známo, zda bylo někdy toto zařízení sestrojeno. Gwinnet předběhl svojí dobu a tehdejší průmysl nebyl připraven na takto komplexní mechanismus.



Obr. 2.3 – Gwinnetův patent [6]

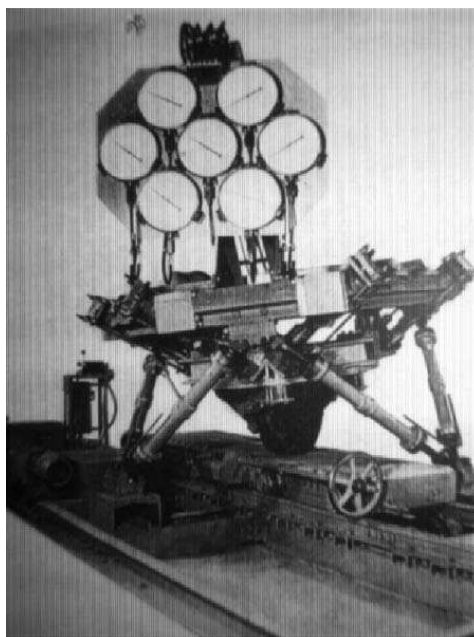
Za první průmyslový paralelní robot je považován design od Willarda L. V. Pollarda, který byl patentován roku 1942. Šlo o robota, který měl pomocí stříkací pistole nanášet barvu. Jak je patrné z (obr. 2.4), robot měl tři ramena, která byla u báze ovládána motory pro pohyb hlavy v prostoru a další dva motory spojené s hlavou pomocí bowdenů pro její natáčení. Tento mechanismus měl tedy 5 stupňů volnosti. Ani toto zařízení však nebylo nikdy sestrojeno.



Obr. 2.4 – Pollardův lakovací robot [6]

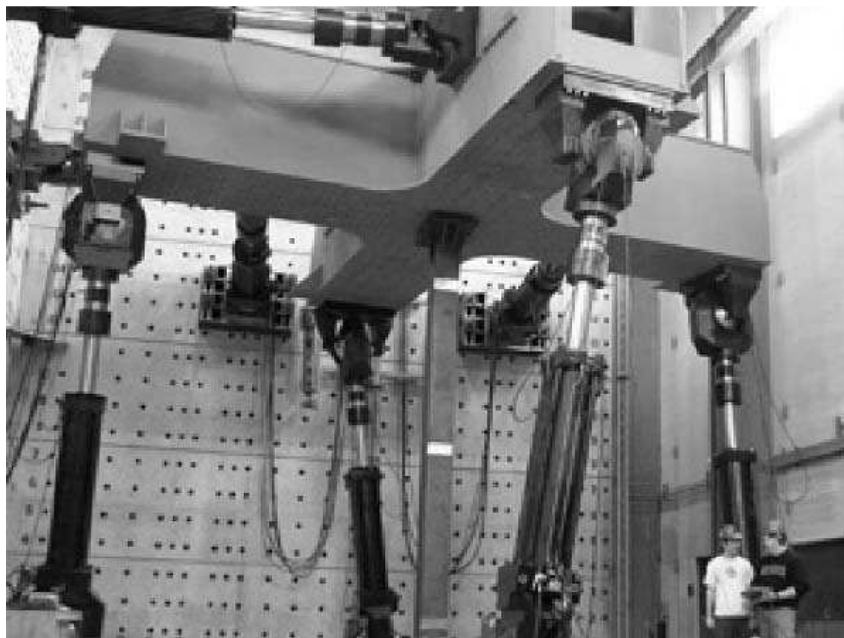
2.4.2 Goughova, Stewartova, nebo Cappelova platforma ?

Až v roce 1955 byl sestaven prototyp oktahedráního hexapodu, který je vidět na (obr. 2.5). Jeho autorem je Angličan Dr. Eric Gough a s prvním návrhem přišel již roku 1947. Zařízení bylo sestaveno za účelem testování pneumatik pro firmu Dunlop Rubber Co. Konstrukce se skládá z báze a platformy, která je k bázi připevněna šesti rameny (hexapod). Ramena jsou k platformě připevněna pomocí kulových kloubů a k bázi pomocí univerzálních kloubů, podle jejich osmistěnného umístění (oktahedron). Pohyb je zajištěn proměnlivou délkou ramen. Zařízení má celkem 6 stupňů volnosti. Později byl stroj rekonstruován a řízen digitálně. Do roku 2000 byl používán v praxi a nyní je vystaven v Britském národním muzeu.



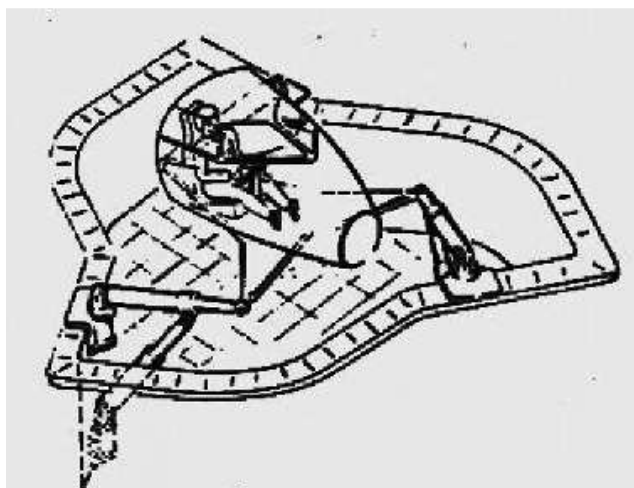
Obr. 2.5 – Goughův oktahedrání hexapod [6]

Avšak jak zmiňuje Dr. Gough ve své práci, na myšlenku použití šesti ramen nepřišel sám, nýbrž se nechal inspirovat zařízením MAST (Multi-Axis Simulation Table). Tento mechanismus má tři horizontálně a tři vertikálně umístěná ramena, a slouží k simulaci zemětřesení nebo obecně vibrací. Zařízení tohoto druhu jsou používána dodnes. Na (obr. 2.6) je vidět MAST Minesotské Univerzity.



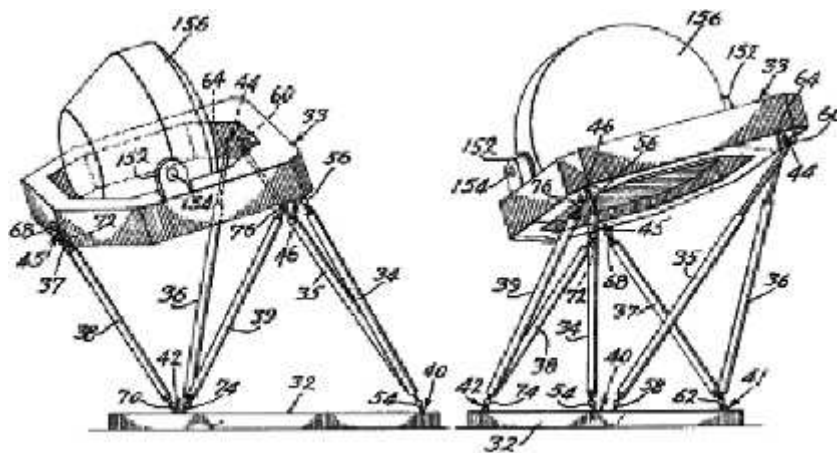
Obr. 2.6 – Zařízení MAST na Minnesotské Univerzitě [6]

V roce 1965 vydal D. Stewart svůj článek, ve kterém popisuje zařízení se 6. stupni volnosti, které vidíme na (obr. 2.7). Jedná se o návrh využití paralelní kinematiky jako leteckého simulátoru, jehož platforma má trojúhelníkový tvar a je napojena na tři řetězce pomocí kulových kloubů. Každý řetězec se skládá ze dvou ramen proměnlivé délky, která jsou s bází a mezi sebou spojena rotační vazbou. Na úplném konci své práce navrhuje Stewart připojit všech 6 ramen k platformě, takže vznikne hexapod, tak jak jej navrhl Gough. Ironií je, že Goughův hexapod je dnes ve většině případů označován jako Stewartova platforma.



Obr. 2.7 – Stewartův návrh simulátoru [6]

Do třetice. V roce 1962 dostal americký inženýr Klaus Cappel za úkol vylepšit konstrukci MAST tak, aby byla vhodná pro použití jako letecký simulátor. Po neúspěšných experimentech na zařízení se sedmi řetězci (komplikované řízení, které vyústilo ke zničení stroje), přišel se stejným oktahedrálním uspořádáním jako Gough (obr. 2.8).



Obr. 2.8 – Cappelův oktahedrální hexapod [6]

3 Využití v průmyslu

Tato kapitola obsahuje výběr několika aplikací paralelních mechanismů v průmyslové praxi.

3.1 Obráběcí stroje

Jedním z největších výrobců obráběcích center s paralelní kinematikou je německá firma Metrom, která vyvinula sérii zařízení pentapod. Obráběcí stroj s 5 řetězci s proměnlivou délkou, kde je jako koncový efektor vřeteno stroje. Řetězce jsou umístěné tak, aby bylo možné natočení vřetena v jedné ose až o 90°. Takže v kombinaci s rotačním stolem je centrum schopné plného obrábění z 5 stran. Jeden z posledních modelů je Metrom P1423 (obr. 3.1).

Firma Metrom také vyvinula kompaktní a mobilní verzi svého pentapodu, Metrom PM1400 (obr. 3.2). Je konstruován tak, aby bylo možné jej jednoduše dovézt na místo určení, v krátkém čase složit a použít, např. na obrábění velkorozměrných součástí. Konstrukce také umožňuje výměnu koncového efektoru, např. pro laser, broušení či lakování [9],[10].



obr. 3.1 – Metrom P1423 [10]



obr. 3.2 – Metrom PM1400 [10]

3.2 Tvářecí stroje

Paralelní mechanismy našli své uplatnění i v oboru tváření. Na institutu Fraunhofer IWU bylo vyvinuto a patentováno zařízení HexaBend (obr. 3.3), což je hydraulicky ovládaná Stewartova platforma. Pohybem platformy se dá tvarovat předehřívaný materiál vystupující ze stacionární části stroje. Výhoda zařízení spočívá v jeho flexibilitě. Pro daný průměr profilu stačí na ohyb o libovolném poloměru jen jeden nástroj [11],[12].

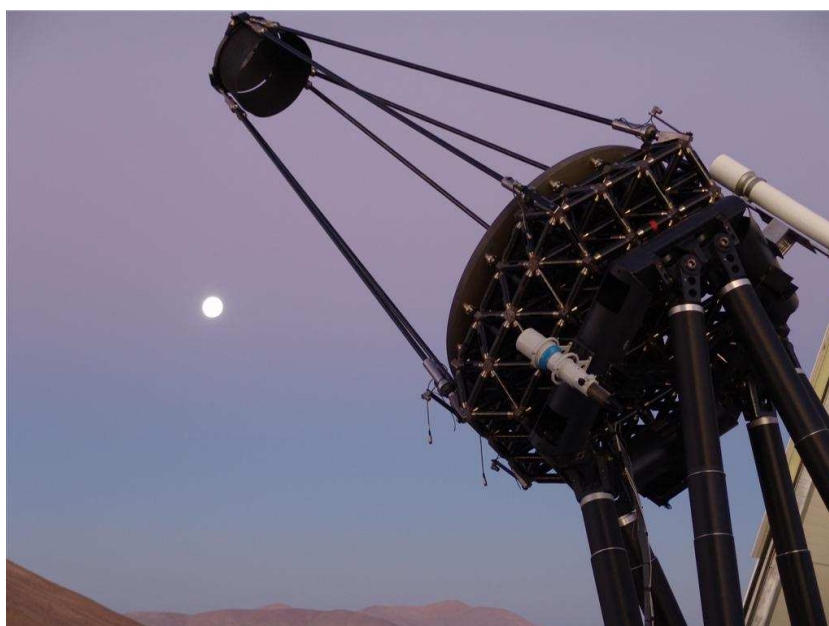


obr. 3.3 – HexaBend [12]

3.3 Polohování

Mezi nejčastější použití Stewartovy platformy v praxi patří polohování zařízení v prostoru, jenž je využito v různých odvětvích průmyslu. V příkladech, které jsou popsány níže, se zaměříme na vesmírný výzkum.

Prvním zařízením je Hexapod-Telescope (HPT), který je vidět na (obr. 3.4). Teleskop, s jehož vývojem se začalo v roce 1999 a od roku 2006 je umístěn v horách na severu Chile, je unikátní svou konstrukcí. Primární zrcadlo, o průměru 1,5 metru, je umístěno na Stewartově platformě s velice přesným polohováním. Proti nepříznivým vlivům prашného prostředí je mechanika uložena v přetlakovém krytu z kompozitu s karbonovými vlákny. Na primárním zrcadle je druhá Stewartova plošina, na jejímž konci je sekundární optika [13],[14].



obr. 3.4 – Hexapod-Telescope [14]

Druhé je zařízení SAGEIII - ISS (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment III). Jedná se o přístroj schopný pomocí spektrometru měřit obsah plynů v horní atmosféře. Tento přístroj je hlavně zaměřený na měření ozonoféry. Jeho vypuštění na oběžnou dráhu je plánováno na rok 2016, nejedná se však o samostatnou družici, jako byli jeho předchůdci, ale o modul připravený pro montáž na ISS (International Space Station). Proto je potřeba jeho samostatného polohování, o které se postará Stewartova platforma, jak je vidět na (obr 3.5) [15],[16].



obr. 3.5 – SAGEIII - ISS [16]

3.4 Delta robot

Na začátku 80. let přišel Dr. Reymond Clavel s nápadem použít paralelogram na sestavení paralelního robotu se 3 rameny, který má 3 translační stupně volnosti. Tímto vznikl delta robot. V původním návrhu bylo použito 4. rameno k přenosu rotačního pohybu mezi bází a platformou [17].

Delta roboty si velice rychle našly své místo v průmyslové praxi a dnes se nejčastěji používají na tzv. Pick and Place operace (vezmi a umísti), např. v potravinářském průmyslu. Mezi přední výrobce patří firma ABB s modelem FlexPicker (obr. 3.6) a společnost Fanuc s modelem M1iA/0.5SL (obr. 3.7).



obr. 3.6 – ABB FlexPicker IRB 340 [18]



obr. 3.7 – FANUC M1iA/0.5SL [19]

Delta robot má i další způsoby využití. Například společnost ISIS (Intelligent Surgical Instruments & Systems) představila svůj SurgiScope (obr. 3.8). Jedná se o delta robot, který nese 20 kg vážící mikroskop a další nástroje. Používá se v oblasti neurochirurgie [17].

Paralelní mechanismy si našly své místo i v oblasti 3D tisku. Lehce upravený delta robot, který místo rotačního pohonu využívá lineární posuv, se používá jako 3D tiskárna. Jeden z prvních sériově vyráběných modelů určených spíše pro domácí použití je ORION Delta 3D Printer (obr. 3.9). Díky lineárnímu posuvu má robot rozšířenou pracovní oblast na výšku [20].



obr. 3.8 – SurgiScope [17]



obr. 3.9 – ORION Delta 3D Printer [20]

3.5 Tricept

PKMTricept je španělská firma, která vyvíjí a vyrábí roboty série Tricept. Jedná se o roboty s hybridní kinematikou, kde je na paralelní trojnožce (tripodu) umístěn sériový řetězec zajišťující rotaci koncového efektoru. Celý mechanismus má podle potřeby 5, nebo 6 stupňů volnosti. Díky jejich velké pracovní oblasti a dobré dynamice našly uplatnění ve spoustě odvětvích průmyslu. Nejvíce se však používají právě v automobilovém průmyslu, kde jsou na výrobní lince schopny zastat velkou škálu pracovních operací jako třeba obrábění, svařování, broušení. Na (obr. 3.10) je vidět model Tricept T606 [21].



obr. 3.10 – Tricept T606 [22]

3.6 Simulátor

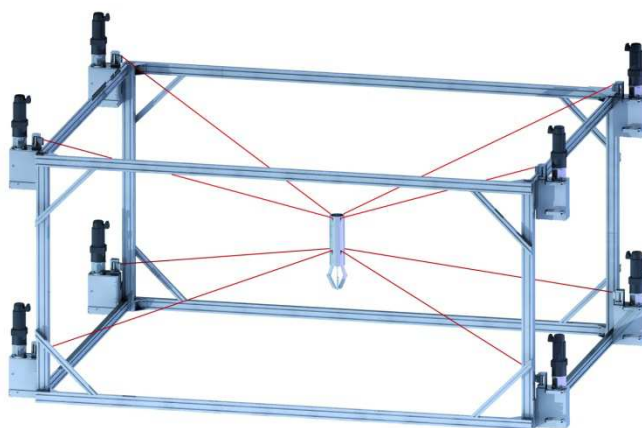
Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, Stewartova plošina byla vynalezena jako letecký simulátor a pro tento účel se používá dodnes. Společnost CEA již 70 let vyvíjí a provozuje simulátory, jak pro civilní, tak pro armádní účely. V poslední době se čím dál více používají tzv. FFS (Full-Flight Simulator). Simulátor, který je schopen simulovat celý let a také všechny možné komplikace při letu. Na (obr. 3.11) je vidět CEA simulátor Boeingu 737 [23].



obr. 3.11 – CEA simulátor Boeing 737 [23]

3.7 Kabelový robot

Kabelový robot IPAnem (obr. 3.12) je speciální druh paralelního mechanismu, který byl vyvinut na institutu Fraunhofer INA. K pohybu využívá proměnou délku ramen, tvořenou z kabelu navíjeného na buben. Tento robot prozatím nenašel žádné průmyslové využití a je stále ve vývoji [24].



obr. 3.12 – Model robotu IPAnem [24]

Avšak v roce 2016 by mělo být v Číně dokončeno zařízení FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope). Bude to největší a nejcitlivější radioteleskop na světě. Jak je již patrné z názvu, primární reflektor bude mít průměr 500 metrů a bude tvořen z přibližně 4400 trojúhelníkových zrcadel. Sekundární zaostřovací optika bude umístěna v kabině, která bude polohována pomocí kabelového paralelního mechanismu tvořeného z 6 lan zavěšených na 6 věžích. Ty budou rovnoměrně rozmístěny v kruhu o průměru 600m. Přesná poloha sekundární optiky bude doladěna pomocí Stewartovy platformy umístěné v kabině. (obr. 3.13) [25].



obr. 3.13 – FAST teleskop [25]

4 Popis mechanismu

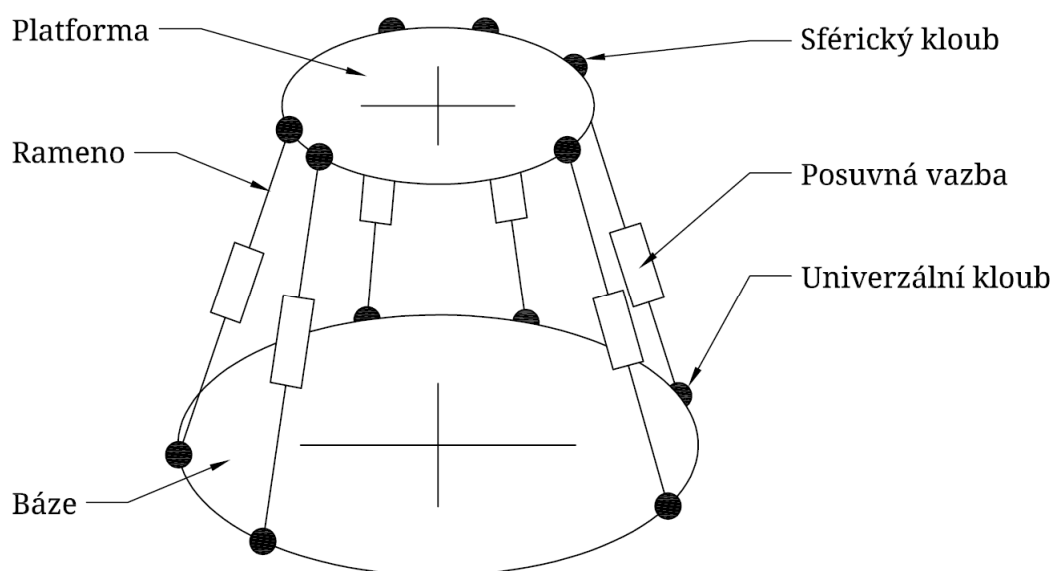
Tato kapitola je zaměřena na základní popis Stewartovy platformy a je v ní určen počet stupňů volnosti, který má daný mechanismus.

4.1 Základní popis

Stewartova platforma je paralelní mechanismus, který je také označován jako 6-UPS, podle konstrukce jeho ramena, kde 6 označuje počet ramen a písmena U,P,S, v pořadí od báze k platformě, vazby mezi tělesy.

- U – Universal joint (univerzální nebo také kardanův kloub)
- P – Prismatic joint (posuvná vazba)
- S – Ball-and-socket joint (sférický nebo také kulový kloub)

Pohybu je docíleno změnou délky ramena.



Obr. 4.1 – Schéma Stewartovy platformy

4.2 Určení počtu stupňů volnosti

Pro určení počtu stupňů volnosti paralelního mechanismu v prostoru je použito Grüblerovy rovnice, jak je popsána v [6].

$$m = 6(l - n - 1) + \sum_{i=1}^n d_i \quad (4.1)$$

kde l je celkový počet těles mechanismu včetně základního tělesa, n je počet vazeb v mechanismu a d_i je počet stupňů volnosti vazby i .

Jak již bylo zmíněno v popisu, mechanismus se skládá ze základního tělesa, platformy a šesti ramen, kde každé je tvořeno ze dvou těles.

$$l = 1 + 1 + 6(1 + 1) = 14 \quad (4.2)$$

Každé rameno je pomocí univerzálního kloubu spojeno se základním tělesem a pomocí kulového kloubu s platformou. Mezi tělesy tvořící rameno je posuvná vazba. Pro univerzální kloub je $d_u = 2$, pro kulový kloub je $d_s = 3$ a pro posuvnou vazbu je $d_p = 1$.

$$n = 6 + 6 + 6 = 18 \quad (4.3)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i = 6(2 + 3 + 1) = 36 \quad (4.4)$$

Dosazením do vztahu (4.1) dostaneme:

$$m = 6(14 - 18 - 1) + 36 = 6 \quad (4.1)$$

Stewartova plošina má tedy 6 stupňů volnosti. Může konat translaci ve směru os x , y , z a také volně rotovat kolem těchto os. Lze snadno dokázat, že po zablokování všech šesti posuvných vazeb bude mít mechanismus nulovou mobilitu.

5 Tvorba modelu v SolidWorks

Tato kapitola se zabývá tvorbou modelu Stewartovy plošiny pro následný export do prostředí MSC Adams.

5.1 Výběr vhodné konstrukce

Při tvorbě modelu pro simulaci musí být brán zřetel na několik faktorů. Model by neměl být příliš komplikovaný (nemusí obsahovat všechny prvky, které jsou součástí reálného stroje). Zároveň by však měl zohledňovat všechny faktory ovlivňující jeho funkčnost.

5.1.1 Lineární aktuátor

Hlavní částí Stewartovy platformy jsou jeho ramena. Ta se skládají z kloubů a lineárního aktuátoru, který zajišťuje jejich pohyb. Může být realizován v několika provedeních:

- hydraulický nebo pneumatický pohon
- lineární elektromotor
- mechanický pohon (převod z rotačního pohybu motoru na posuvný pohyb matice)

Jako vzor pro náš model byl vybrán lineární aktuátor DLA 200 (obr. 5.1) od firmy Transmotec. Jedná se o aktuátor poháněný DC elektromotorem, kde rotační pohyb je převeden na posuvný pomocí kuličkového šroubu. Převod mezi motorem a šroubem je realizován převodovkou s hliníkovými ozubenými koly [26].



Obr. 5.1 – Lineární aktuátor Transmotec [26]

5.1.2 Klouby

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, ramena jsou s platformou spojena pomocí kloubů. K bázi připojíme rameno kardanovým kloubem. Byl vybrán

kloub GLK 2 (obr. 5.2), který má možnost pohybu v jedné ose $\pm 45^\circ$ a ve druhé $\pm 90^\circ$, což je pro tento model více než dostačující [27].



Obr. 5.2 – Kardanový kloub GLK 2 firmy INA [27]

Při výpočtu stupňů volnosti jsme jako druhou vazbu uvažovali kulový kloub, avšak pro zjednodušení konstrukce použijeme kardanový kloub GLK 3. Jeho konstrukce je totožná s modelem GLK 2, jen je pomocí kombinace axiálně radiálního ložiska umožněna rotace třetí osy [27].

5.1.3 Platforma a báze

Při návrhu tvaru platformy a báze se snažíme umístit sousední klouby co nejblíže k sobě, aby se konstrukce přiblížila oktahedru tak, jak jej navrhl Gough. Tvar budeme volit podobný konstrukci Stewartovy platformy od francouzské firmy Symétrie, která je vidět na (obr. 5.3).



Obr. 5.3 – Platforma firmy Symétrie [28]

5.2 Finální model

Z dílů, které byly popsány výše, byl sestaven model Stewartovy platformy, který je vidět na (obr 5.4). Pro zjednodušení konstrukce, však bylo potřeba udělat pár změn.



Obr. 5.4 – Model Stewartovy platformy

5.2.1 Model aktuátoru

Pro potřeby simulace bylo, oproti vzoru aktuátoru, provedeno několik úprav. Pro zjednodušení byla převodovka tvořená ozubenými koly nahrazena převodem s ozubeným řemenem. Dále byla vynechána většina součástí, které nejsou nezbytné pro funkci aktuátoru. Na (obr. 5.5) jsou popsány jeho základní části.

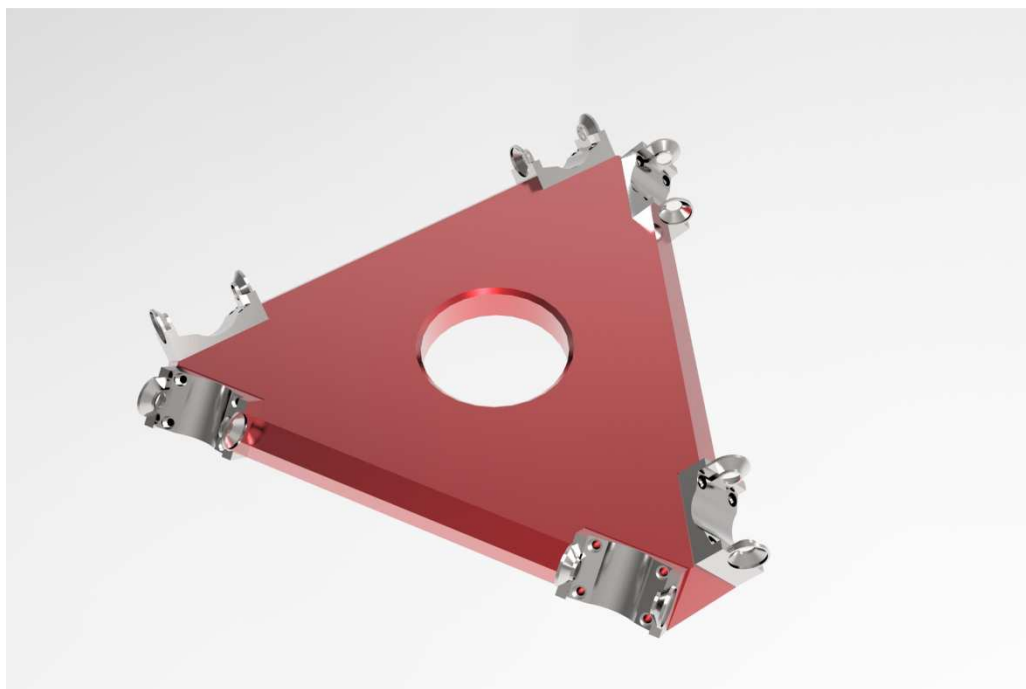


Obr. 5.5 – Popis aktuátoru

5.2.2 Model platformy a báze

Tvar platformy bylo potřeba upravit tak, jak je vidět na (obr. 5.6). Umístění kloubů bylo voleno tak, aby byl pokud možno dodržen tvar oktaherdu. Zároveň však je potřeba, aby při střední poloze platformy byl umožněn kloubům rovnoměrný pohyb do všech stran a neomezovaly tak zbytečně pracovní prostor mechanismu.

Stejné požadavky byly kladeny i na tvar báze a umístění kloubů na ní.



Obr. 5.6 – Model platformy

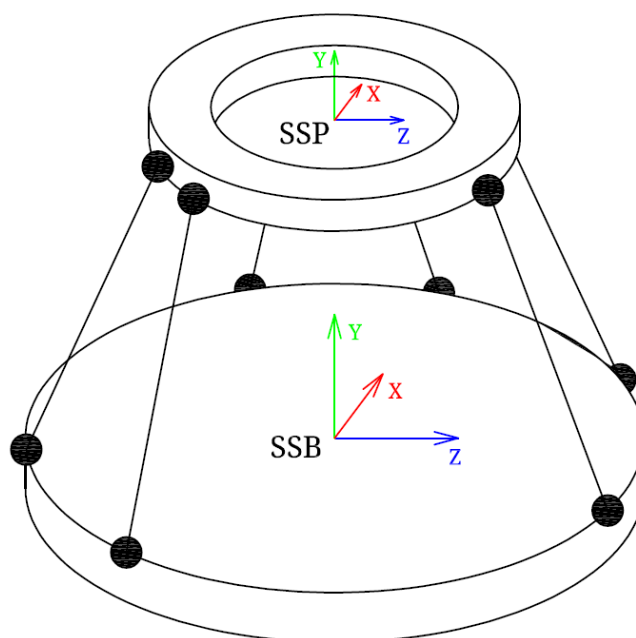
6 Inverzní kinematika

V této kapitole jsou popsány vztahy pro výpočet inverzní kinematiky vytvořeného modelu, které by mohly být použity v rámci návrhu polohového řízení. Rovnice inverzní kinematiky slouží pro výpočet délek ramen pro danou polohu platformy. Pro výpočet jsou použity upravené vztahy uvedené v [6].

6.1 Výpočet inverzní kinematiky

6.1.1 Souřadné systémy

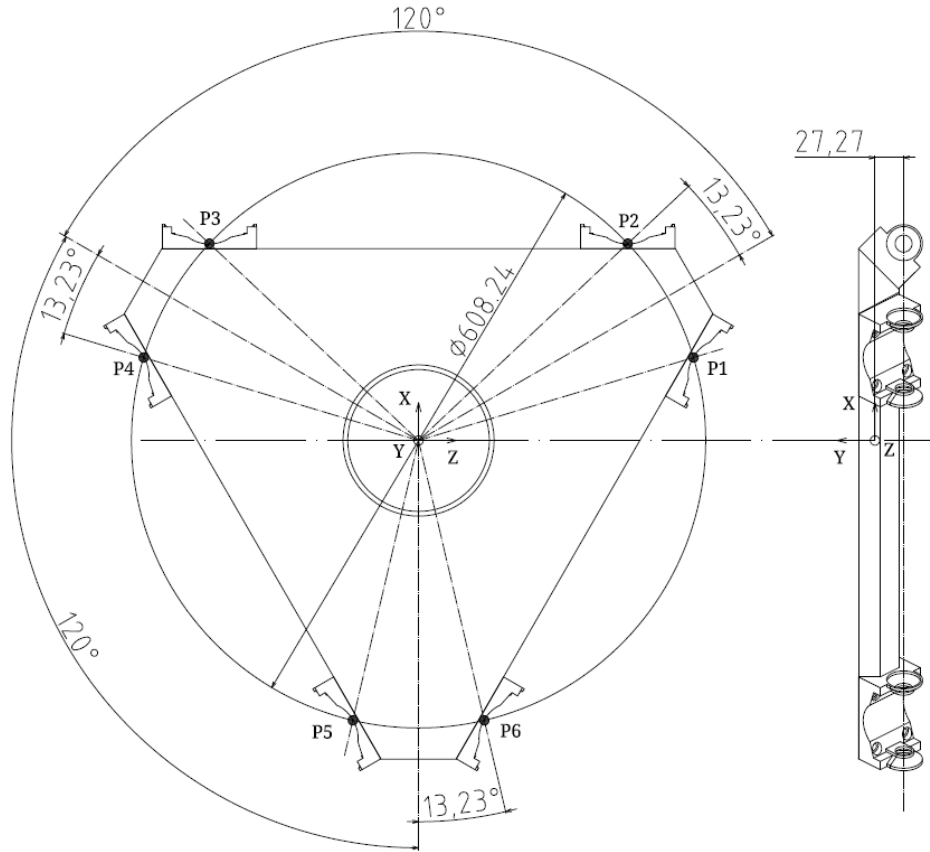
Před výpočtem je nutné definovat souřadné systémy. Během výpočtu jsou použity dva souřadné systémy. Absolutní souřadný systém báze (SSB) a relativní souřadný systém platformy (SSP). Směr os je volen tak, aby odpovídal absolutnímu souřadnému systému prostředí MSC Adams. Výška je tedy ve směru osy y .



Obr. 6.1 – Souřadné systémy

6.1.2 Určení polohy bodů

Nyní je nutné určit polohu bodů kloubů v souřadných systémech báze a platformy. Je využito symetrického rozdělení bodů. Jak je vidět z (obr. 6.2), všechny body kloubů platformy leží na roztečné kružnici o poloměru $r_p = 304,12 \text{ mm}$ a od osy symetrie jsou vychýleny o úhel $\alpha_p = 13,23^\circ$. Osy symetrie vzájemně svírají úhel 120° .



Obr. 6.2 – Výkres platformy

Dosazením do vztahů (6.1) a (6.2) jsme získali kartézské souřadnice bodů platformy v SSP. Jelikož těžiště platformy a body kloubů neleží v jedné rovině, je potřeba tuto skutečnost vykompenzovat posunutím bodů ve směru osy y o hodnotu $h_y = 27,27 \text{ mm}$.

Pro sudé

$$\beta_{sp_i} = \frac{2}{3}\pi(i-1) - \alpha_p + \frac{1}{6}\pi,$$

$$\mathbf{p}_{2i} = r_p \begin{bmatrix} \cos \beta_{sp_i} \\ -h_y \\ \sin \beta_{sp_i} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Pro liché

$$\beta_{lp_i} = \frac{2}{3}\pi(i-1) + \alpha_p + \frac{1}{6}\pi,$$

$$\mathbf{p}_{2i-1} = r_p \begin{bmatrix} \cos \beta_{lp_i} \\ -h_y \\ \sin \beta_{lp_i} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

kde $i = 1, \dots, 3$

Kartézské souřadnice bodů báze v SSP byly získány obdobně ze vztahů (6.3) a (6.4), kde $r_b = 523,24 \text{ mm}$ je poloměr roztečné kružnice, $\alpha_b = 7.28^\circ$ je úhel vychýlení od osy symetrie.

Pro sudé

$$\beta_{sb_i} = \frac{2}{3}\pi(i-1) + \alpha_b - \frac{1}{6}\pi,$$

$$\mathbf{p}_{2i} = r_b \begin{bmatrix} \cos \beta_{sb_i} \\ 0 \\ \sin \beta_{sb_i} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Pro liché

$$\beta_{lb_i} = \frac{2}{3}\pi(i-1) - \alpha_b + \frac{1}{2}\pi,$$

$$\mathbf{p}_{2i-1} = r_b \begin{bmatrix} \cos \beta_{lb_i} \\ 0 \\ \sin \beta_{lb_i} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

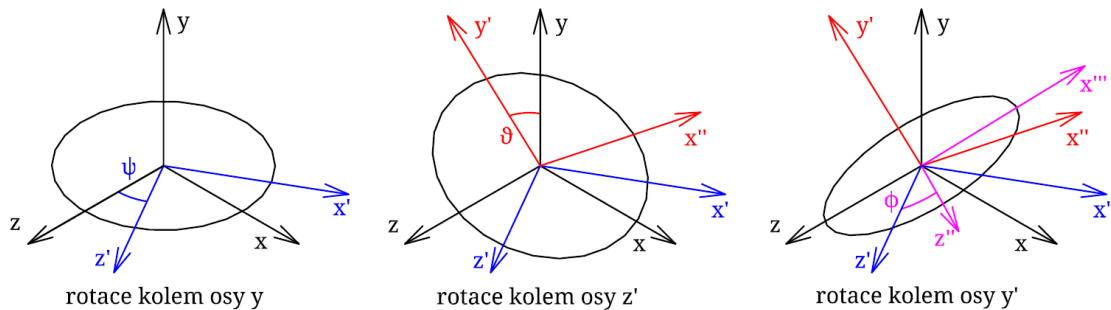
kde $i = 1, \dots, 3$

6.1.3 Transformace

Dalším krokem je transformace bodů platformy do souřadného systému báze (SSB). Pro transformaci je potřeba určit vektor translace $\mathbf{T}$ a matice rotace $\mathbf{R}$.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Matice rotace se sestaví pomocí tří parciálních rotací na základě Eulerových úhlu, jak je popsáno v [2]. Ty je potřeba upravit podle našeho souřadného systému, jak je ukázáno na obr. (6.3).



Obr. 6.3 – Eulerova transformace

1. rotace o úhel ψ kolem osy y

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

2. rotace o úhel ϑ kolem nově vzniklé osy z'

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta & 0 \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

3. rotace o úhel φ kolem nově vzniklé osy y'

$$\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Pomocí maticového součinu dopočítáme matici $\mathbf{R}$.

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \quad (6.9)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta \cos \varphi - \sin \psi \sin \varphi & -\cos \psi \sin \vartheta & \cos \varphi \sin \psi + \cos \psi \cos \vartheta \sin \varphi \\ \cos \varphi \sin \vartheta & \cos \vartheta & \sin \vartheta \sin \varphi \\ -\cos \psi \sin \varphi - \cos \vartheta \cos \varphi \sin \psi & \sin \psi \sin \vartheta & \cos \psi \cos \varphi - \cos \vartheta \sin \psi \sin \varphi \end{bmatrix}$$

Nyní byla provedena transformaci podle vztahu ().

$$\mathbf{p}_{T_i} = \mathbf{T} + \mathbf{p}_i \mathbf{R} \quad (6.10)$$

V posledním kroku je nutné dopočítat vzdálenost mezi body platformy a báze pro každé rameno.

$$l_i = \sqrt{(p_{T_{ix}} - b_{ix})^2 + (p_{T_{iy}} - b_{iy})^2 + (p_{T_{iz}} - b_{iz})^2}, \text{ kde } i = 1, \dots, 6 \quad (6.11)$$

7 Adams model

V této kapitole je popsán postup importu geometrie do programu MSC Adams a poté tvorba multi-body dynamického modelu. Následně je provedena kontrola rovnic inverzní kinematiky pomocí co-simulace a na závěr vygenerován stavový model.

MSC Adams (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) je výpočtový a simulační software, který pracuje s multi-body mechanickými soustavami. Tyto soustavy mohou obsahovat tuhé i poddajné tělesa, která jsou propojená pomocí kinematických vazeb.

Jedním z hlavních objektů Adamsu je marker. Je to bod, který definuje lokální souřadný systém. Může být umístěn na jakémkoliv tělese, včetně základního tělesa Adamsu (ground). Na jeho pozici se umísťují vazby, silové působení, měření a další [29].

7.1 Sestavení modelu

7.1.1 Import geometrie

Pro import geometrie do prostředí MSC Adams je potřeba mít CAD model v podporovaném formátu. Jako nejlepší, pro import celé sestavy, vyšel formát parasolid (*.x_t).

Tělesa po importu obsahují pouze svou geometrii a nemají žádnou hmotu. Pro funkčnost simulace je tedy potřeba definovat hmotnost a tenzor momentů setrvačnosti pro každé těleso. V tomto ohledu nabízí Adams tři možnosti:

1. uživatelsky definována hmota
2. definování pomocí geometrie a hustoty
3. definování pomocí geometrie a typu materiálu

V našem případě je použité definování pomocí geometrie a typu materiálu, který je volen z materiálového listu Adamsu.

7.1.2 Popis vazeb

Jakmile máme importovanou geometrii a zadané její fyzikální vlastnosti je nutno definovat vztahy mezi tělesy. Toho v prostředí Adamsu docílíme pomocí vazeb. Vazby definují omezení relativního pohybu mezi dvěma tělesy tím, že je fyzicky propojí. Verze MSC Adams 2013 obsahuje velkou škálu vazeb od základních, jako třeba posuvná vazba, až po vazby strojní, např. řemenové a řetězové převody nebo ložiska.

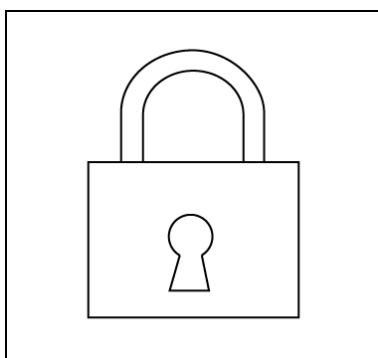
Nyní jsou detailněji popsány vazby, které jsou použity v našem modelu plošiny, tak jak je uvedeno v [30]. U většiny vazeb je potřeba definovat dvě tělesa mezi kterými probíhá interakce a také umístění vazby na pozici markeru. Také se dá vybrat umístění podle geometrie tělesa, na jehož pozici Adams vytvoří marker sám.

Fixní vazba

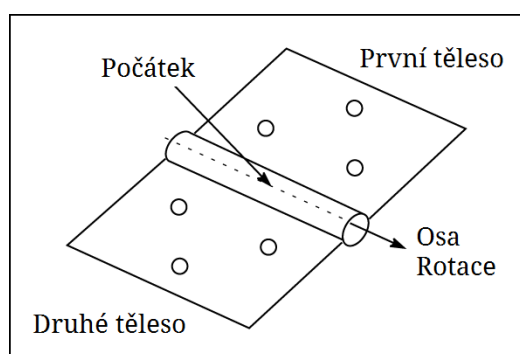
Fixní vazba (Fixed Joint) je vazba, která odebere tělesu vůči druhému 6 stupňů volnosti (3 translační a 3 rotační). Pevně tedy uzamkne pohyb dvou těles mezi sebou. Poloha umístění vazby nijak neovlivní výsledek simulace. Určí pouze polohu grafické ikony, jenž můžeme vidět na (obr. 7.1).

Rotační vazba

Rotační vazba (Revolute Joint) je vazba, která odebere tělesu vůči druhému 5 stupňů volnosti (3 translační a 2 rotační). Je zachována pouze rotace kolem jedné osy, proto je při definování potřeba vybrat nejen marker, ale také osu rotace. Umístění počátku může být kdekoli podél osy rotace. Grafické znázornění této vazby můžeme vidět na (obr. 7.2).



obr. 7.1 – Fixní vazba [30]



obr. 7.2 – Rotační vazba [30]

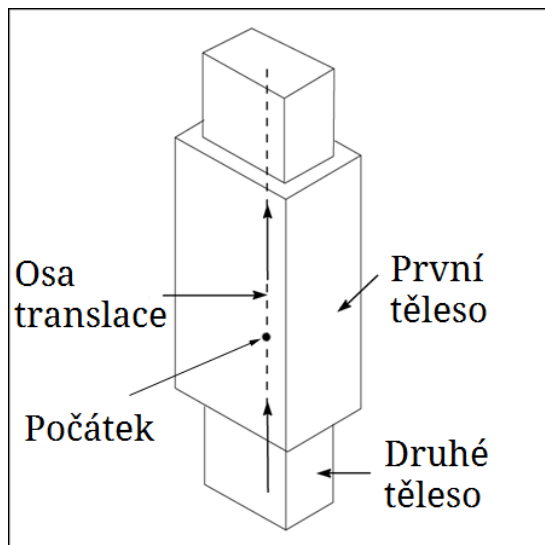
Posuvná vazba

Posuvná vazba (Translational Joint) je vazba, která odebere tělesu vůči druhému 5 stupňů volnosti (2 translační a 3 rotační). Je zachována pouze translace ve směru jedné osy. Je tedy třeba definovat polohu počátku a směr posuvu. Poloha počátku neovlivní vzájemný pohyb těles, avšak ovlivní výpočet reakčního zatížení ve vazbě. Grafické znázornění této vazby můžeme vidět na (obr. 7.3).

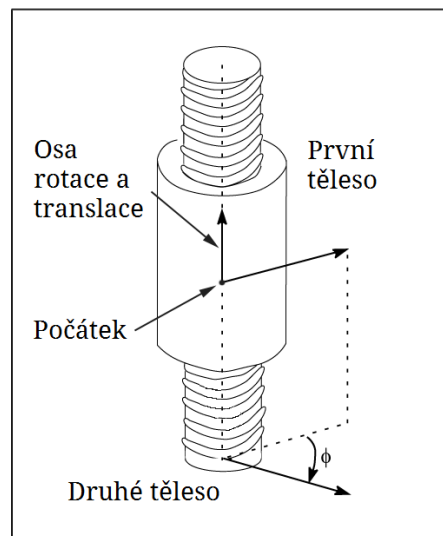
Šroubová vazba

Šroubová vazba (Screw Joint) je vazba, která odebere tělesu vůči druhému 1 stupeň volnosti. Umožňuje svázat rotaci jednoho tělesa s translací druhého. Definuje se umístění počátku a osa společné rotace a translace. Dále se definuje hodnota stoupání. Při jedné otáčce druhého tělesa kolem osy rotace dojde k translaci prvního tělesa po této ose právě o hodnotu stoupání.

Šroubová vazba se velice často používá v kombinaci s posuvnou, nebo válcovou vazbou (Cylindrical joint), protože samotná šroubová vazba jen sváže rotaci a translaci. Avšak v kombinaci s těmito vazbami můžeme docílit pohybu, který věrohodně simuluje reálný šroubový spoj. Grafické znázornění této vazby je vidět na (obr. 7.4).



obr. 7.3 – Posuvná vazba [30]

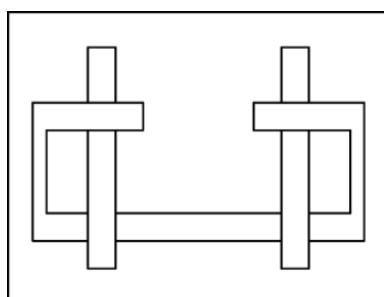


obr. 7.4 – Šroubová vazba [30]

Spojka vazeb

Spojka vazeb (Joint Coupler) by se dala označit jako vazba mezi vazbami. Není totiž definována mezi tělesy, ale propojuje pohyb dvou vazeb. Není tedy nutné definovat její polohu, ale pouze vazby mezi kterými působí. Může propojit vazby rotační, translační a válcovou, kdy je nutné definovat hodnotu pro každou vazbu, ze kterých Adams vypočítá převodový poměr mezi pohyby. Na jednu vazbu může být napojeno několik spojek, avšak každá spojka odebírá modelu 1 stupeň volnosti.

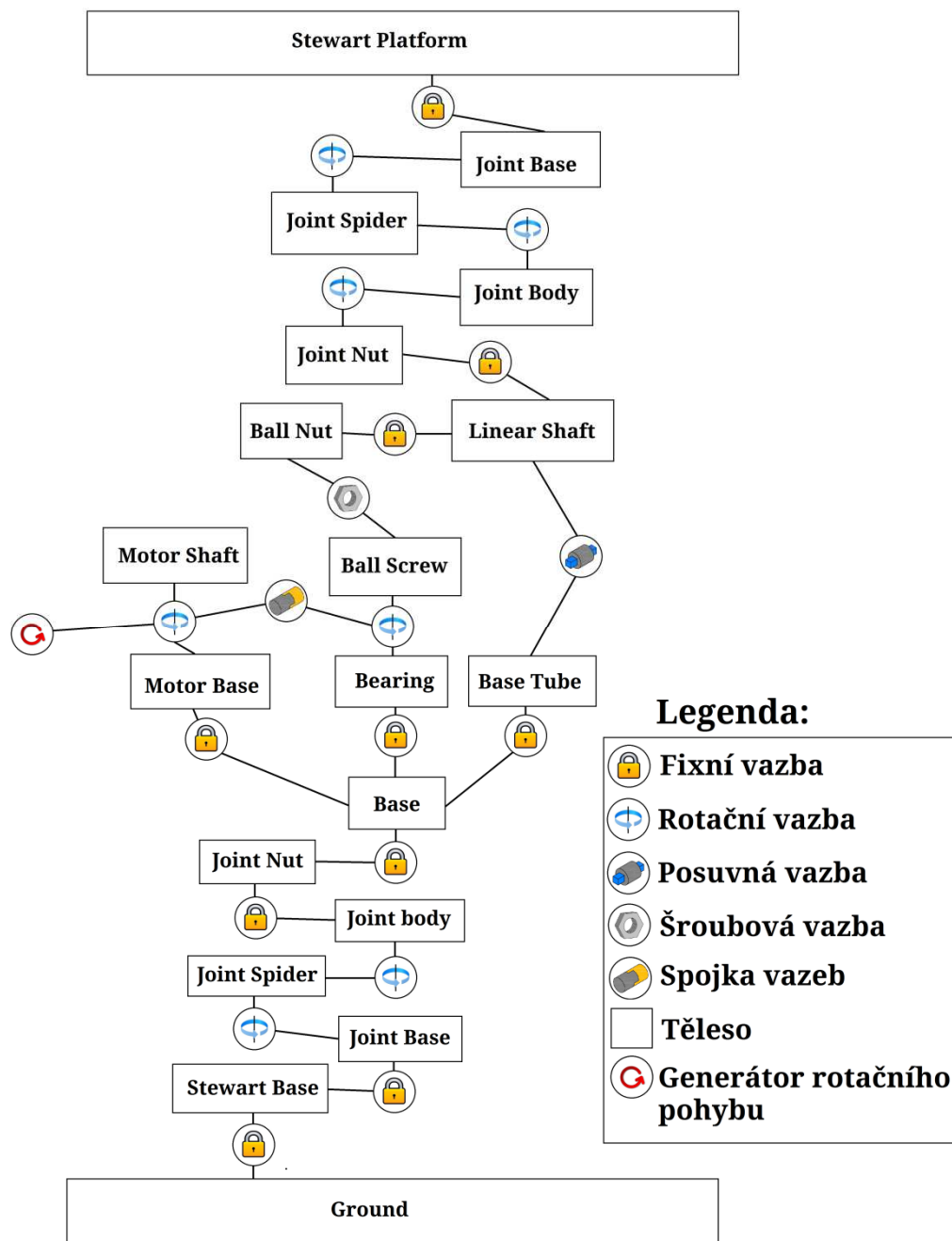
Můžeme propojit různé druhy pohybů, např. dva rotační, nebo jeden rotační a jeden translační. Adams u spojky nerozlišuje mezi hnanou a hnací vazbou. V jednom časovém okamžiku může být první vazba hnací a druhá hnaná, v dalším to může být opačně. Grafické znázornění této vazby je vidět na (obr. 7.5).



obr. 7.5 – Spojka vazeb [30]

7.1.3 Model ramena

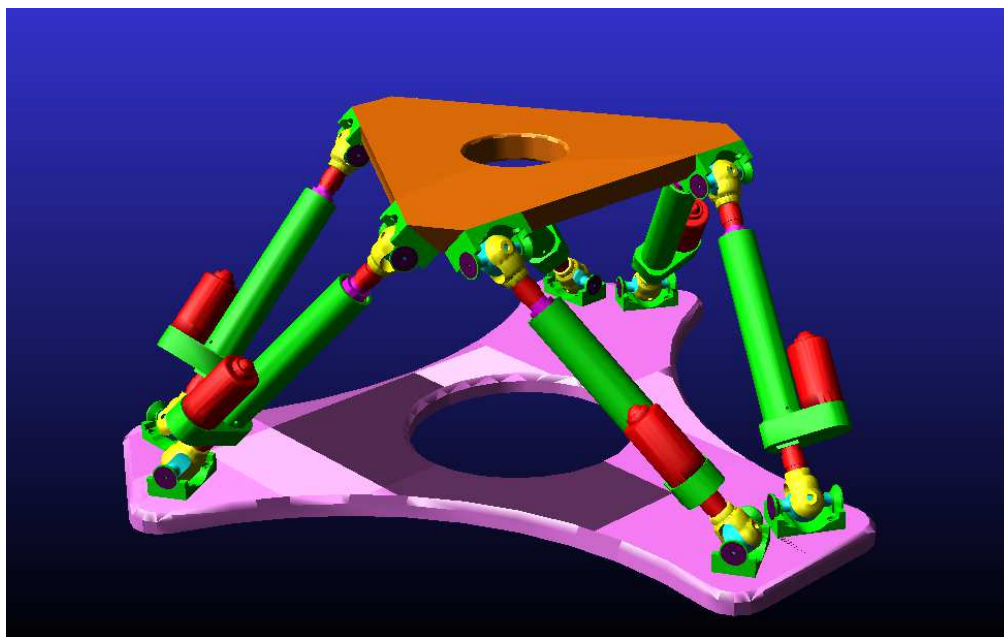
Na schématu (obr. 7.6) je popsáno jedno rameno mechanismu. Tělesa, která obsahuje a vazby mezi nimi. Pro jednoduchost byla vynechána tělesa, která nejsou nezbytně nutná pro funkčnost mechanismu. Všechna tato tělesa jsou pomocí fixní vazby pevně přichycena k mechanismu a pomocí své hmoty pouze mění moment setrvačnosti sestavy.



obr. 7.6 – Schéma modelu ramena

Celý model se skládá z 6 identických ramen označených A až F (obr 7.7). Pohyb modelu je ovládán pomocí generátorů rotačních pohybů, které jsou napojeny na rotační vazby hřídelí motorů.

Dále je potřeba nastavit měření polohy platformy v prostoru. Toho je docíleno definováním markeru na pozici těžiště platformy, který je součástí základního tělesa Adamsu (Ground). Poté je zapotřebí nastavit měření vzdálenosti mezi definovaným markerem a těžištěm platformy ve všech třech osách. Také je nutno definovat měření Eulerových úhlů mezi těmito markery.



obr. 7.7 – Model platformy v Adamsu

7.2 Co-simulace

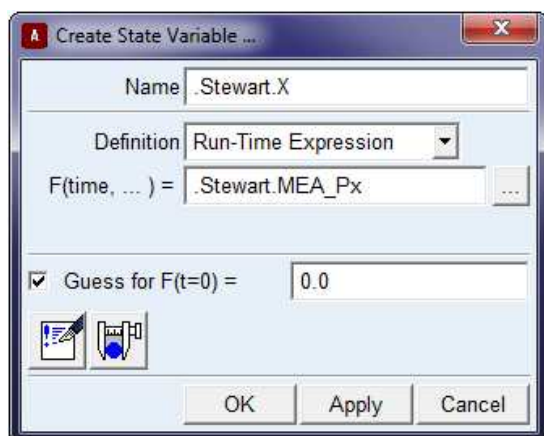
Nyní, když je vytvořen mechanický model a nastavená měření polohy těžiště platformy v prostoru, se může přistoupit k dalšímu kroku, kterým je ověření správnosti rovnic inverzní kinematiky sestavené v kapitole 6. K tomu je využito možnosti co-simulace.

Co-simulace spočívá ve vzájemné spolupráci dvou programů při simulaci chování modelu. V našem případě je použito propojení programů MSC Adams a Matlab/Simulink. Pro nastavení co-simulace je potřeba provést následující kroky:

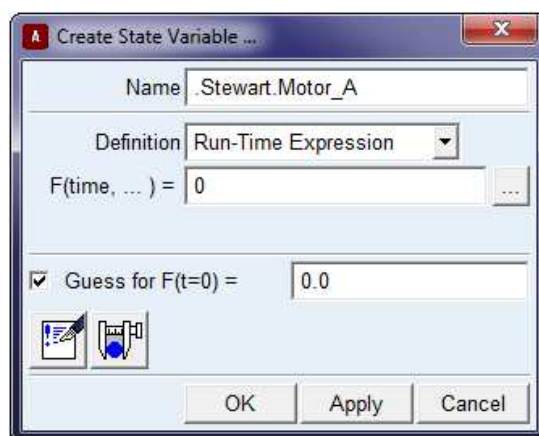
1. definování vstupních a výstupních proměnných
2. export Adams bloku do prostředí Simulinku
3. napojení Adams bloku na zbytek modelu

7.2.1 Definování proměnných

Pro definování proměnných je použita funkce: Vytvořit stavovou proměnnou (Create State Variable). Při vytváření výstupní proměnné je potřeba jako funkci času definovat měřenou hodnotu polohy (obr. 7.8). U tvorby vstupní proměnné zůstane hodnota funkce nulová (obr. 7.9).

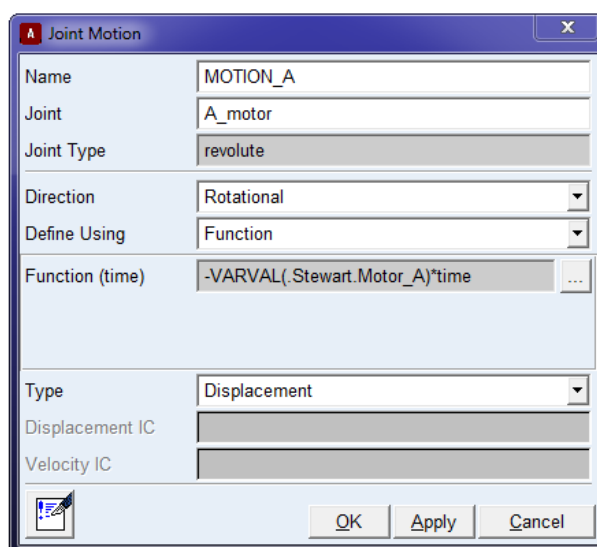


obr. 7.8 – Tvorba výstupní proměnné



obr. 7.9 – Tvorba vstupní proměnné

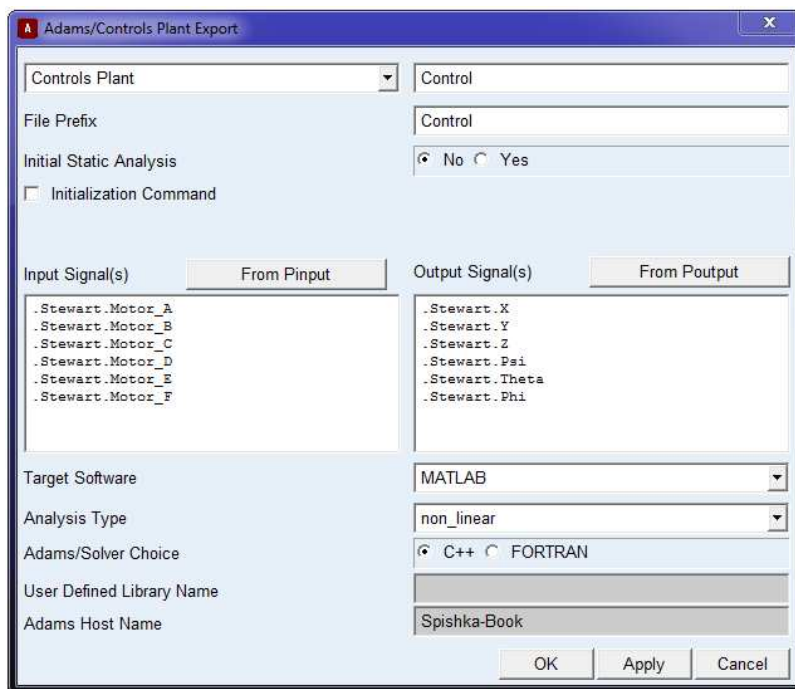
Dalším krokem je nastavení vstupních proměnných jako funkci generátoru pohybu (obr. 7.10). K tomu nám poslouží funkce VARVAL, která navrácí funkční hodnotu proměnné Motor_A. Znaménko – v tomto případě upravuje směr otáčení motoru.



obr. 7.10 – Přiřazení proměnné k pohybu

7.2.2 Export Adams bloku

Jakmile jsou definované všechny proměnné je model připraven k exportu. Ten se provede pomocí funkce: Plant Export. Pro její spuštění je potřeba mít aktivní plugin Adams/Controls. Nastavení exportu je na (obr. 7.11). Je potřeba vybrat vstupní a výstupní proměnné, které jsme byly definovány v předchozí kapitole. Jejich pořadí bude odpovídat pinům v bloku Simulinku. Dále je volen software pro export a lineární či nelineární model.

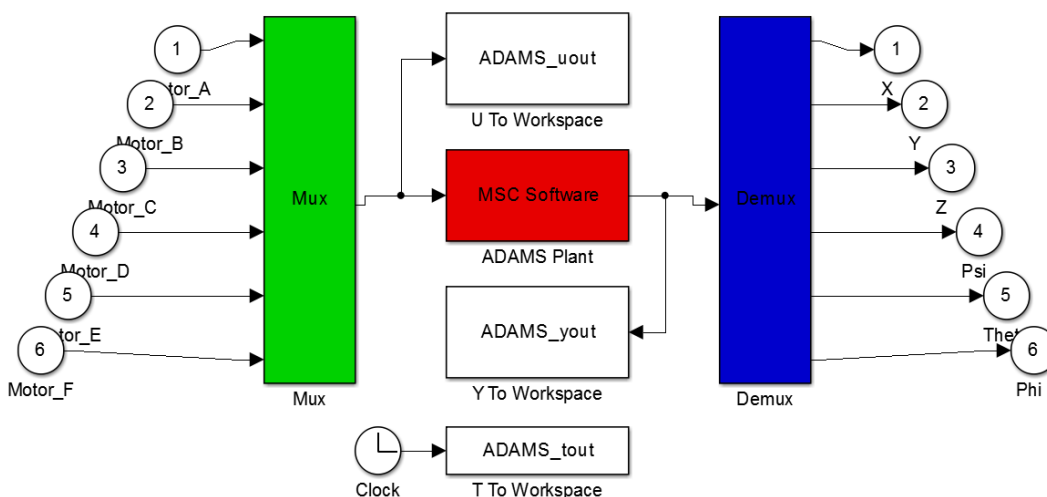


obr. 7.11 – Export co-simulačních souborů

Po provedení exportu se ve složce s modelem vytvoří 4 co-simulační soubory.

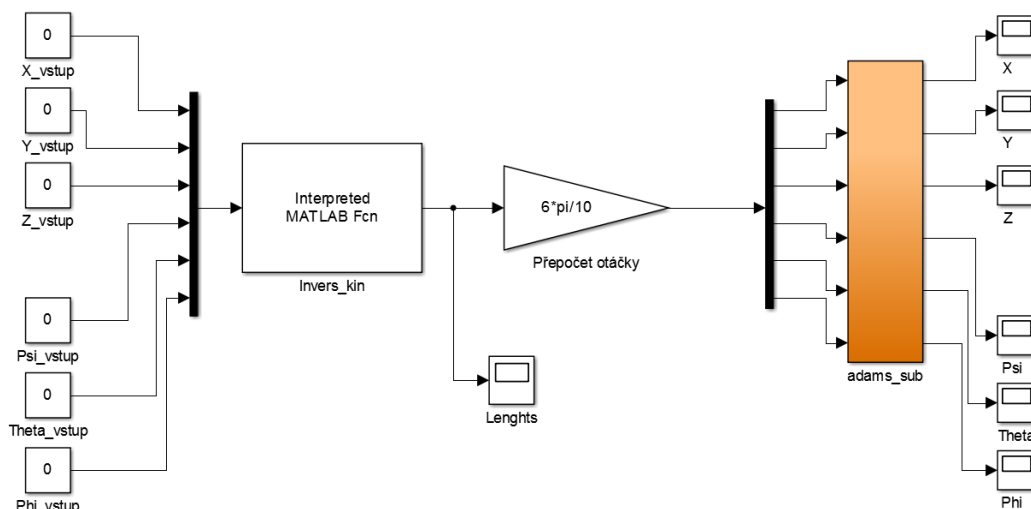
7.2.3 Import do Simulinku

Pro získání Adams bloku je potřeba otevřít Matlab v příslušné složce a do pracovního prostoru (Workspace) nahrát m-file (Control.m) vytvořený při exportu. Pomocí příkazu Adams_sys se otevře nové okno s modelem Simulinku, který je na (obr. 7.12).



obr. 7.12 – Adams blok

Z tohoto modelu byl použit pouze blok adams_sub, který vložíme do připraveného modelu s inverzní kinematikou (obr. 7.13). Ten následně bude použit pro kontrolu správnosti rovnic inverzní kinematiky.



obr. 7.13 – Model inverzní kinematiky v Simulinku

Vstupem v tomto simulačním modelu je požadovaná poloha platformy. Pomocí inverzní kinematiky je přepočítána na délky ramen a následně na otáčky motorů. Poté proběhne co-simulace a výsledkem je simulovaná poloha platformy, která je porovnána s požadovanou polohou v tabulce 7.1.

tab. 7.1 – Kontrola inverzní kinematiky

		x [mm]	y [mm]	z [mm]	ψ [°]	ϑ [°]	φ [°]
1.	P	130	130	130	0	0	0
	S	129,9993	130,0006	130,0024	0	0	0,0002
2.	P	-35	90	88	0	0	0
	S	-35,0012	90,0008	88,0064	0	0	0,0006
3.	P	-35	90	88	8	9	6
	S	-35,0009	90,0013	88,0003	8,0009	8,9997	5,9989
4.	P	0	110	0	0	25	0
	S	0,0001	110,0032	0,0059	0,0018	24,9998	0,0012
5.	P	16,25	80,39	-24,24	7	3	-13
	S	16,2495	80,3909	-24,2371	6,991	3	12,9913
6.	P	-30,33	103	-18,92	18	0	0
	S	-30,3302	103,0019	-18,9177	17,9996	0	0
7.	P	0	247	0	0	0	0
	S	-0,0004	247,0001	0,0023	0	0	0,0002
8.	P	26,3	71,2	65,7	4	9	-7
	S	26,2996	71,2012	65,7047	3,996	8,9997	-6,964

P – Požadovaná poloha, S – Simulovaná poloha

Jak je vidět z výsledků simulací, polohovací chyba ani v jednom z případů nepřesáhla 0,01 mm při translaci a 0,01° při rotaci. Rovnice pro výpočet inverzní kinematiky jsou tedy odvozeny správně.

7.3 Stavový model

Posledním krokem je vygenerování stavového modelu, který bude vhodný pro návrh stavového řízení. Nejprve však je nutno popsat stavový systém jako takový a poté potřebné úpravy modelu před samotným exportem. Na závěr je porovnán model platformy v Adamsu a vytvořený stavový model.

7.3.1 Stavový popis systému

Stavový model je matematický popis fyzikálního systému, definovaný pomocí vstupů, výstupů a stavových proměnných. Matematicky lze podle [31] popsat takto:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}\end{aligned}\tag{7.1}$$

$\mathbf{x}$ – vnitřní stavy systému

$\mathbf{u}$ – vstupy do systému

$\mathbf{y}$ – výstupy systému

$\mathbf{A}$ – matice popisující vztah mezi stavy systému a jejich derivacemi

$\mathbf{B}$ – matice popisující vztah mezi vstupy do systému a derivacemi stavů

$\mathbf{C}$ – matice popisující vztah mezi stavy systému a výstupy systému

$\mathbf{D}$ – matice popisující vztah mezi vstupy do systému a výstupy systému

7.3.2 Generování stavového modelu

Lineární stavový model se v Adamsu generuje obdobně jako co-simulační soubory přes funkci Plant Export, avšak nyní je použita možnost exportu lineárního modelu. Ten, na rozdíl od nelineárního, není schopen pracovat pouze s kinematikou a tak je před exportem potřeba předefinovat vstupní proměnné. Místo generátorů rotačních pohybů jsou použity jako vstupy krouticí momenty na osách jednotlivých motorů.

Před exportem je nutné najít rovnovážnou polohu. Toho bylo docíleno zamezením pohybu ramen při působení tíhové síly a změřením momentů působících na osy motorů. Tyto hodnoty jsou následně přidány jako konstanty k řízeným krouticím momentům. Takže při nulových hodnotách vstupu je platforma v klidu. Naměřená hodnota momentu 95,91 N.mm platí pro všechna ramena.

Při samotném exportu provede Adams linearizaci modelu kolem pracovního bodu a vytvoří soubory obsahující matice A, B, C, D a m-file pro spuštění co-simulace v Matlabu.

Lineární model odpovídá modelu v Adamsu jen v určité oblasti kolem pracovního bodu (rovnovážné polohy) ve kterém byl vytvořen. Což je ověřeno v následující tabulce 7.2.

Jako vstup do všech motorů je zadána stejná hodnota krouticího momentu a je porovnána hodnota polohy v ose y v závislosti na čase simulace. Pracovní bod má souřadnici $y = 0$ mm.

tab. 7.2 – Porovnání stavového a Adams modelu

Moment [N.mm]	Čas [s]		y [mm]
0,2	0,3	A	0,8862
		S	0,8715
	0,7	A	6,9250
		S	6,7792
	1	A	21,9908
		S	21,6104
0,5	0,3	A	2,1936
		S	2,1766
	0,7	A	17,4188
		S	16,9408
	1	A	55,4213
		S	54,0261
1,3	0,3	A	5,6925
		S	5,6637
	0,7	A	45,4903
		S	44,0617
	1	A	139,7093
		S	140,4677

A – Adams model, S – Stavový model

Se zvětšující se vzdáleností od pracovního bodu roste chyba způsobená linearizací modelu.

8 Závěr

Hlavním cílem bakalářské práce bylo vytvoření multi-body mechatronického modelu Stewartovy platformy. Při tvorbě konstrukčního návrhu v SolidWorks, který sloužil pro následný import a simulaci kinematiky a dynamiky v MSC Adams, bylo zohledněno použití skutečných součástí, běžných při konstrukci tohoto mechanismu. Získaný multi-body model mechanismu byl doplněn o rovnice inverzní kinematiky a následně linearizován kolem pracovního bodu. Jak popis inverzní kinematiky, tak obdržený lineární stavový model by mohl být dále použit jako součást návrhu stavového řízení. Návrh řízení samotného však již nebyl předmětem zadání práce.

Součástí práce je také rešerše zabývající se využitím paralelních robotů v průmyslové praxi. Rešerše samotná obsahuje několik ukázek z různých průmyslových odvětví včetně několika unikátních konstrukcí.

Seznam použité literatury

- [1] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 260 s [cit. 2015-05-27]. ISBN 978-80-248-1522-0. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf
- [2] SICILIANO, Bruno. *Robotics: modelling, planning and control*. London: Springer, 2009, 632 s. Advanced textbooks in control and signal processing. ISBN 18-462-8642-5.
- [3] KOLÍBAL, Zdeněk. *Průmyslové roboty I. Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů. P RaM*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1993, 189 s. ISBN 80-214-0526-0.
- [4] KOHOUT, Luděk. *Roboty a manipulátory* [online]. VOŠ a SPŠ Kutná Hora [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www.edumat.cz/texty/Roboty_manipulatory.pdf
- [5] MRÁZ, Petr. *Průmyslové roboty v praxi*. [online]. České vysoké učení technické Praha, Fakulta strojní, Ústav konstruování a částí strojů. 2008 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/VSZ_-_2351054/VSZ_-_Aplikace_Robotu.pdf
- [6] MERLET, J. *Parallel robots*. 2nd ed. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 2006, 355 s. ISBN 978-140-2041-334.
- [7] KNOFLÍČEK, Radek. *Historie hexapodů*. MM spektrum [online]. 2003, [cit. 2015-05-27]. Dostupné z : <http://www.mmspektrum.com/clanek/historie-hexapodu.html>
- [8] BONEV Ilian . The True Origins of Parallel Robots. *parallelic*. [online]. 30.1.2003 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.parallelic.org/Reviews/Review007.html>
- [9] WECK, M., D. STAIMER, Dan ZHANG, A. J. WAVERING, G. WIENS a D. HARDAGE. Parallel Kinematic Machine Tools – Current State and Future Potentials: Past, Present, and Future. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2002, 51(2): 217-225. DOI: 10.1007/978-1-4471-0885-6_14.
- [10] METROM, *Mechatronische Maschinen GmbH* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.metrom-mobil.com/>
- [11] KOZUBÍK, J. Experimentální robotizované pracoviště s delta-robotem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 103 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr..
- [12] HexaBend, Fraunhofer IWU [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://www.iwu.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/wzm_und_produnktionsysteme/hexabend.html

-
- [13] CHINI, Rolf. The Hexapod Telescope: A Never-ending Story. *Reviews in Modern Astronomy* 13. 2000, : 257-268. Dostupné také z: <http://adsabs.harvard.edu/full/2000RvMA...13..257C>
- [14] Hexapod Telescope. *Instituto de astronomía* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.iaucn.cl/en/observatories/bochum-ucn>
- [15] SAGEIII. *NASA Missions* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://science.nasa.gov/missions/sage-3-iss/>
- [16] SAGE III - ISS. *National aeronautics and space administration* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://sage.nasa.gov/SAGE3ISS/>
- [17] BONEV Ilian . Delta Parallel Robot — the Story of Success. [online]. 6.5.2001 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>
- [18] FlexPicker. *ABB* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/d264e2abafe82ce1c1257cf50032eba9.aspx>
- [19] FANUC M1iA/0.5SL. *RobotWorx* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.robots.com/articles/viewing/the-fanuc-m1ia-0-5sl-robot>
- [20] ORION 3D Printer. *SeeMeCNC* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://seemecnc.com/products/orion-delta-3d-printer>
- [21] TRICEPT. *Loxin* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.loxin2002.com/general-descriptio>
- [22] Tricept T606. *MKPTricept* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.pkmtricept.com/productos/index.php?id=en>
- [23] Full-Flight Simulator. *CAE* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.cae.com/>
- [24] IPAnema. *Fraunhofer IPA* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.eu-nited.net/robotics/press-room/cable-robot-ipanema-extended-version-for-engineers.html>
- [25] NAN, RENDONG, DI LI, CHENGJIN JIN, QIMING WANG, LICHUN ZHU, WENBAI ZHU, HAIYAN ZHANG, YOU Ling YUE a LEI QIAN. THE FIVE-HUNDRED-METER APERTURE SPHERICAL RADIO TELESCOPE (FAST) PROJECT. *International Journal of Modern Physics D*. 2011, 20(06): 989-1024. DOI: 10.1142/s0218271811019335. Dostupné také z: <http://arxiv.org/abs/1105.3794>
- [26] Aktuátor DLA 200. *Transmotec* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.transmotec.cz/linearni-aktuatory/dla-bez-senzoru.html>
- [27] Components for parallel kinematics. *INA katalog* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.promshop.info/cataloguespdf/mai66deus.pdf>
- [28] Hexapod Breva. *Symétrie* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.symetrie.fr/en/positioning/products/breva-hexapod/>
-

-
- [29] HAJŽMAN, Michal. *Pomocný text k proniknutí do základů práce se systémem ADAMS* [online]. 2005 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: www.kme.zcu.cz/mhajzman/download/adams_zaklad.pdf
- [30] Dynamic Designer Motion User's Guide. *Mechanical Dynamics, Inc.* [online]. 2002 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://web.mscsoftware.com/support/prod_support/ddm/documentation/ddinventor_userguide_2003.pdf
- [31] TUREK, Milan. *Tvorba stavového modelu systému* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a4-716/vyuka/rir/pdf/stavovy_model.pdf

Seznam příloh

Přílohy odevzdány elektronicky:

- Stavový model – složka obsahující stavový model
- Invers.m – m-file s výpočtem inverzní kinematiky

Přílohy na přiloženém CD:

- Adams – složka obsahující model v MSC Adams 2013
- Co-simulace – složka obsahující soubory co-simulace
- SolidWorks – složka obsahující model v SolidWorks 2014
- Stavový model – složka obsahující stavový model