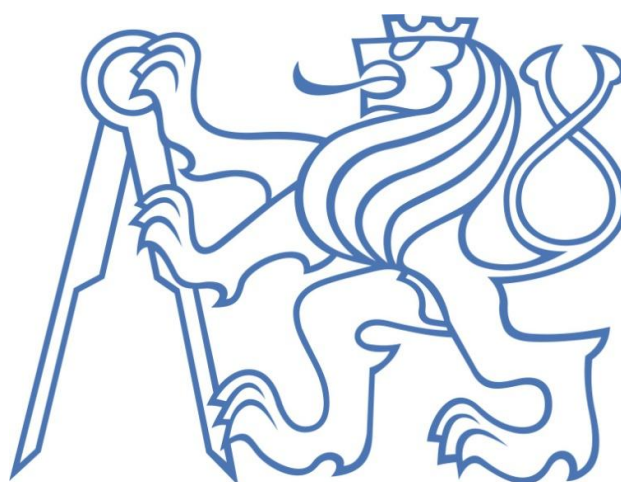


BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

FAKULTA STROJNÍ

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky



TÉMA:

PARALELNÍ MANIPULÁTOR SE DVĚMA STUPNI VOLNOSTI

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kvasnica** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **420529**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojínského inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Paralelní manipulátor se dvěma stupni volnosti

Název bakalářské práce anglicky:

Parallel manipulator with 2 degrees of freedom

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou robotů a jejich řízení 2. Vytvořte kinematický a dynamický simulační model paralelního manipulátoru 3. Navrhněte řídicí algoritmus pro pohyb robota po zadané trajektorii 4. Navrhněte konstrukční řešení robota a proveďte jeho realizaci 5. Proveďte simulační a experimentální ověření navržených algoritmů 6. Porovnejte výsledky získané simulačně a z experimentu

Seznam doporučené literatury:

Stejskal V., Valášek M.: Kinematics and Dynamics of Machinery. Marcel Dekker, Inc., New York 1996 B. Siciliano, Modelling and Control of Robot Manipulators, 2nd Edition Jorge Angeles, Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms (Mechanical Engineering Series)

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Martin Nečas MSc., Ph.D.

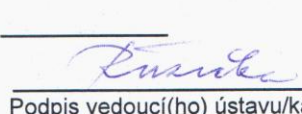
Jméno a pracoviště konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17-08-2016**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

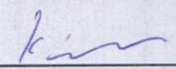

Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

25.4.2016
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Anotace

Jméno autora:	Ondřej Kvasnica
Název bakalářské práce:	Paralelní manipulátor se dvěma stupni volnosti
Anglický název:	Parallel manipulator with 2 degrees of freedom
Akademický rok:	2015/2016
Obor studia:	TZSI
Ústav:	U12105–Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Martin Nečas, MSc. Ph.D
Bibliografické údaje:	počet stran: 44
	počet obrázků: 27
	počet tabulek: 0
	počet grafů: 0

Klíčová slova: robot, manipulátor, mechanismus, kinematika, dynamika, simulace, automatizace

Keywords: robot, manipulator, machinery, kinematics, dynamics, simulation, automation

Anotace: Tato bakalářská práce se zabývá komplexním návrhem modelu paralelního daného manipulátoru. Popisuje jeho pracovní prostor, volbu rozměrů a princip funkce mechanismu. Dále popisuje sestavení kinematického a dynamického modelu včetně jeho využití. V závěru práce je ukázána simulace manipulátoru při psaní požadovaného textu.

Abstract: This bachelor thesis analyzes complex design of the parallel manipulator. It describe size of its workplace, choosing proportions and principle of the machinery. It shows creating of kinematics and dynamics models and its using. In the end is simulation of writing the text by manipulator.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze za odborného vedení vedoucího práce. Veškeré zdroje informací, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne

podpis:

.

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Martinovi Nečasovi, MSc. Ph.D., za pomoc při zpracování bakalářské práce a za vstřícnost při řešení problémů.

Obsah

1	Úvod.....	3
1.1	Motivace	3
1.2	Cíle práce.....	3
2	Rešerše	3
2.1	Historie robotů.....	3
2.2	Definice slova robot.....	4
2.3	Rozdělení robotů.....	5
2.3.1	Rozdělení podle generací	5
2.3.2	Rozdělení robotů podle schopnosti pohybu	6
2.3.3	Rozdělení robotů podle vzhledu a účelnosti	7
2.4	Působení robotů v jednotlivých odvětví	7
2.4.1	Strojírenství	8
2.4.2	Potravinářství	9
2.4.3	Armáda	10
2.4.4	Lékařství.....	11
2.4.5	Dřevo zpracující průmysl	12
2.4.6	Doprava	12
3	Paralelní manipulátor	14
3.1	Rozměry mechanismu a pracovní prostor	14
3.2	Konstrukční návrh	18
3.3	Kinematický model.....	20
3.4	Dynamický model.....	25
3.5	Inverzní kinematický model	34
3.6	Inverzní dynamický model	36
3.7	Simulace chování navrženého modelu	37

4	Závěr.....	42
5	Seznam obrázků	43
6	Použité zdroje.....	44
6.1	Bibliografické citace:.....	44
6.2	Literatura:	44
6.3	Internetové odkazy:	44

1 Úvod

1.1 Motivace

Díky automatizaci služeb, procesů a výroby se lidem otevírají stále nové možnosti. Mě automatizace velice zajímá, a tak se jí snažím věnovat svůj volný čas a učit se novým dovednostem. V automatizaci hrají svojí velkou roli roboty, kteří dokážou usnadnit mnohé práce, a proto jsem se rozhodl zaměřit svojí bakalářskou práci právě robotům. Touto prací se chci o robotech dozvědět nové informace a rozšířit si celkové znalosti z této problematiky. Zároveň bych chtěl využít své znalosti z mechaniky a aplikovat je na tvorbu simulačního modelu daného manipulátoru.

1.2 Cíle práce

Cílem práce je shromáždit informace o historii robotů, rozdělit roboty podle různých kritérií a popsat jednotlivé působení robotů v různých odvětvích. Hlavním cílem je ovšem sestavit kinematický a dynamický model zadaného paralelního manipulátoru a s využitím počítačového programu Matlab dané modely odzkoušet a ověřit správnost výpočtů. Dále budou oba modely převedeny do inverzní podoby a bude navržen algoritmus k řízení manipulátoru. Tyto poznatky budou vloženy do programu Simulink, kde se nasimuluje chování manipulátoru. Celý projekt bude končit realizací manipulátoru a porovnáním dat ze simulací se skutečností.

2 Rešerše

2.1 Historie robotů

Tato kapitola vychází z [1].

Představy a touhy usnadnit si svojí práci pomocí nějakého stroje, měli lidé už od nepaměti. Už ve starověkém Řecku si bůh kovář Hefaistos vytvářel, podle legendy, mechanické sluhý. První reálný plán připomínající robota se ale objevil až o stovky let později a to od Leonarda da Vinciho. Ten kolem roku 1495 sestrojil návrh mechanického rytíře, který by uměl sedět, hýbat rukama, hlavou a dokonce čelistmi. Výsledek jeho bádání ovšem není známý. Označení robot, které používáme dodnes, zavedl až Karel Čapek roku 1920 v jeho hře R.U.R a to jenom čirou náhodou po návrhu od jeho bratra Josefa Čapka. Tento název se lidem zalíbil a začal se tedy používat po celém světě.

První robot, který se uvedl do průmyslu se začal konstruovat až roku 1956 americkými inženýry Georgem Devolem a Josephem Engelbergerem. Ti svůj výtvar, pojmenovaný Unimate, zavedli o pět let později ve městě Trenton ve firmě společnosti General Motors, kde robot manipuloval a uskladňoval horký kov ze slévárny. Vývoj robotů pokračoval a s ním rostla i poptávka po robotech. [1] *Hospodářská situace v západních státech se zlepšovala, zákazníci měli*



větší požadavky na výroby. **Obr. č.: 1 Jeden z prvních průmyslových robotů**

A to bylo správné prostředí

pro vývoj robotiky. Průmyslový robot začal obsluhovat výrobní techniku v linkách a nahradil lidský faktor při nadměrně namáhavých pracích v nepříznivých podmínkách. Roboty byly využívány například v automobilovém průmyslu, hlavním dodavatelem byla v té době firma GMF Robotics Corporation. Roku 1974 přišel do průmyslu první robot v Japonsku. V Evropě se první roboty objevily až roku 1983, kde se v Anglii podílely na výrobě ventilů. Tento rok se také zautomatizovala výrobní linka v Bulharsku ve firmě BAROE. Velký nárůst robotů pokračoval začátkem 90. let a to v západní Evropě. U nás se robotika také rozrostla, ale je tomu tak až posledních několik let. Možnosti robotů se stále rozšiřují. Od pouhého manipulování ve strojírenství se roboty dostaly do potravinářského průmyslu, do výroby plastů nebo dokonce do medicíny.

2.2 Definice slova robot

Tato kapitola vychází z [2].

Robot je uměle vytvořený stroj, který podle předem naprogramovaného programu vykonává danou práci, která je mu zadána. Robot, dle daného typu, může umět do určité míry pozorovat své okolí, rozhodovat se pro nejlepší řešení podle daného vzorce nebo měnit programy podle vyhodnocené situace. Robot je tedy stroj ovládaný počítačem.

2.3 Rozdělení robotů

Tato kapitola vychází z [2].

Rozdělení robotů se nedá jednoznačně určit, a proto roboty dělíme podle daných kritérií.

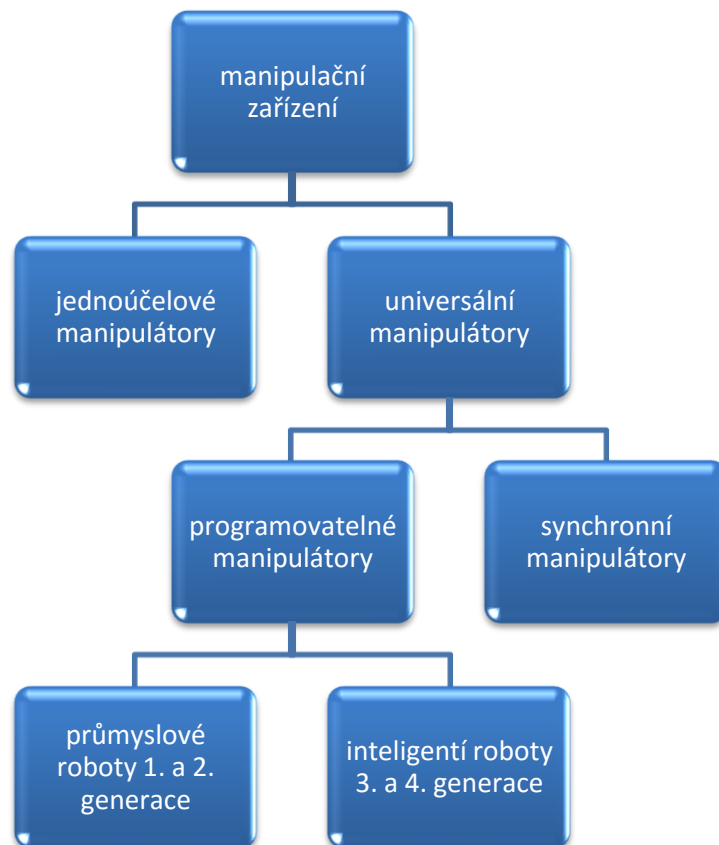
2.3.1 Rozdělení podle generací

- **Roboty nulté generace** jsou většinou manipulátory a roboty bez zpětné vazby. Veškeré chyby nebo nesrovnalosti v oblasti nebo v plnění procesu vedou pouze k zastavení běžícího programu, odpojení stroje od energie a zavolání obsluhy nebo seřizovače.
- **Roboty první generace** jsou manipulační zařízení, která jsou naprogramovaná na pevně po sobě jdoucí operace. Mají jen malou zpětnou vazbu.
- **Roboty druhé generace** jsou naprogramovány na vyšší úrovni. Mají vyspělejší odezvu na dané situace a dostávají možnost volby optimálního programu, podle daného vzorce, pro dané řešení. Bývají osazeny spoustou senzorů.
- **Roboty třetí generace** dokážou sami tvořit svůj vlastní program. Zadáva se jim pouze cíl práce a oni mají možnost se sami rozhodnout, jak se k danému cíli dopravují a to na základě učení a sbírání zkušeností.
- **Roboty čtvrté generace** jsou plně autonomní, mají sociální chování. Jsou velice podobné člověku, sami volí svůj cíl práce.



Obr. č.: 2 Průmyslový manipulátor

V našem průmyslu se zatím využívají nejvíce roboty nulté a první generace. Roboty druhé generace se rozšiřují, ale jejich cenová dostupnost není stále optimální.



2.3.2 Rozdělení robotů podle schopnosti pohybu

- **stacionární roboty** - tyto roboty se nemohou vůbec pohybovat, patří sem např. : výrobní automaty a průmyslové manipulátory
- **mobilní roboty** - roboty, které mají jakoukoliv možnost vlastního pohybu
 - a) pozemní - nejrozšířenější kategorie, např. : veškeré humanoidní roboty a roboty pro vojenské využití
 - b) vodní - např. : hlubinné sondy
 - c) vzdušné - např. : drony, bezpilotní letadla



Obr. č.: 3 Letající dron

2.3.3 Rozdělení robotů podle vzhledu a účelnosti

[3]

- **Manipulátory** jsou stroje, které nemají vlastní inteligenci a jsou ovládnány pouze dálkově.
- **Android** je stroj podobný člověku. Ideálem je stroj zkonstruovaný na biologickém základu. V této kategorii se můžeme setkat se třemi typy:
 - a) **Droid** je inteligentní a samočinný robot určený například pro svařování nebo nanášení barev. Jeho typem je i dron, tedy droid pracující jako dělník.
 - b) **Humanoid** je robot podobný člověku stavbou těla a hlavně způsobem pohybu. Lidská chůze je bezkonkurenčně nejtěžší způsob pohybu robotů.
 - c) **Anthropomorfní robot** je stroj, který napodobuje člověka buď fyzicky (napodobuje veškeré lidské pohyby) nebo se mu přibližuje mentálně.
- **Kyborg** (kybernetický organismus) je umělá bytost či mysl. Jedná se o přírodní biologické tělo, které je plně pod kontrolou stroje, díky biokybernetickému propojení. Může se však jednat i o naprostý opak, kdy živá přírodní bytost nebo mysl ovládá uměle upravené tělo, které je obohaceno o mechanické nebo elektronické součástky. V extrémním případě se může jednat pouze o mozek. Tento kyborg je však stále považován za člověka.



Obr. č.: 4 Humanoid NAO

2.4 Působení robotů v jednotlivých odvětvích

Tato kapitola vychází z [4], [5], [6], [7], [8], [9].

Aplikaci robotů můžeme rozdělit podle dvou jednoduchých kritérií:

- Použití robotů pro práce, které robot zvládne lépe než člověk. Například zrychlí proces výroby, zvýší přesnost nebo přenesou něco, co by člověk ani nedovedl a podobně.

- Použití robotů pro práce, které člověk dovede lépe, ale z určitých důvodů je lepší použití robota. Například odstranění nudných opakovaných prací, provádění pro člověka nebezpečných prací a podobně.

2.4.1 Strojírenství

Pole působnosti robotů jsou opravdu veliké a ve strojírenství je jich bezpochyby

nejvíce. Ve všech oborech strojírenství je spousta operací, které díky své opakovatelnosti, náročnosti a nebo přesnosti je lepší zautomatizovat. Největší část používaných robotů najdeme v automobilovém průmyslu a to více než 70% všech průmyslových robotů. Z počátku roboty ve strojírenství dostávaly uplatnění pouze u jednoduchého přemísťování vyráběných součástí,



Obr. č.: 5 Robotická obsluha lití kovů

či potřebného materiálu, ale dnes je jejich uplatnění mnohem širší. Dnes se roboty využívají ke svařování, a to jak metodami odporového (bodového) svařování, tak i obloukového svařování (MIG, TIG, laser, plazma...). Dále se využívají v obráběcích, tvářecích a lisovacích halách, kde obsluhují jednotlivé stroje nebo také slouží k montáži jednotlivých součástí. Dále roboty fungují ve slévárenství, kde vyrábějí formy, pracují s tekutým kovem a nebo z bavují odlitky vtokových soustav a podobně. Jednou z velikých aplikací robotů je také výroba plastových součástí. K tomu všemu se velice rozšířila jejich působnost v dokončovacích operacích, kde roboty měří jednotlivé součásti, brousí, odstraňují ořepy apod. Zároveň se hojně využívají k paletizaci a balení výrobků. Velikým postupem, kterého se zatím nepodařilo plně dosáhnout, je představa robota sloužícího přímo k obrábění. Toto ale uskutečnit je velice obtížné, protože u obrábění záleží velice na přesnostech obrobku, kterých roboty nejsou zatím schopné dosáhnout už jen kvůli své konstrukci a kvůli vysokým vibracím při obrábění.

Celkové využití robotů ve strojírenství působí velice kladně, protože se díky robotům dosahuje lepších kvalit výrobků za mnohem kratší časy. veliké rozšíření jejich působnosti

vedlo i k velkému zlevnění používaných robotů a tudíž si je dnes mohou dovést i menší firmy. Velikou výhodou jejich využití je také možnost rychlého přeprogramování na jiný vyráběný díl a to díky rychle se zlepšujícímu uživatelskému prostředí je stále jednodušší.

2.4.2 Potravinářství

V potravinářství je sice robotů daleko méně, ale jejich využití stále stoupá. Roboty v této oblasti nacházejí velké uplatnění v balících a paletizačních úlohách. Jejich rychlost je totiž ve srovnání s lidmi naprosto nesrovnatelná. Robot je schopen naskládat třeba 500 kusů bonbonů do krabic od bonboniér za jednu minutu. Díky novým kamerám jsou roboty schopny pracovat s velice rozdílnými produkty a v naprosto jiném rozložení. Navíc speciální roboty pro potravinářské firmy ušetří i spoustu peněz za hygienu, protože tyto roboty jsou ochranně zkonstruované a na jejich mazání jsou potřeba jen potravinařsky nezávadné mazadla. Dokonce už jsou i speciální roboty pro práci s mraženými výrobky, které vydrží prostředí



až do $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a to bez ohřívání. Toto **Obr. č.: 6 Robotická manipulace s potravinami** relativně jednoduché využití robotů

není v potravinářství ovšem jediné. Vznikly totiž i roboty, které dnes nahrazují například řezníky a oddělují velké kusy masa od kůže a nebo od kostí. Tato práce se tedy potom dá provést daleko snadněji a rychleji s vysokou účinností. V Japonsku se dokonce snaží vynalézt roboty kuchaře. Využití robotů v tomto oboru stále roste a bude růst i nadále, protože kvůli neustále rostoucí poptávce po co nejnižších cenách firmám nezbyde nic jiného, než uvést roboty do provozu (za předpokladu nesnížení kvality produktů).

2.4.3 Armáda

Robotizace armád se za poslední léta také velice rozrostla. Představy, které se dříve zdály jako sci-fi, se dnes pomalu stávají skutečností. Dnes se z vojenských robotů nejvíce používají bezpilotní letouny (drony), které mají v armádě různé úkoly. Některé slouží jen k průzkumu terénu, jiné zase mohou sbírat určitá data a některé jsou dokonce vyzbrojena a slouží k zabíjení nepřátel. Drony jsou ovládané operátory na dálku z bojových základen.

Kromě dronů najdeme v armádě spoustu dalších robotů. Tak například v námořnictvu můžeme vidět roboty sloužící k vyhledávání a odstraňování podvodních min. Také nově vyvinutou americkou robotickou rybu, která se podobá žraloku a může se využívat k



Obr. č.: 7 Robot na detekci výbušnin

prozkoumávání vod nepřítelů nebo jako kontroly lodí a

podobně. Tam kam se ale nyní zaměřují vývojové týmy vojenských robotů, je směr pozemních jednotek. Na zemi zatím armády využívají hlavně roboty pro odstraňování min a všemožných výbušnin nebo roboty pro prozkoumávání kontaminovaného prostředí. Nyní ovšem přichází poptávka po bojových jednotkách. Zatím se ve vojskách vyvíjí dálkově ovladatelné roboty s určitými zbraněmi, detekcí výstřelu nebo roboty se spoustou senzorů a možností odbírání vzorků pro různé účely. Potřebným řešením je také robot sloužící k dovozu zbraní, munice, léků nebo odvozu raněných z bojiště.

2.4.4 Lékařství

V lékařství se roboty využívají zejména v chirurgických zákrocích. Roboty totiž umožňují chirurgickou revoluci, kdy doktoři operují pacienta vzdáleně skrze ovládaného robota. Princip tohoto zákroku je dost podobný laparoskopii (zákrok, při kterém se do člověka zavádějí malými otvory lékařské nástroje). Do těla pacienta se vyříznou malé otvory do kterých se následně zasouvají ramena robota.



Obr. č.: 8 Robot pro chirurgické operace

Robot má většinou tři ramena pro přímé provádění operace a jedno rameno s kamerou. Doktor provádějící zákrok, sedí buď přímo v místnosti nebo někde vedle u ovládacího centra robota s přitisknutým čelem k promítacímu místu, kde vidí celý operovaný prostor zvětšený ve 3D. On jen hýbe velmi citlivými joysticky a ovládá ramena robota. Tímto pro doktory odpadají dlouhé hodiny strávené ve stoje na sále v dost nepraktických a nepohodlných polohách. Tímto se také zmenšuje stres a únava spojená s tímto výkonem, což zlepšuje konečný výsledek operace. Zároveň roboty přináší větší přesnost a možnost pracovat v daleko menších prostorách, tudíž se pacient po zákroku léčí mnohem rychleji a je tak možné ho pustit domů mnohem dříve. Jedinou velikou nevýhodou je cena těchto operací. Ta se pohybuje v řádu sta tisíců za operaci a pojišťovny je stále nechtějí moc hradit, a tak se s těmito roboty léčí jen pár zdravotních onemocnění. Navíc je k těmto robotům potřeba zkušených a proškolených doktorů, což bývá také velice složité.

Dnes je těchto robotů ve světě jen několik desítek, ale dobrou zprávou je, že v Čechách je také máme a dokonce naši doktoři patří mezi špičku v tomto oboru. Díky finanční náročnosti těchto robotů se jejich rozvoj zvyšuje velice pomalu. Jako budoucnost v tomto oboru lékaři vidí operace prováděné na dálku. Zmenšily by se tak náklady na přepravu pacientů a mohl by se do problému zapojit jakýkoliv odborník po celém světě.

2.4.5 Dřevo zpracující průmysl

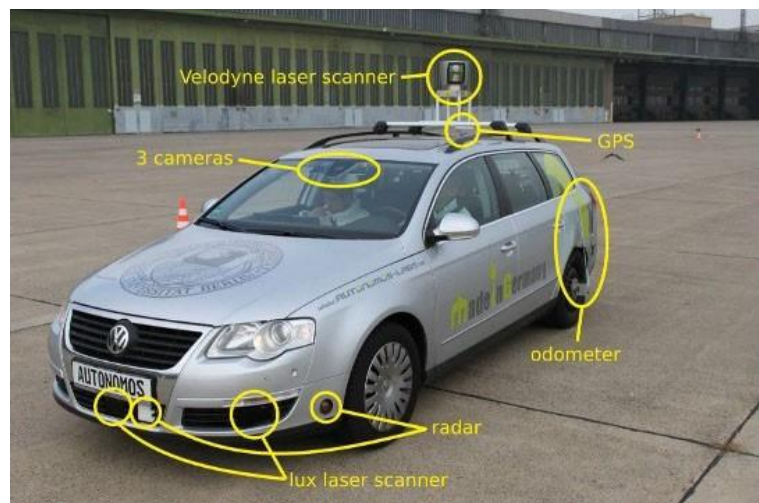
Základem používání robotů je zde především velká sériovost a relativně jednoduché operace výroby. Roboty zde tedy fungují, podobně jako ve strojírenství, v oblastech manipulace, obsluhy strojů a nebo montáže. Můžeme je také vidět v balící části, kde dokážou být velice produktivní, nebo také v oblasti lakování. Lakování roboty je velice výhodné, protože dokážou nanášet stejnou souvislou vrstvu po celém výrobku. Největším úspěchem v dřevařském průmyslu je provádění obráběcích operací pomocí robotů. Roboty umí dřevo frézovat i brousit. Pracuje se zde jako ve strojírenství s 3D modely převedenými pomocí CAM systému do softwaru pro roboty, kde přesnou simulací můžeme vidět dráhy pohybů robota a poté zahájit výrobu. Toto se využívá hlavně pro velké výrobky, kde by bylo složité používat obráběcí centra. Využití robotů je v tomto oboru velice komplexní a dá se díky němu zavést 24 hodinový provoz, což spěje k veliké návratnosti počátečních investic.



Obr. č.: 9 Obrábění dřeva robotem

2.4.6 Doprava

V dopravě nemůžeme vidět typické roboty či manipulátory, ale pracuje se zde na vývoji veliké automatizace a to v podobě autonomních vozidel. Už dnes můžeme ve stávajících automobilech nalézt spoustu prvků automatizace. Patří mezi ně funkce ABS, ESP, parkovací asistent a podobné systémy zlepšující ovládání vozidla. Nyní se ale



Obr. č.: 10 Autonomní automobil

několik společností snaží vyrobit auto, které by úplně samo řídilo a reagovalo na všemožné situace v dopravě. Lidem by stačilo jen říci řídicímu systému, kam chtějí dovézt a zbytek by za ně vyřešilo samotné vozidlo. Tato představa vznikla už hodně dávno, již před druhou světovou válkou se lidé snažili rozpohybovat automobil na dálku. Začalo to pouze přes kabel, poté na dálkové ovládání, ale díky slabým řídicím prvkům jen na krátké vzdálenosti a v prázdných halách. Postupem času vývoj pokračoval a dnes díky více jádrovým procesorům se tato představa stává realitou. Mnoho automobilových společností se touto problematikou zabývá, ale bezkonkurenčně nejdál je firma Google, která na vývoji pracuje opravdu řadu let. Tato firma dokonce najezdila přes sto tisíc kilometrů v provozu s autonomním vozidlem v Kalifornii. Google dokonce vyrobil svůj prototyp vozidla a nechal v něm svést několik občanů.

Celý systém funguje na rozsáhlém pozorování okolí. Automobil musí mít kolem sebe spoustu kamer, které vyhodnocují dění kolem auta, dále je zde také mnoho laserů, které slouží k přesnému odměřování všech věcí kolem a pak auto musí mít velice dobrý řídicí systém, který musí obsahovat velikou databázi všech situací, které mohou nastat, tak aby byl schopen přesně určit chování v dané situaci. Provoz na silnici je velice složitý, může se tam stát opravdu cokoliv, a tak je jisté že vývoj bude ještě řadu let pokračovat. Specialisté se ale shodují, že už do pěti let budeme moci vlastnit automobily, které budou umět řídit samy alespoň v jednoduchých situacích jako jsou kolony. Poté by prý měli přijít automobily schopny autonomního řízení, ale jen pokud si to člověk zvolí. Bude zde ale možnost kdykoliv převzít



Obr. č.: 11 Představa auta bez řidičů

řízení. No a nakonec bychom se měli dočkat doby, kdy už budou řídit auta zcela samy a lidé zde budou jen sedět jako pasažéři jako například ve vlaku. S tím se váže vize, že by lidé neměli mít své auta, ale pouze by si je půjčovali přivoláním přes různé aplikace například pomocí telefonů nebo tabletů. Toto řešení by mělo zlepšit parkování ve velkých městech a zmenšilo by se chátrání nepoužívaných vozidel. Tato představa má ovšem spoustu otazníků, které se budou muset ještě vyřešit. Hlavním problémem je otázka zákona, protože kdyby zcela převzal řízení automobil, tak kdo by potom zodpovídal za případné nehody? Tato inovace přináší veliký převrat, ale na jeho přesnou realizaci si musíme ještě počkat.

3 Paralelní manipulátor

Tato část popisuje celý postup při tvorbě simulačního modelu paralelního manipulátoru . Je zde zároveň popsán návrh konstrukce manipulátoru a princip fungování.

3.1 Rozměry mechanismu a pracovní prostor

Zadání bylo vytvořit simulační model pro manipulátor s konstrukcí podle obr. č.: 13. Nebyly zadány žádné rozměry, a tak bylo potřeba je určit. Podle rovnice (3.1) pro určení počtu stupňů volnosti z [10, str. 27], která platí pro rovinný mechanismus, kde:

u - počet těles i s rámem = 5,

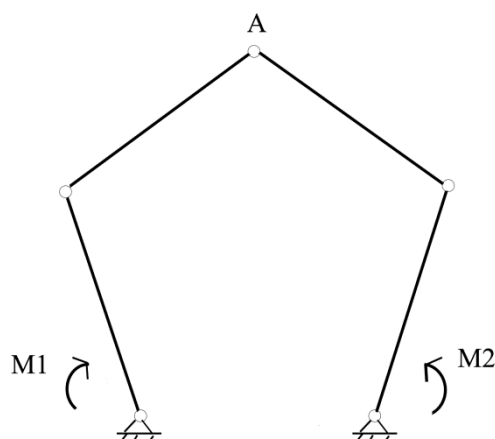
vp - pevné vazby = 0,

r - rotační vazby = 5,

p - posuvné vazby = 0,

v -valivé vazby = 0,

o - obecné vazby = 0,



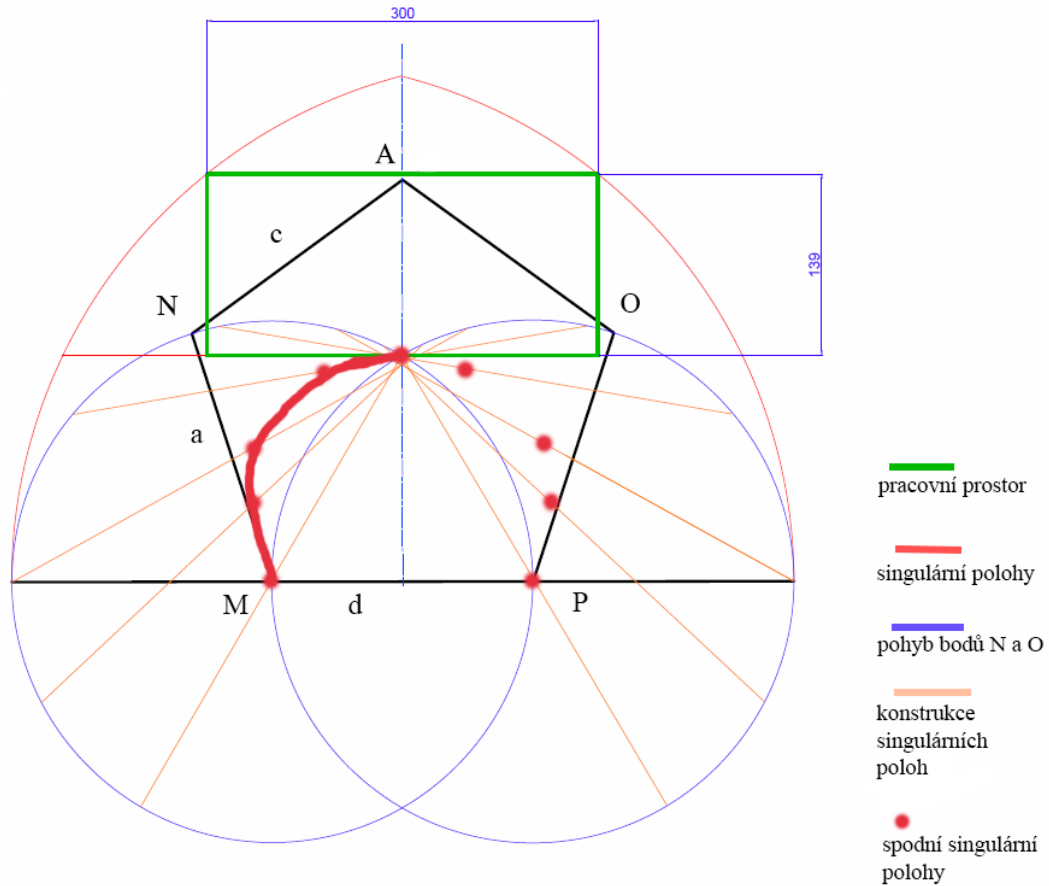
Obr. č.: 12 Zadání požadovaného manipulátoru

$$n = 3 \cdot (u - 1) - 3 \cdot vp - 2 \cdot (r + p + v) - 1 \cdot o \quad (3.1)$$

je jasné, že počet stupňů volnosti mechanismu $n = 2$. Dále je nutné zkontrolovat, zda zadaný mechanismus má nějaké singulární polohy. Singulární poloha je místo, kde mechanismus ztrácí svoji ovladatelnost (tzn. nedá se pro jakoukoliv rychlost dostat do požadované polohy). Singulární polohy ovlivňují velikost pracovního prostoru, a proto je potřeba si je všechny vyznačit při řešení rozměrů mechanismu.

V tomto projektu bylo využito programu Autodesk Autocad Mechanical k nakreslení pracovního prostoru mechanismu a k volbě potřebných proporcí manipulátoru. Bylo

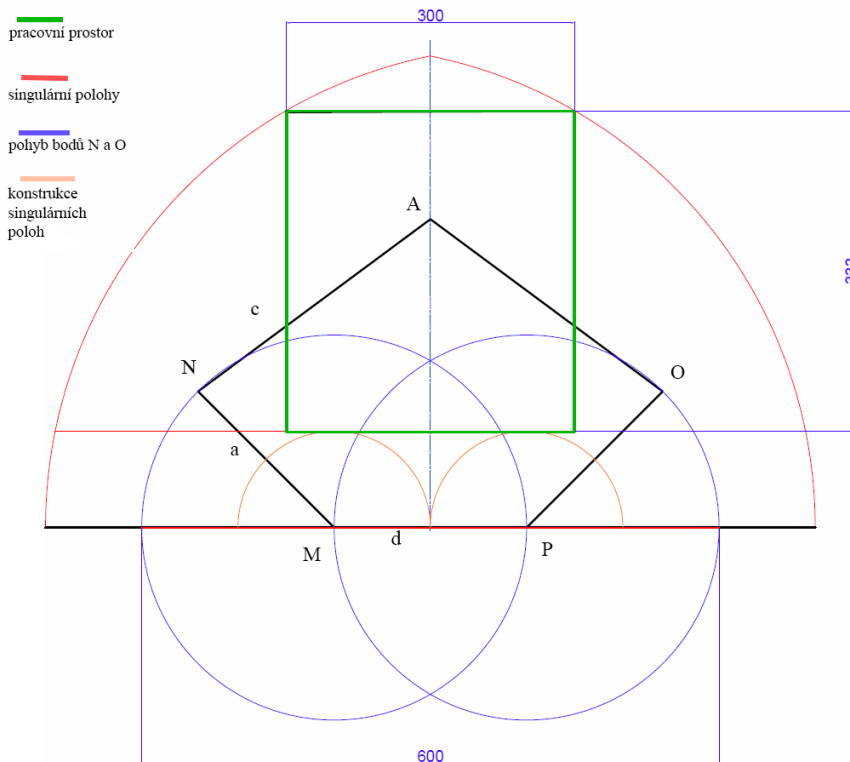
vycházeno z předpokladu, že mechanismus bude potřeba přemísťovat, popřípadě i odzkoušet v laboratoři, a proto byl zvolen první pokusný tvar 1) rovnoramenný pětiúhelník o straně $a = c = d = 20$ cm viz. Obr. č.: 14.



Obr. č.: 13 Grafické zjištění pracovního prostoru 1)

Nejdříve je nutné si uvědomit v jakých polohách bude mechanismus singulární. V tomto případě je to vždy, když se z bočních ramen tvořících trojúhelník MNA, resp. PAO, stane úsečka MA, resp. PA. A také když horní ramena NAO přejdou v úsečku NO. První případ se graficky znázorní kružnicemi z bodu M a P o poloměru $r = a + c$. Vzniknou dvě kružnice protínající se v ose mechanismu, které ohraničují horní singulární polohy. Druhý případ se sestrojí opět pomocí kružnic z bodu M a P, ale tentokrát o poloměru $r = a$. V tomto případě ovšem kružnice neznačí singulární polohy, nýbrž možnosti pohybu bodů N a O. Pro nalezení spodních singulárních poloh je potřeba spojit nějaký bod jedné kružnice s bodem druhé kružnice úsečkou dlouhou $|NO| = 2 * c$, nalézt střed této úsečky a vyznačit jej. Tento postup je nutné opakovat vícekrát, dokud není získán dostatečný počet bodů pro proložení bodů křivkou a nalezení tak všech spodních singulárních poloh. Tento celý postup je

znázorněn na Obr. č.: 14, ze kterého je dobře poznat, jak u tohoto mechanismu vypadá množina singulárních poloh za předpokladu, že vyžadujeme pohyb manipulátoru pouze v horní oblasti od pohonů mechanismu. Tento manipulátor bude sestaven pro psaní textu na papír, z čehož vychází podmínka, že bude potřeba souvislý obdélníkový pracovní prostor. Tento požadavek vede na významné ulehčení hledání singulárních poloh mechanismu,



Obr. č.: 14 Grafické zjištění pracovního prostoru 2)

30 cm. Aby bylo vyhověno všem požadavkům, vznikne pracovní prostor, pro tuto variantu, o výšce 13,9 cm.

Následuje další varianta rozměrů mechanismu 2) viz. Obr. č.: 15, při které se rozměr $a = d = 20$ cm a rozměr $c = 1,5 * a = 30$ cm.

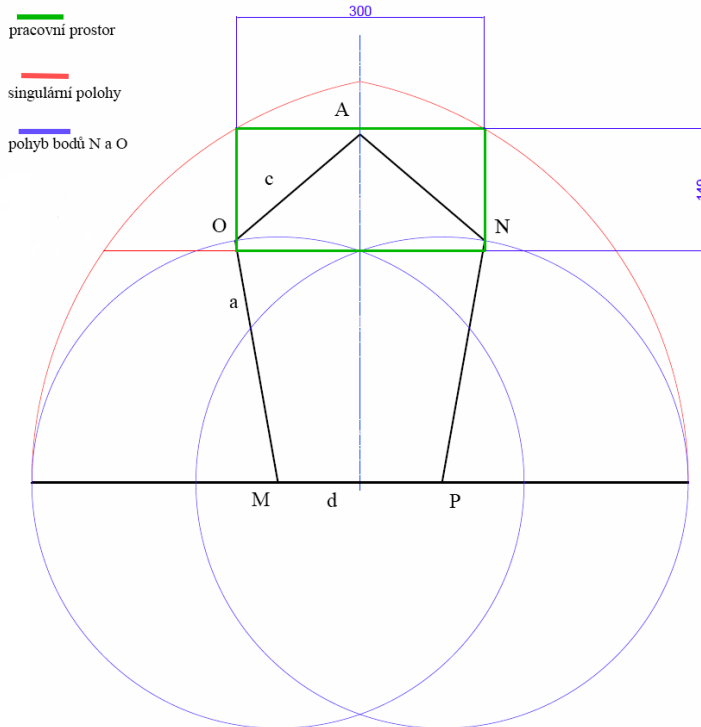
Postup nalezení singulárních poloh je stejný jako u varianty 1). Pro toto rozměrové rozložení je ovšem zajímavé, že úsečka o velikosti $|NO| = 2 * c$ leží přímo v rovině úsečky MP. Zdálo by se tedy, že mechanismus může mít pracovní prostor až k úsečce MP, ale to není pravda. Je zde skryté omezení pohybu mechanismu spočívající v rozměru $c > a$, který způsobí, že i když bod N, resp. O, bude v nejnižším možném místě, tak bod A bude stále nad úrovní pohonů. Bude totiž opisovat kružnice z bodů P a M o poloměru $r = c - a$. Po omezení plynoucích z

protože jak je vidět z Obr. č.: 14, pro nalezení horní hranice spodních singulárních poloh stačí nalézt úsečku o velikosti $|NO| = 2 * c$ spojující obě kružnice a zároveň rovnoběžnou s úsečkou MP. Pro získání obdélníkového pracovního prostoru a srovnání z dalšími variantami je zavedena

poslední podmínka na šířku pracovního prostoru o velikosti

těchto kružnic a podmínkách jako ve variantě 1) vznikne pracovní prostor o výšce 33,3 cm,

což je více jak dvakrát vyšší rozměr.

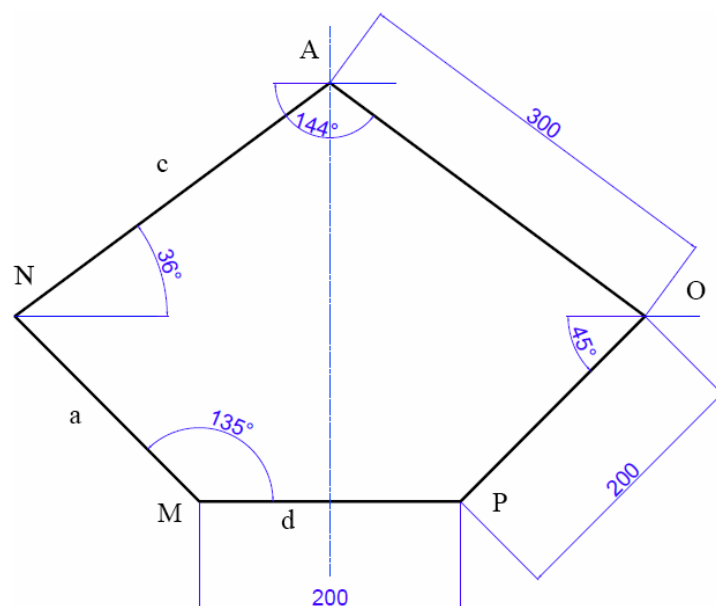


Poslední ukázkou rozměrových možností je varianta 3) s rozměry $c = d = 20$ cm a $a = 1,5 * c = 30$ cm viz. Obr. č.: 16. Pro tento případ platí stejný postup jako ve variantě 1). Jak je vidět, tento případ má omezený pohyb spodních ramen díky vlastnosti $c < a$, a proto je i výška pracovního prostoru, za stejných podmínek, rovna 14,9 cm. Ze vyzkoušených variant tedy vychází nejlépe varianta 2), takže další postup bude tvořen podle

Obr. č.: 15 Grafické zjištění pracovního prostoru 3)

těchto rozměrů. Je jasné ,že tato grafická metoda je pouze orientační a slouží spíše k rychlé ukázce průběhu singularit, ale pro potřeby tohoto projektu je dostačující. Pro přesnější výpočet optimálních

rozměrů mechanismu by byla potřeba využití počítačové techniky a optimalizačních technik. Výsledný mechanismus je zobrazen a okótován na Obr. č: 17 i s úhly v

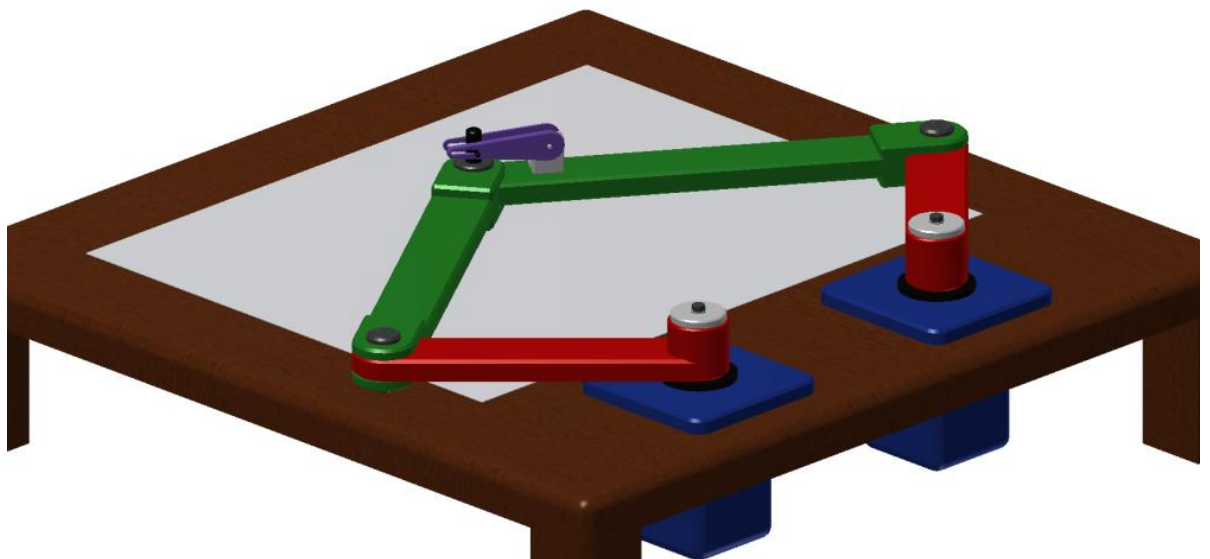


Obr. č.: 16 Konečné rozměry manipulátoru

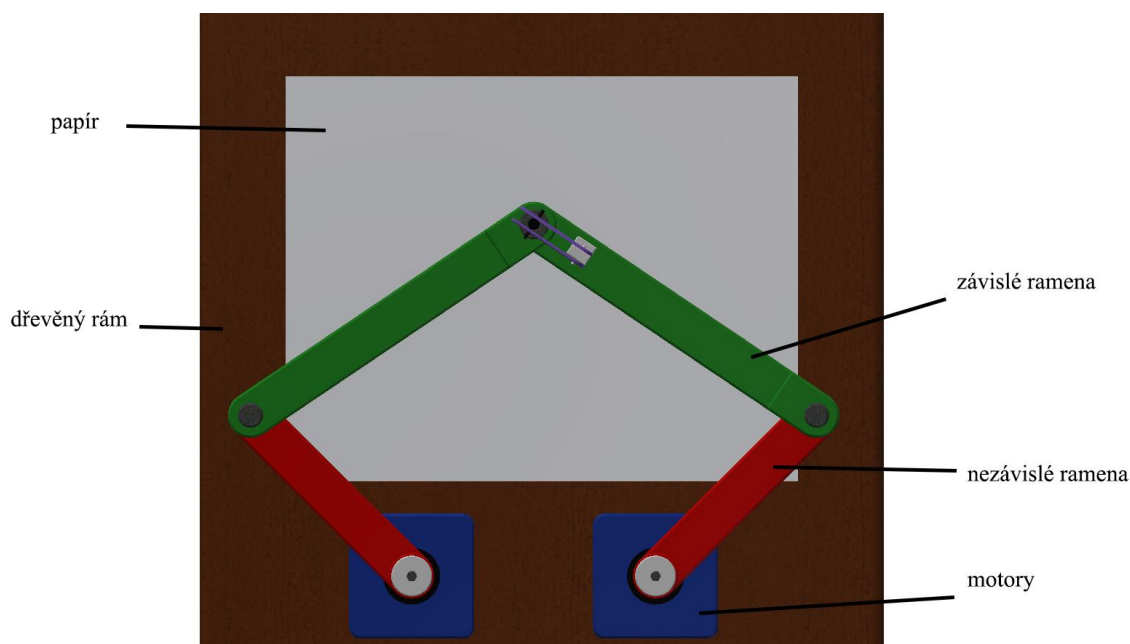
daných ramenech, které budou využity k dalším výpočtům.

3.2 Konstrukční návrh

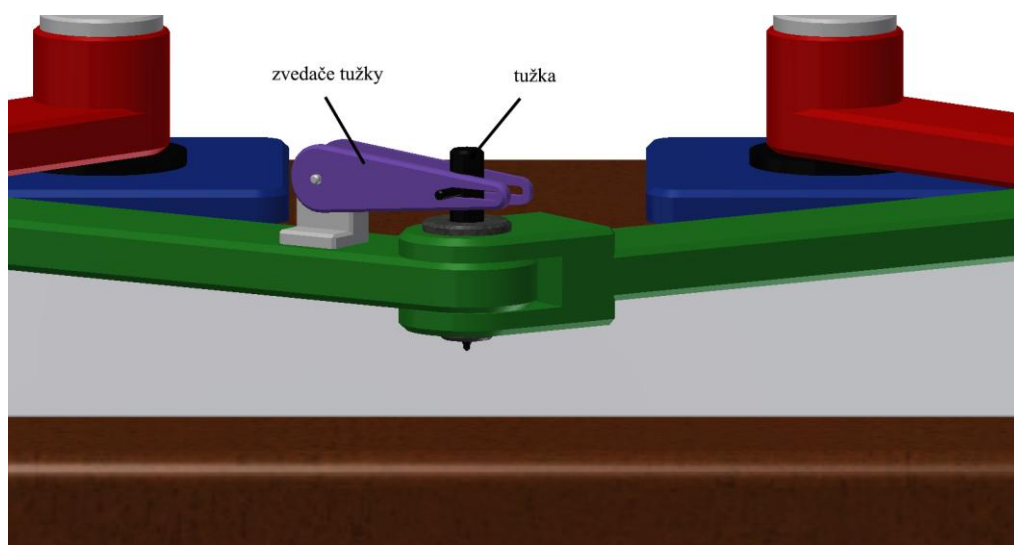
Konstrukce tohoto mechanismu je založena na co největší jednoduchosti mechanismu. K pohonu jsou využity dva servomotory, které jsou usazeny v rámu a přímo rozhýbávají spodní ramena manipulátoru přes tvarové spojení výstupních hřídelí s rameny pomocí per. Spodní nezávislá (poháněná) ramena jsou spojena se závislými horními rameny pomocí čepů s hlavou a pojistných kroužků. Konce obou horních ramen jsou také spojeny čepem s hlavou, který je ovšem provrtaný a jeho dutinou je vedena tužka manipulátoru. Tužku je potřeba zvedat v polohách, kdy manipulátor přejíždí z jedné polohy do druhé a není žádoucí tento pohyb zaznamenávat. Tento problém je vyřešen umístěním tužky do pouzdra s čepem v horní části po obou stranách. Na pravém horním ramenu je připevněn malý držák do tvaru L, aby nebránil pohybu manipulátoru a na něm jsou umístěny zvedače tužky, které by mohly fungovat na principu vystavovacích ramen pevných disků počítače. Celý konstrukční návrh byl vytvořen v programu Autodesk Inventor a je zobrazen na Obr. č.: 18. Na Obr. č.: 19 a 20 jsou popsány hlavní části mechanismu.



Obr. č.: 17 3D model manipulátoru



Obr. č.: 18 Pohled z hora na manipulátor



Obr. č.: 19 Detail koncové tužky manipulátoru

U tohoto manipulátoru je hlavní požadavek na lehkou konstrukci ramen, tak aby výstupní hřídele nebyly přetíženy a nedošlo tak k jejich ohybu. Zároveň je potřeba zajistit, co nejmenší tření v rotačních vazbách manipulátoru, aby servomotory zbytečně neztrácely výkon.

Tento konstrukční návrh je brán pouze jako orientační koncept sloužící spíše k ujasnění si daných potřeb a funkcí celého mechanismu. Před realizací je ovšem potřeba vytvořit řádnou konstrukční práci, která bude splňovat přesně vypočtené požadavky na správnou funkci mechanismu a dané hodnoty budou ověřeny v simulaci.

3.3 Kinematický model

Tato kapitola vychází z [10, str. 24 - 44]

Kinematika se obecně zabývá pohybem těles či soustavou těles bez ohledu na příčiny vzniku tohoto pohybu. Pro vyřešení kinematických úloh, je tedy potřeba pochopit pohyblivost mechanismu, nalézt nezávislé (hnačí) souřadnice a jejich časový průběh. Za předpokladu znalosti rozměrů mechanismu, lze sestavit rovnice vyjadřující přesnou polohu mechanismu v daném časovém okamžiku, díky nimž se dají dopočítat přesné hodnoty zbylých hledaných souřadnic. Z rovnic polohy, po časové derivaci, vznikají rovnice rychlostí a, po opětovné derivaci, rovnice zrychlení mechanismu.

Kinematický model soustav těles lze vytvořit maticovou, či vektorovou metodou. Pro tento manipulátor byla zvolena vektorová metoda, která vychází z představy mechanismu v podobě nezávislých smyček, které tvoří vektory spojující jednotlivé tělesa mechanismu a vyjadřují tak jeho pohyb. Na začátku řešení je nutné zjistit z rovnice (3.1) z [10, str. 27], počet stupňů volnosti rovinného mechanismu a zároveň také počet nezávislých souřadnic $q = n = 2$. Dále je potřeba spočítat počet nezávislých smyček (rovnice (3.2) z [10, str. 27]), kde:

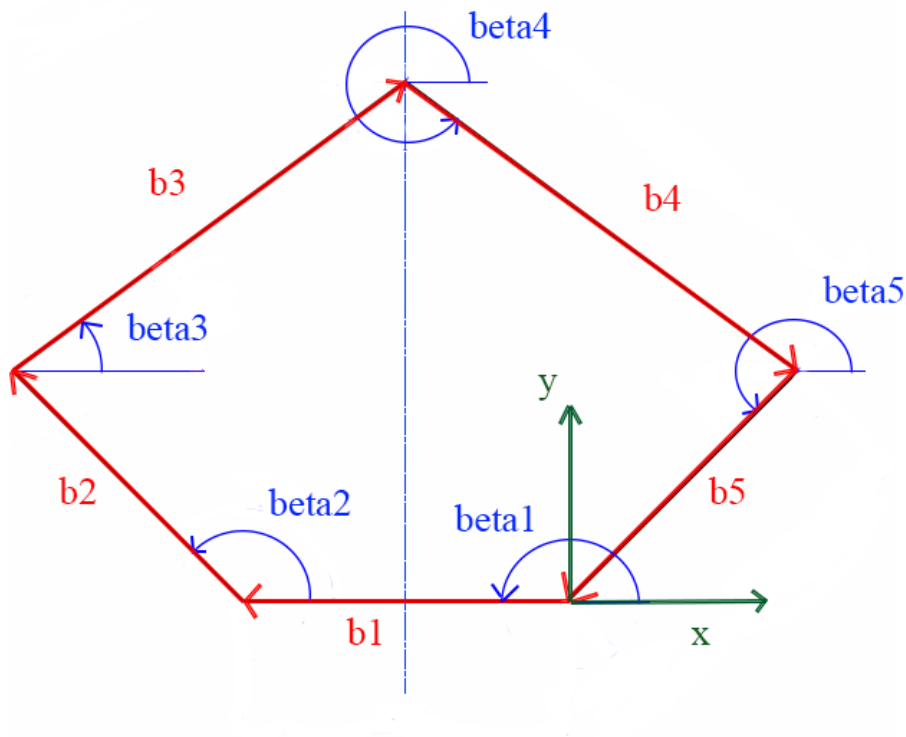
d - počet kinematických dvojic = 5,

m - počet předepsaných poloh mechanismu = 0,

u - počet těles = 5.

$$l = d + m - u + 1 \quad (3.2)$$

Po výpočtu vychází počet nezávislých smyček $l = 1$, což také znamená, že mechanismus bude mít počet závislých (hnaných) souřadnic $z = 2 * l = 2$. Následuje vytvoření obrazu manipulátoru skládajícího se pouze z vektorů tvořících smyčku a jejich úhlů viz. Obr. č: 21. Ke správné funkci této metody je nutné úhly všech vektorů začínat od stejné osy souřadnicového systému (nejčastěji x) a dodržovat znaménkovou konvenci pro směry úhlů (většinou se proto zavádějí všechny úhly ve stejném směru). Po vytvoření tohoto obrazu, přichází na řadu určení závislých a nezávislých souřadnic z použitých velikostí vektorů a úhlů, které se mění v čase. Ostatní velikosti vektorů a úhly je nutné vyjádřit z rozměrů mechanismu, či pomocí přepočtu z jiných souřadnic.



Obr. č.: 20 Smyčka manipulátoru

Nezávislé souřadnice se nacházejí vždy v místech pohonů a v tomto případě jsou to tedy úhlové souřadnice β_2 a β_5 viz. Obr. č: 21. Tento manipulátor se skládá pouze z rotačních vazeb, a proto i závislé souřadnice budou úhlové a to β_3 a β_4 . Zbylé vektory a úhel β_1 jsou konstanty. Výsledné parametry tedy jsou:

$$\beta_1 = \pi, \quad b_1 = d = 20 \text{ cm}, \quad b_2 = b_5 = a = 20 \text{ cm}, \quad b_3 = b_4 = 30 \text{ cm}, \quad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} \beta_3 \\ \beta_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} \beta_2 \\ \beta_5 \end{bmatrix}$$

Vektorová metoda využívá smyček z toho důvodu, že součet navazujících vektorů začínající a končící ve stejném místě je roven nule. Lze tedy psát vektorovou rovnici smyčky (3.3):

$$\mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 + \mathbf{b}_3 + \mathbf{b}_4 + \mathbf{b}_5 = \mathbf{0} \quad (3.3)$$

Tato rovnice je převeditelná do skalárního tvaru pro jednotlivé složky souřadnicového systému:

$$x: b_1 \cdot \cos(\beta_1) + b_2 \cdot \cos(\beta_2) + b_3 \cdot \cos(\beta_3) + b_4 \cdot \cos(\beta_4) + b_5 \cdot \cos(\beta_5) = 0 \quad (3.4)$$

$$y: b_1 \cdot \sin(\beta_1) + b_2 \cdot \sin(\beta_2) + b_3 \cdot \sin(\beta_3) + b_4 \cdot \sin(\beta_4) + b_5 \cdot \sin(\beta_5) = 0 \quad (3.5)$$

Po první časové derivaci vzniknou skalární rovnice rychlostí:

$$\dot{x}: -b_2 \cdot \dot{\beta}_2 \cdot \sin(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3 \cdot \sin(\beta_3) - b_4 \cdot \dot{\beta}_4 \cdot \sin(\beta_4) - b_5 \cdot \dot{\beta}_5 \cdot \sin(\beta_5) = 0 \quad (3.6)$$

$$\dot{y}: b_2 \cdot \dot{\beta}_2 \cdot \cos(\beta_2) + b_3 \cdot \dot{\beta}_3 \cdot \cos(\beta_3) + b_4 \cdot \dot{\beta}_4 \cdot \cos(\beta_4) + b_5 \cdot \dot{\beta}_5 \cdot \cos(\beta_5) = 0 \quad (3.7)$$

A po druhé derivaci vznikají skalární rovnice zrychlení:

$$\begin{aligned} \ddot{x}: & -b_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \cos(\beta_2) - b_2 \cdot \ddot{\beta}_2 \cdot \sin(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3^2 \cdot \cos(\beta_3) - b_3 \cdot \ddot{\beta}_3 \cdot \sin(\beta_3) \\ & - b_4 \cdot \dot{\beta}_4^2 \cdot \cos(\beta_4) - b_4 \cdot \ddot{\beta}_4 \cdot \sin(\beta_4) \\ & - b_5 \cdot \dot{\beta}_5^2 \cdot \cos(\beta_5) - b_5 \cdot \ddot{\beta}_5 \cdot \sin(\beta_5) = 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}: & -b_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \sin(\beta_2) + b_2 \cdot \ddot{\beta}_2 \cdot \cos(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3^2 \cdot \sin(\beta_3) + b_3 \cdot \ddot{\beta}_3 \cdot \cos(\beta_3) \\ & - b_4 \cdot \dot{\beta}_4^2 \cdot \sin(\beta_4) + b_4 \cdot \ddot{\beta}_4 \cdot \cos(\beta_4) \\ & - b_5 \cdot \dot{\beta}_5^2 \cdot \sin(\beta_5) + b_5 \cdot \ddot{\beta}_5 \cdot \cos(\beta_5) = 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Rovnice rychlostí a zrychlení lze převést do maticového tvaru, který je žádoucí pro využití v programu Matlab. V tomto programu budou probíhat výpočty časových průběhů všech souřadnic pro získání potřebných parametrů a zároveň bude sloužit ke kontrole a ověření správnosti navrženého kinematického modelu.

Maticový zápis tedy je:

pro rychlosti:

$$\mathbf{J}_z \cdot \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{J}_q \cdot \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (3.10)$$

a pro zrychlení:

$$\mathbf{J}_z \cdot \ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{J}_q \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{j}_{qz} = \mathbf{0} \quad (3.11)$$

kde:

$$\mathbf{J}_z = \begin{bmatrix} -b_3 \cdot \sin(\beta_3) & -b_4 \cdot \sin(\beta_4) \\ b_3 \cdot \cos(\beta_3) & b_4 \cdot \cos(\beta_4) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_q = \begin{bmatrix} -b_2 \cdot \sin(\beta_2) & -b_5 \cdot \sin(\beta_5) \\ b_2 \cdot \cos(\beta_2) & b_5 \cdot \cos(\beta_5) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{j}_{qz} = \begin{bmatrix} -b_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \cos(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3^2 \cdot \cos(\beta_3) - b_4 \cdot \dot{\beta}_4^2 \cdot \cos(\beta_4) - b_5 \cdot \dot{\beta}_5^2 \cdot \cos(\beta_5) \\ -b_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \sin(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3^2 \cdot \sin(\beta_3) - b_4 \cdot \dot{\beta}_4^2 \cdot \sin(\beta_4) - b_5 \cdot \dot{\beta}_5^2 \cdot \sin(\beta_5) \end{bmatrix},$$

Nyní je sestaven kinematický model mechanismu, ze kterého lze při znalosti souřadnic pohonu dopočítat polohy, rychlosti i zrychlení závislých souřadnic. Zadaný manipulátor

slouží k ovládaní bodu A přes jeho pohony viz. Obr. č.: 13. Je tedy ještě potřeba popsat pohyb bodu A pomocí parametrů z kinematického modelu. Z Obr. č: 21 je zřejmé, že do bodu A se lze dostat z počátku souřadnicového systému pomocí vektorů \mathbf{b}_1 , \mathbf{b}_2 a \mathbf{b}_3 nebo pomocí vektorů \mathbf{b}_5 a \mathbf{b}_4 , které musí být záporné, protože směřují na druhou stranu. Lze tedy napsat vektorové rovnice:

$$\mathbf{r}_{1A} = \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 + \mathbf{b}_3 \quad (3.12)$$

$$\mathbf{r}_{1A} = -\mathbf{b}_5 - \mathbf{b}_4 \quad (3.13)$$

Obě rovnice jsou správně, ale v tomto projektu bylo využito prvního případu, tedy rovnice (3.12). Po rozepsání do skalárních rovnic vzniknou tyto rovnice:

pro polohy:

$$x_{1A} = b_1 \cdot \cos(\beta_1) + b_2 \cdot \cos(\beta_2) + b_3 \cdot \cos(\beta_3) \quad (3.14)$$

$$y_{1A} = b_1 \cdot \sin(\beta_1) + b_2 \cdot \sin(\beta_2) + b_3 \cdot \sin(\beta_3) \quad (3.15)$$

pro rychlosti:

$$\dot{x}_{1A} = -b_2 \cdot \dot{\beta}_2 \cdot \sin(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3 \cdot \sin(\beta_3) \quad (3.16)$$

$$\dot{y}_{1A} = b_2 \cdot \dot{\beta}_2 \cdot \cos(\beta_2) + b_3 \cdot \dot{\beta}_3 \cdot \cos(\beta_3) \quad (3.17)$$

a pro zrychlení:

$$\ddot{x}_{1A} = -b_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \cos(\beta_2) - b_2 \cdot \ddot{\beta}_2 \cdot \sin(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3^2 \cdot \cos(\beta_3) - b_3 \cdot \ddot{\beta}_3 \cdot \sin(\beta_3) \quad (3.18)$$

$$\ddot{y}_{1A} = -b_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \sin(\beta_2) + b_2 \cdot \ddot{\beta}_2 \cdot \cos(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3^2 \cdot \sin(\beta_3) + b_3 \cdot \ddot{\beta}_3 \cdot \cos(\beta_3) \quad (3.19)$$

Nyní je tedy kinematika celého mechanismu a bodu A vyřešena a je tedy možné vše ověřit v programu Matlab. Na toto ověření bylo využito skriptu, s názvem „Kinematika.m“, používajícího se na řešení rovinných kinematických úloh. Tento skript bylo nutné upravit, protože se využíval zejména na mechanismy s jedním stupněm volnosti. Dále stačilo pouze změnit hodnoty všech matic a zapsat určené konstanty mechanismu. Tento skript využívá funkce „Kresic.m“, která využívá Newtonovy iterační metody k vyřešení rovnic (3.4) a (3.5) pomocí vypočtených nezávislých souřadnic, ze zadaného pohonu, pro daný časový krok a hodnoty závislých souřadnic z předchozího kroku. Z toho tedy vyplývá nutnost znalosti počátečních podmínek mechanismu. Část funkce „Kresic.m“ je zobrazena na Obr.č 22, kde je

vidět princip iterace, kdy program v každém časovém kroku hledá vektor závislých souřadnic \mathbf{z}_1 , který by vyhovoval rovnicím (3.4) a (3.5). Tyto rovnice jsou v Matlabu definované maticí \mathbf{R} o rozměru 2×1 , kde jednotlivé řádky tvoří levé strany těchto rovnic:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} b_1 \cdot \cos(\beta_1) + b_2 \cdot \cos(\beta_2) + b_3 \cdot \cos(\beta_3) + b_4 \cdot \cos(\beta_4) + b_5 \cdot \cos(\beta_5) \\ b_1 \cdot \sin(\beta_1) + b_2 \cdot \sin(\beta_2) + b_3 \cdot \sin(\beta_3) + b_4 \cdot \sin(\beta_4) + b_5 \cdot \sin(\beta_5) \end{bmatrix}$$

```

3 function [z_out]=Kresic(zz,q,konst)
4 z1=zz;
5
6 R=vazby(zz,q,konst);
7 eps=1e-10;
8 maxpocet=35;
9 ii=1;
10 while (norm(R)>= eps) & (ii<maxpocet),
11 R=vazby(zz,q,konst);
12 Jz=jacobianJz(zz,q,konst);
13 R1=R;
14 lambda=1;
15 iterace=1;
16 while (norm(R1)>=norm(R)) & (iterace<maxpocet),
17 iterace=iterace+1;
18 z1=zz-lambda*lae(Jz,R,eps);
19 R1=vazby(z1,q,konst);
20 lambda=lambda/2;
21 end;
22 zz=z1;
23 ii=ii+1;
24 end;
25 z_out=zz;

```

Obr. č.: 21 funkce „Kresic.m”

Z Obr. č.: 22 je zřejmé, že funkce spočítá velikost matic \mathbf{J}_z a \mathbf{R} pro vstupní vektor \mathbf{q} v daném čase a vstupní vektor \mathbf{zz} , který značí vektor závislých souřadnic v předchozím časovém okamžiku. Dále se potom hledá nový vektor závislých souřadnic \mathbf{z}_1 pomocí rovnice:

$$\mathbf{z}_1 = \mathbf{zz} - \lambda \cdot \mathbf{x} \tag{3.20}$$

Kde \mathbf{x} značí výsledný vektor z rovnice:

$$\mathbf{J}_z \cdot \mathbf{x} = \mathbf{R} \tag{3.21}$$

Takto proběhnutá první iterace zkontroluje hodnotu matice \mathbf{R} , pro nový vektor \mathbf{z}_1 . Pokud je hodnota matice \mathbf{R} menší než požadovaná maximální velikost „eps” tak cyklus končí a nastává další časový krok, pro který platí stejné požadavky jako pro první iteraci. Pokud ovšem je hodnota matice větší než „eps” zmenší se krok iterace λ o polovinu a proces se opakuje do té doby dokud není dosaženo požadované hodnoty matice \mathbf{R} nebo dokud se nepřekročí předepsaný počet iteračních kroků.

Program Matlab ověřil správnost navrženého kinematického modelu. Je tedy možné pro různě definovaný potřebný pohon využít tohoto skriptu, zjistit potřebné hodnoty úhlových souřadnic a nastítnit si tak představu o daném pohybu mechanismu pomocí animace vložené mezi výstupy skriptu „Kinematika.m”.

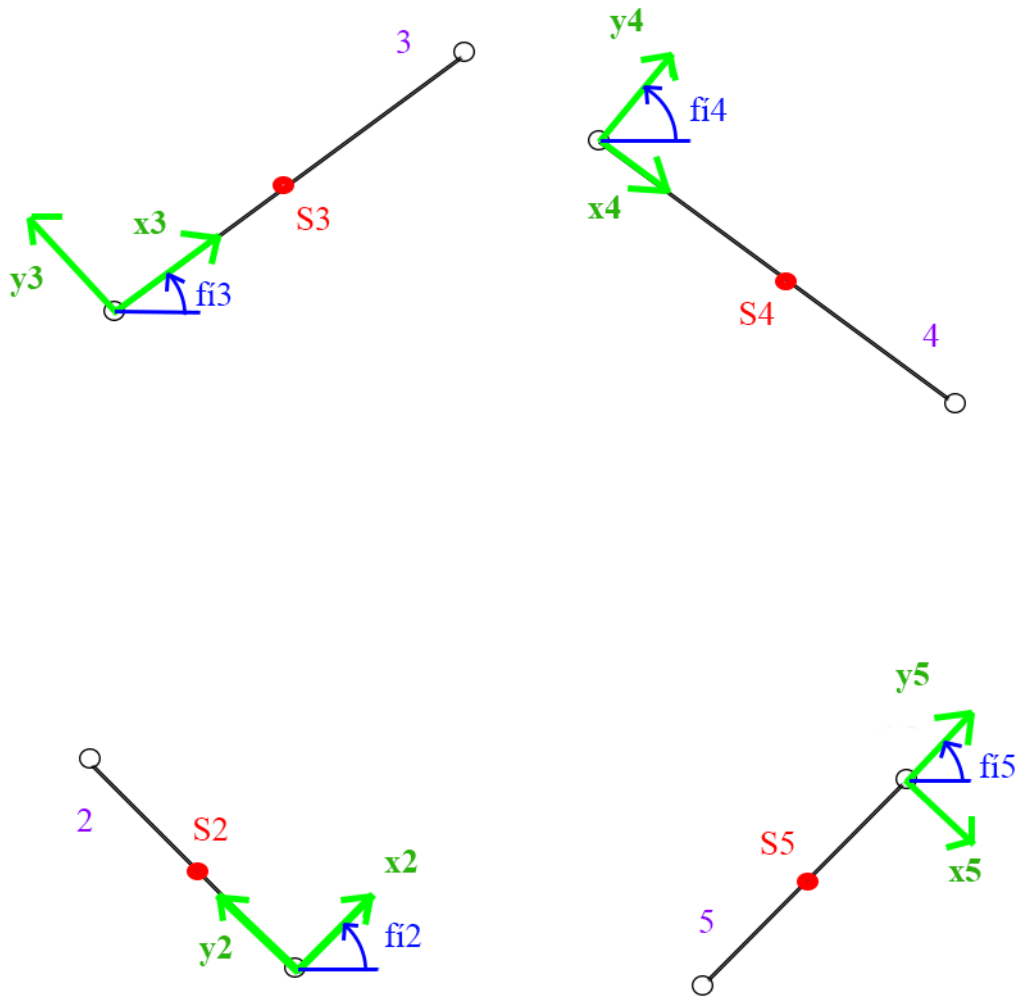
3.4 Dynamický model

Tato kapitola vychází z [10, str. 57 a 84 - 92]

Dynamika spojuje schopnosti statiky a kinematiky v jeden celek, zabývá se tedy působením sil na těleso či soustavu těles a řeší jejich pohyb vznikající z reakce na tyto veličiny. Dynamika vychází z druhého Newtonova zákona síly, který říká, že časová změna hybnosti tělesa je úměrná působící síle a děje se ve směru této síly. Dynamikou lze tedy sestavit pohybovou rovnici tělesa či soustavy těles, která obsahuje pouze nezávislé souřadnice, parametry mechanismu a vnější působící síly. Pomocí této rovnice lze přesně vyjádřit, jak se změní pohyb tělesa při určité změně vnější síly.

Dynamický model soustavy těles lze vytvořit různými způsoby, v tomto projektu bude popsán postup vycházející ze spojení metody uvolňování ze statiky Newton Eulerových dynamických rovnic z dynamiky, vektorové metody z kinematiky a poznatek z analytické mechaniky, že při numerickém řešení můžeme integrovat pouze nezávislé zrychlení a nezávislé rychlosti. Tento postup je trochu časově náročnější, ale dají se pomocí něj vyřešit i velmi složité mechanismy. Tento princip je určen pro rovinné mechanismy, ale dal by se využít i pro prostorové.

Začátek sestavování dynamického modelu pomocí této metody je stejný jako v při řešení kinematického modelu vektorovou metodou, a proto jsou tyto kroky přeskočeny. Po sestavení kinematického modelu je nutné pro každé těleso mechanismu určit lokální souřadnicový systém a pomocí něj vyjádřit polohu těžišť jednotlivých těles viz. Obr. č.: 23.



Obr. č.: 22 Lokální souřadnicové systémy a těžiště těles

Jak je vidět, při tvorbě lokálních souřadnicových systémů, je potřeba také zavést úhly popisující pootočení jednotlivých těles. Tyto úhly lze volit libovolně, je ale potřeba vyjádřit jejich závislost na původní úhly zavedené v kinematice:

$$\varphi_2 = \beta_2 - \pi/2,$$

$$\varphi_3 = \beta_3,$$

$$\varphi_4 = \beta_4 - 3.\pi/2,$$

$$\varphi_5 = \beta_5 - \pi$$

Tyto úhly je také nutné převést do úhlových rychlostí a zrychlení, což se provede časovými derivacemi:

$$\dot{\varphi}_2 = \dot{\beta}_2,$$

$$\ddot{\varphi}_2 = \ddot{\beta}_2,$$

$$\dot{\varphi}_3 = \dot{\beta}_3,$$

$$\ddot{\varphi}_3 = \ddot{\beta}_3,$$

$$\dot{\varphi}_4 = \dot{\beta}_4,$$

$$\ddot{\varphi}_4 = \ddot{\beta}_4,$$

$$\dot{\varphi}_5 = \dot{\beta}_5,$$

$$\ddot{\varphi}_5 = \ddot{\beta}_5$$

Z Obr. č.:23 a ze zavedených rozměrů mechanismu tedy plynou pro jednotlivá těžiště tyto vztahy (pozn.: index např.: 2S2 značí polohu těžiště 2 v souřadnicovém systému 2):

$$\begin{array}{llll} x_{2S2} = 0, & x_{3S3} = c/2, & x_{4S4} = c/2, & x_{5S5} = 0 \\ y_{2S2} = a/2, & y_{3S3} = 0, & y_{4S4} = 0, & y_{5S5} = -a/2 \end{array}$$

Převedení těchto vztahů do globálního systému je provedeno pomocí vektorového vyjádření:

$$\mathbf{r}_{1S2} = \mathbf{b}_1 + \mathbf{y}_{2S2} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{r}_{1S3} = \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 + \mathbf{x}_{3S3} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{r}_{1S4} = \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 + \mathbf{b}_3 + \mathbf{x}_{4S4} \quad (3.24)$$

$$\mathbf{r}_{1S5} = \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 + \mathbf{b}_3 + \mathbf{b}_4 + \mathbf{y}_{5S5} \quad (3.25)$$

Vektorové rovnice lze opět převést do skalárních. Je potřeba dát pozor na velikost y_{5S5} , která má zápornou hodnotu určující směr vektoru. Toto ale u skalárních rovnic neplatí, tam se bere pouze velikost vektoru, tudíž je potřeba psát y_{5S5} vždy v absolutní hodnotě. Rovnice tedy jsou (pozn.: je zde zaveden jednodušší zápis složek globálního souřadnicového systému tzn. např.: $x_{1S3} = x_3$):

$$x_2 = b_1 \cdot \cos(\beta_1) + y_{2S2} \cdot \cos(\beta_2) \quad (3.26)$$

$$y_2 = b_1 \cdot \sin(\beta_1) + y_{2S2} \cdot \sin(\beta_2) \quad (3.27)$$

$$x_3 = b_1 \cdot \cos(\beta_1) + b_2 \cdot \cos(\beta_2) + x_{3S3} \cdot \cos(\beta_3) \quad (3.28)$$

$$y_3 = b_1 \cdot \sin(\beta_1) + b_2 \cdot \sin(\beta_2) + x_{3S3} \cdot \sin(\beta_3) \quad (3.29)$$

$$x_4 = b_1 \cdot \cos(\beta_1) + b_2 \cdot \cos(\beta_2) + b_3 \cdot \cos(\beta_3) + x_{4S4} \cdot \cos(\beta_4) \quad (3.30)$$

$$y_4 = b_1 \cdot \sin(\beta_1) + b_2 \cdot \sin(\beta_2) + b_3 \cdot \sin(\beta_3) + x_{4S4} \cdot \sin(\beta_4) \quad (3.31)$$

$$x_5 = b_1 \cdot \cos(\beta_1) + b_2 \cdot \cos(\beta_2) + b_3 \cdot \cos(\beta_3) + b_4 \cdot \cos(\beta_4) + |y_{5S5}| \cdot \cos(\beta_5) \quad (3.32)$$

$$y_5 = b_1 \cdot \sin(\beta_1) + b_2 \cdot \sin(\beta_2) + b_3 \cdot \sin(\beta_3) + b_4 \cdot \sin(\beta_4) + |y_{5S5}| \cdot \sin(\beta_5) \quad (3.33)$$

Rychlost jednotlivých těžišť je získána časovou derivací:

$$\dot{x}_2 = -b_1 \cdot \dot{\beta}_1 \cdot \sin(\beta_1) - y_{2S2} \cdot \dot{\beta}_2 \cdot \sin(\beta_2) \quad (3.34)$$

$$\dot{y}_2 = b_1 \cdot \dot{\beta}_1 \cdot \cos(\beta_1) + y_{2S2} \cdot \dot{\beta}_2 \cdot \cos(\beta_2) \quad (3.35)$$

$$\dot{x}_3 = -b_1 \cdot \dot{\beta}_1 \cdot \sin(\beta_1) - b_2 \cdot \dot{\beta}_2 \cdot \sin(\beta_2) - x_{3S3} \cdot \dot{\beta}_3 \cdot \sin(\beta_3) \quad (3.36)$$

$$\dot{y}_3 = b_1 \cdot \dot{\beta}_1 \cdot \cos(\beta_1) + b_2 \cdot \dot{\beta}_2 \cdot \cos(\beta_2) + x_{3S3} \cdot \dot{\beta}_3 \cdot \cos(\beta_3) \quad (3.37)$$

$$\dot{x}_4 = -b_1 \cdot \dot{\beta}_1 \cdot \sin(\beta_1) - b_2 \cdot \dot{\beta}_2 \cdot \sin(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3 \cdot \sin(\beta_3) - x_{4S4} \cdot \dot{\beta}_4 \cdot \sin(\beta_4) \quad (3.38)$$

$$\dot{y}_4 = b_1 \cdot \dot{\beta}_1 \cdot \cos(\beta_1) + b_2 \cdot \dot{\beta}_2 \cdot \cos(\beta_2) + b_3 \cdot \dot{\beta}_3 \cdot \cos(\beta_3) + x_{4S4} \cdot \dot{\beta}_4 \cdot \cos(\beta_4) \quad (3.39)$$

$$\dot{x}_5 = -b_1 \cdot \dot{\beta}_1 \cdot \sin(\beta_1) - b_2 \cdot \dot{\beta}_2 \cdot \sin(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3 \cdot \sin(\beta_3) - b_4 \cdot \dot{\beta}_4 \cdot \sin(\beta_4) - |y_{5S5}| \cdot \dot{\beta}_5 \cdot \sin(\beta_5) \quad (3.40)$$

$$\dot{y}_5 = b_1 \cdot \dot{\beta}_1 \cdot \cos(\beta_1) + b_2 \cdot \dot{\beta}_2 \cdot \cos(\beta_2) + b_3 \cdot \dot{\beta}_3 \cdot \cos(\beta_3) + b_4 \cdot \dot{\beta}_4 \cdot \cos(\beta_4) + |y_{5S5}| \cdot \dot{\beta}_5 \cdot \cos(\beta_5) \quad (3.41)$$

Z těchto rovnic se další časovou derivací získají zrychlení všech těžišť. Jednotlivé rovnice zrychlení budou popsány pouze v maticovém tvaru z důvodu velké rozsáhlosti rovnic. Výsledný maticový zápis vypadá takto:

$$\mathbf{a} = \mathbf{V}_z \cdot \ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{V}_q \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{a}_{qz} \quad (3.42)$$

Kde jednotlivé matice jsou:

$$\mathbf{a} = [\ddot{x}_2 \quad \ddot{y}_2 \quad \ddot{\varphi}_2 \quad \ddot{x}_3 \quad \ddot{y}_3 \quad \ddot{\varphi}_3 \quad \ddot{x}_4 \quad \ddot{y}_4 \quad \ddot{\varphi}_4 \quad \ddot{x}_5 \quad \ddot{y}_5 \quad \ddot{\varphi}_5]^T$$

$$\mathbf{V}_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -x_{3S3} \cdot \sin(\beta_3) & 0 \\ x_{3S3} \cdot \cos(\beta_3) & 0 \\ 1 & 0 \\ -b_3 \cdot \sin(\beta_3) & -x_{4S4} \cdot \sin(\beta_4) \\ b_3 \cdot \cos(\beta_3) & x_{4S4} \cdot \cos(\beta_4) \\ 0 & 1 \\ -b_3 \cdot \sin(\beta_3) & -b_4 \cdot \sin(\beta_4) \\ b_3 \cdot \cos(\beta_3) & b_4 \cdot \cos(\beta_4) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{V}_q = \begin{bmatrix} -y_{2S2} \cdot \sin(\beta_3) & 0 \\ y_{2S2} \cdot \sin(\beta_3) & 0 \\ 1 & 0 \\ -b_2 \cdot \sin(\beta_2) & 0 \\ b_2 \cdot \cos(\beta_2) & 0 \\ 0 & 0 \\ -b_2 \cdot \sin(\beta_2) & 0 \\ b_2 \cdot \cos(\beta_2) & 0 \\ 0 & 0 \\ -b_2 \cdot \sin(\beta_2) & -|y_{5S5}| \cdot \sin(\beta_5) \\ b_2 \cdot \cos(\beta_2) & |y_{5S5}| \cdot \cos(\beta_5) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{a}_{qz} = \begin{bmatrix} -y_{2S2} \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \cos(\beta_2) \\ -y_{2S2} \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \sin(\beta_2) \\ 0 \\ -b_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \cos(\beta_2) - x_{3S3} \cdot \dot{\beta}_3^2 \cdot \cos(\beta_3) \\ -b_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \sin(\beta_2) - x_{3S3} \cdot \dot{\beta}_3^2 \cdot \sin(\beta_3) \\ 0 \\ -b_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \cos(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3^2 \cdot \cos(\beta_3) - x_{4S4} \cdot \dot{\beta}_4^2 \cdot \cos(\beta_4) \\ -b_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \sin(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3^2 \cdot \sin(\beta_3) - x_{4S4} \cdot \dot{\beta}_4^2 \cdot \sin(\beta_4) \\ 0 \\ -b_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \cos(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3^2 \cdot \cos(\beta_3) - b_4 \cdot \dot{\beta}_4^2 \cdot \cos(\beta_4) - |y_{5S5}| \cdot \dot{\beta}_5^2 \cdot \cos(\beta_5) \\ -b_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 \cdot \sin(\beta_2) - b_3 \cdot \dot{\beta}_3^2 \cdot \sin(\beta_3) - b_4 \cdot \dot{\beta}_4^2 \cdot \sin(\beta_4) - |y_{5S5}| \cdot \dot{\beta}_5^2 \cdot \sin(\beta_5) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Následně bude popsáno sestavení dynamických rovnic. K řešení této části je využito třech rovnic, dvou Newtonových rovnic a jedné Eulerovy dynamické rovnice. Tyto rovnice vypadají obecně takto:

$$m_j \cdot a_{Sjx} = \sum_i F_{ix} + \sum_k R_{kx} \quad (3.43)$$

$$m_j \cdot a_{Sjy} = \sum_i F_{iy} + \sum_k R_{ky} \quad (3.44)$$

$$I_{jSj} \cdot \alpha_j = \sum_i M_{iS} + \sum_k M_{kS}^R \quad (3.45)$$

Kde jednotlivé složky rovnic znamenají:

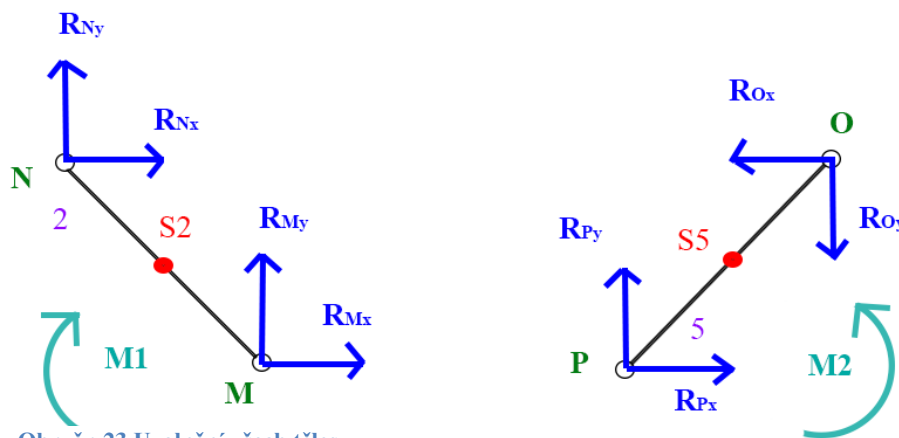
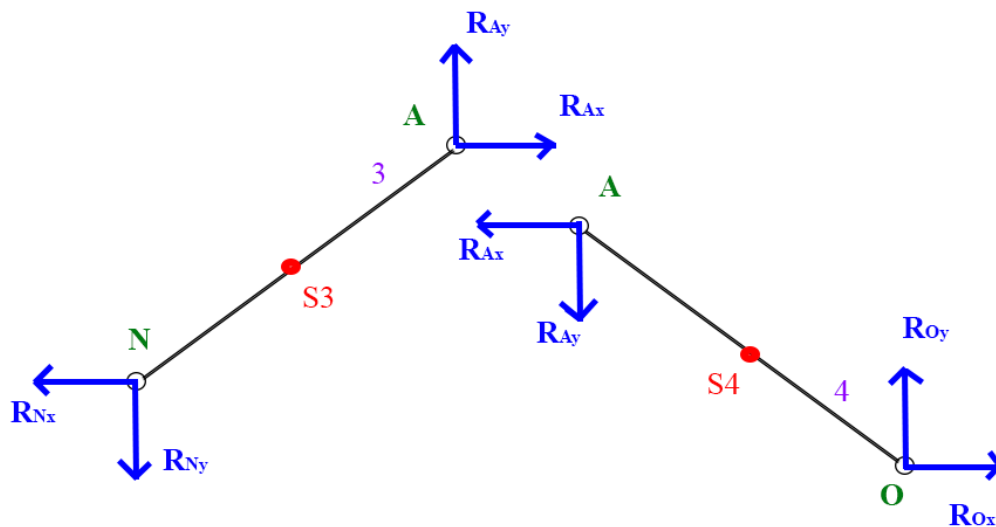
m - hmotnost tělesa F - vnější (akční) síly I_S - moment setrvačnosti tělesa

a_S - zrychlení těžiště tělesa R - vnitřní (reakční) síly α - úhlové zrychlení tělesa

M_S - moment vnějších sil působící v těžišti tělesa

M_S^R - moment vnitřních sil působící v těžišti tělesa

Aby bylo možné sestavit rovnice (3.43 - 3.45), je potřeba provést uvolnění všech těles podle principů statiky viz. Obr. č.: 24.



Obr. č.: 23 Uvolnění všech těles

Dále je nutné znát hmotnosti jednotlivých těles a jejich momenty setrvačnosti. Tyto informace byly získány z programu Autodesk Inventor, kde byly použity ramena z 3D modelu a předběžně zvolený materiál hliník:

$$m_2 = m_5 = 0,4 \text{ kg}$$

$$I_{2S2} = I_{5S5} = 0,00142 \text{ kg.m}^2$$

$$m_3 = m_4 = 0,54 \text{ kg}$$

$$I_{3S3} = I_{4S4} = 0,00385 \text{ kg.m}^2$$

Po získání všech potřebných parametrů, je možné začít sestavovat rovnice (3.43 - 3.45) pro jednotlivá tělesa:

těleso 2:

$$m_2 \cdot \ddot{x}_2 = R_{Nx} + R_{Mx} \quad (3.46)$$

$$m_2 \cdot \ddot{y}_2 = R_{Ny} + R_{My} \quad (3.47)$$

$$I_{2S2} \cdot \ddot{\varphi}_2 = \frac{a}{2} \cdot \sin(\varphi_2) \cdot R_{My} + \frac{a}{2} \cdot \cos(\varphi_2) \cdot R_{Mx} - \frac{a}{2} \cdot \sin(\varphi_2) \cdot R_{Ny} - \frac{a}{2} \cdot \cos(\varphi_2) \cdot R_{Nx} - M_1 \quad (3.48)$$

těleso 3:

$$m_3 \cdot \ddot{x}_3 = R_{Ax} - R_{Nx} \quad (3.49)$$

$$m_3 \cdot \ddot{y}_3 = R_{Ay} + R_{Ny} \quad (3.50)$$

$$I_{3S3} \cdot \ddot{\varphi}_3 = \frac{c}{2} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot R_{Ny} + \frac{c}{2} \cdot \cos(\varphi_3) \cdot R_{Ay} - \frac{c}{2} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot R_{Nx} - \frac{c}{2} \cdot \sin(\varphi_3) \cdot R_{Ax} \quad (3.51)$$

těleso 4:

$$m_4 \cdot \ddot{x}_4 = R_{Ox} - R_{Ax} \quad (3.52)$$

$$m_4 \cdot \ddot{y}_4 = R_{Oy} - R_{Ay} \quad (3.53)$$

$$I_{4S4} \cdot \ddot{\varphi}_4 = \frac{c}{2} \cdot \cos(\varphi_4) \cdot R_{Ox} + \frac{c}{2} \cdot \cos(\varphi_4) \cdot R_{Ax} + \frac{c}{2} \cdot \sin(\varphi_4) \cdot R_{Ay} + \frac{c}{2} \cdot \sin(\varphi_4) \cdot R_{Oy} \quad (3.54)$$

těleso 4:

$$m_5 \cdot \ddot{x}_5 = R_{Px} + R_{Ox} \quad (3.55)$$

$$m_5 \cdot \ddot{y}_5 = R_{Py} - R_{Oy} \quad (3.56)$$

$$I_{5S5} \cdot \ddot{\varphi}_5 = \frac{a}{2} \cdot \sin(\varphi_5) \cdot R_{Px} + \frac{a}{2} \cdot \sin(\varphi_5) \cdot R_{Ox} - \frac{a}{2} \cdot \cos(\varphi_5) \cdot R_{Py} - \frac{a}{2} \cdot \cos(\varphi_5) \cdot R_{Oy} + M_2 \quad (3.57)$$

(pozn. v tomto případě nejsou v rovnicích gravitační síly, protože mechanismus pracuje ve vodorovné poloze, kdyby byl ovšem postaven svisle vzhůru, tak je potřeba tyto síly také zahrnout do výpočtů)

Tyto rovnice lze upravit do maticového tvaru:

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{R} + \mathbf{Q} \quad (3.58)$$

Kde jednotlivé matice jsou:

$$\mathbf{M} = \text{diag}[m_2 \quad m_2 \quad I_{2S2} \quad m_3 \quad m_3 \quad I_{3S3} \quad m_4 \quad m_4 \quad I_{4S4} \quad m_5 \quad m_5 \quad I_{5S5}],$$

$$\mathbf{Q} = [0 \quad 0 \quad -M_1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad M_2]^T,$$

$$\mathbf{R} = [R_{Mx} \quad R_{My} \quad R_{Nx} \quad R_{Ny} \quad R_{Ax} \quad R_{Ay} \quad R_{Ox} \quad R_{Oy} \quad R_{Px} \quad R_{Py}]^T,$$

D=

1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
a/2.c(φ ₂)	a/2.s(φ ₂)	-a/2.c(φ ₂)	-a/2.s(φ ₂)	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0
0	0	-c/2.s(φ ₃)	c/2.c(φ ₃)	-c/2.s(φ ₃)	c/2.c(φ ₃)	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0
0	0	0	0	c/2.c(φ ₄)	c/2.s(φ ₄)	c/2.c(φ ₄)	c/2.s(φ ₄)	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	a/2.s(φ ₅)	-a/2.c(φ ₅)	a/2.s(φ ₅)	-a/2.c(φ ₅)	0

(Pozn. je zde využito zkratky pro trigonometrické funkce tzn. **s** = sin a **c** = cos)

Nyní jsou definovány všechny potřebné matice pro získání dynamického modelu. Z postupu je jasné, že výpočet je založen na třech maticových rovnicích (3.11), (3.42) a (3.58). Tyto rovnice lze sjednotit do maticového zápisu:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & -\mathbf{D} & \mathbf{O}_1 & \mathbf{O}_2 \\ \mathbf{I} & \mathbf{O}_3 & -\mathbf{V}_z & -\mathbf{V}_q \\ \mathbf{O}_4 & \mathbf{O}_5 & \mathbf{J}_z & \mathbf{J}_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{R} \\ \ddot{\mathbf{z}} \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{a}_{qz} \\ -\mathbf{j}_{qz} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

Kde \mathbf{O}_i jsou nulové matice a \mathbf{I} jednotková matice. Jejich rozměry závisí na parametrech řešeného manipulátoru (přesné hodnoty v [10, str.87]). Tento zápis se nám je vhodný, protože při znalosti průběhů všech závislých a nezávislých souřadnic jsme schopni přímo dopočítat zrychlení těžišť, reakce ve vazbách a zrychlení závislých a nezávislých souřadnic. Celý princip výpočtu dynamického modelu tedy spočívá v tom, že jsou známy počáteční hodnoty nezávislých souřadnic polohy a rychlostí, ze kterých lze dopočítat závislé souřadnice polohy a

rychlostí, podle postupu popsaném v předchozí kapitole. Když jsou známy tyto hodnoty pro daný časový okamžik, tak už není problém vypočítat hodnoty všech neznámých v rovnici (3.59). Z vypočtených parametrů se využijí hodnoty nezávislých zrychlení, ze kterých se dvojitou časovou integrací získají souřadnice polohy pro nový časový okamžik. Tento postup lze opakovat, dokud není dosaženo popsání pohybu mechanismu pro celé časové pásmo.

Tento dynamický model byl sestaven v prostředí Matlab a byl inspirován skriptem „Dynamika.m“ využívaným na FS ČVUT při výuce mechaniky. Tento skript pracuje na principu metody popsané výše. Ukázka z tohoto skriptu je na Obr. č.: 25, kde je vidět princip zadávání počátečních podmínek mechanismu a výpočet nezávislých souřadnic polohy a rychlostí. K výpočtu je použita funkce „ode45“, která řeší soustavy diferenciálních rovnic pomocí kombinace metody Runge-Kutta 4. a 5. řádu. Z volání funkce je zřejmé, že pro správný chod tohoto výpočtu opravdu stačí sestrojené matice definované ve funkci „Dresic.m“, časový úsek výpočtu a počáteční hodnoty polohy a rychlosti nezávislých

```

41 % Pocatecni podminky pohonu: pocatecni poloha, pocatecni uhlova rychlost
42 FI01=3/5*pi; FI02=7/5*pi; FI=pi*0.5; OM=pi/50;
43 %
44 beta2=FI01;
45 beta2t=OM;
46 beta5=FI02;
47 beta5t=-OM;
48 % Lokalni souradnice stredisek teles v prostorech vektoru
49 x2S2=0;
50 y2S2=c/2;
51 x3S3=a/2;
52 y3S3=0;
53 x4S4=a/2;
54 y4S4=0;
55 x5S5=0;
56 y5S5=-c/2;
57 % Odhady zavislych souradnic
58 beta3=pi/5;
59 beta4=9*pi/5;
60 %
61 zz=[beta3;beta4];
62 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
63
64 X0=[beta2;beta5;beta2t;beta5t];
65 options=odeset('reltol',0.000001,'abstol',1e-8);
66 [t X]=ode45('Dresic',[0,t1],X0,options);

```

souřadnic. Dynamický model manipulátoru je tedy funkční, čehož se

Obr. č.: 24 Ukázka skriptu „Dynamika.m“

se dá využít pro objasnění, jak jednotlivé vstupní momenty ovlivňují pohyb manipulátoru. Dále je možné vygenerovat grafy s velikostí reakcí v jednotlivých vazbách a pozorovat, jak se s pohybem mechanismu mění.

3.5 Inverzní kinematický model

Tato kapitola vychází z [10] a [11]

V mechanice se rozlišují dva typy úloh. První je dopředná úloha, která ze zadaných souřadnic mechanismu počítá souřadnice určitého bodu či části mechanismu (u manipulátorů většinou pracovního efektoru) Tento případ byl popsán v kapitolách 3.3 a 3.4.. Pro manipulátory je ale více používán inverzní model mechanismu, který ze zadaných souřadnic pracovního bodu je schopen dopočítat všechny úhly (motorové souřadnice) používaného mechanismu.

V inverzní kinematice zadaného manipulátoru, budou zadávány souřadnice bodu A a z nich bude potřeba najít všechny úhly β . Vznikne tedy nový vektor nezávislých souřadnic:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x_{1A} \\ y_{1A} \end{bmatrix}$$

A také nový vektor závislých souřadnic:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \end{bmatrix}$$

Jsou tedy čtyři závislé souřadnice, což znamená, že bude potřeba nalézt čtyři rovnice k výpočtu těchto neznámých. Protože jsou zadávány souřadnice bodu A, je tedy možné využít rovnice (3.14) a (3.15), jako první dvě závislosti vektorů \mathbf{q} a \mathbf{z} . Zároveň víme že se jedná o paralelní manipulátor, takže musí být splněna uzavřenost všech ramen, což vede na požití rovnic (3.4) a (3.5). Nyní jsou nalezeny všechny čtyři rovnice. Po vyřešení této soustavy rovnic o čtyřech neznámých, vznikne hledané řešení.

Pro výpočet inverzní kinematiky byl napsán skript „inverzeK.m“ v programu Matlab, kde je využito rovnic (3.4), (3.5), (3.14) a (3.15) převedených do maticového tvaru:

$$\mathbf{V} = \mathbf{0} \tag{3.60}$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} x_{1A} - b_1 \cdot \cos(\beta_1) - b_2 \cdot \cos(\beta_2) - b_3 \cdot \cos(\beta_3) \\ y_{1A} - b_1 \cdot \sin(\beta_1) - b_2 \cdot \sin(\beta_2) - b_3 \cdot \sin(\beta_3) \\ b_1 \cdot \cos(\beta_1) + b_2 \cdot \cos(\beta_2) + b_3 \cdot \cos(\beta_3) + b_4 \cdot \cos(\beta_4) + b_5 \cdot \cos(\beta_5) \\ b_1 \cdot \sin(\beta_1) + b_2 \cdot \sin(\beta_2) + b_3 \cdot \sin(\beta_3) + b_4 \cdot \sin(\beta_4) + b_5 \cdot \sin(\beta_5) \end{bmatrix}$$

Aby vznikla plynulá dráha tvořená úsečkami ze zadaných souřadnic, jsou souřadnice proloženy body z parametrických rovnic úsečky:

$$x = x_0 + s_1 \cdot t \quad (3.61)$$

$$y = y_0 + s_2 \cdot t \quad (3.62)$$

Kde jednotlivé parametry znamenají:

x, y - současná poloha, s_1 - celkový rozdíl souřadnic $x = x_1 - x_0$

x_0, y_0 - počáteční poloha, s_2 - celkový rozdíl souřadnic $y = y_1 - y_0$

t - procentuální posun = $0 : k : 1$, k - velikost vzorkování

Po zadání počátečních podmínek a spuštění skriptu „inverzeK.m“ program bere postupně dvojice zadaných souřadnic, které proloží dalšími body pomocí rovnic (3.61) a (3.62) a poté začne hledat jednotlivé velikosti závislých souřadnic vyhovujících rovnici (3.60). Řešení je hledáno pomocí funkce „fsolve“, která v Matlabu řeší soustavy nelineárních rovnic. Stejný postup je ve skriptu opakován pro nalezení závislých rychlostí a zrychlení. Ukázka skriptu „inverzeK.m“ je zobrazena na Obr. č.: 26.


```

+1
45
46 -   beta00=[beta0];
47 -   k=size(P,1);
48 -   for i=1:k
49 -
50 -       x0=H(i,1);
51 -       y0=H(i,2);
52 -       s1=H(i+1,1)-x0;
53 -       s2=H(i+1,2)-y0;
54 -
55 -
56 -   for it=0:0.001:1           % Proložení jednotlivých souřadnic dalšími body
57 -       x1=x0+s1*it;
58 -       y1=y0+s2*it;
59 -
60 -       xA=x1(1);
61 -       yA=y1(1);
62 -       [w, fval] = fsolve(@ipoloha,beta00)   % Výpočet závislých souřadnic polohy
63 -       W1=[W1 [w]];
64 -   end
65 -   beta00=[w];
66 -
67 -   xtA=Pt(i,1);
68 -   ytA=Pt(i,2);
69 -   beta2=W1(1,i);
70 -   beta3=W1(2,i);
71 -   beta4=W1(3,i);
72 -   beta5=W1(4,i);
73 -   [wt, fval] = fsolve(@irychlost,betat0)   % Výpočet závislých rychlostí
74 -   Wt1=[Wt1 [wt]];
75 -
76 -   xttA=Ptt(i,1);
77 -   yttA=Ptt(i,2);
78 -   betat2=Wt1(1,i);
79 -   betat3=Wt1(2,i);
80 -   betat4=Wt1(3,i);

```

Obr. č.: 25 Ukázka skriptu „inverzeK.m“

3.6 Inverzní dynamický model

U inverzní úlohy dynamiky jsou opět zadávány nezávislé souřadnice bodu A. Inverzní dynamický model dokáže z těchto souřadnic spočítat velikosti hnacích momentů, které se poté dají využít např. k ovládní servomotorů realizujících pohyb mechanismu.

Pro sestavení modelu inverzní dynamiky byla nalezena možnost využití rovnice (3.58) z dopředné dynamiky. K vyřešení této soustavy rovnic je nutné nejdříve určit pro všechny závislé souřadnice velikosti poloh, rychlostí a zrychlení z inverzní kinematiky. Poté je třeba využít rovnice (3.42) na dopočítání vektoru **a**. Nakonec se všechny parametry dosadí do rovnice (3.58) a vznikne nám dvanáct rovnic pro dvanácti neznámých, což je řešitelná

soustava. Na inverzní dynamiku byl vytvořen skript „idynamika.m“, který pracuje podle tohoto postupu. Výpočet vstupních momentů funguje, jen řešení těchto rovnic je pomalé, protože se v tomto skriptu používá opět funkce „fsolve“, která celý proces významně zpomaluje. Tento problém by se dal vyřešit roznásobením matic z rovnice (3.58) a vyjádřením nového maticového zápisu, který by obsahoval vektor plný všech neznámých. Soustava rovnic je lineární a proto by oddělení všech neznámých neměl být problém. K roznásobení matic lze využít symbolického násobení matic v programu Matlab. Tento problém nebyl odstraněn z důvodu nedostatku času.

3.7 Simulace chování navrženého modelu

V předchozích kapitolách byly navrženy všechny potřebné modely pro sestavení simulace chování daného manipulátoru. K této simulaci bylo využito programu Simulink, který využívá funkčních bloků k sestavení řízení daného mechanismu a zároveň spolupracuje s programem Matlab. V programu Matlab byl vytvořen spouštěcí skript celé simulace „realny_model.m“. Tento skript obsahuje na začátku všechny konstanty mechanismu a počáteční polohy mechanismu. Dále v něm následuje výpočet úhlů β_2 a β_5 ze zadaných souřadnic bodu A pomocí principu popsaného v inverzní kinematice. Po tomto výpočtu se vytvoří pro každý úhel jedna matice nesoucí i informace o čase, které vychází z iterace probíhající při výpočtu úhlů. Skript poté vyvolá soubor „Simulacni_schema.slx“ a nasimuluje zadaný pohyb mechanismu.

Do Simulinku vstupují dva vstupní bloky obsahující právě vypočtené matice úhlových souřadnic. Každý vstup je propojen s jedním PID regulátorem, který má za úkol generovat korekční momenty z rozdílu mezi žádanými vstupními úhlovými souřadnicemi a souřadnicemi měřenými na simulačním modelu. Momenty pohonu vstupují do dynamického modelu pomocí spojovače signálu. Dynamický model je v Simulinku tvořen blokem podporujícím Matlabovské funkce a vytváří tak možnost, vytvořit si vlastní skript propojující se s dalšími bloky schématu. Blok dynamického modelu tedy vypadá skoro stejně jako skript „dynamika.m“, ale bylo nutné z něj odebrat funkci „ode45“, protože Simulink nepracuje s těmito funkcemi. Časovou integraci ale nahrazuje integrační blok Simulinku, který je umístěn na oba výstupy vypočtených zrychlení úhlů β_2 a β_5 dvakrát, protože je potřeba tyto zrychlení dvakrát z integrovat, aby byly nalezeny souřadnice polohy těchto úhlů. Velikost těchto úhlů je poté ukládána výstupním blokem do pracovního prostoru Matlabu. Kromě do výstupního

bloku jdou velikosti vypočtených úhlů zpět na začátek před PID regulátory, kde se odečítají od vstupních parametrů a tvoří tak zpětnou vazbu. Také bylo vysvětleno, že pro správnou funkci dynamického modelu je nutné znát hodnoty nezávislých úhlů, jejich rychlostí a předchozí krok závislých souřadnic. Jsou tedy také vytvořeny zpětné vazby z první integrace nezávislého zrychlení a z výpočtu závislých souřadnic pozdržených o jeden časový okamžik pomocí bloku „paměť“. Tyto zpětné vazby vedou před dynamický model, do spojovače signálu. Do tohoto místa přijde vytvořit ještě jedna zpětná vazba z parametrů nezávislých souřadnic polohy. Schéma dynamického modelu má tedy 8 vstupů a 4 výstupy. Výstupy závislých úhlů jsou také ukládány do paměti Matlabu. Po odsimulování celého průběhu vstupních souřadnic se simulace zastaví a proces se vrátí zpět do programu Matlab, kde se z výsledných hodnot všech úhlů sestaví animace pohybu mechanismu. Celé simulační schéma ze Simulinku je zobrazeno na Obr. č.:27.

Pro správnou funkci simulace je nutné napsat do integračních bloků a bloku paměti počáteční hodnoty jednotlivých parametrů. Zároveň je potřeba nastavit PID regulátorům správné hodnoty pro jednotlivé složek. PID znamená, že je využíváno P - proporciální, I - integrační a D - derivační složky. Proporciální složka určuje jak moc bude přímo ovlivněna výstupní veličina při změně vstupní veličiny. Derivační složka snižuje kmitavost systému a představuje jistou formu elektronického tlumení. Integrační složka snižuje trvalou regulační odchylku přenosu. Nastavování regulátorů začalo laděním P složky do té doby, dokud nebyla nalezena frekvence netlumených kmitů. Poté se do systému přidala D složka a hledalo se optimální nastavení, které by způsobilo rychlou odezvu systému a malý počáteční rozkmit. Na závěr se do systému přidala složka I která snížila trvalou odchylku od požadované hodnoty. Pro ještě lepší stabilitu systému, bylo využito filtru derivační složky N. Rovnice PID regulátoru v Simulinku vypadá takto:

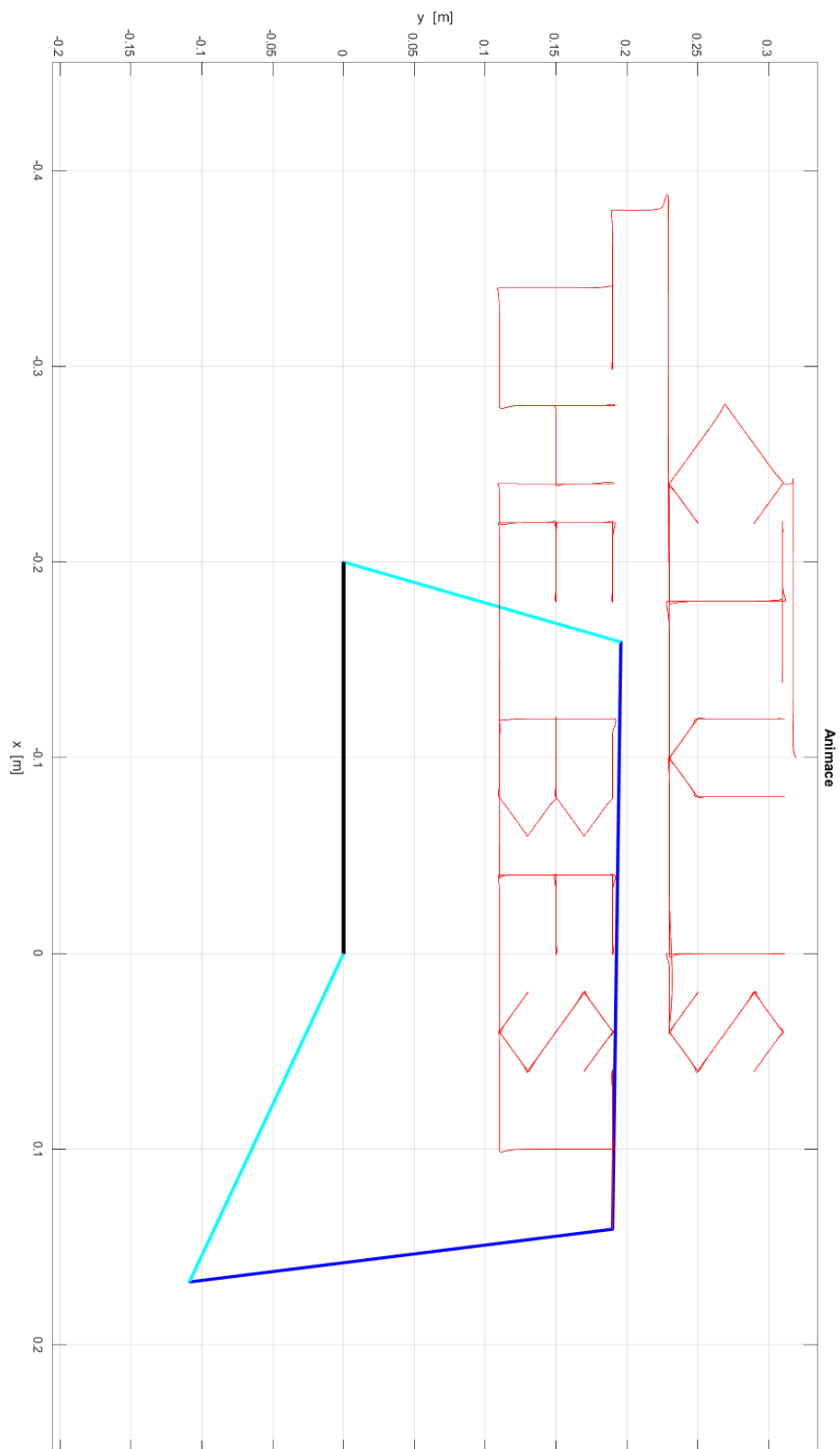
$$u(s) = P + I \cdot \frac{1}{s} + D \cdot \frac{N}{1 + N \cdot \frac{1}{s}}$$

Výsledné hodnoty PID regulátoru, které vyhovovaly nejlépe jsou:

$$P = 40, \quad I = 15, \quad D = 3, \quad N = 90$$

Hlavním cílem práce bylo nasimulovat napsání textu „CTU IS THE BEST“. Aby se tohoto cíle dalo dosáhnout, bylo potřeba nakreslit celý text do pracovního prostoru a určit souřadnice bodů nutných k napsání tohoto textu. Tyto souřadnice byly zapsány do funkce

„souradnice.m" a spouštěcí skript simulace si tyto hodnoty nahraje do paměti vždy po jeho spuštění. Po spuštění finálního skriptu manipulátor sestrojil tento text a výsledek je na Obr. č.: 28. Tato simulace řízení vychází pouze z inverzní kinematiky a funkce PID regulátoru. Pro zlepšení parametrů simulace a snížení práce PID regulátorů by bylo potřeba do systému přidat inverzní dynamiku mechanismu popsanou v předchozí kapitole. Tyto úpravy simulace řízení jsou naplánovány pro budoucí realizaci, která se při tvorbě této práce z časových důvodů nestihla. Zároveň by bylo žádoucí do pro budoucí realizaci vytvořit simulaci vybudovanou pouze v Simulinku, s možností měnit vstupní parametry souřadnic x a y v reálném čase.



Obr. č.: 27 Napsání zadaného textu

4 Závěr

V této práci byly shromážděny základní informace o robotech, o jejich historii, základním dělení a jejich využití. Dále byly sestaveny modely dopředné a inverzní kinematiky a dynamiky zadaného manipulátoru, u kterých byla vysvětlena jejich tvorba a použití v programu Matlab. Na závěr byl sestaven simulační model manipulátoru v programu Simulink a provedení simulace napsání zadaného textu. Bohužel z časových důvodů nebyla provedena realizace projektu, která je ovšem domluvena na formu mimoškolních aktivit.

5 Seznam obrázků

Obr. č.: 1 Jeden z prvních průmyslových robotů	4
Obr. č.: 2 Průmyslový manipulátor	5
Obr. č.: 3 Letající dron	6
Obr. č.: 4 Humanoid NAO	7
Obr. č.: 5 Robotická obsluha lití kovů	8
Obr. č.: 6 Robotická manipulace s potravinami	9
Obr. č.: 7 Robot na detekci výbušnin	10
Obr. č.: 8 Robot pro chirurgické operace	11
Obr. č.: 9 Obrábění dřeva robotem.....	12
Obr. č.: 10 Autonomní automobil	12
Obr. č.: 11 Představa auta bez řidičů.....	13
Obr. č.: 12 Zadání požadovaného manipulátoru	14
Obr. č.: 13 Grafické zjištění pracovního prostoru 1).....	15
Obr. č.: 14 Grafické zjištění pracovního prostoru 2).....	16
Obr. č.: 15 Grafické zjištění pracovního prostoru 3).....	17
Obr. č.: 16 Konečné rozměry manipulátoru	17
Obr. č.: 17 3D model manipulátoru.....	18
Obr. č.: 18 Pohled zhora na manipulátor.....	19
Obr. č.: 19 Detail koncové tužky manipulátoru	19
Obr. č.: 20 Smyčka manipulátoru.....	21
Obr. č.: 21 funkce „Kresic.m“	24
Obr. č.: 22 Lokální souřadnicové systémy a těžiště těles.....	26
Obr. č.: 23 Uvolnění všech těles	30
Obr. č.: 24 Ukázka skriptu „Dynamika.m“	33
Obr. č.: 25 Ukázka skriptu „inverzeK.m“	36
Obr. č.: 26 Simulační schéma.....	40
Obr. č.: 27 Napsání zadaného textu.....	41

6 Použité zdroje

6.1 Bibliografické citace:

V textu jsou vyznačeny kurzívou a odkazem na zdroj:

[1] *Historie robotů* [online]. 2014 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://factoryautomation.cz/historie-robotu-saha-az-do-recke-mytologie/>

[3] *Roboty nebo roboti?* [online]. [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: <http://www.etm.cz/index.php/etm/656-roboty-nebo-roboti>

6.2 Literatura:

[10] VALÁŠEK, Michael a spol. *Mechanika B*. Praha, 2004. ISBN 8001029190.

[11] GREPL, Robert. *Kinematika a dynamika mechatronických systémů*. Brno: VUT v Brně, 2007. ISBN 9788021435308.

6.3 Internetové odkazy:

[1] *Historie robotů* [online]. 2014 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://factoryautomation.cz/historie-robotu-saha-az-do-recke-mytologie/>

[2] *ROBOTIKA* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: https://moodle.sspbrno.cz/pluginfile.php/7493/mod_resource/content/1/ROBOTIKA.pdf

[3] *Roboty nebo roboti?* [online]. [cit. 2015-11-24]. Dostupné z: <http://www.etm.cz/index.php/etm/656-roboty-nebo-roboti>

[4] *Roboty v průmyslu* [online]. [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://www.roboti.cz/test/robotizace-v-prumyslu>

- [5] *7 výhod potravinářské výrobní linky s roboty* [online]. [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/7-vyhod-potravinarske-vyrobní-linky-s-roboty/>
- [6] *2025: Ruská armáda sází na roboty* [online]. [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.armadinoviny.cz/2025-ruska-armada-sazi-na-roboty.html>
- [7] *Armáda nahradí tisíce vojáků roboty* [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.freepub.cz/2014/armada-vojensti-roboti/>
- [8] *Robot vedený lékaři* [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.upol.cz/nc/aktualita/clanek/robot-vedeny-lekari-univerzitetniho-robotickeho-centra-operoval-uz-vic-nez-stovku-pacientu/>
- [9] *Sci-fi realitou: inteligentní auta bez řidiče* [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/aktuality/sci-fi-realitou-inteligentni-auta-bez-ridice>