

# Analiza pokretljivosti segmenta šake kao podloga za konstruiranje bioničke proteze šake

---

**Horvat, Matija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:936002>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-14**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Matija Horvat**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Aleksandar Sušić

Student:

Matija Horvat

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Iskreno se zahvaljujem svom mentoru izv. prof. dr. sc. Aleksandru Sušiću na korisnim sugestijama i kritikama koje su ukomponirane u ovaj rad. Također se zahvaljujem i na svim prenesenim znanjima tijekom predavanja koja su mi omogućila da uvijek sagledam stvari u širem kontekstu i na poticanju kritičkog razmišljanja.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Mariju Štorgi na sugestijama vezanim uz izradu funkcijske strukture.

Veliku zahvalu dugujem svojim roditeljima, koji su bili glavni stupovi moga školovanja i ohrabivali me tokom svih ovih godina. Također se zahvaljujem na podršci svojoj užoj obitelji.

Prijateljima, koji su tijekom mojeg školovanja bili uz mene, želim zahvaliti na svim predivnim i nezaboravnim trenucima.

Matija Horvat



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Matija Horvat**

Mat. br.: **0035185487**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza pokretljivosti segmenata šake kao podloga za konstruiranje bioničke proteze šake**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of hand segments mobility as a basis for bionic prosthesis hands design**

Opis zadatka:

Funkcionalna umjetna šaka postala je predmet mnogih pokušaja unaprjeđenja, unatoč postojanju mnoštva već prisutnih u upotrebi. Razlog je u tome da se razvojem mnogih tehnologija proizvodnja može izvršiti uz znatno niže troškove, a tako dobivena rješenja imaju dostatnu razinu funkcionalnosti.

U okviru ovog rada je potrebno pristupiti analizi pokretljivosti segmenata šake kako bi se ostvarila dva cilja, od kojih je primarni utvrditi zahtjeve za konstruiranje bioničke šake, a sekundarni iskazan kao kriterij utvrđivanja razine dotjeranosti rješenja dostupnih na tržištu.

U radu je potrebno:

- Izvršiti kritički osvrt na tržišno dostupna rješenja proteze šake;
- Provesti analizu pokretljivosti i funkcija segmenata šake;
- Definirati zahtjeve, ograničenja i očekivane značajke optimalne konstrukcije bioničke šake;
- Sistematizirati utvrđene i odabrane funkcionalne odlike bioničke šake
- Predložiti smjernice za oblikovanje bioničke proteze šake.

Opseg analize, možebitnog modeliranja i izrade prijedloga konstrukcija dogovoriti tijekom izrade rada. Svu dokumentaciju izraditi pomoću računala. U radu navesti korištenu literaturu, kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

Predviđeni datumi obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadao:

Izv.prof.dr.sc. Aleksandar Sušić

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
OPIS OSI, RAVNINA I SMJERA.....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. ANATOMIJA I POKRETLJIVOST SEGMENTA ŠAKE .....	2
2.1. Kostii šake.....	2
2.1.1. Kostii pešća .....	2
2.1.2. Kostii zapešća .....	3
2.1.3. Kostii prstiju.....	4
2.2. Zglobovi šake .....	5
2.3. Pokreti šake .....	17
2.3.1. Pokret štipanja.....	17
2.3.2. Pokret hvatanja.....	22
2.3.2.1. Snaga stiska.....	25
2.3.3. Tipkanje .....	27
2.3.4. Prihvat miša .....	27
2.3.5. Prirodni položaj šake.....	28
3. ANALIZA TRŽIŠTA .....	29
3.1. Napredne proteze šake .....	29
3.1.1. Steeper.....	29
3.1.2. Touch Bionics .....	32
3.1.3. Otto Bock .....	34
3.2. Jednostavne bioničke šake .....	36
3.2.1. Open Bionics.....	36
3.2.2. Limbitless Solutions.....	39
3.2.3. OpenBionics.....	41
3.2.4. Komponente jednostavne bioničke proteze šake .....	43
3.2.4.1. Servomotor.....	43
3.2.4.2. Arduino .....	48
3.2.4.3. Senzor aktivnosti mišića .....	51
4. ZAHTJEVI .....	53
4.1. Generalni zahtjevi .....	53
4.1.1. Mala masa .....	53
4.1.2. Jednostavnost .....	54
4.1.3. Korištenje gotovih elemenata .....	54
4.1.4. Broj mogućih zahvata .....	55

4.1.5.	Doziranje pritiska prstiju.....	55
4.1.6.	Nosivost proteze.....	56
4.1.7.	Autonomija .....	56
4.1.8.	Ergonomija.....	56
4.1.9.	Sigurnost .....	56
4.1.10.	Dizajn.....	57
4.1.11.	Niska cijena.....	57
4.2.	Raznolikost zahtjeva različitih skupina korisnika.....	58
4.2.1.	Zahtjevi ciljane skupine korisnika .....	58
4.2.2.	Analiza zahtjeva.....	65
4.2.3.	Bionička proteza šake namijenjena za školske aktivnosti .....	65
4.2.4.	Bionička proteza šake namijenjena za igru na otvorenom.....	67
4.2.5.	Funkcijska struktura.....	68
5.	SMJERNICE ZA OBLIKOVANJE BIONIČKE PROTEZE ŠAKE .....	70
5.1.	Prihvat bioničke proteze šake na protezu podlaktice .....	70
5.2.	Abdukcija i adukcija prstiju .....	77
5.3.	Dizajn prstiju proteze .....	78
5.4.	Abdukcija palca proteze .....	80
5.5.	Prilagođavanje prstiju obliku predmeta koji se prihvaća .....	82
5.6.	Aktuatori .....	82
5.7.	Zaključavanje položaja kažiprsta .....	86
5.8.	Osiguranje od preopterećenja i prejakog stiska .....	87
5.9.	Odabir elektroničkih komponenti .....	89
5.10.	Materijali za izradu proteze šake.....	90
5.11.	Ispunjeni zahtjevi ciljane grupe korisnika .....	93
6.	ZAKLJUČAK.....	96
	LITERATURA.....	98
	PRILOZI.....	102

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Kostí pešća [7] .....	3
Slika 2. Kostí zapešća [8] .....	4
Slika 3. Kostí prstiju [7] .....	5
Slika 4. Proksimalni zglob šake [6].....	6
Slika 5. Distalni zglob šake [6] .....	7
Slika 6. Zglobovi između kostiju korijena šake [6] .....	7
Slika 7. Globalni pokreti ručnog zgloba [6] .....	9
Slika 8. Pokreti zgloba palca [6] .....	11
Slika 9. Zglobovi korijena šake i zapešća [6].....	13
Slika 10. Pokret štipanja [6] .....	17
Slika 11. Prihvat predmeta vrhovima prstiju [9] .....	18
Slika 12. Prihvat predmeta jagodicama prstiju [10] .....	19
Slika 13. Prihvat predmeta s tri prsta [12].....	20
Slika 14. Lateralni prihvat predmeta [13] .....	22
Slika 15. Hvatanje tankih predmeta [14].....	23
Slika 16. Hvatanje debljih predmeta [15].....	24
Slika 17. Hvatanje sferičnih predmeta [16].....	24
Slika 18. Nošenje vrećica ( <i>hook grasp</i> ) [17].....	25
Slika 19. Mjerenje snage stiska hidrauličnim dinamometrom [18] .....	26
Slika 20. Položaj prstiju pri tipkanju [19] .....	27
Slika 21. Prihvat miša [20] .....	28
Slika 22. Prirodni položaj šake [21] .....	28
Slika 23. Bionička šaka bebionic [22].....	30
Slika 24. Mogućnost abdukcije palca i fleksije pojedinih prstiju proteze šake [23].....	31
Slika 25. Bionička šaka i-limb quantum [25].....	33
Slika 26. Povezivanje bioničke ruke i-limb sa pametnim satom [25] .....	33
Slika 27. Bionička šaka Michelangelo [28] .....	35
Slika 28. Dizajn bioničke ruke tvrtke Open bionics [31] .....	37
Slika 29. 3D tiskane komponente [30] .....	37
Slika 30. Smještaj linearnih aktuatora unutar šake [30].....	38
Slika 31. PCB je smješten unutar proteze šake [30] .....	38
Slika 32. Različite varijante bioničkih proteza ruke temeljenih na dizajnu organizacije Limbless Solutions [33] .....	39
Slika 33. Prikaz komponenti šake [34].....	40
Slika 34. Prikaz sklopljene bioničke ruke s elektroničkim komponentama [34] .....	40
Slika 35. Sklop prsta bioničke šake [35] .....	41
Slika 36. Mehanizam za pasivnu abdukciju palca [35] .....	42
Slika 37. Prikaz sklopljene bioničke proteze šake [36].....	42
Slika 38. Servomotori [39] .....	44
Slika 39. Shema DC servomehanizma u neutralnom položaju [40] .....	46
Slika 40. Shema DC servomehanizma pri promjeni ulaznog signala [40].....	47
Slika 41. Unutrašnjost servomotoru [41].....	48
Slika 42. Arduino Uno R3 [42] .....	49
Slika 43. ATmega328 mikrokontroler [44].....	50
Slika 44. Hexapod temeljen na Arduino čipu [45].....	50
Slika 45. Muscle Sensor (AT-04-001) [47].....	51
Slika 46. Kvaliteta signala ovisno o poziciji senzora [47] .....	52
Slika 47. Izgužvane plastične čaše uslijed prevelikog pritiska prstiju [50] .....	55



Slika 48. Supinacija i pronacija [51] .....	59
Slika 49. Prihvat za nošenje torbe [55] .....	61
Slika 50. Držanje predmeta u dlanu [56].....	61
Slika 51. Abdukcija i adukcija prstiju [57] .....	62
Slika 52. Funkcijska struktura.....	69
Slika 53. Kandžasta spojnica [58].....	71
Slika 54. Zahtijevani rasponi pokreta ručnog zgloba za prvu i drugu protezu.....	71
Slika 55. Položaj kandži kod obje proteze za različite kutove rotacije ručnog zgloba .....	72
Slika 56. Prihvat na protezi nadlaktice .....	73
Slika 57. Prihvat na protezi šake .....	74
Slika 58. Sila na ručni zglob kod nošenja tereta [59].....	75
Slika 59. Geometrija kandže .....	75
Slika 60. Abdukcija i adukcija prstiju kod otvorene i zatvorene šake [61].....	77
Slika 61. Prihvat lista papira između prstiju [62].....	77
Slika 62. Članci prstiju proteze [63].....	78
Slika 63. Prst proteze napravljen pomoću silikonske trake [35] .....	79
Slika 64. Predloženo rješenje prsta bioničke šake.....	80
Slika 65. Mehanizam za abdukciju palca proteze .....	81
Slika 66. Konstrukcijsko rješenje za prihvat predmeta nepravilnog oblika.....	82
Slika 67. Linearni aktuator PQ12 tvrtke Firgelli [65] .....	83
Slika 68. Krivulja opterećenja [65] .....	85
Slika 69. Mehanizam za blokiranje fleksije kažiprsta.....	86
Slika 70. Trimer za podešavanje pritiska [69].....	88
Slika 71. Shema spajanja komponenti.....	89
Slika 72. Polimerne komponente bioničke proteze šake.....	91

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Normalne vrijednosti pasivnog raspona pokreta ručnog zgloba [6] .....	10
Tablica 2. Normalne vrijednosti raspona pokreta zgloba palca [6].....	12
Tablica 3. Normalne vrijednosti raspona pokreta (°) zglobova prstiju [6].....	14
Tablica 4. Normalne vrijednosti raspona pokreta distalnih zglobova među člancima prstiju [6] .....	15
Tablica 5. Normalne vrijednosti raspona pokreta zgloba (°) među člancima palca i proksimalnih zglobova među člancima prstiju [6].....	16
Tablica 6. Srednja jačina pritiska kod prihvata predmeta jagodicama prstiju sa pojedinim prstima [11] .....	20
Tablica 7. Srednja jačina pritiska kod prihvata s tri prsta ovisno o okupaciji [11].....	21
Tablica 8. Srednja jačina pritiska kod lateralnog prihvata ovisno o okupaciji [11].....	22
Tablica 9. Srednja vrijednost jačine stiska ovisno o okupaciji [11].....	25
Tablica 10. Srednja vrijednost jačine stiska ovisno o starosti [11] .....	26
Tablica 11. Regresijski koeficijenti za žene i muškarce [48].....	54
Tablica 12. Svojstva materijala Ninjaflex [64] .....	80
Tablica 13. specifikacije linearnog aktuatora PQ12 [65].....	84
Tablica 14. Odabrani servomotori [67], [68] .....	85
Tablica 15. Cijena pojedinih elektroničkih komponenti .....	90
Tablica 16. Svojstva ABS-a [70].....	91

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A$	$\text{mm}^2$	površina
$A_k$	%	elongacija do pucanja materijala
$B_1, B_2, B_3$	-	regresijski koeficijent
$F$	N	sila
$G$	N	sila na ručni zglob
$h$	mm	debljina kandže
$H_S$	cm	ukupna visina subjekta
$I$	A	jakost električne struje
$M$	Nm	moment
$m$	kg	masa
$m_i$	kg	masa segmenta tijela
$M_S$	kg	ukupna masa subjekta
$n$	$\text{min}^{-1}$	učestalost vrtnje
$P$	W	snaga
$p$	$\text{N/mm}^2$	pritisak
$p_{\text{dop}}$	$\text{N/mm}^2$	dopušteni dodirni pritisak
$r$	-	prijenosni omjer
$r_1$	mm	unutarnji promjer kandže
$r_2$	mm	vanjski promjer kandže
$R_m$	MPa	vlačna čvrstoća
$T$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
$T_g$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura staklišta
$T_m$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura taljenja
$U$	V	napon
$v$	m/s	brzina
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	gustoća
$\tau$	$\text{N/mm}^2$	smično naprezanje
$\tau_{\text{dop}}$	$\text{N/mm}^2$	dopušteno smično naprezanje
$\varphi$	$^{\circ}$	kut kandže

## OPIS OSI, RAVNINA I SMJERA

### Osi

Os	Opis
okomita, longitudinalna sagitalna	teče uzduž od tjemena do tabana i okomita je na podlogu prolazi od straga prema naprijed kroza stražnju i prednju stijenkiju tijela
vodoravna, transverzalna	prolazi poprečno od lijeva nadesno i međusobno spaja odgovarajuće točke obiju strana tijela

### Ravnine

Ravnina	Opis
medijalna, središnja	teče od leđa prema trbuhu i dijeli tijelo od glave do stopala na dvije zrcalne polovice ( <i>antimere</i> )
sagitalna frontalna	teče usporedno (paralelno) sa medijalnom kroz tijelo postavljena je okomito na medijalnu i dijeli tijelo na prednji i stražnji dio
vodoravna, transverzalna	teče poprečno kroz tijelo i okomita je na sagitalnu i frontalnu ravninu i dijeli tijelo na gornji i donji dio

### Opisi smjera

Opisi na udovima	Opis
<i>proximalis</i> , (proksimalni)	prema trupu, smješteno bliže trupu
<i>distalis</i> , (distalno)	prema kraju uda, prema prstima, udaljeno od trupa
<i>radialis</i> , (radijalno)	prema palcu
<i>ulnaris</i> , (ulnarno)	prema malome prstu
<i>palmaris</i> , (palmarno)	prema dlanu, prema površini dlana
<i>dorsalis</i> , (dorzalno)	prema nadlanci, prema hrptu dlana

Smjerovi kretanja	Opis
<i>flexio</i> (fleksija)	pregibanje trupa ili uda oko poprečne osi
<i>extensio</i> (ekstenzija)	istezanje trupa ili uda oko poprečne osi
<i>adductio</i> (adukcija)	primicanje uda tijelu
<i>abductio</i> (abdukcija)	odmicanje uda od tijela
vanjska rotacija	vanjsko okretanje uda oko dulje osi
unutarnja rotacija	unutarnje okretanje uda oko dulje osi
<i>supinatio</i> (supinacija)	uvrtanje šake ili stopala, pri čemu se dlan usmjerava prema gore, tj. podiže se medijalni rub stopala
<i>pronatio</i> (pronacija)	uvrtanje šake ili stopala, pri čemu se dlan usmjerava prema dolje, tj. spušta se medijalni rub stopala
<i>circumductio</i> (cirkumdukcija)	kružna, obilazna kretanja uda

---

**SAŽETAK**

Na tržištu jednostavnih bioničkih proteza uočeno je da ne postoje proteze za određene interesne skupine. Postojeće bioničke proteze pokušavaju ispuniti različite zahtjeve više interesnih skupina što dovodi do proizvoda koji za određene skupine korisnika nije funkcionalan.

U radu su prepoznati generalni zahtjevi, koji vrijede za sve skupine korisnika. Odabrana je ciljana skupina za koju su se analizirali zahtjevi. Ciljana skupina su djeca u dobi od 6 do 11 godina sa gubitkom šake na jednoj ruci. Na temelju zahtjeva iskazana je potreba za razvojem dvije različite bioničke proteze šake.

Prva bionička proteza šake potrebna je za obavljanje školskih aktivnosti, poput pisanja, crtanja, hvatanja listova papira i niza drugih aktivnosti. Ona omogućuje veću preciznost kod hvatanja predmeta, te veći broj mogućih vrsta prihvata.

Druga bionička proteza šake koristila bi se kod igranja na otvorenom, gdje je proteza izložena različitim vremenskim uvjetima, vodi i prljavštini. Od te bioničke proteze se očekuje da ispunjava funkcije zahtijevane u takvim kompleksnim uvjetima. Kod nje su više izraženiji zahtjevi za mogućnošću podnošenja većih opterećenja, jačim stiskom i otpornosti na trošenje.

Na temelju tih zahtjeva izrađena je funkcijska struktura za obje bioničke proteze šake.

U smjernicama za oblikovanje proteze šake dana su rješenja koja će ispuniti utvrđene zahtjeve. Time definiramo izbor zahtjeva koje možemo ispuniti i kakav proizvod možemo ponuditi korisnicima. Neki od zahtjeva su potpuno ispunjeni, dok se neki nisu dali ispuniti u punoj mjeri. Ovdje je važno da predložene bioničke proteze šake mogu ispuniti više zahtjeva nego konkurentske, ili da mogu ispunjavati podjednako zahtjeva, ali po nižoj cijeni. Samo pod tim uvjetima možemo očekivati uspjeh našeg proizvoda na tržištu.

Obzirom da postoje brojna konstrukcijska i funkcijska rješenja, senzori, upravljački sklopovi i brojni drugi neophodni elementi nisu bili primarni cilj ovoga rada. Prilagodбом tih podsklopova i elemenata moguće je pristupiti detaljnijoj konstrukcijskoj razradi predloženih rješenja bioničkih proteza šake.

**Ključne riječi:** namjenska bionička proteza šake, malodobna djeca, fina motorika, slobodne aktivnosti

---

**SUMMARY**

There is observed that on the market of affordable bionic hands are no prostheses for specific interest groups. Existing bionic prostheses are trying to meet various requirements of numerous interest groups. This leads us to products which are not functional for specific groups of users. In this thesis, general demands of all user groups are recognized. The target group was selected, and the requests for this group were analyzed. In this target group are children, between 6 and 11 years with a fist loss on one hand. Based on those requests the necessity for developing two different bionic prosthesis of the wrist is expressed.

The first bionic prosthesis is required to perform school activities such as writing, drawing, carrying school bag and series of other actions. It provides better accuracy in catching objects and additional grasp types.

The second bionic prosthesis will be used in playing outdoors, where the prosthesis is exposed to all kind of weather conditions, water influence and dirt. From this bionic prosthesis is expected to fulfill requested functions in such complex conditions. The requests for stronger grip, wear resistance and carrying greater loads are expressed.

Based on this requests the functional structure for both bionic prosthesis was made.

In the guidelines for designing fist prostheses, the solutions that will fulfill established requests are given. With this guidelines we define which requests can be fulfilled and what can we offer to customers. Some of requests are fully accomplished, while some can't be meet in full measure. It is important that proposed bionic prostheses can fulfill more requests than other prostheses, or that can fulfill equal requests, but at a lower price. Only under that circumstances we can expect the success for our products on the market.

Because there are numerous structural and functional solutions, sensors, controllers and many other elements weren't the main goal of this thesis. After adaptation of these subassemblies and elements we can move toward detailed construction development of the proposed solutions.

**Key words:** dedicated bionic hand prosthesis, school-age children, fine motor skills, free time activities

## 1. UVOD

Prva mioelektrična proteza bila je razvijena ranih 40-ih godina prošlog stoljeća od strane Reinholda Reitera, fizičara koji je radio u bavarskom Crvenom križu. Njegov rad nije izazvao jak odjek u javnosti. Tijekom 50-ih godina prošloga stoljeća u Engleskoj i Sovjetskom Savezu došlo je do ponovnog otkrića mioelektričnog upravljanja. 1945. godine, nakon završetka Drugog svjetskog rata, pojavila se jaka potreba za razvojem funkcionalnih proteza zbog velikog broja ratnih veterana sa invaliditetom. Prva bionička ruka postala je komercijalno dostupna tijekom 60-ih godina, a izradila ju je tvrtka Otto Bock. Ruka se temeljila na pneumatskom sistemu i bila je uspješno primjenjivana kod djece. Ne treba ni spominjati da te prve proteze nisu bile prilagođene korisniku, a estetski dojam bio je kao da su došle iz horor filmova. Prolaskom vremena i ti nedostaci su se polako popravljali, tako da današnje bioničke proteze imaju zavidljivu razinu tehničkih mogućnosti i atraktivnog su dizajna.

Karakteristika mioelektričnih proteza je da na temelju detektiranja električnih impulsa u mišićima izvrši član, aktuator, obavlja neki pokret ili zadanu funkciju. Za detektiranje električnih impulsa u mišićima koriste se elektrode čiji se signali obrađuju u malenim računalima – mikrokontrolerima, koji upravljaju cijelim sustavom.

Konstrukcija proteze vrlo je delikatan posao, jer je naša šaka sa 27 kostiju i sa mnogobrojnim zglobnim površinama vrlo kompleksan sustav. Najdalje što možemo ići je kopirati pojedine elemente i dati bioničkoj ruci neke osnovne mogućnosti zahvata.

Na tržištu su dostupne napredne proteze koje mogu izvoditi mnogobrojne zahvate, imaju mogućnost prilagođavanja pojedincu i uz posebnu rukavicu teško ih je i primijetiti. Nedavno je predstavljena inovativna bionička proteza koja korisniku daje osjet dodira [2],[3], što daje mogućnost preciznijeg hvatanja predmeta. No, vrhunska tehnologija ima i svoju cijenu, pa napredne bioničke proteze nisu dostupne svim slojevima društva.

Zbog toga su projekti jednostavnih i jeftinih bioničkih proteza vrlo zanimljivi jer omogućuju širokom krugu ljudi mogućnost nabavke bioničke proteze po vrlo pristupačnim cijenama. Većina tih proteza su projekti otvorenog koda koji omogućuju dijeljenje tehnologija i znanja sa svom zainteresiranom javnošću. Takvi projekti omogućuju da svaki pojedinac može doprinijeti unapređenju ili izradi bioničke proteze te se time stvara timsko ozračje i kolektivna svijest o potrebama osoba s invaliditetom.

## 2. ANATOMIJA I POKRETLJIVOST SEGMENTA ŠAKE

### 2.1. Kostii šake

Djelomično objašnjenje za mogućnost izvođenja preciznih pokreta ruke leži u prisutnosti mnogih kostiju i zglobova koji se mogu pokretati u suradnji sa ili neovisno jedni o drugima. Ruka se sastoji od 30 kostiju, ne računajući sezamoidne kosti čiji broj varira. Kostii slobodnog djela ruke su: humerus, ulna i radius, ossa carpi, ossa metacarpi i ossa digitorum manus.

#### 2.1.1. Kostii pešća

**Kostii pešća** (ossa carpi) tvori 8 nepravilnih kratkih kostiju, ossa carpi, koje su raspoređene u jedan proksimalni i jedan distalni niz.

U proksimalnom nizu od radijalno prema ulnarno leže:

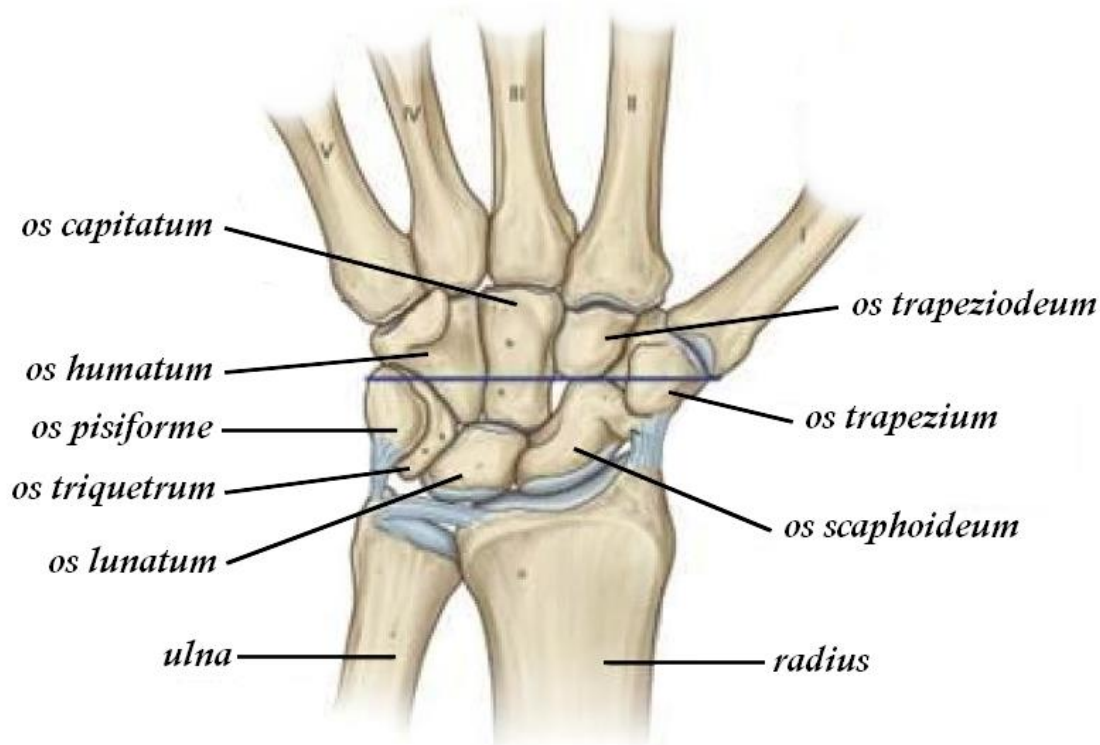
- *os scaphoideum* (čunasta kost),
- *os lunatum* (polumjesečasta kost),
- *os triquetrum* (trokutasta kost) i
- *os pisiforme* (graškasta kost).

U distalnom nizu od radijalno prema ulnarno leže:

- *os trapezium* (trapezna kost),
- *os trapeziodium* (trapeziodna kost),
- *os capitatum* (glavičasta kost) i
- *os humatum* (kukasta kost).

Iako svih osam kostiju pešća šake funkcioniraju zajedno kao jedna cjelina, svaka posjeduje jedinstvene karakteristike koje nam pomažu objasniti mehaniku šake, kao i neke abnormalnosti koje su rezultat traume ili bolesti. Svaka kost pešća ima svoju jedinstvenu poziciju, te sa zglobovima koje međusobno tvori sa drugim kostima pridonosi stabilnosti i mobilnosti šake.





Slika 1. Kostii pešća [7]

### 2.1.2. Kostii zapešća

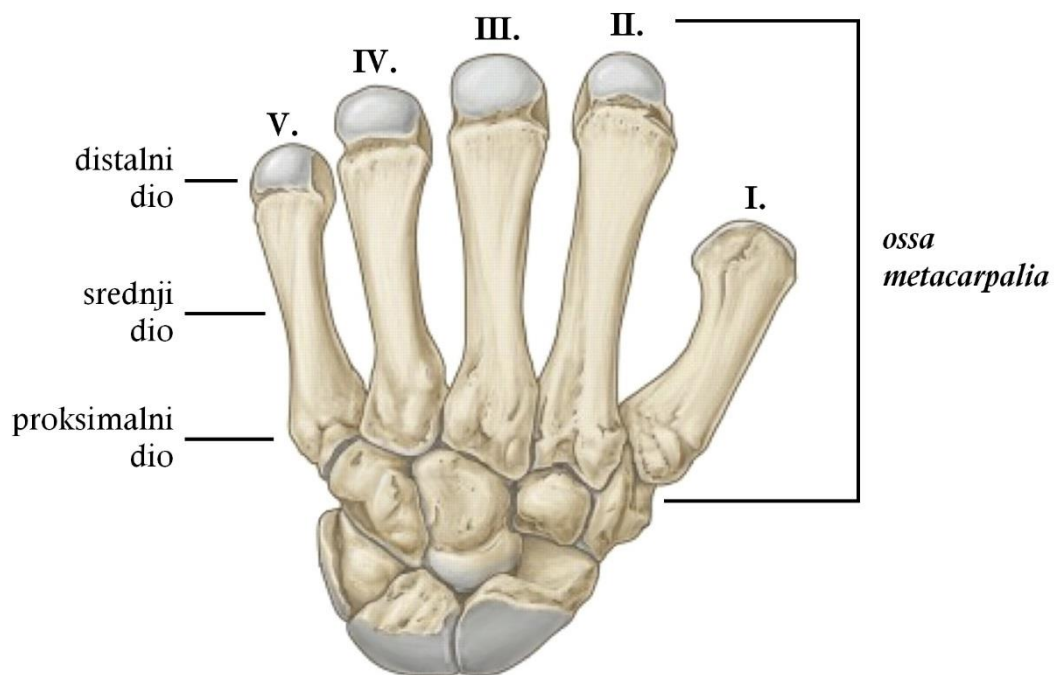
**Kostii zapešća** (ossa metacarpalia) sastoje se od pet minijturnih cjevastih (dugih) kostiju, koje su od radijalno prema ulnarno označene rimskim brojkama I.-V. Svaka se metakarpalna kost sastoji od tri dijela:

- basis ossis metacarpi (proksimalni dio),
- corpus ossis metacarpi (srednji dio) i
- caput ossis metacarpi (distalni dio).

Proksimalni dio kostiju međusobno varira u izgledu, a njihov oblik definiran je vezom između metakarpalne kosti i pripadajućih kostiju pešća. Baze metakarpalnih kostiju II.-V. međusobno su povezane zglobovima i zbijene. Kostii zapešća divergiraju prema distalno, tako da je zapešće znatno šire distalno nego proksimalno. Osim toga, kostii zapešća su lagano savijene (konkavne prema palmarno).

Zglobni spojevi ossa metacarpi s ossa carpi:

- os metacarpale I. → os trapezium
- os metacarpale II. → os trapezoideum i os capitatum
- os metacarpale III. → os capitatum
- os metacarpale IV. → os capitatum i os humatum
- os metacarpale V. → os humatum



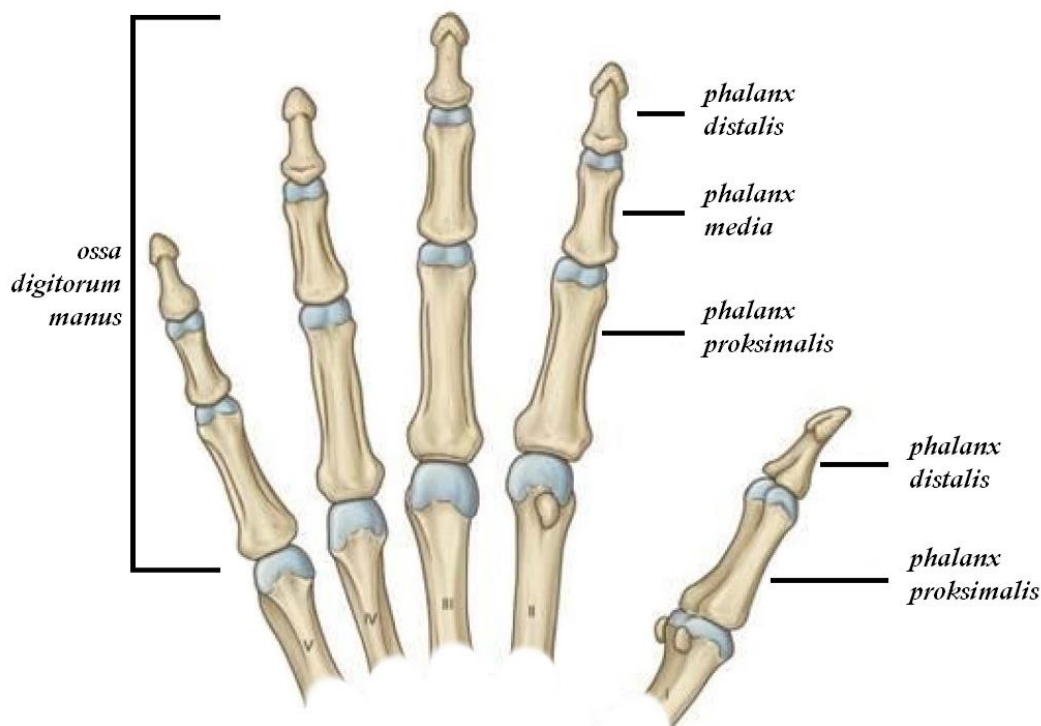
Slika 2. Kosti zapešća [8]

### 2.1.3. Kosti prstiju

**Kosti prstiju** (*ossa digitorum manus*) jesu kratke cjevanice. Prsti se sastoje od 14 kostiju. Palac ima dva članka (*phalanx proximalis* et *distalis*), a ostali prsti tri, gdje se između *phalanx proximalis* i *distalis* nalazi se *phalanx media*. Kosti prstiju smanjuju se u veličini od proksimalno prema distalno, a imaju tri dijela, *basis phalangis*, *corpus phalangis* i *caput phalangis*, koji od proksimalno prema distalno postaju manji.

## Detalji:

- *Phalanx proximalis*, baza nosi plosnato-ovalnu zglobnu plohu za kuglastu glavu metakarpalne kosti. Trup je konkavno savijen prema palmarno, a palmarno ima izrazite rubove za pripajanje ovojnica tetiva mišića pregibača.
- *Phalanx media*, rubovi su palmarno naglašeni.
- *Phalanx distalis*, ta falanga distalno ima lopatičasto proširenje *tuberositas phalangis distalis*, na kojemu inserira vezivno tkivo ležišta nokta i prsta.



Slika 3. Kostii prstiju [7]

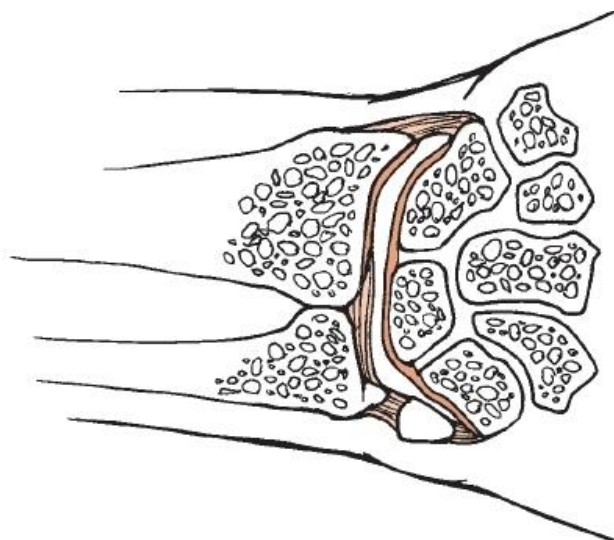
## 2.2. Zglobovi šake

Na prijelazu od podlaktice prema šaci nalaze se mnogobrojne zglobne formacije, koje su uzgobljene usporedno ili jedna iza druge. Kostii korijena šake pri svim kretnjama neprestano mijenjaju položaj jer se odgovarajuće kostii u susjednim zglobovima optimalno prilagođavaju svakom položaju i opterećenju što osiguravaju okolni ligamenti.

**Proksimalni zglob šake** (articulatio radiocarpalis) je elipsoidan (jajoliki) zglob koji spaja korijen šake s podlakticom. Tvore ga proksimalno radius i discus articularis, a distalno proksimalne kosti pešća. Sve kosti proksimalnog reda pešća nisu u stalnom doticaju s konkavnom zglobnom površinom radiusa. Trokutasta kost (os triquetrum) je pri ularnoj abdukciji u doticaju s discus articularis, a doticaja nema pri radijalnoj abdukciji.

Iako su zglobne površine međusobno sukladne, kontakt između čunaste i polumjesečaste kosti i radiusa nije stalan ni uniforman. Kod opterećenja manjeg od 11 kg u kontaktu je oko 20% površine zgloba. Opterećenje od gotovo 23 kg povećava dodirnu površinu na maksimalno 40%, uzrokujući deformaciju zglobne hrskavice. Osim toga, površina kontakta je veća između čunaste kosti i radiusa nego između polumjesečaste kosti i radiusa.

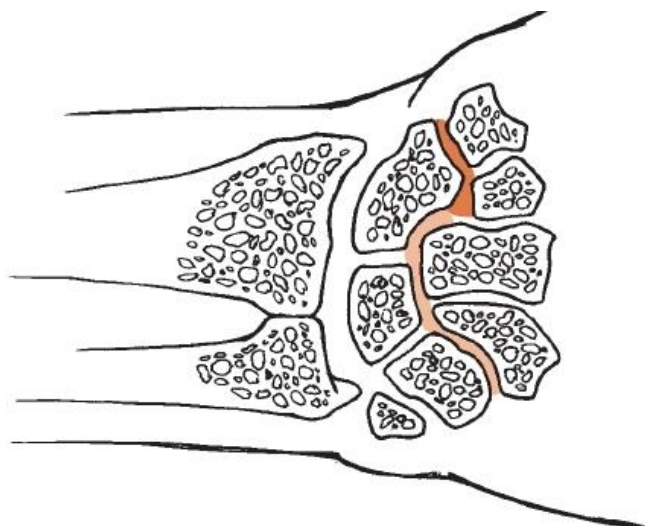
Proksimalni zglob šake sam po sebi ima vrlo malu stabilnost. Ono što mu daje stabilnost su fibrozne ovojnice i ligamenti. Proksimalni je zglob šake često u doticaju s distalnim zglobovom, i to komunikacijama između karpalnih kostiju.



Slika 4. Proksimalni zglob šake [6]

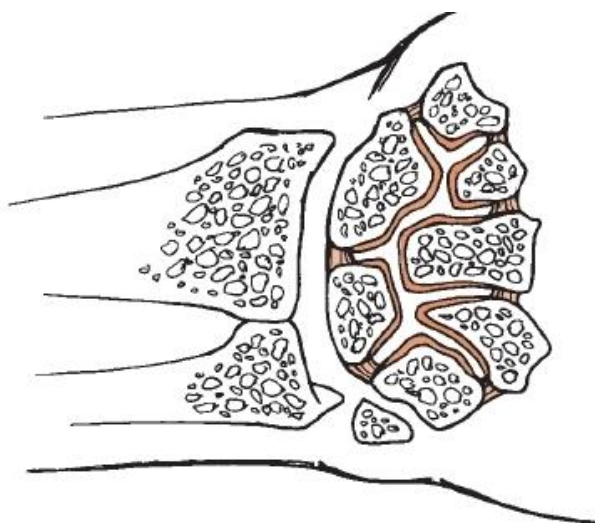
**Distalni zglob šake** (articulatio mediocarpalis) oblikuju proksimalni i distalni red kostiju korijena šake. Razlike u veličini pojedinih kostiju pešća uvjetuju vijugavu i valovitu zglobnu crtu, nalik na slovo „S“, koja je prema distalno savijena dvije ularne trećine konkavno, a radijalnu trećinu konveksno. Ako pojednostavljeno promatramo svaki red kostiju kao cjelovito zgloбно tijelo, oba zglobnna tijela djeluju nazubljeno. Kostiju distalnog reda međusobno s metakarpalnim kostima povezane čvrstim svezama. Među kostima proksimalnog reda moguća su međusobna gibanja, dok među kostima distalnog reda takvi pokreti nisu mogući.

Nepravilna površina distalnog zgloba šake dovodi do nejednolike raspodjele opterećenja preko zglobne plohe. Najveće opterećenje prenosi se preko veze između čunaste i glavičaste kosti, a najmanje preko veze između trokutaste i kukaste kosti. Lagano opterećenje distalnog zgloba šake distribuirati će se samo kroz malo područje zglobne površine, malo više od 25%. Kontaktna površina će se povećati na oko 35% kod većih opterećenja.



Slika 5. Distalni zglob šake [6]

**Zglobovi između kostiju korijena šake** (articulationes intercarpales) tvore kosti proksimalnoga i distalnoga reda korijena šake koje su međusobno zglobno povezane. Kosti su povezane svezama koje stabiliziraju zglob. Ti zglobovi dopuštaju različito velike otklone, prije svega između os lunatum i os scaphoideum u smislu rotacije.



Slika 6. Zglobovi između kostiju korijena šake [6]

Unatoč dugotrajnom istraživanju, još uvijek postoje nesuglasice oko smjera i opsega relativnog gibanja kostiju pešća tijekom izvođenja pokreta ruke. Postoje najmanje tri bitna razloga zbog kojih nastaju nesuglasice:

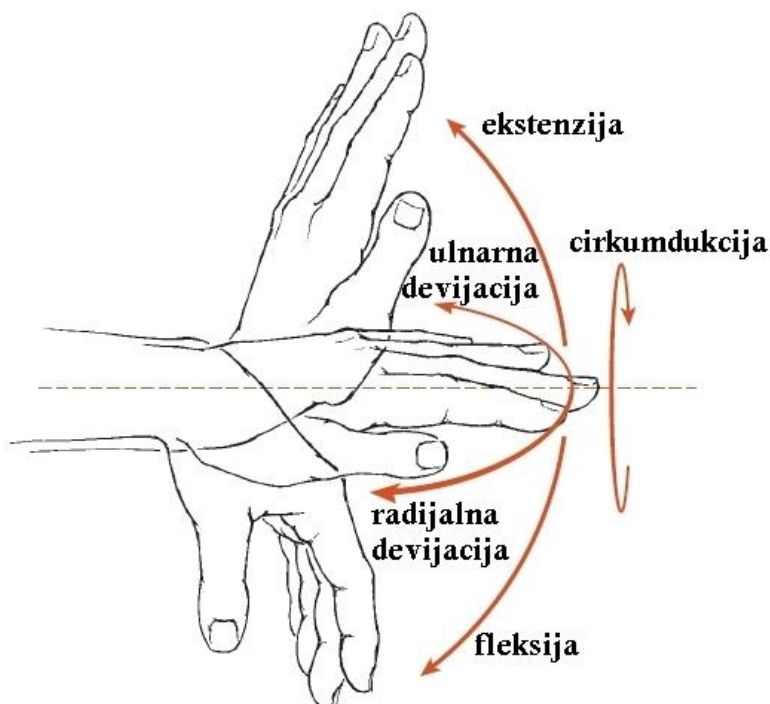
1. Točne metode za procjenu malih, trodimenzionalnih gibanja postale su dostupne tek nedavno.
2. Mnoge studije se provode na toliko malom broju uzoraka da se rezultati ne mogu generalizirati.
3. Razlika u mjernim tehnikama može biti rezultat razlike u objavljenim podacima.

Unatoč tome mogu se izvući sljedeći zaključci:

- Kostii pešća primarno djeluju u dva zasebna retka, proksimalnom i distalnom.
- Distalni red funkcionira više kao jedna cjelina.
- Kostii proksimalnog reda pokazuju značajnu neovisnost u gibanju.
- Kretanja kostiju pešća su trodimenzionalna, čak i kada se pokret ruke izvodi u jednoj ravnini.
- I proksimalni i distalni zglob šake daju značajan doprinos svim pokretima ruke.

Dok razumijevanje relativnih pokreta individualnih kostiju pešća je bitno za shvaćanje mehanike ručnog zgloba, mjerenje **totalnih** ili **globalnih pokreta ručnog zgloba** ostaje standardni klinički alat za procjenu. Takva procjena opisuje gibanje ručnog zgloba kao relativni položaj šake u odnosu na podlakticu, uobičajeno položaj metakarpalne kosti srednjeg prsta u odnosu na uzdužnu os radiusa ili ulne. Ovim mjerenjima se pretpostavlja da se pokreti ručnog zgloba mogu opisati gibanjem oko jedne fiksne osi, no podaci koji opisuju pojedinačne doprinose svake kosti pešća pokretima ručnog zgloba pokazuju da to nije istina. Međutim, istraživanja pokazuju da takva pretpostavka omogućuje razumnu aproksimaciju za opis totalnih pokreta šake. Nekoliko studija je pokušalo identificirati gdje se nalaze osi rotacije ručnog zgloba, no zasad nema sporazuma oko točne lokacije. Postoje neki dokazi da se lokacija teoretskih osi ručnog zgloba mijenjaju ovisno o poziciji zbog translacije i rotacije kostiju pešća.

Kretanje ručnog zgloba sastoji se od **fleksije**, **ekstenzije**, **radijalne devijacije (abdukcije)**, **ulnarne devijacije (adukcije)** i **cirkumdukcije**. Ručni zglob također dopušta ograničenu supinaciju i pronaciju. Pronacija i supinacija ručnog zgloba mogu doprinijeti pronaciji i supinaciji podlaktice kod izvođenju određenih zadataka.



Slika 7. Globalni pokreti ručnog zgloba [6]

U tablici su dani normalni pasivni rasponi pokreta za ručni zglob. Za neke od podataka dana je i populacija na koju se podaci odnose. Generalno postoje neke razlike u podacima, ali su opći trendovi u vrijednostima vidljivi. Svi izvori daju podatak da je adukcija veća od abdukcije. Fleksija šake je veća ili jednaka ekstenziji šake. Čini se da godine i spol imaju neznatan učinak na raspone pokreta. Iako se pokreti tipično ocjenjuju u sagitalnoj (fleksija-ekstenzija) i frontalnoj (adukcija-abdukcija) ravnini, promatranje uobičajenih dnevnih aktivnosti pokazuje da ručni zglob normalno djeluje u dijagonalnoj ravnini, kombinirajući ekstenziju s abdukcijom i fleksiju s adukcijom. Maksimalni raspon fleksije/ekstenzije i adukcije/abdukcije pojavljuju se kada je lakat u neutralnom položaju u odnosu na ostale ravnine gibanja. U tablici nisu dani podaci za supinaciju i pronaciju ručnog zgloba, koje u prosjeku iznose  $15^\circ$  kod zdravih muških ispitanika.



**Tablica 1. Normalne vrijednosti pasivnog raspona pokreta ručnog zgloba [6]**

	fleksija (°)	ekstenzija (°)	abdukcija (°)	adukcija (°)
Steindler	84	64	30	30 – 50
US Army/Air Force	80	70	20	30
Boone i Azin <sup>a</sup>	74,8 ± 6,6	74,0 ± 6,6	21,1 ± 4,0	35,3 ± 3,8
Walker i drugi <sup>b</sup>	64 ± 10	63 ± 9	19 ± 6	26 ± 7
Schoenmarklin i Marras <sup>c</sup>	62 ± 10	57 ± 9	20 ± 7,5	28 ± 7
Gerhardt i Rippstein	60	50	20	30
Bird i Stowe	96,2 <sup>d</sup>	60,0 <sup>d</sup>	31,5 <sup>d</sup>	36,7 <sup>d</sup>
	98,2 <sup>e</sup>	66,5 <sup>e</sup>	34,1 <sup>e</sup>	37,2 <sup>e</sup>
Ryu i drugi <sup>f</sup>	79,1	59,3	21,1	37,2
Spilman i Pinkston <sup>g</sup>	—	—	16,7 ± 5,5	32 ± 5,0
	—	—	18,6 ± 5,8	32,4 ± 6,2
	—	—	18,9 ± 6,2	35 ± 5,3

<sup>a</sup> Podaci od 56 muškaraca iznad 19 godina.

<sup>b</sup> Podaci od 30 muškaraca i 30 žena između 60 – 84 godine.

<sup>c</sup> Podaci od 39 industrijskih radnika, 22 muškarca i 17 žena. Muškarci srednje dobi 41,7 ± 10,5 godina.

<sup>d</sup> Podaci od 8 muškaraca i 6 žena između 40 – 49 godina.

<sup>e</sup> Podaci od 5 muškaraca i 6 žena između 50 – 80+ godina.

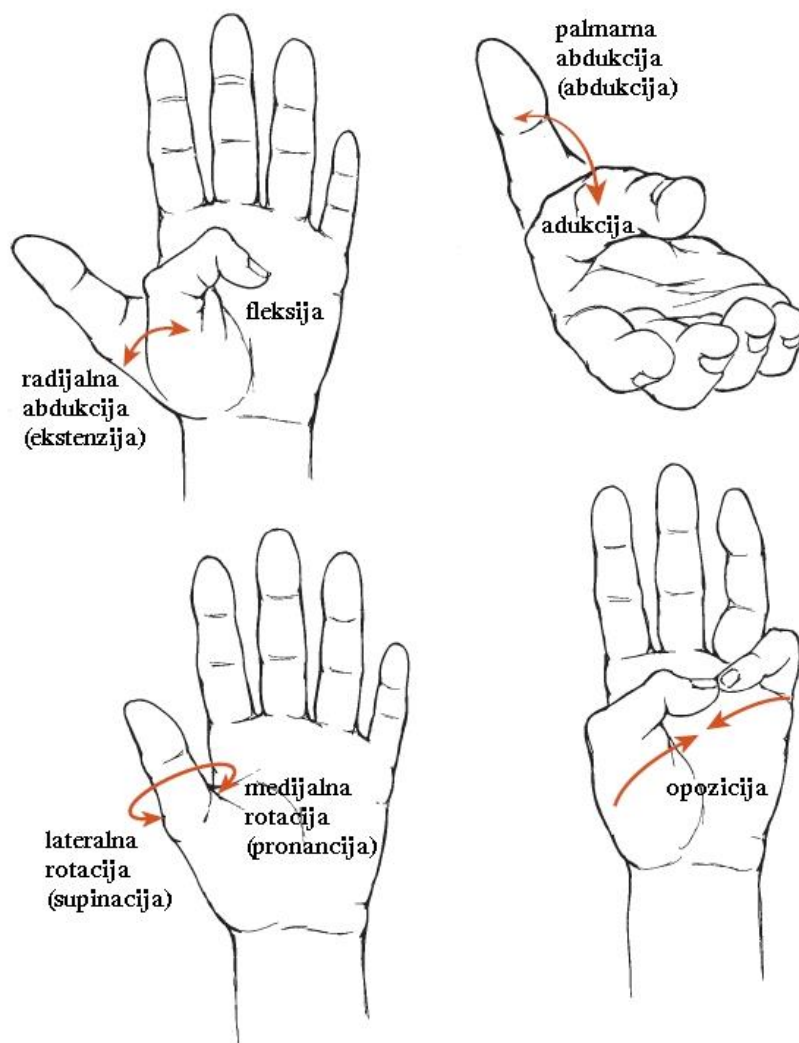
<sup>f</sup> Podaci od 20 muškaraca i 20 žena.

<sup>g</sup> Podaci od 63 muškaraca i 37 žena između 18 – 28 godina u tri testne pozicije.

**Zglob palca** (articulatio carpometacarpalis pollicis) je zglobni spoj između os trapezium i basis ossis metacarpi I. Zbog trapezne kosti koja je pozicionirana anteriorno izvan ravnine ruke, metakarpalna kost palca također leži van ravnine ruke. Jedinstveni oblik zglobnih površina sa suprotno položenim zakrivljenostima (sedlasti zglob) dopušta veliki opseg pokreta palca, slično kao u kuglastom zglobu. Sedlasti zglob trapezne kosti konkavan je u ravnini abdukcije i adukcije, a konveksan u ravnini fleksije i ekstenzije. Takav zglob omogućuje pokrete



**ekstenzije, fleksije, palmarne i radijalne abdukcije, adukcije i rotacije** oko uzdužne osi metakarpalne kosti palca.



**Slika 8. Pokreti zgloba palca [6]**

Fleksija i radijalna abdukcija (ekstenzija) zgloba palca definirana je kao pokret metakarpalne kosti palca u ravnini dlana prema i od ulnarne strane ruke. Palmarna abdukcija i adukcija pojavljuju se kada se palac giba od i prema dlanu u ravnini okomitoj na dlan. Medijalna rotacija (pronacija) zgloba palca je rotacija vrha palca prema dlanu, a lateralna rotacija (supinacija) je rotacija vrha palca od ostalih vrhova prstiju. Pri rotaciji kontakt se zglobnih površina ostvaruje preko dvije male dodirne površine. Time nastaje opterećenje visokog stupnja. Rotacija je pretpostavka za opoziciju, koja se sastoji od ekstenzije, abdukcije, fleksije, adukcije i unutarnje rotacije. Opozicija postavlja palac nasuprot malom prstu tako da se njihove jagodice dodiruju.

U tablici su dane normalne vrijednosti raspona pokreta za zglob palca pri fleksiji, radijalnoj abdukciji i palmarnoj abdukciji. Pasivna medijalna rotacija iznosi otprilike 30°, a pasivna lateralna rotacija oko 15°. Rasponi pokreta rotacije zgloba palca ne odnose se na rotaciju cijeloga palca, budući da može doći do rotacije između članaka prstiju, pa te vrijednosti mogu biti veće tijekom dohvaćanja predmeta. Podaci u tablici otkrivaju značajne razlike u izmjerenim vrijednostima.

**Tablica 2. Normalne vrijednosti raspona pokreta zgloba palca [6]**

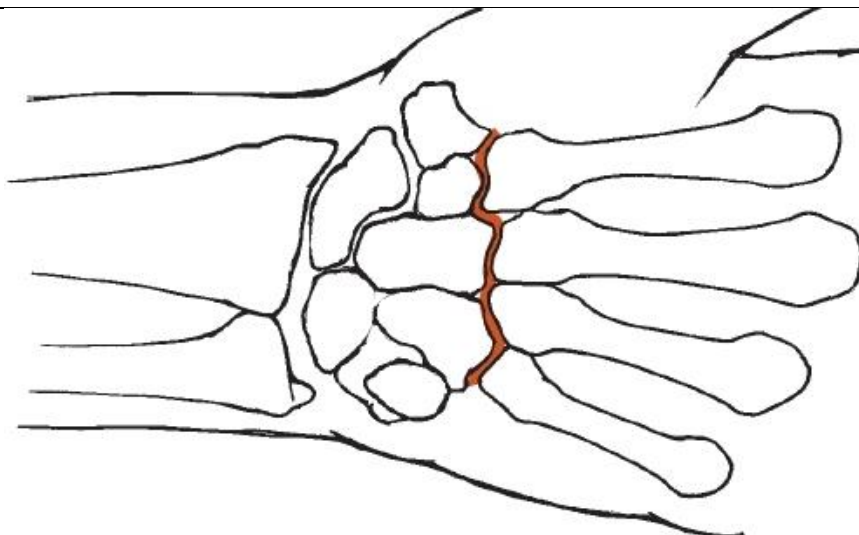
	fleksija (°)	radijalna abdukcija (°)	palmarna abdukcija (°)
Steindler	<sup>a</sup>		25
AAOS <sup>b</sup>		80	70
Gerhardt i Rippstein	15	20	40
US Army/Air Force	15	70	70

<sup>a</sup> American Academy of Orthopaedic Surgeons

<sup>b</sup> 35 – 40° za kombiniranu fleksiju i ekstenziju

U nedostatku pouzdanih normativnih vrijednosti raspona pokreta palca i zbog toga što je ta mjerenja vrlo teško provesti, kliničari često procjenjuju sposobnost zgloba palca u odnosu na ostale prste. Takva mjerenja mogu biti korisna za praćenje napredovanja pacijenata, ali se ne mogu koristiti za usporedbu sa drugim pacijentima zbog različitih duljina članaka prstiju.

**Zglobovi korijena šake i zapešća** (articulationes carpometacarpales II-V) su zglobovi između ossa metacarpalia II-V i distalnoga reda kostiju korijena šake. Zglobovi između ossa metacarpalia II-V i distalnoga reda kostiju korijena šake jesu amfiartroze (amfiartroza: stegnuti zglob (grč. *amphi*: oko, okolo; *arthron*.: zglob)) koje imaju jedinstvenu zglobnu pukotinu cik-cak oblika, što rezultira značajnim funkcionalnim razlikama. Metakarpalna kost kažiprsta tvori zglobnu površinu sa trapeznom, trapezoidnom i glavičastom kosti te sa metakarpalnom kosti srednjeg prsta. Prema tome ona je uklještena i osigurana te je posljedično tome najmanje mobilna od svih ostalih kostiju ovog zgloba. Mobilnost metakarpalnih kostiju zgloba povećava se od radijalne prema ularnoj strani ruke. Metakarpalna kost malog prsta tvori zglobnu površinu samo sa kukastom kosti te bočno sa IV. metakarpalnom kosti. Taj zglob je vrlo sličan sedlastom zglobovima što rezultira značajnom mobilnošću, najvećom nakon palca.



**Slika 9. Zglobovi korijena šake i zapešća [6]**

**Zglobovi između kostiju zapešća** (articulationes intermetacarpales) su amfiartroze, a tvore ga tri ravna zgloba između bočnih površina ossa metacarpalia II-V. Njihova gibanja su vrlo malo pa se stoga nit ne mjere.

**Zglobovi prstiju** (articulationes metacarpophalangeae) imaju oblik kuglastoga zgloba s prostranom i labavom zglobnom čahurom. Zglobove tvori distalni dio metakarpalnih kostiju sa konveksnom zglobnom površinom i baze proksimalnih članaka prstiju sa konkavnom zglobnom površinom i u njima se kretanje ograničuje preko kolateralnih ligamenata.

Iako su struktura i funkcija zglobova prstiju slična za svih pet članaka, postoji mala, ali bitna razlika između zgloba palca te ostalih zglobova prstiju. Raspon pokreta ostalih prstiju zgloba u odnosu na raspon pokreta zgloba palca je nešto veća. Zglobovi su biaksijalni što omogućava fleksiju i ekstenziju, kao i abdukciju i adukciju. Distalni dio metakarpalne kosti razlikuje se od prsta do prsta, što rezultira različitim mogućnostima opsega kretanja.

Zakrivljenost distalne zglobne površine metakarpalne kosti palca je varijabilna, što utječe na mobilnost zgloba. Ta zakrivljenost utječe na mogućnost abdukcije i adukcije zgloba. Što se više zakrivljenost zglobne površine smanjuje mogućnost adukcije i abdukcije se također smanjuje, te zglob dopušta samo fleksiju i ekstenziju.

Kod ostalih prstiju, čini se, da se u zglobu osim fleksije, ekstenzije, abdukcije i adukcije, događa i blaga rotacija. Kompleksnost ovih pokreta možemo vidjeti i sa usporedbom položaja prstiju kada je dlan otvoren ili zatvoren. Kad je dlan otvoren, prsti su malo razdvojeni i vidljiva je razlika u dužini prstiju. međutim, kad se dlan zatvora prsti se primiču jedan prema drugome te se čini kao da su jednake duljine. Kombinacija fleksije, abdukcije i rotacije najviše je vidljiva

kod malog prsta i prstenjaka, što se događa zbog oblika distalnog zgloba metakarpalne kosti i utjecaja ligamenata. Kažiprst i srednji prst imaju veću mogućnost adukcije od abdukcije. Kod prstenjaka je mogućnost adukcije i abdukcije podjednaka, dok je kod malog prsta mogućnost abdukcije malo veća od adukcije. Abdukcija uspijeva samo u položaju opruženih prstiju, jer se pri fleksiji prstiju kolateralni ligamenti jako napeti. Pasivno se u zglobu može načiniti i rotacija, i to do 50°.

**Tablica 3. Normalne vrijednost raspona pokreta (°) zglobova prstiju [6]**

		Mallon i drugi <sup>a</sup>		US Army/Air Force	Hume <sup>b</sup>
		60 muškaraca	60 žena		
fleksija	kažiprst	94	95	90°	100°
	srednji prst	98	100		
	prstenjak	102	103		
	mali prst	107	107		
ekstenzija	kažiprst	29	56	45°	—
	srednji prst	34	54		
	prstenjak	29	60		
	mali prst	48	62		

<sup>a</sup> Srednja vrijednost izmjerenih pasivnih raspona pokreta od 60 muškaraca i 60 žena između 18 – 35 godina. Nema podataka o standardnoj devijaciji.

<sup>b</sup> Srednja vrijednost izmjerenih aktivnih raspona pokreta od 35 muškaraca između 26 – 28 godina. Nema podataka o standardnoj devijaciji.

<sup>c</sup> Nema zasebnih vrijednosti za pojedine prste.

Rasponi pokreta zglobova prstiju dani su u tablici. Podaci pokazuju da žene imaju znatnu veću mogućnost ekstenzije prstiju od muškaraca. Također postoji i razlika u mobilnosti prstiju koja se povećava od radialno prema ulnarno, što omogućuje da se prsti poravnaju kada je dlan zatvoren. Fleksija palca se kreće od 0-50°, međutim postoje i podaci da može doseći i do 80°. Mogućnost ekstenzije palca iznosi do 10°. Iznosi raspona abdukcije i adukcije kod palca nisu navedeni, nego postoji samo podatak da je abdukcija veća od adukcije.

**Zglobovi među člancima prstiju** (articulationes interphalangeae manus) su valjkasti zglobovi u kojima se izvodi jedna skupina pokreta, fleksija i ekstenzija. Sveukupno ima devet zglobova između članaka prstiju, s time da je jedan na palcu, a četiri proksimalna i četiri distalna na ostalim prstima. Struktura tih zglobova je slična. Valjkasto konveksno zglobno tijelo (caput sive trochlea phalangis) proksimalnoga i srednjeg članka leži na bazi srednjega i distalnog članka u gotovo ravnoj zglobnoj udubini koja po sredini ima greben.

Zglobna površina proksimalnog članka je malo asimetrična, s iznimkom proksimalnog zgloba srednjeg prsta i zgloba palca. Ta asimetričnost uzrokuje da se kod fleksije pojavljuje blagi kut u odnosu na uzdužnu os članaka prstiju, čime se omogućava da se prsti kod zatvaranja dlana približe jedni drugima. Distalni zglobovi, tj. njihove zglobne površine su simetričnije te se kretnje vrše paralelno sa uzdužnim osima prstiju. U ovim zglobovima se osim fleksije i ekstenzije mogu pojaviti mali radioulnarni pokreti te rotacije, posebno u zglobu palca.

**Tablica 4. Normalne vrijednosti raspona pokreta distalnih zglobova među člancima prstiju [6]**

	Mallon i drugi <sup>a</sup>		AAOS <sup>b</sup>	US Army/Air Force	Hume i drugi <sup>c</sup>
	muškarci	žene			
<b>fleksija (°)</b>					
kažiprst	75	75	<sup>d</sup>	90 <sup>e</sup>	85 <sup>e</sup>
srednjak	80	79			
prstenjak	74	76			
mali prst	72	72			
<b>ekstenzija (°)</b>					
kažiprst	22	24	<sup>d</sup>	0 <sup>e</sup>	—
srednjak	19	23			
prstenjak	17	18			
mali prst	15	21			

<sup>a</sup> Srednja vrijednost izmjerenih pasivnih raspona pokreta od 60 muškaraca i 60 žena između 18 – 35 godina. Nema podataka o standardnoj devijaciji.

<sup>b</sup> American Academy of Orthopaedic Surgeons

<sup>c</sup> Srednja vrijednost izmjerenih aktivnih raspona pokreta od 35 muškaraca između 26 – 28 godina. Nema podataka o standardnoj devijaciji.

<sup>d</sup> Zabilježeni podaci od Mallona i drugih.

<sup>e</sup> Nije zabilježeno za pojedine prste.

**Tablica 5. Normalne vrijednosti raspona pokreta zgloba (°) među člancima palca i proksimalnih zglobova među člancima prstiju [6]**

	Mallon i drugi <sup>a</sup>		AAOS <sup>b</sup>	US Army/Air Force	Hume i drugi <sup>c</sup>	Apfel <sup>d</sup>	
	muškarci	žene				muškarci	žene
<b>fleksija</b>							
palac			80	90	73	78,6 ± 9,5	83,5 ± 10,9
kažiprst	106	107	<sup>e</sup>	100 <sup>f</sup>	105 <sup>f</sup>		
srednjak	110	112					
prstenjak	110	108					
mali prst	111	111					
<b>ekstenzija</b>							
palac			0	—	5	35,2 ± 16,4	25,8 ± 14,4
kažiprst	11	19	<sup>e</sup>	0 <sup>f</sup>	—		
srednjak	10	20					
prstenjak	14	20					
mali prst	13	21					

<sup>a</sup> Srednja vrijednost izmjerenih pasivnih raspona pokreta od 60 muškaraca i 60 žena između 18 – 35 godina.

Nema podataka o standardnoj devijaciji.

<sup>b</sup> American Academy of Orthopaedic Surgeons

<sup>c</sup> Srednja vrijednost izmjerenih aktivnih raspona pokreta od 35 muškaraca između 26 – 28 godina. Nema podataka o standardnoj devijaciji.

<sup>d</sup> Srednja vrijednost pasivnih raspona pokreta na temelju desnih ruku 19 muškaraca srednje dobi 35,7 ± 13,9 godina i 12 žena srednje dobi 33,7 ± 6,0 godina.

<sup>e</sup> Zabilježeni podaci od Mallona i drugih.

<sup>f</sup> Nije zabilježeno za pojedine prste.

U tablici su dani rasponi fleksije i ekstenzije za zglobove među člancima prstiju. Generalni zaključci su da je zglob palca manje mobilan od ostalih zglobova prstiju, proksimalan zglobovi imaju veću mogućnost fleksije od distalnih zglobova među člancima i zglobova prstiju između metakarpalne kosti i članaka, te da distalni zglob prstiju ima mogućnost veće ekstenzije od proksimalnog zgloba.

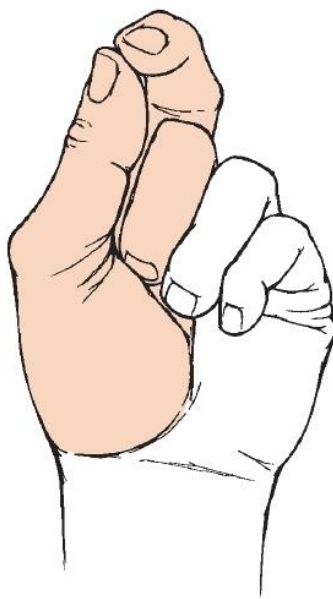
## 2.3. Pokreti šake

Prisustvo mnogobrojnih zglobnih veza u šaci daje mogućnost ostvarivanja cijelog niza različitih pokreta i zahvata. Najkarakterističniji pokreti su pokreti štipanja i pokreti hvatanja. Neke od varijanti tih pokreta opisane su u sljedećem tekstu, a za pojedine su dane i vrijednosti srednje jačine stiska.

### 2.3.1. Pokret štipanja

Pokret štipanja (engl. *pinch*) se koristi kod manipulacije relativno malim objektima kao što su ključevi, olovke i sl. Koristi se kod rukovanja osjetljivim predmetima. Unatoč brojnim primjenama, kod pokreta štipanja postoje neke karakteristične kretnje. Koristi se većinom radijalna strana šake, i to palac, kažiprst i srednji prst. Palac se kretnjom abdukcije postavlja nasuprot prstiju. Stiskanjem palca stvara se sila kojom se drži predmet nasuprot kojemu se nalaze prsti koji osiguravaju stabilnost. Pozicija palca značajno ovisi o mobilnosti zgloba palca i dok relativna nepokretnost zglobova kažiprsta i srednjeg prsta pruža potrebnu stabilnost kako bi se oduprli sili koju radi palac. Zglobovi između korijena šake i zapešća kažiprsta i srednjeg prsta su najmanje mobilni, što im omogućuje da ostaju fiksni za vrijeme trajanja pokreta štipanja.

Ljudi se koriste različitim varijantama pokreta štipanja ovisno o situaciji i predmetu koji se dohvaća. Neki od glavnih pokreta štipanja opisani su u nastavku.



Slika 10. Pokret štipanja [6]

**Prihvat vrhovima prstiju** (engl. *tip-to-tip pinch*) je pokret štipanja koji se može najlakše prepoznati po tome što palac tvori sa prstom, najčešće kažiprstom ili srednjim prstom, konturu u obliku slova „O“. Postoje različite varijacije ovog zahvata, gdje prsti koji ne sudjeluju u zahvatu mogu biti u prirodnom položaju ili mogu biti zatvoreni radi bolje preglednosti posebno kada predmet koji se dohvaća nije u razini očiju. Većinom se ovaj pokret koristi kod manipuliranja laganijim predmetima budući da su površine vrhova prstiju male. Neki od karakterističnih zadataka kod kojih se koristi ovaj zahvat su:

- podizanje olovke sa stola
- podizanje malih predmeta sa poda
- prikupljanje kovanica
- sortiranje malih ili tankih predmeta



**Slika 11. Prihvat predmeta vrhovima prstiju [9]**

Kod **prihvata predmeta jagodicama** (engl. *pulp-to-pulp pinch*) površina prihвата je veća pa se može manipulirati većim i težim predmetima. U zahvatu sudjeluju dva prsta, palac i bilo koji od prstiju. Karakterističan je po tome što u zglobovima između članaka prstiju vrši manja fleksija.





**Slika 12. Prihvat predmeta jagodicama prstiju [10]**

U tablici su dani podaci za srednju jačinu pritiska kod ovoga zahvata za pojedini prst mjerene u kilogramima. Mjerenje je provedeno na uzorku od 100 ljudi, 50 žena i 50 muškaraca, u dobi od 17 do 60 godina. Test je rađen za primarnu i sekundarnu ruku u različita doba dana na sobnoj temperaturi.

Iz tablice se mogu iščitati sljedeći podaci:

- kod prijvata sa srednjim prstom (III) dobiva se najjači stisak kod žena i muškaraca za obje ruke
- jačina stiska sa malim prstom (V) je upola manji od stiska kažiprstom (II) ili srednjim prstom (III)
- najmanja srednja vrijednost jačine pritiska je kod žena za stisak sa malim prstom (V) sekundarne ruke iznosa 1,6 kg, a najveća srednja vrijednost dobiva se kod muškaraca kod pritiska srednjim prstom (III) sekundarne ruke iznosa 5,7 kg

Najveća zabilježena jačina pritiska je 11,8 kg kod stiska srednjim (III) prstom kod muškaraca. Kod 88 % muškaraca i 50% žena uočena je hiperekstenzija zgloba između članaka palca, no ta pojava se počela smanjivati kod stiska prstenjakom (IV) i malim prstom (V) zato jer je došlo do hiperekstenzije njihovih zglobova.

**Tablica 6. Srednja jačina pritiska kod prihvata predmeta jagodicama prstiju sa pojedinim prstima [11]**

članak prstiju	prihvat predmeta jagodicama prstiju (kg)			
	muška ruka		ženska ruka	
	primarna	sekundarna	primarna	sekundarna
II	5,3	4,8	3,6	3,3
III	5,6	5,7	3,8	3,4
IV	3,8	3,6	2,5	2,4
V	2,3	2,2	1,7	1,6

**Prihvatom predmeta sa tri prsta** (engl. *three-jaw pinch*, *tripod pinch*) dobije se jači zahvat, te se koristi gdje je snaga važnija od preciznosti. U zahvatu sudjeluju palac, kažiprst i srednji prst, a prstenjak i mali prst su savijeni. Neke od karakterističnih radnji kod ovog zahvata su:

- držanje olovke
- odvrtnje čepa sa boce
- prihvat CD-a
- držanje telefona

**Slika 13. Prihvat predmeta s tri prsta [12]**

U tablici su dani podaci o jačini stiska s tri prsta mjereni u kilogramima za tri skupine ljudi ovisno o profesiji kojom se bave. U prvu skupinu spadaju vješti obrtnici koji ne rade teške fizičke poslove, u drugoj skupini su ljudi koji svoj posao obavljaju u sjedećem položaju, a u trećoj su skupini ljudi koji obavljaju teške fizičke poslove.

Uspoređujući vrijednosti iz tablice uočavamo neke zanimljive izmjere. Kod muškaraca, za prihvata primarnom rukom, razlika srednje vrijednosti jačine stiska sa tri prsta kod teških fizičkih radnika i onih koji rade lagane fizičke poslove je vrlo mala. Takav je slučaj i za sekundarnu ruku gdje je razlika kod sve tri skupine također minimalna. Kod žena, razlika u mjerenim podacima za različite skupine je veća. Najveću srednju vrijednost stiska, očekivano, imaju radnice na teškim fizičkim poslovima, a najmanju one koje rade lake fizičke poslove. Maksimalna jačina pritiska je iznosila 14,5 kg za muškarce i 10 kg za žene. U većini slučajeva došlo je do hiperekstenzije zgloba palca.

**Tablica 7. Srednja jačina pritiska kod prihvata s tri prsta ovisno o okupaciji [11]**

okupacija	prihvata predmeta s tri prsta (kg)			
	muška ruka		ženska ruka	
	primarna	sekundarna	primarna	sekundarna
vješti obrtnici	7,3	7,2	5,4	4,6
poslovi u sjedećem položaju	8,4	7,3	4,2	4,0
teški fizički poslovi	8,5	7,6	6,1	5,6
srednja vrijednost	7,9	7,5	5,2	4,9

Kod **lateralnog prihvata** (engl. *lateral pinch*) predmet se drži između palca i radijalne strane kažiprsta. Zahvati koji se izvode ovim pokretom su:

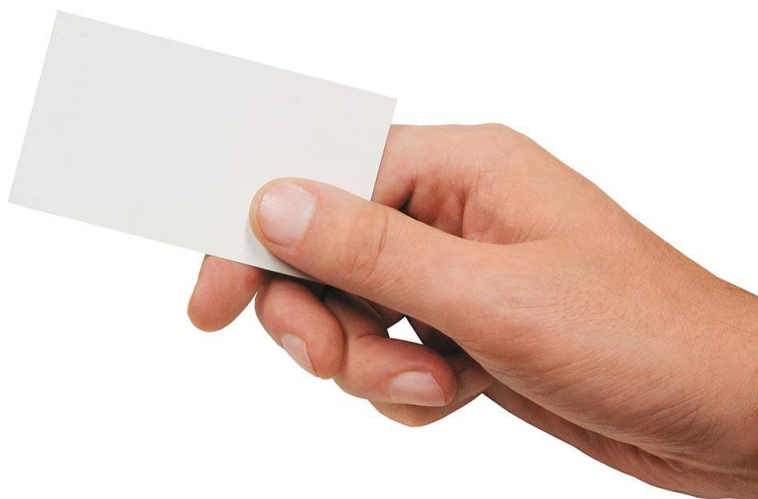
- vezanje cipela
- držanje pladnja
- držanje ključa

U tablici su dani podaci o jačini stiska kod lateralnog zahvata mjereni u kilogramima. I ovdje su ljudi grupirani u tri skupine. Najveća srednja vrijednost jačine lateralnog stiska pojavljuje se kod žena i muškaraca koji rade teške fizičke poslove, dok je, očekivano, najmanja srednja vrijednost kod onih radnika koji posao obavljaju sjedeći, radeći poslove koji ne zahtijevaju veće fizičke napore. Vidljiva je velika razlika u srednjoj jačini stiska kod radnika koji rade teške fizičke poslove i preostale dvije skupine.

Najveća vrijednost jačine stiska zabilježena je kod radnika koji rade teške fizičke poslove iznosa 14,5 kg za primarnu ruku kod muškaraca, a kod žena za primarnu ruku je to iznosilo 9 kg.

**Tablica 8. Srednja jačina pritiska kod lateralnog prihvata ovisno o okupaciji [11]**

okupacija	prihvat predmeta s tri prsta (kg)			
	muška ruka		ženska ruka	
	primarna	sekundarna	primarna	sekundarna
vješti obrtnici	6,6	6,4	4,4	4,3
poslovi u sjedećem položaju	6,3	6,1	4,1	3,9
teški fizički poslovi	8,5	7,7	6,0	5,5
srednja vrijednost	7,5	7,1	4,9	4,7

**Slika 14. Lateralni prihvat predmeta [13]**

### 2.3.2. Pokret hvatanja

**Pokret hvatanja** (engl. *grasp*) se razlikuje od pokreta štipanja po tome što se kod njega koristi veća površina dlana i više prstiju. Većinom se koriste svih pet prstiju ruke kako bi se ostvario što jači prihvat. Kao i kod pokreta štipanja ima različitih varijacija pokreta hvatanja ovisno o obliku objekta na koji se primjenjuje.

Uobičajeno, kod pokreta hvatanja prsti rade veću fleksiju u odnosu na pokret štipanja, s tim da prsti na ularnoj strani rade veću fleksiju nego oni na radijalnoj. Povećana fleksija malog prsta i prstenjaka privlači objekt koji se hvata prema palcu, koji taj objekt steže. Sljedeća karakteristika kod pokreta hvatanja je da palac ima tendenciju da se savija preko prstiju pri

čemu zglob palca radi abdukciju. Povećavanjem jačine pokreta hvatanja fleksija prstiju je veća, povećava se sudjelovanje ulnarne strane ruke i povećava se kontaktna površina između objekta, prstiju i dlana.

Kod hvatanja tankih predmeta prsti se uvijaju oko predmeta te ga privlače dlanu. Predmet se prihvaća sa sva četiri prsta podjednako. Palac radi abdukciju, također se uvija oko predmeta te se savija oko prstiju dajući zahvatu još veću sigurnost. Ako je predmet koji se hvata vrlo tanak, npr. debljine flomastera za ploču, vrhovi prstiju će dodirivati dlan, a abdukcija palca i njegovo preklapanje ostalih prstiju će biti veće.



**Slika 15. Hvatanje tankih predmeta [14]**

Hvatanje debljih predmeta ima za posljedicu manju fleksiju prstiju. Opterećenje na sve prste nije podjednako jer se više koriste prsti ulnarne strane ruke. Kod prihvaćanja boce debljine oko 60 mm ili debljih predmeta u prihvatu najčešće ne sudjeluje kažiprst. Abdukcija palca je manja nego kod prihvata tanjih predmeta. Također kod ovoga zahvata prsti mogu biti primaknuti jedni drugima ili razmaknuti. Što je predmet koji se prihvaća deblji, sigurnost prihvata je manja.



**Slika 16. Hvatanje debljih predmeta [15]**

Pri **hvatanju sferičnih predmeta** (engl. *spherical grasp*), kao što su teniska loptica ili rukometna lopta, sudjeluju svi prsti ruke koji se savijaju oko predmeta. Prsti su razmaknuti kako bi se dobila što veća površina prihвата i time veća sigurnost prihвата. Kod hvatanja rukometne lopte u ručnom zglobu i zglobovima prstiju se javlja značajna ekstenzija, dok je u zglobovima između članaka prisutna fleksija.



**Slika 17. Hvatanje sferičnih predmeta [16]**

Kod nošenja teških vrećica ili kofera sudjeluju svi prsti osim palca. Ako se nose laganiji predmeti u zahvatu ne moraju sudjelovati svi prsti. Zglobovi prstiju i zglobovi između članaka prstiju rade fleksiju pa prsti imaju oblik kuke. Ponekad zglobovi prstiju ostaju u neutralnom položaju, a samo zglobovi između članaka prstiju rade fleksiju.



Slika 18. Nošenje vrećica (*hook grasp*) [17]

#### 2.3.2.1. Snaga stiska

Snaga stiska mjerena je hidrauličnim dinamometrom. Drška dinamometra bila je postavljena na 63,5 mm. Većini ispitanika odgovarala je ovakva postavka drške i mogli su primijeniti najveću snagu stiska. Minimalna jačina stiska izmjerena kod muškaraca bila je 30,4 kg, a maksimalna 70,4 kg, dok je kod žena minimalna jačina stiska iznosila 14,0 kg, dok je maksimalna iznosila 38,6 kg.

Tablica prikazuje srednju jačinu stiska za svaku grupu ispitanika. Možemo zaključiti da su razlike u jačini stiska između grupa minimalne.

Tablica 9. Srednja vrijednost jačine stiska ovisno o okupaciji [11]

okupacija	snaga stiska (kg)			
	muška ruka		ženska ruka	
	primarna	sekundarna	primarna	sekundarna
vješti obrtnici	47,0	45,4	26,8	24,4
poslovi u sjedećem položaju	47,2	44,1	23,1	21,1
teški fizički poslovi	48,5	44,6	24,2	22,0
srednja vrijednost	47,6	45,0	24,6	22,4

U sljedećoj tablici prikazane su srednje vrijednost jačine stiska ovisno o godinama. Kod muških ispitanika primjećuje se konstantna jačina stiska između 20-te i 50-te godine. Kod žena, maksimalna snaga stiska zabilježena je između 30-te i 40-te godine života.

**Tablica 10. Srednja vrijednost jačine stiska ovisno o starosti [11]**

dob	snaga stiska (kg)			
	muška ruka		ženska ruka	
	primarna	sekundarna	primarna	sekundarna
20	45,2	42,6	23,8	22,8
20 – 30	48,5	46,2	24,6	22,7
30 – 40	49,2	44,5	30,8	28,0
40 – 50	49,0	47,3	23,4	21,5
50 – 60	45,9	43,5	22,3	18,2

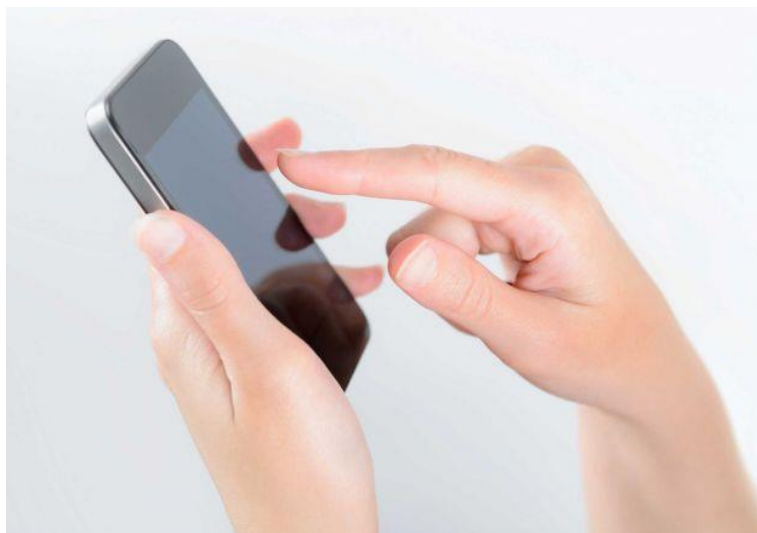


**Slika 19. Mjerenje snage stiska hidrauličnim dinamometrom [18]**



### 2.3.3. Tipkanje

Kažiprst je kod tipkanja u neutralnom položaju ili u laganoj fleksiji. Ostali prsti su savijeni radi bolje preglednosti sadržaja. Palac može ostati u neutralnom položaju ili također može biti savijen. Ovaj pokret se koristi kod korištenja telefona, mobitela, pritiskanja daljinskog ili pri korištenju tipkovnice računala kod neizvježbanih ljudi.



Slika 20. Položaj prstiju pri tipkanju [19]

### 2.3.4. Prihvat miša

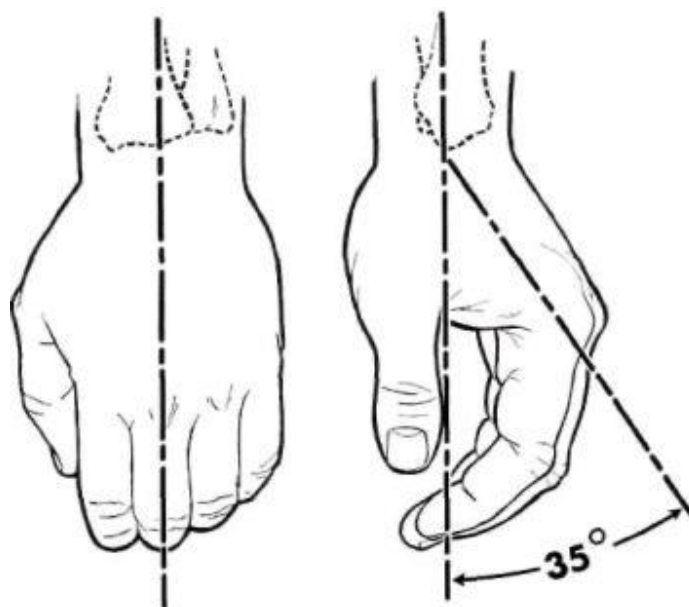
Kod korištenja miša dlan leži na odmorištu za dlan. Kažiprst i srednji prst stoje iznad tipki, dok ostali prsti bočno stežu tijelo miša omogućujući tako lakše pomicanje. Ručni zglob je malo istegnut, a pokretima abdukcije i adukcije miš se pomiče lijevo i desno. Fleksijom i ekstenzijom kažiprsta i srednjeg prsta vrši se tipkanje. Okretanje kotačića vrši se složenim pokretom kažiprsta.



Slika 21. Prihvat miša [20]

### 2.3.5. Prirodni položaj šake

Šaka se nalazi u prirodnom položaju kod šetnje ili kad počiva na stolu. To je stanje kada su mišići opušteni i ne osjećamo nikakve napetosti u tetivama. U odnosu na neutralni položaj ručni zglob je u ekstenziji. Zglob palca radi malu adukciju, a zglobovi prstiju su u fleksiji. Svi zglobovi između članaka prstiju su fleksiji.



Slika 22. Prirodni položaj šake [21]

### 3. ANALIZA TRŽIŠTA

Na tržištu se u današnje vrijeme nudi jako puno mioelektričnih proteza, različitih funkcionalnosti, jeftinih i vrlo skupih. Napredne bioničke šake odlikuju se svojom visokom funkcionalnošću, raznolikim mogućnostima i korištenjem najnovije tehnologije. Dakako sve to doprinosi njihovoj povećoj cijeni, a pošto se ovdje radi o medicinskim pomagalicama, cijena raste u oblake. S druge strane, nedavno su u javnosti počele pristizati vijesti o jednostavnim bioničkim protezama koje imaju puno slabije mogućnosti od naprednih bioničkih proteza, no njihova funkcionalnost je sasvim dovoljna za obavljanje pojedinih zadataka. Ne samo da su te proteze cjenovno daleko prihvatljivije, već se mogu i vrlo jednostavno, uz pomoć 3D printera, izraditi kod kuće što ih čini lako dostupnima.

#### 3.1. Napredne proteze šake

Kao što je u uvodu rečeno, napredne proteze šake odlikuju se visokom funkcionalnošću i širokim mogućnostima. Nerijetko imaju mogućnost zasebne fleksije i ekstenzije svakog pojedinog prsta, mogućnost adukcije i abdukcije palca, te rotacije, fleksije i ekstenzije ručnog zgloba. Zbog toga je njihovo upravljanje vrlo složeno. Sve napredne proteze imaju mogućnost podešavanja parametara prema potrebama i željama korisnika. U nastavku su navedene tri najpoznatije bioničke proteze.

##### 3.1.1. Steeper

Tvrtka Steeper ima preko 90 godina iskustva u proizvodnji proteza gornjih ekstremiteta, a proteza šake bebionic je njihov najnoviji dodatak proizvodnom portfoliju. Osim aktivnih proteza proizvode i druge funkcionalne i mehaničke proteze, kao i pasivne kozmetičke proteze. Sjedište se nalazi u San Antoniu, odakle distribuiraju svoje proizvode i daju korisničku podršku korisnicima u Sjevernoj i Južnoj Americi. Također imaju mnogobrojne međunarodne partnere koji distribuiraju njihove proizvode diljem svijeta.



Slika 23. Bionička šaka bebionic [22]

Značajke bioničke ruke bebionic:

- svaki prst bioničke ruke ima zaseban motor što omogućava izvedbu različitih zahvata
- šaka može izvesti 14 različitih vrsta prihvata
- poseban softver omogućuje povezivanje sa bioničkom rukom putem bežične tehnologije kako bi se omogućila prilagodba funkcija ruke u skladu sa željama korisnika
- moguće je mijenjati položaj palca te se shodno tome omogućuje izvedba drugih zahvata
- bionička šaka automatski prilagođava i podešava stisak prstiju u slučaju kad predmet koji je prihvaćen klizi iz ruke
- u prste ruke ugrađen je mehanizam koji omogućuje otklanjanje prstiju u slučaju sudara sa nekim objektom
- konstrukcija je dovoljno jaka da omogućuje prenošenje tereta do 45 kg ili odguravanje iz sjedećeg položaja



**Slika 24. Mogućnost abdukcije palca i fleksije pojedinih prstiju proteze šake [23]**

Mogućnost pokretljivosti proteze šake:

- ručni zglob ima mogućnost pasivnog podešavanja i zaključavanja u tri položaja: fleksija 30°, neutralni položaj i ekstenzija 30°, te rotacije
- zglob palac osim fleksije i ekstenzije ima mogućnost abdukcije u položaj u kojemu je suprotstavljen ostalim prstima
- zglobovi prstiju imaju mogućnost fleksije i ekstenzije
- proksimalni zglobovi između članaka prstiju imaju mogućnost fleksije i ekstenzije, distalni zglobovi su u laganoj fleksiji

Bionička šaka dobiva signale od dvije elektrode smještene na točno određenim pozicijama na tijelu. Na prvi pogled bionička ruka je vrlo atraktivnog dizajna te uz tehničke mogućnosti spada u sam vrh ponude. Protezu je moguće prekriti silikonskom rukavicom koja se može izraditi u boji koja odgovara drugoj ruci čime se bioničkoj protezi daje prirodan izgled. Cijena proteze nije javno dostupna od strane proizvođača, ali prema podacima sa internetskih portala [24] iznosi oko 25000-35000 dolara. Konfiguriranje različitih pokreta putem specijalnog softvera daje mogućnost prilagođavanja proteze korisniku.

### 3.1.2. *Touch Bionics*

Povijest Touch Bionics seže u 1963. kada je započeo program rada na istraživanju i razvoju proteza za djecu u sklopu bolnice Princess Margaret Rose u Edinburghu. U današnje vrijeme tvrtka se bavi izradom aktivnih proteza ruku i šake kao i pasivnih funkcionalnih proteza. Tvrtka je 2007. godine plasirala na tržište protezu i-limb koja je imala mogućnost neovisnog pokretanja svih pet prstiju šake. Uz ovu protezu bilo je moguće nabaviti i silikonsku rukavicu pomoću koje se proteza prekrila dajući joj prirodniji izgled. Za pacijente koji imaju funkcionalnu podlakticu ili im nedostaje neki prst na tržištu je dostupna proteza i-limb digits. U današnje vrijeme razvili su mnogobrojne modele koji prate trenutne tehnologije, pa tako i mogućnost bežičnog povezivanja sa pametnim mobitelom.

Značajke bioničke ruke i-limb::

- jednostavnom gestom, tj. pokretom proteze u jedan od četiri smjera, može se odabrati vrsta zahvata koja se želi izvesti
- postoje 24 pred-programirana zahvata koji se mogu odabirati, također postoji i mogućnost programiranja vlastitih zahvata
- proteza može izdržati opterećenje do 90 kg
- postoji mogućnost promjene zahvata kontrakcijom mišića, pa se tako ovisno o vremenu trajanja kontrakcije mišića šalje preko elektrode signal mikroprocesoru da izvrši određeni zahvat
- uz pomoć mobilne aplikacije moguće je odabrati bilo koji programirani zahvat
- ruka se automatski vraća u prirodni položaj nakon dužeg perioda neaktivnosti
- u protezu je ugrađen senzor blizine koji sa Bluetooth® tehnologijom komunicira sa čipovima koji se mogu programirati i postaviti na neko mjesto, npr. kraj tipkovnice računala ili na bicikl, gdje će ruka prepoznati blizinu čipa te će automatski preći u određeni, unaprijed programirani zahvat



Slika 25. Bionička šaka i-limb quantum [25]

Mogućnost pokretljivosti proteze šake:

- ručni zglob ima mogućnost aktivne rotacije, te slobodne fleksije  $40^\circ$  i ekstenzije  $40^\circ$  uz pomoć opruge ili zaključavanje u položaju: fleksija  $40^\circ$ , fleksija  $20^\circ$ , neutralni položaj, te ekstenzija  $20^\circ$  i ekstenzija  $40^\circ$
- zglob palca ima mogućnost fleksije i ekstenzije te abdukcije
- zglobovi prstiju imaju mogućnost fleksije i ekstenzije
- samo proksimalni zglobovi između članaka prstiju imaju mogućnost fleksije i ekstenzije, dok su distalni zglobovi postavljeni pod određenim kutom fleksije



Slika 26. Povezivanje bioničke ruke i-limb sa pametnim satom [25]

Ova proteza šake je vrlo slična prethodnoj što se tiče dizajna, dok je u funkcionalnom smislu nešto bolja. Ima mogućnost aktivne rotacije šake i aktivne abdukcije palca. Najveća prednost je laka izmjena vrste prihvata jednostavnim gestama te mogućnost povezivanja sa svim danas dostupnim pametnim uređajima. Jedna od dobrih stvari su i čipovi koji se mogu postaviti na bilo koje mjesto gdje se zahtjeva specifična vrsta zahvata kojemu se ruka prilagođava. Cijena proteze se kreće 25000 pa sve do 80000 funti [26].

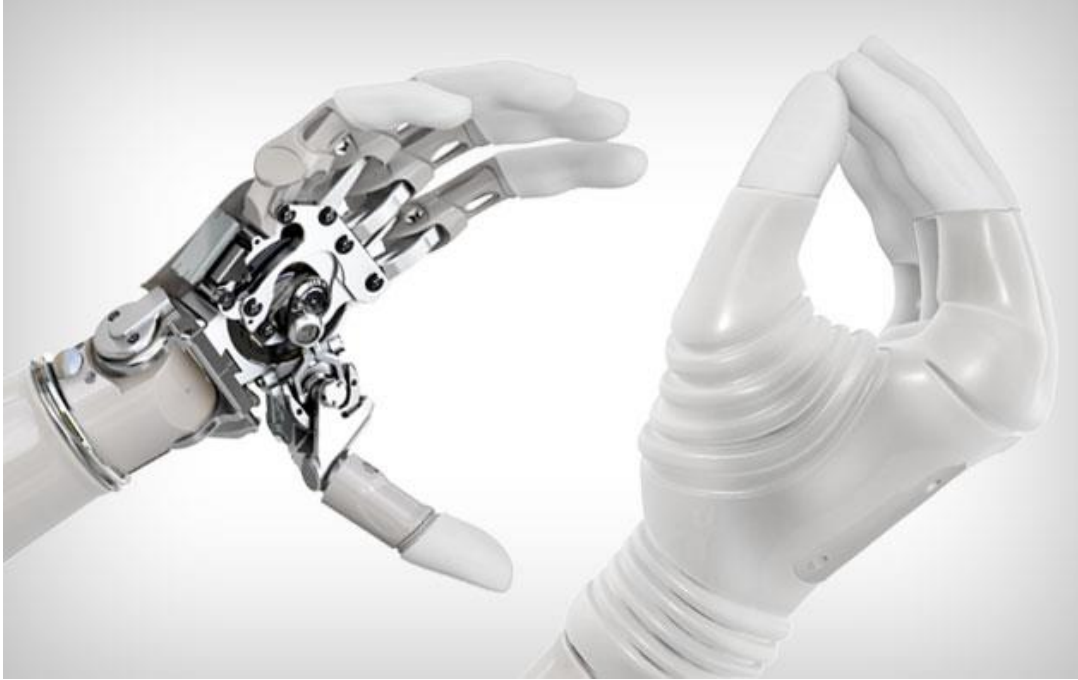
### 3.1.3. *Otto Bock*

Njemačka tvrtka Otto Bock osnovana je 1919. godine kao odgovor na veliki broj ozlijeđenih veterana iz Prvog svjetskog rata. Sa razvojem i proizvodnjom mioelektričnih proteza i modularnih proteza donjih ekstremiteta krenuli su 60-ih i 70-ih godina prošloga stoljeća. Distribucijska mreža i usluge nude se u 50-ak zemalja, a globalne aktivnosti tvrtke kordiniraju se iz sjedišta u Duderstadtu. Tvrtka ima preko 6000 zaposlenika diljem svijeta. Sa svoje četiri divizije: proteze, ortopedska pomagala, rješenjima za mobilnost i medicinskom njegom, tvrtka je sposobna ponuditi široki spektar proizvoda i usluga. Bionička ruka Michelangelo nastala je u suradnji sa američkim partnerom Advanced Arm Dynamics koji su sudjelovali u testiranju i usavršavanju proteze. Njeno korištenje započelo je 2011. godine i prva je bionička ruka koja je imala mogućnost aktivne abdukcije i adukcije palca.

Značajke bioničke ruke Michelangelo:

- mogućnost izvođenja 7 vrsti zahvata
- sila kod opozicije je približno 70 N, a kod lateralnog štipanja oko 60 N
- palac, kažiprst i srednji prst se pokreću aktivno, dok prstenjak i mali prst pasivno slijede pokrete ostalih prstiju
- bionička ruka ima dva aktuatora, od kojih jedan služi za adukciju i abdukciju palca, a drugi za fleksiju i ekstenziju prstiju
- proteza se vraća u prirodni položaj kada se duže vrijeme aktivno ne koristi
- protezu je moguće prekriti kozmetičkom rukavicom





**Slika 27. Bionička šaka Michelangelo [28]**

Mogućnost pokretljivosti proteze šake:

- ručni zglob ima mogućnost pasivne rotacije  $360^\circ$  (24 pozicije u inkrementima od  $15^\circ$ ), te pasivne fleksije ( $75^\circ$ ) i ekstenzije ( $45^\circ$ ) u dva načina: fleksibilni, gdje karakteristika opruge definira fleksiju i ekstenziju ručnog zgloba, i krut, gdje korisnik namješta kut fleksije ili ekstenzije
- zglob palca ima mogućnost fleksije i ekstenzije, kao i abdukcije i adukcije
- zglobovi prstiju imaju mogućnost fleksije i ekstenzije
- zglobovi između članaka prstiju nemaju mogućnost fleksije i ekstenzije, nego su postavljeni u određenom položaju fleksije
- kod zatvaranja šake prsti vrše adukciju približavajući se jedni drugima, a kod otvaranja šake abdukciju

Za razliku od prethodnih dviju bioničkih šaka, bionička proteza Michelangelo ima nešto slabije mogućnosti. Posebno se to odnosi na nemogućnost aktivne fleksije i ekstenzije prstenjaka i malog prsta, a znamo da kod hvatanja cilindričnih predmeta ulnarni dio šake ima važniju ulogu od radijalnog. Proteza ima mogućnost konfiguriranja pokreta i ostalih postavki preko računala, no zasad nema mogućnost povezivanja sa ostalim uređajima poput pametnih telefona ili satova. Cijena proteze je oko 70000 dolara [29].

### 3.2. Jednostavne bioničke šake

Javnost okupljena oko mnogobrojnih projekata otvorenog koda/izvora (engl. *open source*) omogućila je da se skupe bioničke proteze zamijene jeftinima koje može izraditi svaki pojedinac koji ima pristup lako dostupnim komercijalnim tehnologijama. To je moguće primjenom aditivnih postupka proizvodnje i jeftinih mikrokontrolera i senzora koji su se u posljednje vrijeme pojavili na tržištu. Tako je u kratkom vremenu na internetu postao dostupan jednostavan dizajn šaka koje imaju osnovnu funkciju fleksije i ekstenzije svih prstiju, do onih složenijih, kod kojih je moguće upravljati svakim prstom pojedinačno. Karakteristika tih projekata je da je većina njih otvorenog koda, pa je na internet stranicama lako dostupna dokumentacija koju možemo po želji prepravljati ili doradivati. Cijena izrade jednostavnijih bionički šaka kreće se oko 300 dolara, a onih složenijih oko 1500 dolara.

#### 3.2.1. *Open Bionics*

Ova kompanija je došla u medije nakon što je 2015. godine na CES-u u Las Vegasu predstavila svoju 3D tiskanu bioničku ruku. Svoje napore ulažu u smanjenje cijene protetike rađene po mjeri onima koji su potrebiti, a to su većinom zemlje u razvoju.

Na njihovim stranicama dostupne su detaljne upute za izradu bioničke ruke. Vrijeme printanja glavnih komponenti iznosi oko 28 sati, ako se koristi kvaliteta tiskanja koju oni preporučaju. Materijali koji se koriste za tiskanje su PLA (polilaktid)/ABS (akrilonitril/butadien/stiren) i Ninjaflex (fleksibilni filament koji se koristi za 3D tiskanje). Ostale komponente su dostupne na njihovoj online trgovini, npr. PCB (Printed Circuit Board – tiskana pločica) stoji 150 funti, linearni aktuatori 225 funti. Kada se sve skupa izračuna, ukupna cijena bioničke proteze je oko 500 funti, što uključuje i filamente. To je nešto viša cijena nego u ostalih proizvođača, no treba imati na umu da je i tehnologija drugačija.

Jednom kada se prikupe sve komponente sama montaža ruke traje oko sat vremena. Tome u prilog idu i upute koje su jasno napisane. Za sastavljanje bioničke proteze ruke potrebno je ponešto iskustva sa lemljenjem. Nakon montaže potrebno je učitati program na PCB.

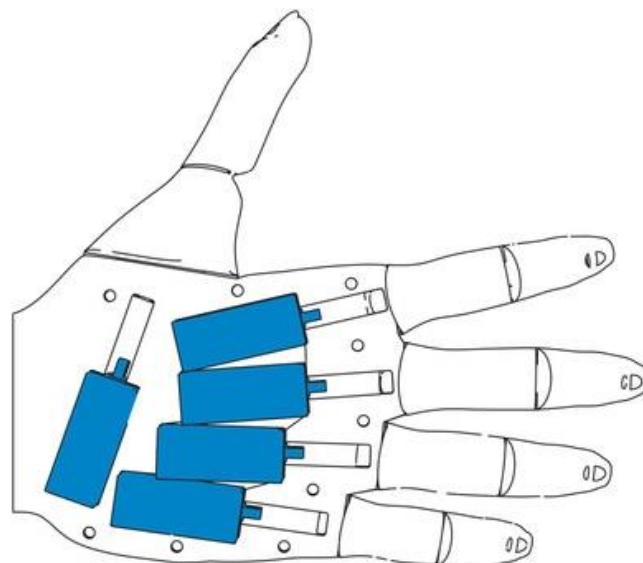


**Slika 28. Dizajn bioničke ruke tvrtke Open bionics [31]**

Pomoću 3D printera izrađuju se četiri glavne komponente šake. Za razliku od sličnih proizvoda, dlan je sa prstima izrađen u jednom komadu iz materijala Ninjaflex. Ostale komponente izrađene su od PLA/ABS plastike.

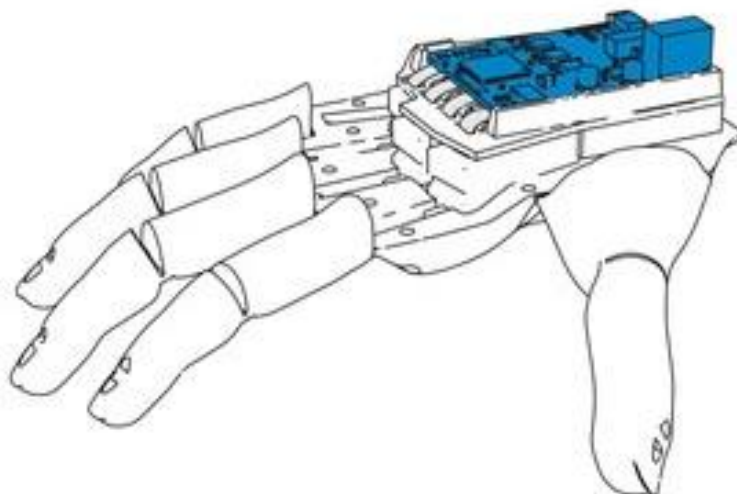


**Slika 29. 3D tiskane komponente [30]**



**Slika 30. Smještaj linearnih aktuatora unutar šake [30]**

Ova bionička ruka ima samo mogućnost fleksije i ekstenzije. Za pokretanje prstiju šake koriste se linearni aktuatori. Budući da je dizajn takav da se prsti mogu pomicati neovisno jedan o drugome, potrebno je pet linearnih aktuatora. Prema tome oni predstavljaju najveći pojedinačni trošak u izradi bioničke ruke. Članci prstiju se sa aktuatorima obično spajaju pomoću elastične niti, kako bi dobili što elastičnije veze.



**Slika 31. PCB je smješten unutar proteze šake [30]**

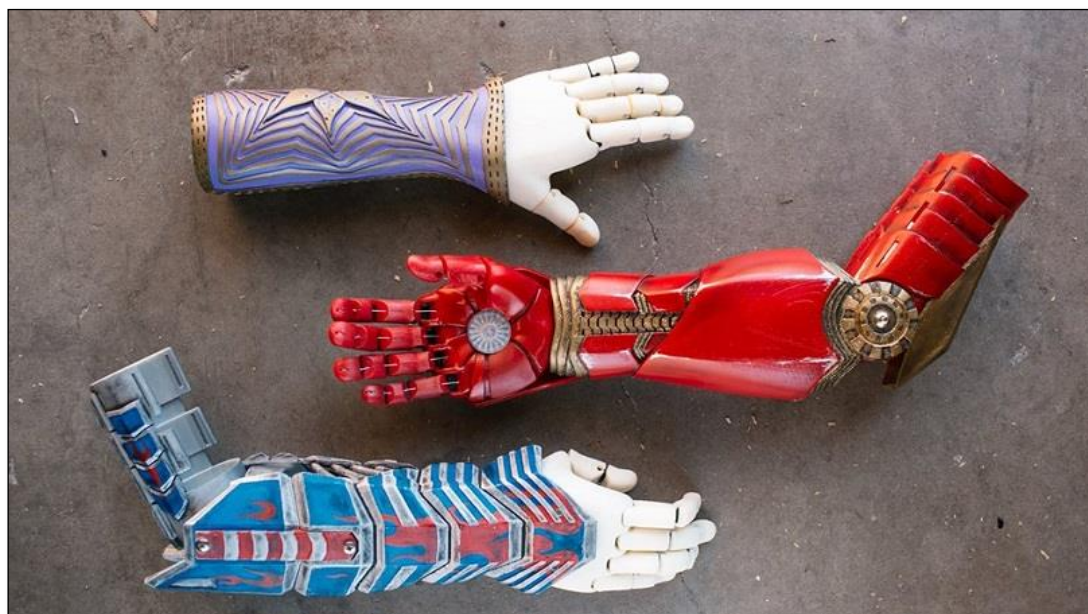
### 3.2.2. *Limbitless Solutions*

Limbitless Solutions je neprofitna organizacija posvećena poticanju pojedinaca koji koriste svoje vještine i strast za poboljšanje svijeta oko sebe. Koriste se aditivnim postupcima proizvodnje kako bi unaprijedili personalizirane bioničke uređaje i rješenja za osobe s invaliditetom. Svojim primjerom žele potaknuti zajednicu kako bi sudjelovala u inovativnim projektima.

Svi njihovi projekti su otvorenog koda, tako da bilo tko može uz pomoć dokumentacije dostupne na njihovim stranicama izraditi bioničku ruku, napraviti poboljšanja i podijeliti ih sa zajednicom. Također, svi oni koji imaju uređaj za 3D tiskanje mogu sudjelovati u projektu tako da izrade pojedine dijelove i pošalju ih nekome tko će ih sastaviti.

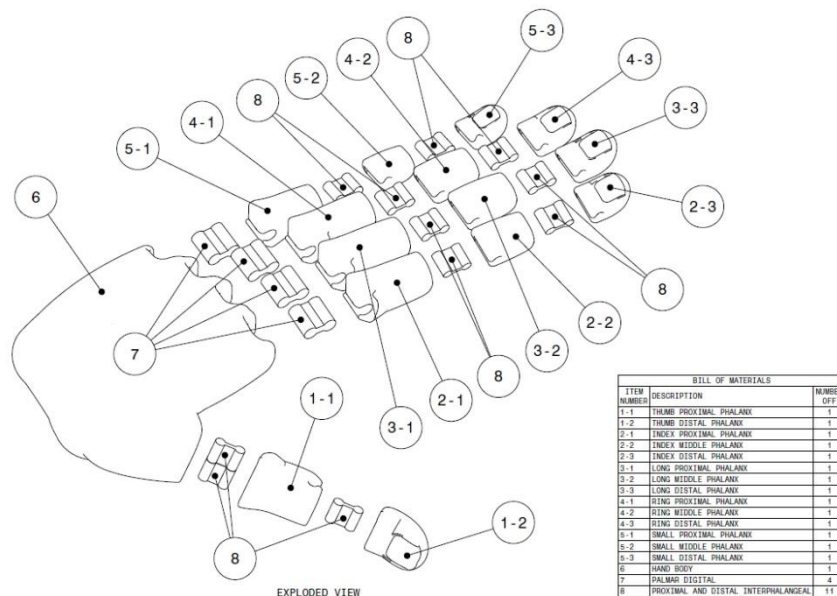
Aktivno rade na novom dizajnu bioničke ruke za djecu i odrasle koji imaju gubitak ruke u području nadlaktice, ali za sada za većinu proteza je potreban funkcionalni zglob lakta ili zglob šake. Trenutno postoji eksperimentalni dizajn za osobe koje imaju gubitak ruke u području nadlaktice koji je napravio tim studenata sa Floride. Do sada je izrađeno samo nekoliko takvih bioničkih uređaja, pa postoje liste čekanja.

Dizajn ruke organizacije Limbitless Solutions ima prednost u tome što se ruka izrađuje od jednog materijala, uobičajeno ABS-a. Elektroničke komponente su komercijalno lako dostupne i jeftine. Cijena izrade kreće se ispod 500 dolara.



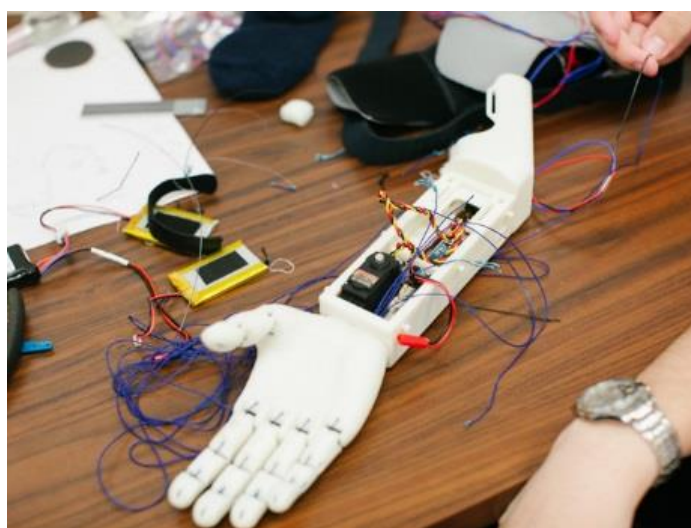
**Slika 32. Različite varijante bioničkih proteza ruke temeljenih na dizajnu organizacije Limbitless Solutions [33]**

Za razliku od prijašnjeg dizajna šake gdje su prsti i dlan bili napravljeni u jednom komadu, ovdje se oni sastoje od više komada, tj. posebno dlan i posebno članci prstiju koji se zatim spajaju u jednu funkcionalnu cjelinu. Kao tetive koriste se najlon.



Slika 33. Prikaz komponenti šake [34]

Budući da se bionička ruka pokreće pomoću samo jednog aktuatora, svi prsti odjednom mogu vršiti samo fleksiju i ekstenziju. Signal za pokretanje aktuatora dolazi iz senzora aktivnosti mišića.



Slika 34. Prikaz sklopljene bioničke ruke s elektroničkim komponentama [34]

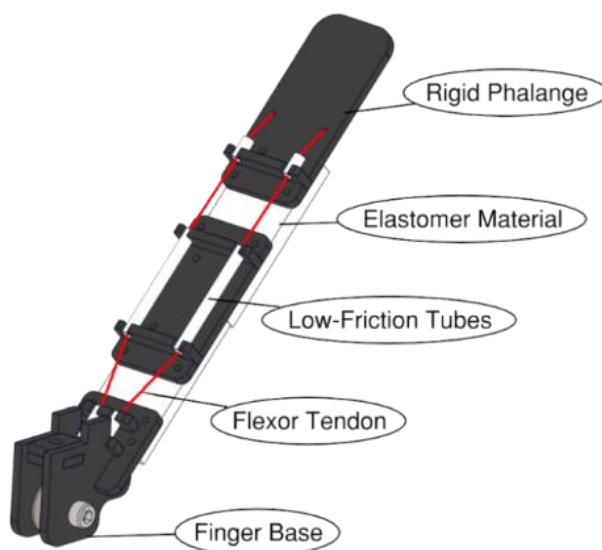


### 3.2.3. OpenBionics

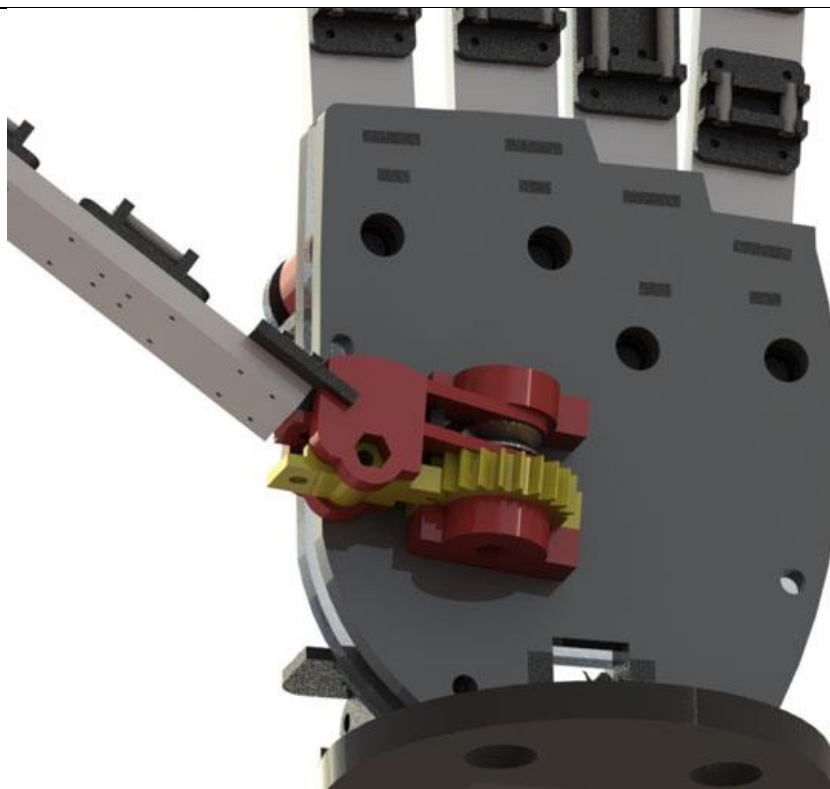
OpenBionics je inicijativa otvorenog koda koja se bavi razvojem pristupačnih, lakih i modularnih robotskih ruka i bioničkih uređaja koji se mogu lako izraditi korištenjem lako dostupnih materijala. Cijena bioničke proteze ruke manja je od 200 dolara i mase manje od 300 grama.

Detaljna dokumentacija i upute dostupne su na web stranicama. Bionička šaka je modelirana parametarski na temelju standardnih antropometrijskih mjera, što omogućuje lako skaliranje modela i prilagođavanje svakom pojedincu. Mehanizam šake se temelji na mehanizmu zglobnih oslonaca što omogućava korisniku da izvrši razne vrste prihvata sa samo jednim aktuatorom. Prebacivanje između različitih položaja i gesta je jednostavno jer postoje gumbi za zaključavanje čime se može blokirati kretanje fleksija svakog prsta zasebno.

Za razliku od prethodnih dizajna prstiju, ovdje su članci prstiju u zglobovi spojeni pomoću elastomernog materijala (silikon), što daje još veću elastičnost šaci. Palac je dizajniran tako da se može zakretati čime se daje mogućnost prihvata različitih vrsta predmeta.



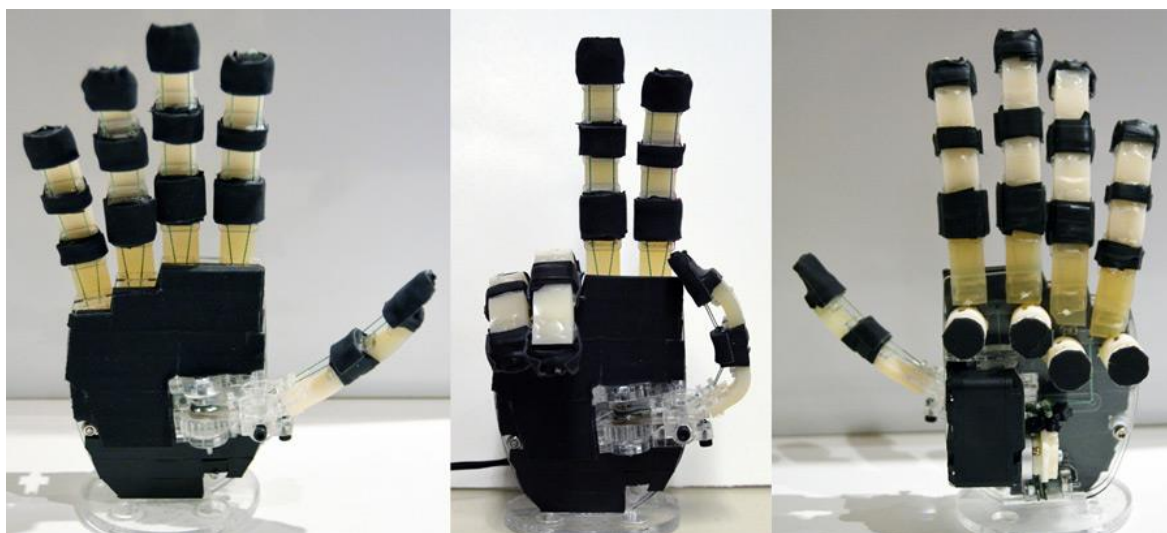
Slika 35. Sklop prsta bioničke šake [35]



Slika 36. Mehanizam za pasivnu abdukciju palca [35]

Šaka ima mogućnost izvođenja slijedećih pokreta:

- fleksija i ekstenzija prstiju uz mogućnost blokiranja fleksije pojedinih prstiju
- pasivna adukcija palca te mogućnost zaključavanja adukcije palca u određenom položaju



Slika 37. Prikaz sklopljene bioničke proteze šake [36]



### 3.2.4. Komponente jednostavne bioničke proteze šake

U nastavku su nabrojane neke od komponenti koje se koriste pri izradi jednostavnih bioničkih proteza šake, te su dani su opisi kako one funkcioniraju i koje funkcije obavljaju.

#### 3.2.4.1. Servomotor

**Servomotor** je izvršni dio sustava za dinamičko pozicioniranje i podrazumijeva se da radi u zatvorenom regulacijskom krugu. Kako su temeljni zahtjevi pri pozicioniranju *brzo* i *točno* postizavati zadani položaj i brzinu, servomotor mora posjedovati svojstva kojima se ovi zahtjevi mogu što bolje ispuniti. Osnova su svojstva servomotoru mala mehanička i električna vremenska konstanta, a postižu se malim momentima tromosti rotora, malim rasipnim tokovima, te velikim specifičnim opterećenjem materijala.

Za servomotor mogu poslužiti različite vrste motora, no neki daju bolje rezultate te se češće koriste. Danas se kao servomotori pojavljuju još uvijek istosmjerni motor, sve više beskolektorski istosmjerni, zatim vektorski upravljani asinkroni i sinkroni s trajnim magnetima. U pozicioniranju se, osobito kod malih snaga, mnogo koriste i koračni motori, no kako obično rade bez povratne veze, ne mogu se smatrati servomotorima. Puno mogućnosti servomotor ostvaruje tek uz visokokvalitetni izvor napajanja i optimalne regulacijske parametre. Za ostvarenje potrebnih promjenjivih pozicija i brzina potrebni su odgovarajući promjenjivi parametri napajanja servomotoru, koji nastaju na temelju poznavanja željenih i stvarnih pozicija i brzina. Stvarne pozicije i brzine mjere se prikladnim pretvornicima koji se zbog uštede prostora i sigurnijeg rada često ugrađuju u zajedničko kućište sa servomotorom. To mogu biti tahogeneratori, apsolutni i inkrementalni enkodери, davači položaja, komponentni čitači i dr. Susreću se i servomotori s ugrađenim dodatnim elektromagnetskim prigušivačima torzijskih vibracija pomoću vrtložnih struja. Servomotori često imaju razmjerno visoku graničnu brzinu, a izvedbeno su prepoznatljivi po osnoj izduženosti. Izrađuju se za snage od najmanjih do više desetaka kilovata.



Slika 38. Servomotori [39]

Vrste motora:

- Istosmjerne struje
  - S trajnim magnetima
  - S nezavisnom uzbuđom
  - Beskolektorski
- Izmjenične struje vektorski upravljani
  - Asinkroni kavezni motor
  - Sinkroni s trajnim magnetima

**Istosmjerni motori** pogodni su za upravljanje, a istosmjerni elektromotorni pogoni (motor s pojačalom snage i upravljačkim uređajem) nešto su jeftiniji od izmjeničnih elektromotornih pogona. Nedostatak je istosmjernih motora u kolektoru, koji određuje vijek trajanja i maksimalnu struju armature u prijelaznom procesu, a time i maksimalnog momenta motora.

**Beskontaktni** odnosno elektronički komutirani istosmjerni motori sastoje se od motora bez kolektora, elektroničkog komutatora i davača položaja rotora, koji generira signale za upravljanje elektroničkim komutatorom. Beskontaktni motori omogućuju kvalitetnu regulaciju brzine i momenta promjenom napona odnosno struje motora. Osobito su pogodni za pogon osovina malih i srednje velikih robota.

**Asinkroni motori** manjih su dimenzija i mase, a i jeftiniji su od istosmjernih strojeva iste snage. Osim toga, jednostavniji su za održavanje. Upravljanje asinkronim motorima je složenije, pa su asinkroni elektromotorni pogoni nešto skuplji od istosmjernih elektromotornih pogona. Razvoj elektronike omogućava izradu sve jeftinijih upravljačkih uređaja s jedne strane, ali i sve složenijih i profinjenijih, a time i skupljih upravljačkih uređaja s druge strane. Rezultat toga je sve veća primjena regularnih asinkronih elektromotornih pogona u robotici.

Diskretni elektromotorni pogoni s koračnim motorima veoma su pogodni za primjenu digitalnih računala u upravljanju. Upotrebom tih pogona postiže se velika brzina odziva i točnost pozicioniranja. Razvoj elektronike i mikroelektronike pospješio je razvoj i primjenu diskretnih pogona s koračnim motorima. Snaga koračnih motora reda je veličine  $10^{-6}$ - $10^3$  W, moment  $10^{-3}$ - $10^2$  Nm, korak  $1$ - $90^\circ$ , a frekvencija 500-1000 koraka/s. Osim u robotima, pogoni s koračnim motorima koriste se i u mnogim drugim uređajima, kao što su: alatni strojevi, šivaći strojevi, printeri, satovi, zrakoplovi itd.

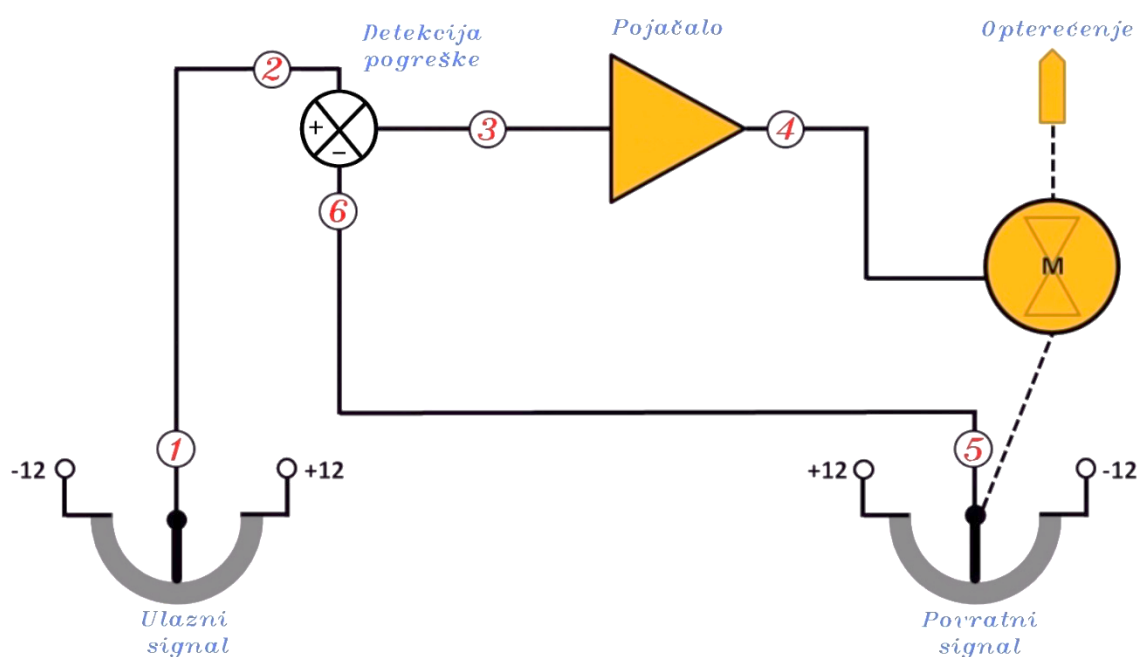
### *Princip rada servomotora*

Na slijedećoj slici prikazan je jednostavan DC servomehanizam koji se sastoji od sljedećih komponenti:

- **Ulazni potencijometar** – je ubiti promjenjivi otpornik, koji na temelju ulaznog signala daje izlazni napon u određenom rasponu, a u našem slučaju to je  $\pm 12$  V. Za ulaz se koristi digitalni potencijometar jer izlazni signal koji dolazi sa mikrokontrolera je u digitalnom obliku.
- **Detektor pogreške** – uspoređuje izlazne signale koji dolaze sa oba potencijometra i prosljeđuje ih pojačalu. Primjera radi ako je u točki 2 napon  $+4$  V a u točki 6 napon  $-1$  V, pojačalu će biti proslijeđen napon od  $+3$ V.
- **Pojačalo** – je elektronički sklop čija je zadaća da pojača jakost električnog signala. Pojačala se odabiru na temelju raznih specifikacija, kao što su: raspon frekvencijskog polja, linearnost, šum, stabilnost, a ona najvažnija je pojačanje. Pojačala mogu imati pojačanja različitih vrijednosti, npr. 5, 10, 25... Za primjer uzmimo da je ulazni signal na pojačalu  $+3$  V. Uz pojačanje od 25 puta, to bi nam dalo pojačani signal  $+75$  V. No to nije uvijek tako jer se u pojačalu ne pojačava ulazni signal, već je za rad pojačala potrebno vanjsko napajanje koje nije uvijek u tako velikim rasponima. Dakle ako naše pojačalo napajamo sa rasponom od  $\pm 12$  V, tada ćemo za ulazno signal od  $+3$  V uz

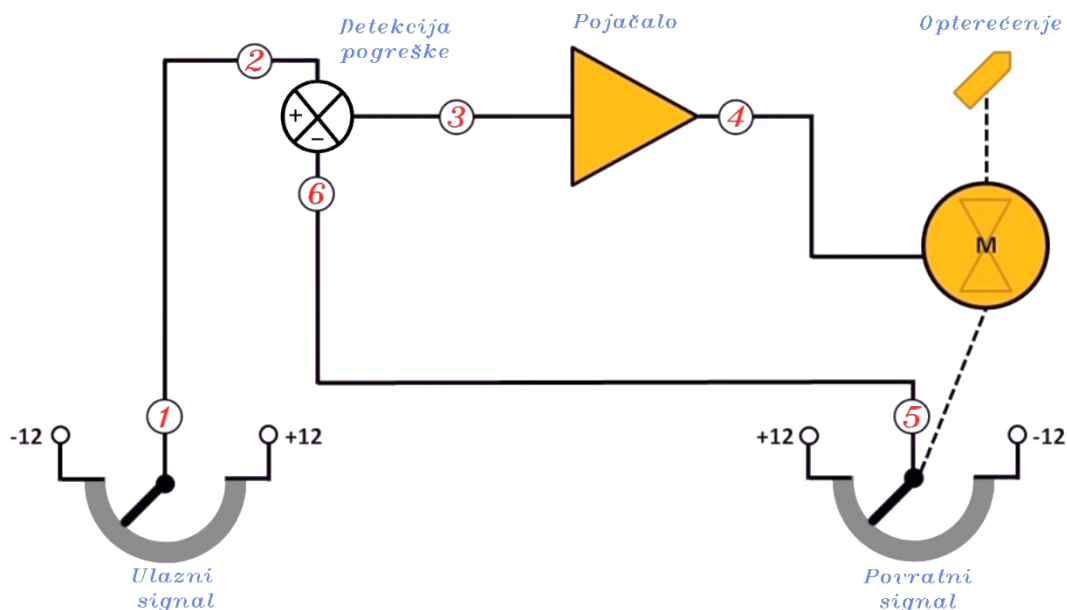
pojačanje od 25 puta dobiti izlazni signal od +12 V. Analogno tome, ako je ulazni signal na pojačalu -0.2 V, izlazni signal će biti -5V.

- **Elektromotor** – se zakreće u pozitivnom ili negativnom smjeru ovisno o izlaznom naponu pojačala. Rotor elektromotora povezujemo sa različitim konstrukcijskim elementima na opterećenje.
- **Potencijometar za povratnu vezu** – najčešće je to analogni potencijometar koji je direktno vezan za rotor elektromotora ili za osovinu, gdje njegovo zakretanje uzrokuje slanje povratnog signala u detektor pogreške.



Slika 39. Shema DC servomehanizma u neutralnom položaju [40]

Na sljedećem primjeru pojasnit ćemo što se događa i kako radi servomehanizam kada se promijeni ulazni signal.



**Slika 40. Shema DC servomehanizma pri promjeni ulaznog signala [40]**

Pomicanjem klizača na analognom potenciometru ili slanjem digitalnog signala na digitalni potenciometar namjestili smo da potenciometar propušta  $-6\text{ V}$ . Taj signal putuje do detektora pogreške gdje on uspoređuje ulazne signale. Pošto je u točki 2 napon  $-6\text{ V}$ , a u točki 6, zbog toga što je drugi potenciometar u neutralnom položaju,  $0\text{ V}$ , detektor pogreške šalje na pojačalo signal od  $-6\text{ V}$ . Pojačalo sa pojačanjem od 25 puta pojačava taj signal na maksimalnih  $-12\text{ V}$  što je uvjetovano vanjskim napajanjem. Zatim taj signal dolazi do elektromotora koji se zakreće rotor i potenciometar za povratnu vezu u smjeru kazaljke na satu. Zakretanje elektromotora traje toliko dugo dok u točki 6 ne dobijemo signal od  $+6\text{ V}$ . Tada detektor pogreške šalje pojačalu signal od  $0\text{ V}$ , te pojačalo nema više što pojačavati i šalje elektromotoru napon od  $0\text{ V}$  te se uslijed toga rotor elektromotora prestaje vrtjeti.

Sada promotrimo drugi slučaj. Rotor elektromotora se nalazi u gore opisanom položaju. U jednom trenutku dolazi do preraspodjele opterećenja što uzrokuje zakretanje rotora elektromotora u smjeru kazaljke na satu. To zakretanje detektira potenciometar za povratnu vezu na čijem izlazu se sada nalazi signal od  $+6.2\text{ V}$ . Sada taj signal putuje do detektora pogreške i tamo se uspoređuje sa signalom u toči 2 od  $-6\text{ V}$ . Detektor pogreške šalje pojačalu signal od  $+0.2\text{ V}$ , što pojačalo pojačava na  $+5\text{ V}$  i šalje elektromotoru. Elektromotor se sad zakreće u smjeru suprotnom od kazaljke na satu tako dugo dok se opet ne uspostavi ravnoteža signala, tj. sve dok u točki 3 napon ne padne na  $0\text{ V}$ .



**Slika 41. Unutrašnjost servomotora [41]**

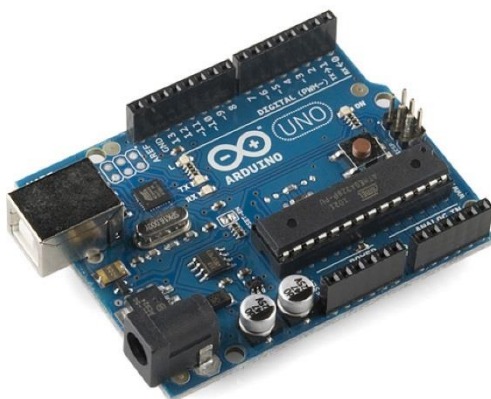
#### 3.2.4.2. *Arduino*

Arduino je zajednički naziv za softversku tvrtku, projekt i korisničku zajednicu koja dizajnira i proizvodi računalni hardver otvorenog koda, softver otvorenog koda i mikrokontrolere za izradu digitalnih i interaktivnih uređaja pomoću kojih se mogu primiti signali iz okoline i kontrolirati uređaji.

Projekt se zasniva na mikrokontroleru koji se nalazi na tiskanoj pločici, a proizvodi ga nekoliko proizvođača koji koriste mikrokontrolere različitog tipa. Ovaj sustav dolazi sa setom digitalnih i analognih ulazno/izlaznih pinova koji se mogu povezati sa različitim ekspanzijskim pločicama (shieldovima) i ostalim elektroničkim krugovima. Pločica sadrži serijsko komunikacijsko sučelje kao i USB sučelje na pojedinim modelima, za učitavanje programa sa osobnog računala. Za programiranje mikrokontrolera, Arduino projekt koristi integrirano razvojno okruženje (IDE) bazirano na programskom jeziku *Processing*, koji podržava jezike C i C++.

Prvi Arduino je predstavljen 2005. godine, sa željom da svojom niskom cijenom i jednostavnošću omogući početnicima i profesionalcima da stvore uređaje koji su u interakciji sa okolinom koristeći se senzorima i aktuatorima. Uobičajeni primjeri za takvih uređaja namijenjenih za početnike su jednostavni roboti, termostati i detektori pokreta.

Arduino pločice su komercijalno dostupne u sastavljenom obliku, ili kao kompleti za slaganje. Dizajn pločice je javno dostupan, što omogućuje svakome entuzijastu da ih proizvodi.



Slika 42. Arduino Uno R3 [42]

### ***Razvoj Arduina***

Kolumbijski student Hernando Barragán stvorio je u sklopu svoga magistarskog rada razvojnu platformu Wiring 2004. godine u Italiji. Massimo Banzi i Casey Reas (poznati po svom radu na programskom jeziku *Processing*) bili su supervizori za njegov rad. Cilj je bio stvoriti jeftin i jednostavan alat za entuzijaste pomoću kojega bi oni mogli stvarati svoje projekte. Wiring platforma bila je bazirana na mikrokontroleru ATmega128, integriranom razvojnom okruženju (IDE) baziranom na Processingu i bibliotekom funkcija za lakše programiranje mikrokontrolera.

2005. godine Massimo Banzi, David Mellis i David Cuartielles dodaju podršku za jeftiniji ATmega8 mikrokontroler na platformu Wiring. No umjesto da nastave rad na Wiringu, oni su kopirali izvorni kod sa Wiringa i započeli na radu na zasebnom projektu, nazvanom Arduino.

### ***Mikrokontroler***

Mikrokontroler je maleno računalo (SoC – Sistem on Chip) koje se nalazi na jednom integriranom krugu na kojemu se nalazi procesorska jezgra, memorija i programibilni ulazno/izlazni pinovi.

Mikrokontroleri se koriste u automatiziranim uređajima i proizvodima, kao što su kontrola rada motora kod automobila, medicinski uređaji, daljinski upravljači, uredski uređaji, igračke i u ostalim *embedded* sustavima (*embedded* sustavi su računalni sustavi sa jako izraženom integracijom hardvera i softvera, prije svega namijenjenih da obavljaju specifičnu funkciju). Reduciranjem veličine i cijene u odnosu na sustave koji koriste zasebne mikroprocesore,

memoriju i ulazno/izlazne uređaje, upotreba mikrokontrolera je znatno ekonomičnija za digitalnu kontrolu uređaja i procesa.



**Slika 43. ATmega328 mikrokontroler [44]**

Kod pojedinih ne zahtjevnih uređaja, mikrokontroler u fazi mirovanja može imati potrošnji od samo nekoliko nW, dok u uporabi troši nekoliko mW ili  $\mu$ W, što omogućuje da baterija traje i po nekoliko godina. Dakako postoje i brži mikrokontroleri sa brzom obradom signala koji imaju znatno višu potrošnju energije.

### ***Projekti temeljeni na Arduino platformi***

Platforma otvorenog koda i smanjenje cijene mikrokontrolera omogućila je stvaranje velike zajednice u koju su uključeni profesionalci, hobisti, entuzijasti i ostali zaljubljenici u tehnologiju. Tako je danas moguće na web stranicama i po različitim forumima pronaći na stotine projekata, što jednostavnih, kao npr. paljenje LED rasvjete, do onih složenijih kao što su pametne kuće ili autonomni sustavi za upravljanje mikroklimom u staklenicima. Zbog jednostavnosti korištenja i lako savladivog programskog jezika Arduino je savršena platforma za početnike.



**Slika 44. Hexapod temeljen na Arduino čipu [45]**



### 3.2.4.3. Senzor aktivnosti mišića

#### **Elektromiografija**

Elektromiografija (EMG) je elektrodijagnostička tehnika za evaluaciju i snimanje električne aktivnosti skeletnih mišića. EMG se izvodi pomoću specijalnog uređaja, elektromiografa i različitih vrsta elektroda. Elektromiograf detektira električni potencijal generiran od strane mišićnih stanica kada te stanice električki ili neurološki aktiviramo. Bilježenjem električnih potencijala mišićnih stanica dobivamo elektromiogram, kojeg koristimo za daljnju analizu kako bi uočili medicinske abnormalnosti, razinu aktivacije ili analizirali biomehaniku pokreta ljudi ili životinja.

Postupak je sličan kao kod EKG snimanja, gdje se koriste površinske elektrode, no kod EMG-a se često koriste i elektrode u obliku igle koje se direktno plasiraju u mišić kako bi dobili što jači signal bez šumova. Ispitivanje se najčešće obavlja na ekstremitetima, i to pretežito na šakama i stopalima, a samo izuzetno na licu ili sfinkterskim mišićima.

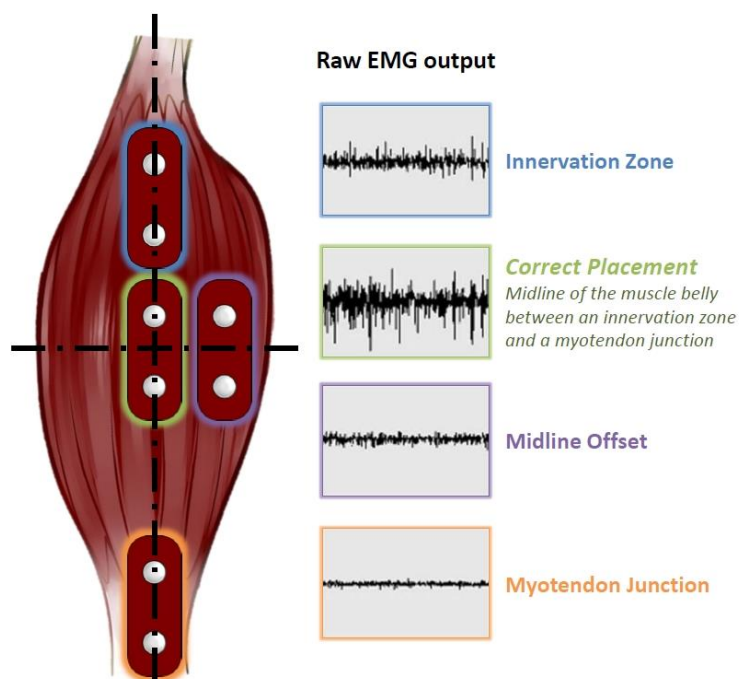
#### **Muscle Sensor**

Muscle Sensor je proizvod tvrtke Advancer Technologies koji detektira električnu aktivnost mišića. Razvoj ovog senzora omogućen je dolaskom na tržište snažnijih mikrokontrolera i integriranih krugova, pa su EMG senzori pronašli svoju uporabu u video igrama, medicinskim uređajima, nosivoj elektronici, protezama, robotici i u drugim upravljačkim sustavima. No ipak, EMG senzori su još uvijek skupi i još nisu pronašli pravi put do hobista.



**Slika 45. Muscle Sensor (AT-04-001) [47]**

U dokumentaciji su detaljno dane specifikacije senzora, načini spajanja sa Arduino pločicom, ispravan način postavljanja, vrste izlaznih signala i dimenzije. Pozicioniranje i orijentacija senzora aktivnosti mišića ima veliki utjecaj na jačinu signala. Elektrode moraju biti postavljene na sredinu tijela mišića i poravnate sa orijentacijom mišićnih vlakana. Postavljanje senzora na drugu lokaciju smanjiti će jačinu i kvalitetu signala.



Slika 46. Kvaliteta signala ovisno o poziciji senzora [47]

## 4. ZAHTJEVI

Kod definiranja zahtjeva moramo imati na umu da postoji više potencijalnih skupina korisnika koje bi mogle koristiti našu protezu. Stoga zahtjeve možemo podijeliti na dvije grupe. U prvoj grupi su zahtjevi koji vrijede za sve skupine korisnika te ih moraju ispunjavati sve jednostavne bioničke proteze šake. Ta grupa zahtjeva se može nazvati generalnim zahtjevima. Oni su općeniti pa se iz njih ne mogu točno definirati potrebe pojedine skupine korisnika. Kako nije moguće napraviti bioničku protezu šake koja će odgovarati svim korisnicima, potrebni su nam zahtjevi za određenu skupinu korisnika čije će želje i potrebe naš proizvod moći ispuniti. Te skupine mogu biti djeca, fizički radnici, umirovljenici ili neki drugi. Izradom proteze koja će ispunjavati zahtjeve određene grupe korisnika moći ćemo se pozicionirati na točno određeni dio tržišta koji nije popunjen ili svojim proizvodom koji je funkcionalniji ili ima iste funkcije kao konkurentski, a manju cijenu uzeti dio „kolača“ od toga tržišta.

### 4.1. Generalni zahtjevi

Odnose se na sve skupine korisnika. To su općeniti zahtjevi koje moraju ispunjavati sve bioničke proteze neovisno o segmentu tržišta na koji misle izaći. Najjači zahtjev je da proteza šake bude sigurna za svakog pojedinca koji dolazi s njom u doticaj. Što se tiče jednostavnih bioničkih proteza šake, važno je da one budu dostupne širokom krugu osoba s invaliditetom i da budu što je više moguće funkcionalnije, a da se istodobno zadrži što je moguće niža cijena izrade.

#### 4.1.1. Mala masa

Kod konstruiranja, vrlo je važno pripaziti da masa proteze šake ne bude prevelika. Povećana masa može negativno utjecati na mobilnost korisnika što direktno utječe na njegovo zadovoljstvo proizvodom. Idealno bi bilo da masa proteze šake bude manja ili jednaka stvarnoj masi šake. Zbog toga je potrebno na neki način odrediti ciljanu masu bioničke proteze šake.

Mase segmenta ljudskog tijela najčešće se određuju pomoću određenih koeficijenata koji se množe sa ukupnom masom i visinom određene osobe. Jedna od metoda za određivanja mase segmenata tijela je metoda Donskog i Zaciorskog u kojoj se koriste regresijske jednadžbe za određivanje mase segmenata tijela. Istraživanje je provedeno na 100 muškaraca u dobi od 19 – 35 godina i 16 žena u dobi od 19 – 27 godina.

Jednadžba ima oblik:

$$m_i = B_0 + B_1 \cdot M_S + B_2 \cdot H_S,$$

gdje je  $m_i$  masa segmenta (kg),  $B_0$ ,  $B_1$  i  $B_2$  regresijski koeficijenti,  $M_S$  ukupna masa subjekta (kg), a  $H_S$  ukupna visina subjekta (cm).

**Tablica 11. Regresijski koeficijenti za žene i muškarce [48]**

regresijski koeficijenti za segment šake				
	$B_0$	$B_1$	$B_2$	standardna devijacija, $\sigma$
žene	-0,116	0,0017	0,002	0,03
muškarci	-0,1165	0,0036	0,00175	0,036

Naravno postavlja se pitanje koliko je metoda Donskog i Zaciorskog točna za subjekte van uzorka istraživanja, a posebno je upitna točnost metode za djecu budući da su istraživanja provedena na starijim ispitanicima. Također postoje i varijacije u masi svih segmenata ljudskog tijela ovisno o profesijama kojima se ljudi bave.

Imamo i nešto jednostavniju procjenu mase segmenta iz drugih izvora [49], gdje se procjenjuje da masa segmenta šake iznosi oko 0.6% ukupne mase tijela.

#### **4.1.2. Jednostavnost**

Najbolje konstrukcije su one sa najmanjim brojem komponenti. Potrebno je razmotriti mogućnost spajanja dvije ili više komponenti u jednu, ali pritom treba pripaziti da ne izgubimo prvobitnu funkcionalnost. Proizvod sa manje komponenti biti će lakši za sklapanje i održavanje, manja je mogućnost da dođe do zatajenja komponenti i zakazivanja cijelog proizvoda uopće. S druge strane, spajanjem više komponenti u jednu često dolazimo do oblika koje je teško proizvesti. Stoga je vrlo važno ispitati što više mogućih rješenja, te izabrati ono koje najbolje odgovara.

#### **4.1.3. Korištenje gotovih elemenata**

Prvenstveno, kod konstrukcije jednostavne bioničke šake misli se na korištenje gotovih elektroničkih elemenata. Odabirom gotovih elemenata smanjit ćemo vrijeme razvoja i zasigurno uštedjeti novac. Postavlja se pitanje dali ima smisla izrađivati vlastite senzore električne aktivnosti mišića ili mikrokontrolere. Zacijelo na tržištu postoji široka lepeza

proizvoda koja će zasigurno odgovarati našim potrebama. Ako ne pronađemo komponente koje ispunjavaju naše zahtjeve, tek tada se pristupa vlastitom razvoju komponenti.

#### **4.1.4. Broj mogućih zahvata**

U principu se od bioničke proteze očekuje da ima mogućnost izvršavanja što većeg broja zahvata. Time se korisniku omogućuje da obavlja raznolike poslove i da je njegovo zadovoljstvo veće. Naša ruka ima puno mišića koji zajedno surađuju te na taj način izvode različite zahvate. Stoga će za veći broj mogućih zahvata, bionička proteza trebati i veći broj aktuatora koji omogućuju izvedbu tih zahvata. Veći broj aktuatora zahtjeva kompliciranije upravljanje, više elektroničkih komponenti te potrebu za obradom većih količina podataka. To u konačnici dovodi do veće potrošnje energije i do povećanja mase same proteze. Stoga je potrebno analizirati koji zahvati se potrebni za koju skupinu korisnika, te u kojoj prigodi se oni koriste i na temelju toga odabrati one od kojih će korisnik imati najveće koristi, a one malo manje potrebne izbaciti.

#### **4.1.5. Doziranje pritiska prstiju**

Problem mioelektričnih proteza šake je što korisnik ne može prilagoditi silu kojom prihvaća objekte jer nema osjet dodir, tj. ne postoji povratna veza koja bi dala odgovor kakva su svojstva predmeta koji se prihvaća. Iako postoji proteza koja korisniku daje osjet dodira, za očekivati je da ta tehnologija neće tako skoro postati široko dostupna. Stoga korisniku preostaje samo da na temelju vizualne informacije procjeni dali neki objekt može sigurno prihvatiti ili ne. Prema tome potrebno je pronaći rješenje na koji način treba regulirati sustav kako bi korisnik mogao jednako uspješno prihvatiti plastičnu čašu da ju ne izgužva ili bocu vina da mu ona ne sklizne iz ruke.



**Slika 47. Izgužvane plastične čaše uslijed prevelikog pritiska prstiju [50]**

#### **4.1.6. Nosivost proteze**

Bionička proteza šake mora imati određenu nosivost kako bi bila funkcionalna. Npr. mora podnijeti težinu vrećice nakon obavljene kupnje. Postavlja se pitanje koliku bi težinu morala podnijeti? Dali je to 100 N, 200 N ili više? Neke proteze mogu podnijeti opterećenja i do 90 kg, ali to sve ovisi kako ćemo osigurati spoj između proteze i tijela korisnika. Dakako ovisi i o vrsti materijala koji se koriste, jačini aktuatora i o samom konstrukcijskom rješenju bioničke proteze. Također postoji i mogućnost ugradnje sigurnosnih značajki tako da kod pokušaja podizanja preteških objekata prsti automatski popuste kako bi se smanjio rizik od oštećenja proteze.

#### **4.1.7. Autonomija**

Budući da proteza ima električne komponente potrebna je baterija koja će osigurati dovoljno vrijeme autonomije kako bi korisnik mogao odraditi sve potrebne zadatke. Poželjno bi bilo da bionička proteza imati dovoljno vrijeme autonomije kako bi se mogla koristiti cijeli dan. U slučaju da se baterija proteze uslijed intenzivne uporabe isprazni prije vremena, potrebno je osigurati neki drugi način da se produži njen daljnji rad. Na autonomiju baterije ima utjecaj i količina elektroničkih komponenti, pa će se tako napredne proteze sa više aktuatora brže isprazniti. Prema tome treba pronaći rješenje kako produžiti maksimalno vrijeme korištenja proteze, dali povećanjem kapaciteta baterije, upotrebom zamjenske baterije, ugradnjom standardnog priključka za punjenje ili na neki drugi način.

#### **4.1.8. Ergonomija**

Za korisnika je najbolje da mu proteza pristaje tako da ju uopće ne osjeća, bez da ga ona pritišće ili žulja. Takve proteze je u današnje vrijeme moguće napraviti na temelju 3D skena ljudskog tijela prema kojemu se zatim oblikuje proteza. Također, ako je proteza jednostavna za uporabu, pouzdana i sigurna zadovoljstvo korisnika će biti veće. Ergonomski zahtjevi direktno utječu na dizajn proteze kako bi ona bila najprikladnija za korisnika.

#### **4.1.9. Sigurnost**

U ovu kategoriju možemo objediniti više zahtjeva. Sigurnost od ozljeđivanja je vrlo važan zahtjev. Proteza mora biti dizajnirana tako da se spriječi mogućnost samoozljeđivanja, npr. nošenjem preteških objekata. Također trebamo uzeti u obzir i sigurnost ljudi te okoline pri obavljanju svakodnevnih aktivnosti. Sve mehaničke pokretne dijelove (zupčanci, servomotori) treba ukomponirati unutar proteze šake, ne samo radi sprječavanja ozljeda nego i radi

sprečavanja mogućih zatajenja komponenti. U današnje vrijeme koriste se baterije velikih kapaciteta te je sprječavanje kratkog spoja i zaštita od strujnog udara vrlo važno. Ako je proteza izrađena iz zapaljivog materijala potrebno je izolirati sve elektroničke komponente kako ne bi došlo do taljenja ili zapaljenja.

#### **4.1.10. Dizajn**

Dizajn bioničke proteze šake važan je ne samo za korisnika proteze, već i za sve ostale osobe koje dolaze u kontakt s tom osobom. Dok pasivne proteze nerijetko izazivaju podvojene emocije kod ljudi, aktivne mioelektrične proteze većinom izazivaju „wow“ efekt, posebno u slučaju naprednih proteza koje imaju mogućnost spajanja sa pametnim telefonima. Djeca koja nose bioničke proteze, više nisu u drugom planu kao nekad ili izbačena iz društva, nego se druga djeca žele sprijateljiti s njima i smatraju ih posebnima. Mnoge bioničke proteze ruku imaju mogućnost navlačenja estetske rukavice koja se ni u čemu ne razlikuje od druge ruke, pa je iz daljine teško uopće i uočiti da osoba ima protezu a pri normalnom hodu ponaša se prirodno. Svi ti elementi značajno utječu na samopouzdanje korisnika te bolje prihvaćanje u društvu.

#### **4.1.11. Niska cijena**

Nakon svih navedenih zahtjeva, zahtjev za što nižom cijenom utjecati će na to koliko će si osoba s invaliditetom moći priuštiti bioničku protezu. U analizi jednostavnih bioničkih šaka vidjeli smo da se najjeftinija proteza može izraditi za oko 200 dolara, što daje širokoj populaciji osoba s invaliditetom mogućnost nabave takve proteze. Posebno su takve, jednostavne, proteze povoljne za djecu koja se brzo razvijaju pa im je svako malo potrebna veća proteza. Tada je samo potrebno napraviti veću protezu nekom od aditivnih tehnologija, a elektroničke komponente se mogu ponovno iskoristiti na novoj protezi. Malim povećanjem funkcionalnosti jednostavnih bioničkih proteza ukupna cijena bi se mogla nešto povećati, ali će one još uvijek ostati unutar prihvatljive granice.

## **4.2. Raznolikost zahtjeva različitih skupina korisnika**

Svaka od posebnih skupina korisnika ima svoje karakteristične zahtjeve, te žele da im njihova proteza daje mogućnost ispunjenja tih zahtjeva. Tako se ljudi, koji su na primjer prije gubitka ruke radili kao stolari, mesari ili su se bavili biciklizmom, žele čim prije vratiti svojem poslu ili hobijima. Nakon traume oni vjerojatno više neće moći raditi iste poslove kao prije, već će trebati prilagoditi svoj dotadašnji posao svojim mogućnostima. Ponovnom prilikom za rad tim se ljudima daje prilika da ispune svoje živote i osjećaju se korisni u zajednici. Usto, pravo na rad je ustavno i ljudsko pravo.

Na temelju njihovih osobnih zahtjeva, zahtjeva koji ovise o radnom mjestu i njihovim interesima potrebno je prilagoditi dizajn proteze. Tako će stolaru biti potrebna proteza koja će biti otporna na prašinu i da s njom može podići veće terete. Mesar će trebati protezu otpornu na vodu koja će se moći lako čistiti, a biciklist protezu koja će imati dužu autonomiju, otpornu na različite vremenske uvjete i lako prilagodljivu.

Iz ovih primjera vidimo da je svakoj pojedinoj skupini ljudi potrebna proteza šake sa različitim mogućnostima. Ako bi krenuli konstruirati protezu koja bi ispunjavala zahtjeve svih skupina, pitanje je dali bi uopće mogli izraditi takvu bioničku protezu. Kao što smo u analizi tržišta vidjeli, postoje napredne bioničke proteze šake koje imaju mogućnost ispunjavanja zahtjeva različitih skupina ljudi, ali su zbog toga te proteze preskupe za većinu ljudi.

Sa jednostavnim mioelektričnim protezama možemo ispuniti zahtjeve određene skupine korisnika za koje će te proteze biti namijenjene tako da one budu financijski dostupne tim korisnicima.

### **4.2.1. Zahtjevi ciljane skupine korisnika**

Ciljana skupina kojoj se želi posvetiti u ovom radu su djeca u dobi od 6 do 11 godina koja imaju gubitak šake samo na samo jednoj ruci. Predviđeno je spajanje bioničke proteze šake na protezu podlaktice, pa stoga djelomične proteze šake nisu razmatrane u ovom radu budući da one moraju ispunjavati sasvim drugačije zahtjeve te su za njihov razvoj potrebna sasvim drugačija konstrukcijska rješenja.

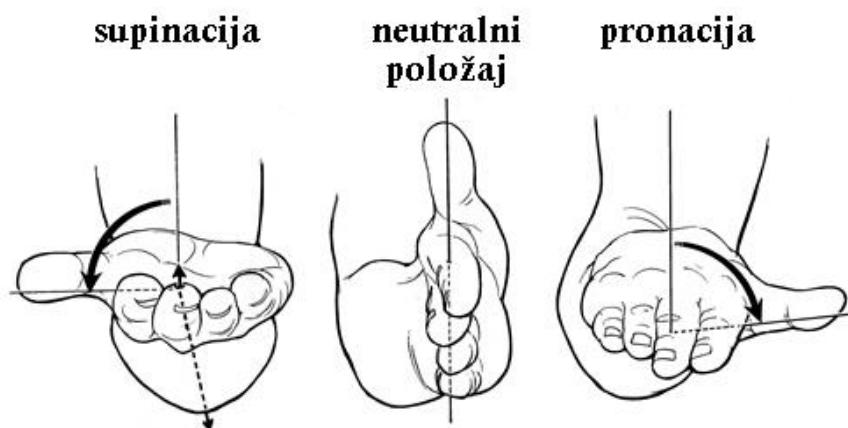
Znamo da djeca u tom razdoblju pohađaju niže razrede osnovne škole, a prije toga većina njih pohađa predškolski odgoj. U tom razdoblju se oni počinju aktivno koristiti sa olovkom učeći kako se olovka drži, te počinju crtati određene oblike i pisati slova. Prema tome na našu se bioničku protezu šake postavlja uvjet da omogući pravilno hvatanje olovke kako bi se korisniku



omogućila crtanje i pisanje bez prevelikih napora. Dakako, na tu protezu šake postavljaju se i drugi zahtjevi koji će biti nabrojani u nastavku. Gornja granica u godinama određena je u skladu s trenutkom kada će dijete preći u više razrede osnovne škole. Vrlo je vjerojatno da će u tom razdoblju dijete trebati novu protezu šake jer će staru prerasti i neće biti u skladu sa proporcijama tijela. Također, u višim razredima se već traže i neki drugi zahtjevi koje stara proteza šake više neće biti u stanju ispuniti, npr. držanje šestara, baratanje sa trokutima...

Kako bi mogli izvući zahtjeve koji se postavljaju pred protezu šake prvo moramo analizirati kako izgledaju dnevne aktivnosti djece u toj dobi. Njih bi mogli podijeliti na aktivnosti vezane uz školu i na aktivnosti vezane uz slobodno vrijeme.

Prvo će biti razmotrene aktivnosti djece vezano uz školu. Kao što je bilo rečeno najvažnija vještina koja se uči u prvom razredu je pisanje. Za pisanje je potrebno naučiti pravilno držati olovku. Za to se koristi prihvat sa tri prsta koji se koristi za precizne radnje. Poblježe je taj prihvat opisan u drugom poglavlju, s tim da je kod pisanja potrebna pronacija ručnog zgloba oko  $10^\circ$  do  $20^\circ$  u odnosu na neutralni položaj. Ako je kut rotacije ručnog zgloba manji, biti će potrebna i lagana ulnarna devijacija od oko  $5^\circ$  u odnosu na neutralni položaj. A ako je kut rotacije veći, ulnarna devijacija neće biti potrebna. Ulnarna devijacija također ovisi i o poziciji na kojoj se hvata olovka. Ako se olovka hvata niže, biti će potrebna ulnarna devijacija, dok će kod višeg hvatanja olovke ona biti nepotrebna. Fleksija i ekstenzija ručnog zgloba kod normalnog pisanja nisu potrebne.



Slika 48. Supinacija i pronacija [51]

Slijedeći zadaci koji se izvode u školi su vađenje i spremanje knjiga, prihvaćanje papira, brisanje gumicom. Za takve zadatke potrebni su ostali pokreti štipanja u koje spadaju prihvat

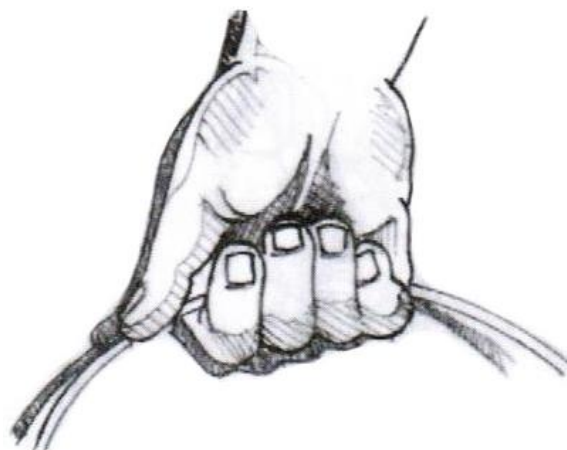
sa vrhovima prstiju, lateralni prihvat i prihvat predmeta jagodicama prstiju. Uz to dijete se u školi koristi sa žlicama i vilicama kod konzumiranja obroka. Prema tome jasno je da će naša proteza morati imati mogućnost adukcije zgloba palca.

Predmeti kojima se manipulira unutar školskih aktivnosti su većinom sitni i tanki, ali ipak treba misliti i na mogućnost prihvata širih i debljih predmeta. Stoga se pred nas postavlja problem kako zaustaviti fleksiju prstiju kod prihvaćanja širih predmeta. Sljedeći zahtjev koji se postavlja je ograničenje jačine stiska prstiju proteze šake. Dobro bi bilo da korisnik može sam podesiti jačinu stiska prstiju. Tu je potrebno uvesti i sigurnosne značajke u slučaju da korisnik zaboravi podesiti jačinu stiska i krene prihvaćati predmet.

Potrebno je omogućiti da se objekti nepravilnog oblika prihvaćaju sa svim prstima proteze. Time će se omogućiti da se ujednači opterećenje u tetivama i da svi prsti proteze šake djeluju jednakim opterećenjem na površinu objekta.

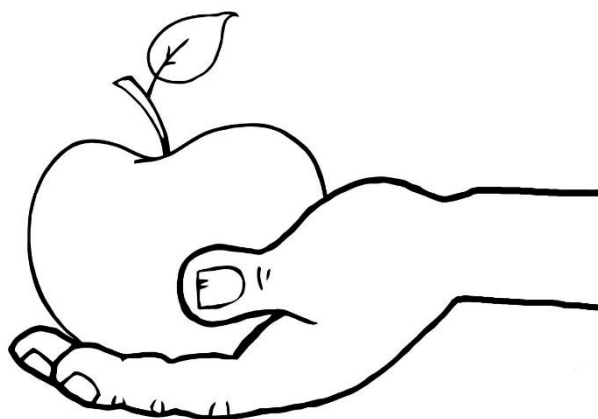
Proteza šake mora biti u mogućnosti izdržati teret školske torbe. Puna školska torba djeteta ne bi trebala premašivati 10% njegove težine. Tjelesna masa djeteta pri upisu u prvi razred iznosi od 19 do 28 kg [52]. Srednja masa jedanaestogodišnjaka iznosi oko 35 kg [53]. To znači da bi masa njegove torbe morala iznositi oko 3,5 kg. No, zna se da to kod nas nije slučaj. Prema podacima [54] masa torbe prvašića iznosi oko 5,3 kg, što je puno više od preporučenog. Prosječna masa školske torbe gotovo je jednaka od 1. do 8. razreda. Za nošenje torbe potreban nam je zahvat hvatanja. Prema tome to je još jedan uvjet koji proteza mora zadovoljiti.

Iako nemamo egzaktno podatke za dopušteno opterećenje ručnog zgloba djece, prema podacima o težini torbe možemo odrediti koje bi opterećenje proteza šake morala izdržati. Možemo još tome dodati da djeca znaju podići i teže predmete od torbe, na primjer vrećice sa namirnicama nakon kupovine. Prema tome od proteze ćemo tražiti da izdrži masu od 10 kg, što znači da u smjeru aksijalne osi, tj. osi pružanja podlaktice, djelovati sila od 100 N.



Slika 49. Prihvat za nošenje torbe [55]

Kod se predmet prihvaća u dlan, težina toga predmeta izaziva u ručnom zglobu reakcijski moment i reakcijsku poprečnu silu koja je jednaka težini predmeta. Često djeca na taj način znaju držati torbu. Stoga ako uzmemo u obzir i nešto rezerve, proteza bi trebala izdržati opterećenje ovakvog tipa do 6 kg.

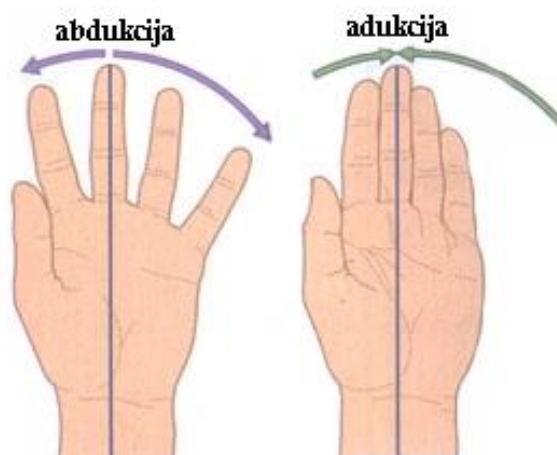


Slika 50. Držanje predmeta u dlanu [56]

Zglobu palca mora biti omogućena adukcija kako bi bilo moguće izvršavati različite zahvate. Kod jednostavne bioničke proteze od OpenBionicsa vidjeli smo da je tamo omogućena adukcija u rasponu od neutralnog položaja pa i više od  $100^\circ$ . Za našu protezu potrebna je tolika mogućnost adukcije zgloba palca tako da on može zajedno sa kažiprstom izvršiti prihvat predmeta vrhovima prstiju koji se koristi kod hvatanja sitnih predmeta. Također predviđena je fleksija zgloba palca od  $15^\circ$  u odnosu na neutralni položaj.

Potrebno je da fleksija zgloba između članaka palca iznosi između  $70^\circ$  do  $90^\circ$ . Nikakvi drugi pokreti u tom zglobu nisu potrebni. Fleksije zglobova prstiju, te proksimalnih i distalnih zglobova između članaka prstiju dane su u tablicama u 2. poglavlju. Prema tome uputno je da proteza šake zadovoljava te raspone fleksije.

Kad je šaka u opuštenom položaju vrhovi prstiju su odvojeni jedni od drugih. Abdukcija prstiju mjeri se u odnosu na srednji prst koji stoji ravno u pravcu podlaktice. Ta abdukcija važna je na primjer kod prihvata predmeta sferičnog oblika, gdje prsti moraju obuhvatiti predmet. Fleksijom prstiju kut abdukcije se smanjuje. Kod stisnute šake prsti se međusobno dodiruju i sveze u zglobovima ne daju im mogućnost abdukcije. Osim što abdukcijom prstiju protezi šake dajemo mogućnost sferičnog hvata, kod fleksije imamo mogućnost prihvaćanja tankih predmeta, poput papira ili ravnala, između prstiju. Time dobivamo četiri nova mjesta za mogući prihvata predmeta. Kut početne abdukcije ovisi o dimenzijama šake. Svakako je potrebno paziti na to da taj kut ne bude prevelik kako pri fleksiji ne bi došlo do zapijanja prstiju.



Slika 51. Abdukcija i adukcija prstiju [57]

U sklopu školskog programa je i nastava likovnog. Na likovnom se djeca koriste temperama, vodenim bojama, plastelinom, glinom, itd. To nameće određene zahtjeve za vodootpornošću, otpornošću na nečistoće i lako čišćenje proteze. Rješenje za taj problem bi mogla biti rukavica koja se prije takvih aktivnosti navuče na protezu šake. Nakon obavljenog posla ta se rukavica skida, a proteza šake će ostati čista.

Aktivnost koja spada u vanškolske aktivnosti, a može i spadati u školske obaveze je korištenje računala. Tu možemo i svrstati korištenje mobitela, tableta i touchpada. Iako se dijete može koristiti zdravom rukom pri radu na računalu, potrebno bi bilo da se pomoću proteze može

tipkati po tipkovnici ili baratati tabletom kako bi se vježbala motorika i suradnja ruke na kojoj se nosi proteza sa zdravom rukom. Kod tipkanja je potrebno da ručni zglob radi pronaciju od 80° do 90°, svi prsti su savijeni osim kažiprsta koji je neutralnom položaju ili u laganoj fleksiji kao kod prirodnog, opuštenog položaja.

U slobodno vrijeme djeca provode većinu vremena igrajući se unutar kuće ili na otvorenom. Unutar kuće, djeca se najčešće igraju sa svojim igračkama, slažu kocke, slagalice, igraju se s lutkama, igraju društvene igre, kartaju se... To su sve aktivnosti koje zahtijevaju više manje precizne pokrete i različite vrste zahvata. Uvjeti u kućama su različiti, neke su više čiste, neke su manje čiste, u nekima ima više prašine, u nekima manje. U takvim različitim uvjetima potrebno je omogućiti nesmetan rad proteze šake.

Kod obroka potrebno je da proteza može izvesti različite prihvate koji služe za hvatanje žlice, vilice i noža, te da se proteza može brzo prilagoditi kako bi se omogućilo držanje čaše pri točenju pića. Također kod obroka se može dogoditi da se slučajno hrana prospe po protezi ili da se smoči. Najjednostavnije rješenje za zaštitu proteze šake od vanjskih utjecaja je da se na nju navuče rukavica koja će je štititi od nečistoća, vode, prašine i ostalih prljavština.

Autonomija bioničke proteze šake u školi i kod kuće nije toliko važna, budući da se uvijek mogu negdje na strani čuvati napunjene baterije. Mora se omogućiti brza i sigurna izmjena ispražnjene baterije kako bi dijete moglo nastaviti sa svojim aktivnostima. Na mjestima gdje dijete duže boravi trebali bi stajati i punjači kako bi se mogle napuniti ispražnjene baterije.

Što se tiče igranja na otvorenom, tu vladaju znatno teži uvjeti. Umjesto preciznosti tu se od bioničke proteze šake očekuje robusnost. Opterećenja na ručni zglob i na prste su nešto veća u odnosu na kućnu uporabu. Djeca se igraju u pijesku, po prašini i po blatu, te je bitno zaštititi protezu šake od tih utjecaja. Stoga je potrebno izraditi prste i mehanizam za pomicanje prstiju takav da mu ne smetaju ti uvjeti. Pošto na otvorenom vladaju različiti vremenski uvjeti potrebno je protezu prilagoditi i tim zahtjevima. Elektroničke komponente trebaju biti izolirane kako na njih ne bi imala utjecaja voda ili vlaga. Aktuator mora biti vodootporan, a dobra bi bila i mogućnost da se može lako skinuti. Na tetive ne smije imati utjecaja vlaga. Proteza šake mora imati mogućnost da se nakon igre može skinuti sa proteze podlaktice, isprati pod mlazom vode i osušiti kako bi bila spremna sa sljedeću uporabu.

Pošto se bionička proteza koristi van kuće dobro bi bilo da prsti proteze stoje u prirodnom položaju. To znači da bi prsti trebali biti lagano savijeni prema dlanu kako bi se bioničkoj ruci

dao prirodan izgled kod hodanja. U tom položaju prsti bi trebali biti u abdukciji, a kod zatvaranja šake trebaju se približavati jedni drugima dok se ne dotaknu.

Za vožnju bicikla ili romobila potrebna je mogućnost supinacija ručnog zgloba do  $90^\circ$ . Ručice upravljača potrebno je prihvatiti čvrstim stiskom radi sigurnosti i stabilnosti u vožnji, kako pri skretanju prsti proteze ne bi skliznuli. Također kod skretanja potrebna je ularna i radijalna devijacija ručnog zgloba od  $10^\circ$ . Fleksija i ekstenzija ručnog zgloba nisu prijeko potrebne. Najbolje bi bilo da se u ručni zglob ugrade opruge ili da se izradi od nekog elastičnog materijala koji će ovisno o intenzitetu opterećenja dopuštati otklone u smjeru fleksije i ekstenzije te ularne i radijane devijacije. Potrebna je adukcija zgloba palca od oko  $20^\circ$  do  $30^\circ$ . Zahtjevi za fleksijom ostalih zglobova prstiju i zgloba palca mogu se odrediti prema podacima iz tablica za raspone pokreta iz 2. poglavlja.

Kod prihvaćanja različitih objekata s tla, poput kamena i štapova, postoji potreba za rotacijom ručnog zgloba i fleksijom zglobova prstiju i zglobova palca. Potrebna rotacija ručnog zgloba su u rasponu do  $90^\circ$  za supinaciju i  $70^\circ$  za pronaciju. Potrebna adukcija zgloba palca može iznositi jednako kao i kod prihvata volana, od  $20^\circ$  do  $30^\circ$ . Fleksija ostalih zglobova prstiju potrebna je prema izmjenjenim podacima za raspone kretanja. Budući da se hvataju predmeti nepravilnih oblika, potrebno je da se predmet prihvati sa svim prstima i da u svim tetivama proteze šake vlada isto opterećenje.

Potrebna je abdukcija prstiju u zglobovima za izvođenje sferičnog hvata. Time bi se omogućio prirodniji prihvati loptica. Pri fleksiji je potrebno da se prsti približavaju jedni drugima kako bi se pritisak prstiju koncentrirao na manju površinu.

Kod aktivnosti na otvorenom ne zahtjeva se posebna regulacija pritiska prstiju bioničke šake, već se zahtjeva samo njihova fleksija i vraćanje u njezin prirodni položaj. Budući da su kod igre na otvorenom potrebni jači zahvati, jer se manipulira sa težim predmetima, potreban je jači aktuator i jače tetive kako bi se prstima bioničke proteze mogli stvarati veći pritisci.

Prisutna su i veća opterećenja. Stoga konstrukcija mora biti u mogućnosti izdržati ih. Prema tome možemo predvidjeti da bi se mogla javiti opterećenja od 15 kg pri nošenju, iako je vrlo malo vjerojatno da će neki desetogodišnjak moći podići više od trećine svoje mase. Za držanje predmeta u dlanu isto tako možemo predvidjeti mase do 8 kg.

Budući da su predmeti s kojima se djeca igraju na otvorenom ponekad vrlo grubi i hrapavi, bilo bi potrebno da su prsti bioničke proteze pokriveni nekakvim gumenim kapičama. Još bi bilo bolje da su cijeli izrađeni od gumenog materijala. Time bi se značajno smanjilo trošenje materijala uzrokovano rukovanjem takvim predmetima.

Od proteza namijenjenih za igru na otvorenom potreba za autonomijom je veća. Dijete može ići nekamo na cjelodnevni izlet gdje je potrebno da baterija izdrži cijeli dan, ili se zateći u situaciji da ne može napuniti ispražnjenu bateriju. Zbog toga će biti potrebne baterije većeg kapaciteta kako bi se bionička proteza mogla duže vremena koristiti.

#### **4.2.2. Analiza zahtjeva**

Analizom prethodnih zahtjeva možemo uočiti da kod nekih aktivnosti djeteta bionička proteza mora ispuniti složenije zahtjeve, dok su kod drugi aktivnosti ti zahtjevi znatno jednostavniji. Također kod pojedinih aktivnosti pojavljuju se i zahtjevi koji su kontradiktorni jedni naspram drugih. Tako se na primjer kod obavljanja školskih obaveza od bioničke proteze očekuje da izvodi preciznije i finije pokrete, dok se kod korištenja proteze na otvorenom od nje očekuje da izvršava jače pritiske prstima.

Zbog toga što postoje različiti zahtjevi za korištenje bioničke proteze za školske obaveze i kod kuće od onih za korištenje na otvorenom, može se predložiti izrada dviju protezi šake koje će ispunjavati zahtjeve za određene aktivnosti. Stoga možemo izraditi jednu protezu šake koja će se koristiti u školi i kod kuće kada je potrebno obavljati preciznije poslove sa više mogućih vrsta zahvata i drugu, koja će služiti za igru na otvorenom, te će imati mogućnost podnijeti veća opterećenja, biti otpornija na trošenje, imati mogućnost izvođenja jačih zahvata i dulje autonomije. Potrebno je izraditi prihvat bioničke šake na protezu podlaktice koji će omogućiti brzu izmjenu proteza šake, a da u isto vrijeme taj prihvat bude siguran.

Sada će prethodno definirani zahtjevi biti podijeljeni u dvije skupine koje određena proteza mora ispunjavati.

#### **4.2.3. Bionička proteza šake namijenjena za školske aktivnosti**

Bionička proteza šake namijenjena za školske aktivnosti treba ispunjavati slijedeće zahtjeve:

- Potrebna je pokretljivost ručnog zgloba. Takva mogućnost nije zamijećena kod konkurentskih jednostavnih bioničkih proteza šake. Uobičajeno je kod tih proteza ručnog zgloba fiksiran i nema mogućnost namještanja. Za potrebe držanja olovke pri pisanju potrebna je pronacija ručnog zgloba oko 10° do 20°. Za potrebe izvedbe različitih vrsta zahvata potrebna je supinacija do 70° i pronacija do 90°. Za potrebe pisanja se u određenim uvjetima pojavljuje se potreba za ularnom devijacijom do 5°.

Uobičajene vrijednosti pasivne radijalne devijacije su oko  $30^\circ$ , a pasivne ulnarne devijacije oko  $35^\circ$ . Potreba za fleksijom i ekstenzijom ručnog zgloba nije tako velika.

- Budući da imamo pokretljiv ručni zglob postavlja se zahtjev za mogućnosti brzog i lakog namještanja kuta pronacije i supinacije. Ručni zglob proteze se namješta pomoću druge ruke. Potrebno je ograničiti kretanje zgloba, tj. rotaciju šake.
- Predviđamo da će dijete nositi terete mase do 10 kg, a u dlanu držati terete mase do 6 kg. Stoga se od proteze šake očekuje da izdrži ta opterećenja uz određenu sigurnost.
- Zglob palca mora imati toliku adukciju da ima mogućnost izvođenja zahvata predmeta zajedno sa kažiprstom, tj. da su palac i kažiprst u opoziciji. Adukciju palca moguće je izvoditi aktivno, pomoću aktuatora, ili pasivnim namještanjem. Kod pasivnog namještanja potrebna je mogućnost zaključavanja položaja palca. Potrebno je istaknuti da većina jednostavnih bioničkih proteza na tržištu nema mogućnost namještanja adukcije palca, već je on postavljen pod određenim fiksnim kutom. Potrebna fleksija zgloba palca je  $15^\circ$ . Fleksija zgloba između članaka palca u odnosu na neutralni položaj iznosi  $70^\circ$  do  $90^\circ$ .
- Zahtijevane fleksije zglobova prstiju, proksimalnih i distalnih zglobova između članaka prstiju su određene prema podacima iz tablica. Potreban je određen kut abdukcije prstiju radi mogućnosti izvedbe sferičnog prihvata.
- Proteza šake mora imati mogućnost prepoznavanja kada je predmet u zahvatu. Tako će se moći hvatati široki i uski predmeti bez straha da će se potrgati tetive koje služe za fleksiju šake ili da će doći do preopterećenja aktuatora.
- Potrebno je dati korisniku mogućnost da sam dozira jačinu pritiska, dali pomoću trimera ili pomoću dugmadi. Mikrokontroler mora voditi računa da ne dođe do prejakog ili preslabog stiska, te na vrijeme upozoriti korisnika, na primjer kad korisnik zaboravi podesiti jačinu pritiska. Dodavanjem ovih značajki našoj protezi omogućili bi znatno povoljniji položaj na tržištu jednostavnih bioničkih proteza jer konkurentski proizvodi ne nude takve mogućnosti.
- Kod prihvata nepravilnih predmeta potrebno je da svi prsti proteze šake dodiruju površinu predmeta, te da je jačina stiska kojom se djeluje na predmet u svim prstima jednaka.
- Mogućnost zaključavanja položaja kažiprsta u neutralnom položaju ili u stanju lagane fleksije radi obavljanja zadaće tipkanja. Ostali prsti moraju biti savijeni.



- Sprječavanje nečistoća da onemoguće funkcionalnost proteze i otpornost na prskanje vodom tokom nastave likovne kulture. Uvjeti čistoće u kućama ili stanovima su veoma različiti, stoga je potrebno protezu šake zaštititi od prašine i nečistoća kako bi održali njenu funkcionalnost.

#### **4.2.4. Bionička proteza šake namijenjena za igru na otvorenom**

Bionička proteza šake namijenjena za igru na otvorenom treba ispunjavati slijedeće zahtjeve:

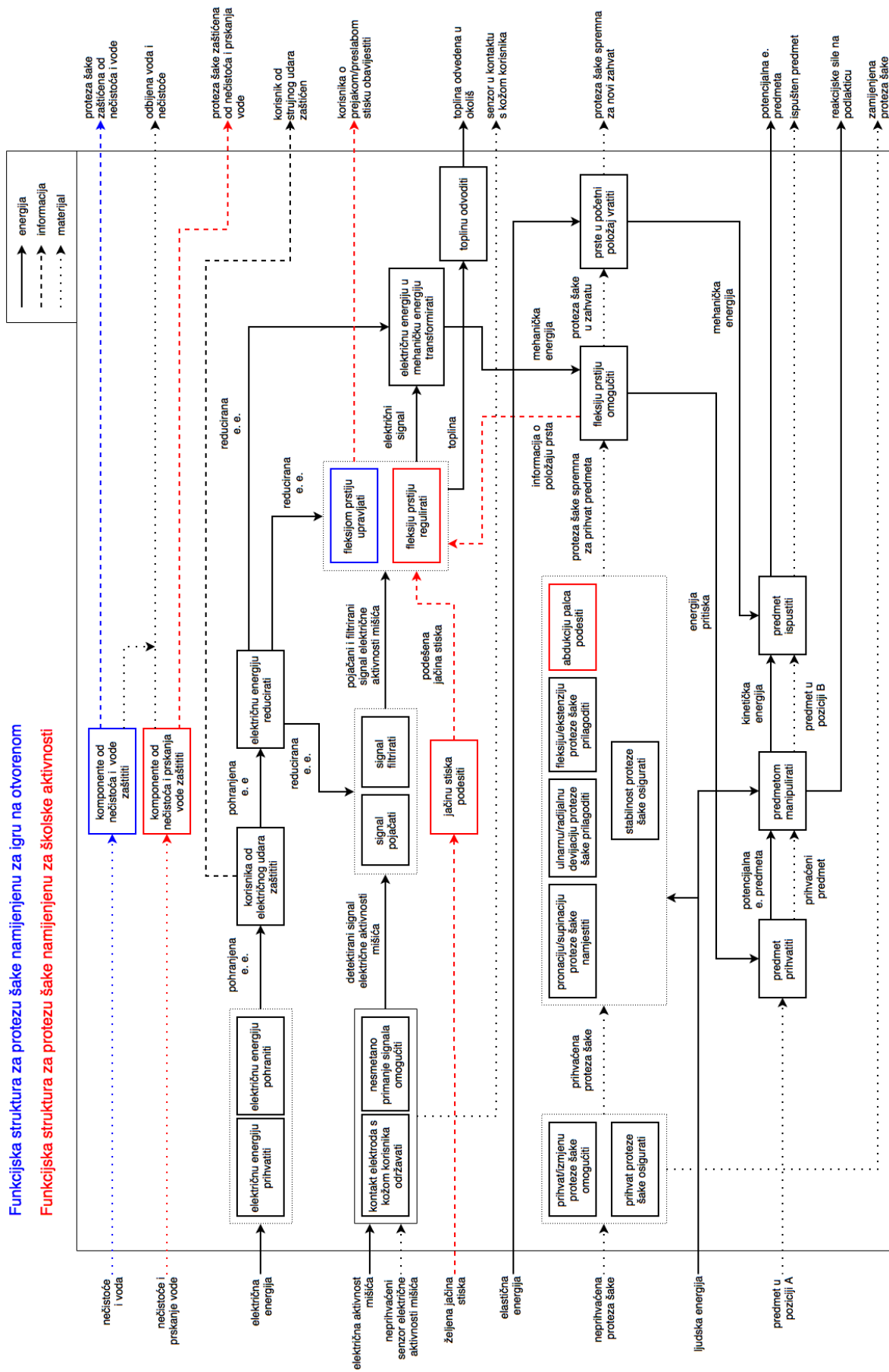
- Postavlja se potreba za rotacijom ručnog zgloba proteze šake, što nije zamijećeno kod drugih jednostavnih proteza. Potrebna supinacija mora se moći izvoditi u rasponu od  $80^\circ$  do  $90^\circ$ , a pronacija u rasponu do  $70^\circ$ . Uz to potrebna je ularna i radijana devijacija do  $10^\circ$ . Potreba za fleksijom i ekstenzijom ručnog zgloba nije prevelika, ali može biti korisna.
- Proteza se mora moći brzo izmijeniti, a spoj sa podlakticom mora biti čvrst i siguran. U zglobu je potrebno ograničiti slobodnu rotaciju šake. Pronacija i supinacija zgloba mora se moći lako podesiti pomoću druge ruke i potrebno je omogućiti zaključavanje zgloba u određenoj poziciji.
- Dobro bi bilo da prsti proteze stoje u prirodnom položaju. Time će se bioničkoj protezi šake dati prirodniji izgled.
- Zglob palca može biti fiksiran, s tim da kut abdukcije iznosi  $20^\circ$  do  $30^\circ$ . Taj kut abdukcije dat će nam mogućnost izvođenja pokreta hvatanja. Fleksija zgloba između članaka palca u odnosu na neutralni položaj iznosi  $70^\circ$  do  $90^\circ$ .
- Fleksije zglobova prstiju, te proksimalnih i distalnih zglobova između članaka prstiju su određene prema podacima iz tablica. Potreban je određen kut abdukcije prstiju radi mogućnosti izvedbe sferičnog prihвата.
- Predviđeno opterećenje na protezu šake kod nošenja iznosi 15 kg, dok za držanje predmeta u dlanu možemo predvidjeti opterećenje mase do 8 kg.
- Bionička proteza šake mora biti otporna na blato, prašinu i vodu. U takvim uvjetima očekuje se potpuna funkcionalnost proteze šake. Također, proteza šake mora biti otporna na sve vremenske uvjete.
- Elektroničke komponente trebaju biti izolirane kako im ne bi naštetila voda i vlaga. Servomotor mora biti vodootporan. Voda i vlaga ne smiju utjecati na elastična svojstva tetiva, a prisutnost prljavštine ne smije uzrokovati njihovo preveliko trošenje.

- Proteza šake se nakon uporabe mora moći isprati pod mlazom vode kako bi bila spremna za sljedeću uporabu.
- Kako bi se spriječilo trošenje proteze uslijed rukovanja grubim i hrapavim predmetima, prsti proteze moraju biti izrađeni od materijala otpornog na trošenje.

#### **4.2.5. Funkcijska struktura**

Na temelju utvrđenih zahtjeva potrebno je izraditi funkcijsku strukturu. Prema zahtjevima možemo uočiti da su pojedini zahtjevi kod obje bioničke proteze šake identični. Slijedom toga i pojedine funkcije koje moraju proteze ispuniti će biti jednake. Prema tome bionička proteza šake za igru na otvorenom i bionička proteza šake za školske aktivnosti tvore familiju proizvoda.

Za obje proteze šake prikazana je jedna funkcijska struktura. Funkcije koje su im zajedničke nalaze se u pravokutnicima sa crnim obrubom. Funkcije bioničke proteze šake za igru na otvorenom napisane su u pravokutnicima sa plavim obrubom, dok su funkcije bioničke proteze šake za školske aktivnosti napisane u pravokutnicima sa crvenim obrubom. Također energija, signal i materijal koji su dodatno potrebni za pojedinu bioničku šaku ili su različiti od one druge, označeni su plavom i crvenom bojom.



Slika 52. Funkcijska struktura

## 5. SMJERNICE ZA OBLIKOVANJE BIONIČKE PROTEZE ŠAKE

Nakon definiranja konstrukcijskih zahtjeva možemo pristupiti traženju konstrukcijskih rješenja koji će ih ispuniti. U ovoj fazi točno ćemo definirati koje zahtjeve možemo ispuniti, a koje ne. Traženje konstrukcijskih rješenja vrlo je zanimljiv i kreativan posao, a inspiraciju za rješenja ponekad možemo pronaći promatrajući sasvim jednostavne komponente i način na koji one funkcioniraju.

### 5.1. Prihvat bioničke proteze šake na protezu podlaktice

Kod analize tržišta uočeno je da napredne bioničke proteze imaju mogućnost izmjene segmenta šake, a zglob podlaktice sa šakom ima mogućnost pasivne ili aktivne rotacije, te većinom pasivne fleksije i ekstenzije. Kod jednostavnih proteza imamo uglavnom dva rješenja za spajanje podlaktice i dlana. Kod prvog rješenja proteza podlaktice i dlan su spojeni u cjelinu tako da ručni zglob ne postoji, a kod drugog rješenja proteza podlaktice i proteza šake su spojeni sa fiksnom vezom. To znači da kod jednostavnih proteza nemamo mogućnost pasivnog namještanja ručnog zgloba.

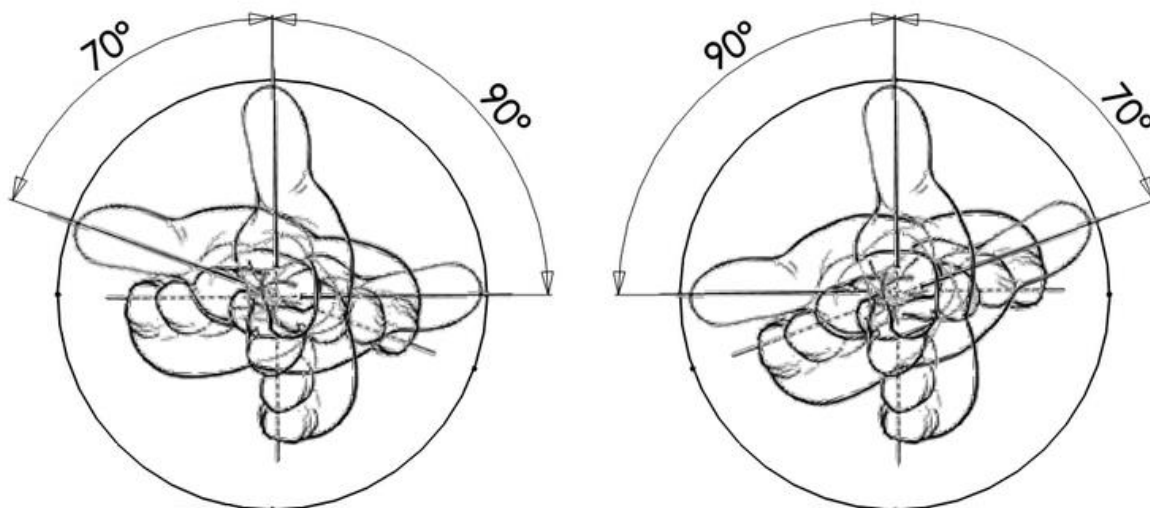
Budući da mi imamo dvije proteze šake, jednu za školske aktivnosti, a drugu za igru na otvorenom potrebno je napraviti takav spoj sa protezom podlaktice koji će biti kompatibilan sa obje proteze šake i sa mogućim budućim rješenjima. Šaka se od proteze podlaktice mora moći jednostavno i brzo odvojiti i isto tako spojiti. Spoj mora biti čvrst i siguran te mora podnijeti zadana opterećenja. Ručni zglob mora moći izvršavati zahtijevane opsege kretanja koji su definirani zahtjevima ciljane grupe korisnika.

Ideju za spajanje proteze podlaktice sa bioničkom šakom možemo pronaći kod primjera kandžaste spojnice koja služi za spajanja cijevi za zalijevanje. Ovu spojnicu je vrlo lako spojiti i razdvojiti. Spojnice su vrlo jednostavne, podnose visoke tlakove, aksijalna opterećenja i momente u smjeru poprečnih osi.



**Slika 53. Kandžasta spojnica [58]**

Kod proteze namijenjene za školske aktivnosti (lijevo na slijedećoj slici) potrebna nam je supinacija do  $70^\circ$  i pronacija do  $90^\circ$ , dok je kod proteze namijenjena za igru na otvorenom (desno na slici) potrebna supinacija u rasponu od  $80^\circ$  do  $90^\circ$  i pronacija do  $70^\circ$ .



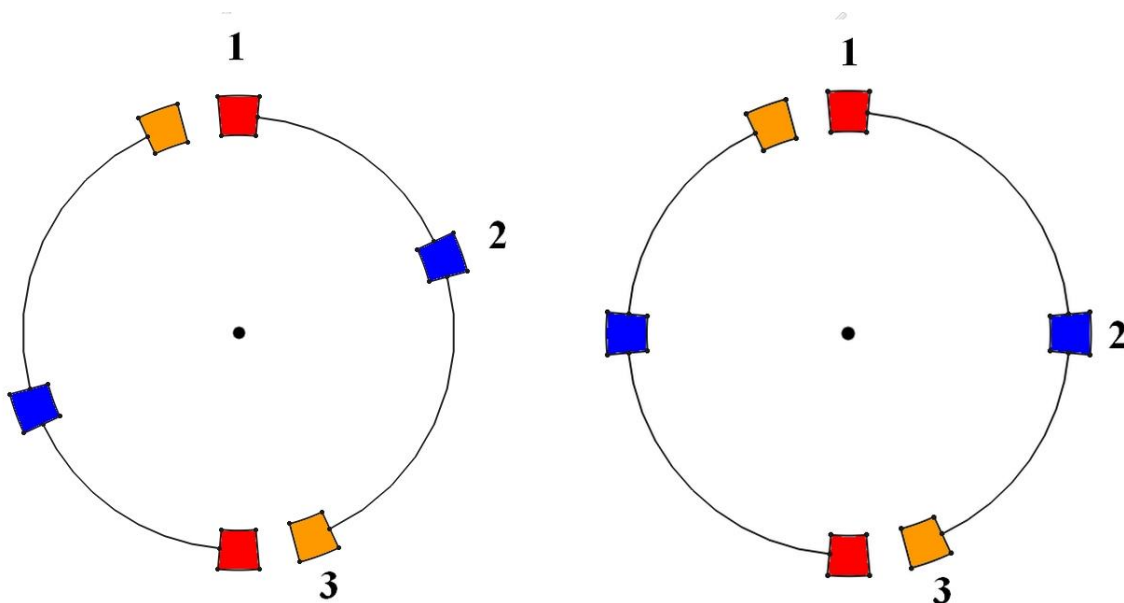
**Slika 54. Zahtijevani rasponi pokreta ručnog zgloba za prvu i drugu protezu**

Kod proteze za školske aktivnosti predvidjeli smo da na dlan djeluje maksimalno opterećenje od 6 kg, a kod proteze za igru na otvorenom 8 kg. Zbog toga ćemo kod proteze za igru na otvorenom, kada je kut supinacije ručnog zgloba  $90^\circ$  postaviti kandže da stoje paralelno sa medijalnom ravninom kako bi izbjegli da na njih djeluje složeno naprezanje. Isto ćemo tako,

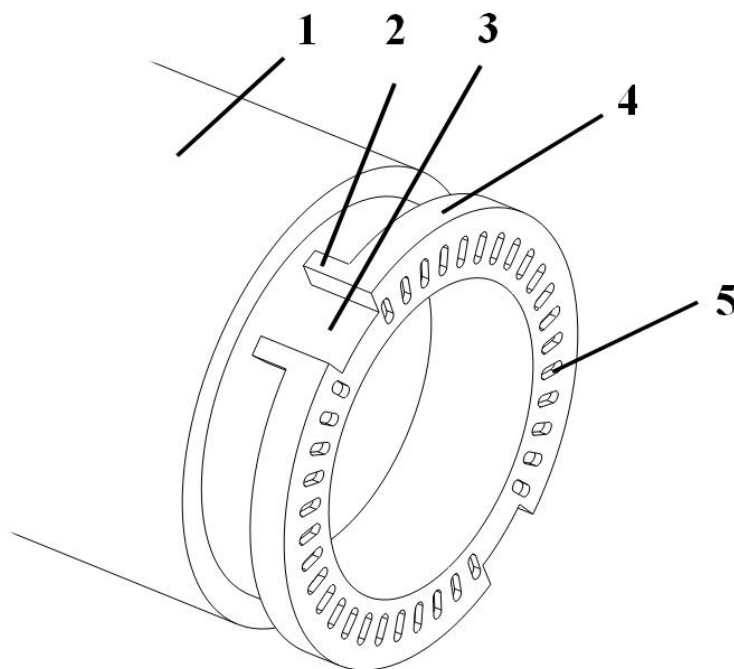
na protezi za školske aktivnosti kad je ručni zglob u supinaciji od  $70^\circ$  postaviti kandže paralelno sa medijalnom ravninom.

Na slijedećoj slici vidimo kako stoje kandže u tri položaja rotacije ručnog zgloba: maksimalnoj supinaciji, neutralnom položaju i maksimalnoj pronaciji. Kod proteza šake za školske aktivnosti (lijevo na slijedećoj slici) kod supinacije od  $70^\circ$  gornja kandža stoji u položaju 1 (donja kandža je nasuprot gornjoj), rotacijom proteze šake u neutralni položaj gornja kandža dolazi u položaj 2, a pronacijom proteze šake za  $90^\circ$  gornja kandža dolazi u položaj 3. Kod proteza šake za igru na otvorenom kod supinacije proteze šake od  $90^\circ$  gornja kandža je u položaju 1, rotacijom proteze šake u neutralni položaj gornja kandža klizi prema položaju 2, a kod pronacije od  $70^\circ$  gornja kandža se nalazi u položaju 3. Ovu shemu ćemo iskoristiti za konstrukciju prihvata proteze podlaktice.

Kod obiju šaka raspon pokreta kod rotacije zgloba šake  $160^\circ$ . Time se za svaku kandžu ostavlja  $10^\circ$  slobodnog prostora. Biti će potrebno proračunati s obzirom na zahtjevano opterećenje dali je to dovoljno.



Slika 55. Položaj kandži kod obje proteze za različite kutove rotacije ručnog zgloba

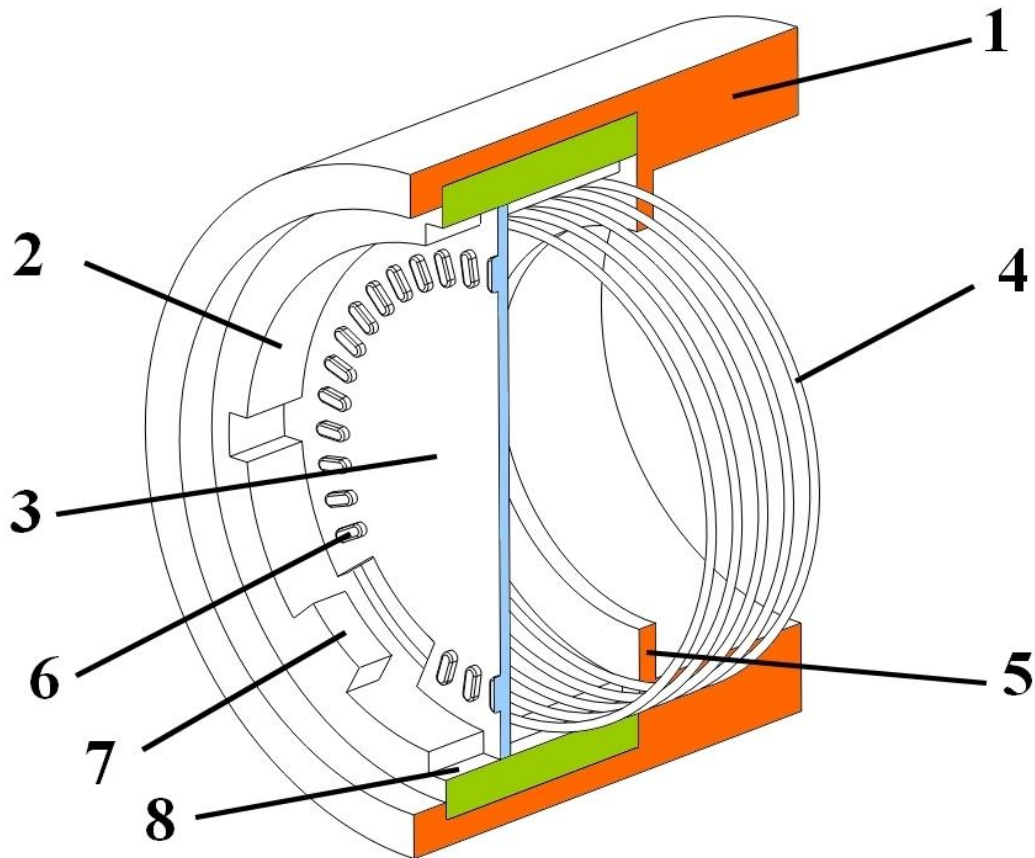


**Slika 56. Prihvat na protezi nadlaktice**

Na prethodnoj je slici prikazano rješenje spoja na protezi podlaktice (1). Kandže sa proteze šake prolaze kroz utore (3). Graničnici (2) služe tome da se proteza šake ne bi odvojila od proteze podlaktice pri rotaciji. Također zadaća graničnika je da ograniče raspon rotacije proteze šake. Kandže proteze šake kližu po graničnom prstenu (4). Po frontalnoj strani distalnog djela podlaktice urezani su utori (5) koji služe za ograničenje rotacije proteze šake. Kako bi se granični prsten manje trošio, dobro bi bilo razmotriti da se on izradi od nekog materijala koji dobro podnosi trošenje te način njegove montaže na protezu podlaktice.

Na sljedećoj slici prikazan je dio proteze šake (1) na kojemu se nalazi sklop za spajanje s protezom podlaktice. Radi bolje preglednosti sklop je prikazan u presjeku. U protezu šake ugrađen je prsten (2) koji na sebi ima kandže (7). Te kandže ulaze u utore na protezi podlaktice i kližu po graničnom prstenu. Na prstenu su izrađeni utori (8) koji koriste kako bi se pločica (3) sa izbočenjima (6) mogla slobodno gibati u aksijalnom smjeru. Druga namjena tih utora je da spriječe rotaciju pločice. U protezi šake nalazi se graničnik (5). Između tog graničnika i pločice (3) nalazi se opruga (4). Opruga ima dvostruku ulogu. Brine za to da su kandže u stalnom kontaktu sa graničnim prstenom na protezi podlaktice i gura pločicu sa izbočenjima prema proksimalno, tako da ta izbočenja uđu u utore na protezi podlaktice. Taj spoj onda sprječava slobodnu rotaciju ručnog zgloba, a radi na sličnom principu kao čegrtaljka. Kod nekog

graničnog aksijalnog momenta, kada namještamo položaj ručnog zgloba, doći će do preskakanja izbočenja u drugi utor te će se promijeniti položaj proteze šake.

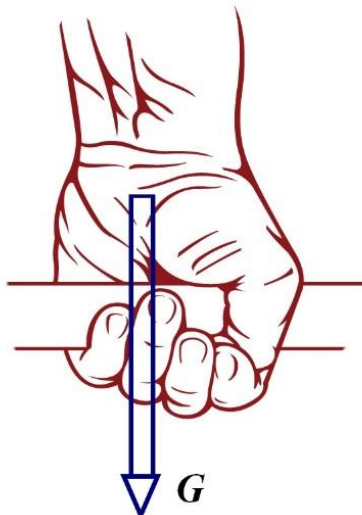


Slika 57. Prihvat na protezi šake

Ovim rješenjima omogućili smo samo rotaciju proteze šake, no nismo omogućili njenu fleksiju i ekstenziju te ularnu i radijalnu devijaciju. Za takav mehanizam nema dovoljno mjesta na protezi šake pa bi se on trebao riješiti na protezi podlaktice. Druga mogućnost je da se između proteze podlaktice i proteze ruke stavi još jedan sklop, baš kao što između radiusa, ulne i kostiju zapešća postoje kosti pešća koji bi omogućio pokrete fleksije, ekstenzije, ularne i radijalne devijacije. Taj sklop bi značajno zakomplicirao konstrukciju i povećao složenost sa dodatnim komponentama, što ne ide ruku pod ruku sa niskom cijenom izrade.

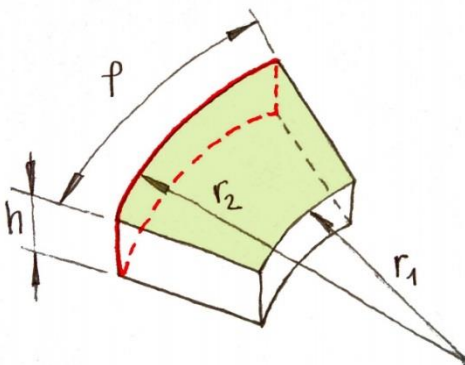
Budući da na protezu šake djeluju određena opterećenja, potrebno je izračunati kolika je potrebna površina i debljina kandži. Kod proteze za igru na otvorenom predvidjeli smo da na protezu šake kod nošenja djeluje masa od 15 kg. To znači da na ručni zglob djeluje sila  $G$  od gotovo 150 N.





Slika 58. Sila na ručni zglob kod nošenja tereta [59]

Geometrija kandže prikazana je na slijedećoj slici. Na gornju površinu (zeleno sjenčano) jedne kandže djeluje opterećenje  $G/2$ . Stoga je za tu površinu potrebno napraviti proračun dopuštenog dodirnog pritiska. Na stražnju površinu (označena crvenim konturama) djeluje smik.



Slika 59. Geometrija kandže

### **Dopušteni dodirni pritisak**

Formula za proračun dopuštenog dodirnog pritiska izgleda ovako:

$$p = \frac{F}{A} \leq p_{dop},$$

gdje je  $p$  pritisak na gornju površinu kandže ( $\text{N/mm}^2$ ),  $F = G/2$  sila (N),  $A$  gornja površina kandže ( $\text{mm}^2$ ), a  $p_{dop}$  dopušteni dodirni pritisak ( $\text{N/mm}^2$ ) koji ovisi o materijalu.

Gornja površina kandže ima oblik isječka kružnog vijenca, čija se površina računa ovako:

$$A = \frac{(r_2^2 - r_1^2) \cdot \pi \cdot \varphi}{360},$$

gdje su  $r_1$  i  $r_2$  unutarnji i vanjski promjer kandže (mm), a  $\varphi$  kut kandže ( $^\circ$ ).

### **Dopušteno smično naprezanje**

Formula za proračun dopuštenog smičnog naprezanja izgleda ovako:

$$\tau = \frac{F}{A} \leq \tau_{dop},$$

gdje je  $\tau$  smično naprezanje ( $\text{N/mm}^2$ ),  $F = G/2$  sila (N),  $A$  površina smicanja ( $\text{mm}^2$ ), a  $\tau_{dop}$  dopušteno smično naprezanje ( $\text{N/mm}^2$ ) koje ovisi o materijalu.

Smična površina se računa ovako:

$$A = \frac{r_2 \cdot \pi \cdot \varphi \cdot h}{180},$$

gdje je  $r_2$  vanjski promjer kandže (mm),  $\varphi$  kut kandže ( $^\circ$ ), a  $h$  debljina kandže (mm).

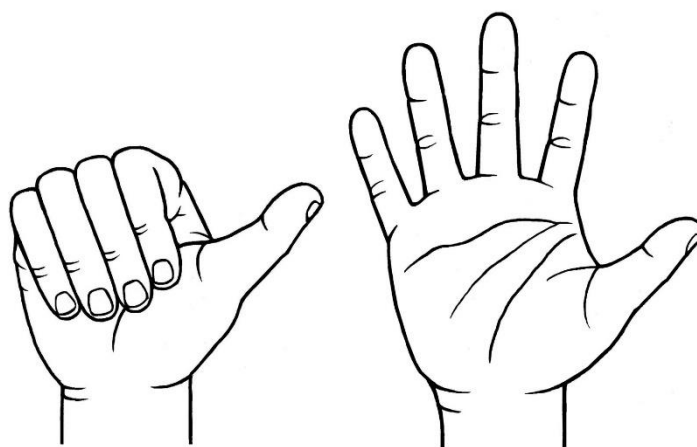
$p_{dop}$  i  $\tau_{dop}$  ovise o vrsti materijala koji odaberemo. Za izradu kandži bi najbolje bilo da odaberemo metalni materijal poput bronce koja ima dobra klizna svojstva. Kada odaberemo materijal, moći ćemo saznati njegova svojstva te vrijednosti za dopušteni dodirni pritisak i dopušteno smično naprezanje. Tada nam u gornjim dvjema jednadžbama ostaju četiri nepoznanice. Prema tome trebat ćemo znati ili približno unijeti vrijednosti za dvije nepoznanice, kako bi izračunali preostale.

Na primjer ako uzmemo da je  $\varphi = 10^\circ$ ,  $r_2 = 30$  mm,  $p_{dop} = 10$   $\text{N/mm}^2$  [60], a  $\tau_{dop} = 30$   $\text{N/mm}^2$  dobivamo da je  $r_1 = 18,4$  mm, a  $h = 0,579$  mm.

Vidimo da je debljina kandže  $h$  vrlo mala, a sigurno je da ćemo je kod konstruiranja staviti barem 5 mm, ako ne i više. Sa kutom kandže od  $10^\circ$  dobivamo zadovoljavajući unutarnji promjer, što znači da ćemo moći ispuniti zahtjev za rotaciju ručnog zgloba u rasponu od  $160^\circ$ . Također time smo potvrdili da će proteza šake moći izdržati ne samo zahtijevana opterećenja, nego i znatno veća.

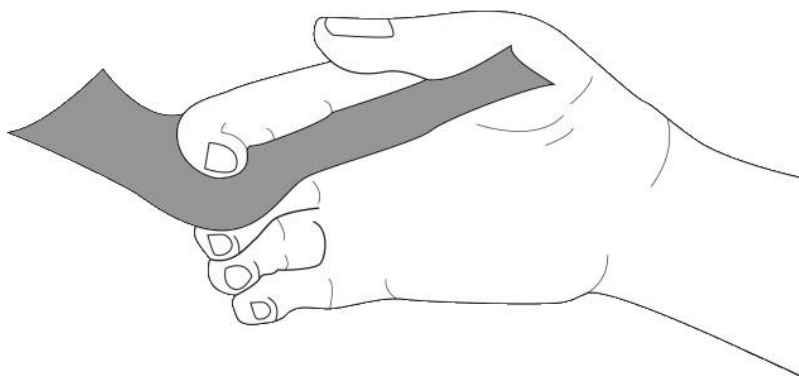
## 5.2. Abdukcija i adukcija prstiju

U prirodnom položaju vrhovi prstiju su odvojeni jedni od drugih. Fleksijom prstiju taj se razmak između vrhova prstiju smanjuje. Kad je dlan zatvoren prsti dodiruju jedni druge. Kod nekih jednostavnih bioničkih proteza prsti rade fleksiju i ekstenziju u paralelnim ravninama, pa se zato oni nikad ne dodiruju. Postavlja se pitanje zašto bi nam bila potrebna abdukcija kad su prsti u neutralnom položaju, a adukcija pri fleksiji? Kao prvo time dobivamo mogućnost sferičnog zahvata što daje veću funkcionalnost bioničkoj protezi i prihvata sferičnih objekata poput teniskih loptica ili kugli za biljar.



Slika 60. Abdukcija i adukcija prstiju kod otvorene i zatvorene šake [61]

Slijedeće što dobivamo je mogućnost prihvata tankih predmeta, poput listova papira ili računa između prstiju. Time dobivamo još četiri mjesta između prstiju gdje možemo prihvatiti objekte.



Slika 61. Prihvat lista papira između prstiju [62]

Uz mogućnost dodatnih prihvata abdukcijom prstiju u neutralnom položaju bionička proteza šake izgleda mnogo prirodnije, baš kao i kod pomicanja prstiju. Potrebne kutove abdukcije možemo definirati tek nakon što znamo sve potrebne dimenzije za konstruiranje proteze šake. Potrebno je pripaziti da taj kut nije prevelik jer se onda prsti neće moći sklopiti i doći će do opterećenja ostalih komponenti proteze.

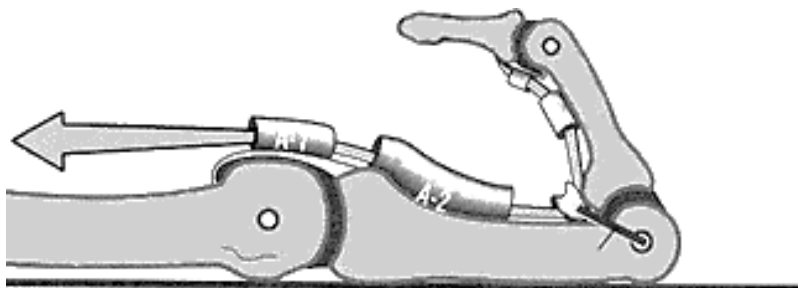
### 5.3. Dizajn prstiju proteze

#### *Bionička proteza namijenjena za školske aktivnosti*

Kod bioničke proteze namijenjene za školske aktivnosti traži se preciznost zahvata. Zbog toga će prsti proteze šake biti u obliku članaka. Broj članaka biti će jednak broju kosti prstiju. Članci prstiju proteze moraju omjerima dužina odgovaraju kostima prstiju. Zatim je potrebno te članke spojiti tako da se omogući rotacija u zglobovima. Zglobovi članaka biti će spojeni pomoću svornjaka.

Kako bi ti zglobovi bili funkcionalni potrebno je naći rješenja za njihovu fleksiju i ekstenziju. Za taj problem postoje dva rješenja. Kod jednog je potrebno u zglobove članaka staviti torzijske opruge kako bi se prsti iz fleksije mogli vratiti natrag u neutralni položaj. Za fleksiju prstiju potrebna nam je tetiva u obliku uzice koju povlači aktuator. Ta uzica prolazi palmarnom stranom prsta sve do vrhova prsta.

Drugo rješenje, koje ćemo iskoristiti radi jednostavnosti, je da imamo dvije uzice, od kojih jedna prolazi palmarnom, a druga dorzalnom stranom do vrha prsta. Ona uzica koja je na palmarnoj strani spaja se na aktuator te je zadužena za fleksiju prsta. Druga uzica koja je na dorzalnoj strani šake je elastična. Ona se pri fleksiji prsta rasteže i napinje, a u fleksiji se steže i vraća prst u neutralan položaj.



Slika 62. Članci prstiju proteze [63]

**Bionička proteza šake namijenjena za igru na otvorenom**

Za protezu šake namijenjenu za igru na otvorenom izradit ćemo prst bez zglobova, kao što je to napravljeno kod proteze šake od OpenBionicsa. Ovdje su članci prstiju spojeni na silikonsku traku te se na taj način dopušta savijanje silikonske trake između članaka prstiju. Silikonska traka će se zbog elastičnosti, nakon prestanka fleksije vratiti u prvobitni položaj. Stoga je kod ovog rješenja potrebna samo uzica koja se spaja na aktuator i čijim potezanjem se izvodi fleksija. Na člancima prstiju se nalaze cjevčice kroz koje se provlači uzica. One imaju mali faktor trenja kako bi se smanjilo trošenje. Ovo rješenje je vrlo dobro zato jer zglob ima veću fleksibilnost i bolje se prilagođava površini objekta. Možda je jedina mana ovog rješenja smanjena torzijska krutost prsta.



**Slika 63. Prst proteze napravljen pomoću silikonske trake [35]**

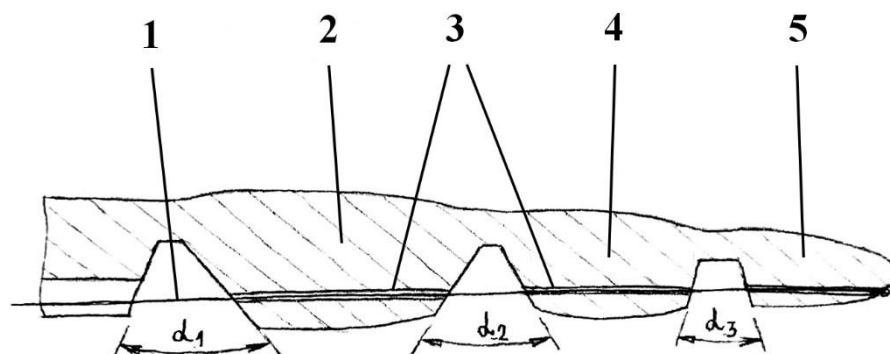
Najbolje rješenje za izradu prstiju bioničke proteze bilo bi da modificiramo prethodno rješenje, te da napravimo cijeli prst iz jednog materijala. Taj materijal mora biti elastičan kako bi se nakon prestanka opterećenja prst vratio u neutralan položaj. Za to bi najbolji materijal bio Ninjaflex, ili neki drugi, slični, materijal kojeg je moguće koristiti za 3D tiskanje. U tablici su dana neka svojstva Ninjaflex materijala.

Izradom prsta bioničke proteze šake iz jednog komada izbjegli smo potrebu za klasičnim zglobovima, kakvi se javljaju kod proteze namijenjene za školske aktivnosti. Na ovakav prst nemaju utjecaja nečistoće ni prašina, što ga čini idealnim za primjenu na protezi za igru na otvorenom.

**Tablica 12. Svojstva materijala Ninjaflex [64]**

vlačna čvrstoća	26 MPa
temperatura taljenja	216° C
gustoća	1040 kg/m <sup>3</sup>
tvrdća po Shoreu A	85
elongacija do pucanja materijala	660 %

Na sljedećoj slici je prikazano predloženo rješenje za izradu prsta bioničke proteze. Na dorzalnoj strani umetnute su cjevčice (3) kroz koje prolazi tetiva (1) sve do vrha prsta. Na prstu se nalaze tri članka, proksimalni (2), medijalni (4) i distalni (5). Palac će imati samo proksimalni i distalni članak. Kutovi  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  i  $\alpha_3$  u skladu su za zahtjevima za raspone gibanja.

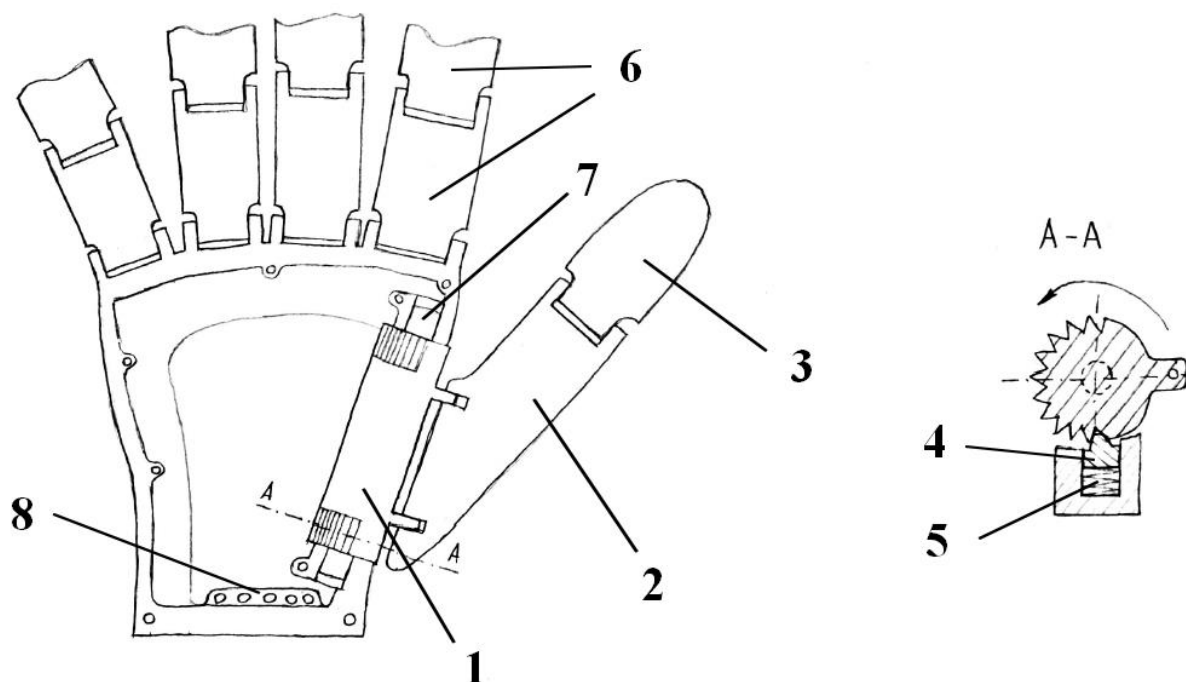
**Slika 64. Predloženo rješenje prsta bioničke šake**

#### 5.4. Abdukcija palca proteze

Za aktivnu abdukciju palca bio bi nam potreban još jedan dodatni aktuator. Dodatni aktuator doprinosi većoj složenosti upravljanja, a vjerojatno sa sobom donosi potrebu za još jednom elektrodom smještenu na nekom drugom mišiću. Pa stoga za jednostavne proteze aktivna abdukcija palca nije baš dobro rješenje.

Pasivno namještanje zgloba palca, kao što je to kod bioničke šake od OpenBionicsa, je vrlo dobro rješenje za jednostavne proteze. Time dobivamo mogućnost izvođenja više različitih pokreta. Na primjer, kad je palac u prirodnom položaju fleksijom prstiju dobivamo lateralni zahvat štipanja. Prelaskom u blagu abdukciju dobivamo prihvat sa tri prsta, palcem, kažiprstom i srednjim prstom, koji služi za držanje olovke. Još veći povećanjem kuta možemo dobiti prihvat vrhovima prstiju, palcem i kažiprstom, koji se koristi za manipuliranje sitnim predmetima.

Konstrukcija mehanizma za abdukciju je malo složenija zato jer treba postojati i mehanizam za zaključavanje pozicije.



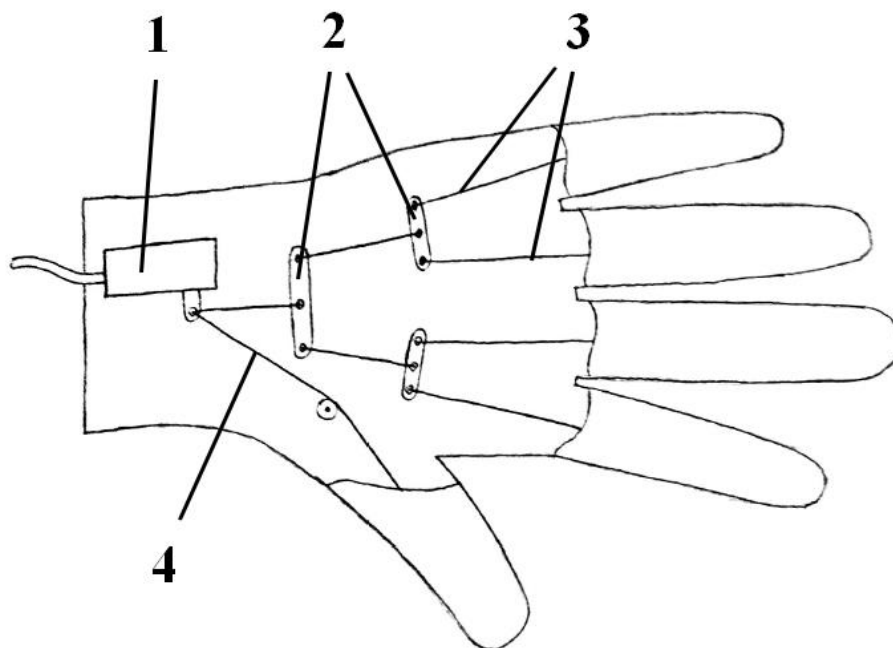
Slika 65. Mehanizam za abdukciju palca proteze

Na prethodnoj slici prikazan je dlan proteze sa palmarne strane. Kako bi omogućili abdukciju palca, proksimalni članak palca (2) spojili smo na bubanj (1). Rukavci bubnja (7) nalaze se u ležištu. Kao što vidimo u presjeku A-A bubanj po lijevoj polovici ima napravljena ozubljenja. U ta ozubljenja ulazi klin (4) kojega pritišće opruga (5). Nakon što zakretanjem palca postignemo dovoljan moment, klin će preskočiti na slijedeće mjesto među zubima. Koliki treba biti taj granični moment kako bi klin preskočio ovisi o svojstvima opruge. Ako je opruga „tvrđa“ biti će potreban veći moment. Mogućnost fleksije zgloba palca iznosi  $15^\circ$ . Na proksimalni članak palca nadovezuje se distalni zglob palca (3) čiji zglob ima mogućnost fleksije do  $90^\circ$ . Članci ostalih prstiju (6) također se spajaju na ovaj dio proteze. Za povratak prstiju u normalan položaj potreban je elastična uzica. Jedan kraj elastične uzice veže na vrhu prsta, a drugi dio na za rupe (8). Ta uzica prolazi dorzalnom stranom prstiju.

### 5.5. Prilagodavanje prstiju obliku predmeta koji se prihvaća

Kod prihvata nekih nepravilnih predmeta, ako koristimo bioničku protezu sa jednim aktuatorom, neće svi prsti doći u kontakt s površinom predmeta. To se događa zato jer su sve tetive prstiju povezane na jedan aktuator. Prema tome kad će palac i još dva prsta doći u kontakt sa predmetom, aktuator će prestati vući i neće doći do kontakta preostalih prstiju sa predmetom. Primjer gdje se događa ovaj problem je sferični prihvata. Kod njega kažiprst i mali prst rade veću ekstenziju nego srednji prst i prstenjak.

Rješenje za taj problem je korištenje zglobnih oslonaca (2). Zglobni oslonci će omogućiti da, nakon što pojedini prsti dotaknu predmet, linearni aktuator (1) nastavi povlačiti tetive (3) ostalih prstiju sve dok se u svim tetivama ne izjednači opterećenje. Tetiva palca (4) spojena je direktno na linearni aktuator. Rješenje pomoću zglobnih oslonaca je prikazano na slijedećoj slici.



Slika 66. Konstrukcijsko rješenje za prihvat predmeta nepravilnog oblika

### 5.6. Aktuatori

Uloga aktuatora kod bioničke proteze šake je da vuče tetive prstiju što uzrokuje fleksiju prstiju. Kod naprednih proteza šake nije rijetkost da se za svaki prst koristi poseban aktuator, uz to koristi se i poseban aktuator za abdukciju zgloba palca.

Kod jednostavnih bioničkih proteza šake koristi se većinom jedan aktuator, jer je to dosta skupa komponenta. Imamo i jednostavne proteze šake, kao što je ona od Open bionics-a koja ima pet



aktuatora. Kod izrade jednostavnih bioničkih proteza šake, cilj nam je da sa čim manje aktuatora možemo ispuniti zahtjeve koji su definirani za određenu skupinu korisnika.

Kod bioničkih proteza koriste se dvije vrste aktuatora. To su linearni aktuatori i servomotori. Razlike u principu rada ovih dviju vrsta aktuatora gotovo da i nema, a jedina je razlika u putanji. Putanja je kod linearnog aktuatora pravac, dok je kod servomotora u obliku kružnog luka. Zbog pravocrtne putanje, u preciznije bioničke proteze se više preferira ugradnja linearnih aktuatora. Kod jednostavnih bioničkih proteza šake koriste se servomotori, jer kod takvih proteza nije toliko bitna preciznost pokreta, a i obični servomotori su puno jeftiniji od linearnih aktuatora. U našim protezama koristit ćemo različite vrste aktuatora.

### ***Bionička proteza namijenjena za školske aktivnosti***

Kod bioničke proteze za školske aktivnosti potrebna je preciznost pokreta, stoga ćemo koristiti linearni aktuator zbog toga jer je njegova putanja pravocrtna. Budući da kod ove šake imamo mogućnost podešavanja jačine pritiska i prepoznavanja kad prsti dodiruju predmeta, to će nam znatno olakšati stvar, za razliku od servomotora gdje je putanja kružna. Linearni aktuator mora imati povratnu vezu položaja kako bi ga mogli regulirati. Za aktuator, uzet ćemo provjereno rješenje koje koristi kompanija Open bionics, a to je minijaturni linearni aktuator PQ12.

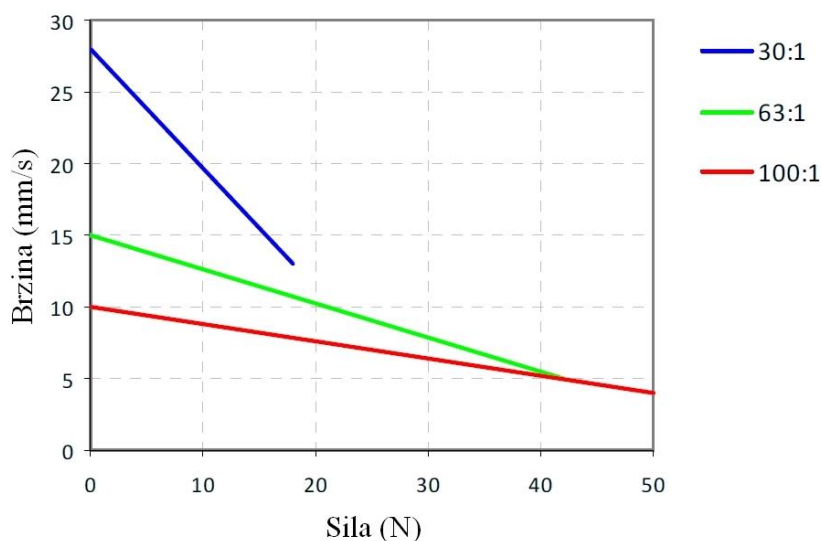


**Slika 67. Linearni aktuator PQ12 tvrtke Firgelli [65]**

**Tablica 13. specifikacije linearnog aktuatora PQ12 [65]**

prijenosni omjer	30:1	63:1	100:1
maksimalna sila	15 N kod 15 mm/s	30 N kod 8 mm/s	40 N kod 6 mm/s
maksimalna efikasnost	8N kod 20 mm/s	12 N kod 12 mm/s	20 N kod 8 mm/s
maksimalna brzina (bez opterećenja)	28 mm/s	15 mm/s	10 mm/s
maksimalno opterećenje	18 N	45 N	50 N
maksimalna bočna opterećenja	5 N	10 N	10 N
duljina potezanja	20 mm		
ulazni napon	6 ili 12 VDC		
potrebna jakost el. struje	550 mA kod 6 V, 210 mA kod 12 V		
masa	15 g		
radna temperatura	-10° C do 50° C		
buka	55 dB na udaljenosti 45 cm		
standard	IP-54 (ograničena zaštita od prodora prašine, zaštićen od prskanja vode iz bilo kojeg smjera)		
mogućnost ponovnog točnog pozicioniranja	±0,1 mm		

Na internetskoj stranici [65] je navedena cijena od 225 funti za pet komada linearnih aktuatora, što daje cijenu od približno 400 kn po komadu.





Slika 68. Krivulja opterećenja [65]

### ***Bionička proteza šake namijenjena za igru na otvorenom***

Kod bioničke proteze šake za igru na otvorenom koristiti ćemo servomotor, jer nam kod te proteze nije važna preciznost pokreta, te nam nije potrebna povratna veza. Servomotor mora zadovoljavati zahtjev da je voodootporan i otporan na prašinu. Prema tome tražit ćemo servomotore sa certifikatom IP-67 (totalno zaštićen od prodora prašine, zaštićen kod kratkog perioda uranjanja u vodu) i IP-68 (totalno zaštićen od prodora prašine, zaštićen kod dugih perioda uranjanja u vodu).

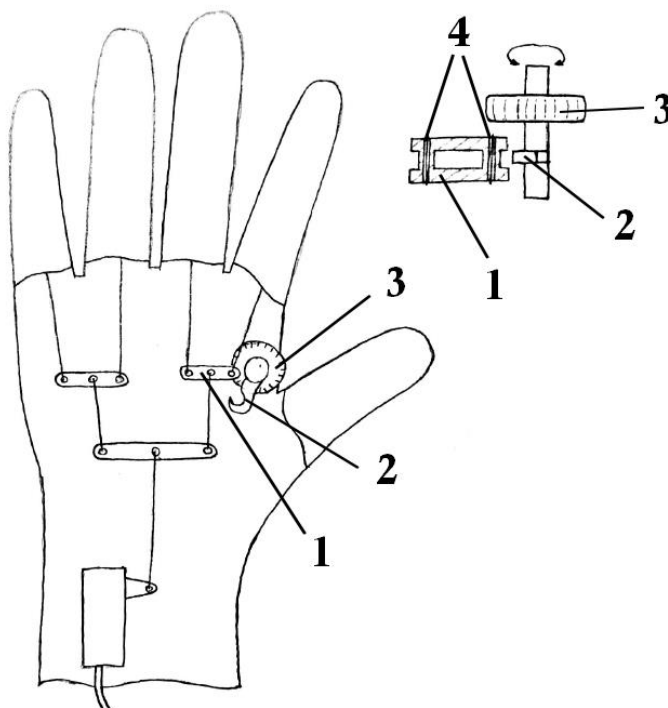
Tablica 14. Odabrani servomotori [67], [68]

servomotor	Hi Tec HS646WP	Savox SW-0230MG
		
brzina	0,20 s/60° kod 6 V 0,17 s/60° kod 7,4 V	0,16 s/60° kod 6 V 0,13 s/60° kod 7,4 V

moment	9,6 kg·cm kod 6V 11,6 kg·cm kod 7,4 V	6,5 kg·cm kod 6 V 8 kg·cm kod 7,4 V
dimenzije	41,8 x 21,0 x 40,0 mm	41,8 x 20,2 x 38,0 mm
cijena	£41,71 ( $\approx$ 375 kn)	\$36,99 ( $\approx$ 250 kn)
masa	60,1 g	59 g

### 5.7. Zaključavanje položaja kažiprsta

Zaključavanje položaja kažiprsta potrebno je kod tipkanja računalne tipkovnice ili korištenja mobitela. Od jednostavnih proteza šake, samo proteza od OpenBionics-a ima mogućnost zaključavanja položaja svakog prsta. Za taj zahtjev predloženo je slijedeće rješenje.



Slika 69. Mehanizam za blokiranje fleksije kažiprsta

Na radijalnoj strani šake nalazi se kotačić (3) čijim zavrtnjem pomičemo kuku (2) koja je spojena na njega. Fleksiju kažiprsta možemo blokirati samo kad je proteza šake u neutralnom položaju. Tada pomičemo kotačić sve dok on ne zahvati zglobni oslonac (1), što znači da je fleksija kažiprsta sada onemogućena. Sa desne strane prikazan je potreban oblik zglobnog

oslonca. Kroz rupe (4) na zglobnom osloncu se provlače tetive kažiprsta i srednjeg prsta. Ovaj mehanizam omogućuje zaključavanje položaja kažiprsta u položaju blage fleksije koji je povoljan za tipkanje na računalu i na mobitelu.

### 5.8. Osiguranje od preopterećenja i prejakog stiska

Kod prihvaćanja većih predmeta bioničkom rukom može doći do preopterećenja koje može prouzrokovati pucanje uzice ili oštećenje aktuatora. Iako je ta oštećenja lako popraviti bolje je da se ona spriječe.

Najlakše rješenje za taj problem je korisnika upoznati sa ograničenjima konstrukcije, te će on na temelju tih smjernica znati koje objekte može prihvatiti, a koje ne. No, za to je korisniku potrebno puno vježbe i iskustva, a pošto su naša ciljana skupina djeca, ne možemo se potpuno pouzdati u njihovu razinu procjene.

Do prejakog stiska može doći kad korisnik u bioničku šaku prihvaća plastičnu čašu ili neki krhki predmet. Kod jednostavnih proteza se ne može dozirati vrijednost pritiska koji će korisnik primijeniti, nego postoji samo signal za fleksiju i signal za ekstenziju.

Rješenje je da se koriste aktuatori koji imaju povratnu vezu koja mikrokontroleru dojavljuje položaj. Kad se proteza izradi potrebno je izmjeriti karakteristiku ovisnosti položaja aktuatora o vremenu od trenutka aktivacije. Time ćemo dobiti karakteristiku šake u praznom hodu. Kod prihvaćanja širih predmeta, mikrokontroler će pratiti položaj aktuatora od trenutka aktivacije. Kad jedan ili više prstiju počinju prihvaćati predmet javit će se odstupanja od prvobitne karakteristike. Tako će mikrokontroler znati da su prsti počeli zahvaćati predmet. Potrebno nam je još znati odstupanje od karakteristike u trenutku kad svi prsti dođu do prepreke, bilo da je to površina predmeta ili dlan šake, kako bi znali kada započinje faza stiska. U toj fazi prsti se više ne miču, nego se samo povećava napetost u tetivama.

Sljedeći zahtjev koji se postavlja je kako ograničiti jačinu stiska prstiju proteze šake. Poznata nam je karakteristika položaja aktuatora o vremenu u praznom hodu i možemo odrediti trenutak kada prsti počinju stiskati predmet. Već je ranije kao zahtjev bilo određeno da postoje predmeti koje možemo slobodno stisnuti maksimalnim pritiskom, dok je za one krhke i mekane potrebno ograničiti stisak. Zbog toga bi na protezi šake, ili na protezi podlaktice trebalo postojati gumb čijim aktiviranjem ćemo uključiti mod za prihvaćanje nježnijih i krhkih predmeta. Umjesto gumba može se staviti i trimmer čijim okretanjem ćemo odabrati razinu stiska, minimalnu ili maksimalnu.



**Slika 70. Trimer za podešavanje pritiska [69]**

Može se dogoditi da korisnik zaboravi pritisnuti gumb, ili namjestiti pritisak. Zbog toga će nam biti potrebna sigurnosna značajka koja će ispraviti tu pogrešku. Ovdje možemo definirati dva slučaja:

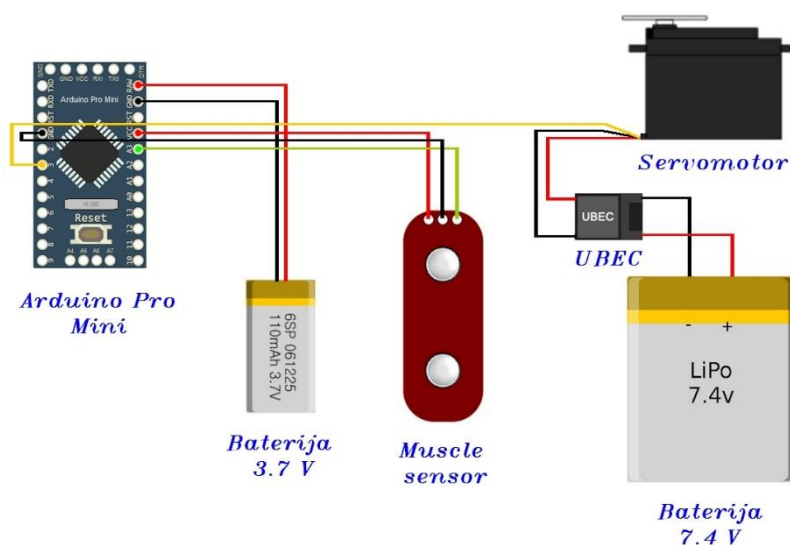
1. Proteza bioničke šake podešena je na maksimalni stisak i prihvaćaju se mekani predmeti plastične čaše ili limenke.
2. Proteza bioničke šake podešena je na minimalni stisak i prihvaćaju se teži predmeti ili predmeti koje možemo prihvatiti jačim stiskom.

Recimo da u prvom slučaju korisnik prihvaća plastičnu čašu napunjenu vodom sa stola. Kod prihvata mikrokontroler prati položaj aktuatora i može točno odrediti kada počinje stisak. Pošto je pritisak postavljen na maksimalnu razinu, mikrokontroler očekuje se da ćemo u fazi stiska imati krutu karakteristiku, tj. da će doći do opterećenja aktuatora znatnijeg smanjenja brzine pokreta aktuatora. No suprotno očekivanom, mikrokontroler primjećuje da se položaj aktuatora u jedinici vremena mijenja prebrzo, tj. da prsti deformiraju plastičnu čašu. Zbog toga će mikrokontroler zaustaviti rad aktuatora i zvučnim signalom javiti grešku.

Za drugi slučaj ćemo uzeti da korisnik sa stola uzima staklenu bocu mineralne vode od 1 l. Bionička proteza podešena je na minimalni stisak prstiju. Prsti proteze će zahvatiti bocu, ali će korisnik primijetiti da mu ona klizi pri pokušaju podizanja. Zatim korisnik ima mogućnost odabira dviju opcija. Može dok je još šaka u zahvatu podesiti jači pritisak ili određenim uzorkom kontrakcije mišića, npr. dvije uzastopne brze kontrakcije mišića iznad kojega je postavljena elektroda, pojačati pritisak.

## 5.9. Odabir elektroničkih komponenti

Na sljedećoj shemi prikazane su komponente koje su potrebne za rad bioničke šake namijenjene za igru na otvorenom. Cijeli sustav funkcionira na vrlo jednostavnom principu i koristi se kod većine jednostavnih bioničkih šaka. Kao mikrokontroler odabran je Arduino Pro Mini zbog manjih dimenzija i manje potrošnje, ali sasvim dovoljnih performansi. Mikrokontroler napajamo pomoću LiPo baterije kapaciteta 3.7 V (1 ćelija). Muscle sensor detektira električnu aktivnost mišića i šalje signale mikrokontroleru. Njega spajamo na napon i uzemljenje, a treću žicu na analogni ulaz mikrokontrolera. Za pogon servomotora odabrano je posebno napajanje od 7.4 V (2 ćelije). Bateriju prvo spajamo na UBEC (Universal Battery Elimination Circuit), a zatim na servomotor. UBEC nam snižava napon na optimalan za pogon servomotora. Na temelju signala kojih dobiva od Muscle sensora program šalje servomotoru signale preko izlaznog pina na koji je spojen.



Slika 71. Shema spajanja komponenti

U tablici su dane cijene pojedinih komponenti električne sheme. Ukupna cijena je najniža moguća za ovakvu shemu spajanja, a odabirom kvalitetnijih komponenti ili poboljšanjem sustava cijena će rasti.

**Tablica 15. Cijena pojedinih elektroničkih komponenti**

	Cijena	Trgovina
Arduino Pro Mini	od \$2 (original €12 + PDV)	<a href="http://www.ebay.com">http://www.ebay.com</a> <a href="https://www.arduino.cc">https://www.arduino.cc</a>
LiPo 3.7 V 1000 mAh	od \$4	<a href="http://www.ebay.com">http://www.ebay.com</a>
LiPo 7.4 V 2000 mAh	od \$11	<a href="http://www.ebay.com">http://www.ebay.com</a>
Muscle sensor	\$27	<a href="https://www.sparkfun.com">https://www.sparkfun.com</a>
UBEC	od \$2,5	<a href="http://www.ebay.com">http://www.ebay.com</a>
Servomotor Hi Tec HS646WP	\$55,35	<a href="http://www.westbourne-model.co.uk">http://www.westbourne-model.co.uk</a>
UKUPNO	≈ \$102 (≈ 690 kn)	

Vidimo da servomotor predstavlja najveći trošak. To je zato jer se od njega zahtjeva da bude otporan na vodu. Običan servomotor koji bi zadovoljavao potrebe ove proteze mogao bi se nabaviti po cijeni od 70 kn.

### 5.10. Materijali za izradu proteze šake

Izrada polimernih dijelova proteze šake mora biti što jeftinija. Zbog toga će se za izradu dijelova koristiti aditivne tehnologije. Tim postupcima se mogu izraditi komponente složenih geometrija, te kad je potrebno, kod svakog novog proizvoda mijenjati pojedine dimenzije. Stoga će materijali koji se koriste biti oni koji su kompatibilni s postupkom 3D tiskanja.

#### ***Bionička proteza šake namijenjena za igru na otvorenom***

Polimerne komponente koje je potrebno izraditi su gornji dio (poklopac) (1), središnji dio sa prstima (2) i donji dio (dlan) (3). Materijal za izradu prstiju je već odabran. To je elastični materijal Ninjaflex. Stoga je najbolje cijeli središnji dio proteze šake napraviti od tog materijala kako ne bi trebali pronalaziti rješenje za spajanje prstiju.

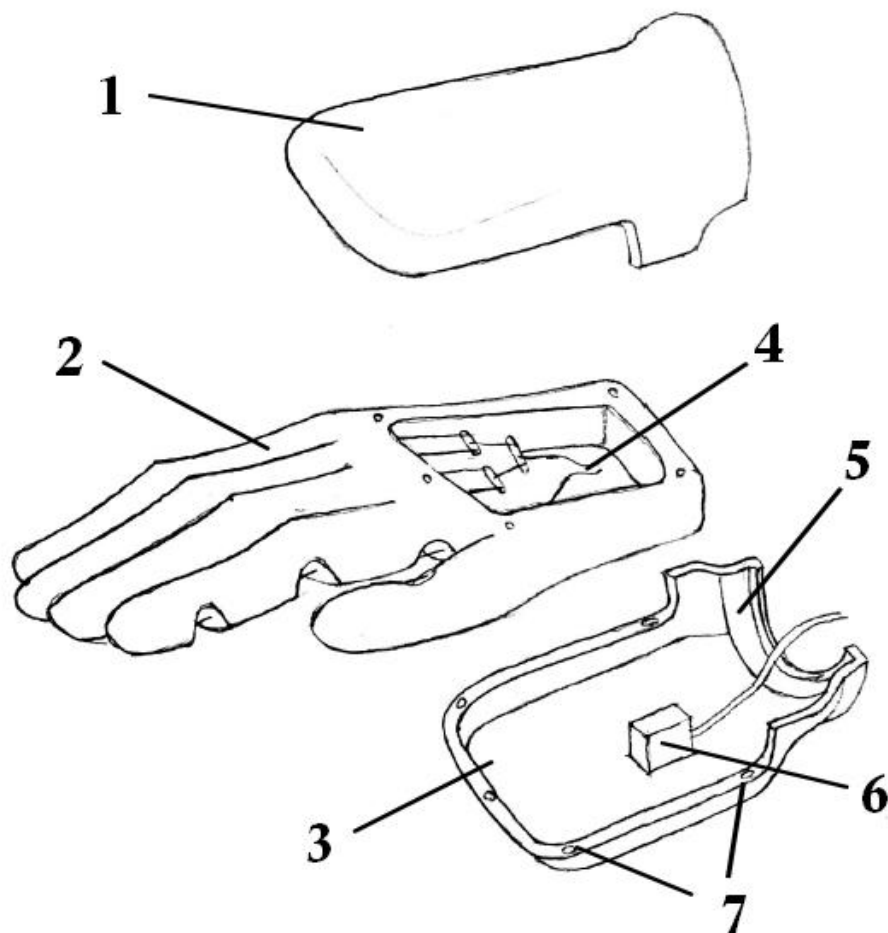
Gornji i donji dio proteze šake potrebno je izraditi od tvrdog materijala kako bi šaci dali krutost. Za tu primjenu najbolje je koristiti ABS (akrilonitril/butadien/stiren). U tablici su dana pojedina svojstva za ABS.



**Tablica 16. Svojstva ABS-a [70]**

vlačna čvrstoća	42,5-44,8 MPa
temperatura staklišta	105° C
gustoća	1040 kg/m <sup>3</sup>
tvrdća po Rockwell R	103-112
elongacija do pucanja materijala	23-25 %

Na donjem djelu i na središnjem djelu se nalaze rupe (7) kroz koje se pomoću vijaka komponente spajaju za gornji dio. Time dobijemo „sendvič“ konstrukciju sa elastičnim materijalom između tvrdog materijala, što pomalo podsjeća na brtvu te pridonosi vodonepropusnosti proteze. Servomotor (6) je potrebno fiksirati za donji dio na određenoj poziciji, tako da se na njega daju spojiti tetive prstiju i palca (4). Na proksimalnom djelu proteze gornji i donji dio proteze tvori kružnu površinu (5) gdje se smješta prsten sa kandžama.

**Slika 72. Polimerne komponente bioničke proteze šake**

***Bionička proteza namijenjena za školske aktivnosti***

Polimerne komponente proteze namijenjene za školske aktivnosti biti će izrađene od ABS-a pomoću aditivnih tehnologija. Proteza šake će se također sastojati od gornjeg, središnjeg i donjeg djela i pričvrstiti pomoću vijaka. Na središnjem djelu je potrebno napraviti prihvat za prste i za mehanizam za abdukciju palca. Na proksimalnom djelu potrebo je da proteza ima kružnu površinu za prihvat prsten sa kandžama, kao i kod prethodne proteze. Također potrebno je napraviti prihvat za mehanizam za blokiranje kažiprsta. Konstrukcija ove proteze značajno je kompliciranija i potrebno je paziti na puno više detalja.

## 5.11. Ispunjeni zahtjevi ciljane grupe korisnika

Na kraju ćemo još jednom proći kroz zahtjeve ciljane skupine korisnika i analizirati koje su zahtjeve naše proteze uspjele ispuniti, a koje nisu. Karakteristike bioničkih proteza šaka biti će ispisane u listu, koja je i ujedno lista onoga što možemo ponuditi potencijalnim kupcima naše bioničke proteze.

### *Bionička proteza namijenjena za školske aktivnosti*

- Omogućena je rotacija ručnog zgloba u rasponu od 70° supinacije do 90° pronacije. Nije nađeno rješenje na protezi šake koje bi omogućilo fleksiju i ekstenziju, te ulnarnu i radijalnu devijaciju. Za mogućnost izvođenja tih pokreta potrebno je razmotriti preinake na proteze podlaktice. I samom rotacijom ručnog zgloba ostvaren je napredak, jer je kod konkurentskih proizvoda ručni zglob fiksiran.
- Pronađeno je rješenje koje omogućuje brzu izmjenu proteze šake. Ograničena je slobodna rotacija zgloba i mogućnost pasivnog namještanja kuta pronacije i supinacije. Predviđeni su i graničnici koji onemogućuju ispadanje proteze šake.
- Provedena je analiza nosivosti ručnog zgloba, prema kojoj zaključujemo da će proteza šake moći izdržati zahtijevana opterećenja.
- Omogućena je pasivna adukcija zgloba palca, što mnoge jednostavne proteze šake nemaju. Osmišljen je mehanizam koji omogućuje lako pozicioniranje palca u određenoj poziciji i omogućeno je zaključavanje položaja palca u toj poziciji. Također je omogućena fleksija zgloba palca, i zgloba između članaka palca prema zahtjevima.
- Zahtjevi za fleksiju zglobova prstiju, proksimalnih i distalnih zglobova između članaka prstiju su ispunjeni i u skladu su sa podacima iz tablica u 2. poglavlju.
- Predviđen je kut abdukcije prstiju, koji se može odrediti tek nakon što znamo dimenzijske zanjake proteze šake, tj. dužine članaka prstiju.
- Proteza šake ima mogućnost prepoznavanja kada je predmet u zahvatu. Korisnik može sam dozirati jačinu pritiska dali pomoću trimera. Mikrokontroler nadzire proces prihvaćanja objekata, te se brine o tome da ne dođe do prejakog ili preslabog stiska i pomoću zvučnog signala obavještava korisnika. Dodavanjem ove značajke našoj protezi omogućili smo znatno povoljniji položaj na tržištu jednostavnih bioničkih proteza jer konkurentski proizvodi ne nude takve mogućnosti.
- Protezi šake dodani su zglobni oslonci pomoću kojih se omogućuje prihvat nepravilnih predmeta.

- Osmišljen je mehanizam sa kukicom koji omogućuje zaključavanje položaja kažiprsta u stanju lagane fleksije. Kažiprst se zaključava i otključava rotacijom kotačića. Zaključavanje položaja palca moguće je samo kad nema fleksije prstiju.
- Sve elektroničke komponente, osim linearnog aktuatora, premještene su u protezu podlaktice. Linearni aktuator ima certifikat IP-54 pa će proteza biti zaštićena od slučajnog prolijevanja vode. Budući da bionička šaka ima puno zglobova koji su otvoreni, potrebno ju je kod pojedinih aktivnosti zaštititi rukavicom kako bi onemogućili hvatanje nečistoća koje bi narušile funkcionalnost proteze šake.

### ***Bionička proteza šake namijenjena za igru na otvorenom***

- Omogućena je rotacija ručnog zgloba u rasponu od 90° supinacije do 70° pronacije. Nije nađeno rješenje na protezi šake koje bi omogućilo fleksiju i ekstenziju, te ularnu i radijalnu devijaciju. Za mogućnost izvođenja tih pokreta potrebno je razmotriti preinake na proteze podlaktice. I samom rotacijom ručnog zgloba ostvaren je napredak, jer je kod konkurentskih proizvoda ručni zglob fiksiran.
- Pronađeno je rješenje koje omogućuje brzu izmjenu proteze šake. Ograničena je slobodna rotacija zgloba i mogućnost pasivnog namještanja kuta pronacije i supinacije. Predviđeni su i graničnici koji onemogućuju ispadanje proteze šake.
- Moguće je postaviti prste proteze da stoje u prirodnom položaju.
- Kut abdukcije zgloba palca je fiksiran, i može se izraditi prema zahtjevima korisnika. omogućena je fleksija zgloba palca, i zgloba između članaka palca prema zahtjevima.
- Prst proteze šake izrađen je iz jedno djela i ima mogućnost fleksije zglobova prstiju, proksimalnih i distalnih zglobova između članaka prema zahtjevima.
- Predviđen je kut abdukcije prstiju, koji se može odrediti tek nakon što znamo dimenzijske zanjake proteze šake, tj. dužine članaka prstiju.
- Provedena je analiza nosivosti ručnog zgloba, prema kojoj zaključujemo da će proteza šake moći izdržati zahtijevana opterećenja.
- Bionička proteza šake otporna je na blato, prašinu i vodu. To je omogućeno izradom prsta od jednog djela, koji nema zglobova pa mu ne smetaju blato i prašina pa se očekuje potpuna funkcionalnost proteze šake u tim uvjetima. Odabrani servomotor je zaštićen kod kratkog perioda uranjanja u vodu, pa se proteza šake može slobodno isprati vodom

---

nakon uporabe, pazeći da se pritom voda direktno ne polijeva po servomotoru. Nije pronađen podatak da konkurentske proteze imaju tu istu mogućnost.

- Sve elektroničke komponente, osim servomotora, premještene su u protezu podlaktice i tamo su zaštićene od utjecaja vode i vlage.
- Prsti proteze su izrađeni od materijala Ninjaflex koji je veoma elastičan, pa prihvat hrapavih predmeta neće doprinosti trošenju vrhova prstiju. Ipak potrebno je voditi oprez kod rukovanja sa oštrim predmetima koji bi mogli razrezati materijal.

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je provedena analiza pokretljivosti segmenta šake i na temelju te analize definirani su zahtjevi i predložene smjernice za konstruiranje bioničke proteze šake.

Uočena je da na tržištu vlada potražnja za bioničkim protezama šake od strane različitih skupina ljudi. Te skupine mogu biti djeca koja su se rodila bez uda, mogu biti radnici koji su na poslu doživjeli nesreću, mogu biti umirovljenici ili neka druga skupina ljudi. Za njih sve postoje generalni zahtjevi koje bionička proteza šake treba ispuniti. To su na primjer: mala masa, sigurnost, ergonomske značajke, vrijeme autonomije, niska cijena.

Unutar tih skupina postoji više podgrupa i pod podgrupa koje imaju svoje specifične zahtjeve, koji mogu biti sasvim drugačiji od onih za druge grupe, pa i kontradiktorni. Problem sa postojećim rješenjima tvrtki koje razvijaju jednostavne bioničke šake je da pokušavaju ispunjavati zahtjeve što više grupa ljudi. Slijedom toga za mnoge probleme moraju napraviti kompromis i odbaciti pojedine zahtjeve. Tako se nakon razvoja i izrade, na tržištu može naći proizvod koji je rađen za određene skupine ili grupe ljudi, a da ne odgovara zahtjevima tih skupina. Naravno, na tržištu su dostupne i proteze koje mogu ispunjavati zahtjeve različitih grupa ljudi. To su napredne bioničke proteze šake koje imaju mogućnost personalizacije, tj. prilagođavanja korisniku. Budući da je čitav skup mogućnosti upakiran u jednu sofisticiranu bioničku protezu njezina cijena je znatno veća od onih jednostavnih.

Zbog toga se u ovom radu odabrala ciljana grupa korisnika za koje će se razvijati jednostavna bionička šaka. Ta su grupa djeca u dobi od 6 do 11 godina koja imaju gubitak šake na jednoj ruci. Djeca u toj dobi pohađaju niže razrede osnovne škole te veći dio svoga vremena provode u školi ili baveći se aktivnostima vezanim uz školu (učenje, pisanje zadaća), a ostatak vremena provode igrajući se u zatvorenom prostoru ili na otvorenom. Nakon definiranja zahtjeva za te skupine aktivnosti, provedena je analiza tih zahtjeva. Uočeno je da postoje oprečni zahtjevi, koje bi teško mogli ispuniti sa jednom protezom šake. Zbog toga je odlučeno da se krene u razvoj dviju bioničkih proteza šake. Jedna će biti namijenjena za aktivnosti vezane uz školu gdje se od proteze šake očekuje veća preciznost i mogućnost izvođenja više zahvata, dok će druga proteza biti vezana za aktivnosti na otvoreno, gdje se od proteze šake očekuje veća robusnost, jednostavnost, otpornost na vodu i nečistoće, te duže vrijeme autonomije. Kako bi se ove dvije proteze šake mogle izmjenjivati, potrebno je za njih napraviti prihvat koji će omogućiti brzu i jednostavnu izmjenu. Na temelju zahtjeva, za oba dvije bioničke proteze šake izrađena je funkcijska struktura.

Nakon definiranih zahtjeva krenulo se sa izradom smjernica za konstruiranje. Pojedini zahtjevi su bili jednaki za obje bioničke proteze šake pa je za te zahtjeve korišteno isto rješenje. Ipak, proteza za aktivnosti vezane uz školu puno je složenija jer su njezini zahtjevi stroži. Na kraju petog poglavlja dana je lista u kojoj je navedeno koji su zahtjevi uspješno ispunjeni, a koji nisu. Ta lista može se i shvatiti kao lista mogućnosti našeg proizvoda koju možemo ponuditi ciljanoj grupi korisnika.

Sa jasno definiranim smjericama dovršena je faza planiranja, što je tek dio posla. No sada imamo jasan smjer i viziju kako bionička proteza šake mora funkcionirati. Ono što slijedi je izrada morfološke matrice i koncepata. Od više različitih koncepata, biti će odabran onaj koji ima više ocijene i sa njim se kreće u konstrukcijsku razradu, gdje će se oblikovati proizvod s obzirom na različite kriterije, te provesti kontrole čvrstoće i kinematičke analize. Do izrade proizvoda još je dalek put, ali sada imamo nit vodilju koja će nas voditi kroz sve faze razvoja.

---

**LITERATURA**

- [1] *Childress, S. D., Historical Aspects of Powered Limb Protheses*, Clinical Prosthetics & Orthotics, Vol 9, Num 1, pp. 2-13, 1985., web stranica: [http://www.oandplibrary.org/cpo/1985\\_01\\_002.asp](http://www.oandplibrary.org/cpo/1985_01_002.asp), srpanj 2016.
- [2] **Neurotechology Provides Near-Natural Sense of Touch**, web stranica: <http://www.darpa.mil/news-events/2015-09-11>, srpanj 2016.
- [3] **A Prosthetic Hand That Can Feel**, web stranica: <http://time.com/4104723/a-prosthetic-hand-that-can-feel/>, srpanj 2016.
- [4] *Platzer, W., Sustav organa za pokretanje*, Denona, Zagreb 2011.
- [5] *Waldeyer, A., Waldeyerova anatomija čovjeka*, Golden marketing – Tehnička Knjiga, Zagreb 2009.
- [6] *Oatis, A. C., Kinesiology: The mechanics and pathomechanics of human movement*, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia 2004.
- [7] <http://www.anatomy-diagram.info/wp-content/uploads/2015/03/hand-bone-anatomy-picture-55122ba924945.jpg>, srpanj 2016.
- [8] <http://www.radiologictechnology.org/content/82/2/161/F2.large.jpg>, srpanj 2016.
- [9] <http://www.silvercoins.com/wp-content/uploads/2014/11/holding-coin-proper.jpg>, srpanj 2016.
- [10] [http://pngimg.com/upload/hands\\_PNG873.png](http://pngimg.com/upload/hands_PNG873.png), srpanj 2016.
- [11] *Swanson, A. B., Matev, I. B., de Groot, G., The Strength of Hand*, ICIB, Vol 13, Num 10, pp. 1-8, 1974., web stranica: [http://www.acpoc.org/newsletters-and-journals/1974\\_10\\_001.asp](http://www.acpoc.org/newsletters-and-journals/1974_10_001.asp), srpanj 2016.
- [12] [http://cdn.bigidesign.com/wp-content/uploads/2012/07/titanium\\_pen\\_inhand\\_black.jpg](http://cdn.bigidesign.com/wp-content/uploads/2012/07/titanium_pen_inhand_black.jpg), srpanj 2016.
- [13] <http://simonstratford.com/wp-content/uploads/hand-holding-card.jpg>, srpanj 2016.
- [14] <https://mylifeinzion.files.wordpress.com/2013/09/hold-to-the-rod-the-iron-rod.jpg>, srpanj 2016.
- [15] <http://www.clker.com/cliparts/3/9/7/4/1417799312196222398hand%20holding%20can.jpg>, srpanj 2016.
- [16] <http://www.bodybuilding.com/fun/rubberballsqueeze.jpg>, srpanj 2016.
- [17] [http://www.feelgift.com/media/productdetail/HOME\\_OFFICE/Kitchen\\_Dining/One-Trip-Grips-Shopping-Grocery-Bag-Holder-Handle-Carrier-cool-Stuffs-And-idea-Gift-Handle-Holder.jpg](http://www.feelgift.com/media/productdetail/HOME_OFFICE/Kitchen_Dining/One-Trip-Grips-Shopping-Grocery-Bag-Holder-Handle-Carrier-cool-Stuffs-And-idea-Gift-Handle-Holder.jpg), srpanj 2016.



- [18] [http://methodsman.com/wp/wp-content/uploads/2015/05/p\\_9495\\_1341841676.jpg](http://methodsman.com/wp/wp-content/uploads/2015/05/p_9495_1341841676.jpg), srpanj 2016.
- [19] <http://media.techregar.com/images/2015/01/index-finger-typing.jpg>, srpanj 2016.
- [20] [http://www.clker.com/cliparts/9/e/b/e/1282138650495970011hand\\_mouse.jpg](http://www.clker.com/cliparts/9/e/b/e/1282138650495970011hand_mouse.jpg), srpanj 2016.
- [21] [http://www.oandplibrary.org/al/images/1955\\_02\\_022/1955-MayOCRBatch-27.jpg](http://www.oandplibrary.org/al/images/1955_02_022/1955-MayOCRBatch-27.jpg), srpanj 2016.
- [22] **Steeper**, web stranica: <http://rslsteeper.com/products/prosthetics>, srpanj 2016.
- [23] <http://www.24horas.cl/incoming/article392834.ece/ALTERNATES/w1024h768/Be%20bionic.png>, srpanj 2016.
- [24] **New beBionic hand almost doubles its grip-strength, steered by user's electrical 'skin signals'**, web stranica: <https://www.engadget.com/2012/09/07/bebionic-3-bionic-hand/>, srpanj 2016.
- [25] **Touch Bionics**, web stranica: <http://www.touchbionics.com/>, srpanj 2016.
- [26] **Britain's first bionic boy**, web stranica: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2313507/i-limb-ultra-revolution-The-16-year-old-boy-Britains-app-controlled-bionic-hand.html>, srpanj 2016.
- [27] **Ottobock**, web stranica: <http://www.ottobockus.com/>
- [28] <http://www.prostheticsinmotion.com/images/michelangelo.jpg>, srpanj 2016.
- [29] **Michelangelo Hand**, Wikipedija: [https://en.wikipedia.org/wiki/Michelangelo\\_Hand](https://en.wikipedia.org/wiki/Michelangelo_Hand)
- [30] **Open Bionics**, web stranica: <http://www.openbionics.com/>, srpanj 2016.
- [31] <http://goo.gl/KwDx0E>, srpanj 2016.
- [32] **Limbitless Solutions**, web stranica: <http://limbitless-solutions.org/index.php/en/>
- [33] <http://florida.justgoodnews.biz/wp-content/uploads/sites/11/2015/11/Limbitless-Solutions.jpg>, srpanj 2016.
- [34] **Thingiverse**, web stranica: <http://www.thingiverse.com/UCFarmory/about>, srpanj 2016.
- [35] **OpenBionics**, web stranica: <http://www.openbionics.org/>, srpanj 2016.
- [36] <http://robotika.lt/wp-content/uploads/2015/04/openbionics.jpg>, srpanj 2016.
- [37] *Kovačić, Z., Bogdan, S., Krajči, V., Osnove robotike*, Graphis, Zagreb 2002.
- [38] *Skalicki, B., Grilec, J., Električni strojevi i pogoni*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2004.
- [39] [http://img.directindustry.de/images\\_di/photo-g/7205-2498205.jpg](http://img.directindustry.de/images_di/photo-g/7205-2498205.jpg), srpanj 2016.
- [40] **DC servo principles**, Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=tsrAP8EgcbQ>

- [41] <http://www.stemulate.org/wp-content/uploads/2012/06/Servo-Exploded1.png>, srpanj 2016.
- [42] **Arduino**, web stranica: <https://www.arduino.cc/>, srpanj 2016.
- [43] **Microcontroller**, Wikipedija: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller>, srpanj 2016.
- [44] <http://cdn.instructables.com/F7W/3TBJ/HRPBNLRZ/F7W3TBJHRPBNLRZ.RECT2100.jpg>, srpanj 2016.
- [45] <http://www.robotshop.com/media/files/images/lynxmotion-a-pod-hexapod-complete-kit-1-large.jpg>, srpanj 2016.
- [46] **Electromyography**, Wikipedija: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electromyography>, srpanj 2016.
- [47] **SparkFun**, web stranica: <https://www.sparkfun.com/>, srpanj 2016.
- [48] *Jurčević Lulić, T.*, **Biomehanički modeli**, predavanja, FSB, 2013.
- [49] **Geometrical and Mass-inertial Characteristic of the Upper Human Limb**, web kalkulator: <http://www.clbme.bas.bg/projects/motco/data/massinertial.html>, srpanj 2016.
- [50] <http://goo.gl/1zSJfh>, srpanj 2016.
- [51] <http://www.clickwithyourmac.com/wp-content/uploads/2013/11/wrist-supination-neutral-pronation.jpg>, srpanj 2016.
- [52] **Kakva mora biti školska torba?**, članak: <http://reha.hr/cms/kakva-mora-bit-skolska-torba/>, srpanj 2016.
- [53] **Average Height to Weight Chart – Babies to Teenagers**, web stranica: <http://www.disabled-world.com/artman/publish/height-weight-teens.shtml>, srpanj 2016.
- [54] **Alarmanтно – prvašići nose teže školske torbe od osmaša!**, članak: <http://goo.gl/osXgcA>, srpanj 2016.
- [55] [https://classconnection.s3.amazonaws.com/816/flashcards/1673816/jpg/001\\_\(417x445\)1352776649565.jpg](https://classconnection.s3.amazonaws.com/816/flashcards/1673816/jpg/001_(417x445)1352776649565.jpg), srpanj 2016.
- [56] <http://previews.123rf.com/images/chudtsankov/chudtsankov1104/chudtsankov110400001/9276565-Outlined-Hand-Holding-A-Red-Apple-Stock-Vector.jpg>, srpanj 2016.
- [57] <http://www.outlanderanatomy.com/wp-content/uploads/2015/05/finger-movements-KLS-edited.jpg>, srpanj 2016.
- [58] <http://www.lorencicsarajevo.ba/0cache/136cc98f1e2b943fa94fe47e7160c9c1.jpg>, srpanj 2016.
- [59] [http://www.vanessapaolantonio.com/high/hook\\_grip2\\_hi.jpg](http://www.vanessapaolantonio.com/high/hook_grip2_hi.jpg), srpanj 2016.

- 
- [60] Jelaska, D., **Radijalni klizni ležaj – proračun**, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split 2003.
- [61] [http://unews.utah.edu/wp-content/uploads/2015/10/FistPunch\\_OpenFistPunch\\_Slap-art.jpg](http://unews.utah.edu/wp-content/uploads/2015/10/FistPunch_OpenFistPunch_Slap-art.jpg), srpanj 2016.
- [62] <http://goo.gl/e9kpP1>, srpanj 2016.
- [63] [http://www.massagetoday.com/content/images/lowe2\\_19664\\_1\\_1\\_4480.gif](http://www.massagetoday.com/content/images/lowe2_19664_1_1_4480.gif), srpanj 2016.
- [64] **Vexma Technologies**, web stranica: <http://vexmatech.com/ninjaflex-material.html>, srpanj 2016.
- [65] **OpenBionics**, web stranica: <http://www.openbionics.com/shop/5-x-pq12-30-12-p>, srpanj 2016.
- [66] **IP Ratings (Ingress Protection)**, web stranica: <http://www.mpl.ch/info/IPratings.html>, srpanj 2016.
- [67] <http://www.westbourne-model.co.uk/acatalog/Servos.html>, srpanj 2016.
- [68] [http://www.savoxusa.com/Savox\\_SW0230MG\\_HV\\_Waterproof\\_Digital\\_Servo\\_p/savsw0230mg.htm](http://www.savoxusa.com/Savox_SW0230MG_HV_Waterproof_Digital_Servo_p/savsw0230mg.htm), srpanj 2016.
- [69] [http://thumbs3.ebaystatic.com/d/1225/m/mFncxzCX\\_1bbNY5sbUIHbpA.jpg](http://thumbs3.ebaystatic.com/d/1225/m/mFncxzCX_1bbNY5sbUIHbpA.jpg), srpanj 2016.
- [70] **ABS Material Data Sheet**, PDF dokument: [http://www.teststandard.com/data\\_sheets/ABS\\_Data\\_sheet.pdf](http://www.teststandard.com/data_sheets/ABS_Data_sheet.pdf), srpanj 2016.

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc