



České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta strojní  
Ústav přístrojové a řídicí techniky

# Bakalářská práce

Konstrukce robotické ruky

## **Prohlášení**

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

Datum: .....

Podpis .....

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Javorský** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **473616**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Informační a automatizační technika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Konstrukce robotické ruky**

Název bakalářské práce anglicky:

**Construction of a robotic hand**

Pokyny pro vypracování:

Zkonstruuje robotickou ruku k humanoidnímu robotu se zaměřením na ramenní kloub.

- 1) Navrhněte mechaniku, díly nejlépe 3D tištěné
- 2) Nainstalujte pohony a ostatní elektroniku
- 3) Experimentálně ověřte funkčnost

Seznam doporučené literatury:

Paul H. Chappell, Mechatronic Hands: Prosthetic and robotic design (Control, Robotics and Sensors) 1st Edition, ISBN-10: 1785611542, The Institution of Engineering and Technology; 1st edition (June 6, 2016)

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: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.06.2021**

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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Anotační list

Jméno autora: Petr Javorský  
Název BP: Konstrukce robotické ruky  
Anglický název: Construction of a robotic hand  
Rok: 2021

Obor: Informační a automatizační technika  
Ústav: Přístrojové a řídicí techniky  
Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.

Bibliografické údaje: Počet stran:  
Počet obrázků:  
Počet tabulek:

Klíčová slova: robotická ruka, Arduino, servomotor, 3D tisk  
Keywords: robotic hand, Arduino, servo, 3D print

### Anotace:

Tato bakalářská práce popisuje postup návrhu a následně konstrukce ramenní části horní končetiny pro humanoidního robota. Ruka je vytvořena pomocí 3D tiskárny a ovládána pomocí arduina. Začátek bakalářské práce uvede již existující projekty řešící konstrukci robotické končetiny a představí různé možnosti rozpořívování podobné konstrukce. V práci je následně proveden návrh konstrukce ramenního kloubu v programu Autodesk Inventor Professional 2019, která navazuje na předchozí bakalářské práce, které se zabývali konstrukcí robotické ruky od prstů na ruce po loket. V další části práce je popsána výroba a sestavení této sestavy a elektrické propojení všech komponent. V závěru práce je popsáno zapojení končetiny k Arduinu a otestování celé sestavy.

### Abstract:

This bachelor's thesis describes the process of designing and then constructing the upper arm for a humanoid robot. The hand is created using a 3D printer and controlled by Arduino. The beginning of the thesis will present already existing projects addressing the construction of the robotic limb and present various methods of moving similar construction. The work subsequently performs a design of the shoulder joint in the Autodesk Inventor Professional 2019 program, which builds on previous bachelor thesis that dealt with the design of the robotic hand from fingers to elbow. The next part of the work describes the production and assembly of this assembly and the electrical interconnection of all components. The conclusion of the work describes the involvement of the limb with Arduino and testing of the entire assembly.

## Seznam použitých symbolů a značek

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Význam</b>
M	[Nm]	Kroutící moment
$M_{MAX}$	[Nm]	Maximální kroutící moment
m	[kg]	Hmotnost
g	[m·s <sup>-2</sup> ]	Gravitační zrychlení
l	[m]	Délka
$\alpha$	[°]	Úhel natočení
$\alpha_{MAX}$	[°]	Maximální úhel natočení
i	[1]	Převodový poměr
z	[1]	Počet zubů
$U_{IN}$	[V]	Vstupní napětí

# 1 Obsah

1	Obsah .....	6
2	Úvod.....	7
3	Teoretická část.....	8
3.1	Horní končetina z anatomického hlediska .....	8
3.1.1	Ramenní kloub .....	8
3.2	Vývoj protéz .....	9
3.3	Existující projekty .....	10
3.3.1	Reachy.....	10
3.3.2	InMoov.....	11
3.4	Pohony.....	12
3.4.1	Krokový motor .....	12
3.4.2	Servomotor .....	13
3.4.3	Kontinuální servomotor .....	14
3.5	Snímače úhlu natočení.....	14
3.5.1	Optický enkodér.....	14
3.5.2	Potenciometr .....	15
3.5.3	Resolver.....	15
3.5.4	Kapacitní snímač natočení .....	15
3.6	Arduino.....	16
3.6.1	Senzor shield .....	16
4	Praktická část .....	18
4.1	Výchozí stav.....	18
4.2	Postup návrhu .....	18
4.2.1	Návrh řešení ramenního kloubu .....	18
4.2.2	Návrh pohonů kloubů .....	19
4.2.3	Návrh ramene .....	21
4.2.4	Návrh paže .....	24
4.2.5	Návrh trupu.....	25
4.2.6	Připojení pastorku k servu .....	25
4.3	Tisk a sestavení.....	26
4.4	Zapojení elektroniky.....	29
4.5	Programování .....	32
5	Závěr.....	35
6	Seznam zdrojů.....	36
7	Seznam obrázků .....	38
8	Seznam příloh .....	38

## 2 Úvod

Snaha o vytvoření funkční protézy jakékoliv chybějící části lidského těla existuje už od starověku, ale teprve s příchodem novověku začali být něčím více než jen jednoduchou dřevěnou protézou. A až teprve s příchodem moderních technologií se mohl rozjet vývoj těchto protéz naplno. S příchodem technologií, jako jsou mikropočítače, 3D tisk nebo internet, lze takovou tu jednodušší protézu bez větších problémů vytvořit i při poměrně malých vstupních nákladech doma. Tyto protézy se v posledních letech ale nezačaly tvořit jen jako náhrady lidských anebo zvířecích končetin, ale i jako části pro výrobu humanoidních robotů.

Tato bakalářská práce navazuje na bakalářské práce mých předchůdců [1] [2], kteří již vytvořili funkční model horní končetiny funkční od prstů na ruce až po loket. Hlavním cílem této práce je návrh o rozšíření této končetiny o ramenní kloub a následně výroba a zprovoznění takového kloubu. Nosné a krycí části končetiny budou vytisknuty na 3D tiskárně a rozpohybovány s pomocí Arduina.

## 3 Teoretická část

### 3.1 Horní končetina z anatomického hlediska

Lidskou horní končetinu můžeme z anatomického hlediska rozdělit na několik částí: rameno, paže, loket, předloktí, zápěstí, dlaň a prsty. Od ramenního kloubu po dlaň má ruka 3 klouby umožňující její pohyb se 7 stupni volnosti.

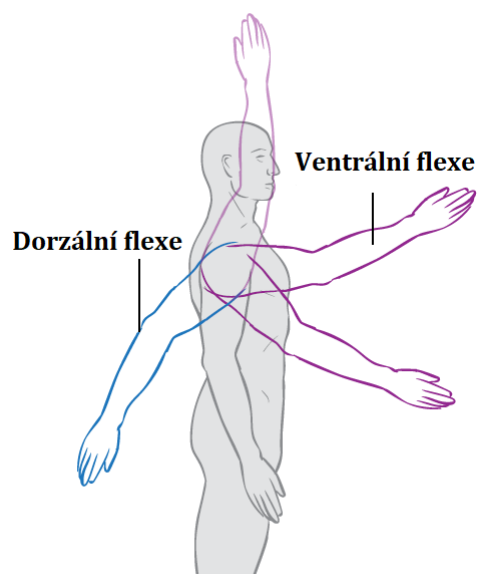
#### 3.1.1 Ramenní kloub

Ramenní kloub spojuje v lidském těle lopatku s pažní kostí. Ramenní kloub je nejpohyblivější kloub v lidském těle. Umožňuje pohyb paže ve všech 3 osách otáčení. [3]

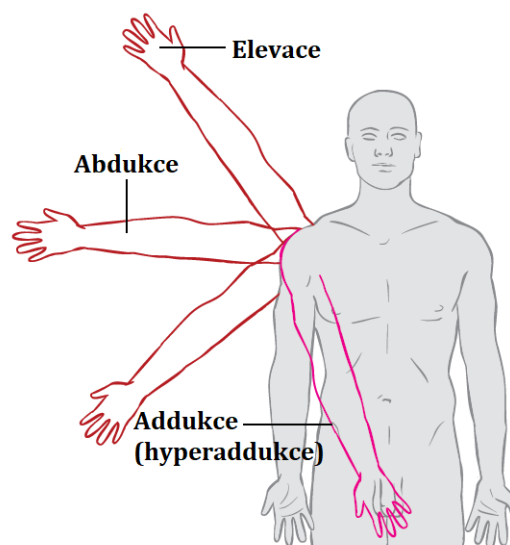
Prvním z těchto pohybů je ventrální a dorsální flexe (obr. 1). Ventrální flexe začíná s rukou připaženou u těla a končí se vzpaženou rukou v téměř vertikální poloze směřující vzhůru. Její rozsah je tak 0-170°. Dorsální flexe je pohyb ze samé počáteční pozice na druhou stranu neboli zapažení o rozsahu až 60°. [4]

Druhým z těchto pohybů je abdukce, addukce a elevace (obr. 2). Abdukce a addukce začíná s rukou připaženou u těla a končí s rukou upaženou ve vodorovné poloze, avšak ruku lze v tomto směru zvednout dále až nad hlavu. Toto pokračování se nazývá elevace. Rozsah tohoto pohybu je 0-180°. Hyperaddukce je pohyb ruky před tělo o rozsahu až 75°. [3][5]

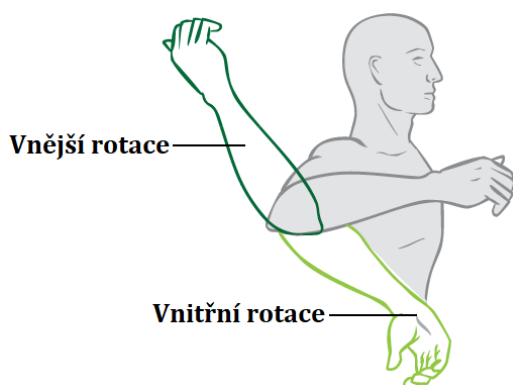
Posledním z těchto pohybů je vnitřní a vnější rotace (obr. 3). Počáteční polohou je ruka ve vodorovné poloze s loktem ohnutým o 90°. Z této pozice se loket otáčí kolem osy paže na obě strany až o 90°. [4]



Obr. 1: Ventrální a dorsální flexe [3]



Obr. 2: Abdukce, addukce a elevace [3]



Obr. 3: Vnější a vnitřní rotace [3]



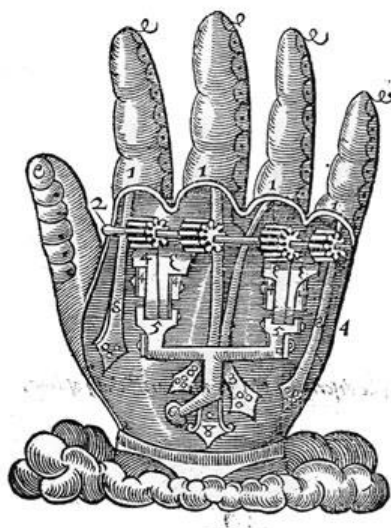
## 3.2 Vývoj protéz

Mezi první zmínky o existenci jakékoliv náhrady lidského těla patří dřevěný palec, který byl vytvořený v Egyptě mezi lety 950-710 před naším letopočtem. Od té doby vznikali povětšinou jednoduché protézy sloužící ke zmírnění důsledků postižení člověka. Současně ale vznikali i protézy, které někdy měli pouze estetický účel, např. falešné oko. [6]

První člověk, u kterého můžeme doložit, že používal protézu, byl římský generál Marcus Sergius. Ten během druhé punské války přišel o ruku, kterou mu nahradili železnou protézou, která mu dovoľovala držet štít. [6]

Mezi největší průkopníky v oboru protéz patří doktor Ambroise Paré, který žil na počátku 16. století. Paré působil jako chirurg na královském dvoře ve Francii a během svého života se mu podařilo kromě zlepšení průběhu amputací končetin i vytvořit protézu ruky s klouby, které mohly být ovládány pomocí tří páček umístěných na předloktí. Kombinací těchto tří páček dokázal ovládat umístit prsty protézy do téměř jakékoliv polohy. [7]

I když takováto protéza nebyla zrovna praktická, bylo možné pomocí zdravé ruky do ní vložit různé předměty, jako například nůž či pero. [6]



Obr. 4: Desing protézy ruky od Amboise Paté [7]

První protézu, která byla ovládána přímo pomocí pohybů lidského těla místo páček vymyslel německý zubař Petr Baliff v roce 1818. Pomocí napínání řemínků svaly trupu a ramene se mu podařilo vyvolat pohyb samotné protézy. [8]

První protézu, kterou bylo možné ovládat pomocí myoelektrických signálů vytvořil v roce 1948 Reinhold Reiner. Tato končetina fungovala tak, že se pomocí elektrod detekovaly EMG signály ze svalů a při zvýšení intenzity tohoto signálu se ruka rozevře. U tohoto typu protézy byl taktéž vyvinut jednoduchý systém pro oznámení plného stisku ruky, který fungoval díky vibracím vzniklým od zatíženého motorku. [7]

## 3.3 Existující projekty

### 3.3.1 Reachy

Reachy je robotický manipulátor vytvořený jako univerzální open-source robotická platforma napodobující lidskou horní končetinu v životní velikosti pro testování řídicích rozhraní a strategií pro projekty od jednoduchých manipulátorů podobných tomuto až po profesionální neuroprotézy. [9]

Reachy je v základním provedení manipulátor se sedmi stupni volnosti. Každý z těchto stupňů volnosti je kloub ovládaný pomocí jednoho servomotoru značky Robotis Dynamixel, který slouží zároveň jako snímač polohy. První tři motory zastupují funkci ramenního kloubu, další dva ovládají ohyb loktu a natočení předloktí a poslední dva se starají o správné natočení zápěstí. Na zápěstí se následně může přichytit několik různých konců jako je například funkční klepeto. Samotná kostra manipulátoru je vyrobena pomocí 3D tisku z PLA plastu a celá ruka váží přibližně 1,4 kg. [9]

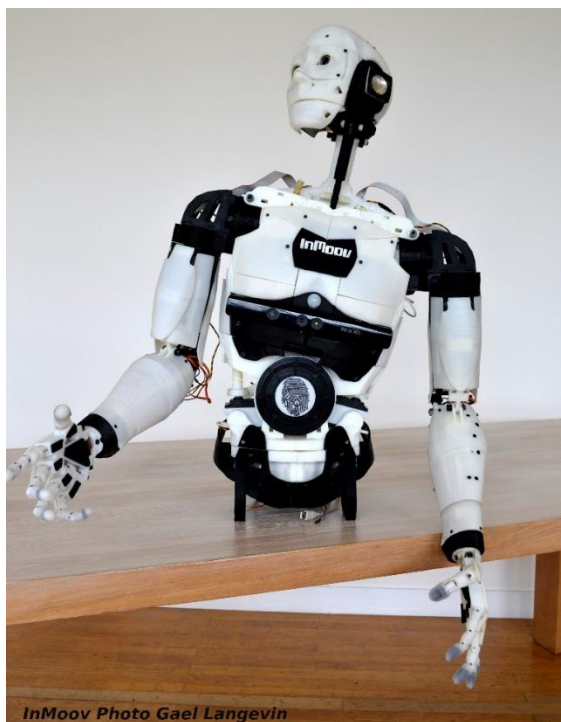
Ovládání manipulátoru je prováděno přes USB port počítačem s programem Pypot. Pypot je open-source software sloužící ke komunikaci se servomotory řady Dynamixel. Samotný program je napsán v Pythonu, díky čemuž je schopen pracovat pod většinou operačních systémů. [9]



Obr. 5: Reachy [10]

### 3.3.2 InMoov

InMoov je projekt založený v roce 2012 francouzským designerem Gaelem Langevinem, jehož cílem bylo vytvoření prvního open-source humanoidního robota v životní velikosti na světě pomocí technologie 3D tisku. [11]



*Obr. 6: InMoov [11]*

Pohyb robota je zajištěn pomocí modelářských servomotorů. Některé servomotory musely být kvůli zvýšení kroutícího momentu mechanicky upraveny na servomotory kontinuální a následně převodovány většinou pomocí šnekového převodu vytištěného na 3D tiskárně. Servomotory a senzory jsou ovládány pomocí mikroprocesoru řady Arduino, které komunikuje přes USB s počítačem. Pro ovládání robota byl na počítači vytvořen software MyRobot Lab napsaný v pythonu, který ovládá robota pomocí jednoduchých příkazů k natočení jednotlivých servomotorů do správné polohy. [11]

## 3.4 Pohony

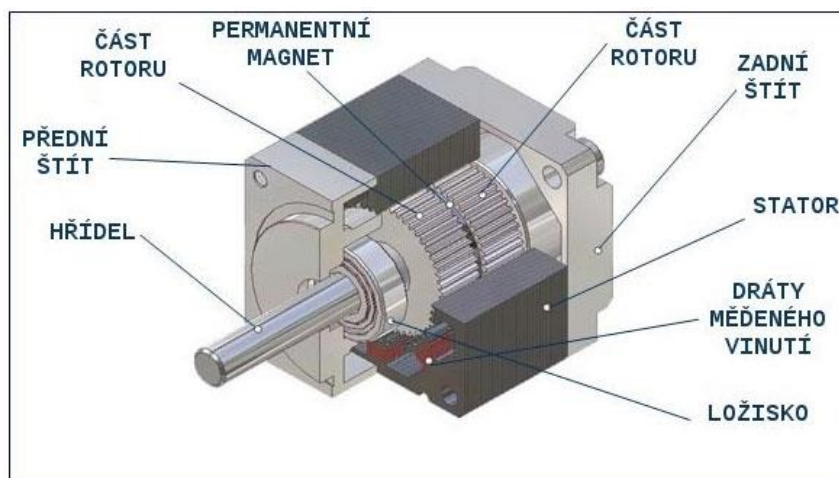
Funkcí pohonů je přeměna vstupní energie na pohyb. Nejčastějšími druhy energie přiváděné na vstup pohonů jsou elektrická energie a tlak kapalin. Tyto pohony rozdělujeme na elektrické, hydraulické a pneumatické.

Nejčastěji se v robotice používají elektrické pohony. Jejich výhodou je snadné ovládání rychlosti otáček nebo polohy. Nevýhodou je však oproti pneumatickým, a hlavně hydraulickým pohonům jejich poměr výstupního výkonu a hmotnosti.

### 3.4.1 Krokový motor

Jeden z nejběžnějších pohonů v automatizaci je krokový motor. Jednou z jeho výhod je možnost poměrně přesně nastavit jeho polohu a tuto polohu držet i přes síly působící zvenčí. Mezi další výhody patří vysoký točivý moment i při nulových otáčkách, prakticky nulová údržba nebo to, že ho nelze poškodit mechanickým přetížením. Při přetížení ale dochází k vypadávaní kroků způsobující chybné určení aktuální polohy.[12][13]

Krokový motor je impulzně napájený motor tvořený statorem a rotorem. Rotaci krokového motoru dosáhneme postupným střídáním napájení jednotlivých cívek na statoru, které přitahují rotor do žádané pozice. Pohyb krokového motoru tudíž není spojitý, ale v podstatě skáče z jedné polohy do druhé po jednotlivých úsecích neboli krocích. [12][14]



Obr. 7: Řez krokovým motorem [13]

Nevýhodami krokového motoru jsou jeho trvalý odběr proudu a jeho poměr výkonu ke hmotnosti. Další jeho nevýhodou je skutečnost, že při zapnutí krokového motoru neznáme jeho výchozí polohu. Pro zjištění aktuální polohy je tudíž nutné nějakým způsobem určit počáteční polohu, jako například najetím do krajní polohy a následně jeho polohu určovat podle počtu kroků, které vykonal. Maximální rychlost otáček je zřídka více než  $1500 \text{ min}^{-1}$  a po překročení maximální rychlosti otáčení nebo při velké zátěži se může stát, že motor začne ztrácet jednotlivé kroky. [12][13][14]

Přesnost krokového motoru lze zvýšit dvojnásobně použitím polovičních kroků. Toho je dosaženo tak, že proud prochází dvěma cívkami na statoru, díky čemuž se poloha rotoru nastaví mezi dané cívky. Řízení s polovičním krokem má však na rozdíl od řízení s celým krokem menší točivý moment. [14]

V případech, kdy je nutné zajistit ještě přesnější natočení motoru, se provádí pomocí mikrokrokování, které dokáže jeden krok motoru rozdělit až na 128 mikrokroků. Mikrokrokování funguje stejně jako řízení s polovičním krokem s tím rozdílem, že na první cívku posíláme jiný proud než na cívku druhou. Vhodnou volbou velikostí proudů na cívkách můžeme dosáhnout libovolné polohy motoru. [14]



Obr. 8: Krokový motor [13]

### 3.4.2 Servomotor

Servomotor je elektrický pohon schopný měnit svoji polohu s velkou přesností. Je proto používán například pro menší robotická ramena, pro nastavení kormidla u leteckých modelů nebo pro natočení kol RC modelů aut. Dalšími výhodami servomotoru jsou jeho nízká hmotnost, malé rozměry a poměrně vysoký kroutící moment. [15]

Uvnitř servomotoru se nachází stejnosměrný motor, ozubený převod, potenciometr a řídicí obvod. Servomotor funguje na principu zpětnovazebního řízení. Řídicí obvod nejdříve porovnává momentální polohu servomotoru s požadovanou polohou a následně z tohoto rozdílu poloh pošle signál do DC motoru na kterou stanu se má otočit. Toto se děje do doby, než servomotor dosáhne požadované polohy, ve které se zastaví. Ozubený převod snižuje vysokou rychlost otáčení DC motoru ve prospěch vyššího kroutícího momentu. [16]



Obr. 9: Servomotor [17]

Samotné řízení servomotoru je většinou prováděno přes PWM neboli pulzně šířkovou modulaci. Do servomotoru je jednou za pevně daný časový úsek poslán impuls o různé délce. Střední délka tohoto impulsu je většinou u modelářských serv 1,5 ms, při které je servomotor ve středové pozici svého

rozsahu. Tento rozsah většinou bývá kolem  $90^\circ$  nebo  $180^\circ$ , ovšem existují i servomotory s větším rozsahem. [16]

### 3.4.3 Kontinuální servomotor

Víceotáčkový servomotor není ze své definice servomotor, protože na rozdíl od klasického serva postrádá zpětnou vazbu. První víceotáčková serva vznikla úpravou klasických servomotorů odstraněním mechanických zarážek a výměnou potenciometru za rezistor s odporem potenciometru servomotoru umístěného ve své středové pozici. Princip kontinuálního servomotoru je téměř stejný jako u servomotoru klasického. Jelikož však má vnitřní rezistor pevně daný odpor, servo vnímá svoji pozici jako pozici ve středu rozsahu klasického servomotoru a po přijmutí signálu ke změně pozice se začne otáčet ve směru ve kterém se nachází daná pozice. [18]

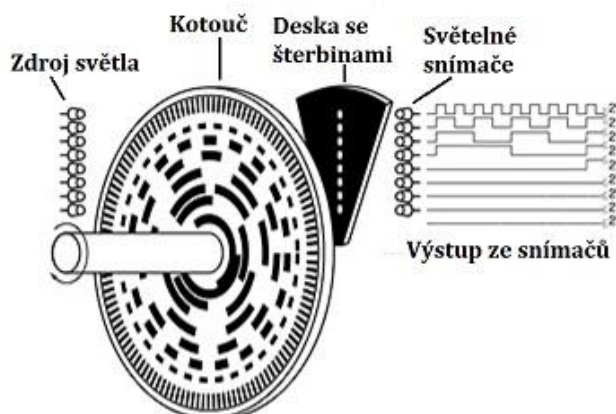
Kontinuální servomotor se používá tam, kde je zapotřebí kompaktní a silný stejnosměrný motor se zabudovaným H-můstkem a s ovládáním rychlosti otáčení. Ovládání kontinuálních servomotorů probíhá stejně jako u klasických servomotorů pomocí pulzních signálů, které většina mikrokontrolerů dokáže generovat. Jsou proto velmi často používány například v podvozcích některých robotů. [18]

## 3.5 Snímače úhlu natočení

Snímače jsou zařízení, které převádí fyzikální, elektrickou či chemickou veličinu na elektrický signál. Rozdělují se na snímače elektrických (např. proudu, odporu, napětí) a neelektrických (např. polohy, tlaku, teploty) veličin. Snímače úhlů řadíme mezi snímače mechanické. [19]

### 3.5.1 Optický enkodér

Jeden z nejpoužívanějších snímačů natočení je optický enkodér. Ten funguje na principu stínění zdroje světla. Samotný senzor se skládá ze 3 částí: zdroje světla, kódového kotouče a snímačů světla. Světlo ze zdroje prochází přes rotační kotouč, který je připojen ke vstupní hřídeli a následně dopadá na soustavu geometricky přesně uspořádaných snímačů. Na kotouči je systém průhledných a neprůhledných ploch, které jsou uspořádány podle binárního nebo častěji grayova kódu. Přesnost optického snímače tudíž závisí na velikosti kotouče, respektive na počtu jeho řad. Výhodou tohoto snímače je jeho velká přesnost, odolnost i proti silnému rušení a velmi snadné čtení polohy. [19]



Obr. 10: Princip optického enkodéru [20]

### 3.5.2 Potenciometr

Potenciometry jsou jedny z nejpoužívanějších senzorů pohybu. Potenciometr je pasivní součástkou, tudíž nevyžaduje žádné napájení nebo jiné elektrické obvody pro svou funkci. Základem potenciometru je odporová dráha, které se dotýká pohyblivý jezdec mechanicky spojený s předmětem, který odměřujeme. Ze základu se potenciometry rozdělují podle tvaru na lineární a rotační. Dále je rozdělujeme podle materiálu odporové dráhy, které jsou nejčastěji drátové nebo vyrobeny z vodivého plastu. [19][20]

Potenciometr dokáže pracovat jako dělič napětí nebo jako reostat. Při použití potenciometru jako děliče napětí se vstupní napětí rozdělí na 2 výstupní napětí, jejichž velikost se bude odvíjet od vzdálenosti jednotlivých konců potenciometru k jezdcí. Při použití reostatu se měří velikost odporu, která je daná dráhou od jednoho konce potenciometru k jezdcí. [19][20]

Výhodou potenciometru je jeho velmi jednoduché zapojení, velmi nízká cena a velikost. Nevýhodami jsou jeho změna odporu vlivem tepla, která se projevuje nejvíce u drátových potenciometrů a náchylnost ke změně svých vlastností vlivy jako jsou nečistoty, vlhkost nebo odskakování jezdcí. [19]



Obr. 11: Potenciometr [20]

### 3.5.3 Resolver

Resolver funguje na principu polohového transformátoru. Skládá se ze statoru se dvěma vinutími, které jsou vůči sobě pootočený o  $90^\circ$  a z rotoru vyvedeným vinutím. Měřené natočení se zjistí díky fázovému posunu výstupního napětí resolveru, které je stejné jako úhel natočení pohyblivého vinutí motoru vůči cívkám na statoru. [19]

### 3.5.4 Kapacitní snímač natočení

Kapacitní snímač natočení funguje na principu kondenzátoru. Tento snímač je tvořen 2 nebo více deskami z vodivého materiálu, které jsou vzájemně oddělené nevodivým prostředím, nejčastěji vzduchem. Po pootočení desek vůči sobě se změní velikost jejich aktivní plochy, což mění jejich kapacitu. [19]

## 3.6 Arduino

Arduino je open-source elektronická platforma založená na čipu ATmega. Poprvé byla představena v roce 2005 a od té doby se stala jednou z nejpobulárnějších open-source projektů na světě. Obliba arduina je dána především jeho nízkou cenou, jednoduchým programováním a poměrně širokou škálou využití od ovládání malých robotů, RC modelů letadel či dronů až po automatizaci skleníků, akvárií a terárií. [21]

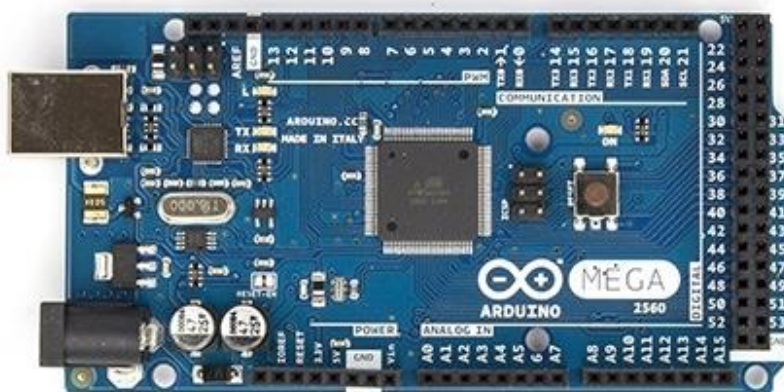
Nejpoužívanější vývojovou deskou arduina je pravděpodobně Arduino Uno R3. Jeho největšími výhodami jsou jeho nízká cena, přítomnost napájecího konektoru a kompatibilita s většinou přídatných desek neboli shieldů. Deska poskytuje 14 digitálních pinů, z nichž je 6 s PWM, 6 analogových vstupů a napájení 5/3,3 V. Arduino Uno je založen na mikroprocesoru ATmega328P, který poskytuje 32kB paměť. [21][22]

Dalším modelem je Arduino Nano založeném na mikrokontroleru ATmega328, které má na rozdíl od ATmega328P celkem 8 analogových vstupů. Výstupy u Arduino Nano navíc umožňují jeho přímé zapojení do nepájivého pole.[21][22]

Pro složitější projekty, pro které je třeba větší počet výstupů nebo větší paměť pro program je vhodné Arduino Mega nebo Arduino Mega2560. Tyto desky disponují 54 digitálními piny, čehož 12 může sloužit jako PWM, s napájením 5/3,3 V a 16 analogovými vstupy. Rozdíl mezi Arduino Mega a Mega2560 je v jejich mikroprocesoru. Arduino Mega využívá ATmega 1280 jenž disponuje 128 kB paměti, zatímco Arduino Mega2560 běží na ATmega 2560 s paměti o velikosti 256 kB. [21][22]

Existují i speciální desky jako Arduino Esplora z roku 2012 se zabudovaným joystickem a 4 tlačítka jako u herních ovladačů nebo Arduino LilyPad určený pro všíti do oblečení. [21]

Samotné programování arduina probíhá přes vývojové prostředí Arduino IDE v programovacím jazyce Wiring nebo popřípadě C++. [21]



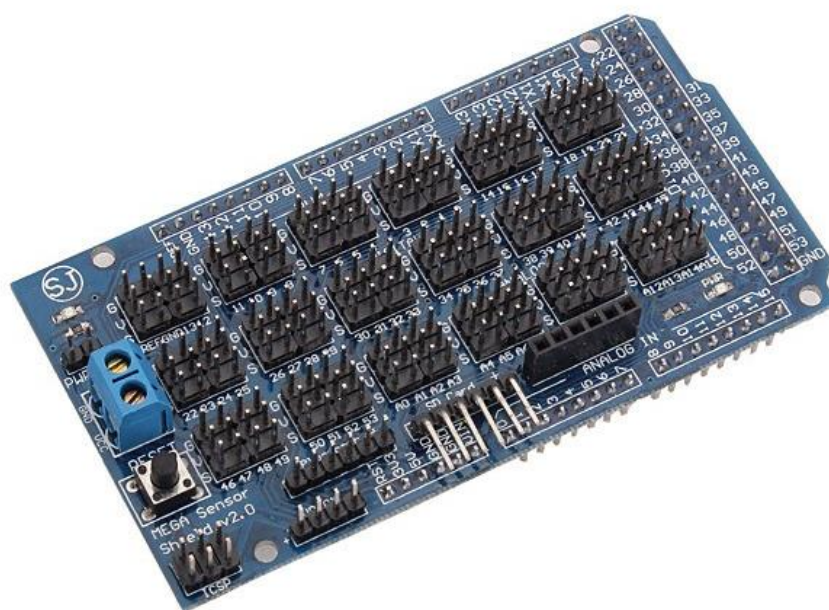
Obr. 12: Arduino Mega 2560 [22]

### 3.6.1 Sensor shield

Senzor shield je jeden z mnoha shieldů určených pro Arduino Mega. Senzor shield umožňuje připojení různých modulů k arduinu, jako jsou například serva, relé, tlačítka či potenciometry. Každý digitální a analogový pin z arduina je vyveden na shield společně s vlastním napájecím pinem a zemí. Na shieldu



je připraveno rozhraní pro připojení bezdrátového, Bluetooth a ultrazvukového modulu, paralel a serial LCD a SD karty. Tento modul se často používá, pokud je nutné zapojit k arduinu více servomotorů nebo jiných součástí s větším odběrem proudu nebo s jiným napětím, než je napětí Arduina. To je možné díky přídavnému napájení shieldu, které umožňuje změnit napětí na napájecích pinech. [23]



Obr. 13: Arduino Mega sensor shield [23]

## 4 Praktická část

### 4.1 Výchozí stav

Tato práce přímo navazuje na práce 3D tisknutelná robotická ruka od Ondřeje Sulce, který vytvořil robotickou dlaň s ovládatelnými prsty a jednoduchým předloktím a na práci Návrh humanoidní ruky robota od Jakuba Vaňka, který tuto práci rozšířil o řešení loketního a zápěstního kloubu. [20][21]

Prsty robotické ruky jsou ovládány pomocí 5 servomotorů, k nimž jsou připojeny kovová lanka o průměru 1,2 mm ovládající ohýbání a natahování jednotlivých prstů. Náklon palce je ovládán pomocí 6. servomotoru přes ozubené soukolí. Zápěstní kloub zde umožňuje pohyb ve dvou osách otáčení. Zápěstí můžeme ohnout dopředu o 70° a dozadu o 60°. Druhým pohybem je náklon zápěstí do stran, jenž na obě strany dosahuje 43°. Tento pohyb je prováděn pomocí 2 lanek připevněných k opačným stranám servopáky s dvěma rameny k 7. servomotoru. Těchto 7 servomotorů je umístěno v předloktí. Loketní kloub je řešen pomocí plastového ozubeného soukolí, které zvýšilo potřebný kroutící moment servomotoru. [1][2]

Nosné a krycí díly končetiny jsou vytištěny na 3D tiskárně z plastu. Nejčastějším spojovacím materiálem je zde z důvodu časté demontáže spojení šroubové. Pro ovládání sestavy je použit mikropočítač Arduino Mega 2560 osazený senzorem shieldem pro jednodušší ovládání připojených periférií. [1][2]



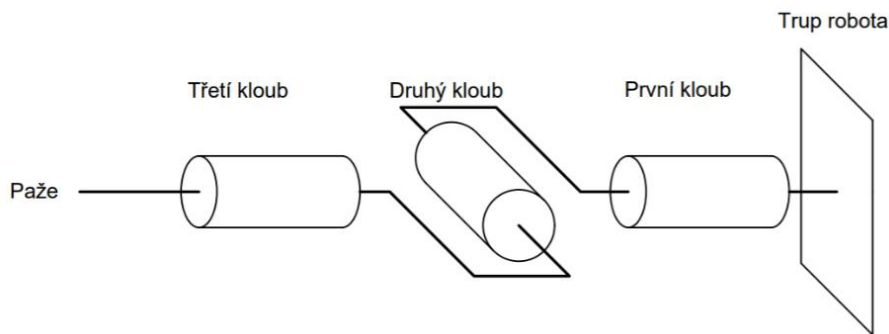
Obr. 14: Výchozí stav horní končetiny [2]

### 4.2 Postup návrhu

Jelikož je již daná končetina rozpohybovaná po loket, primárním cílem této práce je vytvoření a rozpohybování ramenního kloubu. Při jeho návrhu jsem se snažil o snadnou montáž či případnou rozebratelnost celé soustavy a vytvoření jednotlivých dílů tak, aby je bylo možné tisknout na 3D tiskárně bez nutnosti podpor v tisku.

#### 4.2.1 Návrh řešení ramenního kloubu

Jelikož má ramenní kloub 3 osy otáčení a vytvoření a rozpohybování takového kloubu by bylo velice náročné, rozdělil jsem tento kloub na 3 jednoduché rotační klouby.



Obr. 15: Kinematické schéma ramenního kloubu

První kloub jsem umístil mezi lopatku a ramenní kloub. Tento kloub realizuje ventrální a dorsální flexi ruky neboli její připažení a odpažení. Rozsah takového to pohybu je pro připažení 170° a pro odpažení 60°.

Druhý kloub se nachází na místě ramenního kloubu a zajišťuje abdukci a elevaci neboli upažení a addukci ruky neboli její připažení. Rozsah tohoto pohybu je pro upažení ruky 180°, pro připažení až 75°.

Poslední třetí kloub se nachází mezi ramenním a loketním kloubem a zajišťuje vnitřní a vnější rotaci ramenního kloubu. Rozsah tohoto pohybu je přibližně 90° na obě strany.

#### 4.2.2 Návrh pohonů kloubů

Jelikož jsem rozdělil ramenní kloub na tři klouby, je nutné ke každému z kloubu nutné zajistit vlastní pohon. Pro předběžný výpočet nutné síly pohonů budu předpokládat vzdálenost ramenního kloubu od loketního 280 mm, hmotnost části ruky mezi těmito klouby 2 kg a těžiště této části ve svém vlastním středu. Od pohonů je požadováno, aby byly schopné zajistit dostatečnou sílu pro uzvednutí přibližně kilogramového závaží drženého v dlaní natažené robotické ruky. Hmotnost modelu předloktí [2] je 1,6 kg s těžištěm vzdáleným 172 mm od loketního kloubu a vzdáleností dlaně od loketního kloubu 470 mm.

Jelikož jsou klouby 1 a 2 umístěné na konci paže u ramenního kloubu a oba pohybují celou vahou končetiny, můžeme potřebnou sílu pohonů pro oba klouby počítat společně:

$$M_{1,2} = \sum l_{\text{těžiště}} \cdot m \cdot g = (0,452 \cdot 1,6 + 0,14 \cdot 2 + 0,75 \cdot 1) \cdot 9,81 = 17,2 \text{ Nm} \quad (4.1)$$

Protože pohony s takto vysokým kroutícím momentem by byly poměrně drahé a těžké, rozhodl jsem se použít kombinaci motorů s nižšími kroutícími momenty a ozubených převodů. Jelikož mají oba klouby velké rozsahy natočení a je tudíž nutné použití víceotáčkových pohonů, vybral jsem pro oba klouby kontinuální servomotor JX Servo PDI-HV5932MG [24] s kroutícím momentem 3,16 Nm.

Tab. 1: Parametry servomotoru JX Servo PDI-HV5932MG [24]

Název	$M_{MAX}$	$U_{IN}$	Rozměry	Hmotnost	$\alpha_{MAX}$
JX Servo PDI-HV5932MG	3,16 Nm	6-8,4 V	40,5x20,5x36,5 mm	59 g	360°

Převodový poměr převodu s tímto servomotorem je tedy:

$$i_{1,2} = \frac{M_{potřebné}}{M_{servo}} = \frac{17,2}{3,16} = 5,44 \quad (4.2)$$

Převod je vytvořen pomocí dvou kol s čelním ozubením. Kola jsou vyrobena z polyketonu pomocí vstřikování. Při použití pastorku s 15 zuby se minimální počet zubů druhého kola vypočítá dle vztahu:

$$z_{kolo} = z_{pastorek} \cdot i_{1,2} = 15 \cdot 5,44 = 81,6 \quad (4.3)$$

Nejbližší vyráběné ozubené kolo s vyšším počet zubů má zubů 90. Protože kontinuální servo nemá na rozdíl od serva klasického vlastní zpětnou vazbu své polohy, musíme ji zajistit externě. Zpětnou vazbu jsem zrealizoval pomocí industriálního potenciometru R22W 10k.

Osa kloubu 3 prochází středem sestavy paže. Z tohoto důvodu můžeme uvažovat o zatížení v této části sestavy nulové a počítat jen se zatížením předloktí a závaží umístěného v dlani:

$$M_3 = \sum l_{těžište} \cdot m \cdot g = (0,172 \cdot 1,6 + 0,47 \cdot 1) \cdot 9,81 = 7,3 \text{ Nm} \quad (4.4)$$

Protože pohon s takto vysokým kroutícím momentem by byl poměrně drahý, rozhodl jsem se použít kombinaci servomotoru SPT5535LV-320 [25] s kroutícím momentem 3,43 Nm a ozubeného převodu s převodovým poměrem:

$$i_3 = \frac{M_{potřebné}}{M_{servo}} = \frac{7,3}{3,43} = 2,128 \quad (4.5)$$

Tab. 2: Parametry servomotoru BH466-LV270 [25]

Název	$M_{MAX}$	$U_{IN}$	Rozměry	Hmotnost	$\alpha_{MAX}$
BH466-LV270	3,43 Nm	4,8-6 V	40x20x40 mm	57 g	270°

Převod je stejně jako předchozí převod vytvořen pomocí dvou ozubených kol. Pastorek má 15 zubů. Minimální počet zubů druhého kola jsem vypočítal dle vztahu:

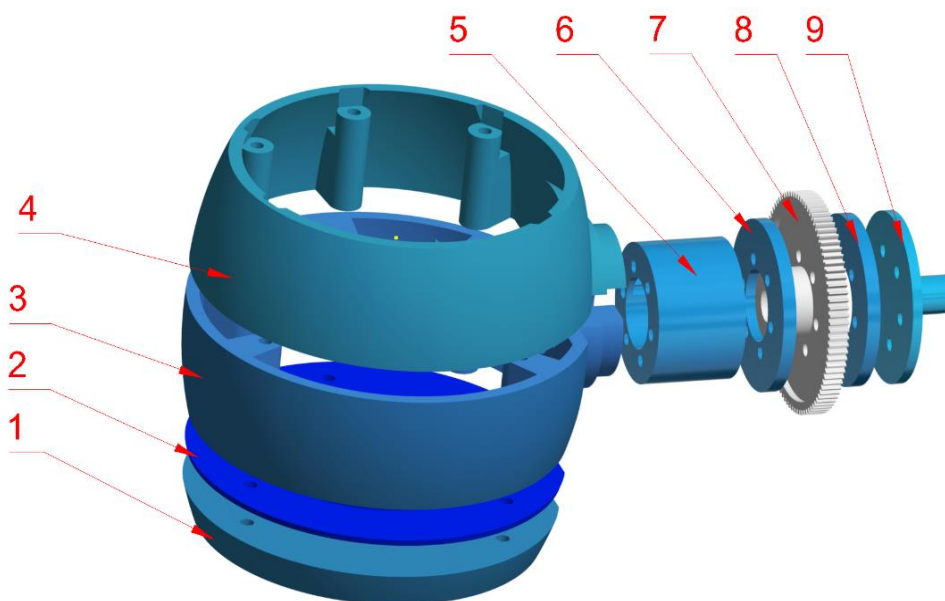
$$z_{kolo} = z_{pastorek} \cdot i_3 = 15 \cdot 2,128 = 31,9 \quad (4.6)$$

Nejbližší vyráběné ozubené kolo s vyšším počet zubů má zubů 32.

### 4.2.3 Návrh ramene

Svůj návrh o rozšíření již existující robotické horní končetiny jsem započal u samotného ramene. Při tvorbě jsem dbal o vytvoření ramene co možná nejuvhodnějšího tvaru a rozměrů při zajištění dobré pohyblivosti kloubů a jeho smontovatelnosti. Samotné rameno jsem rozdělil na dvě soustavy, které se vůči sobě mohou otáčet.

Základem první sestavy je součást dutého soudkovitého tvaru s dutým válcem vysunutým v polovině své výšky. Tuto část sestavy jsem kvůli snadnějšímu tisku dílů na 3D tiskárně a vkládání ostatních součástí rozdělil na několik dílů.



Obr. 16: Rozložená sestava ramene

První dva díly, které tvoří dno sestavy (Obr. 14, díl 1,2), slouží pro uchycení ložiska zajišťující rotační pohyb mezi dvěma hlavními sestavami ramene. Rozhodl jsem se použít jednořadé kuličkové ložisko SNH 61807 2RS [23] kvůli jeho velkému vnitřnímu průměru a schopnosti přenášet i větší axiální zatížení. Ložisko má relativně malý vnější průměr, díky čemuž má při své velikosti malou hmotnost.

Tab. 3: Parametry ložiska SNH 61807 2RS [26]

Označení	d [mm]	D [mm]	b [mm]	Hmotnost [kg]
SNH 61807 2RS	35	47	7	0,03

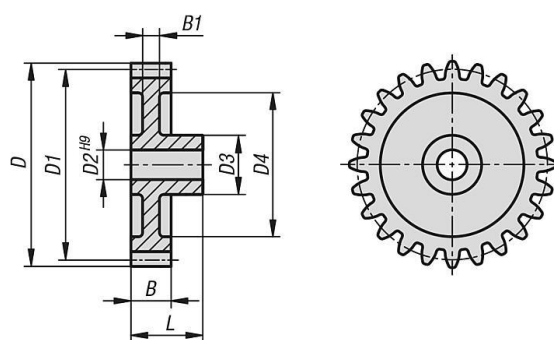
Třetí díl (Obr. 16, díl 3) tvoří střední část soudečku s přibližně polovinou vysunutého dutého válce. Čtvrtou částí (Obr. 16, díl 4) je horní část soudečku se zbytkem válce, na jehož spodní části se nachází deska, ke které se později přišroubuje servomotor a potenciometr. Tyto čtyři díly jsou následně spojeny pomocí šesti šroubů. Dutý válec vytvořený třetím a čtvrtým dílem složí jako hřídel pro umístění ložiska zajišťující rotační pohyb mezi ramenem a trupem. Ložisko použité k přenosu tohoto pohybu jsem zvolil stejné jako ložisko použité k přenosu pohybu mezi sestavami ramene.

Na konci dutého válce je umístěn dutý válec s otvorem pro vedení kabelů serv a potenciometru (Obr. 16, díl 5). Následně je na něm umístěna podložka ozubeného kola (Obr. 16, díl 6), samotné ozubené kolo (Obr. 16, díl 7), druhá podložka ozubeného kola (Obr. 16, díl 8) a následně příruba pro připojení potenciometru (Obr. 16, díl 9). Tyto díly jsou následně sešroubovány šrouby k předchozím dílům pomocí 4 šroubů.

Ozubené kolo v této sestavě tvoří převod zajišťující rotační pohyb mezi ramenem a trupem. Modul ozubených kol jsem vybral 0,7, neboť se jedná o největší možný modul kola, při kterém se ozubené kolo do bez problémů vejde do sestavy.

Tab. 4: Parametry čelních ozubených kol prodávaných společností MAREK Industrial [27]

Objednávací číslo	Materiál	z	D	d1	d2	D3	D4	B	B1	L	M <sub>MAX</sub>
22402-2070015	Polyketon	15	11,9	10,5	3	6		6	6	15	7,2 Nm
22402-2070090	Polyketon	90	64,4	63	10	21	57	6	2	15	43,6 Nm



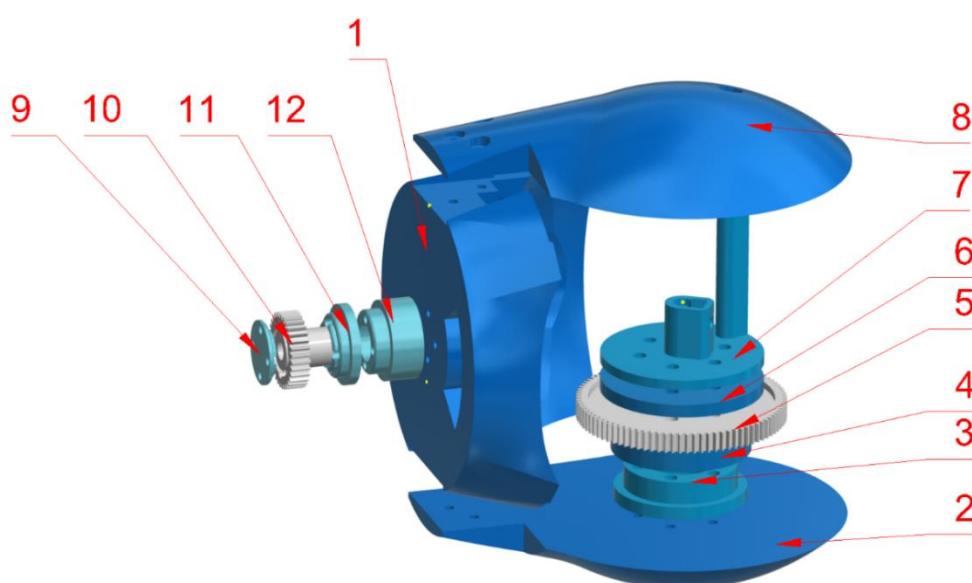
Obr. 17: Schéma základních rozměrů ozubení [27]

Druhou sestavu ramene jsem vytvořil pomocí vytvoření rotačních konců dosedajících na první sestavu a následně pomocí spojení profilu těchto konců s kruhem, který bude následně spojen s paží končetiny. Následně jsem tuto sestavu kvůli tisku rozložil na tři části.

Ke střední části této sestavy (Obr. 18, díl 1) jsem následně připojil jeden z krytů (Obr. 18, díl 2) pomocí 3 šroubů a matic upevněných v první dílu. Dále jsem na tento kryt postupně přišrouboval 6 šrouby hřídel pro ložisko (Obr. 18, díl 3), díl pro sevření ložiska (Obr. 18, díl 4), ozubené kolo (Obr. 18, díl 5), podložku pro ozubené kolo s šestihranným otvorem určeným pro zajištění matice (Obr. 18, díl 6) a přírubu pro připojení potenciometru (Obr. 18, díl 7) ve které je dlouhý vysunutý profil s válcovou dírou určenou pro šroub.

Poté jsem tuto sestavu zakryl z druhé strany druhým krytem (Obr. 18, díl 8), který je přišroubovaný k prvnímu dílu stejným způsobem jako první kryt a pomocí šroubu k matici umístěné v dílu šestém.

K této sestavě jsem následně připojil hřídel (Obr. 18, díl 12) pro ložisko přenášející pohyb mezi ramenem a paží, podložku pod ozubené kolo (Obr. 18, díl 11), která zároveň slouží k přitáhnutí ložiska, ozubené kolo (Obr. 18, díl 10) a druhou podložku ozubeného kola (Obr. 18, díl 9).



Obr. 18: Rozložená druhá sestava ramene

Z důvodu menšího rozměru hřídele jsem se rozhodl použít jednořadé kuličkové ložisko SNH 61904ZZ [24] kvůli jeho velkému vnitřnímu průměru a schopnosti přenášet i větší axiální zatížení. Ložisko má relativně malý vnější průměr, díky čemuž má při své velikosti malou hmotnost.

Tab. 5: Parametry ložiska SNH 61904ZZ [28]

Označení	d [mm]	D [mm]	b [mm]	Hmotnost [kg]
SNH 61904ZZ	20	37	9	0,038

V této sestavě jsou dvě ozubená kola tvořící dva samostatné převody. První převod slouží k zajištění pohybu mezi sestavami ramene. Tento převod je identický s převodem mezi ramenem a trupem.

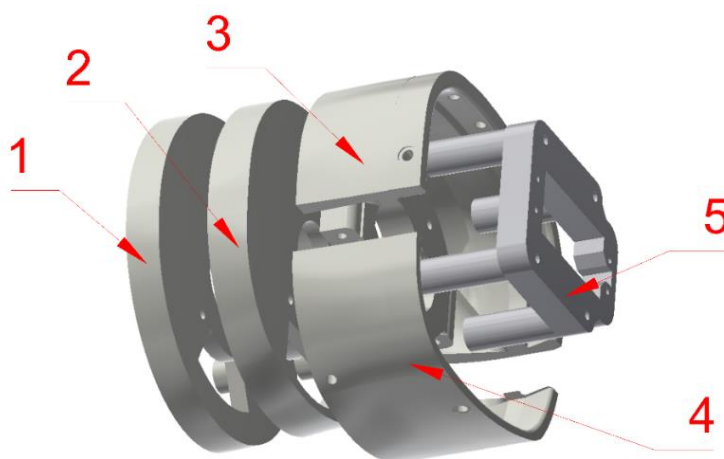
Druhý převod složí pro přenos pohybu mezi ramenem a paží. Převod je složen ze dvou ozubených kol s převodovým poměrem 32/15 a modulem kol 0,7.

Tab. 6: Parametry čelních ozubených kol převodu rameno-paže prodáváných společností MAREK Industrial [27]

Objednávací číslo	Materiál	z	D	d1	d2	D3	D4	B	B1	L	M <sub>MAX</sub>
22402-2070015	Polyketon	15	11,9	10,5	3	6	-	6	6	15	7,2 Nm
22402-2070032	Polyketon	32	23,8	22,4	6	12	16	6	3	18	15,5 Nm

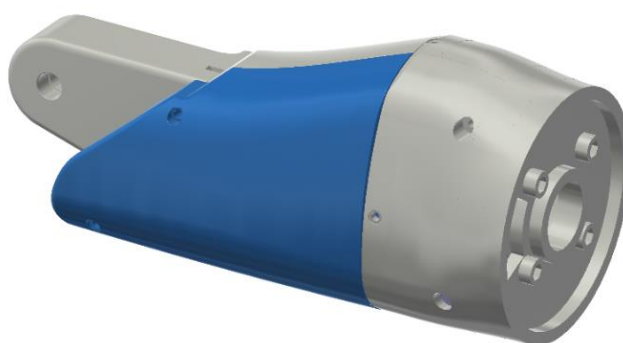
#### 4.2.4 Návrh paže

Při návrhu paže končetiny jsem vycházel z původního modelu paže [2], ze kterého jsem odstranil několik posledních částí, které jsem nahradil sestavou částí vlastních. Základ této soustavy jsem vytvořil z části odstraněného segmentu původní paže, která bude složit z uchycení nové sestavy k sestavě původní a její spojení pomocí šablonování s kruhem o poloměru stejném jako je u kruhu v sestavě ramene ke které bude následně přiléhat.



Obr. 19: Rozložená sestava nových dílů paže

Tuto vytvořenou sestavu jsem následně kvůli tisku rozdělil na několik částí. První dvě části sestavy (Obr. 19, díl 1,2) dosedají na sestavu ramene a slouží k uchycení ložiska přenášející pohyb mezi touto sestavou a sestavou ramene. V obou dílech jsem zároveň vytvořil díru pro kabeláž. Na tyto díly jsem následně nasadil díl (Obr. 19, díl 3) sloužící k připojení této sestavy ke zbytku paže a držák servomotoru (Obr. 19, díl 5). Tuto sestavu jsem následně sešrouboval k sobě pomocí 4 šroubů. Poslední díl (Obr. 19, díl 4) slouží ke spojení sestavy k původní paži.



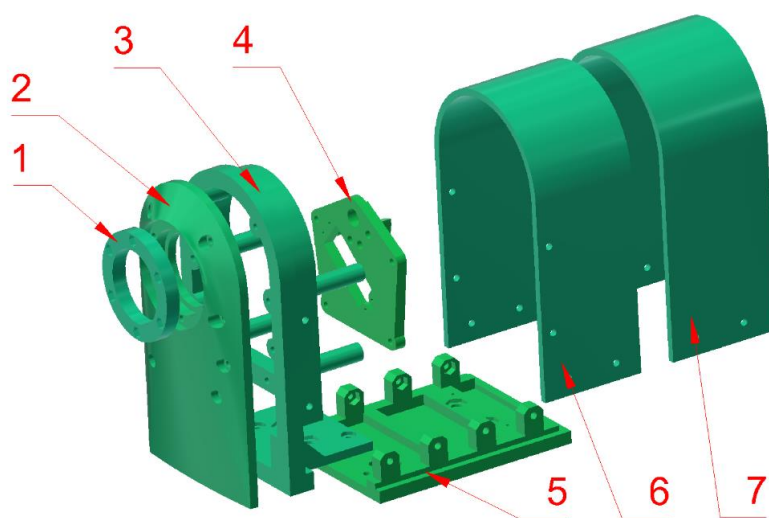
Obr. 20: Konečná sestava paže



#### 4.2.5 Návrh trupu

Pro uchycení ramenního kloubu jsem vytvořil zjednodušenou sestavu poloviny horní části trupu. Základem této sestavy je jeho střední část (Obr. 21, díl 3), ke které je přišroubován ke spodnímu dílu sestavy (Obr. 21, díl 5). V těchto dvou dílech se nachází díry pro následné přišroubování celé sestavy končetiny ke stojanu. Dále se zde nacházejí 4 díry pro přišroubování distančních sloupků na kterých je umístěno Arduino Mega 2560. K této sestavě jsem následně připojil boční kryt (Obr. 21, díl 2) s přírubou (Obr. 21, díl 1), ve kterém je umístěno kuličkové ložisko SNH 61807 2RS. Z druhé strany je k této sestavě přišroubován díl (Obr. 21, díl 4) sloužící pro přišroubování servomotoru.

Tato sestava je následně zakryta pomocí dvou krytů (Obr. 21, díl 6,7).

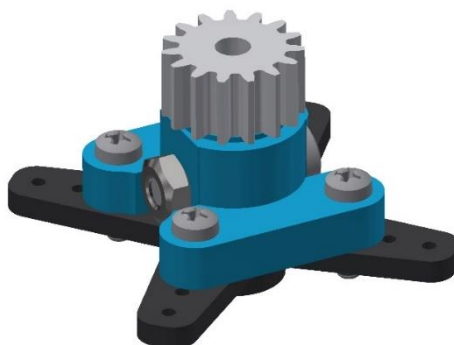


Obr. 21: Rozložená sestava trupu

Model celé horní končetiny je možné nalézt v příloze č.1.

#### 4.2.6 Připojení pastorku k servu

Jelikož bylo nutné ke všem novým servomotorům připojit pastorek, bylo nutné vytvořit díl který jej bude spojovat se servopákou. Jelikož všechny tři pastorky jsou stejné, mohl jsem pro všechny tři vytvořit stejný díl. Tento díl je připojen ke křížové servopáce pomocí 4 šroubů. Pastorek je provrtán soustředně s dírou v dílu a následně upevněn pomocí šroubu M3.



Obr. 22: Připojení pastorku

### 4.3 Tisk a sestavení

Po dokončení modelu ruky jsem mnou vytvořené díly exportoval do formátu stl a pomocí programu Slicer jsem vytvořil Gcode pro 3D tiskárnu. Pro tisk dílů jsem použil podomácku vyrobenou tiskárnu Rebel II s maximální plochou tisku o rozměrech 160x120 a s tryskou o průměru 0,4mm. Seznam všech mnou vytvořených a tisknutých dílů jsem zaznamenal do tabulky 7 umístěné níže.

Tab. 7: Seznam tištěných dílů

Název dílu	Počet kusů	Název dílu	Počet kusů
Rameno_cast_spodni.stl	1	Hridel_spodni3.stl	1
Rameno_cast_spodni2.stl	1	Hridel_kolo_potenciometr3.stl	2
Rameno_cast_stred.stl	1	Hridel_kolo_potenciometr4.stl	1
Rameno_cast_horni.stl	1	Rameno_kryt_spodni.stl	1
Rameno_kryt1.stl	1	Rameno_kryt2.stl	1
Rameno_kolo32_dolni.stl	1	Rameno_kolo32_horni.stl	1
Rameno_kolo32_dolni2.stl	1	Hridel_spodni2.stl	1
Hridel_spodni.stl	1	Hridel_kolo_potenciometr.stl	1
Hridel_kolo_potenciometr2.stl	1	Paze_dil_1.stl	1
Paze_dil_2.stl	1	Paze_dil_3.stl	1
Paze_dil_4.stl	1	Paze_dil_5.stl	1
Trup_priruba_ramene.stl	1	Trup_priruba_ramene2.stl	1
Trup_drzak_serva.stl	1	Trup_priruba_ramene3.stl	1
Trup_priruba_podlozka.stl	1	Trup_kryt1.stl	1
Trup_kryt2.stl	1	Spojka_kolo_servo.stl	3

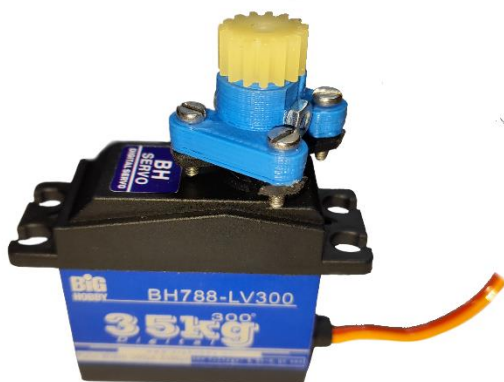
Jelikož tisk 3D tiskárny není zcela přesný, bylo nutné většinu dílů doupravit, bylo žádoucí před samotným exportováním dílů do tiskárny v některých modelech zvětšit rozměry děr pro šrouby a ložiska o několik desetin milimetru. Po vytištění dílů bylo nutné zvětšení děr pro šrouby pomocí vrtáku. Poté co jsem zvětšil díry hřídelů, ve kterých budou umístěny ozubená kola, jsem tyto hřídele sestavil a pomocí předvrtaných děr jsem vyvrtal díry do ozubených kol. Dále bylo nutné upravit průměry děr a hřídelů pro všechny ložiska pomocí pilníku a brusných papírů. Stejnou metodou jsem následně upravit rozměry děr pro uchycení servomotorů a potenciometrů.

Jelikož není možné při montáži ruky v některých případech použít klíč k utažení šroubového spoje, rozhodl jsem se k zatavení těchto matic do dílů pomocí pájky. Po přiložení pájky ke šroubu se šroub ohřeje a nataví okolní materiál. Po vychladnutí se termoplast znovu zpevní a díky tomu pevně zafixuje matici v dílu.

Tab. 8: Kusovník kupovaných součástí

Položka	Název	Norma	Koupeno v	Ks
1	ŠROUB M2,5x12	DIN 84	BN ŠROUBY SERVIS	15
2	ŠROUB M3x16	DIN 7985	BN ŠROUBY SERVIS	12
3	ŠROUB M3x45	DIN 7985	BN ŠROUBY SERVIS	6
4	ŠROUB M4x10	DIN 7985	BN ŠROUBY SERVIS	7
5	ŠROUB M4x16	DIN 7985	BN ŠROUBY SERVIS	16
6	ŠROUB M4x20	DIN 7985	BN ŠROUBY SERVIS	6
7	ŠROUB M4x45	DIN 7985	BN ŠROUBY SERVIS	6
8	ŠROUB M4x50	DIN 7985	BN ŠROUBY SERVIS	1
9	ŠROUB M4x65	DIN 7985	BN ŠROUBY SERVIS	4
10	ŠROUB M4x70	DIN 7985	BN ŠROUBY SERVIS	7
11	ŠROUB M4x75	DIN 7985	BN ŠROUBY SERVIS	5
12	ŠROUB M4x80	DIN 84	BN ŠROUBY SERVIS	5
13	ŠROUB M6x12	DIN 7985	BN ŠROUBY SERVIS	4
14	SAMOŘEZNÝ ŠROUB M2,9x9,5	DIN 7981C	BN ŠROUBY SERVIS	12
15	ŠESTIHRANNÁ MATICE M6	DIN 934	BN ŠROUBY SERVIS	4
16	ŠESTIHRANNÁ MATICE M4	DIN 934	BN ŠROUBY SERVIS	36
17	ŠESTIHRANNÁ MATICE M3	DIN 934	BN ŠROUBY SERVIS	12
18	ŠESTIHRANNÁ MATICE M2,5	DIN 934	BN ŠROUBY SERVIS	3
19	SERVOMOTOR JX PDI-HV5932MG		JXSERVO	2
20	SERVOMOTOR BH466-LV270		BIGHOBBY	1
21	POTENCIOMETR R22W 10k		MEGATRON	2
22	ČELNÍ OZUBENÉ KOLO M0,7 z15	22402-2070015	MAREK.EU	3
23	ČELNÍ OZUBENÉ KOLO M0,7 z90	22402-2070090	MAREK.EU	2
24	ČELNÍ OZUBENÉ KOLO M0,7 z32	22402-2070032	MAREK.EU	1
25	LOŽISKO SNH 61904ZZ		MATEZA	1
26	LOŽISKO SNH 61807 2RS		MATEZA	2
27	STEP-DOWN MĚNIČ XL4016		HADEX	2
28	PLOCHÝ VÍCEŽILOVÝ KABEL 10x5m	UL-2468	GM ELECTRONIC	1

Po očištění všech dílů jsem umístil a pomocí samořezných šroubů upevnil všechny servomotory. Na všechny servomotory jsem následně připevnil pastorek pomocí dílu umístěného mezi servopáku a samotným pastorkem. Protože ramena samotné servopáky byla příliš dlouhá a po složení končetiny by narážela do okolních částí končetiny, bylo nutné ramena servopák zkrátit. Poté jsem vložil pastorek do dílu spojky a vyvrtal jsem díru o průměru 2,9 mm skrz otvor ve spojce. Do této díry jsem následně vložil šroub M2,5x12 a z druhé strany ji zajistil maticí. Tuto sestavu jsem následně upevnil na upravenou servopáku pomocí 4 šroubů.



Obr. 23: Servomotor s uchyceným pastorkem

Pro zajištění pastorku proti přeskokování zubů v ozubení jsem se rozhodl zvětšit tuhost sestavy vyvrtáním díry o průměru 3 mm a o hloubce kolem 5 mm, do které jsem vložil kus broušené tyčky, která se následně vsunula do díry v pastorku.

Následně jsem vložil do určených dílů potenciometru, které se uchytily pomocí šroubového spoje umístěného na hřídeli potenciometru. Dále jsem sestavu osadil kuličkovými ložisky.

Poté, co jsem měl všechny díly nachystány, jsem složil všechny sestavy dohromady s výjimkou krycích dílů, hřídelů sloužících pro propojení jednotlivých sestav a první sestavy ramene, která se spojují až po připojení druhé sestavy ramene a držáku servomotoru v sestavě trupu.

Po zkompletování sestav jsem přiložil k sobě sestavu paže a druhou sestavu ramene a sešrouboval jsem k sobě hřídel s ozubeným kolem umístěným v sestavě ramene pomocí 6 šroubů M3x45 tak, aby ložisko umístěné v sestavě paže bylo uchyceno ve vybrání na hřídeli.

Z původní sestavy končetiny jsem odmontoval několik posledních segmentů paže a ty jsem nahradil touto sestavou pomocí 6 krátkých šroubů M3. Následně jsem připojil k sobě obě sestavy ramene stejným postupem, jako u montáže předchozích sestav, pomocí 6 šroubů M4x60. Dále jsem sešrouboval druhou sestavu ramene pomocí 5 šroubů M4x80. Poté jsem připojil ke druhé sestavě ramene servomotor umístěný v sestavě první a celou sestavu druhou sestavu ramene jsem sešrouboval pomocí 5 šroubů M4x80.

Tuto zkompletovanou sestavu ramene jsem následně nasadil na sestavu trupu. Na sestavu ramene jsem skrz otvor v kuličkovém ložisku v trupu přišrouboval zbytek hřídele s ozubeným kolem pomocí 6 šroubů M4x70. Následně jsem do sestavy trupu přišrouboval držák servomotoru a připojil potenciometr k hřídeli ramene.

Nakonec jsem celou sestavu zakryl pomocí krycích dílů, které mohou být později odmontovány pro snazší přístup k elektronickým součástem končetiny a celou sestavou jsem připevnil na desku, na které bude následně umístěna i elektronika.



*Obr. 24: Dokončená sestava horní končetiny*

#### 4.4 Zapojení elektroniky

Jednou z věcí, kterou jsem musel v rámci bakalářské práce vyřešit, bylo napájení celé sestavy. Pro napájení jsem se rozhodl použít upravený počítačový zdroj Evolve 350ATX s výkonem 350 W [29], ze kterého jsem vyvedl napájecí kabely do svorkovnice. Takovýto zdroj umožňuje napájení napětím o hodnotě 3,3 V, 5 V a 12 V. Pro napájení řídicí elektroniky a většiny servomotorů jsem použil 5 V.

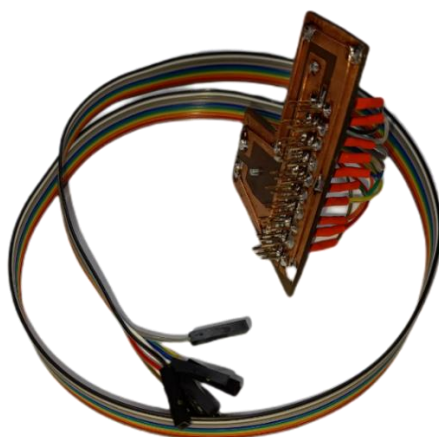
Některé servomotory je ale možné napájet vyšším napětím pro zlepšení jejich kroutícího momentu. Servomotory ovládající loket a rotaci paže mohou být napájeny 6 V, oba servomotory ramenního kloubu se mohou napájet až 8,4 V. Pro dosažení těchto voltáží jsem využil 2 step-down měničů XL4016 [30], které jsem použil pro snížení napětí z 12 V svorky na námi požadovaná napětí.

Tyto zdroje napětí jsem následně připevnil k desce, na které se nachází sestava končetiny.



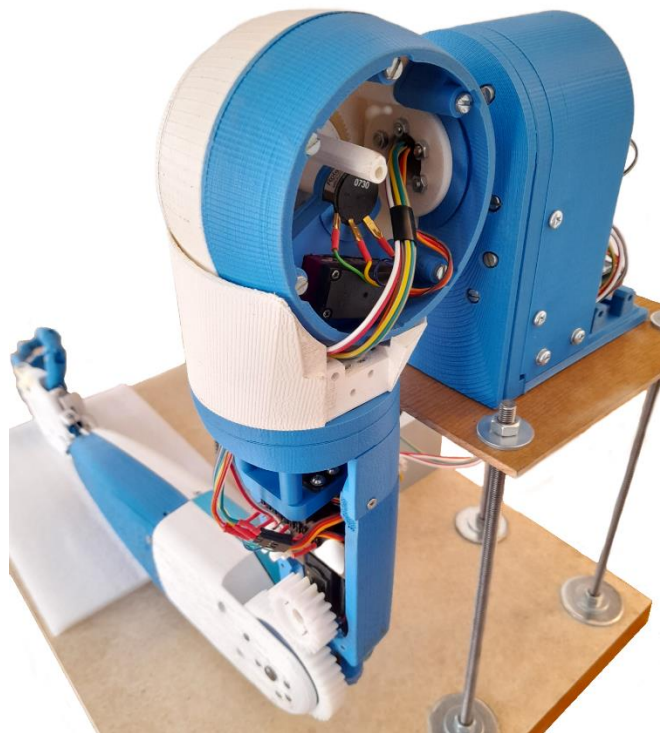
*Obr. 25: Upravený zdroj napětí*

Dále jsem upravil kabeláž z již připojených serv a vytvořil jsem kabeláž pro nové servomotory a potenciometry. Jelikož byl počet kabelů vedoucí z předloktí již příliš velký a omezovali pohyb ramene, rozhodl jsem se zredukovat počet těchto kabelů vyvedením napájení a země na dva samostatné silnější kabely. Signály mezi Arduinem a servomotory se budou posílat po vícežilovém kabelu. Tyto kabely jsem spojil se servomotory pomocí jednoduchého plošného spoje, který jsem umístil do paže vedle servomotoru lokte.

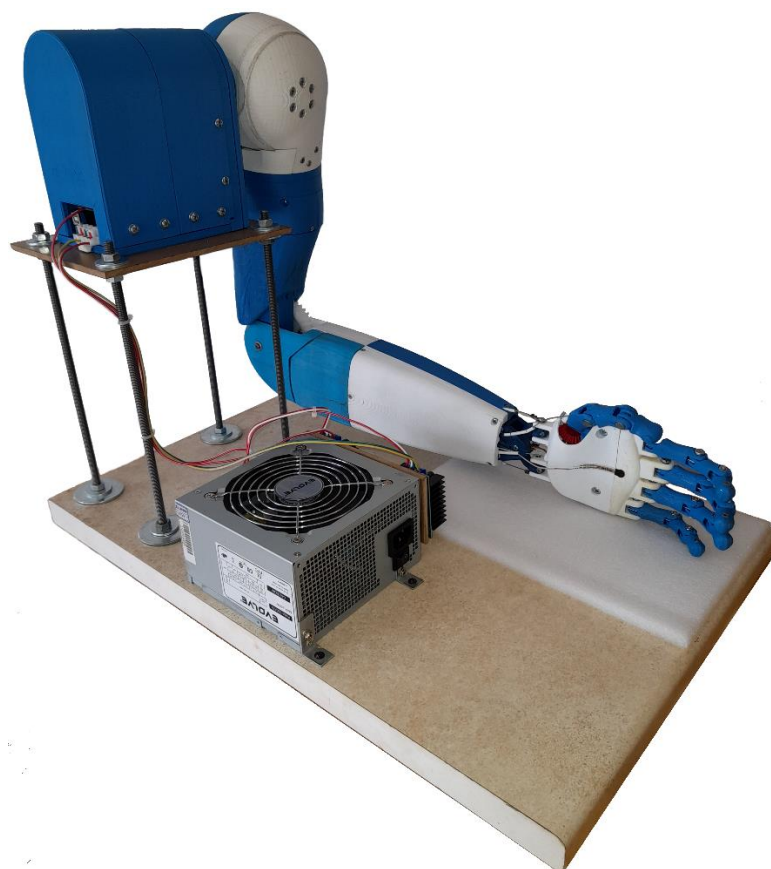


*Obr. 26: Plošný spoj s připevněnou kabeláží*

Dále jsem vytvořil kabely pro připojení potenciometru. Na jedné straně takovéhoho třížilového kabele je připájena dutinková lišta pro připojení k Arduinu, na druhé straně jsou přiletovány fastony pro snadné připojení k potenciometru.



*Obr. 27: Nezakrytovaná sestava ruky*



*Obr. 28: Konečná sestava končetiny*

## 4.5 Programování

Pro ovládání sestavy končetiny jsem použil Arduino MEGA 2560 R3, na kterém je nasazen Arduino Mega Sensor Shield V2.0, který umožňuje přímé zapojení více servomotorů díky napájení ze samostatného zdroje.

Program pro sestavu je napsán v programu Arduino IDE pomocí programovacího jazyka Wiring. K ovládání všech servomotorů jsem použil knihovnu servo.h, která dokáže pomocí funkce attach() vytvořit v programu objekty servomotorů a následně pomocí funkce write() posílat řídicí signály z Arduina do serv pro ovládání jejich polohy.

Nejdříve jsem do programu vložil knihovnu servo.h, vytvořil objekty serv a vytvořil všechny proměnné, které budou zapotřebí pro chod programu. Do proměnných jsem zároveň vložil hodnoty, které slouží jako výchozí pozice natočení servomotorů.

```
#include <Servo.h>

Servo s_palec1;
Servo s_palec2;
Servo s_ukaz;
Servo s_pros;
Servo s_prst;
Servo s_mali;
Servo s_zapes1;
Servo s_zapes2;
Servo s_loket;
Servo s_paze;
Servo s_rameno1;
Servo s_rameno2;

const int potenciometr1 = A15;
const int potenciometr2 = A12;

int palec1=50; //palec
int palec2=20; //palec(mikroservo)
int ukaz=20; //ukazováček
int pros=20; //prostředníček
int prst=20; //prsteníček
int mali=20; //maliček
int zapes1=90; //zápěstí do stran
int zapes2=90; //zápěstí nahoru-dolu
int loket=90; // loket
int paze=90; //paže
int rameno1=170; //rameno do stran 20(ruka nahore)-180(upazeno)
int rameno2=130; //rameno dopredu-dozaadu 110(vzadu)-305(nahoře)
```

Obr. 29: Část programu pro nastavení servomotorů

Následně jsem ve funkci setup() přiřadil všem servomotorům jejich příslušné piny pomocí funkce attach() a nastavil jsem sériovou komunikaci pro připojení počítače.



```

void setup() {
  s_palec1.attach(3);
  s_palec2.attach(4);
  s_ukaz.attach(5);
  s_pros.attach(6);
  s_prst.attach(7);
  s_mali.attach(8);
  s_zapes1.attach(9);
  s_zapes2.attach(10);
  s_loket.attach(44);
  s_paze.attach(45);
  s_ramenol.attach(11);
  s_rameno2.attach(12);
  Serial.begin(9600);
}

```

Obr. 30: Obsah funkce setup()

Program využívá sériové komunikace přes USB kabel s počítačem pro přímé ovládání polohy jednotlivých serv. Provedení takové změny požadované polohy servomotoru je prováděno na začátku funkce smyčky loop(). Pokud Arduino přijalo data po sériové komunikaci, tak program spustí funkci nastavení(), která provede požadované změny. Příkaz pro změnu polohy servomotoru je psán ve tvaru servo=hodnota;, například ohnutí palce se provede pomocí příkazu palec1=150;

```

void nastaveni() {
  boolean prijato_ok = true;
  String vstupkod=(Serial.readStringUntil('='));
  int vstup=(Serial.readStringUntil(';')).toInt();
  if (vstupkod=="palec1") {palec1=vstup;}
  else if (vstupkod=="palec2") {palec2=vstup;}
  else if (vstupkod=="ukaz") {ukaz=vstup;}
  else if (vstupkod=="pros") {pros=vstup;}
  else if (vstupkod=="prst") {prst=vstup;}
  else if (vstupkod=="mali") {mali=vstup;}
  else if (vstupkod=="zapes1") {zapes1=vstup;}
  else if (vstupkod=="zapes2") {zapes2=vstup;}
  else if (vstupkod=="loket") {loket=vstup;}
  else if (vstupkod=="paze") {paze=vstup;}
  else if (vstupkod=="ramenol") {ramenol=vstup;}
  else if (vstupkod=="rameno2") {rameno2=vstup;}
  else {prijato_ok = false;}

  if(prijato_ok){
    Serial.println("Prijato:");
    Serial.print(vstupkod);
    Serial.print("=");
    Serial.print(vstup);
  } else {Serial.println("Chyba");}
}

```

Obr. 31: Funkce nastaveni()

Po zjištění případných změn v programu se pomocí funkce write() nastaví požadované hodnoty na všech klasických servomotorech.

```

void loop() {
  while (Serial.available()) {
    nastaveni();
  }
  s_palec1.write(palec1);
  s_palec2.write(palec2);
  s_ukaz.write(ukaz);
  s_pros.write(pros);
  s_prst.write(prst);
  s_mali.write(mali);
  s_zapes1.write(zapes1);
  s_zapes2.write(zapes2);
  s_loket.write(loket);
  s_paze.write(paze);
  konservo1();
  konservo2();
  delay(15);
}

```

Obr. 32: Funkce loop()

Pro ovládání kontinuálních servomotorů je zapotřebí zajistit zpětnou vazbu polohy pomocí potenciometru. Nejdříve se pomocí funkce analogRead() zjistí momentální natočení servomotoru a to se pomocí funkce map() přeloží do stupňů. Dále se tato momentální poloha porovná s polohou požadovanou a určí se směr otáčení kontinuálního servomotoru. Tato funkce je v programu vytvořena ještě jednou pro ovládání druhého kontinuálního servomotoru.

```

void konservo1() {
  int poten=analogRead(potenciometr1);
  int poten2=map(poten, 0, 1023, 0, 320);
  int smer=poten2-rameno1;
  int vystup=94;
  if(-2<smer<2) (vystup=94);
  if(smer>3) (vystup=85);
  if(-3>smer) (vystup=100);
  s_rameno1.write(vystup);
}

```

Obr. 33: Funkce konservo()

Posledním příkazem ve smyčce loop() je funkce delay(), která na malou chvíli zastaví program než se smyčka loop() spustí znovu. Celý tento program je uložen v příloze č.1.

## 5 Závěr

Tato bakalářská práce rozšířila již existující model horní končetiny o ramenní kloub. Model tohoto kloubu byl vymodelován v CAD systému Autodesk Inventor a následně byly všechny sestavy rozděleny na menší díly pro snadnější montáž jednotlivých sestav a zjednodušení tisku samotných dílů.

Všechny potřebné díly byly následně vytisknuty na 3D tiskárně Rebel II a smontovány pomocí šroubových spojů. Sestava je vytvořena tak, aby jí bylo možné opakovaně rozebrat a případné poškozené díly vyměnit. Pro přístup k elektronice a kabelům byly některé díly koncipovány jako krycí.

Jako pohony pro zajištění pohybu byly vybrány dva zpřevodované kontinuální servomotory, jejichž natočení bylo kontrolováno pomocí potenciometrů, pro zajištění natáčení ramenního kloubu a jeden zpřevodované servomotor pro ovládání natočení paže.

Dále bylo v práci vyřešen problém napájení servomotorů s rozdílnými maximálními hodnotami napájecího napětí a upravena kabeláž serv umístěných v paži končetiny.

Správná funkce serv byla otestována pomocí programu, který umožňuje nastavení všech servomotorů přes sériovou komunikaci s počítačem.

Na tuto práci by bylo možné navázat například implementací dotykových senzorů konců prstů, tlakových senzorů snímajících sílu stisku robotické ruky nebo zlepšením řízení jednotlivých motorů. Tato robotická končetina by se mohla následně po úpravách několika dílů umístit na humanoidního robota.

## 6 Seznam zdrojů

- [1] ŠULC, Ondřej. 3D tisknutelná robotická ruka. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
- [2] VANĚK, Jakub. Návrh humanoidní ruky robota. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
- [3] HANZLOVÁ, Jitka a Jan HEMZA. Základy anatomie pohybového ústrojí. 2., dopl. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2009. ISBN 978-80-210-4937-6.
- [4] LABAT, Karen L. a Karen S. RYAN. Human body: a wearable product designer's guide. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2019]. ISBN 978-1-4987-5571-9.
- [5] HUDÁK, Radovan a David KACHLÍK. Memorix anatomie. 4. vydání. Ilustroval Jan BALKO, ilustroval Šárka ZAVÁZALOVÁ. Praha: Triton, 2017. ISBN 978-80-7553-420-0.
- [6] THE HISTORY OF PROSTHETICS. UNYQ [online]. 21.9.2015 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <http://unyq.com/the-history-of-prosthetics/>
- [7] CHAPPELL, Paul H. Mechatronic Hands: Prosthetic and robotic design: Prosthetic and robotic design. Stevenage: The Institution of Engineering and Technology, 2016. ISBN 1785611542;9781785611544;.
- [8] ZUO, Kevin J a Jaret L OLSON. The evolution of functional hand replacement: From iron prostheses to hand transplantation. National Center for Biotechnology Information [online]. 2014 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4128433/>
- [9] MICK, S., M. LAPEYRE, P. ROUANET, Ch. HALGAND, J. BENOIS-PINEAU, F. PACLET, P. OUDEYER a A. DE RUDY. Reachy, a 3D-Printed Human-Like Robotic Arm as a Testbed for Human-Robot Control Strategies. Frontiers in Neurorobotics [online]. 2019, , 65 [cit. 2020-06-14]. DOI: 10.3389/fnbot.2019.00065. PMID: 31474846. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbot.2019.00065/full>
- [10] Reachy robotic arm. Wevolver: Pollen Robotics [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/wevolver.staff/reachy.robotic.arm>
- [11] LANGEVIN, Gaël. InMoov. InMoov [online]. 2013 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://inmoov.fr/>
- [12] ŘEZÁČ, Kamil. Krokové motory [online]. 28.10.2002 [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: <https://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [13] KROKOVÝ MOTOR - CO TO JE A JAK FUNGUJE [online]. 2018 [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: [https://shop.eufactory.com/blog/12\\_krokovy-motor-uvod](https://shop.eufactory.com/blog/12_krokovy-motor-uvod)
- [14] RYDLO, Pavel. KROKOVÉ MOTORY A JEJICH ŘÍZENÍ: Studijní texty [online]. 2000 [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: <http://cis.wz.cz/elz/krok2.pdf>
- [15] ARDUINO NÁVODY: Servo motor [online]. Martin.S, 2017 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://navody.arduino-shop.cz/arduino-projekty/servo-motor.html>
- [16] CircuitDigest: Servo Motor: Basics, Theory & Working Principle [online]. Apoorve, 2015 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/article/servo-motor-basics>
- [17] Biaxial/SPT5325LV-320/25kg/Controllable 300°/SPT Servo/Large torque/Large angle/Metal gear/Digital servo. SPT Servo [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <http://www.spt-servo.com/Product/428395112.html>

- [18] EARL, Bill. Adafruit: Continuous Rotation Servos [online]. 2014 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/adafruit-motor-selection-guide/continuous-rotation-servos>
- [19] Anna ŘEHOVÁ a Petr VAVŘINÁK. AUTOMATIZACE [online]. 2006 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: [http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/studijni\\_materialy/automatizace.pdf](http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/studijni_materialy/automatizace.pdf)
- [20] Position Sensors | Types, LVDT, Rotary Encoder. ELECTRONICS HUB [online]. 2019 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: [https://www.electronicshub.org/position-sensors/#Optical\\_Position\\_Sensors](https://www.electronicshub.org/position-sensors/#Optical_Position_Sensors)
- [21] HUGHES, John M. Arduino: a technical reference: a handbook for technicians, engineers, and makers. Beijing: O'Reilly, 2016. ISBN 978-1-491-92176-0.
- [22] Luboš M. Vývojové desky. Arduino návody [online]. 2016 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://navody.arduino-shop.cz/zaciname-s-arduinem/vyvojove-desky.html>
- [23] Arduino Mega senzor shield. ARDUINO-SHOP.CZ [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/arduino/1202-arduino-mega-senzor-shield.html?mena=2>
- [24] JX servo PDI-HV5932MG(digital) 59g/0,1sec/32kg. JX servo [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.jxservo.cz/JX-servo-PDI-HV5932MG-digital-59g-0-1sec-32kg-d249.htm>
- [25] BH Servo 466-LV270 57g/0,14s/35kg/270° (Digitální). BigHobby [online]. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.bighobby.cz/bh-466-lv270-servo-57g-0-14s-35kg-270--digitalni-/>
- [26] SNH 61807 2RS Kuličkové ložisko. MAZETA [online]. [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.mateza.cz/e-shop/kulickove-lozisko-snh-61807-2rs>
- [27] ČELNÍ OZUBENÁ KOLA Z PLASTU, MODUL 0,7 VSTŘIKOVANÁ, PŘÍMÉ OZUBENÍ, ÚHEL ZÁBĚRU 20°. MAREK [online]. [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.marek.eu/norelem-normovane-dily/systemy-a-komponenty-pro-vyrobu-stroju-a-zarizeni/technika-hnacich-ustroji/ozubena-kola-ozubene-tyce-kuzelova-ozubena-kola/25376/celni-ozubena-kola-z-plastu-modul-0-7-vstrikovana-prime-ozubeni-uhel-zaberu-20.html>
- [28] SNH 61904ZZ Kuličkové ložisko. MAZETA [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.mateza.cz/e-shop/kulickove-lozisko-snh-61904zz>
- [29] Evolveo - 350W. CZC.CZ [online]. [cit. 2021-6-3]. Dostupné z: [https://www.czc.cz/evolveo-350w/72909/produkt?gclid=Cj0KCQjw--GFBhDeARIsACH\\_kdbZoghF1zwfB\\_UFWiGsM\\_ry3JUeCzS5cc28bTwuuEzL40z-1RujgcaApVPEALw\\_wcB](https://www.czc.cz/evolveo-350w/72909/produkt?gclid=Cj0KCQjw--GFBhDeARIsACH_kdbZoghF1zwfB_UFWiGsM_ry3JUeCzS5cc28bTwuuEzL40z-1RujgcaApVPEALw_wcB)
- [30] Napájecí modul, step-down měnič 0-32V, 9A, 280W s XL4016. Hadex [online]. [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/m411-napajeci-modul-step-down-menic-0-32v-9a-280w-s-xl4016/>

## 7 Seznam obrázků

Obr. 1: Ventrální a dorsální flexe [3].....	8
Obr. 2: Abdukce, addukce a elevace [3] .....	8
Obr. 3: Vnější a vnitřní rotace [3].....	8
Obr. 4: Desing protézy ruky od Amboise Paté [7] .....	9
Obr. 5: Reachy [10] .....	10
Obr. 6: InMoov [11] .....	11
Obr. 7: Řez krokovým motorem [13] .....	12
Obr. 8: Krokový motor [13].....	13
Obr. 9: Servomotor [17].....	13
Obr. 10: Princip optického enkodéru [20] .....	14
Obr. 11: Potenciometr [20].....	15
Obr. 12: Arduino Mega 2560 [22].....	16
Obr. 13: Arduino Mega sensor shield [23].....	17
Obr. 14: Výchozí stav horní končetiny [2].....	18
Obr. 15: Kinematické schéma ramenního kloubu .....	19
Obr. 16: Rozložená sestava ramene .....	21
Obr. 17: Schéma základních rozměrů ozubení [27].....	22
Obr. 18: Rozložená druhá sestava ramene .....	23
Obr. 19: Rozložená sestava nových dílů paže .....	24
Obr. 20: Konečná sestava paže .....	24
Obr. 21: Rozložená sestava trupu .....	25
Obr. 22: Připojení pastorku.....	25
Obr. 23: Servomotor s uchyceným pastorkem .....	28
Obr. 24: Dokončená sestava horní končetiny.....	29
Obr. 25: Upravený zdroj napětí .....	30
Obr. 26: Plošný spoj s připevněnou kabeláží .....	30
Obr. 27: Nezakrytovaná sestava ruky .....	31
Obr. 28: Konečná sestava končetiny.....	31
Obr. 29: Část programu pro nastavení servomotorů .....	32
Obr. 30: Obsah funkce setup().....	33
Obr. 31: Funkce nastavení() .....	33
Obr. 32: Funkce loop() .....	34
Obr. 33: Funkce konservo().....	34

## 8 Seznam příloh

Příloha č. 1: SD karta