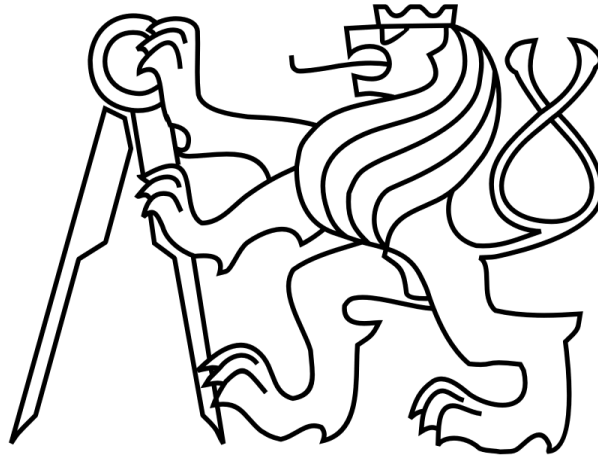


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Návrh úchopné hlavice manipulačního robota

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Seifrt** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **482588**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh úchopné hlavice manipulačního robota

Název bakalářské práce anglicky:

Design of gripper for manipulation robot

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Cílem práce je návrh flexibilní smart uchopovací hlavice pro robot KUKA IIWA vytvořené jako kombinace dostupných aktuátorů, navržených úchopných čelistí a nezbytné sensoriky. Manipulovaný objekt má parametry: max. hmotnost 1 kg; tvar: krychle, válec; max. rozměry dílce: hlavice bude mít vyměnitelné prsty pro různé rozměry. Pro návrh uvažujte jmenovitý rozměr krychle o straně 75 mm a přestavení min +/- 25 mm. Řešení sensoriky úchopu navrhnete tak, aby bylo možno při uchopení objektu kontrolovat nežádoucí deformaci objektu a ev. neuchopení objektu. Požadovány jsou tři prsty hlavice, z toho dva přestavitelné, které umožní změnu uchopování objektu paralelním nebo centrickým způsobem. Osnova práce: Rešerše uchopovacích hlavíc průmyslových robotů. Návrh koncepce uchopovací hlavice dle zadané aplikace. Provedení základních dimezovacích výpočtů. Vytvoření 3D modelu a výkresové dokumentace zvolené finální konstrukční varianty. Rozsah grafické části: Výkres sestavy hlavice. Zpracování tří vybraných výrobních výkresů. Rozsah textové části: 40-60 stran.

Seznam doporučené literatury:

Škařupa, J., Mostýn, V. Teorie průmyslových robotů. 2000, VIENALA
KOLÍBAL, Z. et al. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: VUTIUM, 2016. 788 p. ISBN: 978-80-214-4828-5
Dokumentace komponent a robotů dostupná na internetu.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 24.7.2021

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu své práce, panu doc. Ing. Petru Kolářovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Michalu Rytířovi za jejich vedení, připomínky a rady. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za veškerou podporu a všem ostatním, kteří mi při práci i studiu byli nápomocni.

Anotace

Autor:	Jaroslav Seifrt
Název BP:	Návrh úchopné hlavice manipulačního robota
Rozsah práce:	71 stran
Školní rok:	2021
Škola:	České vysoké učení technické v Praze
Ústav:	Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské DP:	doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Michal Rytíř
Zadavatel:	ČVUT FS, Ú12135 ve spolupráci s ČVUT CIIRC
Využití:	Příslušenství k robotu KUKA IIWA. K manipulaci s hranatými i kulatými objekty náchylnými na poškození, s malými rozměry a hmotnostmi.
Klíčová slova:	uchopovací hlavice, smart hlavice, flexibilní hlavice, kontrola deformací, kontrola přítomnosti objektu
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá řešením a návrhem flexibilní smart úchopné hlavice pro robot KUKA IIWA. Hlavice je definována schopností manipulovat s objekty náchylnými na poškození, s možností uchopování jak hranatých tak kulatých předmětů malých rozměrů a malé hmotnosti, s možností přestavby pozice prstů. Jsou provedeny návrhové a kontrolní výpočty, kinematický a silový rozbor a je vytvořen. Jsou navrženy vhodné snímače pro kontrolu deformací a přítomnosti objektu. Práce obsahuje také základní návrh logiky řízení uchopování.

Annotation

Author:	Jaroslav Seifrt
Title of bachelor's thesis:	Design of gripper for manipulation robot
Extent:	71 pages
Academic year:	2021
University:	Czech technical university in Prague
Department:	Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
Consultant:	Ing. Michal Rytíř
Submitter of the Theme:	CTU FME, Ú12135 in cooperation with ČVUT CIIRC
Application:	Accessories for the KUKA IIWA robot. For manipulation with both square and round objects prone to damage, with small dimensions and weight.
Keywords:	gripper, smart gripper, flexible gripper, deformation control, slipping control
Anotace:	This bachelor's thesis deals with searching flexible smart gripper possibilities and designing one for KUKA IIWA robot. Gripper is able to grab both round and square objects which are prone to damage and have small dimensions and weight. Gripper can change configuration for round and square objects. In this thesis, there are design and control calculations, kinematic and force analysis and 3D model. Control sensors were also designed for both damage and slipping control. The thesis contains the logic of gripping control too.



Obsah

1 Úvod	9
1.1 Cíl práce	9
2 Stav poznání	11
2.1 Kinematika prstových úchopných hlavíc	11
2.2 Dělení úchopných hlavíc	11
2.3 Senzorické smart úchopné hlavice	18
2.4 Flexibilní smart grippery	24
2.5 Závěr rešerše	26
3 Varianty řešení	27
3.1 Bezpečnost úchopu	27
3.2 Spolehlivost úchopu	28
3.3 Návrh kinematiky	28
3.4 Výběr finální varianty	31
4 Popis finální varianty	32
4.1 Kinematika	32
4.2 Kontrola síly a deformace	33
4.3 Kontrola přítomnosti objektu	33
5 Návrhové výpočty	34
5.1 Uchopovací mechanismus	34
5.2 Přestavovací mechanismus	46
6 Popis konstrukce	51
6.1 Návrh uchopovacího prstu	53
7 Kontrolní výpočty	54
7.1 Kontrola lícovaných šroubů	54
7.2 Kontrola napětí vyráběných součástí	55
8 Návrh logiky řízení	57
8.1 Kontrola poškození	57
8.2 Kontrola přítomnosti a uvolnění objektu	57
8.3 Uchopování pevné součásti	58
8.4 Uchopování deformovatelné součásti	58
8.5 Uchopování s kontrolou maximální síly	59
8.6 Uchopování s kontrolou síly i deformace	59
8.7 Kontrola pozice přestavby	59
9 Závěr	63



Seznam veličin

Veličiny	Jednotky	Význam
T	[N]	Třecí uchopovací síla
N	[N]	Normálová uchopovací síla
μ	[-]	Koeficient uchopovacího tření
F	[N]	Síla uchopovacího pneumotoru
tlak	[bar]	Tlak v uchopovacím pneumotoru
T_k	[N]	Normálová síla pro uchopení objektu tvaru koule
T_{h1}	[N]	Normálová síla pro uchopení objektu tvaru hranol pro prst A
T_{h2}	[N]	Normálová síla pro uchopení objektu tvaru hranol pro prst B
F_z	[N]	Síla v západce
F'_z	[N]	Síla pro uvolnění západky
N_p	[N]	Normálová přestavovací síla
T_p	[N]	Tečná přestavovací síla
F_p	[N]	Síla na přestavovacím pneumotoru
R	[N]	Reakce v lícovaných šroubech



1 Úvod

Uchopovací hlavice je nutnou součástí každého manipulačního robotu. Pomocí této hlavice interaguje robot s okolním prostředím a tak koná práci, ke které byl navržen, tedy manipulaci s objekty. Základní vlastností uchopovací hlavice je schopnost uchopit objekt. Ne vždy je uchopení objektu tak snadné, jak se na první pohled může zdát. Uchopovaný objekt může mít různé tvary, velikosti a různé požadavky na uchopení. Tato práce se zabývá hlavicí pro uchopování tvarově rozmanitých objektů. Jsou to objekty hranaté a kulaté. Každý tento tvar je nutné uchopit jiným způsobem a proto musí být hlavice schopna změnit způsob uchopování podle daného tvaru.

Kromě tvaru může být objekt také náchylný na poškození. Tato práce se zabývá právě objektem, který je deformovatelný, případně křehký. V takovém případě musí hlavice umožnit dostatečně šetrné uchopení, aby k takovému poškození objektu nedocházelo. K tomu slouží kontrolní senzory, které na poškozování upozorní. Nápomocný v této věci může být také materiál dotekové vrstvy uchopovacího prstu, či jeho celkové provedení.

Dalším problémem při uchopování zejména nižšími silami je nebezpečí uvolnění a ztráty objektu během uchopování a manipulace. I toto lze ohlídat pomocí vhodně zvolených a umístěných senzorů.

V této práci je navržena taková uchopovací hlavice, která splňuje požadavky na spolehlivé a bezpečné uchopení tvarově rozmanitých objektů náchylných na poškození.

1.1 Cíl práce

Cílem této práce je navrhnout prstovou uchopovací hlavici pro kolaborativního robota Kuka liwa. Hlavice je uzpůsobena pro uchopování křehkých a deformovatelných objektů. Musí být tedy zajištěno, aby nedocházelo k jejich poškozování. Z tohoto důvodu je potřeba vybavit hlavici četnými senzory pro dosažení bezpečného a zároveň spolehlivého uchopení. Jedná se zejména o kontrolu deformace objektu a kontrolu přítomnosti objektu.



Uchopovaný objekt může mít jak tvar koule, tak hranolu. Proto je zapotřebí možnost automatické přestavby hlavice mezi úchopem paralelním a centrálním. Charakteristický rozměr daného objektu je 75 mm. Tento rozměr vyjadřuje délku hrany krychle, případně průměr objektu tvaru koule. Cílem je také navrhnout hlavici s ohledem na cenu a možnost výroby.

Cílem je provést rešerši dostupných smart úchopných hlavic na současném trhu a způsobu kontroly poškození a přítomnosti uchopovaných objektů. Dalším úkolem je vytvořit několik variant úchopné hlavice, vybrat z nich jednu vhodnou a u ní provést základní návrhové a kontrolní výpočty a vytvořit konstrukční návrh reprezentovaný modelem hlavice, sestavným výkresem a danými výrobními výkresy. Je také třeba provést návrh pohonů a návrh vhodné sensoriky pro zajištění správné funkce hlavice. Dále je třeba navrhnout logiku řízení této hlavice.



2 Stav poznání

2.1 Kinematika prstových úchopných hlavic

Kinematika popisuje veškeré pohyby úchopných hlavic, a proto je pro konstrukční návrh velmi důležitá. S ohledem na velké množství různých druhů hlavic je i kinematika často velmi rozdílná a závisí na typu pohonu, principu uchopování a mnoha dalších aspektech. Je provedeno rozdělení jednotlivých kinematik s ohledem na konkrétní na trhu dostupné hlavice.

2.2 Dělení úchopných hlavic

S ohledem na rozsáhlost použití úchopných hlavic je jejich dělení možné provádět podle mnoha aspektů. Kritériem pro dělení může být například fyzikální princip, který umožňuje hlavici uchopit předmět. Jsou to především mechanické hlavice, které využívají třecích sil při uchopení předmětu, dále pak pneumatické úchopné hlavice, které využívají k úchopu tlakového vzduchu. Magnetické úchopné hlavice, nebo hlavice, které využívají adhezní elektrostatickou sílu. [2]

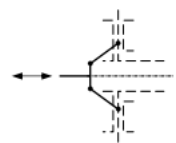
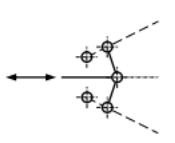
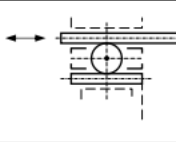
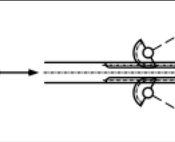
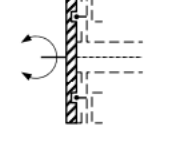
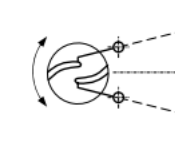
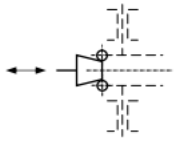
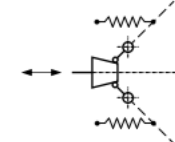
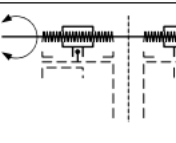
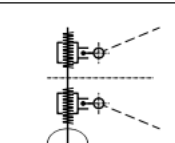
Práce se bude nadále zabývat mechanickými a pneumatickými hlavicemi, které využívají uchopovací prsty.

Mechanické hlavice

Do této kategorie lze zařadit jak pasivní, tak aktivní efekty. Významnější jsou aktivní mechanické úchopné hlavice. Řešení těchto hlavic závisí na typu použitého motoru a na koncových prvcích. Dalším aspektem je princip transformace pohybu. Motory se rozdělují podle druhu použité energie na elektrické servomotory a hydraulické nebo pneumatické motory. Hydraulické motory se pro uchopovací hlavice používají pouze výjimečně. Naproti tomu využití tlakového vzduchu je využíváno hojně. Výhodou je jednoduché dovedení tlakové energie ke koncovým prvkům, a oproti hydraulice, bezpečný provoz. Nevýhodou je však menší jednotkový výkon. Poslední možností je využití elektrických servomotorů. Výhodou je jednoduché a spolehlivé řízení a také snadný přívod energie k motorům. [1, 8]

Další možné dělení úchopných hlavic je podle kinematického uspořádání. Je to uspořádání paralelní či středící též centrální nebo například úhlové. Paralelní kinematika využívá posuvný pohyb čelistí, které mohou být doplněny vzájemnou synchronizací. Pro úhlové kinematické uspořádání je typické naklápění koncového členu. Středící kinematika může využívat jak principu paralelní, tak úhlové struktury. Je však tvořena alespoň třemi prsty tak, aby se střed objektu po uchopení nacházel vždy pod středem úchopné hlavic. Jiné kinematické uspořádání umožňuje například obejmutí uchopovaného objektu. Dále je v této práci použito označení paralelní uchopení pro uchopení ze dvou protilehlých stran a centrální uchopení v případě, že je objekt uchopen třemi koncovými prvky tak, že je automaticky středěn. Toto označení používá většina výrobců. [6][7]

Mechanické hlavice lze dělit podle mnoha aspektů. Pro tuto práci bylo zvoleno dělení podle transformačního mechanismu. Toto rozdělení je vyjádřeno obrázkem 2.1.

Typ MÚE		Mechanismus transformačního bloku	Typ MÚE	
Označení	Posuvný pohyb ÚP		Rotační pohyb ÚP	Označení
T1		kloubový		T2
T1		ozubený		T2
T3		vačkový		T4
T1		vačkový		T2
T3		šroubový		T4

Obrázek 2.1: Transformační mechanismy MÚH [1, s. 143]

Pneumatické úchopné hlavice

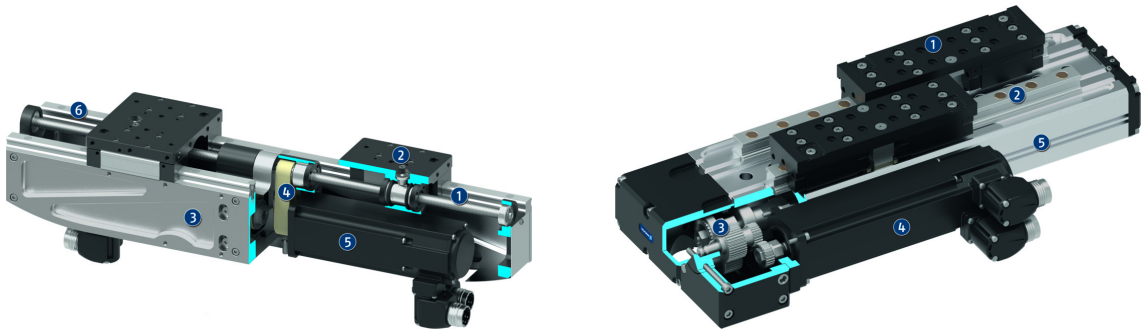
Pneumatické hlavice můžeme rozdělit na přetlakové a podtlakové. Přetlakové pneumatické úchopné hlavice využívají speciální přetlaková pouzdra, která jsou z flexibilního materiálu a při zvýšení tlaku působí silou na uchopovaný objekt. Další možností pro úchopný prvek je využití hadice, která má nestejný průřez, a tudíž se při naplnění tlakovým vzduchem ohýbá a díky této deformaci uchopuje objekt. Tento způsob uchopení je znázorněn na obrázku 2.16. Síla, kterou hlavice na objekt působí je jednoznačně dána pracovním tlakem v hlavici.

Podtlakové úchopné prvky mohou být aktivní, tak jako ty přetlakové, nebo pasivní. Oba způsoby využívají přísavky. Pod pasivní přísavkou vzniká podtlak samovolně, u aktivních je nutné podtlak vyvolat pomocí vývěvy, nebo difuzoru a jsou vhodné i pro méně kvalitní povrchy. [8]

2.2.1 Šroubový mechanismus

Šroubový mechanismus je obecně tříčlenná soustava včetně rámu. Pro uchopovací hlavice obsahuje šroubovou, rotační a posuvnou vazbu. Rotační pohyb a silový moment se mění na posuvný pohyb a osovou sílu. Rotační pohyb šroubu může být vyvozen například ozubeným soukolím, nebo přímo připojením motoru. Tento převod je doprovázen ztrátami, které lze shrnout do účinnosti mechanismu. Ztráty lze zmenšit zvětšením stoupání, proto se používají vícechodé lichoběžníkové, popřípadě kuličkové šrouby. [9, 10] Šroubový transformační blok se využívá zejména pro elektrické paralelní úchopné hlavice se dvěma prsty. Mezi tyto hlavice lze řadit například paralelní úchopnou hlavici LEG od firmy SCHUNK, jejíž průřez je znázorněn na obrázku 2.2 vlevo nebo hlavici EGA od stejného výrobce vpravo.

Hlavice LEG používá k přenosu energie od motoru řemenový převod. Šrouby jsou umístěny za sebou a proto je hlavice velmi úzká a má velký rozsah. Hlavice EGA využívá k přenosu pohybu na šroub ozubený převod a šrouby jsou vedle sebe. Obě hlavice mají prst zasazen v prizmatu, které zachytává veškeré působící síly. [11]



Obrázek 2.2: Paralelní hlavice LEG a EGA SCHUNK [11]

2.2.2 Kloubový mechanismus

Kloubový mechanismus se sestává z několika členů, které jsou vzájemně propojeny pomocí rotačních či posuvných vazeb. Tyto mechanismy převádí rotační či posuvný pohyb na obecně rovinný. Kloubové mechanismy můžeme podle vlastností jednotlivých členů dále dělit například na čtyřkloubový mechanismus, klikový mechanismus nebo mechanismus kulisový. [12, 9]

Čtyřkloubový mechanismus má pro úchopné hlavice největší význam. Obsahuje pouze rotační vazby. Jeden člen tvoří rám, další je hnán a další nese koncový prvek. Příkladem může být hlavice od společnosti HD-Robotic, která je zobrazena na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: DH-Robotics Adaptive Gripper DH-3 TM Kit [14]

Jedná se o variabilní smart hlavici s nastavitelnou silou, která umožňuje přestavbu z paralelního na centrální uchopování. Slouží k uchopování v elektronice či v automobilovém průmyslu nebo v medicíně.[14]

Vlastnosti čtyřkloubového mechanismu záleží zejména na rozměrech jednotlivých členů. Speciální případ je paralelogram, kdy jsou dva a dva členy stejně dlouhé. Koncový prvek pak koná posuvný pohyb po kružnici. [13, 9] Tohoto

principu se u úchopných hlavic hojně využívá. Příkladem může být například hlavice FH360-01 od firmy NACHI, která je zobrazena na obrázku 2.4 vlevo, nebo hlavice RG6 Onrobot vpravo.



Obrázek 2.4: FLEX HAND FH360-01 NACHI a RG6 Onrobot [15][16]

Hlavice od firmy NACHI umožňuje nejen centrální, ale i paralelní uchopování, kontrolu síly v koncových členech a detekci rozměrů objektu. [15] Hlavice od Onrobotu je určena pro kolaborativní roboty, má velký rozsah a umožňuje určení hmotnosti objektu. [16]

2.2.3 Pákový transformační mechanismus

Pákový mechanismus se sestává zejména z páky, která je upevněna rotační vazbou. Na páku působí síla, nebo točivý moment. Rotační vazbu tvoří běžně čep, u úchopných hlavic může rotační vazbu tvořit integrovaný servomotor. [12]

Převod síly na jednom konci páky na rotační pohyb a sílu na druhém konci páky využívají u pneumatické úchopné hlavice, kde působí společná tlaková síla. Příkladem je úhlová hlavice SGW od firmy SCHUNK, která je na obrázku 2.5 vlevo, nebo SDH od stejného výrobce vpravo.

U hlavice SGW je společný válec, který obsahuje tři netradiční písty tvořené jednou stranou pák, na jejichž druhé straně se nachází koncový člen. Tlak ve válci je převeden na sílu uchopovacích prvků. Těleso této hlavice je z plastu, proto je odolná vůči korozi a extrémně lehká. Hlavice SDH je tvořena několika pákovými segmenty spojenými rotačně za sebou. V každé rotační vazbě je samostatný servomotor a hlavice je proto velmi variabilní. Umožňuje jak paralelní, tak centrální

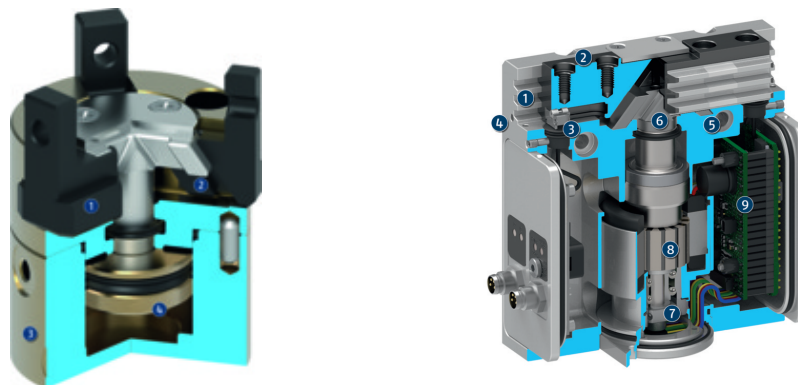


Obrázek 2.5: SGW a SDH SCHUNK [11]

úchop. Umožňuje detekci dotykového tlaku a rozpoznání povrchu díky systému snímačů. Je vhodná například pro servisní robotiku. [11]

2.2.4 Vačkový transformační mechanismus

Vačkové mechanismy obsahují třecí vazbu, pomocí které mění charakter pohybu. Třecí vazbu zajišťuje vačka, nebo například šablona. Mechanismus se pak může nazývat šablonový. Ten je velmi rozšířený zejména v kombinaci s lineárním pneumatickým motorem. Nevýhodou mechanismu je vysoké tření, výhodou automatická synchronizace pohybu. [12] Mechanismus využívá například úchopná hlavice MPZ na obrázku 2.6 vlevo, nebo PGN-plu-E vpravo, obě od firmy SCHUNK.



Obrázek 2.6: MPZ SCHUNK [11]

Obě hlavice využívají stejný princip. Koncové členy jsou uloženy v prizmátu, které zachytává uchopovací síly a jsou proto určeny pro vysoká zatížení. Hlavice PNG využívá elektrický servomotor doplněný o kuličkový šroub pro změny

rotačního na posuvný pohyb. Dále disponuje kontrolou polohy prstů a kontrolou uchopovací síly.

2.2.5 Ozubený transformační mechanismus

Ozubená soukolí využívají princip záběru s dotykem členů, které mechanismus tvoří. Využívají se zejména jako převodové mechanismy pro dva rotační pohyby. Transformační mechanismus tvoří, pokud je jedno kolo nahrazeno ozubeným hřebenem. U elektrických hlavic je hnaný pastorek a hřeben koná akční pohyb, u pneumatických tomu může být naopak.

Příkladem elektrické hlavic s ozubeným transformačním mechanismem může být hlavice EGH od firmy SCHUNK, kterou je vidět na obrázku 2.7 vlevo, nebo EGP od stejného výrobce vpravo..



Obrázek 2.7: EGH SCHUNK [11]

Hlavice EGH je kolaborativní smart hlavice, sloužící k uchopování malých a středních předmětů. Umožňuje přesné polohování a kontrolu stavu. Hlavice obsahuje dva ozubené hřebeny se společným pastorkem, stejně jako hlavice EGP. Ta je určená pro malé předměty pro testování a farmacii. Lze u ní kontrolovat sílu a stav uchopení. [11]

2.2.6 Mechanismy bez transformace pohybu

Tyto uchopovače ke svému provozu nepotřebují transformační mechanismus. Původní, lineární či rotační pohyb, se nemění a je pouze vhodně zpřevodován, nebo přímo napojen na koncové členy. Proto jsou tyto hlavice jednodušší a ztráty v nich jsou menší.

Jako první příklad je uvedena úchopná hlavice 3FG15 společnosti Onrobot s rotačním pohybem koncových členů, zobrazená na obrázku 2.4 [16], druhá je pak hlavice Smart Gripper 2.1 od AppliedRobotics vpravo.



Obrázek 2.8: 3FG15 Onrobot a Smart Gripper 2.1 [16]

Jedna hlavice má kinematiku paralelní, druhá středící s možností vnitřního i vnějšího uchopení. SmartGripper 2.1 disponuje také nastavitelnou silou a má vyměnitelné koncové prvky.

Bylo provedeno rozdělení kinematik úchopných hlavic. Pro jednotlivé kinematiky byly uvedeny příklady hlavic s uvedenými smart funkcemi.

Některé z těchto kinematik jsou využity pro tvorbu konceptů, jiné, například vačkové, nejsou vhodné pro přestavbu a dále se s nimi neuvažuje.

2.3 Senzorické smart úchopné hlavice

Smart úchopné hlavice se vyznačují zejména rozsáhlou senzoričkou pro kontrolu pohybu čelistí, dosahované úchopné síly, kontrolu vyklouzávání objektu, nebo například počítačovým viděním na rozpoznání pozice či orientace objektu. V následující části jsou představeny některé možnosti těchto kontrol.

2.3.1 Silové senzory

Tenzometry

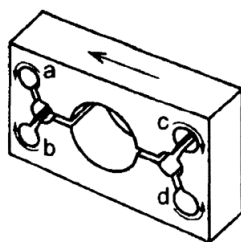
Působící síla způsobuje deformace objektů, na které působí. Tohoto faktu využívají odporové tenzometry ke zpětnému určení síly, která deformaci způsobila. Tenzometr je odporový snímač, u něhož se v závislosti na jeho deformaci mění

odpor. To může být způsobeno pouze změnou rozměrů, jak je tomu u kovových tenzometrů, nebo změnou krystalografické struktury, jak je tomu u tenzometrů polovodičových. Odpor kovového tenzometru závisí pouze na deformaci a součiniteli deformační citlivost, což je materiálová konstanta.

Podle provedení lze kovové tenzometry rozdělit na drátkové, vrstevné a fóliové.

Pro kompenzaci vlivů teploty a parazitních sil se využívají můstky. Z důvodu stability a citlivosti je také nutné volit vhodné materiály. Nejčastěji se volí slitina mědi a niklu, která se nazývá konstantan. Dále se používají například slitiny niklu a chromu, popřípadě platiny a wolframu.

V praxi se využívají tenzometrické snímače, které se skládají z deformačního členu a tenzometrického můstku, který měří jeho deformaci. Deformační člen je z vhodného materiálu a má takový tvar, aby se deformoval zejména ve směru měřené síly. Mezi tenzometrické snímače patří například vetknutý nosník, člen typu S, nebo člen se dvěma otvory, podobný členu typu S. Pro měření síly v příčném směru slouží deformační člen typu paralelogram. Je tvořen hranolem s vhodně umístěnými otvory s tenzometry. Tento člen je zobrazen na obrázku 2.9 a je nejvhodnější pro použití na úchopné hlavici. [18, 19]



Obrázek 2.9: Pružný člen - Paralelogram [19]

Taktilní senzory

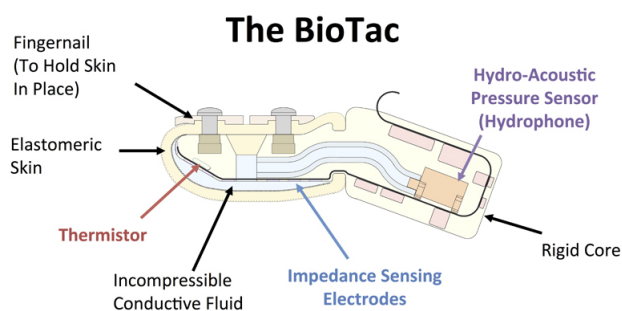
Taktilní senzory a snímače, které jsou jimi tvořeny, slouží k získávání informace o dotyku, která je dále převáděna na elektrický signál. Umožňují kromě uchopovací síly určit například natočení a tvar tělesa, nebo určit koeficient tření. Existuje několik typů taktilních senzorů.

Taktilní senzory s vodivým elastomerem převádí sílu na elektrický signál díky změnám odporu v elastomeru, který je grafitem sycená pryž a lze z něj získat také například informace o teplotě.

Senzory typu FSR využívají podobný princip. Je sledována změna elektrického odporu s rostoucí silou. Lze sledovat i síly tečné, díky povrchovým klkům.

Senzory s piezoelektrickým materiálem využívají piezoelektrického jevu. Jejich předností jsou malé rozměry. Jsou vhodné zejména pro měření dynamických sil, ke kterým dochází například při vibracích. Díky tomu jsou hojně využívány i pro rozpoznávání prokluzu. [20]

Jako konkrétní taktilní senzor lze uvést například senzor BioTac, který získává celou sadu informací. Skládá se z jádra, které je tvořeno mnohými senzory, a elastomerického obalu. Mezi obalem a jádrem se nachází vodivá kapalina. BioTac, zobrazený na obrázku 2.10, je určen zejména pro měření síly, vibrací a tepla.



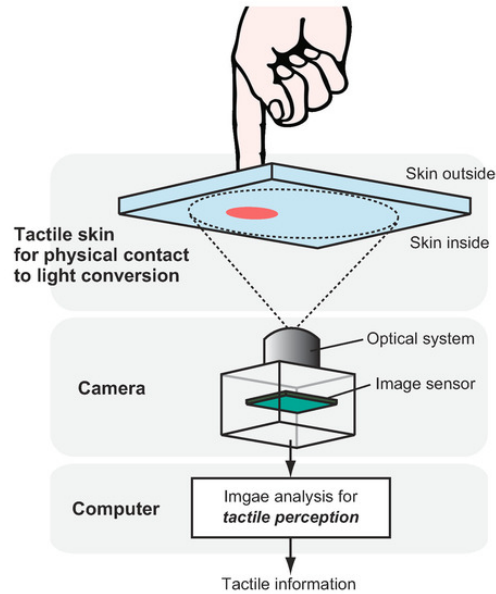
Obrázek 2.10: BioTac [21]

Pomocí sady senzorů lze určit také polohu a směr síly. Z vibrací lze vyhodnocovat uvolňování objektu.

Měření síly optickými metodami

Mezi taktilní senzory lze zařadit také senzory, které pracují pomocí obrazové analýzy. Tyto senzory se skládají ze tří základních částí. Jde o hmatový povrch, který převádí informaci o doteku na kontaktní světlo, kameru a počítač. Princip funkce je zobrazen na obrázku 2.11.

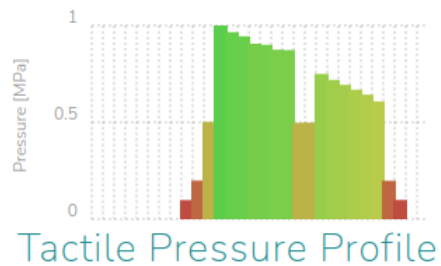
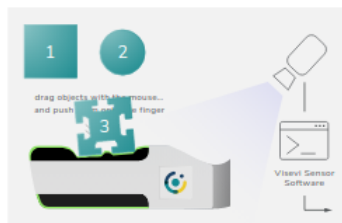
Prvním a zásadním krokem je převedení fyzických podnětů na podněty světelné. Toho lze dosáhnout pomocí světlovodivé desky, nebo pomocí deformační



Obrázek 2.11: Struktura hmatového snímače [30]

vrstvy, která je poseta body, nebo pokryta reflexní vrstvou. Detekována je změna světla, případně změna v rozložení kontrolních bodů. U těchto metod lze měřit také polohu síly.

Podobný princip, tedy analýzu deformací a následně síly pomocí kamer, využívá také systém od firmy Visevi, což je patrné z obrázku 2.12.



Obrázek 2.12: Camera-based tactile sensor [29]

Zde je sledována přímo deformace dotykové vrstvy koncového členu, která je tvořena pěnovou gumou, pomocí dvojice kamer. Opět lze určit i rozložení síly. Dvojice kamer lze zároveň přímo využít pro další kontroly, například kontrolu uvolnění.



2.3.2 Kontrola deformace

Deformace je u nabízených hlavic kontrolována na motorech, případně na jiných prvcích.

Odměrování na motoru

Nejčastější je odměrování na elektrickém servomotoru, kde lze měřit jeho natočení pomocí inkrementálních případně i absolutních snímačů natočení. Z natočení osy motoru lze dopočítat polohu koncového prvku. Na pneumatických motorech lze podobně odměřovat polohu pístu, nejčastěji bezkontaktními senzory v kombinaci s detekčním prvkem na pístu pneumotoru. Opět lze dopočítat polohu uchopovacích prstů.

Odměrování na prvcích mechanismu

Stejným způsobem lze odměřovat na některém z prvků mechanismu. Může to být rameno paralelogramu, prizma u posuvných pohybů, nebo otočný úchopný prvek. Měřit lze jak natočení, tak lineární posuv těchto členů. Čím je místo měření blíže tělesu, tím je měření přesnější.

2.3.3 Způsoby kontroly uvolnění objektu

Protože se jedná o uchopení citlivého předmětu, musí být uchopení šetrné a nelze vždy využít maximálních sil. Proto je potřeba doplnit kontrolu uvolnění.

Kontrola pomocí šestiosého snímače síly

Šestiosý snímač síly umístěný na koncovém členu má hned několik využití. Může sloužit jako senzor uchopovací síly, nebo k měření hmotnosti uchopeného objektu. Velký význam může mít v kontrolování uvolnění. Pro statickou analýzu je využit koncept mezní plochy. Cílem je dostat se do neklouzavé oblasti, čehož lze dosahovat zvětšováním působící síly.

Kontrola snímači vzdálenosti

Snímače vzdálenosti určují bezkontaktně vzdálenost uchopeného objektu. Lze je dělit na odrazové, které využívají odražené energie, a snímače reagující přímo na přiblížení objektu.

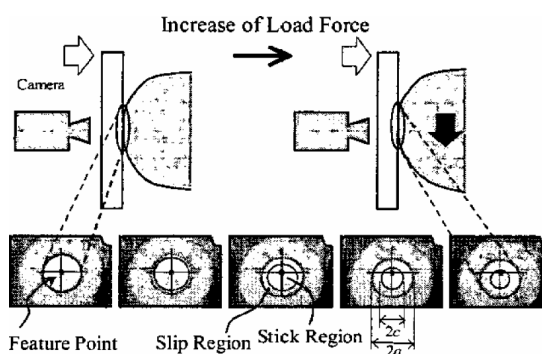
Mezi odrazové patří například optický snímač, který reaguje na rychlost návratu světla, popřípadě na úhel odraženého světla. Ultrazvukový snímač vyhodnocuje fázový rozdíl vyslaného a odraženého ultrazvuku.

Kapacitní a indukční snímače reagují na vzrůst kapacity či indukčnosti v jejich okolí. Tato změna je způsobena právě přítomností objektu. [19]

Snímače tohoto typu se dají použít k odhalení probíhajícího uvolňování pomocí přeměrování vzdálenosti objektu. Pokud se vzdálenost mění, dochází k uvolňování.

Optická kontrola skluzu

Tato kontrola je použitelná zejména pro deformovatelné objekty. Využívá analýzy dotykového obrazu tělesa na průhledné kontaktní ploše. Rozlišuje plochy stabilní a plochy, kde dochází ke smýkání. Lze tak uvolnění odhalit s předstihem a zabránit mu. Toto je patrné též z obrázku 2.13. [24]



Obrázek 2.13: Optická kontrola skluzu [24]

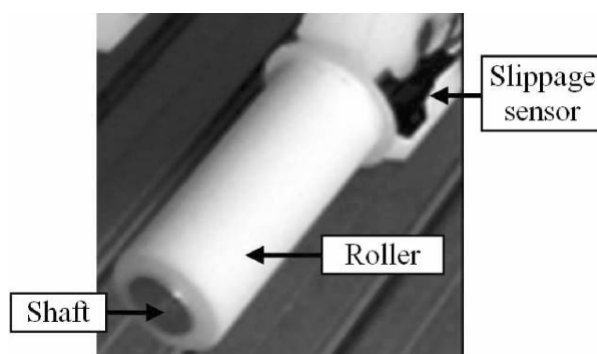
Kontrola pomocí hmatové predikce skluzu

Tato kontrola využívá stejného principu, pouze místo analýzy obrazu jsou analyzovány informace z taktilního prstu. Jedná se zejména o vibrace a tlaky. Na základě těchto informací a předchozí zkušenosti lze predikovat, zda k uvolňování

bude či nebude docházet, a podle toho zpětnovazebně řídit uchopovací veličiny. Jednotlivé kontrolní veličiny jsou získávány mnohokrát během jedné sekundy, aby bylo uvolnění včas odhaleno. Predikce jsou vytvořeny na modelových příkladech a jsou využity pro uchopování objektů se zcela neznámými vlastnostmi. [23]

Kontrola pomocí tření

Detekci prokluzu lze provádět také na základě tření. Výhodou je, že tření je přímo vlastnost daného senzoru a není odvozena jako je tomu například u vibrací. Díky tomu se jedná o jednoduchou a robustní konstrukci, kterou lze využít prakticky v jakémkoli prostředí. Prvek sloužící k detekci je na obrázku 2.14.



Obrázek 2.14: Prvek kontroly prokluzu na základě tření [22]

Při správném sladění třecích koeficientů tělesa a válečku se začne při uvolňování místo posuvu tělesa protáčet detekční váleček. Tato rotace je jednoduše detekovatelná vestavěnými senzory a lze na ni reagovat zvýšením síly. Pro lepší uchopení je možné umístit několik těchto prvků za sebe. [22]

2.4 Flexibilní smart grippery

2.4.1 Pasivní flexibilní prvky

Adaptivní koncový člen

Příkladem těchto koncových členů mohou být například prsty se strukturou Fin Ray, které jsou použity na obrázku 2.15 vlevo. Tyto koncové členy jsou z flexibilního materiálu a jejich struktura umožňuje tvarové přizpůsobení a citlivější úchop. Tvarový úchop také snižuje nárok na uchopovací sílu.

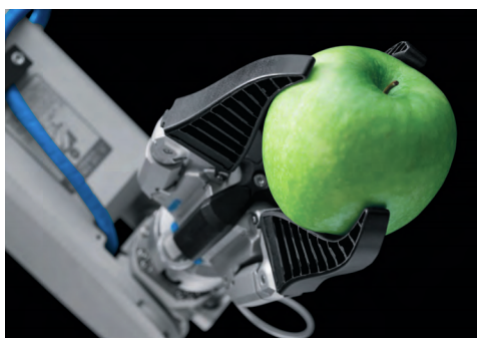
Těchto úchopných prvků využívá například uchopovací hlavice od firmy Festo, MultiChoiceGripper, vyobrazená na obrázku 2.15 vlevo.

Tato hlavice umožňuje jak paralelní, tak centrální úchop. Jako pohon je použita trojice lineárních pneumatických motorů, na které jsou přímo napojené flexibilní koncové členy. Hlavice je určena zejména pro uchopování citlivých a křehkých objektů. [28]

2.4.2 Aktivní flexibilní prvky

Flex shape gripper

V tomto případě je celá uchopovací část hlavice, kterou nabízí ve svém portfoliu firma Festo, tvořena jedním flexibilním prvkem. Toto chapadlo se skládá z dvojčinného válce, jehož jedna komora je naplněna stlačeným vzduchem a druhá je naplněna vodou a její povrch připomíná jazyk chameleona. Uchopení probíhá tak, že je silikonový konec chapadla přitlačen na objekt a komora s přetlakovým vzduchem je odvětrána. Díky tomu se komora s vodou vtáhne dovnitř a silikonová koncovka se pevně utáhne kolem objektu. Toto umožňuje spolehlivé uchopení velké škály objektů, ať už jde o tvar či velikost. Princip uchopení je patrný z obrázku 2.15 vpravo. [28]



Obrázek 2.15: Multi ChoiceGripper a Flex shape gripper, Festo [28]

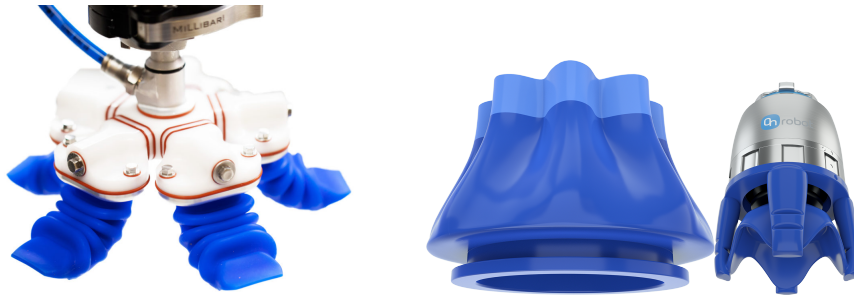
MGrip

Jde o aktivní přetlakový úchopný prvek popsán výše. Zjednodušeně se dá mluvit o jednostranně uzavřené hadici z flexibilního materiálu o nestejném průřezu. Při změně tlaku se prvek prohýbá a tím uchopuje. Díky své flexibilitě je

schopen uchopovat i křehké předměty, kdy lze úchopnou sílu jednoduše určit podle tlaku uvnitř prvku, a zároveň lze sílu tímto tlakem řídit. Úchopná hlavice s tímto prvkem je zobrazena na obrázku 2.16 vlevo. [26]

Flexibilní elektrická úchopná hlavice

Firma OnRobot představila silikonovou úchopnou hlavici, která dokáže uchopit velkou škálu objektů. Zvláště je vhodná na uchopování křehkých a jemných předmětů. K dispozici je několik přísavek potažených silikonem, zobrazených na obrázku 2.16 vpravo. Tyto jsou zavírány a otevírány pomocí elektrického pohonného mechanismu. Při uchopení objektu vznikne mezi objektem a přísavkou podtlak v důsledku deformace přísavky. Toto uchopování je určeno zejména pro potravinářství, farmacii a jiné čisté aplikace.



Obrázek 2.16: M-Grip a OnRobot Soft Gripper [26]

2.5 Závěr rešerše

V rámci rešerše bylo provedeno rozdělení kinematiky úchopných hlavic podle mechanismu transformačního bloku. V rámci tohoto rozdělení byl vytvořen také přehled hlavic nabízených jednotlivými výrobci, se zaměřením na hlavice s možností přestavitelného uchopení z paralelního na středící.

Další část se zabývá možnostmi měření a kontrolování síly, deformace a uvolnění objektu.

Poslední část rešerše se zabývá využitím flexibilních úchopných prvků, které mohou napomáhat citlivosti i spolehlivosti úchopu. Jsou představeny pasivní prvky i prvky aktivní, ať už pneumatické, či elektrické.



3 Varianty řešení

V následující kapitole je představeno několik možností jak řešit jednotlivé požadavky na úchopnou hlavici. Na základě těchto možností je následně vybrána finální varianta.

3.1 Bezpečnost úchopu

Předpokládá se, že uchopovaný předmět může být křehký či deformovatelný, a proto je třeba při uchopování kontrolovat, zda není překročena dovolená síla či deformace a objekt není poškozován. Pokud by byla uchopovací síla větší, než dovolená, nebude se dále navyšovat, protože uchopený, ale poškozený objekt není žádoucí. V tomto případě nebude uchopení provedeno.

3.1.1 Možnosti kontroly síly

Pro kontrolu bezpečnosti uchopení vzhledem k uchopovací síle, je třeba znát maximální sílu, kterou lze úchopnou hlavici na objekt působit a konkrétní uchopovací sílu. Kontrola této síly může probíhat pomocí silových senzorů představených výše. Jedná se zejména o využití tenzometrických čidel, nebo taktilních prvků. Další možností je kontrolovat a zároveň ovládat sílu pomocí tlaku v pneu-motoru, případně změnou napájení elektrického servomotoru.

3.1.2 Kontrola deformace

Deformace lze určit z polohy uchopovacích prstů. Jejich polohu lze měřit obtížně a proto odměřování probíhá na jiných součástech. Odměřovat lze přímo na motoru. U pneumatického je snímána poloha pístu, u elektrického servomotoru lze snímat úhel natočení. Další možností je snímání polohy na některém ze členů mechanismu, například natočení vahadel kloubového mechanismu, nebo polohy v prizmatu.

3.1.3 Kombinovaná kontrola

Pro opravdu bezpečné uchopení je možné kontrolu zkombinovat, tedy použít jak kontrolu síly, tak kontrolu deformace. Ne vždy jsou však obě tyto



charakteristiky dostupné. Pro stejnorodý materiál, u kterého jde pouze o nepřekročení meze kluzu, jsou tyto dvě hodnoty závislé. Kombinovaná kontrola má význam například pokud je jádro objektu deformovatelné a náchylné na přetvoření, ale vnější vrstva objektu je naopak křehká.

3.2 Spolehlivost úchopu

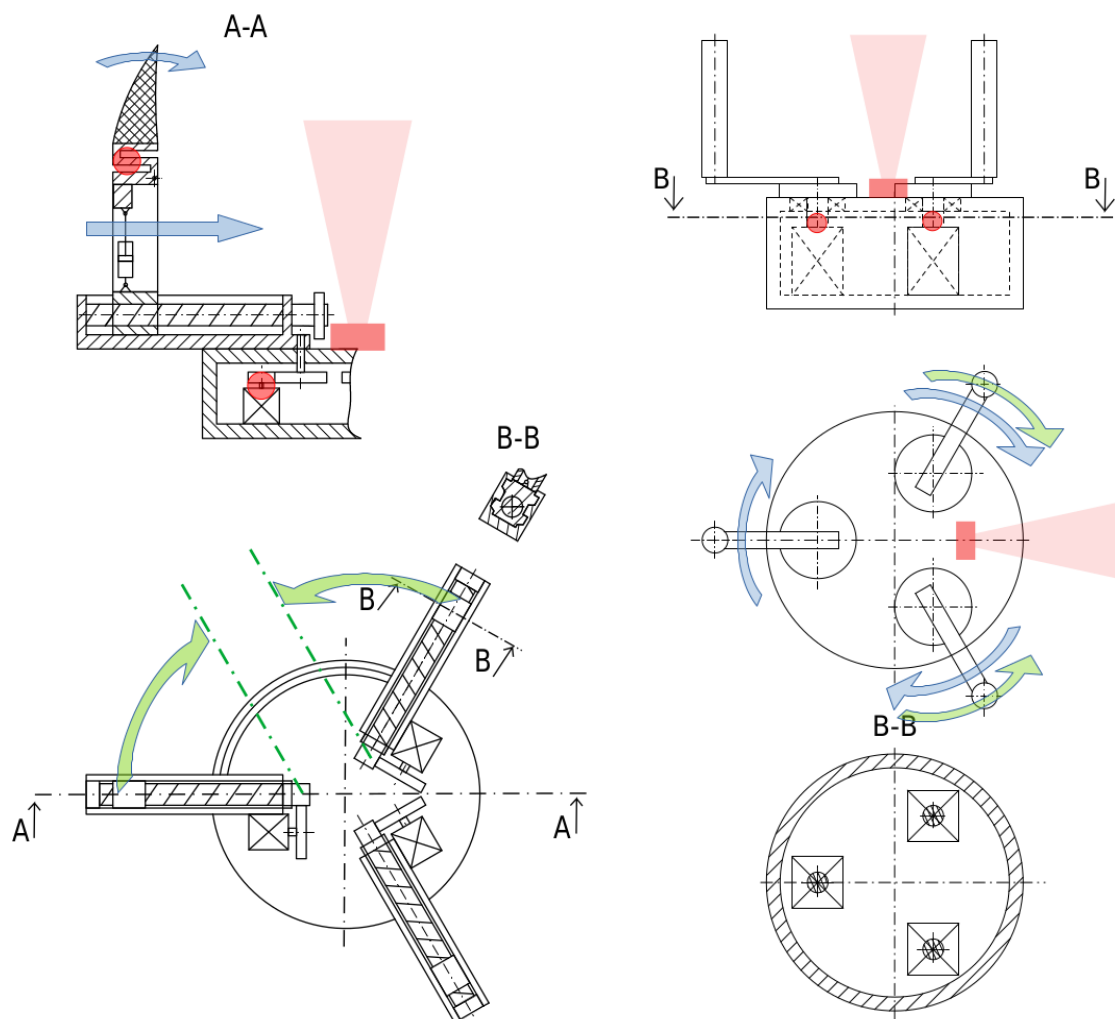
Spolehlivost úchopu lze kontrolovat několika způsoby. Jedna z možností je využití speciálních uchopovacích prvků, jako jsou například taktilní prsty. Další možností je využití odrazových senzorů, případně jiných senzorů polohy. Odrazové senzory mohou pracovat s časem návratu odraženého světla či zvuku, případně se změnou orientace vyslaného a odraženého paprsku. Další možností je využití radaru.

Spolehlivost lze kontrolovat jak staticky, tak dynamicky. Vzhledem k požadovanému šetrnému uchopení a tedy malým uchopovacími silám je tato kontrola nezbytná.

3.3 Návrh kinematiky

V tomto oddíle jsou uvedeny tři předběžné návrhy kinematického uspořádání doplněné o pozice senzorů a druh a umístění pohonů. Na základě těchto schémat bude následně navržena finální varianta.

Návrh zobrazený na obrázku 3.1 vlevo má kinematiku se šroubovým transformačním mechanismem. Každá sestava koncového prvku obsahuje pohybový šroub, na kterém se nachází matice, která tvoří samotný uchopovací prst. Matice je uložena v prizmatu, ve kterém jsou zachytávány síly a momenty. Každý pohybový šroub je hnán samostatným servomotorem. Pomocí tohoto mechanismu je dosažen posuvný pohyb prstu. Tento pohyb je dále doplněn naklápěním prstu pomocí lineárního pneumotoru a slouží k lepšímu uchopení objektu pomocí podebrání, a zároveň umožňuje kratší, ale rychlejší pohyby prstu. Přestavba je realizována pomocí dalších servomotorů a ozubeného převodu. Přestavba je možná do dvou exaktních poloh, pro paralelní a pro centrální uchopení.



Obrázek 3.1: Návrh se šroubovým transformačním mechanismem a bez transformačního mechanismu

Síla je měřena pomocí deformačního členu umístěného v koncovém prvku. Senzor vzdálenosti pro kontrolu uvolnění objektu je umístěn v tělese uchopovací hlavy. Deformace je kontrolována pomocí odměřování na servomotorech.

Nevýhodou této varianty je zejména množství servomotorů a třecí ztráty v pohybovém šroubu. Výhodou je naopak použití deformačního prstu a jednoduchá kontrola síly v blízkosti místa uchopení.

Na obrázku 3.1 vpravo je návrh kinematiky bez transformačního bloku. rotační pohyb servomotoru je přímo převeden pomocí ozubeného převodu na rotační pohyb koncových členů tvořených válci pokrytými měkčím materiálem. Dochází zde tedy ke změně rychlosti otáčení, případně ke změně směru, ne však ke změně charakteru pohybu. Přestavba z paralelní na centrální kinematiku je re-

alizována pouze změnou směru rotace jednoho a zastavením druhého servomotoru. Prsty se pohybují stejným směrem a uchopují objekt nad středem základny, nebo se dva pohybují proti sobě a uchopují paralelně, zatímco třetí prst se nepohybuje. Změní se ovšem zásadně místo, ve kterém je objekt uchopován, proto je nutné kontrolu uvolnění objektu provádět dvěma senzory na dvou různých místech.

U této varianty je jednoduchá kontrola deformace pomocí odměřování přímo na servomotech. Kontrola síly může být umístěna v koncovém členu. Oba snímače vzdálenosti jsou umístěny v tělese hlavice, jeden uprostřed, druhý z boku.

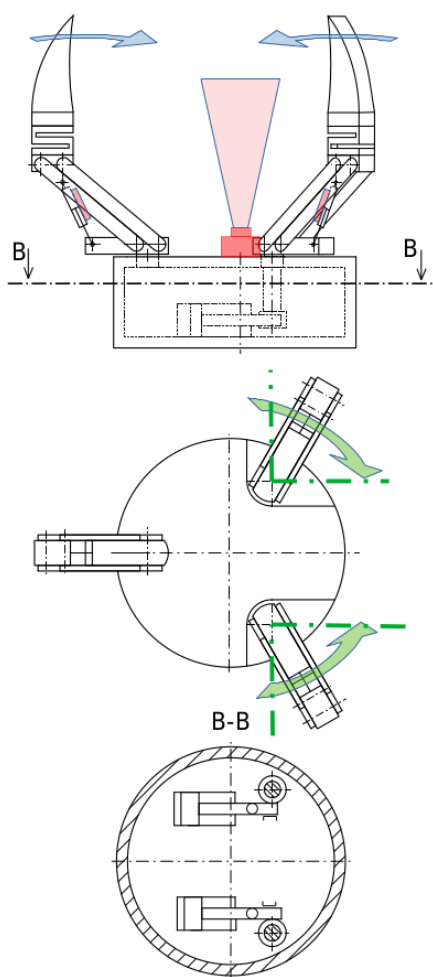
Tato varianta je velmi jednoduchá ať už jde o samotný pohyb nebo o přestavbu. Nevýhodou je zejména jiná pozice uchopení pro centrální a paralelní sestavení.

Obrázek 3.2 ukazuje verzi s paralelogramem. Hlavní hnací prvek je lineární pneumotický motor, který je připojen přímo na paralelogram. Přestavba je realizována pomocí natáčení dvou prstů mezi třemi polohami. Jde o polohu zobrazenou, to je centrální, dále pak kinematiku paralelní, kdy je pevný prst naproti oběma otočným a poslední varianta, která je opět paralelní, ale otočné prsty jsou proti sobě a pevný prst může zůstat v klidu, případně může sloužit k odměřování, jako doraz, nebo k jiné technologické operaci. Toto natáčení je realizováno pomocí dvou pneumotorů s ozubenými hřebeny a ozubeného kola na koncových sestavách.

Kontrola síly je realizována pomocí kontroly tlaku uvnitř hnacího pneumotoru. Pro kontrolu uvolnění objektu je umístěn snímač polohy v tělese hlavice. Kontrola deformace je potom realizována pomocí odměřování na pneumotoru.

Výhodou tohoto řešení je jednoduchost mechanismu, elastický koncový člen a několik užitečných konfigurací postavení koncových členů

Pro výběr finální varianty je podstatná zejména jednoduchost konstrukce, snadné ovládání a snadná kontrola poškození a vyklouznutí. Dalším aspektem jsou možné konfigurace jednotlivých variant a jejich praktičnost při uchopování.



Obrázek 3.2: Návrh s paralelogramickým transformačním mechanismem

3.4 Výběr finální varianty

Z výše uvedených možností byla vybrána varianta, která využívá uchopovací mechanismus s paralelogramem. Výhodou je zejména jednoduchost konstrukce a snadné ovládání síly. Deformace je kontrolována odměřováním na pneumotorech, což je jednoduchá a zároveň velmi přesná metoda. Přítomnost objektu je kontrolována bezkontaktním snímačem polohy, konkrétně odrazovým, ultrazvukovým. Hlavním kritériem je jednoduchost a cena, protože ostatní metody vyžadují velmi přesné a drahé součástky, popřípadě strojové učení. Síla je vzhledem k použití pneumotorů ovládána jednoduše tlakem. Finální varianta je popsána v kapitole 4.

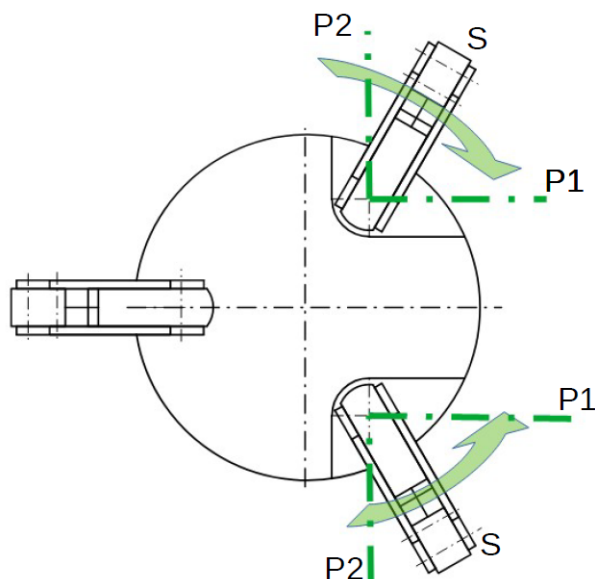
4 Popis finální varianty

Finální varianta vychází z varianty s paralelogramem. Některé části byly dále zjednodušeny či upraveny.

4.1 Kinematika

Paralelogram je poháněn pomocí pneumatického motoru. Každá sestava koncového prvku má vlastní dvojčinný pneumotor, pomocí kterého je ovládán pohyb a síla uchopovacích prstů.

Přestavba je realizována pomocí jednoho pístu společného pro obě osy, na kterých je koncová sestava upevněna. Při lineárním pohybu pístu je dosažen otáčivý pohyb os, a tím přetáčení jednotlivých koncových sestav mezi jednotlivými polohami. Možné natočení prstů je znázorněno na obrázku 4.1. Zde jsou také označeny tři polohy, ve kterých se koncové sestavy mohou nacházet. Jedná se o jednu centrální (S) a dvě paralelní (P1, P2) konfigurace



Obrázek 4.1: Konfigurace přestavení

V těchto třech polohách musí být také zajištěna aretace, kterou zajišťují záskočky zapadající do zářezů na osách. Osy se musí otáčet na obě strany, proto je nutné použít dvojčinný pneumotor.



4.2 Kontrola síly a deformace

Síla je ovládána přímo pomocí tlaku v pístu a závisí na parametrech pneumotoru, rozměrech mechanismu a tlaku.

Deformace je kontrolována pomocí odměřování na pneumotoru, který na pístu nese detekovatelný prvek. Jeho poloha je snímána hallovým čidlem umístěným na pneumotoru.

4.3 Kontrola přítomnosti objektu

Kontrola uvolnění objektu, nebo též kontrola přítomnosti je prováděna pomocí bezkontaktního senzoru polohy umístěného v tělese hlavice. Z rozměrových důvodů jsou využity odrazové senzory, konkrétně ultrazvukový snímač, která má větší dosah a dostatečnou přesnost. Další jeho výhodou je, že s ním lze identifikovat jak kovové, tak nekovové prvky. Rozsah snímače umožňuje nejenom kontrolu uvolnění objektu při uchopování, ale i další kontrolu během přenášení objektu, či kontrolu přítomnosti po stop stavu. Dále umožňuje také kontrolu nájezdu na požadovanou vzdálenost od pracovní plochy, pokud bude snímaná oblast dosahovat až za uchopovací prsty.

5 Návrhové výpočty

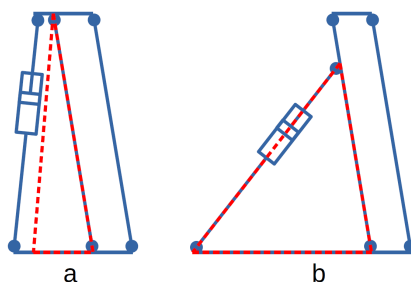
Tato část práce se zabývá návrhem součástí hlavice s ohledem na popsanou finální variantu. Je zde navržen uchopovací a přestavovací mechanismus. Jedná se zejména o návrh rozměrů, pohybový a silový rozbor.

5.1 Uchopovací mechanismus

Jak je popsáno v kapitole 4., uchopovací mechanismus má podobu paralelogramu hnaného pneumatickým lineárním motorem.

5.1.1 Návrh mechanismu a jeho rozměrů

Pneumatický motor lze umístit do dvou poloh znázorněných na obrázku 5.1. Jako výhodnější se zejména z pohledu rozměrů ukázala varianta a), která má menší sílu a větší rozsah a je prostorově úspornější.



Obrázek 5.1: Definiční trojúhelník, ukotvení na těhlici (a), ukotvení na vahadle (b)

Pro popis obou variant slouží definiční trojúhelník zobrazený na obrázku 5.1 červeně. Z něho vychází veškeré kinematické i silové výpočty, a podle délky jeho spodní strany lze ladit rozsah a sílu.

Pro účel kinematického rozboru byl předběžně vybrán pneumotor se zdvihem 10 mm. Další jeho rozměry, které vyšly z několika iterací, jsou uvedeny na obrázku 5.2, ze kterého vychází také rozměr základního trojúhelníku.

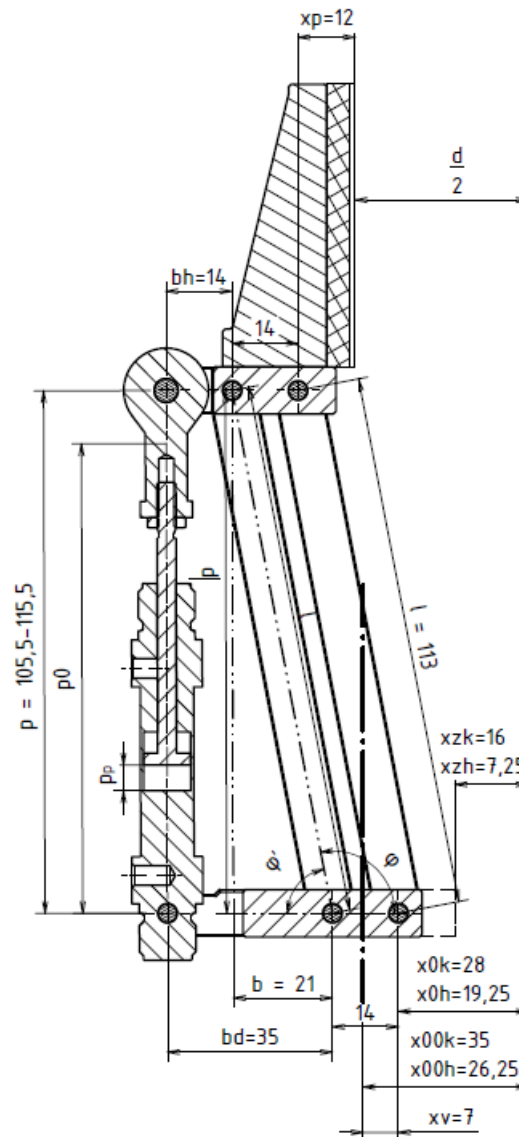
Vzdálenost jednotlivých koncových sestav vychází z uchopovaných rozměrů, tedy ze zadaného charakteristického rozměru a také z požadovaného rozsahu okolo něj. Dalším omezujícím faktem je to, že se nesmí uchopovací prsty



navzájem dostat do kontaktu. Po několika iteracích bylo zvoleno rozmístění po 120° na kružnici o poloměru 35 mm.

5.1.2 Kinematický rozbor

Kinematický rozbor vychází ze základního trojúhelníku znázorněného v obrázku 5.2 phantom čárou, a pozice koncové sestavy vůči ose uchopovaného objektu.



Obrázek 5.2: Kinematický rozbor uchopovacího mechanismu



Objekt tvaru koule

Nejprve je analyzována kinematika pro objekt tvaru koule s konfigurací S. Střední vzdálenost je tedy vzdálenost osy otáčení koncové sestavy od osy hlavice. Rozměry pro popis kinematiky, spolu s proměnnými, které jsou pro tuto analýzu použity, jsou znázorněny na obrázku 5.2 s indexem k.

Kinematický rozbor spočívá v určení funkční závislosti mezi polohou pístu a uchopovaným průměrem d. Tato závislost je určena pomocí úhlu φ .

Základní rozměr je dán pouze geometrií paralelogramu a lze jej tedy určit následovně:

$$x_{zk} = x_{00k} - x_v - x_p = 35 - 7 - 12 = 16mm \quad (5.1)$$

Naklopení vahadel závisí na momentálních rozměrech základního trojúhelníku, kde proměnná je délka sestavy pneumotoru, která se mění podle polohy pístu. Z kosinové věty lze vyjádřit vztah pro φ' a následně pro φ :

$$\varphi = 180^\circ - \varphi' = 180^\circ - \arccos \frac{b^2 + l^2 - p^2}{2 \cdot b \cdot l} \quad (5.2)$$

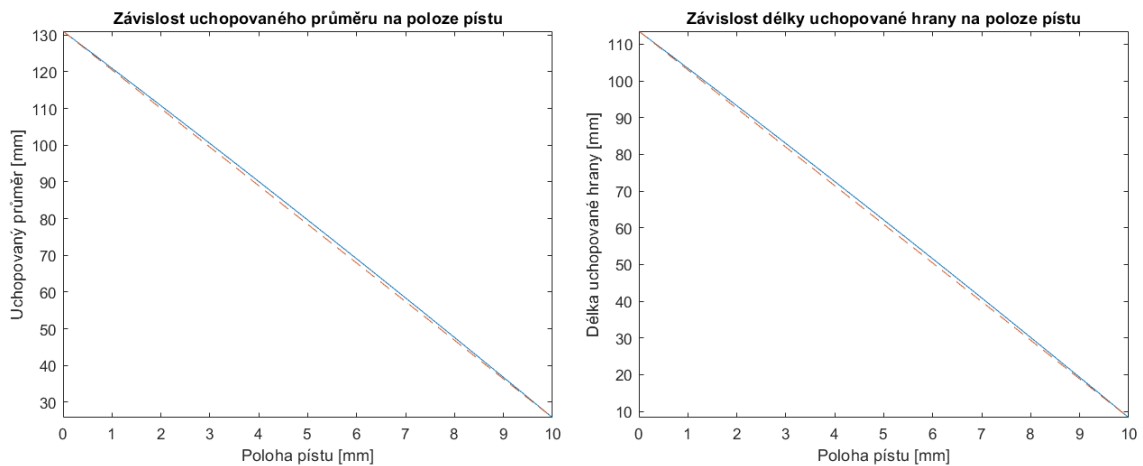
Odečtením kosinové složky natočení vahadel od základního rozměru je určena polovina uchopovaného průměru a následně je takto určen uchopovaný průměr:

$$d = 2 \cdot (x_{zk} - l \cdot \cos(\varphi)) = 2 \cdot (x_{zk} + l \cdot \cos(\varphi')) = 2 \cdot \left(x_{zk} + \frac{b^2 + l^2 - p^2}{2 \cdot b} \right) \quad (5.3)$$

Neznámou p pak lze vyjádřit za pomoci minimální délky sestavy pneumotoru a aktuální polohy. Po dosazení vyjde rovnice jedné proměnné a to polohy pístu:

$$d = 2 \cdot \left(x_{zk} + \frac{b^2 + l^2 - (p_0 + p_p)^2}{2 \cdot b} \right) = 330.5 - 0.024 \cdot (p_p + 105.5)^2 mm \quad (5.4)$$

Pro rozmezí zdvihu od 0 do 10 mm je tato závislost znázorněna graficky pomocí programu Matlab na obrázku 5.3 vlevo.



Obrázek 5.3: Závislost uchopovaného rozměru na zdvihu pneumatotoru

Modrá čára znázorňuje danou závislost, červená čárkovaná čára znázorňuje lineární spojnicí krajních bodů. Funkce je mírně nelineární. Tato závislost je podstatná pro kontrolu deformace, kdy je původní rozměr porovnán s rozměrem takto určeným.

Z rovnice 5.3 lze vyjádřit velikost strany základního trojúhelníku p a následně lze vyjádřit poloha pístu:

$$p_p = p - p_0 = \sqrt{b^2 + l^2 - 2 \cdot b \cdot \left(\frac{d}{2} - x_{zk}\right)} - p_0 \quad (5.5)$$

Jedná se opět o funkci jedné proměnné. Závislost odpovídá obrázku 5.3 s prohozenými osami a má využití při nájezdu prstů na daný uchopovací rozměr.

Teoretický rozsah 26 až 131 mm je z důvodů nájezdů a možné elastické deformace uchopovaného objektu omezen na 30 až 130 mm, což splňuje zadání. Zadaný charakteristický rozměr 75 mm se nachází přibližně v polovině rozsahu.

Objekt typu hranol

Pro uchopování objektu typu hranolu při konfiguraci P1 platí vesměs stejné vzorce jako pro uchopování kulatých objektů. Rozdílem je výchozí pozice. Střed uchopovaného objektu je posunut směrem k prstu A. Rozsah je posunut směrem k menším rozměrům. Základní rozměr je na obrázku 5.2 s indexem h a určí se takto:



$$x_{zh} = x_{00h} - x_v - x_p = 0.5 \cdot x_{00k} \cdot (1 + \cos(60^\circ)) - x_v - x_p = 0.5 \cdot (35 \cdot 1.5) - 7 - 12 = 7.25 \text{ mm} \quad (5.6)$$

Určení úhlu natočení vahadel se nijak nemění a proto lze rovnou vyjádřit délku uchopované hrany, kdy je pouze změněn základní rozměr:

$$hr = 2 \cdot \left(x_{zh} + \frac{b^2 + l^2 - (p_0 + p_p)^2}{2 \cdot b} \right) = 330.5 - 0.024 \cdot (p_p + 105.5)^2 \text{ mm} \quad (5.7)$$

Tato závislost je opět vyjádřena graficky a to na obrázku 5.3 vpravo a má stejné vlastnosti jako závislost pro kulaté objekty.

Opačnou závislostí je opět závislost polohy pístu na požadovaném uchopovacím rozměru, která vychází z rovnice 5.5 a má tento tvar:

$$p_p = p - p_0 = \sqrt{b^2 + l^2 - 2 \cdot b \cdot \left(\frac{d}{2} - x_{zh} \right)} - p_0 \quad (5.8)$$

Obrázek 5.3 vyjadřuje opět i tuto závislost, pouze s prohozenými osami.

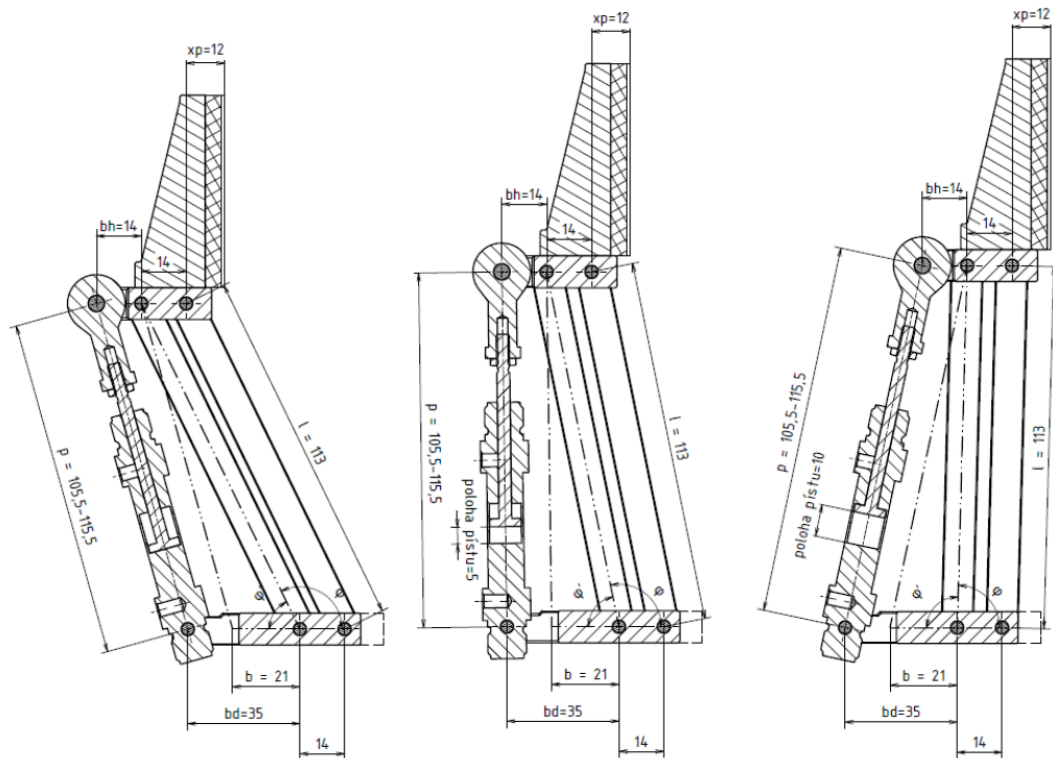
Pracovní rozsah pro tuto konfiguraci je 10 až 110 mm. K uchopení krychle o hraně 75 mm dochází asi ve dvou třetinách celkového rozsahu.

Drobné hranaté objekty

Pro zvláště malé objekty slouží konfigurace P2. Analýza této kinematiky je naprosto totožná jako pro klasické hranaté a kulaté objekty, liší se pouze základním rozměrem x_{zdh} , který v rovnicích nahrazuje x_{zh} a který vychází následovně:

$$x_{zdh} = 2 \cdot x_{00h} \cdot \sin(60^\circ) - x_v - x_p = 30.31 - 7 - 12 = 11.31 \text{ mm} \quad (5.9)$$

Na obrázku 5.4 je zobrazena koncová sestava ve třech fázích svého pohybu. Jedná se o dvě krajní polohy a o polohu uprostřed, která přibližně odpovídá danému rozměru pro objekt tvaru koule.



Obrázek 5.4: Fáze pohybu paralelogramu

5.1.3 Návrh pohonu

Návrhem pohonu je myšleno určení velikosti pneumotoru tak, aby byly splněny požadavky na uchopení objektů, tedy aby byla dosažena dostatečná uchopovací síla. Tato síla vychází z hmotnosti uchopovaného objektu a ze třecího koeficientu mezi objektem a prstem. Zadaná hmotnost 1 kg působí silou 9.81 N. Tato síla je rozdělena mezi jednotlivé prsty, kde největší zatížení na jeden prst je polovina této síly tedy 4.9 N. Pokud se síla rozdělí mezi tři prsty, bude nosnost hlavice větší. Jako vhodný materiál byla zvolena guma, kvůli velkému koeficientu tření, jehož hodnoty jsou uvedeny na obrázku 5.5.



Rubber	Rubber	1.15	
Rubber	Asphalt	.9	
Rubber	Concrete	.6	
Rubber (60 A Belt)	Stainless Steel 316	.64	
Rubber (60 A Belt)	Rubber (40 A Belt)	.62	
Rubber (60 A Belt)	Rubber (60 A Belt)	.73	
Rubber (60 A Belt)	Tool Steel	.86	
Rubber (60 A Belt)	Tungsten Carbide	.62	
Rubber (60 A Belt)	UHMW	.56	
Rubber (60 A Belt)	Urethane 50	.60	
Rubber (60 A Belt)	Urethane 80A	.70	
Rubber (60 A Belt)	Urethane	.67	
Rubber	Rubber	Clean and Dry	1.16
Rubber	Cardboard	Clean and Dry	0.5 - 0.8
Rubber	Dry Asphalt	Clean and Dry	0.9

Obrázek 5.5: Koeficienty tření gumy [31, 32]

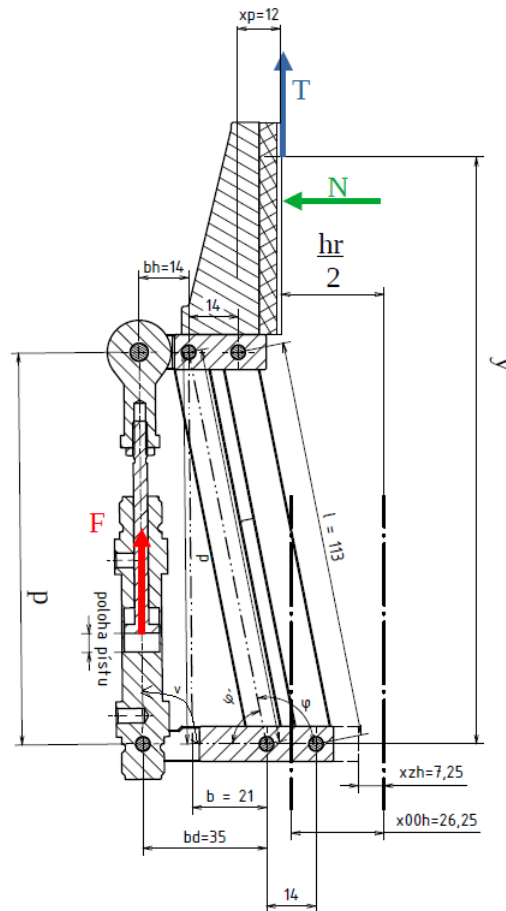
Pro dostatečnou spolehlivost byl zvolen koeficient tření na 0.55 a z něho, a třecí síly lze pak dopočítat sílu normálovou:

$$T = N \cdot \mu \Rightarrow N = \frac{T}{\mu} = \frac{4.9}{0.55} = 8.9N \quad (5.10)$$

Předběžný návrh síly je proveden za pomoci principu virtuálních prací. V soustavě působí celkem při akční síly a to síla normálová N , síla třecí T a síla v pístu F . Pozice sil, směry jejich působení i směr jejich virtuálních posuvů jsou znázorněny na obrázku 5.6.

Tečná síla T bude v případě, že je úhel $\varphi > 90^\circ$, zvětšovat normálovou sílu. Pokud je úhel $\varphi < 90^\circ$, síla T naopak normálovou sílu zmenšuje. Pro rozměr 75 mm, jak pro průměr objektu tvaru koule, tak pro hranu krychle, je úhel φ výrazně větší než 90° , proto není třeba zmenšování síly uvažovat. Je použit model, kdy je úhel $\varphi = 90^\circ$, a síla T tedy nemá vliv. Výsledek bude tedy se značnou rezervou. Základní rovnice PVP bude vypadat takto:

$$N \cdot \delta \frac{hr}{2} + F \cdot \delta p = 0 \quad (5.11)$$



Obrázek 5.6: Schéma PVP

Souřadnice δp je použita, protože se od polohy pístu liší pouze o konstantu. Pro další postup je potřeba najít vztah mezi δp a $\delta \frac{hr}{2}$, respektive vztah mezi p a $\frac{hr}{2}$. Tento vztah definuje rovnice 5.7, která byla upravena do následujících vztahů:

$$hr \frac{2x_{zh} + \frac{b^2 + l^2 - p^2}{2b} - \frac{p^2}{2b}}{2x_{zh} + \frac{b^2 + l^2 - p^2}{2b} - \frac{p^2}{2b}} \quad \text{tedy} \quad \delta \frac{hr}{2} = -2 \cdot p \cdot \delta p \cdot \frac{1}{2b} = -\frac{p}{b} \delta p \quad (5.12)$$

Po zavedení virtuálních posuvů pak platí následující rovnice:

Po dosazení do rovnice 5.11 je získán vztah pro požadovanou sílu F , která bude největší při maximální poloze pneumotoru:

$$F = -\frac{N \cdot \delta \frac{hr}{2}}{\delta p} = -\frac{N \cdot \left(-\frac{p}{b}\right) \delta p}{\delta p} = N \cdot \frac{p}{b} \stackrel{max}{=} N \cdot \frac{p_{max}}{b} = 8,9 \cdot \frac{115,5}{21} = 49N \quad (5.13)$$

Na základě kinematického rozboru byl předběžně vybrán lineární pneumatický motor DNSU od firmy FESTO, se zdvihem 10 mm. Podle požadované síly je pak nutné vybrat vhodný průměr pístu. Nabízejí se varianty shrnuté v obrázku 5.7.



Síly [N] a energie nárazu [J]	8	10	12	16	20	25	32	40	50	63
teoretická síla při 6 barech, pohyb vpřed	30	47	68	121	189	295	483	753	1178	1870
teoretická síla při 6 barech, pohyb vzad	23	40	51	104	158	247	415	633	990	1682
energie nárazu v koncových polohách pro tlumení P ¹⁾	0,03	0,05	0,07	0,15	0,20	0,30	0,40	0,70	1,00	1,30

Obrázek 5.7: DNSU Dosahované síly [36]

Pneumotor s průměrem pístu 12 mm má dostatečnou sílu, ale pro většinu objektů je značně předimenzován. Vzhledem k rezervě při výpočtu byl zvolen průměr pístu 10 mm, jehož síla by měla být dostačující. Pro případ velmi malých těžkých objektů je možné využít multiplikátor, protože válec je konstruován až na 10 barů. Pro jaké rozměry a koeficienty tření je tento motor dostatečný, bude ověřeno v kapitole 5.1.4.

Byl tedy zvolen dvoučinný pneumotor od firmy Festo s následujícím označením:

DSNU-10-10-P-A

Dokumentace k tomuto válci spolu s katalogovým listem je dostupná na stránkách výrobce a tvoří přílohu práce.

5.1.4 Silový rozbor

V této části je proveden silový rozbor uchopovacího mechanismu klasickým způsobem, tedy za pomoci statických rovnic. Vzhledem k malým silám a průměrům lícovaných šroubů byly zanedbány pasivní odpory. Soustava statických rovnic spolu se schématy jednotlivých částí tvoří přílohu Statická analýza paralelogramu.

Řešením dané soustavy rovnic je získán vztah mezi silou F a silou N . Do tohoto vztahu vstupuje dále rozměr objektu a jeho hmotnost. Z hmotnosti je určena třecí síla T podle konfigurace. Z rozměru je určen úhel φ a na něm závislý úhel ν . Výpočet tohoto úhlu je komplikovaný a je jiný vzhledem k meznímu úhlu $\varphi_{mez} = 100.71^\circ$. Platí:

$$\nu = \arcsin\left(\frac{l}{p} \cdot \sin(\varphi)\right) \Leftrightarrow \varphi < \varphi_{mez} \quad (5.14)$$



$$\nu = 180 - \arcsin\left(\frac{l}{p} \cdot \sin(\varphi)\right) \Leftrightarrow \varphi > \varphi_{mez} \quad (5.15)$$

Dále je určen vztah pro výpočet potřebného tlaku pneumotoru pro jeden prst. V obecné rovnici vystupuje také úhel ν , aby se jednalo o jednu rovnici.

$$tlak = \frac{0,128 \cdot T \cdot (\sin(\varphi) + \mu \cdot \cos(\varphi))}{\mu \cdot \sin(\varphi - \nu)} \quad (5.16)$$

Pokud bude dosazeno za ν , vzniknou dvě rovnice, každá pro jinou oblast, které vypadají následovně:

$$tlak = \frac{0,128 \cdot T \cdot (\sin(\varphi) + \mu \cdot \cos(\varphi))}{\mu \cdot \sin\left(\varphi - \arcsin\left(\frac{113 \cdot \sin(\varphi)}{\sqrt{4746 \cdot \cos(\varphi) + 13210}}\right)\right)} \Leftrightarrow \varphi < \varphi_{mez} \quad (5.17)$$

$$tlak = \frac{0,128 \cdot T \cdot (\sin(\varphi) + \mu \cdot \cos(\varphi))}{\mu \cdot \sin\left(\varphi + \arcsin\left(\frac{113 \cdot \sin(\varphi)}{\sqrt{4746 \cdot \cos(\varphi) + 13210}}\right)\right)} \Leftrightarrow \varphi > \varphi_{mez} \quad (5.18)$$

Tyto rovnice platí obecně pro jakýkoli uchopovaný předmět. Z hmotnosti tělesa a rozložení jeho váhy vůči uchopovacím prstům je nutné určit třecí sílu T a podle tvaru a rozměru uchopovaného objektu je potřeba určit úhel φ . Pro zadané objekty jsou tyto parametry dále určeny.

Objekt tvaru koule

Pro objekt tvaru koule platí následující vztah:

$$T_k = \frac{m_t \cdot g}{3} \quad (5.19)$$

Pro určení úhlu φ se vychází z rovnice 5.3

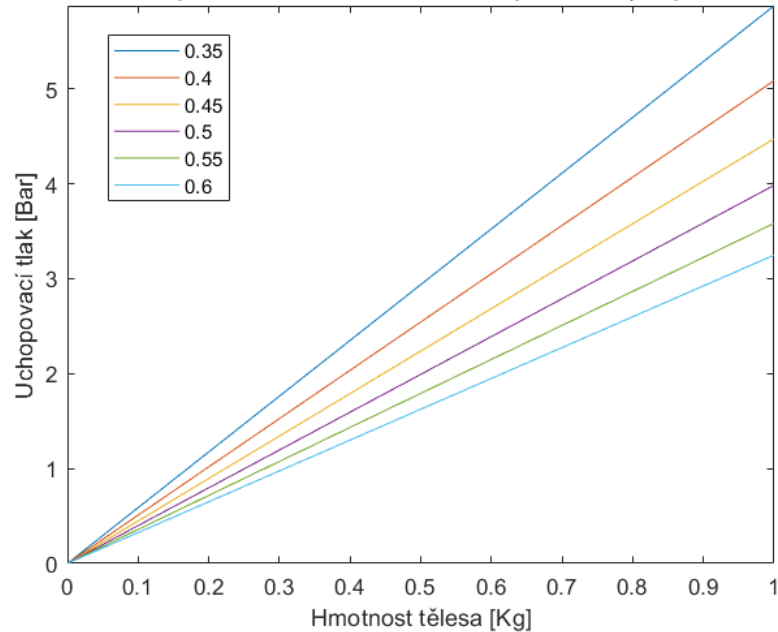
$$\varphi = \arccos\left(-\frac{\left(\frac{d}{2}\right) - x_{zk}}{l}\right) \quad (5.20)$$

Dosazením by pak vznikly vztahy pro výpočet požadovaného tlaku.

Tento vztah je následně vyjádřen graficky. Jedná se o závislost požadovaného tlaku na hmotnosti objektu s daným rozměrem 75 mm pro několik různých koeficientů tření. Z grafu lze určit, jaký koeficient musí mít objekt o určité váze, aby mohl být uchopen 5.8.

Z grafu je patrné, že kruhový předmět s průměrem 75 mm lze uchopit i při nízkém koeficientu tření, jako je například 0.35. Je zřejmé, že uchopovací tlak klesá s klesající hmotností a stoupá s klesajícím koeficientem tření.

Závislost uchopovacího tlaku na hmotnosti, pro různé μ a průměr 75mm



Obrázek 5.8: Závislost uchopovacího tlaku na hmotnosti a koeficientu tření při daném průměru 75 mm

Objekt typu hranol

Pro objekt typu hranol jsou potřebné třecí síly na jednotlivých prstech různé:

$$T_{h1} = \frac{m_t \cdot g}{2} \quad (5.21)$$

$$T_{h2} = \frac{m_t \cdot g}{4} \quad (5.22)$$

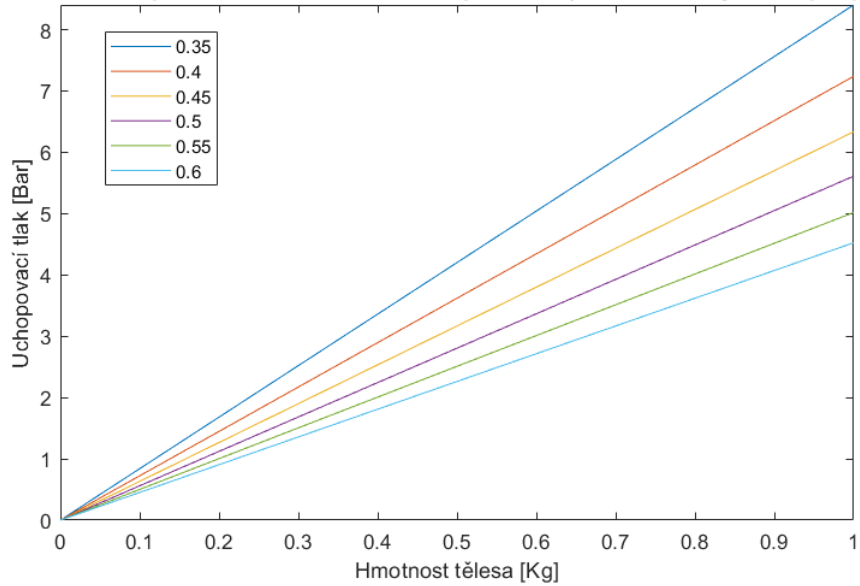
Pro prst A je tato síla i výsledný tlak dvakrát větší, než pro prst B. Pro určení úhlu φ se vychází z rovnice 5.7

$$\varphi = \arccos \left(-\frac{\left(\frac{hr}{2}\right) - x_{zh}}{l} \right) \quad (5.23)$$

Dosazením opět vznikají vztahy pro dopočet potřebného tlaku.

Pro hranaté objekty byly graficky zpracovány stejné závislosti jako u kruhových objektů. Na obrázku 5.9 je zobrazena charakteristika závislosti tlaku na hmotnosti a koeficientu tření pro zadanou délku hrany 75 mm.

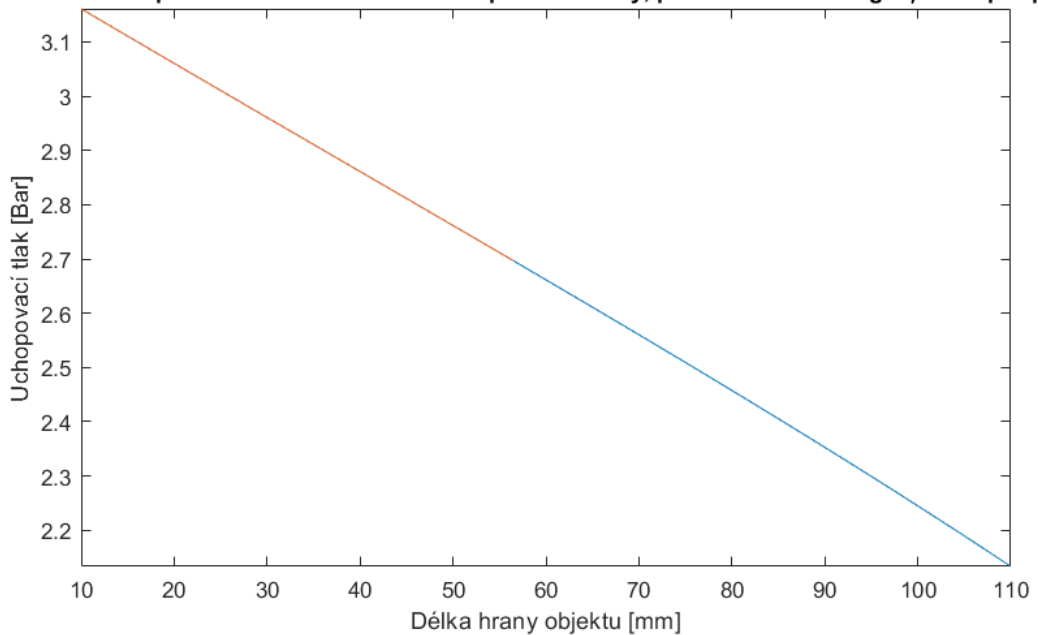
Závislost uchopovacího tlaku na hmotnosti, pro různé μ a délku hrany 75mm pro prst A



Obrázek 5.9: Závislost uchopovacího tlaku na hmotnosti a koeficientu tření při dané délce hrany 75 mm pro prst A

Pro uchopení objektu, který váží 1 kg a má charakteristický rozměr 75 mm, musí být na základě tohoto grafu koeficient tření minimálně 0.5. Třecí síla T tedy napomáhá v uchopení dostatečně a zvolený pneumotor je pro uchopení zadaného objektu vzhledem k dosahovaným koeficientům tření dostatečný.

Závislost uchopovacího tlaku na délce uchopované hrany, při hmotnosti 0.5 kg a μ 0.55 pro prst A



Obrázek 5.10: Závislost uchopovacího tlaku na délce hrany tělesa pro prst A a B

Poslední graf na obrázku 5.10 ukazuje, že závislost tlaku na charakteristickém rozměru není lineární, protože se pro úhel φ jako proměnnou vyskytují v závislosti goniometrické funkce. Protože se naklopení vahadel pohybuje v malém rozsahu, odchylka od linearit je také malá.

Funkce je zde tvořena dvěma částmi. V každé části platí jiný vztah pro úhel ν . Pro ostatní grafy se tato vlastnost neprojevuje, protože rozměr je vždy pevně dán a oba úhly se mění na konstanty.

Drobné hranaté objekty

Princip výpočtu je opět naprosto stejný. Třecí síla je pro oba prsty stejná a odpovídá T_{h1} . Úhel φ se určí také podobně a to konkrétně takto:

$$\varphi = \arccos \left(-\frac{\left(\frac{hrd}{2}\right) - x_{zhd}}{l} \right) \quad (5.24)$$

Nesymetrické objekty

Pro nesymetrické objekty nelze použít žádné zjednodušení. Je třeba podle umístění objektu a jeho rozměrů dopočítat úhel φ a ze statických rovnic určit třecí sílu T . Tyto hodnoty lze pak dosadit do výše uvedených vztahů a určit tak potřebný tlak pneumotoru.

Z grafů je patrné, že pro konkrétní rozměry a koeficienty tření se jedná u lineární závislosti hmotnosti. Při změně rozměru se tyto funkce mění nelineárně.

Potřebný tlak lze dopočítat podle uvedených vzorců, případně lze vyčíst z grafů v textové příloze Grafy silového rozboru. Pro výpočet slouží také matla-
bovský skript, který tvoří přílohu Výpočet tlaku dle hmotnosti objektu.

5.2 Přestavovací mechanismus

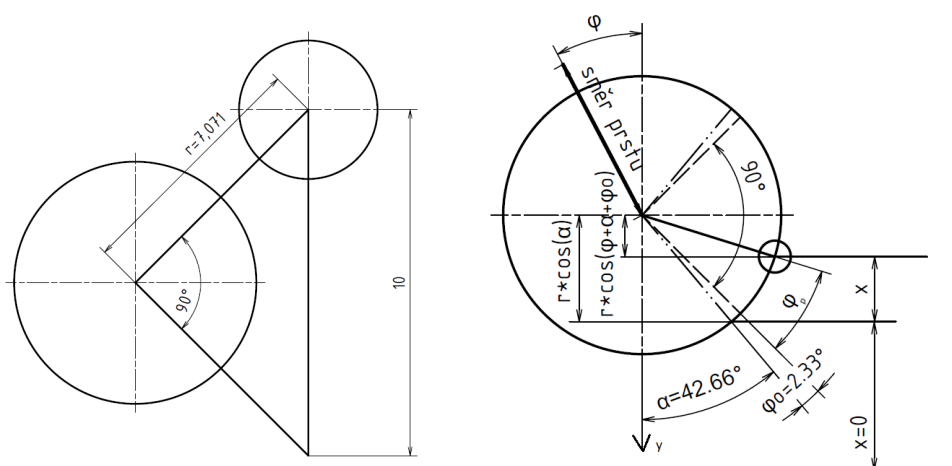
Tato část práce se zabývá návrhem mechanismu pro přestavování hlavice mezi třemi konfiguracemi znázorněných na obrázku 4.1 zelenými čarami.

Je patrné, že prst A se neotáčí, zatímco prsty B se otáčí v rozsahu 90° .

5.2.1 Návrh mechanismu a jeho rozměrů

Vzhledem k malým rozměrům byl předběžně vybrán pneumotor se zdvihem 10 mm. Mechanismus tedy musí zajišťovat při tomto zdvihu pootočení o 90° . K tomu bylo navrženo několik možností - využití kloubových vazeb, lankový mechanismus, použití ozubeného hřebenu a kola, a kluzný mechanismus. Součásti kloubového a lankového mechanismu by se dostávaly do kolize s ostatními částmi hlavice. Ozubený hřeben je náročný na výrobu a prostor. Jako nejvýhodnější, zejména prostorově, se ukázal mechanismus kluzný, kde byla kluzná vazba nahrazena valivou pro minimalizaci pasivních odporů.

Rozsah tohoto mechanismu záleží na vzdálenosti čepu od osy a lze ho určit podle Pythagorovy věty, nebo graficky z obrázku 5.11 vlevo.



Obrázek 5.11: Geometrie přestavovacího mechanismu

Určená vzdálenost je zmenšena na 6.8 mm, tak aby byl rozsah větší a bylo zajištěno spolehlivější dosažení koncových poloh. Úhlový rozsah je necelých 95° . Úhel, který svírá prst se spojnicí osy a čepu, je 135° , aby spojnice čepu a osy byla ve střední poloze vodorovná.

5.2.2 Kinematický rozbor

Cílem kinematického rozboru je určit funkci úhlu φ_p natočení prstů v závislosti na poloze pístu pneumotoru, který mechanismus pohání. Tento úhel odpovídá natočení čepu od osy y. Celá situace je naznačena na obrázku 5.11 vpravo.

Čárkovanou čarou je vyznačen požadovaný rozsah mechanismu a phantom čarou maximální dosažitelný rozsah, který je 94.66° . Souřadnice x vyjadřuje polohu vidlice oproti minimální poloze a její rozsah odpovídá zdvihu pneumotoru. Z geometrie vychází předpis pro souřadnici, ze kterého je následně vyjádřen úhel φ_p .

$$\varphi_p = \arcsin\left(\sin(\alpha) - \frac{x}{r}\right) - \alpha - \varphi_0 \quad (5.25)$$

Tato závislost je v daném rozsahu vyjádřena graficky na obrázku 5.12.



Obrázek 5.12: Průběh úhlu natočení prstu

Pro požadované konfigurace prstů jsou podstatné pozice při 0° (P1), 60° (S) a 90° (P2). Pro úhly jsou hodnoty x vyjádřeny v tabulce 5.1

Tabulka 5.1: Polohy pístu pro dané úhly natočení

φ [°]	0	60	90
x [mm]	0.19	6.76	9.8

Tyto hodnoty slouží pro kontrolu pozice prstů. Pro samotné přestavování není nutné znát tyto hodnoty, jelikož tlaky pneumotoru a tvar zářezů bude navržen tak, aby při daném tlaku zapadla záskočka do daného zářezu a tím zaaretovala polohu.

5.2.3 Návrh aretace a pohonu a silový rozbor

Pro aretaci jsou využity již výše zmíněné odpružené kuličkové záskočky. Kulička západky zapadá do připravených zářezů. Síla pro uvolnění je závislá na parametrech západky, vysunutí kuličky a na úhlu stěny zářezu. Ladit lze tuto sílu zasunutím kuličky, tedy vzdáleností západky od osy a sklonem zářezů podle následujícího vztahu:

$$F'_z = \frac{F_z}{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (5.26)$$

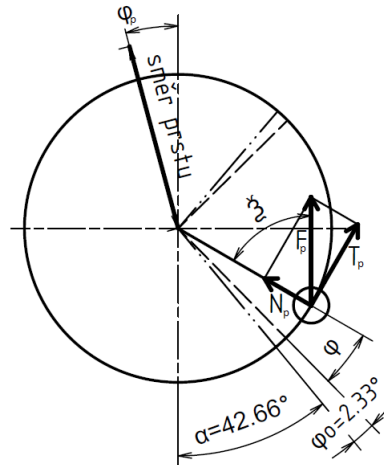
Vzhledem k malým rozměrům byl zvolen pneumatický válec ADN-S-10-10-A-A od firmy Festo. Jedná se o dvoučinný válec, který má zdvih i průměr 10 mm. Síly dosahované tímto pneumotorem jsou uvedeny v katalogu, jehož výstřižek je na obrázku 5.13. Katalogový list pneumotoru tvoří textovou přílohu Katalogový list ADN-S.

Síly [N] a energie nárazu [J]		
Ø pístu	6	10
teoretická síla při 6 barech, pohyb vpřed	17	47
teoretická síla při 6 barech, pohyb vzad	9,4	30,2
energie nárazu v koncových polohách	0,006	0,012

Obrázek 5.13: Dosahované síly ADN-S-10 [37]

Byla navržena kuličková západka K0309 od firmy Kipp. Tato západka bude použita v rozsahu 4 mm s maximální silou 9 N. Tu lze dále ladit polohou západky.

Na základě sil pneumotoru a jejich rozkladu patrného z obrázku 5.14 a síly na kuličce, byly navrženy sklony boků zářezů.



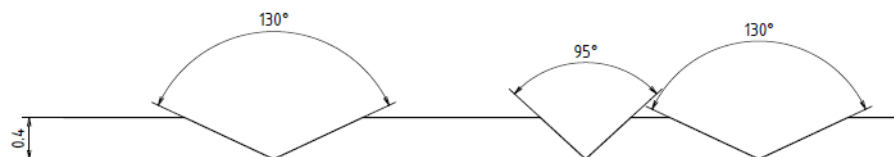
Obrázek 5.14: Rozklad sil na čepu

Síla F je dána tlakem ve válci. Tečná síla, která je pro další návrh podstatná, se pak určí následovně:

$$N_p = F_p \cdot \cos(\xi) = F_p \cdot \cos(45^\circ + \varphi_p) \quad (5.27)$$

Síla, která způsobí uvolnění západky, závisí na vzdálenosti čepu od osy a poloměru osazení se zářezy. Na základě těchto sil byly navrženy sklony stěn zářezů, potřebné tlaky a skutečné síly, které jsou zobrazeny na obrázku 5.15, který představuje rozvinutý tvar osy v místě zářezů.

Síly určené z navržených tlaků jsou vyšší, aby bylo překonáno také tření, které u západky vzniká. Na samotné přestavení prstů není třeba žádných sil, kromě sil na překonání pasivního odporu v ložiscích, který lze prakticky zanedbat. Veškerá potřebná síla je tedy určena právě na vyskočení západky.

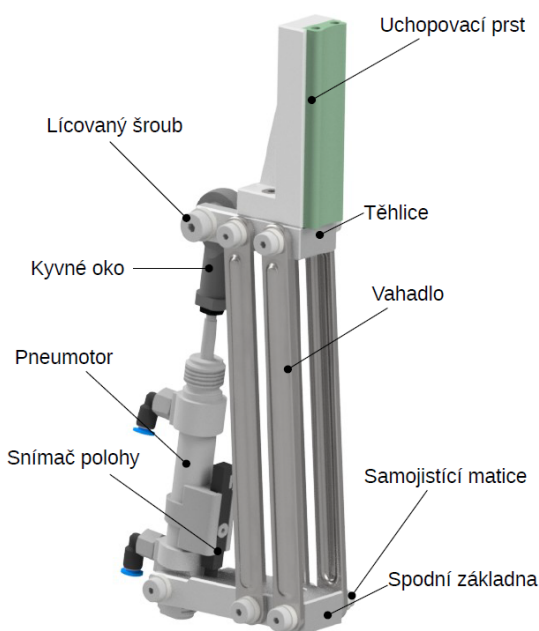


Tabulka			
Síla potřebná k vyskožení západky [N]	4.2	8.24	4.2
Navržený tlak CW [bar]	2.5	4.5	-
Navržený tlak CCW [bar]	-	6	3.8
Skutečně dosažená síla CW [N]	5.2	12.9	-
Skutečně dosažená síla CCW [N]	-	11	5.1

Obrázek 5.15: Návrh zářezů, sil a tlaků

6 Popis konstrukce

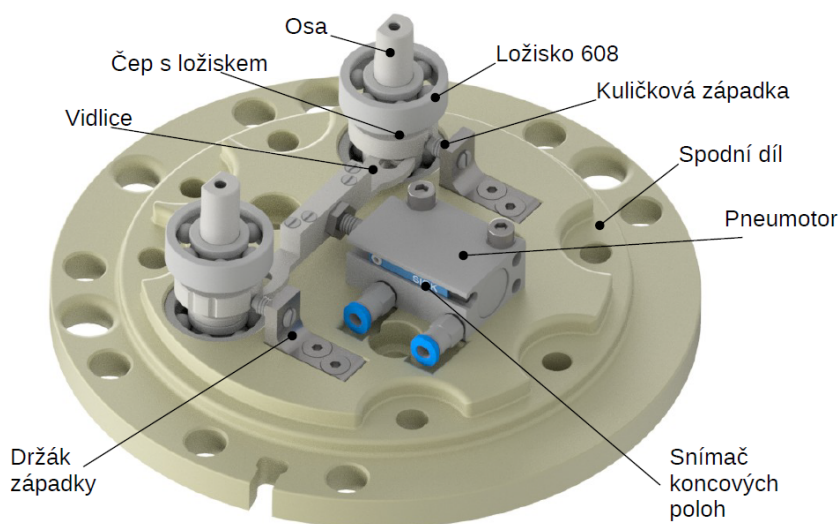
Paralelogram je tvořen spodní základnou, čtyřmi vahadly, těhlicí, pneumotorem osazeným kyvným okem. Tyto díly vzájemně spojují lícovací šrouby, které jsou zajištěny samojistícími maticemi a distančními podložkami. Vahadla jsou opatřena prolisy pro zvětšení tuhosti mechanismu. Jejich vzdálenost je navržena tak, aby nedocházelo k vzájemným kolizím. Uchopovací prst je na těhlici připevněn pomocí dvou šroubů s kuželovou hlavou pro zajištění pozice. Pneumotor je dále opatřen snímačem polohy SDAS-MHS pro možnost kontroly deformace. Základna je opatřena dírou pro nasunutí osy, případně dvěma dírami s kuželovým zahloubením pro připevnění neotočného prstu do tělesa hlavice. Tato koncová sestava je na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Koncová uchopovací sestava

Těleso hlavice je složeno ze dvou dílů. Spodní díl je přímo nasazován na koncovku robotu a nese přestavovací pneumotor se snímačem MZ2Q-CFSPSKU0 od firmy Sick pro snímání koncových poloh. Píst nese vidlice, které zapadají do ložisek na čepu a zajišťují otáčení. Jejich rozměr je navrhnout tak, aby nedocházelo ke kolizím ani k vypadnutí čepu. Pro aretaci v daných polohách slouží kuličková západka zašroubovaná v krátkém L-profilu. Na ose je v horní části osazení, na kterém je nasazena koncová sestava, upevněná pomocí šroubu a podložky

a pojištěná stavěcím šroubem proti pootočení. Osy jsou uloženy v ložiscích, která zachytávají veškeré uchopovací síly a přenášejí je do tělesa hlavice. Horní díl tělesa nese také neotočný prst a ultrazvukový bezkontaktní snímač pro kontrolu uvolnění objektu. Obě části jsou spojeny pomocí šroubů a slícovány pomocí kolíčků a vzhledem k tvarové komplikovanosti jsou vyrobeny pomocí 3d tisku.

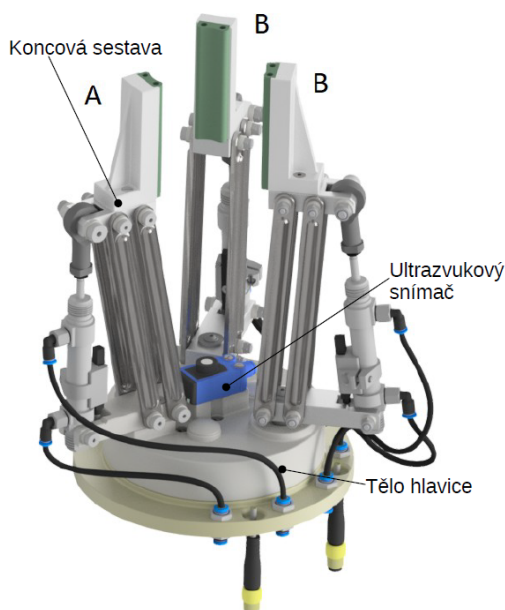


Obrázek 6.2: Těleso hlavice

Do spodního dílu tělesa jsou našroubovány průchozí fitinky na propojení hadiček od pneumotorů a od zdroje tlakového vzduchu. Dále se zde nacházejí otvory pro prostrčení kabelů od senzorů. Kabely a hadičky od jedné koncové sestavy jsou pak vedeny flexibilním rukávem pro zvýšení robustnosti hlavice. Tento rukávec není z praktických důvodů na modelu zobrazen. Celkový pohled se nachází na obrázku 6.3. Neotočný prst má označení A, dva otočné prsty mají označení B. Vzhledem k rozměrům připojovacího rozhraní uchopovacích pneumotorů a k dostupným hadicím, byla použita hadice PUN-3X0,5-SW opět od firmy Festo. Její vnější průměr je 3 mm a vnitřní průměr je 2.1 mm. Délka hadice se liší. Pro prst B je to 110 a 130 mm, pro prst A 100 a 150 mm. Pro přestavovací pneumotor byly využity stejné hadice o délce 50 mm.

Pro aretaci v jednotlivých polohách slouží odpružené kuličkové záskočky, které zapadají do připravených zářezů.

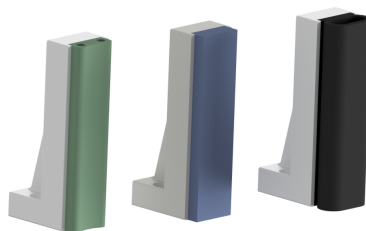
Osy jsou uloženy v kuličkových ložiscích od firmy ZKL s označením 608. Ložiska jsou uchycena ve spodním a v horním díle tělesa hlavice. Osy mají několik osazení pro ložiska, zářezy, pro čep a pro nasazení koncové sestavy.



Obrázek 6.3: Celkový pohled

6.1 Návrh uchopovacího prstu

Uchopovací prst, který se skládá ze základu prstu a dotekové vrstvy, přichází do kontaktu s objektem a díky tření mezi nimi vzniká třecí síla, která objekt drží. Tato síla je závislá na koeficientu tření, proto je důležitá volba materiálu dotekové vrstvy. Jako ideální byla vybrána guma. Kromě samotného materiálu záleží i na jeho struktuře a provedení vrstvy, například využití tunelů. Kromě kupované gumové, může být vrstva vytištěna z vhodného materiálu 3d tiskem. Na obrázku 6.4 je vidět několik navržených variant uchopovacího prstu.



Obrázek 6.4: Varianty uchopovacího prstu

Prsty se dají měnit a používat tak různé tvary a materiály a tímto lze také měnit rozsah hlavice.

Konstrukční návrh je zpracován pomocí 3D modelu, který tvoří přílohu práce.



7 Kontrolní výpočty

V této sekci jsou provedeny kontrolní výpočty kritických míst obou mechanismů. Síly působící v mechanismech jsou analyzovány pomocí soustavy rovnic ze sekce 5.1.4. Místo dosazení hmotnosti uchopovaného předmětu je zde dosažen maximální konstrukční tlak pneumotoru a z něj dopočtená normálová a maximální třecí síla. Jsou uváděna místa kritického zatížení, dále je uvedena hodnota tohoto zatížení a výsledná bezpečnost. Schémata s působícími silami, rovnice a průběhy momentů jsou součástí přílohy Kontrolní výpočty.

7.1 Kontrola lícovaných šroubů

Lícované šrouby jsou shodně namáhány reakcemi v rotačních vazbách. Zatížení některých šroubů jsou dokonce totožná. Liší se síly pro jednotlivé uchopované průměry, a proto je vždy nalezen ten kritický.

7.1.1 Kontaktní tlak

Kontaktní tlak se určí jako podíl síly a plochy, na kterou působí, bezpečnost pak porovnáním této a dovolené hodnoty. Pro vahadla je $p_d = 40 \text{ MPa}$, pro kontakt s hliníkovým dílem byl z důvodu chybějících dat, s ohledem na vysokou bezpečnost, zvolen na čtvrtinu. [34] Kontrolu popisuje tabulka 7.1.

Tabulka 7.1: Kontrola kontaktních tlaků lícovaných šroubů

Šroub	Oblast	R [N]	d_{kr} [mm]	S [mm^2]	p_k [MPa]	p_{kD} [MPa]	k [-]
D	Vnější	39.15	30	25	1.958	10	5.1
D	Vnitřní	78.3	30	40	2.448	40	16.3
B,E	Vnější	43.05	30	10	4.307	40	9.3
B,E	Vnitřní	86.1	30	72	1.196	10	8.4
C,F	Vnější	20.45	130	10	2.047	40	19.5
C,F	Vnitřní	40.9	130	72	0.569	10	17.6

7.1.2 Ohybové napětí

Maximální ohybový moment i napětí působí uprostřed šroubu. Kontrola je přehledně shrnuta v tabulce 7.2. Dovolené napětí bylo s velkou rezervou zvoleno 100 MPa, jako pro případ střídavého namáhání [33].



Tabulka 7.2: Kontrola ohybových napětí šroubů

Označení	d [mm]	W_o [mm^3]	M_{omax} [$N \cdot mm$]	σ_{omax} [MPa]	σ_d [MPa]	k [-]
A	5	12.27	176.23	14.36	100	7
D	4	6.28	176.3	28.1	100	3.6
B,E	4	6.28	247.6	39.41	100	2.5
C,F	4	6.28	117.7	18.73	100	5.3

Z obou kontrolovaných hledisek vychází dostatečná bezpečnost. Rozměry už zmenšovat nelze, pro některé díly by mohl být použit méně kvalitní materiál.

7.2 Kontrola napětí vyráběných součástí

Je provedena kontrola napětí pro prst, dolní základnu, těhlice a osu v nejkritičtějším místech a nejnepříznivějších polohách.

7.2.1 Uchopovací prst

Největší moment a zároveň nejslabší místo je v místě děr pro šrouby. Materiál je PETG-HT, který má mez pevnosti 42 MPa [34]. V tabulce 7.3 je kontrola shrnuta.

Tabulka 7.3: Kontrola ohybových napětí prstu

M_o [N.mm]	σ_o [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	k [-]
1375	17.2	42	2.44

Při kontrole bylo zanedbáno žebro, které bezpečnost zvyšuje.

7.2.2 Těhlice

Nejkritičtější je zde místo, kde končí zářez pro pohyb pneumotoru, a místo prostřední díry na šroub. Těhlice i spodní základna je vyrobena z hliníkové slitiny EN 6060 s mezí kluzu 195 MPa. Kontrola je uvedena v tabulce 7.4.

Tabulka 7.4: Kontrola ohybových napětí těhlice

Pozice	x [mm]	d_{krit} [mm]	M_o [N.mm]	W_o [mm^3]	σ_o [MPa]	σ_{pd} [MPa]	k [-]
Zářez	10	70	783.2	166	4.7	195	41
Šroub	14	40	893	280.8	3.1	195	61



Napětí jsou velmi malá a nebude tedy docházet ani k průhybům. Nabízí se volba méně kvalitního, tedy levnějšího materiálu.

7.2.3 Spodní základna

Pro spodní základnu je nejkritičtější místo napojení osy a místo prostředního šroubu. Vše je shrnuto v tabulce 7.5.

Tabulka 7.5: Kontrola spodní základny

Pozice	x [mm]	d_{krit} [mm]	M_o [N.mm]	W_o [mm ³]	σ_o [MPa]	σ_{pd} [MPa]	k [-]
Šroub	35	70	2741	280.8	9.8	195	20
Osa	42	130	2820	166	17	195	11.5

Napětí jsou vyšší, než pro těhlici z důvodu větších rozměrů.

7.2.4 Osa

Osa je namáhána kombinovaně a největší redukované napětí určené pro nejmenší průměr vychází pod horním ložiskem. Je použita ocel 11 600 s mezí kluzu 300 MPa. Kontrolu shrnuje tabulka 7.6.

Tabulka 7.6: Kontrola osy

σ_{red} [MPa]	σ_{pd} [MPa]	k [-]
104	300	2.9

Bezpečnost bude ve skutečnosti vyšší, protože průměr pod ložiskem není minimální.

7.2.5 Statická kontrola ložisek

Ložiska jsou vzhledem k pouze občasnému otáčení kontrolována staticky, podle katalogu výrobce. Kritické je spodní ložisko. Kontrola je v tabulce 7.7.

Tabulka 7.7: Kontrola ložiska

P_o [N]	C_{or} [N]	k [-]
202.4	1356	6.7

Ve všech kontrolních výpočtech vyšla dostatečná bezpečnost a nemělo by tedy docházet k defektům hlavice.



8 Návrh logiky řízení

V této kapitole jde o navržení způsobu kontroly přítomnosti objektu, kontroly deformace a kontroly maximální uchopovací síly, a využití těchto kontrol pro zajištění bezpečného a spolehlivého uchopení. Kontroly zajišťují navržené senzory a na jejich základě je ovládán tlak v pneumatorech.

8.1 Kontrola poškození

Objekt může být poškozen dvěma způsoby. Deformací a porušením z důvodu příliš vysoké uchopovací síly.

8.1.1 Kontrola deformace

K trvalé, plastické deformaci dochází po překročení meze kluzu. Elastická deformace ale také nemusí být žádoucí. Například při montáži nesmí být jednotlivé součásti deformovány.

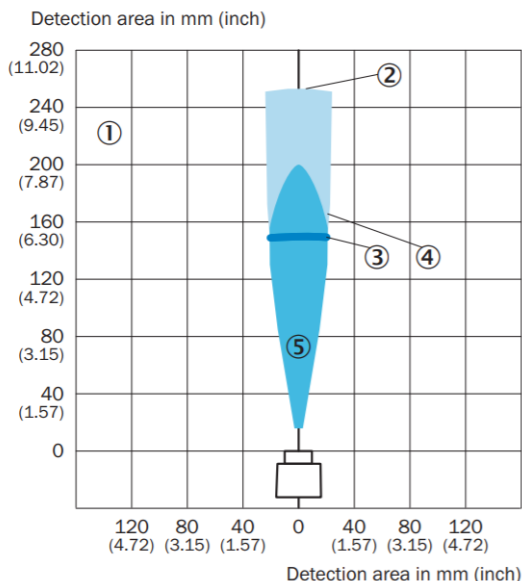
Ke kontrole deformací slouží snímače polohy na pneumatorech uchopovacího mechanismu. Pro kontrolu deformace je třeba znát počáteční a aktuální rozměr. Aktuální rozměr je určen pomocí senzorů jako kombinace jednotlivých posunů. Počáteční rozměr pak musí být zadán, případně ho lze u těles odolných vůči deformaci rozpoznat při nárůstu tlaku v pneumatorech.

8.1.2 Ovládání uchopovací síly

Díky využití pneumatů je možné uchopovací sílu řídit přímo změnou tlaku. Z aktuálního tlaku lze při známém uchopovacím rozměru a hmotnosti objektu dopočítat aktuální uchopovací sílu, která nesmí překročit maximální hodnotu. Tuto sílu lze kontrolovat výpočtem ještě před navýšením tlaku. Z důvodu zanedbání tření při výpočtu je nutné počítat s jistou rezervou.

8.2 Kontrola přítomnosti a uvolnění objektu

Přítomnost objektu je kontrolována pomocí odrazového bezkontaktního senzoru vzdálenosti, který funguje na principu ultrazvuku. Jedná se o senzor UC4-1334A od firmy Sick. Rozsah tohoto snímače je znázorněn na obrázku 8.1.



Obrázek 8.1: Rozsah snímače UC4-13 [38]

Konec senzoru je od konce prstů vzdálen přibližně 160 mm, je tedy možné detekovat objekt a také kontrolovat vzdálenost od podložky.

Kromě kontroly přítomnosti lze také neustálým přeměřováním vzdálenosti detekovat uvolňování objektu. Pokud se tato vzdálenost v čase mění, k uvolnění dochází. V tom případě je třeba uchopit objekt s větší silou.

8.3 Uchopování pevné součásti

Pro uchopování pevné součásti není potřeba kontrolovat ani deformaci ani uchopovací sílu. Uchopení může probíhat maximální silou, případně vypočtenou potřebnou silou. Při kontrole uvolnění lze sílu podle potřeby navyšovat. Logiku uchopení vyjadřuje vývojový diagram na obrázku 8.2.

Koeficient k navyšuje potřebný tlak a tím je i spolehlivost úchopu vyšší. Platí tedy že $k > 1$.

8.4 Uchopování deformovatelné součásti

Pro deformovatelný objekt je nutná kontrola deformace během uchopování. Lze uchopovat vypočteným tlakem, případně lze tlak omezit dosaženou deformací. Celý proces je znázorněn ve vývojovém diagramu 8.3.



Opět je zde použit koeficient k , pro spolehlivější uchopení. Koeficient q , který vyjadřuje bezpečnost deformace a koeficient l , první uchopovací deformaci při neznámém jmenovitém tlaku. Platí že $k > 1$, $q < 1$ a $l < 1$, například 0.5. Uchopovací deformace se zvětšuje až na maximální, po takových krocích, aby bylo uchopení dostatečně rychlé a zároveň šetrné.

8.5 Uchopování s kontrolou maximální síly

Při uchopování s kontrolou maximální síly je potřeba z této síly určit dovolený tlak. Tento tlak nesmí být překročen a od toho se odvíjí celá logika uchopování znázorněná ve vývojovém diagramu 8.4.

Koeficient k má zde stejný význam jako v předchozích diagramech. Koeficient q opět zajišťuje bezpečnost, tentokrát síly. Koeficient l podobně jako pro předchozí variantu určuje hodnotu tlaku pro první uchopení. Tlak je následně navyšován stejně jako uchopovací deformace v předchozím případě.

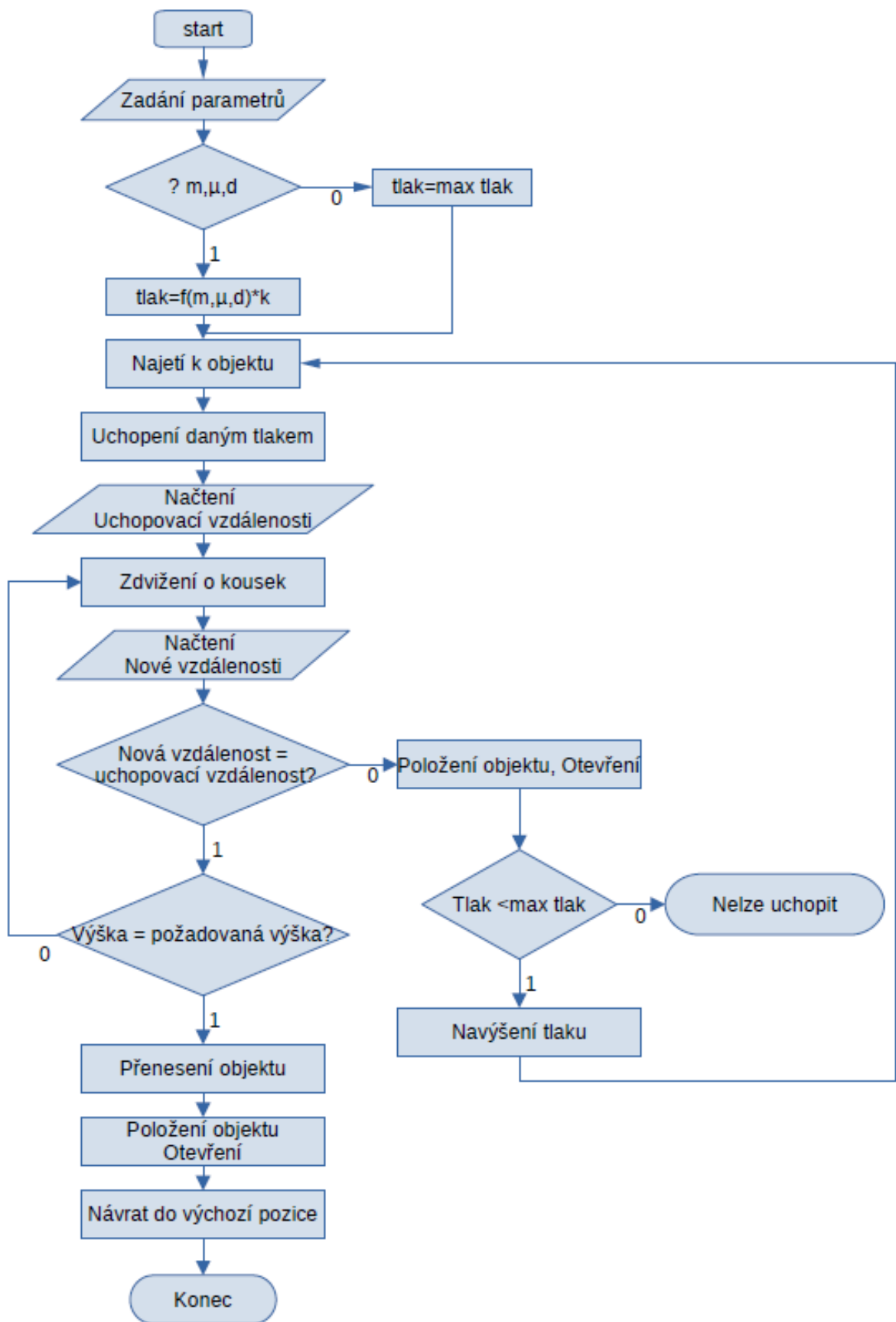
Pro všechny tři případy se může uchopování objektu časově značně protáhnout. Proto je vhodné při uchopování více stejných těles, uložit parametry, při nichž byl úchop úspěšný, a pro další kus použít toto nastavení.

8.6 Uchopování s kontrolou síly i deformace

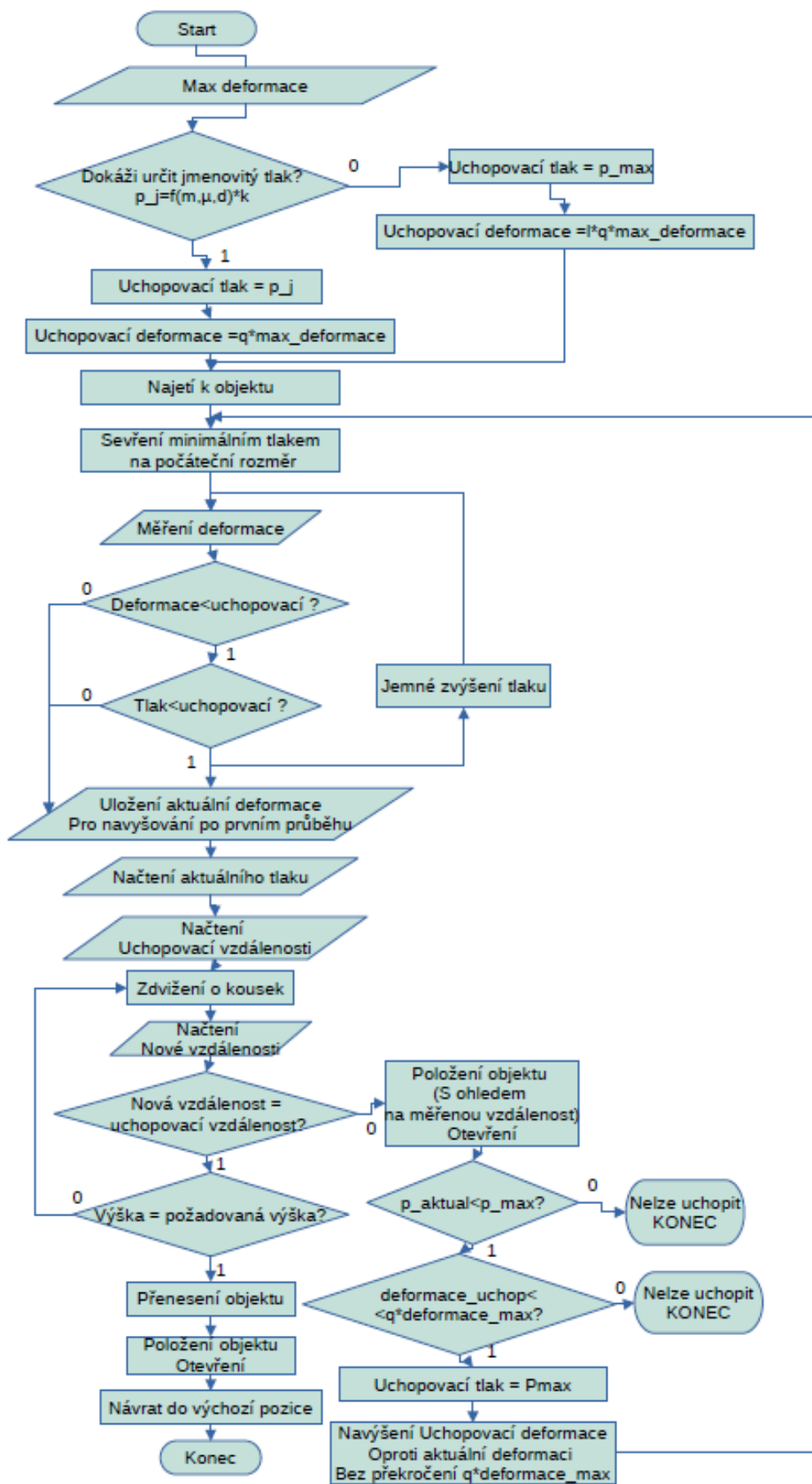
Při této variantě se vychází z diagramu 8.2. Maximální tlak zde však nesmí překročit tlak dovolený, který je počítán pro kontrolu maximální síly. Jmenovitý tlak pak nesmí také přesáhnout tento dovolený tlak. Jinak je postup naprosto stejný.

8.7 Kontrola pozice přestavby

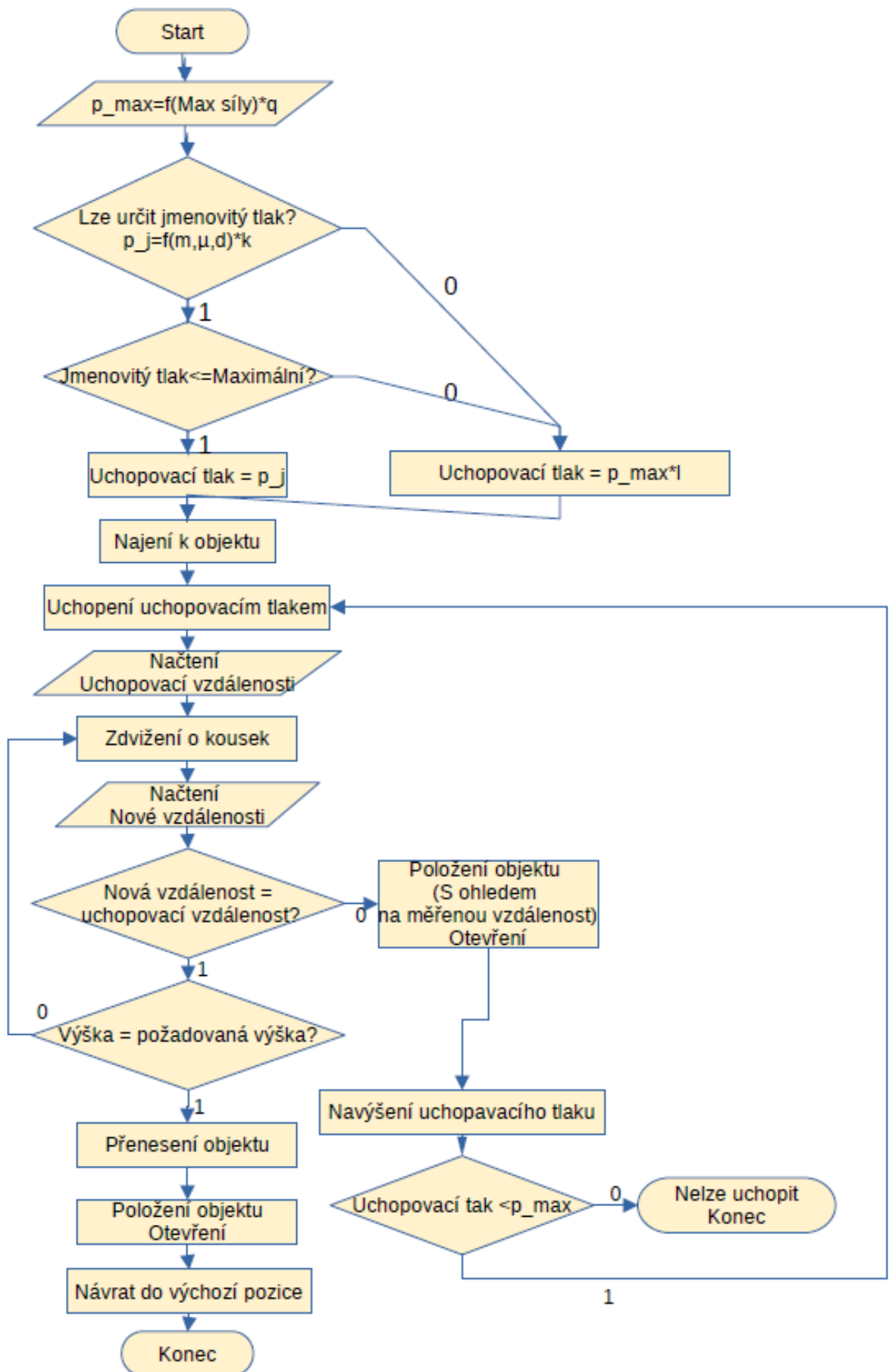
K této kontrole slouží snímač polohy na přestavovacím pneumotoru, který dokáže rozpoznat dvě krajní polohy, a podle toho lze rozhodnout, ve které pozici se nachází uchopovací prsty. Pokud je píst v poloze blízké 0, jedná se o konfiguraci P1. Je-li píst v poloze blízké 10, jedná se o konfiguraci P2. Pokud se píst nenachází ani v jedné z těchto měřených poloh, jedná se o středící konfiguraci S.



Obrázek 8.2: Vývojový diagram pro uchopení pevné součásti



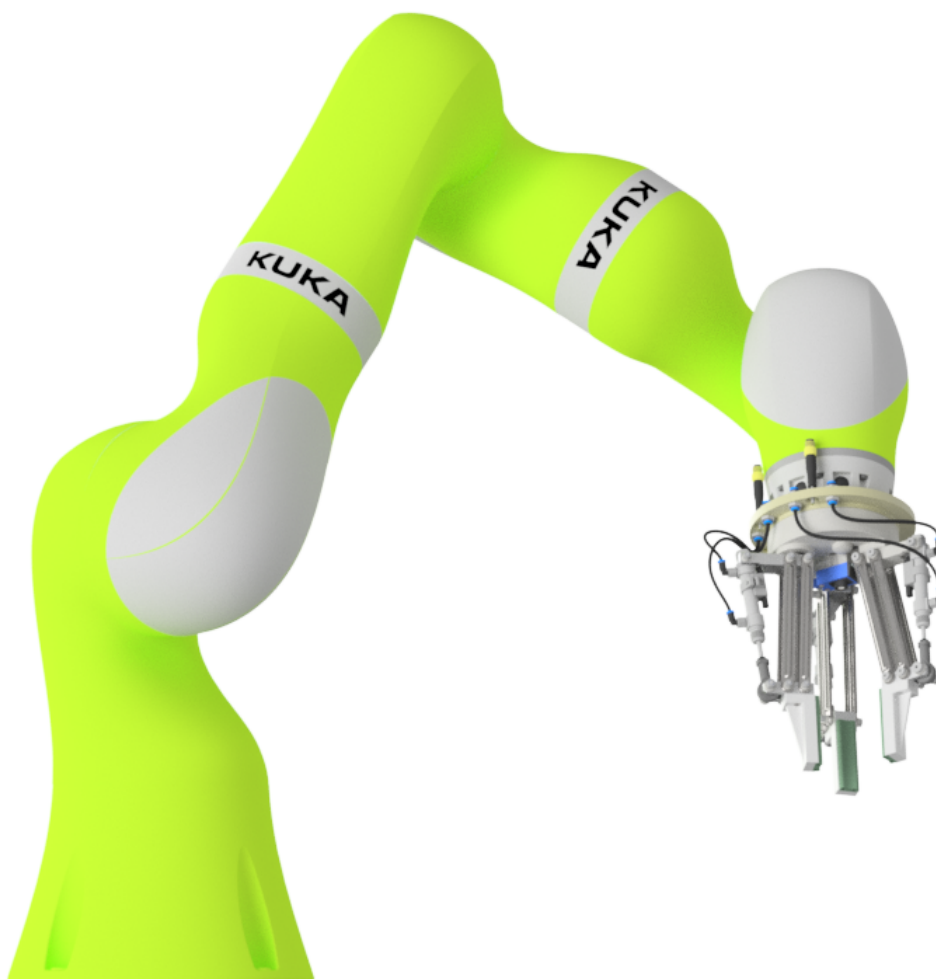
Obrázek 8.3: Vývojový diagram pro uchopení deformovatelné součásti



Obrázek 8.4: Vývojový diagram pro uchopování s kontrolou síly

9 Závěr

V rámci této práce byla provedena rešerše dostupných řešení smart ucho-
povacích hlavic. Bylo provedeno rozdělení hlavic z hlediska kinematiky. Dále byla
provedena rešerše současného řešení senzorů pro kontrolu deformace a síly
a jejich využití na úchopných hlavicích. Dále byly zanalyzovány možnosti kont-
roly přítomnosti a uvolňování objektu, spolu s rešerší senzorů, které tuto kontrolu
umožňují. Další část rešerše se zabývá využitím aktivních i pasivních flexibilních
prvků.



Obrázek 9.1: Navržená hlavice připevňená na robotu



Na základě rešerše byly navrhнутy tři varianty kinematiky hlavice s možnostmi kontroly daných parametrů a s možností kontroly přítomnosti objektu. U těchto variant byl navržen základní kinematický princip a možnosti umístění senzorů pro kontrolu deformace a uvolnění. Z těchto variant byla vybrána jedna finální varianta, která byla dále podrobně zpracována.

Byla vybrána varianta s možností přestavby prstů pro paralelní a centrální uchopení. Pro pohon uchopování i přestavby jsou využity pneumatické lineární motory. Pneumotory pro uchopování jsou opatřeny snímači polohy, aby byla možná kontrola deformace uchopovaného objektu. Přestavovací pneumotor je opatřen snímáním krajních poloh, aby bylo možné kontrolovat natočení prstů. Pro udržení správné konfigurace je přestavovací mechanismus opatřen aretací pomocí kuličkových západek. Součástí hlavice je také ultrazvukový snímač vzdálenosti pro kontrolu přítomnosti a uvolnění objektu.

Pro tuto variantu byl proveden jak kinematický, tak silový rozbor pro uchopovací, i pro přestavovací mechanismus. Byly provedeny základní kontrolní výpočty. Byl také navržen uchopovací prst.

V závěru práce je navržena a popsána logika řízení uchopování objektu s ohledem na jeho náchylnost na poškození.

Hlavice je navržena pro robota KUKA IIWA, a na obrázku 9.1 je na tomto robotu zobrazena.



Seznam použité literatury

- [1] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. 1. vyd. Ostrava : Ediční středisko VŠB - TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0
- [2] GRABIT, Inc, *Grabit products* [online]. Utah : Godaddy.com, LLC, 2015. [30.11.2020]. Dostupný z: <https://grabitinc.com/products/>
- [3] Cutler, J., C., and Christopher, G., M. *Dictionary of Energy*, 2. vyd. Amsterdam: Elsevier, 2014. 701 s. ISBN 9780080968124 Dostupné z: ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=1821967>.
- [4] SKAŘUPA, J. MOSTÝN, v. *Teorie průmyslových robotů*. 1. vyd. Košice: VIE-NALA, 2000. 150 s. ISBN 80-88922-35-6.
- [5] KOLÍBAL, Z. ET AL. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: VUTUM, 2016. 788 s. ISBN: 978-80-214-4828-5
- [6] SCHUNK GmbH & Co. KG. *SCHUNK Gripping Systems : Product Overview* [Online]. Lauffen am Neckark : SCUNK GmbH & Co. KG., 2019 [cit. 10.11.2020]. Dostupné z WWW: https://schunk.com/fileadmin/user_upload/Live_ab_2016/06_Service/Kataloge/ab2016/Neu/PA01023632_EN_Produktuebersicht_Greifsysteme_WEB.pdf
- [7] ROBOTIQ. *3-Finger adaptive robot gripper* [Online]. Canada: Robotiq, December 2020 [cit 4.1.2021]. Dostupné z WWW: https://blog.robotiq.com/hubfs/Product-sheets/3-Finger-Adaptive-Robot-Gripper/Product_sheet-3F-EN.pdf?_ga=2.129197260.1567691658.1611493582-1017200188.1603216252
- [8] B. Chvála, R. Matička, and J. Talácko, *Průmyslové manipulátory a roboty*. Praha: České vysoké učení technické, 1983. ISBN: 80-03-00361-X
- [9] CHARVÁT, Jaroslav. *Teorie mechanismů*. 1. vyd. Praha : SNTL n.p., 1964. 338s. ISBN 05-239-64
- [10] BOLEK, Alfréd. KOCHMAN, Josef. *Části strojů : 1. svazek*. 5.vyd, v SNTL 1.vyd. Praha : SNTL n.p., 1989. 780s. ISBN 04-202-89



- [11] SCHUNK GmbH & Co. KG. *Uchopovací systémy* [online]. Lauffen am Neckar : SCUNK GmbH & Co. KG., 2020 [cit. 15.11.2020] Dostupné z WWW: https://schunk.com/cz_cs/uchopovaci-systemy/
- [12] KŘÍŽ, Rudolf. WEIGNER, Karel. SVOBODA, Jaroslav. *Stavba a provoz strojů III : mechanismy*. 1.vyd. Praha : SNTL, 1979. 165 s.
- [13] ŠREJTE, Josef. *Kinematika : se základy teorie mechanismů*. Přepřacované vydání. Praha : SNTL, 1962. 270 s. ISBN 05-054-62
- [14] TECHMAN ROBOT INC. *Techman robot* [online]. Taoyuan, Taiwan : Techman robot, 2019 [cit. 18.11.2020]. Dostupné z WWW: <https://www.tm-robot.com/en>
- [15] SVOBODA, Vojtěch. *Flex hand* [online]. Crefeld, Germany : Fresh Services 2011 [cit. 18.11.2020]. Dostupné z WWW: <http://www.nachirobotics.eu/flex-hand/>
- [16] ONROBOT. *Robot arm grippers and EOAT components* [online]. Odense, Denmark : Linode LLC 2020 [cit. 18.11.2020], Dostupné z WWW: <https://onrobot.com/en/products>
- [17] APPLIEDROBOTICS. *Grippers* [online]. Arona : Guareschi adv, 2020 [cit. 3.12.2020]. Dostupné z WWW: <https://www.appliedrobotics.com/products/automation/grippers/>
- [18] VOJÁČEK, Antonín. *Odporové tenzometry : princip, provedení, použití, historie* [online]. Praha: HW server, 19. Březen 2017 [cit. 2.12.2020]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-principprovedeni-pouziti-historie.html>
- [19] JENČÍK, Josef. *Technické měření*. 1. vyd. Praha :ČVUT, 2000. 212s. 80-01-02138-6
- [20] VOLF, Jaromír. *Taktilní senzory pro automatizaci*. Automa. 2008, 7, 16-19
- [21] BURKA, Alex. *The BioTac - Multimodal Tactile Sensor* [online]. Ros.org, 2015 [cit. 7.12.2020]. dostupné z WWW: <http://wiki.ros.org/BioTac>
- [22] DZITAC, Pavel. MAZID, Abdul. *Friction-based slip detection in robotic grasping*. IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial



- Electronics Society, Yokohama, 2015, pp. 004871-004874, doi: 10.1109/IECON.2015.7392863.
- [23] VEIGA, Filipe. VAN HOOFF, Herke. *Stabilizing novel objects by learning to predict tactile slip*. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, 2015, pp. 5065-5072, doi: 10.1109/IROS.2015.7354090.
- [24] IKEDA, Atsutoshi. *Grip force control for an elastic finger using vision-based incipient slip feedback*. 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566), Sendai, 2004, pp. 810-815 vol.1, doi: 10.1109/IROS.2004.1389452.
- [25] FESTO. *FlexShapeGripper* [online]. Germany:Festo [cit. 10.1.2021]. dostupné z WWW: <https://www.festo.com/group/en/cms/10217.htm>
- [26] SOFT ROBOTICS. *Them mGrip systems*[online]. [cit. 15.1.2021] dostupné z WWW: <https://www.softroboticsinc.com/products/mgrip/>
- [27] SAMSYS. *Silicone gripper : Soft Gripper from OnRobot* [online]. Germany [Cit. 18.1.2021]. Dostupné z WWW: <https://www.samsys.eu/en/product/silicone-gripper-soft-gripper-from-onrobot/>
- [28] FESTO. *MultyChoisGripper* [online]. Germany : Festo 2014 [cit. 17.1.2021]. Dostupné z WWW: https://www.festo.com.cn/net/SupportPortal/Files/333986/Festo_MultiChoiceGripper_en.pdf
- [29] VISEVI. *Camera-based tactile sensor* [online]. Germany 2018, [cit. 10.12.2020]. Dostupné z WWW: <https://www.visevi.com/en/product-tactile.html#tactile>
- [30] SHIMONOMURA, Kazuhiro. *Tactile Image Sensors Employing Camera: A Review*. Sensors. 2019, vol. 19, 3933. <https://doi.org/10.3390/s19183933>
- [31] ENGINEERS EDGE. *Coefficient of Friction Equation and Table Chart* [online]. Georgia 2020. Dostupné z WWW: https://www.engineersedge.com/coefficients_of_friction.htm
- [32] ENGINEERING TOOLBOX. *Friction and Friction Coefficients* [online],[cit. 18.6.2021]. Dostupné z WWW: https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html



- [33] E-KONTRUKTER. *Hodnoty mezí pevnosti, kluzu, únavy a dovolených napětí pro ocel* [online]. Brno, 2017 [cit. 20.6.2021]. Dostupné z WWW: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/hodnoty-mezi-pevnosti-kluzu-unavy-a-dovolenych-napeti-pro-ocel>
- [34] PRUSA RESEARCH A.S. *Materiály* [online]. Praha 2021 [cit. 20.6.2021]. Dostupné z WWW: https://help.prusa3d.com/cs/materials#_ga=2.122337858.89171896.1625866445-184053306.1625866445
- [35] STROJMETAL ALUMINIUM FORGING. *Tabulka slitin* [online]. Kamenice 2021 [cit. 21.6.2021]. Dostupné z WWW: <https://www.strojmetal.cz/tabulka-slitin>
- [36] FESTO. *Kruhové válce DSNU/DSNUP/DSN/ESNU/ESN. Festo 2017.*
- [37] FESTO. *Kompaktní válce ADN-S/AEN-S. Festo 2019.*
- [38] SICK. *Ultrazvukové snímače UC4-1334A. Sick 2021.*



Seznam použitého software

1. MathWorks Matlab - studentská licence
2. Autodesk Inventor pro - studentská licence
3. Autocad - Studentská licence
4. Lyx - opensource
5. LibreOffice Draw - opensource

Seznam obrázků

2.1	Transformační mechanismy MÚH [1, s. 143]	12
2.2	Paralelní hlavice LEG a EGA SCHUNK [11]	14
2.3	DH-Robotics Adaptive Gripper DH-3 TM Kit [14]	14
2.4	FLEX HAND FH360-01 NACHI a RG6 Onrobot [15][16]	15
2.5	SGW a SDH SCHUNK [11]	16
2.6	MPZ SCHUNK [11]	16
2.7	EGH SCHUNK [11]	17
2.8	3FG15 Onrobot a Smart Gripper 2.1 [16]	18
2.9	Pružný člen - Paralelogram [19]	19
2.10	BioTac [21]	20
2.11	Struktura hmatového snímače [30]	21
2.12	Camera-based tactile sensor [29]	21
2.13	Optická kontrola skluzu [24]	23
2.14	Prvek kontroly prokluzu na základě tření [22]	24
2.15	Multi ChoiceGripper a Flex shape gripper, Festo [28]	25
2.16	MGrip a OnRobot Soft Gripper [26]	26
3.1	Návrh se šroubovým transformačním mechanismem a bez tranfor- mačního mechanismu	29
3.2	Návrh s paralelogramickým transformačním mechanismem	31
4.1	Konfigurace přestavení	32
5.1	Definiční trojúhelník, ukotvení na těhlici (a), ukotvení na vahadle (b)	34
5.2	Kinematický rozbor uchopovacího mechanismu	35



5.3	Závislost uchopovaného rozměru na zdvihu pneumotoru	37
5.4	Fáze pohybu paralelogramu	39
5.5	Koeficienty tření gumy [31, 32]	40
5.6	Schéma PVP	41
5.7	DNSU Dosahované síly [36]	42
5.8	Závislost uchopovacího tlaku na hmotnosti a koeficientu tření při daném průměru 75 mm	44
5.9	Závislost uchopovacího tlaku na hmotnosti a koeficientu tření při dané délce hrany 75 mm pro prst A	45
5.10	Závislost uchopovacího tlaku na délce hrany tělesa pro prst A a B	45
5.11	Geometrie přestavovacího mechanismu	47
5.12	Průběh úhlu natočení prstu	48
5.13	Dosahované síly ADN-S-10 [37]	49
5.14	Rozklad sil na čepu	50
5.15	Návrh zářezů, sil a tlaků	50
6.1	Koncová uchopovací sestava	51
6.2	Těleso hlavice	52
6.3	Celkový pohled	53
6.4	Varianty uchopovacího prstu	53
8.1	Rozsah snímače UC4-13 [38]	58
8.2	Vývojový diagram pro uchopení pevné součásti	60
8.3	Vývojový diagram pro uchopení deformovatelné součásti	61
8.4	Vývojový diagram pro uchopování s kontrolou síly	62
9.1	Navržená hlavice připevněná na robotu	63

Seznam tabulek

5.1	Polohy pístu pro dané úhly natočení	48
7.1	Kontrola kontaktních tlaků lícovaných šroubů	54
7.2	Kontrola ohybových napětí šroubů	55
7.3	Kontrola ohybových napětí prstu	55
7.4	Kontrola ohybových napětí těhlice	55
7.5	Kontrola spodní základny	56



7.6	Kontrola osy	56
7.7	Kontrola ložiska	56

Seznam příloh

- Textové přílohy
 1. Statická analýza paralelogramu
 2. Grafy silového rozboru
 3. Kontrolní výpočty
 4. Katalogový list DNSU
 5. Katalogový list ADNS
- Výkresová dokumentace
 1. BP0276-2021-1001 Úchopná hlavice - sestavný výkres
 2. BP0276-2021-0001 Spodní díl tělesa - výrobní výkres
 3. BP0276-2021-0002 Levá osa - výrobní výkres
 4. BP0276-2021-0003 Spodní základna B - výrobní výkres
 5. BP0276-2021-K001 Úchopná hlavice - kusovník
- Elektronické přílohy
 1. Uchopna_hlavice_BP0276.stp - 3D model ve formátu stp
 2. Uchopna_hlavice_BP0276_Inventor2021.zip - nativní 3D model AD Inventor 2021
 3. Vypocet_tlaku.m - výpočetní skript
 4. Vypocet_uchopovaci_sily.m - výpočetní skript
 5. Text_práce.pdf - vlastní text práce