

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Nejc Ločičnik

**Biomimetična antropomorfna  
robotska roka**

DIPLOMSKO DELO

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJSKI PROGRAM  
PRVE STOPNJE  
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: viš. pred. dr. Robert Rozman

Ljubljana, 2023

To delo je ponujeno pod licenco *Creative Commons Priznanje avtorstva-Deljenje pod enakimi pogoji 2.5 Slovenija* (ali novejšo različico). To pomeni, da se tako besedilo, slike, grafi in druge sestavine dela kot tudi rezultati diplomskega dela lahko prosto distribuirajo, reproducirajo, uporabljajo, priobčujejo javnosti in predelujejo, pod pogojem, da se jasno in vidno navede avtorja in naslov tega dela in da se v primeru spremembe, preoblikovanja ali uporabe tega dela v svojem delu, lahko distribuira predelava le pod licenco, ki je enaka tej. Podrobnosti licence so dostopne na spletni strani creativecommons.si ali na Inštitutu za intelektualno lastnino, Strelška 1, 1000 Ljubljana.



Izvorna koda diplomskega dela, njeni rezultati in v ta namen razvita programska oprema je ponujena pod licenco GNU General Public License, različica 3 (ali novejša). To pomeni, da se lahko prosto distribuira in/ali predeluje pod njenimi pogoji. Podrobnosti licence so dostopne na spletni strani <http://www.gnu.org/licenses/>.

*Besedilo je oblikovano z urejevalnikom besedil L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.*

**Kandidat:** Nejc Ločičnik

**Naslov:** Biomimetična antropomorfna robotska roka

**Vrsta naloge:** Diplomska naloga na visokošolskem strokovnem programu prve stopnje Računalništvo in informatika

**Mentor:** viš. pred. dr. Robert Rozman

**Opis:**

Po lastni ideji načrtujte, izdelajte in sprogramirajte model robotske roke. Izvedite najprej mehansko konstrukcijo in potem še računalniško krmiljenje. Pri tem poskusite čim bolj posnemati naravna gibanja človeške roke. Delovanje roke preizkusite in ocenite njeno praktično uporabnost.

**Title:** Biomimetic Anthropomorphic Robotic Hand

**Description:**

Design, build, and program a model of a robotic hand according to your own ideas. Design the mechanical construction and then the computer controls. Try to mimic the natural movements of a human hand as closely as possible. Test the operation of the hand and evaluate its practical usability.



# Kazalo

## Povzetek

## Abstract

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zasnova mehanskega dela</b>	<b>3</b>
2.1	Osnovno delovanje sistema škripcev . . . . .	5
2.2	Razlaga posledičnih premikov . . . . .	7
2.3	Prilagoditev sistema škripcev za gibanje prsta . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Mehanska konstrukcija roke</b>	<b>11</b>
3.1	Prsti . . . . .	12
3.2	Palec . . . . .	30
3.3	Dlan . . . . .	35
3.4	Podporne komponente . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Aparaturna krmilna oprema</b>	<b>45</b>
4.1	Opis aparaturnih komponent . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Programska krmilna oprema</b>	<b>55</b>
5.1	Komunikacija med mikrokrmilniki in mikroročunalnikom . . .	56
5.2	Krmiljenje sklepov . . . . .	63
5.3	Varovanje robotske roke pred poškodbami . . . . .	67
5.4	Razred za krmiljenje sklepa <i>HandJoint</i> . . . . .	68

5.5	Glavna programska zanka v mikrokrmilnikih . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Preizkus delovanja</b>	<b>73</b>
6.1	Preizkus delovanja sistema škripcev . . . . .	74
6.2	Preizkusi prijemanja . . . . .	81
<b>7</b>	<b>Sklepne ugotovitve</b>	<b>85</b>
	<b>Literatura</b>	<b>87</b>

# Seznam uporabljenih kratic

kratica	angleško	slovensko
<b>DIP</b>	Distal Interphalangeal	distalni interfalangealni
<b>PIP</b>	Proximal Interphalangeal	proksimalni interfalangealni
<b>MCP</b>	Metacarpophalangeal	metacarpafalangealni
<b>IP</b>	Interphalangeal	interfalangealni
<b>CMC</b>	Carpometacarpal	karpometakarpalni
<b>DOF</b>	Degrees of Freedom	prostostne stopnje
<b>PLA</b>	Polylactic acid	poliaktična kislina
<b>FDM</b>	Fused Deposition Modeling	modeliranje s taljenim nanašanjem



# Povzetek

**Naslov:** Biomimetična antropomorfna robotska roka

**Avtor:** Nejc Ločičnik

Naloga opisuje načrtovanje, izdelavo in programiranje biomimetične antropomorfne robotske roke z dvajsetimi prostostnimi stopnjami oziroma gibljivimi sklepi. Konstrukcija robotske roke poskuša posnemati obliko in razpon gibanja posameznih sklepov človeške roke z namenom, da s tem tudi poustvari njeno prijemanlo funkcijo. Konstrukcija temelji na sistemu škripcev, ki omogoča neodvisne premike sosednjih sklepov istega prsta. Konstrukcija je preprosta, modularna in ohranja dimenzije primerljive s človeško roko. Robotska roka je izdelana z uporabo cenovno ugodnih komponent in dostopne tehnologije tiskanja 3D. Programska oprema omogoča osnovno krmiljenje sklepov, ki so preko vzporednih vrvic povezani s servomotorji. Vsak sklep vsebuje pozicijsko tipalo, ki omogoča natančno regulacijo njegovega položaja. Delovanje je preizkušeno z računalniškim krmiljenjem prsta robotske roke in prikazuje pomembnost napetosti vrvic za pravilno delovanje sistema škripcev ter potrebo po boljši koordinaciji sosednjih sklepov. Razpon gibanja konstrukcije dodatno preizkusimo z ročnim krmiljenjem prijemanja predmetov različnih oblik in velikosti. Preizkus pokaže, da konstrukcija robotske roke uspešno posnema glavne gibe prstov človeške roke, medtem ko se lahko negibljiva dlan v prihodnosti še izboljša. Preizkus prijemanja prav tako razkrije redundantnost nekaterih sklepov, kar pomeni, da lahko primerljive prijeme dosežemo z manjšim številom aktivnih sklepov. Praktično uporabo robotske

roke lahko izboljšamo še tako, da konstrukciji dodamo tipalo za zaznavanje dotika, programsko opremo pa nadgradimo s kompleksnejšim modelom upravljanja gibanja.

**Ključne besede:** biomimetična antropomorfna robotska roka, kite/vrvice, sklep, aktuator, škripec.

# Abstract

**Title:** Biomimetic Anthropomorphic Robotic Hand

**Author:** Nejc Ločičnik

The thesis describes the design, construction and programming of a biomimetic anthropomorphic robotic hand with 20 degrees of freedom, i.e. flexible joints. The design of the robotic hand attempts to mimic the shape and range of motion of the individual joints of the human hand, with the goal of replicating its grasping function. The design is based on a pulley system that allows adjacent joints of the same finger to move individually. The design is simple, modular, and has dimensions comparable to those of the human hand. The robotic hand is made from low-cost components and affordable 3D printing technology. Software provides basic control of the joints, which are connected to servo motors via parallel strings. Each joint contains a position sensor that provides precise control of its position. The operation of the robotic hand is tested by computer control of finger joints, demonstrating the importance of the tension of the strings for proper operation of the pulley system and the need for better coordination of adjacent joints. The range of motion is also tested by manual control while grasping objects of different shapes and sizes. The grasping test shows that the construction of the robotic hand successfully mimics the main movements of the fingers of the human hand, while the non-moving part of the hand can be further improved in the future. The grasping test also reveals the redundancy of some joints, which means that comparable grasps can be achieved with less functional joints. The practical use of the robotic hand can be further improved by adding a touch sensor

to the design and by upgrading the software with a more complex motion control model.

**Keywords:** biomimetic anthropomorphic robotic hand, tendons/strings, joint, actuator, pulley.

# Poglavlje 1

## Uvod

Človeška roka je zelo razvit in kompleksen organ za prijemanje. Veliko število premikajočih sklepov omogoča širok nabor gibalnih kombinacij, njihova struktura pa dovoljuje prilagajanje sili in hitrosti. Te lastnosti naredijo posnemanje funkcionalnosti človeške roke zanimiv problem na področju biomimetične robotike.

Biomimetična robotika poskuša čim bolj posnemati strukture, ki omogočajo naravne gibe. To doseže z nadgradnjo klasičnih inženirskeih rešitev z biološkimi načeli. Naloga podrobnejše spada v antropomorfen podsklop biomimetike, saj poskušamo posnemati lastnosti človeške roke.

Tovrstne robotske roke lahko opredelimo po načinu premika sklepov v tri skupine. Prva skupina vsebuje povezave med sklepi prsta, kar pomeni, da cel prst potrebuje le en motor oziroma aktuator in deluje kot ena prostostna stopnja [16, 11]. V tem primeru prijem ni prilagodljiv na predmet, saj se posamezen sklep ne more gibati neodvisno od sosednjih sklepov istega prsta.

Druga skupina vsebuje aktuatorje v samih členkih prsta. To pripomore k večji spremnosti prsta, saj lahko vsak sklep premikamo posamezno [2]. Posledica takšnega pristopa so večje dimenzije in teža prstov, kar povzroči večjo obremenitev aktuatorjev.

Zadnja in najbolj sodobna skupina pa ima bolj biomimetičen pristop. Konstrukcija takšne robotske roke posnema kompleksno zgradbo človeške

roke in omogoča naravni gib prstov (prilagodljiv prijem) z manjšim številom aktuatorjev [14, 15, 12]. Ligamenti in tetiva človeške roke so nadomeščeni z elastičnimi elementi, kabli ali vrvicami. To dovoljuje odmik aktuatorjev iz roke v podlaket ali preizkusno mizo, kar pomeni, da lahko dimenzijske roke ostanejo približno enake človeški. Slabost takšnega pristopa je kompleksna zgradba, ki ne dovoljuje uporabe pozicijskih tipal v dejanskih sklepih. Krmiljenje prstov je zato posledično manj natančno.

Izdelana robotska roka poskuša združiti prednosti vseh treh skupin. Glavni cilj je razumeti strukturo posameznih sklepov in jih poustvariti s preprosto in modularno konstrukcijo, ki bi karseda ohranila obliko in prijemalno funkcijo človeške roke. Zasnovati želimo sistem, ki omogoča naravno gibanje prstov ali posamezne premike sklepov istega prsta. Konstrukcija sistema mora biti dovolj majhna, da ohrani približne dimenzijske roke. Izdelava robotske roke mora biti cenovno ugodna, zato je večina delov narejenih s pomočjo cenovno dostopne tehnologije tiskanja 3D. Vsak sklep mora vsebovati pozicijsko tipalo za natančno regulacijo položaja. Programska oprema mora podpirati enostavno interakcijo uporabnika z robotsko roko. Končen izdelek naj bi bil uporaben za izobraževalne in raziskovalne namene.

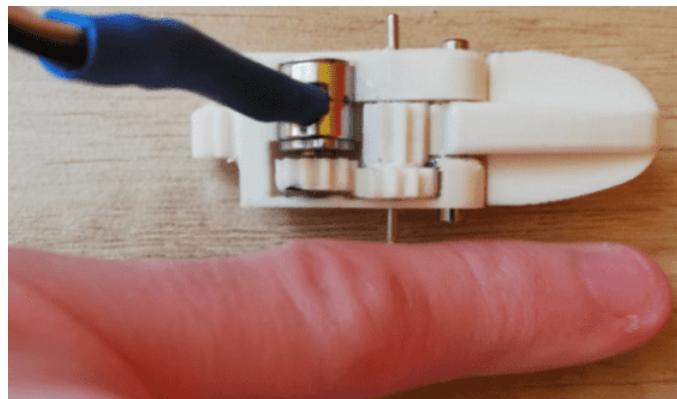
V nadaljevanju se najprej opiše zasnova mehanskega dela (2. poglavje), ki je potrebna za premik posameznega sklepa. Sledi opis konstrukcije (3. poglavje), kjer se ločeno obravnava konstrukcija prstov, dlani, palca in ostalih komponent, potrebnih za delovanje. Sledi opis aparaturne krmilne opreme (4. poglavje), ki opisuje električno vezavo in lastnosti izbranih komponent. Obravnava izdelave robotske roke se zaključi s podrobnejšim opisom krmilnega programa (5. poglavje) in preizkusom krmiljenja ter razponov gibanja konstrukcije (6. poglavje). V zadnjem poglavju podamo še sklepne ugotovitve.

## Poglavlje 2

### Zasnova mehanskega dela

Najprej moramo zasnovati mehanski sistem, ki omogoča prilagojen prijem. Prilagojen prijem dopušča prilagoditev sklepov prsta na prijeti predmet, kar omogoča močnejši prijem. Takšen sistem lahko izvedemo na dva načina. Prvi način omogoča neodvisno gibanje sklepov istega prsta, kjer lahko vsak sklep posebej prilagodimo na predmet. Drugi način pa je odvisen od same zgradbe prstov, saj poskušamo poustvariti strukturno odvisnost med sklepi, podobno kot v človeški roki, kjer se prst samodejno prilagodi prijetemu predmetu. Imamo torej kompromis med kompleksnostjo konstrukcije roke in njenim krmiljenjem. Ker je eden od začetnih ciljev preprosta in modularna konstrukcija, smo uporabili prvi način.

Najbolj neposreden pristop do posamičnega premika sklepov je uporaba aktuatorjev v samih členkih prstov. Rezultat tega so večje dimenzije robotske roke [2]. Naša prvotna ideja je bila nadomestitev servo motorjev z mikro koračnimi motorji (slika 2.1). Z uporabo manjših motorjev lahko dimenzije robotske roke ostanejo primerljive človeški. Posledica uporabe manjših motorjev je velika izguba moči. Začetni preizkus takega prototipa je pokazal, da so zaradi nenatančnosti tiskanja 3D in trenja, prisotnega med gibljivimi deli, motorji preobremenjeni za dejansko uporabo. Zato smo se odločili za uporabo biomimetičnega pristopa.



Slika 2.1: Primer prvotne ideje.

Če želimo majhne dimenzije in močan prijem, moramo aktuatorje odmakniti izven robotske roke. V tem primeru potrebujemo sistem, ki prenese gibanje do sklepov, a ohranja možnost posameznih premikov sklepov istega prsta. Za ta namen podobne roke uporabijo vzporedne vrvice, kjer en konec skrbi za upogib in drug za iztezanje sklepa [12].

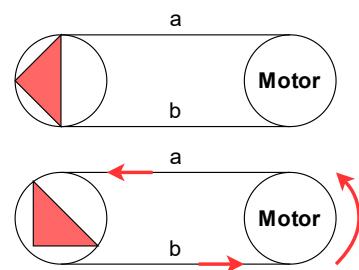
Najbolj primeren je sistem škripcev. Zasnova sistema škripcev izvira iz YouTube videoposnetka, kjer uporabnik Will Cogley izdeluje svojo robotsko roko (Slika 2.2). Prikazano izvirno zasnovo smo pri svojem delu dodatno prilagodili za vodenje prstov robotske roke.



Slika 2.2: Primer izvedbe prsta s pomočjo sistema škripcev [3].

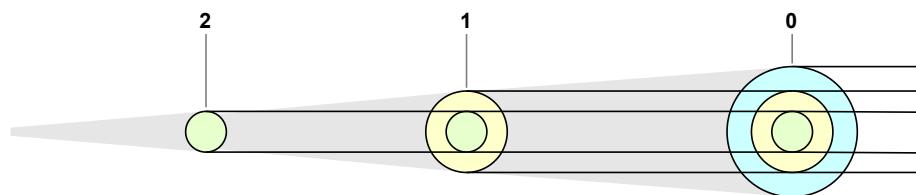
## 2.1 Osnovno delovanje sistema škripcev

Slika 2.3 prikazuje delovanje osnovnega modela, ki vsebuje sklep in motor. Prenos gibanja poteka preko vrvice, ki je na sredini pritrjena na sklep. Konca vrvice a in b pa sta napeto pritrjena na motor. Ko motor zavrtimo, se napetost na enem koncu zmanjša, medtem ko se na drugem poveča, kar povzroči enako rotacijo na sklepu. Z večjo napetostjo vrvice pripomoremo k togosti sklepa in čim bolj enakomerni rotaciji med aktuatorjem in dejanskim sklepom.

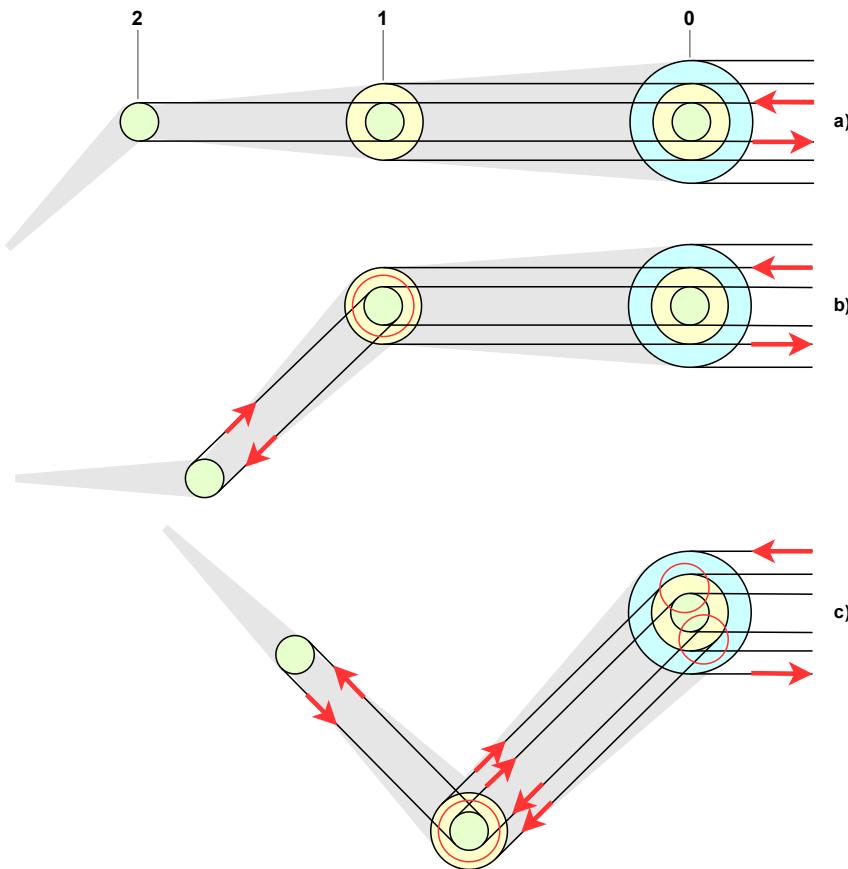


Slika 2.3: Osnova sistema za prenos gibanja preko vrvic.

Na sliki 2.4 vidimo razširitev osnovnega modela na 3 sklepe, kot jih potrebuje prst. Vrvice do kasnejših sklepov vodimo preko škripcev. Škripci in gonilni del sklepa, kamor je navezana vrvica, so enake velikosti.



Slika 2.4: Razširitev sistema škripcev na 3 sklepe.



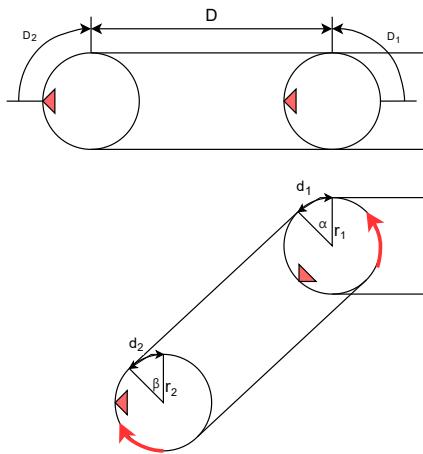
Slika 2.5: Primeri posledičnih premikov sosednjih sklepov.

Slika 2.5 prikazuje posamezne premike sklepov in njihove posledične premike. Posledičen premik se zgodi zaradi navijanja oziroma odvijanja (obkroženo z rdečo) vrvice na škripcu v predhodnem sklepu, medtem ko se razdalja med sklepi ne spremeni.

Vsek sklep lahko premikamo posamezno. Sklep 2 je zadnji v vrsti in ne vpliva na druge (primer a). Premik sklepa 1 posledično premakne sklep 2 (primer b). Premik sklepa 0 posledično premakne sklep 1 (primer c). Sklep 2 pri premiku sklepa 0 ne spremeni pozicije, ker se posledičen premik izenači (primer c). Navijanje oziroma odvijanje vrvice se zgodi dvakrat v obratno smer. Prvič v sklepu 0 zaradi prvotnega premika in drugič v sklepu 1 zaradi posledičnega premika.

## 2.2 Razlaga posledičnih premikov

Velikost posledičnega premika je odvisna od razlike velikosti med predhodnim škripcem in gonilnim delom sklepa, kjer je vrvica pritrjena. Če sta obsega škripca in gonilnega dela enaka, potem je velikost posledičnega premika enaka prvotnemu premiku.



Slika 2.6: Prikaz posledičnega premika.

Dolžina konca vrvice a je  $(D_1 \pm d_1) + D + (D_2 \pm d_2) = a$  (slika 2.6), kjer sta  $d_1$  in  $d_2$  odvisna od položaja  $\alpha$  sklepa 1 (prvotni premik) in položaja  $\beta$  sklepa 2 (posledični premik) ter obsega škripca in gonilnega dela sklepa.

$$d_1 = 2\pi r_1 \frac{\alpha}{360}$$

$$d_2 = 2\pi r_2 \frac{\beta}{360}$$

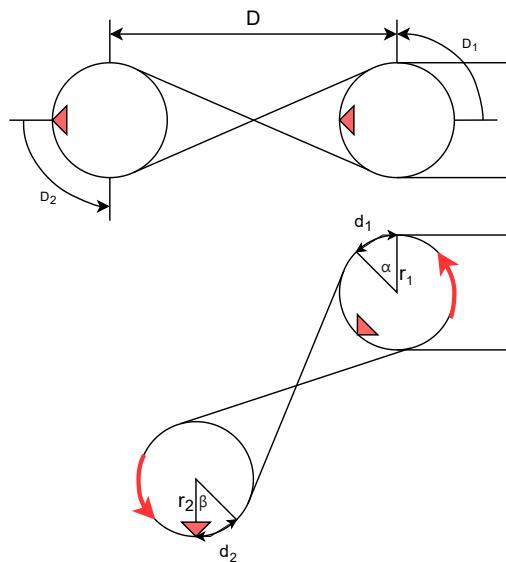
Zanima nas razmerje med  $d_1$  in  $d_2$ .

$$2\pi r_1 \frac{\alpha}{360} = 2\pi r_2 \frac{\beta}{360}$$

$$r_1 \alpha = r_2 \beta$$

Velikost posledičnega premika  $\beta$  je torej  $\beta = \frac{r_1}{r_2} \alpha$  in v primeru, da je  $r_1 = r_2$ , je velikost prvotnega premika sklepa enaka posledičnemu  $\alpha = \beta$ .

V zgornjem primeru nismo upoštevali smeri premika. Če sta konca vrvice med škripci in gonilnim delom povezana vzporedno, je smer posledičnega premika obratna smeri prvotnega premika. V primeru, da konca vrvice križamo, kot prikazuje slika 2.7 ostane smer posledičnega premika enaka smeri prvotnega premika.



Slika 2.7: Prikaz spremembe smeri posledičnega premika s križanjem vrvic.

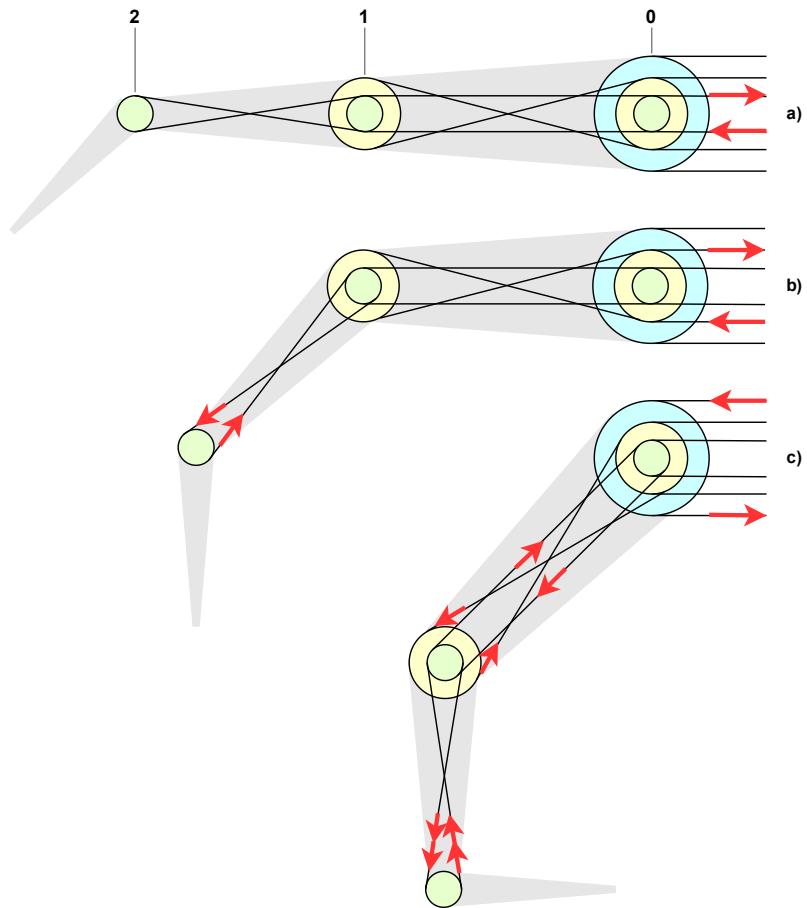
## 2.3 Prilagoditev sistema škripcev za gibanje prsta

Zasnovan sistem škripcev je namenjen premiku sklepov prsta. S prilagoditvijo posledičnih premikov lahko sistem dodatno približamo privzetemu gibu prsta. Smer premika sklepov je pri privzetem gibanju enaka, zato je smiselno, da sistem škripcev to poustvari.

Sistemu škripcev lahko prilagodimo velikost in smer posledičnih premikov. Ker poskušamo ohraniti karseda majhne dimenzije robotske roke, ni smiselno spremenjati velikosti, saj zato potrebujemo večje škripce. Lahko pa s križanjem koncev vrvic med gonilnim delom in predhodnim škripcem enostavno spremenimo smer (slika 2.8). Smer posledičnega premika sedaj ostane enaka smeri prvotnega premika.

Veliko razliko opazimo pri premiku sklepa 0, ki sedaj posledično premakne tudi sklep 2 (primer c). Posledični premik sklepa 2 ob premiku sklepa 0 je sedaj dvakrat večji od prvotnega.

Prilagojen sistem zboljša krmiljenje prsta, saj zmanjša delovni čas aktuatorjev ob naravnem gibu. Upogib celega prsta (primer c) je zdaj lahko izveden s premikom le enega sklepa.



Slika 2.8: Primeri posledičnih premikov sosednjih sklepov po prilagoditvi.

## Poglavlje 3

### Mehanska konstrukcija roke

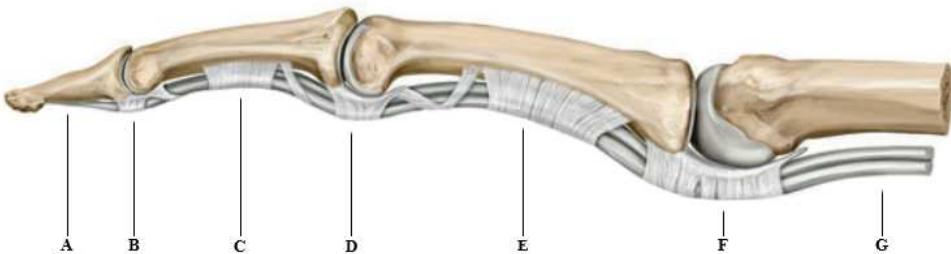
Na zasnovi mehanskega dela lahko začnemo konstruirati robotsko roko. Poglavlje je razdeljeno na konstrukcijo prstov, dlani in palca, ki je od prstov ločen zaradi drugačne strukture in funkcije. Dodatno so opisane tudi ostale podporne komponente, ki so potrebne za delovanje.

Vsi zasnovani deli so narisani v programu SolidWorks 2021 in prilagojeni za tiskanje 3D v programu CURA 5.0. Deli so tiskani z materialom PLA, debeline 1.75 mm na 3D tiskalniku Ender 5. Določeni deli so posebej prilagojeni natančnosti tega tiskalnika in zasnovani za minimalno uporabo podpore med tiskanjem. Pri tako majhnih merah in uporabi vrste tiskalnika FDM lahko tiskana podpora škoduje natančnosti izdelanih delov. Minimalno podporo ob tiskanju dosežemo tako, da se zavedamo visečih ali dvignjenih delov tiskanega kosa.

### 3.1 Prsti

Prsti človeške roke s svojimi finimi in grobimi motoričnimi funkcijami omogočajo opravljanje osnovnih funkcij, kot so čutenje, prijemanje predmetov in komunikacija (kazanje, pisanje, znakovni jezik). Prsti torej igrajo glavno vlogo v izvajanju vsakodnevnih opravil.

Prsti se nanašajo na pet končnih členov človeške roke: palec, kazalec, sredinec, prstanec in mezinec. Palec je funkcionalno in strukturno drugačen od ostalih prstov in je zato opisan v ločenem razdelku. Prsti lahko opravlja širok obseg raznolikih gibov, potrebnih za vsakodnevno življenje. Gibanje vseh treh sklepov prsta mora biti koordinirano [5].



Slika 3.1: Prikaz členkov in sklepov prsta [6].

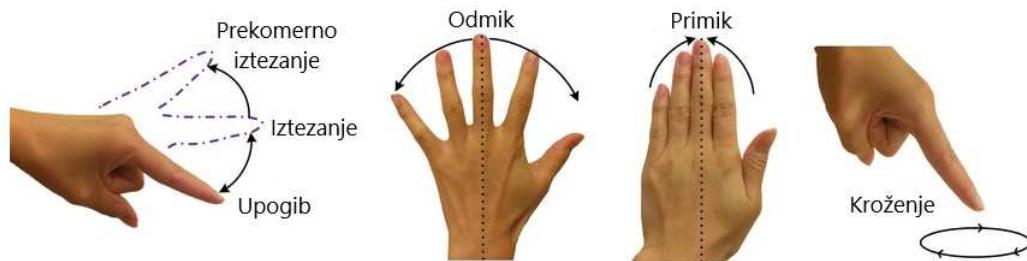
Prsti vsebujejo 3 členke: distalni (A), srednji (C) in proksimalni (E) členek in 3 sklepe: distalni interfalangealni oziroma DIP (B), proksimalni interfalangealni oziroma PIP (D) ter metakarpofalangealni oziroma MCP (F) sklep. Proksimalni členek je preko sklepa MCP povezan z metakarpalno kostjo (G) oziroma dlanjo.

Poudarek konstrukcije robotske roke je posnemati glavne gibe posameznih sklepov. To pomeni, da smo pozorni na vrste sklepov, položaje njihovih osi in razpone gibanja, ki jih omogočajo. Ker smo osredotočeni na glavne gibe sklepov, prezremo dodatne gibe, ki so prisotni zaradi zgradbe človeške roke. Primer prezrtega giba je rotacija okoli osi vzdolž členka (supinacija in pronacija), ki se pojavi v sklepu MCP prsta zaradi njegove okrogle oblike.

### 3.1.1 Vrste sklepov prstov

Kot je opazno na sliki 3.1, sta sklepa DIP (B) in PIP (D) praktično enaka. Oba sta tečajaste (*gingylmus*) oblike in imata eno os. Sklep ima eno sklepno ploskev oblikovano kot valj, drugo pa kot njegov odlitek. Sklep lahko izvaja upogib oziroma fleksijo in iztezanje oziroma ekstenzijo. Poleg upogibanja in iztezanja so v določenih sklepih prstov minimalno prisotne tudi druge vrste gibov: odmik oziroma abdukcija, primik oziroma addukcija in supinacija (slika 3.2). Te druge vrste gibov pripomorejo k prilaganju prsta različnim predmetom, kar omogoča močnejši prijem [6, 7].

Najenostavnejša mehanska realizacija takšnega sklepa je rotacijski sklep. Preprosta konstrukcija rotacijskega sklepa je zelo primerna za uporabo škripcev in pozicijskih tipal. V tem primeru zaradi omejitev mehanske konstrukcije izpustimo vse ostale vrste gibov, razen upogiba in iztezanja. Manjšo prilagodljivost zaradi pomanjkanja drugih vrst gibov lahko potencialno popravimo z boljšim položajem prsta na dlani ali orientacijo palca.

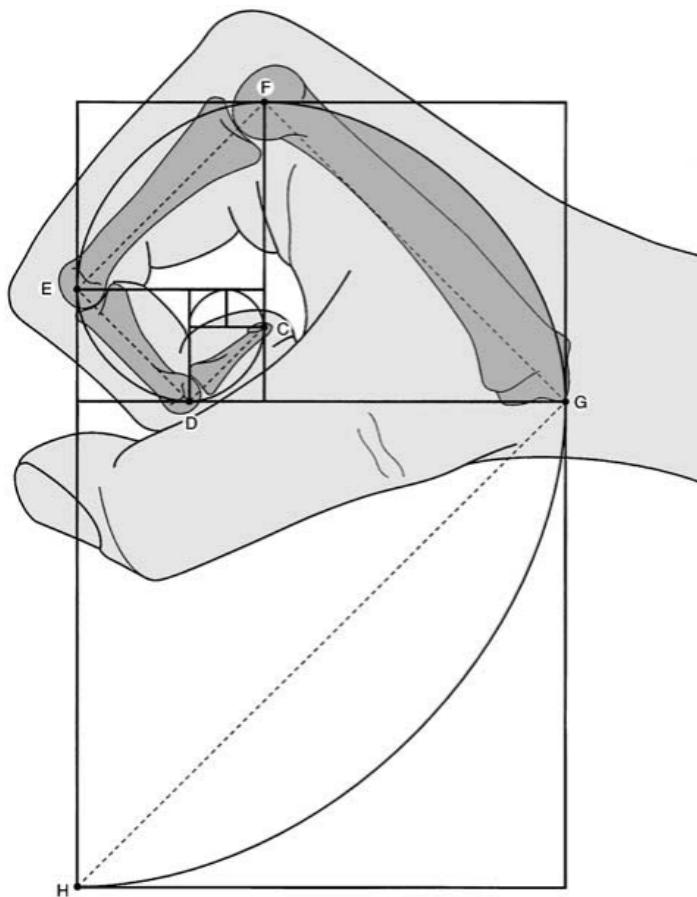


Slika 3.2: Vrste gibov prsta.

MCP (F) sklep je jajčaste (*articulatio elipsoidea*) oblike in je dvoosni sklep. Konveksna površina sklepa ima elipsoidno obliko, konkavna pa obliko njegovega odlitka. Mogoči gibi so upogib in iztezanje ter odmik in primik. Kombinacija vseh gibov se imenuje kroženje oziroma cirkumdukcija [5]. Dvoosni sklep je najlažje poustvarjen z univerzalnim sklepom. Univerzalni sklep je sestavljen iz dveh rotacijskih sklepov, katerih osi se pravokotno križata.

### 3.1.2 Razmerje dolžin členkov

V robotski roki se vsi prsti razen palca razlikujejo le po dolžini členkov. Za ohranjanje funkcionalnosti prstov se moramo povprašati po dveh dolžinskih razmerjih. Prvo je razmerje dolžin členkov istega prsta in drugo je razmerje dolžin členkov sosednjih prstov.



Slika 3.3: Upogib prsta človeške roke prekrit s Fibbonaccijevimi pravokotniki in enakokotno spiralo [13].

Splošno je sprejeto, da naravni gib prsta sledi enakokotni spirali (slika 3.3). To pomeni, da razmerje razdalj med osmi sosednjih sklepov istega prsta (npr. razmerje razdalj med sklepoma DIP in PIP ter sklepoma PIP in MCP) sledi Fibonaccijevemu razmerju, ki je enako 1.62 [13].

Razmerje dolžin členkov sosednjih prstov nima podobno lepe matematične relacije, zato uporabimo študijo o matematični relaciji istih členkov v različnih prstih (na primer razmerja med srednjimi členki sosednjih prstov) [1]. Pozorni moramo biti, saj Fibonaccijevo razmerje velja za razdalje med osmi, medtem ko v omenjeni študiji razmerja izračunajo na podlagi dolžin kosti členkov.

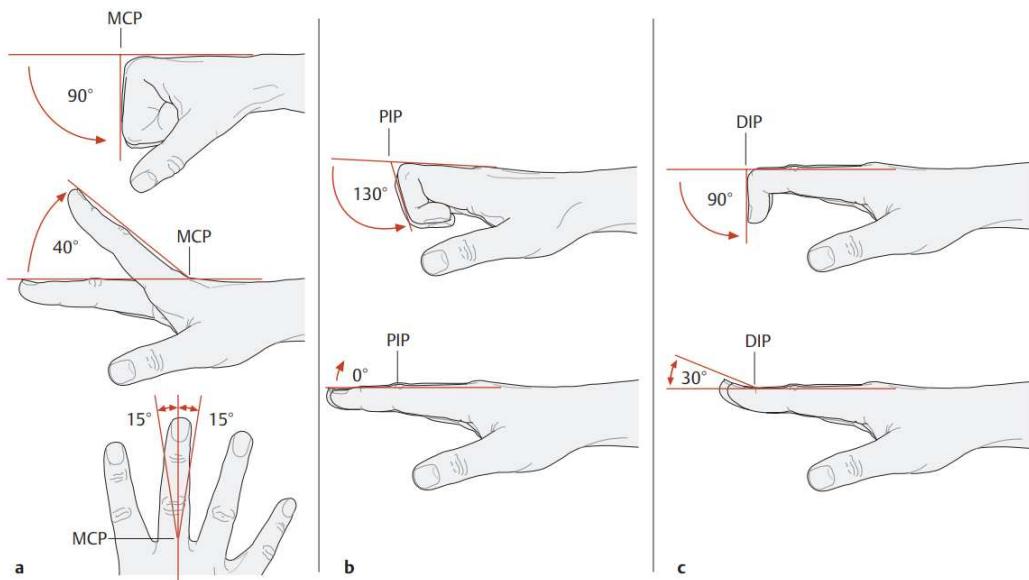
Če poznamo relacijo med členki istega prsta in istimi členki sosednjih prstov, lahko na podlagi razdalje enega členka določimo razdalje vseh ostalih členkov.

Ker iščemo minimalno velikost prstov, moramo najprej določiti velikost najmanjšega členka, ki je omejen na obeh straneh: srednji členek mezinca. Slika 3.4 prikazuje izračunana razmerja razdalj členkov robotske roke.



Slika 3.4: Izračunana razmerja dolžin členkov v odvisnosti od dolžine srednjega členka mezinca.

### 3.1.3 Razponi gibanja sklepov prsta



Slika 3.5: Razponi gibanja sklepov MCP (a), PIP (b) in DIP (c) [8].

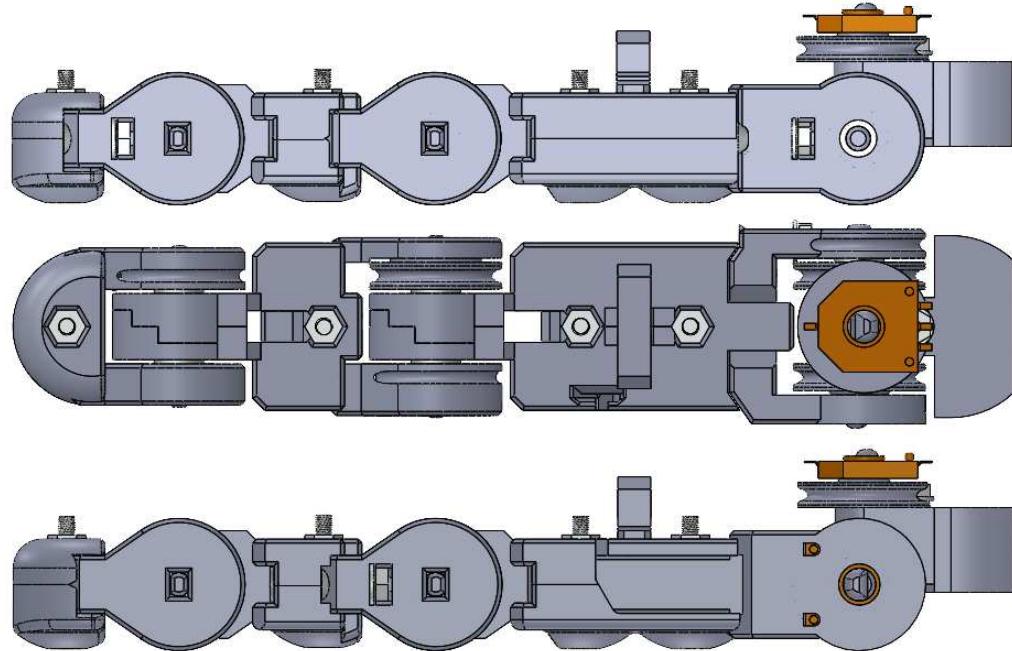
Sklep MCP (primer a) dopušča upogib do  $90^\circ$ , iztezanje do  $40^\circ$ , odmik in primik pa do  $15^\circ$  (slika 3.5). Prekomerno iztezanje sklepa MCP nima ob prijemanju praktične uporabe, zato ga lahko po potrebah konstrukcije prsta zmanjšamo.

Sklep PIP (primer b) ne dopušča iztezanja, a vsebuje upogib do  $130^\circ$ . Mera upogiba pri topih kotih je odvisna predvsem od debeline prstov in je v konstrukciji lahko manjša.

Sklep DIP (primer c) dopušča upogib do  $90^\circ$  in iztezanje do  $30^\circ$ . Kot končen sklep prsta ima sklep DIP najmanj omejitev, ki lahko vplivajo na njegov razpon gibanja.

### 3.1.4 Konstrukcija prsta

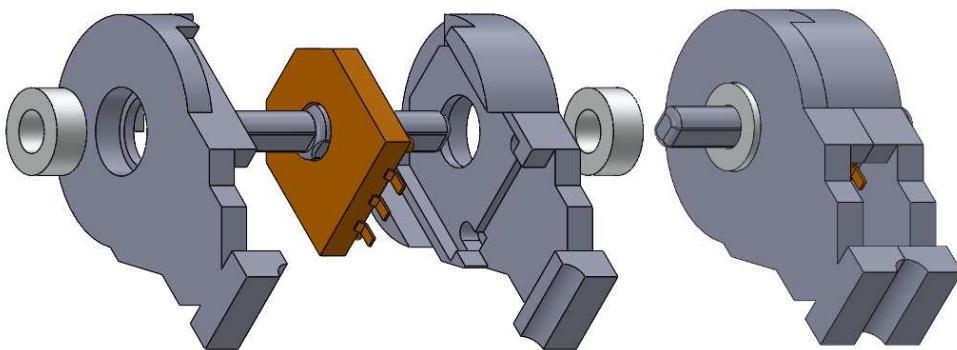
Konstrukcija prsta vsebuje 25 tiskanih delov, 4 potenciometre, 9 ležajev, 4 pare vijakov in matic, ki pritrdijo vse sestavne dele, ter 4 pare vijakov, matic in podložk, ki pritrdijo vrvice na gonalni del sklepa.



Slika 3.6: Primer konstrukcije celega prsta - mezinec.

### Rotacijski sklep

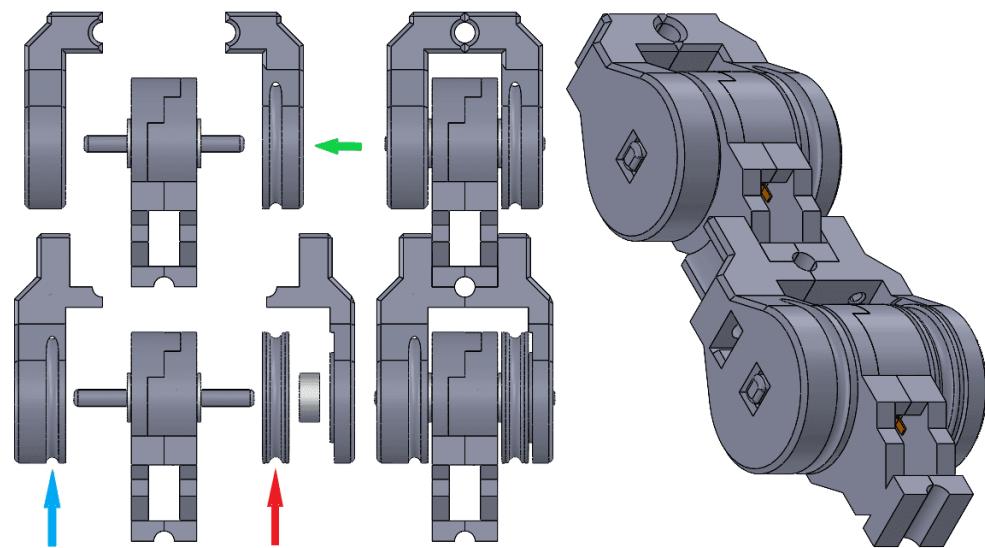
Zasnovno prsta začnemo z najbolj osnovnim sklepom - rotacijskim sklepom. Rotacijski sklep je uporabljen za mehansko realizacijo sklepov DIP in PIP pri prstih. Sklepa DIP in PIP sta skoraj popolnoma enaka, zato ju lahko obravnavamo skupaj.



Slika 3.7: Jedro rotacijskega sklepa.

Slika 3.7 prikazuje jedro rotacijskega sklepa. Na sredini sklepa je potenciometer, ki je uporabljen kot pozicijsko tipalo. Skozi sklep poteka os, ki se na sredini popolnoma prilega potenciometru. Če lahko os v potenciometru zavrtimo, ne da ga premaknemo, bo prikazan položaj sklepa nepravilen.

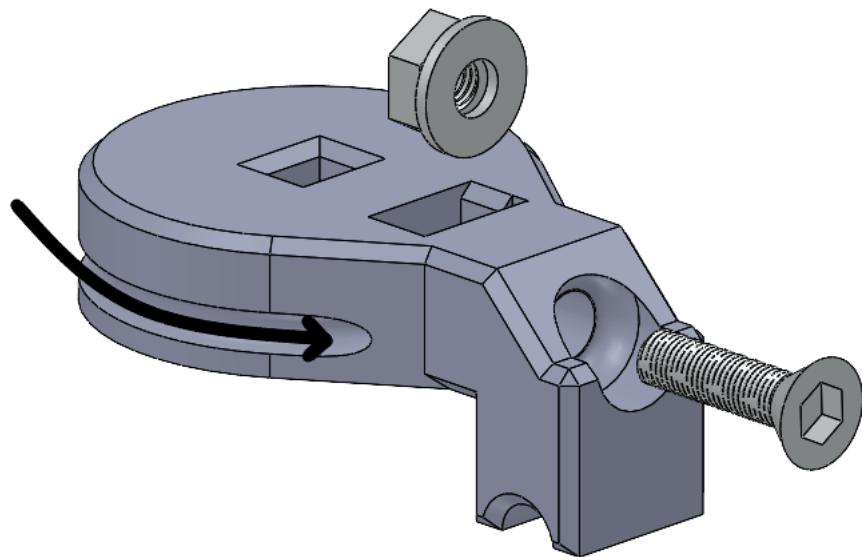
Potenciometer je nato stisnjен v ohišje. Na vsaki strani ohišja je pritrjen ležaj, ki poskrbi za stabilnost in pravilno vrtenje osi ter olajša trenje med ohišjem in sosednjimi deli. Ohišje prav tako vsebuje prostor za kable, potrebne za delovanje potenciometra.



Slika 3.8: Sklepa DIP in PIP povezana s srednjim členkom.

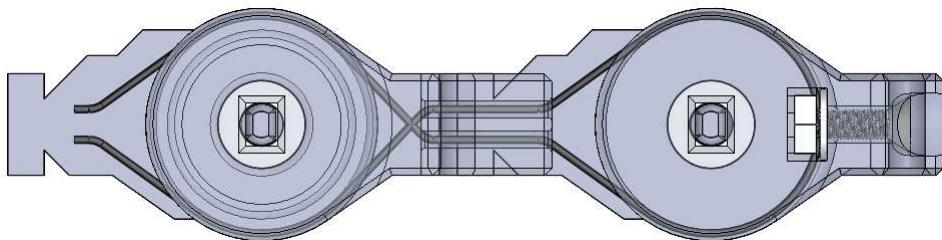
Drug del sklepa in polovico členka predstavljajo stranice, ki se nasadijo na izpostavljen del osi (slika 3.8). Sklep PIP vsebuje škripec (rdeča puščica), preko katerega je napeljana vrvica, ki poganja sklep DIP. Škripec vsebuje ležaj za čim lažje vrtenje.

Ena od stranic predstavlja gonilni del sklepa. Na gonilni del sklepa je pritrjena vrvica, ki premika sklep. Desni del sklepa DIP (zelena puščica) in levi del sklepa PIP (modra puščica) sta gonilna dela.



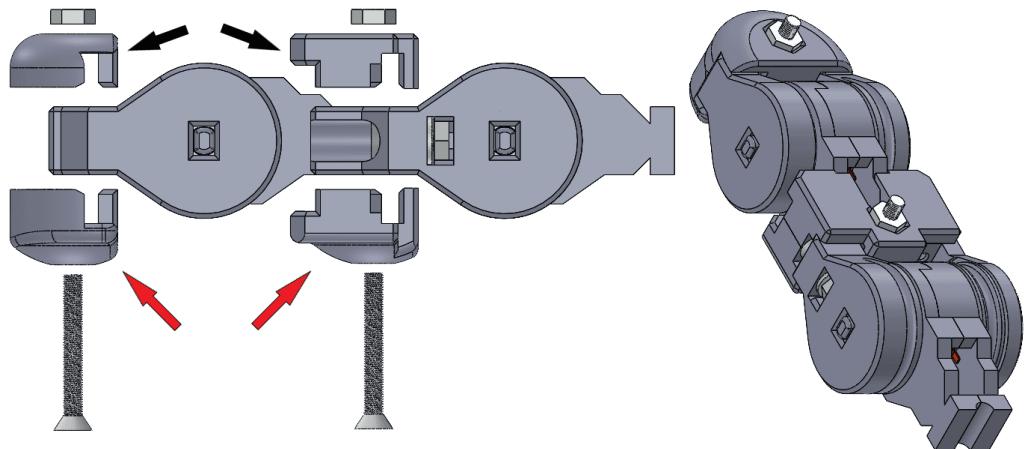
Slika 3.9: Pogonski del sklepa DIP.

Kot prikazuje slika 3.9, je vrvica (predstavljena s črno puščico) pritrjena tako, da jo stisnemo med matico in podložko, ko zategnemo vijak. S tem se izognemo vozlanju, kar pomeni, da lahko ob spremembah ali napakah vrvico ponovno uporabimo.



Slika 3.10: Potek in pritrditev vrvice na gonilni del sklepa DIP.

Slika 3.10 prikazuje pot vrvice, ki premika sklepa DIP. Vrvica je napeljana skozi škripec predhodnega sklepa in skrita v stranicah, tako da se ne poškoduje ob delovanju robotske roke.



Slika 3.11: Spodnje (rdeča puščica) in zgornje (črna puščica) ohišje distalnega in srednjega členka.

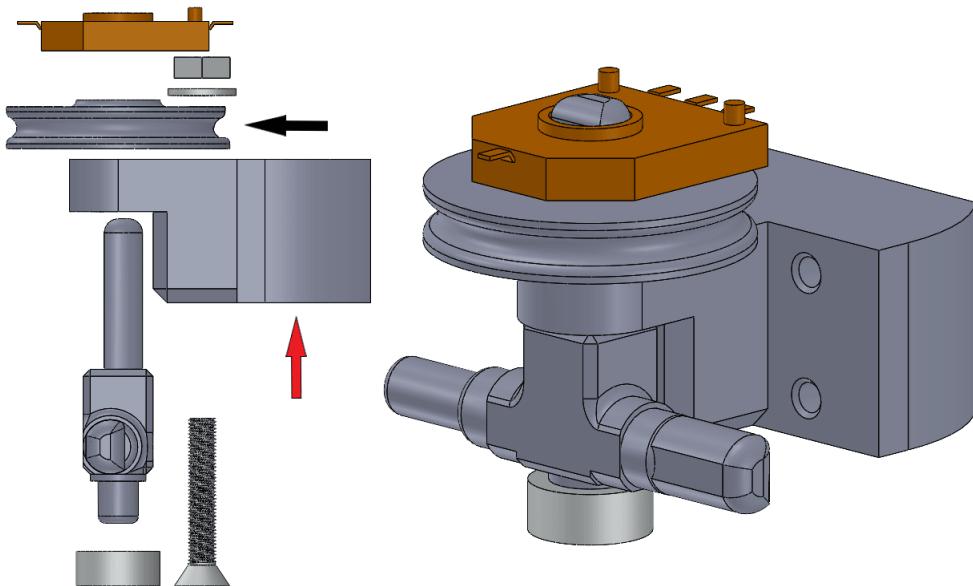
Zadnji deli distalnega in srednjega členka so spodnja in zgornja ohišja, ki s pomočjo vijakov pritrdijo ostale dele členkov in sklepov skupaj (slika 3.11). Ker so sklepi prsta debelejši od členkov, so spodnja ohišja oblikovana kot blazinice prstov in poskušajo zmanjšati obremenitev na sklepih ob prijemu predmeta.

### Univerzalni sklep

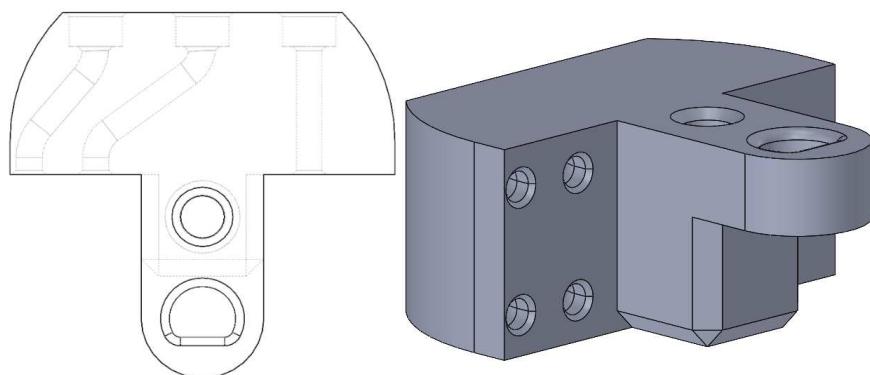
Sklep MCP je poustvarjen z univerzalnim sklepom. Univerzalni sklep ima dve osi, ki se pravokotno križata. Na navpično os se najprej pritrdi nastavek (rdeča puščica na sliki 3.12 in ločeno na sliki 3.13), ki poravna vrvice na posamezne škripce oziroma gonilne dele prsta. Sledi mu gonilni del (črna puščica) navpične osi univerzalnega sklepa, ki skrbi za odmik in primik MCP sklepa. Na vrh navpične osi nasadimo potenciometer.

Pomemben dejavnik uspešnega delovanja sistema škripcev je napetost vrvic. Rotacija okoli navpične osi kvari napetost vrvic, kar deloma rešimo z mehkimi vodili, ki vrvice vodijo do univerzalnega sklepa. Za mehka vodila uporabimo majhne gumijaste cevi (slika 3.14), ki se pritrdijo na nastavek, ki usmeri vrvice na škripce. Cevi so dolge okoli 5 cm in se na spodnji strani

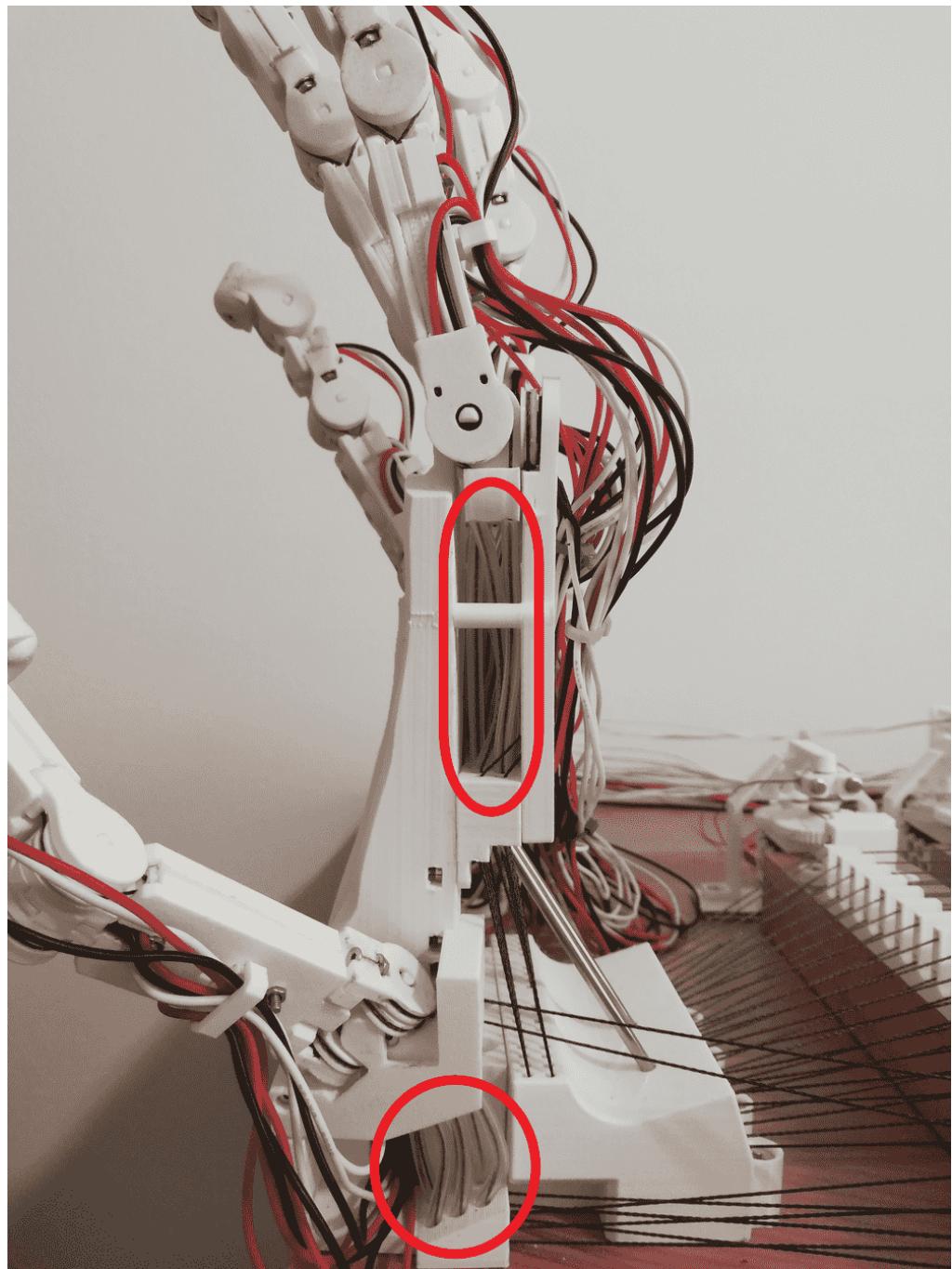
dlani fiksno pritrdijo.



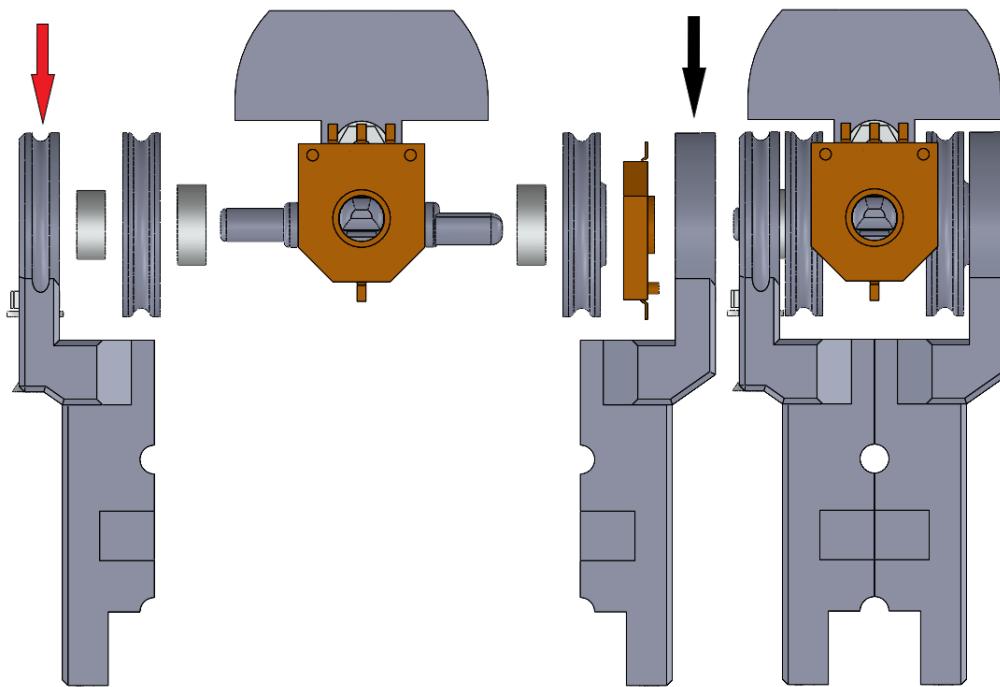
Slika 3.12: Jedro univerzalnega sklepa.



Slika 3.13: Nastavek za usmerjanje vrvic.



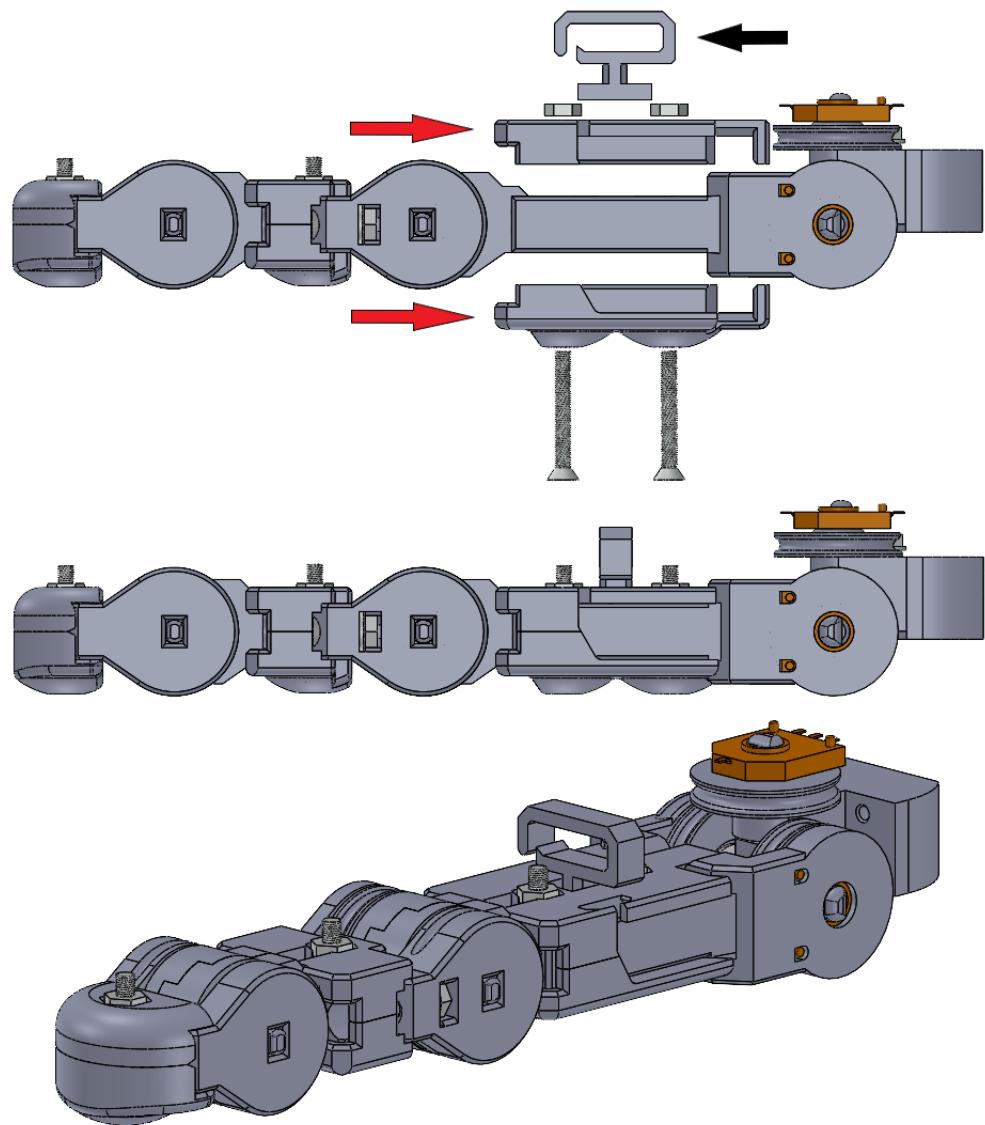
Slika 3.14: Primer uporabe mehkih cevi za vodenje vrvic.



Slika 3.15: Sklep MCP in proksimalen členek.

Sledi nasaditev škripcev in stranic (slika 3.15). Leva stranica (rdeča puščica) deluje kot gonilni del, desna (črna puščica) pa drži potenciometer vodoravne osi univerzalnega sklepa.

Zadnji deli prsta so ponovno ohišja (rdeča puščica na sliki 3.16), ki držijo skupaj dele členka. Proksimalen členek je veliko večji in zato vsebuje dva vijaka. Zgornje ohišje prav tako vsebuje nastavek za upravljanje kablov (črna puščica) potenciometrov. Vsak potenciometer potrebuje 3 kable za delovanje, zato je pomembno, da smo že med konstrukcijo pozorni na upravljanje s kabli. Idealno bi zgornje ohišje in nastavek za upravljanje s kabli bila skupaj kot enoten del, vendar jih moramo zaradi natančnosti tiskanja ločiti.



Slika 3.16: Ohišje proksimalnega členka z nastavkom za upravljanje kablov pozicijskih tipal in končna konstrukcija prsta.

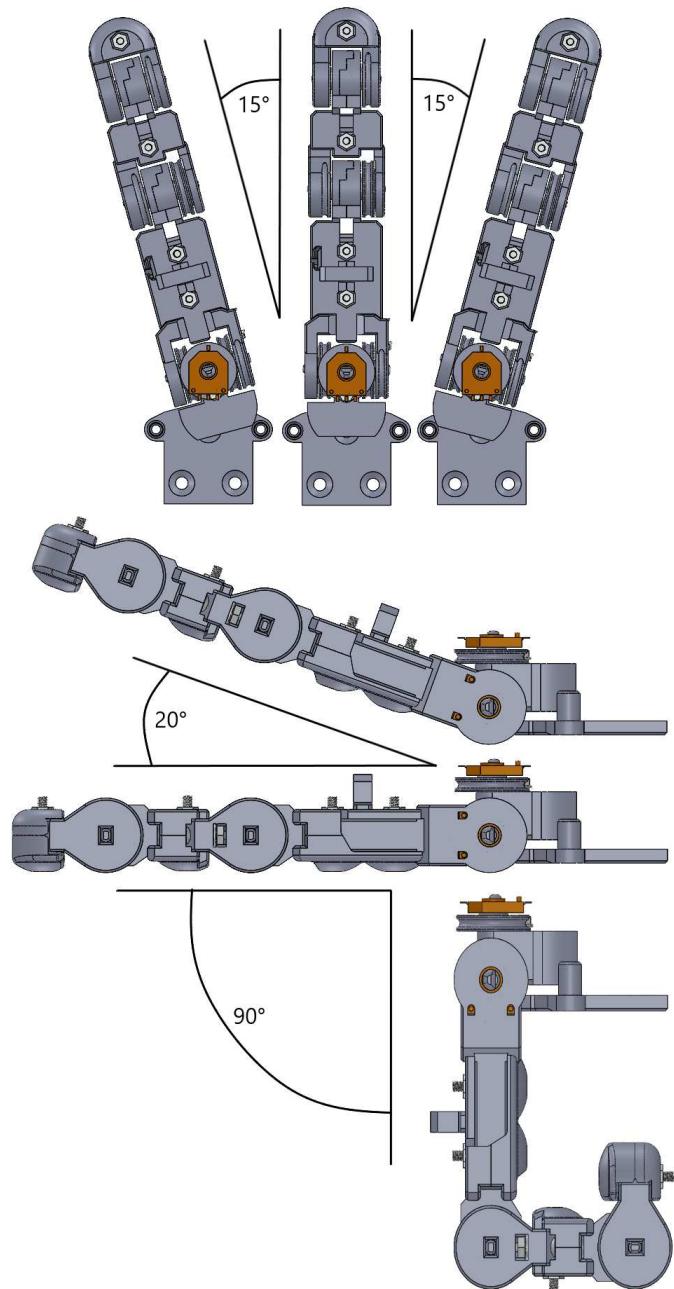
### 3.1.5 Končni razponi gibanja sklepov prsta

Razpon odmika in primika sklepa MCP je  $15^\circ$  in je enak kot v človeški roki (slika 3.17). Zaradi strukture sklepa MCP je razpon prekomernega iztezanja zmanjšan iz  $40^\circ$  na  $20^\circ$ . Razpon upogiba pa je ob poljubnem odmiku ali primiku  $90^\circ$ .

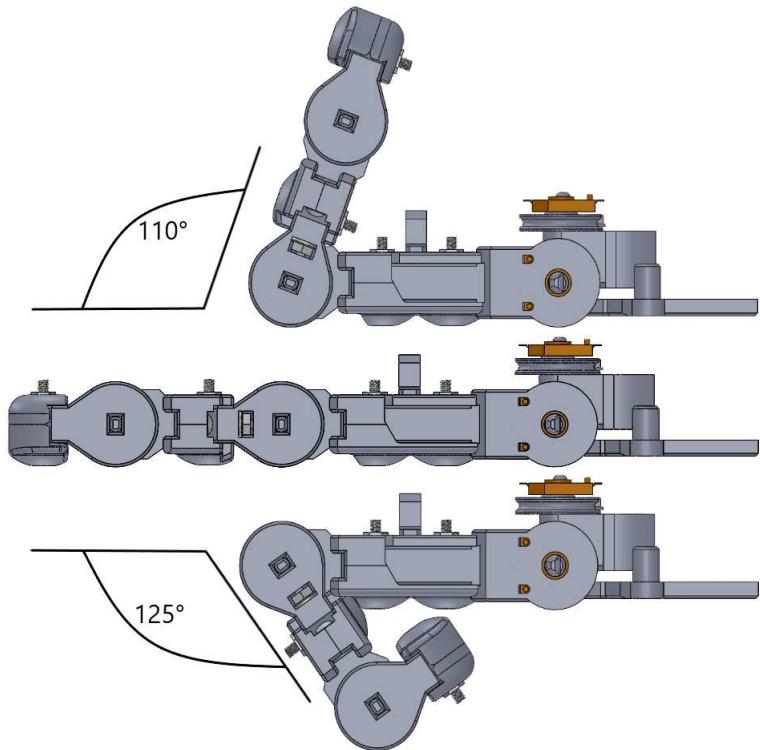
Razpon prekomernega iztezanja sklepa PIP je  $110^\circ$  zaradi mehanske izvedbe sklepa, kljub temu da nima praktične uporabe (slika 3.18). Razpon upogiba sklepa PIP je zmanjšan iz  $130^\circ$  na  $125^\circ$  zaradi debeline členka.

Razpon iztezanja sklepa DIP je enak kot pri sklepu PIP (slika 3.19). Razpon upogiba sklepa DIP dopušča gib do  $114^\circ$  kar je  $24^\circ$  več kot v človeški roki.

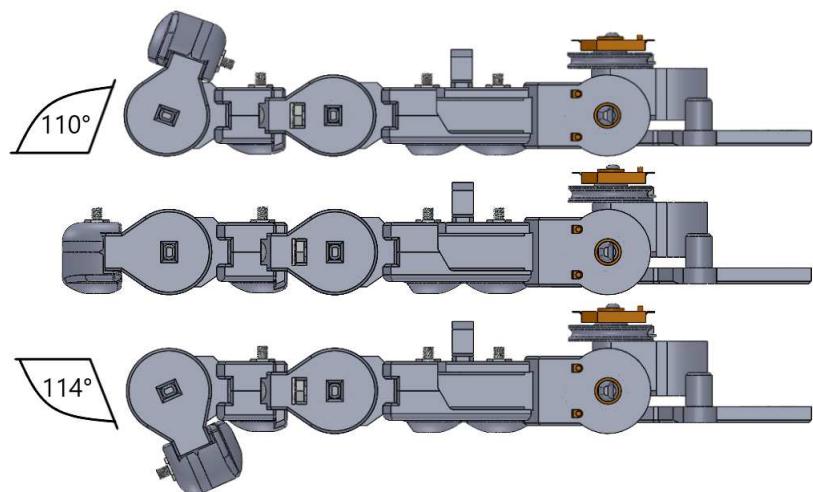
Upoštevati moramo, da so ti razponi teoretično ocenjeni glede na konstrukcijo. Realno je zaradi nenatančnosti tiskanja 3D lahko razpon posameznega sklepa nekaj stopinj manjši ali večji. Razpon gibanja sklepov prsta je enak za vsak prst.



Slika 3.17: Razponi gibanja MCP sklepa.



Slika 3.18: Razpon gibanja PIP sklepa.



Slika 3.19: Razpon gibanja DIP sklepa.

### 3.1.6 Končne dolžine prstov

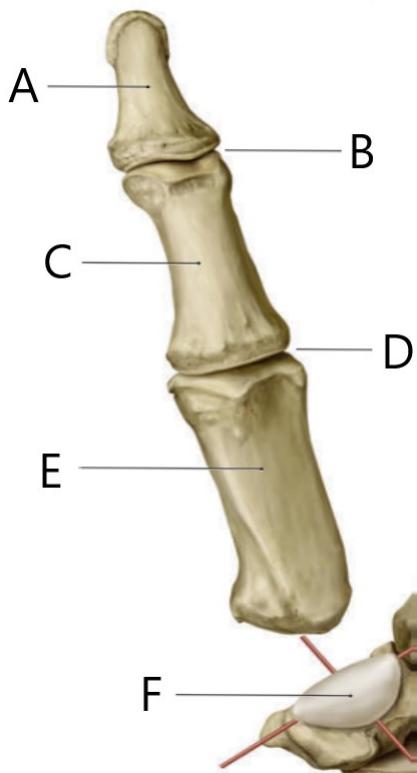
S končano konstrukcijo prsta lahko uporabimo izračunana razmerja dolžin členkov. Minimalna velikost srednjega členka mezinca je 31 mm, na podlagi katerega lahko izračunamo dolžine vseh ostalih členkov. Vse dolžine so zaokrožene navzgor in predstavljene v tabeli 3.1.

distalni členek	srednji členek	proksimalni členek	
20 mm	31 mm	51 mm	mezinec
26 mm	42 mm	68 mm	prstanec
28 mm	45 mm	73 mm	sredinec
24 mm	38 mm	62 mm	kazalec

Tabela 3.1: Tabela izračunanih dolžin členkov prstov razen palca.

### 3.2 Palec

Palec je zaradi nabora možnih gibov najpomembnejši in najmočnejši prst človeške roke. Opozicijski položaj palca, prikazan na sliki 3.21 (primer c), omogoča učinkovito uporabo sile in posledično močno stiskanje pesti. Sklep CMC palca in devet individualnih mišic, ki ga podpirajo, optimizira grobe in fine motorične sposobnosti človeške roke [9].



Slika 3.20: Prikaz členkov in sklefov palca [9].

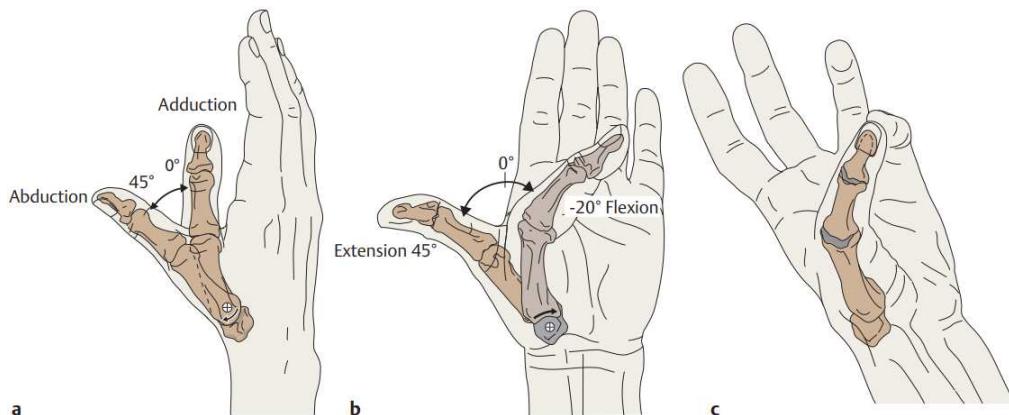
Palec vsebuje 3 členke: distalni (A), proksimalni (C) in metakarpalni (E) členek in 3 sklepe: medfalangalni oziroma IP (B), metakarpalni oziroma MCP (D) in karpo metakarpalni oziroma CMC (F) sklep. Karpalna kost, ki povezuje palec z dlanjo, se imenuje *trapezium*.

### 3.2.1 Vrste in razpon gibanja sklepov palca

IP sklep je enak kot so sklepi DIP in PIP ostalih prstov in je tečajaste oblike. Dovoljuje upogib do  $90^\circ$  in iztezanje do  $25^\circ$  [9].

Sklep MCP je jajčaste oblike in deluje podobno kot sklepi MCP ostalih prstov. Po prvi osi dovoljuje upogib do  $80^\circ$ , po drugi primik do  $12^\circ$  in odmik do  $7^\circ$ . Sklep MCP dovoljuje tudi  $6^\circ$  supinacije in  $20^\circ$  pronacije.

Sklep CMC palca je sedlaste oblike. Na strani dlani ima ploskev sferične oblike, zato lahko deluje tudi kot vrtljiv (pivot) sklep [9].



Slika 3.21: Razponi gibanja CMC sklepa palca [9].

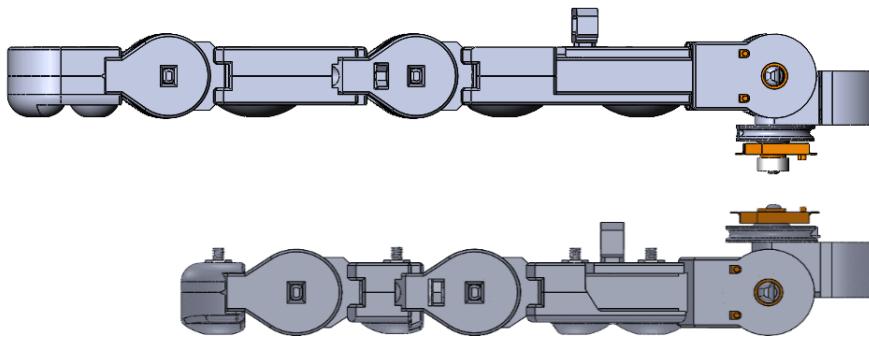
Sklep CMC v glavnem omogoča gibanje po dveh oseh (slika 3.21). Prva os omogoča primik in odmik do  $45^\circ$  (primer a) ter upogib do  $20^\circ$  in iztezanje do  $45^\circ$  (primer b). Sklep dodatno omogoča tudi do  $10^\circ$  rotacije. Tipično gibanje palca je v obliki opozicije (primer c) in repozicije. Opozicija je gib, kjer palec nasprotuje drugemu prstu, medtem ko je repozicija obraten gib. Opozicija in repozicija sta koordinirana giba med primikom/odmikom in upogibom/iztezanjem.

### 3.2.2 Konstrukcija palca

Palec vsebuje veliko minimalnih gibov, ki pripomorejo k prilagoditvi njegovega položaja in posledično močnejšemu prijemu človeške roke. Podobno kot pri prstih omenjenih gibov ne moremo poustvariti zaradi mehanskih omejitve uporabljenih sklepov.

Konstrukcija palca je zato podobna konstrukciji prstov. Sklepa IP in MCP sta enaka kot sklepa DIP in PIP ostalih prstov. Vsebujeta preprost rotacijski sklep, ki vsebuje pozicijsko tipalo.

Sklep CMC palca je sedlaste oblike, kar pomeni, da vsebuje dve osi, ki se od sklepov MCP ostalih prstov razlikujeta le po razdalji med njima. Sklep je poustvarjen z univerzalnim sklepom, zaradi lažje implementacije mehanskega sistema škripcev. Konstrukcija palca se zaradi njegovega položaja na dlani od ostalih prstov razlikuje le v orientaciji univerzalnega sklepa. Ta je pri palcu postavljen na glavo (slika 3.22). Temu primerno so prilagojeni vsi deli, ki se nasadijo na križasto os univerzalnega sklepa.



Slika 3.22: Primerjava konstrukcije palca (zgoraj) s konstrukcijo mezinca (spodaj).

### 3.2.3 Dolžine členkov palca

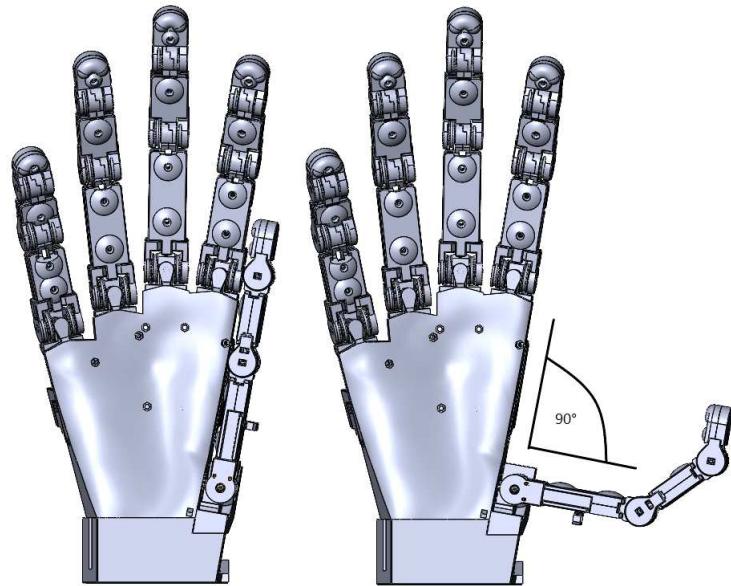
Pri izračunu dolžin členkov palca si ne moremo pomagati s Fibonaccijevim razmerjem. Uporabiti moramo izmerjena in izračunana razmerja dolžin med distalnimi, proksimalnimi in metakarpalnimi členki prstov [1]. Dolžine izračunamo na podlagi dolžin členkov kazalca. Izračun dolžin je prikazan v tabeli 3.2.

Členek	Izračun	Rezultat
Distalni	$distalni_2 \times 1.22$	30 mm
Proksimalni	$proksimalni_2 \times 0.75$	47 mm
Metakarpalni	$metakarpalni_2 \times 0.67$	68 mm

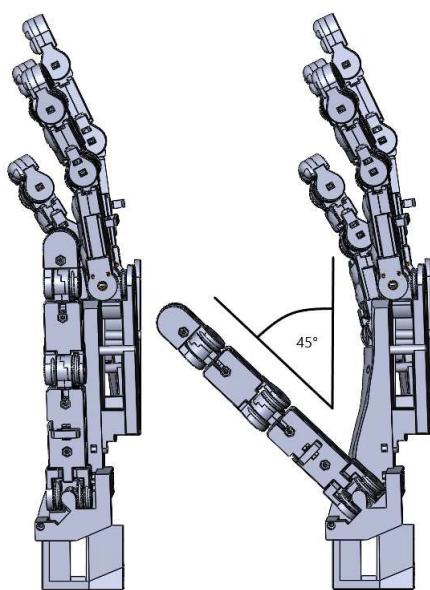
Tabela 3.2: Izračun dolžin členkov palca.

### 3.2.4 Končni razponi gibanja palca

Sklepa IP in MCP palca dovoljujeta upogib do  $114^\circ$  in iztezanje do  $110^\circ$ . Privzet položaj sklepa CMC je popoln upogib, tako da sklep dovoljuje do  $90^\circ$  iztezanja (slika 3.23). Sklep CMC palca za razliko od MCP sklepov ostalih prstov dovoljuje odmik in primik do  $22,5^\circ$  (slika 3.24).



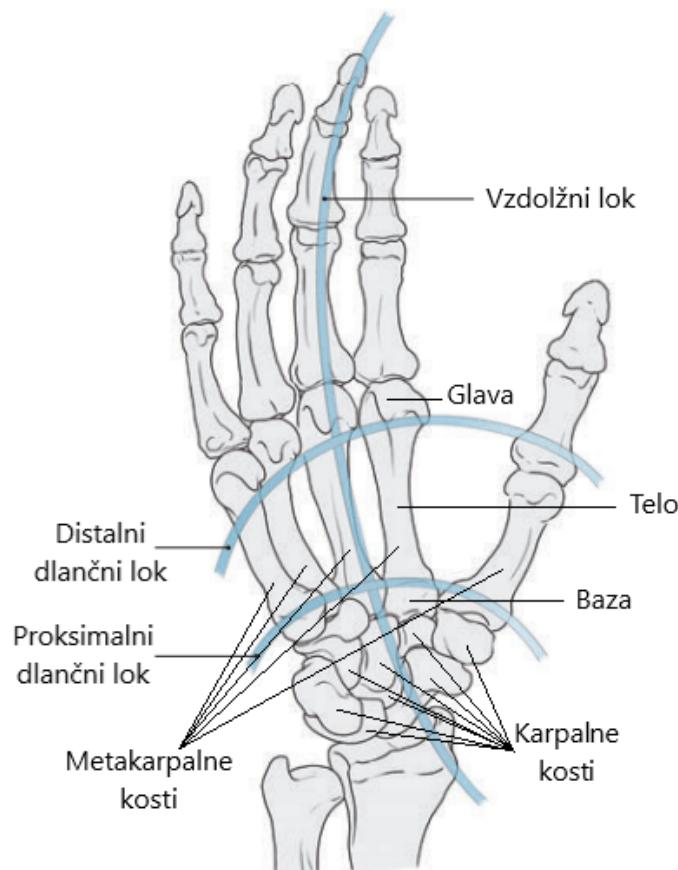
Slika 3.23: Razpon gibanja ob iztezanju sklepa CMC palca.



Slika 3.24: Razpon gibanja odmika in primika sklepa CMC palca.

### 3.3 Dlan

Dlan človeške roke je sestavljena iz metakarpalnih in deloma karpalnih kosti. Metakarpalne kosti povezujejo karpalne do posameznih prstov. Naloga dlani je podpiranje prijemalne funkcije roke, saj je uporabljena kot protiležaj pri prijemanju predmetov. Metakarpalne kosti lahko ločimo na bazo, telo in glavo (slika 3.25). Baza metakarpalnih kosti in distalne karpalne kosti tvorijo CMC sklepe. Sklepa CMC kazalca in sredinca sta praktično pritrjena, medtem ko sta sklepa CMC prstanca in mezinca dovolj fleksibilna, da dovoljujeta opazen upogib ob prijemu pesti [10].



Slika 3.25: Opis konkavne oblike dlani [10].

Konkavno obliko dlančne (notranje) strani dlani lahko opišemo s tremi loki (slika 3.25). Sklepi CMC oblikujejo proksimalni dlančni lok, sklepi MCP oblikujejo distalni dlančni lok, sama oblika metakarpalnih kosti in prstov pa predstavlja vzdolžni lok. Postavitev metakarpalnih kosti je pahljačaste oblike. Medtem ko proksimalni dlančni lok ohranja obliko, se distalni dlančni lok prilagodi gibanju roke. Ob prijemu pesti se distalni dlančni lok, zaradi upogiba sklepov CMC zmanjša, kar pripomore k močnejšemu prijemu. Obretno se zgodi pri iztezanju vseh prstov, kjer se lok poveča za večjo prijemno površino dlani [10].

### 3.3.1 Konstrukcija dlani

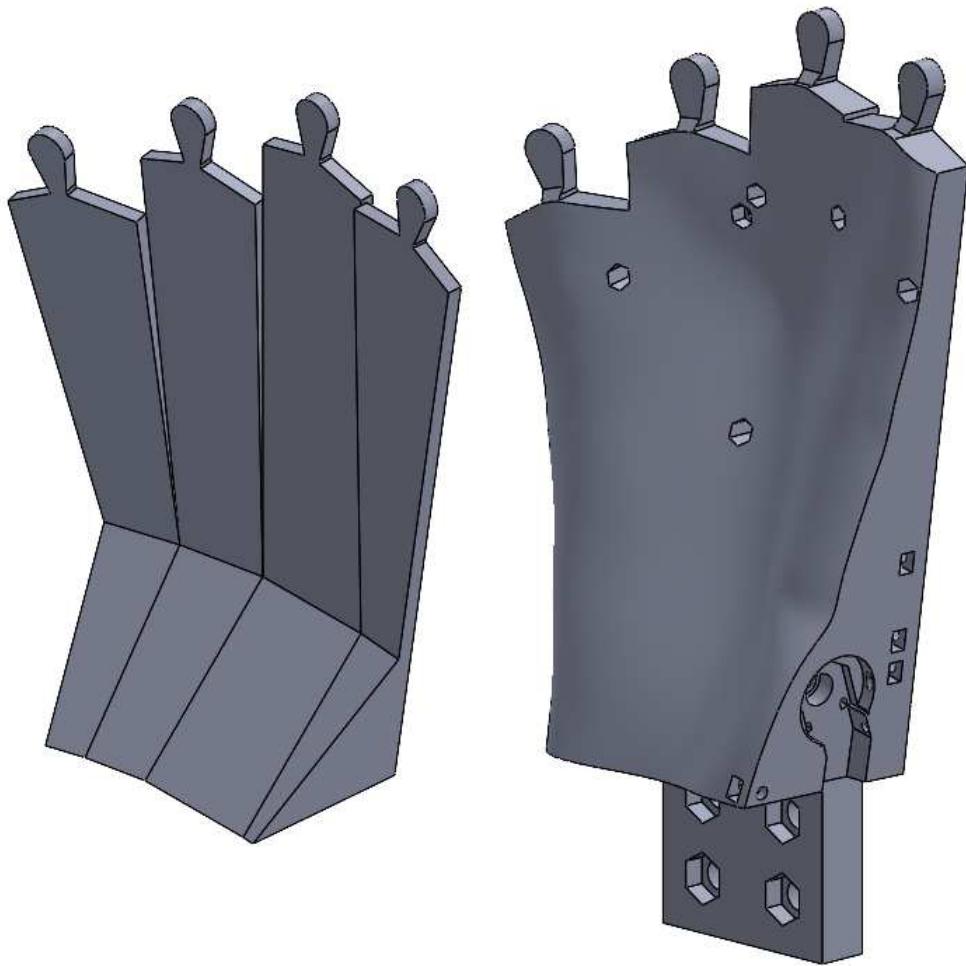
Konstrukcija dlani je razdeljena na dlančni in hrbtni del. Dlančni del je zasnovan kot en del, ki služi kot stabilna baza ostalim gibajočim delom robotske roke. Hrbtni del deluje kot ohišje, ki pritrdi prste na dlan in skrije fleksibilna vodila vrvic. Vodila vrvic so na dlan pritrjena na spodnji strani hrbtnega dela.

Podobno kot pri prstih moramo zaradi mehanskih omejitev izpustiti vse minimalne gibe, ki se pojavijo v dlani človeške roke. Izpuščeni gibi poskrbijo za dodatno prilagoditev dlani na prijeti predmet. Originalno naj bi robotska roka vsebovala še dodatno, 21. prostostno stopnjo v obliki sklepa CMC mezinca in prstanca, kar bi deloma poustvarilo gibanje dlani in izboljšalo opozicijo palca. Ta CMC sklep ni izveden, ker je bolje, da pod kompleksnim univerzalnim sklepom ni dodatnih gibljivih delov. Dodatni gibljivi deli škodujejo napetosti vrvic. Višja togost in moč prstov ima prednost pred možnostjo dodatne prilagoditve robotske roke.

Pri konstrukciji dlančnega dela moramo poskrbeti za čim bolj pravilen položaj in orientacijo prstov ter splošno, pahljačasto in konkavno obliko dlani. Konstrukcijo dodatno razbijemo na dele, kamor pritrdimo posamezne prste robotske roke. Posamezen del deluje kot navidezna metakarpalna kost. Dolžine metakarpalnih kosti niso skladne s Fibonaccijevim razmerjem. Posamezni deli so na spodnji strani (v zapestju) poravnani (levi primer slike 3.26).

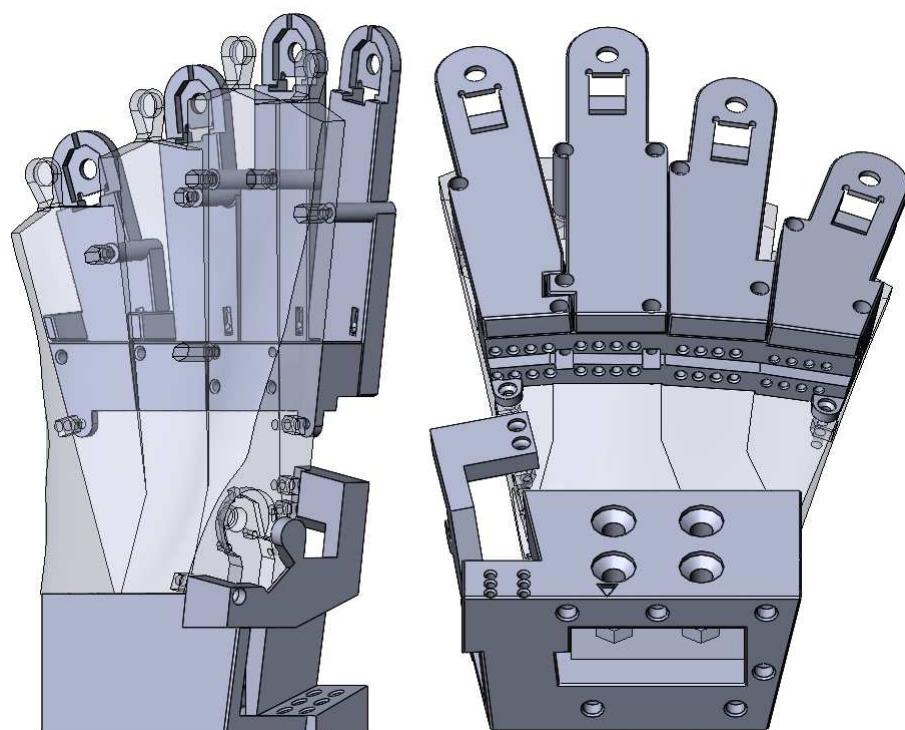
Konstrukcijo začnemo z delom, ki pritrdi sredinec. Postavimo ga navpično in uporabimo kot izhodišče za položaj sosednjih delov. Sosednje dele postavimo zraven tako, da si delijo bližnjo stranico. Pri vsakem sosednjem delu moramo upoštevati 4 spremenljivke: "yaw" dela, ki poskrbi za konkavno obliko, "roll" dela, ki poskrbi za pahljačasto obliko, "pitch" dela, ki poskrbi za boljšo obliko pesti in razdaljo med končnimi sklepi MCP, ki omogoča nemoteno delovanje sosednjih prstov. Spremenljivke postopoma povečujemo, dokler ne pride do trka prstov robotske roke ob stisku pesti. Na spodnji strani konstrukcije dodamo še širši zapestni del.

Levi primer slike 3.26 prikazuje končen rezultat povečevanje omenjenih spremenljivk. Iz primera opazimo, da je konkavna oblika dlani pomanjkljiva, zato dlan dodatno oblikujemo v konkavni obliki (desni primer). Palec je nameščen na zapestni del pod kazalcem.



Slika 3.26: Konstrukcija dlančnega dela dlani.

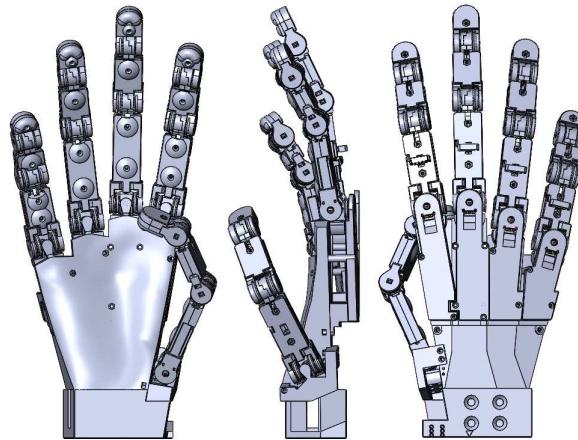
Hrbtni del poskrbi za pritrditev posameznih prstov na dlančni del. Vsak prst je pritrjen z ločenim delom za lažje vzdrževanje posameznega prsta. Poleg delov, potrebnih za pritrditev prstov, hrbtni del vsebuje še del, kamor pritrdimo mehka vodila vrvic. Vodila vrvic palca se zaradi njegovega nižjega položaja pritrdijo na del, ki pritrdi robotsko roko na preizkusno mizo. Robotska roka je na mizo pritrjena pravokotno.



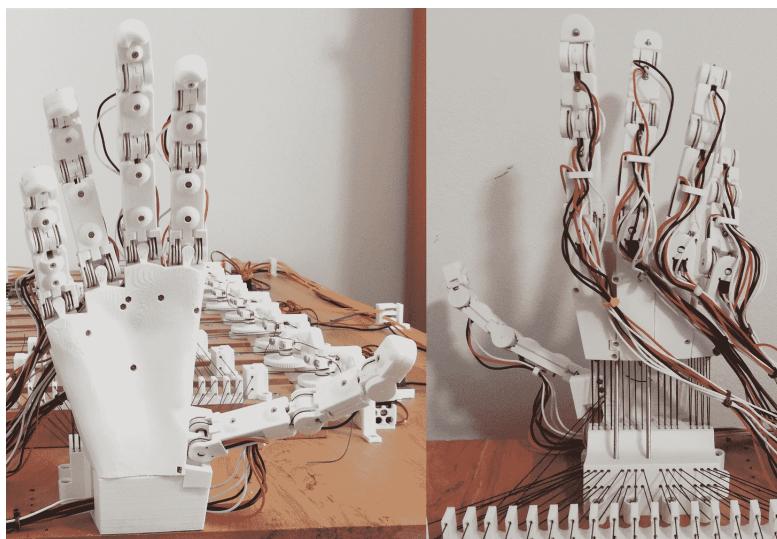
Slika 3.27: Konstrukcija hrbtnega dela dlani.

### 3.3.2 Končna konstrukcija robotske roke

S končano konstrukcijo dlani zaključimo konstrukcijo robotske roke. Končna konstrukcija je prikazana na sliki 3.28 in na sliki 3.29, kjer je robotska roka pritrjena na preizkusno mizo.



Slika 3.28: Prikaz celotne konstrukcije robotske roke.



Slika 3.29: Prikaz robotske roke na preizkusni mizi.

## 3.4 Podporne komponente

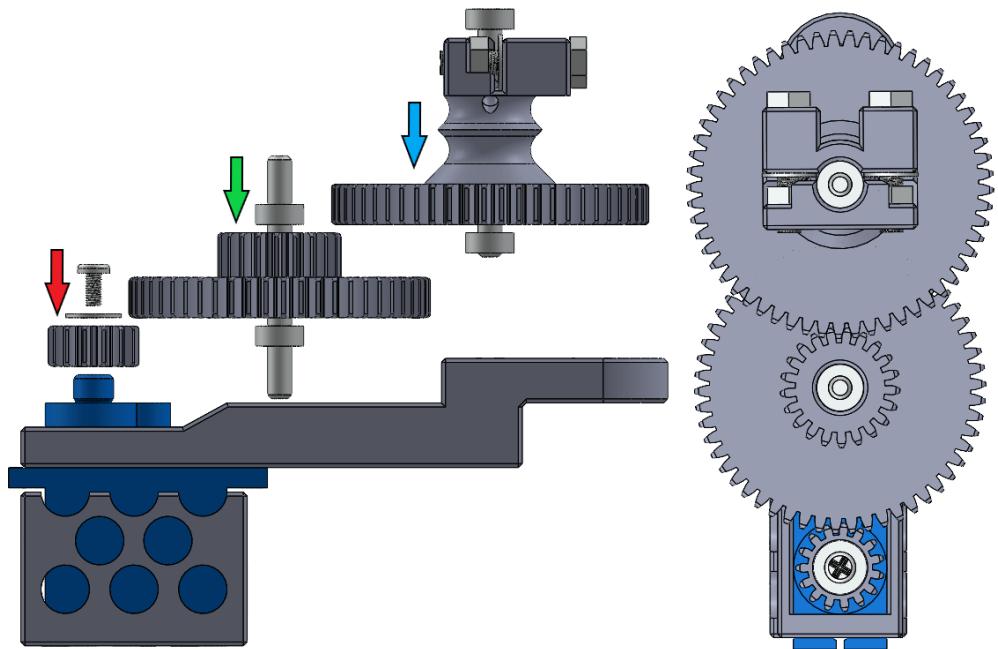
Za delovanje robotske roke potrebujemo tudi določene podporne komponente, ki so pritrjene na preizkusni mizi. Podporne komponente vključujejo dele za povečanje navora motorjev, dele za pritrditev vrvic na motorje in dele, ki usmerjajo vrvice po preizkusni mizi.

### 3.4.1 Dodani zobjniki

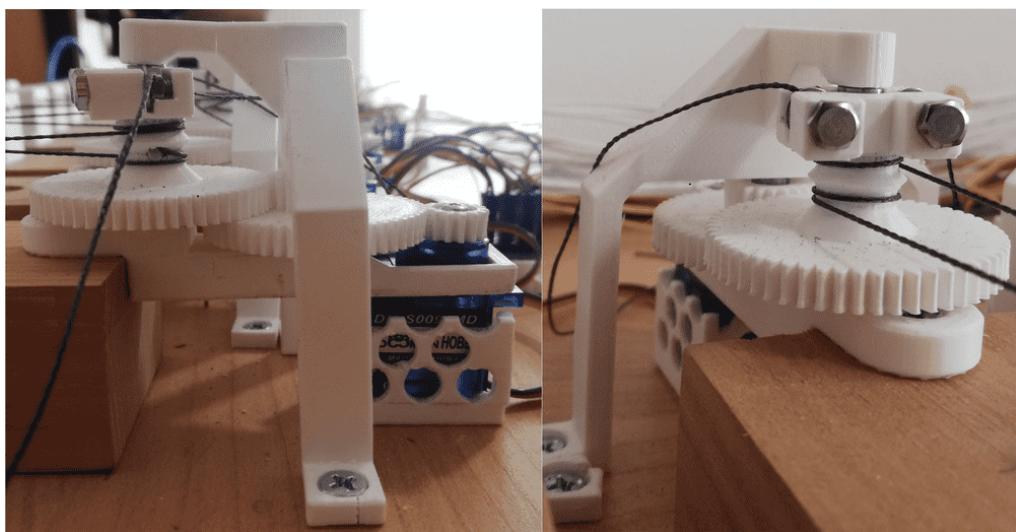
Na motorje ne moremo neposredno pritrditi vrvic zaradi hitrosti in navora, ki ga motorji ponujajo. Prehiter gib oteži iskanje želenega položaja ob krmiljenju. Z uporabo motorjev, ki dovoljujejo regulacijo hitrosti, to ne bi smel biti problem. Težave imamo, če motor ob potrebnih hitrosti nima dovolj moči za premik navora, ki nanj deluje. V tem primeru se motor ne premakne ali pa se premakne prehitro, ko ima dovolj moč za premik. Večja kot je obremenitev motorja, večji je razpon hitrosti, v katerem se to lahko zgodi.

Najbolj učinkovita rešitev je uporaba boljših motorjev. Ker se je težava pojavila, ko so motorji že bili kupljeni, smo izven motorjev dodali zobjnike, katerih razmerje je upočasnilo hitrost in zvišalo navor.

V svoji izvedbi dodamo 3 zunanje zobjnike (slika 3.30). Prvi je direktno pritrjen na motor (rdeča puščica). Drugi (zeleni puščici) povezuje prvi in zadnji zobjnik s spodnjim in zgornjim delom. Na zadnji zobjnik (modra puščica) pritrdimo vrvice, ki poganjajo sklep. Razmerje med prvim zobjnikom in spodnjim delom drugega je 15:54. Razmerje med zgornjim delom drugega in zadnjim zobjnikom je 21:57. Razmerje med prvim in zadnjim zobjnikom je torej  $\frac{15}{54} * \frac{21}{57} = 0.1$ . To pomeni, da je končna hitrost 10-krat manjša, medtem ko je navor 10-krat večji. Počasnejša hitrost takšnega razmerja je primerna za preizkušanje krmiljenja robotske roke. Slika 3.31 prikazuje dodatne zobjnike in pritrditev vrvic na preizkusni mizi.

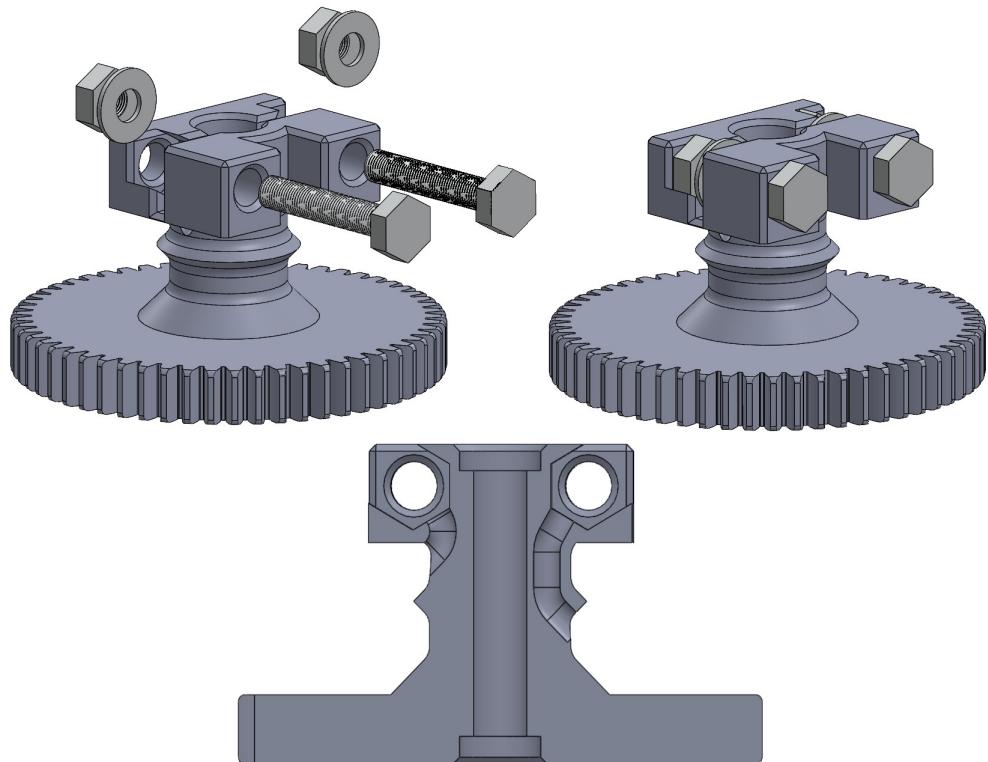


Slika 3.30: Prikaz dodanih zunanjih zobnikov.



Slika 3.31: Prikaz podpornih komponent na preizkusni mizi.

### 3.4.2 Pritrditev vrvice na aktuatorje



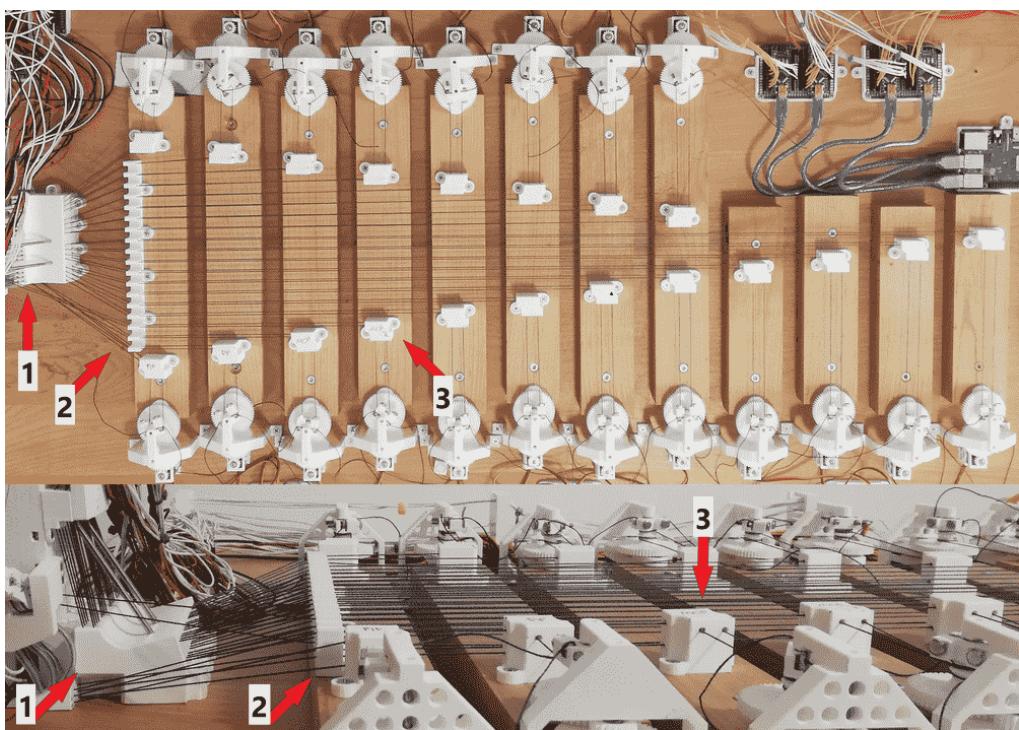
Slika 3.32: Pritrditev vrvice na zobnik.

Enakomerno odvijanje in navijanje vrvice na aktuatorju je pomembno za pravilno delovanje sistema škripcev. Robotska roka se lahko poškoduje, če se en konec vrvice zavozla. Vozlanje vrvice preprečimo tako, da na končnem zobniku ločimo kanala, kjer je vrvica navita (sliki 3.31 in 3.32).

Sama pritrditev vrvice je podobna kot v sklepih, kjer je vrvica stisnjena med matico in podložko. Takšna konstrukcija dovoljuje enostavno napenjanje vrvice ob pritrditvi.

### 3.4.3 Usmerjanje vrvic na preizkusni mizi

Vrvice na preizkusni mizi usmerjamo s tremi različnimi deli (slika 3.33). Prvi del (1) je ob robotski roki in poskrbi, da je sila, ki jo vrvice povzročijo na robotsko roko, kar se da pravokotna na preizkusno mizo. Prvi del tudi vsebuje dve kovinski palici, ki dodatno podpirata robotsko roko. Brez prvega dela lahko normalno delovanje povzroči zlom v pritrditvi robotske roke. Naloga drugega dela (2) je preusmeriti vrvice vodoravno po preizkusni mizi. Zadnji del (3) je pritrjen pred vsakim motorjem in preusmeri navpično vzporedne vrvice v vodoravno vzporedne, tako da so primerne za pritrditev na aktuatorje.



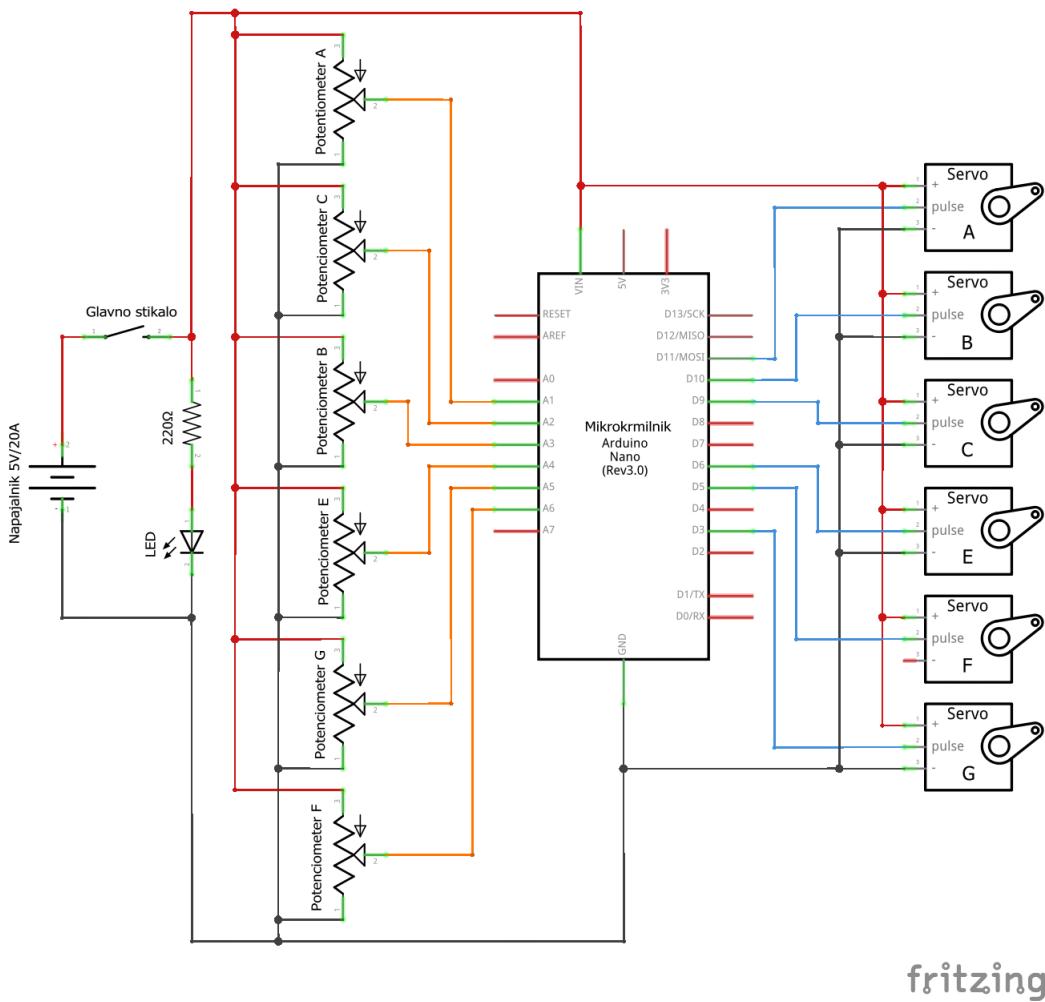
Slika 3.33: Usmerjanje vrvic na preizkusni mizi.

## Poglavlje 4

# Aparaturna krmilna oprema

Robotska roka vsebuje veliko elektronskih komponent, ki potrebujejo pravilno napetost in tok za učinkovito delovanje. Vzporedna vezava komponent omogoča ohranjanje napetosti in porazdelitev toka. Vezju je dodano glavno stikalo in LED-dioda, ki oznanja, da je sistem pod napetostjo.

Vsak sklep je krmiljen z aktuatorjem, ki ga premika in potenciometrom za tipanje pozicije. Za lažje krmiljenje robotske roke razdelimo sklepe v štiri krmilne podskupine. Vsaka podskupina vsebuje en mikrokrmilnik, ki regulira 3 do 6 sklepov. Število sklepov na posameznem mikrokrmilniku je odvisno od vrste priključenih sklepov, saj nekateri sklepi potrebujejo informacije sosednjih sklepov. Sklepi MCP, PIP in DIP istega prsta se morajo na primer krmiliti na istem mikrokrmilniku. Slika 4.1 prikazuje vezalno shemo prvega mikrokrmilnika, ki krmili šest sklepov: sklepe MCP, PIP in DIP mezinca in prstanca.



Slika 4.1: Vezalna shema prvega mikrokrmlnika.

## 4.1 Opis aparaturnih komponent

Podpoglavlje predstavi izbrane aparaturne komponente sistema, razloge za njihovo izbiro ter funkcijo, ki jo opravlja.

### 4.1.1 Napajalnik

Celotna roka vsebuje 45 porabnikov: 20 motorjev, 20 potenciometrov, 4 mikrokrmlnike Arduino Nano in mikroracačunalnik Raspberry Pi 3B+. Vsaka komponenta potrebuje dovolj toka za učinkovito delovanje. Vsa tipala skupaj potrebujejo le  $20 * 5V/10000\Omega = 10mA$ , tako da lahko njihovo porabo zanemarimo. Raspberry Pi 3B+ pričakuje okoli 2.5 A in Arduino Nano 250 mA, tako da celoten krmilni del robotske roke skupaj potrebuje okoli 3.5 A. Motorji ob polni hitrosti za normalno delovanje pričakujejo od 0.8 do 1 A toka. V redkem primeru, ko delujejo vsi hkrati, potrebujemo 16-20 A. Maksimalna poraba, ki jo lahko pričakujemo, je 23.5 A toka. Izbran napajalnik (slika 4.2 in tabela 4.1) ima 100 W oziroma 5 V/20 A, kar bi moralo zadostovati potrebam robotske roke.



Slika 4.2: Napajalnik.

Vhodna napetost	110-240V AC
Izhodna napetost	5 V DC
Izhodni tok	20 A
Izhodna moč	100 W

Tabela 4.1: Specifikacija napajalnika.

### 4.1.2 Mikroračunalnik Raspberry Pi

Zaradi računskih zahtev potencialnih nadgradenj je bil izbran mikroračunalnik, ki ponuja več funkcionalnosti od preprostega mikrokrmlnika. Zaželene dodatne funkcionalnosti so dostop do interneta (WIFI ali Ethernet), 4 USB vrata, ki omogočajo preprost vmesnik z mikrokrmlniki Arduino, operacijski sistem in procesor, ki hkrati podpira tudi večnitnost.

Izbran mikroračunalnik je Raspberry Pi 3B+ (slika 4.3 in tabela 4.2), ki deluje kot vmesnik med robotsko roko in uporabnikom. Skrbi za pošiljanje ukazov od uporabnika do mikrokrmlnikov, ki krmilijo sklepe roke. Kompleksnejše funkcionalnosti, kot so kinematika, inverzna kinematika, iskanje potencialnih trkov in podobne funkcije, ki niso vključene v nalogu, bi bile izvedene na mikroračunalniku.



Slika 4.3: Raspberry Pi 3B+.

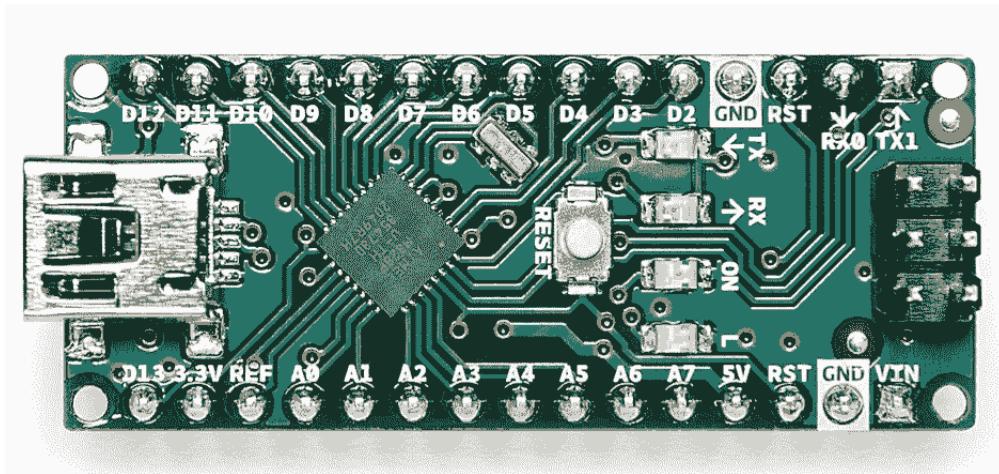
SoC	Broadcom BCM2837B0 quad-core	USB vrata	4x USB 2.0
GPU	Broadcom Videocore-IV	Vhodna napetost	5 V
RAM	1 GB LPDDR2 SDRAM	Poraba	2.5 A
Omrežje	Gigabit Ethernet, 2.4 in 5 GHz	Dimenzije	82 x 56 mm
GPIO	40	Teža	50 g

Tabela 4.2: Specifikacija Raspberry Pi 3B+.

#### 4.1.3 Mikrokrmlniki sklepov Arduino Nano

Izbira mikrokrmlnikov je bila osredotočena na število analognih vhodov, že pripravljenih digitalnih izhodov PWM in enostavnost uporabe. Izbran mikrokrmlnik prav tako potrebuje USB vrata, ki omogočajo enostavno komunikacijo z mikrorračunalnikom. S tem se lahko izognemo ostalim načinom komunikacij, ki uporabljajo nožice mikrokrmlnika. Za enostavno uporabo so bili izbrani mikrokrmlniki družine Arduino, natančneje mikrokrmlniki Arduino Nano (slika 4.4 in tabela 4.3).

Mikrokrmlniki krmilijo sklepe robotske roke z zaprto povratno zanko, kjer motor deluje kot aktuator in potenciometer kot pozicijsko tipalo. Robotska roka uporablja 4 mikrokrmlnike, ki si porazdelijo 20 sklepov v krmilne podskupine. Vsaka podskupina vsebuje 3 do 6 sklepov. Skupine niso enakomerne, ker moramo zaradi posledičnih premikov sklepe MCP, PIP in DIP obvezno krmiliti skupaj. Prvi in tretji mikrokrmlnik krmilita po 6 sklepov, drugi mikrokrmlnik krmili 5 sklepov in četrти mikrokrmlnik krmili 3 sklepe. Krmiljenje je podrobneje opisano v poglavju 5.



Slika 4.4: Arduino Nano.

Mikrokrmlnik	ATmega328	GPIO	22
Arhitektura	AVR	Analogni vhodi	8
Delovna napetost	5 V	PWM	6
Flash spomin	32 KB	Vhodna napetost	7-12 V
Hitrost procesorja	16 MHz	Poraba	19 mA
Teža	7 g	Dimenziije	18 x 45 mm

Tabela 4.3: Specifikacija mikrokrmlnika Arduino Nano.

#### 4.1.4 Servomotorji

Za vlogo aktuatorjev robotske roke lahko uporabimo dve vrsti cenovno ugodnih servomotorjev. Uporabimo lahko pozicijske servomotorje, kjer s PWM signalom reguliramo položaj motorja. V tem primeru je redundantno imeti dve pozicijski tipali, eno v motorju in drugo v sklepu. Potenciometer v sklepu lahko vežemo direktno na motor, kjer nadomestimo njegov vgrajeni potenciometer. V tem primeru sklep krmilimo preko vgrajenega čipa na servo motorju, kar pomeni, da raznih spremenljivk krmiljenja ne moremo optimizirati za uporabo v robotski roki. Z manj možnosti optimizacije bi bistveno zmanjšali kompleksnost krmiljenja.

Druga vrsta servomotorjev dopušča neprekinjeno vrtenje, kjer s PWM signalom krmilimo hitrost in smer vrtenja. V tem primeru moramo v mikrokrmilniku regulirati hitrost in smer vrtenja servomotorja v odvisnosti od položaja sklepa. Samo krmiljenje pri takšni izvedbi poteka na mikrokrmilniku in ponuja popoln pregled nad spremenljivkami krmiljenja. To seveda bistveno zviša kompleksnost krmiljenja.

Učinkovita uporaba pozicijskega servomotorja zahteva razstavitev motorja in spajkanje vgrajenega potenciometra, kar lahko potencialno uniči vgrajeno vezje, zato je bila izbrana druga rešitev - servo motorji z neprekinjenim vrtenjem (slika 4.5 in tabela 4.4).



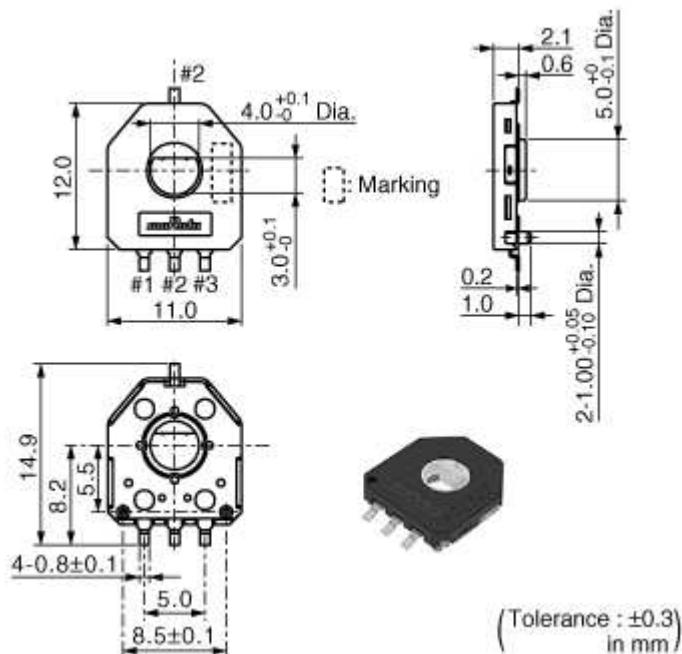
Slika 4.5: Servo motor.

Vrsta	360° neprekinjeno vrtenje
Kovinski zobniki	Ja
Hitrost	0.07-0.08 s/60°
Zastojni navor?	1.6-1.8 kg/cm
PWM	500 - 2500 us
Delovna napetost	4.8 - 6 V
Dimenzijs	23 x 12.5 x 22 mm
Teža	12 g

Tabela 4.4: Specifikacija servo motorja.

#### 4.1.5 Pozicijska tipala

Izbira pozicijskih tipal je odvisna le od njihove velikosti. Robotska roka uporablja ultratanke  $10\text{ k}\Omega$  potenciometre (slika 4.6 in tabela 4.5), ki so dovolj majhni za uporabo v sklepih. Potenciometer deluje kot variabilen upor, kjer upornost določimo s položajem tipala. Vrednost tipala beremo preko analognih vhodov mikrokrmlnika, kjer dosežejo natančnost okoli  $0.35^\circ$ .



Slika 4.6: Potenciometer.

Oblika	SMD
Upornost	$10\text{ k}\Omega$
Efektivni rotacijski kot	$333.3^\circ$
Življenska doba	1 M ciklov
Delovna napetost	5 V
Teža	0.36 g

Tabela 4.5: Specifikacija potenciometra.

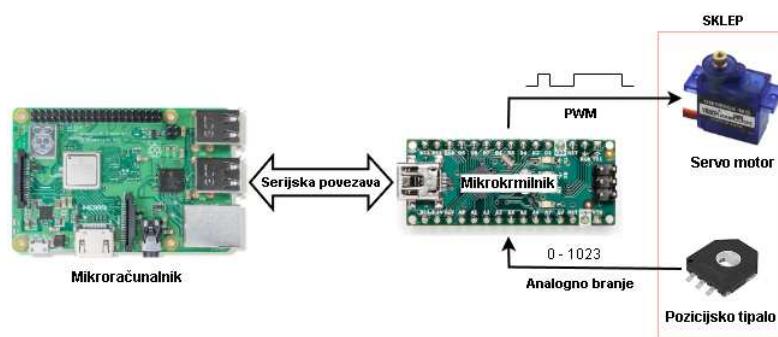


## Poglavlje 5

# Programska krmilna oprema

Programska oprema omogoča osnovno interakcijo uporabnika z robotsko roko. Uporabnik preko mikroričunalnika posreduje želene položaje sklepov posameznim mikrokrmlnikom. Mikrokrmlniki pa na podlagi želenih položajev krmilijo dejanske sklepe. Na ta način preko mikroričunalnika koordiniramo delovanje celotne robotske roke.

Programska oprema mikroričunalnika je zaenkrat osnovna in mogoča le branje položajev sklepov ter pošiljanje ukazov. Večji poudarek pri razvoju je na programski opremi mikrokrmlnikov. Ta sprejema ukaze mikroričunalnika, periodično sporoča trenutne položaje sklepov, krmili posamezne sklepe in robotsko roko varuje pred možnimi poškodbami. Slika 5.1 prikazuje interakcijo komponent med seboj.



Slika 5.1: Shema programskega in aparurnega krmiljenja.

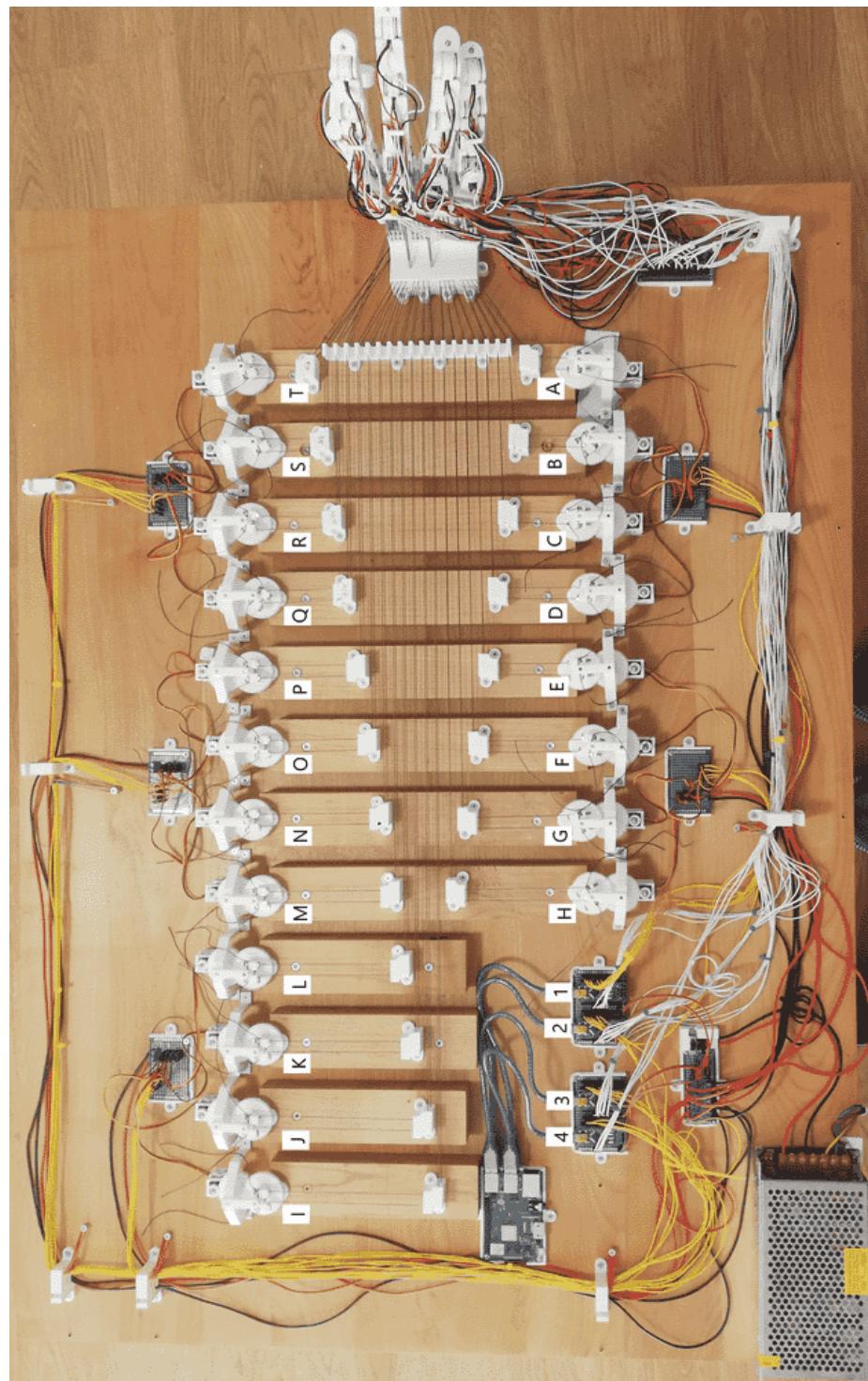
## 5.1 Komunikacija med mikrokrmilniki in mikroračunalnikom

Mikroračunalnik je uporabljen kot vmesnik med uporabnikom in robotsko roko. Sprejete ukaze posreduje mikrokrmilnikom, ki krmilijo sklepe. Komunikacija z mikrokrmilniki vsebuje 3 vrste ukazov: *pisanje* (W), *ustavi* (S) in *aktiviraj* (A). Ukaz *pisanje* sporoči mikrokrmilnikom nove želene položaje. Ukaza *ustavi* in *aktiviraj* pa sta uporabljeni za menjavo delovnega stanja programa mikrokrmilnikov. Mikrokrmilniki računalniku vsakih 500 ms periodično sporočijo trenuten položaj sklepov.

Ob zagonu robotske roke je program mikrokrmilnikov v stanju ustavi. V stanju ustavi mikrokrmilniki čakajo na aktivacijo in periodično sporočajo trenutne položaje sklepov. Na serijski povezavi zmanjšamo promet tako, da mikrokrmilnikom pošljemo le ukaze za sklepe, katere krmilijo.

Sestava komunikacijskega sporočila je odvisna od vrste ukaza. Ukaza *ustavi* in *aktiviraj* vsebujejo le vrsto ukaza. Ukaz *pisanja* pa vsebuje število in identifikacijo sklepov, ki jim želimo spremeniti položaj in dejansko vrednost novega položaja. Število je lahko med 1 in 6 (odvisno od mikrokrmilnika). Vsak sklep uporablja črko kot unikaten identifikator (slika 5.2 in tabela 5.1). Vrednost novega želenega položaja pa je vedno tri mestno število (000-999).

Primer ukaza *pisanja* je W2A666B420. Ukaz začnemo z vrsto (W), sledi mu število sklepov (2), identifikatorji sklepov (A in B) ter nove želene vrednosti (666 in 420). Če je mikrokrmilnik v aktivnem stanju, se bo ob sprejemu ukaza sklep A premaknil v položaj, ki ga predstavlja vrednost 666, in sklep B v položaj, ki ga predstavlja vrednost 420.



Slika 5.2: Identifikatorji sklepov in mikrokrmilnikov na preizkusni mizi.

ID sklepa	Prst	Sklep	Mikrokrmilnik
A	Mezinec	MCP1	1
B	Mezinec	DIP	1
C	Mezinec	PIP	1
D	Mezinec	MCP2	2
E	Prstanec	MCP1	1
F	Prstanec	DIP	1
G	Prstanec	PIP	1
H	Prstanec	MCP2	2
I	Sredinec	MCP1	3
J	Sredinec	DIP	3
K	Sredinec	PIP	3
L	Sredinec	MCP2	2
M	Kazalec	MCP1	3
N	Kazalec	DIP	3
O	Kazalec	PIP	3
P	Kazalec	MCP2	2
Q	Palec	CMC1	4
R	Palec	IP	4
S	Palec	MCP	4
T	Palec	CMC2	2

Tabela 5.1: Opis identifikatorjev sklepov.

### 5.1.1 Optimizacija branja ukazov

Mikrokrmlniki v glavni zanki ves čas regulirajo položaj sklepov. Dolgotrajno branje ukazov lahko zakasni odziv regulacije, zato branje dodatno optimizramo.

Branje ukazov se začne s čakanjem aktivnosti serijske povezave. Ko aktivnost zaznamo, najprej razberemo vrsto ukaza. Ukaza *ustavi* in *aktiviraj* izvedemo takoj, ukaz *pisanja* pa potrebuje dodatno dekodiranje (slika 5.3). Iz števila, ki sledi ukazu *pisanja*, razberemo preostalo število znakov v ukazu. Za tem bi se lahko s preprosto zanko sprehodili čez sklepe in jim spremenili vrednost želenega položaja, kar zasede kar nekaj procesorjevega časa. Medtem ko procesor dekodira ukaz, lahko določen sklep zamudi okno, kjer bi se moral ustaviti.

Dekodiranje ukaza zato lahko prilagodimo, da cel preostanek ukaza prepišemo v vrsto FIFO, ki se z vsakim novim ciklom glavne zanke prazni (slika 5.4). S tem se izognemo dolgotrajnim odmorom med krmiljenjem sklepov.

```

91 // check serial connection for new commands, current available commands are W, A, S;
92 void checkForInstructions() {
93     String input;
94
95     if (Serial.available()) {
96         input = Serial.readString();
97         switch (input[0]) {
98             case 'W': // update set-point values
99                 sizeFIFO += (int)(input[1] - 48); // number 0 has ASCII code 48
100                // second index until the end of msg,
101                // can't put -1 because serial adds a sign at the end
102                spFIFO += input.substring(2, (int)(input[1] - 48) * 4 + 2);
103                break;
104            case 'A': // change state to active
105                state = true;
106                break;
107            case 'S': // change state to stop
108                state = false;
109                break;
110            // potentially add additional commands
111        }
112        //Serial.println("Recieved!");
113    }
114 }
```

Slika 5.3: Branje ukaza iz serijske povezave.

```

64     // Check for new instructions
65     checkForInstructions();
66
67     // If sp buffer isn't empty, update the next SP
68     if (sizeFIFO > 0) {
69         updateJointSP();
70     }

119    // update the first joint set-point (SP value) in the FIFO
120    void updateJointSP() {
121        // update first sp in buffer before deleting it
122        char sp_id = spFIFO[0];
123        int sp_val = spFIFO.substring(1, 4).toInt();
124
125        switch (sp_id) {
126            case MCP_M_ID:
127                MCP_M.updateSetpoint(sp_val);
128            case PIP_M_ID:
129                PIP_M.updateSetpoint(sp_val);
130            case DIP_M_ID:
131                DIP_M.updateSetpoint(sp_val);
132            case MCP_I_ID:
133                MCP_I.updateSetpoint(sp_val);
134            case PIP_I_ID:
135                PIP_I.updateSetpoint(sp_val);
136            case DIP_I_ID:
137                DIP_I.updateSetpoint(sp_val);
138        }
139
140        // delete the updated joint setpoint
141        spFIFO = spFIFO.substring(4, -1);
142        sizeFIFO -= 1;
143    }

```

Slika 5.4: Dekodiranje ukaza pisanja.

### 5.1.2 Komunikacija s strani mikroračunalnika

Programska oprema, ki se izvaja na mikroračunalniku, je v zelo osnovni obliki. Vsebuje dve funkciji: prva konstantno sprejema podatke iz mikrokrmlnikov, druga pa čaka na ukaz, ki ga nato pošlje izbranemu mikrokrmlniku. Prva funkcija se s pomočjo večnitnosti izvaja v ozadju, medtem ko druga ostane v glavni niti programa.

Slika 5.5 prikazuje komunikacijo z mikrokrmlniki. Rdeči puščici prikazujeta poslana ukaza, modre puščice pa spremembe, ki so jih ukazi naredili. Pred ukaz dodamo številko, ki mikroračunalniku pove, na katero serijsko povezavo naj ga pošlje.

S prvim ukazom aktiviramo delovanje prvega mikrokrmlnika, z drugim pa sklepu B (sklep DIP mezinca) spremenimo želeno vrednost na 750. Mikrokrmlnik nato sklepu B počasi spremeni položaj.

```

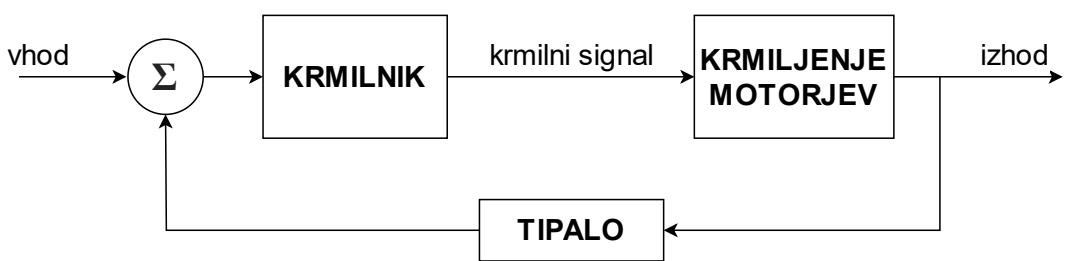
serial01: {{id:1},{state:0},{A:650,B:646,C:649,E:638,F:726,G:673}}
serial02: {{id:4},{state:0},{R:507,S:751,T:749}}
serial03: {{id:3},{state:0},{I:695,J:613,K:627,M:939,N:858,O:782}}
serial04: {{id:2},{state:0},{D:646,H:682,L:694,P:659,Q:547}}
1A ←
New command:
serial01: {{id:1},{state:1},{A:649,B:646,C:648,E:638,F:726,G:673}}
serial02: {{id:4},{state:0},{R:506,S:749,T:748}}
serial03: {{id:3},{state:0},{I:694,J:612,K:627,M:937,N:857,O:780}}
serial04: {{id:2},{state:0},{D:645,H:681,L:692,P:657,Q:546}}
1W1B750 ←
New command:
serial01: {{id:1},{state:1},{A:649,B:645,C:649,E:638,F:726,G:673}}
serial02: {{id:4},{state:0},{R:506,S:749,T:748}}
serial03: {{id:3},{state:0},{I:694,J:612,K:627,M:938,N:858,O:781}}
serial04: {{id:2},{state:0},{D:647,H:682,L:693,P:658,Q:547}}
serial01: {{id:1},{state:1},{A:648,B:662,C:646,E:637,F:724,G:671}}
serial02: {{id:4},{state:0},{R:506,S:749,T:748}}
serial03: {{id:3},{state:0},{I:694,J:612,K:627,M:936,N:856,O:780}}
serial04: {{id:2},{state:0},{D:645,H:680,L:692,P:657,Q:546}}
serial01: {{id:1},{state:1},{A:648,B:702,C:646,E:637,F:725,G:672}}
serial02: {{id:4},{state:0},{R:506,S:749,T:748}}
serial03: {{id:3},{state:0},{I:694,J:612,K:627,M:937,N:857,O:780}}
serial04: {{id:2},{state:0},{D:645,H:681,L:692,P:657,Q:546}}
serial01: {{id:1},{state:1},{A:648,B:724,C:644,E:637,F:724,G:672}}
serial02: {{id:4},{state:0},{R:506,S:749,T:748}}
serial03: {{id:3},{state:0},{I:694,J:612,K:627,M:937,N:856,O:780}}
serial04: {{id:2},{state:0},{D:645,H:680,L:692,P:657,Q:546}}
serial01: {{id:1},{state:1},{A:648,B:733,C:642,E:637,F:725,G:672}}
serial02: {{id:4},{state:0},{R:506,S:749,T:748}}
serial03: {{id:3},{state:0},{I:695,J:613,K:627,M:939,N:858,O:782}}
serial04: {{id:2},{state:0},{D:646,H:682,L:693,P:659,Q:547}}
serial01: {{id:1},{state:1},{A:648,B:740,C:642,E:637,F:725,G:672}}
serial02: {{id:4},{state:0},{R:506,S:749,T:748}}
serial03: {{id:3},{state:0},{I:695,J:613,K:627,M:938,N:859,O:781}}
serial04: {{id:2},{state:0},{D:645,H:681,L:693,P:658,Q:547}}
serial01: {{id:1},{state:1},{A:648,B:741,C:642,E:637,F:725,G:672}}

```

Slika 5.5: Prikaz komunikacije mikroračunalnika z mikrokrmlniki.

## 5.2 Krmiljenje sklepov

Za krmiljenje sklepov uporabimo PID krmiljenje, ki je vrsta krmiljenja z zaprto zanko (slika 5.6). Sistem z zaprto zanko na podlagi želenega položaja oziroma vhoda in trenutnega položaja sklepa oziroma izmerjene vrednosti izračuna krmilno vrednost, s katero krmilimo aktuator. Takšno krmiljenje omogoča regulacijo položaja v primeru zunanjih spremenljivk, kot so posledični premiki.



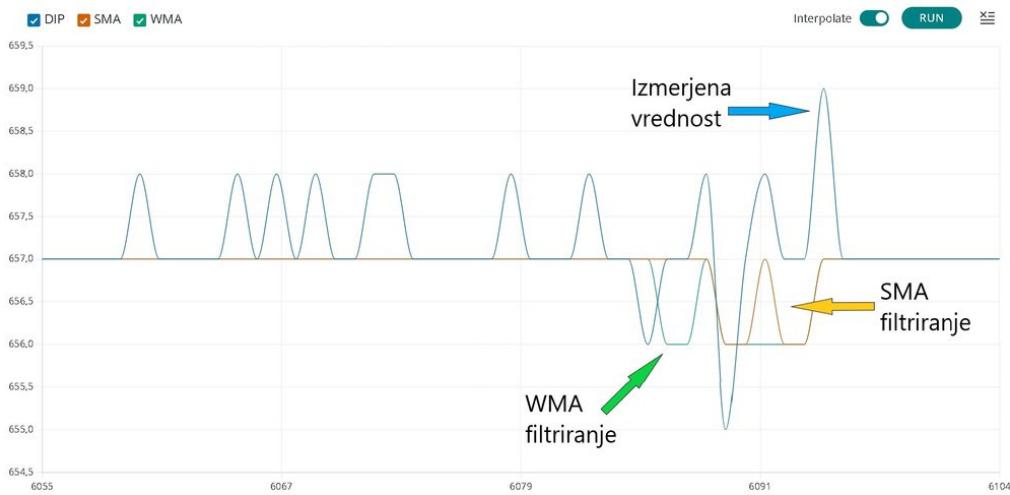
Slika 5.6: Blok shema krmiljenja sklepov z zaprto povratno zanko.

### 5.2.1 Filtriranje vrednosti pozicijskih tipal

Krmiljenje z zaprto zanko je odvisno od izmerjene vrednosti, ki je v primeru robotske roke analogna vrednost potenciometra. Analogni vhodi mikrokrmilnikov vsebujejo 10-bitni analogno-digitalni pretvornik, ki prebrano napetost pretvori v diskretno vrednost med 0 in 1023. Sprememba vsake vrednosti potenciometra za 1 pomeni približno  $0.35^\circ$  rotacije sklepa.

Na izmerjeno vrednost tipala vplivajo tudi drugi dejavniki. Ker zvezno vrednost senzorja pretvorimo v diskretno, je mogoče, da je prava vrednost med dvema sosednjima diskretnima vrednostima. To povzroči nihanje med dvema vrednostima. Takšno nihanje ni problematično, saj lahko programsko omejimo natančnost položaja (na primer na  $\pm 1$  vrednost potenciometra).

Večje težave se pojavijo zaradi nestabilne napetosti, ki povzroči naključne špice v izmerjenem signalu. Špice so lahko bistveno večje ali manjše od dejanske vrednosti senzorja (modri signal na sliki 5.7).



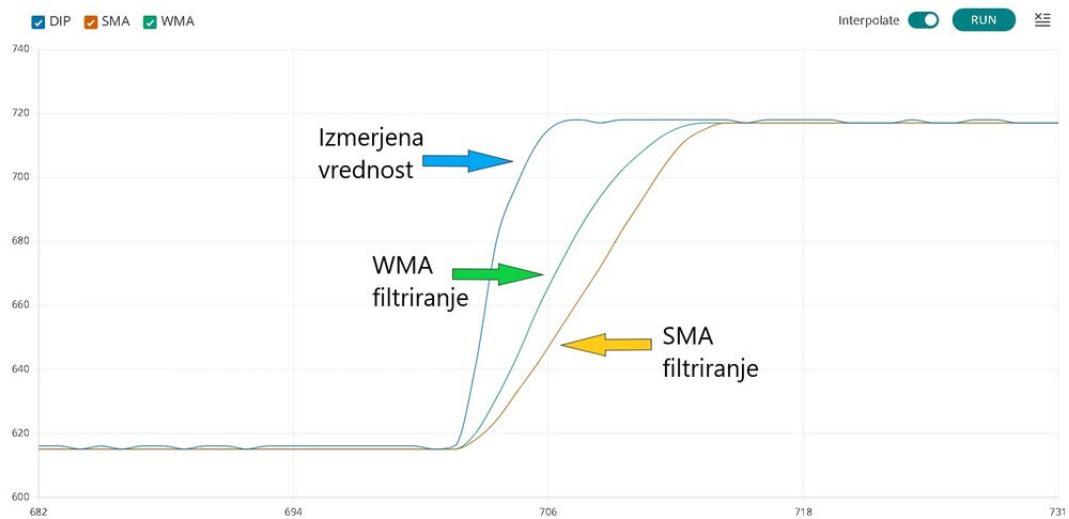
Slika 5.7: Prikaz filtriranja pozicijskih tipal.

V tem primeru moramo zagotavljati stabilnost napetosti ali pa filtrirati izmerjeno vrednost pozicijskih tipal. Filtriranje je lahko na fizičnem nivoju, na primer z elektronskim nizkoprepustnim filtrom (*low-pass filter*) ali programsko s premikajočim povprečjem.

Robotska roka vsebuje programsko filtriranje. Poznamo več metod premikajočega povprečja: preprosto (SMA - *Simple moving average*), uteženo (WMA - *Weighted moving average*) in eksponentno (EMA - *Exponential moving average*). EMA filtriranje ni primerno, saj kopiji vrednost skozi celo delovanje. To v primeru potenciometra, ki konstantno spreminja vrednost, ni idealno. Preprosto in uteženo premikajoče povprečje delujeta na podoben način. Vzameta zadnjih  $n$  ( $n=10$ ) vrednosti in jih povprečita. Razlika je, da SMA izračuna povprečje na vrednostih, kot so, medtem ko WMA izračunu doda uteži glede na starost meritve. Najnovejša meritve ima najvišjo utež, saj je najbolj pomembna.

Razlika v izračunu je opazna pri hitrosti odziva filtriranega signala (slika 5.8). Ker imajo pri filtriranju WMA najnovejše meritve višjo utež, je filtriran signal bolj občutljiv na spremicanje vrednosti. Najti moramo pravilen kompromis med hitrostjo odziva in dejanskim filtriranjem. Če je utež najnovejših vrednosti previsoka, se filtriran signal preveč prilagodi izmerjenemu, če pa je

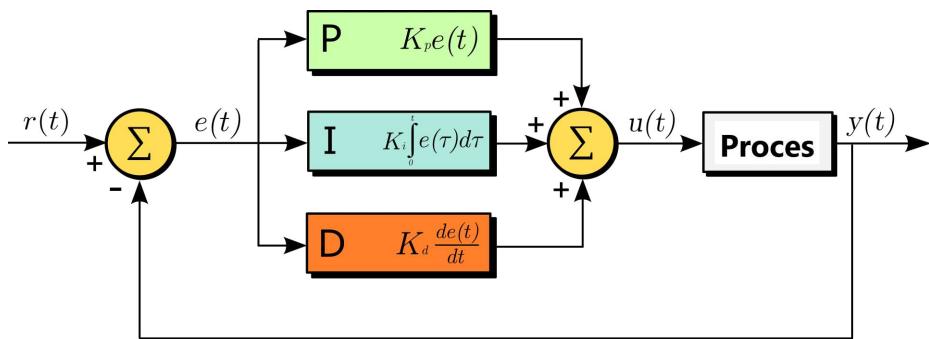
utež prenizka, je odziv prepočasen. Robotska roka vsebuje filtriranje WMA, saj lahko z izbiro pravilnih uteži dosežemo enako filtriranje kot s SMA, le s hitrejšim odzivom na spremembe. Filtriranje zgladi naključne špice na  $\pm 1$  vrednost ( $\pm 0.35^\circ$ ) potenciometra.



Slika 5.8: Prikaz hitrosti odziva različnih metod filtriranja.

### 5.2.2 PID krmiljenje

PID krmiljenje ali triročno krmiljenje je vrsta krmiljenja s povratno zanko (slika 5.9). Popravek ( $u(t)$ ) je izračunan na podlagi napake ( $e(t)$ ) s pomočjo proporcionalnega (P), integralnega (I) in izpeljanega (D) dela. Napaka pa predstavlja razliko med želeno ( $r(t)$ ) in izmerjeno ( $y(t)$ ) vrednostjo.



Slika 5.9: Blok shema PID krmiljenja.

Želena in izmerjena vrednost sta v primeru robotske roke predstavljeni z vrednostjo potenciometra. Izračunan popravek pa predstavlja hitrost vrtenja motorja. Smer vrtenja motorja je odvisna od predznaka napake.

Proporcionalen (P) del izračuna popravek proporcionalno od napake. Večja kot je napaka, večja bo hitrost motorja.

Integralni (I) del je uporabljen, če proporcionalen del ni dovolj za doseg želene vrednosti. V primeru sklepa, če je izračunana krmilna vrednost prenizka za premik aktuatorja, jo bo integralni del postopoma povečeval. Ko sklep pride v želen položaj, se nakopičena vrednost integralnega dela ponastavi.

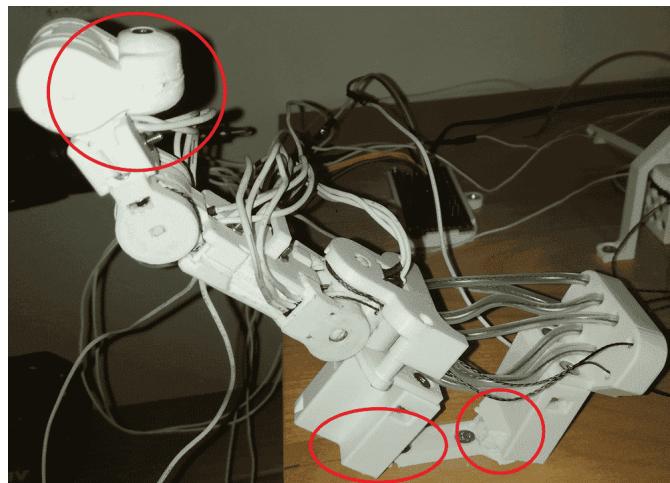
Izpeljan (D) del s predvidevanjem prihodnje napake zgladi krmilno vrednost. Njegova funkcija v primeru robotske roke ni najbolj razvidna zaradi že počasne hitrosti aktuatorjev. Bolj bi bila opazna, če bi hitrost premika sklepov bila večja.

### 5.3 Varovanje robotske roke pred poškodbami

Robotska roka potrebuje mehanizme, ki jo zaščitijo pred možnimi poškodbami. To naredimo tako, da programsko omejimo razpon gibanja vsakega sklepa. Vsak sklep, ki lahko posledično premakne druge, mora dodatno preveriti še stanje sosednjih sklepov. Sklep MCP mora na primer poleg veljavnosti svojega položaja upoštevati tudi veljavnost položajev sklepov PIP in DIP. To je tudi glavni razlog za neenakomerno razporeditev sklepov po mikrokrmilnikih. Sklepi MCP, PIP in DIP istega prsta morajo biti krmiljeni na istem mikrokrmilniku.

Slika 5.10 prikazuje primer, kjer je prišlo do zloma, ker se motor sklepa DIP ni ustavil. Slika je iz prvega preizkusa delovanja prsta, ko programska omejitev razpona gibanja posameznega sklepa še ni bila izvedena. Zlom se je zgodil v najšibkejšem delu oziroma v pritrđitvi prsta na preizkusno mizo.

Na končni konstrukciji roke v podobnih primerih ni prišlo do zloma, ampak do poškodbe vrvic. V končni konstrukciji je najšibkejši del pritrđitev vrvic na aktuatorjih ali na gonilnih delih sklepov. V teh primerih je bila potrebna menjava vrvic.



Slika 5.10: Zlom ob prvem preizkušu delovanja prsta.

## 5.4 Razred za krmiljenje sklepa *HandJoint*

Programska oprema krmili 20 sklepov robotske roke. Spremenljivke in funkcije vsakega sklepa so enake, zato jih lahko organiziramo v en razred. Programski konstruktor razreda *HandJoint* je prikazan na sliki 5.11.

```

3   class HandJoint {
4     public:
5       HandJoint(int min_pos, int max_pos, int joint_type);
6
7       int    joint_position;
8       bool   joint_movement_available;
9
10      void   initFiltering(int joint_pos);
11      void   invertServoRotation();
12      void   updateJointPosition(int joint_pos);
13      bool   movementAvailable(bool joint_1, bool joint_2);
14      void   updateSetpoint(int position);
15      int    regulateJoint(bool joint_1, bool joint_2);
16
17     private:
18       int    _min_pos;
19       int    _max_pos;
20       int    _joint_type;
21       int    _pid_accuracy;
22       int    _min_servo_speed;
23       int    _max_servo_speed;
24       int    _invert_servo_rotation;
25       float  _kp;
26       float  _ki;
27       float  _kd;
28
29       double _filtering_array[10];
30       int    _joint_setpoint;
31       int    _error;
32       int    _direction;
33       int    _last_error;
34       double _cum_error;
35       double _rate_error;
36       double _pid_value;
37
38       unsigned long _last_correction_time;
39
40       void   shiftFiltering(int joint_pos);
41       void   calcFiltering();
42
43       void   calcError();
44       void   updateDirection();
45       void   updateJointMovementAvailability();
46       int    calcPID();
47   };

```

Slika 5.11: Programski konstruktor razreda *HandJoint*.

## 5.5 Glavna programska zanka v mikrokrmilnikih

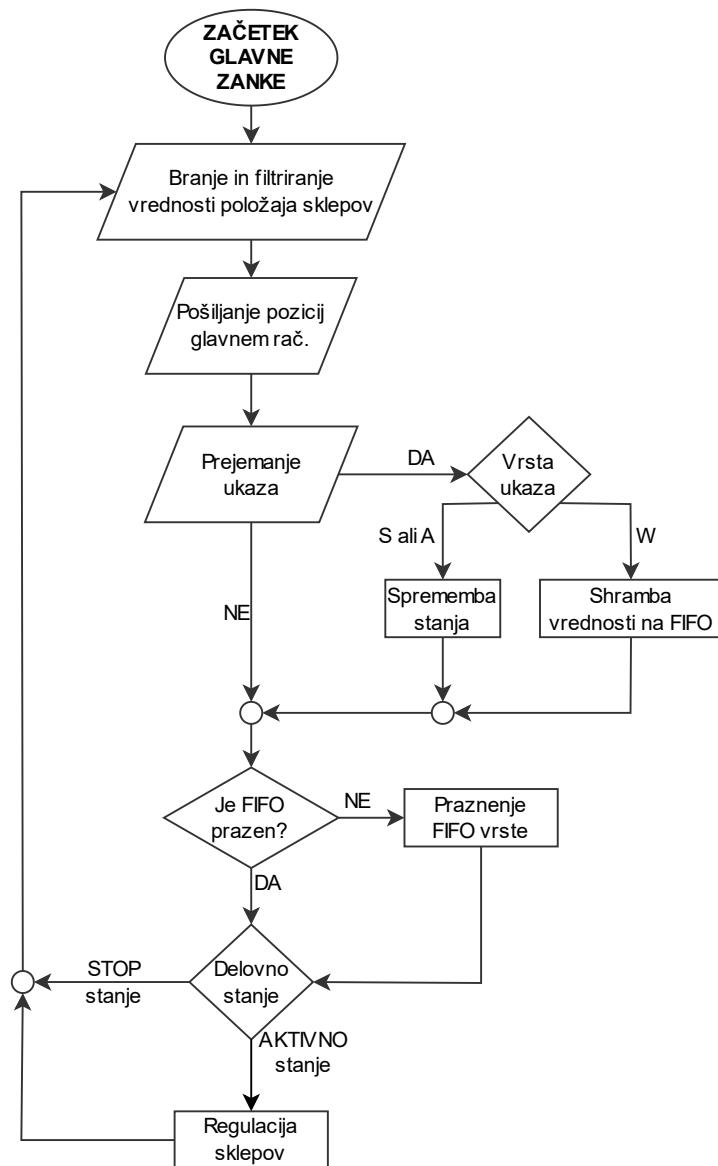
Slika 5.12 prikazuje diagram poteka glavne zanke programa mikrokrmilnikov. Zanka se začne z branjem položaja vsakega sklepa. Prebrane vrednosti položaja nato filtriramo z metodo WMA. Filtrirane vrednosti nato pošljemo mikroračunalniku preko serijske povezave.

Sledi zaznavanje aktivnosti na serijski povezavi, kjer preverimo, ali je mikrokrmilnik dobil nov ukaz. Če ga je, na podlagi vrste ukaza izvede različne ukaze. Ukaza aktiviraj (A) in ustavi (S) spremenita delovno stanje glavne zanke. Ukaz pisanje (W) pa shrani nove želene vrednosti položaja sklepov v vrsto FIFO.

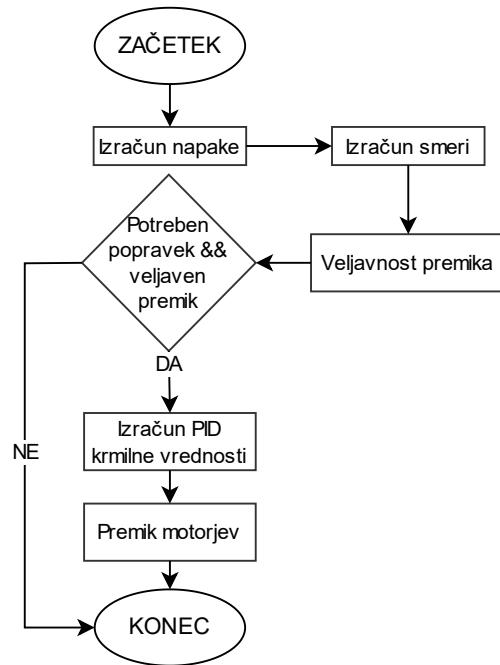
Sledi preverjanje stanja glavne zanke. Če je program v stanju ustavi, ustavimo vse motorje in glavno zanko vrnemo nazaj na branje položajev. Če je program v aktivnem stanju, se glavna zanka nadaljuje.

Če vrsta FIFO ni prazna, vzamemo prve 4 znake in jih dekodiramo. Prvi znak pove, kateremu sklepu sprememimo želeno vrednost položaja, naslednji trije znaki pa vsebujejo dejansko vrednost.

Glavna zanka programa nato začne regulacijo sklepov, ki je ločeno prikazana z diagramom poteka na sliki 5.13. Najprej izračunamo vrednost napake, ki je razlika med želenim in dejanskim položajem sklepa. Nato na podlagi napake izračunamo smer premika, ki je skupaj z omejenim razponom gibanja uporabljena za določanje veljavnosti premika. Če je premik veljaven in sklep potrebuje popravek položaja, program izračuna PID krmilno vrednost in jo uporabi za premik sklepa.



Slika 5.12: Diagram poteka glavne zanke programa mikrokrmlnikov.



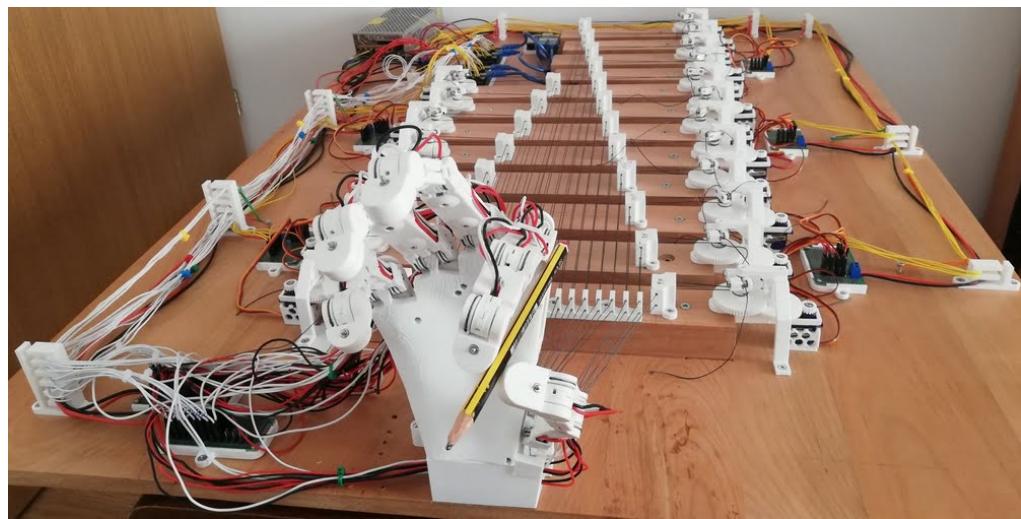
Slika 5.13: Diagram poteka regulacije sklepa.



# Poglavlje 6

## Preizkus delovanja

Naloga je bila osredotočena na konstrukcijo robotske roke (slika 6.1), zato je temu primerno tudi njeno preizkušanje. Prvi preizkus s krmiljenjem preveri delovanje sistema škripcev. Drugi preizkus pa preveri konstrukcijo robotske roke s prijemanjem predmetov različnih oblik in velikosti. Ta preizkus je bolj mehanske oziroma teoretične narave, saj brez povratne informacije o dotiku robotska roka ni primerna za dejansko prijemanje predmetov. Preizkus smo zato izvedli z ročnimi premiki aktuatorjev.



Slika 6.1: Robotska roka v celoti na preizkusni mizi.

## 6.1 Preizkus delovanja sistema škripcev

Preizkus preveri delovanje sistema škripcev s krmiljenjem sklepov MCP, PIP in DIP mezinca robotske roke. Sklepi so krmiljeni preko mikroračunalnika brez dotikanja robotske roke ali preizkusne mize. Preizkus prikazujejo slike, ki so zajete iz video posnetka delovanja. Preizkus je razdeljen na krmiljenje posameznega sklepa in krmiljenje celotnega prsta. Preizkus zaključimo s končnimi ugotovitvami.

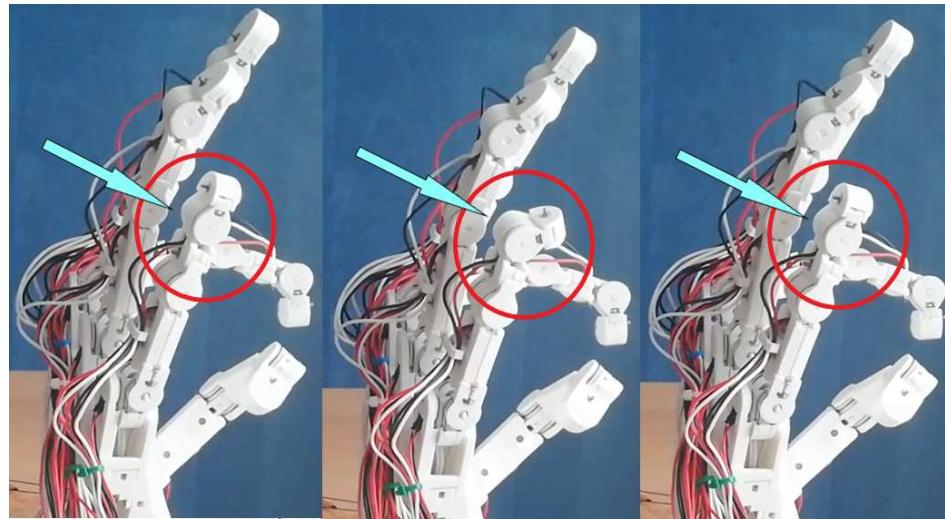
### 6.1.1 Preizkus krmiljenja posameznega sklepa prsta

Najprej preverimo krmiljenje posameznega sklepa. Za boljši prikaz posledičnih premikov je regulacija sklepov, ki jih ne krmilimo, izklopljena. Primer zaporedja ukazov za premik posameznega sklepa (v tem primeru sklepa MCP) je **W1A750 W1A600**. Začeten položaj sklepa je 600.

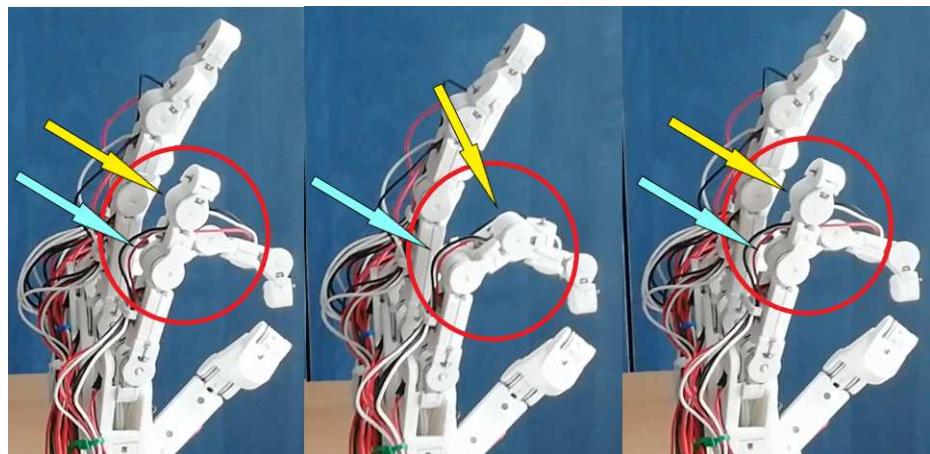
Slika 6.2 prikazuje krmiljenje sklepa DIP (modra puščica). Slika 6.3 prikazuje krmiljenje sklepa PIP (modra puščica). Kot pričakovano, se zaradi posledičnega premika (rumena puščica) premakne tudi sklep DIP. Slika 6.4 pa prikazuje krmiljenje sklepa MCP. Ponovno opazimo delovanje posledičnih premikov s premikom sklepov DIP in PIP (rumena puščica). Velikost premika je bila v primeru sklepa MCP zmanjšana zaradi dvakratnega posledičnega premika na sklepu DIP (zelena puščica).

Krmiljenje posameznega sklepa deluje kot pričakovano. Učinkovitost krmiljenja s sistemom škripcev je odvisna od napetosti vrvic. Napetost vrvic ni najboljša zaradi uporabe mehkih vodil.

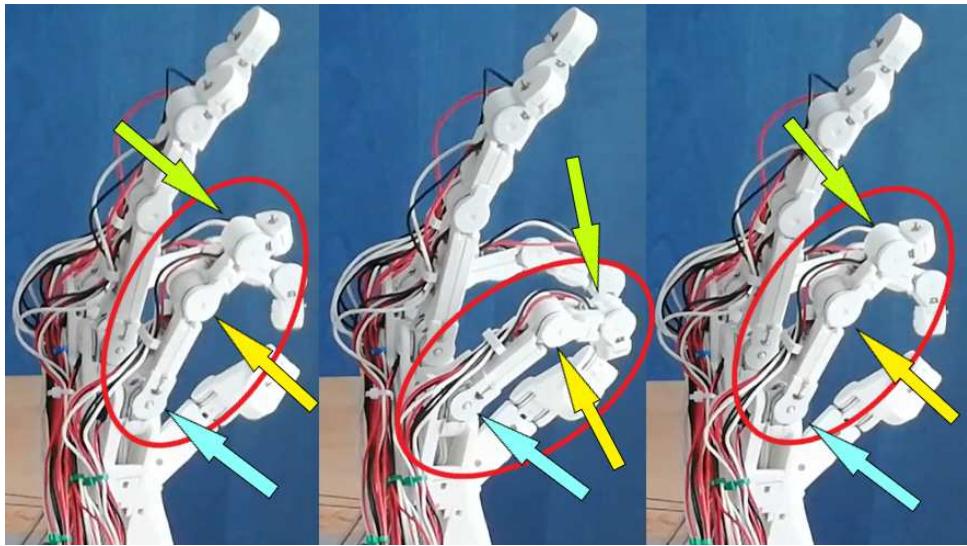
Če imamo premajhno napetost vrvic v sklepu MCP, se lahko zgodi, da ob premiku sklepa DIP premaknemo tudi sklep MCP. Sklep MCP se nato poskuša popraviti in posledično premakne sklepa PIP in DIP. Sklepa PIP in DIP pa se ponovno poskušata popraviti. Končen rezultat je nestabilno krmiljenje, kjer zelo majhen začeten premik zraste v nihanje celotnega prsta. Vzrok premika je trenje med škripcem (ki vrvice vodi do sklepa DIP) in gonilnim delom sklepa MCP.



Slika 6.2: Prikaz krmiljenja sklepa DIP mezinca.



Slika 6.3: Prikaz krmiljenja sklepa PIP mezinca.

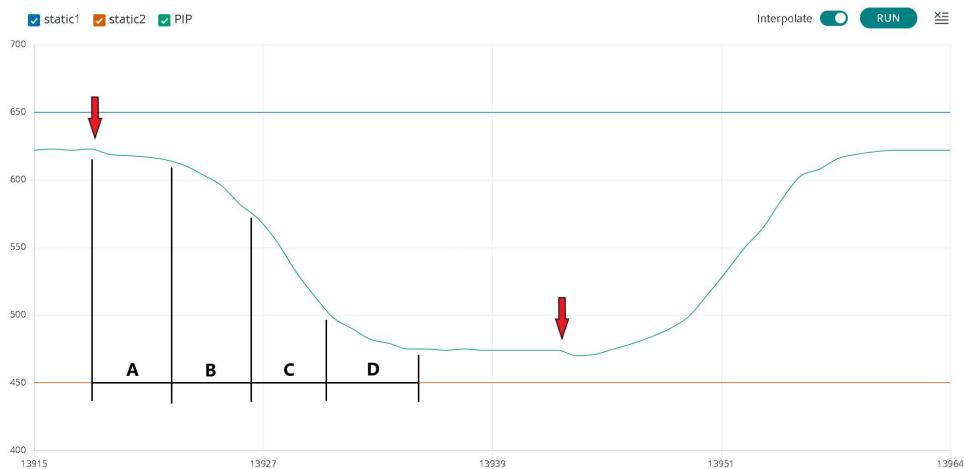


Slika 6.4: Prikaz krmiljenja sklepa MCP mezinca.

### Analiza krmiljenja enega sklepa

Premajhna napetost vrvic ni razvidna iz zgornjih slik. Lažje jo prikažemo, če analiziramo graf položaja sklepa (y os) med njegovim krmiljenjem (slika 6.5). X os grafa ne predstavlja dejanskega časa, ampak število *print* ukazov.

Rdeči puščici prikazujeta začetek premika motorjev za popravek položaja sklepa. Zaradi podobnega poteka bomo podrobnejše razložili le premik položaja navzdol. Ob začetnem premiku opazimo majhen padec položaja in nato zelo počasno spremembo (območje A). Za oba pojava je kriva slaba napetost gognilne vrvice, ki je posledica uporabe mehkih vodil med sklepom MCP in dlanjo. Ob menjavi smeri popravka sprememimo, kateri konec vrvice je napet, zato se motor vrti, ne da premakne sklep. Zakasnjen odziv sklepa v tem primeru zavzame okoli 25% celotnega časa, ki ga sklep potrebuje, da najde nov želen položaj. Območja B, C in D prikažejo delovanje PID krmiljenja. Območje B prikazuje povečevanje hitrosti zaradi kopiranja integralnega dela, ker proporcionalni del ni dovolj velik. Območje C prikazuje spremembo položaja sklepa ob polni hitrosti motorja. Območje D pa prikazuje upočasnitev motorja ob približevanju iskanemu položaju zaradi izpeljanega dela PID krmiljenja. Uporabljeni PID konstante bi lahko bile bolj optimizirane.

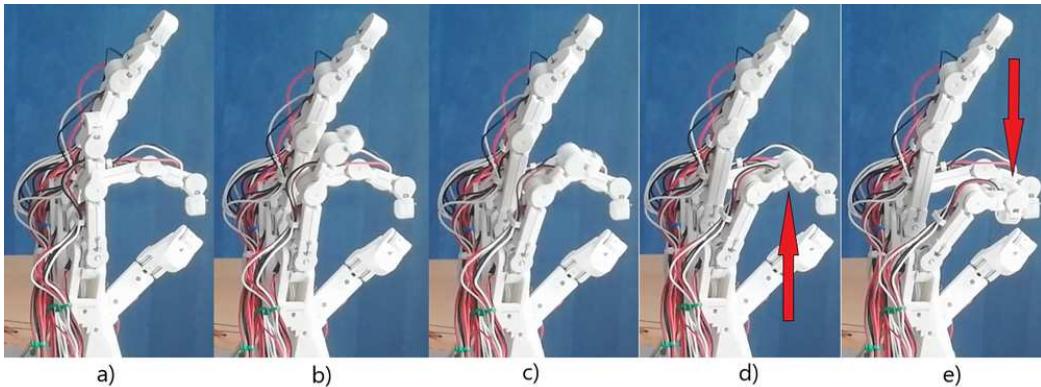


Slika 6.5: Potek položaja sklepa PIP mezinca ob krmiljenju.

### 6.1.2 Preizkus krmiljenja celotnega prsta

Po preizkusu posameznega premika sklepov lahko preverimo krmiljenje celotnega prsta. Za razliko od preizkusa posameznega premika tukaj v ukazu podamo nove želene vrednosti za vse 3 sklepe. Primer zaporedja ukazov je W3A750B750C750 W3A600B600C600, kjer je začetna vrednost vseh tipal sklepov približno 600.

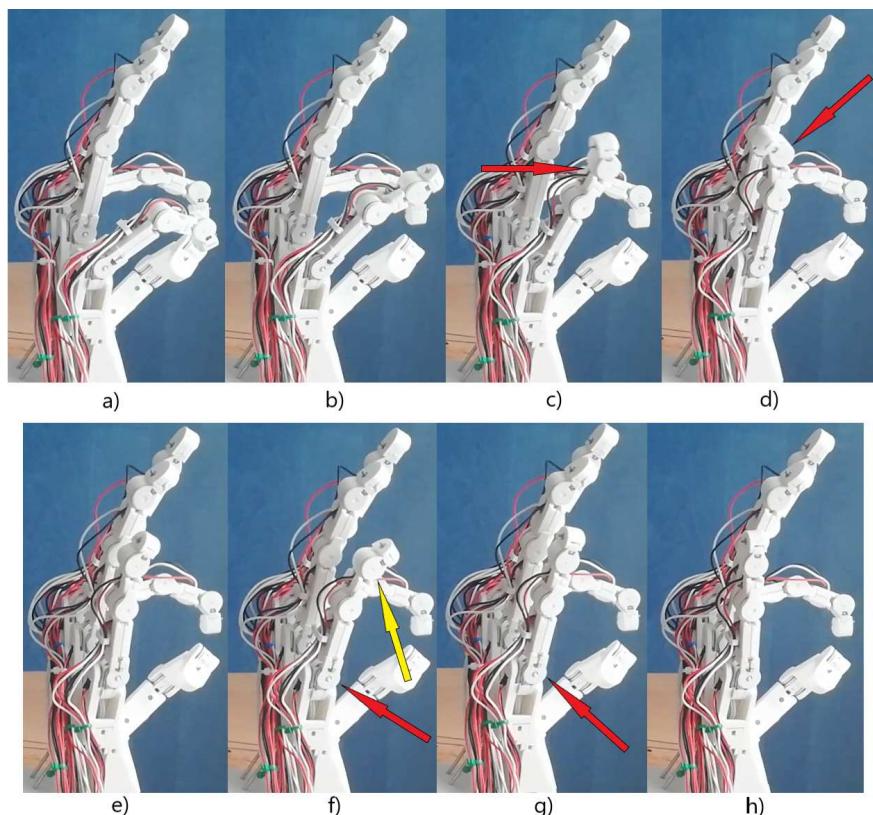
Slika 6.6 prikazuje upogib mezinca ob krmiljenju vseh treh sklepov. Ker podamo le en ukaz s končnimi položaji sklepov, se že v začetku premaknejo vsi trije hkrati. To pomeni, da se sklep DIP premika, kljub temu da bi ga posledični premiki približali želenemu položaju. Zaradi tega sklep DIP kmalu prekorači želen položaj (rdeča puščica v primeru d) in spremeni smer vrtenja, medtem ko se sklepa MCP in PIP še vedno premikata v isto smer. Obratno vrtenja sklepa DIP ne dohaja dvema posledičnima premikoma. Sklep DIP se premakne izven dovoljenega razpona (rdeča puščica v primeru e), zato se sklepa MCP in PIP ustavita. To demonstrira mehanizem, ki roko varuje pred poškodbami. Sklepa MCP in PIP morata za nadaljnje gibanje počakati, da se sklep DIP premakne nazaj v dovoljen razpon gibanja.



Slika 6.6: Prikaz upogiba mezinca robotske roke.

Slika 6.7 prikazuje iztezanje mezinca. Začeten položaj prsta je nadaljevanje iz prejšnjega primera. Sklep DIP je ob iztezanju teže premakniti izven dovoljenega delovnega območja, zato je prekoračitev želenega položaja bolj razvidna (rdeča puščica v primeru c in d).

Ob premiku sklepa DIP (rumena puščica v primeru f) se zaradi premajhne napetosti vrvice premakne tudi sklep MCP (rdeča puščica v primeru f). Sklep MCP zato potrebuje dodaten popravek (rdeča puščica v primeru g), da pride v želen položaj (primer h).



Slika 6.7: Prikaz iztega mezinca robotske roke.

Primera prikažeta pomanjkanje koordinacije med sosednjimi sklepi. Uporaba le enega ukaza za premik celega prsta ni idealna rešitev. Za bolj natančno krmiljenje je en ukaz treba razdeliti na več ukazov vmesnih položajev giba.

### 6.1.3 Ugotovitve preizkusa delovanja sistema škipcev

Sistem škipcev z zelo preprosto konstrukcijo omogoča vodenje sklepov preko vrvic. Krmiljenje sistema deluje dobro, edina stvar, ki ga ovira pred odličnim delovanjem, je napetost vrvic.

Problem izhaja iz uporabe mehkih vodil med dlanjo in sklepi MCP prstov. Mehka vodila so potrebna, da prstu omogočimo primik in odmik.

Ena rešitev je preprosta odstranitev sklepov, ki skrbijo za primik in odmik prstov. V tem primeru lahko vrvico popolnoma napnemo. To bi seveda robotski roki zmanjšalo nabor gibov.

Druge možne rešitve pa so uporaba manj prilagodljivega materiala za mehka vodila, zmanjšanje trenja med škipcem in gonilnim delom ali pa umetno povečevanje sile, ki je potrebna za začeten premik sklepa (oziroma povečanje trenja med osjo in gonilnim delom sklepa).

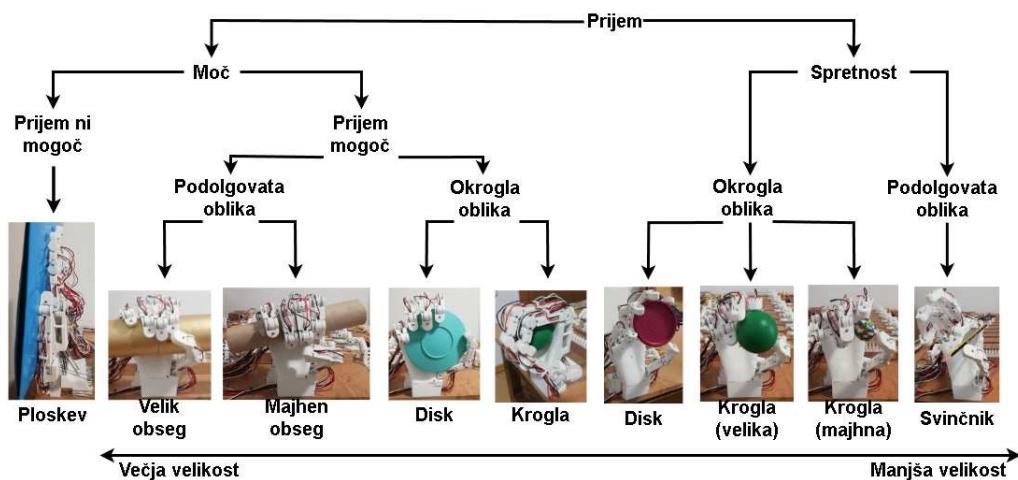
Poleg opisanih konstrukcijskih težav je razvidna tudi slaba koordinacija med sosednjimi sklepi prsta. To lahko rešimo tako, da ukaze giba razdelimo na vmesne točke. En ukaz za gib bi v tem primeru razdelili v na primer 5 zaporednih ukazov, ki prst po vmesnih točkah vodijo do želenega položaja. Rešitev bi v prihodnosti vključili v kinematični model, ki za posamezen končen gib izračuna vmesne položaje sklepov in tvori ustreznou zaporedje ukazov.

## 6.2 Preizkusi prijemanja

Preizkus prijemanja preveri funkcionalnost prijema robotske roke predmetov različnih oblik in velikosti. Preizkus je bolj mehanske oziroma teoretične naware, saj je bil izveden z ročnim premikom aktuatorjev in ne z računalniškim krmiljenjem sklepov. Trenutna izvedba robotske roke ni primerna za dejansko prijemanje predmetov. Brez dodatnega tipala za dotik se aktuatorji preprosto ne ustavijo. Problematična je tudi sama natančnost krmiljenja zaradi slabše koordinacije med sosednjimi sklepi.

Preizkus je predvsem konstrukcijski, saj preveri razpone gibanja robotske roke in nam nudi podroben vpogled v nadaljnje nadgradnje, potrebne za izvedbo funkcionalnosti prijema. Preizkus sledi taksonomiji prijema in predstavlja stopenjsko razvrstitev nekaterih pogostih prijemov (slika 6.8) [4]. Taksonomija seveda ne predstavlja vseh možnih gibov. Njen cilj je z omejeno izbiro primerov preveriti, ali se roka lahko premakne v primeren položaj za prijem izbranega predmeta.

Prijeme najprej razdelimo na močan in spreten prijem ter nato glede na obliko predmeta. Sama postavitev primerov v taksonomiji pa je odvisna od velikosti predmeta. Ta na sliki 6.8 v desno stran pada oziroma v levo stran narašča.



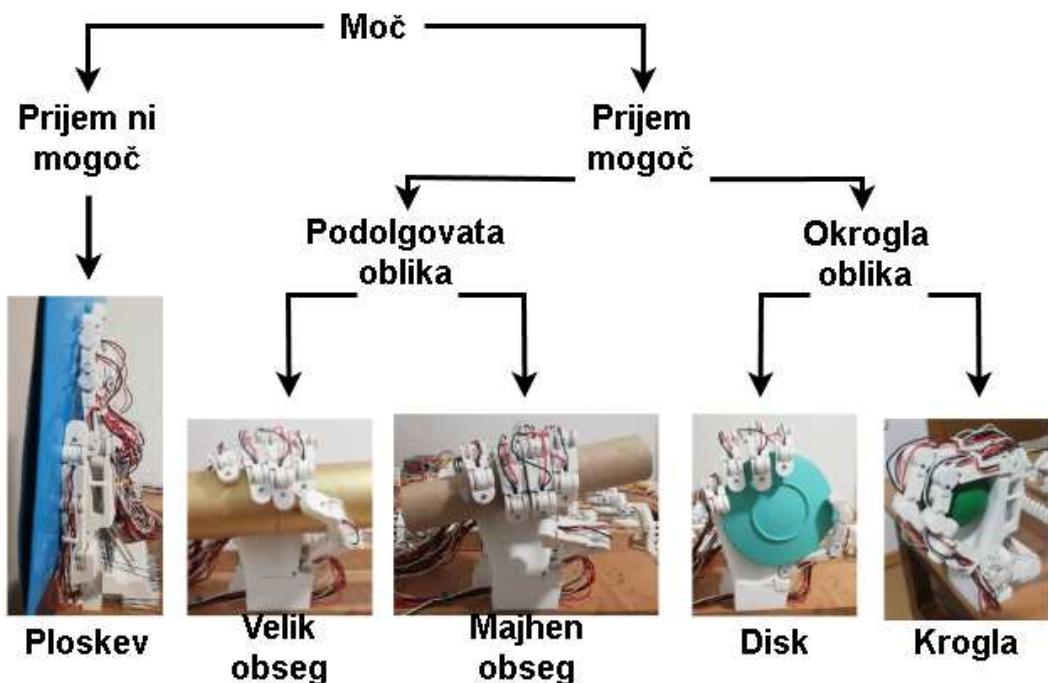
Slika 6.8: Taksonomija prijema [4].

### 6.2.1 Močan prijem

Močan prijem stisne predmet med dlan in prste (slika 6.9). Močan je zato, ker lahko roka s podporo dlani bolj učinkovito izkoristi silo prstov. Taksonomija močnega prijema ima dodaten primer, kjer prijem ni mogoč. Gre za pritisk dlani na ploskev. Vključen je zato, ker vsebuje položaj palca, ki se ob prijemih ne pojavi (palec je vzporeden z ostalimi prsti). Poleg pritiska dlani na ploskev taksonomija močnega prijema vsebuje prijem dveh podolgovatih predmetov valjaste oblike različnih obsegov in dveh okroglih predmetov: krogle in diska.

Primeri močnega prijema dobro izpostavijo razpon gibanja palca; od reprezicijskega položaja pri ploskvi in disku, do opozicijskega položaja v ostalih primerih.

Z vidika zahtevnosti izvedbe močan prijem ni pretirano zanimiv. Podobne rezultate bi dosegli s polovico razpoložljivih prostostnih stopenj. Razen palca noben primer ne potrebuje primika in odmika prstov.

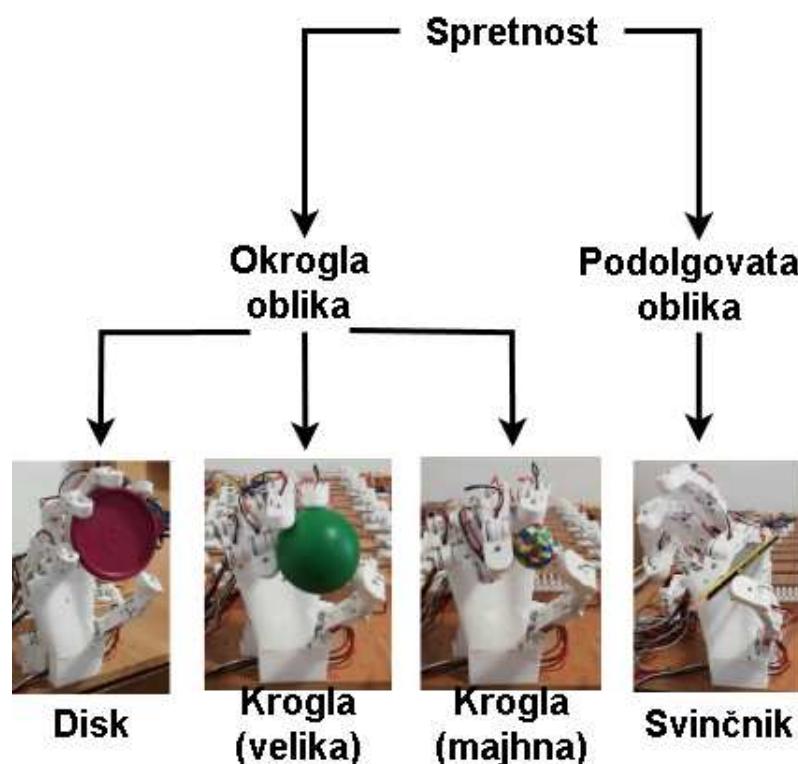


Slika 6.9: Taksonomija močnega prijema.

### 6.2.2 Spreten prijem

Spreten prijem prime predmet z distalnim členkom palca in ostalih prstov. Palec je pri spretnem prijemu vedno v opozicijskem položaju. Taksonomija spretnega prijema vsebuje tri okrogle predmete (disk in dve krogli različnih velikosti) ter enega podolgovatega (svinčnik).

Primeri spretnega prijema potrebujejo večjo natančnost, zato bolj izpostavijo pomanjkljivosti konstrukcije robotske roke. Primik in odmik prstov sta pri spretnem prijemu bolj uporabljeni, saj je orientacija prsta pri prijemu manjših predmetov bolj pomembna. To velja na primer za orientacijo kazalca pri primerih prijema krogle različnih velikosti. Primik in odmik naj bi izboljšala nasprotovanje med palcem in prsti, vendar to ni razvidno iz primerov. Bolj kot si določen prst in palec nasprotujeta, bolj učinkovito je uporabljeni sila in lažje je prijeti predmet.



Slika 6.10: Taksonomija spretnega prijema.

Pri prijemu diska kljub odmiku mezinca opazimo pomanjkljivo nasprotovanje palcu. To je posledica manjkajočega gibanja dlani. CMC sklep mezinca bi bistveno olajšal prijemanje predmeta z mezincem in palcem.

Pri prijemu krogel lahko opazimo prijem predmeta s stranico prsta. Pri prijemu velike krogle predmet primemo s stranico prstanca in konico palca. Podobno je pri prijemu majhne krogle, le da tokrat s stranico sredinca. Iz teh primerov lahko razberemo, da je nasprotovanje prstov manj pomembno za osnovni prijem predmeta, saj si lahko pomagamo s stranico prsta. Nasprotovanje prstov kvečjemu dovoljuje bolj učinkovito uporabo sile.

### 6.2.3 Ugotovitve preizkusov prijemanja

Cilj konstrukcije robotske roke je bil poustvariti razpon gibanja človeške roke. Menim, da je konstrukcija uspela poustvariti razpon gibanja prstov človeške roke. Negibljivost dlani je v posameznih primerih preprečevala boljši prijem.

Iz vidika praktične uporabe pa smo opazili redundatnost nekaterih sklepov. Sklepi, ki skrbijo za primik in odmik, niso imeli veliko vpliva na prijemanja predmeta. Namesto da prst prilagodimo, da nasprotuje palcu, je lažje predmet preprosto prijeti s stranico prsta.

Iz tega stališča bi bilo v prihodnosti smiselno analizirati, kateri sklepi najbolj pripomorejo k prijemalni funkciji človeške roke. Na podlagi analize lahko nato omejimo število sklepov in izberemo le tiste, ki so res potrebni. Z manjšim številom sklepov prav tako olajšamo krmiljenje robotske roke.

Da bi lahko takšne preizkuse izvajali s krmiljenjem, moramo v prihodnosti robotski roki dodati še tipalo za dotik oziroma, še bolje, tipanje sile na vsakem členku. To bi nam dalo potrebno povratno informacijo o prijemu predmeta.

# Poglavlje 7

## Sklepne ugotovitve

Naloga opisuje načrtovanje, izvedbo konstrukcije in razvoj programske opreme za biomimetično antropomorfno robotsko roko. Konstrukcija je narejena po mehanski zasnovi škripcev in omogoča posamezen premik sklepov istega prsta. Zaradi mehanske izvedbe sklepov je konstrukcija preprosta in modularna. Konstrukcija je uspela poustvariti obliko in prijemalno funkcijo človeške roke. Programska oprema omogoča uporabniku preko mikrorračunalnika krmili posamezne sklepe robotske roke.

Robotska roka je cenovno ugodna. K temu pripomore, da je izdelana s pomočjo tehnologije tiskanja 3D in da so izbrane aparaturne komponente cenovno ugodne. Končna cena robotske roke znaša okoli 600 evrov.

Preizkus delovanja sistema škripcev je pokazal, da za učinkovito krmiljenje prstov potrebujemo dobro napetost vrvic. Zaradi pojava posledičnih premikov prav tako potrebujemo boljšo koordinacijo med sosednjimi sklepi prsta. Boljšo koordinacijo bomo v prihodnosti dosegli z uporabo kinematičnega modela, ki bi zgladil gib prsta z dodatnimi vmesnimi točkami položajev sklepov.

Preizkusi prijemanja so namenjeni konstrukciji robotske roke, saj preverijo razpon gibanja s prijemanjem predmetov različnih oblik in velikosti. Preizkus je teoretične narave, saj je izведен z ročnim premikom aktuatorjev in ne s krmiljenjem sklepov. Nam pa omogoča podrobni vpogled v nadaljn-

nje izboljšave sistema, potrebne za izvedbo funkcionalnosti prijema tudi z računalniškim krmiljenjem. Primeri prijema so opredeljeni v taksonomiji.

Preizkus je pokazal, da je konstrukcija dobro posnemala razpon gibanja prstov. V nekaterih primerih je opazno manjkajoče gibanje dlani.

Končna ugotovitev preizkusa prijemanja je redundantnost nekaterih sklepov in potreba po podrobnejši analizi pomembnosti posameznih sklepov v prijemalni funkciji človeške roke. Da bodo v prihodnosti preizkusi prijemanja opravljeni s krmiljenjem sklepov, moramo robotski roki dodati še tipalo, ki bi prispevalo povratne informacije o dotiku.

# Literatura

- [1] Atif Aydinlioglu, Fuat Akpinar in Nihat Tosun. “Mathematical relations between the lengths of the metacarpal bones and phalanges: surgical significance”. V: *The Tohoku journal of experimental medicine* 185.3 (1998), str. 209–216. DOI: 10.1620/tjem.185.209.
- [2] Ji-Hun Bae in sod. “Development of a low cost anthropomorphic robot hand with high capability”. V: *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. 2012, str. 4776–4782.
- [3] Will Cogley. *Prototyping a Full Bionic Finger - Biomimetic Mechatronic Hand Part 3*. Dostopano: 5. 9. 2023. Jul. 2020. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=MxbX9iKGd6w&ab\\_channel=WillCogley](https://www.youtube.com/watch?v=MxbX9iKGd6w&ab_channel=WillCogley).
- [4] Mark R Cutkosky in sod. “On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks.” V: *IEEE Transactions on robotics and automation* 5.3 (1989), str. 269–279.
- [5] B. Hirt, H. Seyhan in M. Wagner. *Hand and Wrist Anatomy and Biomechanics: A Comprehensive Guide*. Thieme, 2016. Pogl. 1.6.1 Structure and Function of the MCP Joints, str. 66–69.
- [6] B. Hirt, H. Seyhan in M. Wagner. *Hand and Wrist Anatomy and Biomechanics: A Comprehensive Guide*. Thieme, 2016. Pogl. 1.6.2 Structure and Function of the PIP Joints, str. 69–73.
- [7] B. Hirt, H. Seyhan in M. Wagner. *Hand and Wrist Anatomy and Biomechanics: A Comprehensive Guide*. Thieme, 2016. Pogl. 1.6.3 Structure and Function of the DIP Joints, str. 73, 74.

- [8] B. Hirt, H. Seyhan in M. Wagner. *Hand and Wrist Anatomy and Biomechanics: A Comprehensive Guide*. Thieme, 2016. Pogl. 1.6.4 Range of Motion of the MCP, PIP and DIP Joints, str. 75.
- [9] B. Hirt, H. Seyhan in M. Wagner. *Hand and Wrist Anatomy and Biomechanics: A Comprehensive Guide*. Thieme, 2016. Pogl. 1.4 Thumb, str. 48–59.
- [10] B. Hirt, H. Seyhan in M. Wagner. *Hand and Wrist Anatomy and Biomechanics: A Comprehensive Guide*. Thieme, 2016. Pogl. 1.5 Structure and Function of the Palm, str. 59–66.
- [11] Uikyum Kim in sod. “Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand”. V: *Nature communications* 12.1 (2021), str. 7177.
- [12] Sungjae Min in Sooyeong Yi. “Development of Cable-driven Anthropomorphic Robot Hand”. V: *IEEE Robotics and Automation Letters* 6.2 (2021), str. 1176–1183. DOI: [10.1109/LRA.2021.3056375](https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3056375).
- [13] Andrew E Park in sod. “The Fibonacci sequence: relationship to the human hand”. V: *The journal of hand surgery* 28.1 (2003), str. 157–160. DOI: [10.1053/jhsu.2003.50000](https://doi.org/10.1053/jhsu.2003.50000).
- [14] Zhe Xu, Vikash Kumar in Emanuel Todorov. “A low-cost and modular, 20-DOF anthropomorphic robotic hand: design, actuation and modeling”. V: *2013 13th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*. 2013, str. 368–375. DOI: [10.1109/HUMANOIDS.2013.7030001](https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2013.7030001).
- [15] Zhe Xu in Emanuel Todorov. “Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration”. V: *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2016, str. 3485–3492. DOI: [10.1109/ICRA.2016.7487528](https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487528).
- [16] Won Suk You in sod. “Design of a 3D-printable, robust anthropomorphic robot hand including intermetacarpal joints”. V: *Intelligent Service Robotics* 12 (2019), str. 1–16.