Biomehanički model šake za određivanje optimalne veličine ručke

Matija, Kalauz

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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:235:740175

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-16**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matija Kalauz

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić, dipl. ing. Matija Kalauz

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem profesorici dr. sc. Tanji Jurčević Lulić na pruženoj pomoći.

Matija Kalauz

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Matija Kalauz** Mat. br.: 0035195555

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Biomehanički model šake za određivanje optimalne veličine ručke**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Biomechanical hand model for identification of optimum handle size**

Opis zadatka:

Zglobovi prstiju šake su obavijeni i učvršćeni ligamentima, a na članke prstiju vežu se tetive ispružača i tetive pregibača prstiju koje su odgovorne za pružanje, odnosno savijanje prstiju. Biomehanički modeli šake imaju primjenu kod identifikacije optimalne veličine ručke ručnog alata s ciljem ostvarenja minimalnih sila u tetivama.

U radu je potrebno:
- opisati građu šake,
- objasniti biomehanički model tetiva prstiju i ručnog zgloba kao sustav remenica,
- objasniti i usporediti tri Landsmeerova modela tetiva prstiju ruke kao sustava remenica,
- objasniti dinamički model tetiva prstiju ruke kao sustava remenica,
- objasniti Armstrongov model tetiva ručnog zgloba,
- primijeniti model za zahvat šake i cilindrične ručke te procijeniti naprezanja tetiva.

Antropomjere i potrebne podatke uzeti iz literature i u dogovoru s mentorom.
Potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenog 2017.

Rok predaje rada:
1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Tanja Jurčević Lulić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VI
SUMMARY VII
1. Uvod 1
1.2. Građa šake 1
1.2.1. Kosti 1
1.2.2. Zglobovi 3
1.2.3. Mišići 3
1.2.4. Tetive 6
2. Biomehanički model kao sustav remenica 7
2.1. Tetive prstiju 7
2.2. Ručni zglob 7
3. Landsmeerovi modeli tetiva kao sustav remenica 9
3.1. Landsmeerov model I 9
3.2. Landsmeerov model II 10
3.3. Landsmeerov model III 11
3.4. Procjena valjanosti modela 12
4. Dinamički model tetiva kao sustav remenica 13
5. Armstrongov model tetiva ručnog zgloba 15
6. Model za zahvat šake i cilindrične ručke 21
6.1. Prvi model zahvata šake i cilindrične ručke 24
6.2. Drugi model zahvata šake i cilindrične ručke 26
7. ZAKLJUČAK 30
LITERATURA 31

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Kosti korijena sprijeda 1

Slika 1.2 Kosti korijena straga 1

Slika 1.3 Kosti zapešća i prstiju 2

Slika 1.4 Zglobovi prsta 3

Slika 1.5 Prvi mišićni sloj 4

Slika 1.6 Drugi mišićni sloj 4

Slika 1.7 Treći mišićni sloj 4

Slika 1.8 Interossei palmares 4

Slika 1.9 Interossei dorsales 4

Slika 1.10 Lubricales 4

Slika 1.11 Palmaris brevis 5

Slika 1.12 Prvi mišićni sloj 5

Slika 1.13 Drugi mišićni sloj 5

Slika 1.14 Mišići u prstima 6

Slika 2.1 Remenice u prstima 7

Slika 2.2 Mišići za pokretanje zgloba i ruke 8

Slika 2.3 Savijanje ručnog zgloba 8

Slika 2.4 Istezanje ručnog zgloba 8

Slika 3.1 Landsmeerov model I-prst 9

Slika 3.2 Landsmeerov model I- pojednostavljeni prikaz 9

Slika 3.3 Landsmeerov model II-prst 10

Slika 3.4 Landsmeerov model II- pojednostavljeni prikaz 10

Slika 3.5 Landsmeerov model III-prst 11

Slika 3.6 Landsmeerov model III- pojednostavljeni prikaz 11

Slika 4.1 Sile i momenti 13

Slika 4.2 Inercijske sile i momenti 13

Slika 5.1 Opterećenje užeta 15

Slika 5.2 Prikaz ručnog zgloba kao remenica 17

Slika 5.3 FDS pomicanje tetive 19

Slika 5.4 FDP pomicanje tetive 19

Slika 6.1 Koordinatni sustav prsta 21

Slika 6.2 Lokalni koordinatni sustav prsta 22

Slika 6.3 Prvi model zahvata šake i cilindrične ručke 24

Slika 6.4 Drugi model zahvata šake i cilindrične ručke 26

Slika 6.5 Sile ligamenata za prvi model 28

Slika 6.6 Sile ligamenata za drugi model 29

POPIS TABLICA

Tablica 1 Vrijednosti zglobva u prstima 12

Tablica 2 Vrijednosti ručnog zgloba 18

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
x	mm	Pomak tetive
r	mm	Udaljenost središta zgloba do tetive
Θ	rad	Kut rotacije zgloba
M	kg	Debljina kože
A_t	m/s^2	Tangencijalno ubrzanje
A_c	m/s^2	Centripetalno ubrzanje
F_R	N	Radijalna reakcijska sila
F_T	N	Sila tetive
μ		Faktor trenja između tetive i tkiva
F_N	N	Normalna sila koja djeluje na tetivu
PR	mm	Moment tetive ruke za FDP
$F(i,k)$	N	Sile na svaku falangu svakog prsta
$L(i,k)$	mm	Duljina falange
(i, Θ_j)	rad	Kut savijanja zgloba
$TP(i,k)$	N	Sila tetive koju uzrokuje FDP za svaku falangu
$TS(i,k)$	N	Sila tetive koju uzrokuje FDS za svaku falangu
$R_{xk}(i,j)$	N	Sile koje se javljaju zbog ograničenja u smjeru x osi zglobova
$Ry_k(i,j)$	N	Sile koje se javljaju zbog ograničenja u smjeru y osi zglobova

SAŽETAK

U ovome radu objašnjena je građa šake. Sam rad temelji se na proučavanju naprezanja u tetivama. Opisani su tetive i ručni zglob kao sustav remenica. Također, objašnjeni su i uspoređeni 3 Landsmeerova modela tetiva prstiju ruke kao sustav remenica. Na kraju je objašnjen i opisan primijenjeni model za zahvat šake i cilindrične ručke.

Ključne riječi: tetiva, remenice, naprezanja, šaka i zglob

SUMMARY

The hand model is explained in this paper. This work is based on studying tendon stresses. Tendons and wrist are described as a system of pulleys. Also, 3 Landsmeer's tendon pulley model are described and explained. At the end hand model and cylindrical handle are explained and described.

Key words: tendon, pulley, stresses, hand model and wrist

1. Uvod

Povezanost između medicine i strojarstva je u današnje vrijeme izuzetno velika. Inženjeri mogu uz određena znanja doći do saznanja kakva su naprezanja i deformacije u dijelovima ljudskog tijela. U ovom radu će se opisivati biomehanički model šake, pa bi za sami početak bilo dobro reći nešto općenito o šaci.

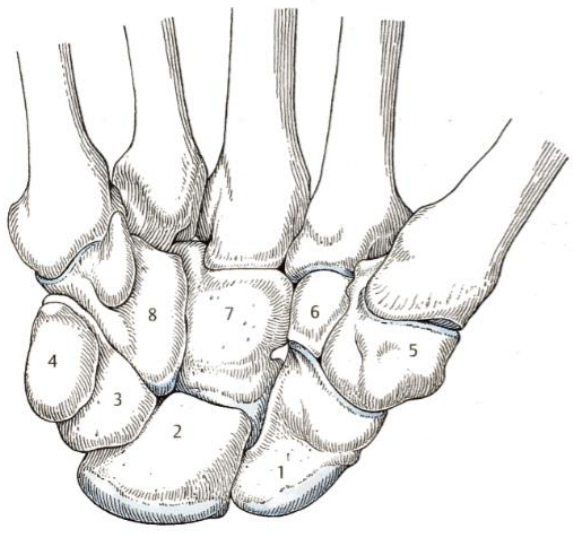
Šaka je sastavni dio ljudske ruke koja završava prstima koji nam služe kako bi mogli nešto hvatati njima. Također kod modeliranja ljudskog tijela zbog analize zbog analize i simulacije gibanja ljudskog tijela, pojednostavljeni prikaz šake pomoću geometrijskog tijela je u obliku elipsoida. Gustoća šake je 1,155 kg/dm^3 [1].

1.2 Građa šake

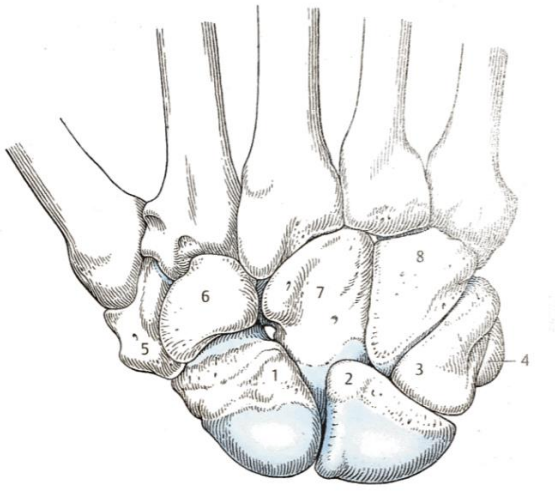
Osnovna dijelovi šake su kosti, mišići, zglobovi i tetive. Ti dijelovi su opisani u sljedećim paragrafima

1.2.1 Kosti

Šaka sadrži ukupno 27 kostiju. Korijen šake sadrži 8 kostiju koji su raspoređeni u dva reda po četiri kosti. U proksimalnom redu se nalaze sljedeće kosti: čunasta, polumjesečna, trokutasta i graškasta kost, dok su u distalnom redu velika trapezna, manja trapezoidna, glavičasta i kukasta kost. Postoje 5 kostiju zapešća i oblikuje ih glava, tijelo i osnovica. Dok kosti prstiju svi osim palca imaju 3 članka falange, a palac ima 2. Položaj opisanih kostiju vidljiv na slikama 1.1 i 1.2 [2].



Slika 1.1 Kosti korijena sprijeda[3]



Slika 1.2 Kosti korijena straga[3]

Popis kostiju u korijenu [3]:

1. Čunasta kost
2. Polumjesečna kost
3. Trokutasta kost
4. Graškasta kost
5. Velika trapezna kost
6. Manja trapezoidna kost
7. Glavičasta kost
8. Kukasta kost

Slika 1.3 Kosti zapešća i prstiju[3]

Popis kostiju u zapešću i prstima [3]:

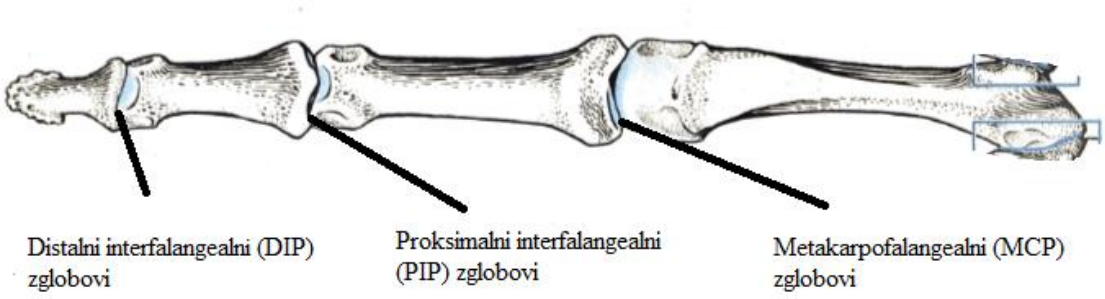
1. Glava zapešća
2. Tijelo zapešća
3. Osnovica zapešća
4. Članak phalanx proximalis (proksimalna falanga)
5. Članak phalanx media (srednja falanga)
6. Članak phalanx distalis (distalna ili vršna falanga)

1.2.2 Zglobovi

Zglobni sustav čine zglobovi i njima pridružene kosti. Oni omogućuju prstima pomicanje naprijed i nazad, ali ne omogućuju im pomicanje u stranu. Njihovu građu moguće je opisati od tri dijela, sastoje se od zglobne šupljine, hrskavične zglobne plohe i zglobne ovojnice. Zglobovi su također sastavni dio šake, te ih možemo podijeliti prema [4]:

1. Zglobove kostiju korijena
2. Zglobovi kostiju zapešća
3. Zglobovi kostiju prstiju.

Također, svaki prst se sastoji od 4 zgloba: CMC (karpometakarpalni), MCP (metakarpofalangealni), PIP (proksimalno-interfalangealni), DIP (distalno-interfalangealni). Zglobovi koji se nalaze u prstu prikazani su na slici 1.4:



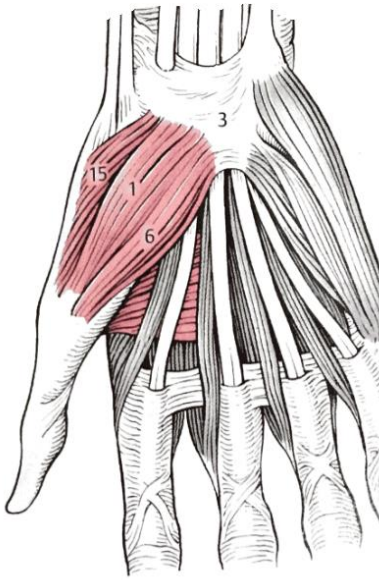
Slika 1.4 Zglobovi prsta[3]

1.2.3 Mišići

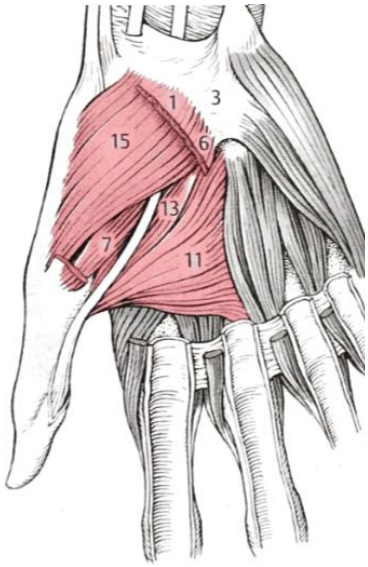
Mišići su aktivni pokretači našeg tijela. Oni zajedno s kostima pokreću ljudskog tijelo. Svi mišići čine 40% ljudske mase. Mišići koji pridonose pomicanju prstiju se mogu podijeliti na površinske i dubinske. Površinski mišići su mišići podlaktice, dok su dubinski mišići oni koji se nalaze u šaci. Površinski mišići su veliki i oni daju snagu, za razliku od dubinskih koji su mali i oni doprinose preciznosti koordinacije svakog prsta [8]. Dubinski mišići odnosno mišići šake mogu se dodatno podijeliti u tri skupine [2]:

1. Četiri mišića tenara (to su mići koji pokreću palac)
2. Tri mišića u sredini šake
3. Četiri mišića hipotenara (to su mišići koji pokreću mali prst)

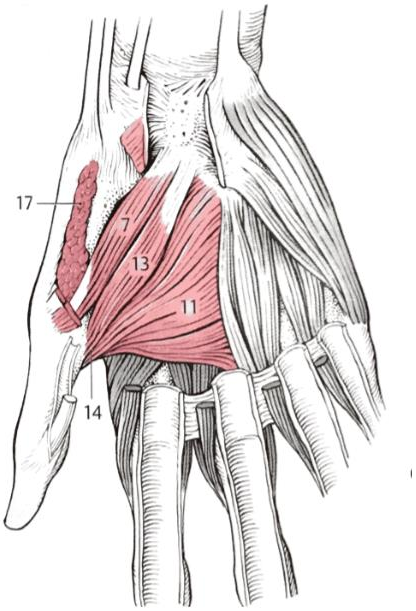
U skupinu mišića tenara spadaju: *abductor pollicis brevis* (1), *flexor pollicis brevis* (6) i (7), *adductor pollicis* (11) i (13) i *opponens pollicis* (15). Ovi mišići su prikazani na sljedećim slikama s oznakama u zagradama da pokazuju njihovo mjesto na slikama 1.5, 1.6, 1.7:



Slika 1.5 Prvi mišićni sloj[3]



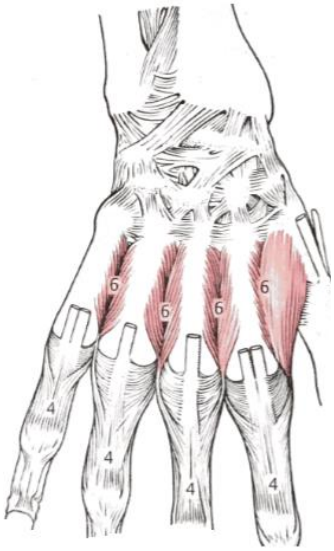
Slika 1.6 Drugi mišićni sloj[3]



Slika 1.7 Treći mišićni sloj[3]

Druga skupina mišića odnosno mišići u sredini šake su sljedeći: interossei palmares (1), interossei dorsales (6) te lubrikalni mišići lumbricales (8). Ova skupina mišića je pokazana na slikama 1.8, 1.9, 1.10:

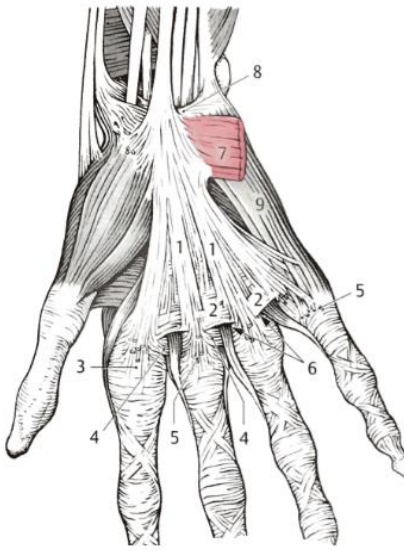
Slika 1.8 Interossei palmares [3]



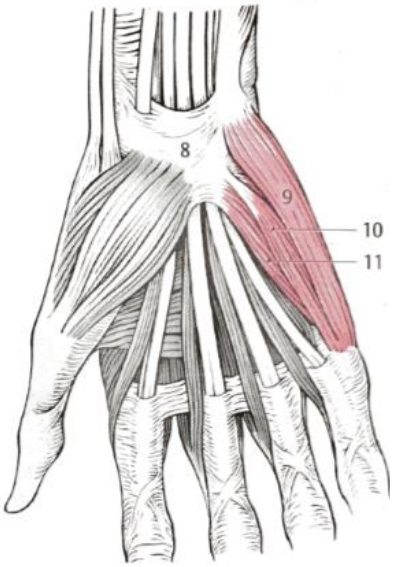
Slika 1.9 Interossei dorsales [3]

Slika 1.10 Lubricales [3]

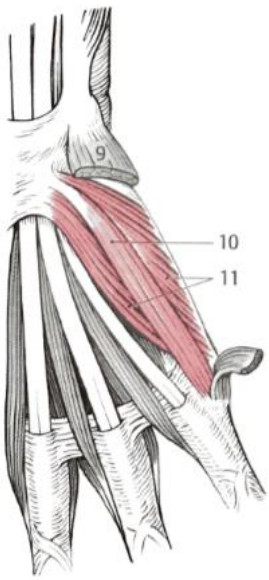
Treću skupinu koja se sastoji od četiri mišića hipotenara čine: *palmaris brevis* (7), *abductor digiti minimi* (9), *flexor digiti minimi brevis* (10), *opponens digiti minimi* (11). Mišići su prikazani na slikama 1.11, 1.12, 1.13:



Slika 1.11 Palmaris brevis [3]



Slika 1.12 Prvi sloj mišića [3]

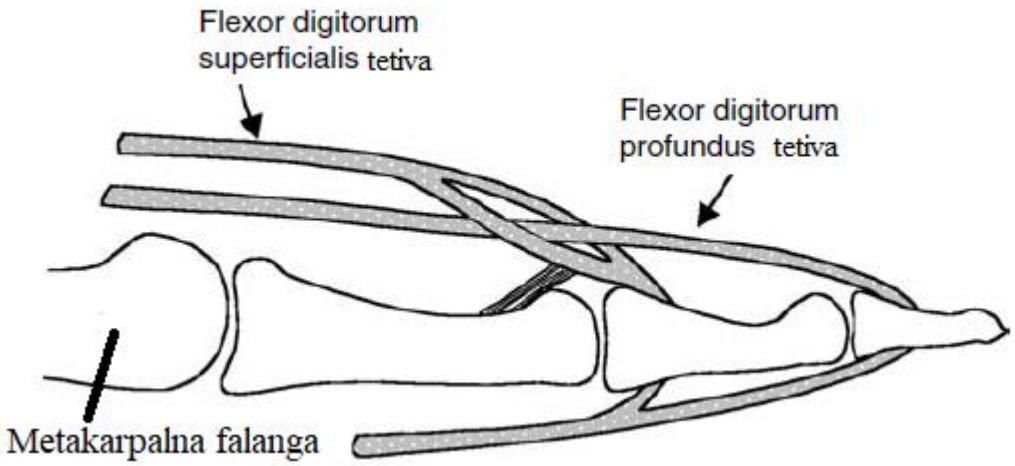


Slika 1.13 Drugi sloj mišića [3]

1.2.4 Tetive

Tetive su vezivna tkiva koja spajaju mišiće s kostima. Sastoje se od mreže kolagenih vlakana. Maksimalno naprezanje koje se javlja u tetivama je oko 100 MPa [1], a naprezanja koja se javljaju u tetivama su od 5 do 10 MPa. Imaju faktor sigurnosti 10-20. *Flexor digitorum superficialis* (FDS) i *flexor digitorum profundus* (FDP) su glavne tetive koje omogućuju savijanje prstiju. Na slici 1.14 su prikazane ove tetive.

Moglo bi se reći da FDP se smatra mišićem koji izvodi većinu savinja prstiju, dok FDS dolazi do izražaja kada je potrebno upotrijebiti dodatnu snagu [4]. Također za FDS postoji velika razlika u pridonošenju sile svakom prstu (0,9 do 3,4%), za razliku od FDP koji doprinosi relativno jednaku silu svakom prstu (2,7 do 3,4%).

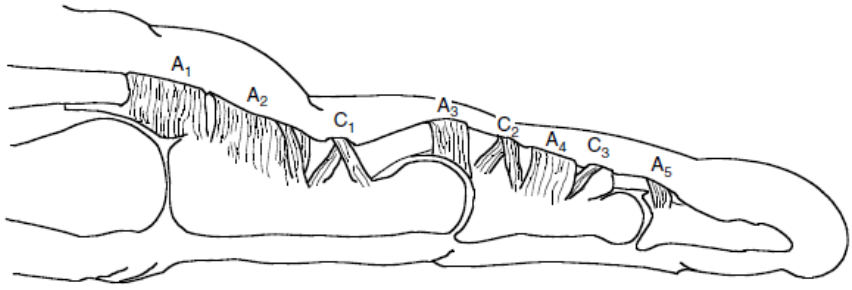


Slika 1.14 Mišići u prstima [4]

2. Biomehanički model kao sustav remenica

2.1 Tetive prstiju

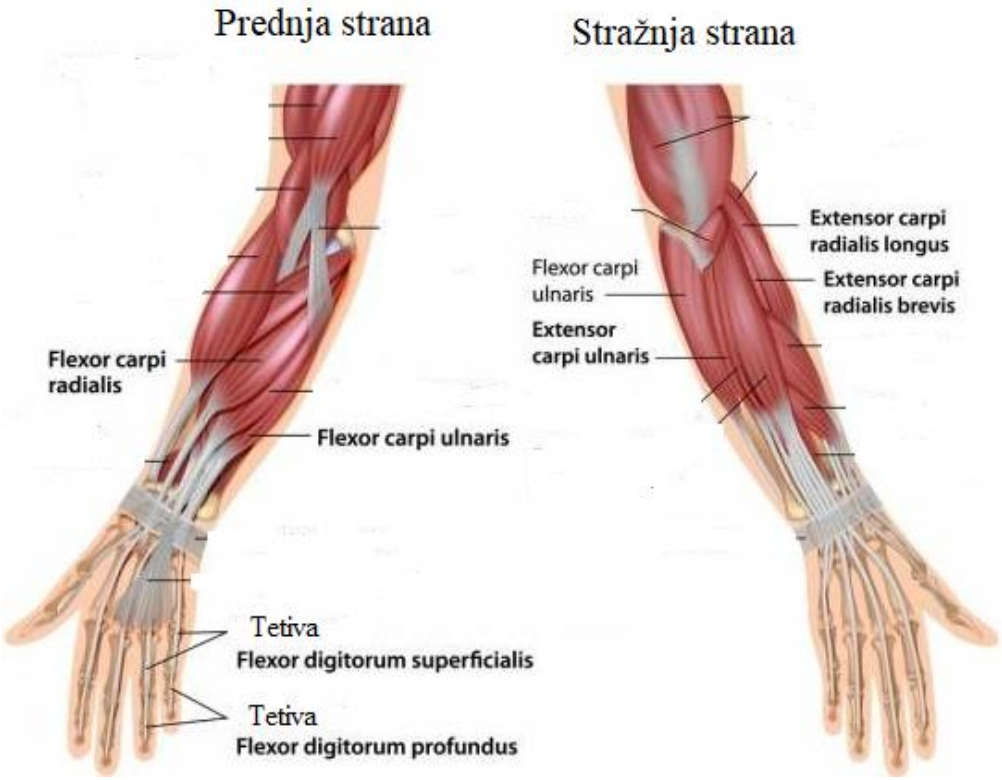
Fleksibilni omotač tetiva počinje na vratu metakarpalne falange i završavaj na interfalangealnom zglobu, te je u odnosu na falangalnu kost oslonjen pomoću remenica, to je prikazano na slici 2.1 Te remenice služe kako bi spriječile naprezanje u zglobovima za vrijeme savijanja. Remenice se mogu podijeliti u 3 vrste s obzirom na njihov položaj. Imamo pet prstenastih remenica (A1, A2, A3, A4, A5) i tri križna (C1, C2, C3). A2 i A4 su pozicionirane u razini proksimalne falange, odnosno medijalne (srednje) falange. Dok su A1, A2, A3 pozicionirani u razini MCP, PIP, DIP zglobova. Najvažniju funkciju imaju A2 i A4, dok A3 dolazi do izražaja u slučaju kada su prve dvije remenice (A2 i A4) oštećene. A3 remenica je relativno slabija i bliža PIP zglobu, ona je fleksibilnija te radi toga opterećenje prvo zahvaća A2 i A4 [4]. Također C1 se nalazi između remenica A2 i A3, C2 između A3 i A4, a C3 između A4 i A5.



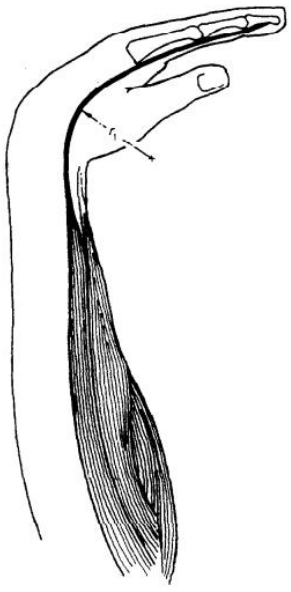
Slika 2.1 Remenice u prstima[4]

2.2 Ručni zglob

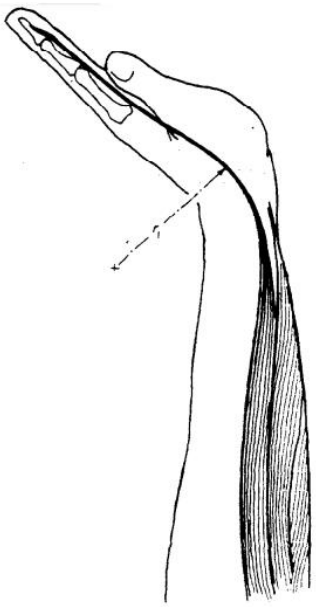
Za pokretanje zgloba i ruke imamo sedam mišića koji su prikazani na slici 2.2, a to su *flexor carpi radialis* (FCR), *flexor carpi ulnaris* (FCU), *flexor digitorum profundus* (FDP), *flexor digitorum superficialis* (FDS), *extensor carpi radialis brevis* (ECRB), *extensor carpi radialis longus* (ECRL) i *extensor carpi radialis ulnaris* (ECU) [4]. Mišići koji prvotno sudjeluju u pokretanju zgloba su FCR, FCU, ECRB, ECRL i ECU. Svi ovi mišići se mogu podijeliti s obzirom na njihove primarne funkcije, pa tako mišići FCR i FCU imaju kao primarni zadatak savijanje, ECRB, ECRL, ECU služe za rastezanje, dok FCR, ECRB, ECRL služe za radijalno odstupanje, odnosno FCU i ECU ulnarno odstupanje. Prilikom pokretanja zglobova svaka tetiva napravi određeno naprezanje kako bi se ručni zglob uspio pomaknuti. Ipak ručni zglob kao remenica najviše se proučava kada se nalazi u području savijanja i rastezanja. Osnovni izgled kako se provode ispitivanja je prikazan na slikama 2.3, 2.4



Slika 2.2 Mišići za pokretanje zgloba i ruke [5]



Slika 2.3 Savijanje ručnog zgloba[6]



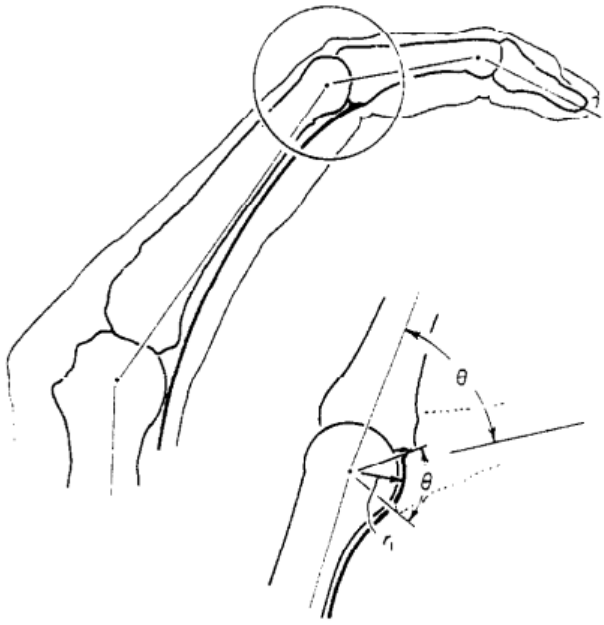
Slika 2.4 Istezanje ručnog zgloba[6]

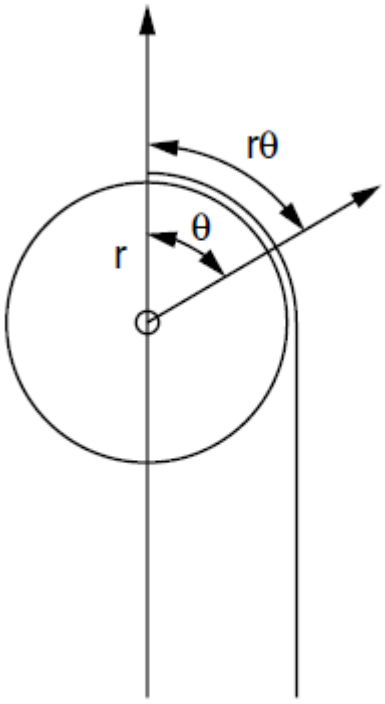
3. Landsmeerovi modeli tetiva prstiju ruke kao sustav remenica

Landsmeer je razvio tri biomehanička modela za pomak tetiva prilikom savijanja. Pomicanje tetiva-zglob je određeno prostornom vezom između tetiva i ligamenata [4]. S obzirom da su razvijena tri različita modela i potrebno je svaki pojedinačno opisati model će se označiti kao Landsmeerov model I, Landsmeerov model II i Landsmeerov model III

3.1 Landsmeerov model I

U prvom modelu je pretpostavljeno da tetiva se nalazi na zakrivljenoj zglobnoj površini proksimalne kosti. Za vrijeme pomicanja zgloba, proksimalna zglobna površina može biti opisana kao žlijeb. Ovaj model dobar je za opisivanje ekstenzorskih mišića, čija je primarna funkcija usmjeravati prste [4]. Na slikama 3.1, 3.2 je prikazan Landsmeerov model I. Slika 3.1 prikazuje prst, dok slika 3.2 prikazuje pojednostavljeni prikaz tako da ga je matematički jednostavnije za opisati.





Slika 3.1 Landsmeerov model I - prst [6] **Slika 3.2 Landsmeerov model I - Pojednostavljeni prikaz[4]**

Veza pomicanja tetive i zgloba može se opisati sljedećom relacijom:

$$x = r\theta. \tag{3.1}$$

U ovoj jednadžbi parametri su sljedeći:

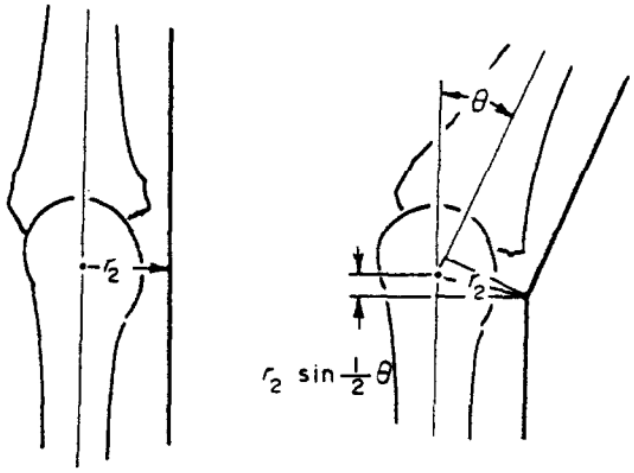
x – pomak tetive

r – udaljenost središta zgloba do tetive

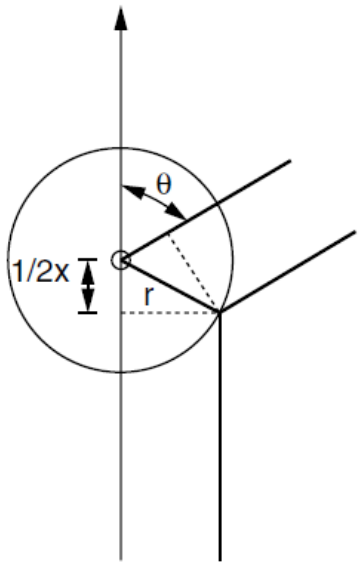
θ - kut rotacije zgloba

3.2 Landsmeerov model II

U ovom modelu pretpostavlja se da je tetiva spriječena od napinjanja geometrijskim ograničenjima. Ako se tetiva ne nalazi kao u prvom Landsmeerovom modelu može doći do pomicanja iz zgloba kada je savinut. U idealnom slučaju geometrijska ograničenja prepolovljuju kut zgloba a tetiva počinje dobivati oblik dvije presječene ravne linije [4]. Na slikama 3.3 i 3.4 opisani su Landsmeerovi modeli, kao i u prvom slučaju slika 3.3 predstavlja uvećani prst, a slika 3.4 jednostavniji prikaz.



Slika 3.3 Landsmeerov model II - prst[6]



Slika 3.4 Landsmeerov model II - Pojednostavljeni prikaz[4]

Veza pomicanja tetive i zgloba kao i u prvom modelu može se opisati sljedećom relacijom:

$$x = 2r \sin(\theta/2). \tag{3.2}$$

U ovoj jednadžbi parametri su sljedeći:

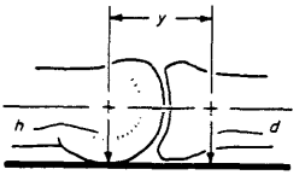
x – pomak tetive

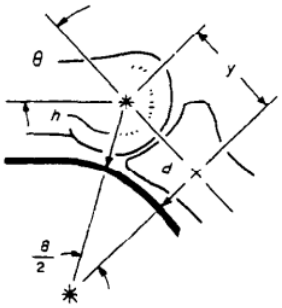
r – udaljenost središta zgloba do tetive

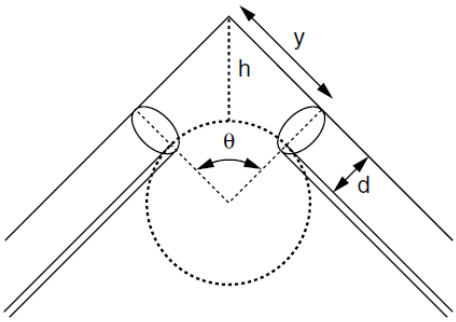
θ - kut rotacije zgloba

3.3 Landsmeerov model III

Za razliku od prethodnog modela, Landsmeerov treći model se bazira na pretpostavci da napinjanja postoje. U ovom modelu se prikazuje tetiva koja prolazi kroz omotač koji je oslonjen na kosti, što ujedno omogućuje da tetiva prelazi glatko oko zgloba [4]. Na slikama 3.5 i 3.6 su kao i u prethodna dva modela prikazani uvećani prst, a druga slika predstavlja pojednostavljeni prikaz.







Slika 3.5 Landsmeerov model III - prst [6] **Slika 3.6 Landsmeerov model III - Pojednostavljeni prikaz[4]**

Iz slike je vidljivo da su tetiva i zglob povezani na sljedeći način:

$$x = 2[y + \frac{\theta}{2}(d - y/\tan(\theta/2)]. \quad (3.3)$$

U ovoj jednadžbi parametri su sljedeći:

x – pomak tetive po zglobu

y – udaljenost između osi kostiju (od točke gdje počinje tetiva preko zavoja do centra zgloba)

θ - kut rotacije zgloba

d – udaljenost tetive do osi kostiju

Kada su kutevi θ < 20º (mali kutevi) tan $\theta/2$ je skoro pa $\theta/2$ pa se jednadžba može napisati na sljedeći način:

$$x = d\,\theta. \quad (3.4)$$

Što ukazuje na to da Landsmeerov model I bi bila dobra aproksimacija Landsmeerova modela III.

3.4 Procjena valjanosti modela

Da bi se odlučilo koji model je najbolji uzete su tri muške ruke i jedna ženska [6]. Debljina zglobova u prstima uzeta je kao mjera. Ruka jedan, dva i četiri su bile muške, a ruka tri je bila ženska. Debljina zglobova za različite ruke prikazane su u Tablici 1

Tablica 1- vrijednosti debljine zglobova u prstima (sve vrijednosti u mm) [6]

zglob	ruka	1	2	3	4
Distalni interfalangealni	1	18,5	17	15	14,5
	2	16,5	17	16	14,5
	3	9	10	9,5	8,5
	4	14,5	17	15	12,5
Proksimalni interfalangealni	1	21,5	22	19,5	19
	2	21,5	22	21,5	17
	3	11,5	12,5	12	10,5
	4	17	19,5	17,5	14,5
metakarpofalangealni	1	26,5	27	23,5	20,5
	2	25	26,5	22,5	21
	3	18	19	18	15,5
	4	25,5	26	24	20

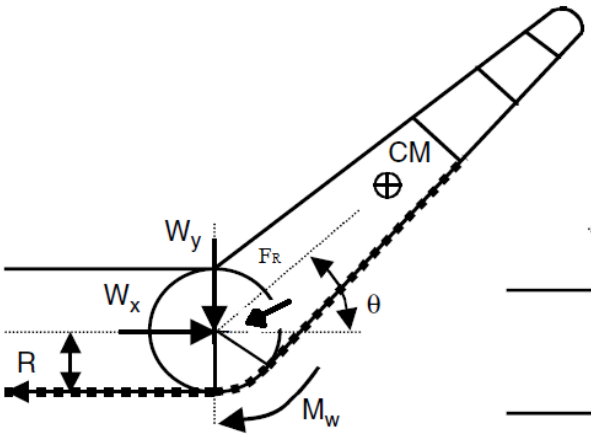
Mjerenja su bazirana na tome da je pretvarač sile bio postavljen između ruke i nepomičnog mikrometra [6]. Za sva mjerenja imali smo utjecaj sile od 19,5 N na tetivu. Pošto su ispitivane četiri različite ruke i na svakoj ruci četiri različita prsta imali smo ukupno šesnaest ispitivanja zglobova. Promatralo se osam do petnaest pozicija za svaku tetivu svakog zgloba [6]. Landsmeerova prva dva modela zasnivaju se na jednom parametru (r), dok se treći model zasniva na 2 parametra (d i y). Da bi parametri bilo značajni odnosno mogući za korištenje u modelima, potrebno je da zadovolje uvjet da je pomicanje tetive $x \leq 0,05$. Za svaki slučaj parametar (d) se pokazao kao značajan za $x \leq 0,05$, ali parametar (y) se pokazao kao koristan u samo sedamnaest od 48 slučajeva za *flexor digitorum profundus* i samo u sedam od 32 slučajeva za *flexor digitorum superficialis.* Stoga se treći model ne može voditi kao relevantan za ova ispitivanja i nije uzet u obzir. Stoga su se uspoređivali Model I i Model II. Model I je

pokazao bolju točnost u 27 od 48 slučajeva za *flexor digitorum profundus*, te 20 od 32 za *flexor digitorum superficialis.* Na kraju se dolazi do zaključka da je Model I pretpostavljen na najvjerodostojnijoj pretpostavci da se tetiva premješta po žlijebu kao zakrivljena površina.

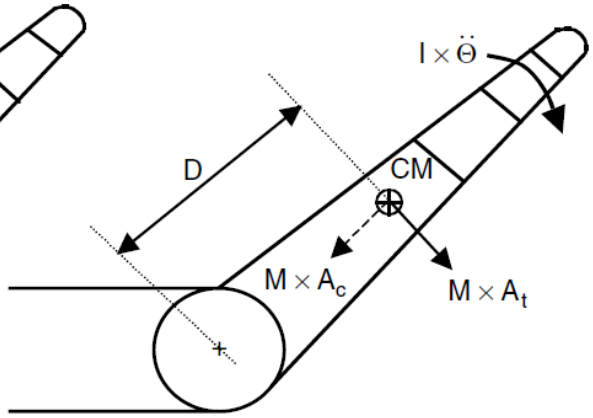
4. Dinamički model tetiva kao sustav remenica

Pošto je statički model već opisan, ovdje ćemo se baviti analizom dinamičkog modela kao sustava remenica. Prvo što je potrebno napraviti je uključiti dinamičku komponentu kutnog ubrzanja. Dinamički model je dvodimenzijski u kojem su analizirane samo sile savijanja i istezanja. Ovaj model proučava maksimalno kutno ubrzanje s obzirom na rezultantnu silu koju ligamenti ručnog zgloba i karpalnih kostiju vrše na tetive i njihove omotače.

Ključne sile i gibanja u modelu uključuju reakcijske sile koje djeluju u središtu ručnog zgloba (W_x *i* W_y), te moment (M_w) potreban za savijanje ručnog zgloba. Također imamo inercijske sile (M *x* A_c *and* M *x* A_t) i inercijski moment (I *x* $\ddot{\Theta}$) koji djeluje oko središta šake [4]. Sve sile, momenti kao i inercijske sile i momenti prikazani su na slika 4.1 i 4.2



Slika 4.1 Sile i moment [4]



Slika 4.2 Inercijske sile i inercijski moment [4]

Zbog ravnoteže moment oko zgloba mora biti jednak momentu koji djeluje oko središta šake stoga će jednadžba glasiti:

$$F_T R = MA_t D + I\ddot{\Theta}. \tag{4.1}$$

Parametri su sljedeći:

M - masa

A_t - tangencijalno ubrzanje

F_T - sila u tetivi

I – moment inercije ruke prilikom savijanja

$\ddot{\Theta}$ – kutno ubrzanje

Izraz za tangencijalno ubrzanje moguće je zapisati:

$$A_t = D\ddot{\Theta}, \tag{4.2}$$

Stoga izraz (4.1), kada se u njega ubaci izraz (4.2) prelazi u sljedeći izraz:

$$F_T R = MD^2\,\ddot{\Theta} + I\ddot{\Theta}, \tag{4.3}$$

Daljnjim sređivanjem dobijemo da je sila tetive jednaka:

$$F_T = \frac{(MD^2 + I)\ddot{\Theta}}{R}, \tag{4.5}$$

Na kraju rezultirajuća reakcijska sila izgleda:

$$F_R = 2\,\frac{(MD^2 + I)\ddot{\Theta}}{R}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right). \tag{4.6}$$

U ovoj jednadžbi imamo parametre:

R – radijus zakrivljenosti tetive

M – masa šake

D – razmak između centra mase ruke i zgloba

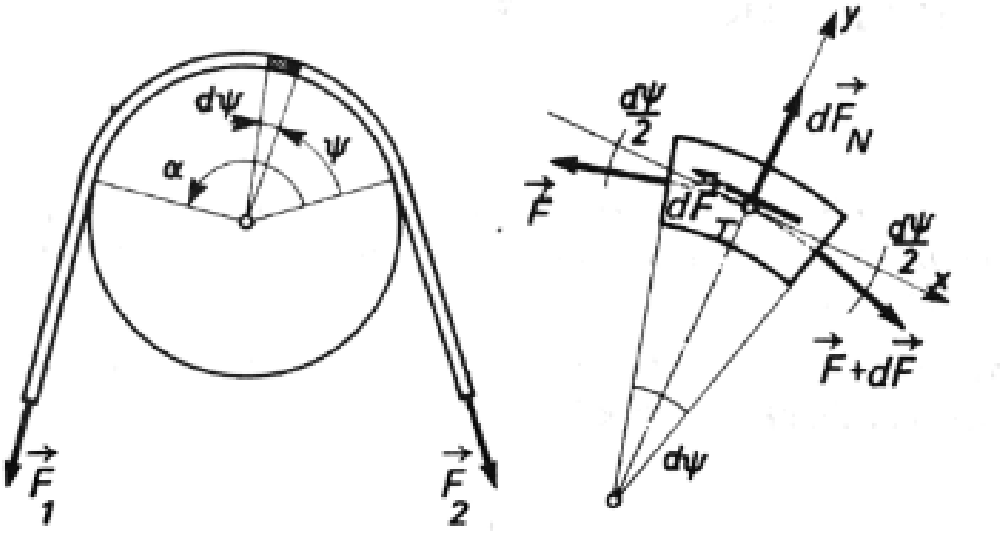
θ – kut odstupanja ručnog zgloba

Ova jednadžba ukazuje na to da rezultirajuća reakcijska sila je funkcija kutnog ubrzanja, radijusa zakrivljenosti i odstupanja ručnog zgloba. Stoga napori s većim kutnim ubrzanjem bi rezultirali s većom rezultirajućom silom nego oni s manjim kutnim ubrzanjem. Prednost ovog modela u odnosu na statički je naravno u tome što su uključene dinamičke varijable kutnog ubrzanja u procjenu rezultirajuće reakcijske sile tetive. Ipak je ovo dvodimenzijski model i još uvijek se treba razvijati.

5. Armstrongov model tetiva ručnog zgloba

Model koji će se ovdje opisivati baziran je na remenici.. Kada se to izvede i dokaže taj princip potrebno ga je primijeniti na ručnom zglobu.

Na slici 5.1 objašnjene su sile koje djeluju u užetu.



Slika 5.1 Opterećenje užeta[7]

Kut α predstavlja zahvat, dok Ψ i $d\ \Psi$ predstavljaju promjenu i prirast kuta na kojem se nalazi element užeta. S obzirom na ucrtane sile jednadžba ravnoteže glasi:

$$\sum F_x = 0; \qquad (F + dF)\cos\frac{d\,\Psi}{2} = F\cos\frac{d\,\Psi}{2} + \mu\, dF_N, \tag{5.1}$$

$$\sum F_Y = 0; \qquad dF_N = (F + dF)\sin\frac{d\,\Psi}{2} + F\sin\frac{d\,\Psi}{2}, \tag{5.2}$$

Iz jednadžbe (6.1) slijedi:

$$dF\cos\frac{d\,\Psi}{2} = \mu\, dF_N, \tag{5.3}$$

$$dF = \mu\, dF_N. \tag{5.4}$$

Iz jednadžbe (6.2) imamo sljedeće:

$$dF_N = F\ d\Psi. \tag{5.5}$$

Nakon uvrštavanja jednadžbe (6.5) u (6.4) dobivam sljedeće:

$$dF = \mu\, F\ d\Psi, \tag{5.6}$$

Daljnjim sređivanjem jednadžbe (6.6) imamo sljedeće:

$$\frac{dF}{F} = \mu \, d\Psi, \tag{5.7}$$

Sada je potrebno integrirati jednadžbu (6.7):

$$\int_{F_1}^{F_2} \frac{dF}{F} = \int_{0}^{\alpha} \mu \, d\Psi \, , \tag{5.8}$$

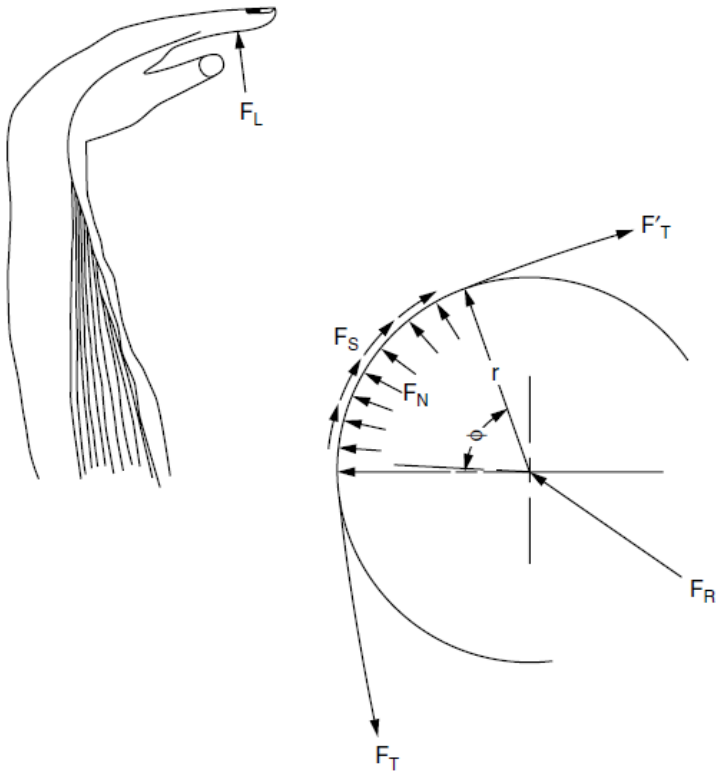
Nakon integriranja

$$\ln \frac{F_2}{F_1} = \mu\alpha, \tag{5.9}$$

Te na kraju imamo sljedeće:

$$F_2 = F_1 \, e^{\mu\alpha}. \tag{5.10}$$

Izraz (5.10) omogućuje izračunavanje sila u užetu namotanog na cilindrični valjak ili u remenu kod remenice. Sada je ovo izvedeni model koji je potrebno primijeniti na ručni zglob pošto je pretpostavljeno da je zglob moguće opisati kao remenicu. Otkriveno je da kada je zglob savijen da su tetive pridržane pomoću *flexor retinaculum* na volarnoj (volarna fleksija predstavlja savijanje šake prema unutra) strani karpalnog tunela (prostor ispod tetive) [8]. Zbog toga odstupanje zgloba iz neutralne pozicije uzrokuje da se tetive premještaju i prolaze susjedan zid karpalnog tunela [4]. Stoga se pretpostavlja da kada tetiva prelazi preko zakrivljene površine je analogno namotaju remena oko remenice, odnosno užeta oko cilindričnog valjka, kao što je prikazano gore. To je prikazano na slici 5.2



Slika 5.2 Prikaz ručnog zgloba kao remenice[4]

Primjenjujući relacije koje su gore već opisane i koristeći sliku 5.2 radijalnu reakciju silu možemo zapisati:

$$F_R = F_T\,(1 + e^{\mu\theta})\sin\left(\frac{\theta}{2}\right). \tag{5.11}$$

U ovoj jednadžbi parametri su sljedeći:

F_R – radijalna reakcijska sila

F_T – sila tetive

μ – koeficijent trenja između tetive i tkiva

θ – kut ručnog zgloba (u radijanima)

Ovdje se javlja i normalna komponenta sile i može se izraziti po jedinici duljine luka kao:

$$F_N = \frac{F_T\,(1 + e^{\mu\theta})\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{r\theta}. \tag{5.12}$$

U ovoj jednadžbi imamo

F_N – normalna sila koja se vrši na tetivu

r – radijus pridržavajućeg tkiva

S obzirom da su u zglobovima koeficijenti trenja mali (μ < 0,04),kao i kutevi θ, za vrijednosti $\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$ se može pisati samo $\left(\frac{\theta}{2}\right)$ pa jednadžba (5.12) prelazi u sljedeću jednadžbu:

$$F_N = \frac{F_T}{r}\,. \tag{5.13}$$

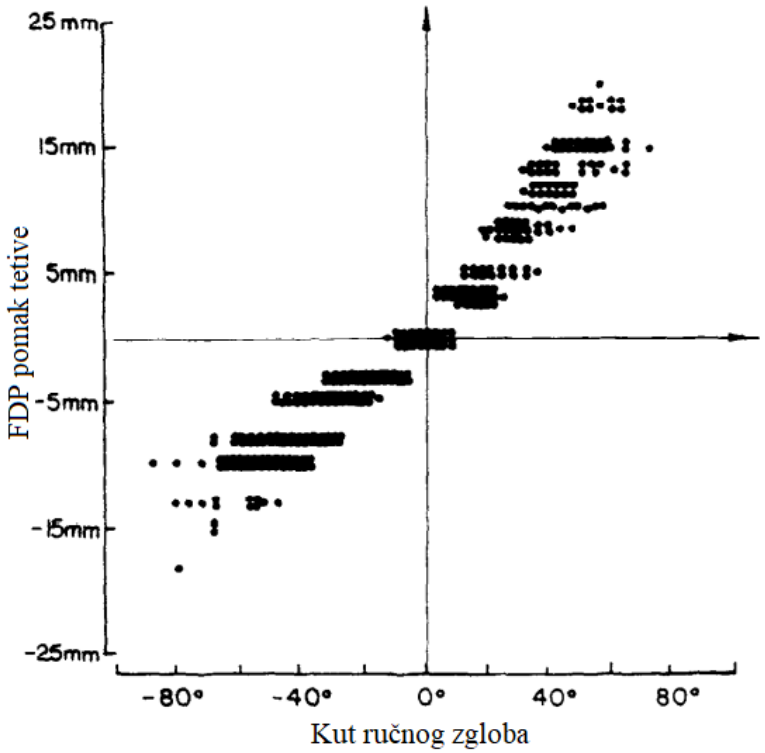
Iz ove jednadžbe je vidljivo da je normalna sila funkcija koja ovisi o sili tetive i radijusa zakrivljenosti. U slučaju da se sila tetive povećava povećavat će se i normalna sila. Za razliku od normalne sile radijalna sila ne ovisi o radijusu zakrivljenosti. Također ovaj model ima određeni nedostatak, a to je što nisu uključene dinamičke komponente pomicanja ručnog zgloba kao što su kutna brzina i kutno ubrzanje.

Nakon što je sve izvedeno potrebno je provesti ispitivanje savijanja ručnog zgloba s obzirom na različitu debljinu ručnog zgloba. U tablici 2 su prikazani podaci koji su korišteni prilikom ispitivanja savijanja ručnog zgloba

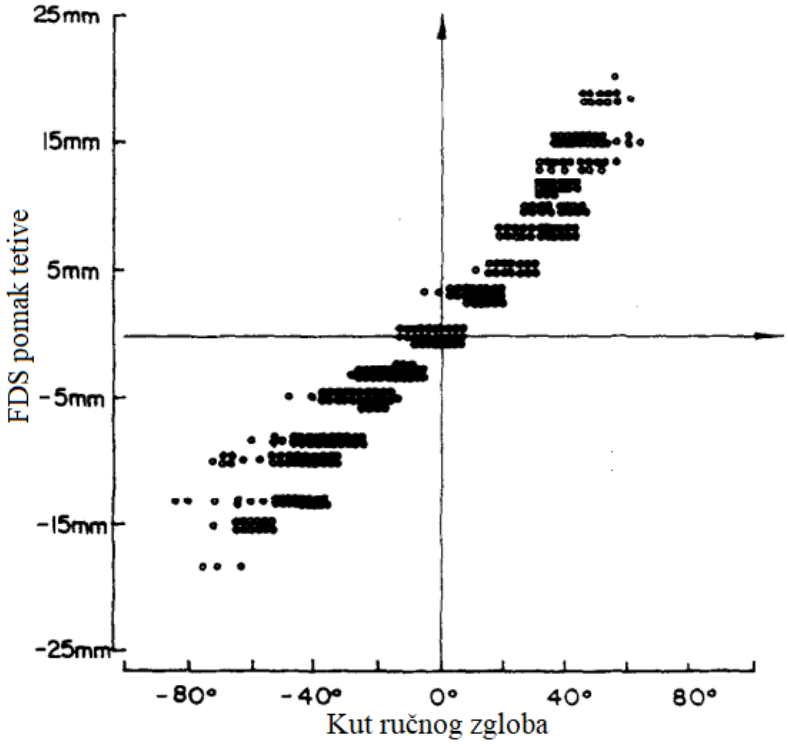
Tablica 2 vrijednosti debljine ručnog zgloba (sve vrijednosti u mm) [6]

Ručni zglob	1	45,5
	2	35,5
	3	30
	4	39,5

Nakon provedenih ispitivanja dobiveni su rezultati kako se mijenja pomak tetive za superficialis i profundus (ti mišići služe za pomicanje ručnog zgloba i opisani su u odjeljku 2.2) s obzirom na promjenu kuta ručnog zgloba. Rezultati su prikazani na slikama 5.3 i 5.4



Slika 5.3 FDP pomak tetive[6]



Slika 5.4 FDS pomak tetive[6]

Nakon što su dobiveni rezultati pomaka tetive s obzirom na savijanje ručnog zgloba razvijen je model po kojem se može izračunati pomak tetive [6]:

$$\text{Pomak tetive (mm)} = 0{,}0263W_1 + 0{,}005W_1W_2 + 0{,}016W_1W_3 - 0{,}000960W_1W_2W_4 \qquad (5.14)$$

U ovoj jednadžbi izrazi su sljedeći:

W_1 – kut zgloba u stupnjevima od neutralne pozicije zgloba ($W_1 = 0$ za savijanje, $W_1 = 1$ za rastezanje)

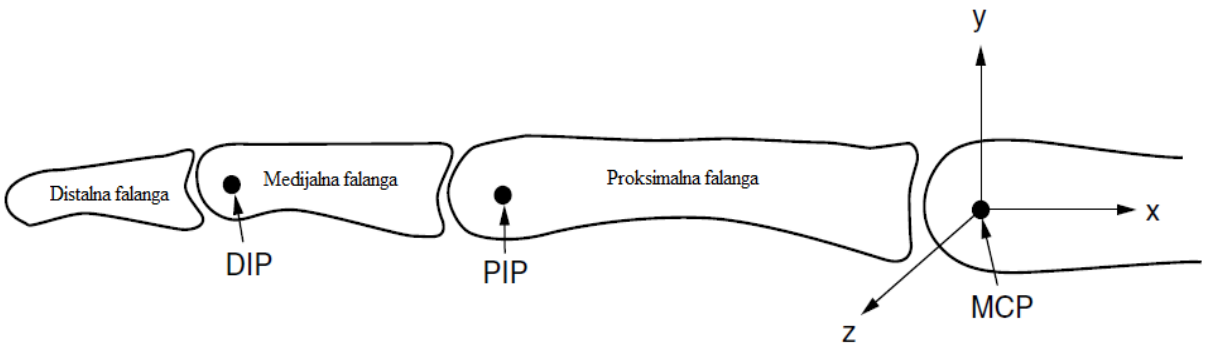
W_2 – debljina zgloba

W_3 – 0 za rastezanje, 1 za savijanje

W_4 – 0 za superficialis, 1 za profundus

6. Model za zahvat šake i cilindrične ručke

Iz biomehaničke perspektive FDP i FDS mišići predstavljaju najveći izvor snage za savijanje prstiju pogotovo prilikom obuhvaćanja određene ručke za čvrsto držanje. Svaki prst je opisan kartezijevim koordinatom sustavom. Os *x* je aksijalna os falange usmjerujući proksimalno, okomito na os *x* je os *y* koja pokazuje dorzalno, dok os *z* pokazuje radijalno kako je i prikazano na slici 6.1 [4].



Slika 6.1 Koordinatni sustav prsta[4]

Pošto je potrebno definirati samo dvije osi, os *x* i *y*, ovo je 2D model, koji bi trebao biti prikladan za većinu upotreba. Potrebno je također odrediti nekoliko pretpostavki [4]:

- pošto će mišić biti u opuštenom stanju, efekt dubinskih mišića i ekstenzora može biti zanemaren kod savijanja prstiju
- pretpostavlja se da svi zglobovi dopuštaju samo savijanje i ispravljanje prsta.
- tetive i njihovi omotači su pretpostavljeni kao sustav užeta namotan na remenicu između kojih nema trenja
- sile koje djeluju smatraju se jedinstvenima i njihov smjer je pretpostavljen kao okomit na glavnu os kostiju
- težina kostiju kao i mekog tkiva se zanemaruje
- zbog neodređenosti omjer tetiva sile od FDS i FDP na svaku falangu se pretpostavlja da je 3:1 a, α se pretpostavlja da je 0,333
- momenti tetive ruke (*mm*) (predstavlja udaljenost na kojoj se nalaze sile mišića FDP i FDS kako bi vršile moment) su procijenjeni za DIP, PIP, i MCP zglobove za različite debljine prema Armstrongu sljedećim jednadžba [4]:

$$PR_{ik} = 6{,}19 - 1{,}66X_1 - 4{,}03X_2 + 0{,}225X_3, \quad (6.1)$$

$$SR_{ik} = 6{,}42 + 0{,}1X_1 - 4{,}03X_2 + 0{,}225X_3. \quad (6.2)$$

PR_{ik} – FDP moment ruke gdje *i*-ti predstavlja prst a *k*-ti zglob

SR_{ik} – FDS moment ruke gdje *i*-ti predstavlja prst a *k*-ti zglob

X_1 – 1 za PIP, a 0 za sve ostale

X_2 – 1 za DIP, a 0 za sve ostale

X_3 – debljina zgloba (mm)

Nakon što se ove relacije uvrste u jednadžbe (7.1) i (7.2) dobivamo sljedeće:

$$PR_{DIP} = 2{,}16 + 0{,}225\ X_3, \quad (6.3)$$

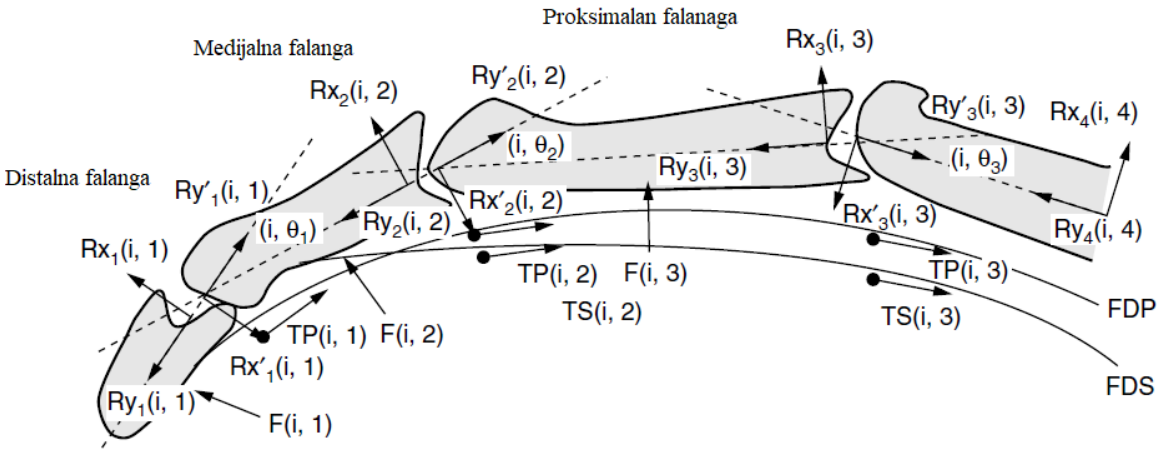
$$PR_{PIP} = 4{,}53 + 0{,}225\ X_3, \quad (6.4)$$

$$SR_{PIP} = 6{,}52 + 0{,}225\ X_3, \quad (6.5)$$

$$PR_{MCP} = 6{,}19 + 0{,}225\ X_3, \quad (6.6)$$

$$SR_{MCP} = 6{,}42 + 0{,}225\ X_3. \quad (6.7)$$

Kako bi se utvrdilo naprezanje koje se javlja u tetivama potrebno je uvesti lokalni koordinatni sustav, pa tako imamo da je *y* os postavljena u smjeru *x* osi u globalnom koordinatnom sustavu. Kako bi se razumio koordinatni sustav prikazano je na slici 6.2.



Slika 6.2 Lokalni koordinatni sustav prsta[4]

Također potrebno je na slici objasniti sve parametre, pa tako imamo *i* koji nam označuje prste, *j* označuje zglobove (DIP, PIP, MIP i ručni zglob), dok *k* označuje falange (distalna, medijalna, proksimalna i metakarpalna kost). Imamo i djelovanje sila na svaku falangu svakog prsta i njih označujemo s *F(i,k),* dok duljinu svake falange označujemo *L(i,k).*Kut savijanja zgloba prstiju mjeri se s obzirom na ispruženu ruku i označuje (i, Θ_j). Sila tetiva koju uzrokuje FDP za svaku falangu se označuje s *TP(i,k),* dok silu tetiva koju uzrokuje FDS se označuje *TS(i,k).* Imamo i sile koje se javljaju zbog ograničenja zglobova s ozbirom na x i y os i njih označujemo $R_{xk}(i,j)$ i $R_{yk}(i,j)$ [4].

S obzirom na prikazanu sliku potrebno je napraviti jednadžbe ravnoteže za svaku falangu, pa tako za distalnu falangu slijedi:

$$TP(i,1) = \frac{0{,}5L(i,1)F(i,1)}{PR(i,1)}, \tag{6.8}$$

$$R_{y1}(i,1) = TP(i,1)\cos(i,\Theta_1), \tag{6.9}$$

$$R_{x1}(i,1) = TP(i,1)\sin(i,\Theta_1). \tag{6.10}$$

Za medijalnu falangu imamo sljedeće:

$$TP(i,2) = \frac{[0{,}5F(i,2) - R_{X1}(i,1)\cos(i,\Theta_1) + R_{Y1}(i,1)\sin(i,\Theta_1)]L(i,2)}{\alpha\, SR(i,2) + PR(i,2)}, \tag{6.11}$$

$$TS(i,2) = \alpha\, TP(i,2), \tag{6.12}$$

$$R_{y2}(i,2) = R_{x1}(i,1)\sin(i,\Theta_1) + R_{y1}(i,1)\cos(i,\Theta_1) + (\alpha+1)\,TP(i,2)\cos(i,\Theta_2), \tag{6.13}$$

$$R_{x2}(i,2) = R_{x1}(i,1)\cos(i,\Theta_1) - R_{y1}(i,1)\sin(i,\Theta_1) + (\alpha+1)\,TP(i,2)\sin(i,\Theta_2) - F(i,2). \tag{6.14}$$

Na kraju za proksimalnu falangu imamo:

$$TP(i,3) = \frac{[0{,}5F(i,3) - R_{X2}(i,2)\cos(i,\Theta_2) + R_{Y2}(i,2)\sin(i,\Theta_2)]L(i,3)}{\alpha\, SR(i,3) + PR(i,3)}, \tag{6.15}$$

$$TS(i,3) = \alpha\, TP(i,3), \tag{6.16}$$

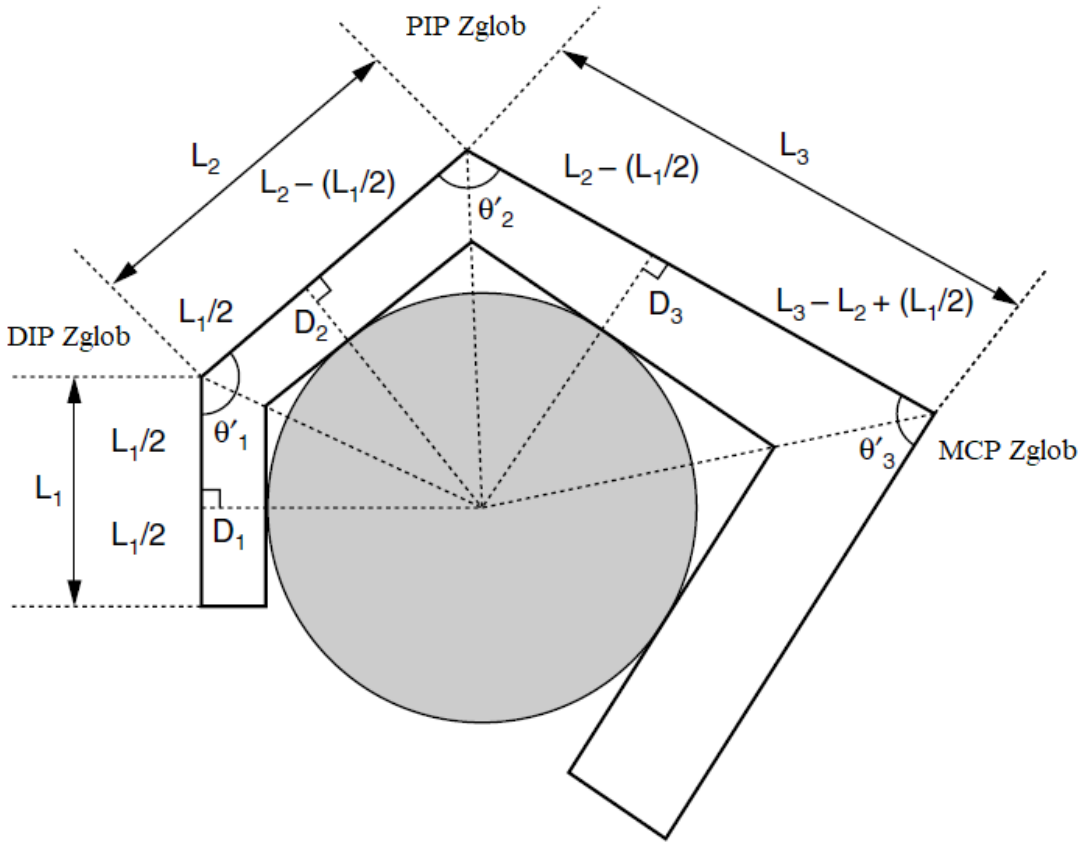
$$R_{y3}(i,3) = R_{x2}(i,2)\sin(i,\Theta_2) + R_{y2}(i,2)\cos(i,\Theta_2) + (\alpha+1)\,TP(i,3)\cos(i,\Theta_3), \tag{6.17}$$

$$R_{x3}(i,3) = R_{x2}(i,2)\cos(i,\Theta_2) - R_{y2}(i,2)\sin(i,\Theta_2) + (\alpha+1)\,TP(i,3)\sin(i,\Theta_3) - F(i,3). \tag{6.18}$$

Nakon što su postavljene jednadžbe za izračunavanje sila u tetivama potrebno nam je odrediti kutove θ_i *(i=1,2,3).* U interesu nam je da se postignu što manje sile u tetivama koje bi mogli iskoristit za oblikovanje cilindrične ručke. Za tipični zahvat postoje dva načina na koji se može definirati geometrija falangi i cilindrične ručke.

6.1 Prvi model zahvata šake i cilindrične ručke

Prvi način se temelji na pretpostavci da je prva točka dodira između distalne falange i ručke u sredini te je zbog toga duljinu distalne falange moguće podijeliti na dva jednaka dijela. Druga točka dodira koja se nalazi između medijalne falange i ručke nije podijeljena jednako već je jedan dio jednak $L_1/2$, a drugi dio pošto je duljina ukupne medjialne falange L_2 iznosi $L_2 - L_1/2$. Na kraju treća točka dodira koja se nalazi između proksimalne falange i ručke dijeli se na 2 različita dijela. Prvi dio je jednak $L_2 - L_1/2$, dok je drugi s obzirom da je ukupna duljina jednaka L_3 jednak $L3 - L2 + L_1/2$. Opisani model je prikazan na slici 6.3.



Slika 6.3 Prvi model zahvata šake i cilindrične ručke[4]

S obzirom na gore opisani model i na sliku potrebno je odrediti relaciju pri kojoj se izračunava svaki kut θ_i *(i=1,2,3)*

Budući da kut θ_1 je prepolovljen i linija kojom je kut prepolovljen čini dijagonalu pravokutnog trokuta koji je omeđen duljinama *L1/2* i (D_1 + *R*) imamo sljedeću relaciju

$$\tan\frac{\theta_1}{2} = \frac{2(D_1 + R)}{L_1}, \tag{6.19}$$

Što je zapravo jednako:

$$\theta_1 = 2 \text{ arctg } [2(D_1 + R)/ L_1]. \tag{6.20}$$

U ovoj jednadžbi elementi su sljedeći:

θ_1 – kut zgloba DIP
R – polumjer cilindrične ručke
D_1 – debljina distalne falange

Sada je potrebno pronaći jednadžbu kojom se izračunava kut θ_2. Kut θ_2 je prepolovljen linijom koja čini dijagonalu pravokutnog trokuta koji je omeđen duljinama (L_2 - *L1/2*) i ($R+D_2$), kako je i vidljivo na slici 6.3, te onda imamo sljedeći izraz:

$$\tan\frac{\theta_2}{2} = \frac{D_2 + R}{L_2 - L_1/2}, \tag{6.21}$$

Što je za izračunavanje kuta zapravo jednako:

$$\theta_2 = 2 \text{ arctg } \frac{2(D_2 + R)}{2L_2 - L_1}. \tag{6.22}$$

Gdje imamo:

θ_2 – kut zgloba PIP

D_2 – debljina medijalne falange

I na kraju je potrebno pronaći jednadžbu kojom se može izračunati kut θ_3. Dijagonala koja prepolavlja kut θ_3 zajedno s duljinama ($L_2 - L_1/2$) i ($L_3 - L_2 + L_1/2$) čini pravokutni trokut. Stoga za kut θ_3 imamo sljedeći izraz:

$$\tan\frac{\theta_3}{2} = \frac{D_3 + R}{L_3 - L_2 + L_1/2}, \tag{6.23}$$

Što kada se izraz sredi da imamo čisti kut imamo sljedeće:

$$\theta_3 = 2\,\text{arctg}\,\frac{2(D_3 + R)}{2L_3 - 2L_2 + L_1}. \tag{6.24}$$

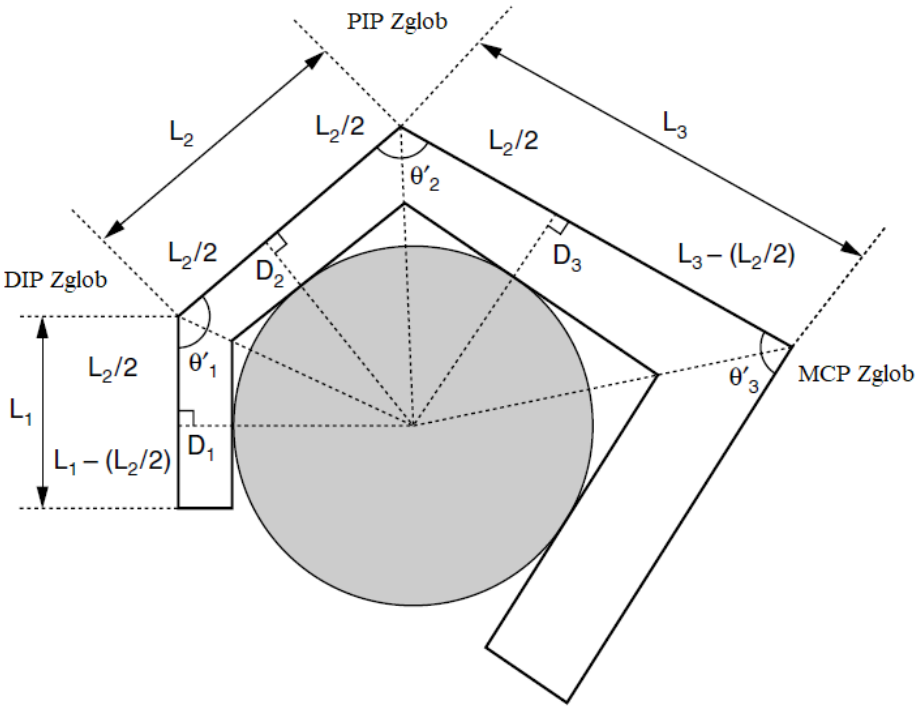
Ovdje imamo sljedeće izraze:

θ_3 – kut zgloba MCP

D_3 – debljina proksimalne falange

6.2 Drugi model zahvata šake i cilindrične ručke

Drugi model se temelji da je druga točka dodira ona koja spaja medijalnu falangu s cilindričnom ručkom u sredini, te da je moguće tu duljinu raspodijeliti na dva jednaka dijela $L_2/2$. Prva točka nije podijeljena jednako već joj je jedna duljina jednaka $L_2/2$, a druga $L_1 - L_2/2$. Također treća točka dodira je između cilindrične ručke i proksimalne falange koja nije podjeljenja na 2 jednaka dijela već na $L_2/2$ i $(L_3 - L_2/2)$. Ovaj opisani model prikazan je na slici 6.4.



Slika 6.4 Drugi model zahvata šake i cilindrične ručke[4]

Kao što se radilo i za prvi model potrebno je odrediti relacije kojima će se izračunati kut θ_i *(i=1,2,3)*

Iz slike 6.4 vidljivo je da je dijagonala koja raspolavlja kut θ_2 dio pravokutnog trokuta koji je još omeđen stranicama $L_2/2$ i $D_1 + R$. Stoga izraz za računanje kuta θ_2 je slijedeći:

$$\tan\frac{\theta_2}{2} = \frac{2(D_2 + R)}{L_2}, \tag{6.25}$$

Što je zapravo jednako

$$\theta_2 = 2 \text{ arctg } [2(D_2 + R)/L_2]. \tag{6.26}$$

Kada se pogleda pogleda kut θ_1 i trokut u kojem se nalazi, vidimo da je jedina razlika u odnosu na trokut gdje se nalazi θ_2 debljina falange. Pošto smo za kut θ_2 imali debljinu medijalne falange, kod kuta θ_1 imat ćemo debljinu distalne falange. Stoga kut θ_1 se izračunava prema sljedećoj relaciji:

$$\tan\frac{\theta_1}{2} = \frac{2(D_1 + R)}{L_2}, \tag{6.27}$$

što je jednako:

$$\theta_1 = 2 \text{ arctg } [2(D_1 + R)/L_2]. \tag{6.28}$$

Vidljivo je da jedina razlika za izračunavanje kuta θ_1 u odnosu na θ_2 debljina falange.

Na kraju potrebno je odrediti relaciju s kojom ćemo dobiti kut θ_3, a to je potrebno dobiti iz pravkoutnog trokuta gdje dijagonala raspolavlja kut θ_3 i omeđena je stranicama $L_3 - L_2/2$ i $R + D_3$. Stoga imamo sljedeće:

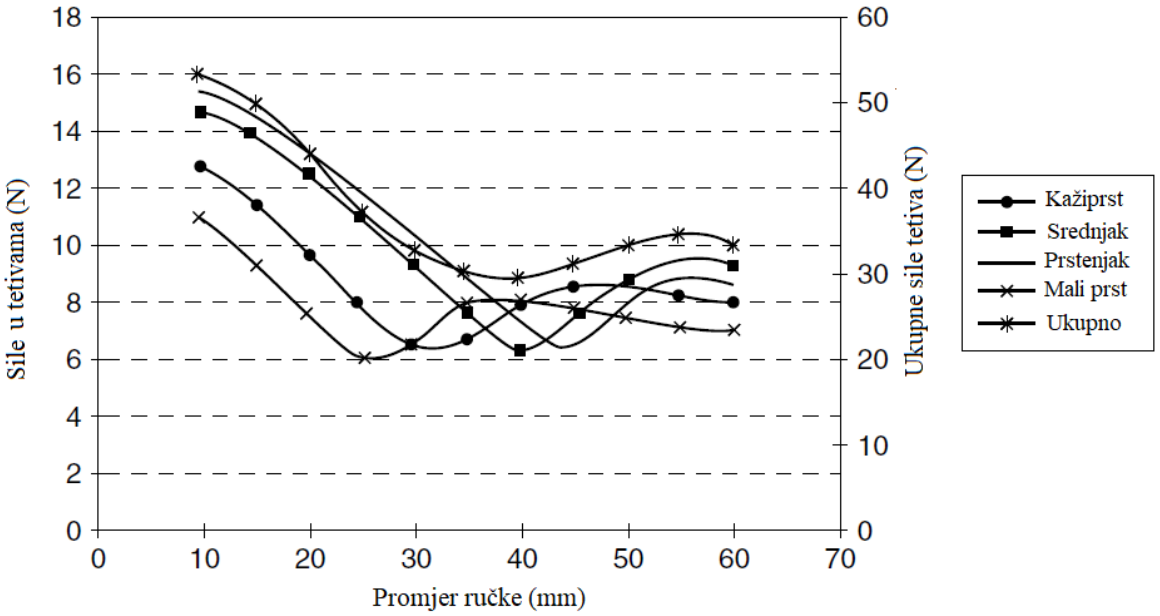
$$\tan\frac{\theta_3}{2} = \frac{D_3 + R}{L_3 - L_2/2}, \tag{6.29}$$

Stoga θ_3 je jednak sljedećem:

$$\theta_3 = 2 \text{ arctg } \frac{2(D_3 + R)}{2L_3 - L_2}. \tag{6.30}$$

6.3 Rezultati ispitivanja

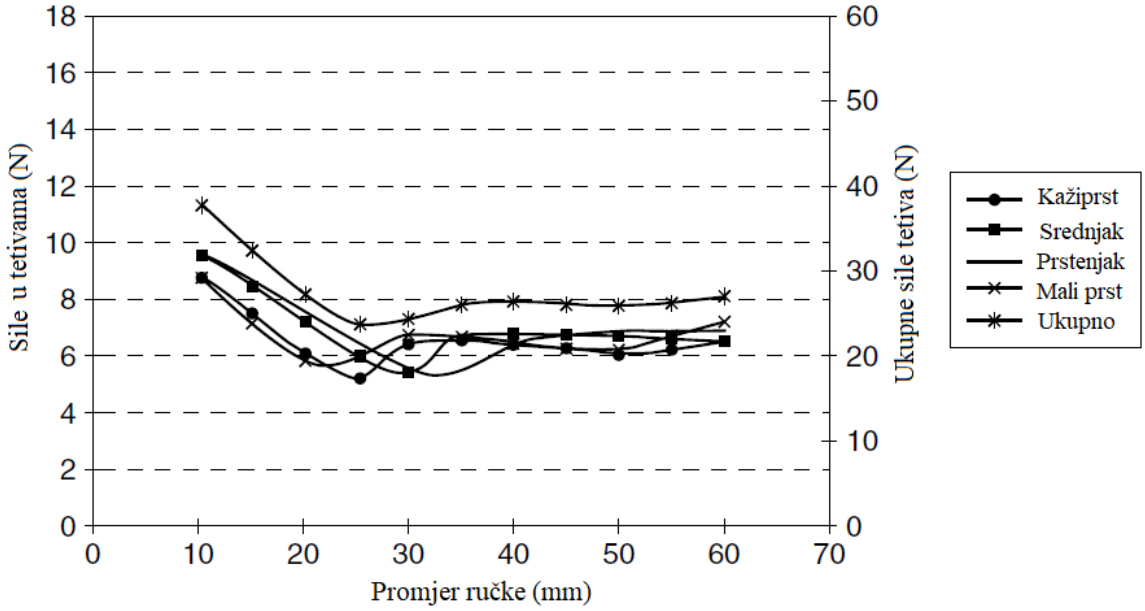
Za oba modela provedena su ispitivanja kolika će biti ukupna sila, te koliko će biti sila u pojedinom prstu. Promjer ručke je varirao od 10 do 60 mm. U sljedećim dijagramima su prikazani rezultati ispitivanja. Slika 6.5 prikazuje rezultate za prvi model za sile u tetivama za svaki prst te ukupno.



Slika 6.5 Sile tetiva za prvi model[4]

Iz grafičkog prikaza koji je vidljiv na slici 6.5 vidljivo je da su najmanje sile za kažiprst pri promjeru oko 35 mm, za srednjak oko 40 mm, za prstenjak oko 45 mm, a za mali prst oko 25 mm. Za ukupne sile u tetivama najoptimalniji promjer ručke je oko 40 mm.

Na slici 6.6 koja također prikazuje sile tetiva s obzirom na promjer prikazani su rezultati za drugi model.



Slika 6.6 Sile tetiva za drugi model[4]

Iz slike 6.6 vidljivo je da su za kažiprst najmanje pri promjeru oko 25 mm, za srednjak su pri promjeru oko 30 mm, za prstenjak također oko 30 mm, a za mali prst oko 20 mm. Najoptimalniji promjer za ukupne sile je oko 25 mm.

7. Zaključak

Šaka sama po sebi je izuzetno komplicirani dio ljudskog tijela. Unutar šake kao što je navedeno imamo veliki broj mišića i kostiju. Također imamo zglobove i tetive. Rad sam po sebi se temelji na opisivanju ručnog zgloba i tetiva kao sustav remenica. Nakon što su objašnjeni različiti modeli koji opisuju tetive u prstima, nakon određenog ispitivanja došlo se do zaključka koji nam model daje najtočniji prikaz. Na kraju rada se opisivao zahvat šake i cilindrične ručke da bi se ustanovilo kolika su naprezanja u tetivama i da bi se vidjelo koliki je optimalni promjer ručke potreban da bi naprezanja u tetivama bila što manja. Tu su bila također ispitivana dva modela, te se došlo do zaključka da je izuzetno teško odrediti optimalnu veličinu ručke koja bi odgovarala za svaki prst, te je potrebno pronaći drugačije modele kojima bi se mogao dobiti promjer koji bi odgovarao za sve prste.

LITERATURA

[1] Tanja Jurčević Lulić: Prezentacije Biomehanički modeli i vezivna tkiva

[2] J. Fanghanel, F. Pera, F. Anderhuber, R. Nitsch: Waldeyerova anatomija čovjeka 1. hrvatsko izdanje, Golden marketing- tehnička knjiga, Zagreb 2009.

[3] Werner Platzer: Priručni Anatomski atlas- sustav organa za pokretanje, Medicinska naklada, Zagreb 2011.

[4] Andris Freivalds: Biomechanics of the upper limbs, CRC press, London 2004.

[5] https://www.pinterest.com/pin/298152437811353616/- pristupljeno 22.2.2018

[6] Thomas J. Armstrong and Don B Chaffin: An investigation of relationship between displacement of finger and wrist joints and the extrinsic flexor tendons- članak iz časopisa Biomechanics, veljača 1978.

[7] Osman Muftić: Mehanika I, Tehnička knjiga, Zagreb 1989.

[8] https://www.slideshare.net/ssuserc33ffb/wrist-and-hand-rucni-zglob-i-saka- pristupljeno 18.2.2018.

[9] Stjepan Jecić: Mehanika II, Tehnička knjiga, Zsgreb 1989.

[10] https://en.wikipedia.org/wiki/Hand- pristupljeno 17.2.2018.

[11] https://en.wikipedia.org/wiki/Tendon.- pristupljeno 16.2.2018.

Prilozi

1. CD-R disc