



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav přístrojové a řídicí techniky

Bakalářská práce

Konstrukce a řízení kooperativního robota

Vojtěch Čapoun

2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čapoun** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **492682**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Konstrukce a řízení kooperativního robota

Název bakalářské práce anglicky:

Construction and control of cooperative robot

Pokyny pro vypracování:

- 1) Navrhněte a realizujte robotickou ruku - kolaborativního robota
- 2) Vyberte, zapojte a naprogramujte senzory a řízení robota tak, aby realizoval jednoduchý bezpečnostní prvek, např. zastavení při doteku s překážkou
- 3) Experimentálně ověřte vlastnosti

Seznam doporučené literatury:

[1] Peter Matthews , Steven Greenspan : Automation and Collaborative Robotics: A Guide to the Future of Work 1st ed. Edition, Apress; 1st ed. edition (July 1, 2020), ISBN-13: [978-1484259634

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D. odbor elektrotechniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **12.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu literatury a zdrojů informací.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, panu doc. Ing. Martinu Novákovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady během konzultací. Poděkovat musím také své rodině, přítelkyni a přátelům, kteří mi byli oporou po celou dobu studia.

Anotační list

Jméno autora: Vojtěch Čapoun
Název BP: Konstrukce a řízení kooperativního robota
Anglický název: Construction and control of cooperative robot
Rok: 2022

Obor: Obor elektrotechniky FS
Ústav: Přístrojové a řídicí techniky
Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.

Bibliografické údaje: Počet stran: 42
Počet obrázků: 26
Počet tabulek: 10

Klíčová slova: Kooperativní robot, 3D tisk, konstrukce, řízení

Keywords: Cooperative robot, 3D print, construction, control

Anotace:

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí a řízením kooperativního robota. Úvodní teoretická část je psaná jako rešerše pojednávající o robotech a jejich možné spolupráci s lidmi. Praktická část obsahuje konstrukci kooperativního robota a realizaci jeho řízení. Závěr praktické části je věnován experimentálnímu ověření vlastností zkonstruovaného kooperativního robota.

Abstract:

This bachelor's thesis deals with the construction and control of cooperative robot. The introductory theoretical part is written as research discussing robots and their possible cooperation with people. The practical part includes the construction of cooperative robot and the implementation of its control. The conclusion of the practical part is devoted to the experimental verification of the properties of the constructed cooperative robot.

Obsah

1	Úvod	2
2	Teoretická část	3
2.1	Roboty a manipulátory	3
2.1.1	Definice robota	3
2.1.2	Klasifikace robotů a manipulátorů	3
2.1.3	Generace robotů a manipulátorů	3
2.1.4	Řízení a programování robotů	4
2.1.5	Struktura pohonů robotů	5
2.2	Rozhraní mezi robotem a člověkem	6
2.3	Ochranná opatření	6
2.4	Existující projekty	7
2.4.1	HCR-3A	7
2.4.2	AUBO i5	9
2.4.3	SWIFTI CRB 1100	10
3	Praktická část	11
3.1	Konstrukce robotické ruky	11
3.1.1	Počáteční úvahy pro konstrukci	11
3.1.2	Návrh konstrukce	15
3.1.3	Návrh servomotorů	21
3.1.4	Návrh soukolí	22
3.1.5	Návrh ložisek	24
3.1.6	Návrh ukotvení kola	26
3.1.7	Experimentální ověření svěrného spoje	29
3.2	Elektronika a řízení	30
3.2.1	Volba elektronických součástí	30
3.2.2	Volba bezpečnostního prvku	30
3.2.3	Blokové schéma zapojení elektroniky	31
3.2.4	Programování	32
3.3	Experimentální ověření vlastností	34
3.3.1	Test přesnosti	34
3.3.2	Test únosnosti	35
4	Závěr	36

5	Seznam zdrojů	38
6	Seznam obrázků	40
7	Seznam tabulek	41
8	Seznam příloh.....	42

Seznam zkratek a symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
HRC	[–]	human-robot collaboration
RVS	[–]	robot visual safety
PWM	[–]	pulse width modulation
M_k	$[N \cdot m]$	kroučící moment
M_R	$[N \cdot m]$	reakční moment
M_Z	$[N \cdot m]$	moment v závitě
M_m	$[N \cdot m]$	montážní moment
M_h	$[N \cdot m]$	moment pod hlavou šroubu
g	$[m \cdot s^{-2}]$	gravitační zrychlení
x	$[m]$	vzdálenost
φ	$[^\circ]$	natočení
i	[–]	převodový poměr
m	$[mm]$	modul
z	[–]	počet zubů
d	$[mm]$	roztečný průměr soukolí
d_w	$[mm]$	valivý průměr soukolí
d_2	$[mm]$	střední průměr závitů
b	$[mm]$	šířka ozubení
α	$[^\circ]$	úhel záběru zubů soukolí
γ	$[^\circ]$	úhel stoupání závitů
β	$[^\circ]$	vrcholový úhel závitů v osovému řezu
β_n	$[^\circ]$	vrcholový úhel závitů v normálovém řezu
φ'	$[^\circ]$	třecí úhel v závitě (modifikovaný)
F_n	$[N]$	normálová síla
F_t	$[N]$	tečná síla
F_r	$[N]$	radiální síla
F_a	$[N]$	axiální síla
F_T	$[N]$	třecí síla
F_O	$[N]$	osová síla
R_{Ax2}	$[N]$	reakce podpory A v rovině ZX
R_{Ay2}	$[N]$	reakce podpory A v rovině ZY
R_{Bx2}	$[N]$	reakce podpory B v rovině ZX
R_{By2}	$[N]$	reakce podpory B v rovině ZY
P_0	$[N]$	ekvivalentní statické zatížení
s_0	[–]	součinitel statické bezpečnosti
C_0	$[N]$	statická únosnost
f_t	[–]	součinitel tření
f_z	[–]	součinitel tření v závitě
k	[–]	bezpečnost přenosu
i_z	[–]	počet chodů závitů
P	[–]	rozteč

1 Úvod

Celosvětový trend vytváří tlak nejen na firmy a velké společnosti, ale i na menší dodavatele široké škály výrobků či služeb, je neúprosný a zasahuje nás všechny. Zvyšuje se tlak především na cenu, rychlost, kvalitu a v posledních několika letech mají velké slovo i podmínky pro zaměstnance, ve kterých jsou výrobky tvořeny. Pokud chce být společnost úspěšná a nechce zaostávat za konkurenty, musí přistoupit na prvky automatizace. Zde ke slovu přichází již v praxi hojně využívané roboty nebo manipulátory. Roboty jsou skvělým řešením pro práci, na kterou člověk není stavěný. My lidé jsme velmi omezeni svojí fyziologií, máme omezený rozsah, manipulační sílu, a především děláme chyby. Bohužel chyby se v dnešním světě čím dál méně odpouštějí a pro správný chod společnosti nejsou na místě. Instalace robotů se zdá jako ideální řešení, ale každá mince má dvě strany. Pro obyčejné roboty musí platit přísná bezpečnostní pravidla, často bývají umístěny mimo dosah člověka, aby nemohlo dojít ke kontaktu, a způsobit tak újmu na zdraví. To s sebou nese jednak zvýšení nákladů, ale i větší požadavky na prostor. A to je hlavní důvod proč investovat do takzvaných kobotů.

Tato práce se problematice kobotů věnuje. Jejím cílem je navrhnout a zkonstruovat robotickou ruku s jednoduchým bezpečnostním prvkem, který by kolizi s člověkem, při níž by mohlo hrozit zranění, zabránil. Závěr zahrnuje experimentální ověření vlastností samotného kobota.

2 Teoretická část

2.1 Roboty a manipulátory

Technika jako taková je velmi exaktní vědní disciplína a pro zachování jisté odbornosti je zapotřebí dodržovat příslušnou terminologii. Většina pojmů, které jsou kategorizovány jako technické, vymezuje vlastní definice, která určuje mantinely pro naše vědění, chápání a především komunikaci.

2.1.1 Definice robota

Definicí robota je velmi mnoho, a je vhodné se nad nimi pozastavit. V tomto případě se jedná spíše o filozofickou stránku věci. Slovo robot se v obecné rovině chápe jako velmi obsáhlý pojem, u kterého se nedaří docílit úplné jednoznačnosti při jeho definování. „*Jednoznačná shoda mezi odborníky nad sjednocením tohoto pojmu dosud neexistuje.*“. Hlavní příčinou je složitost problematiky robotů, kdy je zapotřebí spolupráce více vědních disciplín, kde každá z nich preferuje trochu jiný úhel pohledu. I přes všechny neúspěšné snahy o zavedení jedné konkrétní definice, která by problematiku robotů elegantně vystihla, se povedlo dle Australian Robotics and Automation Association vyjádřit alespoň tři klíčové body, které roboty z části definují, a s nimi si v této práci vystačíme. [1]

- Umožňuje nějakou formu mobility
- Lze jej naprogramovat k variabilním úkolům
- Po naprogramování pracuje v automatickém režimu

2.1.2 Klasifikace robotů a manipulátorů

Roboty a manipulátory lze klasifikovat dle mnoha různých kritérií. Nejčastější kritéria jsou stupně volnosti, kinematické struktury, parametry pracovního prostoru, možnosti řízení a způsob programování. Je zřejmé, že parametrů je opravdu mnoho, i proto není možné všechny roboty a manipulátory správně zařadit. Jedna z možných klasifikací rozřazuje jednotlivé roboty a manipulátory dle již zmiňovaného řízení a programování. Jsou to ostatně jedny z nejdůležitějších parametrů, které pole působnosti robotů rozdělují na: [1]

- Manipulátory (jednoúčelové stroje s pevným programem)
- Synchronní manipulátory (master – slave manipulátory)
- Roboty (manipulátory s flexibilním programem)
- Adaptivní roboty (roboty s možností reakce na změny pracovní scény)
- Kognitivní roboty (roboty s jistou mírou umělé inteligence)

Dalším velmi důležitým parametrem pro rozřazení robotů a manipulátorů je jejich funkce a aplikační možnosti. Pro tuto práci se omezíme na dva základní typy, kterými jsou jednoúčelové a univerzální stroje. Jednoúčelové roboty a manipulátory jsou stroje, které mají zpravidla značně omezenou geometrii určenou pro konkrétní aplikaci. Dále lze říct, že operují s pevným programem s minimální možnou nebo žádnou adaptací na změnu pracovní scény. Roboty a manipulátory, které lze přizpůsobit na aktuální pracovní úkoly, pracoviště nebo podmínky nazýváme Univerzálními roboty a manipulátory. [2]

2.1.3 Generace robotů a manipulátorů

Generace robotů a manipulátorů nám popisují programovou vyspělost. Všechny roboty lze rozdělit dle jejich možností adaptace na změnu pracovní scény. Čím je robot schopnější reagovat na podněty, které ovlivňují jeho konání, tím vyšší bude generace, do které spadá.

Průmyslové roboty rozdělujeme do pěti generací, značené číslicí počínaje nulou. Do nulté generace zařazujeme takové roboty, které zpravidla nemají zpětnou vazbu, veškeré změny či poruchy vedou k centrálnímu odpojení od zdroje energie. V první generaci nalezneme roboty s jednoduchou zpětnou vazbou. Řízení je možno přepínat mezi několika podprogramy, a pracovat podle nich. Všechny programy, dle kterých se robot řídí, jsou vytvořeny člověkem. Stejně tak přepínání jednotlivých programů vykonává člověk. Druhá generace jsou roboty se schopností optimalizace. Robot si sám upravuje několik vybraných parametrů, dle předem definovaného kritéria. V některých literaturách se tato generace pojí s pojmem „systém oko-ruka“. U třetí generace robotů se setkáváme s vlastní samovolnou tvorbou programu. Již se dokážou učit na základě předchozích zkušeností. Zadává se pouze cíl úkolu, samotné vykonání je však ponecháno na robotu. A nakonec plně autonomní roboty vyznačující se prvky sociálního chování. Robot si stejně jako člověk volí i cíl práce. Takové roboty pak řadíme do čtvrté generace. [2]

V běžné praxi se setkáváme s roboty nulté a první generace. Velmi zřídka pak můžeme narazit na roboty druhé generace. Cena takových robotů, nebo dokonce robotů vyšších generací je vysoká. Vše se odvíjí od složitosti sensorové techniky a softwarového rozhraní, které by robotovi umožnilo dosáhnout požadovaných vlastností. [2]

2.1.4 Řízení a programování robotů

Řízení a programování je naprosto zásadní disciplína, co se robotů a manipulátorů týče. Bez možnosti řízení by byl robot jen kus železa, který by pro nás neměl žádnou užitnou hodnotu. Stejně jako číslicové řízení CNC obráběcích strojů, kde je program tvořen posloupností oddělených skupin znaků, ani u robotů a manipulátorů tomu není jinak. Takto oddělené skupiny znaků pak nazýváme věty nebo bloky. V zásadě se tento druh řízení dá rozdělit na bodové a dráhové řízení. [3], [4]

Bodové řízení se využívá v aplikacích, kde je potřeba, aby robot operoval se svým pracovním bodem v požadovaných bodech, bez toho, aniž by mezi jednotlivými pracovními body byla jakákoli funkční závislost. S bodovým řízením se v cizích literaturách váže pojem point to point.

Dráhové řízení je naopak využíváno tam, kde je potřeba, aby se pracovní bod robota pohyboval po předem definovaných trajektoriích, například přímka nebo kružnice. Takový druh řízení se pak velmi často využívá v technologických procesech, například svařování. S dráhovým řízením se pojí termín continuous path. [3]

Do problematiky řízení zcela jistě spadá i učení robotů. K učení robotů se váže slovní spojení „play-back“ nebo také „teach-repeat“, které jsme schopni rozdělit na tři základní druhy. Prvním z nich je Online programování, při kterém robota řídíme pomocí ovládacích prvků, například joystick nebo ovládací panel. Jimi polohujeme robota do různých pozic, které následně ukládáme společně s druhem pohybu a dalšími parametry. Dále mluvíme o Offline programování, kde trajektorie a druh pohybu jsou programovány ve formě křivek v prostoru pomocí příslušného programovacího softwaru. Jako příklad uvedu G-code u 3D tiskárny, nebo CNC obráběcích strojů. Posledním druhem je Bezprostřední programování, u něhož je pracovní bod robota veden přímo po konkrétní trajektorii. Robot v učícím se režimu zpracovává a ukládá informace o parametrech pohybu a následně po přepnutí do pracovního režimu cyklus opakuje. Jedná se o nejstarší způsob učení robotů. [3]

2.1.5 Struktura pohonů robotů

Pro realizaci pohybu robotů a manipulátorů využíváme pohony. Pohon je technický pojem popisující tvorbu mechanického výkonu. Je to jakási jednotka, která robotu dodává potřebnou mechanickou energii pro vykonání požadovaného pohybu. Dle přiváděné energie můžeme pohony rozdělit na tyto základní druhy: [2]

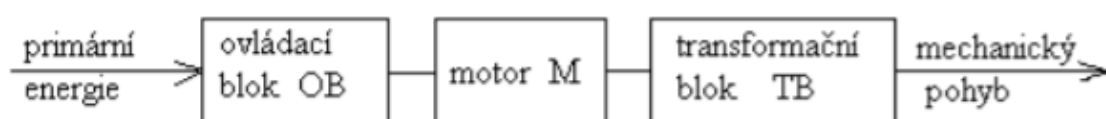
- Elektrické (elektromotory)
- Tekutinové (hydraulické, pneumatické)
- Kombinované (jejich kombinace)

Jednotlivé druhy pohonů mají své přednosti i slabiny, a je potřeba k nim přihlížet, abychom pro danou aplikaci zvolili ten nevhodnější. V následujícím textu se pokusím stručně shrnout jejich významné plusy a minusy.

Elektrický pohon je v poslední době jasnou jedničkou u robotů středních nosností o maximálním výkonu přibližně do 6 kW. Využívají se zde především servopohony se skvělou možností regulace rychlostí, kde kombinací s číslicovým řízením docílíme i velké přesnosti nastavení polohy v uzavřené smyčce. Velkou výhodou je také dostupnost zdroje energie, kterým je elektřina. Elektrické pohony mají jednoduchou údržbu. Dalšími přednostmi je čistota provozu, hluk, menší nároky na chlazení a prostor, ve většině případů je to i nižší cena. Nevýhodou pak může být závislost na dodávce elektřiny a nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Hydraulické a pneumatické pohony jsou uplatňovány u dvou hlavních skupin robotů a manipulátorů. Hydraulické pohony jsou vhodné pro stroje větších výkonů, kde se využívá tuhosti, plynulého spojitého chodu a vyšší účinnosti. Nevýhoda hydraulických pohonů je obtížně dosažitelná rychlost a závislost viskozity kapaliny na teplotě, což má za následek nežádoucí změny tlakových poměrů. Naopak pneumatické pohony jsou vhodné pro konstrukce jednodušších manipulátorů s menšími nosnostmi, kde je zapotřebí větší rychlost nebo práce ve velkém teplotním rozsahu, kde na rozdíl od hydraulických pohonů nehrozí žádné nebezpečí kontaktu hořlavé kapaliny s libovolným zdrojem tepla, který by mohl vznítit kapalinu. Komplikací u těchto pohonů je poměrně drahý provoz a obtížná regulace nerovnoměrnosti pohybu, zvláště při menších rychlostech. Kombinované pohony jsou používány v aplikacích, kde je zapotřebí eliminovat špatné vlastnosti jednotlivých druhů pohonů při zachování těch dobrých. Jejich kombinací tak vytváříme pohonný celek, který dosahuje výrazně lepšího charakteru. [2]

Všechny druhy pohonů charakterizuje společné blokové schéma, znázorňující transformaci primární energie na pohyb, které je tvořeno třemi funkčními částmi. [2]

- Ovládací blok (řídící jednotka)
- Motor (elektrický, hydraulický, pneumatický)
- Transformační blok (mechanismus, systém nebo zařízení upravující výstup motoru na požadovaný výstup celé pohybové jednotky)



Obrázek 1: Blokové schéma pohonů [2]

Vnitřní struktura dále rozděluje pohony na dva druhy koncepce. Prvním z nich je koncepce A, pohon s transformačním blokem. Při tomto druhu koncepce má transformační blok za úkol změnu charakteru pohybu. Mluvíme zde o translační jednotce s rotačním pohybem a rotační jednotce s přímočarým motorem. Druhým druhem je koncepce B, pohon bez transformačního bloku. Jedná se o druh koncepce, kde charakter pohybu vystupující z motoru odpovídá požadovanému charakteru na výstupu celé pohonné jednotky. Transformační blok tedy není zapotřebí a uspořádání takové koncepce pak reprezentuje translační jednotka s přímočarým motorem a rotační jednotka s rotačním motorem. [2]

2.2 Rozhraní mezi robotem a člověkem

V anglicky psané literatuře najdeme pojem human-robot collaboration (HRC). Takové slovní spojení zahrnuje velmi obsáhlou problematiku spolupráce člověka a robota. Obdobně jako člověk, ani robot není dokonalý. Robot je vhodný pro rutinní činnosti, kde neustále opakuje stejné úkony. Dokáže být velmi přesný, rychlý, hravě si poradí s těžkými břemeny a jeho hlavní výhodou je, že nezná únavu. Na druhou stranu je velmi nevhodný na práce, kde lze jen těžko předem přesně specifikovat pohyb nebo úkon, který je třeba vykonat. Velkou část robotů ve výrobě tvoří roboty s tvrdým kódem (roboty nulté a první generace), kdy robot slepě vykonává pohyby do již předem nadefinovaných poloh, a následně plní opět předem definované úkoly. To s sebou nese spoustu problémů, které by se v jistých případech daly řešit pomocí lepších robotických systémů, ale ve většině případů je stále daleko levnější a efektivnější využívat lidskou pracovní sílu. Využitím kombinace skvělých vlastností člověka a robota dostáváme pevné základy, na kterých se dá stavět. [3], [5], [6]

Aspekty HRC

Přestože se ve zkratce HRC pod písmenem C schovává počestěné slovo kolaborace, můžeme narazit na vícero druhů spolupráce mezi člověkem a robotem. V závislosti na intenzitě vzájemné spolupráce rozdělujeme HRC na koexistenci, kooperaci a kolaboraci.

Koexistence je taková spolupráce, kde člověk a robot pracují nezávisle na sobě. Vykonávají pracovní úkoly, které spolu přímo nesouvisí, a není tedy nutné, aby spolu sdíleli pracovní prostor. U takových robotů se aktivní prvky ochrany, které by zamezily kontaktu robota s člověkem, zpravidla nezavádějí. Bezpečnost by měly zajistit pasivní prvky ochrany, jako je nedostupnost prostoru, ve kterém robot pracuje. Naopak kooperace se vyznačuje spoluprací člověka a robota na úkolech, které spolu přímo souvisí. Sdílejí tak společný pracovní prostor, ale ke vzájemné interakci nedochází. Jako aktivní složku vykonávající práci v daném časovém intervalu lze vždy vnímat jen jednoho ze zmiňované dvojice. Vrcholnou formou spolupráce člověka a robota je kolaborace. V reálném čase spolu sdílejí pracovní prostor, navzájem na sebe reagují a jsou ve vzájemném kontaktu. Při tomto druhu HRC je nutností zavádět prvky aktivní ochrany, aby nedošlo k vzájemné kolizi mezi člověkem a robotem, která by mohla vést k újmě na zdraví. V neposlední řadě bezpečnostní prvky chrání samotného robota před poškozením například o neočekávaný předmět, který by člověk mohl vlastní činností ve sdíleném pracovním prostoru nechtíc vložit jako překážku na již předem nadefinované trajektorii pohybu robota. [7]

2.3 Ochranná opatření

Pro jednotlivé druhy HRC se zavádějí taková bezpečnostní opatření, která by dokázala zabezpečit bezproblémový chod samotné spolupráce. Jsou velmi různorodá a zakládají se na odlišných principech. Ochranných systémů je celá škála, můžeme zde najít velmi jednoduché

bezpečnostní opatření, jako je úprava pracovního prostoru, redukce počtu kabelů, nebo jen vhodná forma osvětlení, ale i komplexnější prvky ochrany využívající nejrůznějších čidel, senzorů nebo kamer, které jsou zapotřebí pro mnohem složitější systémy. Níže uvádím několik ochranných opatření, se kterými se můžeme setkat v praxi.

Mezi nejjednodušší a zároveň historicky nejstarší bezpečnostní opatření patří umístění mimo dosah, při kterém je robot od člověka plně izolován. Operátor nemá přístup do pracovního prostoru robota. Není tedy třeba dalších ochranných opatření. Velmi častý prvek ochrany, se kterým se dá setkat u novodobých kooperativních robotů, je monitoring pracovního prostoru. Tento systém v případě detekce přítomnosti operátora donutí robota velmi výrazně zpomalit, nebo úplně zastavit. Realizace takového bezpečnostního systému může být velmi náročná, ale i velmi jednoduchá. Pod náročnějším systémem monitoringu prostoru si lze představit například systém kvalitních termokamer, které dokážou detekovat eventuální pohyb. Výrazně jednodušší systém by mohlo být čidlo, které detekuje otevřené dveře. Dalším prvkem ochrany, který je možné vidět v praxi, je nouzové tlačítko (emergency stop). Nouzové tlačítko je efektivní a zpravidla se uplatňuje u ručního řízení robota, kde operátor ovládá robota pomocí příslušné řídicí techniky, která zjednodušeně plní funkci joysticku. Na tomto joysticku můžeme najít řadu ovládacích prvků, díky kterým dokáže operátor snadno ovládat robota, měnit parametry úkonů, nebo jen provádět jejich kontrolu. Může být opatřen i displejem, který zlepší přehlednost a tím i bezpečnost. K bezpečnosti velmi výrazně přispívá i permanentně snížená rychlost pohybu robota, která nepřesahuje bezpečnou mez. Velmi podobný, jen o trochu efektivnější prvek ochrany, je kontrola kontaktu. Jako bezpečnostní prvek se zde zavádí kontrolní kontaktní plocha na příslušném ovládacím panelu nebo již zmiňovaném joysticku, která detekuje dlaň, nebo jen její část, například prst operátora. Pro rozpohybování robota musí být prvek detekující kontakt s operátorem aktivován. Realizace takového systému ochrany může být v méně nebezpečných případech v podobě bezpečnostního náramku. Při přerušení kontaktu robot okamžitě zastaví, a setrvává v poloze, ve které se nacházel. Posledním ochranným prvkem, který v této práci zmíním, je omezení výkonů, momentů a síly. Je to velmi efektivní systém ochrany a využívá se především při kolaborativních aplikacích robotů. Robot má, ať už svojí konstrukcí nebo jinak, softwarově omezený výkon a sílu. Pokud se jedná o robota, který neoperuje se silami nebo momenty, které by mohly operátorovi ublížit, nejsou třeba softwarová bezpečnostní opatření. Ve většině případů ale toto neplatí, a jsou proto potřeba zmíněná softwarová opatření, kdy se například srovnává předpokládaný moment a moment naměřený, který se snímá na příslušném rameni. Při kontaktu s člověkem se potřebný moment na příslušném rameni zvětší a řídicí systém zaznamená neshodu s momentem předpokládaným. Následně rameno zastaví a setrvává ve své poloze, tím zabrání případné újmě na zdraví operátora. I při tomto systému ochrany se setkáme s rychlostmi, které nepřesahují bezpečnou mez. [3], [8], [9]

2.4 Existující projekty

O zvýšení úrovně automatizace zařazením kobotů do výroby je velký zájem, a jak to bývá, s velkou poptávkou roste i nabídka. Současně existujících společností zabývajících se touto problematikou je mnoho. Vybral jsem opravdu silné hráče na trhu, abych prezentoval projekty s kooperativními roboty na té nejvyšší úrovni.

2.4.1 HCR-3A

HCR-3A je menší šestiosý kooperativní robot od firmy Hanwha. Díky své velmi praktické trubkovité geometrii a velikosti je vhodný pro širokou škálu činností, jako je manipulace

s předměty do 3 kg, obsluha nejrůznějších strojů, montáž, balení, leštění, nanášení nebo třeba kontrola kvality díky skvělé opakovatelnosti 0,05 mm. Jeho velkou předností je rychlost, kde pracovní bod může dosahovat rychlosti až jeden metr za sekundu. Celá konstrukce je vyrobená z kombinace hliníku a oceli, což zajišťuje dostatečnou tuhost. Teplota pracovního prostoru může dosahovat až 50 °C a jeho krytí se pyšní ochranou IP64, takže kobot HCR-3A může pracovat v prašném prostředí a jeho chod nenaruší ani stříkající voda dopadající v libovolném směru. Váží pouze 13 kg a je tedy možné ho připevnit i na stěnu. Firma Hanwha vyvinula i ovládací panel obsahující přehledný display a emergency stop tlačítko, které je přehledně umístěné na přední části panelu. Dalším bezpečnostním opatřením je Robot Visual Safety (RVS). Jedná se o systém kamerové vizualizace, kdy je sledováno okolí kobota, a v případě přítomnosti člověka v nebezpečné zóně v závislosti na vzdálenosti zpomalí nebo úplně zastaví. Je tedy vhodný pro kooperaci s člověkem a jeho životnost činí 35 000 hodin. [10]



Obrázek 2: HCR-3A [15]

2.4.2 AUBO i5

AUBO i5 se stejně jako HCR-3A řadí mezi menší až střední kooperativní roboty. Společnost Aubo se také rozhodla využít praktičnosti trubkovité konstrukce, která s kombinací šesti stupňů volnosti a dosahu až 886 mm umožňuje úplnou volnost pohybu pracovního bodu. Robot dokáže manipulovat s předměty o hmotnosti do 5 kg se stejnou opakovatelností jako HCR-3A. Jeho vnější schránka se stupněm krytí IP54 chrání kobota před prachem, a stříkající vodou, na rozdíl od HRC-3A však není plně prachotěsná. Jeho hmotnost činí 24 kg a je tedy stále vhodný k ukotvení do stěny nebo stropu. AUBO i5 lze ovládat přes ovládací panel s přehledným displejem a intuitivním prostředím pro programování. Tento panel je opět vybaven tlačítkem emergency stop. Jako další bezpečnostní prvek je zde realizována detekce srážky a její citlivost na škále od 1 do 10. Čím vyšší hodnota, tím citlivější je detekce kolize. Kobot AUBO i5 je tedy vhodný pro přímou kolaboraci s člověkem, a je také možné ho přepnout do režimu robot teaching, kde lze uplatnit ruční navádění v několika režimech. Dále je zde k dispozici volba charakteristiky a typu realizace pohybu. [11]



Obrázek 3: AUBO i5 [16]

2.4.3 SWIFTI CRB 1100

SWIFTI CRB 1100 patří mezi nejrychlejší kooperativní roboty menší až střední třídy. Rychlost pracovního bodu dosahuje až pěti metrů za sekundu. Stejně jako již zmiňovaný HCR-3A a AUBO i5 i SWIFTI CRB 1100 operuje s šesti stupni volnosti, které mu dodávají plnou mobilitu ve svém pracovním prostoru, který je vymezen koulí o poloměru 0,475 m. Je také oproti ostatním kobotům této třídy mimořádně přesný, kde jeho opakovatelnost dosahuje hodnoty 0,01 mm. Jeho hmotnost nepřesahuje 21 kg, takže ani tady není problém kobota instalovat do libovolné pozice. Mezi jeho vybavení také patří ovládací panel s přehledným displejem a emergency stop tlačítkem. Pro úplné zajištění bezpečnosti se firma ABB rozhodla pro SafeMove Collaborative system, který funguje obdobně jako RVS, kde kamerový systém detekuje přítomnost člověka a na základě jeho vzdálenosti od pracovního prostoru upravuje svoji rychlost až do úplného zastavení. Robot je tedy vhodný po kooperaci. [12]



Obrázek 4: SWIFTI CRB 1100 [17]

3 Praktická část

3.1 Konstrukce robotické ruky

3.1.1 Počáteční úvahy pro konstrukci

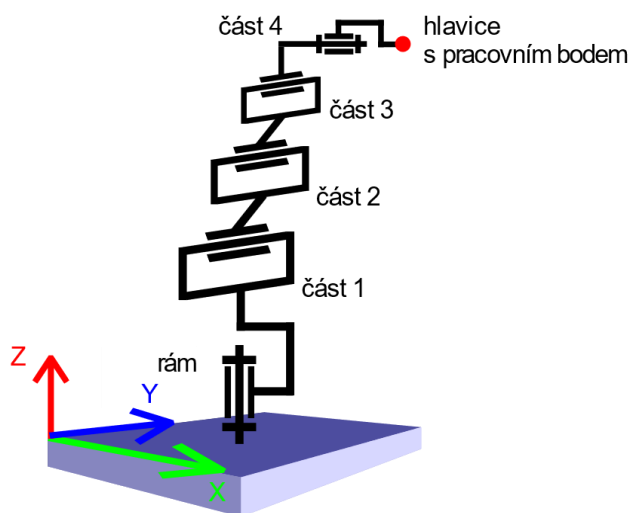
Stanovení vstupních návrhových parametrů

Před samotným návrhem geometrie je potřeba stanovit konkrétní cíle a cesty k jejich dosažení. Prvním předem stanoveným cílem této práce je, jak již bylo zmíněno, navrhnout a realizovat robotickou ruku. Můj výchozí stav pro konstrukci robotické ruky je takový, že mám k dispozici jednoduché náčiní, menší pracovní stůl a 3D tiskárnu. Na základě možností a zkušeností jsem se rozhodl pro následující zadání vstupních parametrů:

- Všechny konstrukční díly tištěné na 3D tiskárně.
- Jednoduchá montáž a možnost úplné demontáže
- Velikost odpovídající manipulaci s předměty na menším pracovním stole (dosah cca 0,5 m).
- Manipulace s lehčími předměty menších rozměrů (nosnost cca 100 g).

Kinematické schéma robota

Drtivá většina kooperativních robotů operuje s šesti stupni volnosti. Ty zaručují velmi dobrou mobilitu v pracovním prostoru. V mé práci jsem se rozhodl, že pro mírné zlehčení konstrukce uberu jeden stupeň volnosti a zkonstruuji robota s pěti stupni volnosti. Takový robot bude mít dostatečnou mobilitu. Navržené kinematické schéma, které je tvořeno pěti rotačními vazbami, je znázorněno na obrázku 5.



Obrázek 5: Kinematické schéma robota [autor]

Klíčové rozměry

Dále je potřeba nastínit klíčové rozměry, které mi poslouží jako dobré vodítko při modelování jednotlivých částí robota. Jako vstupní parametr jsem si zadal, že robot by měl mít rozsah zhruba 50 cm. Vzhledem k dominantnímu namáhání na ohyb, a celkové technologičnosti konstrukce, je tedy rozumné volit velikosti jednotlivých částí sestupně od základního rámu po pracovní bod. Je zapotřebí si také uvědomit, že na rozsah nemá vliv první část, která zajišťuje pouze rotaci kolem osy Z, takže velikost této části navrhnu co nejmenší možnou. Koncová hlavička by pak naopak měla být delší pro snadnější realizaci úchopného zařízení. Orientační délky jednotlivých částí jsou zaneseny v tabulce 1.

–	část 2	část 3	část 4	hlavička	celkem
délka [mm]	150	130	100	120	500

Tabulka 1: Délky jednotlivých částí [autor]

Volba typu pohonu

Dalším důležitým krokem pro získání představy o rozměrech je volba typu pohonu a vizualizace samotného pohybu. Jak již bylo uvedeno v teoretické části, pro realizaci pohonů jsou tři možnosti: elektrické pohony, tekutinové pohony nebo pohony kombinované. S tekutinovými pohony nemám žádné zkušenosti a při návrhu takového systému bych se mohl dopustit velkých chyb. Bylo by také potřeba zajistit přísun stlačené tekutiny, a to by značně zkomplikovalo celé zadání. Problematický by pro mě byl i návrh příslušného řídicího systému. Rozumnou volbou se zdají být pohony elektrické, konkrétněji elektrické točivé, které jsou podstatně jednodušší pro instalaci i řízení. Jako zástupce elektrických točivých pohonů využiji elektromotory.

Pro snadné ovládní natočení elektromotorů bez nutnosti realizace zpětnovazebního řízení, které je pro robota nezbytné, jsou v zásadě pouze dvě možnosti. První možností je použití modelářských servomotorů, které mají jako součást své řídicí elektroniky integrovaný zpětnovazební potenciometr. Druhou možností je použití krokových motorů a příslušných driverů a natočení řídit dle vykonaných kroků vztažených k referenční poloze. Referenční poloha by pak byla určena polohou koncového spínače.

Jako typ pohonu volím použití modelářských servomotorů, které je dle mého názoru ještě o něco málo jednodušší než použití krokových motorů.

Volba přídatného převodového mechanismu

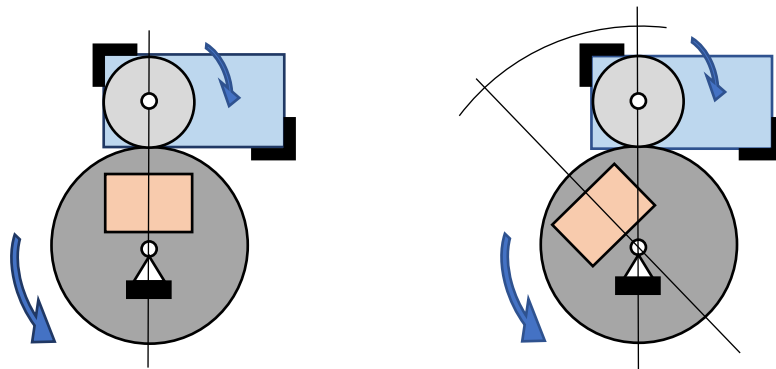
Po zvolení typu pohonu je potřeba se zaměřit na představu o přídatných převodových mechanismech. Modelářské servomotory mají již integrovanou převodovku, a tak není třeba navrhnout vícestupňový převodový systém, který by vysoké otáčky stejnosměrného motoru výrazně zredukoval. Na druhou stranu by byla velká chyba nevyužít dalšího možného převodu, když cena modelářského servomotoru závisí na velikosti poskytnutého kroutícího momentu při daném rozsahu natočení, který není třeba vždy využít celý. Můj úkol je tedy navrhnout převodové mechanismy, které tyto přeměny zajistí, a zároveň mi pomůžou s vizualizací konkrétní geometrie robota.

Mezi nejvyužívanější převodové mechanismy rozhodně patří převod soukolím, klínovým řemenem a řetězem. Z důvodů preference 3D tištěných dílů z plastu volím převod soukolím.

Způsob realizace pohybů

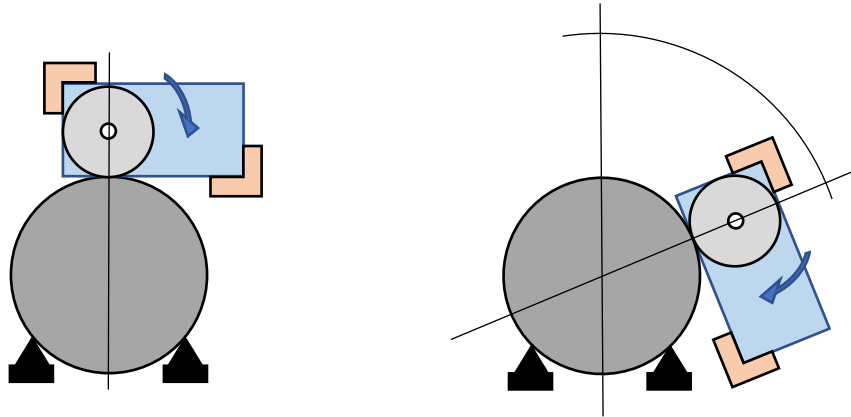
K získání kompletní představy je zapotřebí navrhnut i jednotlivé pohyby, které robota charakterizují. Dle kinematického schématu mám za úkol realizovat pět jednoduchých rotačních pohybů. Víím, že moje pohony budou z řad modelářských servomotorů, a že redukce jejich otáček zajistí ozubená kola. Mám tedy dost informací pro návrh samotné kinematiky pohybu. Možných návrhů pro uskutečnění rotačního pohybu je mnoho, pro moje zadání jsem vybral dva smysluplné, které by dokázaly splnit vstupní požadavky. Jedním vstupním požadavkem je fakt, že příslušné otáčky vystupující ze servomotoru musí být redukovány, takže menší z ozubených kol (pastorek) bude připevněno právě na servomotor. Druhým požadavkem je prostá jednoduchost.

V první navržené konfiguraci je geometrie robota (hnědý objekt) pevně spojená s větším kolem, které je rotačně uloženo na rámu. Samotný servomotor je pak do rámu vetknut. Při spuštění motoru začne rotovat pastorek, ten přes valivou vazbu donutí rotovat i větší kolo a s ním i zmiňovanou geometrii robota. Schéma pohybu je vystiženo na obrázku 6.



Obrázek 6: První navržená konfigurace pohybu [autor]

Naopak v druhé navržené konfiguraci je geometrie robota spojená se servomotorem a větší kolo je opět vetknuté do rámu. Po roztočení motoru se díky valivé vazbě začne odvalovat pastorek a s ním i servomotor, s kterým je spojena geometrie robota. Ta pak tímto způsobem rotuje kolem středu většího kola. Pohyb je schematicky znázorněn na obrázku 7.



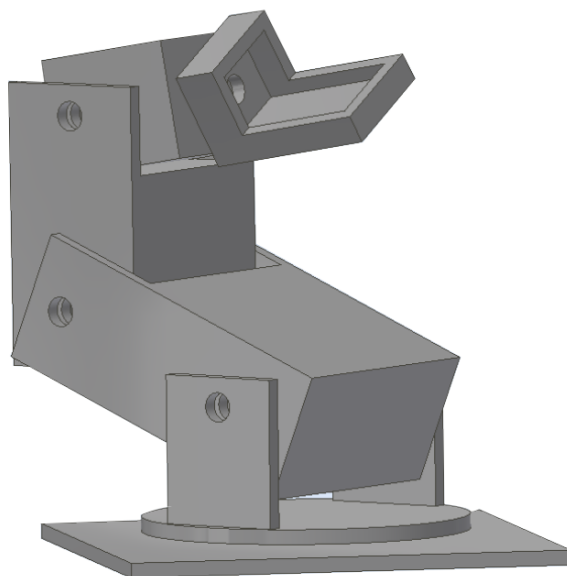
Obrázek 7: Druhá navržená konfigurace pohybu [autor]

Pro realizaci pohybů mého kobota se přikláním k druhé variantě, která je vhodnější pro umístění servomotorů uvnitř geometrie.

Shrnutí počátečních úvah

V této kapitole stručně shrnu všechny informace, které jsem postupnými úvahami získal, a pokusím se na základě nich vytvořit odpovídající model, dle kterého by bylo možné řešit konkrétní konstrukční náležitosti.

Jednou z nejdůležitějších informací, kterou mám, je znalost konkrétního kinematického schématu, které mi určilo kinematické poměry mezi jednotlivými částmi kobota. Další informaci mi poskytly přibližné délkové rozměry, dle kterých se budu řídit, abych splnil požadavek na celkový rozsah pohybu. Víím také, že k rozpohybování ramen mého kobota nebude třeba brát v potaz pneumatické či hydraulické systémy, ale postačí jednodušší varianta pohonů v podobě modelářských servomotorů. Dále víím, že k přidavné redukci jejich otáček použiji ozubená kola a určil jsem také způsob jakým budu realizovat samotný pohyb robota. Model, který splňuje návrhové parametry a je tedy vhodný pro další dílčí rozpracování je znázorněn na obrázku 8.



Obrázek 8: Návrhový model robotické ruky [autor]

3.1.2 Návrh konstrukce

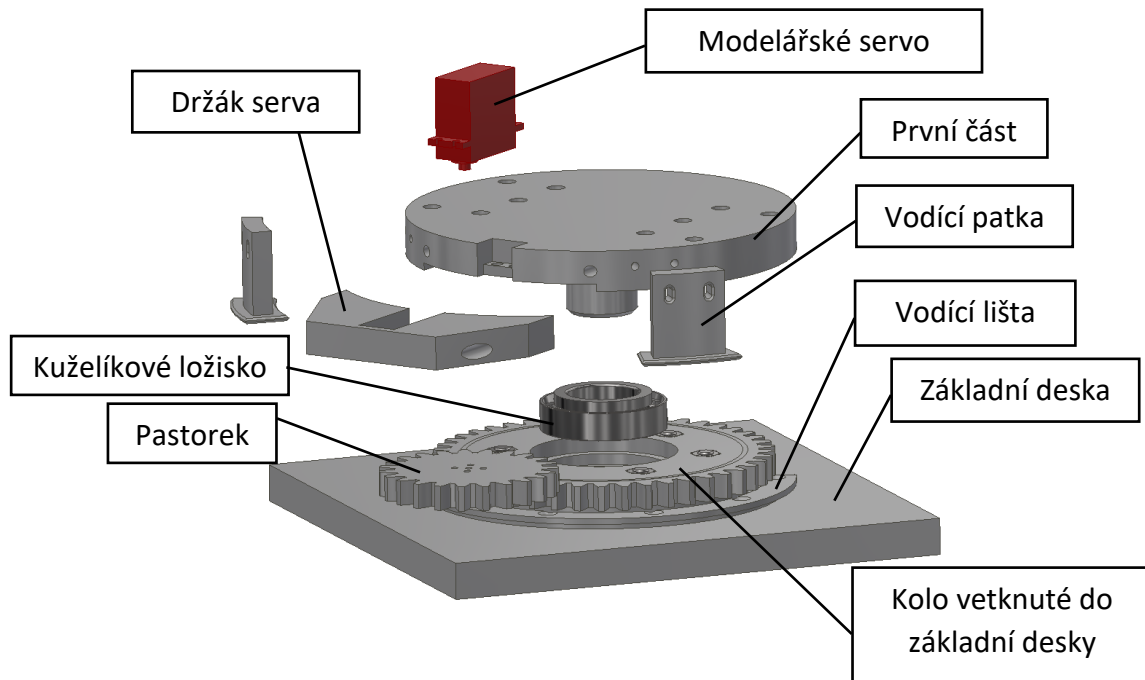
Návrh prvního kloubu

Dle mého kinematického schéma na obrázku 2 je první stupeň volnosti zodpovědný za rotaci kolem osy Z. Jedná se také o první kloub kobota. To pro mě znamená, že bude třeba navrhnout i způsob ukotvení celé konstrukce do základny.

Jako základnu jsem navrhl dřevěnou desku s dostatečnou výškou a rozměry odpovídající velikosti modelu. Vyhnou se tak dlouhému tištění desky z plastu na 3D tiskárně nebo ještě dražší verzi z kovových materiálů. Dřevěná deska je pro mě nejlepší varianta. Konstrukci kobota k této desce připevním pomocí šroubových spojů.

Možnost rotace bude realizována pomocí kuželíkového ložiska, které přenesou vzniklé axiální i radiální síly. Velkým faktorem pro tuto volbu zde opět hraje snadná demontáž, kde kuželíkové ložisko lze rozdělit na jednotlivé části.

Případnému překlápění zamezí vodící lišty pro vodící patky, které budou tendenci k překlápění bránit. Výsledný návrh prvního kloubu pak odpovídá obrázku 9.



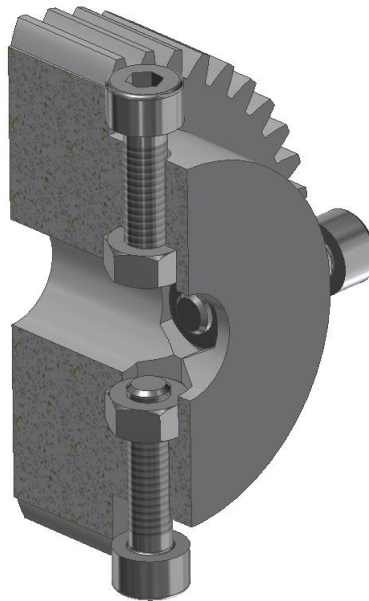
Obrázek 9: Návrh prvního kloubu [autor]

Návrh druhého kloubu

Druhý stupeň volnosti je uskutečněn rotací mezi první a druhou částí kobota. V tomto kloubu považujeme první část za nehybnou, to znamená, že pastorek bude opět spojen s rotující druhou částí a bude odvalován po kole, které bude vetknuto do první části. Bude tedy třeba navrhnout systém vetknutí kola a uchycení pastorku k servomotoru. Stejně jako u prvního kloubu i zde bude třeba valivých ložisek pro zmenšení pasivních odporů a navýšení tuhosti celé konstrukce.

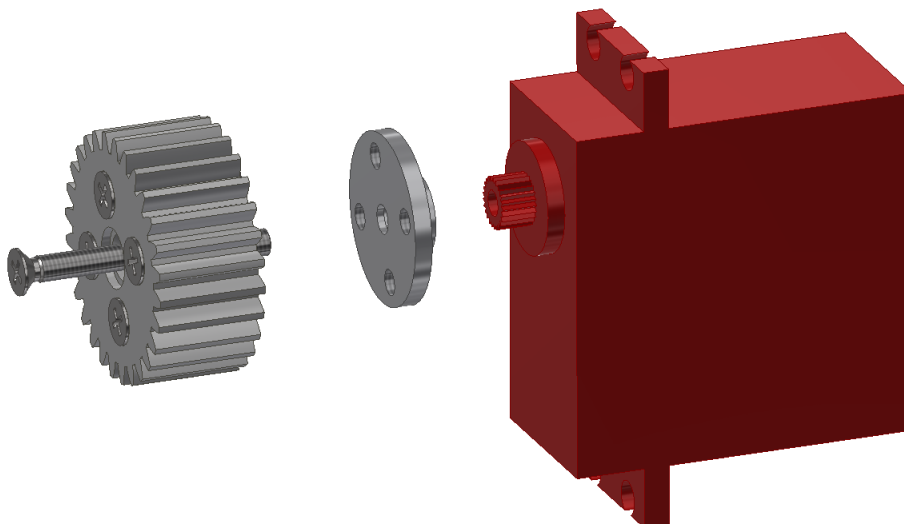
Jako konkrétní typ jsem zvolil dvojici jednořadých kuličkových ložisek. Bohužel tato ložiska není možno rozdělit na více částí, tudíž by v případě nalisování obou průměrů mohl nastat problém s demontáží. Z těchto důvodů použiji jako osu rotace ocelovou tyč taženou za studena s tolerancí h11 nebo h12, takže mezi vnitřním průměrem ložiska a osou bude malá vůle a ložisko bude lisovat do vnějšího otvoru plastové konstrukce. Takové uložení ložiska není ideální, ale pro účely modelu postačí. Samotná tyč bude spojena s první částí pomocí svěrného spoje.

Navržený systém pro ukotvení kola k první části pak využije této osy, kde reakční moment pro zamezení protočení kola vytvoří čtveřice osamělých třecích sil, které budou vyvozeny osovou silou ve šroubech svírajících zmiňovanou osu. Schéma systému ukotvení kola je znázorněno na obrázku 10.



Obrázek 10: Model ukotvení kola na osu [autor]

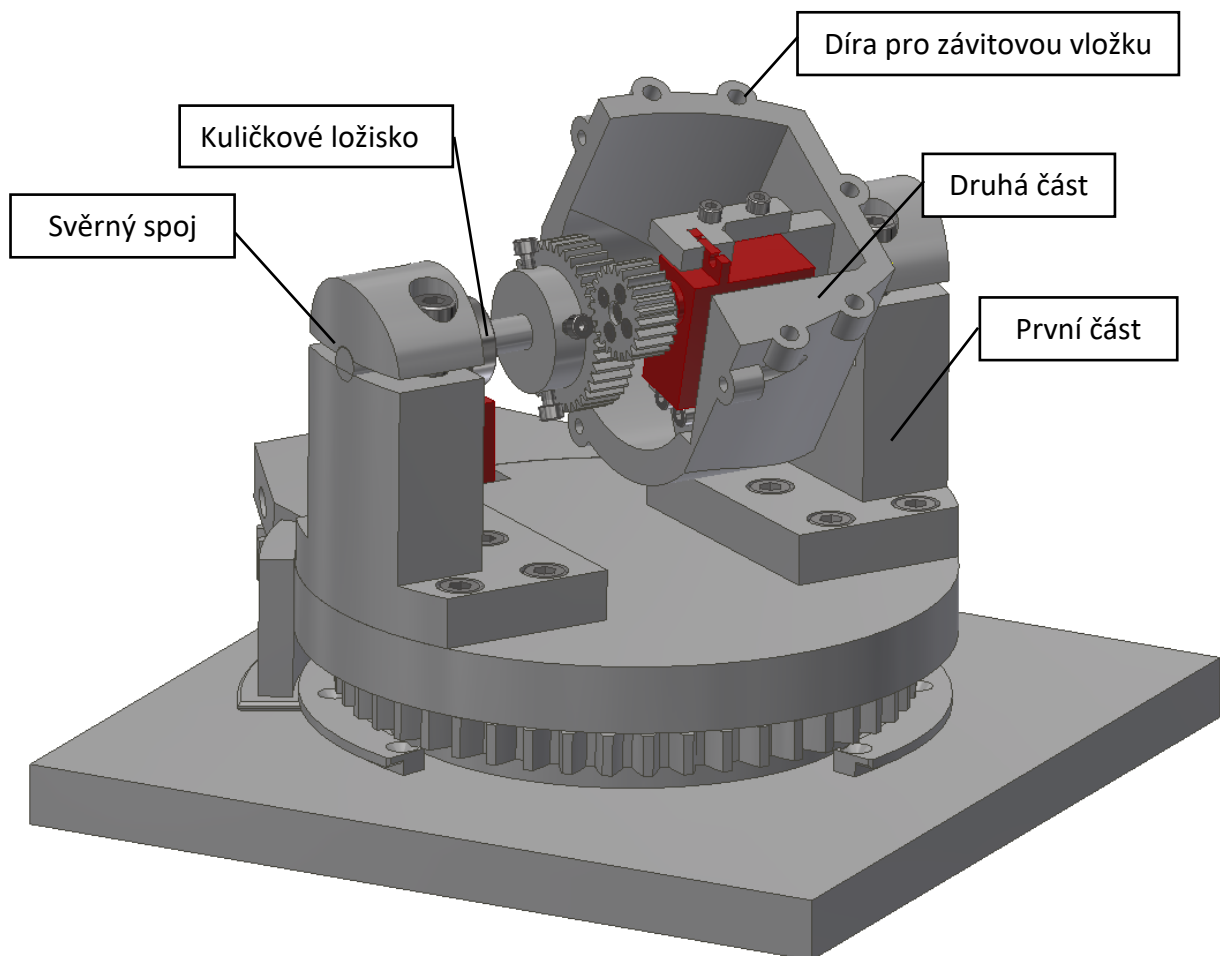
Uchycení pastorku k servomotoru budu realizovat pomocí kruhové hliníkové servopáky se čtyřmi závitovými děrami, do nichž zašroubuji šrouby. Tyto šrouby přitáhnou pastorek s odpovídajícími děrami k servopáce. Samotná servopáka bude s hřídelí servomotoru spojena pomocí jemného drážkování a axiálně zajištěna šroubem. Schéma uchycení vystihuje obrázek 11.



Obrázek 11: Model uchycení pastorku k servomotoru [autor]

Celková druhá část se skládá z několika menších částí, které bude třeba spojit dohromady. Jako nejvhodnější varianta spoje se zde opět jeví šroubový spoj. Pro usnadnění konstrukce i následné montáže nebude šroubový spoj tvořen klasickou dvojicí šroub a matice,

ale namísto matice použijí závitové vložky, které zatavíme do plastové konstrukce. Takové řešení zlepší vizáž a technologičnost konstrukce pro budoucí 3D tisk. Návrh druhého kloubu zajišťující druhý stupeň volnosti je vyobrazen na obrázku 12.



Obrázek 12: Návrh druhého kloubu [autor]

Návrh třetího a čtvrtého kloubu

Jelikož se svojí funkcí třetí a čtvrtý kloub nijak neodlišují od druhého kloubu, budu i jejich geometrii navrhovat obdobně. Stále bude třeba přihlížet na již zvolené přibližné rozměry v počátečních úvahách a zajistit dost prostoru pro rozumné vnitřní uspořádání modelářských servomotorů a přídatného převodu v podobě ozubeného soukolí. Velikost vnitřních prostorů konstrukce bude jediným omezením při budoucí volbě konkrétních převodů, a je tedy na místě vytvořit dostatečnou prostorovou rezervu pro manipulaci s rozměry kol.

Návrh pátého kloubu

Pátý kloub je dle kinematického schématu poslední kloub zajišťující volnost. Ani jeho návrh se nebude výrazně lišit od předchozích kloubů. Drobnou změnou bude jiné uspořádání ozubených kol, kdy pro nedostatek vnitřního prostoru je zapotřebí navrhnout soukolí s vnitřním převodem.

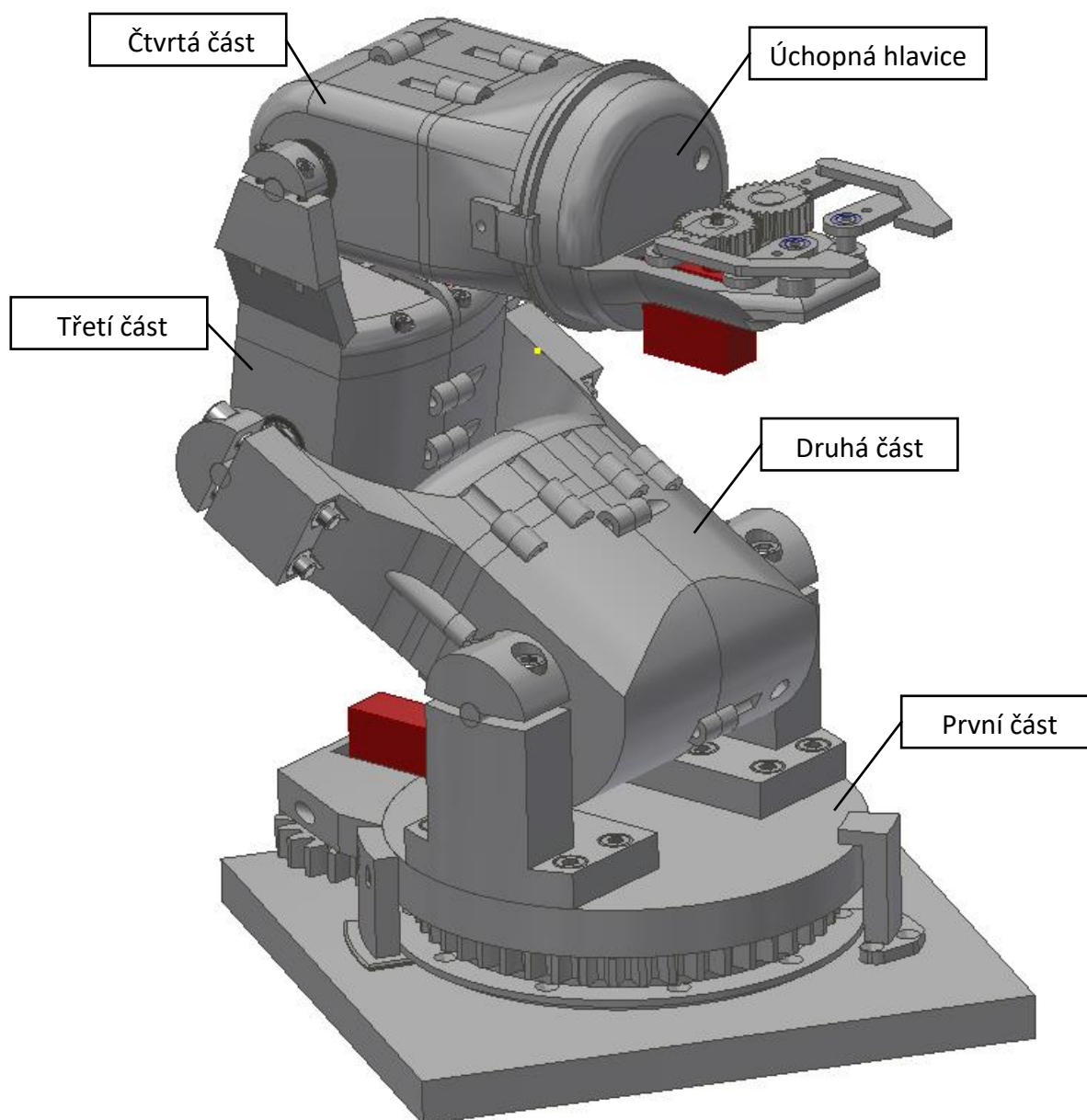
Návrh úchopné hlavice

Jedním z hlavních vstupních požadavků pro návrh je schopnost manipulace s lehčími předměty menších rozměrů, a pro její splnění bude zapotřebí navrhnout takovou koncovou část koboty, která dokáže menší předměty uchopit. Budu tedy mluvit o návrhu úchopné hlavice. Úchopných hlavic je celá řada a jejich principy využívají širokou škálu transformačních členů, které mění příslušnou kinematiku na nejvhodnější možnou pro danou aplikaci úchopu. Jelikož v zadání nejsou blíže specifikovány rozměry ani tvary předmětů, s kterými by měl být kobot schopný manipulovat, bude zapotřebí navrhnout univerzální úchopnou hlavici, která požadovanou manipulaci zajistí.

Jako konkrétní typ úchopné hlavice navrhuji jednoduchý systém využívající principu kleští. Transformační blok přeměňující rotační výstup servomotoru na translační pohyb úchopných částí zde bude realizován pomocí dvojice paralelogramu.

Shrnutí návrhu konstrukce

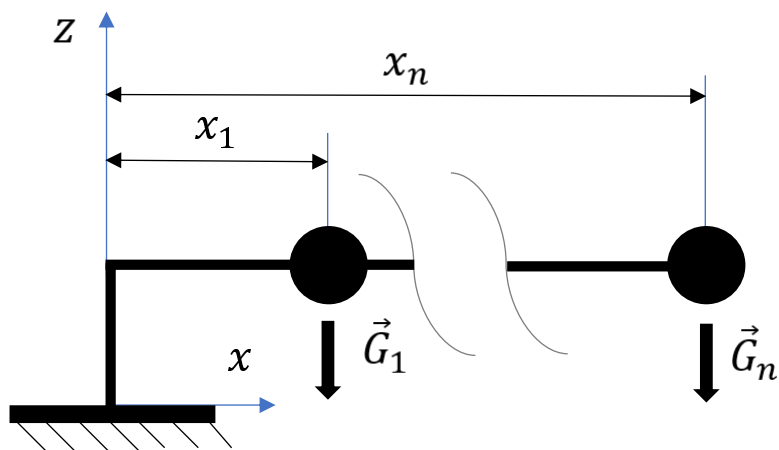
Spojením všech jednotlivých částí návrhu dostávám celkový model konstrukce odpovídající finální geometrii robota. Tato geometrie poslouží jako použitelné vodítko pro matematické modely, kterými jsou schémata pro potřebné dílčí výpočty. Navržená konstrukce odpovídá modelu na obrázku 13.



Obrázek 13: Navržená konstrukce robota [autor]

3.1.3 Návrh servomotorů

Díky znalosti geometrie kobota je nyní možno vytvořit věrný matematický model pro výpočet potřebných kroutících momentů na překonání tíhy břemene, pasivních odporů a vlastní tíhy ramen, kde tíha ramen bude v tomto případě bezpochyby dominantním zatížením. Potřebný kroutící moment určím ze znalosti hmotností a poloh jednotlivých konstrukčních částí a příslušného břemene. Celková nosnost pak odpovídá hmotnosti břemene, s kterým je kobot schopný manipulovat v té nejnepříznivější poloze. Nejnepříznivější polohou se myslí taková poloha, při které je kobot plně natažen ve vodorovné rovině. To znamená, že dle požadavku na únosnost právě v této poloze kobot musí unést zhruba 100 g, což je hmotnost středně velkého jablka. Schéma matematického modelu je vystiženo na obrázku 14.



Obrázek 14: Matematický model pro výpočet momentu [autor]

$$M_k(m, g, x) = \sum_1^n m_i \cdot g_i \cdot x_i$$

Rovnice 1

Naše soustava se samozřejmě celá nachází v tíhovém poli země, takže bude platit, že tíhové zrychlení bude pro všechny členy stejné, a lze tedy tento člen vytknout před sumaci.

$$M_k(m, g, x) = g \cdot \sum_1^n m_i \cdot x_i$$

Rovnice 2

Pro co největší shodu s realitou jsem do výpočtu zahrnul i hmotnosti ocelových os, ložisek, šroubů, matic a závitových vložek. Dále jsem využil slicer pro validní odhad hmotnosti všech konstrukčních částí tištěných na 3D tiskárně. Návrh mi také značně usnadnil fakt, že většina standardních středně silných modelářských servomotorů má téměř stejnou hmotnost.

Servomotor prvního kloubu překonává pouze pasivní účinky na ložisku a patkách, to znamená, že velikost potřebného momentu bude výrazně menší než u ostatních kloubů. Poslední pátý servomotor bude překonávat pouze vliv polohy těžiště, které bude ležet mírně mimo osu rotace, takže i tento moment bude oproti ostatním téměř zanedbatelný. Výsledné požadované kroutící momenty jsou zahrnuty v tabulce 2.

číslo kloubu	hodnota potřebného momentu [kg · cm]
druhý	$M_{k2} = 46,6$
třetí	$M_{k3} = 21,5$
čtvrtý	$M_{k4} = 8,9$

Tabulka 2: Potřebné kroutící momenty [autor]

Na základě těchto hodnot jsem se rozhodl, že pro první, čtvrtý a pátý kloub využiji servomotory MG 995 s dostatečným kroutícím momentem, které jsou pro nás k dispozici od školy. Zbývající dva klouby budou poháněny silnějšími servomotory. Pro druhý kloub jsem vybral servomotor BH Servo 788-LV300 a třetí kloub bude poháněn servomotorem JX Servo PDI-6221MG.

servomotor	maximální kroutící moment [kg · cm]	rozsah natočení [°]	napětí zdroje [V]
MG 995 (1,4,5)	$M_{max1,4,5} = 8,5$	$\varphi_{max1,4,5} = 180$	(4,8 ÷ 6)
BH Servo 788 – LV300 (2)	$M_{max2} = 29$	$\varphi_{max2} = 300$	(4,8 ÷ 6)
JX Servo PDI – 6221MG (3)	$M_{max3} = 17,25$	$\varphi_{max3} = 300$	(4,8 ÷ 6)

Tabulka 3: Parametry navržených servomotorů (hodnoty kroutících momentů jsou stanoveny pro 5 V) [autor]

3.1.4 Návrh soukolí

Pro jednoduchost volím u všech soukolí čelní ozubení s přímými zuby. Minimální hodnoty převodových poměrů pak určím ze znalostí potřebných momentů a maximálních kroutících momentů příslušných modelářských servomotorů pro dané klouby.

$$i_{min} = \frac{M_k}{M_{max}}$$

Rovnice 3

$$i_{min2} = \frac{M_{k2}}{M_{max2}} = \frac{46,6}{29} = 1,607$$

Rovnice 4

$$i_{min3} = \frac{M_{k3}}{M_{max3}} = \frac{21,5}{17,25} = 1,246$$

Rovnice 5

$$i_{min4} = \frac{M_{k4}}{M_{max1,4,5}} = \frac{8,9}{8,5} = 1,047$$

Rovnice 6

Pouhé splnění rovnováhy momentů pro realizaci pohybu nebude stačit, proto hodnoty převodových poměrů lehce navýším. To by mělo pokrýt i menší nepřesnosti ve výpočtu, které

by mohly výrazně ohrozit funkčnost kobota. Pro první kloub volím převodový poměr 2, aby velikost pastorku přibližně odpovídala navrženému modelu. U posledního pátého kloubu musím navrhnout převodový poměr o minimální hodnotě 3, aby rotující pastorek nekolidoval s osou spojující čtvrtou část a úchopnou hlavici. Rozsah rotace příslušného kloubu určím z následujícího vztahu.

$$\varphi_{kloubu} = \frac{\varphi_{max}}{i}$$

Rovnice 7

–	kloub 1	kloub 2	kloub 3	kloub 4	kloub 5
modul [mm]	3,5	1,125	1,125	1,125	1
převodový poměr [–]	2	1,8	1,5	1,4	3
$\varphi_{kloubu} = [^\circ]$	90	167	200	129	60

Tabulka 4: Přehled vybraných parametrů jednotlivých soukolí [autor]

Znalost převodových poměrů a velikostí modulů jednotlivých soukolí mi společně s navrženým modelem konstrukce, který vymezí intervaly možných osových vzdáleností, postačí pro návrhy konkrétních soukolí. K těmto návrhům využiji generátoru ozubených kol v programu Autodesk Inventor.

soukolí 1		
geometrie	pastorek	kolo
m [mm]	3,5	
z [–]	23	45
d [mm]	80,5	157,5
b [mm]	12	
α [°]	20	

soukolí 2		
geometrie	pastorek	kolo
m [mm]	1,125	
z [–]	23	42
d [mm]	25,875	47,25
d_w [mm]	25,937	47,364
b [mm]	12,5	
α [°]	20	

soukolí 3		
geometrie	pastorek	kolo
m [mm]	1,125	
z [–]	18	27
d [mm]	27	39,375
d_w [mm]	27,25	39,74
b [mm]	12,5	
α [°]	20	

soukolí 4		
geometrie	pastorek	kolo
m [mm]	1,125	
z [–]	27	38
d [mm]	30,375	42,75
d_w [mm]	30,234	42,552
b [mm]	12,5	
α [°]	20	

soukolí 5		
geometrie	pastorek	kolo
m [mm]	1	
z [-]	28	83
d [mm]	28	83
b [mm]	12,5	
α [°]	20	

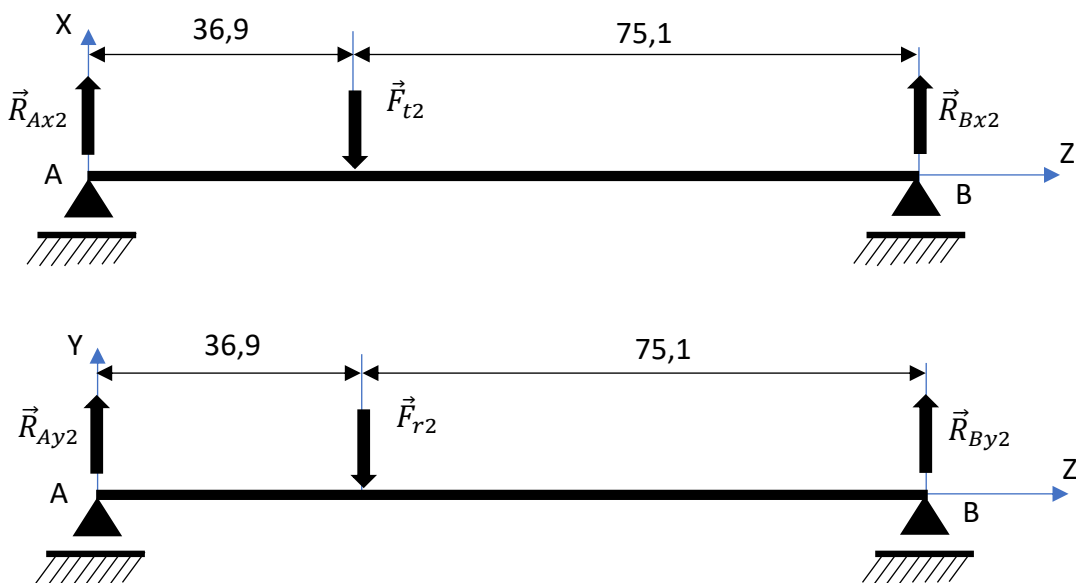
Tabulka 5: Vybrané geometrické vlastnosti jednotlivých soukolí [autor]

3.1.5 Návrh ložisek

Jak již bylo nastíněno v návrhu konstrukce, pro první kloub volím z řad kuželíkových ložisek, konkrétně ložisko s označením 32007, a pro zbylé klouby vybírám jednořadá radiální kuličková ložiska s označením 6000. Vzhledem k nepoměrné únosnosti kuželíkového ložiska 32007 vůči radiálnímu ložisku 6000, provedu kontrolu pouze u nejzatíženějšího, tedy druhého kloubu osazeným právě tímto ložiskem.

Silové poměry v ložiskách druhého kloubu

Pro určení silových poměrů bude opět třeba zvolit vhodný matematický model. Jako tento model volím nosník s dvěma podporami bez axiálního zajištění, kde nosník představuje kruhovou tyč a podpory představují samotná ložiska. Takový model nejlépe popisuje reálnou geometrii vystiženou v navržené konstrukci. Zatížení nosníku bude vyvozeno přes normálovou sílu v ozubení F_n , vycházející z principu akce a reakce. Tuto sílu si rozložím na tečnou F_t a radiální F_r složku. Silové účinky jednotlivých složek vyšetřím ve dvou na sebe kolmých rovinách. Schéma matematického modelu pro druhý kloub je znázorněno na obrázku 15. Reakční síly v ložiskách určím ze znalosti zátěžových sil, geometrie a statiky.



Obrázek 15: Schéma matematického modelu pro výpočet sil v ložiskách [autor]

Zatěžující síly:

$$F_{t2} = \frac{M_{max2}}{\frac{d_{w2}}{2}} = \frac{2,9}{\frac{0,025937}{2}} = 223,62 \cong 224 [N]$$

Rovnice 8

$$F_{n2} = \frac{F_{t2}}{\cos(\alpha)} = \frac{224}{\cos(20)} = 238,36 \cong 238 [N]$$

Rovnice 9

$$F_{r2} = F_{n2} \cdot \tan(\alpha) = 238 \cdot \tan(20) = 86,62 \cong 87 [N]$$

Rovnice 10

Rovina ZX:

$$X: R_{Ax2} + R_{Bx2} - F_{t2} = 0$$

Rovnice 11

$$M(A): F_{t2} \cdot 36,9 - R_{Bx2} \cdot (36,9 + 75,1) = 0$$

Rovnice 12

Rovina ZY:

$$Y: R_{Ay2} + R_{By2} - F_{r2} = 0$$

Rovnice 13

$$M(A): F_{r2} \cdot 36,9 - R_{By2} \cdot (36,9 + 75,1) = 0$$

Rovnice 14

Z těchto rovnic pomocí triviálních úprav získám jednotlivé složky reakčních sil. Výsledné reakční síly v ložiskách určím ze vztahu, který tyto složky zobrazí na čtverec. Složky i výsledné síly jsou zaneseny do tabulky 6.

<i>složky reakce</i>	R_{Ax2}	R_{Ay2}	R_{Bx2}	R_{By2}
<i>hodnota [N]</i>	150,2	58,3	73,8	28,7
<i>výsledná reakce</i>	R_{A2}		R_{B2}	
<i>hodnota [N]</i>	161,1		79,2	

Tabulka 6: Silové poměry v ložiskách druhého kloubu [autor]

Statická kontrola ložisek druhého kloubu

Statickou kontrolu ložisek provedu dle katalogu výrobce SKF, u kterého příslušná ložiska následně objedná. Jako první krok bude potřeba stanovit ekvivalentní statické zatížení P_0 pro obě ložiska, které určím z následujícího vztahu, kde F_r znázorňuje radiální složku reakce a F_a axiální.

$$P_0 = 0,6 \cdot F_r + 0,5 \cdot F_a \quad ; \text{pro } P_0 < F_r \rightarrow P_0 = F_r$$

Rovnice 15

Jelikož ložiska nejsou zatížena žádnými axiálními silami, bude platit, že ekvivalentní statické zatížení P_0 bude rovno výsledné radiální reakci v příslušném ložisku.

$$P_{0A2} = R_{A2}$$

Rovnice 16

$$P_{0B2} = R_{B2}$$

Rovnice 17

Součinitel statické bezpečnosti s_0 pak určím z následujícího vztahu.

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0}$$

Rovnice 18

Statická únosnost radiálního kuličkového ložiska 6000 spolu s výslednými součiniteli statické bezpečnosti v příslušných ložiskách jsou zaznamenány do tabulky 7.

ložisko	A	B
C_0 [N]	1960	
P_0 [N]	161,1	79,2
s_0 [-]	12,2	24,7

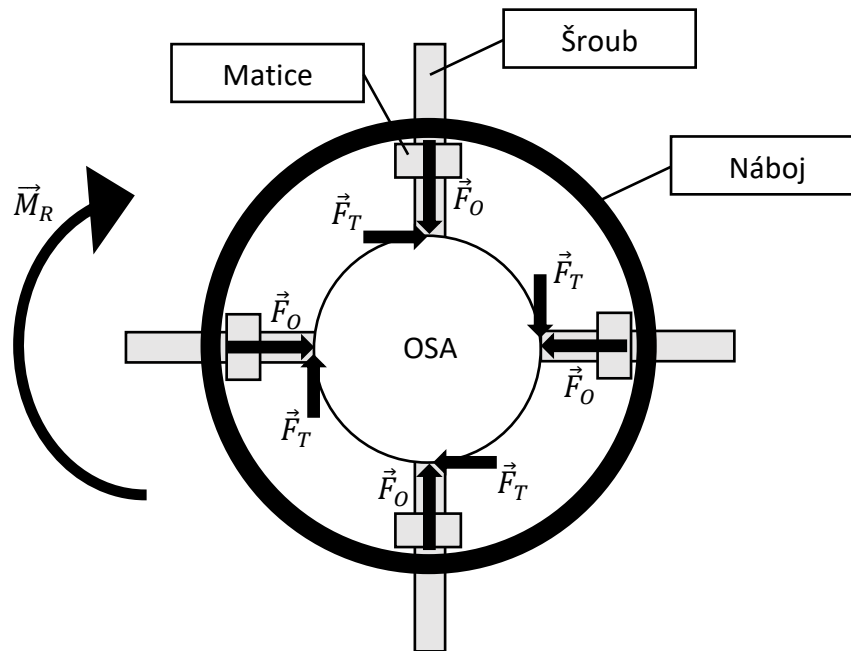
Tabulka 7: Součinitele statické bezpečnosti v ložiskách druhého kloubu [autor]

3.1.6 Návrh ukotvení kola

Kola druhého, třetího a čtvrtého soukolí budou pevně spojena s příslušnými osami pomocí čtveřice šroubů. Tato kola budou muset vzdorovat působícím silám od pastorků, aniž by se protočila. Bude tedy třeba vyvodit reakční moment M_R . Model ukotvení je k nahlédnutí na obrázku 10.

Reakční moment M_R vyvodím pomocí čtyř třecích sil F_T působících na vnějším obvodu osy. Tyto třecí síly budou odpovídat příslušnému součiniteli tření f_t mezi šroubem a samotnou osou a osovými silami ve šroubech F_O . Osově síly F_O vyvodím přes momenty v závitech

matic M_z . Momenty v závitech M_z vzniknou v jednotlivých šroubech po utažení montážním momentem M_m . Odpovídající matematický model vystihuje obrázek 16.



Obrázek 16: Matematický model ukotvení kola [autor]

Samotný výpočet provedu pro šrouby M4 s hrubou roztečí. Důležité veličiny potřebné pro výpočet montážního momentu jsou uvedeny v následující tabulce 8.

d [mm]	10
k [-]	1,5
f_t [-]	0,15
f_z [-]	0,15

Tabulka 8: Průměr osy, bezpečnost přenosu, součinitel tření a součinitel tření v závitu [autor]

$$M_R = k \cdot M_{k2} = 1,5 \cdot 46,6 = 69,9 \text{ [kg} \cdot \text{cm]} = 6990 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

Rovnice 19

$$M_R = 4 \cdot F_T \cdot \frac{d}{2} \rightarrow F_T = \frac{2 \cdot M_R}{4 \cdot d} = \frac{2 \cdot 6990}{4 \cdot 10} = 349,5 \text{ [N]}$$

Rovnice 20

$$F_T = F_O \cdot f_t \rightarrow F_O = \frac{F_T}{f_t} = \frac{349,5}{0,15} = 2330 \text{ [N]}$$

Rovnice 21

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{i_z \cdot P}{\pi \cdot d_2} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{1 \cdot 0,7}{\pi \cdot 3,545} \right) = 3,59 \text{ [}^\circ\text{]}$$

Rovnice 22

$$\beta_n = \tan^{-1}[\tan(\beta) \cdot \cos(\gamma)] = \tan^{-1}[\tan(30) \cdot \cos(3,59)] = 29,95 [^\circ]$$

Rovnice 23

$$\varphi' = \tan^{-1}\left(\frac{f_z}{\cos(\beta_n)}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0,15}{\cos(29,95)}\right) = 9,82 [^\circ]$$

Rovnice 24

$$M_z = F_O \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\gamma + \varphi') = 2330 \cdot \frac{3,545}{2} \cdot \tan(3,59 + 9,82) = 984,65 [N \cdot mm]$$

Rovnice 25

$$M_m = M_z + M_h$$

Rovnice 26

Protože se hlava šroubu nedotýká samotného náboje, nemůže zde vzniknout ani žádné tření, takže i moment vyplývající z tření pod hlavou šroubu M_h bude nulový. Platí tedy následující vztah.

$$M_m = M_z \cong 1000 [N \cdot mm] = 1 [N \cdot m]$$

Rovnice 27

Tímto momentem bude třeba utáhnout příslušné šrouby.

3.1.7 Experimentální ověření svěrného spoje

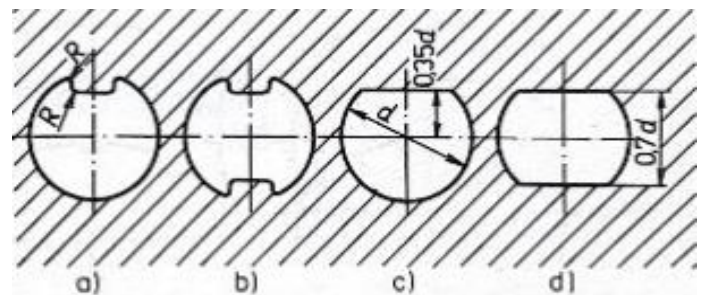
Před samotným zkonstruováním kobota bude třeba ověřit, zda jsou navržené svěrné spoje v jednotlivých kloubech schopny vyvodit potřebný reakční moment M_R pro zamezení prokluzu kola. Kontrolu opět provedu u nejméně namáhaného druhého kloubu.

Postup experimentu

Nejdříve vytisknu funkční části svěrného spoje. Tento prototyp budu postupně zatěžovat momentem. V případě proklouznutí utáhnu šrouby vyvozující svěrnou sílu více a pokračuji v zatěžování až do dosažení potřebného reakčního momentu M_R . Montážní moment pro utažení příslušných šroubů zjistím pomocí momentového klíče. Tento experiment znázorňuje obrázek 18.

Výsledek experimentu

Při postupném zatěžování a utahování příslušných šroubů opakovaně neobstála pevnost funkčních částí svěrného spoje. Moment, který byl svěrný spoj schopný přenést se svojí velikostí ani zdaleka neblížil tomu potřebnému. Z těchto důvodů jsem musel navržené svěrné spoje v jednotlivých kloubech nahradit tvarovými. S ohledem na technologičnost výroby jsem zvolil nejjednodušší možný tvarový spoj pro mou aplikaci. Zvolený tvarový spoj je na obrázku 17 možnost c.



Obrázek 17: Možnosti tvarových spojů [13]

Obrázek 18: Experimentální ověření svěrného spoje [autor]

3.2 Elektronika a řízení

Po konstrukci kobota bude zapotřebí rozpohybovat jednotlivá ramena, a především realizovat bezpečnostní prvek. Před samotným návrhem bude třeba stanovit požadavky na řízení a elektroniku.

- Možnost ovládaní kobota bez počítače
- Realizace bezpečnostního prvku
- Jednoduchý „teach-repeat“ systém
- Napájení přímo ze sítě

Tyto požadavky následně poslouží jako vodítko při samotném programování a umožní volbu elektronických součástek.

3.2.1 Volba elektronických součástek

Prvním a také tím nejdůležitějším krokem bude volba vhodného zdroje. Zdroj musí být schopný napájet celou sestavu kobota, především všechny servomotory. Velikost jeho jmenovitého proudu, který dokáže poskytnout, musí být větší než hodnota proudu, kterou jsou servomotory schopny odebrat při úplné blokaci. Navržené servomotory mají napájecí napětí mezi 4,8 a 6 V, takže i výstupní napětí zdroje bude muset být v tomto rozsahu. Kobota bych rád napájel přímo ze zásuvky, tím jsou dány i vstupní parametry zdroje. Na základě těchto informací jsem zvolil napájecí zdroj LRS-50-5. Ovládaní kobota bez využití počítače, budu realizovat pomocí potenciometrů. Volím nejlevnější dostupné potenciometry R16148-1A-2-B10K. Společně s nimi použiji i tři tlačítka s integrovanou led diodou TACT-24N-F-IG a jedno obyčejné tlačítko 1301.9315. K samotnému řízení celé elektroniky využiji kompaktní arduino nano.

3.2.2 Volba bezpečnostního prvku

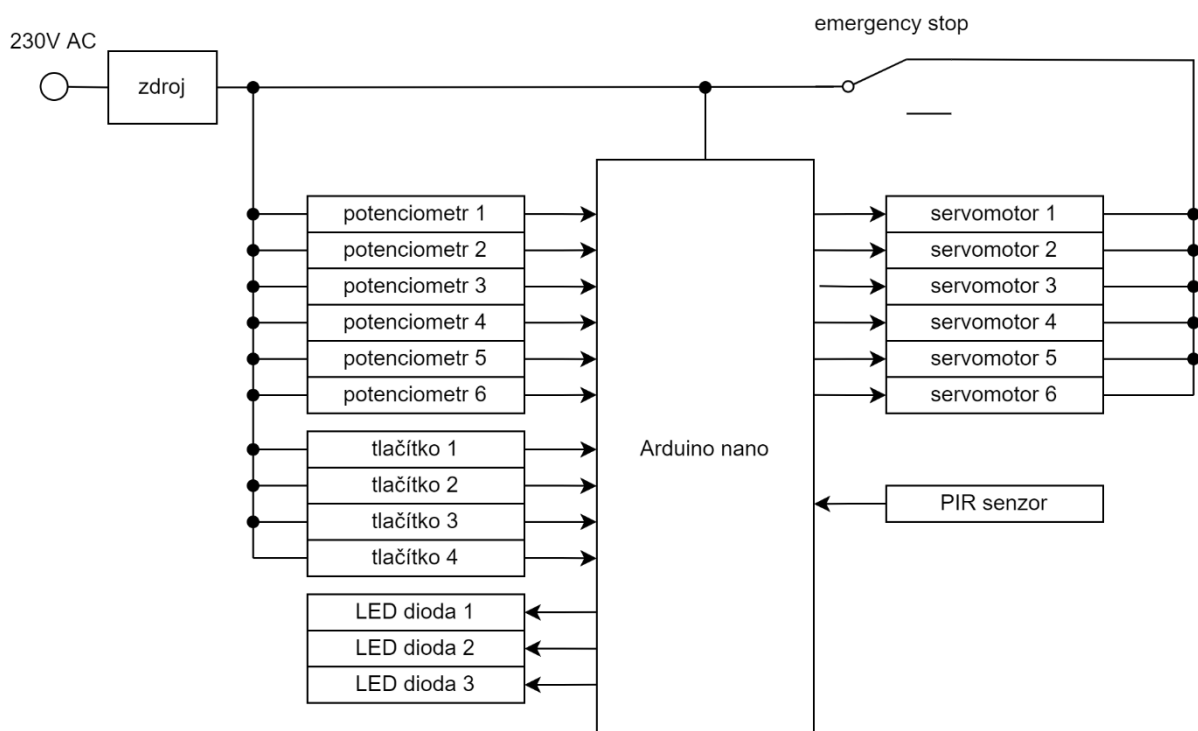
Jako bezpečnostní prvek jsem zvolil pasivní infračervený senzor HC-SR501, který funguje jako senzor pohybu. Celkový bezpečnostní systém bude spočívat v monitorování určitého vymezeného prostoru, do kterého bude spadat i pracovní prostor samotného kobota. V případě zaznamenání jakéhokoliv pohybu v tomto prostoru, kobot zastaví a setrvá ve stávající poloze. Celkovou bezpečnost zvýší i použití přepínače RSI1013C3GN ve funkci emergency stop, který v případě potřeby odpojí servomotory od zdroje.



Obrázek 19: Pasivní infračervený senzor HC-SR501 [14]

3.2.3 Blokové schéma zapojení elektroniky

Jednotlivé elektronické součástky a bezpečnostní prvky bude třeba zapojit a vytvořit tak funkční celek vhodný pro následné naprogramování. K pospojování všech součástí vytvořím plošný spoj. Blokové schéma zapojení elektroniky je znázorněno na obrázku 20.



Obrázek 20: Blokové schéma zapojení elektroniky [autor]

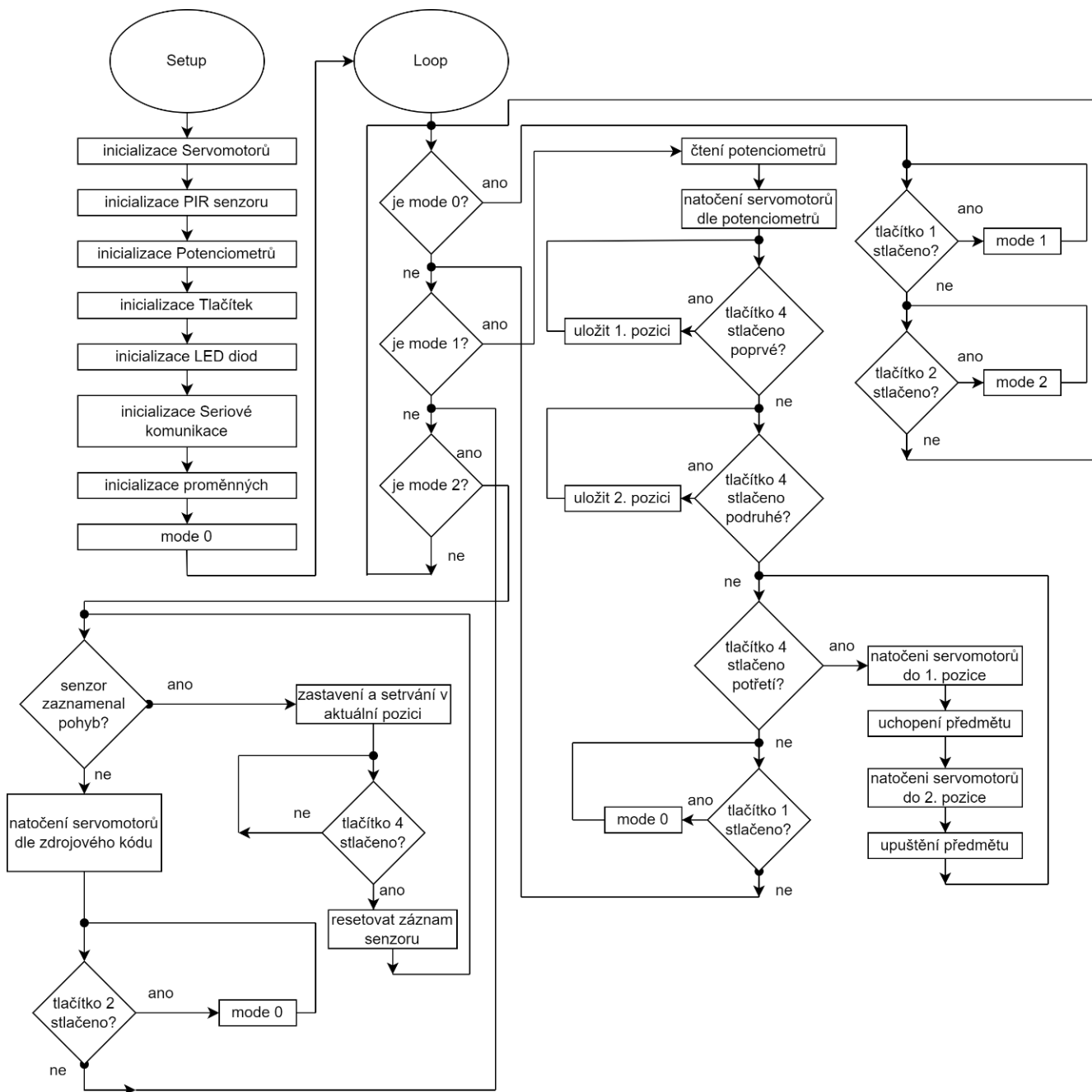
3.2.4 Programování

Jak již bylo řečeno, k programování využijí desku arduino nano, která je osazena procesorem ATmega328. Na této desce nalezneme 6 portů, které jsou schopny generovat PWM signál nezbytný pro řízení modelářských servomotorů. Deska dále nabízí 8 analogových portů, na které připojím potenciometry. Zbylé porty využijí pro připojení senzoru, tlačítek a led diod. Pin-outové zapojení jednotlivých součástí popisuje tabulka 9.

D0	<i>TX (komunikace)</i>	A0	<i>potenciometr 1</i>
D1	<i>RX (komunikace)</i>	A1	<i>potenciometr 2</i>
D2	<i>PIR senzor</i>	A2	<i>potenciometr 3</i>
D3 (PWM)	<i>servomotor 6</i>	A3	<i>potenciometr 4</i>
D4	<i>led dioda 1</i>	A4	<i>led dioda 3</i>
D5 (PWM)	<i>servomotor 5</i>	A5	<i>tlačítko 4</i>
D6 (PWM)	<i>servomotor 4</i>	A6	<i>potenciometr 5</i>
D7	<i>tlačítko 3</i>	A7	<i>potenciometr 6</i>
D8	<i>tlačítko 2</i>	–	–
D9 (PWM)	<i>servomotor 3</i>	–	–
D10 (PWM)	<i>servomotor 2</i>	–	–
D11 (PWM)	<i>servomotor 1</i>	–	–
D12	<i>tlačítko 1</i>	–	–
D13	<i>led dioda 2</i>	–	–

Tabulka 9: Pin-outové zapojení [autor]

K samotnému programování využijí vývojového prostředí Arduino IDE. V tomto prostředí lze programovat v jazyce Wiring, který byl vyvíjen v jazyce C a C++. Jazyk Wiring mi umožní pohodlně programovat bez specifických znalostí použitého hardwaru. Vývojový diagram programu zastávající řízení kobota znázorňuje obrázek 21.



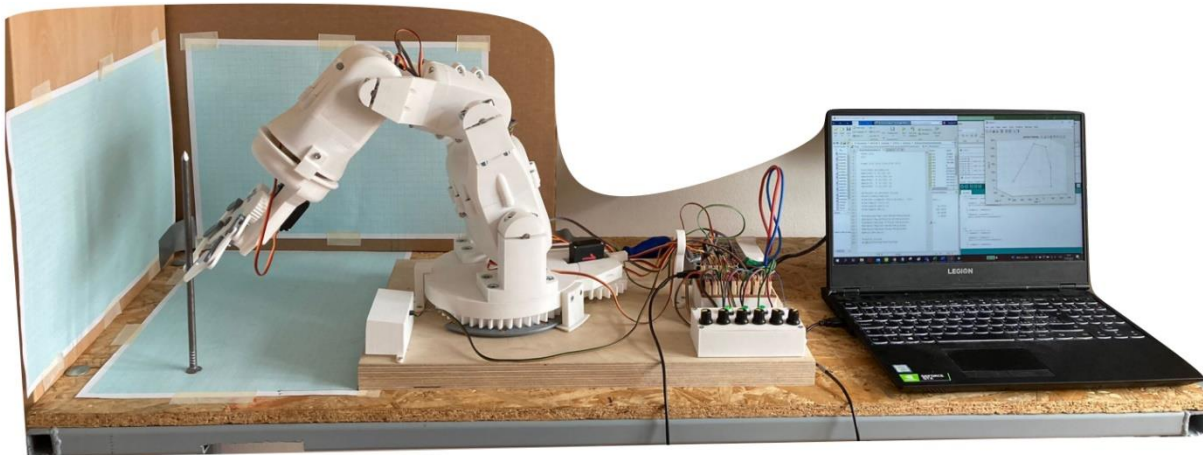
Obrázek 21: Vývojový diagram zdrojového kódu [autor]

3.3 Experimentální ověření vlastností

Pro ověření vlastností kobota jsem se rozhodl pro dva testy nejvíce vystihující vlastnosti, které se od obdobných strojů očekávají. Prvním z nich je test přesnosti, která je naprosto nezbytná a je jedním z hlavních porovnávacích parametrů. Druhým je test únosnosti.

3.3.1 Test přesnosti

Před testem přesnosti bylo třeba zhotovit zjednodušené virtuální dvojče kobota, které využiji k porovnávání ideálních poloh pracovního bodu, vůči těm reálným. Virtuální dvojče jsem zhotovil v programu MATLAB pomocí transformačních matic a dopředné kinematiky. Určil jsem vztahy mezi natočením kloubů a natočením modelářských servomotorů. Ty jsem pak mírně upravoval, abych docílil co nejpřesnějšího polohování v celé oblasti pracovního prostoru. Snažil jsem se především co nejvíce odladit vlastní tíhu ramen. Samotné měření jsem provedl na deseti vybraných polohách náležících pracovnímu prostoru.



Obrázek 22: Sestava pro měření přesnosti [autor]

Postup měření probíhal následovně. Pomocí dopředné kinematiky jsem na základě zvolené konfigurace natočení kloubů stanovil ideální polohu pracovního bodu a pomocí převodních vztahů jsem určil natočení modelářských servomotorů. Tyto polohy servomotorů jsem kobotu napsal do zdrojového kódu, a následně změřil reálnou pozici, pomocí zarovnané trojice milimetrových papírů formátu A3, vysouvacího metru a dlouhého hřebíku do dřeva, který mi pomohl přenést pozici pracovního bodu do vodorovné roviny. Přesnost jsem pak určil na základě rozdílu reálné polohy a té ideální dle virtuálního dvojčete v MATLABU. Výsledky experimentu znázorňuje tabulka 10.

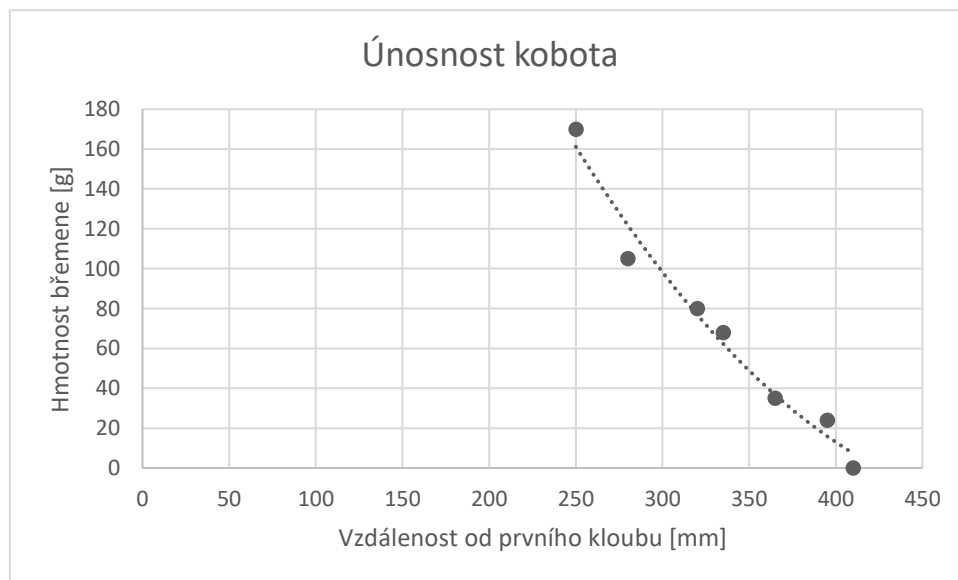
měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ideál. poloha X [mm]	281	15	163	348	150	240	40	31	215	93
ideál. poloha Y [mm]	159	221	98	123	272	44	26	265	94	50
ideál. poloha Z [mm]	140	10	157	200	235	50	15	105	101	163
real. poloha X [mm]	270	25	165	340	160	235	35	40	210	100
real. poloha Y [mm]	155	215	95	130	265	55	35	260	100	50
real. poloha Z [mm]	135	5	170	200	220	55	20	90	105	180
rozdíl X [mm]	11	10	2	8	10	5	5	9	5	7
rozdíl Y [mm]	4	6	3	7	7	11	9	5	6	0
rozdíl Z [mm]	5	5	13	0	15	5	5	15	4	17
celková nepřesnost [mm]	13	13	14	11	19	13	11	18	9	19

Tabulka 10: Měření přesnosti [autor]

Průměrná vzdálenost vzdušnou čarou mezi ideální a reálnou polohou činí 14 mm. Pro robotické aplikace bych se přesto spíše zaměřil na nejhorší dosažené výsledky, které nepřesahují 20 mm.

3.3.2 Test únosnosti

Únosnost kobota jsem stanovil jednoduchým testem, kdy jsem zkoušel zvedat a následně manipulovat s různě těžkými břemeny v různých vzdálenostech. Únosnost je samozřejmě závislá na aktuální konfiguraci kobota, proto jsem se vždy snažil, aby s břemenem kobot manipuloval právě v té neoptimálnější konfiguraci. Optimální konfigurace pak připomínala tvar mostu, ve které byl kobot nejúnosnější. Výsledky jsem pak zahrnul do grafu, který je na obrázku 23.

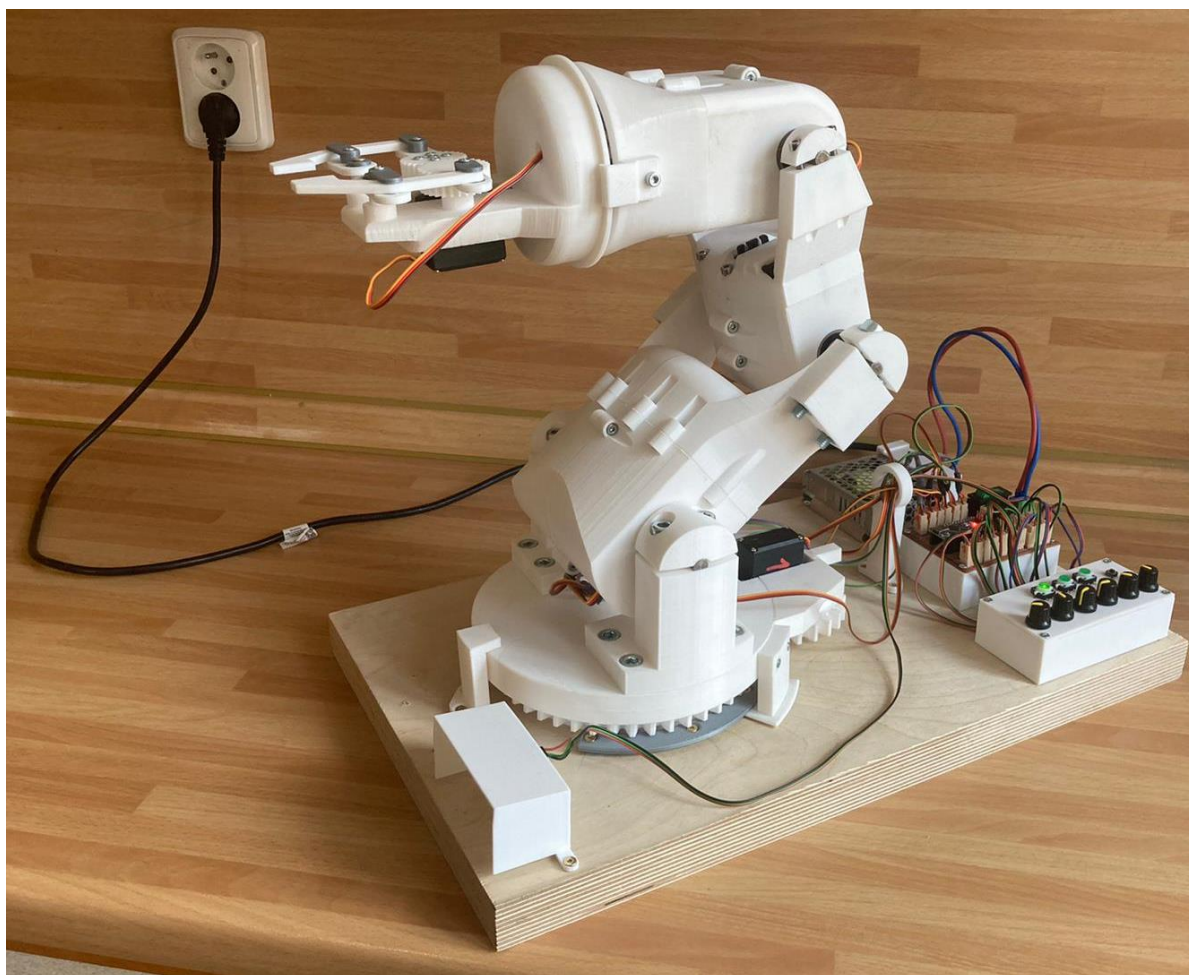


Obrázek 23: Únosnost kobota [autor]

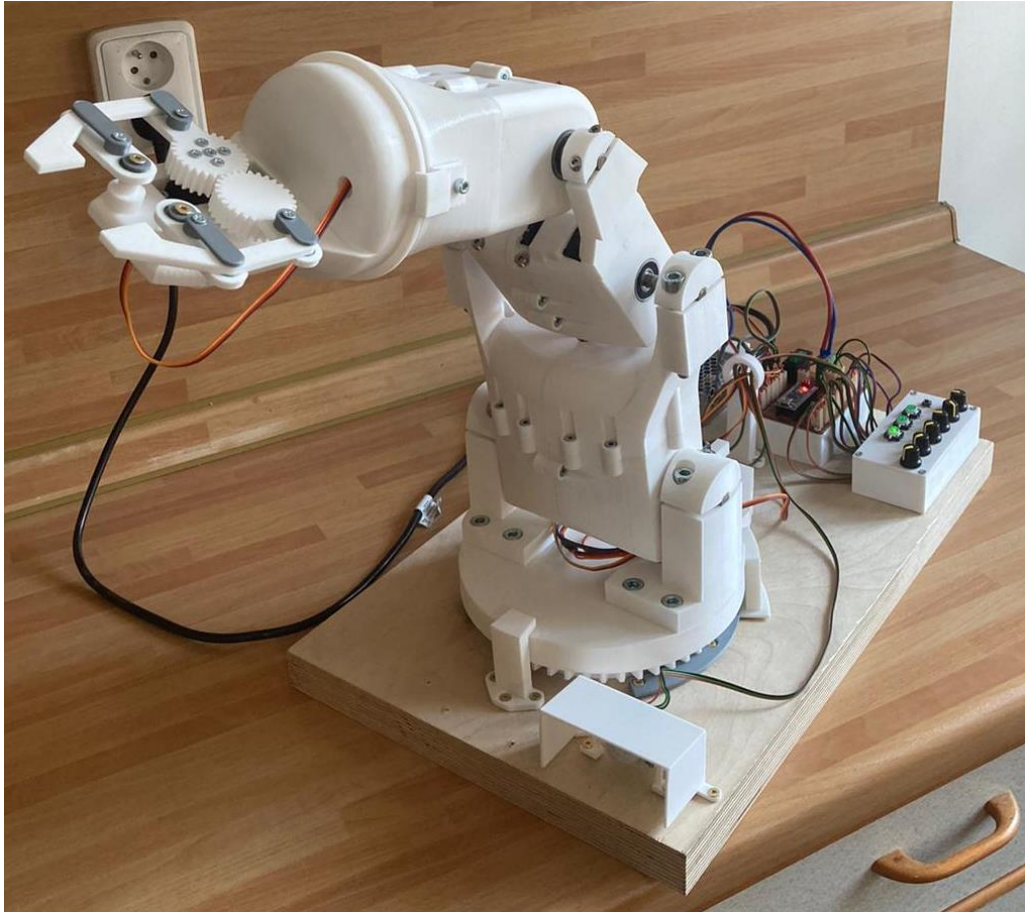
4 Závěr

V rámci této práce jsem navrhl a zkonstruoval robotickou ruku s pěti stupni volnosti. Dále jsem realizoval řízení a zhotovil jednoduchý bezpečnostní prvek v podobě senzoru pohybu, který případné kolizi s člověkem dokáže předejít. Kobot lze ovládat pomocí šesti potenciometrů a v rámci řízení jsem zhotovil jednoduchý teach-repeat systém. Kobot má také popsanou kinematiku, díky které jsem byl schopný experimentálně ověřit jeho přesnost a únosnost.

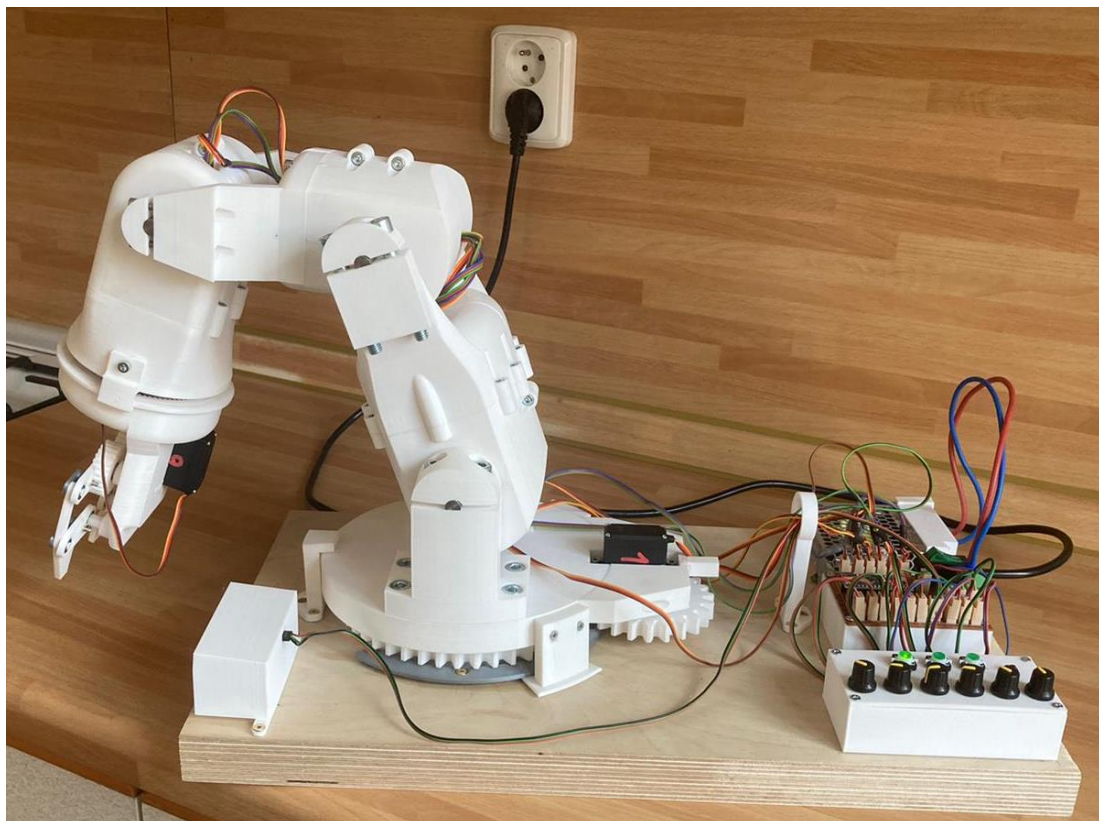
Výsledkem této práce je model kooperativního robota, který mi posloužil k seznámení se s problematikou konstrukce a řízení průmyslových robotů a manipulátorů. Kobot má samozřejmě řadu nedostatků, na kterých lze dále pracovat. Mezi hlavní nedostatky vhodné k řešení rozhodně patří malá tuhost a přesnost, které by prospěla realizace zpětnovazebního řízení. Dalším problémem je rychlé přehřívání servomotorů. Tomu lze předejít zhotovením chladicího systému.



Obrázek 24: Kobot [autor]



Obrázek 25: Kobot [autor]



Obrázek 26: Kobot [autor]

5 Seznam zdrojů

- [1] *Průmyslové roboty a manipulátory* [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [2] *AUTOMATIZACE (roboty a manipulátory)* [online]. Brno, 2003 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/emm_mechanizace_a_automatizace_roboty_rumisek.pdf. Učební text. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ.
- [3] *FTC ŘÍZENÍ PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ A JEHO APLIKACE V OBLASTI PŘÍMÉHO NAVÁDĚNÍ ROBOTU V PROSTORU* [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30910. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [4] *ELUC: Číslicově řízené obráběcí stroje* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1352>
- [5] *KINALI: Kolaborativní roboti* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: https://www.kinali.cz/cs/technologie/kolaborativni-roboti/?gclid=CjwKCAiA9aKQBhBREiwAyGP5ITP_C-j7iFyBsFU2gTeik3pAvrCoHVX1HYN-1yhVFUtaJlfikrKM2BoCjakQAvD_BwE
- [6] *Bollautomation: Human-Robot collaboration* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.bollautomation.de/en/solutions/human-robot-collaboration/>
- [7] *KUKA: Spolupráce člověka s robotem: Vítej, kolego robote!* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/vyroba-v-budoucnosti/spolupr%C3%A1ce-%C4%8Dlov%C4%9Bka-s%C2%A0robotem>
- [8] *MANUFACTURING AUTOMATION: Five ways to help ensure safe operations with collaborative robots* [online]. Annex Business Media, 2016 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.automationmag.com/6568-five-ways-to-help-ensure-safe-operations-with-collaborative-robots/>
- [9] *Tvorimesvetlo: Kolaborativní a kooperativní roboti* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.tvorimesvetlo.cz/kolaborativni-a-kooperativni-roboti/>
- [10] *HCR CZECH: Kolaborativní robot Hanwha HCR-3A* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.hcr-czech.cz/robot/kolaborativni-robot-hcr-3a/>
- [11] *AUBO: KOLABORATIVNÍ ROBOT AUBO i5* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.aubo.cz/produkty/aubo-i5/>

- [12] *ABB: SWIFTI™ CRB 1100* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z:
<https://new.abb.com/products/robotics/cs/kolaborativni-roboty/crb-1100>
- [13] *Strojní součásti z plastu*. Praha: SNTL-Nakladatelsví technické literatury, 1981. ISBN DT 678.5 : 621.81.
- [14] PIR Motion Sensor Module HCSR501. In: *BS universal* [online]. 2015 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.bsuniversal.com/product/pir-motion-sensor-module-hcsr501-in-pakistan/>
- [15] HANWHA HCR-3A. In: *RAVEO* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z:
<https://www.raveo.cz/hcr-3a>
- [16] AUBO-i5 COLLABORATIVE ROBOT. In: *AUBO* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z:
<https://www.aubo-cobot.com/public/i5product3?CPID=i5>
- [17] SWIFTI™ CRB 1100. In: *ABB* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z:
<https://new.abb.com/products/robotics/cs/kolaborativni-roboty/crb-1100>

6 Seznam obrázků

Obrázek 1: Blokové schéma pohonů [2]	5
Obrázek 2: HCR-3A [15].....	8
Obrázek 3: AUBO i5 [16].....	9
Obrázek 4: SWIFTI CRB 1100 [17].....	10
Obrázek 5: Kinematické schéma robota [autor]	11
Obrázek 6: První navržená konfigurace pohybu [autor]	13
Obrázek 7: Druhá navržená konfigurace pohybu [autor]	14
Obrázek 8: Návrhový model robotické ruky [autor]	15
Obrázek 9: Návrh prvního kloubu [autor]	16
Obrázek 10: Model ukotvení kola na osu [autor]	17
Obrázek 11: Model uchycení pastorku k servomotoru [autor]	17
Obrázek 12: Návrh druhého kloubu [autor].....	18
Obrázek 13: Navržená konstrukce robota [autor]	20
Obrázek 14: Matematický model pro výpočet momentu [autor]	21
Obrázek 15: Schéma matematického modelu pro výpočet sil v ložiskách [autor]	24
Obrázek 16: Matematický model ukotvení kola [autor]	27
Obrázek 17: Možnosti tvarových spojů [13]	29
Obrázek 18: Experimentální ověření svěrného spoje [autor]	29
Obrázek 19: Pasivní infračervený senzor HC-SR501 [14]	31
Obrázek 20: Blokové schéma zapojení elektroniky [autor]	31
Obrázek 21: Vývojový diagram zdrojového kódu [autor]	33
Obrázek 22: Sestava pro měření přesnosti [autor]	34
Obrázek 23: Únosnost kobota [autor].....	35
Obrázek 24: Kobot [autor].....	36
Obrázek 25: Kobot [autor].....	37
Obrázek 26: Kobot [autor].....	37

7 Seznam tabulek

Tabulka 1: Délky jednotlivých částí [autor]	12
Tabulka 2: Potřebné kroutící momenty [autor]	22
Tabulka 3: Parametry navržených servomotorů (hodnoty kroutících momentů jsou stanoveny pro 5 V) [autor].....	22
Tabulka 4: Přehled vybraných parametrů jednotlivých soukolí [autor]	23
Tabulka 5: Vybrané geometrické vlastnosti jednotlivých soukolí [autor].....	24
Tabulka 6: Silové poměry v ložiskách druhého kloubu [autor]	25
Tabulka 7: Součinitele statické bezpečnosti v ložiskách druhého kloubu [autor]	26
Tabulka 8: Průměr osy, bezpečnost přenosu, součinitel tření a součinitel tření v závitu [autor]	27
Tabulka 9: Pin-outové zapojení [autor].....	32
Tabulka 10: Měření přesnosti [autor]	35

8 Seznam příloh

Příloha 1: CD-ROM