

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky



Specializovaný gripper pro robotické vozítko

Specialized gripper for robotic rover

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Vojtěch Šedivý
Vedoucí práce: Ing. Jan Zavřel, Ph.D.
Rok: 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šedivý** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **508933**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Specializovaný gripper pro robotické vozítko

Název bakalářské práce anglicky:

Specialized gripper for robotic rover

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši gripperů používaných v robotice a pro robotická vozítka.
- 2) Vyberte vhodné řešení pro použití na robotickém vozítku.
- 3) Proveďte kinematickou a silovou analýzu navržených řešení a porovnejte je. Případně proveďte optimalizaci pro optimální užité vlastnosti.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Andreas Wolf, Henrik Schunk. Grippers in Motion
The Fascination of Automated Handling Tasks. 2019. ISBN 978-1-56990-714-6. <https://doi.org/10.3139/9781569907153>
[2] Valášek, M., Stejskal, V. & Březina, J., 2004. Mechanika A, Praha: ČVUT.
[3] Valášek, M., Bauma, V. & Šika, Z., 2004. Mechanika B, Praha: ČVUT.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

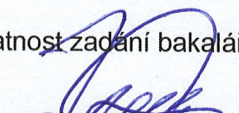
Ing. Jan Zavřel, Ph.D. odbor mechaniky a mechatroniky FS

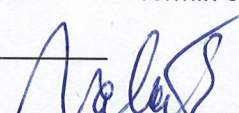
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


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

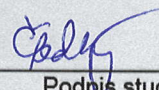

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

13.5.2024
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....
Vojtěch Šedivý

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Janu Zavřelovi, Ph.D. za přínosné rady a pomoc při tvorbě bakalářské práce.

Vojtěch Šedivý

Název práce:

Specializovaný gripper pro robotické vozítko

Autor:

Vojtěch Šedivý

Studijní program:

Teoretický základ strojního inženýrství

Druh práce:

Bakalářská práce

Vedoucí práce:

Ing. Jan Zavřel, Ph.D.

Odbor mechaniky a mechatroniky

Bibliografické údaje:

počet stran: 72

počet kapitol: 6

počet obrázků: 54

počet tabulek: 6

Abstrakt:

Tato práce se zabývá gripery pro robotická vozítka. První část textu se věnuje rešerši literatury se zaměřením na gripery používané v robotice s ohledem na jejich využití pro robotická vozítka, jejich vlastnosti a následnou klasifikaci. V další části je provedena kinematická a silová analýza a následná optimalizace rozměrů. V závěrečné práci jsou diskutovány výsledky analýz a je posouzena vhodnost gripperů pro robotické vozítko.

Klíčová slova:

gripper, robotické vozítko, kinematická analýza, silová analýza, optimalizace

Title:

Specialized gripper for robotic rover

Author:

Vojtěch Šedivý

Abstract:

This thesis deals with grippers for robotic rovers. The first part of the paper is devoted to a literature search focusing on grippers used in robotics with respect to their use for robotic rovers, their properties and subsequent classification. In the next part, kinematic and force analysis and subsequent dimensional optimization is performed. Finally, the results of the analysis are discussed and the suitability of the grippers for the robotic rover is assessed.

Keywords:

gripper, rover, kinematic analysis, force analysis, optimization

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	1
Seznam obrázků	3
Seznam tabulek	5
1 Úvod	6
1.1 Počátky gripperů	6
1.2 Stanovení základních pojmů	7
1.2.1 Gripper	7
1.2.2 Robotické vozítko	7
1.2.3 Okolní prostředí	8
1.2.4 Úkoly robotického vozítka	8
2 Uchopovací proces	10
2.1 Typy úchopu	10
2.1.1 Adhezní a reverzní úchop	11
2.1.2 Silový a tvarový úchop	11
2.2 Potřebné síly pro úchop	11
2.3 Dosah gripperu	12
3 Rozdělení gripperů	13
3.1 Typ pohonu	13
3.1.1 Pneumaticky poháněný gripper	13
3.1.2 Elektricky poháněný gripper	14
3.1.3 Hydraulicky poháněný gripper	14
3.2 Uspořádání prstů	15
3.2.1 Dvouprstý gripper	15
3.2.2 Tříprstý gripper	18
3.2.3 Čtyřprstý gripper	19
3.2.4 Pětprstý gripper	19
3.3 Ostatní grippery	20
3.3.1 Podtlakové grippery	20
3.3.2 Magnetické grippery	21
3.3.3 Grippery pro sběr vzorků hornin	21
4 Metody pro analýzu gripperů	23
4.1 Vektorová metoda	23
4.1.1 Poloha význačného bodu soustavy	25
4.1.2 Dosažitelný prostor	26
4.2 Inverzní kinematika	26
4.3 Metoda uvolňování	27
4.4 Optimalizace	28

5	Analýza vybraných gripperů	30
5.1	Předpoklady pro analýzu	31
5.2	Gripper konstrukce Hiwonder	31
5.2.1	Vektorová metoda gripperu Hiwonder	32
5.2.2	Silová analýza gripperu Hiwonder	35
5.2.3	Optimalizace gripperu Hiwonder	39
5.3	Gripper konstrukce Robotiq 2F-85	40
5.3.1	Vektorová metoda gripperu Robotiq	40
5.3.2	Silová analýza gripperu Robotiq	44
5.3.3	Optimalizace gripperu Robotiq	48
5.4	Gripper konstrukce DH AG-95	51
5.4.1	Vektorová metoda gripperu DH AG-95	52
5.4.2	Silová analýza gripperu DH AG-95	56
5.4.3	Optimalizace gripperu DH AG-95	61
5.5	Shrnutí praktické části	64
5.5.1	Porovnání dosažitelného prostoru	65
5.5.2	Porovnání silových účinků	65
5.5.3	Porovnání optimalizací	66
5.5.4	Výběr gripperu	66
6	Závěr	67
	Literatura	69

Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	Popis	Jednotka
F_G	Přítlačná síla gripperu	N
m_p	Hmotnost předmětu	kg
g	Gravitační zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
μ	Součinitel adheze	-
n_p	Počet prstů gripperu	-
l	Počet smyček	-
d	Počet kinematických dvojic	-
m	Počet předepsaných pohybů	-
u	Počet těles	-
n	Počet stupňů volnosti	-
vp	Vazba pevná	-
r	Vazba rotační	-
p	Vazba posuvná	-
v	Vazba valivá	-
o	Vazba obecná	-
\vec{b}_i	Vektor b s pořadovým indexem i vektorové smyčky	m
β_i	Úhel s pořadovým indexem i vektorové smyčky	rad
\vec{f}	Matice vynulovaných vazbových rovnic	-
\vec{z}	Matice závislých souřadnic	-
\vec{q}	Matice nezávislých souřadnic	-
$\vec{\dot{z}}$	Matice závislých rychlostí	-
$\vec{\dot{q}}$	Matice nezávislých rychlostí	-
\vec{J}_z	Matice koeficientů závislých souřadnic	-
\vec{J}_q	Matice koeficientů nezávislých souřadnic	-
\vec{r}_M	Vektor vyjadřující polohu bodu M v globálním souřadnicovém systému	m
x_M	Souřadnice x bodu M	m
y_M	Souřadnice y bodu M	m
β_k	Úhel vektoru r_M a osy x	rad
$\angle BCM$	Úhel mezi body B a M s vrcholem v bodě C	rad
$ CM $	Vzdálenost bodu C od bodu M	m
t	Čas	s
$R_{Ax,y}$	Reakční síla v bodě např. A ve směru x , popřípadě y	N

Symbol	Popis	Jednotka
M_A	Momentová rovnice rovnováhy okolo bodu např. A	-
M_i	Moment síly	Nm
F	Síla zatěžující gripper	N
T	Nákladová funkce	-
y_{real}	Aktuální souřadnice y bodu M	m
$y_{0,105}$	Souřadnice y s konstantní hodnotou např. $0,105 m$	m
φ	Natočení osy y posledního článku prstu od globální osy y	rad
$\angle CBM$	Úhel mezi body C a M s vrcholem v bodě B	rad
$ BM $	Vzdálenost bodu B od bodu M	m
$Q_{1,2}$	Interval obsahující polohy pohonu	rad nebo m
φ_{limit}	Hranice intervalu Q_1	rad
ψ_{limit}	Hranice intervalu Q_2	rad
$\angle EGM$	Úhel mezi body E a M s vrcholem v bodě G	rad
$ GM $	Vzdálenost bodu G od bodu M	m
$b_1 limit$	Hranice intervalu Q_1	m
$b_{11} limit$	Hranice intervalu Q_2	m
N_i	Normálová síla	N
s	Goniometrická funkce \sin	-
c	Goniometrická funkce \cos	-
w	Index určující číslo polohy gripperu	-

Seznam obrázků

1.1	Rover Waratah	8
1.2	Ovládací panel ze soutěže European Rover Challenge	9
2.1	Typy úchopu	10
3.1	Porovnání pohonů gripperů	15
3.2	Paralelní gripper roveru Waratah týmu Monash Nova Rover	16
3.3	Úhlový gripper Schunk SWG	16
3.4	Dvouprstý gripper s dvěma články roveru Sandstorm	17
3.5	Tvarový a silový úchop adaptivního gripperu Robotiq 2F-85	17
3.6	Tříprstý gripper s jedním článkem Schunk PZN-plus	18
3.7	Tříprstý gripper roveru Huntsman týmu Monash Nova Rover	19
3.8	Tříprstý adaptivní gripper Robotiq	19
3.9	Podtlakový gripper Coval	21
3.10	Bagrovací lžíce roveru K3P4	22
3.11	Vrták roveru ARADS	22
4.1	Brick Solid	27
4.2	Revolute Joint	27
4.3	Bushing Joint	27
5.1	Robotický gripper Hiwonder	30
5.2	Robotiq 2F-85	30
5.3	Gripper DH AG-95	31
5.4	Schéma gripperu Hiwonder	32
5.5	Vektorová smyčka gripperu Hiwonder	33
5.6	Dosažitelný prostor gripperu Hiwonder	35
5.7	Model gripperu Hiwonder v softwaru Matlab Simscape	36
5.8	Uvolnění gripperu Hiwonder	37
5.9	Průběh reakcí v gripperu Hiwonder	38
5.10	Průběh momentu v gripperu Hiwonder	38
5.11	Původní simulační model gripperu Hiwonder	40
5.12	Schéma gripperu Robotiq	41
5.13	Vektorová smyčka gripperu Robotiq	41
5.14	Dosažitelný prostor gripperu Robotiq	44
5.15	Dosažitelné body gripperu Robotiq	44
5.16	Model gripperu Robotiq v softwaru Matlab Simscape	45
5.17	Uvolnění gripperu Robotiq	46
5.18	Průběh reakcí v gripperu Robotiq	47
5.19	Průběh momentu v gripperu Robotiq	48
5.20	Porovnání momentů M_1 gripperu Robotiq	50

5.21	Porovnání momentů M_2 gripperu Robotiq	50
5.22	Porovnání průběhů souřadnice y v gripperu Robotiq	51
5.23	Původní simulační model gripperu Robotiq	51
5.24	Simulační model gripperu Robotiq po optimalizaci pomocí ga	51
5.25	Schéma gripperu DH AG-95	52
5.26	Vektorové smyčky gripperu DH AG-95	53
5.27	Dosažitelný prostor gripperu DH AH-95	56
5.28	Model gripperu DH AG-95 v softwaru Matlab Simscape	57
5.29	Uvolnění gripperu DH AG-95	58
5.30	Průběhy reakčních sil gripperu DH AG-95	60
5.31	Průběhy reakčních momentů M_1 a M_8 gripperu DH AG-95	60
5.32	Průběhy hnacích sil F_1 a F_2 gripperu DH AG-95	61
5.33	Porovnání sil F_1 gripperu DH AH-95	63
5.34	Porovnání sil F_2 gripperu DH AH-95	63
5.35	Porovnání průběhů souřadnice y v gripperu DH AH-95	64
5.36	Původní simulační model gripperu DH AG-95	64
5.37	Simulační model gripperu DH AG-95 po optimalizaci pomocí ga	64

Seznam tabulek

5.1	Členy smyčky prstu gripperu Hiwonder	33
5.2	Porovnání rozměrů před a po optimalizaci prstu gripperu Hiwonder	40
5.3	Členy smyčky prstu gripperu Robotiq	42
5.4	Porovnání rozměrů podle optimalizačního algoritmu prstu gripperu Robotiq	49
5.5	Členy smyček prstu gripperu DH AG-95	53
5.6	Porovnání rozměrů podle optimalizačního algoritmu prstu gripperu DH AG-95	62

1 Úvod

Cílem rešeršní části práce je rešerše používaných gripperů pro robotická vozítka. Nejprve je blíže specifikováno několik základních pojmů jako je gripper nebo robotické vozítko. Dále pak je popsán uchopovací proces a blíže jsou popsány možnosti pohonů, typy gripperů vzhledem ke geometrii článků jednotlivých prstů a jejich vhodnosti pro aplikace na mobilní vozítka.

Následně byly v praktické části vybrány tři grippery, které byly podrobněji analyzovány z hlediska dosažitelného prostoru jednoho prstu gripperu pomocí přímé kinematiky. Dále pak byla zvolena trajektorie v tomto prostoru a pomocí inverzní kinematiky byla v průběhu pohybu provedena silová analýza ve vazbách prstu gripperu a potřebných silových účinků pro pohon gripperu při zvoleném zatížení. Následně byla provedena optimalizace rozměrů prstu gripperu pro požadované vlastnosti. Na závěr byla vybraná řešení vzájemně porovnána a byla posouzena jejich vhodnost pro robotická vozítka.

1.1 Počátky gripperů

Jedním z důvodů vývoje robotických ramen a gripperů bylo zefektivnit proces výroby součástí. Během výroby je v určitých případech nutné součást přemístit k jinému stroji pro další operaci. Tato mezioperace manipulace se součástí jí nepřidává vyšší hodnotu, a proto je snahou tento čas co nejvíce eliminovat a zároveň ulehčit práci obsluze při manipulaci s těžkými součástmi nebo obsluhu plně nahradit, pokud ji dané prostředí nebo úkol ohrožuje. [1]

Robotické grippery vznikaly již ve středověku se snahou napodobit lidskou ruku. Grippery, které se začaly více podobat dnešním, se objevily během průmyslové revoluce, avšak byly pouze pasivní, tzn. že veškerý pohyb se odehrával pouze v mechanickém rameni. Po první světové válce nastal další pokrok v oblasti robotických rukou. První roboty pracující na principu těch dnešních začaly vznikat v 50. letech 20. století. V roce 1954 si George Devol zažádal o patent na prvního průmyslového robota. Spolu s Joem Engelbergerem založili firmu Unimation a první roboty instalovali v továrně General Motors v New Jersey. Převážná většina robotů byla zpočátku určena pro automobilový průmysl a

potřebným operacím byly přizpůsobeny i koncové efekторы jako například svařovací hlavice. Až do 80. let 20. století byly ovšem gripperly většinou specializované na jeden úkol. Od té doby dochází k vývoji i univerzálních gripperů s inspirací u lidské ruky nebo jinde v přírodě. [1, 2, 3]

1.2 Stanovení základních pojmů

V této části je pro další použití v textu blíže definován pojem gripper, robotické vozítko, na které může být tento gripper instalován, a případně je diskutována vhodnost této instalace. Dále pak je specifikováno prostředí, ve kterém se robotické vozítko pohybuje a základní úkony, které jsou po něm požadovány.

1.2.1 Gripper

„A gripper is a mechanical or robotic device designed to grasp, hold, manipulate, or transport objects. It serves as the „hand” or end-effector of a robotic arm or automation system, allowing the robot to interact with the physical world by gripping and releasing objects.” [4] Tuto definici lze přeložit jako: „Gripper je mechanické nebo robotické zařízení určené k uchopení, držení, manipulaci nebo přepravě předmětů. Slouží jako „ruka” nebo koncový efektor robotického ramene nebo automatizačního systému, což umožňuje robotovi interagovat s fyzickým světem uchopováním a pouštěním předmětů.” Obecně lze tedy říci, že gripperly jsou podmnožinou koncových efektorů, protože do koncových efektorů robotických ramen mohou být zahrnuty i přístroje, které nemanipulují s předmětem, ale mohou ho například snímat díky mnoha senzorům, svařovat pomocí svařovací hlavice, nanášet pomocí lakovací pistole lak nebo aplikovat jiné povrchové úpravy. [5]

1.2.2 Robotické vozítko

„The robotic rover is defined as a small vehicle that can move over rough ground and it is initially used by NASA for space exploration.” [6] Přeloženo jako: „Robotické vozítko (rover) je definováno jako malé vozidlo, které je schopné se pohybovat nerovným terénem a bylo původně použito NASA pro průzkum vesmíru.” Robotická vozítka jsou určena pro nahrazení osob v nebezpečném, náročném nebo nepřístupném prostředí. Jedná se většinou o vozidla s pásovým podvozkem nebo několika páry menších kol. [6] Tato práce se zaměřuje především na gripperly umístěné na robotických ramenech vesmírných roverů a roverů vyvinutých studentskými univerzitními týmy pro účely soutěží jako je European Rover Challenge [7] nebo University Rover Challenge. [8] Příklad takového vozítka je na obrázku 1.1.



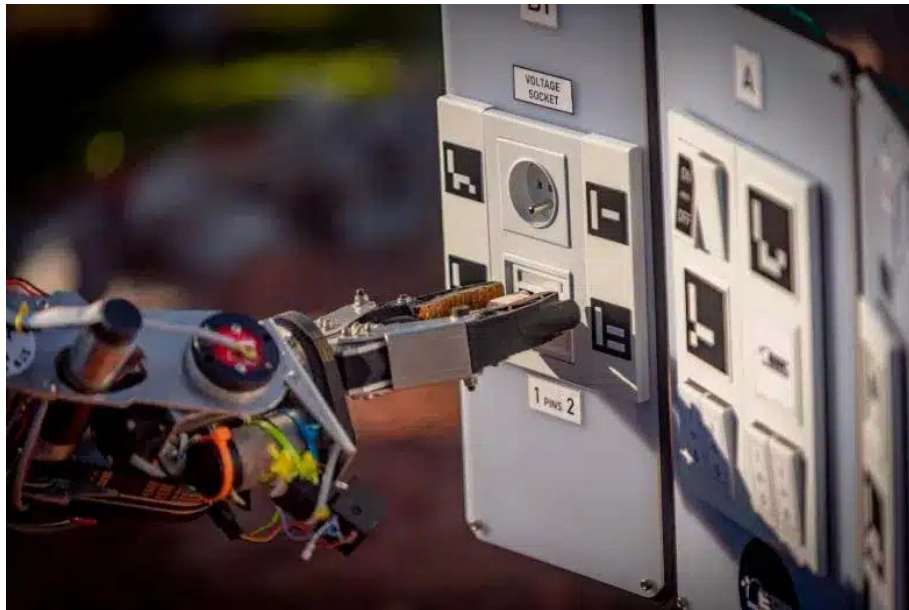
Obrázek 1.1: Rover Waratah týmu Monash Nova Rover z roku 2023. [9]

1.2.3 Okolní prostředí

Jak již bylo řečeno v sekci 1.2.2, tato práce se zabývá převážně rovery určenými pro pohyb na Měsíci, cizí planetě jako je Mars nebo v podmínkách na Zemi simulujících tato prostředí. Materiály a technologie gripperu tak musí být vhodně navrženy pro toto prostředí. Marsovský povrch je tvořen prachem, štěrkem a kameny různých velikostí. Tento typ prašného povrchu typický pro Mars nebo Měsíc se nazývá regolit. Mars i Měsíc mají na povrchu bohatý reliéf. Tvoří ho různé krátery, kaňony, hory a údolí. Teploty na Marsu se pohybují mezi $-153\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ a na Měsíci mezi $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ v závislosti na pozici Slunce. [10, 11]

1.2.4 Úkoly robotického vozítka

Mezi úkoly, které jsou požadovány po robotickém vozítku a využívají k jejich splnění nějakým způsobem gripper, patří převážně získání vzorků hornin různých velikostí a manipulace s nimi pro jejich další zkoumání. Dále pak manipulace s různými předměty, které například nesmí být poškozeny během procesu. Mezi bližší specifika soutěží robotických vozítek patří určitá forma interakce se speciálně připraveným ovládacím panelem jako je například na obrázku 1.2. Dalším úkolem je nalezení sond v terénu, jejich získání a převezení na určené místo a nakonec získání vzorků hornin jak z povrchu, tak z pevných hornin a provedení jejich bližší analýzy. Ovládací panel obsahuje různé úkoly. Jedná se například o ovládání přepínačů, měření elektrických parametrů, zapojení ethernetového kabelu do označené zásuvky a další. Tyto úkoly vyžadují jak potřebnou uchopovací sílu gripperu, tak přesnost. [12]








Obrázek 1.2: Ovládací panel ze soutěže European Rover Challenge. [13]

2 Uchopovací proces

Celý proces uchopení součásti a manipulace s ní je závislý na mnoha faktorech. Tyto faktory jsou z velké části ovlivňovány vlastnostmi gripperu nebo předmětu, který je uchopován. Tyto charakteristiky jsou důležité jak pro konstrukci nového gripperu, tak pro zvolení vhodného již existujícího. Tato kapitola se věnuje jak adheznímu a reverznímu úchopu, tak i silovému úchopu a tvarovému. Zároveň se tato kapitola zaměřuje na síly potřebné pro udržení předmětu a dosah gripperu během uchopovacího procesu.

2.1 Typy úchopu

Podle konstrukce gripperu může být zvoleno několik typů úchopu předmětu. Zvolený úchop předurčuje potřebnou sílu pro manipulaci s předmětem, jeho kvalitu a bezpečnost. Zvolení vhodného typu je důležité, aby nedošlo k poškození předmětu během manipulace. Přehled základních možností je na obrázku 2.1.

	gripping with one contact surface		gripping with more than one contact surface		
	adhesive grip	reverse grip	force-fit	force-fit / form-fit	form-fit
gripping type					
force lock	•		•	•	
form lock		•		•	•

Obrázek 2.1: Typy úchopu. [1]

2.1.1 Adhezní a reverzní úchop

Při použití těchto typů úchopu dochází ke kontaktu pouze na jednom povrchu součásti a to buď shora při adhezním úchopu nebo zespoda při reverzním. Oba dva způsoby zajišťují velmi šetrný způsob úchopu předmětu. [1]

Adhezní úchop funguje na principu adhezních neboli přilnavých sil gripperu a předmětu. Povrch gripperu je speciálně uzpůsoben tak, aby mezi molekulami obou součástí vznikly přitažlivé síly jako jsou například Van der Waalsovy síly. Tento konkrétní případ nezanechává na předmětu žádné stopy. Gripper se pouze na začátku lehce přimáčkne k součásti, aby došlo ke zvýšení aktivního povrchu, na kterém mohou síly působit. Na konci procesu předmět uvolní buď rotačním nebo posuvným pohybem, nakloněním nebo lehkým zmáčknutím. [14]

Reverzní úchop využívá při manipulaci s předmětem pouze gravitační sílu, kterou předmět působí na podporu gripperu pod ním. Předmět tak není plně zajištěn a například při vyšším zrychlení robotického ramene se může na podpoře posunout. Reverzního úchopu se využívá v případech, kdy nelze vyvinout na předmět další vnější sílu, protože by došlo k jeho nežádoucímu zdeformování nebo poškození. Dále se využívá pro předměty, které nemají stálý tvar. Mezi nevýhody reverzního úchopu patří možnost vypadnutí z gripperu po stranách a nízká přesnost pokládání předmětu na určené místo. [1]

2.1.2 Silový a tvarový úchop

O tvarový nebo silový úchop, případně jejich kombinaci, se jedná ve chvíli, kdy jsou v kontaktu alespoň dva povrchy.

Silový úchop působí přímo na předmět pomocí kontaktních ploch na gripperu normálovou silou. Ta v kontaktním bodě vyvolává třecí sílu. Součet třecích sil musí být větší nebo roven síle gravitační, která působí opačným směrem dolů. Třecí síla je závislá na součiniteli adheze přímou úměrou, a proto se často povrch gripperu upravuje pro dosažení vyššího adhezního součinitele. Potřebná síla sevření gripperu pro udržení součásti je potom menší. [2, 1]

Tvarový úchop oproti tomu využívá principu reverzního úchopu, kdy kontaktní povrch gripperu slouží jako podpora předmětu. Normálová síla tak působí proti tíze předmětu. Kvalita úchopu nezávisí na součiniteli tření ve směru proti podpoře. [1]

2.2 Potřebné síly pro úchop

Jak již bylo zmíněno v části 2.1, gripper musí vyvodit minimálně takovou sílu, aby překonal gravitační sílu působící na předmět, pokud na něj nepůsobí žádné další zrychlení. Pokud se předmět pohybuje, během manipulace na něj působí ještě další zrychlení, které musí překonat. Dále pak závisí na pozici těžiště předmětu vůči gripperu.

Pro zmenšení potřebných sil je vhodné těžiště umístit do středu gripperu, jinak dochází k vzniku momentu sil, který je potřeba kompenzovat. Do výpočtů bývá zahrnut také bezpečnostní koeficient, avšak je nutné brát ohled na maximální povolenou sílu, kterou lze na předmět působit, aniž by byl ho poškozen. [1, 21]

Jedná-li se o čistě silový úchop, minimální potřebná síla se vypočte jako

$$F_G = \frac{m_p g}{\mu n_p}, \quad (2.1)$$

kde F_G přítláčná síla gripperu, m_p je hmotnost předmětu, g je gravitační zrychlení, μ je součinitel adheze a n_p je počet prstů nebo kontaktních bodů, pokud jsou prsty speciálně upraveny. Výhodou silového úchopu je, že je nezávislý na orientaci gripperu a součásti během pohybu, protože je navržen pro nejnepríznivější situaci, kdy nedochází k částečnému tvarovému úchopu. [2]

V případě tvarového úchopu je výpočet sil složitější a závisí na geometrii gripperu, ale není závislý na součiniteli adheze mezi oběma materiály. Pokud je vhodně navržen, potřebná síla pro udržení součásti je mnohonásobně menší, než při silovém úchopu. Na druhou stranu tvarový úchop ve většině případů funguje pouze pro jednu orientaci gripperu a součásti. Pokud tedy dojde například k rotaci celého gripperu o určitý úhel, je pravděpodobné, že potřebná síla bude výrazně větší a může dojít k změně úchopu z tvarového na čistě silový. Obecně je však snahou využívat co nejvíce tvarový úchop a umožnit použití levnějšího gripperu. [1]

2.3 Dosah gripperu

Dosah gripperu naprosto zásadně určuje předměty, se kterými bude gripper schopný manipulovat z hlediska jejich velikosti. Délka záběru se výrazně liší podle typu gripperu, avšak převážně se pohybuje v oblasti okolo 20 mm pro specializované gripperu. Běžné gripperu pro univerzální použití mají délku záběru okolo 100 mm, avšak může dosahovat i stovek mm. Problémem gripperů s větším rozsahem může být jejich snížená přesnost například kvůli menší tuhosti gripperu. [1]

Cílem, převážně v průmyslu, je snížit co nejvíce čas, kdy se s předmětem pouze manipuluje a není na něm vykonávána žádná další operace. Proto je snahou zkrátit čas, kdy dochází k uchopení nebo položení předmětu. Určité minimální otevření gripperu je nutné zajistit pro napozicování gripperu a součásti, avšak další chod „naprázdno“ plýtvá časem a je neekonomický. [1]

3 Rozdělení gripperů

Pojem gripper zahrnuje velké množství typů, které se od sebe mohou velmi lišit a určovat tak oblast jejich použití. Pro získání základního přehledu mohou být grippery rozděleny podle tří vlastností.

První význačnou vlastností, podle které lze grippery rozdělit, je typ pohonu gripperu. Druhá vlastnost je uspořádání samotných prstů gripperu. Od počtů prstů a článků na nich se odvíjí počet stupňů volnosti a pohyb, který je gripper schopen vykonat. Do třetí kategorie spadají ostatní grippery, které nemají prsty, ale využívají jinou metodu úchopu.

3.1 Typ pohonu

Pohon gripperů je nejčastěji zajišťován pomocí pneumatických, elektrických nebo hydraulických systémů. Volba pohonu často závisí na podmínkách, ve kterých má gripper operovat, zástavbových možnostech a dostupnosti stlačeného vzduchu či jiných plynů, elektrické energie a hydraulické kapaliny. Porovnání těchto tří pohonů je na obrázku 3.1. [15]

3.1.1 Pneumaticky poháněný gripper

Pneumaticky poháněný gripper využívá pro pohon pístů, které vykonávají posuvný pohyb, stlačený vzduch případně jiné plyny, jako je například dusík a další inertní plyny. [1, 16]

Pneumatické systémy se používají pro systémy s menšími požadavky na potřebnou sílu zajišťující pohyb pístu. Nižší dosažitelná síla oproti například hydraulickým systémům je způsobena stlačitelností vzduchu. Z důvodu nižších tlaků v pneumatickém okruhu než v hydraulickém, vychází pneumatický systém levněji. Nejčastěji se využívá centralizovaný kompresor, který zásobuje stlačeným vzduchem například celou výrobní linku. [16] Pro robotická vozítka proto není často využívanou variantou ze zástavbových důvodů. Na robotickém vozítku by bylo nutné mít kompresor, zajistit jeho pohon, zásobník stlačeného vzduchu a rozvody vzduchu k samotným pístům na gripperu.

3.1.2 Elektricky poháněný gripper

Elektricky poháněné grippery používají převážně různé druhy elektromotorů. Elektromotory generují ve většině případů rotační pohyb. Pro snížení otáček a zvýšení krouticího momentu jsou často zpřevodovány a rotační pohyb je převáděn na posuvný.

V poslední době elektricky poháněné grippery dosáhly takové úrovně, že jsou schopné konkurovat pneumaticky i hydraulicky poháněným gripperům. Jsou vhodné pro aplikace s menší nebo střední zátěží. Jejich hlavní výhodou je nenáročná možnost přesné kontroly polohy, rychlosti a síly během celého procesu. Umožňují poměrně snadno měnit parametry úchopu, snímat jednoduše aktuální stav a reagovat na něj. Oproti hydraulickým nebo pneumatickým systémům nevyžadují elektrické grippery mnoho komplexních součástí, takže jsou snazší na údržbu, průběžnou kontrolu a následnou včasnou výměnu. Zároveň nehrozí riziko kontaminace okolního prostředí při poruše. Jejich nevýhodou je nižší dosažitelná síla úchopu, přestože v poslední době vzrostla, dále pak vyšší pořizovací cena. [1, 15, 18]

3.1.3 Hydraulicky poháněný gripper

V hydraulických systémech je nejčastěji využíván pro pohon pístů hydraulický olej nebo jiná kapalina. Tyto systémy pracují na principu Pascalova zákona, kdy se tlak šíří rovnoměrně kapalinou a dochází k přenosu síly na píst, který pohybuje břemenem. [17]

Systémy poháněné hydraulikou se využívají pro aplikace, kde je zapotřebí vyšší síla pro zdvih pístu oproti pneumatickým systémům. Zároveň lze dosáhnout pomocí hydraulických systémů vyšší přesnosti z důvodu zanedbatelné stlačitelnosti kapalin. Oproti jiným systémům jsou hydraulické náročnější na údržbu, protože například únik oleje ze systému může kontaminovat okolní prostředí a způsobit úplnou nefunkčnost zařízení. Výhodou hydraulicky poháněných gripperů je schopnost vyvinout velkou sílu, jak na malé, tak i větší vzdálenosti, která může být v průběhu celého pohybu udržována konstantní. Zároveň potřebné zástavbové prostory jsou pro gripper s takto velkými silami poměrně kompaktní vzhledem k ostatním možnostem pohonu, avšak využívají se spíše pro těžkou techniku než robotická vozítka, kde není tak velká síla nutná. [1, 17]

	Hydraulic	Pneumatic	Electric
Load range	High	Low	Medium
Energy density	High	Low	Medium
Workpiece weight	High	Low	Medium
Workpiece size	High	Low	Medium
Plant complexity	High	Low	Medium
Velocity range	Low	High	Medium
Controllability	Low	High	Medium

Obrázek 3.1: Porovnání pohonů gripperů. [1]

3.2 Uspořádání prstů

Robotické rameno je vybaveno specifickým koncovým efektozem pro plnění požadovaných úkolů. Tyto efektozy jsou buď úzce specializované pro konkrétní úkol nebo více univerzální pro možnost konání většího množství rozdílných úloh nebo úloh s částečně se měnícími parametry.

Univerzální efektozy jsou nejčastěji grippery s několika prsty, které jsou složeny z jednotlivých článků. Tyto grippery jsou vhodné pro úlohy vyžadující manipulaci s různými předměty. Podle stupně jejich komplexnosti umožňují přizpůsobení se tvaru uchopovaného předmětu. Grippery jsou proto často využívány pro mobilní vozítka, protože je po nich vyžadováno vykonávání většího množství úloh. Grippery je možné rozdělit na víceprsté grippery s ohledem na počet prstů a článků, z nichž se skládají, a ostatní grippery, jejichž konstrukce není podobná lidským prstům.

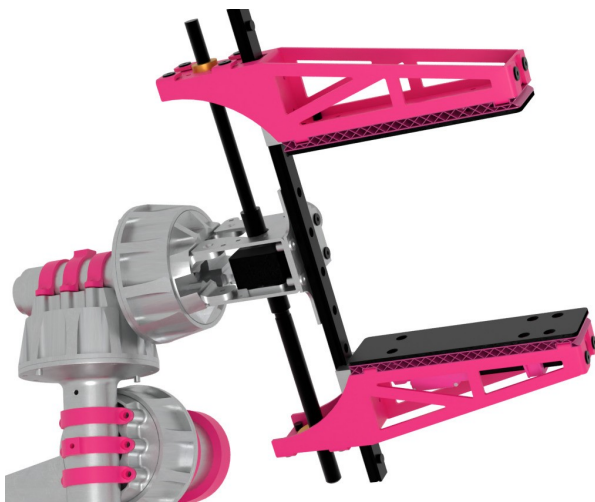
3.2.1 Dvouprstý gripper

Jedná se o nejjednodušší typ gripperu. Nejčastěji dochází k pohonu jednoho prstu, jehož pohyb je spjatý pomocí různých mechanismů s druhým prstem nebo je jeden prst stacionární vůči uchycení na robotickém rameni, jež symbolizuje rám. Každý prst má jeden až dva články. Větší množství článků nepřináší další výrazné výhody a je efektivnější zvýšit samotný počet prstů.

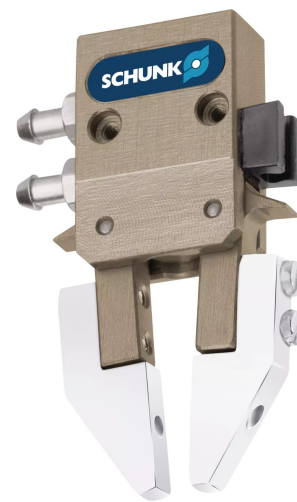
Dvouprstý gripper s jedním článkem

Gripper s pouze jedním pohyblivým prstem funguje podobně jako lidský palec a dlaň. Jeho výhodou je jednoduchost, díky které je lehký a kompaktní. Je vhodný pro velké množství nenáročných aplikací. [1] Zajišťuje pevný úchop, ale není vhodný pro uchopování nepravidelných nebo křehkých předmětů vzhledem k malé kontaktní ploše prstu gripperu a předmětu, která způsobuje vyšší potřebné síly pro udržení manipulovaného objektu. [19] Tento typ gripperu má jeden stupeň volnosti a koncový bod pohyblivého prstu opisuje kružnici o poloměru délky prstu.

Nejpoužívanější typ gripperu je dvouprstý s oběma pohyblivými prsty, které jsou spolu spřaženy. Dochází tak k vycentrování uchopovaného předmětu v jedné ose gripperu. Pohyb prstů proti sobě může být buď nůžkovitý, kdy se jedná o úhlové gripper, viz obrázek 3.3 nebo mohou styčné plochy zůstat vzájemně rovnoběžné, takže se jedná o paralelní gripper. Velkou výhodou paralelního gripperu je, že koncové body jednotlivých prstů se pohybují po jedné přímce, díky čemuž je snadnější přesné uchopování objektů. Oproti tomu úhlové gripperu opisují lehce zakřivenou trajektorii v průběhu jejich zavírání, takže nedosahují takové přesnosti úchopu jako paralelní. Mohou ovšem mít výrazně větší šířku záběru a jsou vhodné pro uchopování předmětů přibližně stejných rozměrů. [20, 21] Díky svým výše zmíněným vlastnostem je paralelní gripper často využíván pro robotická vozítka studentských univerzitních robotických týmů jako je například Monash Nova Rover tým a jejich roverů Wombat z roku 2021, Platypus z roku 2022 a Waratah z roku 2023, který je na obrázku 3.2. [22]



Obrázek 3.2: Paralelní gripper roveru Waratah týmu Monash Nova Rover. [22]



Obrázek 3.3: Úhlový gripper Schunk SWG. [23]

Dvouprstý gripper s dvěma články

Zvýšení počtu článků každého prstu na dva s sebou přináší nárůst složitosti vzhledem k tomu, že každý prst gripperu má dva stupně volnosti.

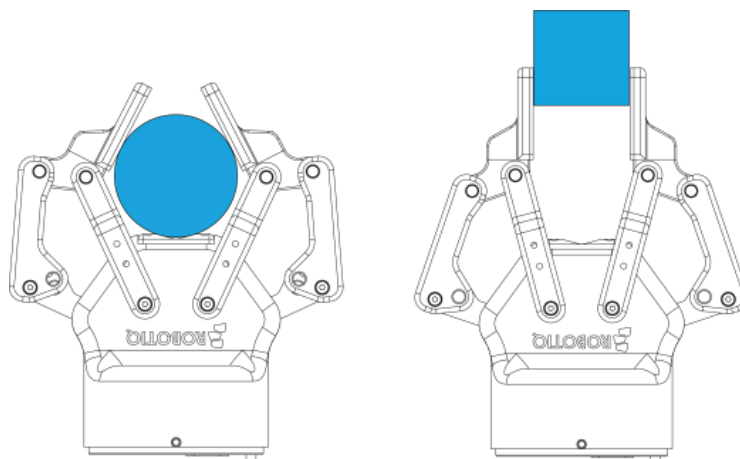
Pohyb prstů je většinou vzájemně spjatý, z čehož vyplývá, že celý gripper má dohromady dva stupně volnosti. Zástavbový prostor a hmotnost je vyšší z důvodu dvou potřebných pohonů. Zároveň výrazně narůstá cena těchto gripperů oproti paralelním gripperům s jedním článkem. [24, 25] Pro robotická vozítka není tak často využíván. Příkladem může být gripper vozítka Sandstorm týmu Monash Nova Rover z roku 2018 na obrázku 3.4. [22]



Obrázek 3.4: Dvouprstý gripper s dvěma články roveru Sandstorm. [26]

Avšak díky více stupňům volnosti umožňují tyto grippery komplikovanější pohyb prstů. Mohou díky tomu lépe uchopovat složitější předměty a kombinovat paralelní silový úchop pomocí koncových článků prstů, kdy prst gripperu funguje jako paralelogram a tvarový úchop, kdy se lépe přizpůsobí tvaru předmětu a není proto potřebná tak velká síla pro udržení předmětu.

Speciálním případem jsou podaktuované systémy jako je například gripper Robotiq 2F-85. Tento gripper využívá pouze jeden pohon, a jakmile se dotkne první částí uchopovaného předmětu, zůstane buď v konfiguraci silového paralelního úchopu, nebo přejde do tvarového úchopu podle pozice předmětu v gripperu. Tyto varianty jsou znázorněny na obrázku 3.5. [27]



Obrázek 3.5: Tvarový a silový úchop adaptivního gripperu Robotiq 2F-85. [28]

3.2.2 Tříprstý gripper

Tříprsté grippery přinášejí oproti dvouprstým několik dalších výhod. Hlavní výhodou je možnost vycentrování rotačně symetrických předmětů, pokud se všechny prsty pohybují synchronizovaně. Zároveň schopnost snadno manipulovat s válcovými předměty může být hlavním důvodem pro zvolení tříprstého gripperu. [1] Toto uspořádání prstů ovšem velmi limituje uchopení předmětů v přibližném tvaru kvádrů neboť pouze jedna dosedací plocha gripperu může být shodně orientována se stěnou předmětu a zbylé dva prsty na protilehlou stranu nedosedají přímo, takže není dosaženo příliš kvalitního úchopu. Možností, jak tento problém vyřešit, je natočit dva prsty do takové polohy, aby dosedací plochy prstů byly rovnoběžné. Toto uspořádání je velmi podobné dvouprstému gripperu a je vhodný například pro uchopování dlouhých předmětů jako jsou trubkové profily. [1]

Tříprsté grippery se používají v několika variantách od prstů s jedním článkem až po prsty skládajícími se ze tří článků s možností změny orientace prstů.

Tříprstý gripper s jedním článkem

Tento typ gripperů je nejlépe uzpůsoben uchopování pravidelných válcovitých předmětů, kdy zajišťuje velmi pevný úchop. Díky jeho vlastnosti centrování předmětů se často využívá pro spojování součástí dohromady. Příkladem může být gripper Schunk PZN-plus na obrázku 3.6. [1]



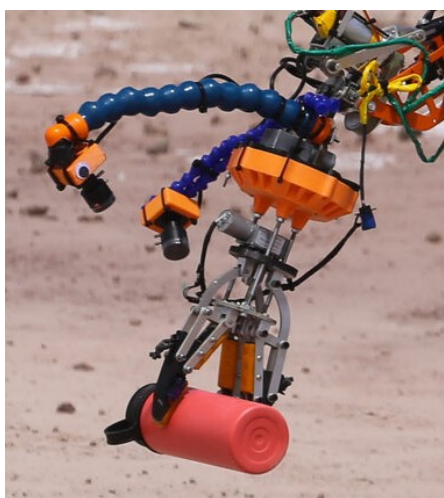
Obrázek 3.6: Tříprstý gripper s jedním článkem Schunk PZN-plus. [29]

Tříprstý gripper s dvěma a třemi články

Přidání počtu článků u tříprstých gripperů má podobný vliv jako u dvouprstých s dvěma články.

Takový gripper se stává ještě více univerzálnějším a je schopný manipulovat s tvarově složitými předměty nebo použít nevhodnější variantu úchopu, aby nedošlo k poškození předmětu. S ohledem na co nejnižší váhu se hlavně u prstů s třemi články používají poddaktuované systémy. [30]

Pro robotická vozítka se tyto grippery téměř nepoužívají, protože pro úkoly, které musí robotické vozítko vykonat, nejsou potřeba. Jedním z mála příkladů může být poddaktuovaný tříprstý gripper s dvěma články robotického vozítka Huntsman týmu Monash Nova Rover z roku 2019 na obrázku 3.7 [22] nebo robot týmu IHMC Robotics, který se zúčastnil soutěže DARPA Robotics Challenge s gripperem 3-Finger Adaptive Gripper firmy Robotiq na obrázku 3.8. [31]



Obrázek 3.7: Tříprstý gripper roveru Huntsman týmu Monash Nova Rover. [32]



Obrázek 3.8: Tříprstý adaptivní gripper Robotiq. [33]

3.2.3 Čtyřprstý gripper

Čtyřprsté grippery patří k obecně méně používaným gripperům a jsou určeny spíše pro specializovanější aplikace. Jsou schopné vystředit čtvercové předměty, pokud je pohyb prstů propojen. Tento systém ovšem vyžaduje podstatně dražší převody. [1, 21]

Jejich výhodou může být, pokud prsty mohou měnit svoji orientaci. Potom se jedná prakticky o dva dvouprsté grippery vedle sebe zajišťující lepší úchop.

3.2.4 Pětprstý gripper

Pětprsté grippery většinou imitují lidskou ruku. Jejich složitost, a tím pádem vysoká cena, je nečiní vhodnými pro běžné aplikace. K jejich využití dochází v oblastech, které byly navrženy pro interakci s člověkem, takže je vhodný stejný způsob úchopu. [21] Jejich předností je velká přizpůsobivost uchopovanému předmětu a možnost výběru z mnoha typů úchopu. Jedním z problémů, bránícím v širším využití, je jejich velikost.

Grippers, imitující lidskou, ruku mohou mít přibližně dvacet stupňů volnosti s pohony umístěnými převážně v zápěstí. Spolu s mnoha senzory potřebnými pro konkrétní aplikaci dosahují velikostí jako je reálná lidská ruka velmi obtížně. [1] Tyto grippers se využívají na humanoidních robotech, [21] ale pro mobilní vozítka nejsou vhodná vzhledem k jejich hmotnosti, velikosti a úkolům, které nevyžadují takto univerzální gripper.

3.3 Ostatní grippers

Do této kategorie je možné zahrnout i grippers, které nespádají do žádné předchozí kategorie. Jedná se tak především o grippers, které nejsou tvořeny jednotlivými prsty rozdělenými na články, ale využívají zcela jiné konstrukce, která je vhodnější pro jejich aplikaci.

Do této skupiny gripperů lze zahrnout například podtlakové a magnetické grippers, grippers pro sběr vzorků hornin a grippers nebo lépe řečeno koncové efekty určené pro použití dalšího nářadí jako jsou svařovací hlavice nebo pistole pro nános povrchových vrstev. [21] Tyto efekty se ovšem vyskytují převážně na robotických ramenech operujících na místě a neřadí se ke gripperům. [5]

3.3.1 Podtlakové grippers

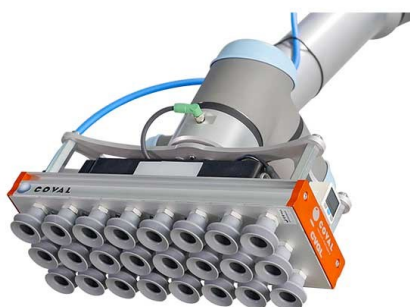
Podtlakové grippers fungují na principu vytvoření vakua nebo nižšího tlaku než je atmosférický mezi přísavkou a uchopovaným předmětem. Atmosférický tlak působící zvnějšku přitlačí předmět ke gripperu. Pro správnou funkcionality podtlakových gripperů je nutné zajistit určitou kvalitu povrchu, aby přísavky mohly vytvořit vzduchotěsný spoj na jejich okraji. S nižší kvalitou povrchu klesá síla, kterou jsou schopné grippers vyvinout. [1, 21]

Ve většině případů se kombinuje několik přísavek dohromady pro vytvoření sítě, která předmět drží ve více bodech jako je tomu například na gripperu značky Coval na obrázku 3.9. K vytvoření podtlaku se využívají převážně dva způsoby. Prvním způsobem je přímé odsávání vzduchu z přísavky pomocí vývěvy. Dochází k vytvoření silného podtlaku, takže gripper uzvedne větší zátěž. Druhým způsobem je využití Venturiho efektu, který využívá principu, že v zúžení trysky vzrůstá rychlost proudícího vzduchu a klesá tlak. Přísavka gripperu je připojena na zúžení a dochází tak k poklesu tlaku i pod ní. Výhodou tohoto systému je, že může být připojen na centrální systém stlačeného vzduchu v budově, který mohou využívat jak pneumatické stroje, tak podtlakové grippers pro manipulaci. [21]

Hlavními výhodami těchto systémů je negenerování vibrací a tepla. Samotné grippers neobsahují pohybující se části, takže je nižší riziko poškození předmětu při manipulaci.

Podtlakové systémy patří k snadno opravitelným, rychle reagujícím, snadno ovladatelným a levným řešením. [21]

Tyto grippery se používají nejčastěji v obalovém průmyslu například pro transport krabic, potravinářském průmyslu a při manipulaci s velkými deskami jako jsou skleněné tabule, plechy nebo dřevo.[21] Pro robotická vozítka nenacházejí velké využití kvůli zastavbovým důvodům a nevhodnosti pro uchopování předmětů, které nemají hladký rovný povrch.



Obrázek 3.9: Podtlakový gripper Coval CVGL335XA50C1. [34]

3.3.2 Magnetické grippery

Magnetické grippery fungují na principu elektromagnetu, který pomocí elektromagnetického pole přitahuje feromagnetické materiály. Magnetické pole je generováno pomocí cívky s feromagnetickým jádrem, kterou prochází proud nebo pomocí permanentních magnetů. K vypnutí úchopu dochází buď přerušením proudu do cívky, odtažením magnetu od součásti například pomocí pneumatického systému nebo vytvořením opačného magnetického pole cívkou, která oslabí sílu permanentního magnetu. [1, 21]

Využití nachází například v ocelářském průmyslu, sběrech kovového odpadu, zpracování plechů nebo při manipulaci se součástmi s komplexní geometrií, které by obtížně uchopovala pomocí jiných typů gripperů. [1, 21] Na robotických vozítkách opět nenacházejí větší využití, protože většina materiálů není feromagnetická.

3.3.3 Grippery pro sběr vzorků hornin

Důležitým úkolem robotických vozítek je sběr hornin. Jedná se o materiál různých vlastností, podle kterých se volí nástroj, kterým bude vozítko vybaveno. Jedná se o sběr jednotlivých kamenů do určité hmotnosti, odebrání vzorku nesoudržného materiálu jako je písek nebo hlína a vyvrtání vzorku buď přímo ze skály nebo ze země.[35]

Pro sběr jednotlivých kusů hornin je možné použít vhodně zvolený gripper s klasickými prsty. Pro sběr sypkého materiálu je možnost použít nástroj pro nabírání hlíny podobný bagrovací lžíci. Tento nástroj na obrázku 3.10 využívá na svém robotickém vozítku K3P4 studentský robotický tým RoverOva. [36] Druhou možností je využití vrtáku fungujícímu jako Archimédův šroub, který horninu dopraví nahoru do sběrné nádoby. Tento způsob využívá například testovací rover programu ARADS na obrázku 3.11, který se věnuje získání důkazů života na Marsu. [37]



Obrázek 3.10: Bagrovací lžíce roveru K3P4 týmu RoverOva. [38]



Obrázek 3.11: Vrták pro získání vzorku sypké půdy roveru ARADS. [39]

Třetí možností pro získání vzorku z pevné horniny je použití dutého vrtáku, v kterém se nahromadí odvrtná hornina. Těmito vrtáky je vybaveno robotické vozítko Perseverance agentury NASA na Marsu. [40]

4 Metody pro analýzu gripperů

V této kapitole budou obecně popsány metody použité v praktické části pro analýzu tří konkrétních prstů gripperů v rovině. Pro analýzu dosažitelného prostoru gripperu byla použita vektorová metoda. V tomto prostoru byla vybrána trajektorie a pomocí inverzní kinematiky byly získány polohy gripperu v průběhu celého pohybu, ve kterých pomocí metody uvolňování byly vypočteny potřebné pohony pro vykonání pohybu a reakce ve vazbách. Na závěr byla provedena optimalizace rozměrů pro vybrané vlastnosti pomocí minimalizačního algoritmu.

4.1 Vektorová metoda

Pro kinematické řešení mechanismů a soustav těles je možné použít vektorovou metodu, což je kinematické řešení numerickou iterační metodou. Slouží k nalezení vztahů mezi průběhy souřadnic, které určují polohu soustavy v závislosti na čase a následně časové derivace těchto vztahů. V této práci bude vektorová metoda použita pro tzv. přímou kinematickou úlohu, kdy ze známé polohy vstupních hnacích členů budou dopočítávány polohy výstupních hnaných členů. [41]

Vektorová metoda funguje na principu iteračního řešení, kdy jsou vypočítány hodnoty výstupních neboli závislých souřadnic na základě iterací z hodnot závislých souřadnic platných pro předchozí polohu při daných souřadnicích vstupních, neboli nezávislých. Pro prohlášení vypočtené polohy za platnou je nutné se zvolenou přesností splnit vazbové rovnice. Pokud k tomu dojde, zvolí se další hodnoty nezávislých souřadnic a iterační proces se opakuje pro všechny zvolené hodnoty nezávislých souřadnic. [41]

Pro sestavení vazbových rovnic je nutné v tělese zavést uzavřené vektorové mnohoúhelníky, které mají vrcholy ve význačných bodech soustavy jako jsou středy rotačních vazeb a další.

Počet mnohoúhelníků zjistíme ze vzorce

$$l = d + m - u + 1, \quad (4.1)$$

kde l je počet smyček neboli mnohoúhelníků, d je počet kinematických dvojic, m je počet předepsaných pohybů a u je počet těles. Protože jsou vektorové mnohoúhelníky uzavřené, je možné tento fakt vyjádřit nulovostí součtu jednotlivých vektorů mnohoúhelníku. Pro rovinný případ lze tuto podmínku rozepsat do směru x a y a získat tak dvě skalární vazbové rovnice pro každou smyčku. Počet těchto rovnic musí odpovídat počtu závislých souřadnic. [41]

Dalším krokem je určení počtu stupňů volnosti soustavy. Ten je možné v rovině zjistit podle vzorce

$$n = 3(u - 1) - 3vp - 2(r + p + v) - 1o, \quad (4.2)$$

kde n je počet stupňů volnosti soustavy, u je počet těles včetně rámu, vp je počet pevných vazeb, r je počet rotačních vazeb, p je počet posuvných vazeb, v je počet valivých vazeb a o je počet obecných vazeb. Pro plně definovanou soustavu musí počet stupňů volnosti odpovídat počtu nezávislých souřadnic. [41]

Pro snazší a přehlednější výpočet se při zavádění vektorů mnohoúhelníku využívá konvence. Vektorový mnohoúhelník je složen z vektorů \vec{b}_i , které svírají v rovině $x - y$ úhel β_i s kladným směrem osy x . Při pohledu na rovinu $x - y$ z poloroviny, kde jsou souřadnice z kladné, bude v pravotočivém systému velikost úhlu β_i odměřována vždy proti směru hodinových ručiček. Index i označuje příslušný vektor, ale není shodný s číslováním těles, která jsou zastoupena vektorem \vec{b}_i . Ve vazbových rovnicích nemusí jít tento index popořadě. [41]

Podmínku uzavřené vektorových mnohoúhelníků lze potom zapsat ve tvaru

$$\sum_i \vec{b}_i = \vec{0} \quad (4.3)$$

a po rozepsání do složek ji lze zapsat jako

$$x : \sum_i b_i \cos \beta_i = 0 \quad (4.4)$$

$$y : \sum_i b_i \sin \beta_i = 0. \quad (4.5)$$

Pokud tyto rovnice zderivujeme podle času, získáme rovnice pro rychlosti ve tvaru

$$\dot{x} : \sum_i \left(\dot{b}_i \cos \beta_i - b_i \sin(\beta_i) \dot{\beta}_i \right) = 0 \quad (4.6)$$

$$\dot{y} : \sum_i \left(\dot{b}_i \sin \beta_i + b_i \cos(\beta_i) \dot{\beta}_i \right) = 0. \quad (4.7)$$

Další derivací bychom získali rovnice pro zrychlení. Některé členy těchto rovnic mohou být vlivem geometrie soustavy v čase konstantní, z čehož plyne, že jejich časová derivace je nulová, a proto je lze v rovnicích pro rychlost nebo zrychlení vynechat. [41]

Soustavu těchto rovnic lze zapsat pro větší přehlednost a kompaktnost v maticovém tvaru

$$\vec{f}(\vec{z}, \vec{q}) = \begin{bmatrix} f_1(\vec{z}, \vec{q}) \\ f_2(\vec{z}, \vec{q}) \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} = \vec{0} \quad (4.8)$$

$$\vec{J}_z \vec{z} + \vec{J}_q \vec{q} = \vec{0}, \quad (4.9)$$

kde výraz $\vec{f}(\vec{z}, \vec{q})$ vyjadřuje vynulované vazbové rovnice, matice \vec{q}, \vec{q} jsou sloupcové matice nezávislých souřadnic a rychlostí a matice \vec{z}, \vec{z} jsou sloupcové matice závislých souřadnic a rychlostí. Matice koeficientů \vec{J}_q a \vec{J}_z jsou části Jacobiho matice a mají tvar

$$\vec{J}_z = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial z_1} & \frac{\partial f_1}{\partial z_2} & \dots \\ \frac{\partial f_2}{\partial z_1} & \frac{\partial f_2}{\partial z_2} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\vec{J}_q = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \dots \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Řešení rychlosti je pak nalezeno ve tvaru

$$\vec{J}_z^{-1} - \vec{J}_q \vec{q} = \vec{z}. \quad (4.12)$$

[41]

4.1.1 Poloha význačného bodu soustavy

Další úlohou často spojenou s výpočtem závislých souřadnic je výpočet polohy a případně rychlosti a zrychlení význačných bodů soustavy v absolutním souřadnicovém systému celé soustavy. Polohu význačného bodu například M můžeme vyjádřit pomocí vektoru \vec{r}_M , který je umístěn v počátku souřadnicového systému. Tento vektor lze rozložit na průběžné vektory \vec{b}_j z vektorových mnohoúhelníků mezi počátkem a koncovým tělesem a konstantní vektory x_{kM} a y_{kM} , které popisují polohu bodu M v lokálním souřadnicovém systému koncového tělesa, jehož osa x_k svírá s absolutní osou x úhel β_k .

Vektor \vec{r}_M je tedy vyjádřen jako

$$\vec{r}_M = \sum_j \vec{b}_j + x_{k_M} \vec{x}_{k_M} + y_{k_M} \vec{y}_{k_M}. \quad (4.13)$$

Tuto rovnici lze opět rozepsat do složek

$$x : x_M = \sum_j b_j \cos \beta_j + x_{k_M} \cos \beta_k - y_{k_M} \sin \beta_k \quad (4.14)$$

$$y : y_M = \sum_j b_j \sin \beta_j + x_{k_M} \sin \beta_k + y_{k_M} \cos \beta_k. \quad (4.15)$$

[41]

4.1.2 Dosažitelný prostor

Dosažitelným prostorem gripperu je myšlen prostor, který je schopen obsáhnout koncový bod prstu gripperu, který byl zvolen jako význačný bod v kapitole 4.1.1. Tento prostor obsahuje body, ve kterých došlo k vypočtení polohy se zvolenou přesností iteračního řešení. Pokud nebylo této přesnosti dosaženo, bod byl označen jako nedosažitelný. Pro výpočet byl použit software Matlab. [42]

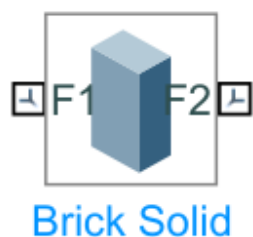
Pro získání dosažitelného prostoru vybraných gripperů byly jako nezávislé souřadnice zvoleny souřadnice hnacích členů. Byly stanoveny jejich rozsahy a tento interval byl rozdělen na stejný počet prvků. Pokud měl prst gripperu pouze jeden stupeň volnosti, a tím pádem pouze jednu nezávislou souřadnici jako pohon, byly spočítány polohy z intervalu daného pohonu. Pokud měl prst gripperu dva stupně volnosti, byly vytvořeny dva intervaly odpovídající hnacím členům. Následně pak byla zafixována poloha jedné nezávislé souřadnice a výpočet proběhl pro celý druhý interval. Potom byla první nezávislá souřadnice zafixována v druhé poloze a znovu proběhl výpočet. Tento proces byl opakován, dokud první nezávislá souřadnice nedošla na konec svého intervalu.

4.2 Inverzní kinematika

V inverzní kinematické úloze jsou hledány polohy hnacích členů soustavy na základě požadovaného pohybu zvoleného členu. Jedná se tedy o úlohu opačnou přímé kinematické úloze. [41]

Inverzní kinematická úloha v této práci byla vyřešena za pomoci softwaru Matlab Simscape Multibody. [43] V tomto softwaru byl vytvořen model prstu gripperu kopírující kinematické schéma.

Jednotlivá tělesa byla simulována pomocí bloků *Brick Solid* na obrázku 4.1 a spojena pomocí vazbových bloků jako je například rotační vazba *Revolute Joint* na obrázku 4.2.



Obrázek 4.1: Brick Solid. [43]



Obrázek 4.2: Revolute Joint. [43]

Na tělesech byly stanoveny souřadnicové systémy (na obrázku 4.1 pojmenované jako $F1$ a $F2$) a vazbové bloky potom propojovaly tyto souřadnicové systémy mezi sebou. Ve vazbovém bloku vždy došlo k transformaci souřadnic mezi prvním připojeným souřadnicovým systémem, značeným jako *Base Frame*, a druhým, který byl značen jako *Follower Frame*.

Celý systém byl připojen ke globálnímu souřadnicovému systému, na nějž byl připojen i tzv. *Bushing Joint*, který je znázorněn na obrázku 4.3. Jedná se o kloub se šesti stupni volnosti. Jeho *Base Frame* byl připojen do počátku globálního souřadnicového systému a jeho *Follower Frame* byl připojen na lokální souřadnicový systém tělesa představujícího poslední článek prstu gripperu. Tento souřadnicový systém ležel na samotném konci prstu gripperu a jednalo se tedy o stejný bod jako v části 4.1.1.



Obrázek 4.3: Bushing Joint. [43]

Tomuto bloku lze předepsat stejný počet pohybů jako má soustava stupňů volnosti. Pro rovinný případ v rovině $x - y$ je možnost předepsat pohyb v ose x a y nebo rotaci okolo osy z . Tím je pak plně definována inverzní kinematická úloha a ve zbylých vazbách je možné snímat a ukládat hodnoty polohy, ale i dalších veličin jako je rychlost nebo zrychlení, závislých souřadnic.

4.3 Metoda uvolňování

Metody uvolňování je využívána pro řešení statických úloh.

Umožňuje přejít od mechanického modelu k silové soustavě a vyšetření silových účinků na bod, těleso i celou soustavu těles. Principem je nahradit všechny vazby na tělese ekvivalentními silovými účinky a tím přejít z tělesa vázaného na těleso volné. [44]

Soustavu sil lze potom zjednodušit nahrazením ekvivalentními silovými účinky a následně použít princip setrvačnosti, který říká, že obecná soustava sil je v rovnováze, je-li výslednice sil a momentů sil nulová. [44]

Postup uvolňování je tedy následující:

1. Vybere se řešené těleso.
2. Znázorní se izolovaně od zbytku soustavy jako volné těleso.
3. Jako vektory jsou zakresleny všechny akční síly a momenty sil v místě jejich působení.
4. Všechny vazby nacházející se na tělese jsou nahrazeny ekvivalentními silovými účinky.
5. Dále jsou sestaveny v rovině pro každé těleso silové rovnice do směru osy x a y a momentová rovnice vůči vybranému bodu.
6. Postup 1. až 5. je opakován pro každé těleso soustavy.
7. Nakonec je vyřešena soustava vzniklých rovnic a tím jsou získány neznámé silové účinky potřebné pro rovnováhu soustavy.

[44]

Průběh silových účinků je v této práci vypočítán pomocí skriptu v softwaru Matlab, pokud by nebyl k dispozici model gripperu v softwaru Matlab Simscape, ale pouze vypočtené polohy. Pokud model k dispozici je, potom lze průběh silových účinků snímat přímo v něm, což je využito během optimalizace.

4.4 Optimalizace

Pro zlepšení návrhu prstů gripperů byla provedena optimalizace rozměrů jednotlivých těles z hlediska jejich délky. Byla provedena s cílem převážně snížit potřebné silové účinky pro pohon prstu gripperu během vykonávání pohybu otevření se a zavření se.

Optimalizace byla provedena pomocí minimalizace tzv. *cost function*, neboli nákladové funkce. Pro tvorbu nákladové funkce bylo vybráno několik veličin, jejichž průběh bylo cílem minimalizovat. V různých případech gripperů bylo cílem minimalizovat momenty nebo síly potřebné pro pohon, natočení posledního článku prstu a zploštit trajektorii koncového bodu, aby se co nejvíce blížila přímce z důvodu následného přesnějšího ovládní gripperu, kterým disponují gripper s jedním článkem.

Minimalizace nákladové funkce byla prováděna pomocí softwaru Matlab [42] pomocí funkce *fminsearch* nebo *ga*.

Funkce *fminsearch* má určené proměnné, které může měnit pro dosažení optima. Tyto proměnné jsou délkové rozměry bloků v modelu prstu gripperu v prostředí Matlab Simscape Multibody. Podle zadaných počátečních podmínek, které byly zvoleny jako původní rozměry prstu gripperu před minimalizací, se určí hodnoty proměnných a jako parametry je nastaví v modelu pro inverzní kinematiku. Následně dojde ke spuštění simulace a nasnímání hodnot veličin, které byly minimalizovány. Tyto hodnoty jsou použity pro vyhodnocení hodnoty nákladové funkce pro tuto volbu parametrů.

Pro optimalizaci trajektorie z hlediska co největší přímkovitosti byl vypočítán v každém bodě, kde byly veličiny snímány, kvadrát rozdílu souřadnice y koncového bodu a zvolené konstantní hodnoty souřadnice y , které se měla trajektorie co nejvíce přiblížit. Odchyly během celého pohybu byly sčítány.

Síly nebo momenty potřebné pro pohon byly optimalizovány na co nejnižší hodnotu. V každém bodě simulace tedy byly nasnímány jejich hodnoty a jejich kvadráty byly následně sečteny.

V jednom případě bylo optimalizováno natočení koncového článku prstu. Cílem bylo udržet jeho stálou vertikální polohu. S ohledem na souřadnicový systém na tělese bylo ideální natočení 0° . Pro nákladovou funkci byly znovu sečteny kvadráty odchylek od nulové hodnoty.

Pokud došlo na začátku k volbě takových parametrů, že nebylo možné splnit všechny vazby v modelu a projet předepsanou trajektorii, hodnota nákladové funkce byla nastavena na tzv. penalizační hodnotu. Tato hodnota byla nastavena dostatečně vysoko, aby jakákoli hodnota nákladové funkce při úspěšném projetí trajektorie byla nižší, než hodnota penalizační, a tudíž nebyla prohlášena za minimum funkce.

Vlastností funkce *fminsearch*, kterou je potřeba brát v potaz, je, že hledá pouze lokální minimum funkce a nikoli globální. Je proto možné, že po skončení optimalizace existuje lepší řešení, které ovšem nebylo nalezeno. Vhodnou náhradou této funkce je použití genetických algoritmů a funkce *ga*, pomocí které lze najít globální minimum. Jejich další výhodou je nastavení intervalů, ve kterých musí ležet řešení. Z tohoto hlediska je možná alternativa funkce *fmincon*. Při použití funkce *ga* je tedy větší pravděpodobnost, že model bude po skončení minimalizace reálně zkonstruovatelný. Nevýhodou oproti *fminsearch* je, že tato funkce je časově náročnější a nezadávají se jí počáteční podmínky, takže řešení při malém počtu pokusů nemusí být nalezeno.

5 Analýza vybraných gripperů

V této části byly vybrány tři geometrie konstrukce prstu gripperu s různou složitostí, které by mohly být vhodné pro robotické vozítko. Všechny tři varianty byly zvoleny jako dvouprsté, protože tento typ gripperu patří mezi nejpoužívanější v oblasti robotických vozítek. První konstrukce gripperu byla inspirována konstrukcí gripperu Hiwonder na obrázku 5.1. Jedná se z této trojice o nejjednodušší gripper. Druhá konstrukce byla inspirována gripperem Robotiq 2F-85 na obrázku 5.2. Tento gripper již umožňuje více možností z hlediska úchopu. Jako třetí byla vybrána konstrukce inspirovaná gripperem firmy DH Robotics modelem AG-95 na obrázku 5.3. Tento gripper patří k nejsložitějším z vybrané trojice. Oproti ostatním se odlišuje typem pohonu, kdy kromě elektrického pohonu využívá ještě pneumatického. Zároveň výsledný pohyb obou pohonů je posuvný.



Obrázek 5.1: Robotický gripper Hiwonder. [45]



Obrázek 5.2: Robotiq 2F-85. [46]



Obrázek 5.3: Gripper DH AG-95. [47]

5.1 Předpoklady pro analýzu

V této části budou shrnuty předpoklady a další vlastnosti společné pro všechny tři vybrané gripperu.

- U vybraných gripperů byl simulován pouze jeden prst z důvodu symetrie gripperu.
- Jedná se vždy o rovinný případ v rovině $x - y$.
- Během simulovaného pohybu působí na koncový bod prstu gripperu osamělá síla o velikosti $F = 30 \text{ N}$, která představuje potřebnou sílu pro udržení uchopovaného tělesa. Tato síla byla zvolena, aby proporcionálně odpovídala velikostem gripperů a jejich možnostem zatížení.
- Veškerá tělesa jsou dokonale tuhá a vazby ideální.
- Gravitační zrychlení je zanedbáno, protože jeho působení je závislé na orientaci gripperu během uchopování a hmotnosti jednotlivých těles nejsou tak velké, aby zásadním způsobem ovlivňovaly nároky na pohon.
- Rychlosti zavírání a otevírání gripperu a hmotnosti jednotlivých komponent jsou poměrně nízké, a proto jsou zanedbávány dynamické účinky jako jsou setrvačné účinky těles.

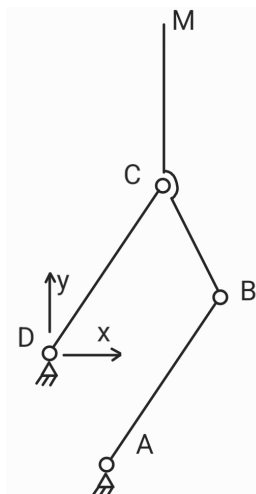
5.2 Gripper konstrukce Hiwonder

Tento gripper lze klasifikovat jako dvouprstý gripper se dvěma články, avšak pouze poslední článek je uzpůsoben k uchopování předmětů a první je pouze konstrukční. Jedná se o gripper s jedním stupněm volnosti. Při vhodně zvolených rozměrech zachovává nulové natočení posledního článku vůči horizontální poloze.

5.2.1 Vektorová metoda gripperu Hiwonder

Reálný model gripperu byl nahrazen kinematickým schématem na obrázku 5.4 s počátkem souřadnicového systému v bodě D a koncovým bodem prstu M . Počet stupňů volnosti prstu se vypočte jako

$$n = 3(u - 1) - 3vp - 2(r + p + v) - 1o = 3(4 - 1) - 3 \cdot 0 - 2(4 + 0 + 0) - 1 \cdot 0 = 1^\circ. \quad (5.1)$$

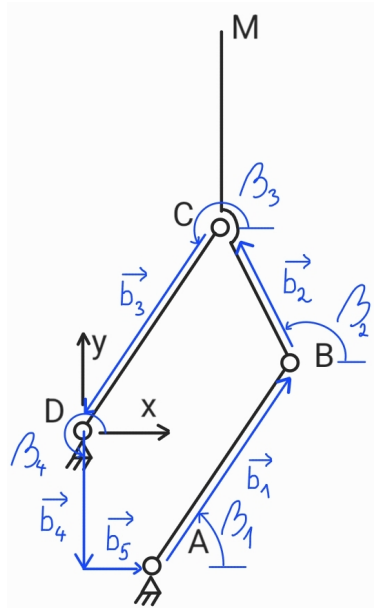


Obrázek 5.4: Schéma prstu gripperu Hiwonder.

Dalším krokem je určení počtu potřebných vektorových mnohoúhelníků, neboli smyček. Ten se určí podle vzorce

$$l = d + m - u + 1 = 4 + 0 - 4 + 1 = 1 \text{ smyčka} \quad (5.2)$$

Byla tedy zavedena jedna smyčka, která je zobrazena na obrázku 5.5. Tato smyčka začíná v bodě A a prochází postupně přes všechna tělesa. V bodě D se smyčka dostává zpět na rám a je uzavřena pomocí dvou vektorů. První vektor je vektor \vec{b}_4 a je rovnoběžný s osou y . Druhý vektor \vec{b}_5 je rovnoběžný s osou x . V počátcích každého vektoru jsou zavedeny úhly β_i podle konvence v kapitole 4.1. Úhel β_5 je nulový, a proto není ve schématu vyznačen.



Obrázek 5.5: Vektorová smyčka prstu gripperu Hiwonder.

Protože má soustava jeden stupeň volnosti, je potřeba určit jednu nezávislou souřadnici. Jelikož se jedná o přímou kinematickou úlohu, jako nezávislá souřadnice byl zvolen hnací člen, který odpovídá úhlu β_1 . Počet závislých souřadnic, které je možné dopočítat, odpovídá dvojnásobnému počtu smyček, protože pro každou smyčku je možné sestavit dvě rovnice. V tomto případě tedy budou dvě závislé souřadnice β_2 a β_3 .

V tabulce 5.1 jsou vyjádřeny všechny členy smyčky. Členy, za které je číselně dosaženo, jsou v čase konstantní a určují původní rozměry gripperu.

i	b_i [m]	β_i [rad]
1	0,006	q_1
2	0,003	z_1
3	0,006	z_2
4	0,01928	$\frac{3\pi}{2}$
5	0,02298	0

Tabulka 5.1: Členy smyčky prstu gripperu Hiwonder

Podle postupu v kapitole 4.1 byla sestavena vektorová rovnice s podmínkou nulového součtu vektorů ve tvaru

$$\vec{b}_1 + \vec{b}_2 + \vec{b}_3 + \vec{b}_4 + \vec{b}_5 = \vec{0}. \quad (5.3)$$

Po rozepsání do složkového tvaru do směrů x a y vzniknou tyto rovnice

$$x : b_1 \cos \beta_1 + b_2 \cos \beta_2 + b_3 \cos \beta_3 + b_4 \cos \beta_4 + b_5 \cos \beta_5 = 0 \quad (5.4)$$

$$y: b_1 \sin \beta_1 + b_2 \sin \beta_2 + b_3 \sin \beta_3 + b_4 \sin \beta_4 + b_5 \sin \beta_5 = 0. \quad (5.5)$$

Rovnice (5.28) a (5.29) byly zderivovány podle času pro získání rovnic pro rychlosti. Rovnice mají tvar

$$\dot{x}: -b_1 \sin \beta_1 \cdot \dot{\beta}_1 - b_2 \sin \beta_2 \cdot \dot{\beta}_2 - b_3 \sin \beta_3 \cdot \dot{\beta}_3 = 0 \quad (5.6)$$

$$\dot{y}: b_1 \cos \beta_1 \cdot \dot{\beta}_1 + b_2 \cos \beta_2 \cdot \dot{\beta}_2 + b_3 \cos \beta_3 \cdot \dot{\beta}_3 = 0. \quad (5.7)$$

Maticově tedy lze tyto rovnice napsat jako

$$\vec{J}_z \vec{\dot{z}} + \vec{J}_q \vec{\dot{q}} = \vec{0} \quad (5.8)$$

a po dosazení

$$\begin{bmatrix} -b_2 \sin(\beta_2) & -b_3 \sin(\beta_3) \\ b_2 \cos(\beta_2) & b_3 \cos(\beta_3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -b_1 \sin(\beta_1) \\ b_1 \cos(\beta_1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Poloha bodu M

Bodu M lze dosáhnout z počátku souřadnicového systému pomocí záporně vzatého vektoru \vec{b}_3 a vektoru směřujícím z bodu C do bodu M . Podle původní konstrukce gripperu je úhel $\angle BCM$ na schématu 5.4 130° . Potom lze polohu bodu M vyjádřit z geometrie ve složkách x a y jako

$$x_M = -b_3 \cos \beta_3 + |CM| \cos(\beta_2 + \angle BCM - \pi) \quad (5.10)$$

$$y_M = -b_3 \sin \beta_3 + |CM| \sin(\beta_2 + \angle BCM - \pi), \quad (5.11)$$

kde $\angle BCM$ je v radiánech a $|CM|$ je vzdálenost bodu C od bodu M .

Dosažitelný prostor

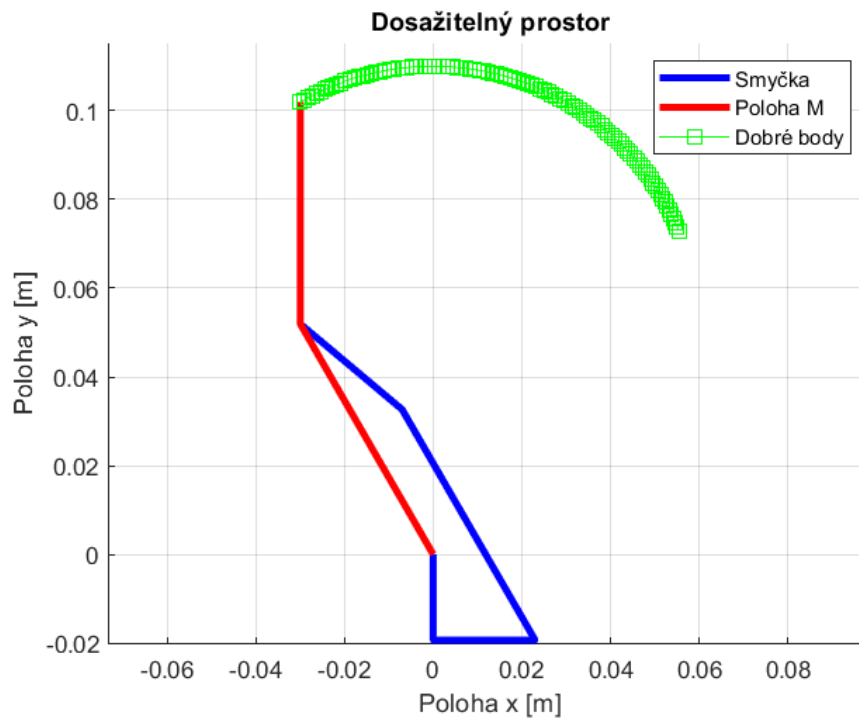
Nejprve byly v softwaru Matlab zdefinovány rozměry mechanismu do proměnných. Následně byly určeny intervaly, ve kterých se mění nezávislé souřadnice. Protože zde analyzovaný prst má pouze jeden stupeň volnosti, a tím pádem pouze jednu nezávislou souřadnici, byl nastaven pouze jeden interval Q_1 s hranicemi $\varphi_{limit} = \langle \frac{\pi}{8}; \frac{2\pi}{3} \rangle$. Tento interval byl rozdělen na sto dílků.

Dále byly učiněny počáteční odhady závislých souřadnic pro počátek iteračního cyklu. Odhad β_2 byl učiněn na 140° a β_3 jako 225° .

Následně byl spuštěn *for-cyklus*, který pro každou hodnotu nezávislé souřadnice z intervalu vypočítal pomocí kinematického řešiče závislé souřadnice. Byla nastavena požadovaná přesnost výpočtu $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-10}$ a maximální počet iterací na 35.

V tomto cyklu také došlo k vypočtení polohy bodu M podle vzorce v sekci *Poloha bodu M* v kapitole 5.2.1. Poloha bodu M byla uložena s informací, zda bylo dosaženo přesnosti nebo ne pro pozdější zobrazení. Zároveň byly pomocí vypočtených závislých souřadnic vypočteny všechny uzlové body smyčky a uloženy pro vykreslení.

Následně byla vytvořena animace, která prochází všechny správné body, neboli body, kdy byla splněna přesnost výpočtu ε . V animaci je kromě správných nebo špatných bodů také znázorněna vektorová smyčka a vektory určující polohu bodu M . Dosažitelný prostor prstu gripperu Hiwonder je složen ze správných bodů a je vyobrazen na obrázku 5.6.



Obrázek 5.6: Dosažitelný prostor prstu gripperu Hiwonder.

Dosažitelný prostor obsahuje pouze dobré body, ve kterých bylo dosaženo požadované přesnosti, což má výhodu, že jediným omezením je reálné konstrukční řešení, které určuje přesné konce této křivky.

5.2.2 Silová analýza gripperu Hiwonder

Silová analýza gripperu Hiwonder spočívá ve výpočtu reakcí ve vazbách a vypočtení momentu potřebného pro vykonání předepsaného pohybu. Během pohybu v bodě M působí síla o velikosti $F = 30 \text{ N}$, která představuje zatížení gripperu. Pohyb gripperu byl odsimulován v softwaru Matlab Simscape Multibody, kde byly získány závislé souřadnice a následně pomocí nich dopočítány hledané neznámé pomocí skriptu v softwaru Matlab.

Inverzní kinematika

V dosažitelném prostoru gripperu Hiwonder na obrázku 5.6 byla zvolena trajektorie. Protože prst má jeden stupeň volnosti, byl zvolen jeden parametr určující trajektorii. Byla zvolena souřadnice x a to v rozsahu $\langle -0,0104179; 0,0424275 \rangle$ m na základě souřadnic bodů v grafu 5.6, avšak výsledky by byly dostačující i s menším počtem desetinných míst. Čas simulace byl stanoven na 10 s pro zavření a otevření prstu gripperu, z čehož vyplývá, že rovnice pro předpis souřadnice x vypadá následovně

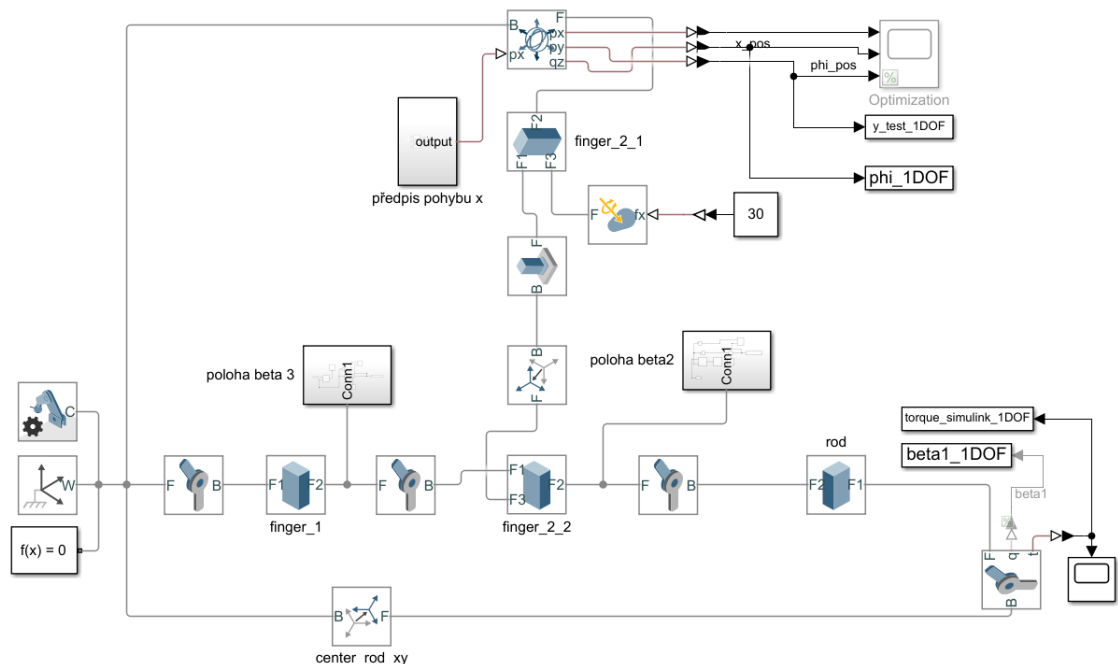
$$x = -0,0528454 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{20} \cdot t\right) + 0,0424275 \quad (5.12)$$

Předpisy pro rychlost a zrychlení jsou první a druhou časovou derivací rovnice (5.12) a mají tvar

$$\dot{x} = -0,0528454 \cdot 0,1\pi \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{20} \cdot t\right) \quad (5.13)$$

$$\ddot{x} = 0,0528454 \cdot (0,1\pi)^2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{20} \cdot t\right) \quad (5.14)$$

Tento předpis pohybu byl předepsán *Bushing Jointu* v modelu na obrázku 5.7

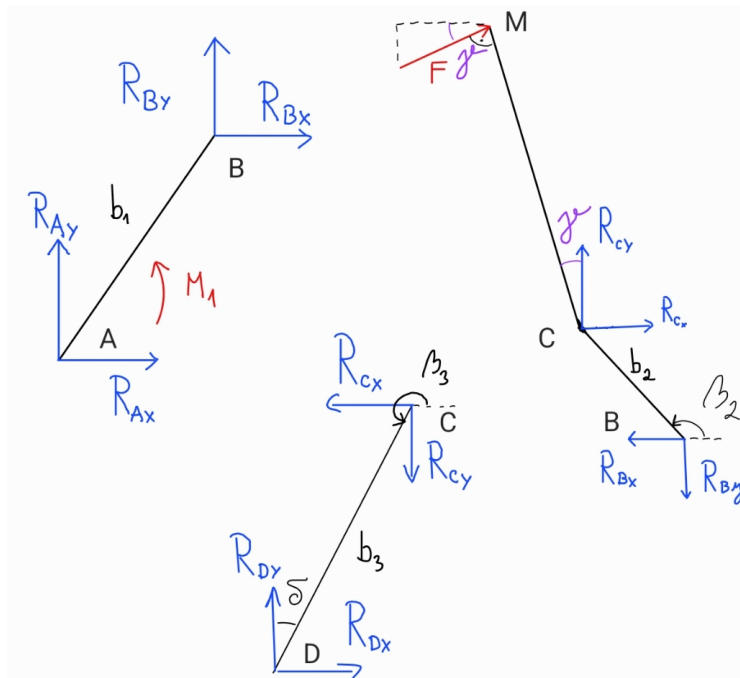


Obrázek 5.7: Model prstu gripperu Hiwonder v softwaru Matlab Simscape.

Po odsimulování pohybu došlo k uložení hodnot úhlů $\beta_{1,2,3}$ do souborů pro výpočet reakcí v kloubech.

Výpočet reakcí a pohonu

Pro výpočet reakcí v jednotlivých polohách během pohybu je použita metoda uvolňování. Zobrazení uvolněných těles je na obrázku 5.8.



Obrázek 5.8: Uvolnění prstu gripperu Hiwonder.

Pro každé uvolněné těleso lze sepsat rovnice rovnováhy do směru x a y a momentovou rovnici rovnováhy okolo vybraného bodu.

Pro těleso b_1

$$x : R_{Ax} + R_{Bx} = 0 \quad (5.15)$$

$$y : R_{Ay} + R_{By} = 0 \quad (5.16)$$

$$M_A : R_{By} \cdot b_1 \cos \beta_1 - R_{Bx} \cdot b_1 \sin \beta_1 + M_1 = 0, \quad (5.17)$$

pro těleso b_2

$$x : R_{Cx} - R_{Bx} + F \cos \left(\angle BCM - \frac{3\pi}{2} + \beta_2 \right) = 0 \quad (5.18)$$

$$y : R_{Cy} - R_{By} + F \sin \left(\angle BCM - \frac{3\pi}{2} + \beta_2 \right) = 0 \quad (5.19)$$

$$M_C : -R_{By} \cdot b_2 \sin \left(\beta_2 - \frac{\pi}{2} \right) - R_{Bx} \cdot b_2 \cos \left(\beta_2 - \frac{\pi}{2} \right) - F \cdot |CM| = 0 \quad (5.20)$$

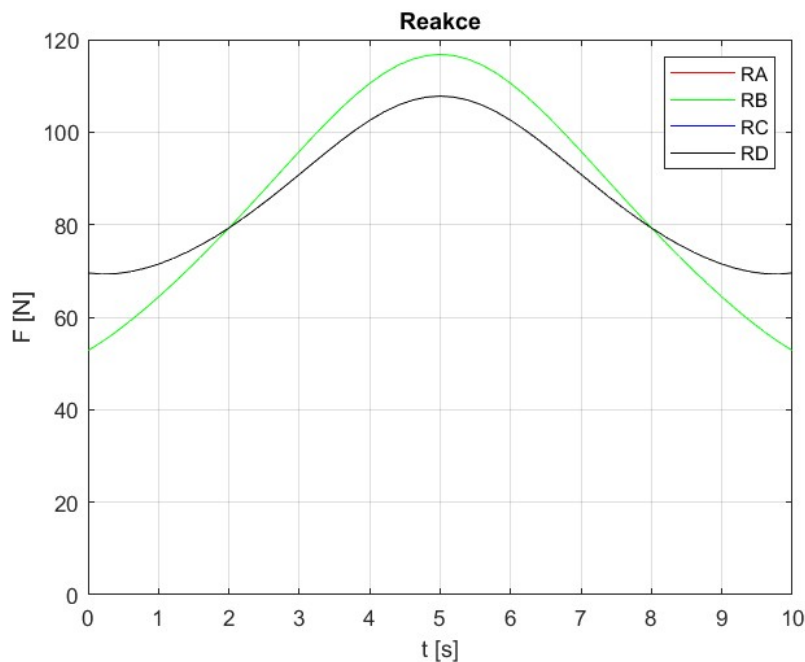
a pro těleso b_3

$$x : R_{Dx} - R_{Cx} = 0 \quad (5.21)$$

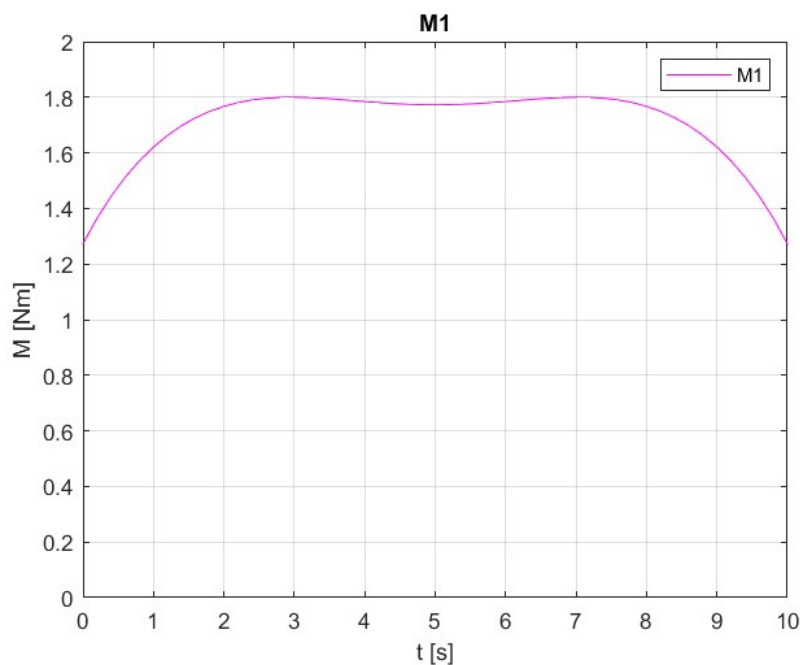
$$y : R_{Dy} - R_{Cy} = 0 \quad (5.22)$$

$$M_C : R_{Dy} \cdot b_3 \sin \left(\frac{3\pi}{2} - \beta_3 \right) + R_{Dx} \cdot b_3 \cos \left(\frac{3\pi}{2} - \beta_3 \right) = 0. \quad (5.23)$$

Řešením této soustavy rovnic v každém časovém okamžiku je průběh reakcí ve vazbách a průběh momentu M_1 . Průběhy těchto silových účinků jsou v grafu 5.9 a 5.10. Reakce R_A a R_B mají stejný průběh stejně jako reakce R_C a R_D , takže se překrývají.



Obrázek 5.9: Průběh reakcí v prstu gripperu Hiwonder.



Obrázek 5.10: Průběh momentu v prstu gripperu Hiwonder.

Na těchto grafech lze pozorovat, že průběhy silových účinků nezačínají na nulové hodnotě. Tento nežádoucí efekt je způsoben tím, že derivace trajektorie, neboli rychlost, není na počátku pohybu nulová.

5.2.3 Optimalizace gripperu Hiwonder

Prst gripperu Hiwonder byl optimalizován pro snížení momentu M_1 a pro snížení odchylky polohy bodu M od souřadnice $y = 0,105 \text{ m}$, aby se trajektorie co nejvíce blížila přímce. Do optimalizace byl také zahrnut požadavek na udržení téměř nulového natočení koncového článku prstu.

Nákladová funkce

Na základě zvolených požadavků byla vytvořena nákladová funkce, která byla minimalizována. Během minimalizace došlo k načtení hodnot potřebných pro výpočet hodnoty funkce z modelu v softwaru Matlab Simscape pro inverzní kinematiku. Pokud simulace proběhla s vybranými hodnotami v pořádku, proběhl *for-cyklus*, během kterého došlo k nasčítání celkové hodnoty nákladové funkce. Pro vyvážení jednotlivých kritérií byl zvolen váhový koeficient 850 000, který násobil odchylky natočení, aby natočení zůstalo téměř nulové. Výsledná nákladová funkce má potom tvar

$$T = \sum_w (y_{real\ w} - y_{0,105\ w})^2 + M_1 w^2 + 850\ 000 \cdot \varphi_w^2, \quad (5.24)$$

kde veličiny y , M_1 a φ jsou matice obsahující jednotlivé hodnoty z polohy s indexem w v průběhu simulace.

Minimalizační algoritmus

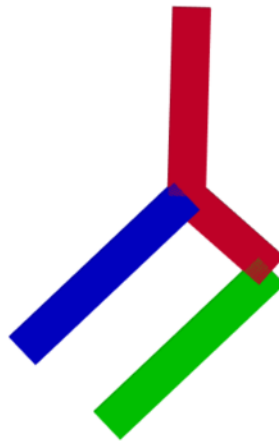
Pro minimalizaci nákladové funkce byla nejprve použita funkce *fminsearch*. Jako počáteční podmínky byly nastaveny původní hodnoty v tabulce 5.1. Po dokončení minimalizace došlo k zanedbatelné změně rozměrů z čehož vyplývá, že původní rozměry buď téměř odpovídaly lokálnímu minimu nebo byl váhový koeficient příliš vysoký a zabránil výraznějším změnám pro dosažení například nižšího momentu. Nákladová funkce pro původní rozměry měla hodnotu $T = 293,6358$ a pro rozměry po minimalizaci $T = 293,6310$. Změny v pozici y , momentu M_1 a natočení φ jsou tedy zanedbatelné.

Pro ověření relevantnosti předchozí optimalizace byla spuštěna minimalizace pomocí funkce *ga*. Jedná se o genetický algoritmus, který vytváří jedince s různými hodnotami proměnných. Jedinci tvoří generace a z poslední generace je vždy vybrána nejlepší kombinace. Tato metoda je schopná při dostatečně velkém počtu jedinců a generací najít globální minimum funkce. Avšak při počtu 100 jedinců v generaci se nepodařilo najít za 50 generací nižší hodnotu nákladové funkce, než při použití *fminsearch*, díky možnosti zvolení počátečních podmínek. Nákladová funkce skončila na hodnotě $T = 4,79 \cdot 10^9$.

Simulační model prstu gripperu v softwaru Matlab Simscape je na obrázku 5.11.

Rozměr	Původní	<i>Fminsearch</i>
b_1	0,006 m	0,0599990 m
b_2	0,003 m	0,0299999 m
b_3	0,006 m	0,0599990 m
b_4	0,01928 m	0,01928356 m
b_5	0,02298 m	0,0229813 m
$\angle BCM$	130°	129,9999280°

Tabulka 5.2: Porovnání rozměrů před a po optimalizaci prstu gripperu Hiwonder



Obrázek 5.11: Původní simulační model prstu gripperu Hiwonder.

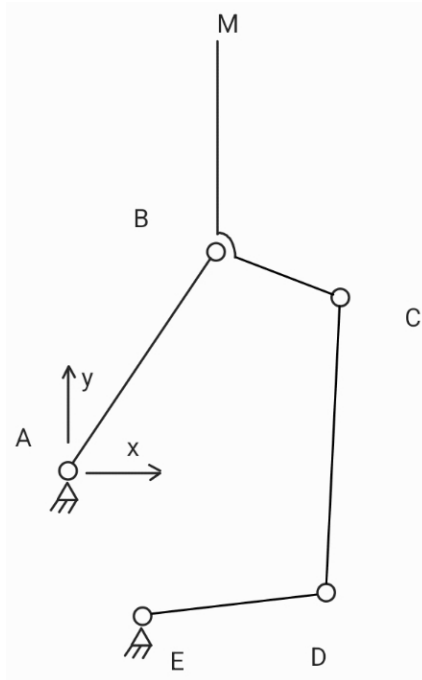
5.3 Gripper konstrukce Robotiq 2F-85

Vybraný gripper lze klasifikovat jako dvouprstý gripper se dvěma články. Na rozdíl od gripperu v kapitole 5.2 se jedná o gripper se dvěma stupni volnosti, což zásadně ovlivňuje jeho možnosti úchopu. Oproti průmyslově vyráběnému gripperu nebyla tato konstrukce simulována jako podaktuovaný systém s pouze jedním pohonem, ale dvěma. Všechny postupy výpočtu v této kapitole využívají stejného principu jako je v kapitole 5.2, a proto nebudou některé postupy popsány tak detailně.

5.3.1 Vektorová metoda gripperu Robotiq

Gripper Robotiq byl nahrazen kinematickým schématem na obrázku 5.12 a počátek souřadnicového systému byl umístěn do bodu A . Počet stupňů volnosti se vypočte jako

$$n = 3(u - 1) - 3vp - 2(r + p + v) - 1o = 3(5 - 1) - 3 \cdot 0 - 2(5 + 0 + 0) - 1 \cdot 0 = 2^\circ. \quad (5.25)$$

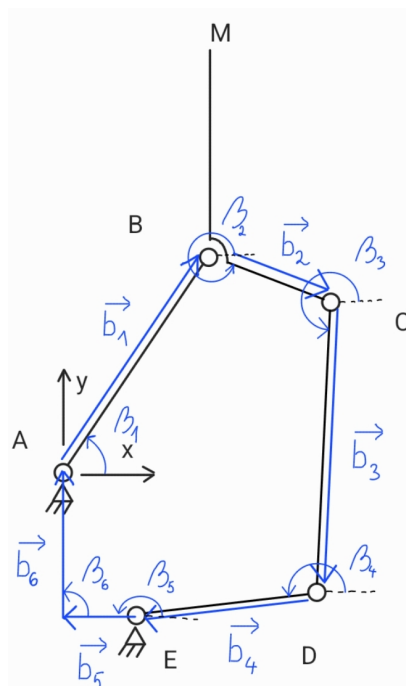


Obrázek 5.12: Schéma prstu gripperu Robotiq.

Počet smyček byl určen následovně

$$l = d + m - u + 1 = 4 + 0 - 4 + 1 = 1 \text{ smyčka} \quad (5.26)$$

Tato smyčka je zobrazena na obrázku 5.13. Smyčka vychází z bodu A a přes jednotlivá tělesa pokračuje až do bodu E, kde se napojuje zpět na rám a končí opět v bodě A.



Obrázek 5.13: Vektorová smyčka prstu gripperu Robotiq.

Soustava má dva stupně volnosti, z čehož vyplývá nutnost určit dvě nezávislé souřadnice. Jako nezávislé byly zvoleny souřadnice hnacích členů, kterými jsou úhly β_1 a β_4 . Počet závislých souřadnic se rovná dvojnásobku počtu smyček, což odpovídám dvěma souřadnicím β_2 a β_3 . V tabulce 5.3 jsou vypsány všechny nezávislé a závislé souřadnice a souřadnice, které jsou konstantní.

i	b_i [m]	β_i [rad]
1	0,0926	q_1
2	0,022068	z_1
3	0,079	z_2
4	0,043425	q_2
5	0,005478	π
6	0,01	$\frac{\pi}{2}$

Tabulka 5.3: Členy smyčky prstu gripperu Robotiq

Vektorová rovnice smyčky má potom tvar

$$\vec{b}_1 + \vec{b}_2 + \vec{b}_3 + \vec{b}_4 + \vec{b}_5 + \vec{b}_6 = \vec{0}. \quad (5.27)$$

Rozepsáním do složkového tvaru do směrů x a y vzniknou tyto rovnice

$$x: b_1 \cos \beta_1 + b_2 \cos \beta_2 + b_3 \cos \beta_3 + b_4 \cos \beta_4 + b_5 \cos \beta_5 + b_6 \cos \beta_6 = 0 \quad (5.28)$$

$$y: b_1 \sin \beta_1 + b_2 \sin \beta_2 + b_3 \sin \beta_3 + b_4 \sin \beta_4 + b_5 \sin \beta_5 + b_6 \sin \beta_6 = 0. \quad (5.29)$$

Derivací těchto rovnic podle času byly získány rovnice pro rychlost ve tvaru

$$\dot{x}: -b_1 \sin \beta_1 \cdot \dot{\beta}_1 - b_2 \sin \beta_2 \cdot \dot{\beta}_2 - b_3 \sin \beta_3 \cdot \dot{\beta}_3 - b_4 \sin \beta_4 \cdot \dot{\beta}_3 = 0 \quad (5.30)$$

$$\dot{y}: b_1 \cos \beta_1 \cdot \dot{\beta}_1 + b_2 \cos \beta_2 \cdot \dot{\beta}_2 + b_3 \cos \beta_3 \cdot \dot{\beta}_3 + b_4 \cos \beta_4 \cdot \dot{\beta}_4 = 0. \quad (5.31)$$

Zapsáním této soustavy rovnic do matic vznikne soustava ve tvaru

$$\vec{J}_z \vec{z} + \vec{J}_q \vec{q} = \vec{0}. \quad (5.32)$$

Po dosazení má tvar

$$\begin{bmatrix} -b_2 \sin(\beta_2) & -b_3 \sin(\beta_3) \\ b_2 \cos(\beta_2) & b_3 \cos(\beta_3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -b_1 \sin(\beta_1) & -b_4 \sin(\beta_4) \\ b_1 \cos(\beta_1) & -b_4 \cos(\beta_4) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

Poloha bodu M

Poloha bodu M v globálním souřadnicovém systému je vyjádřena pomocí vektoru \vec{b}_1 a vektoru směřujícím z bodu B do bodu M . Podle schématu na obrázku 5.12 je úhel $\angle CBM$ roven 115° . Souřadnice x a y bodu M jsou potom vyjádřeny ve tvaru

$$x_M = b_1 \cos \beta_1 + |BM| \cos(\beta_2 + \angle CBM) \quad (5.34)$$

$$y_M = b_1 \sin \beta_1 + |BM| \sin(\beta_2 + \angle CBM), \quad (5.35)$$

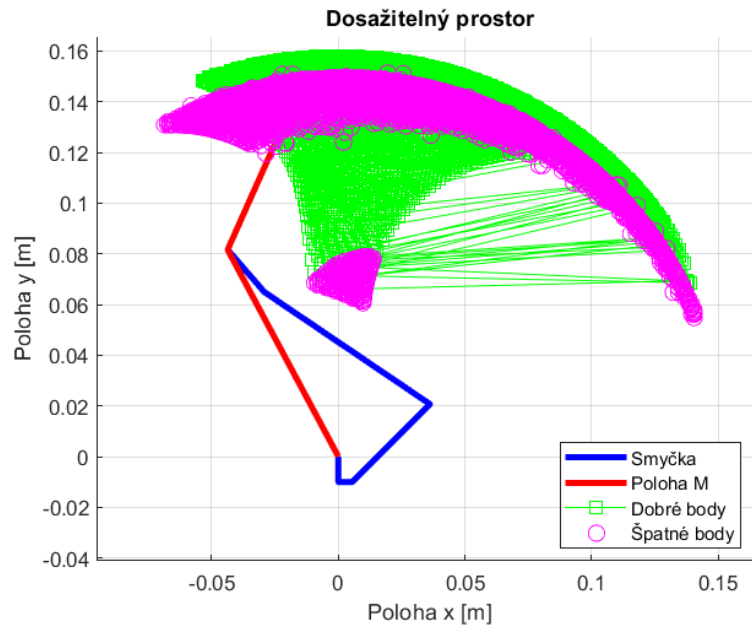
kde $\angle CBM$ je v radiánech a $|BM|$ je vzdálenost bodu B od bodu M .

Dosažitelný prostor

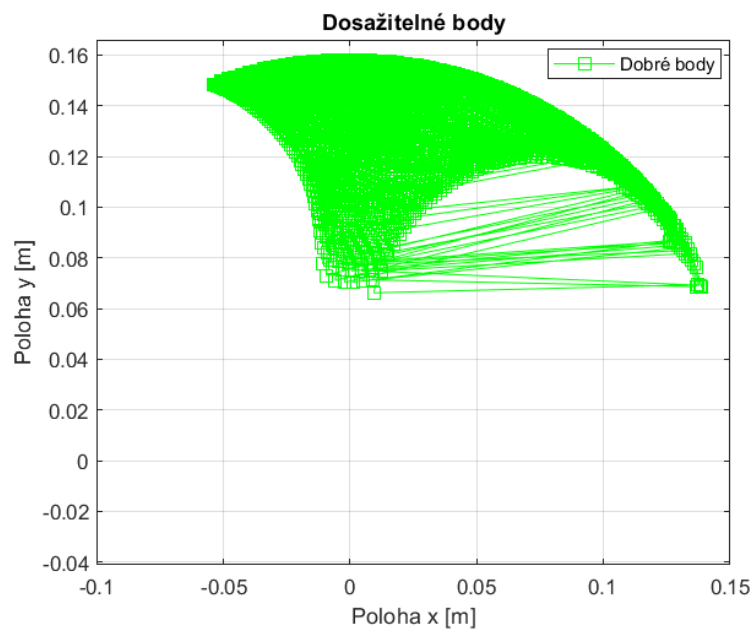
Jako v předchozí kapitole 5.2 byly zdefinovány rozměry gripperu a byly vytvořeny intervaly Q_1 a Q_2 pro pohony prstu. Intervaly určují oblast, ve které se mění hodnoty hodnoty nezávislých souřadnic β_1 a β_4 a každý je rozdělen na sto dílků. Hranice těchto intervalů jsou $\varphi_{limit} = \langle \frac{\pi}{6}; \frac{2\pi}{3} \rangle$ a $\psi_{limit} = \langle \frac{2\pi}{3}; \frac{5\pi}{4} \rangle$.

Odhady závislých souřadnic byly učiněny jako 24° a 242° . Výpočet závislých souřadnic byl proveden pomocí stejného principu, avšak protože jsou nezávislé souřadnice dvě, byl výpočet proveden pomocí dvou vnořených *for-cyklů*. Díky tomu byly provedeny všechny kombinace z intervalů Q_1 a Q_2 .

Následná animace zobrazuje dosažitelný prostor, kde *špatné body* jsou body, kde nebylo dosaženo přesnosti ε , a proto byly vyjmuty z dosažitelného prostoru. Dosažitelný prostor je znázorněn na obrázku 5.14, avšak z obrázku 5.15 je vidět, že prostory bodů dobrých a špatných se překrývají. Přesnost v této oblasti překryvu může být tedy splněna, ale závisí na předchozí konfiguraci gripperu, z které se do prostoru dostal.



Obrázek 5.14: Dosažitelný prostor prstu gripperu Robotiq.



Obrázek 5.15: Dosažitelné body prstu gripperu Robotiq.

5.3.2 Silová analýza gripperu Robotiq

Cílem silové analýzy gripperu Robotiq je vypočítat reakce ve vazbách a potřebné pohony M_1 a M_2 . Gripper je opět zatížen silou $F = 30\text{ N}$ v bodě M a simulace proběhla v softwaru Matlab Simscape, kde byly získány závislé souřadnice a následně pomocí nich dopočítány hledané neznámé pomocí skriptu v softwaru Matlab.

Inverzní kinematika

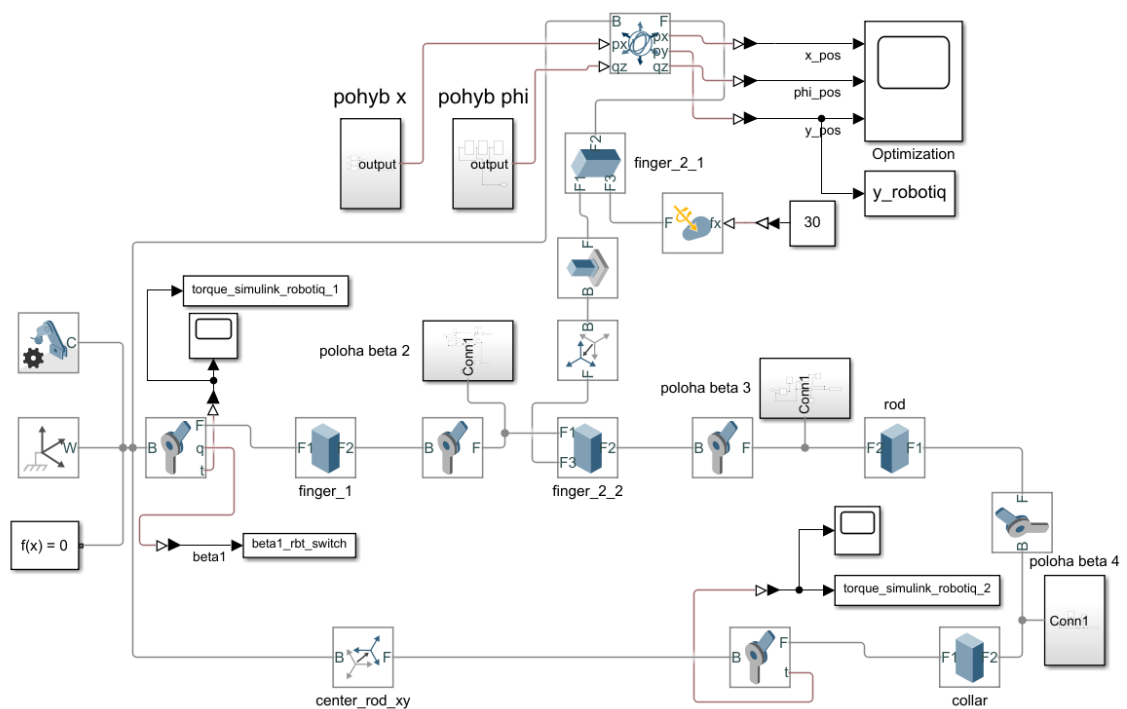
Trajektorie prstu gripperu Robotiq byla vybrána v dosažitelném prostoru prstu na obrázku 5.14. Byly zvoleny dva parametry určující trajektorii, protože se jedná o prst se dvěma stupni volnosti. Byl zvolen parametr pro polohu bodu M podle souřadnice x a druhý parametr pro natočení posledního článku prstu φ . Pohyb ve směru x byl zvolen v intervalu $\langle -0,39; 0,39 \rangle m$. Protože konstrukce gripperu umožňuje měnit natočení během pohybu, byl zvolen průběh natočení φ takový, že nejprve na začátku pohybu udržuje nulové natočení a následně v čase $t = 1,59 s$ změní natočení v intervalu $\langle 0; 1 \rangle rad$ a zpět. V čase $t = 8,41 s$ opět gripper naváže do nulové polohy. Celá simulace probíhá 10 s. Rovnice pro předpis polohy x má tvar

$$x = -0,078 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{20} \cdot t\right) + 0,039 \quad (5.36)$$

a pro φ v časovém intervalu $\langle 1,59; 8,41 \rangle s$

$$\varphi = \sin\left(\frac{2\pi}{13,64} \cdot (t - 1,59)\right). \quad (5.37)$$

Schéma modelu prstu gripperu v softwaru Matlab Simscape je na obrázku 5.16.

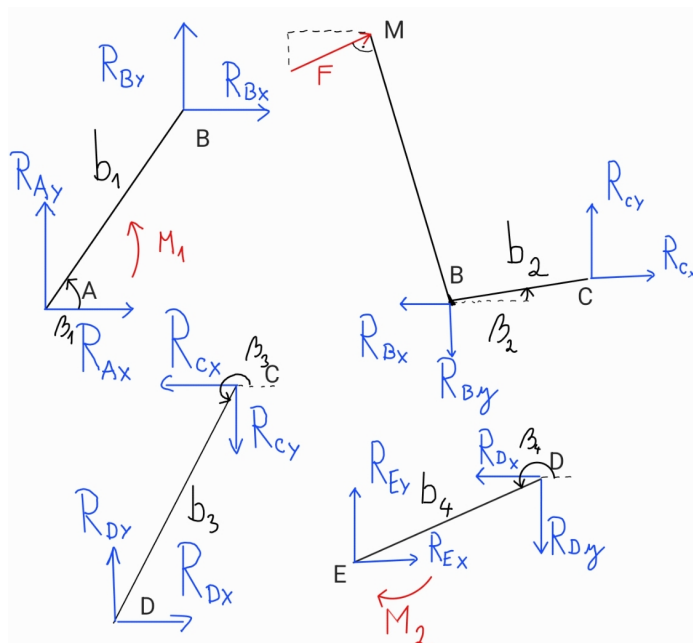


Obrázek 5.16: Model prstu gripperu Robotiq v softwaru Matlab Simscape.

Pro výpočet silových účinků byly opět nasnímány úhly $\beta_{1,2,3,4}$ ve vazbách a uloženy do souborů pro následný výpočet.

Výpočet reakcí a pohonů

Výpočet reakcí ve vazbách a momentů M_1 a M_2 , které zajišťují pohon, byl proveden pomocí metody uvolňování. Uvolněná tělesa s vyznačenými silovými účinky jsou na obrázku 5.17.



Obrázek 5.17: Uvolnění prstu gripperu Robotiq.

Silové rovnice rovnováhy ve směrech x a y , spolu s momentovou rovnicí, lze pro každé těleso zapsat následovně.

Pro těleso b_1

$$x : R_{Ax} + R_{Bx} = 0 \quad (5.38)$$

$$y : R_{Ay} + R_{By} = 0 \quad (5.39)$$

$$M_A : R_{By} \cdot b_1 \cos \beta_1 - R_{Bx} \cdot b_1 \sin \beta_1 + M_1 = 0, \quad (5.40)$$

pro těleso b_2

$$x : R_{Cx} - R_{Bx} + F \cos \left(\angle CBM - \frac{\pi}{2} + \beta_2 \right) = 0 \quad (5.41)$$

$$y : R_{Cy} - R_{By} + F \sin \left(\angle CBM - \frac{\pi}{2} + \beta_2 \right) = 0 \quad (5.42)$$

$$M_B : -R_{Cx} \cdot b_2 \sin(\beta_2) + R_{Cy} \cdot b_2 \cos(\beta_2) - F \cdot |BM| = 0, \quad (5.43)$$

pro těleso b_3

$$x : R_{Dx} - R_{Cx} = 0 \quad (5.44)$$

$$y : R_{Dy} - R_{Cy} = 0 \quad (5.45)$$

$$M_C : R_{Dx} \cdot b_3 \sin(\beta_3 - \pi) - R_{Dy} \cdot b_3 \cos(\beta_3 - \pi) = 0 \quad (5.46)$$

a pro těleso b_4

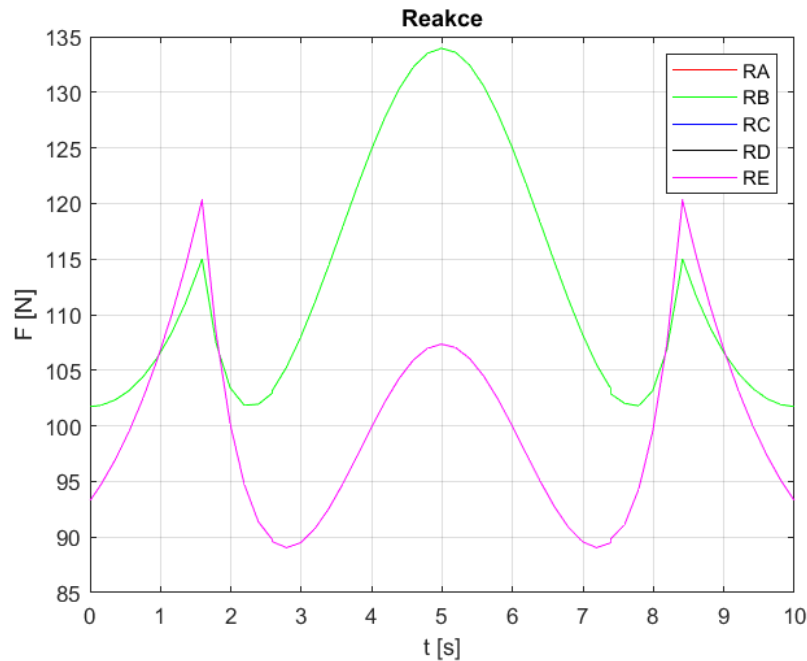
$$x : R_{Ex} - R_{Dx} = 0 \quad (5.47)$$

$$y : R_{Ey} - R_{Dy} = 0 \quad (5.48)$$

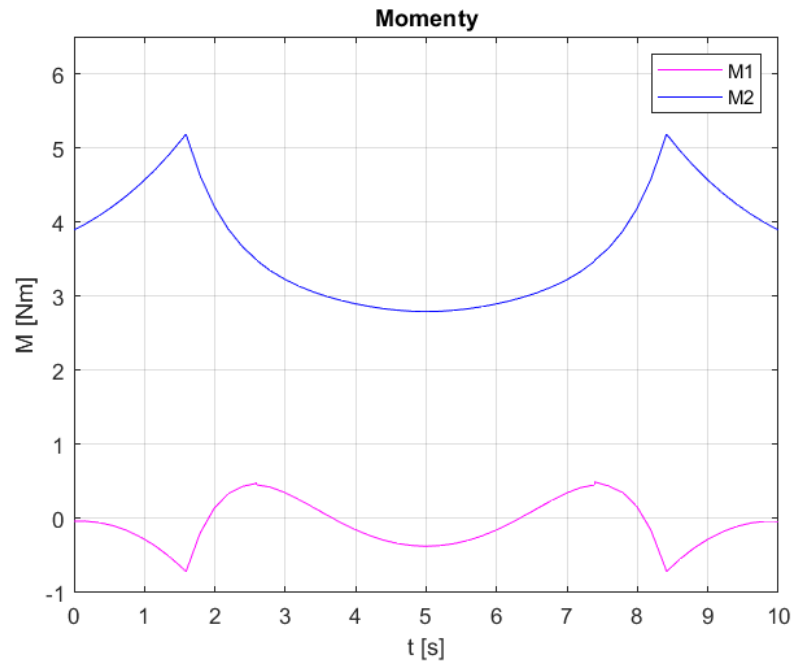
$$M_C : -R_{Ex} \cdot b_4 \sin(\pi - \beta_4) - R_{Ey} \cdot b_4 \cos(\pi - \beta_4) - M_2 = 0. \quad (5.49)$$

Pro každý časový okamžik je tato soustava řešením průběhu reakcí ve vazbách a momentů M_1 a M_2 , které gripper pohánějí. Průběhy reakcí jsou v grafu 5.18 a průběhy momentů jsou v grafu 5.19. Reakce R_A a R_B se překrývají stejně jako reakce R_C , R_D a R_E .

Jak je vidět z grafů, v místech přechodu z nulového natočení koncového článku do druhého typu trajektorie, reakce a momenty dosahují ostrého zlomu. Tuto náhlou změnu by bylo vhodné eliminovat. Zároveň silové účinky nezačínají v nulových hodnotách, protože trajektorie začíná v nule, ale její derivace není nulová, což způsobí tento skok.



Obrázek 5.18: Průběh reakcí v prstu gripperu Robotiq.



Obrázek 5.19: Průběh momentu v prstu gripperu Robotiq.

5.3.3 Optimalizace gripperu Robotiq

Optimalizace prstu gripperu Robotiq byla koncipována stejným způsobem, jako v kapitole 5.2.3 avšak s tím rozdílem, že v nákladové funkci nebyl zahrnut požadavek na natočení posledního článku prstu gripperu, protože ten vyplýval z předpisu trajektorie. Dále pak byly optimalizovány průběhy momentů M_1 , M_2 a průběh souřadnice y , aby se co nejvíce blížila přímce s předpisem $y = 0,15$, avšak pouze v časovém intervalu, kdy byl předpis trajektorie pro natočení nulový.

Nákladová funkce

Z důvodu minimalizace průběhu y pouze v některých částech simulace byla nákladová funkce rozdělena na dvě části. V první a třetí části v časovém intervalu $\langle 0; 1,6 \rangle$ s a $\langle 8,4; 10 \rangle$ s má nákladová funkce tvar

$$T = \sum_w (0,1 \cdot (y_{real\ w} - y_{0,15\ w}))^2 + M_{1\ w}^2 + M_{2\ w}^2 \quad (5.50)$$

a v časovém intervalu $\langle 1,6; 8,4 \rangle$ s vyhodnocuje pouze momenty ve tvaru

$$T = \sum_w M_{1\ w}^2 + M_{2\ w}^2. \quad (5.51)$$

Pro optimalizaci souřadnice y byl zvolen váhový koeficient 0,1 z důvodu menší důležitosti tohoto požadavku oproti ostatním.

Minimalizační algoritmus

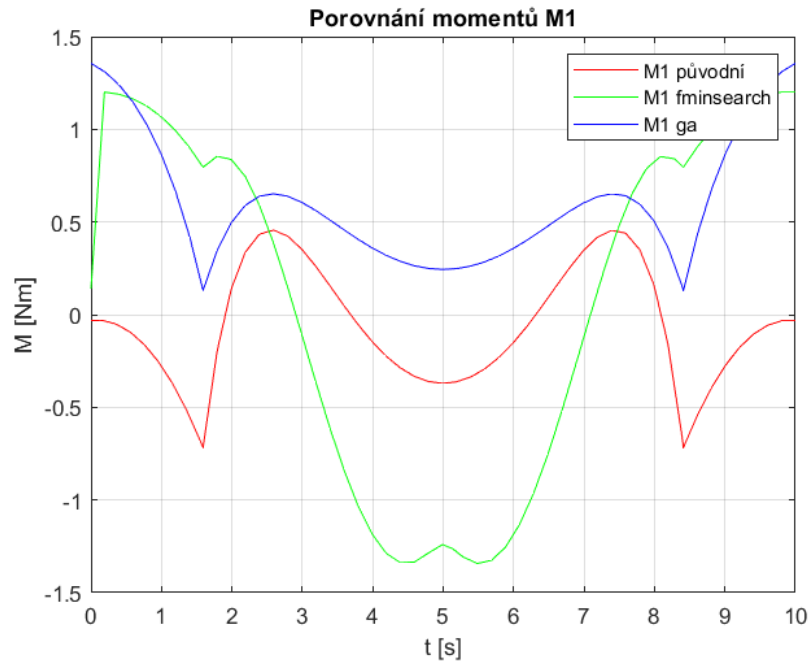
Pro minimalizaci nákladové funkce byla nejprve zvolena funkce *fminsearch*. Počáteční podmínky byly nastaveny podle původních rozměrů gripperu. Funkce *fminsearch* nedosáhla během automaticky nastaveného počtu kroků lokálního minima, protože nákladová funkce stále klesala. Nákladová funkce začínala s hodnotou $T = 891,0099$ a skončila na hodnotě $T = 100,6969$. Nové rozměry jsou v tabulce 5.4.

Pro porovnání výsledků byla provedena optimalizace i pomocí funkce *ga*. Pomocí tohoto genetického algoritmu bylo dosaženo ve stanovených mezích hodnoty nákladové funkce $T = 92,5365$ avšak i tento algoritmus byl ukončen z důvodu dosažení maximálního počtu generací. Rozměry, kterých bylo dosaženo jsou v tabulce 5.4.

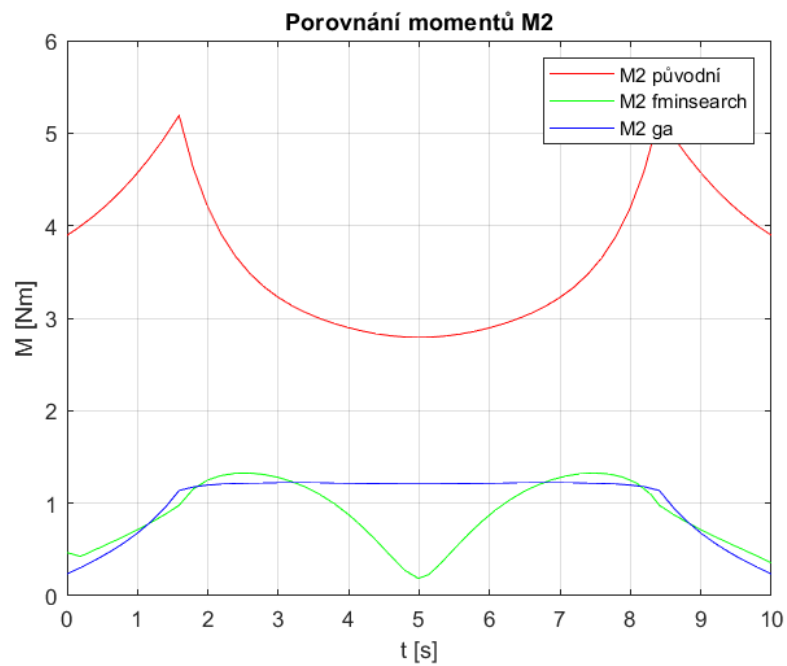
Rozměry	Původní	<i>Fminsearch</i>	<i>Ga</i>
b_1	0,0926 m	0,07141 m	0,07167 m
b_2	0,02207 m	0,01213 m	0,02127 m
b_3	0,079 m	0,07654 m	0,08342 m
b_4	0,04343 m	0,00577 m	0,02034 m
b_5	0,00548 m	0,00952 m	0,02157 m
b_6	0,01 m	-0,00891 m	0,00981 m
$ CM $	0,0655 m	0,09236 m	0,04193 m
$\angle BCM$	115°	135,98823°	135,690224°

Tabulka 5.4: Porovnání rozměrů podle optimalizačního algoritmu prstu gripperu Robotiq

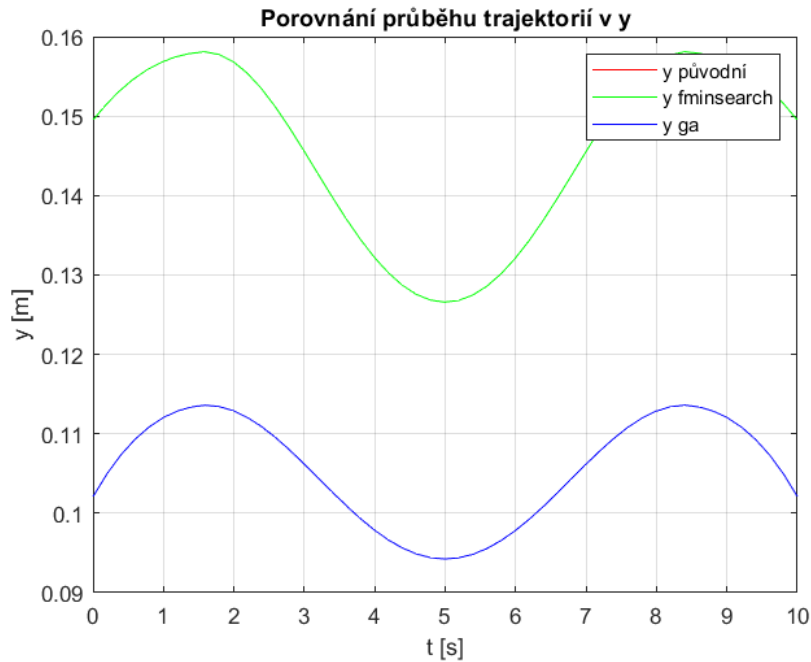
Změny v průběžích veličin, které bylo cílem optimalizovat, jsou zobrazeny v grafech 5.20, 5.21 a 5.22. Z těchto grafů vyplývá, že nejlepší optimalizace se podařilo dosáhnout u průběhu momentu M_2 . Naopak v průběhu momentu M_1 došlo ke zhoršení průběhu u obou metod. Vzhledem k nastavení váhového koeficientu neměl průběh souřadnice y zásadní vliv. Průběh původní trajektorie a trajektorie po optimalizaci pomocí *fminsearch* se neliší. U průběhu s genetickým algoritmem došlo k lehkému zploštění a posunutí trajektorie, protože tento posun nepřinesl takový nárůst hodnoty nákladové funkce i díky váhovému koeficientu.



Obrázek 5.20: Porovnání momentů M_1 gripperu Robotiq.

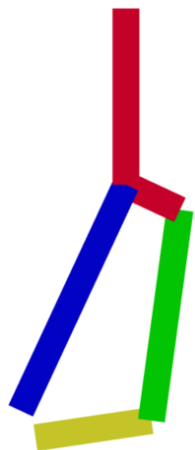


Obrázek 5.21: Porovnání momentů M_2 v prstu gripperu Robotiq.

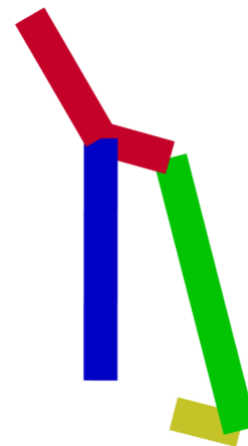


Obrázek 5.22: Porovnání průběhů souřadnice y v prstu gripperu Robotiq.

Vzhled původního simulačního modelu a modelu po optimalizaci pomocí *ga* je na obrázcích 5.23 a 5.24.



Obrázek 5.23: Původní simulační model prstu gripperu Robotiq.



Obrázek 5.24: Simulační model prstu gripperu Robotiq po optimalizaci pomocí *ga*.

5.4 Gripper konstrukce DH AG-95

Z vybrané trojice gripperů se jedná o nejkomplicovanější řešení. Gripper má dva stupně volnosti a je poháněn pomocí pneumatického pístu a elektricky poháněného pohybového šroubu. Gripper umožňuje tvarový i silový úchop a patří mezi velmi univerzální grippery.[47]

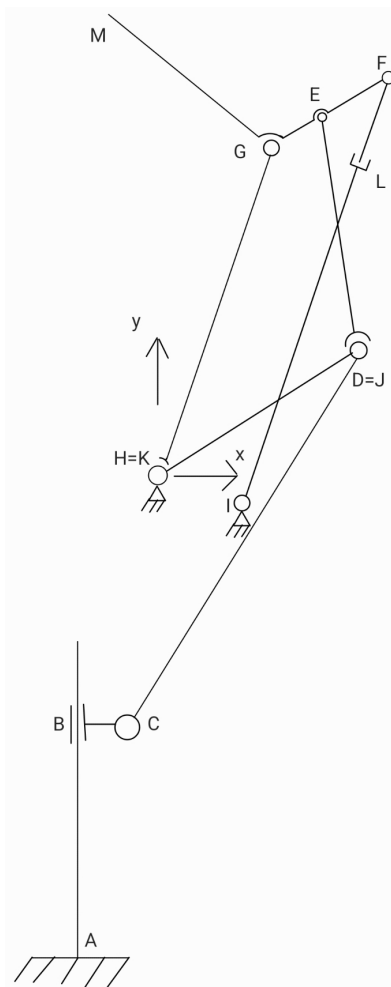
5.4.1 Vektorová metoda gripperu DH AG-95

Nahrazení reálného modelu gripperu kinematickým schématem je znázorněno na obrázku 5.25. Počátek souřadnicového systému byl umístěn do bodu H . Počet stupňů volnosti prstu gripperu se vypočte jako

$$n = 3(u - 1) - 3vp - 2(r + p + v) - 1o = 3(9 - 1) - 3 \cdot 0 - 2(9 + 2 + 0) - 1 \cdot 0 = 2^\circ \quad (5.52)$$

a počet vektorových smyček jako

$$l = d + m - u + 1 = 11 + 0 - 9 + 1 = 3 \text{ smyčky} \quad (5.53)$$

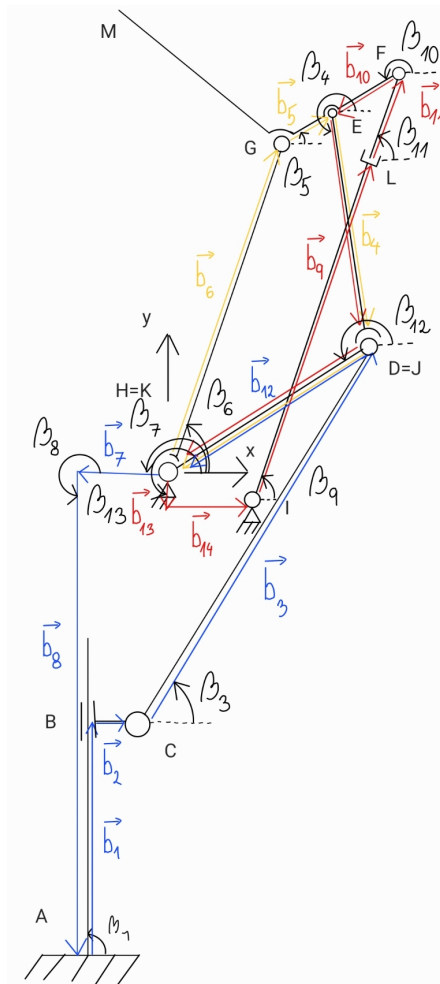


Obrázek 5.25: Schéma prstu gripperu DH AG-95.

Tři vektorové smyčky jsou zobrazeny na obrázku 5.26 a jsou od sebe barevně odlišeny. Protože má soustava dva stupně volnosti, byly určeny dvě nezávislé souřadnice a to b_1 a b_{11} . Počet nezávislých souřadnic byl vypočítán jako dvojnásobek počtu vektorových smyček. Nezávislých souřadnic je šest a jsou to $\beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_9, \beta_{12}$. Všechny souřadnice jsou vypsány v tabulce 5.5.

i	b_i [m]	β_i [rad]	i	b_i [m]	β_i [rad]
1	q_1	$\frac{\pi}{2}$	8	0,043642	$\frac{3\pi}{2}$
2	0,01	0	9	0,040418	z_5
3	0,05	z_1	10	0,015	$\beta_5 + \pi$
4	0,04	z_2	11	q_2	β_9
5	0,015	z_3	12	0,04	z_6
6	0,05	z_4	13	0,005	$\frac{\pi}{2}$
7	0,01	π	14	0,02	0

Tabulka 5.5: Členy smyček prstu gripperu DH AG-95



Obrázek 5.26: Vektorové smyčky prstu gripperu DH AG-95.

Vektorová rovnice první smyčky má tvar

$$\vec{b}_1 + \vec{b}_2 + \vec{b}_3 + \vec{b}_{12} + \vec{b}_7 + \vec{b}_8 = \vec{0}. \quad (5.54)$$

Po rozepsání do složkového tvaru do směrů x a y vzniknou tyto rovnice

$$x : b_1 \cos \beta_1 + b_2 \cos \beta_2 + b_3 \cos \beta_3 + b_{12} \cos \beta_{12} + b_7 \cos \beta_7 + b_8 \cos \beta_8 = 0 \quad (5.55)$$

$$y : b_1 \sin \beta_1 + b_2 \sin \beta_2 + b_3 \sin \beta_3 + b_{12} \sin \beta_{12} + b_7 \sin \beta_7 + b_8 \sin \beta_8 = 0. \quad (5.56)$$

Derivací těchto rovnic podle času vzniknou rovnice pro rychlost ve tvaru

$$\dot{x} : \dot{b}_1 \cos \beta_1 - b_3 \sin \beta_3 \cdot \dot{\beta}_3 - b_{12} \sin \beta_{12} \cdot \dot{\beta}_{12} = 0 \quad (5.57)$$

$$\dot{y} : \dot{b}_1 \sin \beta_1 + b_3 \cos \beta_3 \cdot \dot{\beta}_3 + b_{12} \cos \beta_{12} \cdot \dot{\beta}_{12} = 0. \quad (5.58)$$

Vektorová rovnice pro druhou smyčku má tvar

$$\vec{b}_{13} + \vec{b}_{14} + \vec{b}_9 + \vec{b}_{11} + \vec{b}_{10} + \vec{b}_4 + \vec{b}_{12} = \vec{0}. \quad (5.59)$$

Tato rovnice má po rozepsání do směrů x a y tvar

$$x : b_{13} \cos \beta_{13} + b_{14} \cos \beta_{14} + b_9 \cos \beta_9 + b_{11} \cos \beta_9 + b_{10} \cos (\beta_5 + \pi) + b_4 \cos \beta_4 + b_{12} \cos \beta_{12} = 0 \quad (5.60)$$

$$y : b_{13} \sin \beta_{13} + b_{14} \sin \beta_{14} + b_9 \sin \beta_9 + b_{11} \sin \beta_9 + b_{10} \sin (\beta_5 + \pi) + b_4 \sin \beta_4 + b_{12} \sin \beta_{12} = 0. \quad (5.61)$$

Časové derivace těchto rovnic mají tvar

$$\dot{x} : -b_9 \sin \beta_9 \cdot \dot{\beta}_9 + \dot{b}_{11} \cos \beta_9 - b_{11} \sin \beta_9 \cdot \dot{\beta}_9 - b_{10} \sin (\beta_5 + \pi) \cdot \dot{\beta}_5 - b_4 \sin \beta_4 \cdot \dot{\beta}_4 - b_{12} \sin \beta_{12} \cdot \dot{\beta}_{12} = 0 \quad (5.62)$$

$$\dot{y} : b_9 \cos \beta_9 \cdot \dot{\beta}_9 + \dot{b}_{11} \sin \beta_9 + b_{11} \cos \beta_9 \cdot \dot{\beta}_9 + b_{10} \cos (\beta_5 + \pi) \cdot \dot{\beta}_5 + b_4 \cos \beta_4 \cdot \dot{\beta}_4 + b_{12} \cos \beta_{12} \cdot \dot{\beta}_{12} = 0. \quad (5.63)$$

Vektorová rovnice třetí smyčky má tvar

$$\vec{b}_6 + \vec{b}_5 + \vec{b}_4 + \vec{b}_{12} = \vec{0}. \quad (5.64)$$

Rozepsané tvary do směrů x a y mají tvar

$$x : b_6 \cos \beta_6 + b_5 \cos \beta_5 + b_4 \cos \beta_4 + b_{12} \cos \beta_{12} = 0 \quad (5.65)$$

$$y : b_6 \sin \beta_6 + b_5 \sin \beta_5 + b_4 \sin \beta_4 + b_{12} \sin \beta_{12} = 0. \quad (5.66)$$

Derivace těchto rovnic mají tvar

$$\dot{x} : -b_6 \sin \beta_6 \cdot \dot{\beta}_6 - b_5 \sin \beta_5 \cdot \dot{\beta}_5 - b_4 \sin \beta_4 \cdot \dot{\beta}_4 - b_{12} \sin \beta_{12} \cdot \dot{\beta}_{12} = 0 \quad (5.67)$$

$$\dot{y} : b_6 \cos \beta_6 \cdot \dot{\beta}_6 + b_5 \cos \beta_5 \cdot \dot{\beta}_5 + b_4 \cos \beta_4 \cdot \dot{\beta}_4 + b_{12} \cos \beta_{12} \cdot \dot{\beta}_{12} = 0. \quad (5.68)$$

Maticový zápis těchto rovnic má tvar

$$\vec{J}_z \vec{z} + \vec{J}_q \vec{q} = \vec{0}, \quad (5.69)$$

kde

$$\vec{J}_z = \begin{bmatrix} -b_3 s \beta_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -b_{12} s \beta_{12} \\ b_3 c \beta_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{12} c \beta_{12} \\ 0 & -b_4 s \beta_4 & -b_{10} s (\beta_5 + \pi) & 0 & -b_9 s (\beta_9) - b_{11} s (\beta_9) & -b_{12} s \beta_{12} \\ 0 & b_4 c \beta_4 & b_{10} c (\beta_5 + \pi) & 0 & b_9 c (\beta_9) + b_{11} c (\beta_9) & b_{12} c \beta_{12} \\ 0 & -b_4 s \beta_4 & -b_5 s \beta_5 & -b_6 s \beta_6 & 0 & -b_{12} s \beta_{12} \\ 0 & b_4 c \beta_4 & b_5 c \beta_5 & b_6 c \beta_6 & 0 & b_{12} c \beta_{12} \end{bmatrix}, \quad (5.70)$$

kde s je zkratka pro \sin a c je zkratka pro \cos ,

$$\vec{J}_q = \begin{bmatrix} \cos(\beta_1) & 0 \\ \sin(\beta_1) & 0 \\ 0 & \cos(\beta_9) \\ 0 & \sin(\beta_9) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.71)$$

$$\vec{z} = [\dot{\beta}_3 \ \dot{\beta}_4 \ \dot{\beta}_5 \ \dot{\beta}_6 \ \dot{\beta}_9 \ \dot{\beta}_{12}]^T, \quad (5.72)$$

$$\vec{q} = [\dot{b}_1 \ \dot{b}_{11}]^T. \quad (5.73)$$

Poloha bodu M

Poloha bodu M, který se nachází na konci posledního článku prstu, je vyjádřena pomocí vektoru \vec{b}_6 a vektoru směřujícího z bodu G do bodu M.

Rozepsáním vektorové rovnice do směrů x a y vzniknou rovnice ve tvaru

$$x_M = b_6 \cos \beta_6 + |GM| \cos (\beta_5 + \angle EGM) \quad (5.74)$$

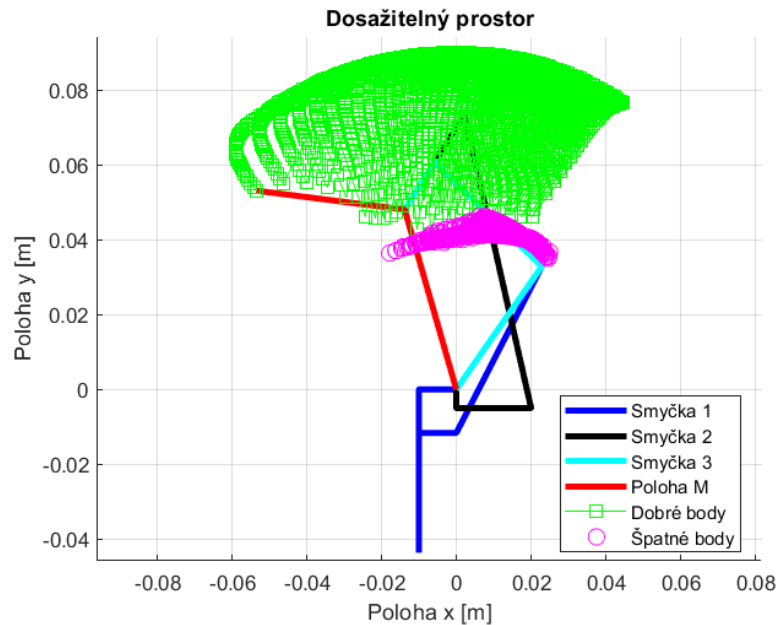
$$y_M = b_6 \sin \beta_1 + |GM| \sin (\beta_5 + \angle EGM), \quad (5.75)$$

kde $\angle EGM$ je v radiánech a $|GM|$ je vzdálenost bodu G od bodu M .

Dosažitelný prostor

Hranice intervalů Q_1 a Q_2 pro hnací členy byly stanoveny s ohledem na limitace kvůli kolizím s dalšími tělesy následovně. Intervaly nezávislých souřadnic b_1 a b_{11} byly rozděleny každý na padesát dílků s hranicemi $b_1 \text{ limit} = \langle 0; 0,035 \rangle m$ a $b_{11} \text{ limit} = \langle 0; 0,035 \rangle m$

Odhady závislých souřadnic pro počátek iteračního cyklu byly stanoveny jako $\beta_3 = 53,4^\circ$, $\beta_4 = 251,4^\circ$, $\beta_5 = 335^\circ$, $\beta_6 = 54,6^\circ$, $\beta_9 = 26,6^\circ$, $\beta_{12} = 173,3^\circ$. Pomocí animace smyček byly vykresleny na obrázku 5.27 body podle dosažené přesnosti při výpočtu.



Obrázek 5.27: Dosažitelný prostor prstu gripperu DH AG-95.

Dosažitelný prostor prstu gripperu je kvůli jeho komplexní konstrukci limitován přítomností dalších těles, která brání v dalším pohybu. Výhodou tohoto gripperu je, že hlavní oblast, kde je gripper designovaný operovat, je souvislá a není rozdělena na více oblastí.

5.4.2 Silová analýza gripperu DH AG-95

Silová analýza prstu gripperu DH AG-95 byla vytvořena s cílem určit průběh reakcí ve vazbách a určit průběh sil potřebných pro pohon při zatížení gripperu silou $F = 30 N$.

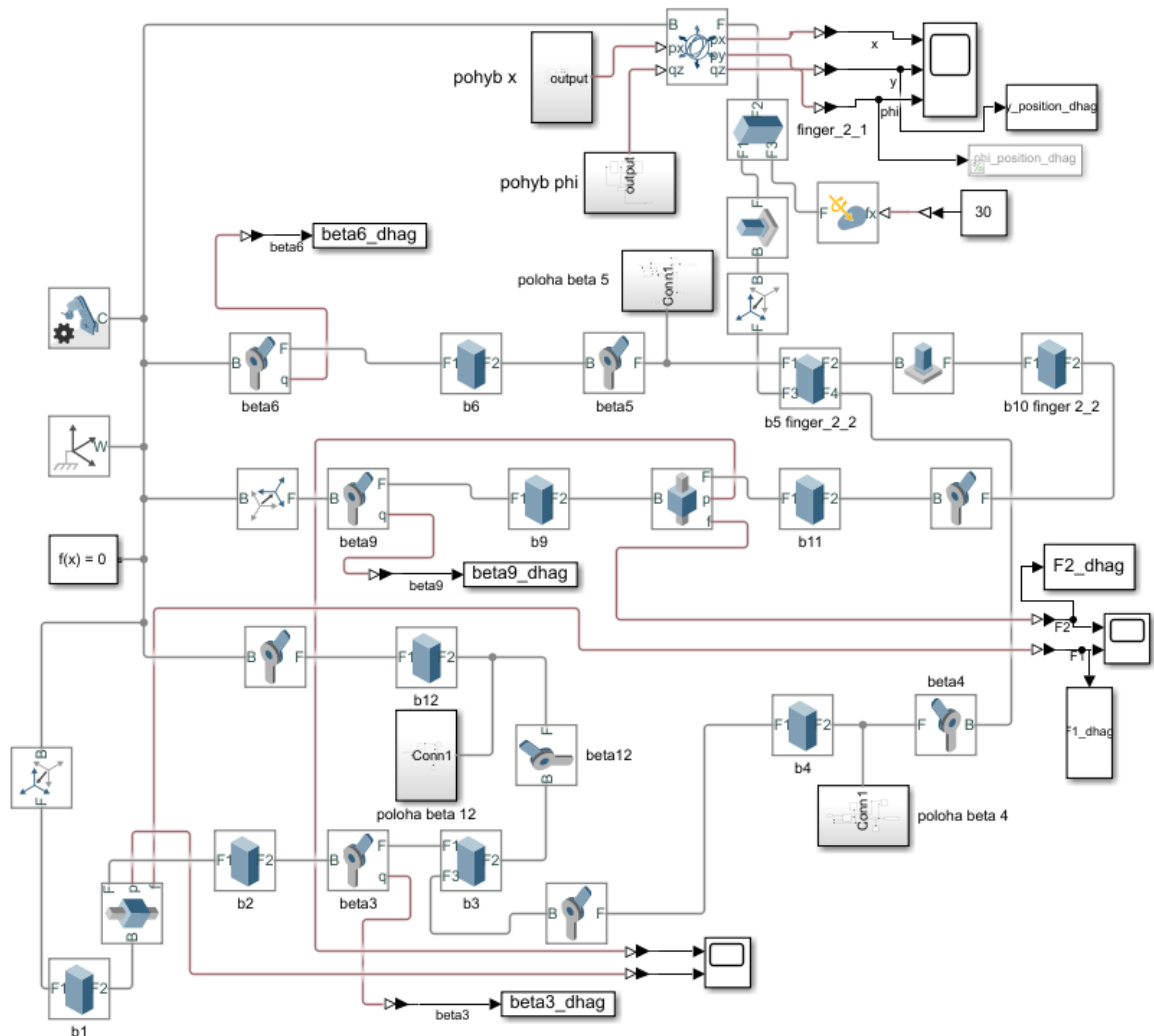
Pohyb byl odsimulován v softwaru Matlab Simscape a reakce byly vypočteny pomocí skriptu v softwaru Matlab na základě získaných poloh kloubů.

Inverzní kinematika

V dosažitelném prostoru gripperu na obrázku 5.27 byla zvolena trajektorie pomocí dvou parametrů, protože se jedná o gripper se dvěma stupni volnosti. Byly zvoleny parametry souřadnice x bodu M a natočení koncového článku prstu gripperu φ . Stejně jako v kapitole 5.3.2 došlo v čase $t = 1,59$ s k natočení koncového článku. Rovnice pro předpis trajektorie pro φ odpovídá rovnici (5.37). Rovnice pro trajektorii ve směru x má tvar

$$x = -0,065 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{20} \cdot t\right) + 0,025 \quad (5.76)$$

Na obrázku 5.28 je zobrazeno schéma modelu prstu gripperu v softwaru Matlab Simscape.

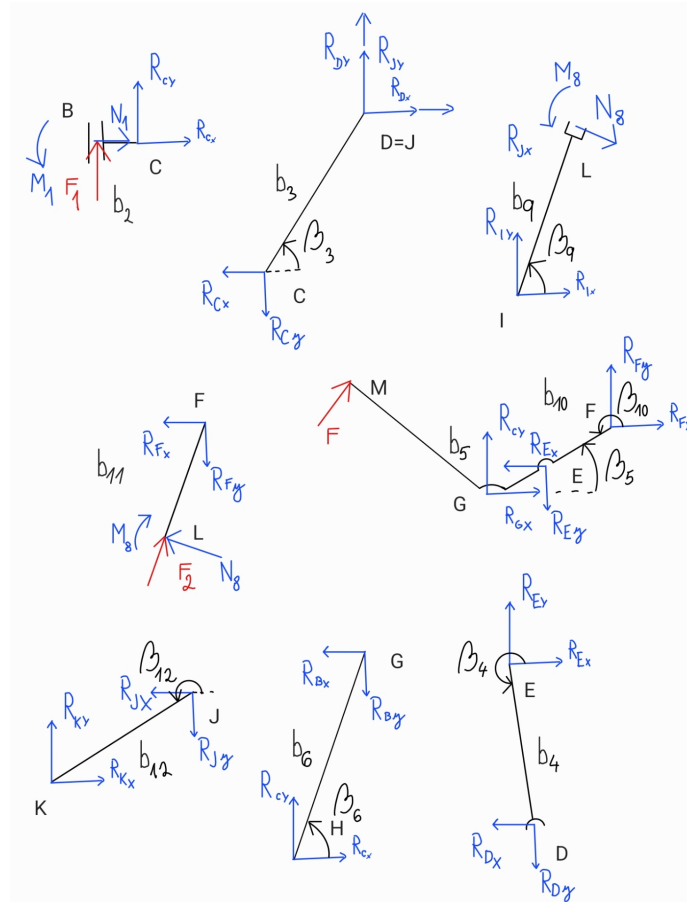


Obrázek 5.28: Model prstu gripperu DH AG-95 v softwaru Matlab Simscape.

Pro výpočet silových účinků byly nasnímány úhly $\beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_9, \beta_{12}$ ve vazbách a uloženy do souborů pro následný výpočet.

Výpočet reakcí a pohonů

Za použití metody uvolňování byly vypočteny v průběhu pohybu reakce ve vazbách a síly F_1 a F_2 , které zajišťují ují pohon prstu. Uvolnění všech těles je na obrázku 5.29.



Obrázek 5.29: Uvolnění prstu gripperu DH AG-95.

Pro každé těleso byly sestaveny silové rovnice rovnováhy do směrů x a y a momentová rovnice rovnováhy okolo vybraného bodu. Pro těleso b_2

$$x: N_1 + R_{Cx} = 0 \quad (5.77)$$

$$y: R_{Cy} + F_1 = 0 \quad (5.78)$$

$$M_C: -F_1 \cdot b_2 + M_1 = 0, \quad (5.79)$$

pro těleso b_3

$$x: -R_{Cx} + R_{Dx} + R_{Jx} = 0 \quad (5.80)$$

$$y: -R_{Cy} + R_{Dy} + R_{Jy} = 0 \quad (5.81)$$

$$M_D : R_{Cy} \cdot b_3 \cos \beta_3 - R_{Cx} \cdot b_3 \sin \beta_3 = 0, \quad (5.82)$$

pro těleso b_4

$$x : -R_{Dx} + R_{Ex} = 0 \quad (5.83)$$

$$y : -R_{Dy} + R_{Ey} = 0 \quad (5.84)$$

$$M_E : -R_{Dx} \cdot b_4 \sin(\beta_4 - \pi) + R_{Dy} \cdot b_4 \cos(\beta_4 - \pi) = 0, \quad (5.85)$$

pro těleso b_5 a b_{10}

$$x : -R_{Ex} + R_{Fx} + R_{Gx} + F \cdot \cos\left(\angle EGM - \frac{\pi}{2} + \beta_5\right) = 0 \quad (5.86)$$

$$y : -R_{Ey} + R_{Fy} + R_{Gy} + F \cdot \sin\left(\angle EGM - \frac{\pi}{2} + \beta_5\right) = 0 \quad (5.87)$$

$$M_G : R_{Ex} \cdot b_5 \sin \beta_5 - R_{Ey} \cdot b_5 \cos \beta_5 - R_{Fx} \cdot (b_5 + b_{10}) \sin \beta_5 + R_{Fy} \cdot (b_5 + b_{10}) \cos \beta_5 - F \cdot |GM| = 0, \quad (5.88)$$

pro těleso b_6

$$x : -R_{Gx} + R_{Hx} = 0 \quad (5.89)$$

$$y : -R_{Gy} + R_{Hy} = 0 \quad (5.90)$$

$$M_G : +R_{Hx} \cdot b_6 \sin \beta_6 - R_{Hy} \cdot b_6 \cos \beta_6 = 0, \quad (5.91)$$

pro těleso b_{12}

$$x : R_{Kx} - R_{Jx} = 0 \quad (5.92)$$

$$y : R_{Ky} - R_{Jy} = 0 \quad (5.93)$$

$$M_J : R_{Kx} \cdot b_{12} \sin(\beta_{12} - \pi) - R_{Ky} \cdot b_{12} \cos(\beta_{12} - \pi) = 0, \quad (5.94)$$

pro těleso b_9

$$x : R_{Ix} + N_8 \cdot \cos \beta_9 = 0 \quad (5.95)$$

$$y : R_{Iy} - N_8 \cdot \sin \beta_9 = 0 \quad (5.96)$$

$$M_I : -N_8 \cdot b_9 + M_8 = 0, \quad (5.97)$$

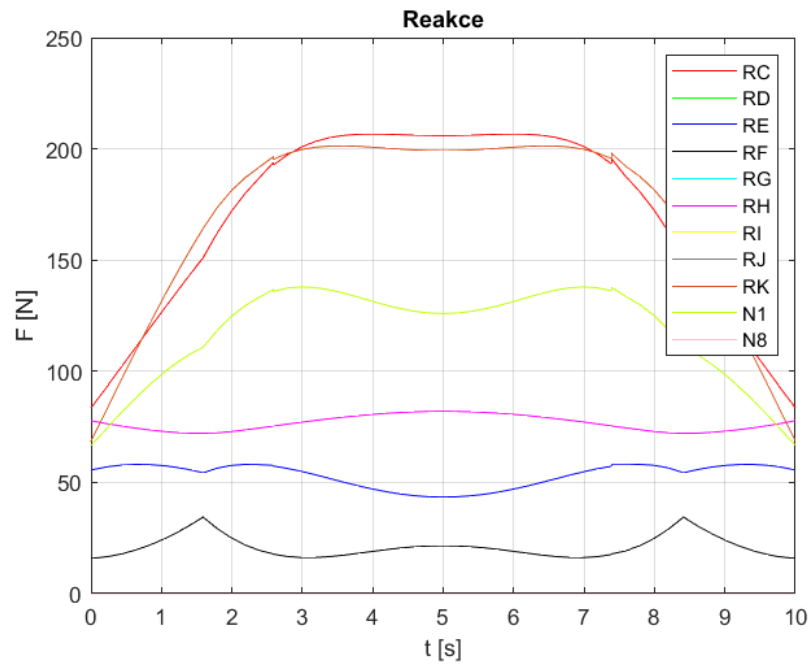
pro těleso b_{11}

$$x : -R_{Fx} - N_8 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta_{11}\right) + F_2 \cos \beta_{11} = 0 \quad (5.98)$$

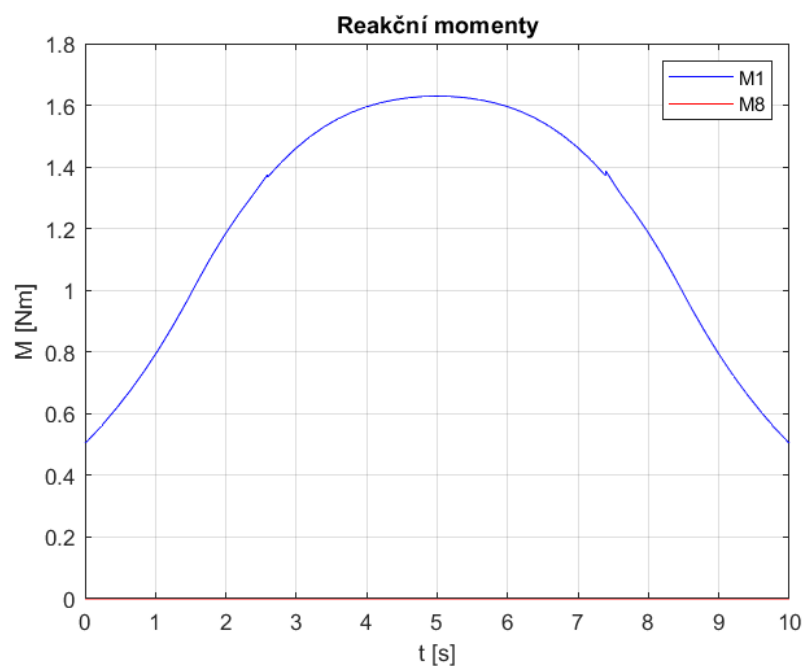
$$y : -R_{Fy} + N_8 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_{11}\right) + F_2 \sin \beta_{11} = 0 \quad (5.99)$$

$$M_F : -N_8 \cdot b_{11} - M_8 = 0. \quad (5.100)$$

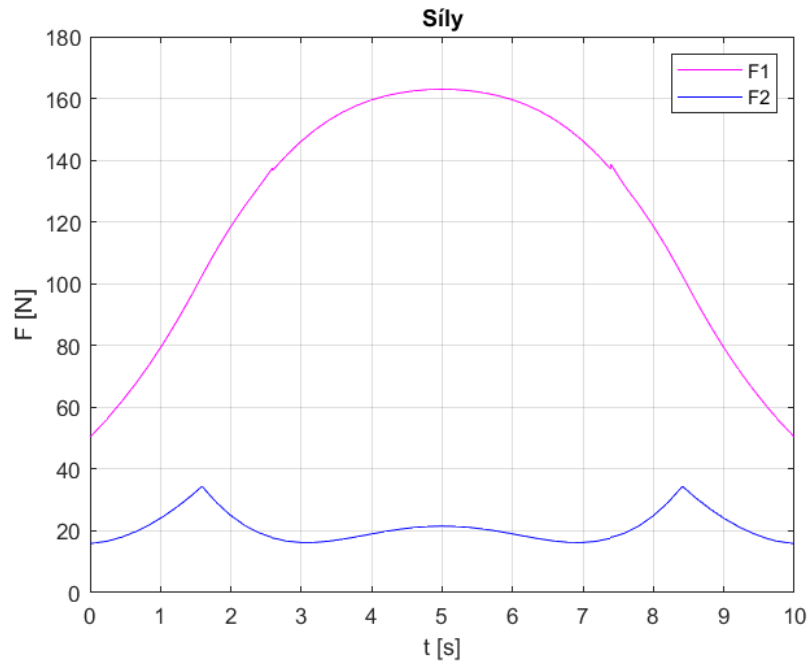
Pomocí této soustavy rovnic je možné získat průběh reakcí a pohánějících sil během celého pohybu. Průběh reakčních sil ve vazbách je znázorněn v grafu 5.30, reakční momenty jsou znázorněny v grafu 5.31 a potřebné síly pro pohon F_1 a F_2 jsou znázorněny v grafu 5.32. Grafy obsahují několik špiček, kde dochází k prudkým změnám silových účinků a to na začátku a konci simulace z důvodu neplynulého rozjezdu a potom v přechodu z nulového natočení φ a v místě návratu.



Obrázek 5.30: Průběhy reakčních sil ve vazbách gripperu DH AG-95



Obrázek 5.31: Průběhy reakčních momentů M_1 a M_8 gripperu DH AG-95



Obrázek 5.32: Průběhy hnacích sil F_1 a F_2 ve vazbách gripperu DH AG-95

5.4.3 Optimalizace gripperu DH AG-95

Optimalizace gripperu DH AG-95 byla provedena stejným způsobem jako optimalizace gripperu Robotiq v kapitole 5.3.3 s tím rozdílem, že nebyly optimalizovány momenty M_1 a M_2 , ale hnací síly F_1 a F_2 . Souřadnice y , od které byly počítány odchylky, byla zvolena $y = 0,08301 \text{ m}$.

Nákladová funkce

Nákladová funkce byla znovu rozdělena na dvě části. První část, která byla vyhodnocována v časovém intervalu $\langle 0; 1,6 \rangle \text{ s}$ a $\langle 8,4; 10 \rangle \text{ s}$, má tvar

$$T = \sum_w (100 \cdot (y_{real\ w} - y_{0,15\ w}))^2 + F_{1\ w}^2 + F_{2\ w}^2 \quad (5.101)$$

a v časovém intervalu $\langle 1,6; 8,4 \rangle \text{ s}$ vyhodnocuje pouze síly ve tvaru

$$T = \sum_w F_{1\ w}^2 + F_{2\ w}^2 \quad (5.102)$$

Pro odchylku y byl zvolen váhový koeficient 100, aby hodnoty odchylek dosahovaly řádu o jeden nižší, než jakého dosahují průběhy sil.

Minimalizační algoritmus

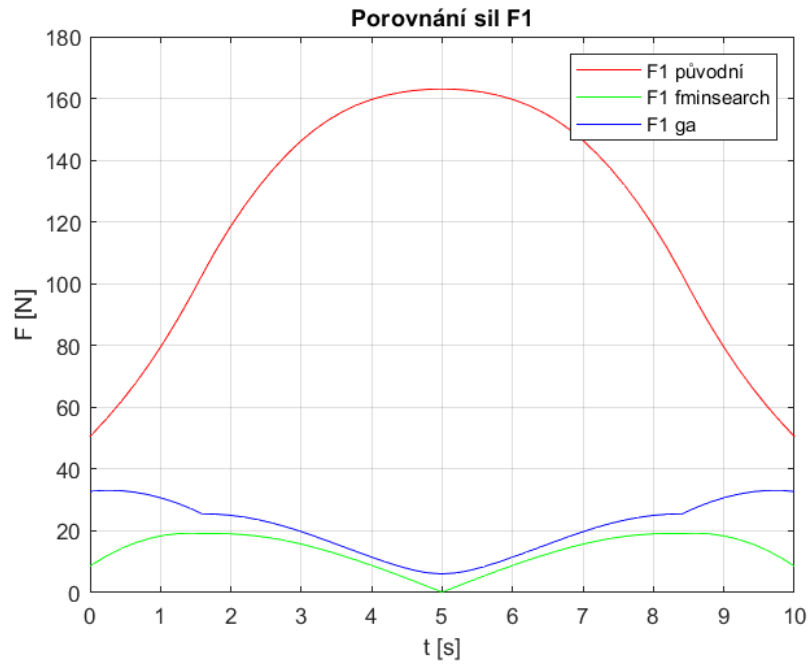
Nejprve byla pro optimalizaci použita funkce *fminsearch* s původními rozměry jako počátečními hodnotami. Nákladová funkce pro původní rozměry měla hodnotu $T = 9,0983 \cdot 10^5$ a na konci dobehnutí algoritmu byla hodnota funkce $T = 1,3146 \cdot 10^4$. Avšak funkce *fminsearch* nepoužívá omezení intervalů, ve kterých se musí řešení nacházet. To mělo za následek, že model zdegeneroval do nesmyslných rozměrů a gripper byl reálně nesestavitelný. Výsledky této optimalizace proto nejsou použitelné.

Z tohoto důvodu byla provedena optimalizace pomocí funkce *ga*, což je genetický algoritmus. Aby byla alespoň částečně zajištěna reálná sestavitelnost modelu, byly zvoleny poměrně úzké intervaly, které omezovaly měnící se rozměry. Pomocí genetického algoritmu bylo dosaženo hodnoty nákladové funkce $T = 4,3486 \cdot 10^4$. Rozměry, kterých bylo dosaženo pomocí těchto minimalizačních algoritmů, jsou v tabulce 5.6.

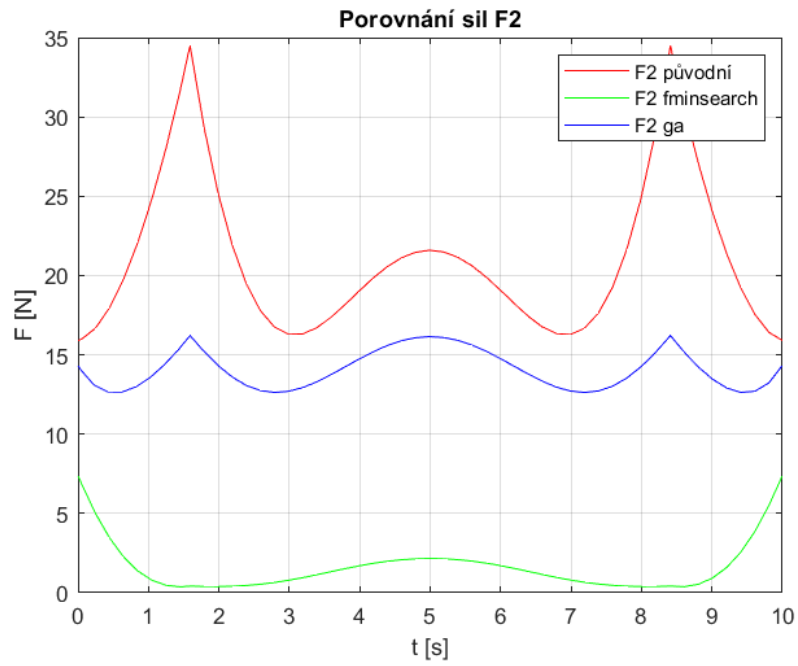
Rozměry	Původní	<i>Fminsearch</i>	<i>Ga</i>
b_2	0,01 m	0,0187 m	0,0092 m
b_3	0,05 m	0,0571 m	0,0547 m
b_4	0,04 m	0,0778 m	0,0339 m
b_5	0,015 m	0,0143 m	0,0144 m
b_6	0,05 m	0,0361 m	0,0451 m
b_7	0,01 m	-0,0623 m	0,0187 m
b_8	0,043642 m	0,0159 m	0,0368 m
b_9	0,040418 m	0,0504 m	0,0387 m
b_{10}	0,015 m	0,0464 m	0,0298 m
b_{12}	0,04 m	0,0838 m	0,0499 m
b_{13}	0,005 m	0,0103 m	0,0083 m
b_{14}	0,02 m	0,0924 m	0,0250 m
$ GM $	0,0655 m	0,0152 m	0,0312 m
$\angle EGM$	115°	8,4534°	90,391°

Tabulka 5.6: Porovnání rozměrů podle optimalizačního algoritmu prstu gripperu DH AG-95

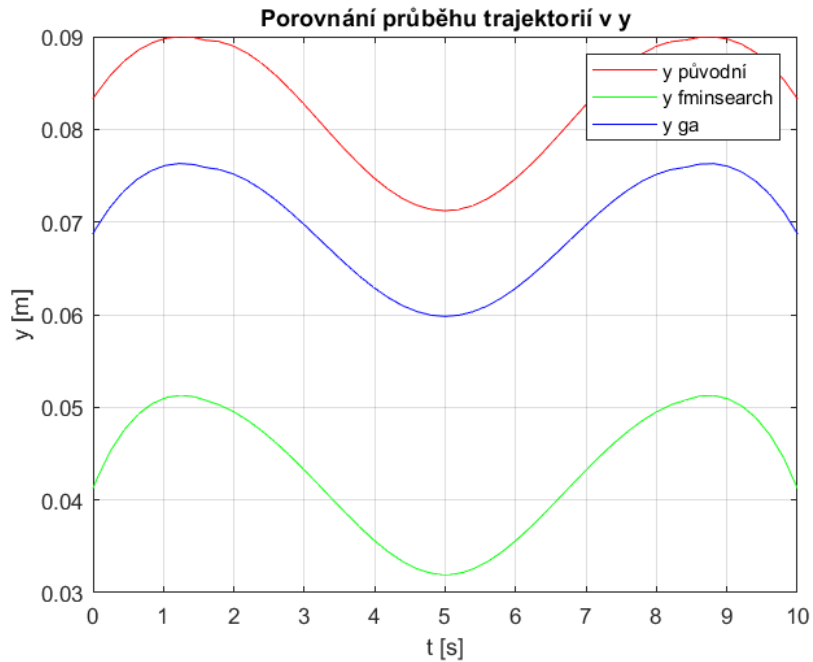
Porovnání průběhů reakčních sil, momentů, sil F_1 a F_2 a souřadnice y podle optimalizační metody je v grafech 5.33, 5.34 a 5.35. Z grafů vyplývá, že pomocí genetického algoritmu došlo k celkovému snížení síly F_1 a lehkému vyhlazení jejího průběhu. U síly F_2 došlo ke snížení špiček při přechodech z nulového natočení a celkovému snížení celého průběhu. U průběhu souřadnice y došlo prakticky pouze k posunutí.



Obrázek 5.33: Porovnání sil F_1 gripperu DH AG-95.



Obrázek 5.34: Porovnání sil F_2 v prstu gripperu DH AH-95.

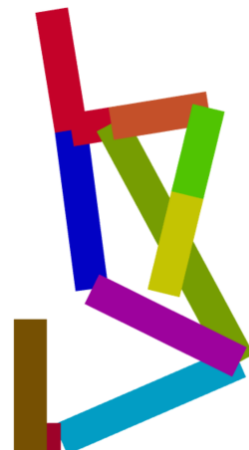


Obrázek 5.35: Porovnání souřadnice y v prstu gripperu DH AG-95.

Na obrázcích 5.36 a 5.37 jsou zobrazeny simulační modely před a po optimalizaci pomocí ga .



Obrázek 5.36: Původní simulační model prstu gripperu DH AG-95.



Obrázek 5.37: Simulační model prstu gripperu DH AG-95 po optimalizaci pomocí ga .

5.5 Shrnutí praktické části

V praktické části byly vybrány tři grippery různě složité konstrukce. Cílem bylo provést jejich analýzu pro následné porovnání a posouzení jejich vhodnosti pro robotické vozítko. Absolutní číselné porovnání těchto gripperů není možné z důvodu rozdílných rozměrů, ale lze pozorovat určité vzorce.

5.5.1 Porovnání dosažitelného prostoru

Dosažitelný prostor, kterého je gripper Hiwonder schopný dosáhnout, je jednoduchá křivka. Tato křivka neobsahuje žádné body, ve kterých by nebylo dosaženo požadované přesnosti výpočtu. Jeden stupeň volnosti gripperu umožňuje pouze silový úchop, což může být nevýhodou při uchopování složitějších předmětů.

Gripper Robotiq je schopen dosáhnout podstatně většího prostoru než gripper konstrukce Hiwonder. Je schopen udržet po celou dobu úchopu nulové natočení koncového článku prstu pro silový úchop. V této oblasti dosáhne stejných výsledků, jako gripper Hiwonder. Avšak díky jeho konstrukci, která má dva stupně volnosti, je schopen využívat i tvarový úchop, který je jistější a vyžaduje menší sílu. Nevýhodou dosažitelného prostoru tohoto gripperu je, že obsahuje mnoho poloh, ve kterých nebylo dosaženo požadované přesnosti a je nutné se jim vyhnout při využívání gripperu.

Dosažitelný prostor gripperu DH AG-95 eliminuje oproti gripperu Robotiq oblast uvnitř dosažitelného prostoru, kde nebylo dosaženo požadované přesnosti. Opět umožňuje využití tvarového i silového úchopu, ale jeho rozsah je omezen složitou konstrukcí gripperu.

5.5.2 Porovnání silových účinků

Pro pohon gripperu Hiwonder byl zapotřebí jeden moment M_1 . Výhodou tohoto gripperu je, že tento moment po rozpořhybování gripperu téměř nekolísá a to ani při změně směru pohybu. Reakční síly dosahují v polovině simulace při změně orientace pohybu svého maxima, avšak jeho vrchol je hladký a nedosahuje výrazně vyšších hodnot sil než ve zbytku simulace. Vhodnou změnou, která by učinila průběh silových účinků lepší, by bylo upravení předpisu pohybu tak, aby simulace začínala a končila s plynulým rozjezdem a zpomalením do nulové rychlosti, protože takto dochází na začátku a na konci simulace ke skoku silových účinků. Tento problém se vyskytuje u všech tří simulovaných gripperů.

Gripper Robotiq je poháněn dvěma momenty M_1 a M_2 . Jejich průběh není tak hladký jako průběh momentu u gripperu Hiwonder, avšak to je způsobeno změnou trajektorie, kdy gripper přechází do tvarového úchopu a následně zpět do silového. V tomto bodě dochází opět k ostré špičce jak momentů, tak reakčních sil z důvodu náhlé změny orientace pohybu pro většinu členů. Stejně jako gripper Hiwonder, dosahuje gripper Robotiq jednoho z vrcholů uprostřed simulace. Některé reakce v něm dosahují maxima, ale oproti špičkám při přechodu do tvarového úchopu je tento vrchol hladký.

Gripper DH AG-95 se od ostatních gripperů odlišuje tím, že využívá lineární pohony ve schématech symbolizovaných posuvnou vazbou. Gripper tak pohánějí dvě síly F_1 a F_2 , kde síla F_1 je několikanásobně větší, než F_2 . Průběhy reakčních sil obsahují špičky ve stejných místech jako předchozí gripper.

5.5.3 Porovnání optimalizací

Pro optimalizaci rozměrů byly použity dvě funkce. První byla funkce *fminsearch*, která hledala lokální minimum nákladové funkce. Její výhodou je, že lze nastavit počáteční podmínky, díky kterým může nalézt lokální minimum v okolí již existujícího řešení a pouze tak doladit stávající rozměry. Toho bylo dosaženo při optimalizaci gripperu Hiwonder. Při optimalizaci gripperu Robotiq bylo dosaženo lepšího řešení, než bylo původní. Zásadní nevýhodou této funkce je nemožnost jejího omezení, kde se má řešení nacházet. Z tohoto důvodu optimalizace gripperu DH AG-95 doběhla, ale s řešením, které nebylo použitelné.

Druhá funkce, která byla použita pro optimalizaci je funkce *ga*. Jedná se o genetický algoritmus. Její výhodou je, že při dostatečném počtu otestovaných jedinců je schopna nalézt globální minimum nákladové funkce. Pomocí této funkce bylo dosaženo lepšího výsledku než pomocí *fminsearch* u gripperu Robotiq a hlavně u gripperu DH AG-95, kde díky omezení intervalů, ve kterých se nachází řešení, bylo nalezeno zkonstruovatelné řešení.

5.5.4 Výběr gripperu

Gripper Hiwonder vyniká svojí jednoduchostí. Velkou výhodou je jeho váha a zástavbový prostor, protože využívá pouze jeden pohon. Díky tomu je také velmi snadný na řízení. Umožňuje uchopit součást pouze pomocí silového úchopu, avšak pro většinu aplikací, pro která jsou robotická vozítka určena, to může být dostačující. Tento gripper tak patří mezi nejvhodnější z vybrané trojice pro robotická vozítka.

Gripper Robotiq je vhodné použít, pokud je nutná manipulace se složitějšími předměty, které není možné uchopit silovým úchopem.

Poslední gripper DH AG-95 nepřináší tak zásadní zlepšení oproti gripperu Robotiq, které by upřednostňovalo jeho využití pro robotická vozítka. Jeho zástavbové prostory jsou z vybrané trojice největší. Nevýhodou je kombinace dvou různých typů pohonů, takže vzniká nutnost provozovat dva různé systémy, které zabírají prostor na robotickém vozítku a zvyšují jeho hmotnost. Sjednocením těchto pohonů by došlo ke zjednodušení, avšak konstrukce gripperu by se musela pravděpodobně změnit.

6 Závěr

Tato práce se zabývala grippery pro robotická vozítka. Bylo splněno zadání provedení rešerše na používané grippery pro robotická vozítka. Dále pak byla vybrána tři možná řešení pro využití na robotickém vozítku. Na těchto gripperech byla provedena kinematická a silová analýza a následně došlo k optimalizaci rozměrů gripperu pro vybrané užité vlastnosti. V první kapitole byly blíže specifikovány pojmy jako gripper a robotické vozítko a byly stanoveny základní požadavky, které grippery na robotických vozítkách musí splnit v určitých okolních podmínkách.

V druhé kapitole byl analyzován uchopovací proces gripperů. Tato kapitola se zabývala různými typy úchopů, silami potřebnými pro udržení a manipulaci s uchopovaným předmětem. Dále se zabývala dosažitelným prostorem gripperů.

třetí kapitola tvořila hlavní část rešerše. Byly analyzovány pohony používané pro grippery na robotických vozítkách. Konkrétně byly porovnány vlastnosti pneumatických, elektrických a hydraulických pohonů. Dále pak bylo provedeno rozdělení gripperů podle počtu prstů a článků, z kterých se skládají. V poslední části byly analyzovány grippery, které přesně nespádají do předchozích kategorií. V této kategorii se nachází hlavně gripper pro sběr hornin, což je velmi častá úloha robotických vozítek.

Ve čtvrté kapitole byly obecně představeny metody a postupy, které byly využity v praktické části práce. Jedná se o vektorovou metodu, základní princip inverzní kinematiky, metoda uvolňování a optimalizace.

V praktické části této práce byly v páté kapitole analyzovány tři vybrané grippery. Pomocí vektorové metody byl u každého gripperu analyzován dosažitelný prostor, do kterého je gripper schopen se dostat bodem na konci posledního článku prstu. Dále byla provedena silová analýza v průběhu pohybu, kdy došlo k zavření a otevření gripperu. Do grafů byly vykresleny průběhy reakčních silových účinků a momenty nebo síly potřebné pro pohon gripperu při jeho zatížení. Nakonec byla provedena optimalizace rozměrů převážně pro snížení nároků na pohon. Z analyzovaných řešení bylo vybráno první řešení, které je nejjednodušší, má nejmenší hmotnost a je dostačující pro většinu aplikací na robotickém vozítku.

Možným pokračováním této práce by bylo sjednocení rozměrů mezi gripperu, aby byly absolutně porovnatelné. Dalším krokem by bylo sestavení přesnějšího modelu gripperu a zpřesnění průběhu zatížení gripperu a kontaktu uchopovaného předmětu s gripperem. Dále by bylo vhodné optimalizovat pouze některé rozměry pro zachování sjednocených rozměrů na začátku. Nakonec by bylo možné vyrobit první prototypy a přejít do výrobní části.

Literatura

- [1] WOLF, Andreas a SCHUNK, Henrik. Grippers in motion: the fascination of automated handling tasks. Munich: Carl Hanser Verlag, [2018]. ISBN 978-156-9907-146.
- [2] MONKMAN, Gareth; HESSE, Steffan; STEINMANN, Ralf a SCHUNK, Henrik. Robot Grippers. Weinheim: John Wiley, 2007. ISBN 978-3-527-40619-7.
- [3] DOĞAN, BURAK. Development of a Two-fingered and a Four-fingered Robotic Gripper. Master's Thesis. Turkey: Middle East Technical University, May 2010.
- [4] Types Of Robot Grippers And Their Applications. Online. Dorna Robotics. 2023. Dostupné z: <https://dorna.ai/blog/types-of-grippers-for-robots/>. [cit. 2024-07-16].
- [5] RAO, Ravi. What are End Effectors? Types of End Effectors in Robotics and Applications. Online. Wevolver. 2024, 08 Apr, 2024. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/end-effector>. [cit. 2024-07-16].
- [6] HERMAN, Nurul Aqilah; RAMLI, Roshahliza M; ADIB, Mohd Azrul Hisham Mohd a WIDIA, Mirta. Development of Robotic Rovers: A Review. Online. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, roč. 697, č. 1, s. 1. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/697/1/012034>. [cit. 2024-07-16].
- [7] European Rover Challenge. Online. 2014. Dostupné z: <https://roverchallenge.eu/>. [cit. 2024-07-16].
- [8] University Rover Challenge. Online. 2006. Dostupné z: <https://urc.marssociety.org/home>. [cit. 2024-07-16].
- [9] Rover Waratah. Online. In: Monash Nova Rover. [2017]. Dostupné z: https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5d907deadfb23123fec64602/63d5a1ea-9299-43b6-8841-4a1d54ac5de6/IMG_6992.jpg?format=2500w. [cit. 2024-07-16].
- [10] Mars Facts. Online. NASA. C2024. Dostupné z: <https://science.nasa.gov/mars/facts/>. [cit. 2024-07-16].
- [11] Moon Facts. Online. NASA. C2024. Dostupné z: <https://science.nasa.gov/moon/facts/>. [cit. 2024-07-16].

- [12] SPACE & ROBOTICS COMPETITION. Online. European Rover Challenge. 2014. Dostupné z: <https://roverchallenge.eu/robotics-competition/>. [cit. 2024-07-16].
- [13] Maintenance panel. Online. In: European Rover Challenge. 2014. Dostupné z: https://roverchallenge.eu/wp-content/uploads/2023/12/min_maintenance4.webp. [cit. 2024-07-16].
- [14] Adheso. Online. Schunk. C2024. Dostupné z: https://schunk.com/fi/en/gripping-systems/adhesive-grippers/adheso/c/PGR_5510. [cit. 2024-07-17].
- [15] Types of Grippers Used in Manufacturing. Online. UNIVERSAL ROBOTS. Universal Robots. 2020. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/blog/types-of-grippers-used-in-manufacturing/> [cit.2024-07-04].
- [16] JENSEN, Sara. When to Specify and Use Pneumatics. Online. Power & Motion. 2022. Dostupné z: <https://www.powermotiontech.com/pneumatics/article/21252902/when-to-specify-and-use-pneumatics>. [cit. 2024-07-04].
- [17] JENSEN, Sara. Understanding When to Use Hydraulics. Online. Power & Motion. 2022. Dostupné z: <https://www.powermotiontech.com/hydraulics/article/21254743/understanding-when-to-use-hydraulics>. [cit. 2024-07-08].
- [18] JENSEN, Sara. Why Electric Actuators are Replacing Hydraulics. Online. Power & Motion. 2024. Dostupné z: <https://www.powermotiontech.com/mechatronics/actuators/article/55036713/why-electric-actuators-are-replacing-hydraulics>. [cit. 2024-07-08].
- [19] Robot Grippers Explained. Online. Universal Robots. 2020. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/blog/robot-grippers-explained/>. [cit. 2024-07-14].
- [20] OWEN-HILL, Alex. Parallel Robot Grippers: Which is Best? Online. Robotiq. 2018. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/adaptive-vs-parallel-grippers-which-is-best>. [cit. 2024-07-14].
- [21] DINWIDDIE, Keith. Industrial Robotics. USA: Cengage Learning, 2019. ISBN 978-1-1336-1099-1.
- [22] Our Rovers. Online. Monash Nova Rover. [2017]. Dostupné z: <https://www.novarover.space/rovers>. [cit. 2024-07-15].
- [23] Schunk SWG. Online. In: Schunk. C2024. Dostupné z: https://d16vz4puxlxml1.cloudfront.net/image/076200133045-Prod/image_h894o87g8t7n383m07amipga64/-FWEBP-B1440. [cit. 2024-07-15].
- [24] Robotiq 2F-85. Online. Unchained Robotics. C2024. Dostupné z: <https://unchainedrobotics.de/en/products/end-of-arm-effectors/grippers/finger-grippers/robotiq-2f-85>. [cit. 2024-07-15].

- [25] SCHUNK EGU 50. Online. Unchained Robotics. C2024. Dostupné z: <https://unchainedrobotics.de/en/products/end-of-arm-effectors/grippers/finger-grippers/schunk-egu-50>. [cit. 2024-07-15].
- [26] Two finger end effector. Online. In: Monash Nova Rover. [2017]. Dostupné z: https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5d907deadfb23123fec64602/1580124774294-IE0PDS29VUHQ00DPR90T/DSC_0314.JPG?format=2500w. [cit. 2024-07-15].
- [27] General Presentation Robotiq 2F-85 and 2F-140. Online. Robotiq. 2012. Dostupné z: https://assets.robotiq.com/website-assets/support_documents/document/online/2F-85_2F-140_TM_InstructionManual_HTML5_20190503.zip/2F-85_2F-140_TM_InstructionManual_HTML5/Content/1.%20General_Presentation.htm. [cit. 2024-07-15].
- [28] 2-Finger parallel and encompassing grips. Online. In: Robotiq. 2012. Dostupné z: https://assets.robotiq.com/website-assets/support_documents/document/online/2F-85_2F-140_TM_InstructionManual_HTML5_20190503.zip/2F-85_2F-140_TM_InstructionManual_HTML5/Content/Resources/Images/Version%204/encompassing%20vs%20normal_1and2_521x320.png. [cit. 2024-07-15].
- [29] Schunk PZN-plus. Online. In: Schunk. C2024. Dostupné z: https://d16vz4puxlxml.cloudfront.net/image/076200133045-Prod/image_7qe1hha55557f53heplefeh347/-FWEBP-B1440. [cit. 2024-07-15].
- [30] BÉLANGER-BARRETTE, Mathieu. Why Use a Robot Gripper with 3 Fingers? Online. Robotiq. 2015. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/why-use-a-robot-gripper-with-3-fingers>. [cit. 2024-07-15].
- [31] BÉLANGER-BARRETTE, Mathieu. Robotiq Proud Contributor to Teams at the DARPA Robotics Challenge. Online. Robotiq. 2012. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/robotiq-gripper-to-help-drc-darpa-robots-in-their-quest>. [cit. 2024-07-15].
- [32] Under-actuated three finger end-effector. Online. In: Monash Nova Rover. [2017]. Dostupné z: <https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5d907deadfb23123fec64602/1580192583566-35N7WJI6EFEVD754CB21/rover2.jpg?format=2500w>. [cit. 2024-07-15].
- [33] 3-Finger Adaptive Robot Gripper. Online. In: Robotiq. 2012. Dostupné z: <https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper>. [cit. 2024-07-15].
- [34] Vacuum gripper Coval CVGL335XA50C1. Online. In: Universal Robots. C2024. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/media/1809330/product-image.jpg?width=600&height=650&mode=crop>. [cit. 2024-07-16].
- [35] What's new? ERC'23 on-site competition. Online. European Rover Challenge. 2014. Dostupné z: <https://roverchallenge.eu/whats-new-erc23-on-site-competition/>. [cit. 2024-07-16].

- [36] Rover K3P4. Online. RoverOva. 2016. Dostupné z: <http://rover.vsb.cz/rover.html>. [cit. 2024-07-16].
- [37] NASA. Searching Sandy Soil for Life – Atacama Rover Astrobiology Drilling Studies. Online. NASA. 2018. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/image-article/searching-sandy-soil-life-atacama-rover-astrobiology-drilling-studies/>. [cit. 2024-07-16].
- [38] Rover K3P4. Online. In: RoverOva. 2016. Dostupné z: <http://rover.vsb.cz/assets/images/15-m-1060x706.jpg>. [cit. 2024-07-16].
- [39] ARADS life-detection rover. Online. In: NASA. C2024. Dostupné z: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/03/arads4_acd17-0197-027.jpg. [cit. 2024-07-16].
- [40] NASA. NASA’s Perseverance Rover Gets the Dirt on Mars. Online. NASA. C2024. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/missions/mars-2020-perseverance/perseverance-rover/nasas-perseverance-rover-gets-the-dirt-on-mars/>. [cit. 2024-07-16].
- [41] VALÁŠEK, Michael; ŠIKA, Zbyněk a BAUMA, Václav. Mechanika B. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02919-0.
- [42] MATHWORKS. MATLAB. Version 2022a [software]. Natick, Massachusetts: The MathWorks, Inc., 2022. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [43] MATHWORKS. MATLAB, Simulink, and Simscape Multibody [software]. Version R2022a. Natick, Massachusetts: The MathWorks, Inc., 2022. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simscape-multibody.html>
- [44] VALÁŠEK, Michael; STEJSKAL, Vladimír a BŘEZINA, Jiří. Mechanika A. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 978-80-01-02890-2.
- [45] Hiwonder Metal Picking Gripper for Robotic Arm and Robot DIY. Online. In: Hiwonder. C2024. Dostupné z: https://www.hiwonder.com/cdn/shop/products/2_e57c82b0-7237-4641-ad15-cf65304ff6f4.jpg?v=1642502645. [cit. 2024-07-19].
- [46] Robotiq 2F-85. Online. In: Robotiq. 2012. Dostupné z: https://assets.robotiq.com/website-assets/products/page_image/bb0e4c86fdb1e8ebee6795cf452773880729b0fed8981fcc65e1a2a5789491bb.png. [cit. 2024-07-19].
- [47] DH AG-95. Online. In: Universal Robots. C2024. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/media/1806378/product-picture-gallery2.jpg>. [cit. 2024-07-19].