

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Dopravní a manipulační technika

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh koncového efektoru průmyslového robota

Autor: **Filip ŠTĚDRÝ**

Vedoucí práce: **Ing. Roman ČERMÁK, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Filip ŠTĚDRÝ**
Osobní číslo: **S17B0229P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**
Téma práce: **Návrh koncového efektoru průmyslového robota**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Proveďte rešerši současného stavu průmyslově používaných koncových efektorů robotů a zmapujte aktuální trendy v této oblasti. V teoretické části stručně popište problematiku uchopování objektů v robotice. Pro zadanou součást navrhnete a popište konfiguraci robotického pracoviště. Navrhnete způsob uchopování a konstrukci chapadla.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce :

1. Rešerše
2. Teoretický popis problému
3. Návrh a popis testovacího pracoviště, popis komponent
4. Návrh chapadla, výpočty, konstrukční dokumentace
5. Zhodnocení práce, závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran A4**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

[1] SICILIANO, B. *Springer Handbook of Robotics*. Springer Verlag, 2007

[2] MONKMAN, G. J., HESSE, S., STEINMANN, R., SCHUNK, H. *Robot Grippers*. WILEY-VCH, 2007

Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Roman Čermák, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Roman Čermák, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Štědrý	Jméno Filip	
STUDIJNÍ OBOR	B3201 „Dopravní a manipulační technika“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Čermák, Ph.D.	Jméno Roman	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST – KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Návrh koncového efektoru průmyslového robota		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	48	TEXTOVÁ ČÁST	40	GRAFICKÁ ČÁST	8
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce obsahuje rešerši z oblasti koncových efektorů se zaměřením na průmyslová chapadla. Teoretická část končí zmapováním trendů v oblasti koncových efektorů. Praktickou část tvoří návrh vlastního koncového efektoru s uchopovací funkcí a výběr komponent pro jeho požadovanou funkci.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	koncový efektor, uchopovač, uchopování, senzor, pohon, 3D tisk

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Štědrý	Name Filip
FIELD OF STUDY	B2301 “Transport Vehicles and Handling Machinery“	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Čermák, Ph.D.	Name Roman
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR
TITLE OF THE WORK	Delete when not applicable	
	Design of the end effector for industrial robot	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	48	TEXT PART	40	GRAPHICAL PART	8
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The first part of this bachelor thesis is a research in the field of the end effectors with main focus on industrial grippers. Theoretical part ends with mapping of trends in the field of the end effectors. Practical part consists of design of a gripper and selection of its components.
KEY WORDS	end effector, gripper, gripping, sensor, drive, 3D print

Rád bych poděkoval Ing. Romanu Čermákovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady, které mi poskytoval během zpracování této bakalářské práce.

Obsah

Úvod	13
1. Robotika	14
2. Koncový efektor	16
2.1. Historie průmyslových koncových efektorů	17
2.2. Průmyslové použití	17
2.3. Uchopovače (Grippers)	18
2.3.1. Impactive grippers	19
2.3.2. Astrictive grippers	19
2.3.3. Ingressive grippers	20
2.3.4. Contigutive grippers	20
3. Uchopování (Gripping)	21
3.1. Typy uchopování	21
3.1.1. Silové uchopení (Force closure)	21
3.1.2. Tvarové uchopení (Form closure)	22
3.2. Víceprsté ruce	22
3.2.1. Antropomorfní a obratné robotické ruce	24
4. Pohony pro impactive grippers	25
4.1. Elektrické pohony	25
4.2. Pneumatické pohony	25
4.3. Hydraulické pohony	25
5. Senzory v robotice	26
5.1. Taktilní senzory	26
5.2. Senzory reagující na přiblížení	26
5.3. Snímače pro měření vzdálenosti	27
6. Kinematika	28
6.1. Polohové závislosti	28

6.2. Typy kloubů	29
6.3. Redundantní robotické paže	30
7. Trendy	31
7.1. Haptika	31
7.2. Medicína	31
7.3. Protetika	32
7.4. Průmysl	32
8. Návrh robotické ruky	34
8.1. Vstupní předpoklady uchopovače	34
9. Vlastní návrh a výběr komponent	35
9.1. Materiál a výroba	35
9.2. Skladba prstů	35
9.2.1. Tvar a počet prstů uchopovače	35
9.2.2. Rotace článků	36
9.2.3. Uchopování	36
9.3. Volba kluzného pouzdra	37
9.4. Volba pohonu	38
9.4.1. Aktuátor	38
9.4.2. Pohyb prstů	40
9.5. Volba senzorů	41
9.5.1. Kalibrace senzorů	41
9.6. Volba řídicí jednotky	43
9.6.1. Arduino	43
9.6.2. Komunikace robota s koncovým efektoem	44
9.6.3. Hlavní program Arduino	45
9.7. Kompatibilita s robotickým ramenem	49
9.8. Výpočet deformace a napětí v kritickém místě konstrukce	50
9.8.1. Výsledky analýzy	51

Závěr.....	53
------------	----

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 Koncový efektor a robotické rameno (4).....	16
Obrázek 2-2 Stanford Arm (37).....	17
Obrázek 2-3 Svařovací robot (6)	18
Obrázek 2-4 Impactive gripper (11)	19
Obrázek 2-5 Koncový efektor s vakuovou hlavicí (12)	20
Obrázek 3-1 Silové schéma (10)	21
Obrázek 3-2 Uchopení koule (10)	22
Obrázek 3-3 Uchopení válce (10).....	22
Obrázek 3-4 Dvoučelist'ový uchopovač (13)	23
Obrázek 3-5 Dvoučelist'ový uchopovač s adaptivními prsty (13).....	23
Obrázek 3-6 Tříčelist'ový uchopovač (13)	23
Obrázek 3-7 Tříčelist'ový uchopovač s adaptivními prsty (14).....	24
Obrázek 3-8 Antropomorfní koncový efektor (16)	24
Obrázek 6-1 Možné pohyby ruky (10)	28
Obrázek 6-2 Polohové závislosti v kartézském systému souřadnic (24).....	29
Obrázek 6-3 Typy kloubů (zleva doprava P, R, U, S).....	29
Obrázek 7-1 Uchopovač od Shadow Robot (38).....	31
Obrázek 7-2 Biomechatronická protéza (39).....	32
Obrázek 7-3 Kolaborace člověka s robotem (28).....	32
Obrázek 9-1 Rozstřel prstu	36
Obrázek 9-2 Maximální rozevření prstů.....	36
Obrázek 9-3 Rotace sousedících prstů.....	37
Obrázek 9-4 Kluzné pouzdro PCMF 81005.5 E (31).....	37
Obrázek 9-5 Servomotor MG955 (32)	38
Obrázek 9-6 Uložení servomotorů	39
Obrázek 9-7 Servomotory uvnitř konstrukce	39
Obrázek 9-8 Cesta vlasce	40
Obrázek 9-9 Taktilní senzor (33).....	41
Obrázek 9-10 Arduino Uno (35)	44

Obrázek 9-11 Grafické zobrazení komunikace robota s Arduinem	44
Obrázek 9-12 Mitsubishi Melfa RV2-SD (36)	50
Obrázek 9-13 Maximální neorientované posunutí	51
Obrázek 9-14 Redukované napětí v součásti.....	52

Seznam grafů

Graf 1-1 Roční instalace průmyslových robotů napříč obory (3).....	14
Graf 1-2 Roční instalace průmyslových robotů napříč státy (3)	15
Graf 7-1 Celkové roční instalace průmyslových robotů (3)	33
Graf 7-2 Celkové roční instalace průmyslových robotů napříč kontinenty (3).....	33
Graf 9-1 Kalibrace senzoru 14 mm	42
Graf 9-2 Kalibrace senzoru 5 mm	43

Seznam tabulek

Tabulka 9-1 Vlastnosti materiálu PLA (28)	35
Tabulka 9-2 Technické specifikace kluzného pouzdra (31)	38
Tabulka 9-3 Technické specifikace servomotoru MG955 (30).....	39
Tabulka 9-4 Proporcionální vyvinuté síly k hodnotám ze senzoru 1	42
Tabulka 9-5 Proporcionální vyvinuté síly k hodnotám ze senzoru 2	42

Seznam příloh

- Příloha č. 1: Rozhraní robota Mitsubishi Melfa RV2-SD
- Příloha č. 2: CAD modely uchopovače
- Příloha č. 3: Výsledná podoba uchopovače

Použitý software

Siemens NX

Přehled použitých zkratek a symbolů

F – síla

m – hmotnost

a – zrychlení

° – stupeň

μ – koeficient tření

n – počet prstů/čelistí

MPa – megapascal

GPa – gigapascal

mm – milimetr

N – newton

kN – kilonewton

s – sekunda

V – volt

g – gram

kg – kilogram

d – vnitřní průměr pouzdra

D – vnější průměr pouzdra

B – výška pouzdra

C – dynamická únosnost

C₀ – statická únosnost

IFR – International Federation of Robotics

Úvod

Tato práce se zabývá tématem robotiky se zaměřením na koncové efekty. Práce je rozdělena na dvě hlavní části. První částí je rešerše, která mapuje základní informace okolo koncových efektorů. V rešerši je věnována největší část průmyslovým uchopovacím koncovým efektorům. Na konci teoretického přehledu jsou nastíněny aktuální trendy, které mohou napovědět, kam by se mohla tato vědní disciplína v praxi dále ubírat.

Robotika je v posledních desítkách let velmi dynamicky se rozvíjející obor, a proto je rozumné tomuto vědnímu odvětví věnovat zvýšenou pozornost. Zatímco v minulosti se robotické výrobky zaměřovaly primárně na průmysl, v dnešní době už expandují čím dál tím více mezi běžnou populaci. V nedaleké budoucnosti je možné očekávat autonomní stroje, které by lidstvu mohly značně usnadnit životy. Robotika v sobě, nejen z tohoto důvodu, skýtá obrovský potenciál a je velmi pravděpodobné, že bude hrát v budoucnosti v našich životech stále větší a větší roli. To však neznamená, že by se průmyslové roboty přestaly dále rozvíjet. S příchodem průmyslu 4.0 znamenají robotičtí pomocníci pro komerční výrobu skutečně mnoho. Průmyslové roboty se stávají stále více inteligentnějšími a sofistikovanějšími, než tomu bylo dříve.

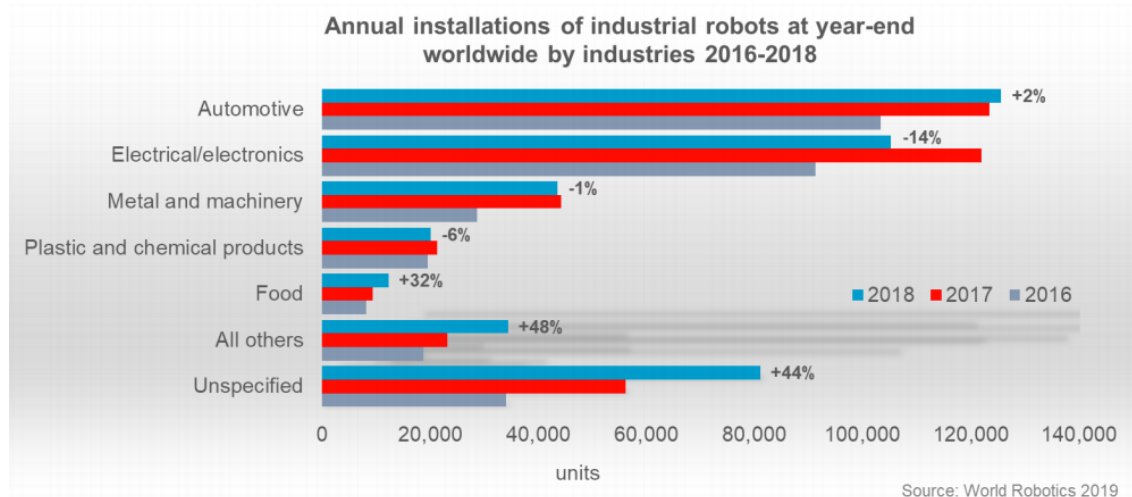
Vlastní úlohou této práce je navrhnout koncový efektor s uchopovací funkcí. Vytvořená konstrukce by měla být schopná manipulovat s širokou škálou předmětů různých tvarů. Cílem je tedy vytvořit programovatelné chapadlo, které by mělo být způsobilé k samostatné práci. Tento návrh by měl být poté vyroben a měl by po připojení na robotické rameno plnit svoji funkci.

1. Robotika

Jedná se o vědní obor zabývající se studiem a výrobou robotů. Na polích robotiky je využíváno dalších vědních disciplín, mezi které se řadí například fyzika, elektrotechnika, mechatronika, měřicí technika, statika, kinematika apod. Pod slovem robot je možné si představit velké množství věcí, což je logické vzhledem k tomu, kolik různých aplikací je možné s roboty provádět. Podle normy však zní definice robota takto: „*Mezinárodní organizace pro standardizaci definuje robota v normě ISO 8373 jako „automaticky řízený, opětovně programovatelný, víceúčelový manipulátor pro činnost ve třech nebo více osách, který může být buď upevněn na místě, nebo mobilní k užití v průmyslových automatických aplikacích“.*“ (1)

Podle situace současného vývoje a trendů je možné očekávat, že se bude robotika stále více rozvíjet a její produkty se budou neustále zdokonalovat. Předpokládá se, že roboti se stanou nedílnou součástí našich životů. Prozatím jsou aplikace robotů zaměřeny převážně na průmyslové užití, ale je možné, že se dočkáme v podobě robotů domácích sluhů nebo specializovaných schopných chirurgů. (2)

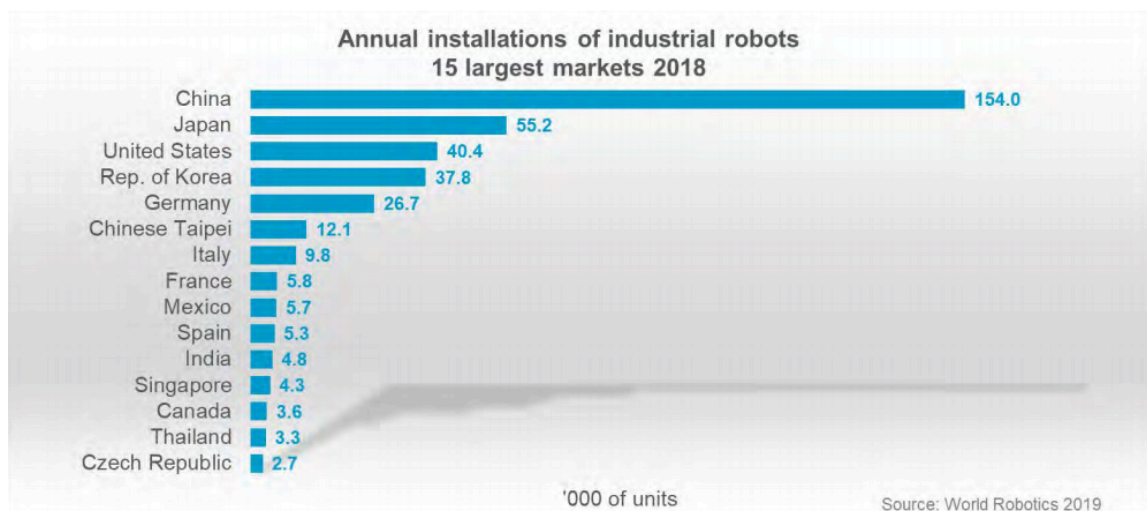
V následujícím grafu je možné vidět, v jakých průmyslových odvětvích a v jakém množství je robotů využíváno. Konkrétně graf popisuje počet instalací průmyslových robotů v roce 2016, 2017 a 2018. Podle předpovědi národní federace pro robotiku tato čísla v následujících letech ještě porostou.



Graf 1-1 Roční instalace průmyslových robotů napříč obory (3)

Automobilový průmysl je obor, který žene robotiku vpřed už dlouhou dobu, a v posledních letech se k němu připojil i elektrotechnický průmysl. V těchto dvou průmyslových oborech hraje automatizace velkou roli.

V grafu 1-2 je zřetelné, které země jsou hlavními hráči na polích průmyslové robotiky.



Graf 1-2 Roční instalace průmyslových robotů napříč státy (3)

Především prvních pět zemí v čele s Čínou se veze na vlně nového trendu, který bývá označován jako průmysl 4.0. Průmysl momentálně přechází přerodem a bude zajímavé se dívat, kam tato cesta povede. Tato práce se bude věnovat především průmyslovým robotům, a převážně pak jejich koncovým efektorům.

2. Koncový efektor

Koncový efektor je zařízení, které lze přes upínací systém připojit na koncovou část robotického ramene. Přes koncový efektor dochází k interakci mezi robotem a pracovním předmětem. Funkce tohoto zařízení pak závisí typu práce, která má být vykonána. Výhodou použití koncových efektorů je, že jedno robotické rameno může být použito k více druhům činností, neboť se dá koncový efektor vyměnit za jiný. Příkladem koncových efektorů mohou být řezací nebo svařovací nástroje, dále kartáče na čištění, šroubováky, ale největší a nejpoužívanější skupinou efektorů jsou uchopovače (v literatuře označovány jako „*grippers*“).

Hlavní pohyb soustavy, uskutečňovaný rotacemi a posuvy, zajišťuje obvykle robotické rameno nebo jednoduchý mechanismus zabudovaný přímo v efektoru. Pohon je nejčastěji zajištěn pneumaticky, hydraulicky nebo pomocí elektromotorů.

Důvody, proč jsou robotické ruce v průmyslu stále více využívány, můžeme hledat ve stále zvyšujících se požadavcích na kvalitu a efektivitu práce. Není ale možné, aby roboty kompletně nahradily lidskou pracovní sílu. Používáním technologií lze však práci lidem značně ulehčit. Klasickým příkladem použití robotické ruky může být sériová výroba, kde se opakují určité úkony a zdvihaná břemena jsou často pro člověka příliš těžká. S vyššími nároky na flexibilitu práce pak roste také složitost robotů, které mají za úkol procesy vykonávat.



Obrázek 2-1 Koncový efektor a robotické rameno (4)

2.1. Historie průmyslových koncových efektorů

První použití průmyslového uchopovače se datuje do roku 1961 a bylo tomu ve společnosti General Motor. Tento vynález odstartoval zájem ostatních firem na polích strojírenství, a tím začal vznikat nový rozvíjející se obor. Revolučním prototypem se stala robotická paže s dvoučelistovým koncovým efektem Stanford Arm od Victora Scheinmana (viz obr. 2-2). Jednalo se o první počítačově ovládané chapadlo s šesti stupni volnosti. Nadcházející průmyslové roboty a uchopovače, které vznikaly na počátku 80. let, byly silně ovlivněny Schienmanovým konceptem. Tím začala masová výroba a implementace uchopovačů do těžkého průmyslu. Veškeré mechanické uchopovací koncové efekty operovaly na počátku jejich vzniku se dvěma čelistmi. Tento koncept je díky své jednoduchosti, účelnosti a ekonomické výhodnosti aplikován v průmyslu hojně i v dnešních letech.

Další inovace v oblasti uchopovačů přišla na konci 80. let. Šlo o tříprstý uchopovač, který je dnes označován jako Barrett hand, respektive Barrettova ruka. Tehdy ještě v průmyslu tato konstrukce velké uplatnění nenacházela, ale v dnešní době už se s tříprstými koncovými efekty díky pokročilejší technice můžeme setkávat i v praxi, a to hlavně kvůli jejich vysoké flexibilitě. (5)



Obrázek 2-2 Stanford Arm (37)

2.2. Průmyslové použití

Koncové efekty našly největší využití v industriální sféře. V dnešní době průmyslové koncové efekty přispívají v průmyslu k automatizaci všemožných pracovních úkonů. Ačkoli se tato práce zaměřuje převážně na koncové efekty s uchopovací funkcí, které slouží především k manipulaci s předměty, aplikace efektorů sahají i mnohem dále. Následuje shrnutí další možných aplikací koncových efektorů.

- Svařování: Těchto robotů je využíváno nejčastěji ve velkosériových výrobcích, kde se svařovací úkony neustále opakují. Výhodou těchto robotů je drastické zvýšení produktivity, přesnosti a celkové kvality oproti manuálnímu svařování, ale také snížení zdravotních rizik pro dělníky. (6)



Obrázek 2-3 Svařovací robot (6)

- Lakování: Robot dokáže vrstvu spreje nanést na předmět přesněji a rovnoměrněji než člověk, a tím omezuje plýtvání nanášené látky. I při této aplikaci je hlavní výhodou ochrana dělníka před dlouhodobými zdravotními následky. (7)
- Kontrola: Roboty pro kontrolu používají jako koncový efektor lasery, systémy vidění nebo jiné typy měřících nástrojů. Robot se typicky pro správnou funkci nemusí pohybovat. (8)
- Dělení materiálu: K této aplikaci je využíváno řezacích nebo vypalovacích koncových efektorů. Použitím robota je při dělení materiálu zajištěna preciznost a rychlost řezání. Řezací roboty také eliminují zdravotní rizika, protože dělník nemusí vdechovat prach nebo výpary produkované řezáním. (9)

2.3. Uchopovače (Grippers)

Jedná se o speciální typ koncových efektorů, kde interakce nástroje s pracovním předmětem spočívá v manipulaci s předmětem. Tohoto procesu je dosaženo pomocí dočasného kontaktu nástroje a předmětu. Uchopení je dosahováno vlivem působení sil nebo tvarových spojení. Termín uchopovač (gripper) je používán i v případech, kdy není těleso fyzicky uchopeno v pravém slova smyslu, ale setkáváme se s ním i v případech, kdy je těleso uchopovacím nástrojem drženo pomocí například vakuového sání nebo magnetických sil.

Hlavní aplikace, které se pomocí chapadel uskutečňují jsou – dočasné zajištění polohy a orientace předmětu relativně k nástroji, dále k zaručení potřebného statického zatížení nebo k udržení kýžených rychlostí a zrychlení, a v neposlední řadě stanovení nové polohy a orientace přemístěním předmětu.

Chapadla lze pak dále dělit do čtyř základních skupin podle způsobu uchopování pracovního předmětu. (10)

Pro zachování správného významu nebudou následující označení jednotlivých skupin předkládána z anglického jazyka do češtiny. Tyto názvy jsou převzaty z knižní publikace Robot Grippers (v seznamu použité literatury označené číslem 10).

2.3.1. Impactive grippers

Nejpoužívanější typ uchopovačů se v literatuře označuje jako *Impactive grippers*, jak už z anglického slova *impact* (vyvolání silového působení předmětem na jiný předmět vlivem jejich kontaktu) plyne. Uchopovaná součást je zajištěna díky přímým silám na předmět, které jsou vyvolány čelistmi nebo prsty samotného uchopovače. Obvykle jsou koncové efekторы tohoto typu osazeny dvěma až čtyřmi prsty, které se ve většině případů, pohybují současně. Nezávisle na sobě pohybující se prsty se vyskytují prozatím převážně pouze na prototypech, které jsou stále předmětem výzkumu. Z důvodu vysokých ekonomických nákladů se v průmyslu prozatím neobjevují. Téma složitějších konstrukcí těchto uchopovačů bude zmíněno v pozdějších částech práce. (10)



Obrázek 2-4 Impactive gripper (11)

2.3.2. Astrictive grippers

Druhý nejpoužívanější typ uchopovačů je označován jako *Astrictive grippers*. Slovo *astrictive* by se dalo přeložit jako „svázat“ nebo „spoutat“. Tato chapadla mívají obvykle kuželovitý tvar. Jako způsob zvedání předmětů používají nejčastěji vakuové sání. Méně často využívají pro uchopování magnetismus a elektroodhezi. Na rozdíl od skupiny *Impactive grippers* působí síla potřebná pro zdvihnutí součásti pouze v jednom směru. Vakuové uchopovače se řadí mezi jedny z nejstarších. Jejich výhodou je, že mohou zvedat relativně široké spektrum předmětů o různých tvarech a hmotnostech. Princip, jakým fungují, je ve srovnání s kinematickými řetězci *Impactive grippers* jednoduchý. Sací hlava vyrobená z pružného materiálu uchopí zdvihací předmět silou, které je vyvozena sáním vzduchu. Předmět zvedne a pevně ho k sobě připoutá. Ze spoje pak odchází zbylý vzduch. Při spojení tak v trychtýři vznikne podtlak, a ten zajistí udržení předmětu při vlastní manipulaci. Součást je pak odpoutána, když hlavice přestane nasávat vzduch, případně může vzduch proudit opačným směrem. (10)



Obrázek 2-5 Koncový efektor s vakuovou hlavicí (12)

2.3.3. Ingressive grippers

Další typ uchopovačů je označován jako *Ingressive grippers*. Specifická vlastnost pro tuto skupinu je, že povrch předmětu bývá při uchopení zpravidla penetrován. V tomto případě je tvar koncového efektoru většinou špičatý, může připomínat špendlík nebo jehlu. Tohoto způsobu uchopování je využíváno u materiálů, které nejsou tuhého charakteru. Předměty uchopovány pomocí těchto uchopovačů jsou nejčastěji tvořeny z vláken. Spadá sem například textil, karbon nebo sklená vlákna. Síla potřebná pro uchopení předmětu je vyvíjena pouze při průniku hrotu nebo více hrotů do materiálu, po proniknutí už není potřeba vyvíjet sílu na udržení předmětu při manipulaci. (10)

2.3.4. Contigutive grippers

O poslední skupině chapadel literatura pojednává jako o *Contigutive grippers*. Z anglického slova *contiguous*, které se dá přeložit jako „sousedící“ nebo „velmi blízký“, vyplývá, že vazba předmětu na uchopovač vzniká při jejich blízkém kontaktu. Síla působí na základě chemické nebo termální adheze nebo pouze na bázi napětového působení mezi oběma povrchy. Tohoto způsobu uchopování je využíváno zejména u mikro chapadel, kde není potřeba pro manipulaci s miniaturními součástmi vyvíjet velké síly. (10)

3. Uchopování (Gripping)

Proces manipulace s předmětem se skládá ze dvou základních částí – uchopení předmětu a držení předmětu. Uchopení bývá v literatuře označováno jako *prehension* nebo *grasping*. Držení předmětu, v literatuře označováno jako *retention*, logicky nastává potom, co je předmět uchopen, a tím je zajištěna jeho poloha.

Důvodem, proč je důležité oddělit od sebe tyto dva procesy, jsou rozdílné síly, které musí být vyvíjeny pro správnou funkci uchopovače. Ve fázi držení není zpravidla nutné vyvíjet tak velké síly jako při samotném uchopení. (10)

3.1. Typy uchopování

U mechanických uchopovačů rozdělujeme dva základní typy uchopení. Prvním typem je uchopení čistě pomocí silového působení nástroje na pracovní předmět a druhým typem je uchopení na základě tvaru nástroje a uchopovaného předmětu.

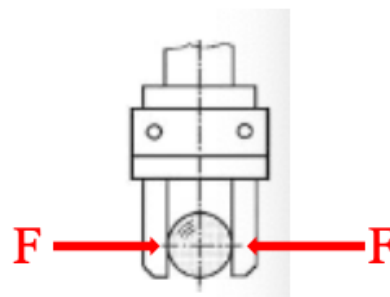
3.1.1. Silové uchopení (Force closure)

Při silovém uchopování působí čelisti nebo prsty nástroje na těleso takovou silou, aby mezi nimi nedošlo ke ztrátě kontaktu. Při vyvinutí dostatečné síly čelistmi nástroje je možné úplně zamezit pohybu tělesa. Takovýto stav může nastat, když se nástroj a těleso dotýkají pouze ve dvou společných bodech (viz obr. 3-1). Ztráta možnosti pohybu uchopovaného tělesa vzniká vlivem třecích sil, z tohoto důvodu je minimální potřebná síla pro správné uchopení předmětu závislá na koeficientu tření mezi dotýkajícími se povrchy, čehož je možné si všimnout ve vztahu [1].

Vztah určující minimální potřebnou sílu F pro uchopení předmětu, aniž by došlo k přerušení kontaktu mezi čelistmi nebo prsty uchopovače a uchopovaného předmětu:

$$F = \frac{ma}{\mu n}, \quad [1]$$

kde: F síla potřebná pro uchopení předmětu
 m vyjadřuje hmotnost předmětu
 a zrychlení předmětu
 μ koeficient tření
 n počet čelistí nebo prstů působících silou na předmět



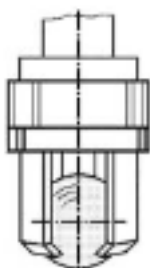
Obrázek 3-1 Silové schéma (10)

Uchopení tohoto typu nemusí být vhodné pro všechny typy součástí, protože síla působící na předmět v něm bude zákonitě vyvolávat určitou míru napětí, které může předmět nějakým způsobem deformovat a poničit. Předpokladem pro silový styk tedy je, že uchopované objekty budou z dostatečně tuhých materiálů. (10)

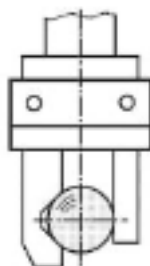
3.1.2. Tvarové uchopení (Form closure)

Při tomto způsobu uchopování jsou čelisti nástroje přizpůsobeny tvaru pracovního předmětu. Znemožnění pohybu uchopovaného objektu je dáno geometrií nástroje. Protože těleso v prostoru disponuje šesti stupni volnosti, je pro zamezení jakéhokoli teoretického pohybu tělesa nutné zajistit kontakt v minimálně 6 bodech. Obecně však při manipulaci s předměty není zcela nezbytné zamezit veškerému pohybu. Tvarové uchopovače jsou ve většině případů navrhovány tak, aby byly schopny přemísťovat tělesa bez nechtěného vyproštění součásti ze sevření. Poloha může být zajištěna i vlivem tíhové síly předmětu. Pomocí tvarových čelistí je však možné manipulovat jen s předměty, pro které byl nástroj navržen.

(10)



Obrázek 3-2 Uchopení koule (10)



Obrázek 3-3 Uchopení válce (10)

3.2. Víceprsté ruce

Při konstrukci víceprstých koncových efektorů vyvstává otázka, kolik prstů by měla robotická vlastně ruka mít. Není zde však jednoduché přijít s jasnou odpovědí. Existuje široké spektrum aplikací, na které se hodí více flexibilnější ruce a na které stačí pouze základní uchopovače.

- Dvouprsté uchopovače: Klasické uchopovače vybaveny dvěma paralelně se pohybujícími prsty nebo čelistmi nacházejí své místo v industriální automatizaci. Jejich výhodou je nízká cena, ale nedisponují velkou flexibilitou. Existují ale také dvouprsté uchopovače s adaptivními prsty, které se dokáží přizpůsobit tvaru uchopovaného objektu. Adaptivními prsty rozumíme prsty, které mají jeden nebo více kloubů. Tyto koncové efekторы přinášejí daleko větší flexibilitu.

(13)



Obrázek 3-4 Dvoučelist'ový uchopovač (13)



Obrázek 3-5 Dvoučelist'ový uchopovač s adaptivními prsty (13)

- Tříprsté uchopovače: Tříprsté uchopovače s paralelně se pohybujícími čelistmi při uchopování objektu fungují na principu sklíčidel. Jedná se také o efektorů s nízkou flexibilitou vhodné pro vykonávání opakovaných operací. Zajímavějším tématem jsou tříprsté uchopovače s adaptivními prsty. Konstrukce těchto uchopovačů se obvykle sestává z dvou sousedících prstů a jedním prstem v opozici, který plní funkci palce. Výhodou těchto koncových efektorů je především velká míra flexibility, která umožňuje plnit nejrůznější manipulační úkoly. Prsty se dokáží přizpůsobit téměř jakémukoli tvaru zdvihaneho objektu. Nevýhodou je vyšší cena. Tyto uchopovače však díky svým nesporným výhodám začínají nalézat uplatnění v automatizaci průmyslu. (13)



Obrázek 3-6 Tříčelist'ový uchopovač (13)



Obrázek 3-7 Tříčelist'ový uchopovač s adaptivními prsty (14)

- Čtyřprsté až pětprsté uchopovače: Jsou pravděpodobně nejzajímavějším technických tématem v oblasti víceprstých uchopovačů, a to hlavně kvůli jejich univerzálnosti. Konstrukce je víceméně napodobeninou lidské ruky. Ačkoli jsou schopné uchopovat předměty všemožných tvarů, v praktické sféře jsou zatím téměř nepoužitelné. Hlavními důvody, proč nejsou tyto uchopovače relevantní pro průmysl, jsou vysoké pořizovací náklady, velká složitost konstrukce, náročná ovladatelnost a často jsou schopné manipulovat pouze lehkými předměty. Tyto koncové efekторы jsou ve fázi výzkumu a nejsou obvykle používány v průmyslu. (13)

3.2.1. Antropomorfní a obratné robotické ruce

Termín antropomorfismus označuje schopnost koncového efektoru napodobit lidskou ruku. Tento pojem je spojen spíše s vizuálními vlastnostmi námi vnímaného objektu a opomíjí jeho schopnosti. Funkčnost koncového efektoru se pojí v oblasti robotiky s termínem *Dexterity*, který by se dal přeložit do češtiny jako obratnost nebo zručnost. Stupeň antropomorfismu a zručnosti koncového efektoru jsou dva na sobě nezávislé koncepty. Můžeme se setkat s konstrukcemi dokonale připomínající lidskou ruku, které jsou však schopné vykonávat jen ty nejjednodušší úkoly, a naopak s velmi zručnými koncovými efekторы s nízkým stupněm antropomorfismu, které dokáží pracovat relativně sofistikovaně. (15)



Obrázek 3-8 Antropomorfní koncový efektor (16)

4. Pohony pro impactive grippers

Pohyb, a s ním spojené silové působení prstů nebo čelistí v mechanických uchopovačích, je realizován přeměnou určité formy energie na mechanickou energii. Aktuátory zajišťující pohyb soustavy jsou obvykle snadno dostupné součástky, které nacházejí využití i v široké řadě jiných přístrojů mimo robotiku. Nejčastěji se jako pohony do mechanických uchopovačů používají elektrické, pneumatické a hydraulické komponenty.

Pro převod pohybu je využíváno lineárních jednotek, a to především kvůli jejich jednoduchosti. Tyto jednotky jsou schopny převádět rotační pohyb na lineární, případně horizontální na vertikální a naopak.

4.1. Elektrické pohony

Jedná se o nejpoužívanější typ pohonu v dnešních robotech. Jejich výhodou je především vysoký točivý moment a snadná a dostupná ovladatelnost. Objevují se především v menších konstrukcích. Nejvíce elektrických motorů používá pro přenos pohybu a síly lineární jednotku typu hřeben a pastorek.

Nejčastějším typem elektromotorů používaných v robotických konstrukcích jsou servomotory. Jejich předností je, že mohou snadno polohovat čelisti uchopovače, a následně je držet v určité poloze. Největší výhodou použití servomotorů jsou malé rozměry a malá hmotnost ve srovnání s poměrně velkou silou, kterou jsou schopny hýbat s čelistmi. Díky své jednoduchosti disponují servomotory značnou spolehlivostí.

Hlavním prvkem servomotoru je stejnosměrný elektromotor, který je poháněn energií z akumulátorů a točí se vysokými otáčkami. Vysoké otáčky na vstupu jsou v servomotoru převáděny převodovým mechanismem na relativně vysokou hodnotu točivého momentu na výstupu. Ozubená kola nacházející se v konstrukci servomotorů používaných v robotice jsou obvykle vyrobená z plastových materiálů, které zajišťují velmi nízkou hmotnost i dostačující trvanlivost. Pro servomotory operující při vyšších silách se ozubená kola vyrábí z oceli. Zpětnou vazbu, reprezentovanou informací o aktuální poloze výstupního hřídele, obvykle zajišťuje potenciometr. (17)

4.2. Pneumatické pohony

Stejně jako elektrické pohony se pneumatické pohony používají převážně v robotech menších rozměrů. Nabízejí relativně dobrou přesnost a rychlost pohybu. Pneumatickým pohonem je možno docílit posuvného i rotačního pohybu. Posuvný pohyb může být uskutečňován pomocí tlaku vzduchu na píst. (18)

4.3. Hydraulické pohony

Pohony využívající hydrauliku jsou ve většině případů částmi robotů velkých rozměrů, a to z toho důvodu, že hydraulika dokáže vyvinout velké hodnoty výkonu a rychlosti. Pohon je využíván pro posuvný i rotační pohyb. Posuvný pohyb je vyvozován tlakem tekutiny na píst a rotační pohyb je uskutečňován pomocí lopatkových pohonů. Nevýhodou hydraulických pohonů je potřeba média pro vyvození tlaků na plochy pístů nebo lopatek. Nejpoužívanějším médiem je olej. (18)

5. Senzory v robotice

V moderní robotice aktuálně neexistuje mnoho robotů či robotických rukou, které by operovaly bez určitých senzorů. Senzory robotu umožňují vnímat prostředí kolem něj a jsou klíčové pro jeho správnou funkci. V případě koncových efektorů, které jsou určeny pro uchopování, senzory dokáží snímat geometrii a fyzikální vlastnosti uchopovaného objektu. Příkladem může být pozice předmětu, jeho orientace, vzdálenost od uchopovače, velikost, váha a podobně.

Senzory se obecně dělí do dvou skupin – na vnitřní a vnější senzory.

Vnitřní senzory zajišťují informace o samotném robotu. Dokáží snímat například pozici, rychlost, zrychlení, vyvíjenou sílu nebo moment. Zatímco vnější senzory slouží robotu pro interakci s prostředím, ve kterém se nachází. Mezi vnější senzory patří například kamery nebo senzory snímající vzdálenosti objektů.

Senzory jsou tedy v robotech používány pro velké množství aplikací. Větší množství senzorů zajišťuje větší spolehlivost a produktivitu. (19)

5.1. Taktilní senzory

Taktilní senzory reagují na fyzický kontakt. Pokud je senzorem zjištěn kontakt, tato informace se pošle do příslušné řídicí jednotky. V jednodušších případech je dostačující, když koncový efektor disponuje pouze binárním senzorem. Binární senzor může podávat informaci například o tom, že bylo dosaženo kontaktu. Tohoto způsobu je možné využívat u sacích hlavic. Když dojde ke kontaktu mezi sací hlavicí a zdviháním objektem, senzor dá řídicí jednotce pokyn, ta na základě pokynu spustí sání, aby mohlo být zajištěno uchopení objektu. Senzory umístěné v sací hlavě mohou dále detekovat úniky vzduchu při samotné manipulaci s objektem. Signalizují neadekvátní kontakt mezi efektozem a povrchem objektu.

V kategorii *impactive grippers* se setkáváme nejčastěji se senzory na bázi piezoresistivního jevu, což v jednoduchosti znamená, že krystaly obsažené v indikačním zařízení při deformaci jejich krystalické mřížky vlivem vnější síly mění svůj měrný elektrický odpor. (10)

5.2. Senzory reagující na přiblížení

Jedná se o snímače, které dokáží rozpoznat přiblížení určitého předmětu k senzoru bez jakéhokoli fyzického kontaktu. Principem fungování těchto senzorů je vyzařování paprsků z elektromagnetického záření, a následné hledání změn v příjmu odražených paprsků. Existují čtyři základní typy těchto snímačů. Ty pracují na bázi změny indukce, změny kapacity, ultrazvuku a fotoelektrické.

Induktivní senzory mění svoji indukci v případě, že se v jejich blízkosti nachází elektricky vodivý předmět. (20)

Kapacitní senzory jsou kondenzátory s proměnnou kapacitou, která se mění v závislosti na vzájemné vzdálenosti dvou desek nebo při zasouvání dielektrika mezi desky. Těchto snímačů se využívá především pro nekovové předměty. (21)

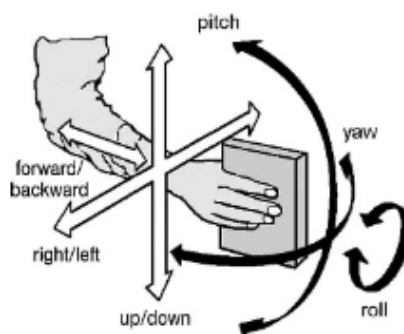
5.3. Snímače pro měření vzdálenosti

Přesná vzdálenost je důležitým parametrem při uchopování předmětů. Umožňuje řídicí jednotce robotu zjistit přesnou polohu daného předmětu. Tyto senzory slouží také jako prevence před srážkou s překážkou, která by se mohla vyskytnout v trajektorii uchopovače. Většina senzorů reagujících na přiblížení může být použita pro tuto skupinu. Nejvíce používaným typem senzorů pro zjištění vzdálenosti jsou IR kamery, IR senzory a ultrazvukové senzory. (22)

6. Kinematika

Kinematika se zajímá o pohyb robotických mechanismů bez ohledu na síly nebo silové momenty, které tento pohyb způsobily. Jelikož podstatou fungování robotických rukou je pohyb, je kinematika jedním z hlavních aspektů při jejich navrhování či ovládní. Robotický mechanismus je ve většině případů modelován tuhými tělesy, ta jsou mezi sebou spojena kinematickými vazbami, které se nazývají klouby. Kinematika popisuje polohu, rychlost, zrychlení a všechny další derivace polohy vyššího řádu. (15)

Pokud se budeme zajímat o kinematiku robotického mechanismu, zaměříme se na hlavní osy robotické paže (viz obr. 6-1). Tyto osy, společně s koncovým efektem, představují takzvaný kinematický řetězec. Pohybem okolo a podél těchto os je možné zajistit prostorovou orientaci koncového efektoru pomocí posuvného a rotačního pohybu. Spojením těchto dvou základních pohybů je možné s efektem libovolně pohybovat v prostoru. Dohromady posuvný a rotační pohyb tvoří pohyb obecný.



Obrázek 6-1 Možné pohyby ruky (10)

Těleso má v prostoru obecně 6 stupňů volnosti. Stupni volnosti se rozumí počet nezávislých parametrů, který jednoznačně popisuje stav určitého mechanického systému. Nezávislé parametry jsou základní směry posuvu a rotace. Zjednodušeně tedy platí, že počet stupňů volnosti definuje počet nezávislých směrů, do kterých se může těleso hýbat.

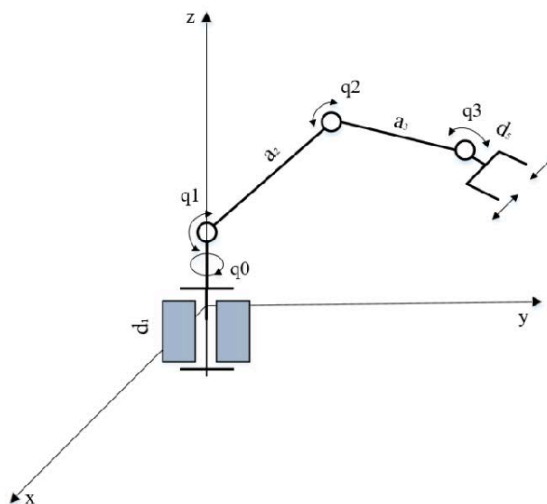
6.1. Polohové závislosti

Hlavní problém, který je v robotice s kinematikou spjat, je popis geometrického uspořádání ramen a kloubů robotických paží. Problém spočívá v tom, že koncový efektor pracuje v klasickém kartézském souřadnicovém systému, který je tvořen třemi na sebe kolmými osami. Ale jednotlivé kinematické vazby, které spojují části paže, operují ve svých vlastních souřadných systémech. Pro popis polohy jednotlivých kloubů je používáno úhlů natočení, případně délek.

Aby bylo možné definovat polohu koncových efektorů, případně kinematického řetězce na paži, je nutné řešit úlohu polohových závislostí. Polohové závislosti představují vztah mezi kloubovými souřadnicemi a souřadnicemi koncového efektoru.

Přepočítání polohy koncového efektoru v kartézském souřadnicovém systému je možné provádět ze vstupů, kterými jsou parametry kloubových spojů. Parametry rozumíme ve

většině případů dané úhly natočení jednotlivých kloubů. Tato úloha se nazývá přímý kinematický problém. Opačným případem je určení závislosti kloubových souřadnic na souřadnicích koncového efektoru. Tento problém je označován jako inverzní kinematický problém a je daleko komplexnější než první typ přepočtu polohy. Pro určité souřadnice koncového efektoru může existovat více možných konfigurací natočení robotických kloubů. Definování problému by mělo být zřejmé z následujícího kinematického schématu (viz obr. 6-2). Robotická paže je opatřena třemi rotačními vazbami, jejichž poloha bude definována příslušnými úhly natočení, ze kterých bude možné určit přesnou polohu koncového efektoru vyjádřenou v souřadnicovém systému s osami x , y , z . (23)



Obrázek 6-2 Polohové závislosti v kartézském systému souřadnic (24)

Stupně volnosti je možné odebrat a přidávat pomocí kinematických vazeb. Kinematické vazby představují klouby v robotickém celku.

6.2. Typy kloubů

Příklady jednotlivých typů kloubů, které se od sebe liší počtem a typem stupňů volnosti.

- P-kloub (Prismatic): Odebírá tělesu pět stupňů volnosti a ponechává posuv možný v jednom směru.
- R-kloub (Revolute): Rotační kloub odebírá pět stupňů volnosti a ponechává jeden stupeň volnosti reprezentovaný rotací kolem jedné z os.
- U-kloub (Universal): Kardanův kloub ponechává dva stupně volnosti ze šesti možných. Těleso může rotovat kolem dvou os.
- S-kloub (Spherical): Sférický kloub umožňuje rotace kolem všech tří os a zamezuje jakémukoli posuvnému pohybu. (25)



Obrázek 6-3 Typy kloubů (zleva doprava P, R, U, S)

6.3. Redundantní robotické paže

O kinematické redundanci mluvíme v případě, že má robotický manipulátor více stupňů volnosti, než je nezbytně nutné pro vykonání daného úkolu. Pokud nebudeme brát ohled na operaci, kterou má robot vykonat, považujeme za redundantní manipulátor takový konstrukční celek, který má sedm a více stupňů volnosti. Číslo sedm je to právě proto, že těleso má obecně v prostoru stupňů volnosti šest. Implementace manipulátorů s kinematickou redundancí má za cíl zvýšit jejich obratnost, a tak je připodobnit lidské paži. Skutečnost, že robotická paže disponuje přidanými stupni volnosti, dovoluje takový pohyb paže, který nemusí nutně způsobovat pohyb koncového efektoru. Tím pádem existuje více cest, kterými může být úkol kladený na koncový efektor proveden. To se hodí v případě, že pracovní prostor může být omezený různými typy fyzických překážek. Z manipulátoru s redundantními stupni volnosti se tedy stává daleko univerzálnější pracovní nástroj. V praxi se dá obratnosti využít nejen na vyhýbání se překážkám, ale také ke snížení potřebných silových účinků nebo množství dodané energie při správném polohování robotu. (15)

7. Trendy

Výzkum přechází od uchopovačů určených pro jednu specifickou úlohu na komplexnější koncové efekty. Průmyslové sektory hledající nové cesty, jak automatizovat pracovní činnosti, chtějí v dnešní době koncové efekty intuitivní a multifunkční. Robotické uchopovače nové generace kombinují jednoduchost použití a univerzálnost pro zlepšení účinnosti a přesnosti průmyslových procesů. V budoucnosti je možné předpokládat, že koncové efekty najdou větší využití i v jiných oborech, než je strojírenský a elektrotechnický průmysl.

7.1. Haptika

Velkou výzvou ve vývoji robotických rukou je integrace haptické odezvy. Lidská ruka operuje s velkým množstvím senzorů, které reprezentují jeden z našich základních smyslů, a tím je hmat. Hmat nám pomáhá charakterizovat vlastnosti zdvihaného předmětu, jakými mohou být například křehkost, tuhost nebo drsnost. Na základě informací získaných při kontaktu s předmětem dokážeme vyvinout adekvátní sílu, která zajistí abychom věc při uchopování nepoškodili. Výsledkem výzkumu společnosti SynTouch, která využívala při práci prostory Univerzity Jižní Kalifornie, je senzorová technologie, díky které mají robotické ruce možnost napodobit, a někdy i převyšovat schopnosti lidského hmatu. Systém SynTouch je vybaven senzory zvanými BioTac. Jejich funkci je možné připodobnit k lidským hmatovým senzorům. Sensory BioTac dokáží vnímat deformaci povrchu prstu, vibrace, tření vznikající klouzáním prstu po povrchu předmětu a také teplotu. Tohoto systému je využíváno například v pokrokové konstrukci antropomorfní ruky od společnosti Shadow Robot (viz obr. 7-1). (26)



Obrázek 7-1 Uchopovač od Shadow Robot (38)

7.2. Medicína

Robotika ve zdravotnictví se začala rozvíjet od poloviny 80. let. Jde tedy o mladý obor, který se neustále rozvíjí i dnes. Na roboty provádějící určité úkony při operacích může být pohlíženo jako na pomocné předměty, které mají za úkol ulehčit práci chirurgovi a zároveň pracovat s vysokou přesností, a tím pádem i bezpečností. Obecně platí, že roboty používané při operacích jsou vždy ovládané chirurgem. Předmětem výzkumu jsou však také autonomní roboty, které by mohly v budoucnu samostatně pracovat na polích medicíny. Implementace robotů do zdravotnictví by tedy mohla znamenat bezpečnější a méně invazivní operace, snížení počtu infekcí, a především dlouhodobé zvýšení lidského věku. (15)

7.3. Protetika

Dalším velmi zajímavým oborem, který už začíná být v dnešní době pro lidi trpící určitým tělesným postižením značně užitečným, je robotická protetika. Během posledních pár let se biomechatronické protézy dostaly do velmi zajímavých sfér v přínosu pro člověka. Do výzkumu investovalo velké množství kapitálu americké ministerstvo obrany, které tímto způsobem hodlá podporovat válečné veterány. Na rozdíl od umělých protéz, typicky vyrobených z plastů nebo oceli, jsou biomechatronické protézy silnější, lehčí a z flexibilnějších kompozitů, které je dělají přirozenějšími k nošení. Tyto protézy používají kombinaci sofistikovaných technologií.

Jsou opatřeny biosenzory, které přijímají signály ze svalů a nervů uživatele. Senzory předávají informaci aktuátorům, které v tomto případě fungují jako lidské svaly, a náhradní končetina se tak může pohnout. (27)



Obrázek 7-2 Biomechatronická protéza (39)

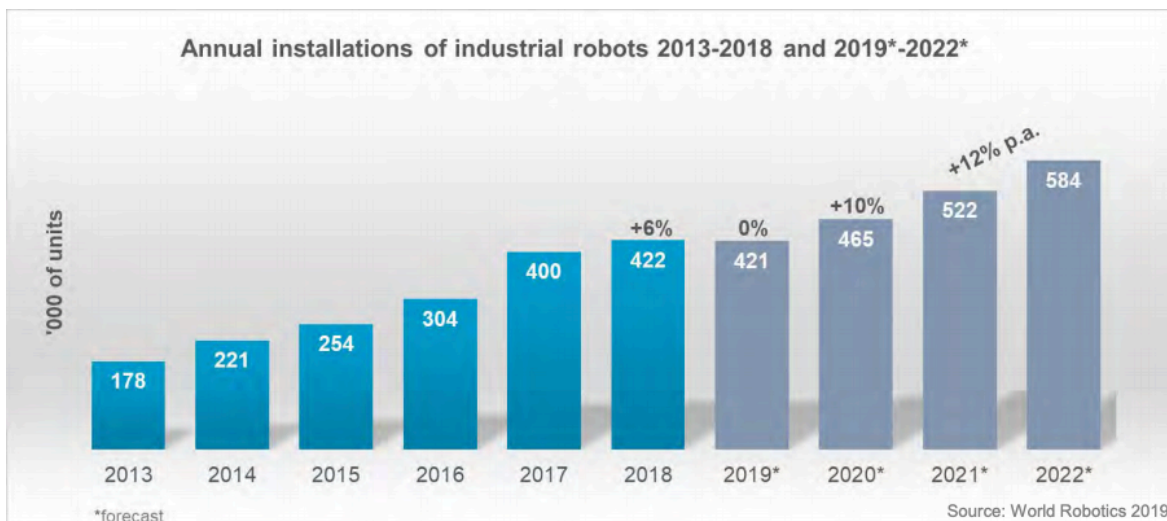
7.4. Průmysl

Kolaborace člověka s robotem na pracovišti je podle International Federation of Robotics (IFR) zajímavým trendem budoucnosti. Při práci s člověkem se robot dokáže velmi rychle přizpůsobit měnícímu se prostředí. Spektrum aplikací, které robot dokáže vykonávat, se neustále navyšuje. Prozatím jsou kooperující roboty používány jako pomocná ruka pro pracovníka. Výzvou je realizovat proces, při kterém by robot a člověk pracovali současně na jedné součásti. Výzkum se nyní zaměřuje na metody, které by mohly zajistit, aby byl robot schopný reagovat na pracovníka v reálném čase. Tato spolupráce má díky obrovským možnostem využití robotů pro průmyslové firmy velký potenciál. (28)



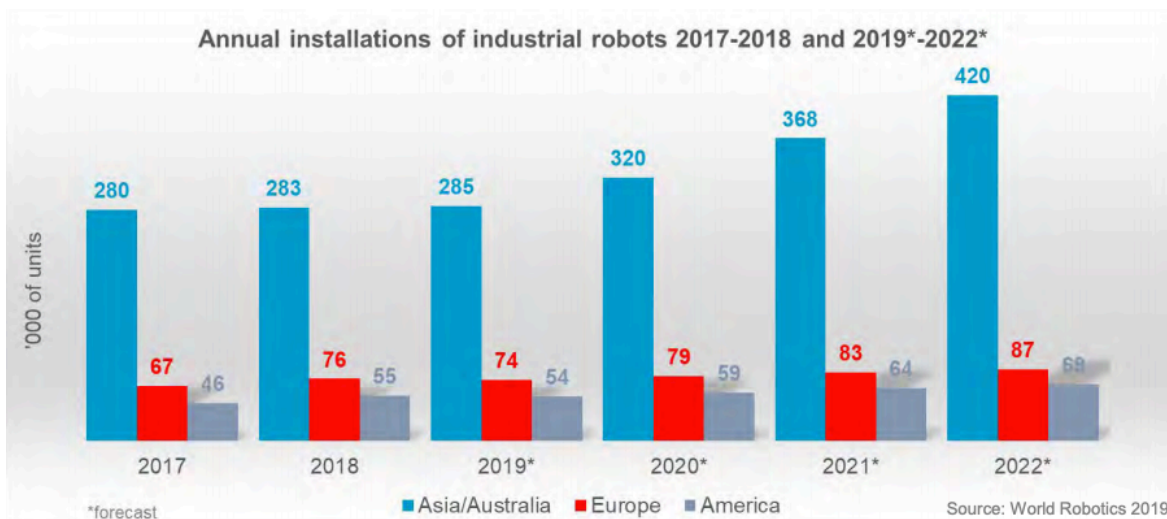
Obrázek 7-3 Kolaborace člověka s robotem (28)

Roboty v průmyslu mají nezpochybnitelně svoji budoucnost. Tato skutečnost se může opřít o grafy (viz grafy 7-1 a 7-2) publikované IFR u příležitosti ročního shrnutí průmyslové robotiky za rok 2019.



Graf 7-1 Celkové roční instalace průmyslových robotů (3)

První z grafů popisuje roční počet instalací průmyslových robotů do pracovního procesu. Za posledních pět až šest let můžeme pozorovat enormní nárůst. Graf obsahuje i předpověď, jak by se mohl počet instalací vyvíjet v budoucnosti. V oblasti průmyslových robotů se tedy stále očekává expanzivní růst i v budoucnosti.



Graf 7-2 Celkové roční instalace průmyslových robotů napříč kontinenty (3)

Na druhém grafu je přehled rozdělení na jednotlivé světadíly, které jsou největšími uživateli průmyslových robotů. Nejprogresivnější růst se předpokládá v Asii, kde jsou hlavními zástupci v implementaci automatizace Čína, Jižní Korea a Japonsko.

8. Návrh robotické ruky

Při návrhu robotické ruky bylo cílem vytvořit jednoduchou a funkční konstrukci, která by byla schopna uchopování obecných pracovních předmětů a následné manipulace s nimi.

8.1. Vstupní předpoklady uchopovače

Projekt robotické ruky byl formován pomocí počátečních požadavků na konečnou konstrukci. Při návrhu nebo volbě už hotového uchopovače hrají největší roli vlastnosti a parametry uchopovaných předmětů. Vstupním předpokladem bylo, že vytvořená robotická ruka by se měla blížit flexibilitou sofistikovanějším konstrukcím průmyslových uchopovačů, aby byla možná manipulace s předměty obecného tvaru.

Dalším důležitým požadavkem bylo zajištění externího ovládní robotické ruky. Programovatelnost je velmi praktická při změně nebo úpravě předepsané funkce.

Z počátku bylo definováno, že jednotlivé prsty budou disponovat každý svým aktuátorem. Aktuátor, který se stará o pohon prstů, by měl být schopný komunikovat s externí řídicí jednotkou, aby bylo zajištěno snadné ovládní ruky.

Robotická ruka by měla být dále opatřena taktilními senzory, které zajistí větší sofistikovanost a samostatnost konstrukce. Pomocí senzorů bude možné získávat informace o interakci chapadla s pracovním dílem. Tyto signály budou následně odesílány do řídicí jednotky a celá konstrukce tak bude schopná pracovat přesněji a samostatněji.

V neposlední řadě bude nutné zajistit kompatibilitu s robotickým ramenem, pro které je robotická ruka určena. V tomto kroku musí být vyřešena smontovatelnost robotické ruky a robotického ramene. Zároveň musí být respektována maximální nosnost ramene.

9. Vlastní návrh a výběr komponent

9.1. Materiál a výroba

Aby mohl být výsledkem této práce nějaký fyzický výrobek, bylo nutné na počátku konceptu stanovit způsob výroby a materiál. Při tvorbě tohoto prototypu byl zvolen jako způsob výroby 3D tisk. Aditivní výroba přináší velké množství výhod. Umožňuje tisk složitých tvarů a velmi malých součástek. Drtivá většina součástí byla tedy zhotovena na 3D tiskárně. Pro tisk jednotlivých komponent byly použity dvě 3D tiskárny. Větší díly byly tisknuty na tiskárně Felix 3.2 a menší díly (např. články prstů) na tiskárně Prusa MKS3. Zbylé komponenty jako spojovací materiál, ložiska nebo servomotory byly zakoupeny.

Uchopovač bude z největší části tvořen polymerem se zkratkou PLA (Polyactic Acid – kyselina polymléčná). Jedná se o termoplast, který se řadí mezi nejvyžívanější materiály pro 3D tisk. Pomocí filamentu PLA lze docílit snadného tisku a hotové výtisky dosahují relativně vysoké tvrdost a odolnosti. Tento materiál je vhodný pro tisknutí větších ploch. Díky nízké tepelné roztažnosti si dokáže zachovat požadovaný tvar. (29)

Technické specifikace materiálu PLA:

Tabulka 9-1 Vlastnosti materiálu PLA (30)

	PLA
Youngův modul [GPa]	3,5
Modul pružnosti [GPa]	4
Pevnost v ohybu [MPa]	80
Pevnost v tahu [MPa]	110
Teplota skelného přechodu [°C]	60
Počátek deformace [°C]	65
Teplota tání [°C]	160

9.2. Skladba prstů

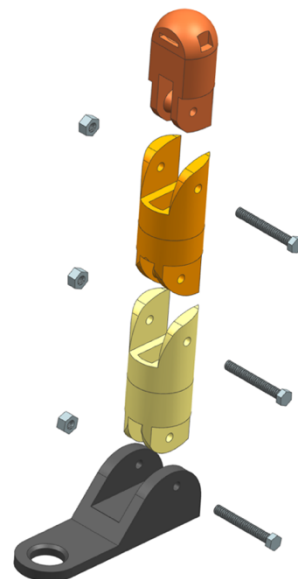
9.2.1. Tvar a počet prstů uchopovače

Nejdůležitějším parametrem, který bylo nutné na samém počátku projektu určit, byla volba tvaru robotické ruky a s tím spojený počet prstů. Aby bylo možné uchopovat co nejširší škálu předmětů, dvouprsté uchopovače musely být zcela vyloučeny. Důvodem, proč bylo nutné zvolit design s více prsty, je flexibilita, kterou tyto konstrukce nabízejí. Jedním ze základních vstupních požadavků byla také určitá jednoduchost výsledného výrobku. Protože robotické ruce se čtyřmi a více prsty už se nekvalifikují jako zcela jednoduché, byla zvolena varianta robotické ruky se třemi prsty. Výsledný design je inspirovaný velice zdařilým konceptem z minulého století – Barrettovy ruky, který je používán v robotice i v dnešní době. Konstrukce Barrettovy ruky je tvořena dvěma sousedícími prsty a třetím prstem, který je proti zbylým dvěma v opozici.

Aby bylo docíleno co největší flexibility, všechny tři prsty budou tvořeny třemi jednotlivými články s kruhovým průřezem. Prsty tak budou mít možnost se přizpůsobit tvaru zdvihaného předmětu.

9.2.2. Rotace článků

Otočnéno spojení mezi jednotlivými články je dosaženo pomocí tvarových prvků na člancích a sousých děr (viz obrázek 9-1). Díry na vnějších tvarových prvcích mají průměr 3 mm a díry na vnitřních tvarových prvcích mají průměr 3,3 mm. Skrz díry prochází šroub M3, který ve vnějších dírách, díky měkkému materiálu článků, vytvoří závit. Ve vnitřních dírách je šroub uložený s vůlí a umožňuje tak rotaci celého článku. Vyřezaný závit v dírách s průměrem 3 mm navíc zajišťuje šroub proti osovému posunutí. Spoj je stažen maticí M3. Plochy jednotlivých článků mezi sebou mají vůli 0,8 mm, aby při rotaci nedocházelo k nevyžádanému tření mezi tvarovými prvky.

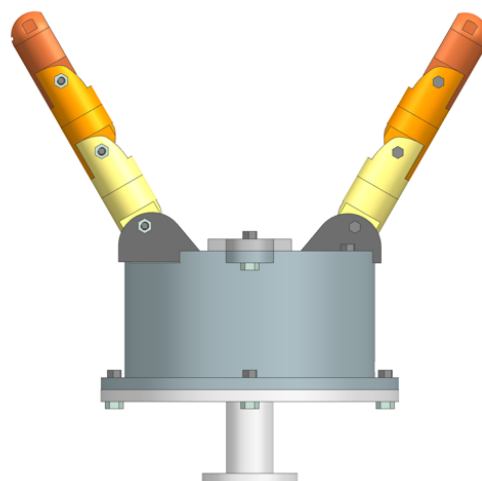


Obrázek 9-1 Rozstřel prstu

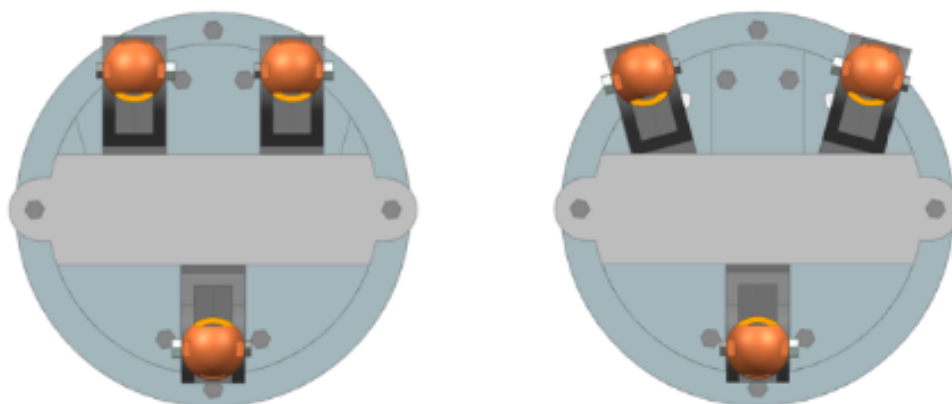
9.2.3. Uchopování

Při maximálním otevření prstů svírá osa nataženého prstu s hlavní osou uchopovače úhel 30° . Tento úhel je definován geometrií prvního článku prstu (žlutý), který se při maximální rozevření opře o připojovací kloub. Tohoto případu si lze všimnout na obrázku 9-2.

Aby bylo možné uchopovat pohodlně kulaté nebo stojící válcové předměty, jsou dva sousedící prsty na ruce uloženy do dlaně otočným kloubem. Připojovací kloub prstu, který je v kontaktu s prvním článkem prstu a zároveň dlaní ruky, je opatřen dírou. Tato část prstu se přes pouzdro nasadí na trn, který je součástí dlaně. Geometrie dlaně, do které je část prstu nasazena, pak celému prstu dovoluje rotační pohyb v rozmezí 0° až 15° (viz obrázek 9-3). Prst se v této rotační dráze může hýbat samovolně a přizpůsobí se tak samostatně pracovnímu předmětu při jejich vzájemném dotyku během procesu uchopování.



Obrázek 9-2 Maximální rozevření prstů



Obrázek 9-3 Rotace sousedících prstů

9.3. Volba kluzného pouzdra

Funkce pouzdra v tomto uložení spočívá ve snížení tření při rotaci přípojovacího kloubu prstu v trnu dlaně. Protože povrchy materiálu pouzdra a materiálu prstu nedosahují vysokých hodnot koeficientu tření (viz tabulka 9-2), probíhá rotace snadno a není potřeba mazání pouzdra vazelínou nebo jiným lubrikačním médiem.

V potaz ještě přicházela varianta uložení s kuličkovým ložiskem, která nabízí plynulejší rotaci než varianta s kluzným pouzdrům. Ale při 3D tisku je skoro nemožné zajistit tak přesné rozměry a tolerance, které kuličkové ložisko pro správnou funkci vyžaduje.

Zvoleným kluzným pouzdrům je výrobek PCMF 081005.5 E od firmy SKF.



Obrázek 9-4 Kluzné pouzdro PCMF 81005.5 E (31)

Technické specifikace kluzného pouzdra:

Tabulka 9-2 Technické specifikace kluzného pouzdra (31)

Vnitřní průměr d [mm]	8
Vnější průměr D [mm]	10
Výška B [mm]	5,5
Dynamická únosnost C [kN]	2,24
Statická únosnost C ₀ [kN]	6,95
Minimální hodnota koeficientu tření μ_{\min} [-]	0,03
Maximální hodnota koeficientu tření μ_{\max} [-]	0,25

Dynamická i statická únosnost jsou pro vyžadovanou funkci zcela dostačující. Zdvíhané předměty nebudou dosahovat velkých hmotností, a to především kvůli limitaci nosnosti robotického ramene.

9.4. Volba pohonu

9.4.1. Aktuátor

Realizaci pohybu zajišťují v robotických rukách obvykle aktuátory. Nejčastěji používané aktuátory pracují na bázi tlakového působení nebo jsou poháněny elektricky. Vzhledem k požadované velikosti je možné vyloučit hydraulické pohony, které se používají především ve velkých zdvihacích strojích za účelem vyvinutí velkých sil. Z běžně dostupných aktuátorů tedy přicházejí v úvahu pneumatické pohony a elektrické pohony.

Pro charakter a funkci této robotické ruky bude nejvhodnější zvolit elektrické servomotory. Ty dokáží nabídnout vysoký točivý moment relativně k jejich velikosti a zároveň snadnou ovladatelnost přes řídicí jednotku. Jejich nespornou výhodou je velmi přijatelná cena.

Pro pohon prstů byl zvolen servomotor MG995. Tento servomotor je vybaven odolnými kovovými převody. Operuje v polohách od 0° do 180°.



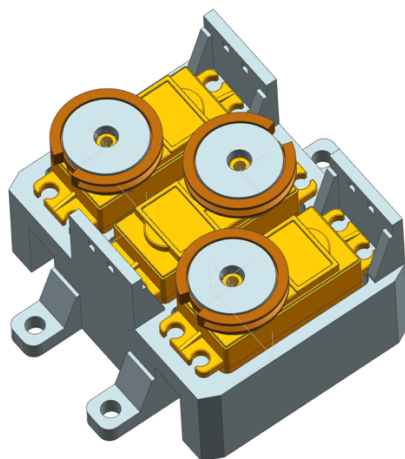
Obrázek 9-5 Servomotor MG955 (32)

Technické specifikace servomotoru:

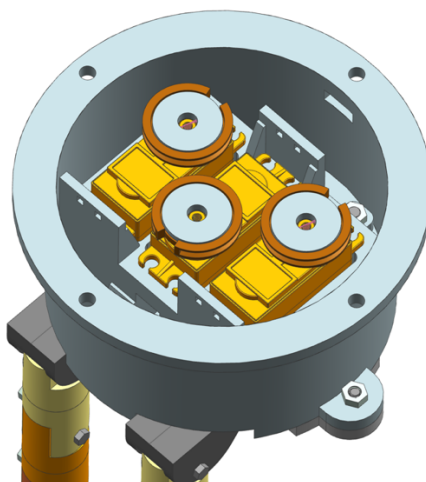
Tabulka 9-3 Technické specifikace servomotoru MG955 (32)

Rychlost při napájení 4,8 V [s/°]	0,17/60
Rychlost při napájení 6,0 V [s/°]	0,13/60
Provozní napětí [V]	4,8 - 7,2
Délka vodičů [mm]	300
Rozměry [mm]	40x43x19
Hmotnost [g]	55

Servomotory budou uloženy v samostatné součásti, která se posléze připojí do vnitřního prostoru ruky pomocí šroubů M4.



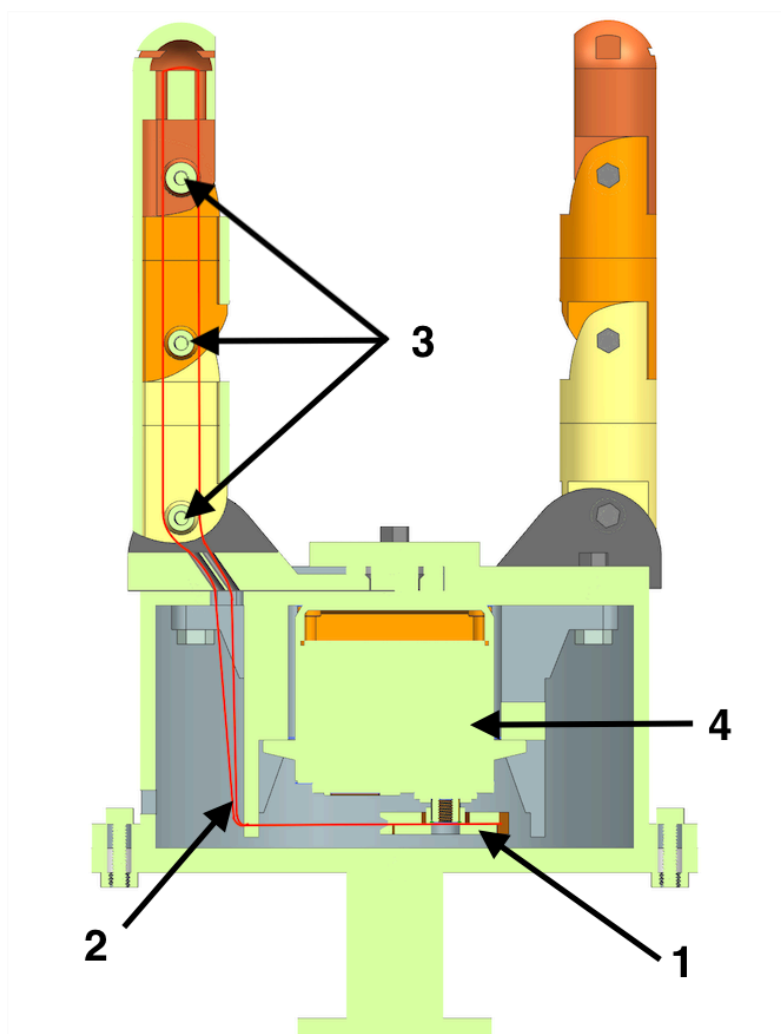
Obrázek 9-6 Uložení servomotorů



Obrázek 9-7 Servomotory uvnitř konstrukce

9.4.2. Pohyb prstů

Aby docházelo při aktivním stavu servomotorů k pohybu prstů, musí být prstům předána mechanická energie z aktuátorů. Jako prvek rozvádějící mechanickou energii byl zvolen nepružný vlasec o průměru 0,5 mm (na obrázku 9-8 pozice č. 2). Ten tvoří uzavřený okruh od servomotoru (pozice č. 4) přes poslední článek prstu. Na výstupní hřídel serva je připojen přes navíjecí kladku s průměrem 26 mm (pozice č. 1). Rotace serva tak navíjením vlasce bude způsobovat otevírání a zavírání prstu. Na obrázku řezu je zobrazen vlasec červenou barvou. Každý článek je vybaven příčným válcem (pozice č. 3), o který se vlasec může při navíjení opřít.

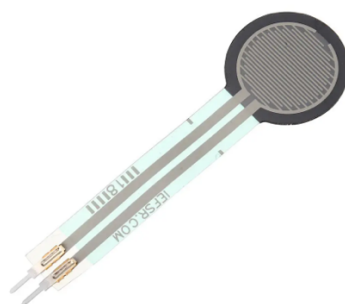


Obrázek 9-8 Cesta vlasce

9.5. Volba senzorů

Pro zajištění správné funkce při uchopování předmětů bude ruka opatřena taktilními senzory. Tyto senzory budou umístěny na posledních člancích prstů a v dlani ruky. Senzory musí být připojeny kabely na řídicí jednotku. Senzor umístěný v dlani bude vysílat do řídicí jednotky digitální signály úměrné síle vyvinuté na senzor pracovním předmětem. V případě, že bude zdviháný objekt dostatečně velký a vhodného tvaru, dostane řídicí jednotka po dosažení předem definované síly vyvinuté na senzor pokyn k uzavírání prstů a k nastolení uchopení předmětu. Senzory umístěné na konečcích prstů budou mít podobnou funkci. Při dosažení určité definované síly, která na ně bude působit při uchopování předmětu, vyšlou do řídicí jednotky signál, že předmět je dostatečně zajištěn a připraven pro manipulaci. Po obdržení tohoto signálu dá řídicí jednotka pokyn servomotorům, servomotory přestanou ruku dále uzavírat a zastaví se v poloze, která zajišťuje dostatečný úchop předmětu.

V dlani ruky budou umístěny dva senzory s aktivní plochou 14 mm a na každém prstu bude na jeho posledním článku umístěn senzor s aktivní plochou 6 mm.



Obrázek 9-9 Taktilní senzor (33)

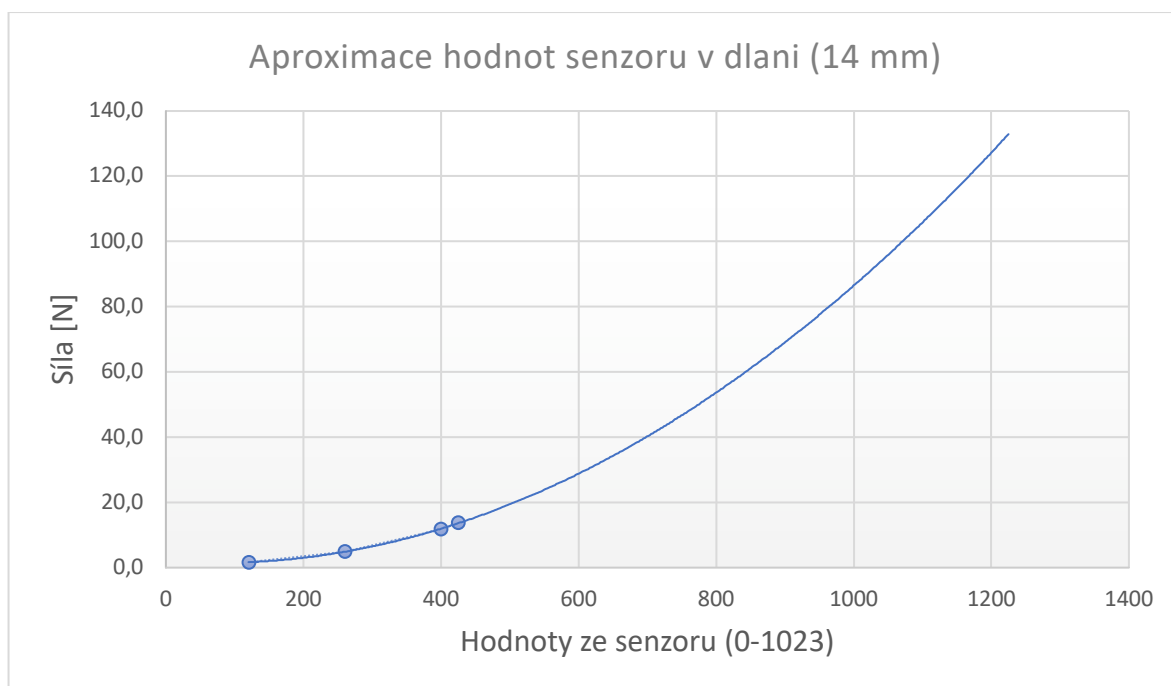
9.5.1. Kalibrace senzorů

Většina desek Arduino, o kterých bude řeč v příští kapitole má analogové vstupy s rozlišením 10 bitů. Stupnici lze rozdělit na $2^{10} = 1024$ hodnot. Senzory tedy budou po dostatečném kontaktu s pracovním předmětem vypisovat hodnoty od 0 do 1023 relativně k zatížení senzoru. Tyto hodnoty však nemají přiřazenou žádnou fyzickou sílu. Nedokážeme si tedy představit, jakou sílu je nutné vyvinout, abychom se dostali na stupnici o 1024 hodnotách přes hranici například 250. Pro tyto účely bylo nutné provést orientační kalibraci senzorů. Kalibrace probíhala zatížením senzoru čtyřmi různými předměty o rozdílných hmotnostech. Hmotnost byla pomocí tíhového zrychlení přepočítána na sílu. K silám byly pak přiřazeny příslušné hodnoty ze senzoru. Výsledné hodnoty byly zaznamenány do grafu a pomocí aproximace je možné odhadnout, jaké síly je nutné vyvinout pro každou z 1024 hodnot.

Senzor s aktivní plochou 14 mm

Tabulka 9-4 Proporcionální vyvinuté síly k hodnotám ze senzoru 1

Vyvinutá síla [N]	Vypsaná hodnota [-]
1,7	120
4,9	260
11,8	400
13,7	425

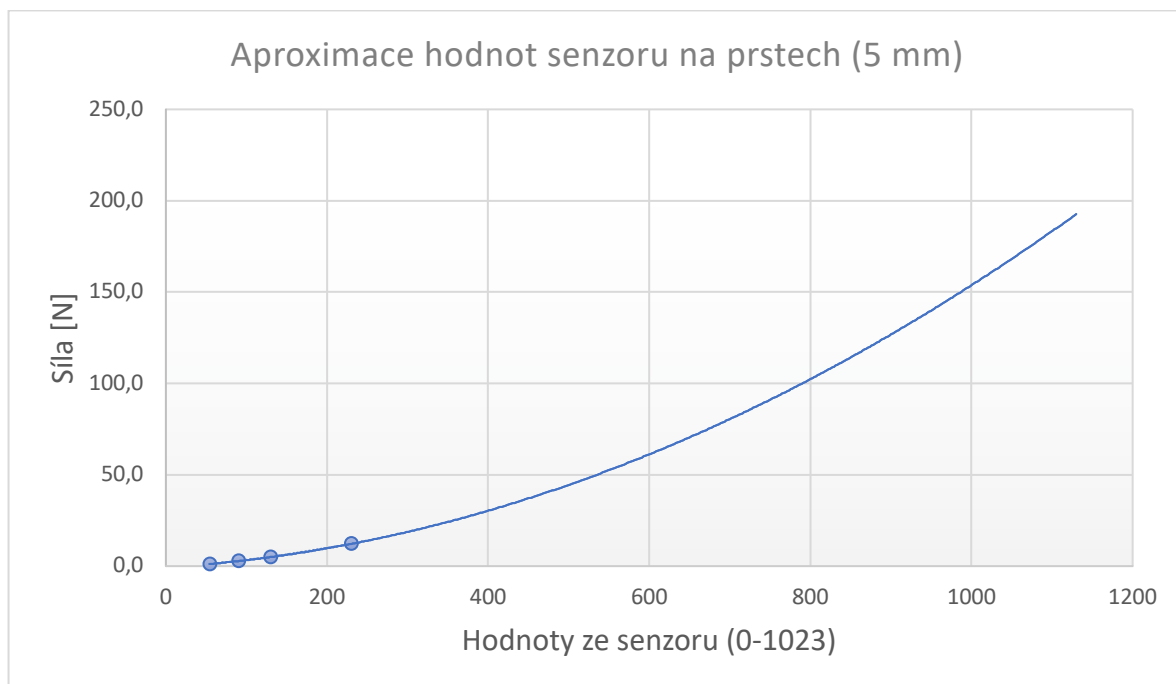


Graf 9-1 Kalibrace senzoru 14 mm

Senzor s aktivní plochou 5 mm

Tabulka 9-5 Proporcionální vyvinuté síly k hodnotám ze senzoru 2

Vyvinutá síla [N]	Vypsaná hodnota [-]
1,2	54
2,8	90
4,9	130
12,2	230



Graf 9-2 Kalibrace senzoru 5 mm

9.6. Volba řídicí jednotky

Programovatelnost robotické ruky lze zajistit použitím řídicí jednotky a programu. Řídicí jednotka dokáže přijímat signály z receptorů a na základě těchto informací odesílat signály do aktuátorů pro ovládání pohybu prstů.

9.6.1. Arduino

Ideálním médiem pro vyžadovanou funkci se jeví jednodeskový počítač Arduino založený na procesorech firmy Atmel. Arduino je volně dostupná elektronická platforma založená na uživatelsky přívětivém hardwaru a softwaru. Tyto základní desky dokáží přijímat vstupy ve formě signálů a přeměňovat je do výstupů vhodných například k aktivaci motorů. Právě díky volné dostupnosti a snadné ovladatelnosti se Arduino stalo velmi používaným nástrojem pro širokou komunitu lidí, kteří ho mohou využívat pro své projekty.

Pro ovládání Arduino je využíváno softwaru Arduino IDE, který lze zdarma získat na oficiálních webových stránkách autorů projektu. Pro tvorbu programu je nutné používat Arduino programovací jazyk, který vychází z klasického konceptu programování. Arduino používá vlastní programovací jazyk Wiring, který syntaxí vychází z programovacího jazyka C a C++.

Existuje více typů základních desek Arduino. Pro tento projekt byla vybrána nejpoužívanější a velmi univerzální deska Arduino UNO. (34)

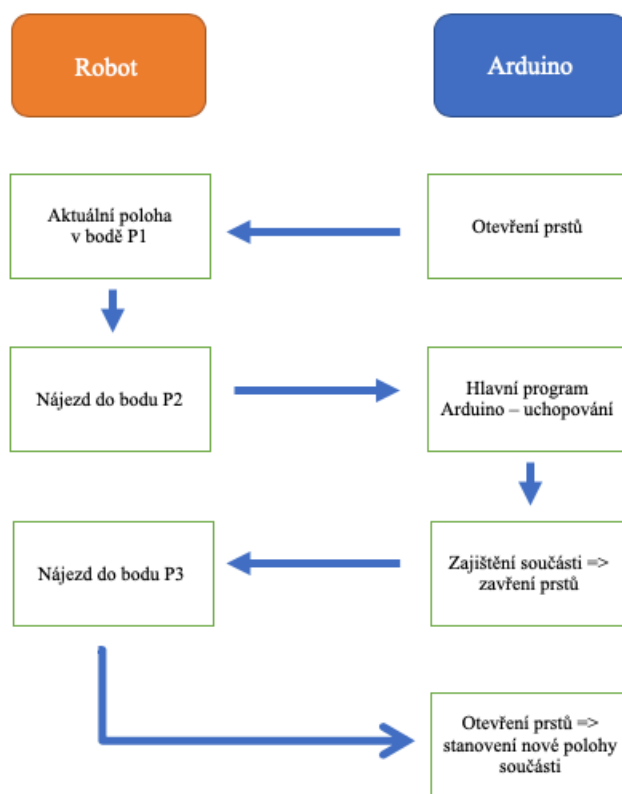


Obrázek 9-10 Arduino Uno (35)

9.6.2. Komunikace robota s koncovým efektem

Při zahájení manipulačního úkonu nejdříve celý systém ovládá řídicí jednotka robotického ramene a jediným úkolem desky Arduino je držet prsty v otevřené poloze. Úkolem řídicí jednotky robota je dostat robotickou ruku do přesně definovaných souřadnic. Zatímco řídicí jednotka Arduino čeká na potvrzení, že je koncový efektor na správném místě. Po transportu uchopovače do správné polohy přebírá kontrolu Arduino. Poté co Arduino s pomocí programu skrze uchopovač zajistí pracovní předmět, předá opět kontrolu řídicí jednotce robotického ramene. Ta opět zajistí transport do nové požadované polohy. Po úspěšném transportu ze strany robotického ramene dostane Arduino pokyn k uvolnění součásti. Tímto způsobem je stanovena nová poloha pracovního předmětu.

Řídicí jednotka robota bude s Arduinem vzájemně komunikovat na rozhraní čtyř pinů.



Obrázek 9-11 Grafické zobrazení komunikace robota s Arduinem

9.6.3. Hlavní program Arduino

Během uchopovacího úkonu plní deska Arduino několik elementárních funkcí:

- Komunikuje s řídicí jednotkou robota, se kterou si předává řízení.
- Řídí uchopování a uvolňování objektu. Čte a vyhodnocuje signály z taktilních senzorů a nastavuje polohu servomotorů, které řídí pohyb prstů.
- Pomocí diod vizualizuje vlastní činnost.
- Během úkonu odesílá po sériové lince do připojeného počítače informace a síle úchopu, poloze servomotorů a o stavu komunikačních pinů s řídicí jednotkou robota.

Program pro Arduino se skládá ze dvou hlavních částí:

- Funkce `setup()`, která se spustí vždy pouze jednou při startu či restartu desky. Funkce obsahuje nastavení jednotlivých pinů, rychlosti komunikace po sériové lince apod.
- Funkce `loop()`, která se pak vykonává jako nekonečná smyčka do vypnutí napájení. Z ní jsou volané další funkce.

Následuje text s důležitými částmi programu, ke kterým je připojen krátký komentář. Protože se jedná o pilotní verzi programu, která bude zatím komunikovat vždy pod dohledem lidského operátora, nejsou prozatím ošetřeny všechny chybové stavy zařízení.

Připojení knihovny servo pro komunikaci se servomotory.

```
#include <Servo.h>
```

Pojmenování pinů využívaných senzory a servy. Sensory jsou připojené k analogovým pinům A0 až A4.

```
const int sensor_prst1_pin = 0;  
const int sensor_prst2_pin = 1;  
const int sensor_prst3_pin = 2;  
const int sensor_dlan1_pin = 3;  
const int sensor_dlan2_pin = 4;
```

Serva jsou připojená k pinům D9 až D11.

```
const int servo_prst1_pin = 9;  
const int servo_prst2_pin = 10;  
const int servo_prst3_pin = 11;
```

Piny D2 až D5 jsou využívány pro komunikaci s řídicí jednotkou robotického ramene. Piny D2 a D3 jsou vstupní a Arduino na nich čte signály z řídicí jednotky robota. Piny D4 a D5 jsou výstupní a Arduino na nich nastavuje informaci odesílanou do robota.

```
const int in1_pin = 2;  
const int in2_pin = 3;  
const int out1_pin = 4;  
const int out2_pin = 5;
```

Vizualizace aktuálního stavu procesu je zobrazována pomocí dvoubarevné diody připojené k pinům D12 a D13. Zelená dioda signalizuje, že řízení je předáno do robota (probíhá přesun ramene) a červená signalizuje, že řízení má Arduino (probíhá uchopování nebo uvolňování objektu). Chybový stav je detekován tónem bzučáku. Jednoduchá interakce s operátorem je zajištěna přes tlačítko (povolení pokračování v případě chyby).

```
const int tl_pin = 7;
const int repro_pin = 8;
const int rled_pin = 12;
const int gled_pin = 13;
```

Objekty servo1, servo2 a servo3 odpovídají servomotorům pro prst1, resp. prst2, resp. prst3.

```
Servo servo1;
Servo servo2;
Servo servo3;
```

Síla požadovaná pro uchopení je v této jednoduché verzi programu nastavena jako konstanta, reprezentující prahovou hodnotu síly (počet vzorků z A/D převodníku). V pokročilejším případě by bylo potřeba požadovanou sílu dopočítat podle hmotnosti, materiálu a tvaru uchopovaného objektu, typu úchopu apod.

```
const int poz_sila = 200; // min=0, max=1023
```

Ve funkci setup() se nastaví režim jednotlivých pinů. Kromě toho se provede inicializace sériové linky pro výpisy hodnot na PC v ladícím režimu. Pro piny analogových vstupů není potřeba režim nastavovat, protože fungují jen jako vstupní.

```
void setup() {
    pinMode(in1_pin, INPUT);
    pinMode(in2_pin, INPUT);
    pinMode(out1_pin, OUTPUT);
    pinMode(out2_pin, OUTPUT);

    pinMode(tl_pin, INPUT_PULLUP);
    pinMode(repro_pin, OUTPUT);
    pinMode(rled_pin, OUTPUT);
    pinMode(gled_pin, OUTPUT);

    servo1.attach(servo_prst1_pin);
    servo2.attach(servo_prst2_pin);
    servo3.attach(servo_prst3_pin);

    Serial.begin(9600);
}
```

Funkce loop() opakovaně čte stav komunikačních pinů a v případě, že dostane řízení (to znamená, že alespoň na jednom z pinů je hodnota logická 1), začne provádět požadovanou činnost. Po ukončení pak předá řízení.

```
void loop() {
    if ((digitalRead(in1_pin)==1) && (digitalRead(in2_pin)==1)) {
        // chyba v komunikaci s robotem
        Serial.println("Chyba: Chyba pri komunikaci s robotem
        - stav 11");
        cekej(); // stop a cekani na potvrzeni
    }
    if ((digitalRead(in1_pin)==1) && (digitalRead(in2_pin)==0)) {
```

```
// Predani rizeni s pokynem k zavirani ruky
prevezmi_rizeni();
// Zavirani vzdy zacne z uplneho otevreni
if !(otevri_ruku()) {
    Serial.println("Zprava: Ruka plne otevrena ...");
}
else {
    zvuk_chyba();
    Serial.println("Chyba: Ruka neni plne otevrena...");
    cekej();          // stop a cekani na potvrzeni
}
if (zavri_ruku()) {
    predej_rizeni();
}
else {
    zvuk_chyba();
    Serial.println("Chyba: Ruka neni plne zavrena ...");
    cekej();          // stop a cekani na potvrzeni
}
}

if ((digitalRead(in1_pin)==0) && (digitalRead(in2_pin)==1)) {
    // Predani rizeni s pokynem k otevirani ruky
    prevezmi_rizeni();
    // Zavirani vzdy zacne z uplneho otevreni
    if (otevri_ruku()) {
        Serial.println("Zprava: Ruka plne otevrena ...");
        predej_rizeni();
    }
    else {
        zvuk_chyba();
        Serial.println("Chyba: Ruka neni plne otevrena...");
        cekej();          // stop a cekani na potvrzeni
    }
}
if ((digitalRead(in1_pin)==0) && (digitalRead(in2_pin)==0)){
    Serial.println("Zprava: Cekam na robota – stav
00");
}
}
```

Následující funkce volané z hlavní smyčky.

Převzetí a předání řízení Arduinem – jednoduché funkce, které nastaví na výstupních pinech kód 00, resp. 11. Robot tak ví, že musí čekat na ukončení uchopení (robot testuje ve while cyklu stav svých dvou vstupních pinů a nepokračuje ve vykonávání programu, dokud nedostane kód 11), nebo že může pokračovat ve svém programu. Současně je provedena změna signalizace stavu diodou.

```
void prevezmi_rizeni() {
    digitalWrite(out1_pin, LOW);
    digitalWrite(out2_pin, LOW);
    digitalWrite(gled_pin, LOW);
    digitalWrite(rled_pin, HIGH);
}
void predej_rizeni() {
    digitalWrite(out1_pin, HIGH);
    digitalWrite(out2_pin, HIGH);
    digitalWrite(gled_pin, HIGH);
    digitalWrite(rled_pin, LOW);
}
```

Funkce upozornění na chybu je jednoduchá funkce, která spustí na 3 sekundy reproduktor s tónem 1kHz, jako upozornění obsluhy, že něco není v pořádku. V ladicím režimu je pak popis chyby zobrazen v okně Serial Monitor. V této ukázkové verzi programu není řešena žádná další pokročilá reakce na chybu, kromě upozornění uživatele a čekání na jeho pokyn.

```
void zvuk_chyba() {
    tone(repro_pin, 1000);
    delay(3000);
    noTone(repro_pin);
}
```

Další funkce je čekání na vstup uživatele v případě, že se objeví některá z elementárních chyb. Program se zastaví a očekává se, že operátor zkontroluje situaci a pokud chyba není fatální, potvrdí tlačítkem pokračování, nebo systém vypne a chybu odstraní.

```
void cekej() {
    Serial.println("Zprava: Cekam. Pro pokracovani stiskni tlacitko");
    while !(digitalRead(tl_pin)) {
        delay(20);
    }
}
```

Otevírání ruky je jednoduchá funkce, která nastaví všechny tři serva do nulové polohy. Není ošetřen stav, kdy by došlo ke kolizi prstu s okolím, předpokládá se tedy, že je v okolí dostatek místa pro otevřenou ruku. Pokud otevření proběhne v pořádku, vrací funkce kód 1, jinak 0.

```
int otevri_ruku() {
    servo1.write(0);
    servo2.write(0);
    servo3.write(0);
    delay(500);
    if ((servo1.read() != 0) && (servo2.read() != 0) && (servo3.read() != 0))
    { return 1;}
    else {return 0;}
}
```


Zavírání je ruky je komplexnější funkce, která postupně zavírá všechny servomotory a testuje sílu na taktilních senzorech jednotlivých prstů. Pokud je dosaženo síly na senzoru (je naměřena hodnota vyšší než předepsaná síla), je servo zastaveno. Po úspěšném kontaktu všech tří servomotorů je uchopování ukončeno a je vrácena hodnota 1. Za úspěšný kontakt je považováno, že je 3x po sobě naměřena na každém senzoru hodnota síly stejná nebo vyšší než požadovaná. Pokud není uchopení úspěšné, to znamená, že se serva zcela zavřou, a přesto síly nebylo dosaženo (např. objekt je na ruku příliš malý), je vrácena 0. Taktilní senzory v dlani nejsou v této verzi programu využívány.

```
int zavri_ruku() {
    int test[] = {0, 0, 0};
    for (int pos = 0; pos < 180; pos++) {
        if (analogRead(sensor_prst1_pin) < poz_sila) {
            test[0] = 0;
            servol.write(pos);
        }
        else test[0] = test[1]+1;
        if (analogRead(sensor_prst1_pin) < poz_sila) {
            test[1] = 0;
            servol.write(pos);
        }
        else test[1] = test[2]+1;
        if (analogRead(sensor_prst1_pin) < poz_sila) {
            test[2] = 0;
            servol.write(pos);
        }
        else test[2] = test[3]+1;
        delay(15);
        if ((test[0]>=3) && (test[1]>=3) && (test[2]>=3)) break;
    }
    if ((test[0]>=3) && (test[1]>=3) && (test[2]>=3))
        {return 1;}
    else {return 0;}
}
```

Robotické rameno bude najíždět do polohy definované v programu robota. Po dosažení polohy se nastaví na výstupní piny řídicí jednotky hodnota 01, respektive 10, podle toho, zda je požadavek ruku otevřít nebo zavřít. Tím se současně nabídne Arduino převzetí řízení a spustí se smyčka, která bude testovat dva vstupní piny a čekat na kód 11 (Arduino předá řízení zpět robotu). Poté se na výstupní piny řídicí jednotky nastaví kód 00 (potvrzení převzetí řízení robotem) a program robota pokračuje např. přejezdem do dalšího bodu.

9.7. Kompatibilita s robotickým ramenem

Ruka bude spojena s robotickým ramenem Mitsubishi Melfa RV2-SD. Spojení je zajištěno přírubou na obou objektech. Maximální přesnost robota je podle výrobce splněna do zátěže dvou kilogramů. Po překročení dvou kilogramů je robot stále schopný manipulace s objekty, ale není zajištěna uvedená přesnost pohybu. Robot je schopný operovat se zátěží až tři

kilogramů a jeho maximální dosah je 504 mm. Rozhraní robota je zobrazeno v příloze č. 1. (36)



Obrázek 9-12 Mitsubishi Melfa RV2-SD (36)

Výsledná hmotnost koncového efektoru včetně spojovacího materiálu činí 473,5 g. To znamená, že dovolená hmotnost zdvihaného předmětu pro garantovanou přesnost pohybu robotického ramene definovanou výrobcem je 1526,5 g. Nejvyšší povolená hmotnost zdvihaného předmětu s již negarantovanou přesností pohybu robota činí 2526,5 g. Vzhledem k charakteru zvoleného materiálu a typu rozvodu mechanické energie bude celková přesnost manipulace však více závislá na koncovém efektoru než robotickém rameni.

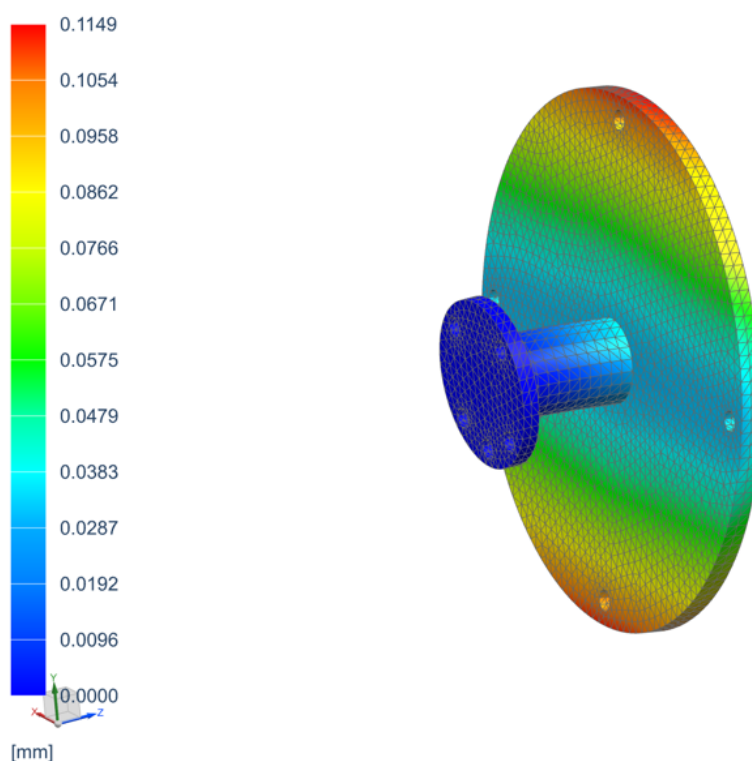
9.8. Výpočet deformace a napětí v kritickém místě konstrukce

Výpočet je proveden pomocí programu NX za použití metody konečných prvků. Metoda konečných prvků je numerická metoda, pomocí které se dají simulovat průběhy napětí, deformací, záření, proudění kapalin a plynů atd. V prostředí simulace je možné zasítovat daný model konečným počtem elementů. Po zadání příslušných fyzikálních a okrajových podmínek dokáže program určit posun uzlových bodů spojující elementy a poté stanovit vzniklé deformace a napětí.

Při analýze hotového modelu s přihlédnutím k požadované funkci koncového efektoru se jako nejslabší místo vzhledem k deformacím a poruchám jevil válec, který spojuje přírubu na robota s přírubou na dutý válec se servomotory. Metodou konečných prvků lze u tohoto typu konstrukce provést orientační výpočet. Výsledek výpočtu by měl přibližně stanovit předpokládané zatížení a deformace. Důvodem, proč je možné brát výpočet pouze jako orientační, je skutečnost, že zvolený materiál PLA nemá ve všech směrech stejné mechanické vlastnosti. Posuzovaná součást byla však vytisknutá s devadesátiprocentním zaplněním, pro naše účely je možné zjednodušit model a považovat součást za homogenní a izotropní. Ideální by bylo posuzovat materiál jako ortotropní, ale s rostoucím zaplněním se chyba způsobená tímto zjednodušením zmenšuje.

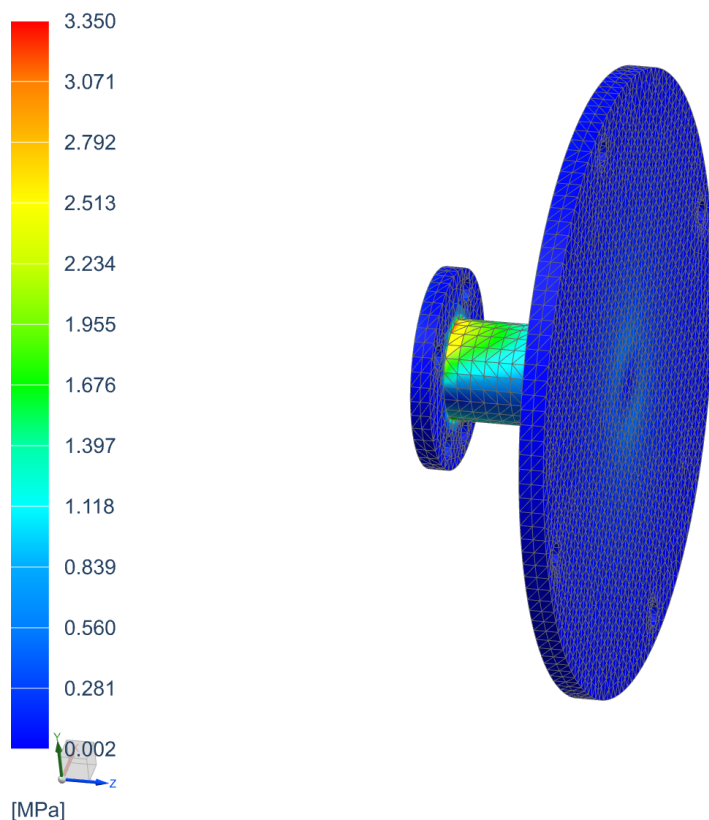
Pro modelování této úlohy byla zvolena poloha, kdy bude část efektoru nejvíce namáhána ohybem. Koncový efektor se bude v tomto případě nacházet ve vodorovné poloze. V místě menší příruby bylo tedy pro zjednodušení uvažováno vetknutí. Dále byl vypočten celkový moment působící na posuzovanou součást pro maximální nosnost robotického ramene. Zatížení bylo poté převedeno na zjednodušený model. V simulaci byly menší přírubě odebrány všechny stupně volnosti a větší příruba byla zatížena silou, která působí na součást stejným momentem, jaký byl vypočten při dosažení maximální nosnosti robotického ramene.

9.8.1. Výsledky analýzy



Obrázek 9-13 Maximální neorientované posunutí

Na obrázku 9-13 je zobrazeno celkové posunutí vzniklé deformace. Nejvyšší hodnoty jsou vykazovány na větší přírubě, která slouží ke spojení se zbytkem koncového efektoru. Maximální posunutí bylo stanoveno jako 0,1149 mm. Vzhledem ke konstrukci mechanismu koncového efektoru (zvolenému materiálu, očekávaným vůlím apod.) je tato hodnota posunutí přijatelná.



Obrázek 9-14 Redukované napětí v součásti

Na obrázku 9-14 je znázorněno redukované napětí v posuzované součásti. Maximální hodnota 3,350 MPa se vyskytuje ve vrubu mezi válcem menší přírubou. Vruby jsou obecně známé jako koncentrátory napětí, proto se dala poloha nejvyššího napětí v tomto místě očekávat. Pevnost v ohybu je u materiálu PLA definována na 80 MPa (viz tabulka 9-1). Maximální hodnota napětí se pevnosti v ohybu ani nepřibližuje, proto je možné prohlásit, že součást by měla v tomto stavu bez problému vydržet pracovat i s uvažáním případných chyb, které mohly být způsobeny zjednodušením modelu.

Závěr

Teoretická část této práce se věnovala robotice se zaměřením na průmyslové koncové efektor. V práci bylo názornými grafy od IFR zobrazeno, že automatizace do průmyslu nesporně patří a hraje v něm velkou roli. V rešerši bylo dále uvedeno rozdělení průmyslových koncových efektorů určených pro manipulaci do příslušných skupin podle způsobu uchopování. Zmíněny byly také sofistikovanější konstrukce chapadel, které v průmyslu zatím příliš nefigurují kvůli jejich vysokým nákladům. Není však vyloučeno, že budoucí vývoj neumožní těmto koncovým efektorům implementaci do výrobních hal. Mapování současných trendů na polích koncových efektorů však vedlo k závěru, že je s nejnovejšími produkty z řad robotických rukou nakládáno především v jiných oborech mimo průmysl.

Úkolem praktické části bylo navrhnout, vyrobit a laboratorně otestovat robotickou ruku. Vyrobený koncový efektor byl určen k připojení na robotické rameno Mitsubishi Melfa RV2-SD, které je k dispozici v laboratorních prostorách ZČU. Hlavním cílem bylo vytvořit koncový efektor schopný manipulace s předměty obecného tvaru. Samotný návrh začal stanovením základních požadavků na uchopovač. Po analýze požadavků bylo rozhodnuto, že pro tento prototyp bude zvolena výroba pomocí 3D tisku. Aditivní výroba umožňuje produkci velmi složitých dílů. Produkce těchto dílů standardními výrobními metodami by byla extrémně nákladná a složitá. Téměř celá konstrukce koncového efektoru byla tedy zhotovena z plastu. Zda bude pevnost plastových součástí dostačující pro požadovanou funkci, bylo ověřeno simulací metodou konečných prvků v programu NX. Ruka pro pohon prstů využívá elektrických servomotorů. Důležitým prvkem koncového efektoru jsou taktilní senzory, které do jisté míry kompenzují absenci hmatu. Celý proces uchopování je ovládán z řídicí jednotky Arduino. Pomocí programu dokáže koncový efektor komunikovat s robotickým ramenem, na které je připojen, a zároveň uchopovat široké spektrum pracovních předmětů.

Seznam použité literatury

1. wikiasofia.cz. *Robotika*. [Online] [Citace: 26. 2. 2020.]
<https://wikiasofia.cz/wiki/Robotika>.
2. VOLNÁ, Eva a KOTYRBA, Martin. *Umělá Inteligence*. Ostrava : Ostravská univerzita, 2013. ISBN 978-80-7464-330-9.
3. ifr.org. *IFR International Federation of Robotics*. [Online] 2019. [Citace: 26. 2. 2020.]
<https://ifr.org/downloads/press2018/IFR%20World%20Robotics%20Presentation%20-%2018%20Sept%202019.pdf>.
4. automationdistribution.com. *Automation Distribution*. [Online]
<https://automationdistribution.com/robotiq-agc-cpl-blank-002-end-effector-blank-coupling-for-2-finger/>.
5. machinedesign.com. *MachineDesign*. [Online] 2009. [Citace: 3. 12. 2019.]
<https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21828521/industrial-grippers-history-and-new-innovation>.
6. robots.com. *RobotWorx*. [Online] [Citace: 3. 12. 2019.]
<https://www.robots.com/articles/what-are-the-advantages-of-robot-welding-over-manual-welding>.
7. robots.com. *RobotWorx*. [Online] <https://www.robots.com/applications/robotic-coating>.
8. drstienecker.com. *Dr. Steinecker's TECH site*. [Online] [Citace: 3. 12. 2019.]
<https://drstienecker.com/tech-332/14-end-effectors-and-applications/>.
9. robots.com. *RobotWorx*. [Online] [Citace: 3. 12. 2019.]
<https://www.robots.com/applications/robotic-cutting>.
10. MONKMAN, Gareth J., a další. *Robot Grippers*. Michigan : WILEY-VCH Verlag, 2007. ISBN 978-3-527-40619-7.
11. robotshop.com. *RobotShop*. [Online] <https://www.robotshop.com/en/actobotics-parallel-gripper-kit-a.html>.
12. automationdistribution.com. *AutomationDistribution*. [Online]
<https://automationdistribution.com/robotiq-epick-vacuum-gripper-for-universal-robots/>.
13. blog.robotiq.com. *ROBOTIQ*. [Online] 2015. [Citace: 3. 12. 2019.]
<https://blog.robotiq.com/why-use-a-robot-gripper-with-3-fingers>.
14. wiredworkers.io. *WiredWorkers*. [Online] <https://wiredworkers.io/product/robotiq-3-finger-adaptive-robot-gripper/>.
15. SICILIANO, Bruno a KHATIB, Oussama. *Handbook of Robotics*. Berlin : Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-30301-5.
16. roscomponents.com. *ROS Components*. [Online]
https://www.roscomponents.com/en/robotic-hands/114-svh-hand.html#svh_hand_training-no/svh_hand_left_or_right_hand-right_hand.
17. ez-robot.com. *ezrobot*. [Online] 2017. [Citace: 4. 12. 2019.] <https://www.ez-robot.com/Tutorials/Lesson/48>.
18. roboticsbible.com. *Robotics Bible*. [Online] [Citace: 4. 12. 2019.]
<https://www.roboticsbible.com/robot-drive-systems.html>.
19. KARGOL, Marta. azorobotics.com. *AZO Robotics*. [Online] [Citace: 5. 2. 2020.]
<https://www.azorobotics.com/Article.aspx?ArticleID=285>.
20. farnell.com. *Farnell*. [Online] [Citace: 5. 2. 2020.] <https://cz.farnell.com/sensor-proximity-sensor-technology>.

21. eluc.kr-olomoucky.cz. *ELUC*. [Online] [Citace: 5. 2. 2020.] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1579>.
22. robotplatform.com. *Robot Platform*. [Online] [Citace: 5. 2. 2020.] http://www.robotplatform.com/knowledge/sensors/types_of_robot_sensors.html.
23. researchgate.net. *ResearchGate*. [Online] [Citace: 5. 2. 2020.] https://www.researchgate.net/post/What_is_the_difference_between_forward_kinematics_and_inverse_kinematics.
24. semanticscholar.org. *Semantic Scholar*. [Online] <https://www.semanticscholar.org/paper/Neural-Network-Based-Approach-to-Positioning-Task-a-Smirnov-Mikhailchenko/134f05448b2f9d5d031547f0618fae172e41f5ac>.
25. ŠVEJDA, Martin. *Kinematika robotických architektur*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2011.
26. HARDIN, Winn. globalspec.com. *Engineering360*. [Online] 2015. [Citace: 6. 2. 2020.] <https://insights.globalspec.com/article/1693/robotic-grippers-take-on-complex-industrial-tasks>.
27. roboticsbusinessreview.com. *Robotics Business Review*. [Online] [Citace: 6. 2. 2020.] https://www.roboticsbusinessreview.com/legal/robotic_limbs_begin_to_revolutionize_prosthetics/.
28. ifr.org. *International Federation of Robotics*. [Online] 2020. [Citace: 26. 2. 2020.] <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/top-trends-robotics-2020>.
29. prusa3d.cz. *PRUSA RESEARCH by JOSEF PRUSA*. [Online] [Citace: 2. 7. 2020.] <https://www.prusa3d.cz/materialy/>.
30. materialpro3d.cz. *MATERIALPRO 3D*. [Online] 2017. <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>.
31. skf.com. *SKF*. [Online] <https://www.skf.com/group/products/plain-bearings/bushings-thrust-washers-strips/bushings/productid-PCMF%20081005.5%20E>.
32. joelektron.com. *JOELEKTRON*. [Online] <https://joelektron.com/servos/679-mg995-metal-gear-servo-180-degree-rotation.html>.
33. banggood.com. *Banggood*. [Online] https://www.banggood.com/cs/FSR402-Force-Sensitive-Resistor-0_5-Inch-FSR-Pressure-Sensor-Module-DIY-KIT-p-1451771.html?gmcCountry=CZ¤cy=CZK&createTmp=1&utm_source=googleshopping&utm_medium=cpc_bgs&utm_content=lijing&utm_campaign=ssc-cz-all-0324&ad_i.
34. arduino.cc. *ARDUINO*. [Online] [Citace: 3. 7. 2020.] <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>.
35. store.arduino.cc. *ARDUINO*. [Online] <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>.
36. cgco.com. *Campbell & George CO*. [Online] [Citace: 3. 7. 2020.] <https://www.cgco.com/news/13-mitsubishi/31-mitsubishi-introduces-rv-2sdsq-a-compact-high-performance-6-axis-robot>.
37. autodromo.co.uk. *Autodromo*. [Online] <http://autodromo.co.uk/stanford-arm/>.
38. roscomponents.com. *ROS Components*. [Online] <https://www.roscomponents.com/en/robotic-hands/117-shadow-dexterous-robotic-hand.html>.
39. flrnet.org. *Florida LambdaRail*. [Online] 2019. <https://www.flrnet.org/department-of-defense-awards-fiu-biomedical-engineering-team-6-million-to-expand-testing-of-pioneering-prosthetic-hand-system/>.

PŘÍLOHA č. 1

Rozhraní robota Mitsubishi Melfa RV2-SD

2.4 Outside dimensions • Operating range diagram

(1) RV-2SD (standard specification)

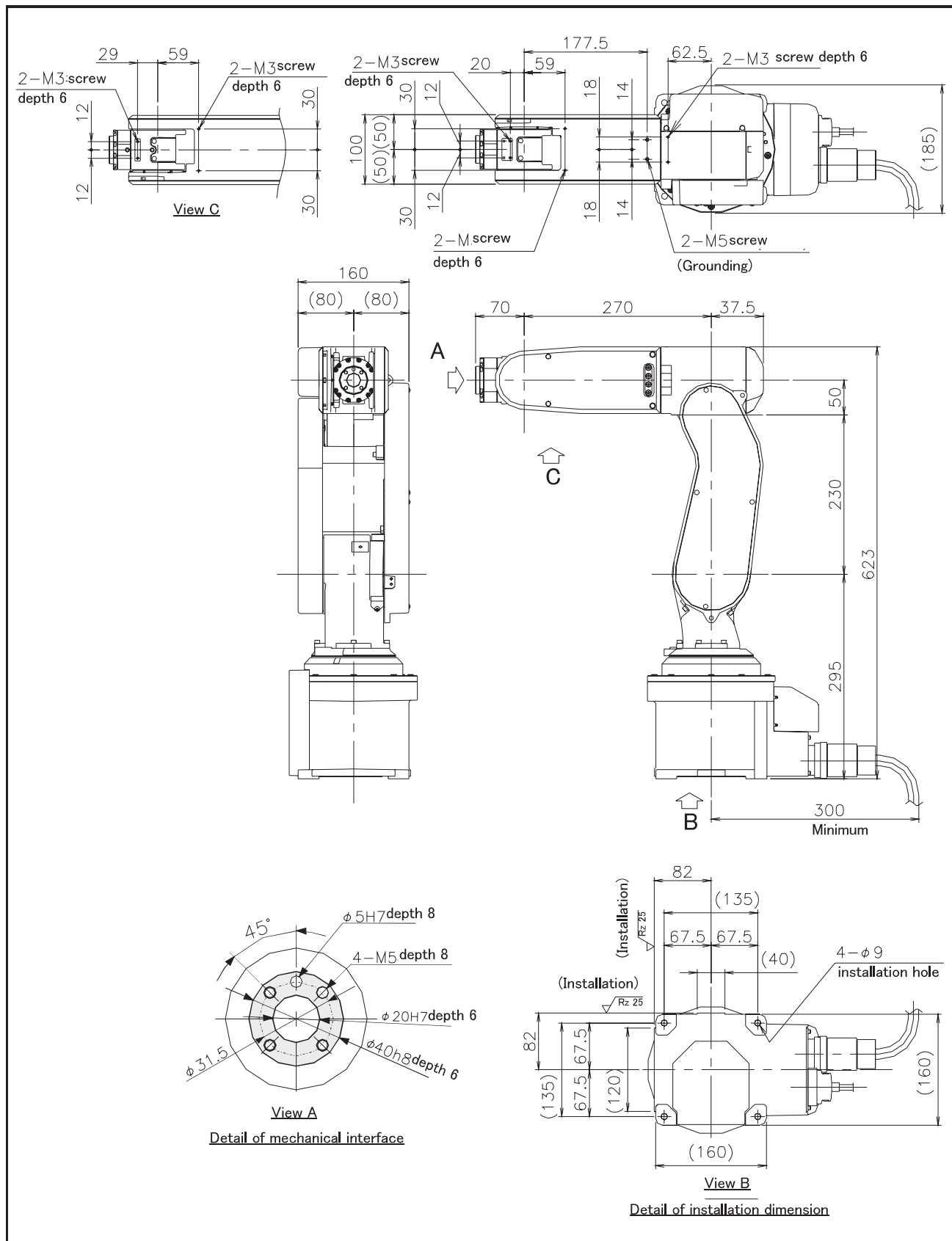
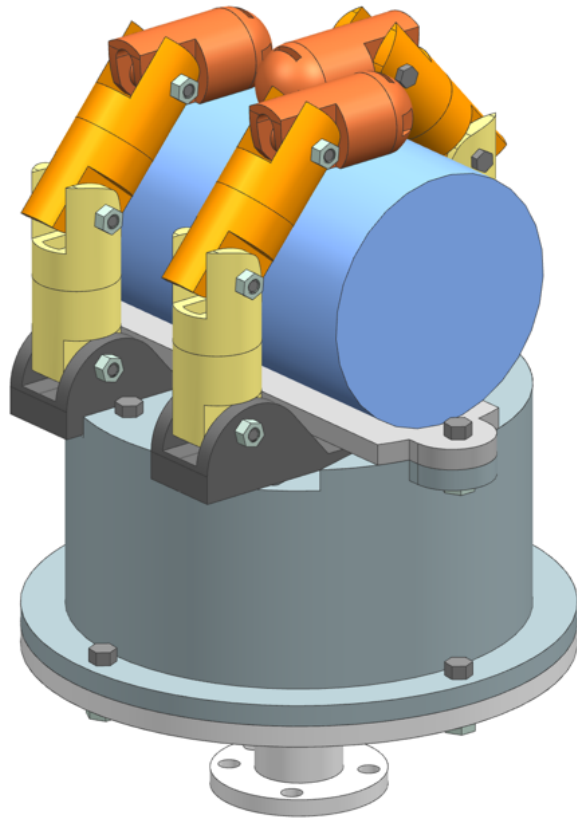
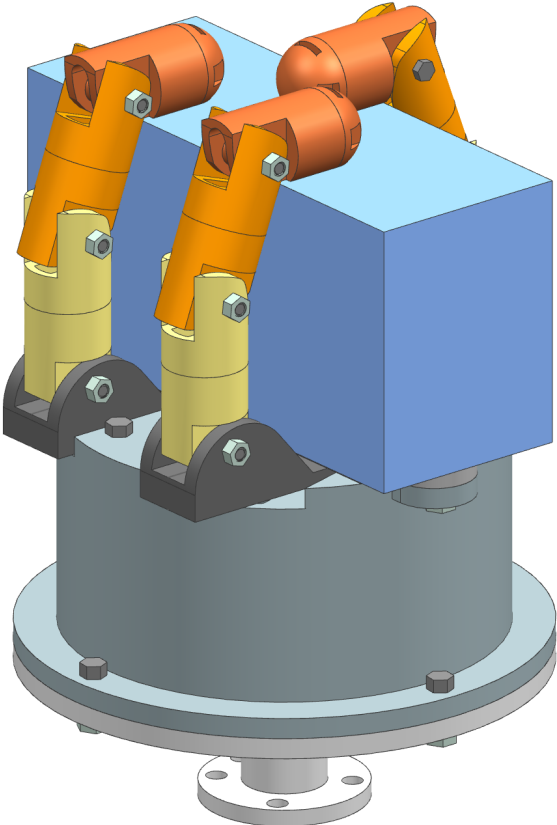


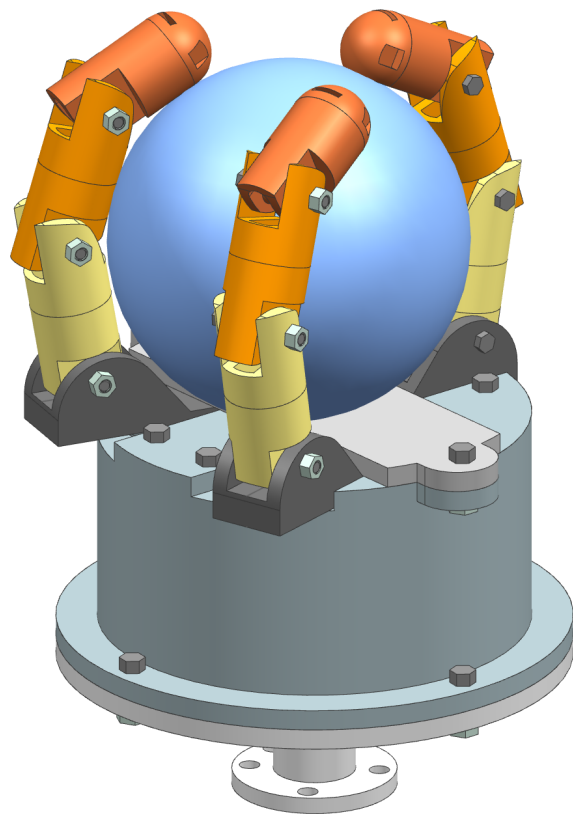
Fig.2-3 : Outside dimensions (standard specification)

PŘÍLOHA č. 2

CAD modely uchopovače







PŘÍLOHA č. 3

Výsledná podoba uchopovače

