

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky**



**Bakalářská práce**

**Návrh humanoidní ruky robota**

**Design of a robotic hand**

**Jakub Vaněk**

**2018**

## Prohlášení

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

Datum: .....

.....

Podpis

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Martinu Novákovi, Ph.D. za ochotné odborné vedení mé bakalářské práce, veškerý jeho čas, trpělivost a užitečné rady, které mi pomohly celý projekt realizovat.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vaněk** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **457531**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh humanoidní ruky robota**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design of a robotic hand**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Navázat na existující design robotické ruky (prsty, dlaň, zápěstí) a navrhnout mechaniku dalších dílů - předloktí, loket, atd až k rameni.
- 2) Ruku realizovat (díly budou 3D tištěné), zapojit serva
- 3) Naprogramovat (Arduino) jednoduché pohyby ruku, systém ověřit

Seznam doporučené literatury:

- [1] The Future of Humanoid Robots - Research and Applications. Edited by Riyadh Zaier, ISBN 978-953-307-951-6, 310 pages, Publisher: InTech, Chapters published January 20, 2012 under CC BY 3.0 license, DOI: 10.5772/1407
- [2] Mobile Robots - Control Architectures, Bio-Interfacing, Navigation, Multi Robot Motion Planning and Operator Training. Edited by Janusz Będkowski, ISBN 978-953-307-842-7, 402 pages, Publisher: InTech, Chapters published December 02, 2011 under CC BY 3.0 license. DOI: 10.5772/2304.
- [3] Robot Arms. Edited by Satoru Goto, ISBN 978-953-307-160-2, 272 pages, Publisher: InTech, Chapters published June 09, 2011 under CC BY-NC-SA 3.0 license  
DOI: 10.5772/677.

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: **18.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

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

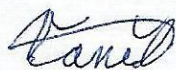
  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

18.4.2018  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Anotační list

Jméno autora:	Jakub Vaněk
Název BP:	Návrh humanoidní ruky robota
Anglický název:	Design of a robotic hand
Rok:	2018
Obor:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav:	Ústav přístrojové a řídicí techniky
Vedoucí práce:	doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran 46 Počet obrázků 41 Počet tabulek 6 Počet příloh 3
Klíčová slova:	3D tisk, humanoidní robotická paže, InMoov, Shadow Dexterous Hand, Arduino, servomotor
Keywords:	3D print, humanoid robotic arm, InMoov, Shadow Dexterous Hand, Arduino, servo

## Anotace

Tato bakalářská práce popisuje postup konstrukce horní končetiny pro humanoidního robota vytištěné pomocí 3D tiskárny. Bakalářská práce v úvodu představuje přehled již existujících konstrukčních řešení projektů Shadow Dexterous Hand a InMoov. Následuje popis vlastní konstrukce v programu Autodesk Inventor Professional 2018. Konstrukce navazuje na předcházející bakalářskou práci, která se zabývala konstrukcí dlaně a prstů. Začíná od úpravy původní dlaně a pokračuje konstrukcí zápěstního kloubu, předloktí, loketního kloubu a končí paží pod ramenem. V další části se věnuje fyzické realizaci sestavy. Závěrem se věnuje zapojení řídicího mikropočítače Arduino a funkční otestování konstrukčního řešení.

## Abstract

This bachelor thesis describes the procedure of the construction of a 3D printable upper limb for a humanoid robot. First, there is an overview of existing solutions, Shadow Dexterous Hand and InMoov, followed by a description of my own design in Autodesk Inventor Professional 2018. Succeeding the bachelor thesis is the description of the construction of the palm and fingers. It starts with adjustments made to the original palm, followed by the improvements made to the wrist joint, forearm, elbow joint and the arm under the shoulder. Next section describes practical realization and concludes with the discussion of Arduino connection and testing functions.

## Seznam použitých symbolů a označení

Symbol	Jednotka	Význam
V	[m <sup>3</sup> ]	Objem
p	[Pa]	Tlak
m	[kg]	Hmotnost
f	[Hz]	Frekvence
l	[mm]	Délka
$\alpha$	[°]	Úhel natočení
M <sub>k</sub>	[Nm]	Kroutící moment v [Nm]
M <sub>kg</sub>	[kg·cm]	Kroutící moment v [kg·cm]
g	[m·s <sup>-2</sup> ]	Konstanta gravitačního zrychlení
U	[V]	Napětí
	[CZK]	Česká koruna
G	[N]	Tíhová síla
r	[m]	Rameno ohybového momentu
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota
$\eta$	[1]	Účinnost
i	[1]	Převodový poměr
<i>kurzíva</i>		Zápisy proměnných a funkcí

# Obsah

1	Úvod .....	8
2	Teoretická část .....	9
2.1	Pohled na lidskou paži z anatomického hlediska .....	9
2.2	Shadow Dexterous Hand .....	10
1.1.	Projekt InMoov .....	12
2.2.1	Dlaň a zápěstí .....	12
2.2.2	Předloktí a loketní kloub .....	13
2.2.3	Paže .....	15
2.3	Servomotor .....	16
2.4	Kloub pomocí servomotoru .....	18
3	Praktická část .....	19
3.1	Výchozí stav .....	19
3.2	Postup návrhu .....	19
3.2.1	Zápěstní kloub .....	20
3.2.2	Předloktí .....	23
3.2.3	Loketní kloub .....	26
3.2.4	Paže .....	30
3.2.5	Horní končetina .....	32
3.3	Tisk a sestavení .....	33
3.4	Elektronické zapojení a naprogramování .....	38
4	Závěr .....	42
5	Reference .....	43
	Seznam obrázků .....	45
	Seznam tabulek .....	46
	Seznam příloh .....	46
	Seznam použitého softwaru .....	46



# 1 Úvod

Počátek 21.století se vyznačuje nástupem moderních technologií, které lidem usnadňují práci, zefektivňují výrobní procesy a nahrazují lidskou sílu na pracovištích s obtížnými provozními podmínkami, jako jsou svařovny, montážní linky, rutinní operace a velmi přesné úkony. Mezi takovéto nastupující technologie patří i robotizace. Samotné slovo „robot“ pochází z Čech a poprvé bylo použito ve hře Karla Čapka R.U.R. (Rossum's Universal Robots) z roku 1920 [1]. Představa spisovatele byla na svou dobu velmi pokročilá. Nastínila rizika, že by jednou umělá inteligence mohla převzít vládu nad člověkem. Tato problematika je stále aktuální i proto, že se technologie rychle rozvíjejí a umělá inteligence dnes již není jen science fiction, ale stává se realitou.

Od doby Karla Čapka však dostala tato fikce již reálné obrysy a vývojem robotů se nyní zabývá řada firem. Roboty jsou již v současné době využívány v mnoha oblastech průmyslu, těžkém strojírenství, v automotive, při výrobě elektronických součástek, v lékařství, prostě všude tam, kde je potřeba precizní, rychlé a přesné práce v operacích, které jsou velmi často rutinního charakteru, anebo kde by člověk velmi obtížně tyto úkony vykonával manuálně.

Robotizace může mít řadu forem od účelových strojů až po stroje, které svým tvarem, chováním i pohyby imitují člověka. Sestrojit humanoida je cíl mnoha pracovních skupin po celém světě. Na strojní fakultě ČVUT se rovněž touto problematikou zabýváme. Pro svojí bakalářskou práci jsem si proto vybral zajímavé téma zpracování části horní končetiny připomínající lidskou paži, která má ovládané prsty, zápěstí i loketní kloub. Někdy v budoucnu by tento projekt mohl být součástí celého humanoidního robota.

Navazuji na bakalářskou práci [2] svého předchůdce, který vytvořil model ruky s improvizovaným předloktím. Model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor a následně vytištěn na 3D tiskárně. K pohybu prstů bylo použito servomotorů ovládaných Arduinem. Moje práce naváže na dlaň a bude pokračovat od zápěstí až po rameno.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Pohled na lidskou paži z anatomického hlediska

Horní končetinu lze rozdělit na tři hlavní části: paži, předloktí a ruku. Všechny tyto topologické oblasti jsou charakterizovány svojí morfologickou strukturou.

Velikosti úhlů náklonu jsou uváděny ze základního tělesného postavení, tj. vzpřímený stoj, volné končetiny, ruce dlaněmi dopředu, palce směřující od těla. [3]

Paže je oblast od ramene po loketní kloub. Základ tvoří kost pažní, která je v rameni skloubena s lopatkou. Vnější tvar paže je dán skupinou pažních svalů, které při pohybu mění svůj tvar a tím i vnější tvar celé paže. Vnější profil je tudíž silně závislý na poloze paže. Rozsah pohybu loketního kloubu je  $0\div 150^\circ$ . [3]

Předloktí je část od lokte po zápěstí. Základem jsou loketní a vřetení kosti, které spolu s příslušnými svaly tvoří nosnou část předloktí. Vnější tvar je opět silně závislý na aktuální poloze. Předloktí je schopné konat rotaci, či spíše náklon kolem své vlastní osy, a to v rozsahu  $-90\div 90^\circ$  od základní polohy. [3]

Zápěstí je tvořeno skupinou kostí, která tvoří složitou soustavu schopnou komplexního pohybu. Základními pohyby jsou:

- Palmární flexe: Ohnutí dlaně dopředu v rozsahu  $0\div 80^\circ$ .
- Dorzální flexe: Ohnutí dlaně dozadu v rozsahu  $0\div 85^\circ$ .
- Ulnární dukce: Náklon dlaně k tělu (tzn. od palce) v rozsahu  $0\div 45^\circ$ .
- Radiální dukce: Náklon dlaně směrem k palci v rozsahu  $0\div 15^\circ$ . [3]

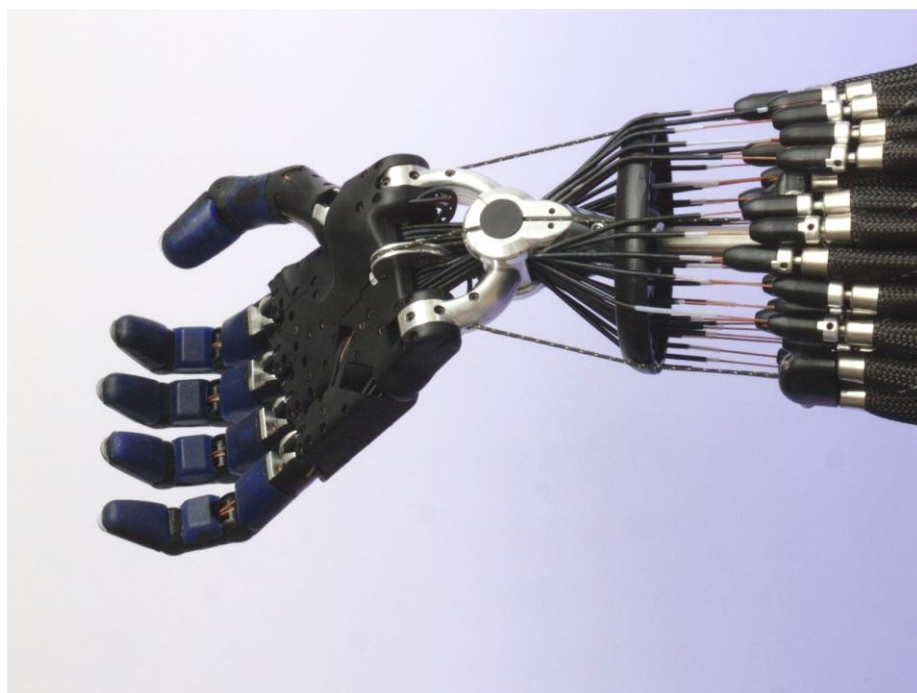
Ruku tvoří složitý systém kostí: 8 zápěstních, 5 záprstních a 14 článků prstů. Na záprstní kosti, které tvoří dlaň, dosedají články prstů. Každý prst je tvořen třemi postupně se zmenšujícími články prstů. Výjimkou je palec, který má pouze 2 články. Tyto články se nazývají proximální, střední a distální. Alternativně první, druhý a třetí. [3]

## 2.2 Shadow Dexterous Hand

Ruka vyvinutá společností Shadow Robot Company disponuje dvaceti stupni volnosti se senzory pro snímání absolutní pozice, síly a senzory dotyku na koncových člancích prvků. [4]

Pohyb je zajištěn soustavou čtyřiceti pneumatických svalů. Pneumatický sval je systém vyvinutý v padesátých letech 20 století, který dokáže velmi dobře imitovat lidský sval, a to jak vyvozanou silou, tak i jejím průběhem. Sval se skládá z gumové trubice obalené tkaninou. Při nafukování tlakovým vzduchem dochází k radiálnímu rozšíření trubice a zároveň axiální kontrakci celého svalu. S postupující kontrakcí se zároveň snižuje síla svalem vyvozená. Při vypuštění vzduchu dojde ke zpětnému axiálnímu prodloužení a uvedení do původního stavu. Sval se v závislosti na konstrukci dokáže smrštit až o 40 % původní délky. Vyvozená síla závisí na použitém materiálu trubice a tlaku vzduchu. Každý z 40 použitých svalů má objem 0,015 dm<sup>3</sup> a je navržen na tlak 350 kPa. Dlaň a předloktí váží dohromady 4,3 kg a je schopna uzvednout až 5 kg. [4] [5] [6]

Na vzduchové svaly navazují ocelová lana, která jsou upevněna na jednotlivých člancích prstů a na dlani. Zápěstní kloub umožňuje rotaci ve 2 osách, čímž je zajištěn pohyb celé dlaně.

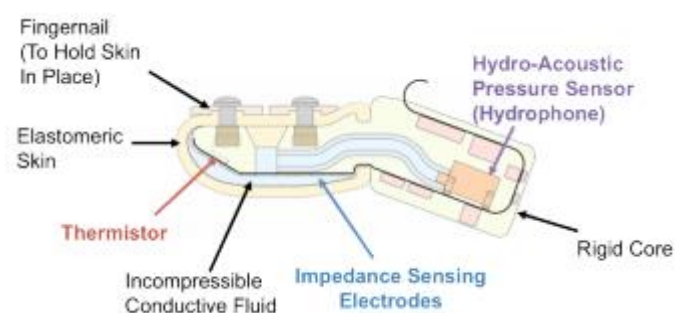


Obr. 1: Shadow Dexterous Hand [5]

Řízení je založeno na zpracování obrazu z kamer, které snímají prostor před rukou. Nejprve je nasnímaný obraz převeden na soustavu bodů v prostoru, kterou vyhodnotí speciální algoritmus a porovná ji se známými objekty v databázi. Pokud je objekt rozeznán dojde k uchopení pomocí před programované sekvence pohybů pro daný objekt. Když se daný objekt v databázi nenachází, dojde k aplikaci vyhodnocovacího algoritmu, který vybere vhodný způsob uchycení v závislosti na geometrii. V případě úspěšného uchopení předmětu je objekt a k němu odpovídající pohyb uložen do databáze. [4]

Ruka je vybavena Hallovými senzory pro snímání rotačních pohybů s rozlišením  $0,2^\circ$ . Data jsou převáděna 12bitovým převodníkem a odesílána do řídicího počítače pro vyhodnocení. [4]

Konečky prstů mohou být vybaveny senzory BioTac, které dokáží snímat absolutní a dynamický tlak vzduchu, teplotu, tepelný tok a napětí na impedančních elektrodách. Zpracováním signálu z těchto senzorů jsou vyhodnocovány body dotyku prstů s předmětem a první kontakt. Odhadován je vektor působící síly na senzor a rádius křivky dotyku. Dokáží detekovat skluz a teplotu povrchu. Vyhodnocování těchto údajů je poměrně náročné na výpočetní výkon. Výrobce uváděné minimální požadavky jsou: procesor s taktovací frekvencí 3,2 GHz, paměť RAM 16 GB a grafickou kartu NVIDIA GeForce GTX 660 nebo Radeon R270. [7]



Obr. 2: Senzor BioTac [7]

## 1.1. Projekt InMoov

InMoov je Open Source projekt založený francouzským sochařem a designerem Gaelem Langevinem založený v roce 2012. Pod tímto projektem se sdružuje řada nadšenců z oblasti 3D tisku a jeho cílem je vytvoření humanoidního robota v životní velikosti. Celý projekt je navržen pro technologii 3D tisku z plastu na tiskárně o minimálních rozměrech 120x120x120 mm. Původní verze byla vytvořena pomocí programu Blender s licencí Open Source. Robot je ovládán pomocí mikrokontroleru Arduino a programu MyRobotLab. [8]

Vzhledem k otevřenosti celého projektu existuje množství různých variant konstrukce, které se od sebe liší jak použitou technologií spojování dílů, tak i profesionalitou zpracování. Ve většině variant je využito lepení v kombinaci se šroubovými spoji různého druhu. Jako aktuátory jsou využívány servomotory, což je při jejich současných cenách a dostupnosti, jedna z nejjednodušších a nejekonomičtějších variant.

### 2.2.1 Dlaň a zápěstí

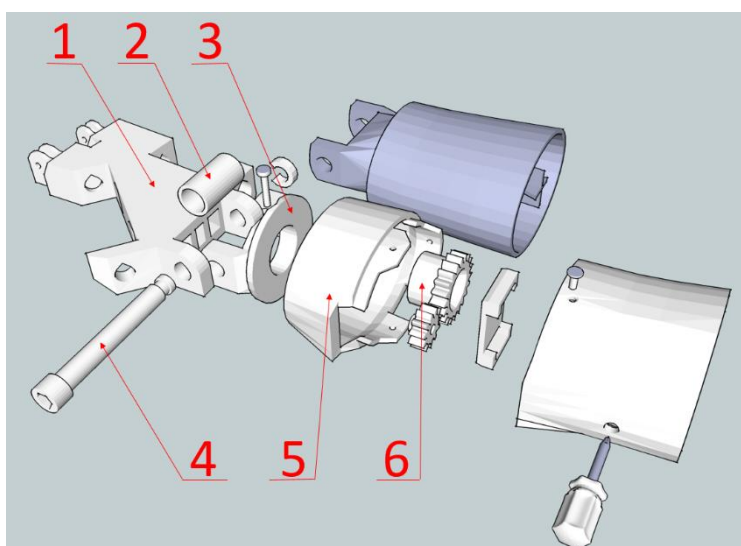
Dlaň tvoří základní díl, na kterém jsou umístěny vidlice pro upevnění prvních článků prstů ukazováku a prostředníku. Palec, prsteník a malíček jsou umístěny na rotačních osách pro zajištění reálnějšího pohybu. Články prstů jsou ovládány pomocí tenkých ocelových lanek nebo vlasců. Ke každému prstu je přivedeno jedno lanko pro ohnutí a lanko pro natažení. Lanka jsou uchycena v distálním (třetím) článku prstů, které mohou být osazeny senzory dotyku.



Obr. 3: InMoov dlaň [9]

Zápěstní kloub tvoří vidlice na základním dílu dlaně (Obr. 4, díl 1) a příruba předloktí (Obr. 4, díl 3), které jsou spojeny čepem (Obr. 4, díl 4). Tento mechanismus v kombinaci s lanky od servomotorů umožňuje ohnutí dlaně. Na čepu je nasazena trubka (Obr. 4, díl 2) pro redukci tření mezi lankou a čepem.

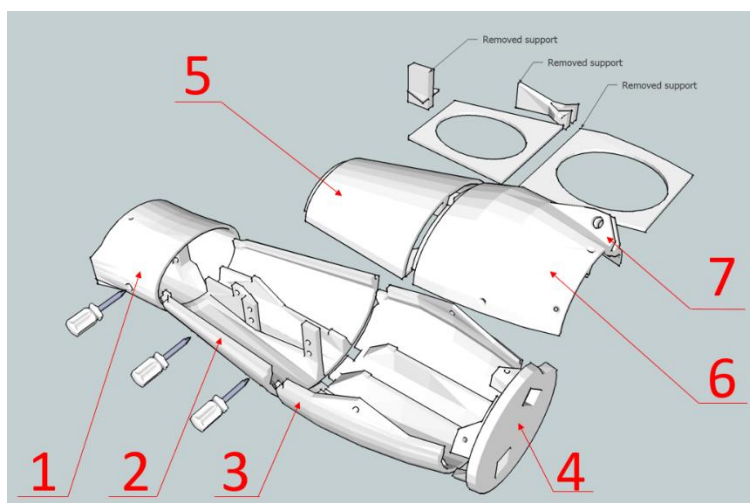
Příruba předloktí (Obr. 4, díl 3) je nasazena na trubku zakončenou ozubeným kolem (Obr. 4, díl 6). Tímto způsobem je zajištěna rotace, nebo spíše náklon, zápěstí.



Obr. 4: InMoov rozpad zápěstí [9]

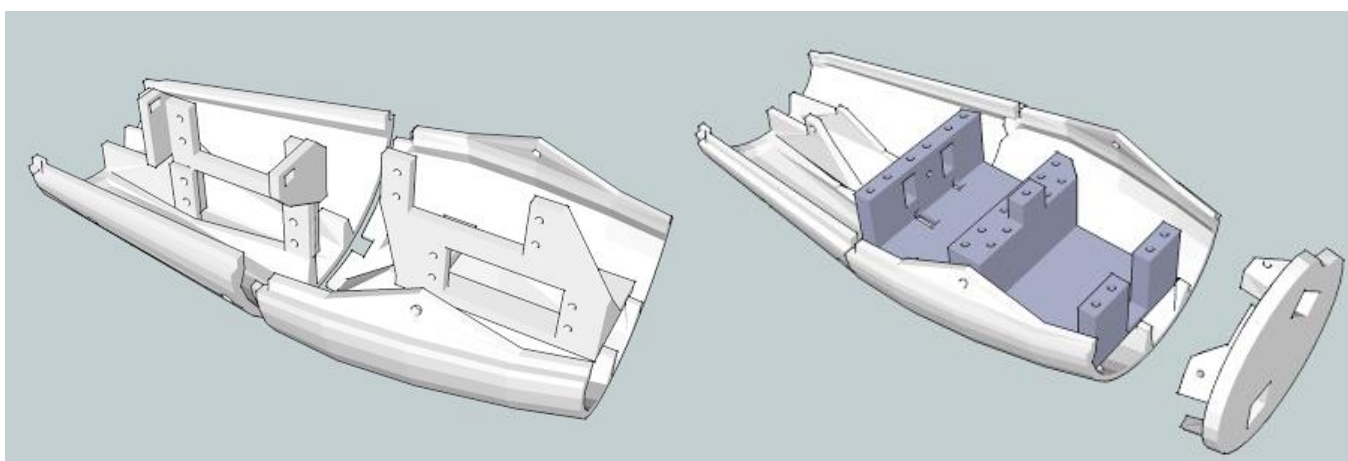
## 2.2.2 Předloktí a loketní kloub

Předloktí je tvořeno ze 3 základních nosných dílů (Obr. 5, díly 1, 2 a 3), které zároveň tvoří vnější profil paže. Tyto díly jsou k sobě přilepeny, čímž se celek stává nerozebíratelným. V případě poškození některého z dílů se celý úsek bude muset vytisknout znovu.



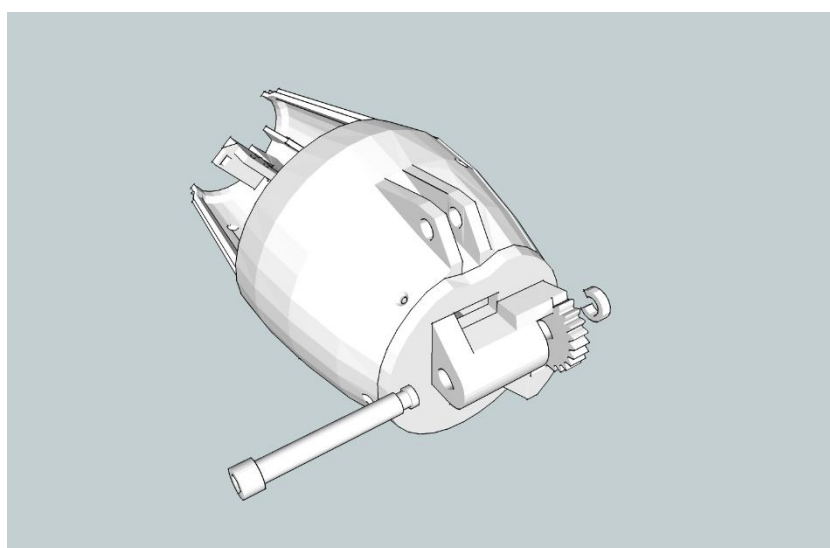
Obr. 5: InMoov rozpad předloktí, varianta 1 [9]

Různé verze robota InMoov se liší způsobem uspořádání servomotorů v předloktí. V obou níže vyobrazených variantách (Obr. 6) jsou na základní konstrukci přišroubovány příravnky k upevnění servomotorů, které slouží pro ovládání pohybů prstů. Toto řešení vyžaduje dostatek prostoru pro umístění pěti servomotorů ovládajících články prstů a servomotoru pro rotaci zápěstí. Tato konstrukce je ukončena přírubou (Obr. 5, díl 4), která slouží jako základ loketního kloubu. Horní část předloktí je uzavřena krytem složeným ze dvou částí (Obr. 5, díly 5 a 6). Zadní část krytu je opatřena vidlicí (Obr. 5, díl 7) pro uchycení čepu, který slouží k rotačnímu spojení s paží.



Obr. 6: InMoov – uchycení servomotorů v předloktí, verze 1 vlevo, verze 2 vpravo [9]

K přírubě, kterou je zakončeno předloktí je upevněn držák pro čep s ozubeným kolem (Obr. 7), které ve spolupráci s protikusem a potenciometrem zajišťuje snímání polohy paže.

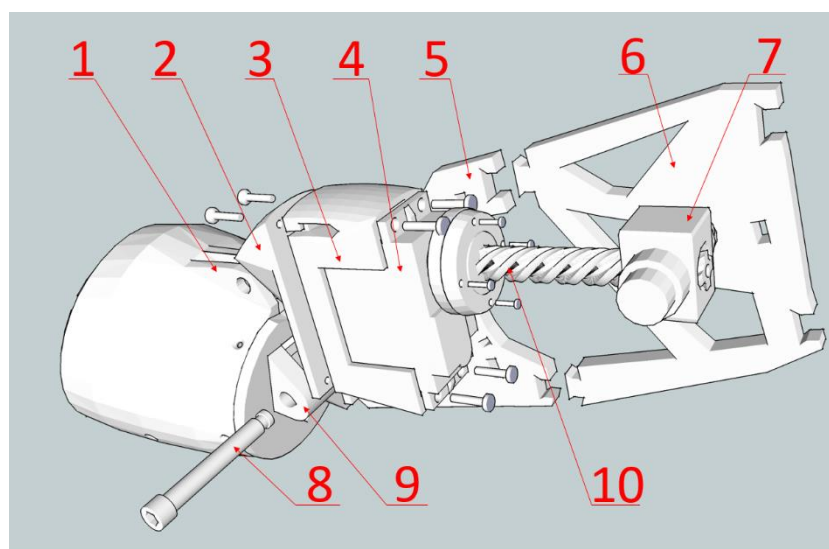


Obr. 7: InMoov předloktí zezadu [9]

### 2.2.3 Paže

Základní oporou paže jsou čtyři tvarované profily (Obr. 8, díly 5 a 6) tvořící rám. Ve spodní části je rám spojen přes čep (Obr. 8, díl 8) s přírubou na předloktí (Obr. 8, díl 9). Toto spojení tvoří nosnou část loketního kloubu.

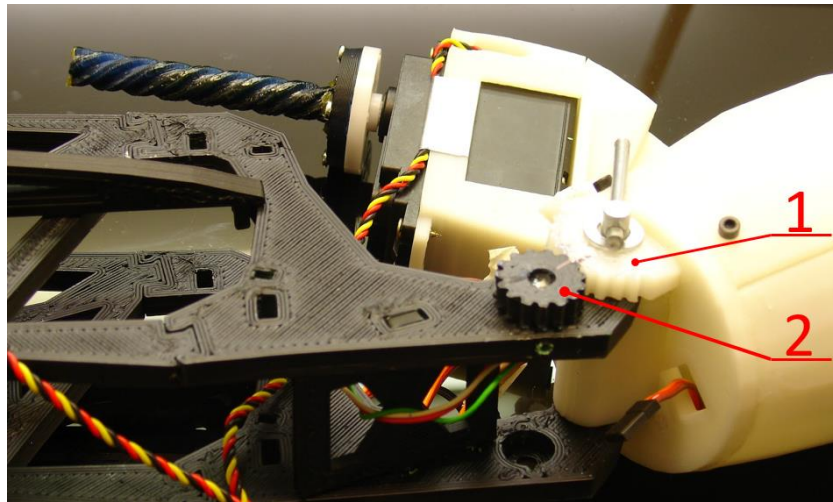
Pohyblivou část loketního kloubu tvoří sestava složená z příruby (Obr. 8, díl 2), lože servomotoru (Obr. 8, díl 3) a vlastního servomotoru (Obr. 8, díl 4). Servomotor je opatřen šnekem (Obr. 8, díl 10). Příruba servomotoru je připojena přes čep (Obr. 8, díl 8) k horní části předloktí (Obr. 8, díl 1). Druhou část šnekového soukolí tvoří blok (Obr. 8, díl 7), který je rotačně uložen do základního rámu paže (Obr. 8, díl 6). Při pohybu servomotoru se celé předloktí přitahuje k tomuto bloku a tím je realizován pohyb předloktí.



Obr. 8: InMoov paže [9]

Poloha paže je kontrolována pomocí potenciometru. Za normálních okolností je potenciometr umístěn přímo v servomotoru. V případě projektu InMoov je potenciometr vyjmutý a umístěný do rámu paže. Potenciometr je osazen ozubeným kolem (Obr. 9, díl 1), které při pohybu předloktí zabírá s ozubeným kolem (Obr. 9, díl 2). Tímto mechanismem je zajištěno polohování předloktí bez obavy o překročení maximálního rozsahu potenciometru.



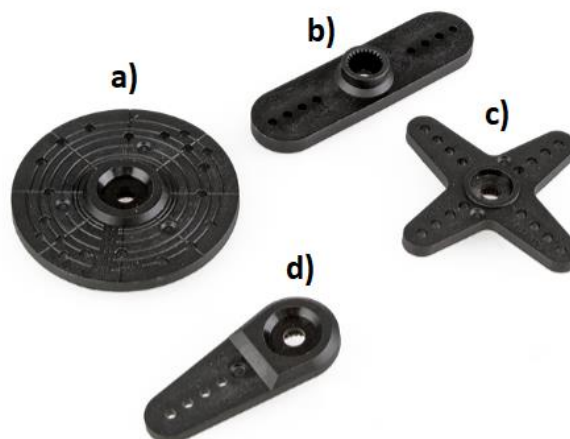


Obr. 9: InMoov paže – detail mechanismu polohování předloktí [9]

## 2.3 Servomotor

Stejnoseměrný servomotor obsahuje elektromotor, převody, potenciometr a řídicí elektroniku. Převody mění vysoké otáčky a malý kroutící moment na výstupním hřídeli motoru na nízké otáčky a větší kroutící moment na výstupním hřídeli převodových kol. Hlavním faktorem omezující rozsah pohybu servomotoru je použitý potenciometr. K jeho ochraně je v převodovém mechanismu mechanický doraz. Maximální úhel natočení bývá 180°, 270° nebo 360°. Rozsah pohybu může být zvětšen při záměně původního potenciometru za více otáčkový a odstraněním dorazu. [10]

Výstupní hřídel servomotoru je osazen tisícihranem a k axiálnímu pojištění servopáky slouží šroub. Servopáky jsou dodávány spolu se servomotorem. Následující obrázek uvádí přehled obvykle dodávaných servopák.



Obr. 10: Přehled obvyklých servopák [11]

Kroutící moment servomotorů je standardně udáván v [kg·cm]. Přepočítání na [Nm] uvádí následující vztah.

$$M_k [Nm] = \frac{M_{kg} [kg \cdot cm] \cdot g}{100} \quad (2.1)$$

Kde konstanta gravitačního zrychlení  $g=9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

Následující tabulka uvádí přehled vybraných servomotorů uvažovaných pro použití na robotické ruce. Zásadními parametry jsou kroutící moment, rozměry a cena.

Tab. 1: Přehled servomotorů

Označení	Kroutící moment [kg · cm]	Napájecí napětí [V]	Rozměry [mm]	Hmotnost [g]	Maximální úhel natočení [°]	Cena [CZK]
MX-106T [12]	85,6 102	12 14,8	40,2x65,1x46	153	360	10200
JX servo PDI HV5932MG [13]	25,2 32,3	6 8,4	40,5x20,5x36,5	59	180	870
JX servo CLS6027HV [13]	22,6 27,4	6,6 7,4	40,5x20,5x40	60	180	949
JX servo PDI 5521 MG [13]	17,3 20,4	4,8 6	40,5x20,2x38	56	360	386
Power HD 6001 MG [11]	6 7	4,8 6	40,7x20,5x39,5	56	170 (změřeno)	250
Tower Pro MG995 [14]	9,4 11	4,8 6	40,7x19,7x42,9	55	170 (změřeno)	250
RoboStar SBRS 5314HTG [11]	32,4 53,1	7,4 11,1	43x32x32,5	81	280	824
RoboStar SRS 3216HTG [11]	25,8 32,4	6 7,4	43x32x32,5	73	280	465

## 2.4 Kloub pomocí servomotoru

Pro konstrukci kloubu může být využito servomotoru na jehož výstupní páku je upevněn plech tvaru U profilu. Na spodní straně servomotoru je připevněn držák s další servopákou a ložiskem. Tento mechanismus je konstrukčně poměrně jednoduchý, ale vyžaduje dostatečně silné servomotor pro předpokládané zatížení.

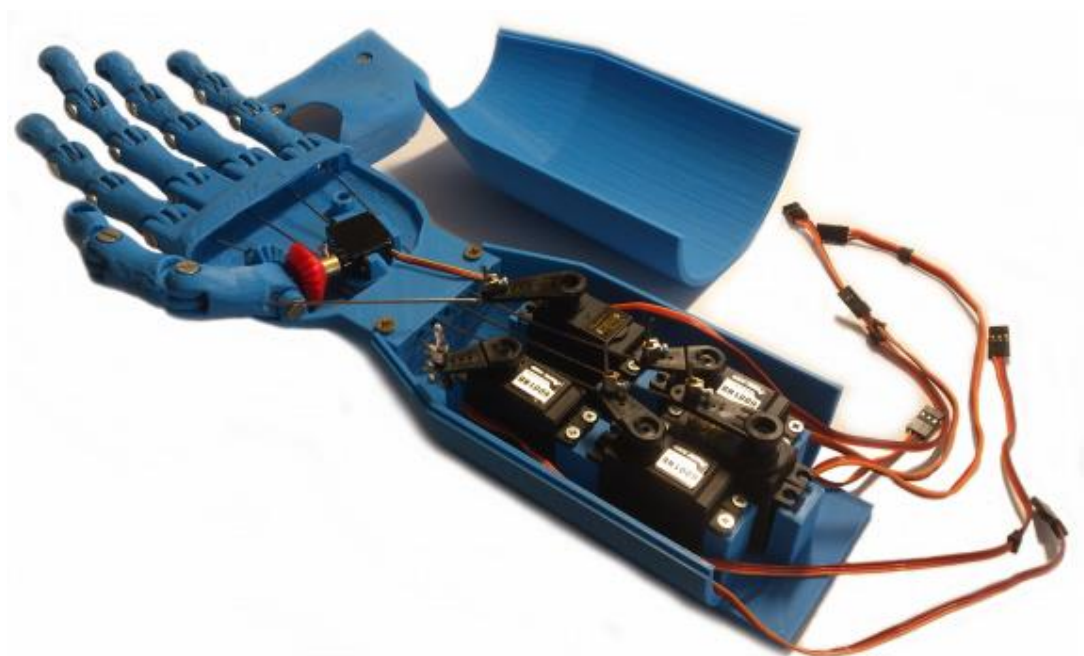


Obr. 11: Kloub se 2 stupni volnosti pomocí servomotorů [12]

## 3 Praktická část

### 3.1 Výchozí stav

Vycházel jsem z práce [2] mého předchůdce, který navrhl robotickou ruku řízenou pomocí mikropočítače Arduino. Pro pohon prstů je použito 5 servomotorů ovládajících ohnutí a natažení prstů a šestého ovládající náklon palce k dlani. K pohybu prstů je využito ocelových lanek o průměru 1,2 mm. Použití vodících ocelových lan je bezproblémové při ohýbání prstů, kdy je lanko namáháno na tah. Při natahování prstů, kdy je lanko tlačeno, již nedochází vlivem prohnutí lanka k úplnému natáhnutí prstů. Celá ruka je upevněna k zjednodušenému modelu předloktí.



Obr. 12: Výchozí model ruky [2]

### 3.2 Postup návrhu

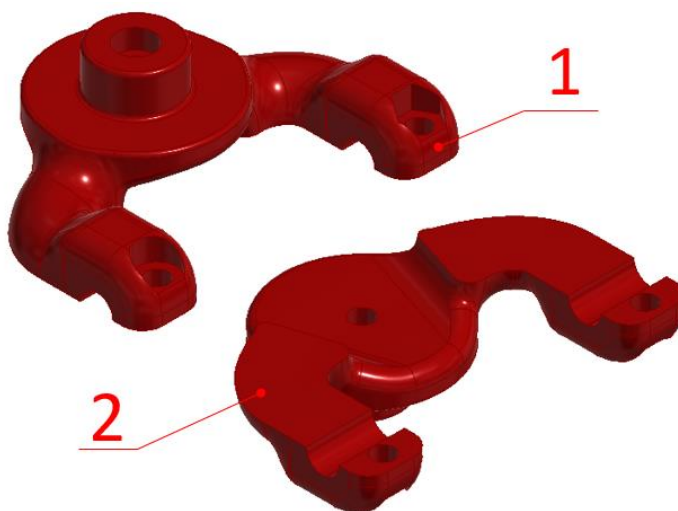
Při návrhu jsem se snažil dbát na jednoduchou rozebíratelnost, aby bylo možno v případě nutnosti jakýkoli díl znovu vytisknout a nahradit. Snažil jsem se vyvarovat samořezným šroubům, u kterých hrozí, že při opakovaném rozebírání dojde vlivem deformace materiálu ke ztrátě únosnosti spoje.

Původní předloktí bylo nepohyblivé, což neodpovídá reálné lidské ruce, které se můj návrh snaží přiblížit. Rozhodl jsem se tedy začít návrhem zápěstního kloubu.

### 3.2.1 Zápěstní kloub

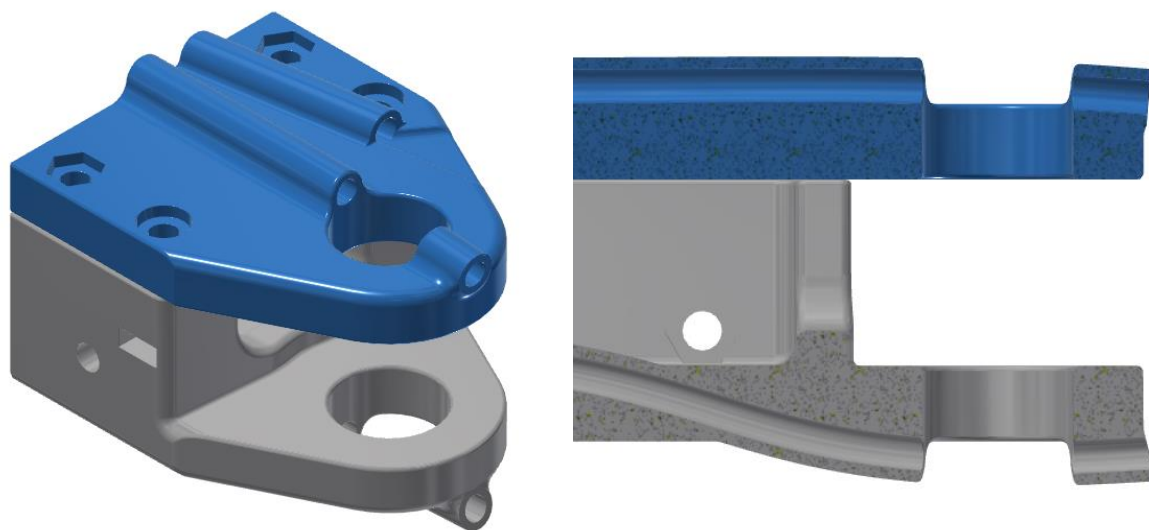
K řešení zápěstního kloubu jsem využil systém vycházející ze *Shadow Dexterous Hand* [5]. Základem kloubu je polovina toroidu osazená 2 čepy. V místě čepů je rozšířená dosedací plocha pro axiální zajištění pohyblivé části kloubu (Obr. 13). Nepohyblivou část kloubu tvoří držák, který je umístěný v předloktí. V prostřední části kloubu je otvor pro lanka pohybující prsty. Ocelová lanka s vnějším průměrem 1,2 mm budou umístěna v teflonových hadičkách o vnějším průměru 3 mm pro zmírnění tření při pohybu lanka a pro přesnější definování geometrie lanka při pohybu dlaně.

Aby mohla být pohyblivá část kloubu vytištěna bez dalších podpor je rozdělena na dvě souměrné části. Jednotlivé části jsou spojeny pomocí šroubového spoje. První část (Obr. 13, díl 1) obsahuje dosedací plochy pro hlavy šroubů M3 o průměru 5,6 mm a lože pro matici. V druhém dílu (Obr. 13, díl 2) jsou vytvořena 2 lože pro šestihrannou matici a dosedací plocha hlavy šroubu.



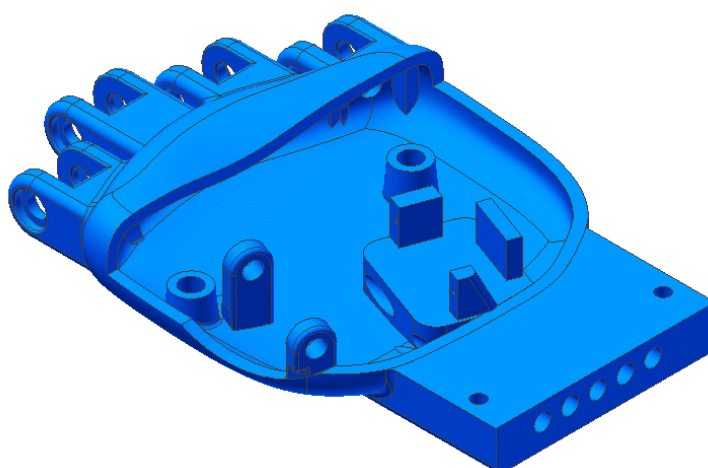
Obr. 13: Pohyblivá část kloubu zápěstí

Držák (Obr. 14) je složen ze 2 částí: základní části a víka. Základní část slouží pro upevnění celého kloubu do předloktí. Toto spojení je realizováno dvěma šroubovými spoji v bočních stěnách a dvěma spoji v zadní části, které zároveň složí pro upevnění víka. Dva šroubové spoje v přední části drží kloub pohromadě při montáži do předloktí a zvětšují celkovou tuhost kloubu. Základní část i víko obsahují vodící kanál pro ocelové lanko v teflonové hadičce umístěné ve střední rovině. Víko navíc obsahuje kanál pro lanko od palce. Jejich umístění a tvar vycházejí z konečné sestavy zápěstního kloubu a předloktí.

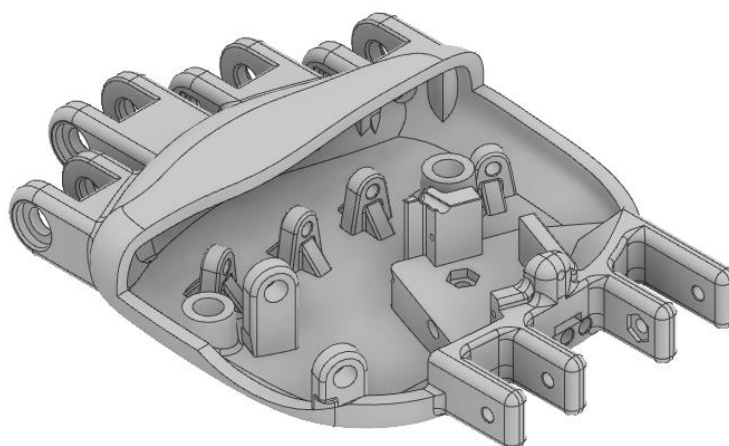


Obr. 14: Zápěstní kloub – držák

Úprava původního nepohyblivého předloktí na pohyblivé vyžadovala i úpravy na hřbetu ruky. Původní díl ruky (Obr. 15) bylo třeba vybavit vidlicemi pro uchycení zápěstního kloubu a konstrukcí zvětšující tuhost. Přidal jsem i 4 držáky pro uchycení trubiček s vodícími lanky pro zajištění jednoznačně definované trajektorie. Lanka pro ovládání náklonu dlaně budou upevněna na vnějších stranách vidlic.

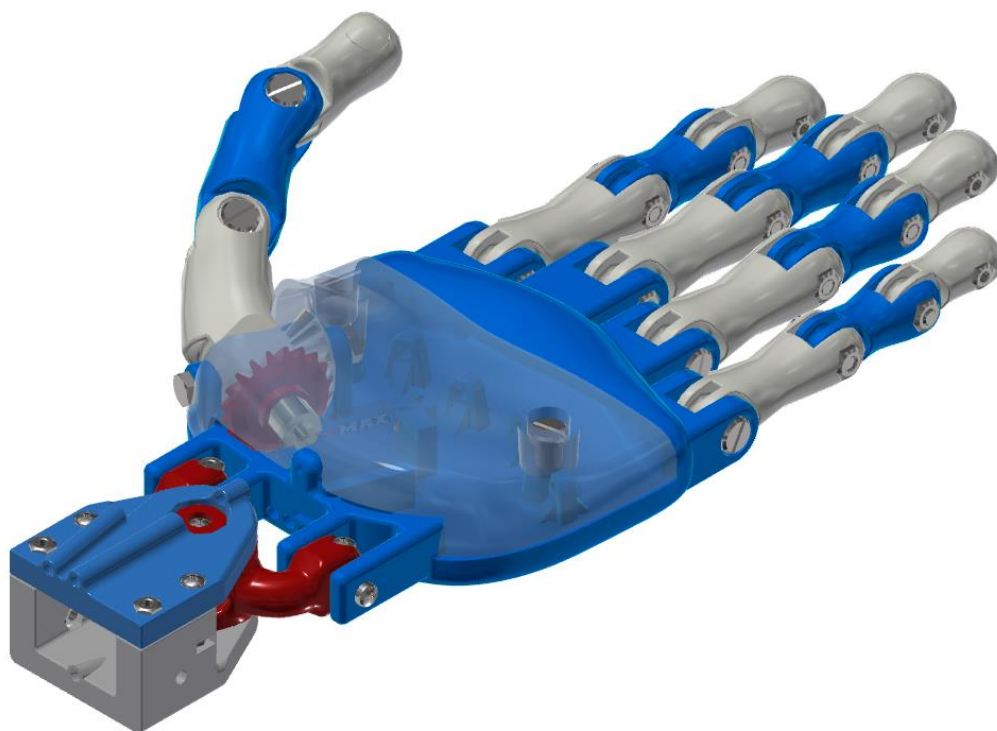


Obr. 15: Původní hřbet ruky [2]



Obr. 16: Upravený hřbet ruky

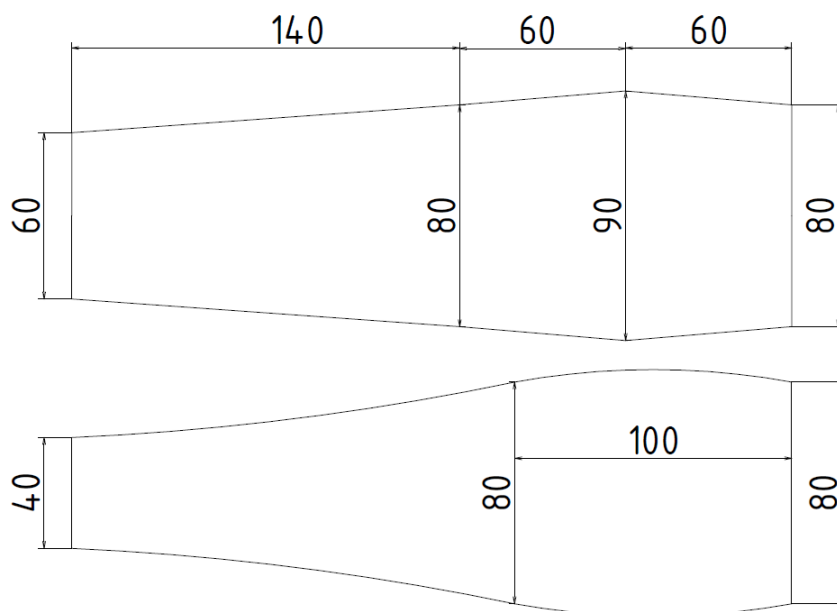
Dále musel být upraven kryt dlaně. Jednalo se o vyříznutí otvoru pro podpory vidlic zápěstního kloubu a otvoru pro lanko k ohýbání ruky směrem dopředu.



Obr. 17: Zápěstní kloub s rukou

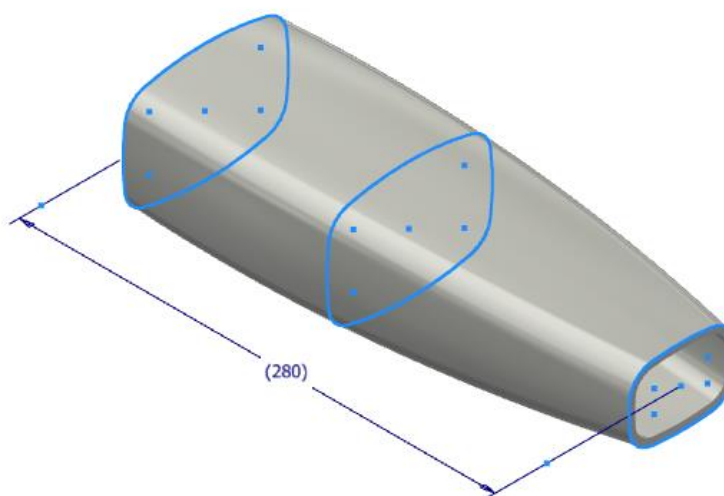
### 3.2.2 Předloktí

Při volbě rozměrů a tvaru předloktí jsem vycházel z měření na svém vlastním předloktí (Obr. 18). Zároveň jsem se snažil dbát ohled na zamýšlené umístění 7 vybraných servomotorů pro ovládání pohybů dlaně a prstů.



Obr. 18: Základní rozměry předloktí

Nejprve jsem vytvořil několik základních řezů a spojil je pomocí funkce *Šablonování*. Následně jsem pomocí funkce *Skořepina* vytvořil základní profil předloktí s tloušťkou stěny 4 mm.

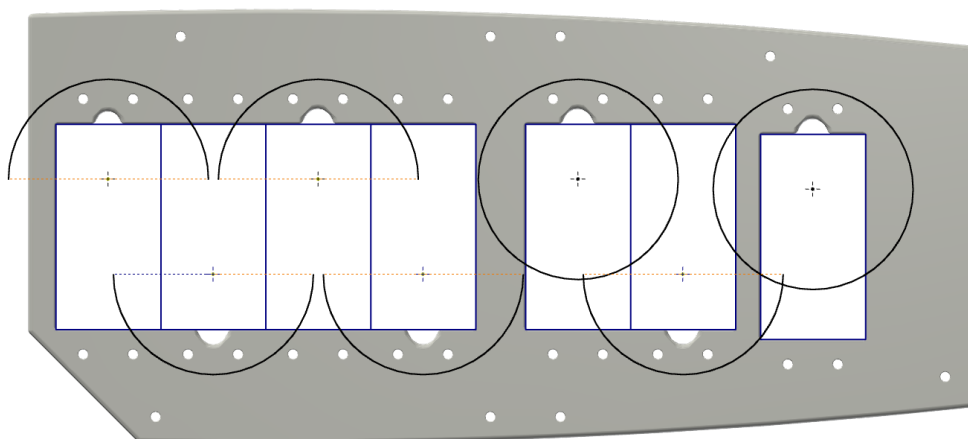


Obr. 19: Základní profil předloktí s řezy pro šablonování



Pro uchycení servomotorů jsem se rozhodl použít desky (Obr. 21, díl 3), která jasně vymezí jejich polohu a zároveň zvětší tuhost celého předloktí. Deska je uchycena na lemu pomocí 8 samořezných šroubů, které jsou uchyceny ve sloupcích. Z důvodu úspory finančních nákladů jsem použil servomotory Power HD 6001 MG a Tower PRO MG995, které byly použity mým předchůdcem. Parametry servomotoru jsou uvedeny v Tab. 1 na straně 17.

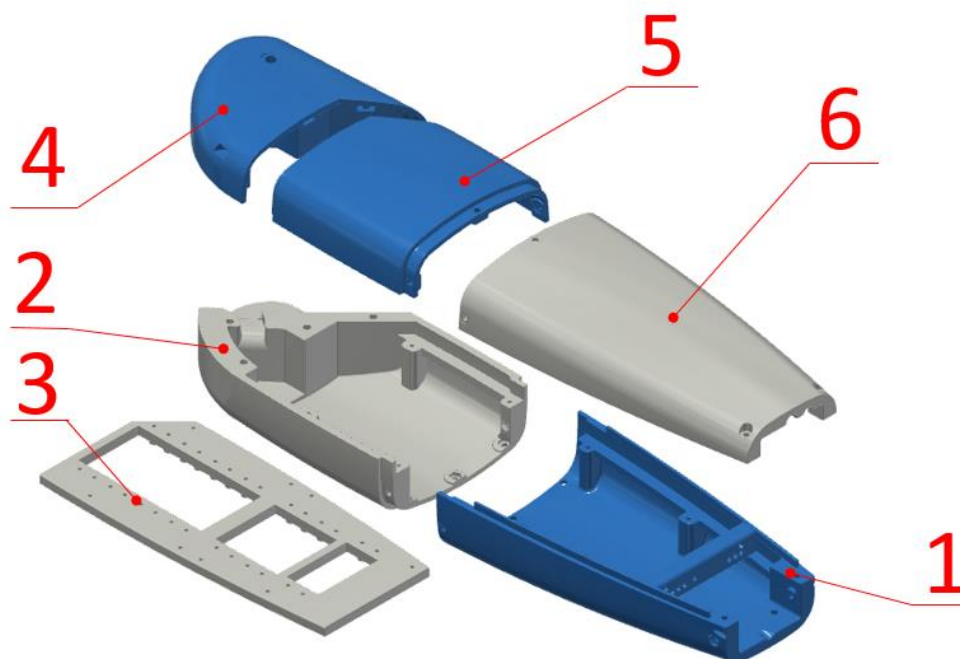
Rozmístění servomotorů na desce jsem se pokusil udělat, co nejúspěšněji. Na Obr. 20 jsou zobrazeny kružnice a půlkružnice představující potenciální prostor, který mohou zabrat jednotlivé servopáky. Pro ovládání prstů uvažuji servopáku s jedním ramenem (Obr. 10d). Na rozdíl od servomotorů pro ovládání zápěstí, pro které počítám se servopáku s dvěma rameny (Obr. 10b). Jednotlivá lože servomotorů v desce jsou vytvořena s mírnou vůlí. Pro lepší zasunutí servomotorů bez deformování kabelů jsem na desce navrhnul půlkruhové výřezy.



Obr. 20: Deska s vyobrazeným rozmístěním servomotorů

V přední části předloktí jsem vytvořil dosedací plochy pro upevnění zápěstního kloubu, který je spojen s dílem předloktí (Obr. 21, díl 1) pomocí čtyř šroubových spojů. Matice těchto spojů jsou umístěny v držáku zápěstního kloubu (Obr. 14).

Kvůli omezení velikosti tisknutelné plochy na 190x190 mm (vyplývající z možností disponibilní 3D tiskárny) bylo nutné předloktí rozdělit na několik částí. Základní nosnou konstrukci tvoří spodní přední (Obr. 21, díl 1) a spodní zadní (Obr. 21, díl 2) část, na které je uchycena loketní část (Obr. 21, díl 4). Předloktí je uzavřeno pomocí krytu složeného ze 2 částí. Zadní část krytu (Obr. 21, díl 5) je překryta s loketní částí. Přední část krytu (Obr. 21, díl 6) je uchycena pomocí 2 šroubových spojů k spodní přední části. Přední a zadní části celého předloktí jsou spojeny pomocí lemů se šroubovými spoji. Vnitřní lemy obsahují lože pro matice.

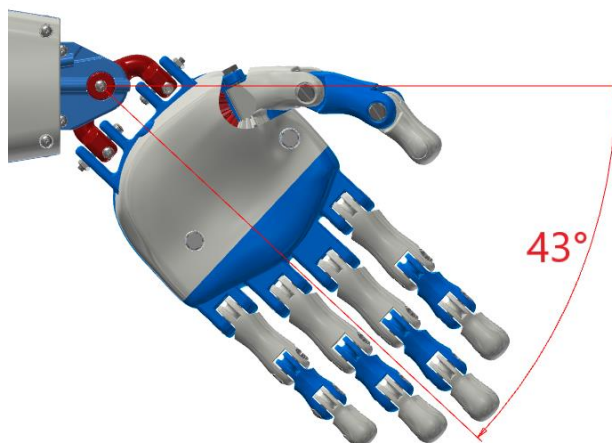


Obr. 21: Rozpad předloktí

Z umístění dílů do sestavy a simulace jednotlivých pohybů jsem odečetl maximální konstrukční hodnoty jednotlivých náklonů. Při srovnání s reálným lidským předloktím jsou omezenější, ale přibližně odpovídají možnostem lidského zápěstí.

Tab. 2: Srovnání možností náklonu modelu a reálného předloktí

Pohyb	Model	Reálné předloktí
Náklon dlaně k palci	$0 \div 43^\circ$	$0 \div 15^\circ$
Náklon dlaně od palce	$0 \div 43^\circ$	$0 \div 45^\circ$
Ohnutí dlaně dopředu	$0 \div 60^\circ$	$0 \div 80^\circ$
Ohnutí dlaně dozadu	$0 \div 70^\circ$	$0 \div 85^\circ$



Obr. 22: Maximální náklon dlaně, model

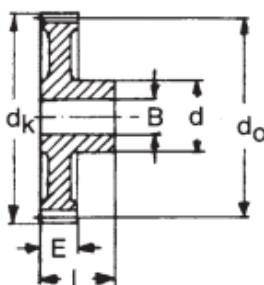
### 3.2.3 Loketní kloub

Pro řešení mechanismu loketního kloubu jsem se rozhodl použít přímého čelního ozubení. Zejména kvůli dostupnosti do formy vstříkovaných plastových ozubených kol, které jsem z důvodů přesnosti a pevnosti, nechtěl mít tištěné. Dalším důvodem je dodatečný převod, který mi ještě zvětší kroutící moment servomotoru pohánějící loketní kloub. Dle rozměrů předloktí jsem zvolil ozubení s výsledným převodovým poměrem:

$$i_{12} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{40}{19} = 2,105 \quad (3.1)$$

Tab. 3: Parametry přímých čelních ozubených kol [15]

Objednací číslo	Modul [mm]	Počet zubů	$\alpha$ [°]	B [mm]	D [mm]	$d_k$ [mm]	$d_o$ [mm]	L [mm]	E [mm]	Hmotnost [g]	Materiál
P2019	2	19	20	8	17,5	42	38	27	15	21,2	Hostaform C
P2040	2	40	20	12	26	84	80	27	15	77	Hostaform C



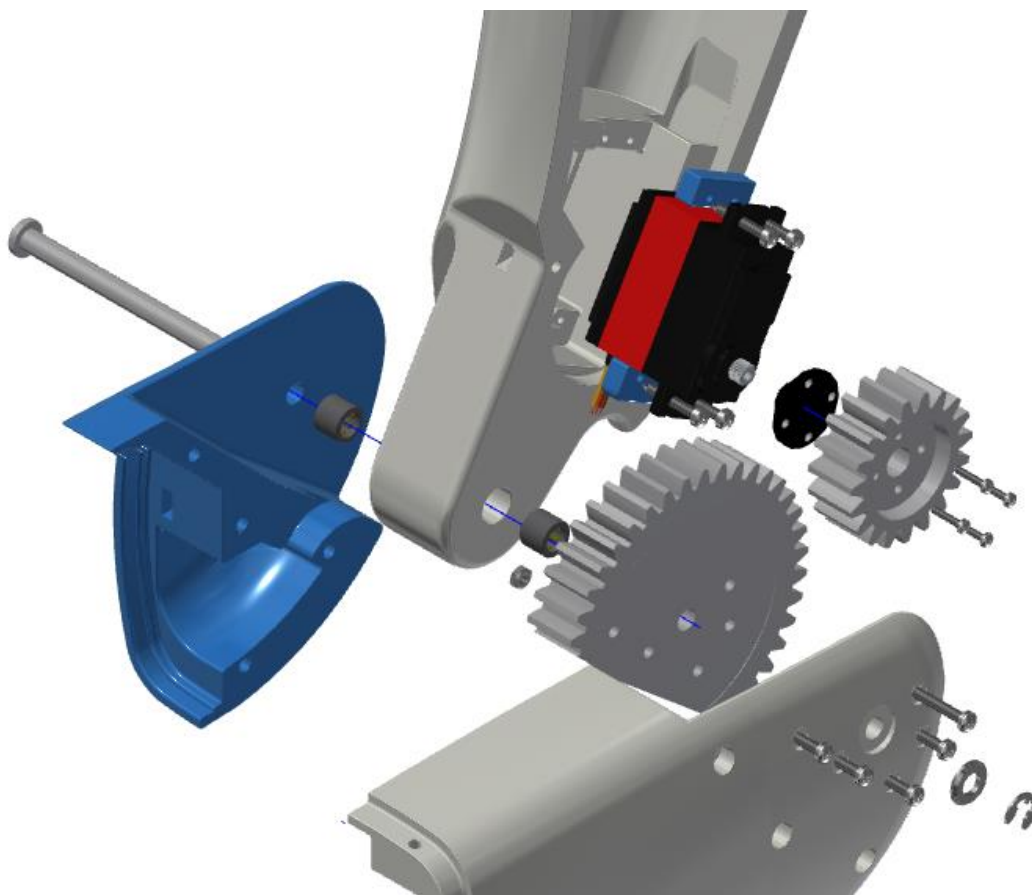
Obr. 23: Schéma základních rozměrů ozubení [15]

Nosná část loketního kloubu se skládá z vidlice tvořené dvěma díly předloktí a držákem paže, které jsou vzájemně spojeny ocelovým čepem (Příloha č. 1) s pojistným kroužkem.

Paže bude připojena přes držák, v jehož přední části je umístěn otvor pro ložiska. Otvor obsahuje osazení uprostřed k axiálnímu zajištění ložisek. Rozhodl jsem se volit jehlová ložiska, která mají díky malému rozdílu vnitřního a vnějšího průměru výhodný rozměr v radiálním směru. Zároveň jsou široká, což zajišťuje velkou dosedací plochu v porovnání s ostatními typy ložisek. Tato velká styčná plocha snižuje nebezpečí deformace materiálu v místě uložení ložisek. Zvolil jsem dvě jehlová ložiska HK 0608.

Tab. 4: Parametry ložiska HK 0608 [16]

Označení	d [mm]	D [mm]	B [mm]
HK 0608	6	12	8



Obr. 24: Rozpad loketního kloubu

Přenos kroutícího momentu ze servomotoru je realizován pomocí plastového ozubeného soukolí. Pastorek je upevněn přímo na servopáku. Ozubené kolo je nutné seříznout dle tvaru zakončení předloktí. Spojení ozubeného kola a předloktí je realizováno pomocí šroubových spojů.

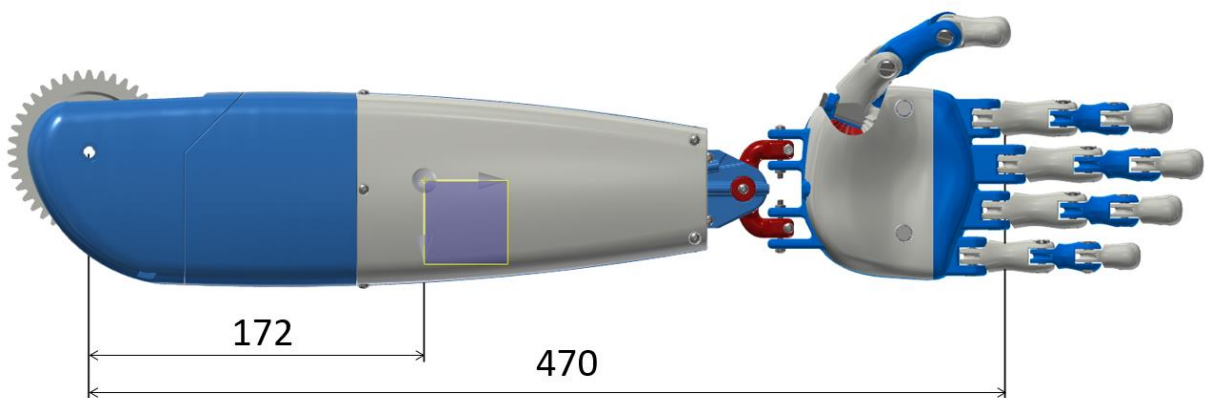
Z dostupných servomotorů uvedených v Tab. 1 str. 17 jsem si vybral: JX servo PDI HV5932MG. Hlavními důvody výběru servomotoru byly: největší dostupný kroutící moment, příznivá cena, malá výška a dostupnost v českém internetovém obchodu. Maximální úhel natočení servomotoru omezí rozsah pohybu loketního kloubu. Řešením by mohlo být odstranění dorazu a výměna potenciometru.

Výhodnější by byl servomotor: RoboStar SBRS 5314HTG [11], který však nebyl v danou dobu dostupný.

Potřebný kroutící moment:

$$M_G = G \cdot r = m_{1m} \cdot g \cdot r = 1,7 \cdot 9,81 \cdot 0,172 = 2,8 \text{ Nm} \quad (3.2)$$

Hmotnost modelu sestavy předloktí  $m_{1m}=1,7$  kg jsem určil pomocí průměrné hustoty materiálu PLA  $\rho_{PLA}=1\,290$  kg·m<sup>-3</sup> [16], ze kterého bude ruka vytištěna a známého objemu vypočteného pomocí funkce programu Autodesk Inventor. A přičtením hmotnosti sedmi servomotorů v předloktí. Tento údaj je pouze orientační, protože při tisku nebudou díly kompletně vyplněny materiálem a zároveň neuvažuje hmotnosti ocelových lanek a vodících hadiček. Polohu těžiště a tím i rameno momentu gravitační síly  $r_t=172$  mm jsem určil pomocí funkce *Těžiště*.



Obr. 25: Sestava předloktí, zápěstí a dlaně pro určení těžiště

Moment JX serva PDI HV5932MG:

$$M_{JX} = \frac{M_{kg} \cdot g}{100} \cdot i_{12} \cdot \eta_{12} = \frac{32,3 \cdot 9,81}{100} \cdot 2,105 \cdot 0,98 = 6,5 \text{ Nm} \quad (3.3)$$

Moment RoboStar SBRS5314HTG:

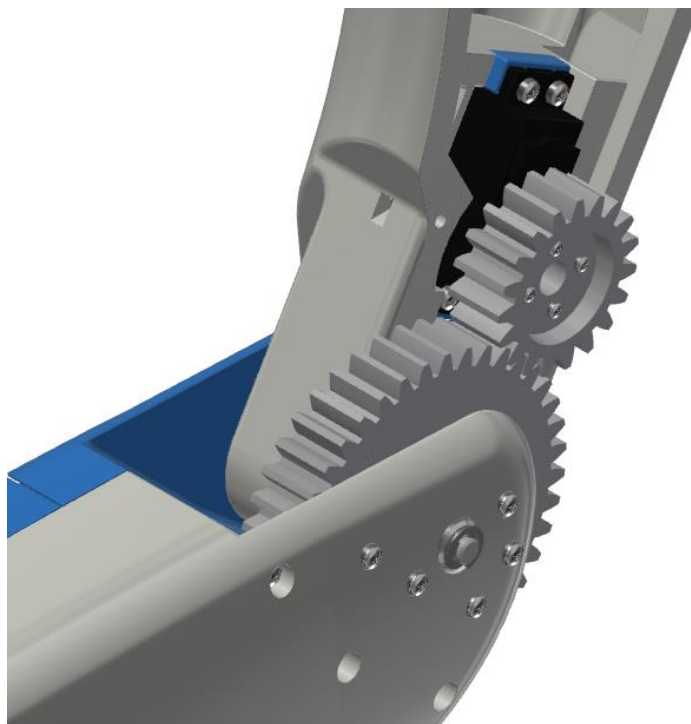
$$M_{RS} = \frac{M_{kg} \cdot g}{100} \cdot i_{12} \cdot \eta_{12} = \frac{53,1 \cdot 9,81}{100} \cdot 2,105 \cdot 0,98 = 10,7 \text{ Nm} \quad (3.4)$$

Kde převodový poměr soukolí  $i_{12}=2,105$  a teoretická účinnost přímého celního ozubení  $\eta=0,98$ .

Maximální teoretická nosnost z pohledu pohonu loketního kloubu:

$$m = \frac{M_{JX}}{r_z \cdot g} = \frac{6,5}{0,47 \cdot 9,81} = 1,4 \text{ kg} \quad (3.5)$$

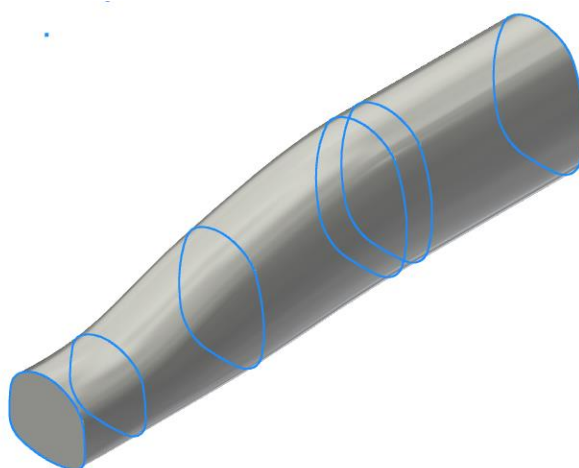
Kde  $r_z=0,47$  m je předpokládané rameno pro zdvih břemene.



*Obr. 26: Složený loketní kloub*

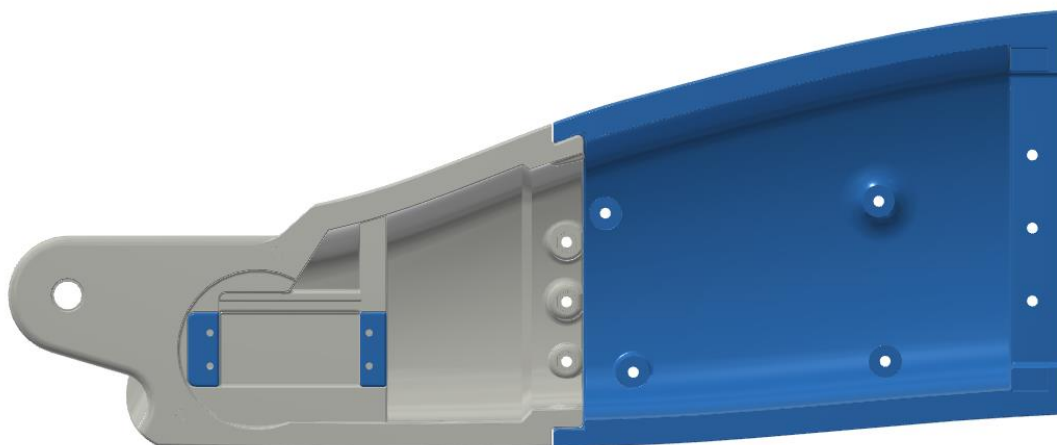
### 3.2.4 Paže

Rozměry a profil paže vychází z přibližného měření mojí paže. Nejprve jsem navrhl sérii základních řezů, které jsem následně spojil pomocí funkce *Šablonování* (Obr. 27). Tento základní profil paže jsem rozdělil na dvě samostatná tělesa a funkcí *Skořepina* jsem vytvořil základní nosnou část paže (Obr. 28) s tloušťkou stěny 8 mm a kryt paže o tloušťce stěny 4 mm. Na přední nosnou část paže jsem připojil držák, který je součástí loketního kloubu.



Obr. 27: Základní profil paže se zobrazenými řezy

Dalším krokem bylo vytvoření lože pro servomotor pohánějící loketní kloub. Lože je uzpůsobeno rozměrům vybraného servomotoru a omezuje případnou výměnu pouze na servomotory podobných rozměrů. Lože servomotoru je navrženo s mírnou vůlí, která umožní správné nastavení osové vzdálenosti ozubených kol. Servomotor bude uložen na distančních podložkách, které umožní axiální nastavení vzájemné polohy ozubených kol.

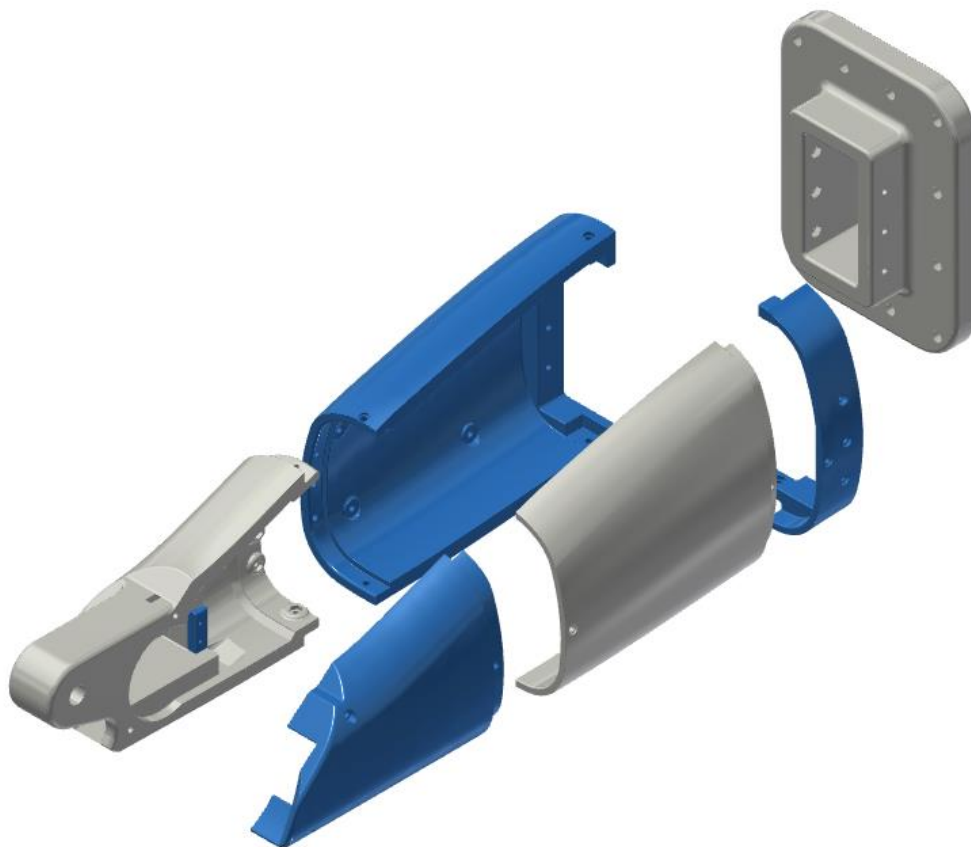


Obr. 28: Základní nosná část paže složená z předního a zadního dílu

Vedle lože loketního servomotoru jsem vytvořil kanál pro vedení kabelů od servomotorů v předloktí. Za ložem pro servomotor jsem vytvořil došedací plochy pro distanční sloupky, na kterých bude umístěno Arduino Mega 2560.

Základní nosnou část i kryt paže bylo opět nutné rozdělit na několik dílů. Ke spojování předních a zadních dílů jsem opět využil systém lemů. Lemy jsou spojeny šroubovými spoji s ložemi pro matice na vnitřní straně.

Paži jsem ukončil pod ramenem a vytvořil přírubu, pomocí které bude uchycena do stojanu.

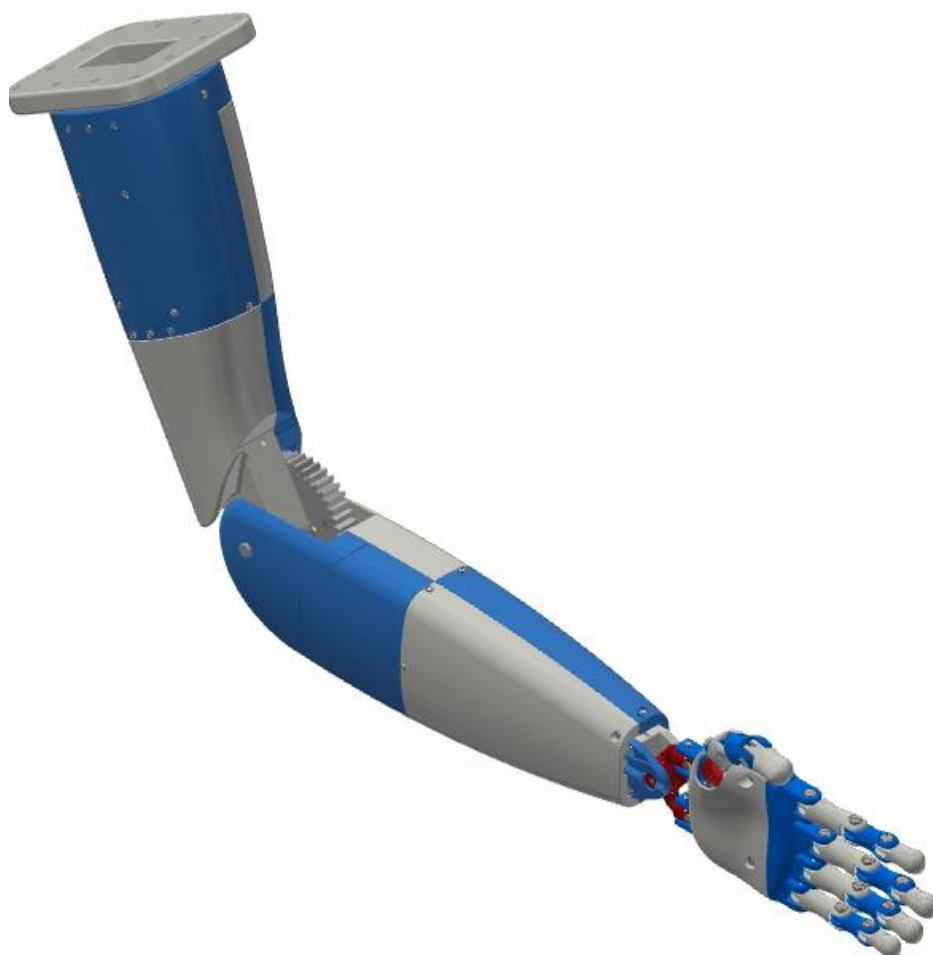


*Obr. 29: Rozpad paže*



### 3.2.5 Horní končetina

Po navržení celé horní končetiny po rameno jsem jednotlivé součásti umístil do sestavy, doplnil o šroubové spoje a nasimuloval jednotlivé koncové pozice. Model je obsažen v Příloze č. 3.



*Obr. 30: Horní končetina*

### 3.3 Tisk a sestavení

Následoval export jednotlivých dílů do formátu stl a jejich vytištění na 3D tiskárně. Stl soubory jsou obsaženy v Příloze č. 3. Tab. 5 uvádí mnou vytvořené, v případě položek 17 a 18 upravené, díly. V Tab. 6 jsou díly, které byly vytvořeny mým předchůdcem. Jsou to díly prstů nezbytné k sestavení celé horní končetiny. Kusovník spojovacího materiálu a nakupovaných součástí je obsažen v Příloze č. 2.

Tab. 5: 3D tištěné díly

Položka	Název	Hmotnost [g]
1	01_Predlokti_deska.stl	57
2	02_Predlokti_nosne_predni.stl	152
3	03_Predlokti_loket_dolni.stl	167
4	04_Predlokti_loket_hodni.stl	64
5	05_Predlokti_kryt_zadni.stl	48
6	06_Predlokti_kryt_predni.stl	75
7	07_Paze_nosna_predni.stl	152
8	08_Paze_kryt_predni.stl	57
9	09_Paze_kryt_zadni.stl	77
10	10_Paze_priruba_kryt.stl	25
11	11_Paze_nosna_zadni.stl	150
12	12_Paze_podlozka.stl	2
13	13_Paze_priruba_hlavni.stl	219
14	14_Zapesti_zaklad.stl	20
15	15_Zapesti_viko.stl	12
16	16_Zapesti_kloub_matice.stl	6
17	17_Zapesti_kloub_sroub.stl	6
18	18_Dlan	17
19	19_Ruka	66
20	20_Pripravek_ozubena_kola	9

Jednotlivé díly jsem zvažil na váze s označením KV 117 SLIM s rozlišením 1 g. Měření je proto pouze přibližné, ale poskytuje lepší představu o rozložení hmoty.

Skutečná hmotnost sestaveného předloktí včetně zápěstního dloubu, servomotorů a ruky je 1597 g. Tato hmotnost je o 103 g menší, než návrhová hmotnost uvažovaná v rovnici (3.2). Z čehož plyne, že skutečné zatížení servomotoru lokte bude menší. Rozdíl mezi návrhovou a skutečnou hmotností je způsoben nastavením výplně 3D tisknutých součástí na 25 %.

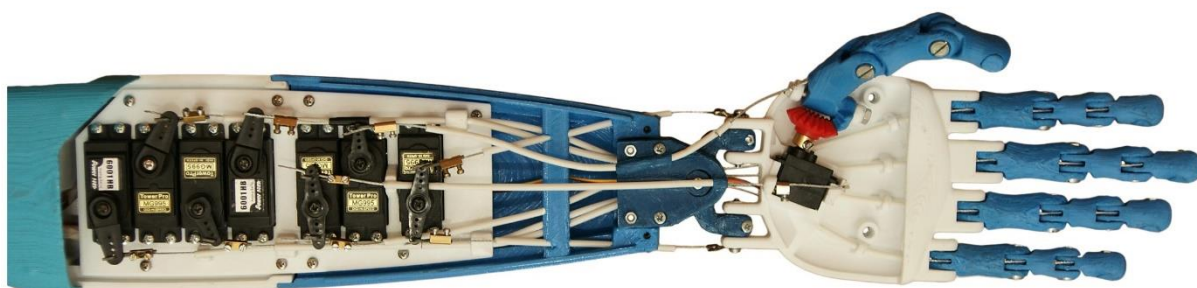
Tab. 6: 3D tištěné díly mého předchůdce [2]

Položka	Název	Množství
1	prvni_clanek_3x.stl	3
2	druhy_clanek_2x.stl	2
3	druhy_clanek_delsi_1x.stl	1
4	treti_clanek_3x.stl	3
5	krytka_3x.stl	3
6	malicek_prvni_clanek_1x.stl	1
7	malicek_druhy_clanek_1x.stl	1
8	malicek_treti_clanek_1x.stl	1
9	malicek_krytka_1x.stl	1
10	palec_prvni_clanek_1x.stl	1
11	palec_druhy_clanek_1x.stl	1
12	palec_treti_clanek_1x.stl	1
13	palec_krytka_1x.stl	1

Po vytištění bylo nutné všechny díly očistit od tiskových podpor. Všechny otvory byly záměrně navrženy menší, a proto bylo nutné jejich převrtání. Při skládání jsem postupoval směrem od dlaně po paži. Nejprve jsem rozebral ruku mého předchůdce [2], ze které jsem použil prsty. U prstů byla vodící lanka zohýbána nebo neměla dostatečnou délku a bylo nutné je vyměnit.

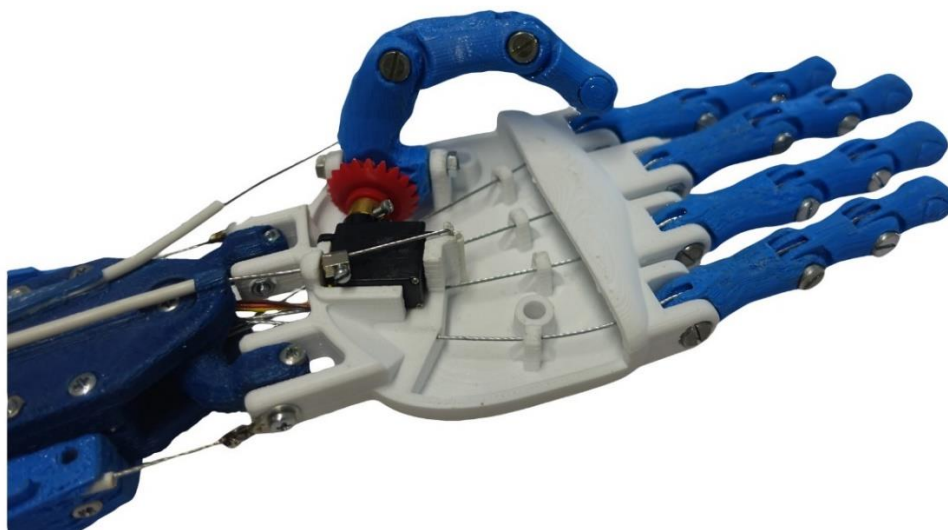
Pro umístění všech matic do odpovídajících loží je bylo nutné zahřát horkovzdušnou pistolí. Matice při svém zasazení nataví termoplast v okolí a po vychladnutí je pevně zafixována v loži.

Po složení vytištěných částí ruky a předloktí jsem osadil desku servomotory a zkusil připojit lanka, bez jejich umístění do vodících hadiček. Dle předpokladu byl velký problém při tlačení lanka, které se pod tlakem ohýbalo a pohyb prstů byl téměř nulový.



Obr. 31: Sestavené předloktí

Původní myšlenku, umístit lanka do teflonových hadiček, jsem musel, z důvodu jejich přílišné poddajnosti, zavrhnout. Namísto nich jsem umístil lanka do plastových bowdenových trubiček s vnitřním průměrem 2 mm, které jsou výrazně tužší. Větší tuhost trubic znemožnila jejich umístění v zápěstním kloubu, kde dochází k největšímu ohybu.



Obr. 32: Detail ruky – bez vodících trubiček v dlani

Při skládání loketního kloubu bylo nutné seříznout ozubené kolo (Obr. 33) dle vytištěného přípravku (Tab. 5, položka 20). Do ozubeného kola jsou vrtány otvory pro šroubové spoje k uchycení k předloktí. Opět vrtáno dle stejného přípravku.



Obr. 33: Seříznuté ozubené kolo P2040

Abych dokázal upevnit pastorek na servomotor loketního kloubu, bylo nutné zkrátit ramena zvolené servopáky. Servopáku jsem ustředil do pastorku, provrtal a sešrouboval šrouby M2x10 se samojistnými maticemi.



*Obr. 34: Pastorek P2019 se servopákou loketního kloubu*

Pro axiální zajištění držáku paže na loketním čepu by bylo vhodné použít axiální ložiska. Z důvodů velmi nízkých otáček a úspory nákladů jsem použil pouze podložky promazané olejem.

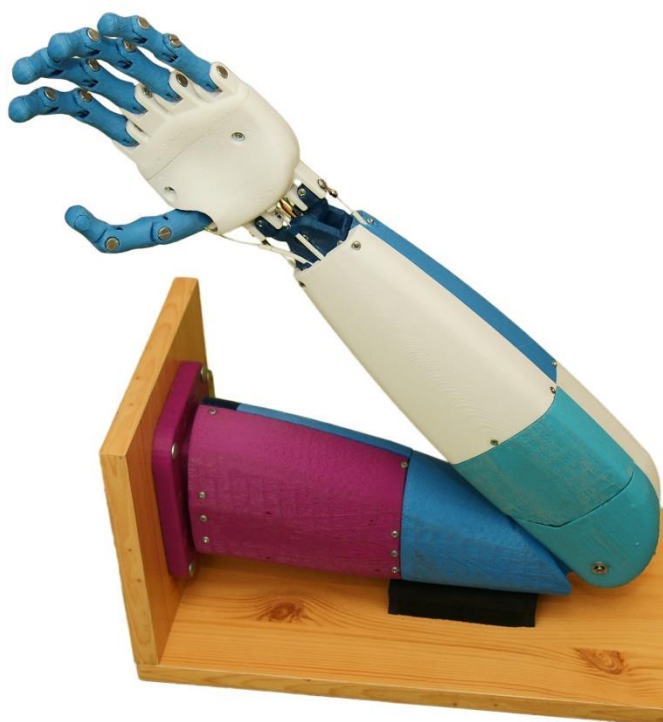


*Obr. 35: Loketní kloub*

Pro uložení celé horní končetiny jsem vytvořil speciální držák a vytvořil oporu pro opření paže. Tento držák zároveň usnadňuje přepravu celé sestavy robotické ruky.



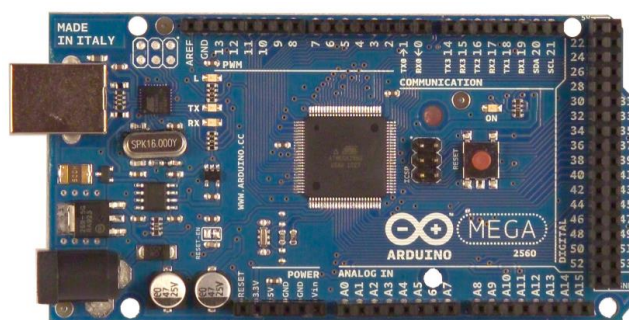
*Obr. 36: Horní končetina – částečně natažená*



*Obr. 37: Horní končetina – pokrčená*

### 3.4 Elektronické zapojení a naprogramování

Pro ovládání celé sestavy jsem použil mikropočítač Arduino. Jedná se o otevřenou elektronickou platformu s jednoduchým hardwerm a vývojovým prostředím pro tvorbu programů. Základní deska Arduina se skládá z mikrokontroleru, krystalu, napájecího zdroje a převodníku pro komunikaci s počítačem. Podle požadované funkce lze základní Arduino rozšířit o přídavné moduly, takzvané Arduino Shiedly. Pro programování se používá programovací jazyk Arduino, který je založený na jazyce Wiring a program Arduino software (IDE). [17]



Obr. 38: Arduino MEGA 2560 [17]

Vzhledem k většímu počtu devíti servomotorů jsem využil verzi MEGA 2560 rozšířenou o Arduino MEGA senzor shield. Rozšíření o senzor shield umožňuje napájení servomotorů ze samostatného zdroje, zatímco základní deska je napájena pomocí programovacího USB kabelu z počítače.

Pro ovládání servomotorů jsem využil knihovnu *servo.h*, která pracuje s objekty typu *Servo*. Tyto objekty obsahují několik funkcí, ze kterých jsem použil funkce:

- *attach()* – Připojí *Servo* objekt k vybranému pinu.
- *write()* – Nastaví pozici servomotoru. Vstupním parametrem je celočíselná hodnota od 0 po 180, která udává úhel natočení. Stejně hodnoty minima a maxima platí i pro servomotory s jiným maximálním úhlem natočení.

Nejprve jsem sundal servopáky z jednotlivých servomotorů, připojil postupně servomotory na odpovídající piny senzor shieldu a pomocí jednoduchého programu (Obr. 39) nastavil postupně všechny servomotory do základních poloh. Pro prsty jsem použil jako výchozí polohu hodnotu 20, která odpovídá stejné hodnotě natočení ve stupních. Pro servomotory ovládající zápěstí jsem za základní polohu určil 90°.

```

1 #include <Servo.h>
2
3 Servo servo1;
4
5 const int s1 = 90;
6
7 void setup() {
8   servo1.attach(2);
9 }
10
11 void loop() {
12   servo1.write(s1);
13 }

```

Obr. 39: Program pro nastavení základní polohy servomotorů

Po nastavení základních poloh jsem upevnil servopáky zpět na odpovídající servomotory a pomocí programu (Obr. 40) otestoval pohybové možnosti celé sestavy. Pomocí příkazu `#include <Servo.h>` načítám knihovnu pro práci se servomotory. Dalším krokem je vytvoření vlastního objektu typu `Servo` s názvem `servo1`.

Následuje deklarace proměnné `pos1` typu `integer` (celočíslný datový typ) a celočíselné konstanty `max1` a její nastavení na hodnotu 160. Tato konstanta určuje maximální koncovou polohu servomotoru pro náklon zápěstí a vzešla z testování pohybu pomocí níže uvedené smyčky.

Po deklarační části následuje funkce `setup()`, která je zavolána pouze po každém zapnutí Arduina. V této části dochází k inicializaci sériového portu pro výpis na monitor počítače, přiřazení objektu `servo1` k pinu 2 a nastavení servomotoru jedna do výchozí polohy `s1`.

Program pokračuje nekonečnou smyčkou `loop()`, která obsahuje cyklus `for`. Během tohoto cyklu je postupně zvyšována hodnota proměnné `pos1` od základní polohy `s1` po koncovou polohu `max1`. Během každé iterace cyklu `for` dochází k nastavení nové polohy servomotoru a nastavená poloha je zároveň příkazem `Serial.println(pos1)` vypsána na monitor. Posledním příkazem v cyklu `for` je příkaz `delay(15)`, který způsobí, že program počká 15 milisekund než cyklus přejde do další iterace. Tímto způsobem se dá nastavovat rychlost otáčení servomotoru. Přidáváním dalších cyklů `for` s jinými vstupními parametry a připojením ostatních servomotorů jsem vytvořil program pro otestování pohybu všech částí sestavy. Tento program je funkční, ale neumožňuje jednoduše pohybovat více servomotory – s různou rychlostí otáčení – najednou.



```

1 #include <Servo.h> //nacteni knihovny
2
3 Servo servol; // vytvoření objektu typu servo
4
5 int pos1; //deklarace proměnné pos1 typu integer
6 const int max1=160; //deklarace celočíselné konstanty
7 const int min1=0;
8 const int s1=90;
9
10 void setup() {
11     Serial.begin(9600); //inicializace seriového portu pro výpis na monitor
12     servol.attach(2); //přiřazení servomotor k pinu
13     servol.write(s1); // nastavení základní polohy
14 }
15
16 void loop() {
17 //naklon dlane - k palci, od palce a stred
18 for (pos1 = s1; pos1 <= max1;pos1 +=1){
19     servol.write(pos1);
20     Serial.println(pos1);
21     delay (15);
22 }
23 }
24
25 for (pos1 = max1; pos1 >= min1;pos1 -=1){
26     servol.write(pos1);
27     Serial.println(pos1);
28     delay (15);
29 }

```

Obr. 40: Část programu: Prvni\_program

Pro řešení více současných pohybů najednou jsem využil knihovnu *VarSpeedServo* [18], která nahrazuje knihovnu *Servo*. Umožňuje pohyb až 8 servomotorů najednou s nastavením rychlosti otáčení. Funkce *write(1,2,3)* vyžaduje tři parametry. První parametr s celočíselnou hodnotou 0÷180 nastavuje pozici servomotoru. Druhý parametr v rozmezí 1÷255 nastavuje rychlost otáčení servomotoru. Poslední parametr je logického typu boolean. Nastavení hodnoty false způsobí, že program nečeká na dokončení pohybu servomotoru a začne provádět následující příkaz.

Program (Obr. 41) má – až na použití jiné knihovny pro servomotory – obdobnou deklarační část s přecházejícím. V nekonečné smyčce *loop()* je nejprve nastaven pohyb servomotoru loketního kloubu s označením *servo9*. Servomotor se začne pohybovat do polohy 50, rychlostí 10 současně dojde k vykonání následujících příkazů. Následuje cyklus *while*, který se opakuje, pokud je splněna podmínka. V tomto případě dokud funkce

`isMoving()` vrací hodnotu `true`. Cyklus obsahuje dva příkazy na pohyb servomotoru `servo1`, který ovládá náklon zápěstí z jedné koncové polohy do druhé. Během pohybu servomotoru lokte dojde k pěti iteracím cyklu `while`. Po dosažení požadované polohy servomotoru `servo9` dojde k doběhnutí cyklu `while` a vykonání dalšího příkazu. Servomotor `servo9` se začne pohybovat zpět do výchozí polohy a během pohybu dojde opět k několika iteracím identického cyklu `while`.

```
68 void loop() {
69   servo9.write(50,10,false);
70   Serial.println("Pohyb dolu");
71   while(servo9.isMoving()==true) {
72     servo1.write(min1,speed1,true);
73     servo1.write(max1,speed1,true);
74     Serial.println(servo9.isMoving());
75   }
76   servo9.write(160,10,false);
77   Serial.println("Pohyb nahoru");
78   while(servo9.isMoving()==true) {
79     servo1.write(min1,speed1,true);
80     servo1.write(max1,speed1,true);
81     Serial.println(servo9.isMoving());
82   }
83 }
```

Obr. 41: Část programu: Zamavani

Pro otestování různých pohybů sestavy jsem vytvořil několik programů, které jsou obsaženy v Příloze č. 3.

Při pohybu zápěstního kloubu dochází ke změnám trajektorie lanek prstů a tím i nechtěnému pohybu prstů. Řešením tohoto nechtěného jevu by mohly být korekce pohybu prstů v podobě několika současných pohybů. Toto řešení jsem se snažil naznačit a otestovat v programu `Ohnuti__dlane__korekce`, který je obsažen v Příloze č. 3.

## 4 Závěr

Výsledek mé bakalářské práce rozšířil existující model humanoidní dlaně s prsty o řešení zápěstní, předloktí, loketního kloubu a paže až po rameno. Model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor Professional 2018.

Celá horní končetina je složena z dílů, tak aby mohla být vytištěna na 3D tiskárně s maximální tiskovou plochou 190x190mm. Ke spojení jednotlivých dílů je použito šroubových spojů většinou velikosti M3 různých délek. Celá sestava je tak jednoduše rozebíratelná a v případě poškození některého z dílů i snadno opravitelná.

Jako aktuátory jsou použity servomotory, které pohybují s prsty a zápěstím kloubem pomocí ocelových lanek o průměru 1,2 mm. Ocelová lanka jsou vedena bowdenových plastových trubicích, aby nedocházelo k nežádoucímu ohybu lanek. Pohyb zápěstního kloubu umožňuje servomotor v kombinaci s přímým čelním ozubením. Pro řízení jednotlivých servomotorů je použito Arduino MEGA 2560 rozšířené o senzor shield.

Na základních algoritmech byly otestovány pohybové schopnosti sestavy. Při pohybech zápěstí dochází ke změně trajektorie lanek prstů a jejich nechtěnému pohybu. Tento nechtěný jev lze odstranit současným korekčním pohybem servomotorů ovládajících prsty. Tento postup je naznačen v programu *Ohnuti\_dlane\_korekce* uvedeného v Příloze č. 3.

Kromě konstrukce dalších mechanických částí humanoidního robota, by se případní další pokračovatelé tohoto projektu mohli věnovat implementaci senzorů a vývoji sofistikovanějších řídicích algoritmů. Například koncové články prstů by mohly být vybaveny dotykovými senzory pro detekci uchycovaných předmětů nebo senzory pro snímání polohy jednotlivých prstů, čímž by mohlo být zajištěno přesnější řízení.

Pokračováním toho projektu by v budoucnu mohl být sestaven celý humanoidní 3D tištěný robot.

## 5 Reference

- [1] R. U. R. *Československá bibliografická databáze* [online]. b.r. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.cbdb.cz/kniha-982-r-u-r-r-u-r>
- [2] ŠULC, Ondřej. *3D tisknutelná robotická ruka*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
- [3] HUDÁK, Radovan. *Memorix anatomie*. 4. Praha: Triton, 2017. ISBN 978-80-7553-420-0.
- [4] Shadow Dexterous Hand Technical Specification. In: *Shadow Robot* [online]. 2015, s. 14 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: [https://www.shadowrobot.com/wp-content/uploads/shadow\\_dexterous\\_hand\\_technical\\_specification\\_E\\_20150827.pdf](https://www.shadowrobot.com/wp-content/uploads/shadow_dexterous_hand_technical_specification_E_20150827.pdf)
- [5] Tactile Robotic Hand with Air Muscles. In: *Hacked Gadgets* [online]. 2007 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: [http://hackedgadgets.com/wp-content/shadow\\_robot\\_company\\_hand\\_c5\\_claw\\_back.jpg](http://hackedgadgets.com/wp-content/shadow_robot_company_hand_c5_claw_back.jpg)
- [6] HONUS, . How to make air muscles!. *Instructable* [online]. 2007 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/How-to-make-air-muscles/>
- [7] FISHEL, Jeremy, Gary LIN, Blaine MATULEVICH a Gerald LEOB. BioTac Product Manual. In: *Syntouch inc* [online]. 2015 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: [https://www.syntouchinc.com/wp-content/uploads/2017/01/BioTac\\_Product\\_Manual.pdf](https://www.syntouchinc.com/wp-content/uploads/2017/01/BioTac_Product_Manual.pdf)
- [8] LANGEVIN, Gaël. InMoov. *InMoov* [online]. 2013 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://inmoov.fr/>
- [9] Hand and Forarm assembly 3D views. In: *InMoov* [online]. b.r. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://inmoov.fr/build-yours/hand-and-forarm-assembly-3d-views/>
- [10] Servo motor. *Arduino-shop* [online]. b.r. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://navody.arduino-shop.cz/arduino-projekty/servo-motor.html>

- [11] Rototic servo. *Hobby King* [online]. b.r. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: [https://hobbyking.com/en\\_us/3d-printing-diy/robotics-diy-kits/servo.html](https://hobbyking.com/en_us/3d-printing-diy/robotics-diy-kits/servo.html)
- [12] Dynamixel MX-106T Robot Actuator. *Trossen robotics* [online]. b.r. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://www.trossenrobotics.com/p/mx-106t-dynamixel-robot-servo.aspx>
- [13] JX servo PDI-HV5932MG. In: *JX Servo* [online]. b.r. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <https://www.jxservo.cz/JX-servo-PDI-HV5932MG-180-digital-59g-0-1sec-32kg-d130.htm>
- [14] Tower Pro MG995. *TowerPro* [online]. b.r. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.towerpro.com.tw/product/mg995/>
- [15] Plastová čelní ozubená kola. *TEA Technik* [online]. b.r. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.teatechnik.cz/plastova-celni-ozubena-kola/>
- [16] Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer. *MatWeb* [online]. b.r. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278>
- [17] Co je to Arduino. *Arduino* [online]. b.r. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://arduino.cz/co-je-to-arduino/>
- [18] VarSpeedServo. *GitHub* [online]. 2018 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://github.com/netlabtoolkit/VarSpeedServo>
- [19] *Jiří Forejt - Železářství na Podbabské* [online]. b.r. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://zelezarstvinapodbabske.cz/>
- [20] Bowdenová trubice M3 1m vnější. *RC - život* [online]. b.r. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: [https://www.rc-zivot.cz/bowdenova-trubice-m3-1m-vnejsi\\_7858](https://www.rc-zivot.cz/bowdenova-trubice-m3-1m-vnejsi_7858)
- [21] Jehlová ložiska. *Tobex* [online]. b.r. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.tobex.cz/eshop/loziska-tobex-praha/jehlova-a-linearni-loziska/jehlova-loziska---katalog-lozisek.html>

## Seznam obrázků

Obr. 1: Shadow Dexterous Hand [5] .....	10
Obr. 2: Senzor BioTac [7] .....	11
Obr. 3: InMoov dlaň [9].....	12
Obr. 4: InMoov rozpad zápěstí [9] .....	13
Obr. 5: InMoov rozpad předloktí, varianta 1 [9].....	13
Obr. 6: InMoov – uchycení servomotorů v předloktí, verze 1 vlevo, verze 2 vpravo [9] ....	14
Obr. 7: InMoov předloktí zezadu [9] .....	14
Obr. 8: InMoov paže [9].....	15
Obr. 9: InMoov paže – detail mechanismu polohování předloktí [9].....	16
Obr. 10: Přehled obvyklých servopák [11].....	16
Obr. 11: Kloub se 2 stupni volnosti pomocí servomotorů [12] .....	18
Obr. 12: Výchozí model ruky [2] .....	19
Obr. 13: Pohyblivá část kloubu zápěstí.....	20
Obr. 14: Zápěstní kloub – držák.....	21
Obr. 15: Původní hřbet ruky [2].....	21
Obr. 16: Upravený hřbet ruky.....	22
Obr. 17: Zápěstní kloub s rukou .....	22
Obr. 18: Základní rozměry předloktí .....	23
Obr. 19: Základní profil předloktí s řezy pro šablonování.....	23
Obr. 20: Deska s vyobrazeným rozmístěním servomotorů .....	24
Obr. 21: Rozpad předloktí .....	25
Obr. 22: Maximální náklon dlaně, model.....	25
Obr. 23: Schéma základních rozměrů ozubení [15] .....	26
Obr. 24: Rozpad loketního kloubu .....	27
Obr. 25: Sestava předloktí, zápěstí a dlaně pro určení těžiště .....	28
Obr. 26: Složený loketní kloub.....	29
Obr. 27: Základní profil paže se zobrazenými řezy .....	30
Obr. 28: Základní nosná část paže složená z předního a zadního dílu .....	30
Obr. 29: Rozpad paže.....	31
Obr. 30: Horní končetina .....	32
Obr. 31: Sestavené předloktí .....	34
Obr. 32: Detail ruky – bez vodících trubiček v dlani .....	35
Obr. 33: Seříznuté ozubené kolo P2040.....	35

Obr. 34: Pastorek P2019 se servopákou loketního kloubu.....	36
Obr. 35: Loketní kloub.....	36
Obr. 36: Horní končetina – částečně natažená.....	37
Obr. 37: Horní končetina – pokrčená .....	37
Obr. 38: Arduino MEGA 2560 [17].....	38
Obr. 39: Program pro nastavení základní polohy servomotorů.....	39
Obr. 40: Část programu: Prvni_program.....	40
Obr. 41: Část programu: Zamavani.....	41

## Seznam tabulek

Tab. 1:Přehled servomotorů.....	17
Tab. 2: Srovnání možností náklonu modelu a reálného předloktí.....	25
Tab. 3: Parametry přímých čelních ozubených kol [15].....	26
Tab. 4: Parametry ložiska HK 0608 [16].....	26
Tab. 5: 3D tištěné díly.....	33
Tab. 6: 3D tištěné díly mého předchůdce [2].....	34

## Seznam příloh

Příloha č. 1: Čep loketního kloubu

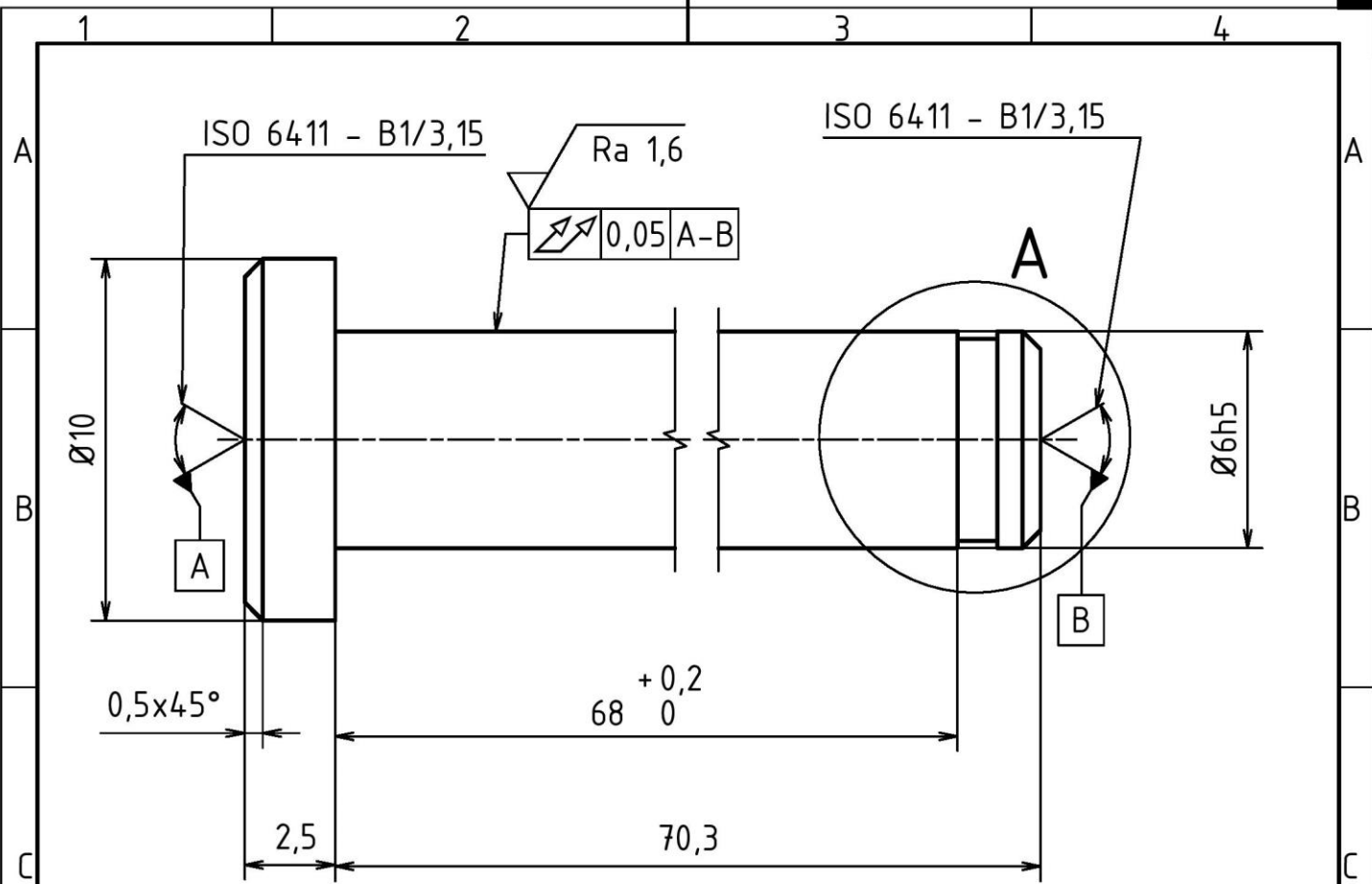
Příloha č. 2: Kupované součásti a spojovací materiál

Příloha č. 3: CD

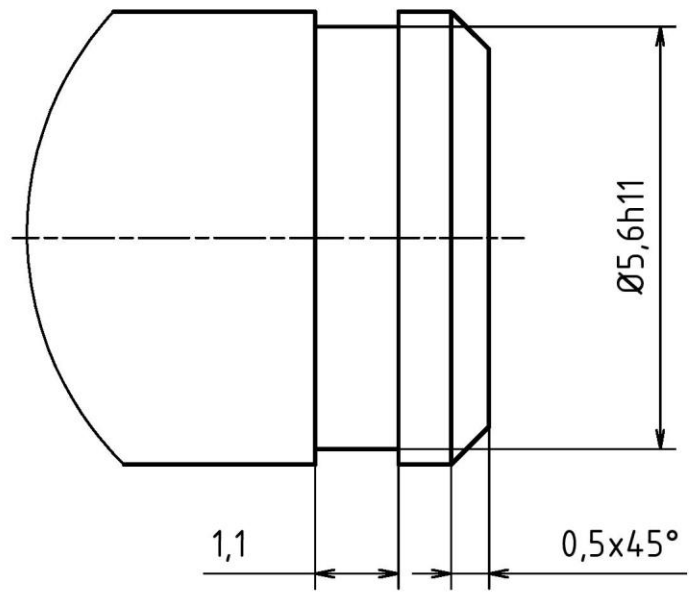
## Seznam použitého softwaru

Autodesk Inventor Professional 2018

Arduino IDE



A ( 10:1 )



MATERIAL: 11 500									
POLOTOVAR: ČSN 42 5510 - KR12-80									
TOLEROVÁNÍ DLE ISO 8015									
PŘESNOST ISO 2768 - mK									
VSEOB. TOL. ISO 8062 -									

Autor		Datum		Podpis		Datum		HMŮTNOST 0,017 kg		MĚŘÍTKO	
NAVRHL	Vaněk Jakub	15.03.2018	PŘEZK.					SESTAVA	5:1 (10:1)		
KRESLIL	Vaněk Jakub	19.05.2018	SCHVÁLIL					KUSOVNÍK	PROMÍTÁNÍ: $\begin{matrix} \text{A} \\ \text{B} \end{matrix}$ (ISO E)		

<p>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</p> <p>FAKULTA STROJNÍ</p>	NÁZEV		PŘÍLOHA Č. 1: ČEP LOKETNÍHO KLOUBU	
	ČÍSLO VÝKRESU		2018-01	
				LIST: 1 / 1



## Příloha č. 2: Kupované součásti a spojovací materiál

Položka	Název	Norma	Množství	Zakoupeno
1	ŠROUB ST 2,9x13 -C -Z	ISO 7049	36	[19]
2	ŠROUB ST 2,9x19 -C -Z	ISO 7049	4	[19]
3	ŠROUB S ČOČKOVOU HLAVOU S KŘÍŽOVOU DRÁŽKOU M2x10-4.8-Z	ISO 7045	4	[19]
4	SAMOJISTNÁ ŠESTIHRANNÁ MATICE M2-8	DIN 985	4	[19]
5	ŠROUB S ČOČKOVOU HLAVOU S KŘÍŽOVOU DRÁŽKOU M3x8-4.8-Z	ISO 7045	6	[19]
6	ŠROUB S ČOČKOVOU HLAVOU S KŘÍŽOVOU DRÁŽKOU M3x10-4.8-Z	ISO 7045	8	[19]
7	ŠROUB S ČOČKOVOU HLAVOU S KŘÍŽOVOU DRÁŽKOU M3x16-4.8-Z	ISO 7045	11	[19]
8	ŠROUB S ČOČKOVOU HLAVOU S KŘÍŽOVOU DRÁŽKOU M3x20-4.8-Z	ISO 7045	9	[19]
9	ŠROUB S ČOČKOVOU HLAVOU S KŘÍŽOVOU DRÁŽKOU M3x25-4.8-Z	ISO 7045	6	[19]
10	ŠROUB S ČOČKOVOU HLAVOU S KŘÍŽOVOU DRÁŽKOU M3x30-4.8-Z	ISO 7045	11	[19]
11	ŠROUB S ČOČKOVOU HLAVOU S KŘÍŽOVOU DRÁŽKOU M4x60-4.8-Z	ISO 7045	4	[19]
12	LÍCOVANÝ ŠROUB M4x12	DIN 923	8	
13	LÍCOVANÝ ŠROUB M4x10	DIN 923	3	
14	LÍCOVANÝ ŠROUB M4x8	DIN 923	5	
15	ŠROUB S ŠESTIHRANNOU HLAVOU M4x40	ISO 4017	1	
16	ŠESTIHRANNÁ MATICE M3	ISO 4032	47	[19]
17	ŠESTIHRANNÁ MATICE M4	ISO 4032	17	[19]
18	SAMOJISTNÁ ŠESTIHRANNÁ MATICE M3-8	DIN 985	5	[19]
19	POJISTNÝ KROUŽEK TRMENOVÝ 6	ČSN 02 2929	1	[19]
20	PODLOŽKA 6	ČSN 02 1702	1	[19]
21	OCELOVÉ LANKO 300x1,2 mm		1	[19]
22	BOWDENOVÁ TRUBICE M3 1m		3	[20]
23	DISTANČNÍ SLOUPEK M3		4	
24	SERVOMOTOR POWER HD 6001 MG		7	
25	SERVOMOTOR JX SERVO PDI HV5932MG		1	[13]
26	SERVOMOTOR ES 08MAII		1	
27	JEHLOVÉ LOŽISKO HK 0608		2	[21]
28	ČELNÍ OZUBENÉ KOLO P2019		1	[15]
29	ČELNÍ PLASTOVÉ OZUBENÉ KOLO P2040		1	[15]
30	KABELOVÉ LISOVACÍ OKO OI 1,5-M3		2	