

# **Ihmiskäden kaltainen ketterä tarttuja**

LAB-ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK), Tieto- ja viestintätekniikka  
2020  
Lari Kallioinen

Tekijä(t) Kallioinen, Lari	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2020
	Sivumäärä 44	
Työn nimi <b>Ihmiskäden kaltainen ketterä tarttuja</b>		
Tutkinto Insinööri (AMK)		
Ohjaavan opettajan nimi, titteli ja organisaatio Tommi Veijalainen, lehtori, Tekniikka, LAB-ammattikorkeakoulu		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio Lari Kallioinen, LAB-ammattikorkeakoulu		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää millainen tarttuja soveltuisi palvelu- ja etärobotiikkaan sekä löytää ketterämpi vaihtoehto yleistarttujille. Tutkimusongelmana oli selvittää, mitä ihmiskäden biomekaanisia rakenteita voidaan hyödyntää mekaanisessa tarttujassa ja rakentaa sen prototyyppi. Opinnäytetyö sisältää kirjallisuuskatsauksen ja tarttujan valmistusta läpi käyvän osuuden.</p> <p>Teoriaosuus on jaettu kahteen aihealueeseen. Tarttujen teoriaosuudessa käydään läpi tarttumat yleisesti ja tarttujilta vaaditut ominaisuudet palvelu- ja etärobotiikassa. Ihmiskäden biomekaniikassa tutkitaan käden rakenteita, tartuntaotteita ja niiden muodostamisen teoriaa. Työssä kuvaillaan ketterän tarttujan eri osien ja mekanismien suunnittelua sekä niiden valmistusta 3D-tulostusta hyödyntämällä. Lopuksi tarttujan suorituskkyä arvioidaan mittauksilla. Opinnäytetyön aineisto koostui kirjoista sekä sähköisesti julkaistuista tutkimuksista ja teoksista.</p> <p>Työ onnistui hyvin ja valmistettu tarttuja täytti lähes kaikki sille asetetut tavoitteet. Työn tärkeimpinä tavoitteina olivat tarttujan ketteryys ja tartuntaotteiden monipuolisuus, jotka toteutuivat erinomaisesti. Opinnäytetyön johtopäätös on, että ihmiskäden ketteryyttä on mahdollista jäljitellä mekaanisella tarttujalla. Jatkokehityksen avulla työssä kehitetty laite voisi soveltua tarttujaksi palvelu- ja etärobotiikkaan.</p> <p>Opinnäytetyö sisältää liitteenä englanninkielisen käännöksen arvostellusta suomenkielisestä opinnäytetyöstä.</p>		
<p>Asiasanat</p> <p>ketterä tarttuja, tarttuja, biomekaniikka, palvelurobotiikka, etärobotiikka</p>		

Author(s) Kallioinen, Lari	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2020
	Number of Pages 44	
Title of Publication <b>An anthropomorphic dexterous gripper</b>		
Name of Degree Engineer (UAS)		
Name, title and organization of the supervising teacher Tommi Veijalainen, Senior Lecturer, Technology, LAB University of Applied Sciences		
Name, title and organization of the client Lari Kallioinen, LAB University of Applied Sciences		
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to determine what type of gripper would best suit service and remote robotics and to find a more dexterous alternative for universal grippers. The research problem in this thesis was to find out what biomechanical structures of the human hand can be utilized in a mechanical gripper and to manufacture a prototype. This thesis includes a literature review and a section on the manufacturing process of the gripper.</p> <p>The theoretical section has been divided into two subject areas. The theory involving grippers describes grippers in general and the properties required of grippers in service and remote robotics. The theory of biomechanics reviews the structures of the hand, grasp types, and theory of generating a grasp. The thesis describes the design of various parts and mechanisms of the dexterous gripper and its manufacturing using 3D printing. Finally, the performance of the gripper is evaluated by using measurements. The material of the thesis consisted of written and electronic sources, as well as electronically published studies and works.</p> <p>The completed work was successful, and the manufactured gripper fulfilled almost all the objectives that were set for it. The thesis concludes that it is possible to imitate the agility of a human hand with a mechanical gripper. With further development, the manufactured device could be suitable as a gripper for service and remote robotics.</p> <p>The thesis includes an English translation of the evaluated thesis as an appendix.</p>		
<p>Keywords</p> <p>dexterous gripper, gripper, biomechanics, service robotics, remote robotics</p>		

## Sisällys

1	Johdanto.....	1
1.1	Työn tarkoitus ja tutkimusongelma.....	1
1.2	Työn rakenne ja rajausta .....	2
1.3	Tutkimusmenetelmät ja käytetty aineisto .....	2
2	Ongelman analyysi .....	4
2.1	Tarttumat .....	4
2.2	Palvelu- ja etärobotiikan toimintaympäristö.....	5
2.3	Tarttumat vaadittavat ominaisuudet .....	6
2.4	Tarttumismekanismit luonnossa.....	7
3	Ihmiskäden biomekaniikka .....	8
3.1	Luusto ja nivelet.....	8
3.2	Lihakset ja jänteet.....	9
3.3	Motorinen kontrolli ja tartuntaotteen muodostaminen.....	12
3.4	Tartuntaotteet .....	13
3.4.1	Tarkkuusote.....	13
3.4.2	Voimaote .....	14
4	Tutkimusprototyypit.....	15
4.1	Tarttuman perusosat.....	15
4.2	Sormen nivelrakenteen testaus.....	15
4.3	Usean toimilaitteen käyttö.....	16
5	Toiminnaltaan ihmiskäden kaltainen ketterä tarttuja.....	18
5.1	Tarttuman tukirakenne .....	18
5.2	Servomoottoreiden kehikko .....	19
5.3	Ligamenttirakenteita simuloivat osat .....	20
5.4	Jänteitä simuloivat osat .....	21
5.5	Tarttuman ohjaus ja sensorit.....	22
5.5.1	EMG .....	23
5.5.2	IR.....	24
5.5.3	Paine ja lämpötilasensori.....	24
6	Tutkimustulokset.....	26
6.1	Tarttuman ominaisuudet .....	26
6.2	Sormien ja peukalon liikelaajuudet.....	27
6.2.1	Peukalon fleksio .....	27
6.2.2	Peukalon oppositio .....	29

6.2.3	Peukalon abduktio ja adduktio .....	29
6.2.4	Sormien fleksio .....	30
6.2.5	Sormien ekstensio .....	32
6.2.6	Sormien abduktio ja adduktio.....	33
6.3	Nyrkkiasennot.....	34
6.4	Tarttumiskyky .....	35
6.4.1	Tarkkuusotteet.....	37
6.4.2	Voimaotteet .....	38
6.5	Tulokset.....	38
7	Johtopäätökset ja pohdinta .....	40
8	Jatkotutkimusehdotukset .....	42
	Lähteet .....	43

## Liitteet

Liite 1. Käännös arvostellusta suomenkielisestä opinnäytetyöstä

# 1 Johdanto

Robottiikkaa löytyy nykyään myös tehdasympäristön ulkopuolella: esimerkiksi kodeissa ja liiketiloissa palvelurobotiikan muodossa. Ensimmäinen kokemukseni palvelurobotiikan kanssa oli tutustuessani SoftBankin Pepper-asiakaspalvelijarobottiin Japanissa. Sen tarjoama palvelu oli varsin rajoittunut, ja olemus oli hyvin lelumainen, mutta eniten kiinnitin huomiota tapaan, jolla robotti vuorovaikutti ihmisen kanssa. Robotin kasvot olivat eloiset ja pään liikkeet yhdistettynä käden eleisiin tekivät asiakaspalvelijasta niin empaattisen tuntuisen, että tuntui työkeältä poistua kesken ystävällistä tuote-esittelyä. Pepperin tapaisia ihmisiä palvelevia ja avustavia robotteja on suunniteltu käytettäväksi myös esimerkiksi sairaaloissa ja vanhainkodeissa informaation jakamiseen ja potilaiden ohjaamiseen laitoksen sisällä. Ennen pitkään tavoitteena on käyttää palvelurobotteja myös vaativiin tehtäviin kuten pukeutumisessa auttamiseen, tavaroiden siirtelyyn ja ruokailussa avustamiseen. Tätä varten tarvitaan kuitenkin ensin riittävän ketterä tarttuja, joka suoriutuisi monista erilaisista sille asetetuista tehtävistä.

## 1.1 Työn tarkoitus ja tutkimusongelma

Tämän työn tarkoituksena on selvittää millainen tarttuja soveltuisi palvelu- ja etärobotiikkaan sekä löytää ketterämpi vaihtoehto yleistarttujille. Tarttuvia robotiikkaan on kehitelty pääsääntöisesti teollisuusrobotiikkaa varten, jossa samaa työtehtävää toistetaan useita kertoja samankokoisilla ja muotoisilla työkaluilla. Nämä tarttumat harvoin soveltuvat palvelurobotiikkaan, jossa tartuttavat esineet ovat usein epäsäännöllisen muotoisia ja eri painoisia. Yleisimmin käytetty tarttuja palvelu- ja etärobotiikassa on kaksi- tai kolmisorminen tarttuja, joka tarttuu esineisiin pihtien tavoin. Sen tartuntaotteet ovat hyvin rajoittuneet ja se voi olla tarkkuutta vaativiin tehtäviin liian kömpelö. Pihtimäiselle tarttujalle on esitetty useita eri vaihtoehtoja, joissa riittävän vahva ja monipuolinen tartuntaote saavutetaan alipaineen tai epätavanomaisen muodon avulla.

Vertailtuani erityyppisiä ratkaisuja mielestäni lupaavimmat ketterät tarttumat perustuivat ihmiskäden rakenteiden ja liikkeiden imitoimiseen. Tämä vaikutti hyvältä ratkaisulta, koska ihmisen luomaa ympäristöä ja esineitä voi parhaiten käyttää ihmiskädellä. Työn tutkimusongelmana oli selvittää, mitä ihmiskäden biomekaanisia rakenteita voidaan hyödyntää mekaanisessa tarttujassa ja rakentaa sen prototyyppi.

Prototyypille asetettiin tiettyjä rajoituksia ja suoritustavoitteita. Oletuksena on, että tätä tarttujaa voitaisiin käyttää ihmisten kanssa työskentelevässä palvelurobotissa. Turvallisuuden takia tarttujan painon ja koon pitäisi vastata karkeasti ihmiskäsivarren painoa, noin 2000 grammaa, ja pituutta, noin 50 senttimetriä.

Tarttujan tärkeimmäksi ominaisuudeksi asetettiin kuitenkin suorituskyky. Ihmiskäden kaltaisen ketterän liikelaajuuden lisäksi, tarttujan pitää pystyä tarttumaan monipuolisesti kevyisiin arkipäiväisiin esineisiin sekä muodostamaan voima- ja tarkkuusotteita. Eri tartuntaotteille asetettiin myös käsittelykyvyn suhteen painotavoitteita. Voimaotteissa tarttujan pitää muodostaa pitävän otteen kappaleesta, joka painaa kaksi kiloa. Tarkkuusotteella käsiteltävien kappaleiden painoraja asetettiin huomattavasti alemmaksi, ketteryyttä vaativaan tarkkuustyöhön tarttujan vähimmäiskantokyvyksi riittää 10 grammaa. Tavoitteena on myös tehdä tarttujan etäkäytöstä mahdollisimman luontevaa, eri muotoisiin kappaleisiin on pystyttävä tarttumaan käyttäjän jo olemassa olevan kokemuksen avulla ja otteen muodostamisen pitäisi noudattaa ihmiskäden tuttuja tartuntatekniikoita.

## 1.2 Työn rakenne ja rajaus

Opinnäytetyön teoriaosuus alkaa ongelman analyysillä: siinä selvitetään mikä tarttuja on ja mitä ominaisuuksia palvelu- ja etärobotiikkaan soveltuvalta tarttujalta vaaditaan. Seuraava osa käsittelee ihmiskäden biomekaanisia rakenteita, tartuntaotteita ja niiden muodostamisen teoriaa. Prototyypit sisältävä osuus esittelee eri tapoja, joilla lähestyttiin lopullisen tarttujan valmistusta. Seuraavassa vaiheessa kuvaillaan lopullisen tarttujan rakentamista ja ratkaisuja eri rakenteiden valmistuksessa. Tutkimustuloksissa valmiin tarttujan suoritusta arvioidaan vertailemalla sen liikelaajuuksia ja ketteryyttä ihmiskäteen. Johtopäätöksissä tarkastellaan alussa asetettuja tavoitteita ja niiden toteutumista sekä pohditaan tarttujan soveltuvuutta suunniteltuun käyttötarkoitukseen.

Tässä työssä aiheena ovat ihmiskäden kaltaisen tarttujan suunnittelu ja prototyypin valmistus. Opinnäytetyön taustatutkimus on rajattu koskemaan mekaanisia tarttujia, niiden toimintaedellytyksiä palvelu- ja etärobotiikassa sekä ihmisen sormien ja kämmenen biomekaanisia toimintoja. Prototyyppien ja varsinaisen tarttujan valmistuksen osalta työ rajautuu toteutettuihin kappaleisiin.

## 1.3 Tutkimusmenetelmät ja käytetty aineisto

Työn tarkoituksena on kehittää käytännön ongelmaan ratkaisu, eli tarttuja, jonka suorituskykyä mitataan ja lopuksi arvioidaan. Opinnäytetyön taustatutkimus tehtiin kirjallisuuskatsauksena ja tätä hankittua tietoa sovellettiin prototyyppien sekä tarttujan valmistuksessa. Työssä tutkittiin eksperimentaalisesti tarttujalle soveltuvia komponentteja ja materiaaleja. Työn lopussa valmistetun tarttujan liikelaajuudet ja kyky muodostaa otteita määriteltiin mitauksilla.

Opinnäytetyön tutkimusaineisto koostuu painetuista ja elektronisista lähteistä. Taustatutkimuksissa käytetyt lähteet vaikuttivat voimakkaasti työssä käytettyihin ratkaisuihin, mm. prototyyppien valmistukseen vaikutti Crawfordin, Molitorin, Perez-Gracian ja Chiun tutkimus vuodelta 2010 ja tarttujan nivelten valmistukseen vaikutti Xun ja Todorovin tutkimus vuodelta 2016. Tarttujien ja palvelurobotiikan teoriassa käytettiin useita lähteitä, joista tärkeimpänä toimi Kuivasen Robotiikka vuodelta 1999. Lähteinä ihmiskäden biomekaniikalle, liikelajuuksille, tartuntaotteille ja niiden muodostamiselle käytettiin pääosin kahta teosta; Vastamäen, Göranssonin, Havulinnan, Kotkansalon, Nietosvaaran, Ryhäsen ja Vilkin Käsikirurgia vuodelta 2016 ja Palastangan, Fieldin ja Soamesin Anatomy and Human Movement vuodelta 2006. Prototyyppien ja varsinaisen tarttujan valmistuksessa materiaalien ja komponenttien tietojen lähteinä toimivat valmistajien omat dokumentit.



## 2 Ongelman analyysi

### 2.1 Tarttujat

Tarttuja on yksi tuotanto- ja palvelurobotiikan yleisimmistä työkaluista. Sen tehtävä on siirtää kappaleita paikasta toiseen sen työympäristössä. Tuotantorobotiikkaa varten on kehitetty paljon erilaisia tarttujia (kuva 1). Ne harvoin sopivat etä- ja palvelurobotiikalle, jossa työtehtävät sijoittuvat ihmisympäristöön. Nämä tilat usein jaetaan ihmisen kanssa, ja työt voivat vaatia ihmisen ja robotin välistä yhteistyötä tai jopa suoraa kosketusta (Kuivanen 1999, 140–141). Tuotannossa robotti suorittaa etukäteen määriteltä tai toimintaympäristön ja antureiden perusteella luotua liikerataa suurella toistotarkkuudella ja nopeudella.

Teollisen tuotannon ulkopuolella toimivasta robotiikasta käytetään termiä palvelurobotiikka. Tämä usein määritellään robotiikaksi, joka tuottaa ihmiselle palveluita osin tai täysin automaattisesti. Palvelurobotiikassa on tavanomaista, että tehtävät suoritetaan yhdessä ihmisen ja robotin vuorovaikutuksena samassa työympäristössä. (Kuivanen 1999, 140–141.)

Tarttujilla varustetut etä- ja palvelurobotit suorittavat epärutiininomaisia työtehtäviä ja niiden on suoriuduttava monimutkaisista tehtävistä, esimerkiksi erikokoisiin ja -muotoisiin kappaleisiin tarttumisesta, kappaleiden siirrosta ja manipulaatiosta aina oven avaukseen ja kytkimen painamiseen.

Muita prosessiin osallistuvia työkaluja voivat olla esimerkiksi hitsauspistoolit, maaliruiskut ja jysinterät. Tarttujan suunnittelun pohjana on tuleva työkappale, työympäristö ja robotin prosessi työtehtävissä. Tämä suunniteltu tarttuja on myös toimittava luotettavasti ja turvallisesti tuotantolinjalla. (Kuivanen 1999, 76–77.)

Yleisin tarttuja robotiikassa on mekaaninen, kitkasulkeinen 2- tai 3-leukatarttuja. Puristusvoimaan perustuvassa eli kitkasulkeisessa tartunnassa mekaanisten sormien tartuntavoima on tarpeeksi suuri kahdesta tai useammasta suunnasta, ja se riittää pitämään kohdekappaleen paikoillaan, mutta ei ole liian suuri rikkoakseen sitä. Tarttuja voi myös yhdistää erityyppisiä tartuntatapoja saavuttaakseen riittävän otteen. Esimerkiksi yhdistämällä kitkasulkeinen ote muotosulkeiseen tartuntaan, kappaleen muotoja, uria ja kohoumia voidaan hyödyntää ja saavuttaa parempi tartunta. Tätä voidaan parantaa edelleen antamalla tartuntapinoille kitkamateriaalia kuten kumia tai hyödyntämällä alipaineeseen tai magneettisuuteen perustuvaa tartuntaperiaatetta. (Kuivanen 1999, 67–69.)

Useimpien tarttujen tartuntaperiaate suunnitellaan käsiteltävän kappaleen mukaan. Kappaleen käsittelykykyä pitää laajentaa, jos kappaleiden koko, muoto ja pintamateriaali vaihtelee usein. Ratkaisuna voi olla työkalunvaihtojärjestelmä tai monitarttuja. Jokainen työkalu

on kuitenkin valmistettava erikseen työtehtävää ja sitä suorittavaa robottia varten. Robotti on kömpelö, epätarkka ja harvoin tarpeeksi hienovarainen kun kyseessä on laaja kokonaisuus eri käsiteltäviä kappaleita. (Kuivanen 1999, 70–77.)



KUVA1. ABB nivelletty tuotantorobotti IRB 6620 ja Robotiq 3-sorminen yleistarttuja (ABB 2020; Robotiq 2020)

## 2.2 Palvelu- ja etärobotiikan toimintaympäristö

Palvelu- ja etärobotit toimivat strukturoiduissa ympäristöissä, joiden muodot ovat ihmisen muokkaamia. Näitä ovat esimerkiksi kotien sisätilat, toimistot, tehtaiden hallit ja katu ympäristö. Lattiat ja tiet ovat tasaisia, oviaukot ovat standardisoituja ja työskentelyalueet on suojattu kokonaan tai osittain voimakkailta sääilmiöiltä. (Kuivanen 1999, 140–141.)

Robotit voidaan asettaa eri luokkiin niiden strukturoidun työympäristön mukaan:

- Ulkoilmassa käytettävät robotit voivat esimerkiksi olla apuna rakennustyömailla tai toimia oppaina kaupungeissa.
- Työtilassa ja yleisissä sisätiloissa käytettävät robotit työskentelevät tuotannollisissa tehtävissä tai kuljettavat tavaraa toimistotiloissa.
- Asuinhuoneistossa käytettävät robotit voivat ottaa monipuolisia rooleja toimien palvelurobottina vanhusten hoidossa tai suorittamalla vain tiettyä tehtävää, esimerkiksi lattian siivousta.

(Kuivanen 1999, 140–141.)

Strukturoimattomiksi ympäristöiksi lasketaan epätyypilliset työskentelyalueet, joita ihminen ei ole muokannut helppokulkuisiksi. Näitä ovat esimerkiksi metsät, maanjäristyksen jälkeiset maastot, vedenalaiset ympäristöt ja avaruus. Näihin olosuhteisiin on kehitetty etärobotteja, jotka avustavat varotyössä tai korvaavat ihmisen läsnäolon vaarallisessa ympäristössä. (Kuivanen 1999, 140–159.)

### 2.3 Tarttujalta vaadittavat ominaisuudet

Palvelu- ja etärobotiikan yleistarttujan on sovelluttava tarttumaan laajaan valikoimaan eri kappaleita. Hoidon yhteydessä käytettävien avustavien palvelurobottien pitää myös pystyä varovasti tarttumaan pehmeisiin kappaleisiin sekä käyttämään tarkkuusotetta: esimerkiksi nostamaan vaatteita lattialta. Tarpeen vaatiessa niiden pitää myös kyetä avustamaan raskaiden kappaleiden siirtämisessä. (Hendrich, Bistry & Zhang 2015)

Toimiakseen yhteisissä tehtävissä ihmisen kanssa, palvelurobotin pitäisi pystyä seuraamaan ihmistä ja toimimaan turvallisesti. Tämä asettaa robotin koolle tietyt rajoitukset: sen pitää mahtua ovesta, ja tarttujan on yletettävä monelle eri korkeudelle asetettujen esineiden luokse ihmisen tavoin. Laitteen painon on oltava tarpeeksi suuri ja painopiste tarpeeksi alhaalla, jotta tasapaino säilyy tarttujen nostaessa raskaita kappaleita. Robotin paino ja koko voivat muodostaa merkittävän riskin ihmisen turvallisuudelle.

Strukturoidussa ympäristössä toimivien robottien suunnittelussa onkin kiinnitettävä erityistä huomiota ihmisten läheisyyteen robotin työympäristössä ja yksi suunnittelun pääkohdista on turvallisuus.

Tuotantorobotiikassa turvallisuussuunnittelun kaksi pääperiaatetta ovat ihmisen poistaminen robotin työalueelta sekä turvalaitteiden käyttö. Palvelu- ja etärobotiikassa keskitytään törmäysvoimien minimoimiseen ja sellaisten rakenteiden suunnitteluun, jotka joustavat tai pysähtyvät välittömästi törmäyksen syntyessä.

Tarttujaa suunnitellessa turvallisuutta voidaan lisätä käyttämällä kevyempiä materiaaleja ja laskemalla tarttujaan kytketyn käsivarren liikenopeutta. Ulkorakenteiden kovat osat voidaan korvata pehmeillä materiaaleilla tai niihin voidaan lisätä pehmusteita. Törmäyksen havaitsevat anturit voivat pysäyttää robotin liikkeen, ja joustavat nivelrakenteet tarttujassa ja käsivarressa minimoivat mahdollisen vammautumisen törmäyksen tapahduttua. (Lens, Kunz & von Stryk 2016)

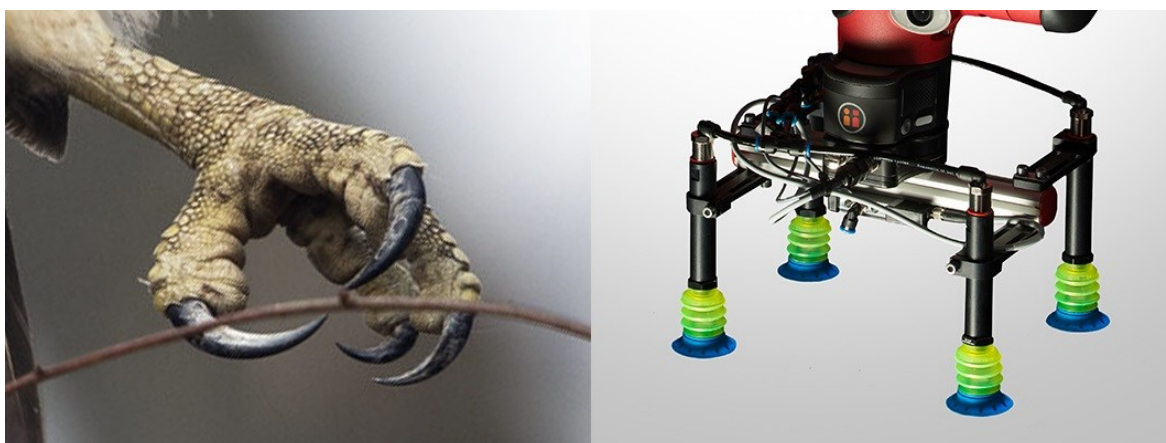
## 2.4 Tarttumismekanismit luonnossa

Luonnossa esiintyy useita erilaisia tarttumismekanismeja, jotka soveltuvat tietyn tyyppisen materiaalin pinnalla liikkumiseen tai erityisen haastavan saaliin metsästykseseen. Monelle teollisuudessa käytettävälle tarttujalle löytyy luonnosta vastine samankaltaisella biomekaanisella tarttumismekanismilla.

Kalasääsken varpaat ovat esimerkki monimutkaisesta tarttujasta, jolle löytyy mekanismeillaan vastine teollisuudessa. Kalasääsken varpaat ja kynnet tarttuvat saaliisen muodostaen ympäröivän puristusotteen, ja jalan anturat toimivat imukuppeina, jotka sopivat erityisesti kalojen liukkaisiin pintoihin tarttumiseen. Monet luonnossa esiintyvät tarttumat ovat antaneet inspiraation teollisuudessa käytettäviin laitteisiin, yksinkertaisista saksimaisista puristimista aina monimutkaisiin norsun kärsää muistuttaviin pehmeisiin tarttumiin (kuvio 1). (Monkman, Hesse, Steinmann & Schunk 2007, 10–11.)

Tuotantorobotiikassa tarttumat ovat suunniteltu yleensä vain yhtä suoritettavaa mekaanista liikettä varten. Tarttuma kykenee suorittamaan vain hyvin rajattua tehtävää, mutta usein nopeammin ja tehokkaammin kuin ihminen samassa työssä. Palvelu- ja etärobottien tarttumat voivat joutua käsittelemään useita erimuotoisia ja -tyyppisiä kappaleita. Tähän tehtävään soveltuu monisorminen tarttuma, jonka liikeradat matkivat ihmiskäden ketteriä otteita, tämän tyyppisiä tarttumuja kutsutaankin usein ”ketteriksi tarttumuiksi” (Monkman, Hesse, Steinmann & Schunk 2007, 268–269).

Useat strukturoidun ympäristön objekteista ja kodin esineistä ovat suunniteltu ihmiskädelle sopiviksi, joten ihmisen kämmentä ja sormia imitoiva rakenne olisi erinomainen tarttumaan ja manipuloimaan niitä.



KUVIO1. Vertailu luonnossa esiintyvien ja valmistettujen tarttujen välillä (russimages 2020; Jeff Green/Rethink Robotics 2020)

### 3 Ihmiskäden biomekaniikka

Ihmisen käsi on monipuolinen työkalu, jolla on suuri liikkuvuus ja kyky suorittaa erilaisia voimakkaita ja hienomotorisia liikkeitä. Käsi on anatomialtaan monimutkainen, siinä on paljon rakenteita, ja ne ovat pieniä sekä sijaitsevat lähellä toisiaan. Yläraajan tukirakenne koostuu luustosta, nivelistä ja nivelsiteistä. Hermoston säätämä lihaksisto mahdollistaa liikesuorituksen tai stabiloitumisen jännittymällä tai rentoutumalla ja vastavuoroisesti antamalla vastavaikuttajalihaksen säätää liikettä. (Vastamäki, Göransson, Havulinna, Kotkansalo, Nietosvaara, Ryhänen & Vilkki 2016, 23.)

#### 3.1 Luusto ja nivelet

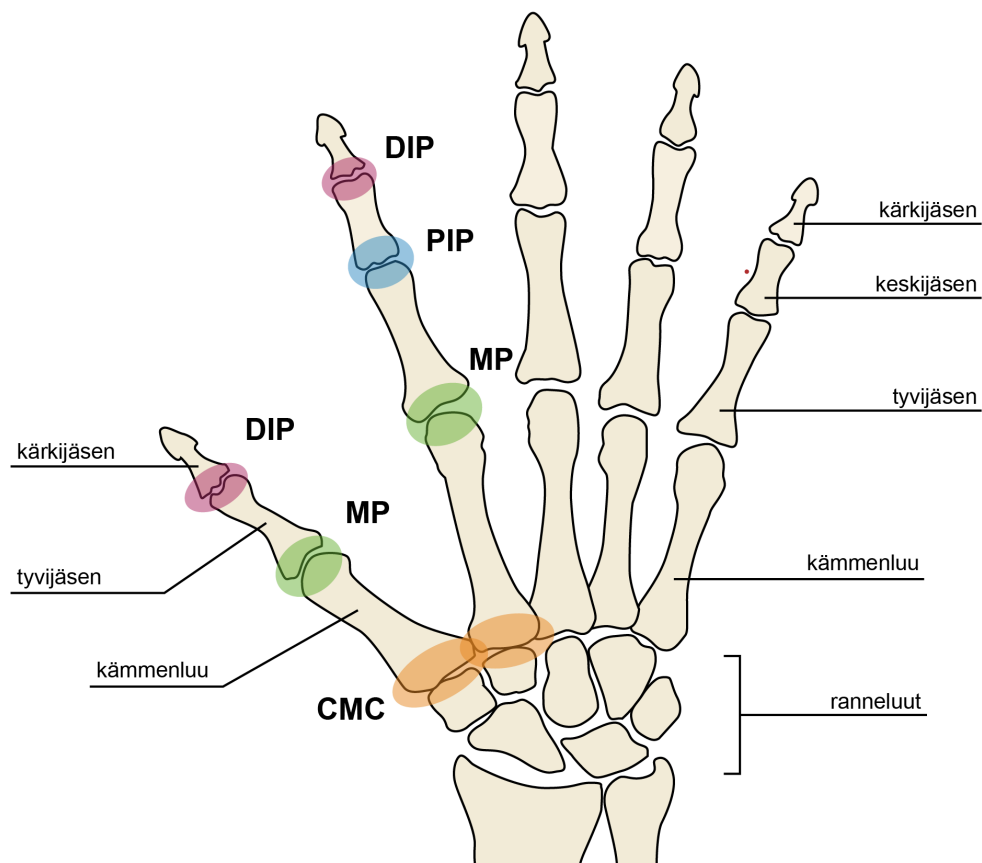
Etusormessa, keskisormessa, nimettömässä ja pikkusormessa on kolme sormiluuta: kärki-jäsen, keskijäsen ja tyvijäsen. Peukalossa sormiluita on vain kaksi (kuvio 2).

Peukalon kämmennivelessä eli CMC1-nivelessä on suuri liikelaajuus sen satulamaisen rakenteen ja löysän nivelkapselin ansiosta. Nivel kykenee suureen ojennus-, koukistus-, loitonnuksen- ja lähennysliikkeeseen. Peukalo saadaan stabiloitumaan haluttuun asentoon nivelsiteiden ja lihasten avulla. Kämmenluiden nivelet eli CMC2-5 ovat kollateraali-ligamenttien kautta yhdistetty ranneluihin ja toisiinsa tyvistä tiukasti. (Vastamäki ym. 2016, 29.)

Metakarpofalangeaalinivelten eli MP-nivelten rakenne on pallomainen. Nivel liikkuu ojentaessa ja koukistaessa, mutta kykenee ojennettuna myös pieneen sivuttaisliikkeeseen. Koukistaessa MP2-5 ovat stabiileja. Peukalon MP-nivelellä on muihin verrattuna pienempi liikkuvuus, mutta se kykenee pieneen rotaatioon. (Vastamäki ym. 2016, 29–31.)

Sormen keskinivel eli PIP-nivel on sarananivel, ja sen stabiliteetti johtuu nivelpinnoista ja ligamenttirakenteesta. Nivelrakenne on leveä, nivelpinta on kaksoiskupera ja sen keskellä on harjanne. Nivelen sivuttaisliikettä ja yliojentumista estävät sivuille kiinnittyneet kollateraali-ligamentit. (Vastamäki ym. 2016, 31.)

Sormen kärkinivel eli DIP-nivel on muodoltaan ja saranamaiselta toiminnaltaan samankaltainen kuin PIP-nivel, ja myös kapselirakenne on pääosin sama. (Vastamäki ym. 2016, 31.)



KUVIO2. Luusto ja nivelet

### 3.2 Lihakset ja jänteet

Käden liikkeitä hallitsevat lihakset jaetaan kahteen luokkaan, extrinsic- ja intrinsic-lihaksiin. Extrinsic-lihakset sijaitsevat käden ulkopuolella jänteitä lukuun ottamatta, intrinsic-lihakset sijaitsevat kämmenen alueella (kuvio 3).

Sormien extrinsic-koukistajalihakset ovat:

- Peukalonkoukistaja pollicis longus (FPL).
- Etu- (II) ja keskisormen (III), nimettömän (IV) sekä pikkusormen (V) koukistajat flexor digitorum profundus (FDP) ja flexor digitorum superficialis (FDS).

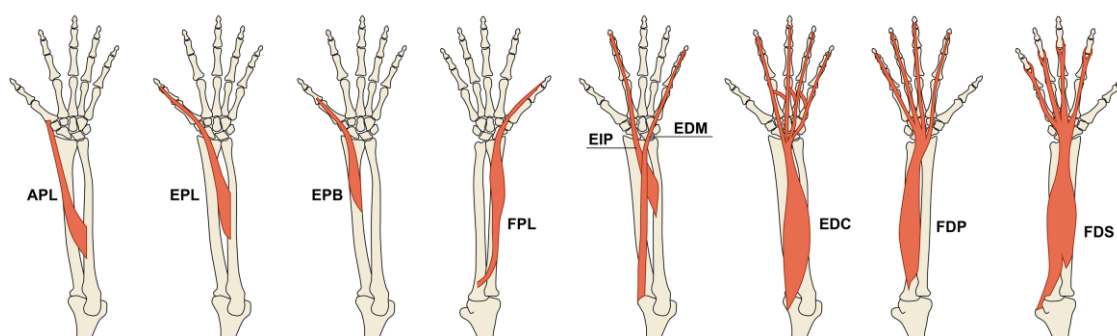
Sormien extrinsic-ojentajia ovat:

- Peukalon ojentajat extensor pollicis brevis (EPB) ja extensor pollicis longus (EPL).
- II-V sormien ojentajat extensor digitorum communis (EDC).
- Peukalon abductor pollicis longus (APL).

Peukalon muita liikkeitä hallitsevat intrinsic-lihakset ovat:

- Koukistaja flexor pollicis brevis (FPB).
- Lyhyt loitontaja (abductor pollicis brevis, APB),
- Vastanasettaja (opponens pollicis, OP)
- Lähentäjä (adductor pollicis, AP).

(Vastamäki ym. 2016, 32–43.)



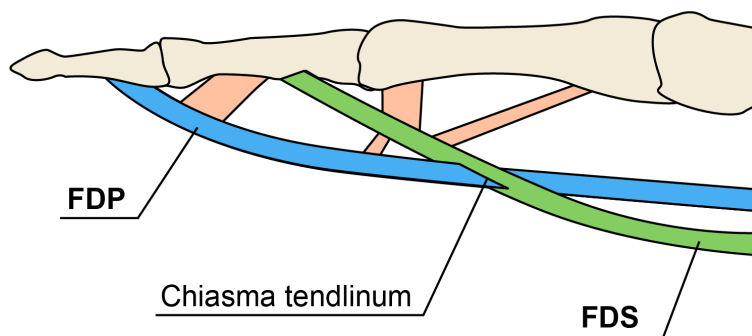
### KUVIO3. Lihasryhmät

Ranteessa ja sormissa sijaitsevat koukistajajännitetupet, joiden sisäpinnat muodostavat liukupinnan jänteille. Paikoin jännetuppi on vahvistunut ja muodostaa taljarakenteen, jonka tehtävä on pitää jänteet paikoillaan ja estää jänneiden kohoaminen jousenjännemäisesti. Koukistajajännetuppi ja taljarakenne pitävät tarvittavan lihaksen supistusliikkeen pienempänä ja varmistavat koukistusliikkeen säilymisen mahdollisimman tehokkaana. (Vastamäki ym. 2016, 477–479.)

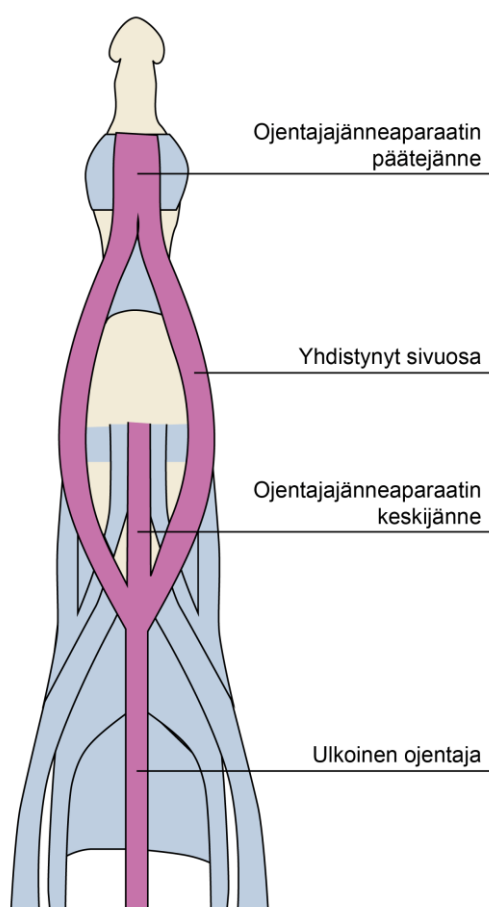
Etusormessa, keskisormessa, nimettömässä ja pikkusormessa koukistajia on kaksi, pinnallinen koukistaja (FDS) ja syvä koukistaja (FDP). Syvä koukistaja kiinnittyy kärkijäsenen tyveen ja vaikuttaa DIP-, PIP- ja MP-nivelten koukistukseen. Pinnallinen koukistaja kiinnittyy keskijäseneseen ja vaikuttaa PIP-nivelen koukistukseen. Pinnallinen koukistajajänne jakautuu kahtia tyvijäsenen alaosassa ja kiertyy syvän koukistajan ympäri takaisin yhteen. Tätä jännerakenteen yhtymäkohtaa kutsutaan kiasmaksi (kuvio 4). (Vastamäki ym. 2016, 477–479.)

Etusormessa, keskisormessa, nimettömässä ja pikkusormessa ojentajat muodostavat eri lihasryhmien kanssa ojentajajännesysteemin, jossa sormien jänteet ja niiden välinen jännekalvo muodostavat kalvorakenteen, ns. extensor hoodin (kuvio 5). Kalvorakenne kiinnittyy keskijäseneseen keskijänteellä, ja yhdistyneet sivujänteet kärkijäseneseen päätejänteellä.

Kämmenen intrinsic-lihakset saavat aikaan PIP- ja DIP-nivelten ojentumisen ja MP-nivelen koukistumisen, extrinsic-lihakset tuottavat MP-nivelen ojentumisen. Extrinsic- ja intrinsic-lihakset yhdessä mahdollistavat sormen täyden ojentumisen. (Vastamäki ym. 2016, 494–497.)



KUVIO4. Taljarakenne



KUVIO5. Ojentajajänneaparaatti



### 3.3 Motorinen kontrolli ja tartuntaotteen muodostaminen

Motorisen kontrollin ja oppimisen teorioita on kehitetty jo hyvin kauan, ja moni niistä on ottanut vaikutteita toisistaan. Systeemiteorian mukaan yläraajojen liikkeisiin, kuten kurottamiseen, tarttumiseen ja kappaleen manipulatioon vaikuttavat hermostolliset sekä tuki- ja liikuntaelimien järjestelmät. Hermostollisiin järjestelmiin lasketaan mm. aistijärjestelmät, yläraajan liikkeistä ja koordinaatiosta vastaava motorinen järjestelmä sekä manipulatioon liittyvät korkeamman tason mukautuvat ja ennakoivat prosessit. Tuki- ja liikuntaelimissä vaikuttavia tekijöitä ovat nivelten liikealat, eri lihasten ominaisuudet ja eri ruumiinosien biomekaaniset suhteet. (Shumway-Cook & Woollacott 1995, 477–478.)

Lähes kaikkiin kappaleisiin ihminen voi käyttää voima- tai tarkkuusotetta tai näiden yhdistelmiä, ja onnistuneelle tarttumiselle on kaksi edellytystä. Kurottamisvaiheessa käden pitää muodostaa sopiva tartunnan esiote ennen varsinaista tarttumista. Tässä tartuttavan kappaleen muoto, koko, pinta ja käyttötarkoitus määrittää esiotteen sekä lopullisen tartuntaotteen. Toinen edellytys on tarttumisen täsmällinen ajoitus liikkeen yhteydessä – sormien sulkeutuminen kappaleen ympäri liian aikaisin tai myöhään tekee otteesta epätäydellisen. (Shumway-Cook & Woollacott 1995, 490–492.)

Ihmisen hermostollinen järjestelmä pystyy mukauttamaan tartuntaotetta tartuttavan kappaleen ominaisuuksien mukaan ja jopa muuttamaan otetta kesken liikesuorituksen. Tarttumisella ja kappaleen nostamisella onkin todettu olevan eri vaiheita, joihin vaikuttaa käden aistijärjestelmän ärsykkeet. Ensimmäisessä vaiheessa sormien ja tartuttavan kappaleen välille muodostuu kosketuskontakti. Toisessa vaiheessa kappaleeseen kohdistuva puristusvoima ja sormiin kohdistuva pinnan tukivoima kasvaa. Kolmannessa vaiheessa tartuntavoima on kasvanut riittäväksi kappaleen siirtoa varten. Neljännessä vaiheessa kappale lasketaan tasolle ja kappaleeseen kohdistuvaa puristusvoimaa pienennetään. Eri vaiheisiin jakamisella on etunsa – tarttumista voidaan käyttää eri painoisin kappaleisiin ja liike tapahtuu vasta kun riittävä puristusvoima on saavutettu. Lisäksi seuraavaan vaiheeseen siirtyminen vaatii aina informaation käsittelyä aistijärjestelmän kautta. Keskushermoston uskotaan käyttävän aikaisempaa kokemusta ja tuntoaistien informaatiota pitävän otteen luomiseksi. Lisäksi pikkuivoilla uskotaan olevan tärkeä rooli ennakoivan puristusvoiman säätelyssä. (Shumway-Cook & Woollacott 1995, 481–487.)

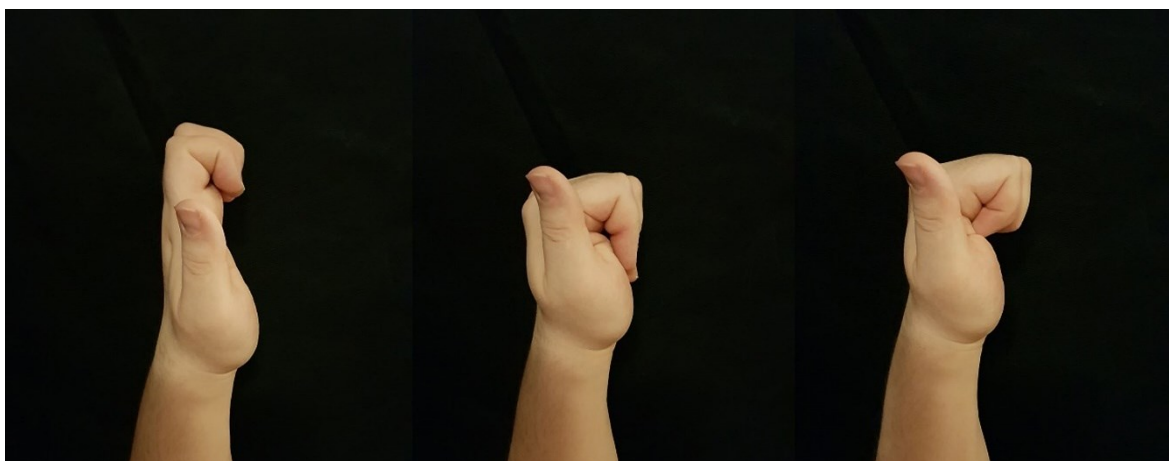
Ihmislapset oppivat kurottamisen ja tarttumisen varhaisessa vaiheessa, ja näiden taitojen kehittyminen voidaan ennustaa luotettavasti. Merkittävin kehitys tapahtuu kahden ensimmäisen ikävuoden aikana. Kämmentote opitaan ensimmäisinä kuukausina ja peukaloa hyödyntävä avainote noin yhdeksän kuukautisena. Ensimmäiset tarkkuusotteet ilmenevät

kymmenessä kuukaudessa ja kahdessatoista kuukaudessa lapsi hallitsee kaikki tartuntaotteiden perusteet. (Cangelosi, Schlesinger 2015, 149–173.)

### 3.4 Tartuntaotteet

Etusormen, keskisormen, nimettömän ja pikkusormen koukistusliikkeen mahdollistavat pinnallinen koukistaja (FDS) ja syvä koukistaja (FDP). Näiden sormien ojennus tapahtuu kahden lihasryhmän yhteistyöllä: käden ulkoisten ojentajien ja kämmenen pienten lihasten, jotka liikuttavat ojentajajänneaparaattia. Sormien rystynivelestä alkavaa koukistusliikettä hallitaan ulkoisten ojentajien ja syvän koukistajan avulla, ja puolinyrkki saadaan pinnallisen koukistajan ja kämmen pienten lihasten kautta (kuva 2). (Vastamäki ym. 2016, 477–479.)

Tapa, jolla ihmisen käsi tarttuu esineeseen, riippuu tartuttavan kohteen koosta, painosta ja suoritettavasta työstä. Ihmiskäden tartuntaote voidaan jakaa kahteen tyyppiin, tarkkuusote ja voimaote.



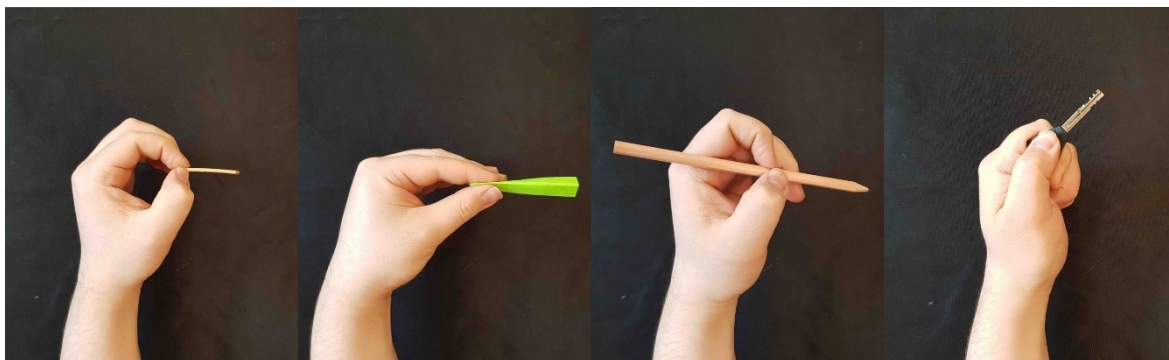
KUVA2. Nyrkitysharjoitussarja: koukku, puolinyrkki ja nyrkki

#### 3.4.1 Tarkkuusote

Tarkkuusotetta otetta käytetään yleensä tarttuessa kevyisiin esineisiin, jolloin tarvitaan täsmällistä silmän ja käden koordinaatiota työn suorittamiseen. Ote suoritetaan pääasiassa peukalon CMC-nivelen ja muiden sormien MC-nivelten liikkeillä. Tarkkuusotteet voidaan edelleen jakaa eri tyypeihin riippuen otteessa käytettävien sormien liikkeistä.

Pihtiote sormenpäillä eli peukalon oppositioliike muita sormia kohden on kädelle tunnusomainen ja monimutkainen liikesuoritus. Tässä suurta tarkkuutta vaativassa liikkeessä tapahtuu peukalossa yhtäaikaaisesti loitonnuks, koukistus, kierto ja lähennys, sekä muissa sormissa koukistus ja sivuttaisliike. Molempien sormien samanaikaisen liikkeen lopputuloksena sormien ja peukalon päät, tai jopa vain kynnenreunat, ovat kääntyneet toisiaan vasten

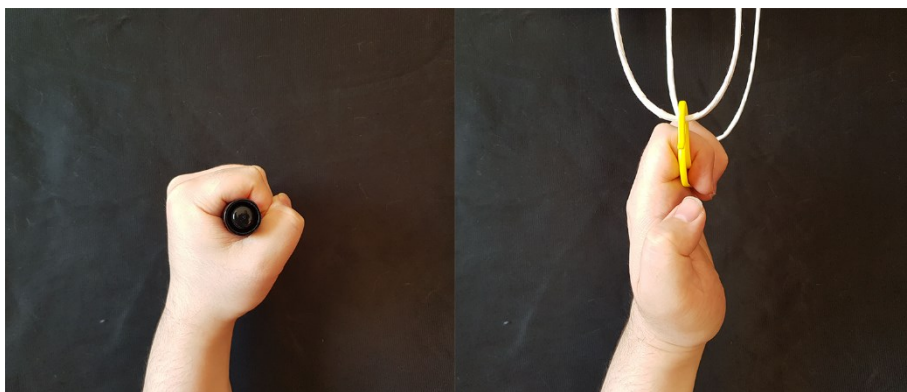
ja muodostavat tarkkuusotteen. Kynäotteessa peukalo ojentuu ja kiertää muita sormia kohti. Peukalon ja yhden tai useamman sormen kämmenen puoleiset ihot asettautuvat esineen vastakkaisille puolille ja muodostat pitävän otteen esineestä. Avainotteessa peukalo ojentuu ja kiertää toisen sormen PIP-niveltä vasten sivuttaisesti, muiden sormien koukistus auttaa stabiloimaan otetta. Otteenä tämä on vähemmän tarkka, mutta on vahva ja vakaa (kuva 3). (Palastanga, Field & Soames 2006, 208–214.)



KUVA3. Kuvasarja oppositioliikkeestä, pihtiotteesta, kynäotteesta ja avainotteesta

### 3.4.2 Voimaote

Voimaotteessa käden ojentajat ja koukistajat toimivat yhdessä muodostaakseen vahvan otteen esineestä, ja samalla ne stabiloivat käden rannetta. Vahvin voimaotteista on kämmenote, jossa sormien kaikki nivelet kiertyvät tartuttavan kappaleen ympärille ja varmistavat sen kämmentä vasten, ja peukalo sulkeutuu etusormea vasten vahvistaen otetta vastakkaiselta puolelta. Koukkuotteessa etusormen, keskisormen, nimettömän ja pikkusormen rystynivelet ojentuvat ja pysyvät stabiloituna, ja keskinivelet ja kärkinivelet koukistuvat ja painavat tartuttavan kappaleen kämmentä vasten (kuva 4). Otteessa voidaan myös käyttää peukaloa apuna, mutta sen tuoma voima on heikompi kuin kämmenotteessa. (Palastanga, Field & Soames 2006, 208–214.)



KUVA4. Kämmentote ja koukkuote

## 4 Tutkimusprototyypit

### 4.1 Tarttujan perusosat

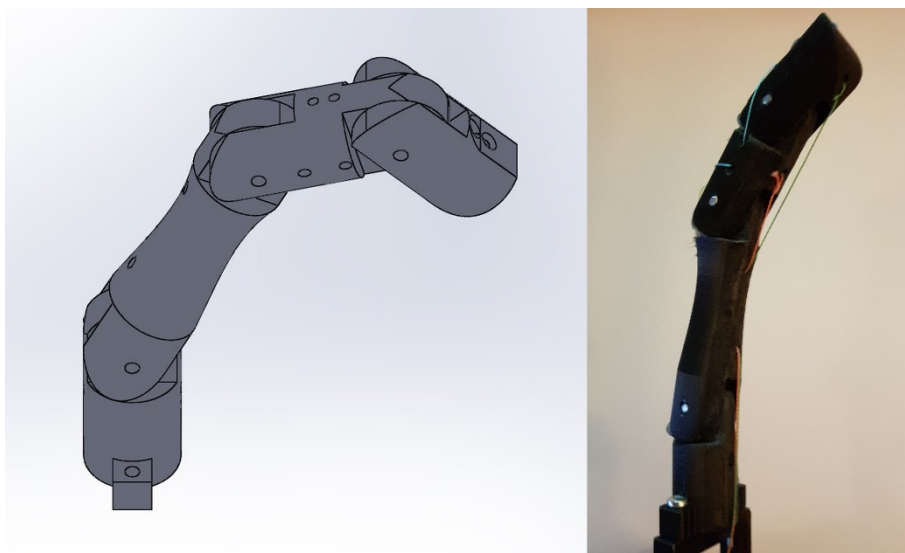
Aloitin tutkimuksen määrittelemällä tarttujaa käyttävän robottijärjestelmän perusosat ja valmistamalla tämän perusteella mahdollisimman yksinkertaisen mekaanisen tarttujan. Robottijärjestelmän perusosia ovat ohjausjärjestelmä, toimilaite, voimansiirtomekanismi, runko ja tarttuja. Valmistetussa yksinkertaisessa mallissa tarttuja koostui kiertyvistä leuoista, ja näiden päädyssä sijaitsevat hammaspyörät olivat tarttujan voimansiirto ja runko. Toimilaitteena käytettiin tasavirtaservomootoria, jonka ohjausjärjestelmänä toimi ohjelmoitava mikrokontrolleri ja potentiometri.

Tämän pelkistetyn tarttujan tarkoituksena oli luoda pohja, jonka päälle pystyin rakentamaan työn seuraavat vaiheet. Se myös auttoi havainnollistamaan mitä osia eri prototyypeissä kehitin ja helpotti robottijärjestelmän kokonaisuuden hahmottamista.

### 4.2 Sormen nivelrakenteen testaus

Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa yksinkertaisen tarttujajärjestelmän tarttumisosat korvattiin sormilla, jonka rakenne jäljittelee koukistamisen biomekaniikkaa simuloimalla käden janteiden toimintaa. Tämä malli osoittautui toiminnaltaan epätydyttäväksi, koska mekaanisten sormien liikerata ei vastannut ihmisvastineen sulavuutta, ja tarvittava voimantuotto liikkeen mahdollistamiseksi osoittautui hankalaksi. Ongelmia tuotti erityisesti sormien osien raskaus ja nivelrakenteiden jäykkyys. Lisäksi sormien eri osien koot ja pituudet eivät olleet mitoitettu oikein voimansiirtomekanismeina toimineen vaijerijärjestelmän kannalta. Tuloksena voima jakautui epätasaisesti nivelten välillä ja syntynyt liike oli epätasaista (kuva 5).

Tämä prototyypin avulla ymmärsin lähestyneeni ongelmaa väärällä tavalla - tarttujamekanismi muistutti vain ulkoisesti ihmissormea ja siitä puuttui sulavan liikkeen mahdollistavat biomekaaniset rakenteet.



KUVA5. Ketterän tarttujan sormen prototyyppi

### 4.3 Usean toimilaitteen käyttö

Seuraavassa mallissa tutkin sopivan ohjausjärjestelmän liittämistä viisisormiseen tarttujaan, jossa sormien sijainti ja biomekaaninen rakenne muistuttaa enemmän ihmisen sormia ja peukaloa. Ohjausjärjestelmänä toimi mikrokontrolleri, joka suoritti valmista liikerataa seuraavaa ohjelmaa tai välitti reaaliaikaisia liikekäskyjä kymmenelle servomoottorille. Toetutuneessa mallissa kiinnitin erityistä huomiota kämmenrakenteen ja yksittäisten sormien eri osien välisiin mittasuhteisiin ja niiden rakenteeseen. Edellisen kokeen havaintojen perusteella kevensin tarttujen sormien rakennetta, asetin nivelten taipumiskohtien etäisyyden sormissa muistuttamaan enemmän ihmisen kättä ja loin sormien rakenteisiin jännetuppeja muistuttavia väyliä jänneiden liikkuvuuden parantamiseksi. Sormirakenteen runkorakenteena toimi jäykkä muovikuitu, jonka jätin ohuemmaksi taipuvissa kohdissa.

Tässä kokeessa ohjausjärjestelmä toimi moitteettomasti, ja kymmenen servomoottorin reaaliaikainen ohjaus onnistui ilman huomattavaa viivettä. Eniten kehitettävää löytyi tarttujan rakenteesta:

- Sormien koukistuksessa ilmeni ylitaipumista ja paljon sivuttaista liikettä. Lisäksi vapaammin taipuva nivelrakenne aiheutti myös kiertoliikettä nivelissä. Tämä rakenne ei myöskään sisältänyt ihmiskädessä löytyvää ylitaipumista estävää nivelkapselirakennetta. Molemmat ongelmat tekivät sormien liikkeistä hyvin epätarkkoja, eikä tarttuja sen vuoksi kyennyt muodostamaan tarkkuusotetta.
- Servomoottoreiden tuottamat voimat ylittivät monin paikoin tarttujajärjestelmän keihikon ja tarttujan sormien kestävyys. Moottoreiden yhtäaikaisen toiminnan

seurauksena järjestelmän kehikko murtui paikoittain. Yksittäisten sormien rakenteet, joissa koukistusvoimat olivat suuret, repeytyivät usein ja runkorakenteena toiminut muovikuitu osoittautui liian hauraaksi.

Nämä havainnot tuottivat seuraavat johtopäätökset:

- Ihmissormien liukas ja sileä nivelpinta mahdollistaa nivelen sulavan liikkeen. Nivelpintojen kaksoiskupera muoto ja keskiharjanne tuovat stabiliteettia koukistus- ja ojennusliikkeessä. Nivelkapseli ja sen alla olevat nivelsiteet ovat olennaisia koukistusliikkeen toteutumiseen ja rajoittavat liikkeen jatkumista liian pitkälle.
- Jännetuppi ja sen vahvistavat rakenteet tuovat sormen koukistusliikkeeseen tehokkuutta ja kohdistavat liikevoiman oikeisiin kohtiin. Jänteiden sileä ja litteä rakenne auttaa niitä liukumaan pitkin jännetuppea.
- Biomekaanista rakennetta jäljittelevä tarttuja hyötyisi suunnittelu- ja materiaalivalinnoista, jotka imitoivat ihmiskäden eri kudoksia. Valmistettavien osien on jäljiteltävä kestävyydeltään ja vahvuudeltaan luonnollisia vastineitaan.

## 5 Toiminnaltaan ihmiskäden kaltainen ketterä tarttuja

Tavoitteena on jäljitellä ihmisen kädellä tuottamia eri tartuntaotteita sekä ojennus- ja koukistusliikkeitä. Tämän toteuttamiseksi tarttujan valmistuksessa jäljitellään ihmiskättä rakenteeltaan ja biomekaniikaltaan.

Tämä lopullinen tarttuja oli opinnäytetyön vaativin osuus ja käytin sen valmistukseen huomattavan määrän aikaa. Tarttujan rakenne ei pohjaudu kaupallisiin tarttujamalleihin, eikä sen valmistuksessa ole käytetty osia valmiista rakennussarjoista. Se on suunniteltu itse hyödyntämällä opinnäytetyön teoriaosuuden taustatutkimusta sekä työssä esiteltyjä aikaisempia prototyyppejä. Tarttujan voimansiirtomekanismit ja lähes kaikki rakenteet imitoivat sormien ja kämmenen biomekaniikkaa.

Mallinsin tarttujan osat käyttämällä SolidWorks ja Zbrush 3D-mallinnusohjelmistoja ja käytin osien valmistuksessa eri 3D-tulostimia, joista eniten käytin Formlabs Form 2 -tulostinta. Kokeilin tässä työssä monia eri materiaaleja ja työn edetessä jouduin vaihtamaan niitä usein. Yhtenä haasteena oli löytää eri osien materiaaleille sopiva tasapaino joustavuuden, kovuuden ja kestävyysvälin.

### 5.1 Tarttujan tukirakenne

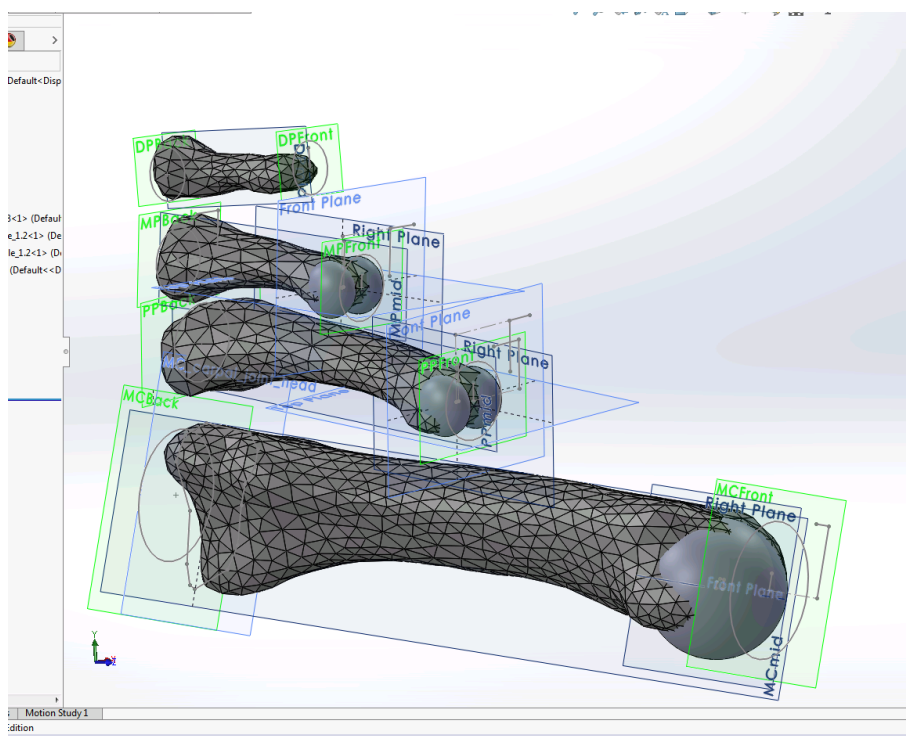
Mallinsin kaikki tarttujan luita vastaavat osat yksilöllisesti - peukalo, etusormi, keskisormi, nimetön ja pikkusormi ovat kaikki erilaisia ja niiden liikkeissä on pieniä eroja. Saadakseni tarttujan imitoimaan ihmiskäden sulavaa liikettä, minun oli kopioitava jokaisen sormen yksilöllinen rakenne. Sormien nivelet vaativat erityistä tarkkuutta: DIP- ja PIP-nivelen kaksoiskupera muoto on tärkeä sormen liikkeen tasaisuudelle ja estää niveltä liikkumasta sivuttaisuunnassa. Kaksoiskuperan rakenteen ja sen keskiharjanteen mallinnuksessa käytin mallina hankkimiani oikeita niveliä, valmistin nivelistä useita versioita ja lopulliseen tarttujaan valikoin parhaiten suoriutuneet versiot.

Sormien MP-nivel vaatii laajemman liikkuvuuden - se liikkuu ojentaessa ja koukistaessa, mutta vaatii myös pienen sivuttaisliikkeen. MP-nivelen mallintaminen oli yksinkertaisempaa sen puolipallomaisen rakenteen takia, ja jo ensimmäisen valmistettu nivel toimi moitteettomasti. Eniten haastetta toi peukalon satulamainen CMC-nivel, joka kykenee suureen ojennus-, koukistus-, loitonnuksen- ja lähennysliikkeeseen. Yksinkertaisin tapa lähestyä ongelmaa olisi ollut mallintaa nivel ja luu ihmiskäden mukaisesti, mutta silloin nivelkapselia ja ligamenttirakenteita simuloivien osien kiinnitys olisi ollut vaikeaa tilanpuutteen takia. Lähestyin ongelmaa rakentamalla ensin osan satulamaisesta rakenteesta ja nivelkapselistä - liikuttamalla tätä keskeneräistä niveltä pystyin kartoittamaan liikeratojen puutteet ja mallinsin sen

jälkeen uuden korvaavan nivelen. Valmis CMC-nivel valmistui kokeilemalla jokainen liikelaaajuus läpi ja mallintamalla aina uusi parempi nivel (kuva 6).

Kämmenen luut ovat tarttujassa ainoa osa, jota ei ole mallinnettu mahdollisimman tarkasti ihmiskättä vastaavaksi. Tässä sen tarkoitus on toimia nivelille ja sormille tukevana alustana sekä kiinnittyä tukirakenteen loppuosaan. Yhdistetyissä kämmenluissa esiintyy silti niille ominainen kupera muoto ja osa vastaa mittasuhteiltaan ihmiskättä.

Tarttujan luita vastaaviin osiin on mallinnettu sisälle kennomainen rakenne, jonka tarkoitus on jäljitellä ihmisen luun huokoista sisäosaa. Tämä tekee osista kevyemmän heikentämättä luun kestävyyttä. Vältin sormien ja kämmenen osien valmistuksessa täysin kiinteiden kappaleiden tulostamista, koska käytin tulostusmateriaalina FormLabsin raskasta Tough 1500 resiiniä. Tarttujan sormien valmistuksessa kokeilin useita eri tulostusmateriaaleja, jotka usein paljastuivat liian koviksi työstää tai liian heikoiksi kestämään otteiden tuottamia puristusvoimia. FormLabsin Tough 1500 resiinissä yhdistyivät erinomainen työstettävyys ja korkea taivutuslujuus.



KUVA6. Kuva DIP-, PIP- ja MP-nivelen mallinnusvaiheesta

## 5.2 Servomoottoreiden kehikko

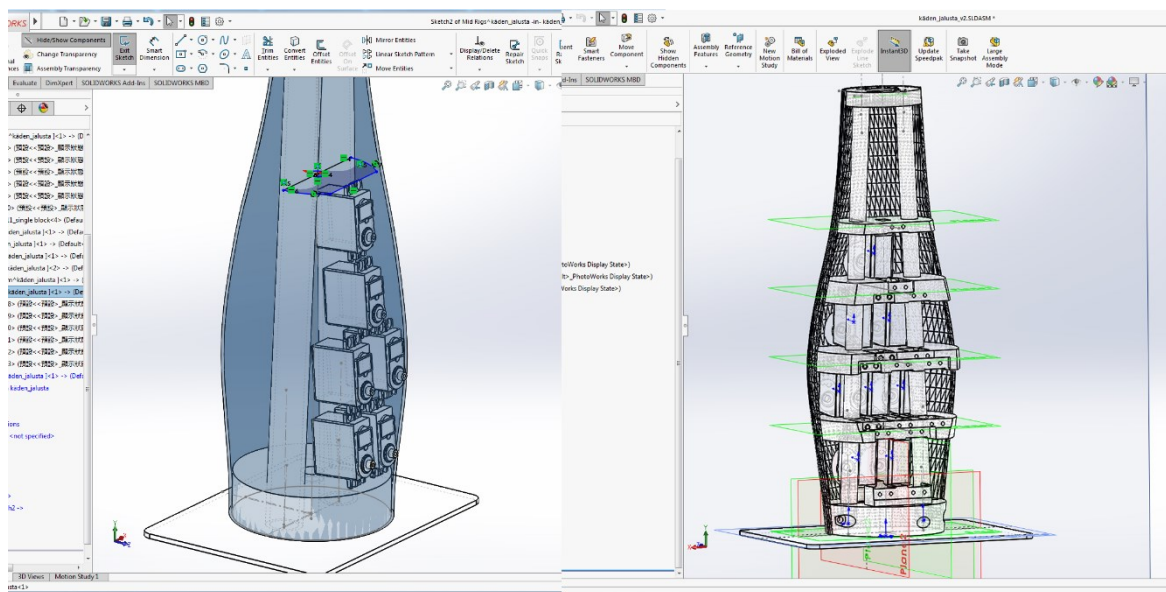
Tarttujan toimilaitteille eli servomoottoreille piti valmistaa erityinen kehikko, joka kykenisi kestämään yhtäaikaisesti kuudentoista servomoottorin tuottaman vääntövoiman. Aikaisemmissa prototyypeissä servomoottorit olivat irronneet kehyksen kiinnityksistä tai pahimmassa



tapauksessa koko servokehikko oli murtunut ja luhistunut korjauskelvottomasti useampaa moottoria käyttäessä. Tarttujan tavoitteissa oli lisäksi asetettu kokonaispainotavoite - alkuperäisessä kehikon suunnitelmassa materiaalina olisi ollut alumiini, joka nyt piti korvata kevyemmällä materiaalilla.

Servomoottoreiden kehikoksi kehitin kerrosmaisen rakenteen, joka puristaisi kehikon välikerrokset ja servomoottorit sitä tiukemmin toisiinsa mitä enemmän servoja aktivoituisi. Kerroksien läpi kulkee kaksi alumiinista tukirankaa, joita pitkin kehikon palat voivat liikkua ylös ja alas. Moottorit ovat sijoitettu kehikkoon sen perusteella minkä ojentaja- tai koukistajalihaksen ryhmää toimilaite jäljittelee, koska tämä helpottaa jänteiden ja niihin kiinnitettyjen vaijereiden liikkumista. Kehikko ei käytä kiinnikkeitä moottoreiden asennuksessa - kerroksissa ovat muotoillut urat, joihin moottori liu'utetaan. Moottoreiden siirtäminen ja kalibroiminen sekä korvaaminen uudella on nopeaa.

Valmistin kehikolle myös käsivarren muotoja mukailevan suojakuoren, sen tehtävänä on suojata moottoreita ja voimansiirtovaijereita kosketukselta sekä käyttäjää kun tarttuja on toiminnassa. Servokehikko ja suojakuori ovat valmistettu ABS-muovista, tämä materiaali soveltui sormissa käytettyä resiniä paremmin sen keveyden, joustavuuden ja pehmeiden ansiosta (kuva 7).



KUVA7. Servomoottorin kehikko

### 5.3 Ligamenttirakenteita simuloivat osat

Sormien ja peukalon ligamenttirakenteita simuloivan vastineen kehittäminen oli yksi työn haastavimmista vaiheista - niveltä ympäröivien kudosten valmistamiseksi oli useita eri vaihtoehtoja, mutta kaksi lupaavinta menetelmää oli kokonaisen nivelpussin tai avonaisen

valjaan suunnittelu. Päädyin valmistamaan ligamenttirakenteet suunnittelemalla sormien nivelten ympärille joustavat valjaat. Avonainen rakenne on monimutkaisempi valmistaa, mutta sitä oli helpompi muokata ja korjata myöhemmin tarpeen vaatiessa.

Sopivan materiaalin löytäminen oli vaikeaa, sillä käytettävän materiaalin ominaisuuksiksi vaadittiin kestävyyttä, korkeaa joustavuutta ja helppoa käsittelyä valmistusvaiheessa. Valmistin ensimmäiset versiot valjaista piirtämällä 2D-mallin ja leikkaamalla laser-leikkurilla lateksikalvosta valjaiden muotoiset kappaleet. Lateksi oli tähän tarkoitukseen liian joustavaa ja valjaiden kiinnitys nivelten ympärille oli vaikeaa. Tasapaksun materiaalin käyttämisessä oli myös oma ongelmansa; toimiakseen oikein, valjaan pitäisi joustaa enemmän tietyissä kohdissa ja olla jäykempi toisessa kohtaa.

Löysin sopivia 3D-tulostettavia materiaaleja, jotka mahdollistivat monimutkaisemman rakenteen luomisen. Pystyin tulostamaan kappaleen yhtenäiseksi osaksi, jossa eri kohdissa esiintyi vaihtelevia paksuuksia. Tämän kolmiulotteisen rakenteen ansiosta tulostettu ligamenttirakenne pystyi joustamaan tai estämään ylitaipumista halutuissa kohdissa. Suunnittelin ja valmistin jokaisen sormen nivelelle erikseen oman valjaansa, ja useat eri osat kokivat vaihteittaisia muutoksia työn edistyessä.

Valjaat pysyvät paikoillaan vahvan ympäröivän kiinnitysrenkaan avulla ja niissä kiinni olevat ohuet kollateraalligamentit tuottavat oikeat liikkumisasteet sormille. Ainoa tapa varmistua toimivuudesta oli kuitenkin ensin asentaa valjaat ja kokeilla toteutuvaa liikelaajuutta. Sain kullekin nivelelle oikean liikkumisasteen muuttamalla vaihteittain ligamenttirakenteiden eri kohtien paksuutta ja lisäämällä ylitaipumista estäviä rakenteita.

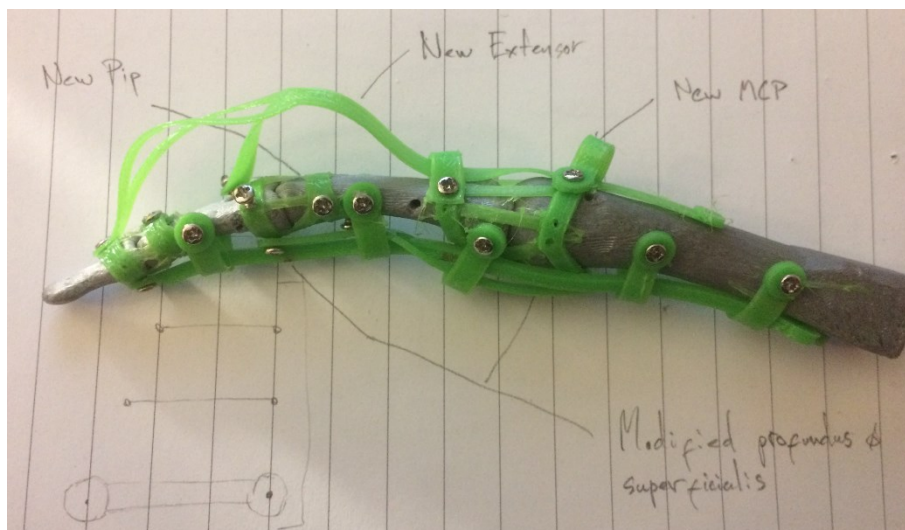
#### 5.4 Jäniteitä simuloivat osat

Jäniteitä simuloivissa osissa ongelmat olivat hyvin samanlaisia kuin ligamenttirakenteissa. Jänteen rakenteet kokivat useita muutoksia ennen lopullisen muodon saavuttamista ja sopivan jännemateriaalin löytäminen oli haaste. Ensimmäisissä versioissa jänne koostui jäykästä vaijerista tai liian joustavasta lateksista, jotka tekivät sormien liikkeistä epätasaisia ja aiheuttivat nivelten ylitaipumista.

Kolmiulotteisella muodolla pystyin jäljittelemään paremmin käden jänneiden koostumusta ja monimutkaisia rakenteita. Jänteet ovat tulostettu pituussuunnassa useisiin kerroksiin, ja niiden välissä on leveyssuuntaisesti tulostettuja risteäviä juovia. Tulostussäikeiden rakenteen on tarkoitus tehdä jänteistä pituussuunnassa joustavia ja kestäviä.

Koukistajajänteen läpi kulkee syväkoukistajajänne. Tämä kiasmaksi kutsuttu rakenne mahdollistaa tietyt koukistusotteet. Suunnittelin tarraimen koukistajan jänteelle samantyyppisen

risteyksen tehdäkseen tarraimen puristusotteesta yhtä monipuolisen kuin ihmiskädellä. Oikean kohdan löytäminen kiasmalle vaati useita yrityksiä, sillä jo muutaman millimetrin muutos saattoi vaikuttaa koukistusliikkeen onnistumiseen. Sormien ojentajien jänteet ja kalvorakenne muodostavat ojentajajännesysteemin, jonka myös toteutin saadakseni tarttujassa aikaiseksi sormien täyden ojentumisen (kuva 8). Myös tämä osa vaati useita muutoksia oikeanlaisen liikkeen saavuttamiseksi.

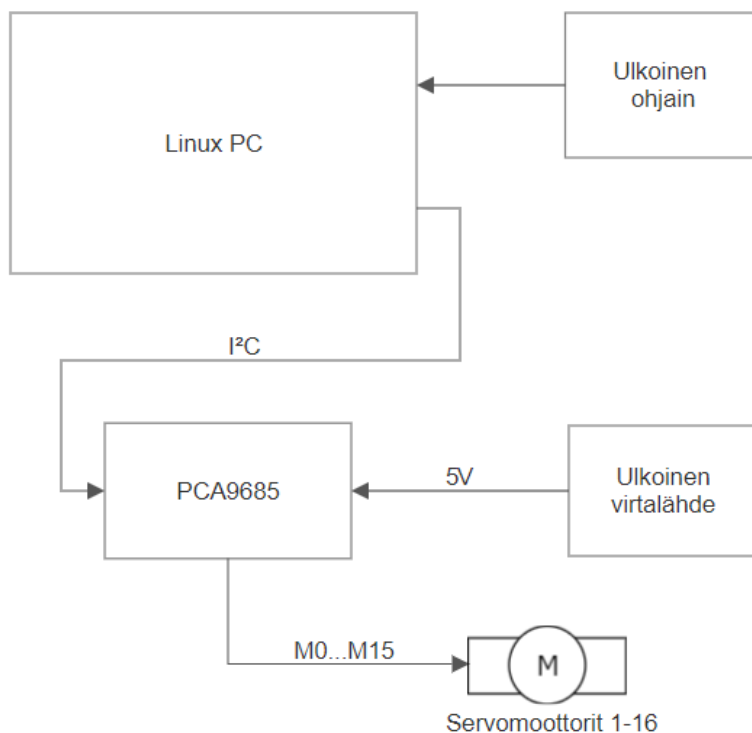


KUVA8. Yksi versio ligamenttirakenteita ja jänteitä simuloivista osista

## 5.5 Tarttujan ohjaus ja sensorit

Tarttujan kuudentoista servomoottorin asentoa hallitaan PCA9685 PWM-ohjauspiirin kautta. Yksittäinen PCA9685 sisältää kuusitoista kanavaa laitteiden ohjaukseen ja ohjattavien laitteiden määrää voidaan laajentaa yhdistämällä useampia PCA9685-ohjauspiirejä keskenään, lisäksi servomootoreille voidaan syöttää virtaa ulkoisen 5V-12V virtalähteen kautta (NXP 2015). Tämä mahdollisuus laajentaa ohjattavien laitteiden määrää myöhemmin ja käyttää erillistä virtalähdettä vaikutti ohjauspiirin valintaan.

Ohjauspiiri kytkettiin I2C-sarjaliikenneväylän avulla Linux-käyttöliittymällä varustettuun tietokoneeseen, jolta Python-ohjelmointikielellä kirjoitetuilla ohjelmilla voitiin välittää liikekäskeyjä servomootoreille komentoikkunan kautta tai ajaa valmiita ohjelmia ennalta määritetyillä liikekäskeyillä. Moottoreiden ohjaukseen voitiin myös käyttää ulkoisia ohjaimia, esimerkiksi yksittäisten servomoottoreiden asentoa voitiin säädellä potentiometrin avulla. Tässä tietokone luki potentiometrin arvoa ja välitti liikekäskeyn ohjauspiirille koodissa määritellyn liikeasteen verran (kuvio 6). Työssä tutkittiin myös mahdollisuutta ohjata tarttujaa elektromyografian ja lihaksiin kohdistettujen infrapunasäteiden avulla.



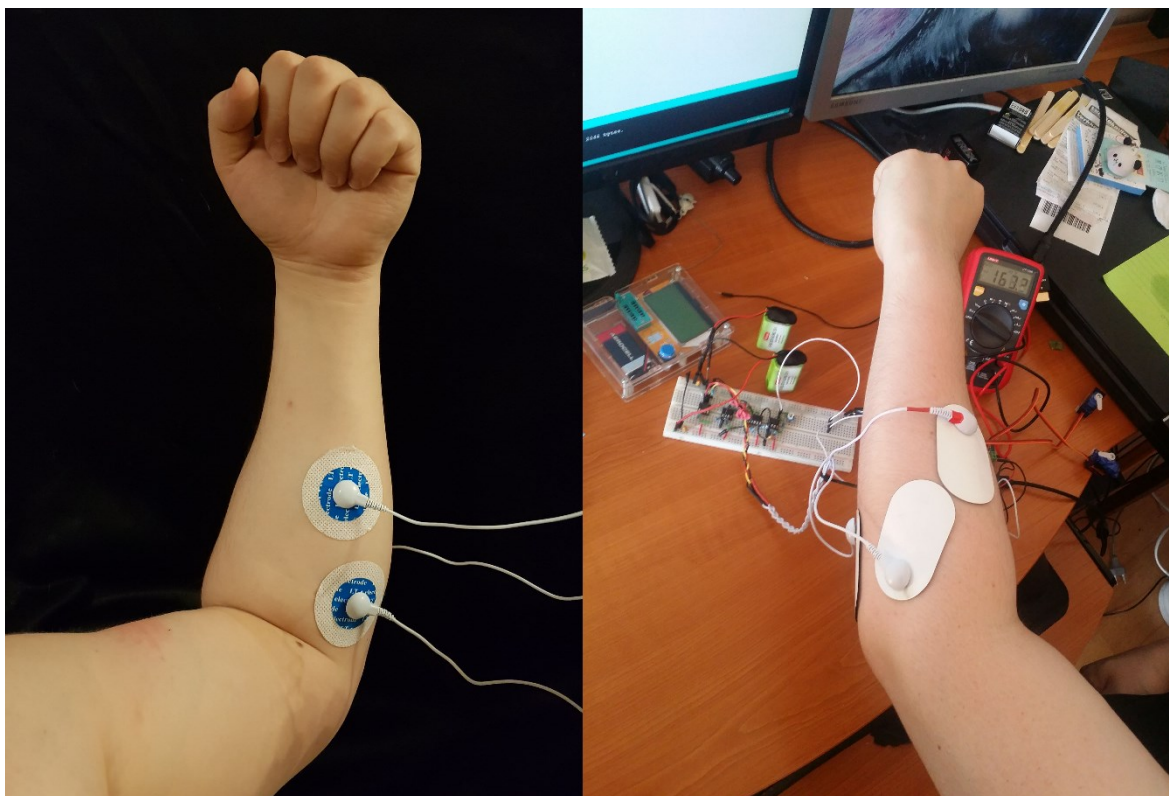
KUVIO6. Servomootoreiden ohjauskaavio

### 5.5.1 EMG

Elektromyografia (EMG) mittaa lihaksen sähköistä toimintaa ja syötettyjen hermoimpulssien määrää lihaksissa. Lihaksen solujen varausmuutoksia voidaan mitata ulkoisesti pintaelektrodeilla tai sisäisesti asettamalla lihaksen sisään neulaelektrodit. Nämä signaalit vahvistetaan moninkertaisesti ja kerätään analysoitavaksi tallennuslaitteelle. (Kauranen & Nurkka 2010, 303–326).

Tutkimusta varten valmistettu yksinkertainen EMG-vahvistin kiinnitettiin pintaelektrodeihin, jotka asetettiin käden isojen lihasryhmien päälle (kuva 9). Lihaskäynnityksestä saadut signaalit välitettiin ohjaustietokoneelle ja edelleen servo-ohjaimelle.

Signaaleilla onnistuttiin ohjaamaan tarttujan nyrkin avautumista ja sulkemista yhdistämällä servomootorit ryhmiksi, yksittäisten sormien ohjaamiseen EMG-pintaelektrodit eivät olleet riittäviä. Osa signaalista suodattui ympäröivien kudosten aiheuttaman kudosispedanssin takia, ja viereisten lihasten aiheuttama häiriö ja kohina liikkeen aikana vaikeutti yksittäisen lihaksen tarkkaa seurantaa.



KUVA9. EMG-pintaelektrodit ja EMG-vahvistin

### 5.5.2 IR

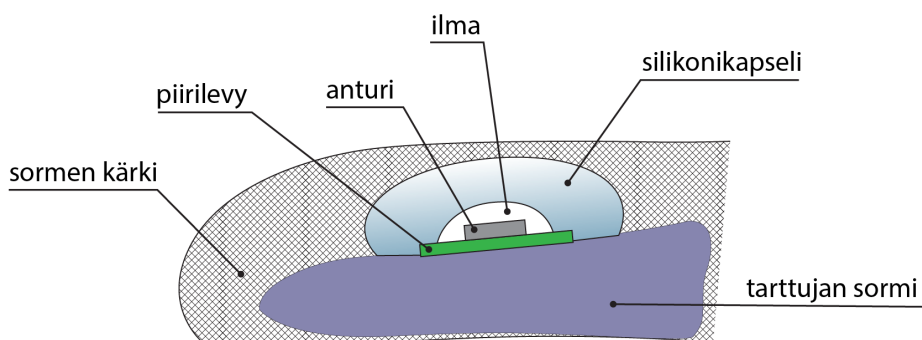
Lihaskäynnitystä voidaan tutkia myös kohdistamalla ihoa läpäiseviä infrapunasäteitä tutkittavalle alueelle. Infrapuna valo läpäisee ihon, mutta lihassäikeisiin osuessaan osa säteistä absorboituu ja osa heijastuu takaisin. Lihaskäynnityksessä lihakseen absorboituvien säteiden määrä muuttuu, ja takaisin heijastuneiden infrapunasäteiden avulla voidaan analysoida tapahtunutta liikesuoritusta. InfrapunaLED:istä ja fototransistoreista valmistetut anturit kohdistettiin käden isoja lihaksia vasten ja tutkimuksessa saavutettiin hiukan paremmat tulokset kuin vastaavilla EMG-antureilla. Infrapuna-antureissa ei ilmennyt kohinaa tai häiriötä, mutta näillä ei kuitenkaan pystytty erottamaan yksittäisten sormien liikuttamiseksi vaadittavaa signaalitarkkuutta. Nämä osoittautuivat kuitenkin pienemmäksi ja yksinkertaisemmaksi tavaksi mitata ison lihasryhmän toimintaa. (Chianura, Giardini 2014)

### 5.5.3 Paine ja lämpötilasensori

Tarttujalla kokeiltiin myös kosketuspaineen seuranta barometrin avulla, tähän käytettiin pienikokoista ja vähävirtaista MPL115A1 digitaalista barometria SPI-väyläulostulolla. MPL115A1 on kooltaan hyvin pieni, sen leveys ja pituus on vain muutamia millimetrejä ja se sopii asetettavaksi tarttujan sormen kärjen alle. MPL115A1 on pintaliitoskomponentti, joka käyttää erittäin herkkää MEMS-paineanturia. (NXP 2017).

Anturin herkkyys teki barometrin käyttöönotosta haastavaa - anturia ei voitu jättää avoimeksi ympäristölle ja komponentille piti tuottaa oma suojaava kapselointi. Ensiksi barometrin toimintaa testattiin normaalissa olosuhteessa ja sen tuottamat paine- ja lämpöarvot varmistettiin tietokoneella luotettaviksi. Seuraavaksi komponentti asetettiin onttoon silikonikapseliin ja sinetöitiin ilmatiiviiksi, kapseli kiinnitettiin tarttujan sormen kärkeen ja komponentin kytkentäjohdot asetettiin kulkemaan sormen sivuja pitkin. Sormen kärkeen ja kapseliin pintaan lisättiin silikonimassaa ihmisen sormen kärkeä muistuttavan rakenteen saavuttamiseksi (kuvio 7).

Suoritetuissa kokeissa komponentin ympäröivään massaan kohdistettiin painetta ja paineanturi tuotti dataa, tämä korreloi myös massaan kohdistetun voiman kanssa. Kapseloitu anturi havaitsi myös silikonimassaan kohdistetun kevyen kosketuksen. Barometri pystyi myös mittaamaan lämpötilaa, mutta luotettavien arvojen mittaaminen eristävän ilmakerroksen ja silikonikapselin läpi osoittautui vaikeaksi.



KUVIO7. Silikonilla koteloitu paine ja lämpötilasensori MPL115A

## 6 Tutkimustulokset

### 6.1 Tarttujan ominaisuudet

Taulukko 1. Tarttujan ominaisuudet

Osa	Paino (grammaa)
Tarttujan, suojakuoren, moottoreiden ja kehyksen kokonaispaino	1730g
Tarttujan paino	130g
Tarttujan suojakuoren paino	220g
Servomoottoreiden paino	890g
Servomoottorikehyksen paino	490g
Laitteen maksimikorkeus	57cm
Tarttujan kämmenen ja sormien maksimikorkeus	20cm
Laitteen maksimileveys	12cm
Tarttujan kämmenen leveys	10cm

Tarttuja vastaa mittasuhteiltaan ihmiskättä. Sormien ja peukalon luita vastaavat osat ovat kooltaan ja muodoltaan samat kuin ihmisellä. Ranneluita jäljittelevä rakenne on yhtenäinen kappale, joka nykyisessä muodossa ei pysty jäljittelemään ranteen taivutusliikkeitä. Kokonaispainoltaan tarttuja on kevyempi kuin vastaavan kokoinen ihmiskäsi. Tarttuja suojakuoren, moottoreiden ja kehyksen kanssa painaa 1730 grammaa, vastaavan kokoinen ihmiskäsi painaisi noin 2100 grammaa (Kauranen & Nurkka 2010, 326). Suurin osa tarttujan painosta koostuu moottoreista ja moottorien kehyksestä, tarttujamekanismi eli sormet ja kämmen painavat yhteensä vain 130 grammaa (taulukko 1).

Pieni koko ja tarttujamekanismin keveys tekevät tarttujasta turvallisen tehtävissä, joita suoritetaan yhdessä ihmisen ja robotin vuorovaikutuksena samassa työympäristössä. Lisäksi jänne- ja ligamenttirakenteita simuloivien osien joustavuus rajoittaa tarttujan puristusvoimaa ja minimoi käyttäjän ruumiinjäsenten murskautumisvaaran.

Ohjaaja käyttää jo aiemmin opittuja taitoja muodostaessaan otteita tällä tarttujalla, ihmiskäden muoto on hänelle jo tuttu, ja hän ymmärtää minkälaisella otteella saa parhaiten kiinni esineestä. Esinettä lähestytään vastaavasta kulmasta kuin omalla kädellä tarttuessa, ja



ohjaaja luo samankaltaisen esitartuntaotteen - tehokkain tartuntatapa on sama ihmiskädelle ja tälle tarttujalle.

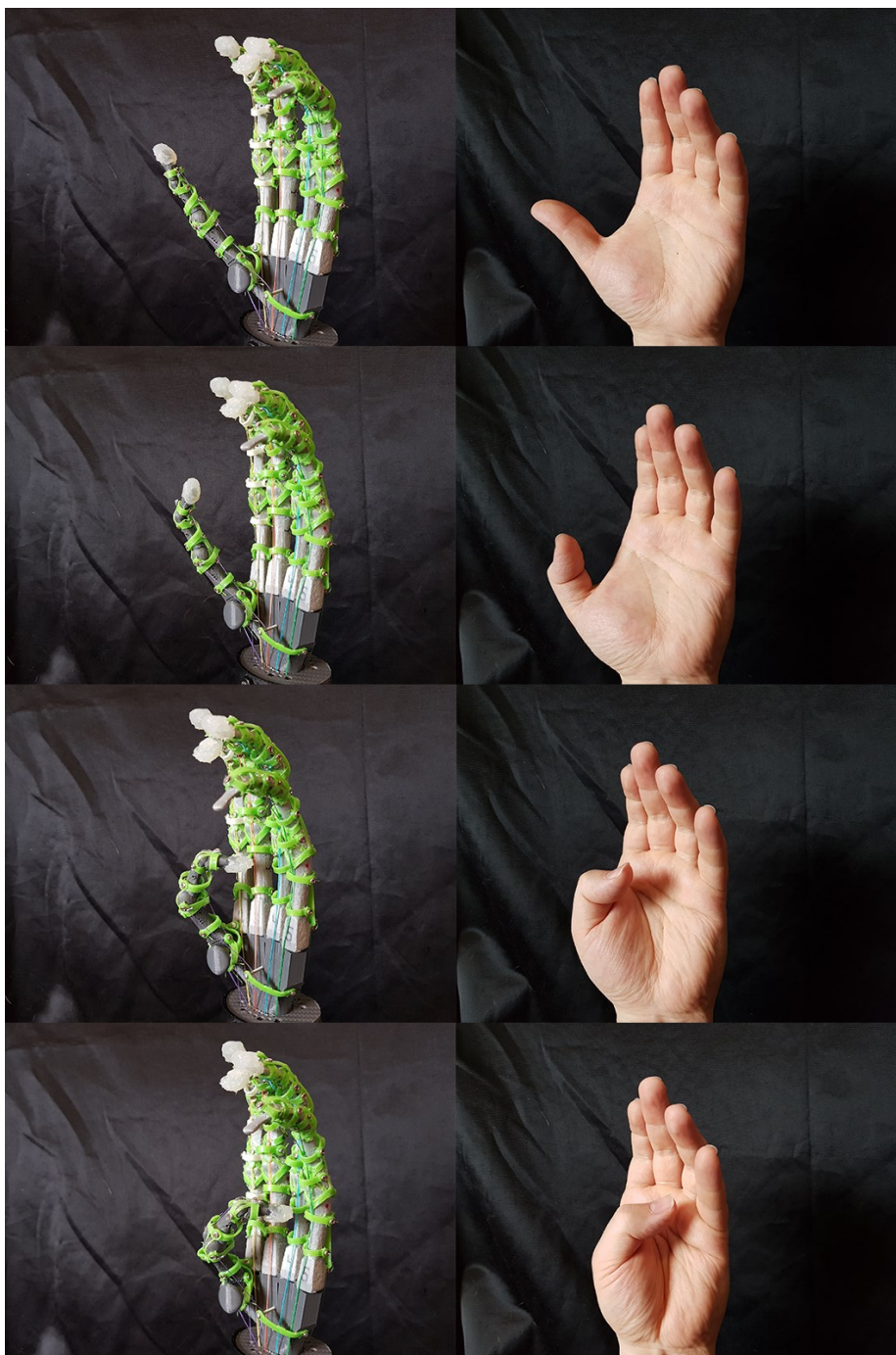
## 6.2 Sormien ja peukalon liikelaajuudet

Tarttujan biomekaanista yhtäläisyyttä ihmiskäteen voidaan tutkia suorittamalla liikelaajuus-tutkimus ja vertailemalla saatuja tuloksia terveen ihmiskäden liikkuvuuden kanssa. Tässä vertailussa tarttujan aktiivinen liikelaajuus sekä mittaajan suorittama passiivinen liikelaajuus mitataan asteina tai sormenpäiden välisenä etäisyytenä. Tässä tutkittavat liikkeet ovat peukalon fleksio, oppositio, abduktio ja adduktio sekä sormien fleksio, ekstensio, abduktio ja adduktio. (Vastamäki ym. 2016, 54–55).

### 6.2.1 Peukalon fleksio

Peukalon fleksion 0-asento alkaa IP-, MP- ja CMC-nivelen ojennuksella. Fleksion kulma määräytyy kunkin nivelen tuottamasta kulmasta vastakkaisten luiden välillä. IP-nivelen liikelaajuus on 80 astetta, MP-nivelen 50 astetta ja CMC-nivelen 15 astetta (kuva 10) (taulukko 2).





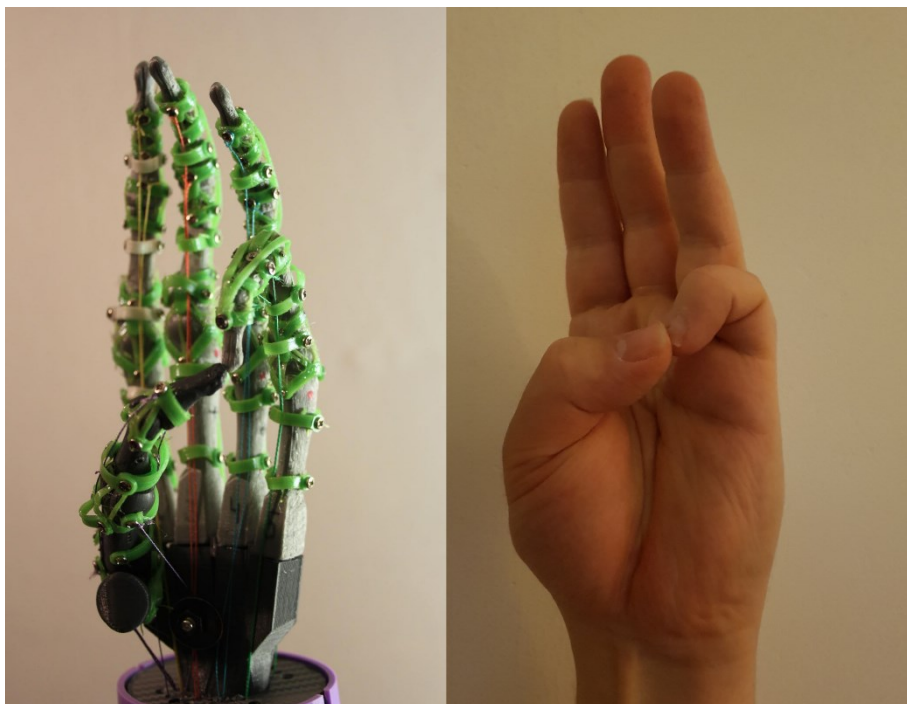
KUVA10. Peukalon fleksio

Taulukko 2. Peukalon fleksio

Liike	Terveen käden liikelaaajuus (astetta)	Tarttujan liikelaaajuus (astetta)
IP-nivelen fleksio	80	80
MP-nivelen fleksio	50	45
CMC-nivelen fleksio	15	20

### 6.2.2 Peukalon oppositio

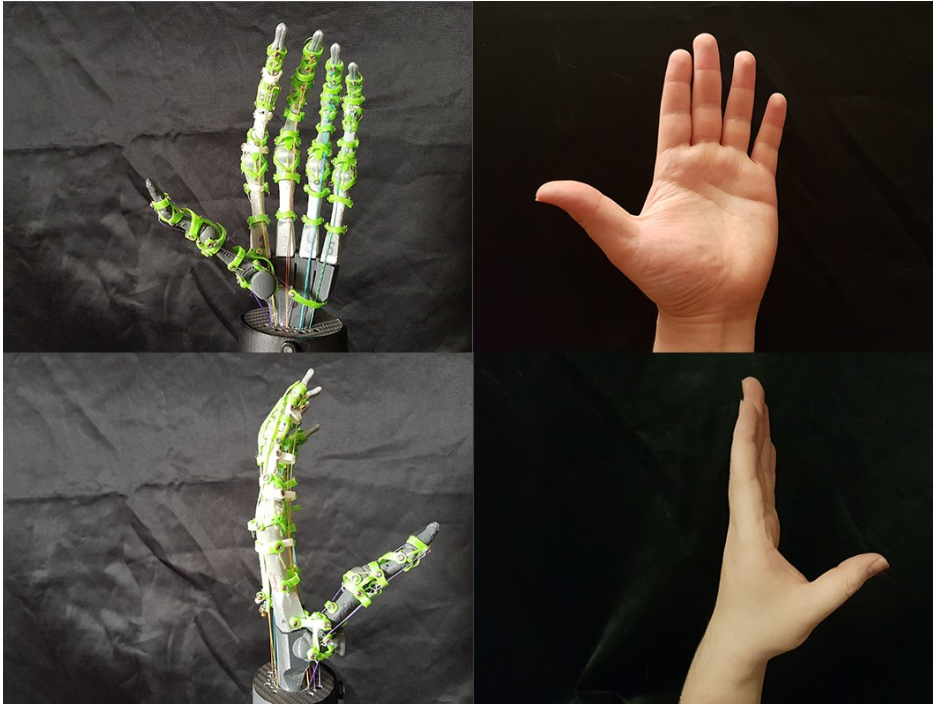
Peukalon opposition 0-asento alkaa peukalon ollessa ojennettuna etusormen suuntaisesti. Peukalon ja sormen oppositioliike koostuu abduktion, rotaation ja fleksion yhdistämisestä. Oppositioliike on täydellinen, jos kämmentä vastaan kääntyneen peukalon kärki koskettaa pikkusormen kärkeä (kuva 11).



KUVA11. Peukalon oppositio

### 6.2.3 Peukalon abduktio ja adduktio

Peukalon abduktion ja adduktion 0-asento alkaa ojentamalla peukalo radiuksen suuntaisesti etusormen sivua vasten. Abduktion kulma määräytyy ensimmäisen ja toisen metakarpalin välisenä kulmana. Palmaariabduktio mitataan suorassa kulmassa kämmenen tasosta ja radiaaliabduktio kämmenen tasosta. Terveen nivelen liikelaajuus molemmissa liikkeissä on 90 astetta (kuva 12) (taulukko 3).



KUVA12. Peukalon abduktio ja adduktio

Taulukko 3. Peukalon abduktio ja adduktio

Liike	Terveen käden liikelaaajuus (astetta)	Tarttujan liikelaaajuus (astetta)
Palmaariabduktio	90	65
Radiaaliabduktio	90	60

#### 6.2.4 Sormien fleksio

Sormen fleksion 0-asennossa ojennetut sormet ovat yhdensuuntaisia kämmenselkään ja toisiinsa nähden. Fleksion kulma määräytyy kunkin nivelen tuottamasta kulmasta vastakkaisten luiden välillä. DIP-nivelen liikelaaajuus on 90 astetta, PIP-nivelen 100 astetta ja MP-nivelen 90 astetta (kuva 13) (taulukko 4).



KUVA13. Etusormen fleksio

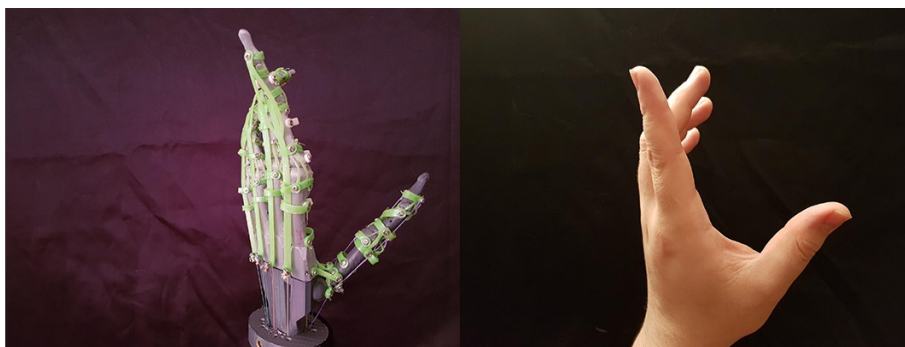


Taulukko 4. Sormen fleksio

<b>Liike</b>	<b>Terveen käden liikelaaajuus (astetta)</b>	<b>Tarttujan liikelaaajuus (astetta)</b>
Etusormen DIP-nivelen fleksio	90	80
Etusormen PIP-nivelen fleksio	100	95
Etusormen MP-nivelen fleksio	90	80
Keskisormen DIP-nivelen fleksio	90	90
Keskisormen PIP-nivelen fleksio	100	90
Keskisormen MP-nivelen fleksio	90	80
Nimettömän DIP-nivelen fleksio	90	90
Nimettömän PIP-nivelen fleksio	100	90
Nimettömän MP-nivelen fleksio	90	100
Pikkusormen DIP-nivelen fleksio	90	90
Pikkusormen PIP-nivelen fleksio	100	90
Pikkusormen MP-nivelen fleksio	90	100

### 6.2.5 Sormien ekstensio

Sormen ekstension 0-asento on sama fleksiossa. Ekstensio tapahtuu MP-nivelessä ja on hyvin pieni, 10 astetta (kuva 14) (taulukko 5).



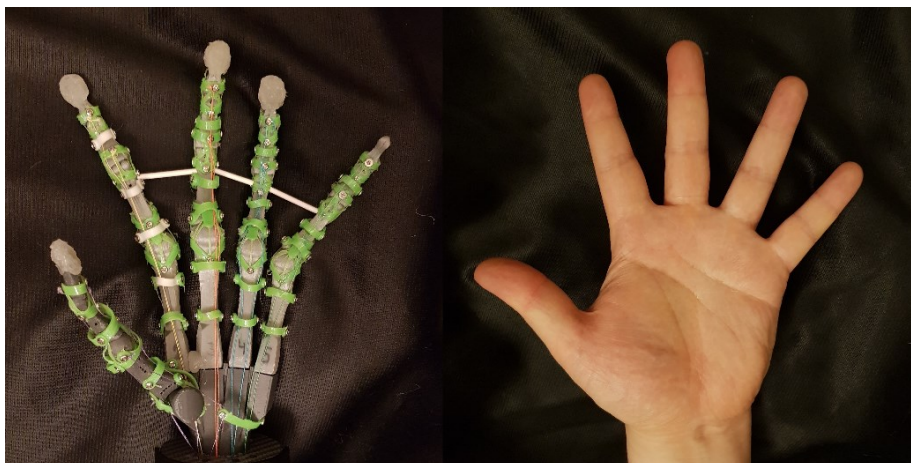
KUVA14. Sormen ekstensio

Taulukko 5. Sormen ekstensio

<b>Liike</b>	<b>Terveen käden liikelaajuus (astetta)</b>	<b>Tarttujan liikelaajuus (astetta)</b>
Etusormen ekstensio	10	15
Keskisormen ekstensio	10	10
Nimettömän ekstensio	10	20
Pikkusormen ekstensio	10	10

### 6.2.6 Sormien abduktio ja adduktio

Tämä loitontumisen liikelaajuuden mittaaminen on vain suuntaa antava, sillä sormien abduktiota ja adduktiota jäljitteleviä moottoroituja mekanismeja ei ole tarttujassa. Taivuttamalla MP-niveltä voidaan tutkia tarttujan teoreettinen liikelaajuus. Sormien abduktio ja adduktio suoritetaan kämmenen tasossa. Sormien yhteinen loitontuminen mitataan etusormen ja pikkusormen kärkien etäisyyksistä, muiden sormien etäisyydet toisiinsa nähden mitataan erikseen (kuva 15) (taulukko 6). Lisäksi mitataan keskisormen ja muiden sormien välinen kulma (taulukko 7).



KUVA15. Sormien abduktio ja adduktio

Taulukko 6. Sormien loitontuminen

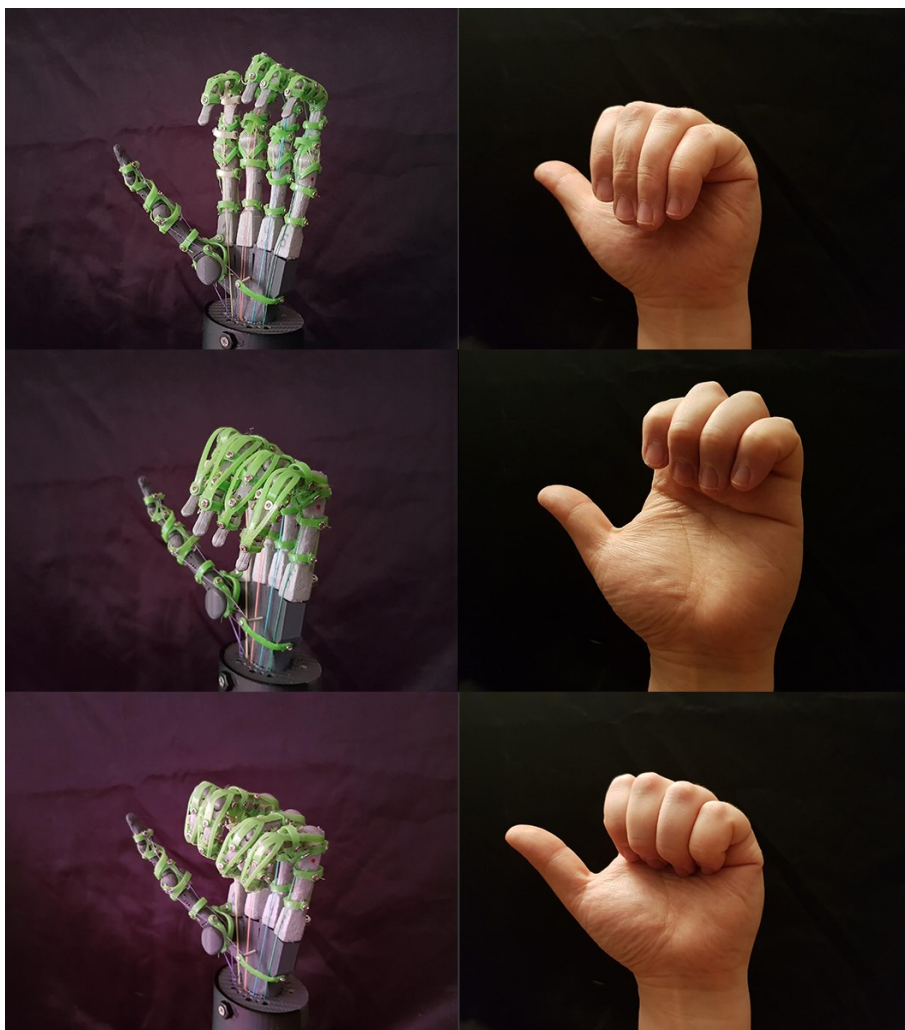
<b>Liike</b>	<b>Terveen käden loitontuminen (senttimetriä)</b>	<b>Tarttujan loitontuminen (senttimetriä)</b>
Loitontuminen	15	14

Taulukko 7. Sormien abduktio ja adduktio

<b>Liike</b>	<b>Terveen käden liikelaaajuus (astetta)</b>	<b>Tarttujan liikelaaajuus (astetta)</b>
Etusormen ja keskisormen välinen abduktio	20	30
Nimettömän ja keskisormen välinen abduktio	25	10
Pikkusormen ja keskisormen välinen abduktio	45	40

### 6.3 Nyrkkiasennot

Tarttujan kykyä muodostaa nyrkkiasentoja tutkittiin käyttämällä koukistajajännevammojen kuntoutuksessa tehtyjä nyrkitysharjoituksia. Näissä liikkeissä harjoitetaan koukistajajänteen isometristä jännitystä kolmessa eri nyrkitysasennossa: koukku, puolinyrkki ja nyrkki (kuva 16). Tätä voidaan soveltaa tarttujaan ja mitata sormien kykyä muodostaa samanaikaisia ja pitäviä fleksioliikkeitä.



KUVA16. Nyrkkiasennot

#### 6.4 Tarttumiskyky

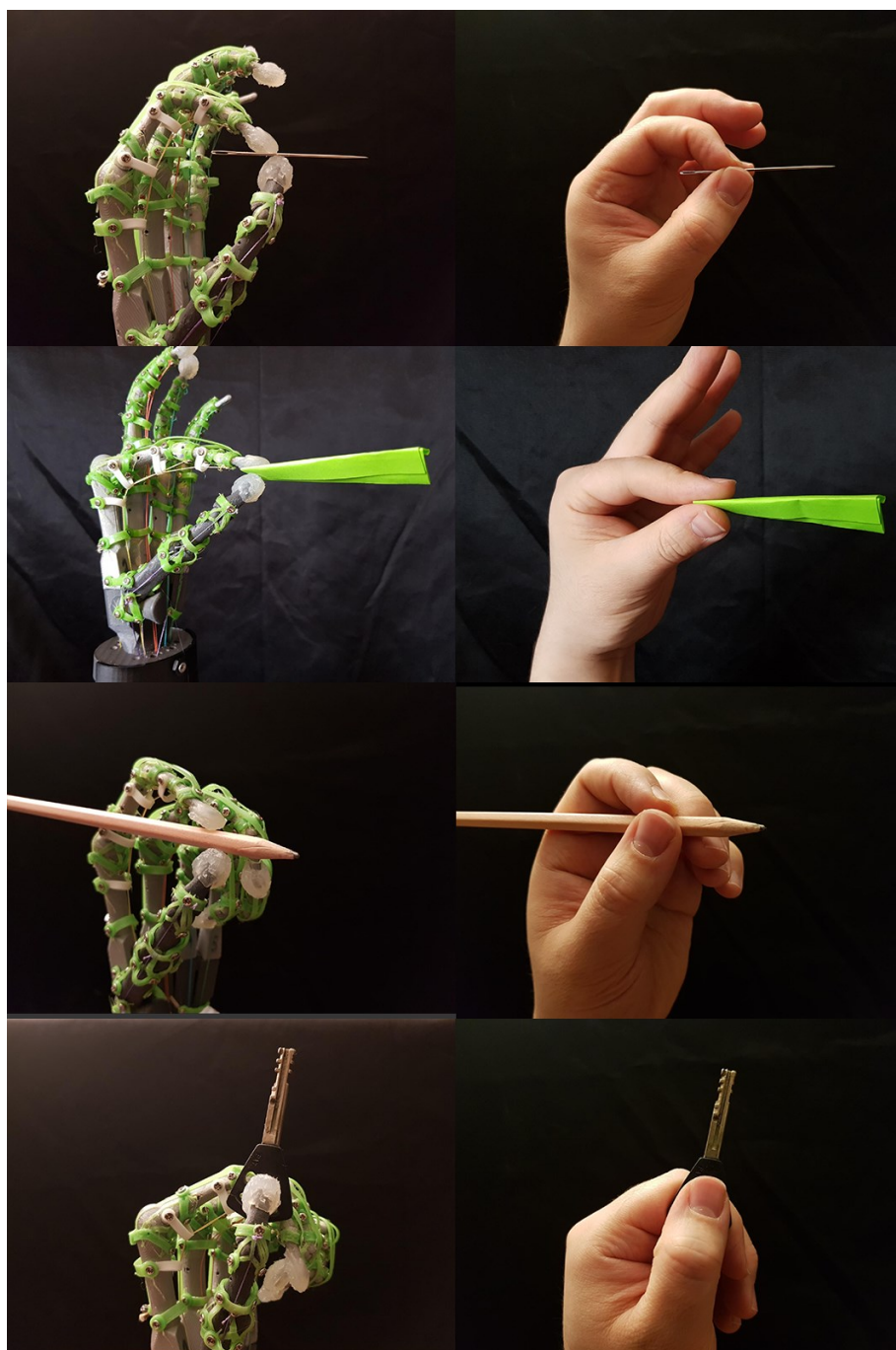
Tarttujan tarttumiskykyä tutkittiin muodostamalla erityyppisiä otteita esineistä ja vertailemalla otetta ihmiskäden muodostamaan otteeseen. Tarttujan tarttumiskyvyn tutkiminen on jaettu kahteen osaan: tarkkuusotteiden muodostaminen ja voimaotteiden muodostaminen. Tarkkuusotteilla tartuttaviksi esineiksi valittiin arkisia esineitä, joiden tartuntaotteita voisi olla haastavaa imitoida. Voimaotteessa tutkittiin tarttujan kykyä pitää ote tartuttavasta esineestä ja arvioida otteen pitävyyttä liikuttamalla esinettä (taulukko 8).



Taulukko 8. Tarttumiskykykokeen esineiden painot

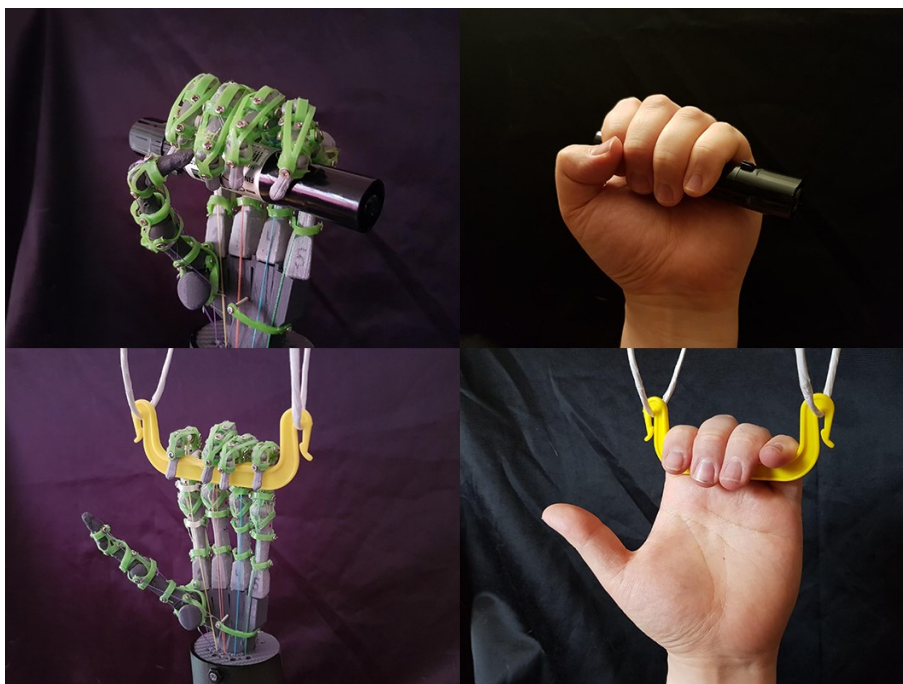
<b>Esine</b>	<b>Paino (grammaa)</b>
Tussi	26
Avain	8
Kynä	3.8
Neula	0.5
Paperi	0.5

#### 6.4.1 Tarkkuusotteet



KUVA17. Tarkkuusote sormenpäällä, pihtiote, kynäote ja avainote

### 6.4.2 Voimaotteet



KUVA18. Kämmentote ja koukkuote

### 6.5 Tulokset

Liikelaajuustutkimuksessa tarttujen suoriutui kohtalaisesti taulukkoarvojen ja tarttujan välisessä vertailussa. Tulokset olivat kuitenkin osittain yhdenvertaiset vertailtaessa liikelaajuutta suoraan mittajan käden ja tarttujan liikkeen välillä. Taulukon antamia arvoja ei kuitenkaan voida pitää absoluuttisina ja ihmisten välillä löytyy huomattavia eroja nivelten liikkuvuudessa ja tukevuudessa. Tämä tuli myös ilmi vertailtaessa mittajan nivelten asentoja taulukon arvoihin. Peukalon liikkeissä tarttujen suoriutui erityisen hyvin peukalon fleksiossa sekä oppositioliikkeessä. Sormien liikkeissä fleksio toteutui hyvin, mutta huomionarvoista on pikkusormessa ja nimettömässä esiintynyt hiukan suurempi liikelaajuus. Tämä voi selittyä pikkusormen ja nimettömän ligamenttirakenteita simuloivien osien pienemmällä koolla ja paksuudella, servomoottorien välittämän voiman pysyessä yhtä korkeana muihin sormiin verrattuna. Sormien loitontumisen liikelaajuustutkimus suoritettiin passiivisena mittauksena, jossa sormienpäiden etäisyys mitattiin levittämällä tarttujan sormet ilman moottoreita.

Nyrkkiasentojen muodostaminen onnistui tarttujalla hyvin, koukistusliikkeiden samanaikainen muodostaminen onnistui ja asennon pitäminen ei tuottanut haasteita. Erityisen hyvin tarttujen suoriutui puolinyrkin muodostamisesta, tässä liikkeessä kaikki sormien DIP-nivelet säilyttivät ojennuksen PIP- ja MP-nivelten koukistuessa. Tämän haastavan liikkeen

onnistunut suoritus on yksi osoitus ihmiskäden biomekaanisten rakenteiden imitoimisen hyödyistä monimutkaisten liikkeiden muodostamisessa.

Tulokset tarttumiskyvyn suhteen olivat vaihtelevia. Tarkkuusotteiden asentojen muodostaminen onnistui hyvin, mutta riittävän puristusvoiman tuottaminen kahdella tai kolmella sormella oli sormien asennosta riippuen haastavaa (kuva 17). Ongelmaksi muodostui tarttujan ligamenttirakenteita simuloivien osien pehmeys ja joustavuus. Valitun materiaalin joustavuus ja tukevuus oli tasapainossa sormien liikkeiden ja asentojen muodostamisessa, mutta tarkkuusotteessa suuret puristusvoimat jakautuivat epätasaisesti ja tietyt nivelet taipuivat yli

Tarkkuusotetutkimusta jatkettiin valitsemalla kevyempiä esineitä, joista saataisiin tukeva ote pienemmällä puristusvoimalla. Voimaotteissa nivelten ylitaipuminen ei vaikuttanut yhtä voimakkaasti tuloksiin. Tämä johtuu osittain puristusvoiman tasaisemmasta jakautumisesta ja käden rakenteesta. Kämmentteessä ote esineestä pysyi hyvin sivuttaisessa liikkeessä sekä liikuttaessa esinettä tyvi- ja keskijäsenen suuntaisesti. Vahvimmaksi otteeksi osoittautui koukkuote, jossa tarttuja muodosti otteen keskijäsenen suuntaisesti ylös liikkuvasta kahvasta. Ote pysyi kahvasta myös koko tarttujan noustua ilmaan, eikä otteen löystymistä ollut havaittavissa. Koetta jatkettiin lisäämällä painoja neljään kiloon asti. Tulos ylitti odotukset ottaen huomioon, että tämä paino on 30-kertainen pelkkään tarttujaosaan verrattuna (kuva 18).

## 7 Johtopäätökset ja pohdinta

Tuotantorobotiikan yleistarttijat ovat tärkeä osa vakiintuneita tuotantoprosesseja ja monet robotiikkavalmistajat tuottavatkin useita eri malleja teollisuuden käyttöön. Osa näistä teollisuudessa käytettävistä tarttujista on tuotu sellaisenaan käyttöön etä- ja palvelurobotteihin. Näistä kuitenkin usein puuttuu tarvittava ketteryys ja tartuntaotteiden monipuolisuus, joita tarvitaan vaativissa työtehtävissä ja ihmisympäristön esineiden tarttumisessa. Otteiltaan monipuolinen ja ketterä ihmiskäden kaltainen tarttuja ei taas välttämättä olisi tehokas tuotantorobotiikassa, mutta se soveltuisi erinomaisesti etä- ja palvelurobotiikkaan. Tarttujia, jotka on lähtökohtaisesti suunniteltu toimimaan ihmisympäristön objektien kanssa, on valmistettu hyvin vähän ja ihmiskäden biomekaniikkaa jäljitteleviä tarttujia on vain muutama kaupallinen malli.

Työn tutkimuksessa analysoitiin käden biomekaanisia rakenteita ja eri tartuntaotteiden muodostamiseksi vaadittuja liikkeitä. Tarttujan suunnittelussa oli sovellettava tuotantorobotiikassa käytettyjä käytäntöjä, koska vastaaville laitteille sellaisia ei vielä ole. Tarttujan lopullinen muoto saavutettiin useiden prototyyppien jälkeen ja monet havainnoista tehtiin vasta laitteita testaamalla.

Tarttuja painaa 1730 grammaa ja sen maksimikorkeus on 57 senttimetriä ja nämä arvot täyttävät asetetut tavoitteet. Kevyt paino ja ihmiskäsivartta vastaava koko tekevät tarttujasta turvallisen ja se soveltuu ihmisten parissa käytettäväksi. Lisäksi tarttujassa käytetyt pehmeät osat ja sormien joustavat nivelrakenteet pienentävät tapaturmariskiä tilanteissa, joissa henkilö voi joutua törmäys- tai murskautumisvaaraan. Liikelaajuustutkimuksen perusteella tarttujan sormet liikkuvat melkein yhtä ketterästi kuin ihmiskäsi - erityisesti eri otteiden kannalta tärkeän peukalon liikkeet onnistuivat hyvin. Esineisiin tarttuessa tuloksissa oli enemmän vaihtelua - otteiden muodostaminen tarkkuus- ja voimaotteella onnistui hyvin, mutta riittävän puristusvoiman tuottaminen tarkkuusotteessa tuotti välillä ongelmia. Tarkkuustyön vähimmäiskantokyvyn tavoitteeksi oli asetettu 10 grammaa, mutta kokeissa tarttujan tarkkuusotteiden maksimikantoraja oli 8 grammaa. Samaa ongelmaa ei ilmennyt voimaotteessa - tavoitteeksi asetettiin kaksi kiloa ja kokeissa voimaotteen suorituskky oli kaksinkertainen.

Tarttujan rakenne imitoi ihmiskättä ulkomuodoltaan ja mekaniikaltaan: se käyttää samoja liikkeitä ja tartunnan esiotteita lähestyessään kappaletta, ja varsinainen tartuntaote muodostetaan samalla tavalla kuin ihmiskättä käyttäessä. Tämän tarttujan tartuntaotteiden hahmottaminen pitäisi olla selkeää, sillä ohjauksessa käytetään jo aiemmin opittuja otteenmuodostamistaitoja, ja tarttuessaan epäsäännöllisen muotoisiin kappaleisiin ohjaaja pystyy arvioimaan sopivan tartuntatavan oman kokemuksensa perusteella.

Opinnäytetyössä valmistettu tarttuja osoittaa, että ihmiskäden täsmällisiä voimaotteita ja monipuolisia tarkkuusotteita voidaan toistaa jäljittelemällä käden biomekaanisia rakenteita. Tätä ketteryyttä ei saavuteta vain tekemällä tarttujasta ulkoisesti yhdennäköistä ja rajoittamalla yksittäisten nivelten liikerataa. Luita, jäniteitä ja ligamenteja simuloivilla rakenteilla on sulavan liikkeen ja täsmällisten otteiden kannalta suuri merkitys.

Aiheena työ oli alkuperäistä arviota vaativampi, haasteina oli vastaavasta aiheesta tehtyjen tutkimusten rajallinen määrä sekä markkinoilla olevien ihmiskästä muistuttavien tarttujien vähyys. Erityisen haastavaksi muodostui tarttujan sormien nivelrakenteiden ja pehmytkudoksia simuloivien osien toteutus, näitä liikkeitä säätelevien rakenteiden suunnittelu ja valmistus vaati paljon taustatutkimusta ja kokeita. Ihmiskäsi on biomekaniikaltaan hyvin monimutkainen, ja sitä imitoivan laitteen valmistus vaatii laajan tuntemuksen käden biomekaniikasta sekä biologisesta rakenteesta. Valmistettavan laitteen tuotantovälineitä ja materiaaleja ei ollut yleisesti saatavilla ja resurssit laitteen kehittämiseen olivat tätä työtä varten rajalliset, tästä johtuen prototyyppien valmistus ja eri mekaanisten ratkaisujen testaaminen oli tärkeää ja monet materiaalit vaihtuivat kokonaan ennen lopullisen tarttujan valmistusta.

Sellaisenaan opinnäytetyössä valmistettu tarttuja ei toimisi robotissa, koska se ei ole valmis tuote, vaan konseptitodistus, jossa on tutkittu biomekaanisten rakenteiden hyödyntämistä monipuolisten tartuntaotteiden saavuttamiseksi. Tarttujan komponentteja, materiaaleja ja valmistustapaa ei valittu suunnitteluvaiheessa kestämiin pitkäaikaista ja toistuvaa käyttöä, vaan tavoitteena oli tuottaa prototyyppejä nopeasti ja kierrättää mahdollisimman paljon edellisten tarttujien osia. Valmistettua tarttujaa voidaan kuitenkin soveltaa etä- ja palvelurobotiikassa vaihtamalla prototyyppissä käytettyjä osia pitkäikäisempiin komponentteihin ja tekemällä materiaalivalintoja, jotka soveltuvat paremmin työkäyttöön.

## 8 Jatkotutkimusehdotukset

Tarttujaa voidaan kehittää edelleen epätäydellisten sormiliikkeiden osalta: sormien loiton-  
nus- ja lähennysliikkeitä ei ole täysin moottoroitu, mutta liikkeen mahdollistavat rakenteet  
ovat jo paikoillaan. Näiden pienten intrinsic-lihaksia simuloivien liikkeiden toteuttaminen on  
haastavaa, johtuen servomoottorien viemästä tilasta ja kämmen pienestä koosta. Toinen  
osa, jota voidaan kehittää edelleen, on ranteen toiminnallisuus. Ranneluita matkiva osa on  
tässä tarttujassa yhtenäinen kappale, joka ei pysty simuloimaan luonnollista ranneliikettä.  
Liike voidaan tuottaa rakentamalla ranneluiden kaltaisia erillisiä osia, jotka liukuvat toistensa  
yli ranteen eri taivutusliikkeiden aikana.

Tarttujan reaaliaikaista ohjausta voidaan parantaa laajentamalla mahdollisuutta käyttää eri-  
laisia ulkoisia ohjaimia. Tarkempia ohjausmenetelmiä voitaisiin kehittää tutkimalla ohjaajan  
oman käden liikkeiden taltioimista ja näiden muokkaamista liikekäskyiksi. Ohjaamisessa  
voitaisiin hyödyntää paine- ja lämpötilasensorin tuottamaa dataa, ja tuottaa sen avulla käyt-  
täjälle informaatiota tai fyysinen vaste käsiteltävän kappaleen ja tarttujan välisestä koske-  
tuspaineesta.

Jatkotutkimusaiheeksi sopisi myös tarttujan käyttäminen osana käsiproteesia. Tämä vaatisi  
muutoksia tarttujassa käytettäviin materiaaleihin ja rakenteiden vahvistamista päivittäistä  
käyttöä varten. Suurimmaksi haasteeksi nousisi kuitenkin tarttujan moottoreiden sijoittami-  
nen sekä riittävän virtalähteen löytäminen.

## Lähteet

- ABB 2020. IRB 6620. [viitattu 17.3.2020]. Saatavissa: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-6620>
- Cangelosi, A. & Schlesinger, M. 2015. Developmental robotics : from babies to robots . Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Chianura, A. & Giardini M. 2010. An electrooptical muscle contraction sensor. Verkkodokumentti [viitattu 20.4.2018]. Saatavissa: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11517-010-0626-x.pdf>.
- Crawford A., Molitor J., Perez-Gracia A. & Chiu S. 2010. Design of a robotic hand and simple EMG input controller with a biologically-inspired parallel actuation system for prosthetic applications. Verkkodokumentti [viitattu 12.2.2017]. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/277064253\\_Design\\_of\\_a\\_robotic\\_hand\\_and\\_simple\\_EMG\\_input\\_controller\\_with\\_a\\_biologically-inspired\\_parallel\\_actuation\\_system\\_for\\_prosthetic\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/277064253_Design_of_a_robotic_hand_and_simple_EMG_input_controller_with_a_biologically-inspired_parallel_actuation_system_for_prosthetic_applications)
- Hendrich, N. & Bistrya H. & Zhang J.. 2015. Architecture and Software Design for a Service Robot in an Elderly-Care Scenario. Engineering. Verkkodokumentti [viitattu 21.3.2017]. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/281422335\\_Architecture\\_and\\_Software\\_Design\\_for\\_a\\_Service\\_Robot\\_in\\_an\\_Elderly-Care\\_Scenario](https://www.researchgate.net/publication/281422335_Architecture_and_Software_Design_for_a_Service_Robot_in_an_Elderly-Care_Scenario)
- Jeff Green/Rethink Robotics 2020. File:ClickSmart 6.jpg. [viitattu 10.11.2020]. Saatavissa: <https://search.creativecommons.org/photos/c9dacd75-ffb8-4ace-9e6b-c2de135bee4d>
- Kauranen, K. & Nurkka, N. 2010. Biomekaniikkaa liikunnan ja terveydenhuollon ammattilaisille. Helsinki: Liikuntatieteellinen seura.
- Kuivanen, R. 1999. Robotiikka. Helsinki: Talentum Oyj/MetalliTekniikka.
- Lens T., Kunz J., von Stryk O., Trommer O. & Karguth A. 2010. BioRob-Arm: A Quickly Deployable and Intrinsically Safe, Light- Weight Robot Arm for Service Robotics Applications. Verkkodokumentti [viitattu 21.3.2017]. Saatavissa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.172.4521>
- Monkman, G. J. 2007. Robot grippers . Weinheim: Wiley-VCH.
- NXP 2015. PCA9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller. Verkkodokumentti [viitattu 2.2.2018]. Saatavissa: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9685.pdf>



NXP 2017. MPL115A1 Miniature SPI digital barometer, 50 to 115 kPa. Verkkodokumentti [viitattu 8.5.2018]. Saatavissa:<https://www.mouser.fi/datasheet/2/302/MPL115A1-1127172.pdf>

Palastanga, N. et al. 2006. Anatomy and human movement: structure and function . 5th. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Robotiq 2020. 3-Finger Adaptive Robot Gripper. [viitattu 17.3.2020]. Saatavissa: <https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper>

russimages 2020. red-tailed hawk claw avalon mid march. [viitattu 10.11.2020]. Saatavissa: <https://search.creativecommons.org/photos/411df2c4-c3f9-4e78-bd53-4cd571472379>

Shumway-Cook, A. & Woollacott, M. 2012. Motor control: translating research into clinical practice . 4th ed., international ed. Philadelphia, PA: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins.

Vastamäki, M. et al. 2016. Käsikirurgia . 2. uudistettu painos. Helsinki: Kandidaattikustannus Oy.

Xu, Z. & Todorov E.. 2016. Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration. Verkkodokumentti [viitattu 3.3.2017]. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/303885487\\_Design\\_of\\_a\\_highly\\_biomimetic\\_anthropomorphic\\_robotic\\_hand\\_towards\\_artificial\\_limb\\_regeneration](https://www.researchgate.net/publication/303885487_Design_of_a_highly_biomimetic_anthropomorphic_robotic_hand_towards_artificial_limb_regeneration)

Liite 1. Käännös arvostellusta suomenkielisestä opinnäytetyöstä

# **An anthropomorphic dexterous gripper**

LAB University of Applied Sciences

Bachelor of Engineering, Information and Communication Technology

2020

Lari Kallioinen

## Contents

1	Introduction.....	4
1.1	Purpose of the thesis and the research objective.....	4
1.2	Structure of the thesis.....	5
1.3	Research methods.....	5
2	Problem analysis .....	7
2.1	Grippers.....	7
2.2	Operation environments of service and remote robots.....	8
2.3	Properties required of the gripper .....	9
2.4	Prehension mechanisms in nature.....	9
3	Biomechanics of the human hand.....	11
3.1	Skeleton and joints .....	11
3.2	Muscles and tendons.....	12
3.3	Motor control and grip formation .....	15
3.4	Grasp patterns.....	16
3.4.1	Precision grip.....	16
3.4.2	Force grip .....	17
4	Research prototypes.....	19
4.1	Basic parts of the gripper.....	19
4.2	Testing the finger joint structure.....	19
4.3	Using multiple actuators.....	20
5	A functional anthropomorphic dexterous gripper.....	22
5.1	Gripper mechanism .....	22
5.2	Servo motor frame .....	24
5.3	Ligament structures simulants .....	25
5.4	Tendon simulants .....	25
5.5	Gripper control and sensors.....	26
5.5.1	EMG .....	27
5.5.2	IR.....	28
5.5.3	Pressure and temperature sensor.....	28
6	Results .....	30
6.1	Gripper properties.....	30
6.2	Finger and thumb range of motion .....	31

6.2.1	Thumb flexion .....	31
6.2.2	Thumb opposition .....	33
6.2.3	Thumb abduction and adduction.....	33
6.2.4	Finger flexion .....	34
6.2.5	Finger extension .....	36
6.2.6	Finger abduction and adduction.....	37
6.3	Fist positions.....	38
6.4	Prehension .....	39
6.4.1	Precision grips .....	40
6.4.2	Power grips .....	41
6.5	Results .....	41
7	Conclusion.....	43
8	Recommendations for further research.....	45
	References .....	46

## 1 Introduction

Robots have become common outside the factory environment; they can be found in homes and business premises in the form of service robotics. My first experience with service robotics was when I became acquainted with the SoftBank Pepper assistant robot in Japan. The services it could provide were quite limited, and its appearance was very toy-like, but what impressed me the most was the way the robot interacted with humans. The robot's face was cheerful, and the head movements combined with hand gestures made the customer service very life-like. It almost felt rude to leave in the middle of its friendly product presentation. Service robots, like Pepper, are also being designed to be used in hospitals and nursing homes for distributing information and guiding patients within the facility. The goal is to eventually use service robots for demanding tasks such as assisting in dressing, moving goods, and assisting with meals. However, for these types of tasks, a sufficiently agile gripper is required.

### 1.1 Purpose of the thesis and the research objective

The purpose of this thesis is to determine what kind of gripper would best suit service and remote robotics and to find a more dexterous alternative for the universal gripper. Robotic grippers have been developed mainly for industrial robotics, where the same task is repeated several times for objects of the same size and shape. These grippers are rarely suitable for service robotics where objects are often irregular in shape and have various weights. The most used gripper in service and remote robotics is the two-finger gripper that grasps objects with a pincer movement. The grasp patterns it can produce are limited, and it can be too clumsy for specific precision tasks. Alternatives for the two-fingered gripper have been presented, where a sufficiently versatile and secure grip is produced using suction or an unconventional grasp shape.

I compared several different types of grippers, and the most promising devices were based on imitating the structures and the movements of the human hand. This solution seemed sensible because man-made environments and objects can best be manipulated using a human hand. Thus, the research objective was to determine what biomechanical features of the human hand can be used in a mechanical gripper and to build a prototype.

Specific restrictions and performance targets were set for the prototype. The gripper must be designed to be suitable for a service robot that works in an environment together with humans. For safety, the weight and size of the gripper should roughly correspond with the weight of the human arm, about 2000 grams, and length, about 50 centimetres.

However, the most critical aspect of the gripper was its performance. In addition to a human hand-like range of motion, the gripper must be able to grasp a variety of lightweight objects to form precision and power grips. Minimum weight handling capacities were set for different grip types. The gripper must be able to create a firm grip on an object which weighs two kilos while using a power grip. For precision grips, the minimum load capacity was set significantly lower; the target weight for agility requiring tasks was set at 10 grams. An additional goal was to make the gripper intuitive to use; the operator should be able to grasp objects of different shapes using their pre-existing experience, and the gripper should use the same grasp techniques used by a human hand.

## 1.2 Structure of the thesis

The theoretical section of the thesis begins with an analysis of the problem: it defines what a gripper is and what features are required for a gripper suitable for service and remote robotics. The next section views the biomechanical structures of the human hand, grasping and the theory of forming a grip. The prototype section presents the different methods that were used during the manufacturing of the gripper prototypes. The next step describes the construction of the final gripper and the solutions used in the manufacturing of its different structures. The results section evaluates the performance of the final gripper, the performance is assessed by comparing its range of motion and agility with a human hand. The conclusions section reviews the previously set objectives, success in their implementation and considers how well the gripper would function in its intended use.

The topics of this thesis are the designing of a human hand-like gripper and the production of a prototype. The background research of the thesis is limited to the biomechanical functions of the human fingers and hand, mechanical grippers, and their requirements for use in service and remote robotics.

## 1.3 Research methods

The purpose of this thesis is to develop a solution for a practical problem; in this case, to manufacture a gripper which will have its ability measured and evaluated. Secondary data for this thesis was gathered as a literature search; it was applied during the manufacturing of the prototypes and the final gripper. Primary data was collected by experimenting with materials and components and measuring the range of motion and grip formation abilities of the final gripper.

The literature used for this thesis consists of printed and electronic sources. Several secondary data sources influenced the solutions used in this work, e.g. the prototype production

was influenced by the research of Crawford, Molitor, Perez-Gracia and Chiu from 2010, and the manufacturing of the joints was influenced by Xun's and Todorov's study from 2016. The theory section on grippers and service robotics used several sources, of which the most important was Kuivanen's *Robotiikka* from 1999. The literature on the biomechanics of the human hand, range of motion, grasp patterns and grip formation had two primary sources: Vastamäki's, Göransson's, Havulinna's, Kotkansalo's, Nietosvaara's, Ryhänen's and Vilki's *Käsikirurgia* from 2016 and Palastanga's, Field's and Soames' *Anatomy and Human Movement* from 2006. The electronic components and materials used in the prototypes and the final gripper had their information sourced from the manufacturer's datasheets.

## 2 Problem analysis

### 2.1 Grippers

The gripper is one of the most common tools in industrial and service robotics. Its task is to move objects from one place to another in its work environment. Different grippers have been developed for industrial robots (figure 1), but they are rarely suitable for use in remote and service robotics where their tasks are in a human environment. These spaces are often shared with humans, and the work may require collaboration or direct contact between humans and a robot (Kuivanen 1999, 140-141). In manufacturing, the robot performs a pre-defined series of movements or follows movement patterns created with the help of knowledge of the operating environment and sensors with high accuracy and speed

The term service robotics is often used for robots that work outside an industrial environment. The term is often defined as robotics that provides services to humans fully or partially automated. In service robotics, it is common for tasks to require interaction between a human user and a robot, and that the tasks are performed in the same work environment. (Kuivanen 1999, 140-141.)

Remote and service robots equipped with grippers often perform complex and non-routine tasks, e.g., grasping objects with varying sizes and shapes, moving, and manipulating items, opening doors, pressing switches.

Other tools involved in industrial processes are, e.g., welding guns, paint sprayer and milling drill bits. The gripper's design is based on the intended workpiece, work environment, and the task performed by the robot. The designed gripper must also always function reliably and safely on the production line. (Kuivanen 1999, 76-77.)

The most common gripper in robotics is a mechanical, force closure, two-finger gripper. A force closure gripper will apply an adequate holding force on an object with its jaws from two or more points of contact. The holding force is strong enough to maintain a grip until release, but will not damage the object. The gripper can also combine multiple methods of prehension to achieve an adequate grip. For example, combining force closure with shape matching gripping allows the gripper to use the object's contours, grooves, and protrusions to achieve a better grip. The grip can be further improved by adding material, such as friction linings, on prehension points and utilising vacuum or magnetic prehension. (Kuivanen 1999, 67-69.)

The prehension method of the gripper is designed according to the workpiece. If the size, shape, or surface material of the workpiece varies often, other options must be considered



to allow for a broader range of handling capacities, such as a gripper changing system or versatile gripper. However, every tool must be designed separately for a task and the robot performing it. Robots are clumsy, inaccurate, and rarely dexterous enough when the task requires handling of a broad selection of objects. (Kuivanen 1999, 70-77.)



FIGURE1. ABB articulated production robot IRB 6620 and Robotiq 3-finger universal gripper (ABB 2020; Robotiq 2020)

## 2.2 Operation environments of service and remote robots

Service and remote robots operate in structured environments created by humans. These include home interiors, offices, industrial complexes, and city environments. Building floors and roads are flat, doorways are standardised, and work environments are protected from weather conditions. (Kuivanen 1999, 140-141.)

Robots can be placed in different categories according to their structured work environment:

- Robots used outdoors can assist with tasks at building sites or be used as guides in towns.
- Robots used indoors can perform tasks in production facilities or transfer items in office premises.
- Robots used in a residential apartment can take on a variety of roles in a role as a service robot in assisted living apartments or by performing only a specific task, e.g., floor cleaning.

(Kuivanen 1999, 140–141.)

Unstructured environments include atypical work areas that are difficult to traverse in. These also include forests, earthquake disaster zones, underwater environments, and space. Remote robots have been developed for these conditions, assisting in specialised hazardous work, or replacing a human in a dangerous environment. (Kuivanen 1999, 140–159.)

### 2.3 Properties required of the gripper

The universal grippers used by service and remote robotics must be able to grasp a wide range of different objects. Service robots working in assisted living apartments and hospitals might be required to gently grasp soft objects and use a precision grip, for example, to lift clothes off the floor. In addition to precision demanding tasks, it is expected that the robot must lift and transfer bulky items. (Hendrich, Bistry & Zhang 2015)

To work with humans, the service robot needs to be able to follow the user and operate safely. An indoor operation environment places certain limitations on the size of the robot: it must fit through a door, and the gripper must reach household items set at varying heights. To lift heavy objects, the robot must possess a sufficient weight, and the centre of gravity must be set low. However, the weight and size of the robot may pose a significant risk to human safety.

Special attention must be paid to the design of robots operating in a structured environment, human proximity in the robot's work environment needs to be considered when designing with human safety in mind.

In production robotics, the two main principles of safety design are removal of humans in the robot's work area and the use of safety devices. In service and remote robotics, the focus is on minimising collision forces and designing structures that are flexible or stop immediately when a collision occurs.

When designing a gripper, safety can be increased by using lighter materials and by calculating the speed of movement of the arm connected to the gripper. Hard parts of external structures can be replaced with softer materials, and cushioning can be added. Collision detection sensors can stop the movement of the robot, and flexible joint structures in the gripper and the robot's arm can minimise injuries during a collision. (Lens, Kunz & von Stryk 2016)

### 2.4 Prehension mechanisms in nature

Different prehension mechanisms can be found in nature; some have developed to be suitable for moving on the surfaces of certain materials or hunting a particular prey. Imitations

of these biomechanical grippers and the same grasping methods can be identified in many industrial robots.

Osprey toes are an example of a complex mechanism which has an equivalent gripper in industrial robotics. The toes and claws latch on to the prey, forming a force closure grip around it. The soft pads on the feet act like suction cups that are particularly effective for grabbing on to the slippery surfaces of a fish. Many naturally occurring prehension mechanisms have given inspiration for equipment used in industry, from simple scissor-like clamps to complex soft grippers resembling an elephant's trunk (figure 2). (Monkman, Hesse, Steinmann & Schunk 2007, 10–11.)

In industrial robotics, grippers are usually designed to perform a single set of precise movements. The gripper is only able to perform a single task but is often faster and more efficient than a human performing the same task. Grippers for service and remote robotics may have to deal with several different shapes and types of objects. A multi-fingered gripper which can mimic the versatile grips of a human hand would be more suitable for this type of task, these types of grippers are often referred as "agile grippers" (Monkman, Hesse, Steinmann & Schunk 2007, 268–269).

Several of the objects in households and structured environments are designed to be suitable for the human hand, a shape that imitates the human palm and fingers would be excellent for gripping and manipulating these items.

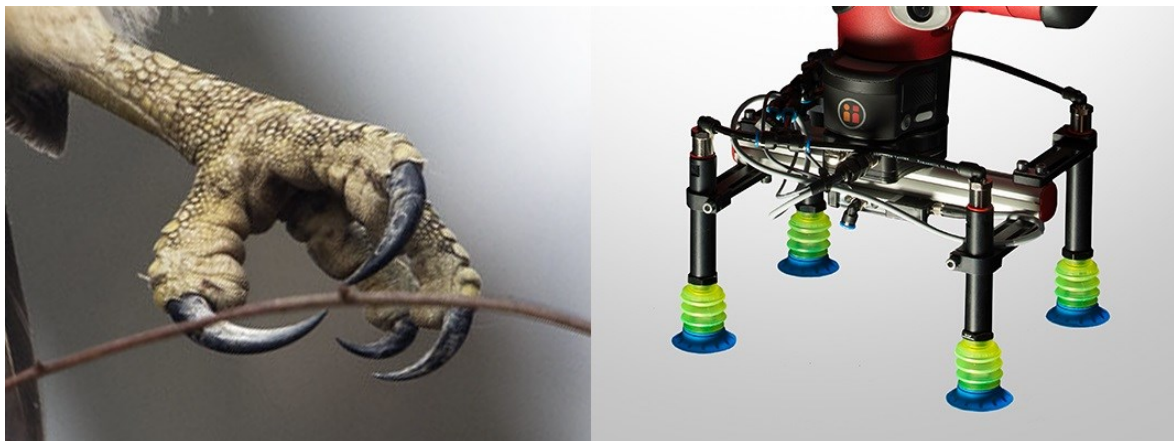


FIGURE2. Comparison between naturally occurring and manufactured grippers (russimages 2020; Jeff Green/Rethink Robotics 2020)

### 3 Biomechanics of the human hand

The human hand is a versatile tool with excellent mobility and the ability to perform a variety of powerful and precise movements. The hand is anatomically complex, and it has a multitude of small biomechanical structures that are packed tightly together. The bones, ligaments and joints of the upper extremity form a framework for the muscles and other soft tissues to connect to. The musculature regulated by the nervous system allows movement and stabilisation; this is achieved by contracting or relaxing agonistic and antagonistic muscles. (Vastamäki, Göransson, Havulinna, Kotkansalo, Nietosvaara, Ryhänen & Vilkki 2016, 23.)

#### 3.1 Skeleton and joints

The index, middle, ring, and little finger have three finger bones: distal phalanx, middle phalanx, and proximal phalanx. There are only two finger bones in the thumb (figure 3), a distal phalanx and a proximal phalanx.

The first carpometacarpal joint, i.e., CMC1 joint, has a wide range of motion due to its saddle-like structure and loose joint capsule. The joint is capable of large extension, flexion, abduction, and adduction movements. The thumb is stabilised in the desired position with ligaments and muscles. The second, third, fourth and fifth carpometacarpal joints, i.e., CMC2-5, are connected to the carpus and each other tightly at the base by collateral ligaments. (Vastamäki et al. 2016, 29.)

The structure of metacarpophalangeal joint, i.e., MP joint, is spherical. The joint moves in extension and flexion but is also capable of a small lateral movement when the fingers are adducted and abducted. During full flexion of the fingers, MP2-5 are stable. The MP1 joint has a slightly smaller range of motion, but it is capable of a small rotation. (Vastamäki et al. 2016, 29–31.)

The proximal interphalangeal joint, i.e., PIP joint, is a hinge joint and gains stability from its articular surfaces and ligament structures. The joint surface is broad and has two facets separated by a median ridge. Lateral movement and hyperextension of the joint are prevented by collateral ligaments attached to the sides and a palmar ligament attached to the palmar section of the joint. (Vastamäki et al. 2016, 31.)

The distal interphalangeal joint, i.e., DIP joint, is similar to the PIP joint in shape and function. The joint capsule and ligaments also share a similar structure with the PIP joint. (Vastamäki et al. 2016, 31.)

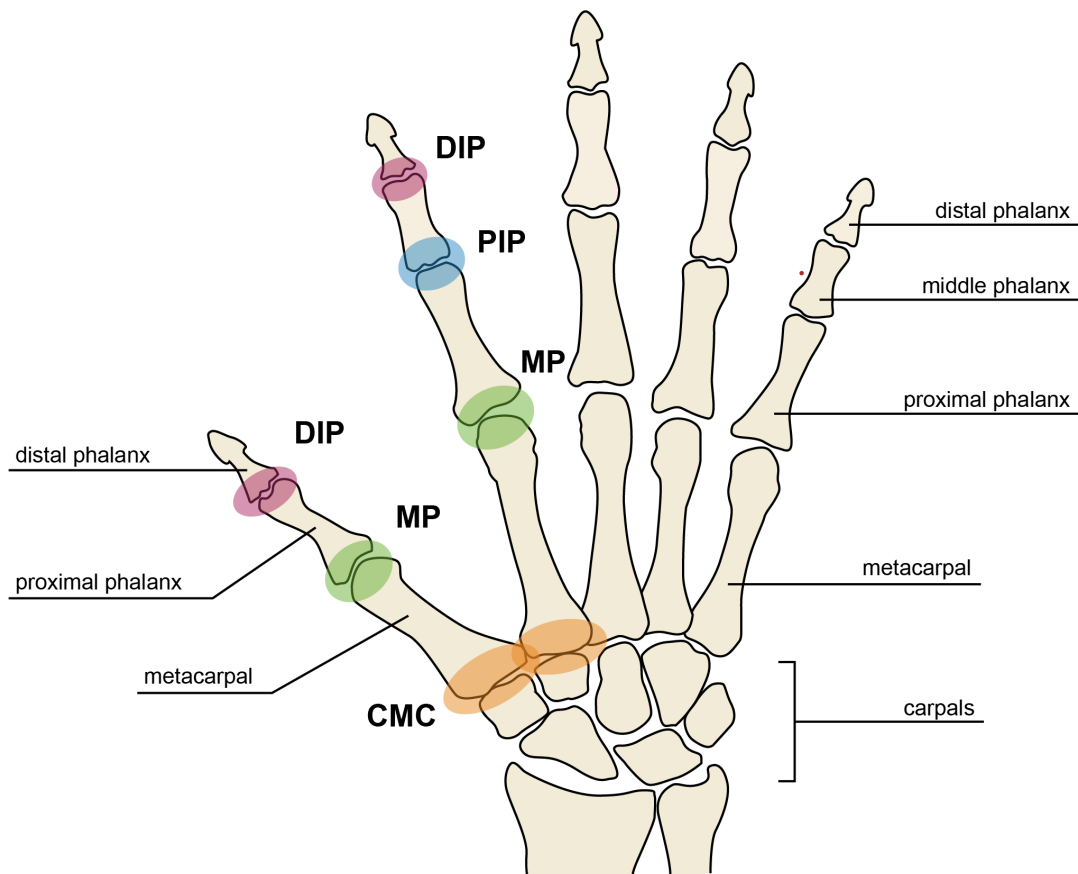


FIGURE3. Skeleton and joints

### 3.2 Muscles and tendons

The muscles that control hand movements are divided into two categories, extrinsic and intrinsic muscles. The extrinsic muscles are in the arm and the intrinsic muscles in the palm area (figure 4).

The extrinsic flexor muscles of the fingers are:

- The thumb flexor, flexor pollicis longus (FPL).
- The index finger (II) and middle finger (III), ring finger (IV) and little finger (V) flexors,
- flexor digitorum profundus (FDP) and flexor digitorum superficialis (FDS).

The extrinsic finger extensors are:

- The thumb extensors, extensor pollicis brevis (EPB) and extensor pollicis longus (EPL).
- The II-V finger extensors, extensor digitorum communis (EDC).

- The thumb's abductor pollicis longus (APL).

Other intrinsic muscles that control movements of the thumb are:

- Flexor pollicis brevis (FPB).
- Abductor pollicis brevis (APB),
- Opponent pollicis (OP)
- Adductor pollicis (AP).

(Vastamäki et al. 2016, 32–43.)

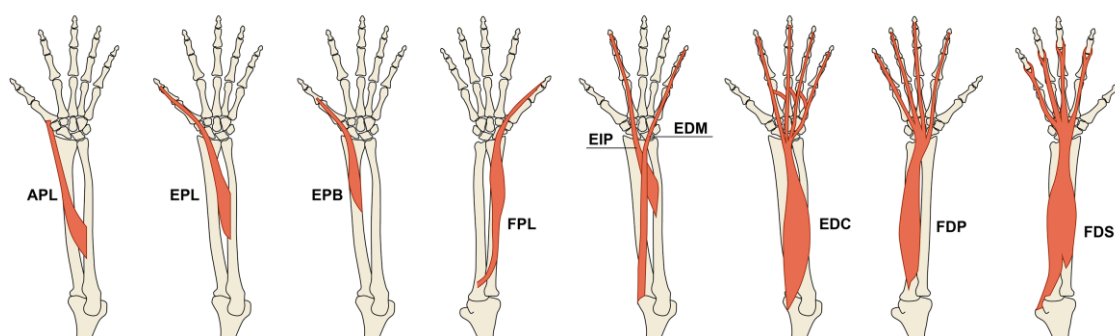


FIGURE4. Muscle group

The carpal and digital tendon sheath form a membrane that reduces friction between the tendon and the surrounding tissues. Parts of the digital tendon sheath are reinforced, and it forms a flexor pulley system. Its role is to constrain and hold down the flexor tendons, and thus, preventing them from bowstringing. The tendon sheaths and the pulley system provide torque and mechanical effectiveness during flexion. (Vastamäki et al. 2016, 477–479.)

The index, middle, ring, and little finger have two flexors, the flexor digitorum superficialis (FDS) and the flexor digitorum profundus (FDP). The FDP tendon attaches to the base of the index phalanx and affects the flexion of the DIP, PIP and MP joints. The FDS tendon attaches to the middle phalanx and affects the flexion of the PIP joint. The FDS tendon splits open at the base of the proximal phalanx, and the FDP passes through the opening. This split of the tendon structure is called the Camper's chiasm, i.e., chiasma tendinum (figure 5). (Vastamäki et al. 2016, 477–479.)

The extensors tendons of the index, middle, ring, and little finger, together with different muscle groups, form an extensor apparatus. The extensor tendons, together with oblique and transverse fibres, form an extensor hood (figure 6). The extensor hood is attached to the middle phalanx by the medial extensor tendon, the two lateral bands rejoin and connect

to the distal phalanx. Intrinsic muscles are involved in the extension of the PIP and DIP joints and the flexion of the MP joint, and the extrinsic muscles extend to the MP joint. Both extrinsic and intrinsic muscles are needed for the full extension of the fingers. (Vastamäki et al. 2016, 494–497.)

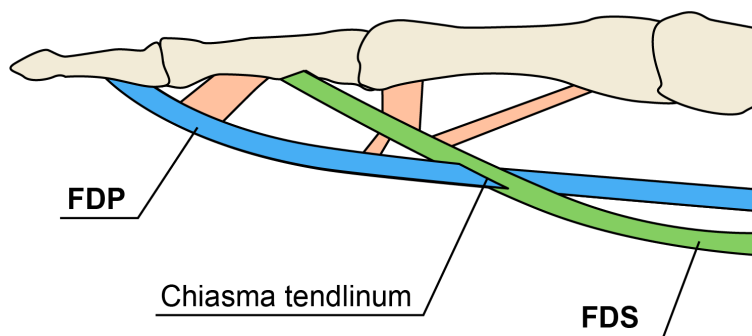


FIGURE5. Flexor tendons

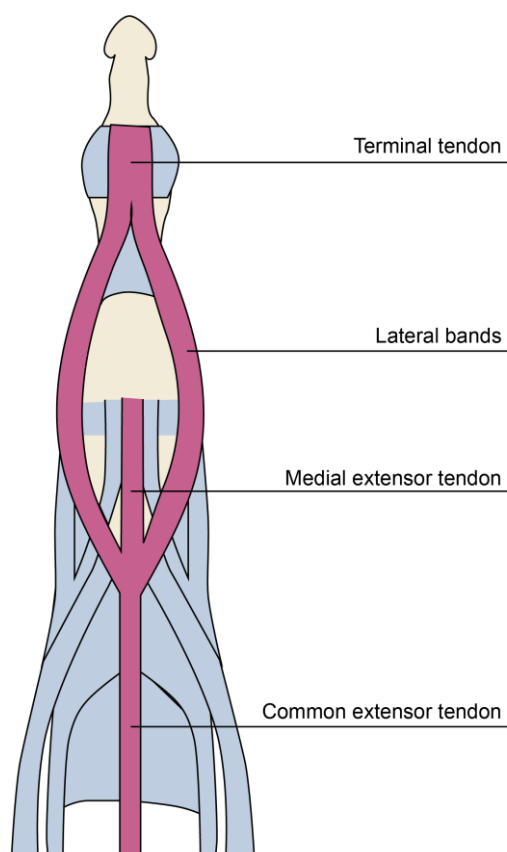


FIGURE6. Extensor apparatus

### 3.3 Motor control and grip formation

There are many theories on motor control and learning, and many of these have influenced each other to various degrees. According to the systems theory, upper limb movements, such as reach, grasp and manipulation, are affected by the neural and musculoskeletal subsystems. The neural components include the sensory processes, the motor processes that are responsible for the movements and coordination of the upper limb, and the higher-level adaptive and anticipatory processes of the manipulatory functions. The musculoskeletal components that affect upper limb movements include the range of motion of limbs, muscle properties and the biomechanical relationships of the linked body segments. (Shumway-Cook & Woollacott 1995, 477–478.)

A person can use a force grip, a precision grip, or a combination of these grips to form a grip on an object, and two requirements need to be met for a successful grasp. During the reaching phase, the hand must form a suitable pregrasp shape before the initial prehension. The object's shape, size, surface quality and intended use determine the pregrasp and the final grip. The second requirement is the exact timing of the prehension during movement - closing the fingers around the object too early or too late will create an inappropriate grasp. (Shumway-Cook & Woollacott 1995, 490–492.)

The human neural subsystem can adapt the grip according to the characteristics of the object and even readjust the grip during movement. Prehension and object lifting have been found to have specific stages, which are affected by the sensory receptors of the hand. In the first stage, a contract is formed between the fingers and the object that is being gripped. In the second stage, the grip force exerted on the object and the load force on the fingers increases. In the third stage, the load force has grown enough to lift the object. In the fourth step, the object is lowered onto a surface, and the grip force is reduced. Dividing the prehension and lifting task into different stages has its advantages - the grip can be used on objects of varying weights since the movement of the object only takes place when a sufficient load force is achieved. Also, progression to the next step always requires information processing through the sensory system. The central nervous system is believed to use previous experience and afferent information to form a solid grip. Also, it is hypothesised that the cerebellum plays an essential role in regulating the predictive grip force. (Shumway-Cook & Woollacott 1995, 481–487.)

Human children learn to reach and grasp at an early stage, and the development of these skills can be reliably predicted. The most significant development takes place during the first two years of the infant's life. The power grip is learned during the first few months, and the key grip that utilises the thumb is learned at nine months. The first precision grips appear



after ten months, and at twelve months, the child can form all basic grasp patterns. (Cangelosi, Schlesinger 2015, 149–173.)

### 3.4 Grasp patterns

Flexion of the index, middle, ring, and little finger is enabled by the flexor digitorum superficialis (FDS) and flexor digitorum profundus (FDP). Extension of these fingers requires collaboration between the two muscle groups: the extrinsic extensors of the hand and the small muscles of the palm, which moves the extensor apparatus. The flexion movement begins from the metacarpophalangeal joint, and the extrinsic extensors and FDP control the movement. A half-fist is formed by using the FDS and the small muscles of the palm (figure 7). (Vastamäki et al. 2016, 477–479.)

The way a human hand grips an object depends on the size, weight and type of movement that will be performed. The grips can be divided into two types, the precision grips and power grips.

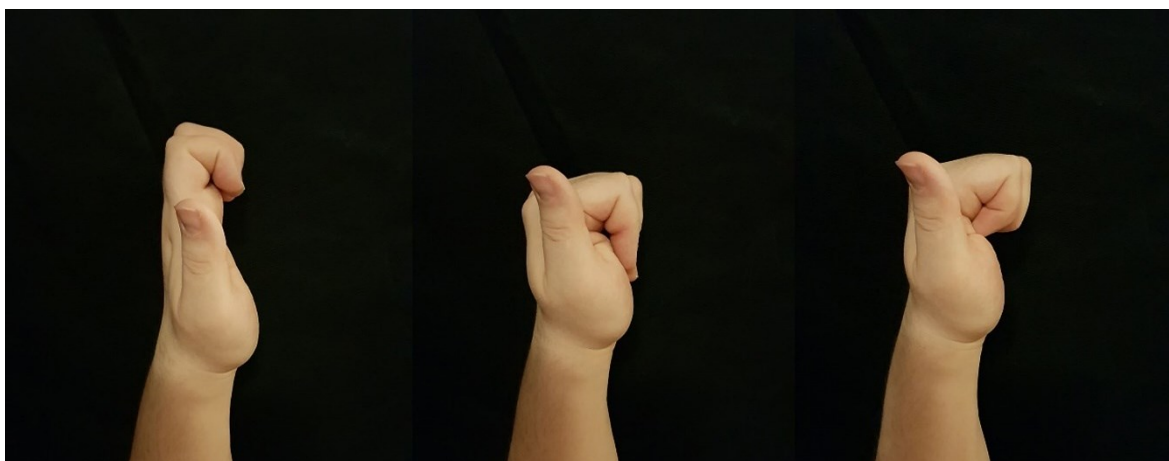


FIGURE7. Fist positions: the hook, the straight fist and the full fist

#### 3.4.1 Precision grip

Precision grip is usually used when gripping light objects and when the performed task requires precise eye-hand coordination. The grip is mostly performed by moving the thumb's CMC joint and the MC joints of the other fingers. Precision grips can be further divided into different types depending on the movements of the fingers used in the grip.

The pincer grip consists of a thumb's opposition movement towards the tips of the other fingers; it is a complex movement that is suitable for picking delicate and small objects. In a pincer grip movement, the thumb simultaneously abducts, flexes, rotates, and adducts. The opposing finger will abduct and flex, thus causing an active rotation at the CMC joint.

The simultaneous movement of both fingers end with tips of the pads, or just the edges of the nails, turned against each other and provide a precision grip. In the pen grip, the thumb will extend and rotate toward the other fingers. The palmar surfaces of the phalanges are pressed against the opposing sides of the object and create a firm grip. In the key grip, the thumb extends and rotates against an opposing finger, and the thumb's palmar pad presses against the side of the opposing finger's PIP joint. This grip is less accurate, but it is strong and can be used to replace the pincer and pen grips after losing the index finger. (figure 8). (Palastanga, Field & Soames 2006, 208–214.)

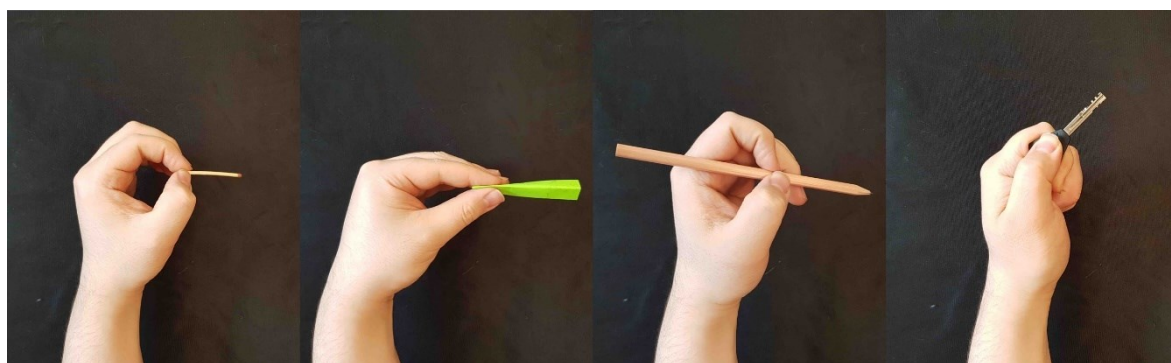


FIGURE8. Precision grip with fingertips, pincer grip, pen grip ja key grip

### 3.4.2 Force grip

During a power grip, the hand extensors and flexors will create together a firm hold on an object, simultaneously stabilising the wrist in a locked position (figure 9). During a palmar grip, all the fingers will wrap around the object and secure it against the palm, and the thumb will be pressed towards the index finger from the opposite direction and further reinforce the grip. In a hook grip, the MP joints of the index, middle, ring, and little finger are in extension and remain stabilised. The PIP and DIP joints are in flexion and press the object against the palm. The hook grip can also utilise the thumb for grip reinforcement, but the additional strength is significantly weaker when compared with the palmar grip. (Palastanga, Field & Soames 2006, 208–214.)

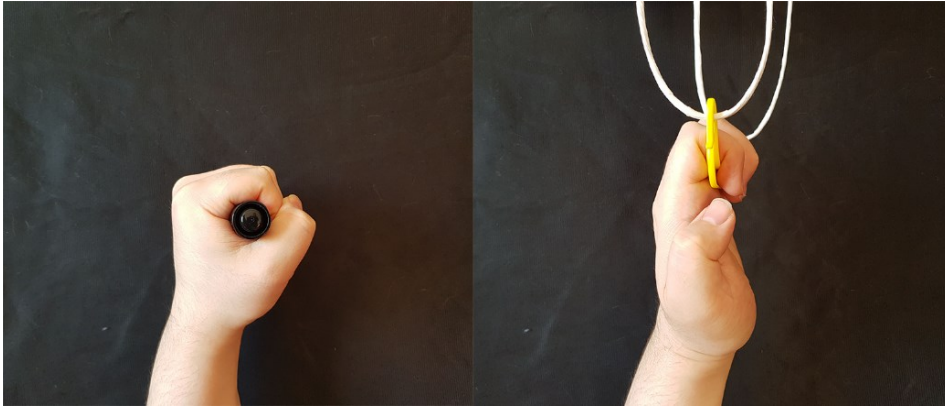


FIGURE9. The palmar grip and the hook grip

## **4 Research prototypes**

### **4.1 Basic parts of the gripper**

The research began by first defining the essential components of a gripper operating robot and creating a simplified mechanical gripper. The essential components are the control system, the actuator, the transmission, the frame, and the gripper. The simplified gripper consisted of jaws that were driven by spur gears; these parts acted as the gripper's transmission and frame. The gripper's actuator was a servo motor which was controlled by a programmable microcontroller and a potentiometer.

The purpose of this overly simplified gripper was to create a base on which to build the next steps of the experiment. Its secondary purpose was to work as a visualisation aid and help in dividing the different systems during the manufacturing of the next prototype grippers.

### **4.2 Testing the finger joint structure**

In the next prototype, the jaws of the simple gripper were replaced with fingers that mimicked the flexion and extension biomechanics of a human phalange by using simulated tendons. This model proved to be unsatisfactory because the movement and range of motion of the mechanical fingers did not match the smooth performance of human fingers. Most issues were caused by the heavy finger segments and joint stiffness and moving these parts would have required a much stronger actuator. Also, the sizes and lengths of the different finger segments were not correctly proportioned for the simulated tendons that acted as the force transmission. As a result, the force was distributed unevenly between the joints, and the resulting motion was erratic (figure 10).

This prototype demonstrated that the initial approach was flawed - the form of the gripper mechanism only resembled human fingers and lacked the biomechanical structures that made the smooth movement possible.

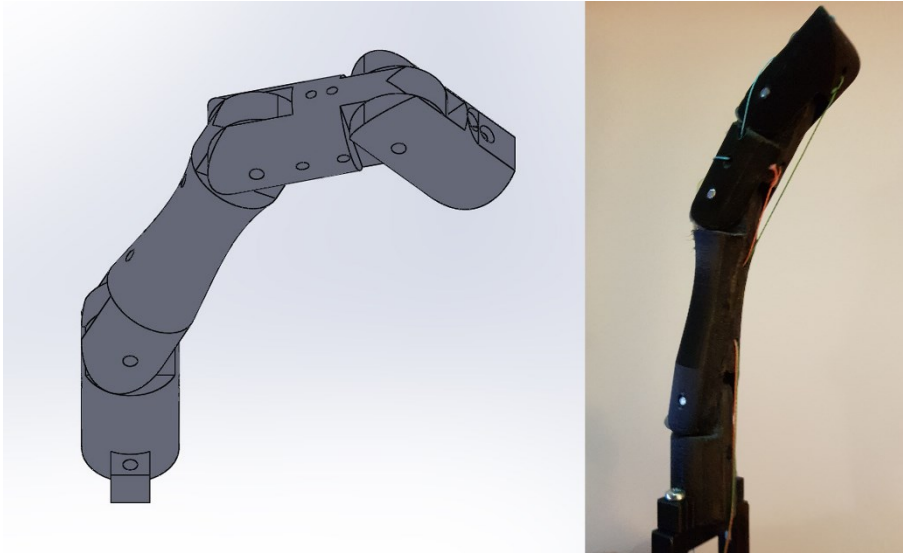


FIGURE10. A finger prototype of an agile gripper

#### 4.3 Using multiple actuators

The objective of the next prototype was to investigate the performance of a motor controller with a five-finger gripper; in this gripper prototype, the fingers and thumb were correctly proportioned to mimic the relative distance between joints in a human hand. The gripper's ten servo motors were controlled by a microcontroller that ran a pre-programmed set of movements; the servo motors could also be controlled in real-time by a separate device. In this prototype, more focus was placed on the gripper's palm structure and individual fingers. Based on the findings of the previous experiment, the fingers were constructed of lighter materials and the bending points the finger joints were precisely measured to match the proportions of a human hand. This prototype gripper featured simulated tendon sheaths that improved the mechanical performance; the core of the fingers was constructed of stiff plastic filaments that were thinner at the bending points.

The control system performed well, and no significant delay was noticed during the real-time control of multiple servo motors. Issues that require further development were related to the gripper's structure:

- During flexion, the finger would exhibit lateral movement and often enter hyperflexion. Without a strong ligament structure, the thin plastic filament is prone to rotation and hyperextension at the finger joints. The finger movements were inaccurate, and the gripper was unable to form a precision grip.
- Forces created by the servo motors would often exceed the structural strength of the servo chassis and the finger joints. Activating all ten motors would cause failures

in the gripper's motor frame and weaker structures in the fingers would rupture. Also, the plastic filament used for the finger core proved to be too brittle for repeated use.

These findings led to the following conclusions:

- Human fingers have articular surfaces that allow the joint to move smoothly; the two facets and median ridge bring stability during flexion and extension. The ligament structures are a crucial part of the joint movement and prevent the finger from bending too far.
- The tendon sheath and pulleys allow the finger a full range of motion and provide mechanical effectiveness during flexion. The tendons of the hand are flat and smooth; this helps the tendons to glide inside the tendon sheaths without friction.
- Designing structures and choosing materials that imitate the different tissues of the human hand would help create a gripper that attempts to mimic its natural counterpart. Parts produced for the gripper must also be as durable and strong as the tissues it copies.

## 5 A functional anthropomorphic dexterous gripper

The objective is to mimic the grasp patterns, as well as the extension and flexion motions of the human hand; the gripper will imitate the structure and biomechanics of a natural hand to achieve this.

This functional gripper was the most demanding part of the thesis and a considerable amount of time was spent in its construction. The gripper was designed by using data gathered for the theoretical section of the thesis and by analysing the performance of the previous prototypes presented in the thesis. The gripper's force transmitting components and nearly all the mechanical structures mimic the biomechanics of the fingers and palm.

I modelled the gripper's parts in SolidWorks and Zbrush 3D. For their production, I used various 3D-printers, of which I used Formlabs Form 2 the most. The production of prototypes and careful testing of various mechanical structures were necessary; many materials used in the first prototypes were also replaced for more suitable alternatives when production on the final gripper began. I had to test the characteristics of different materials, and many of these had to be replaced for more suitable alternatives as the work progressed. One of the challenges was finding for each part the right balance between flexibility, rigidity, and durability.

### 5.1 Gripper mechanism

I modelled all the bone simulating parts individually - the thumb, index, middle, ring, and little finger are all different, and there are small differences in their movements. To imitate the smooth movement of a human hand, I had to copy the individual structure of each finger. The joint surface is wide and has two facets separated by a median ridge. Lateral movement and hyperextension of the joint are prevented by collateral ligaments attached to the sides and a palmar ligament attached to the palmar section of the joint. The finger joints especially required attention; the convex shape of the DIP and PIP joints is essential for the smooth bending motion, and it prevents the joint from moving laterally. For designing the convex structure and the central ridge, I acquired real joints and used them as reference. I made several iterations of these joints, and I selected the best performing version for the final gripper.

The MP joints require a high range of mobility - it moves in flexion and extension, but it also requires a small lateral movement. Modelling the MP joint was more straightforward due to its spherical structure, and the first produced prototype joint proved to be a success. The most challenging was the saddle-like CMC joint of the thumb, which is capable of broad

extension, flexion, adduction, and abduction. The simplest way to approach the problem would have been to model the joint and bone structure to be identical with a human hand, but then attaching the ligament structure simulants would have been difficult due to the lack of space. I approached the problem by first building part of the saddle-like structure and the articulated capsule - using this unfinished joint, I was able to map out the missing range of motion and then modelling a replacement joint. The finished CMC joint was completed by going through each different motion and creating new joint iterations (figure 11).

The carpal structure is the only part of the gripper mechanism that has not been modelled as accurately as possible. The gripper's carpals are intended to act as a supportive platform for the joints and fingers and fix the gripper mechanism to the servo motor frame. The combined bones still possess their characteristic convex shape, and they match the proportions of the human hand.

The bone simulants are modelled to have a honeycomb matrix; its purpose is to mimic the porous interior of human bone, and it makes the parts lighter without weakening bone endurance. I avoided printing the bone simulants as solid pieces because I used heavy resin as the printing material. I tried several different printing materials, and I found many to be too tough to work on or too weak to withstand the pressure produced by the gripping force. The bone simulants are printed with the FormLabs Tough 1500 resin, that can be machined and has good flexural strength.

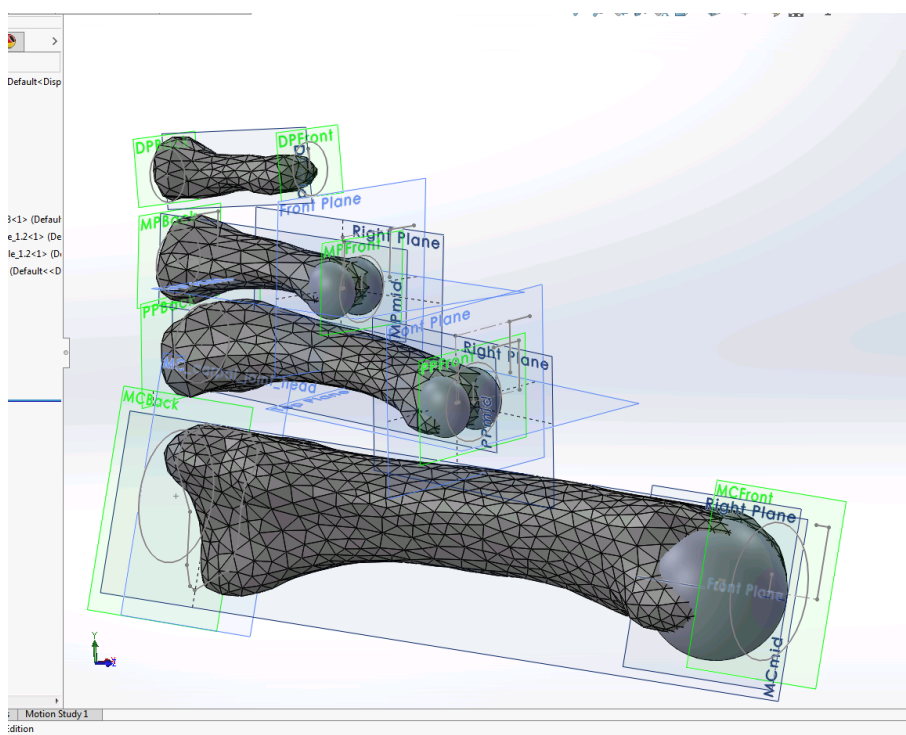


FIGURE11. Illustration of the modelling phase of the DIP, PIP and MP joints



## 5.2 Servo motor frame

A custom frame had to be made for the gripper actuators, i.e., servo motors, which needs to withstand the simultaneous torque produced by sixteen servo motors. During tests on the gripper prototypes, the servo motors had become detached from the frame mountings, or in the worst case, the entire servo frame had split open and was damaged irreparably if all servo motors were activated. Also, the gripper had an overall weight limit - in the original frame design, the frame material would have been aluminium, which now had to be replaced with a lighter material.

For the motor frame, I developed a layered structure that would compress the layers and servo motors tighter together as more servos are activated. Two aluminium support rods run through the layers, and this allows the frame pieces to move a few millimetres vertically. The motors are placed in the frame according to which extensor or flexor group the muscles belong to, this helps to position the tendon simulants and the attached cables. The frame does not use attachment brackets when installing motors - the layers have shaped grooves into which the motor is slid. The shaped groove makes moving, calibrating, and replacing the motors very quick.

I also assembled a protective shell for the motor frame - its shape resembles a human arm, and its function is to protect the servo motors and transmission cables when the gripper is in operation. The servo frame and the protective shell are made of ABS plastic; I chose this material over the resin that was used for the bone simulants, due to its low weight, flexibility, and softness (figure 12).

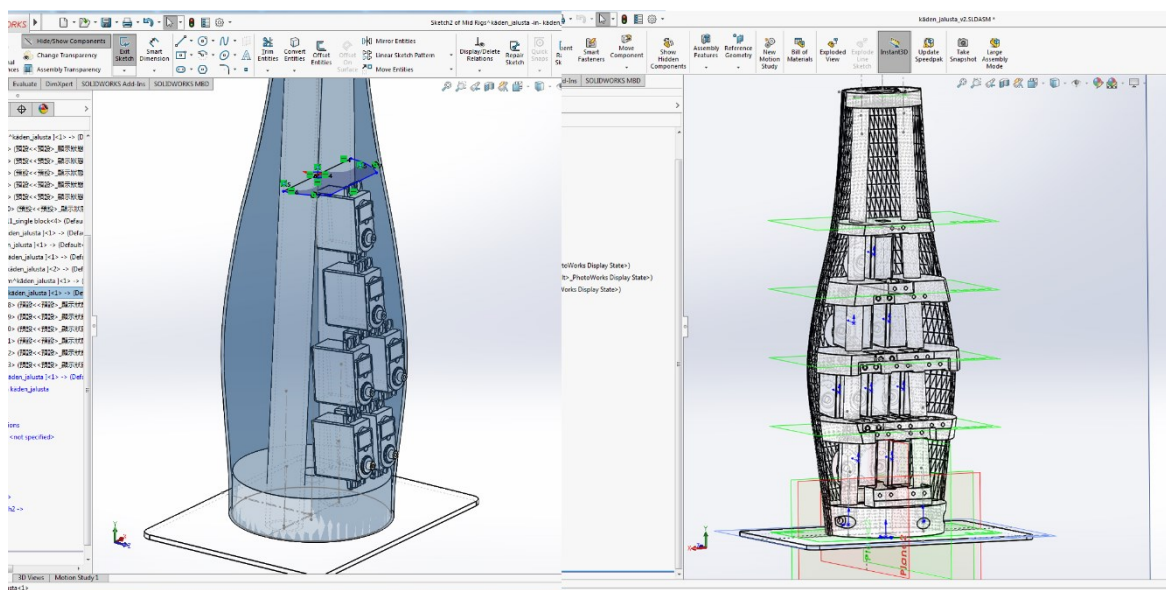


FIGURE12. Servo motor frame

### 5.3 Ligament structures simulants

Developing ligament simulants for fingers and thumb was extremely challenging - there were several different options for making the tissue surrounding the joint; the two most promising methods were creating an articular capsule or using a harness. I ended up making ligament simulants by designing flexible harnesses around the joints. The open structure of the harness was more complex to manufacture, but it was easier to modify and fine-tune later as needed.

Finding a suitable material was difficult, it had to be durable, elastic, and it had to have good machining properties. The first versions of the harnesses were made by drawing a 2D model and cutting out the harness-shaped latex pieces with a laser cutter. I soon found out that latex was too soft for this purpose and attaching the harness around the joints was inconvenient. Using a thick material with a uniform thickness had its issues - the harness needed to be flexible at a certain point of a joint and much stiffer at another.

I found suitable 3D printable materials that allowed for creating more-complex structures - I was then able to print an entire harness as a single piece, and the piece could be designed to have varying thicknesses. Because of the three-dimensional structure, the printed ligament structure was able to bend or prevent hyperflexion at desired points. Each joint in every finger was designed with a unique harness, and several sections went through modifications as the work progressed.

The harness stays in place with the help of a sturdy mounting ring, and the collateral ligaments surrounding the joint produce the right degrees of motion for the fingers. The functionality of the harness had to be first tested by installing it and measuring the degrees of flexion; the range of motion could be controlled by editing the thickness of specific segments and by adding structures that prevents hyperflexion.

### 5.4 Tendon simulants

With the tendon simulants, the problems were very similar to with the ligament structures. The structures of the tendons underwent several changes before reaching its final shape, and finding a suitable material was a challenge. In the first versions, the tendon consisted of wire or soft latex; this made the finger movements irregular and caused joint instability. I chose to use the same 3D printable material for the tendons and the ligament simulants.

With three-dimensional models I was able to imitate the structure of the tendons better - the tendons are printed longitudinally into several layers, with intersecting stripes printed across

them. The purpose of the printing method is to increase the durability and elasticity of the longitudinal strands.

The FDP tendon passes through the FDS tendon's opening - this split, i.e., chiasma tendinum, helps to perform specific grasps. I designed a similar opening for the gripper's flexor tendon to increase the number of possible grasp patterns. Pinpointing the correct location for the chiasma required several attempts, as even an inaccuracy of a few millimetres could affect the flexion movement. Extensor tendons and membranes of the finger form an extensor apparatus - I implemented this structure to achieve a complete finger extension (figure 13), this part also required several changes before the right range of motion was achieved.

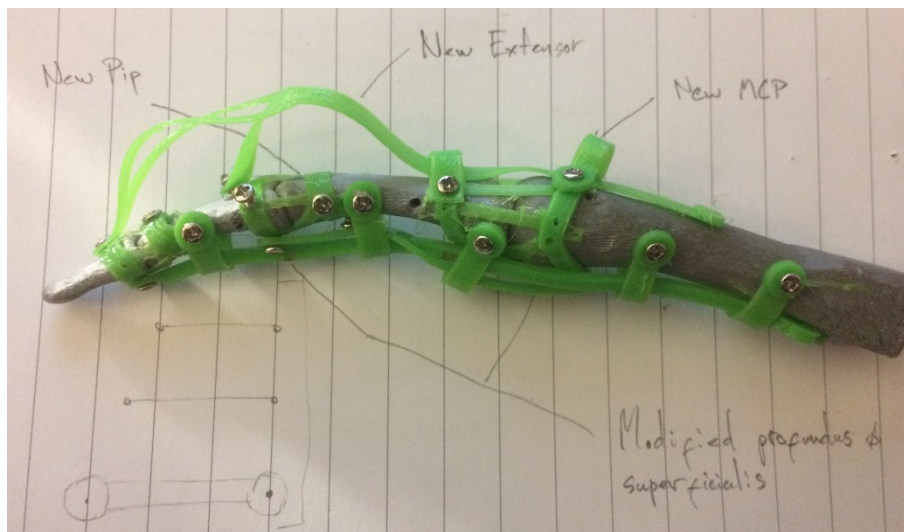


FIGURE13. An iteration of the ligament and tendon structure simulant

## 5.5 Gripper control and sensors

The PCA9685 PWM controller controls the positions of the gripper's sixteen servo motors. The single PCA9685 contains sixteen channels for controlling devices, and the number of devices can be expanded by combining several PCA9685 control circuits. Furthermore, the servo motors can be powered by an external 5V-12V power supply (NXP 2015). This possibility to later expand the number of controllable devices and the option of using a separate power supply influenced the choice of the control circuit.

The control circuit was connected via an I2C serial bus to a computer with a Linux interface. Programs written in Python could transfer signals to servo motors via the terminal or run ready-made programs with predefined series of positions. External controls could also be used to control the motors, e.g., the position of the individual servo motors could be adjusted with a potentiometer. The computer reads the value of the potentiometer and transmitted the motion command to the control circuit as specified in the control diagram (figure 14).

The experiment also investigated the possibility of controlling the gripper using electromyography and infrared rays directed at the muscles.

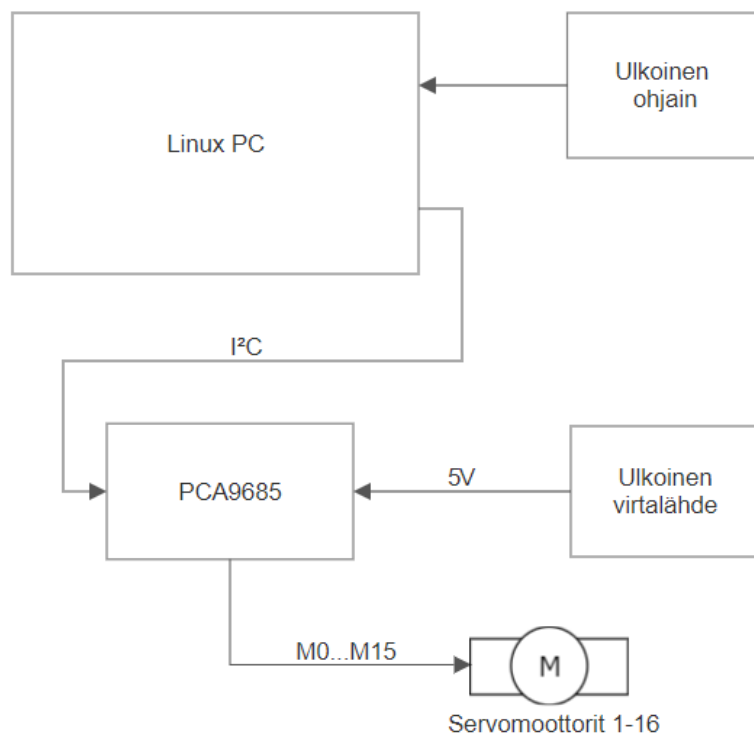


FIGURE14. Control diagram for the servo motors

### 5.5.1 EMG

Electromyography (EMG) measures the electrical activity of a muscle and the number of nerve impulses sent to the muscles. Changes in the muscle cell charge can be measured externally by surface electrodes or internally by needle electrodes inserted into the muscle. These signals are amplified and collected for analysis on a storage device. (Kauranen & Nurkka 2010, 303–326).

A simple EMG amplifier made for the thesis was attached to the surface electrodes and placed on large muscle groups of the hand (figure 15). Signals created by muscle tension were transmitted through a computer and then forwarded to the servo controller.

The signals were used to control the opening and closing of the gripper's fist by combining servo motors into groups. For controlling individual fingers, the EMG surface electrodes were not sufficient. Part of the signal was filtered due to tissue impedance caused by

surrounding tissue, and noise caused by adjacent muscles during movement. The interference made it difficult to monitor an individual muscle.

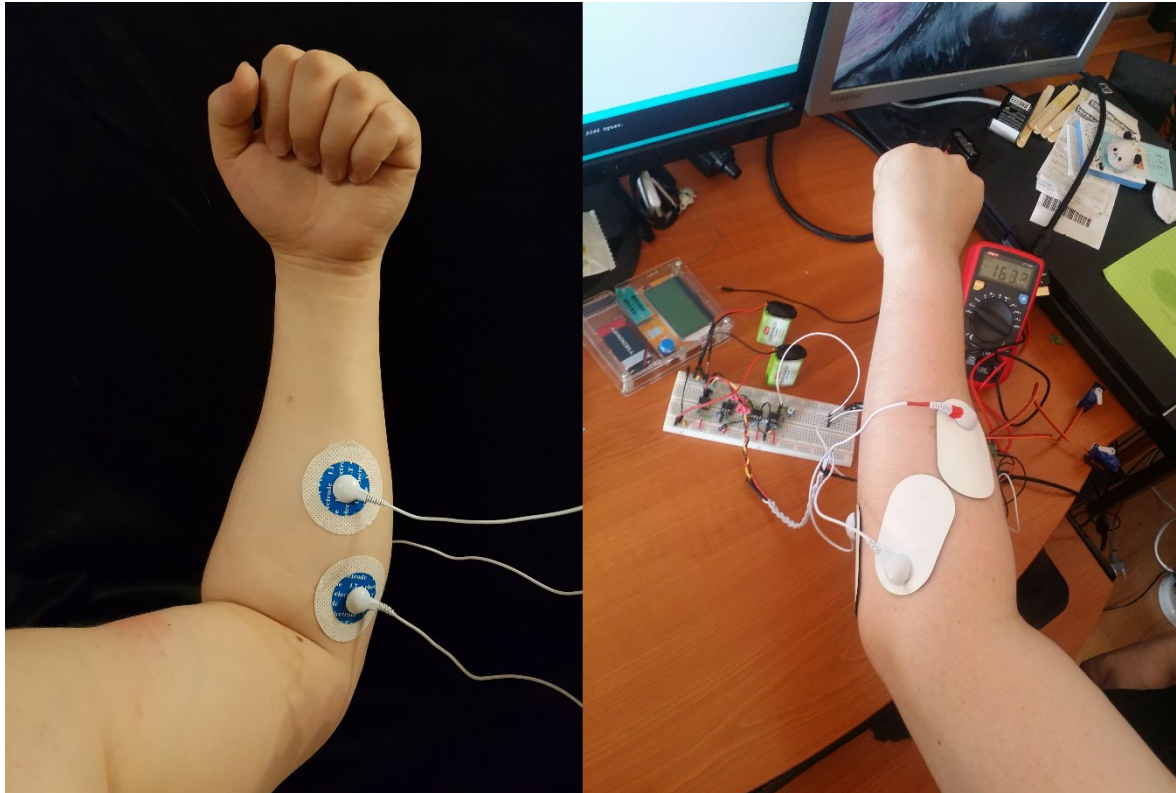


FIGURE15. EMG surface electrodes and EMG amplifier

### 5.5.2 IR

Muscle tension can also be studied by directing infrared rays at the muscles. Infrared light passes through the skin, but when it hits the muscle fibres, some of the rays are absorbed, and some are reflected. As the muscle tenses, the amount of absorbed infrared rays changes, and the remaining amount of reflected infrared rays can be used to analyse the muscle tension. Sensors made of infrared LEDs and phototransistors were placed against the large muscles of the hand, and slightly better results were obtained in this experiment than with the corresponding EMG sensors. There was no noise or interference in the infrared sensors; however, they were unable to distinguish signals with the accuracy required to move individual fingers. These still proved to be smaller and a much simpler way to measure the activity of a large muscle group. (Chianura, Giardini 2014)

### 5.5.3 Pressure and temperature sensor

In an experiment, a barometer was used to monitor contact pressure on the gripper, and the device used was a compact and low-current MPL115A1 digital barometer with SPI bus

output. The MPL115A1 is very small in size, only a few millimetres wide and long, and it is suitable for placing under the tip of the gripper's finger. MPL115A1 is a surface mount component, which uses a sensitive MEMS pressure sensor. (NXP 2017).

The sensitivity of the sensor made the application of the barometer challenging - the sensor could not be left bare to the environment; thus, a protective capsule had to be built for the sensor. First, the barometer was tested under normal conditions, and the pressure and heat values it produced were confirmed to be accurate. Next, the component was placed in a hollow silicone cavity and made airtight. A capsule was attached to the tip of the finger, and connecting wires were set to run along the sides. Silicone was added to the fingertip and on the capsule to achieve a structure resembling the tip of a human finger (figure 16).

In the experiment, pressure was applied to the silicone surrounding the component and sensor data correlating with the applied force was received. The encapsulated sensor also detected a small change in pressure when the surface of the fingertip was stroked. The barometer was able also to measure temperature but measuring reliable values through an insulating air layer and silicone proved challenging.

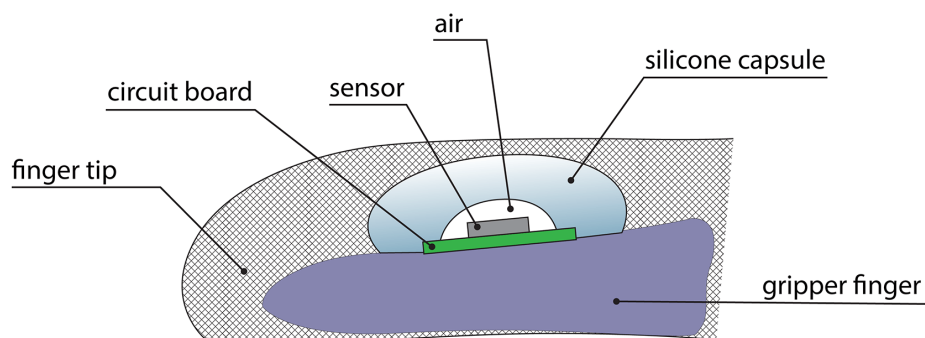


FIGURE16. Silicone encapsulated pressure and temperature sensor MPL115A



## 6 Results

### 6.1 Gripper properties

Table 1. Gripper properties

Part	Weight (g)
Total weight of of the gripper, protective shell, servo motors and motor frame	1730g
Weight of the gripper	130g
Weight of the gripper protective shell	220g
Weight of the servo motors	890g
Weight of the motor frame	490g
Maximum height of gripper unit	57cm
Maximum height of the gripper palm and fingers	20cm
Maximum width of the gripper unit	12cm
Maximum width of the gripper palm	10cm

The gripper has the same proportions as a human arm, and the parts that parallel a human's finger and thumb bones are similar in size and shape. The section that imitates the carpal bones is a uniform piece that cannot simulate natural wrist movements. The entire gripper unit weighs less than a human arm of a similar size; the gripper, the protective shell and the frame have a total weight of 1730 grams, and an equivalent sized arm weighs about 2100 grams (Kauranen & Nurkka 2010, 326). Most of the gripper's weight consists of motors and the motor frame, the gripper's kinematic system and the gripping points, i.e., the tendons and hand, weight in total only 130 grams (table 1).

The small size and lightweight of the gripping mechanism make the gripper suitable for use in environments shared by humans and robots; the flexible tendon and ligament structures limit the grip force and reduce the risk of crushing injuries.

The operator is familiar with grasp patterns and the prerequisites for a successful grasp; these acquired skills can be used to control the gripper. A human hand and this gripper both share the same approach angle, pregrasp and grasping method.

## 6.2 Finger and thumb range of motion

The biomechanical similarity of the gripper and the human hand can be investigated by measuring the range of motion (ROM) and comparing the results with the mobility of a healthy human hand. In this comparison, the active and passive range of motion will be measured as degrees between joints or the distance between the fingertips. The movements that will be examined are thumb flexion, opposition, abduction and adduction, and finger flexion, extension, abduction, and adduction. (Vastamäki et al. 2016, 54–55).

### 6.2.1 Thumb flexion

The zero position of the thumb flexion begins with the extension of the IP, MP, and CMC joints. The flexion angle is determined by the angle produced by each joint between opposite bones. The IP joint ROM is 80 degrees, the MP joint ROM is 50 degrees, and the CMC joint ROM is 15 degrees (figure 17) (table 2).



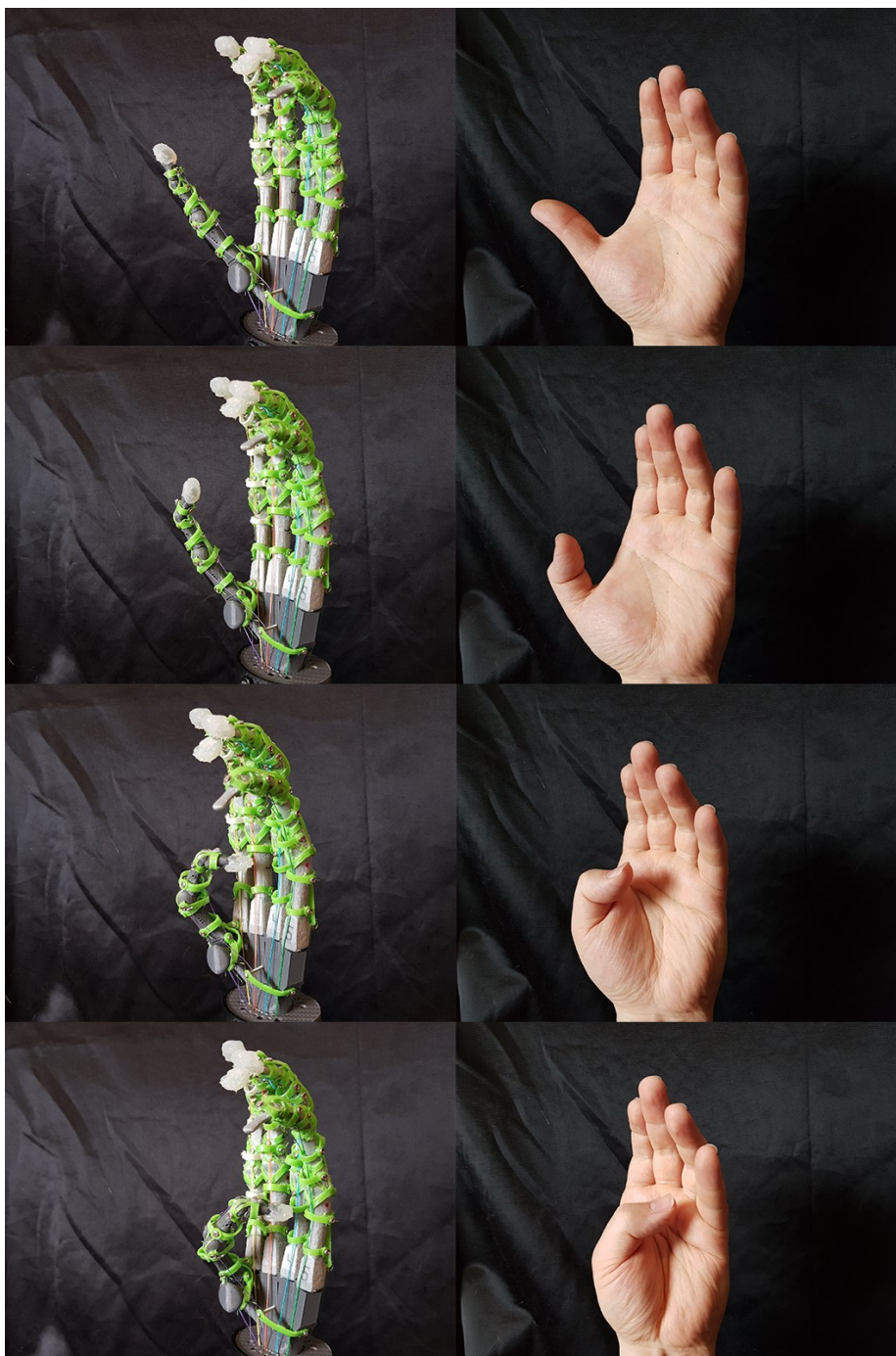


FIGURE17. Thumb flexion

Table 2. Thumb flexion

Motion	Healthy hand ROM (degrees)	Gripper ROM (degrees)
IP joint flexion	80	80
MP joint flexion	50	45
CMC joint flexion	15	20

### 6.2.2 Thumb opposition

The zero position of the thumb opposition starts with the thumb extended parallel to the forefinger. The opposition movement of the thumb and finger consists of combining abduction, rotation, and flexion. The opposition movement is perfect if the thumb's tip turns towards the palm, touches the tip of the little finger (figure 18).

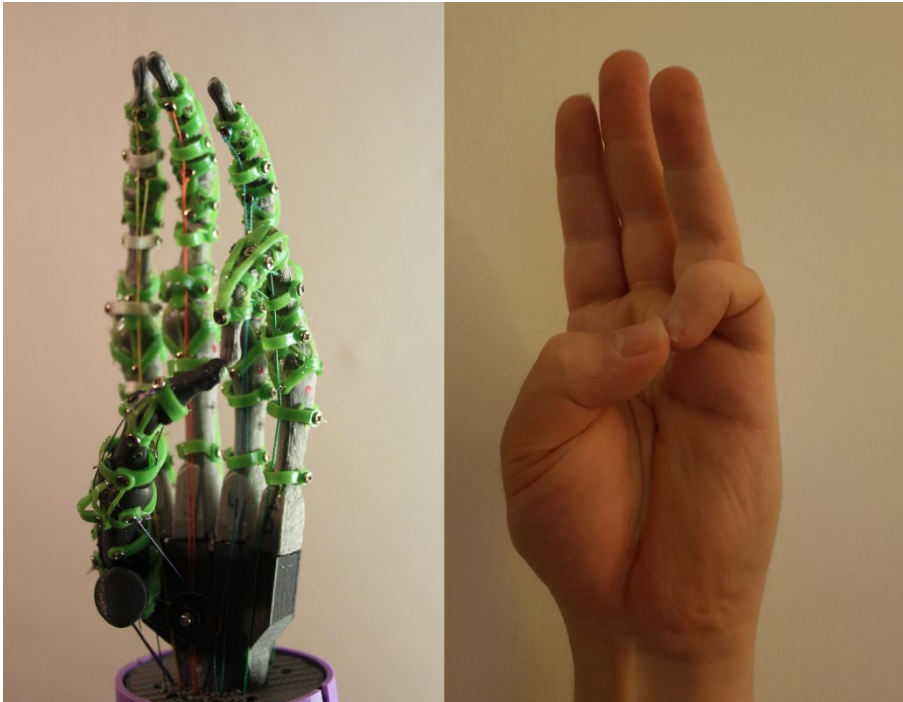


FIGURE18. Thumb opposition

### 6.2.3 Thumb abduction and adduction

The zero position of thumb abduction and adduction begins by extending the thumb in the direction of the radius against the side of the index finger. The angle of abduction is determined by the angle of the first and second metacarpal. The palmar abduction is measured from the palm's right angle and the radial abduction from the level of the palm. In both, the range of motion of a healthy joint is 90 degrees (figure 19) (table 3).

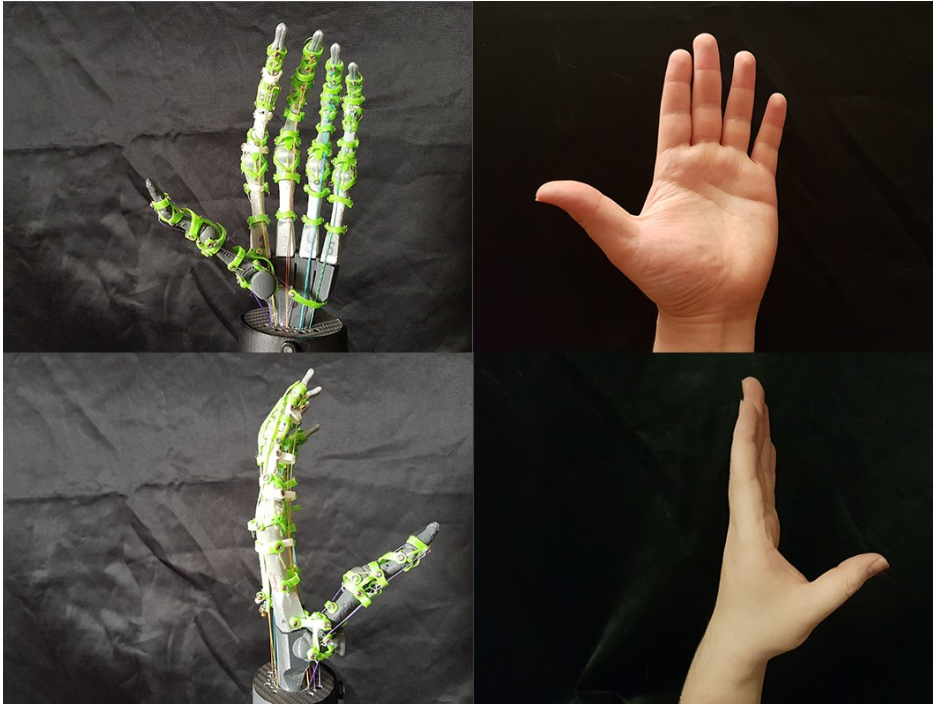


FIGURE19. Thumb abduction and adduction

Table 3. Thumb abduction and adduction

<b>Motion</b>	<b>Healthy hand ROM (degrees)</b>	<b>Gripper ROM (degrees)</b>
Palmar adduction	90	65
Radial abduction	90	60

#### 6.2.4 Finger flexion

In the zero position of the finger flexion, the fingers are extended parallel to the back of the palm and each other. The angle of flexion is determined by the angle produced by each joint between the bones. The DIP joint ROM is 90 degrees, the PIP joint ROM is 100 degrees, and the MP joint ROM is 90 degrees (figure 20) (table 4).

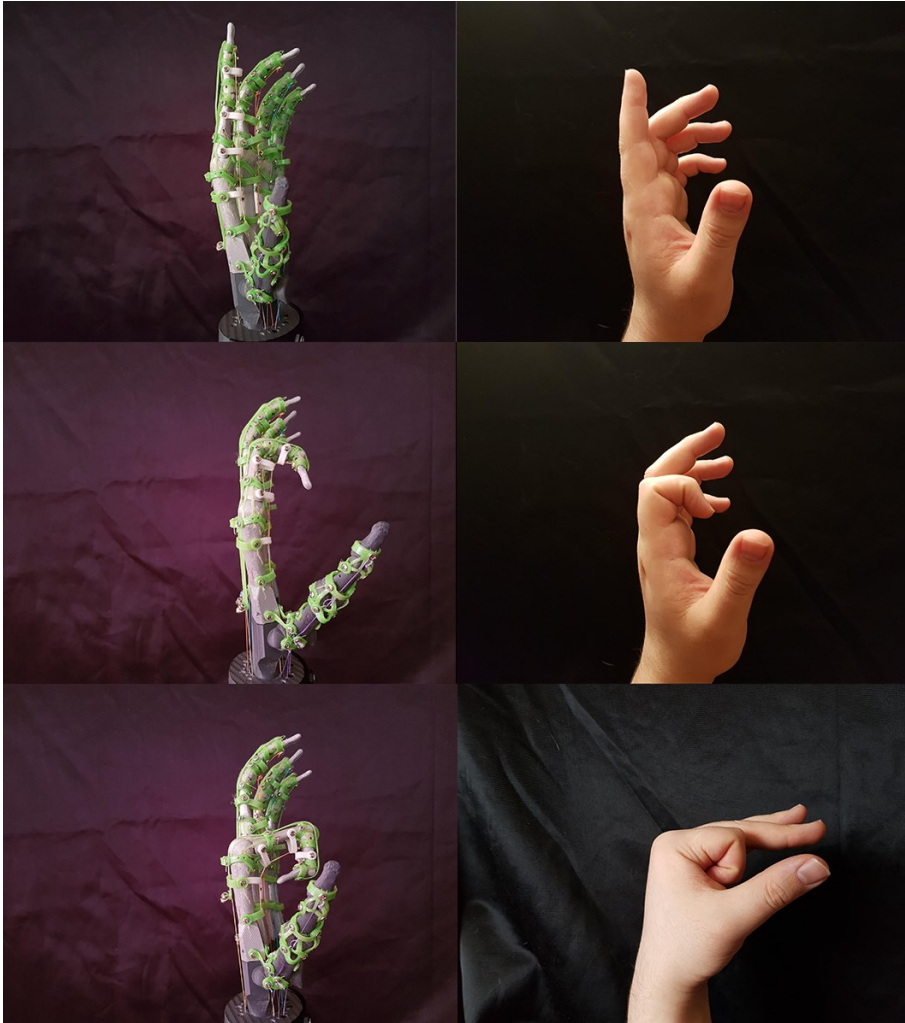


FIGURE20. Flexion of the index finger



Table 4. Finger flexion

<b>Motion</b>	<b>Healthy hand ROM (degrees)</b>	<b>Gripper ROM (degrees)</b>
Index finger - DIP joint flexion	90	80
Index finger - PIP joint flexion	100	95
Index finger - MP joint flexion	90	80
Middle finger - DIP joint flexion	90	90
Middle finger - PIP joint flexion	100	90
Middle finger - MP joint flexion	90	80
Ring finger - DIP joint flexion	90	90
Ring finger - PIP joint flexion	100	90
Ring finger - MP joint flexion	90	100
Little finger - DIP joint flexion	90	90
Little finger - PIP joint flexion	100	90
Little finger - MP joint flexion	90	100

### 6.2.5 Finger extension

The zero position of the finger extension is the same as in flexion. The extension occurs in the MP joint and is very small, 10 degrees (figure 21) (table 5).

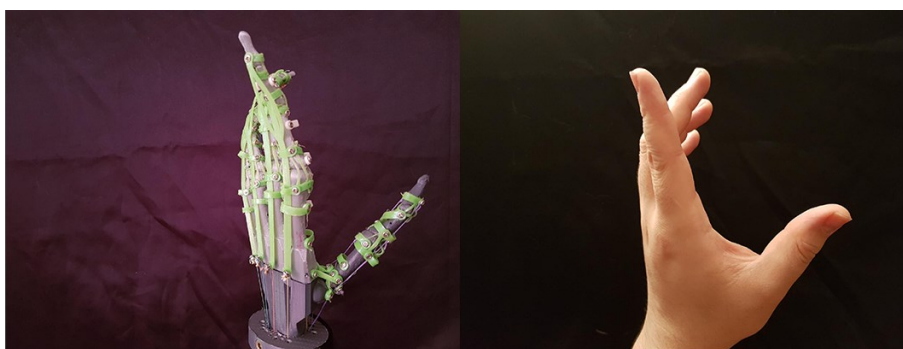


FIGURE21. Finger extension

Table 5. Finger extension

<b>Motion</b>	<b>Healthy hand ROM (degrees)</b>	<b>Gripper ROM (degrees)</b>
Index finger - extension	10	15
Middle finger - extension	10	10
Ring finger - extension	10	20
Little finger - extension	10	10

### 6.2.6 Finger abduction and adduction

This range of motion assessment was performed as a passive measurement; the finger abductors and adductors are not actuated, but the range of motion can be examined by bending the MP joint. The finger abduction and adduction begin at the level of the palm. The total distance of the fingers is measured between the fingertips of the forefinger and the little finger. The distances between the other fingers are measured separately. (figure 22) (table 6). Additionally, the angle between the middle finger and the other fingers is (table 7).

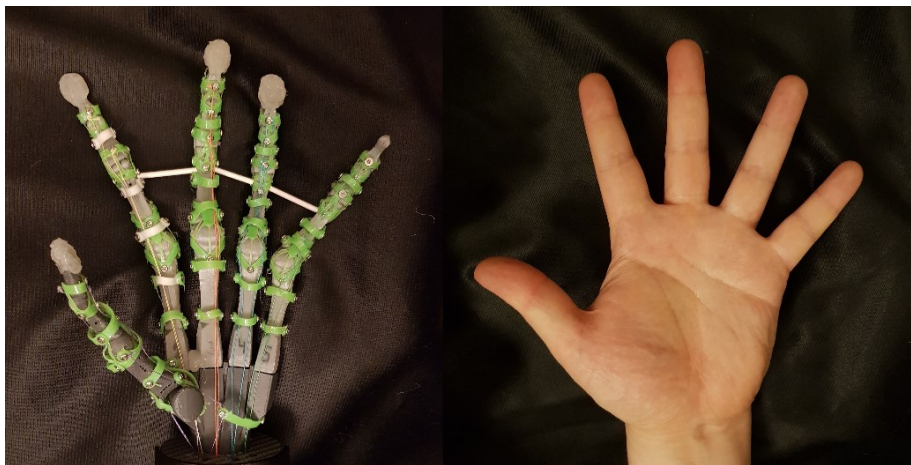


FIGURE22. Finger abduction and adduction

Table 6. Finger abduction

<b>Motion</b>	<b>Healthy hand ROM (degrees)</b>	<b>Gripper ROM (degrees)</b>
Abduction	15	14

Table 7. Finger abduction and adduction

Motion	Healthy hand ROM (degrees)	of the gripper of motion (degrees)
Abduction between the index finger and the middle finger	20	30
Abduction between the ring finger and middle finger	25	25
Abduction between little finger and middle finger	45	40

### 6.3 Fist positions

The gripper's ability to form fist positions was examined by adapting exercises performed in flexor tendon rehabilitation. The flexor tendons are held in isometric tension using three different fist positions: the hook, the straight fist, and the full fist (figure 23). The exercises can be applied to the gripper and measure its ability to form fist positions.

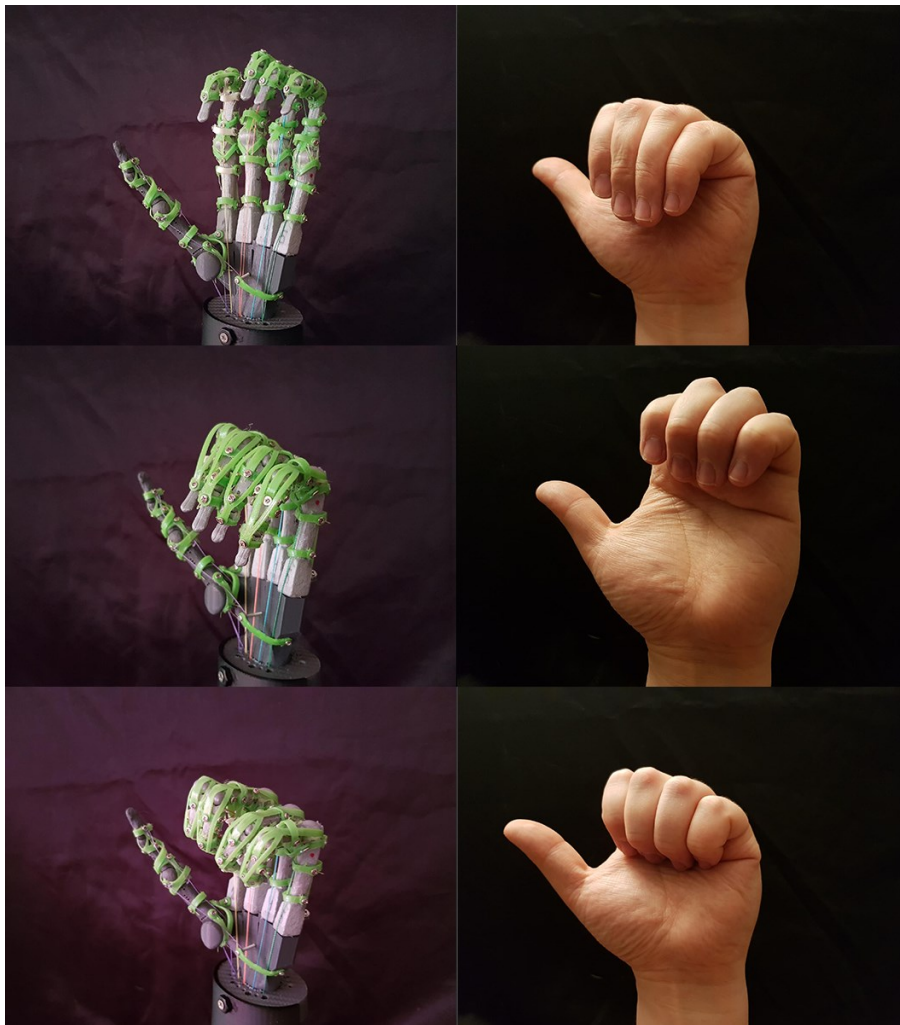


FIGURE23. Fist positions

## 6.4 Prehension

The gripper's prehension is examined by forming different types of grips on items and making a comparison with a human hand. The examined grips are divided into two categories: precision grips and force grips. The performance of the precision grip is evaluated by grasping household items that would be challenging for a regular universal gripper. The power grip is evaluated by its ability to keep a stable grip on an object (table 8).

Table 8. Weights of adhesion test objects

Object	Weight (g)
Marker pen	26
Key	8
Pen	3.8
Needle	0.5
Paper	0.5



#### 6.4.1 Precision grips

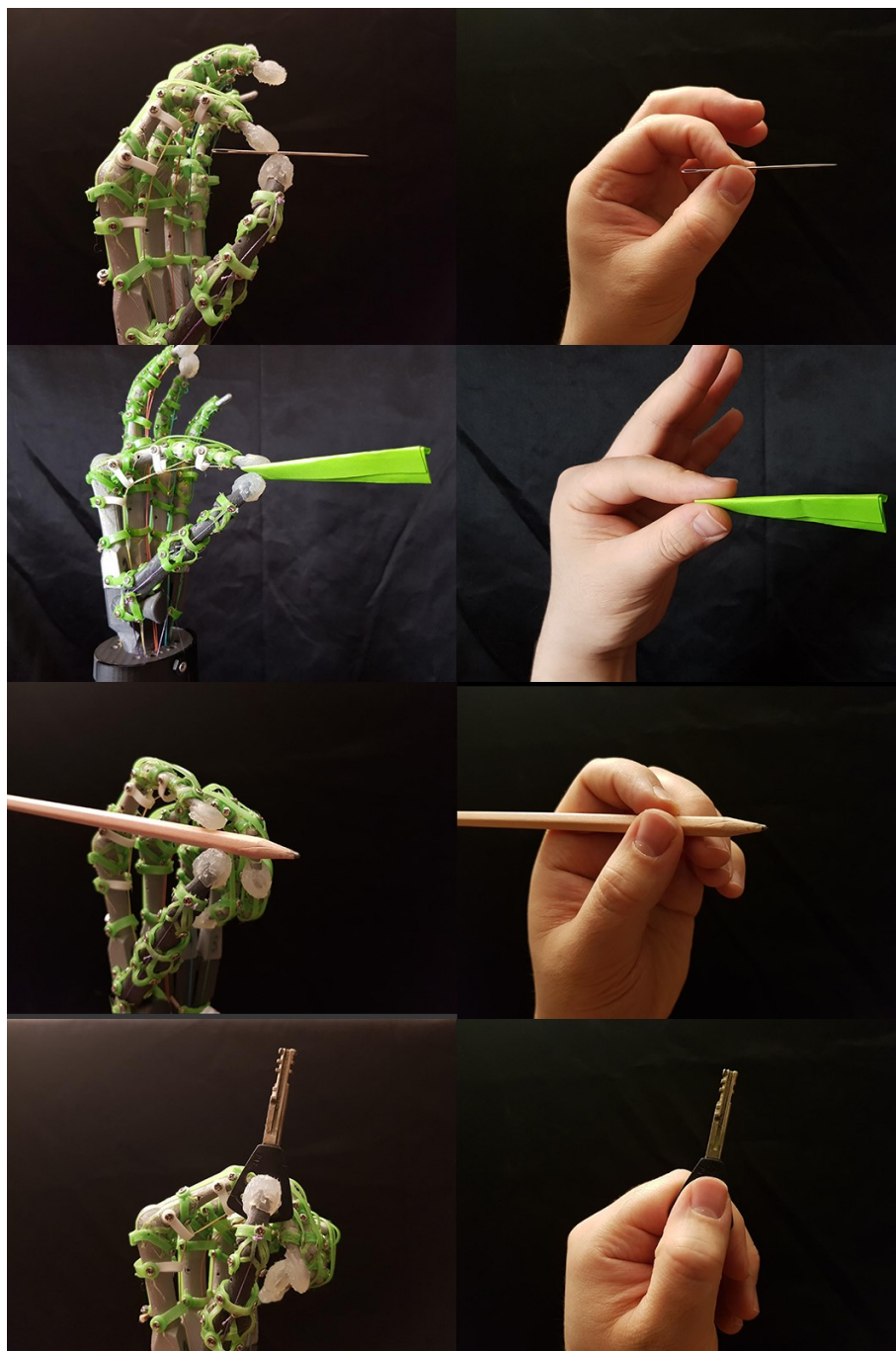


FIGURE24. Precision grip with fingertips, pincer grip, pen grip ja key grip

### 6.4.2 Power grips

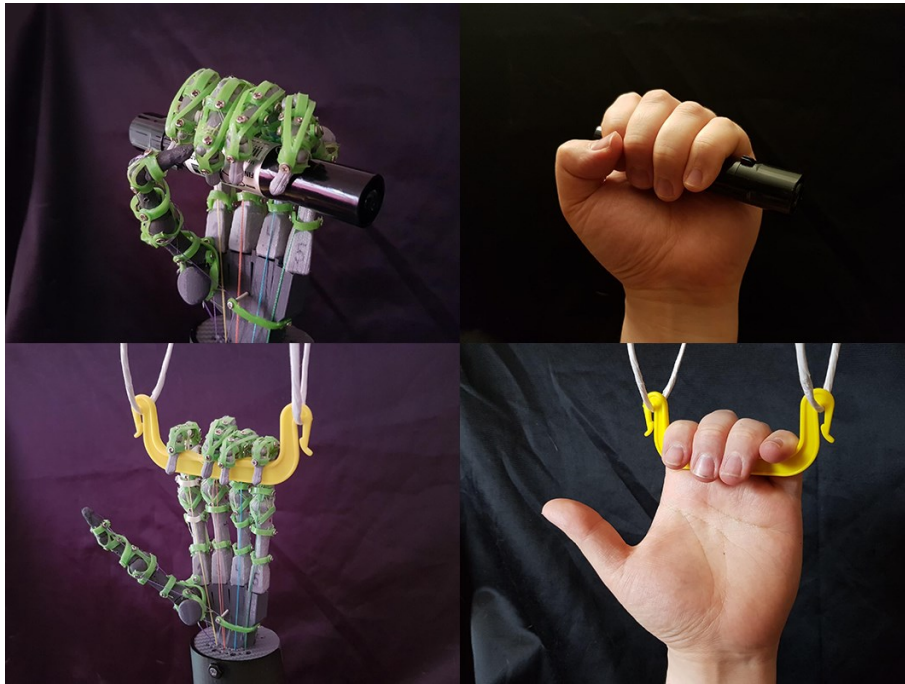


FIGURE25. Palmar grip and hook grip

## 6.5 Results

In the range of motion tests, the gripper performed moderately well when compared against the given values in the tables. However, the range of motion performance was nearly identical when the gripper was compared against the tester's hand. The values given in the tables should not be considered absolute, since the range of motion and joint stability can widely vary between human individuals. This difference was observed when the tester compared their range of motion values with the table values. The thumb performed exceptionally well during the flexion and opposition tests. The fingers also performed well during flexion, but there was noticeable instability of the PIP and DIP joints of the ring and little finger. The instability could be explained by the thinness of the ligament structures of the ring and little finger, and the high torque of the actuators. The adduction and abduction range of motion assessment was performed as a passive measurement without actuators.

The gripper completed the fist positions tests successfully, and it was able to bring all digits simultaneously into full flexion and hold the position. The straight fist position performed the best, in this position, the finger's DIP joints stay extended as the PIP and MP joints enter flexion. The successful performance of this challenging fist position demonstrates that imitating biomechanical structures can be beneficial for the recreation of complex hand movements.

The grasping tests had varying success - the gripper formed precision grips with success, but depending on the grip type, producing enough compression force with only two or three fingers was difficult (figure 24). This issue was caused by the flexibility and softness of the ligament structure simulants. The chosen simulant material had an ideal balance of resistance and elasticity for performing movements and fist positions, but during precision grips, extreme compression forces would distribute unevenly and cause joint instability. The precision grip test was continued with lighter objects that could be grasped with less force.

Joint instability was not an issue during the testing of force grips; this was due to the gripper structure and even distribution of force. During a palmar grip, the item remained still when moving parallel to the proximal and middle phalanx and lateral movement was introduced. The strongest grasp pattern was the hook grip, that was tested by grasping a vertically raised handle. The gripper kept a firm hold of the handle even as the entire gripper assembly was lifted. Testing was discontinued after weights were added to the bottom of the gripper assembly, and the total mass exceeded 4000 grams. This result surpassed expectations, considering that the weight is 30 times that of the gripper system alone (figure 25).

## 7 Conclusion

Universal grippers are an essential part of established production processes, and several robotics manufacturers produce a variety of models for industrial use. Some of these industrial grippers have been implemented as such for service and remote robotics; however, these often lack the necessary agility and grip versatility that is required for demanding work tasks in environments designed for humans. A dexterous gripper with a wide range of grasp patterns, would not be an efficient tool for an industrial robot, but it would be ideally suited for remote and service robotics. Robotic grippers that have been designed to grasp human tools and household items are rare, and there exist only a few models of commercially available grippers that imitate the biomechanics of a human hand.

This thesis analysed the biomechanical structures of the human and the hand movements that are required to form different grasp patterns. The gripper required adapting designing practices used in industrial robotics, due to the unique design of this gripper. The gripper reached its final shape after experimenting with several prototypes and observing their performance during tests.

The gripper weighs 1730 grams and has a maximum height of 57 centimetres, and these values meet the set goals. Being lightweight and similar in size to a human arm makes the gripper suitable for use in environments shared by humans and robots. In addition, the soft materials and the flexible joint structures used in the gripper, reduce the chance of injury in situations where a person might be in risk of collision or being crushed. Results of the range of motion tests show that the gripper's fingers are almost as agile as human fingers. The thumb, which is critical in forming precision grips, performed exceptionally well. The results varied more during grasping tests - the gripper formed power and precision grips successfully but producing sufficient compression force during specific precision grips caused problems. The precision grip's load capacity target was set at 10 grams, but during tests, the maximum load could not exceed 8 grams. The power grips did not face similar issues - the load capacity was set at 2000 grams and the gripper successfully grasped items of over 4000 grams.

The structure of the gripper imitates the human hand in its appearance and mechanics: it uses the same movements and pregrasps when approaching an object, and the final grasp pattern is formed in the same way as when using a human hand. Understanding how the gripper forms grasp patterns should be effortless; the operator uses their existing knowledge of object grasping. When attempting to grasp an object of unusual shape, the operator can form an effective grasp pattern using their own experience.

The gripper built in this thesis demonstrates that reliable power grips and versatile precision grips can be reproduced by mimicking the biomechanical structures of the human hand. This dexterity is not achieved by making the gripper appear externally similar to a hand or by artificially restricting the range of motion of joints. Structures that simulate bones, tendons, and ligaments affect directly on the precision of grip formation and smoothness of joint movements.

The subject of this thesis proved to be more demanding than initially thought, the limited number of studies made of similar topics and the rarity of anthropomorphic grippers made the work more challenging. Designing the gripper's joint structure and creating soft tissue simulations took much more time than what was at first estimated, the design and manufacturing required a lot of research and experimentation. The human hand is very intricate in terms of biomechanics and manufacturing a device that imitates it requires extensive knowledge of hand biomechanics and biological structure. Equipment and materials to produce this gripper were not readily available, and the resources allocated for this thesis were limited. The production of prototypes and careful testing of various mechanical structures were necessary; many materials used in the initial prototypes were also replaced for more suitable alternatives when production on the final gripper began. The components, materials and manufacturing methods were not selected with long-term and repeated use in mind, and the objective was to produce working prototypes rapidly and to reuse as many parts as possible from previous prototypes.

As such, the gripper produced in this thesis would not be a practical tool for a service robot. It is not a complete product, but rather a proof of concept for using biomechanical structures to design grippers with a diverse set of grasps patterns. However, by replacing certain parts with longer-lasting components and by changing materials for more durable alternatives, the gripper may be applied for use in robotics.

## 8 Options for further research

The gripper can be developed further by adding the missing hand movements: the adduction and abduction of the index, middle, ring, and little finger have not been fully actuated, but the joint structures that enable the full range of motion are already in place. Simulating the movement of these small intrinsic muscles might be challenging, due to the size of the servo motors and the limited space in the palm. Another structure that could be improved is the gripper's wrist; the section that imitates the carpal bones is a uniform piece that cannot simulate natural wrist movements. Natural wrist motion can be achieved by producing the separate carpal bones in detail and attaching ligaments that allow the bones to slide over each other during movement.

Real-time control of the gripper can be expanded by adding the possibility to use different external controllers, also recording the operator's hand movements, and editing these into code that is repeated by the gripper is feasible. Data generated by the pressure and temperature sensors could be utilised by displaying the operator information or by giving physical feedback about the contact pressure while gripping an object.

The use of this gripper as part of a hand prosthesis could also be a topic for further research; however, this would require several changes to the materials and structure. For daily prosthetic use, certain materials would need switching out for more durable alternatives, and several structures would need redesigning and reinforcement. The biggest challenge would be the reallocation of the actuators and finding a suitable power source.

## References

- ABB 2020. IRB 6620. [retrieved 17.3.2020]. Available at: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-6620>
- Cangelosi, A. & Schlesinger, M. 2015. Developmental robotics : from babies to robots . Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Chianura, A. & Giardini M. 2010. An electrooptical muscle contraction sensor. Online publication [retrieved 20.4.2018]. Available at: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11517-010-0626-x.pdf>.
- Crawford A., Molitor J., Perez-Gracia A. & Chiu S. 2010. Design of a robotic hand and simple EMG input controller with a biologically-inspired parallel actuation system for prosthetic applications. Online publication [retrieved 12.2.2017]. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/277064253\\_Design\\_of\\_a\\_robotic\\_hand\\_and\\_simple\\_EMG\\_input\\_controller\\_with\\_a\\_biologically-inspired\\_parallel\\_actuation\\_system\\_for\\_prosthetic\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/277064253_Design_of_a_robotic_hand_and_simple_EMG_input_controller_with_a_biologically-inspired_parallel_actuation_system_for_prosthetic_applications)
- Hendrich, N. & Bistrya H. & Zhang J.. 2015. Architecture and Software Design for a Service Robot in an Elderly-Care Scenario. Engineering. Online publication [retrieved 21.3.2017]. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/281422335\\_Architecture\\_and\\_Software\\_Design\\_for\\_a\\_Service\\_Robot\\_in\\_an\\_Elderly-Care\\_Scenario](https://www.researchgate.net/publication/281422335_Architecture_and_Software_Design_for_a_Service_Robot_in_an_Elderly-Care_Scenario)
- Jeff Green/Rethink Robotics 2020. File:ClickSmart 6.jpg. [retrieved 10.11.2020]. Available at: <https://search.creativecommons.org/photos/c9dacd75-ffb8-4ace-9e6b-c2de135bee4d>
- Kauranen, K. & Nurkka, N. 2010. Biomekaniikkaa liikunnan ja terveydenhuollon ammattilaisille. Helsinki: Liikuntatieteellinen seura.
- Kuivanen, R. 1999. Robotiikka. Helsinki: Talentum Oyj/MetalliTekniikka.
- Lens T., Kunz J., von Stryk O., Trommer O. & Karguth A. 2010. BioRob-Arm: A Quickly Deployable and Intrinsically Safe, Light- Weight Robot Arm for Service Robotics Applications. Online publication [retrieved 21.3.2017]. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.172.4521>
- Monkman, G. J. 2007. Robot grippers . Weinheim: Wiley-VCH.
- NXP 2015. PCA9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller. Online publication [retrieved 2.2.2018]. Available at: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9685.pdf>

NXP 2017. MPL115A1 Miniature SPI digital barometer, 50 to 115 kPa. Online publication [retrieved 8.5.2018]. Available at: <https://www.mouser.fi/datasheet/2/302/MPL115A1-1127172.pdf>

Palastanga, N. et al. 2006. Anatomy and human movement: structure and function . 5th. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Robotiq 2020. 3-Finger Adaptive Robot Gripper. [retrieved 17.3.2020]. Available at: <https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper>

russimages 2020. red-tailed hawk claw avalon mid march. [retrieved 10.11.2020]. Available at: <https://search.creativecommons.org/photos/411df2c4-c3f9-4e78-bd53-4cd571472379>

Shumway-Cook, A. & Woollacott, M. 2012. Motor control: translating research into clinical practice . 4th ed., international ed. Philadelphia, PA: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins.

Vastamäki, M. et al. 2016. Käsikirurgia . 2. uudistettu painos. Helsinki: Kandidaattikustannus Oy.

Xu, Z. & Todorov E.. 2016. Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration. Online publication [retrieved 3.3.2017]. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/303885487\\_Design\\_of\\_a\\_highly\\_biomimetic\\_anthropomorphic\\_robotic\\_hand\\_towards\\_artificial\\_limb\\_regeneration](https://www.researchgate.net/publication/303885487_Design_of_a_highly_biomimetic_anthropomorphic_robotic_hand_towards_artificial_limb_regeneration)