



**UNIVERSITY
OF OULU**

TIETO- JA SÄHKÖTEKNIIKAN TIEDEKUNTA

**Antti Korpi
Samuli Körkkö
Waltteri Rasila**

INMOOV-ROBOTIN KÄSIVARSIEN TOTEUTUS

Kandidaatintyö
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma
Marraskuu 2023

Korpi A., Körkkö S., Rasila W. (2023) InMoov-robotin käsivarsien toteutus. Oulun yliopisto, Tietotekniikan tutkinto-ohjelma, 36 s.

TIIVISTELMÄ

Erilaisia robotteja on käytetty jo kauan aikaa. Ensimmäiset robotit tehtiin teolliseen käyttöön, suurimmaksi osaksi liukuhihnatyöhön. Tällaisten robottien ei tarvitse mukautua ympäristöönsä, vaan ympäristö on rakennettu robotin ympärille. Robottiikan ja tekoälyn kehittyessä mahdollistuu myös täysin uudenlaisten robottien valmistus. Robotit voivat mukautua ympäristöönsä paremmin erilaisia sensoreita hyödyntäen. Nykyään robotteja käytetään monenlaiseen tarkoitukseen lääketieteestä autonomisiin autoihin. Robotit voivat olla kalliita suunnitella ja rakentaa, mutta 3d-tulostuksen mahdollistaman halvemman hinnan kautta myös tavallisilla ihmisillä on mahdollista kehittää prototyyppisiä.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään robotin rakentamiseen ja kokeiluun, sekä näissä nopean ja edullisen prototyyppien valmistuksen mahdollisuuksiin sekä ongelmiin. Työssä käytetään pohjana InMoov-robotin valmiita 3d-malleja ja Robot Operating System 2 -kirjastoa robotin ohjaamiseen. Näillä malleilla rakennetaan robotin kädet ja ne liitetään jo olemassa olevaan robottiin. Siinä kerrotaan miten servoa voidaan muokata, ja kuinka hammasrattaiden käyttöä voidaan hyödyntää robotin käsien liikuttamiseen. Verrattuna kaupallisiin roboteihin laadussa on eroja, mutta työn tarkoitus on olla esimerkkinä ja tukena muille, jotka haluavat kokeilla rakentaa robotin prototyyppiä edullisesti. 3d-tulostus mahdollistaa uusien osien tulostamisen helposti ja rikkiinäiset osat voidaan vaihtaa.

Keskeisiä ongelmia robotin rakentamisessa ovat mekaanisten osien heikkous, huonosti toteutetut johdotukset sekä sekava ohjelmistopuoli. Parannus- ja ratkaisuehdotuksia, toteutettuja ratkaisuja, sekä huomioitavia ja vältettäviä asioita esitetään työssä ja lisäksi pohditaan mahdollisia jatkotutkimuskohteita.

Avainsanat: Robot Operating System 2, Robotin ihmismäiset liikkeet, 3d-tulostaminen

Korpi A., Körkkö S., Rasila W. (2023) Implementation of InMoov Robot Arms.
University of Oulu, Degree Programme in Computer Science and Engineering, 36 p.

ABSTRACT

Robots have played a pivotal role in various industries, initially designed for industrial assembly line tasks. These early robots operated in controlled environments tailored to their specifications. However, as robotics technology advances, the creation of adaptable robots equipped with diverse sensors has become feasible. Today, robots serve a wide range of applications, from the medical field to autonomous vehicles. The advent of cost-effective 3D printing technology has democratized robot prototyping, enabling consumers to develop affordable prototypes.

This thesis centers on the creation and evaluation of a robot prototype, exploring both its potential and challenges. Leveraging InMoov robot 3D models as a foundation and the Robot Operating System 2 library as the control system, this research constructs and integrates robotic arms. The study also investigates servo motor adjustments and the use of cogwheels to enhance robot mobility. While the quality of these prototypes may differ from commercial robots, this work serves as a practical reference and support for individuals interested in building cost-effective prototypes. The flexibility of 3D printing allows for swift part replacement, mitigating issues arising from wear and tear.

Common challenges encountered in robot construction include weak connections, suboptimal wiring, and complex software integration. This paper not only identifies these challenges but also presents proposed improvements, implemented solutions, and considerations for future research. By offering insights into overcoming these hurdles, this work aims to facilitate the development of more accessible and functional robotic prototypes.

Keywords: Robot Operating System 2, Humanlike Movements of a Robot, 3d printing

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
SISÄLLYSLUETTELO	
ALKULAUSE	
LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET	
1. JOHDANTO	7
2. ROBOTIIKKA 2020-LUVULLA	8
2.1. Teollisuusrobotit	8
2.2. Palvelurobotit	8
2.3. Terveysthuolto	9
2.3.1. Robotiikka kirurgiassa	9
2.3.2. Kirurgiassa käytettävä tekoäly	10
2.4. Autonominen auto	10
2.5. Robottiproteesikädet	11
2.5.1. Robottiproteesikäsien liikuttaminen	12
2.5.2. Ihmismäisen liikkeen tuottaminen robottiproteesikäsissä	12
2.5.3. Ylimääräiset robotti-raajat	13
2.6. Robottikädet	14
2.7. InMoov	14
2.7.1. InMoov-robotin käsien suunnittelu	15
2.7.2. InMoov-robotin käyttötarkoitukset	16
2.8. Robottien ihmisenkaltaisuus ja outo laakso -efekti	16
3. TOTEUTUS	18
3.1. 3D-tulostaminen	18
3.2. Servot	18
3.3. Kokoaminen	21
3.3.1. Hauikset	21
3.3.2. Olkavarret	22
3.4. ROS2	23
3.5. Arduino	24
3.6. Ohjelmisto	24
3.7. Kommunikointi	25
3.8. Ongelmia	25
3.8.1. Ohjelmisto-ongelmia	28
3.9. Nykytilanne	29
4. JATKOKEHITYS	30
5. YHTEENVETO	31
6. VIITTEET	32
7. LIITTEET	36

ALKULAUSE

Tämä kandidaatintyö on toteutettu projektityönä sulautettujen järjestelmien kurssilla osana Oulun yliopiston Tietotekniikan opintosuuntaa. Haluamme kiittää työn ohjauksesta Teemu Tokolaa ja Aapo Pihlajaniemeä olemassa olevan robotin ja projektin yhteensaattamisen avustamisessa.

Oulussa 17. marraskuuta 2023

Antti Korpi
Samuli Körkkö
Walteri Rasila

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

ROS2	Robot Operating System 2, ROS2-robottiohjausjärjestelmä
DOF	Degrees of freedom, vapausasteet
EMG	Electromyography, lihassähkökäyräsensori
BMI	Brain machine interface, aivokäyttöliittymä
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol, polyetyleenitereftalaatti
PLA	Polylactic acid, polyaktidi
STL	Stereolithography, stereolitografia
colcon	Collective Construction, kollektiivinen rakentaminen
XRCE	eXtremely Resource Constrained Environments, äärimmäisen resurssirajoitetut ympäristöt
DDS	Data Distribution Service, tiedonjakelupalvelu
Serial	sarjaväylä

1. JOHDANTO

Robottiteknologia on kehittynyt viime aikoina useille eri aloille. Tekoälyn edistyessä yhdessä robotiikan kanssa, on tullut mahdolliseksi toteuttaa uusia käytännön sovelluksia. Kaikki alkoi kuitenkin teollisuusroboteista, jotka edelleen työskentelevät tehtaissa liukuhihnalla. Nämä robotit suorittavat yksinkertaisia tehtäviä tehokkaasti ja tasalaatuisesti, mutta ne eivät pysty sopeutumaan muuttuvaan ympäristöön, vaihteleviin raaka-aineisiin tai ihmisten kanssa tehtävään yhteistyöhön.

Tekoälyn merkittävä kehitys on laajentanut robotiikan käyttöä tehtaiden ulkopuolelle. Esimerkiksi itsestään ajavat autot kykenevät navigoimaan liikenteessä muiden ajoneuvojen seassa. Tämä vaatii kykyä ymmärtää ja tulkita ympäristöä, sekä tuottaa ennustettavaa ja ihmisten ymmärtämää liikettä. Lisäksi auton on kyettävä suorittamaan tehtäviä suunnitellusti. Vaikka täysin autonomisia autoja ei vielä ole yleisesti käytössä, muut robotit ovat jo laajalti levinneet markkinoille. Esimerkiksi robotti-imurit ja ruohonleikkurit ovat yleisiä. Koska näiden laitteiden aiheuttamat mahdolliset kolhut eivät ole hengenvaarallisia, niiden valmistaminen on helpompaa. Näistä huolimatta ne osaavat hyvin navigoida sisätiloissa ja pihalla suorittaen tehtävänsä itsenäisesti.

On myös robotteja, jotka eivät toimi täysin itsenäisesti. Tästä esimerkkinä toimivat kirurgiset robotit, jotka ovat kirurgien käsien virtuaalisia laajennuksia. Kirurgiset robotit mahdollistavat erittäin tarkat liikkeet ja pienemmät leikkaushaavat, mikä nopeuttaa potilaiden toipumista. Esimerkiksi aivojen vaativat leikkaukset ovat mahdollisia kirurgirobotin avulla. Kuitenkin näiden robottien hankintakustannukset ovat edelleen erittäin korkeita.

Robottien ja tekoälyn kokeiluun ei tarvita suuria määriä rahaa. 3d-tulostustekniikan yleistyessä sen hinnat ovat laskeneet, mikä tekee siitä kuluttajaystävällisen vaihtoehdon. 3d-tulostuksen avulla voit käytännössä tulostaa kaikenlaisia prototyyppisiä erilaisista roboteista erilaisiin proteeseihin. Tämä mahdollistaa erilaisten kokeilujen tekemisen ja tarjoaa edullisempia valmistusmenetelmiä myös maihin, joissa kustannukset ovat kriittinen tekijä.

Robottien valmistukseen on saatavilla avoimen lähdekoodin kirjastoja, jotka helpottavat robotin ohjausta. Valmiita 3d-tulostettavia robottimalleja on myös saatavilla. Tässä työssä yhdistetään näitä resursseja jatkamalla InMoov-robotin rakentamista käyttäen Robot Operating System 2 -kirjastoa (ROS2).

2. ROBOTIIKKA 2020-LUVULLA

Robotteja käytetään nykyään monissa erilaisissa ympäristöissä ja sovelluksissa. Robotteja käytetään paikoissa jossa työ on liian yksinkertaista, vaarallista, tarkkuutta vaativaa tai muuten vain hankalassa sijainnissa. Robotti on suunniteltava alun perin tiettyyn tarkoitukseen, mutta tekoälyn kehittymisen myötä ne voivat paremmin mukautua muuttuviin tilanteisiin. Roboteilla voi olla erilaisia vaatimuksia riippuen kohteesta, kuten liikenopeus, reaktionopeus, tarkkuus, voima ja kyky mukautua.

2.1. Teollisuusrobotit

Tuotantolinjat olivat ensimmäisiä kohteita, joissa robotit korvasivat ihmisen tarpeen liukuhihnatyössä. Teollisuusrobotit ovat erittäin automatisoituja, mikä rajoittaa niiden kykyä sopeutua muuttuviin tilanteisiin. Koska liukuhihnatyö on hyvin toistettavaa, robotti sopii tähän hyvin. Yleisimpiä käyttökohteita ovat pistehitsaus, maalaus, piirien testaus, erilaiset mittaukset, kokoonpano ja koneistus [1]. Tekoälyä ei toistettavuuden takia paljoa tarvita. Yksinkertainen kameralla tapahtuva tunnistaminen esimerkiksi laadunvarmistuksessa riittää [2].

Nykyään robotit hyödyntävät kehittyntä langatonta tietoliikennettä, mikä laajentaa niiden sovellusmahdollisuuksia, kuten etäohjausta avaruuden tehtävissä. Teollisuus- ja varastoympäristöissä on myös alettu käyttää kobotteja, jotka ovat robotteja, jotka voivat toimia yhteistyössä ihmisten kanssa [1, 2]. Näistä hyvä esimerkki on tavaran liikuttamiseen tarkoitettut robotit isoissa varastoissa.

2.2. Palvelurobotit

Palvelu- ja hoivaroboteissa korostuu ihminen-kone-vuorovaikutuksen puolet. Robottien tulee pystyä tulkitsemaan ihmisten antamia viestejä, kuten puhe- ja elekieltä, sekä osata kommunikoida ihmisten kanssa esimerkiksi äänen ja eleiden avulla. Palvelu- ja hoivaroboteissa keskitytään erityisesti ihmisten kanssa tapahtuvaan kommunikaatioon, ja siksi liikkeen tarkkuus ja voima eivät ole niin keskeisiä ominaisuuksia [3]. Palvelurobotteja voidaan käyttää mm. hotellin aulassa tai hoivatyössä.

Palvelurobotteihin voidaan lukea myös muita robotteja, ja eri määritelmiä palveluroboteille on olemassa. Eräs määritelmä on, että palvelurobotti on robotti, joka hoitaa hyödyllisiä tehtäviä ihmisille tai tavaroille, poislukien asioiden valmistamiseen tarkoitettu työ [3]. Tämän määritelmän perusteella palvelurobotin ei välttämättä tarvitse palvella ihmistä. Tällaisesta robotista hyvä esimerkki on suosiota kasvattaneet robotti-imurit ja robottiruohonleikkurit. Näissä roboteissa voidaan käyttää tekoälyä tunnistamaan oma sijainti sensoreiden perusteella, tai tunnistamaan esteitä. Yleensä näissä laitteissa on hinnan takia jouduttu säästämään laskentatehossa, joten kuvantunnistukseen ja navigointiin on kehitetty siihen tarkoitettuja algoritmeja [4].

2.3. Terveydenhuolto

Terveydenhoidossa käytetään tekoälyä monissa eri paikoissa. Terveydenhoidossa käytetty tekoäly voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan: fyysiseen ja virtuaaliseen tekoälyyn. Fyysinen tekoäly sisältää fyysiset proteesit, robotit kirurgisissa toimenpiteissä ja vanhusten liikkumisen avustaminen. Virtuaalinen tekoäly keskittyy ihmisten keräämään dataan ja sen analysointiin. Tutkittava data voi sisältää esimerkiksi geenitietoa, terveystietoa, puettavien älylaitteiden, kuten älykellojen, tuottamaa dataa tai vaikkapa suuresta joukosta kerättävää tietoa terveyskäyttäytymisestä. [5, 6] Myös kuvantamisessa käytetään tekoälyä avustamaan lääkäreitä tunnistamaan erilaisia asioita kuvista. Luonnollisen kielen käsittelyn parannukset ja datan määrän jatkuva kasvu mahdollistaa tekoälyn käytön monissa uusissa paikoissa. Merkittävimmät robotiikan sovellukset terveydenhuollossa ovat kuitenkin kirurgiassa.

2.3.1. Robotiikka kirurgiassa

Kirurgiassa käytetään yhä enenevässä määrin robotteja kirurgien työn tarkkuuden ja monipuolisten liikkumismahdollisuuksien lisäämiseksi. Vielä ollaan vaiheessa jossa robotti ei tee omia päätöksiä vaan on täysin etäohjattu kirurgin toimesta. Tämäkin jo mahdollistaa esimerkiksi etäohjauksen kauempaa kuin leikkaussalista, joka voisi parantaa kirurgien saatavuutta. Tulevaisuudessa saattaa olla mahdollista käyttää tekoälyä ainakin osittain ohjaamaan kirurgisia robotteja, esimerkiksi leikkausten suunnittelussa ja ohjauksessa. Tekoälyn käytöstä onkin jo muita esimerkkejä terveydenhoidon alalta [5].

Kirurgisille roboteille erityisen tärkeää on tarkkuus ja 3d mallintaminen suhteessa leikattavaan ja mahdollisiin instrumentteihin. Mahdollisimman monipuoliset liikkumismahdollisuudet ovat myös helpottava tekijä leikkauksissa. Tunnetuin esimerkki on Da Vinci -robotti, josta on myös tehty eniten tutkimuksia. Se onkin hyvä esimerkki kauko-ohjatusta leikkausrobotista. Kirurgi kontrolloi robottia ohjausyksiköstä jossa on stereoskopinen näyttö, joka on tarkoitettu 3d-materiaalin katseluun, ja sitä ohjataan sormille tarkoitetuilla ohjaimilla. Robotti seuraa kirurgin ohjaimilla tekemiä liikkeitä, ja robotin kädet ovat suunniteltu samoihin liikeratoihin kuin ihmisen käsi. Da Vinci -robotin suunnittelussa keskityttiin luotettavuuteen, intuitiiviseen ohjaukseen ja kuuteen vapausasteeseen (eng. degrees of freedom, DOF) kädessä jonka päälle erityistä huomiota kiinnitettiin pihtien tartuntaan ja stereoskopiseen visualisaatioon. Da Vinci -robotin suosio kasvattaa robottien käytön tunnettavuutta ja luotettavuutta. Eräässä tutkimuksessa myös kerrotaan, miten tekoälyn kasvava kiinnostus nostaa sen näennäistä luotettavuutta ja näin nostaa tekoälyavusteisen leikkauksen yleistä kannatusta. [7]

Robottien käyttö leikkauksissa parantaa monia asioita korkeamman hinnan kustannuksella. Tähystysleikkauksissa saadaan nopeampi paranemisaika ja pienemmän arvet verrattuna avoleikkauksiin. Tähystysleikkauksia kuitenkin on hankalampi tehdä koska käsille ja työkaluille on vähemmän tilaa. Näkeminen on myös haastavaa kameroidenkin kanssa. Robottiaavusteiset leikkaukset paikkaavat näitä ongelmia etenkin tähystysleikkauksissa, koska robottien pieni tilantarve mahdollistaa tarkemmat ja monimutkaisemmat liikkeet. Monet tähystysleikkauksiin suunnitellut

avustavat robotit pystyvät operoimaan pienestä aukosta iholla, tarjoten käyttäjälle tietoa kameroiden ja haptisen palautteen avulla. Tekoälyä voidaan käyttää myös avustavana tekijänä. Esimerkiksi prossessien ehdottamisessa ja joissakin tapauksissa osittaisessa ohjauksessa esimerkiksi automaattisessa tikkauksessa.

Robottikäisien liike perustuu suurimmaksi osaksi taljoihin, jotka kiinnittyvät hallittavaan käteen, ja kauempana oleviin moottoreihin, jotka mahdollistavat liikkeen hallinnan ja ohjauksen [8]. Taljat myös mahdollistavat sormien lisäksi myös letkujen ohjauksen esimerkiksi kolonoskopiassa.

2.3.2. Kirurgiassa käytettävä tekoäly

Aleks Attanasio et al. esittävät eri tekoälyn tasoja leikkausroboteissa. Tasoja on yhteensä viisi, jotka kuvaavat leikkausrobottien autonomian tasoa kirurgisissa toimenpiteissä. Taso 0, johon lukeutuu suurin osa tämänhetkisistä leikkausroboteista on robotti jolla ei ole ollenkaan päätäntävaltaa. Se on täysin kirurgin ohjaama. Tasolla 1 robotti voi avustaa kirurgia kognitiivisellä ja fyysisellä avustuksella. Tasolla 2 robotti voi automaattisesti suorittaa yksittäisiä tehtäviä kuten tikkaus. Tasolla 3 robotti on melkein itsenäinen, mutta leikkauksen yleinen suunnitelma ja tavoitteet on määritelty etukäteen kirurgin toimesta. Se pitää kirurgin ajantasalla mitä se aikoo tehdä, myös leikkauksen edetessä. Se osaa myös mukautua muuttuviin olosuhteisiin. Tasolla 4 robotti on täysin itsenäinen ja voi hoitaa sarjan tehtäviä täysin itsenäisesti leikkauksen suunnittelusta lähtien [9]. Korkeammilla autonomian tasoilla robotti voi mukautua ja reagoida paremmin yllättäviin tilanteisiin ja muutoksiin leikkauksen aikana.

Kun kirurginen tarkkuus kehittyy edelleen, se mahdollistaa myös erittäin tarkat leikkaukset, kuten aivojen huipputarkat toimenpiteet. Musk esittelee julkaisussaan tapaa, jolla hän aikoo asentaa 3072 elektrodia Neuralink-laitteelleen [10]. Leikkausta varten on kehitetty erityisesti tarkoitettu robotti, joka kykenee asentamaan elektrodeja 192 kappaletta minuutissa mikrometrin tarkkuudella automaattisesti. Robotti onnistuneesti asensi elektrodit rottaan ja heillä onkin meneillään lupa ihmiskokeisiin.

2.4. Autonominen auto

Samaan tapaan kuin kirurgiassa, myös autoissa on ollut jo pitkään käytössä avustavia toimintoja. Esimerkiksi lukkiutumattomat jarrut ja luistonesto voidaan laskea ajoa avustavaksi. Mutta on olemassa myös edistyneempiä ennakoivia järjestelmiä joissa auto voi sensoreiden ja kameroiden avulla huomata, varoittaa ja jarruttaa ettei auto joudu kolariin. Täysin autonomista ajamista ei kuitenkaan ole vielä laajasti saatavilla kuluttajille. Vaihtelevat sääolosuhteet, tien kunto ja muiden autojen huomioiminen ovat suuria esteitä laajemmalle käytölle. Puhumattakaan riskeistä joita virheet voisivat aiheuttaa. Myös autoissa on eri tasoja autonomialle, näistä tasoista voi lukea mm. Marco Galvanin tutkimuksesta. Tasoja on kuusi, joista ensimmäiset tarkoittavat avustavia toimintoja ja viimeinen taso edustaa täysin autonomista ajamista, jossa matkustajan ei tarvitse osallistua ajoon millään tavalla. [11]

2.5. Robottiproteesikädet

Proteesikäsiä on tehty jo pitkään, mutta robottisia proteeseja on aloitettu tekemään vasta parin viimeisen vuosikymmenen aikana. Yleisimmät proteesit ovat olleet, ja ovat vieläkin, proteeseja, jotka toimivat kokonaan kehon omilla lihaksilla ja voimalla. Näissä proteeseissa ei ole yhtään sähköllä toimivaa osaa, vaan kaikki liike luodaan jäljellä olevan kehon avulla. Nämä proteesit ovat myös paljon halvempia kuin metallista tehdyt robottikädet.

3d-tulostusteknologia on mahdollistanut helpon ja halvan muoviosien valmistuksen, jonka avulla on luotu 3d-tulostettavia proteeseja. 3d-tulostetun proteesin hinta on muutaman sadan euron paikkeilla, kun kehon voimalla toimivien proteesien hinta voi olla 4000 ja 20000 euron väliltä. Robottiproteesi on hinnaltaan 20 000 ja 100 000 euron välillä.[12]

Kaikkia proteeseja ei luoda kopioiksi ihmisen vastaavista osista. Esimerkiksi Cybathlon 2020 kisaan osallistunut, kuvassa 1 näkyvä touch hand 4.5, käyttää vain peukaloa, etusormea ja nimetöntä. Sormien määrän vähentäminen ja koko käden 3d-tulostus laskivat käden hintaa huomattavasti. Jokaiselle sormelle on oma moottori, joka tuottaa sille liikkeen. Proteesin käteen kiinnittävän kannan luonti maksaa vain 500 dollaria verrattuna muihin kilpailussa käytettyihin proteeseihin, joiden kantojen valmistus voi maksaa yli 3000 dollaria.[13]

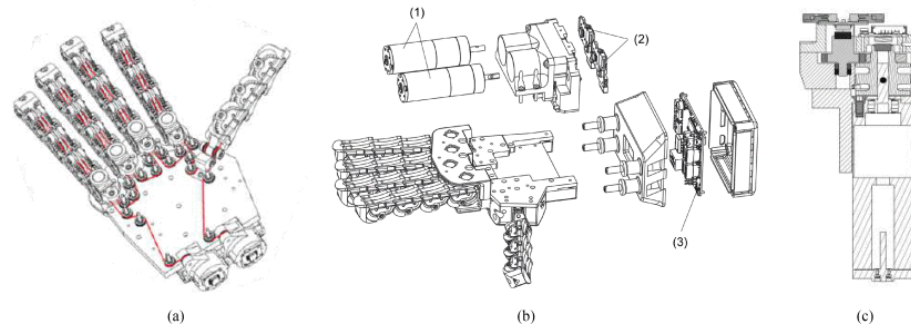


Kuva 1. kuvia touch hand 4.5:stä ¹

Kuvassa 2 näkyvä Softhand 2, on proteesikäsi, joka myös kilpaili Cybathlon 2020 kisassa. Tässä proteesissa oli viisi sormea ja se käyttää moottoreita sekä siimaa sormien tarkkaan liikuttamiseen, samoin kuten tässä projektissa käytettävät InMoov-robotin kädet. InMoov-robotin kädessä jokaiselle sormelle on oma siima ja servo, mutta Softhand 2 käyttää kahta moottoria yhden siiman päädyissä kaikkien sormien liikuttamiseen. Vapausasteiden määrä kuvaa kuinka monen akselin suuntaisesti tai ympäri jonkin asia voi liikkua. Esimerkiksi ihmisen sormessa on neljä vapausastetta. InMoov-robotin kädessä on viisi vapausastetta ja Softhand 2 kädessä on 19 vapausastetta nerokkaan väkipyöräsystemin ansiosta, jonka läpi käden yksi siima kulkee. Proteesikädet tavoittelevat samaa toiminnallisuutta kuin ihmisen käsi ja Softhand 2 on lähellä sitä, sillä ihmisen kädessä on 27 vapausastetta.[14]

¹"Touch Hand 4.5 demonstrating the pinch grip" by Kashereya Moodley et al. CC-BY 4.0 [13]

²"Sketches of SoftHand 2 prototype" by Cosimo Della Santina et al. CC-BY 4.0 [14]



Kuva 2. kuva sohand 2 käden mallista ²

2.5.1. Robottiproteesikäsen liikuttaminen

Kehon voimalla toimivia proteeseja ohjataan liikuttamalla jäljellä olevaa kehoa, mutta robottiproteesit tarvitsevat sähköisiä signaaleja toimiakseen. Nämä sähköiset signaalit hankitaan yleisesti lihassähkökäyräsensorien (eng. electromyography, EMG) avulla, jotka kiinnitetään ihon pinnalle lihasten päälle. Sensorit voivat sitten mitata lihasten aktiivointia ja lähettää signaalin proteesikäteen sen mukaan, miten voimakkaasti lihasta jännitetään. EMG-sensorit tunnistavat tarkoitetun liikkeen yli 90 prosentin todennäköisyydellä [12].

EMG-sensorit yhdistetään yleensä jäljellä olevaan osaan puuttuvasta kädestä, mutta Shibasaki, Taro ja Jin Kosuke kehittivät menetelmän neuroverkon avulla. EMG-sensorit kiinnitetään jäljellä olevaan käteen, ja neuroverkko päättelee halutut liikkeet seurattavan käden asennoista. Tämä paransi proteesikäden liiketunnistuksen tarkkuutta 5 prosenttiyksiköllä verrattuna pelkästään EMG-signaaleja hyödyntävään käteen [15]. Seuraavana vuonna samat tutkijat jatkoivat neuroverkon kehittämistä ja pystyivät testaamaan monimutkaisempia liikkeitä proteesikäden avulla. Tällä kertaa käden liiketunnistuksen tarkkuus nousi lähes 10 prosenttiyksikköä verrattuna pelkkien EMG-signaalien käyttöön perustuvaan käteen [16]. Luomaamme robottia ei ohjata EMG-sensoreiden avulla, mutta tulevaisuudessa mahdollisesti käytetään neuroverkkoja robotin liikkeiden valintaan eri tilanteissa.

Condori ja kumppanit kehittivät menetelmän tarkoitettujen liikkeiden päättelemiseen aivokäyttöliittymän (eng. brain machine interface, BMI) mittaamista tiedoista. Tämä proteesikäden ohjausmenetelmä ei ole vielä käyttökelpoinen jokapäiväisessä käytössä pitkän laskuajan vuoksi. Jotta menetelmän laskuaikaa voitaisiin lyhentää hyväksyttävälle tasolle, proteesikäden tulisi olla yhteydessä tietokoneeseen koko käytön ajan. Tämä ei kuitenkaan ole käytännöllinen ratkaisu proteesin päivittäiseen käyttöön. Tulevaisuudessa, kun minitietokoneiden suorituskyky kasvaa, BMI:n integroiminen proteesikäsiin voi olla paras kädenohjausvaihtoehto sen intuitiivisuuden vuoksi [17].

2.5.2. Ihmismäisen liikkeen tuottaminen robottiproteesikäsisä

Robottikädet, joissa on enemmän vapausasteita, kuin liikkeiden suorittamiseen tarvitaan, tarjoavat lukuisia eri polkuja, joiden avulla käsi voi liikkua pisteestä A pisteeseen B. Käänteiskinematikan (eng. inverse kinematics) avulla voidaan

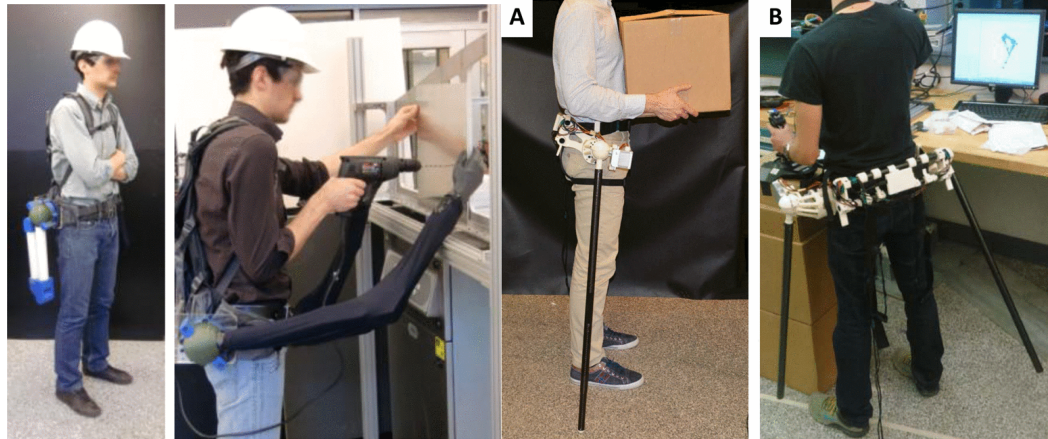
laskea käden nivelten sijainnit käden päätepisteen perusteella. Tätä tekniikkaa käytetään ihmismäisten käden liikkeiden luomiseen ja fyysisen terapian tukemiseen ulkoisten tukirankojen avulla. Tutkimuksissa on havaittu, että ihmiset korjaavat mahdollisia virheellisiä liikkeitä lantio- ja olkapäänivelissä liikuttamalla kyynärpäätä. Tämän ja muiden ihmisten liikkeiden perusteella on luotu painotettu käänteiskinematiikkamatriisi, jonka avulla voidaan ohjelmoida robottikädet liikkumaan ihmismäisesti [18].

On myös muita tapoja saavuttaa ihmismäinen liike robottikäsissä. Vuonna 2015 julkaistiin artikkeli nimeltä "Human-Like Motion Generation and Control for Humanoid's Dual Arm Object Manipulation", jossa tutkijat kehittivät liikemallin kaksikätiselle robotille esineiden nostamista ja siirtämistä varten. Tämä malli perustui ihmisten liikeaineistoon, joka kerättiin Xsens-seurantapuvulla. Malli kykeni luomaan erittäin ihmismäisiä liikkeitä, mutta sen rajoituksena oli tarve suurelle määrälle ihmisten liikeaineistoa [19]. Tämä lähestymistapa ei sovellu InMoov-robotillemme, koska liikeaineiston kerääminen on työlästä ja vaatii välineitä, jotka ylittävät budjetin.

Vuonna 2018 kehitettiin nivelliikemalli robottikäsien ohjaamiseen. Tämä nivelliikemalli perustui nivelten asentoihin ja mahdollisti melko ihmismäisten liikkeiden luomisen ilman käänteiskinematiikkaan liittyviä laskutoimituksia. Tutkijat testasivat nivelliikemallia suorittamalla robottien liikkeitä suoraan pisteestä A pisteeseen B ilman monimutkaisia laskelmia. Tutkimuksessa ihmisten mielipiteitä kerättiin, ja he kokivat robotin, joka käytti nivelliikemallia liikkumiseen, lähestyttävämmäksi ja turvallisemmaksi [20]. Seuraavana vuonna samat tutkijat yhdistivät luomansa nivelliikemallin karteeseeseen liikemalliin, jossa käytettiin myös käänteiskinematiikan yhtälöitä. Tuloksena syntyi yhdistetty malli, joka tuotti lupaavampia liikkeitä verrattuna pelkkään nivelliikemalliin. Tämä yhdistetty malli ei tarvinnut yhtä monimutkaisia käänteiskinematiikan laskelmia, ja molemmat robotit, joissa tätä mallia testattiin, suoriutuivat tehtävistään huomattavasti nopeammin kuin ne, jotka käyttivät pelkästään käänteiskinematiikkaa [21].

2.5.3. Ylimääräiset robotti-raajat

Proteesien ja robottien lisäksi robottikäsiä ja raajoja on lisätty ihmisiin, joilta ei puutu raajoja. Vuonna 2012 luotiin puettava reppu, josta hieman lantion yläpuolelta alkaa kaksi robottikästä [22]. Reppu on näkyvässä kuvassa 3. Näiden käsien tarkoitus oli auttaa työntekijöitä esimerkiksi talojen rakentamisessa. Kun paneeleja pitää kiinnittää tukirakenteisiin, yhden työntekijän täytyy pitää paneelia paikoillaan, kun toinen ruuvaa paneelin kiinni tukirakenteisiin. Näiden robottikäsien tarkoitus oli korvata toinen työntekijä ja tukea paneeleja, jotta robottikäsien käyttäjä voi kiinnittää paneelit tukirakenteisiin. Myös lisäjalkoja on harkittu tukemaan ihmisiä epämukavissa työasennoissa. Vuonna 2017 luotiin prototyyppi kahdesta robottijalasta, jotka puetaan vöiden avulla lantion ympärille [23]. Lisäjalat näkyvät kuvassa 4. Näiden robottijalkojen tarkoitus oli tukea pukijaa istumis- ja seisomisasennoissa. Esimerkiksi lentokonemekaanikot voisivat käyttää näitä itsensä tukemiseen epämukavissa työasennoissa, joissa mekaanikkojen täytyy viettää paljon aikaa.

Kuva 3. Robottilisäkädet ³Kuva 4. Robottisäjalat ⁴

2.6. Robottikädet

Robottikäsiä on luotu moneen eri tarkoitukseen. Suurin osa robottikäsisistä on saanut selvästi inspiraatiota ihmisten käsistä. Monet robottikädet ovat kolminivelisiä kuten ihmisten kädet, mutta robottikäsiensä käsiterät ovat erilaisia käyttötarkoituksesta riippuen. Ihmisiä avustavien ja ihmisten kanssa vuorovaikuttavien robottien käsiterät ovat yleensä ihmismäisiä, kuten suuri osa proteeseista. Ihmismäisyyttä tarvitaan näissä tarkoituksissa, koska se antaa robottikäsillemme vaikutuksen lähestyttävyydestä.[24]

Osa robottikäsisistä pystyy liikuttamaan sormiaan tarkasti kuten vuonna 2012 Jamie K. Paiek et al. valmistama robottikäsi ihmisen ja robotin vuorovaikutusta varten [25]. Kaikki ihmisiä avustavat robotit eivät tarvitse tarkkoja sormiliikkeitä, mutta käsien käyttäjille on helpompaa, jos kädet näyttävät ihmismäisiltä, vaikka niissä ei samoja taitoja olisikaan. Esimerkiksi uudessa syömisessä avustavassa robottikäsiävarren kädessä, joka esiteltiin vuonna 2020 on peukalo ja kolme ylimääräistä sormea, jotta käsi näyttäisi ihmismäiseltä. Käden toiminnan kannalta käsiterä tarvitsee vain peukalon, koska lusikka on kiinnitetty siihen ja muiden sormien liikkuminen on tarpeetonta [26]. Robottikädet, jotka eivät ole suorassa vuorovaikutuksessa ihmisten kanssa korvaavat ihmismäisen käsiterän tehtävään sopivammalla. Esineiden manipulaatiota varten robottikäsisissä on ihmismäisen käden sijasta pihdit, jotka helpottavat esineistä kiinnisaamisen ja kiinnipitämisen [27, 28]. Robottikäden päähän voi kiinnittää minkä tahansa työkalun minkä käyttäjä kokee tarpeelliseksi. Esimerkiksi osalla putkistojen tarkistusroboteista on kamera kiinnitettynä robottikäden päähän [29].

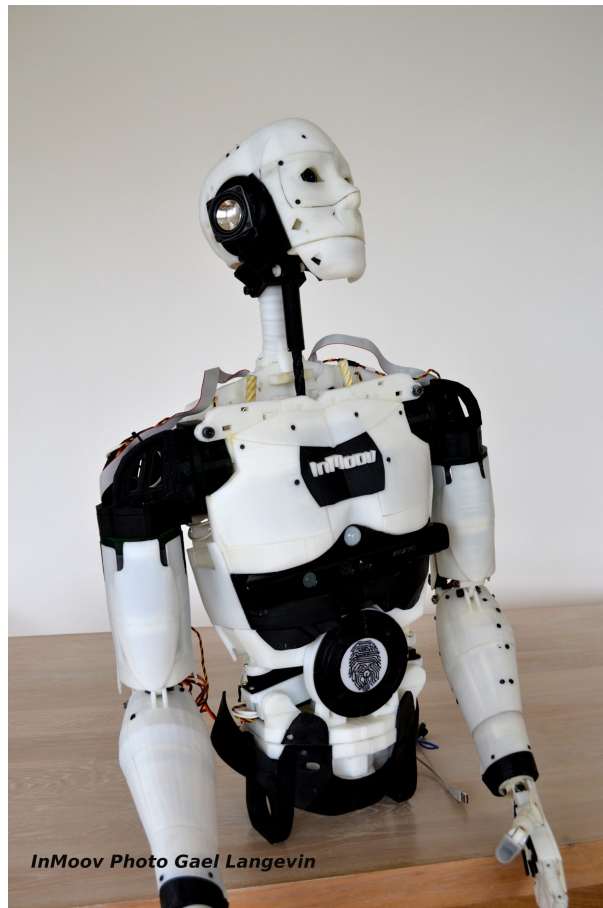
2.7. InMoov

InMoov 3d-tulostettavia robotteja, kuvassa 5, on käytetty maailmanlaajuisesti moniin eri tarkoituksiin. InMoov-robotti on avoimen lähdekoodin ihmismäinen robotti,

³Copyright © 2012, IEEE [22] IEEE sallii kuvien uudelleenkäytön ilman lisenssiä opinnäytetöissä.

⁴Copyright © 2017, IEEE [23] IEEE sallii kuvien uudelleenkäytön ilman lisenssiä opinnäytetöissä.

joten kuka vain voi luoda sellaisen itse ja muokata osia omaan tarkoitukseen sopiviksi. InMoov-robotin harrastusmielisessä kasaamisessa voi tulla vastaan paljon ongelmia. Broota Sumir sekä Juho Bruun et al. kohtasivat kumpikin omissa tutkimuksissaan ongelmia InMoov-robotin käsien kasaamisessa. 3d-tulostetut osat ovat monesti hauraita ja 3d-tulostimien virhemarginaalin vuoksi eivät sovi aina suoraan yhteen. Tulostetut osat vaativat suuren määrän hiomista osien pienentämiseksi ja kitkan vähentämiseksi. Sumir joutui käyttämään vasaraa käden ulkoisten paneelien kiinnittämiseen. [30, 31]



Kuva 5. InMoov robotti. Kuvaaja Gael Langevin©⁵

2.7.1. InMoov-robotin käsien suunnittelu

InMoov-robotin kädet voidaan tulostaa nopeasti ja halvasti, mutta sisäisen suunnittelun ja servojen määrän vuoksi käsi painaa paljon muihin 3d-tulostettaviin käsiin verrattuna. InMoov-robotin kädet arvioitiin huonoimmaksi valinnaksi esineiden kiinnittamisessa vuonna 2020 julkaistussa artikkelissa [32]. InMoov-robotin kädet kuitenkin pärjäsivät paremmin kuin muut kädet verrattaessa käsien kiinnipitämiskykyä esineitä ilmassa pidettäessä ja liikuttaessa.

⁵"INMOOV" and photo by Gael Langevin used with written permission from Gael Langevin

Sidher et al. Lähestyivät tätä ongelmaa muokkaamalla InMoov-robotin käsien suunnittelua lisäämällä ylimääräisen servon käsien peukaloihin ja lisäämällä käsiin kameroita ja etäisyyttä mittaavan sensorin. Ylimääräinen servo antoi peukalon kääntyä paikoillaan, joka mahdollisti käden ottamaan kiinni esineistä monimutkaisemmilla otteilla, jotka eivät ennen olleet mahdollisia. Kamerateat ja etäisyys sensori mahdollistivat itsenäisen esineiden kiinniottamisen [33]. Minja Axelsson vaihtoi rakentaessaan kädet Open Bionics:n Ada käsiin [34].

2.7.2. *InMoov-robotin käyttötarkoitukset*

InMoov-robotti on ihmismäinen robotti, joten robottia ja sen osia voidaan käyttää tarpeissa, missä ihmismäisyys on tärkeää. Esimerkiksi käsiproteesien on tärkeä olla ihmismäisiä, jotta niiden käyttäjät totuisivat käsiin nopeammin ja InMoov-robotin käsiä onkin muokattu proteesikäsiksi [31, 12]. InMoov-robotin ihmismäisyys tuo myös huonoja puolia robotille. Fortunati et al. vertasivat neljän eri robotin tuottamia tunteita opiskelijoissa, jotka olivat vuorovaikutuksessa robottien kanssa tunnin ajan. InMoov-robotti herätti eniten negatiivisia tunteita opiskelijoissa, mutta myös eniten uteliaisuutta verrattuna kolmeen muuhun esiteltyyn robottiin. Tämän syynä uskottiin olevan InMoov-robotin ihmismäinen ulkonäkö ja outo laakso -efekti. [24]

Broota kirjoitti artikkelissaan, että InMoov-robotin käden huonojen kiinniottokyvyn ja kiinnipitämiskyvyn vuoksi InMoov-robotin käsiä ei kannattaisi käyttää missään tilanteessa, joissa ihmismäinen käsi ei ole välttämättömyys [31]. InMoov-robotteja on kuitenkin käytetty muissa tarkoituksissa. Cheng et al. loivat ImNEU nimisen robotin InMoov-robotteja muokaten. ImNEU-robotti oli täysin itsenäinen eikä tarvinnut olla yhdistettynä tietokoneeseen toimiakseen tai liikkuaakseen. ImNEU-robotissa on paljon enemmän sensoreita ympäristödatan keräämiseen kuin InMoov-robotissa, jotta robotin voi ohjelmoida toteuttamaan monimutkaisempia toimintoja kuin mihin InMoov-robotti pystyy. InMoov-robotteja on myös käytetty viittomakielen opettamisessa lapsille [34, 35]. Robotin käyttö viittomakielen opetuksessa sai osan lapsista keskittymään paremmin opetukseen. Robotin ihmismäisyys myös pelotti osaa lapsista, jotka olivat robotin opetuksessa ja osa lapsista kieltäytyi kaikesta vuorovaikutuksesta robotin kanssa [34].

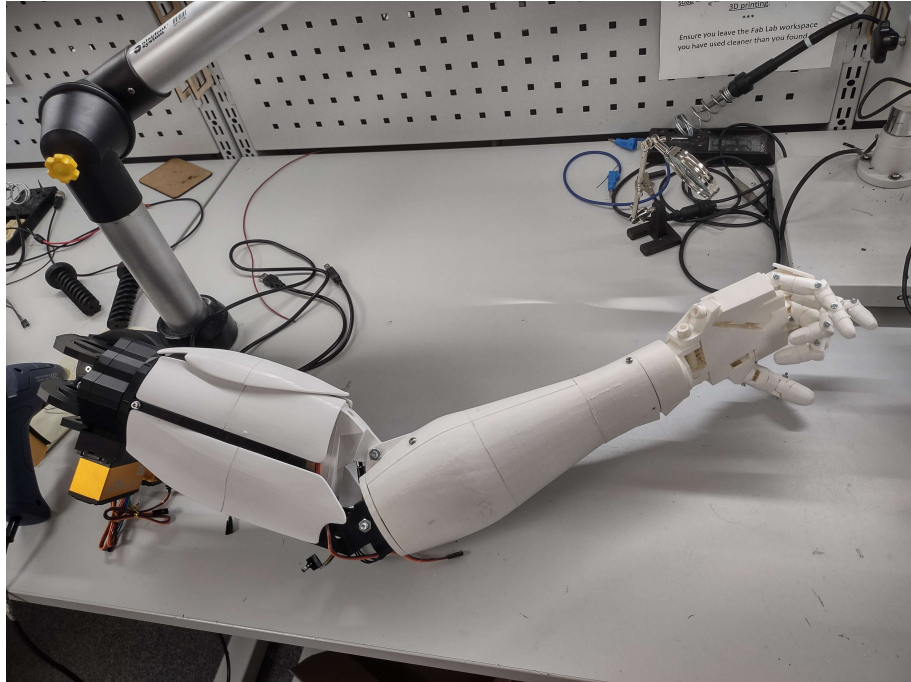
2.8. Robottien ihmisenkaltaisuus ja outo laakso -efekti

Ihmismäisen robotin luomisessa ongelma ihmisten mieltymyksen kannalta on niin kutsuttu outo laakso -efekti. Termin on ensimmäisenä lanseerannut vuonna 1970 silloinen Tokion teknillisen yliopiston robotiikan professori Masahiro Mori ja sillä kuvataan robotista aiheutuvaa outouden tunnetta. Liikkeellä on tärkeä vaikutus outo laakso -efektin aiheutumiseen, voimistaen sekä positiivisia, että negatiivisia tunteita [36, 24]. Morin hypoteesi olikin, että ihmismäinen robotti, joka epäonnistuu ihmismäisen liikkeen tuottamisessa, aiheuttaa ihmisissä inhon tunteita [36]. Kuten edellisissä esimerkeissä huomattiin, InMoov-robotin ihmismäisyys näyttäytyy ongelmana. Tämä ilmiö ei koske vain InMoovia, vaan yleisesti liian ihmismäinen robotti nähdään kielteisenä. Hyvin ihmisenkaltaisista roboteista ei ole vielä päästy

tekemään paljota tutkimusta ja siksi robottien ihmisenkaltaisuudesta ei olekaan päästy vielä yhteisymmärrykseen, mutta on kuitenkin havaittu, että ihmismäisten robottien käyttö alzheimerista ja autismista kärsivien potilaiden avustamisessa on ollut hyödyllistä [37, 24]. Hotellialalla palvelurobotin olisi hyvä olla enemmän ihmisenkaltainen työssä tarvittavan sosiaalisen kanssakäynnin vuoksi. Joanne Yun teettämässä analyysissä nähdään kuitenkin, että iso osa arvostelijoista ei haluaisi robottien olevan ihmisen näköisiä, pitäen näitä jopa pelottavina. Enemmistö myös vieroksui ihmismäisen palvelurobotin konseptia [38]. Myös robotin käyttäytyminen siltä odotettavasta kontekstista voi vaikuttaa efektiin. Outo laakso -efektin laukaiseekin robotin epäonnistuminen sille osoitetuista odotuksista, jotka muodostuvat sen mukaan, kuinka ihmismäinen robotti on [39]. Koska liike on korvaamaton ominaisuus niin ihmisille kuin eläimille, on se sitä myös roboteille. Siksi epäluonnollinen liike aiheuttaa helposti outo laakso -efektiä [36].

3. TOTEUTUS

Työn fyysinen puoli on toteutettu käyttäen 3d-tulostettavan InMoov-robotin osia ja ohjelmisto käyttäen ROS2:sta. Työssä toteutettiin robotille kumpikin olkavarsi ja toiseen olkavarteeseen kiinnitettiin valmiina oleva kyynärvarsi. Toinen, valmiiksi koottu käsivarsi on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Valmis käsivarsi ⁶

3.1. 3D-tulostaminen

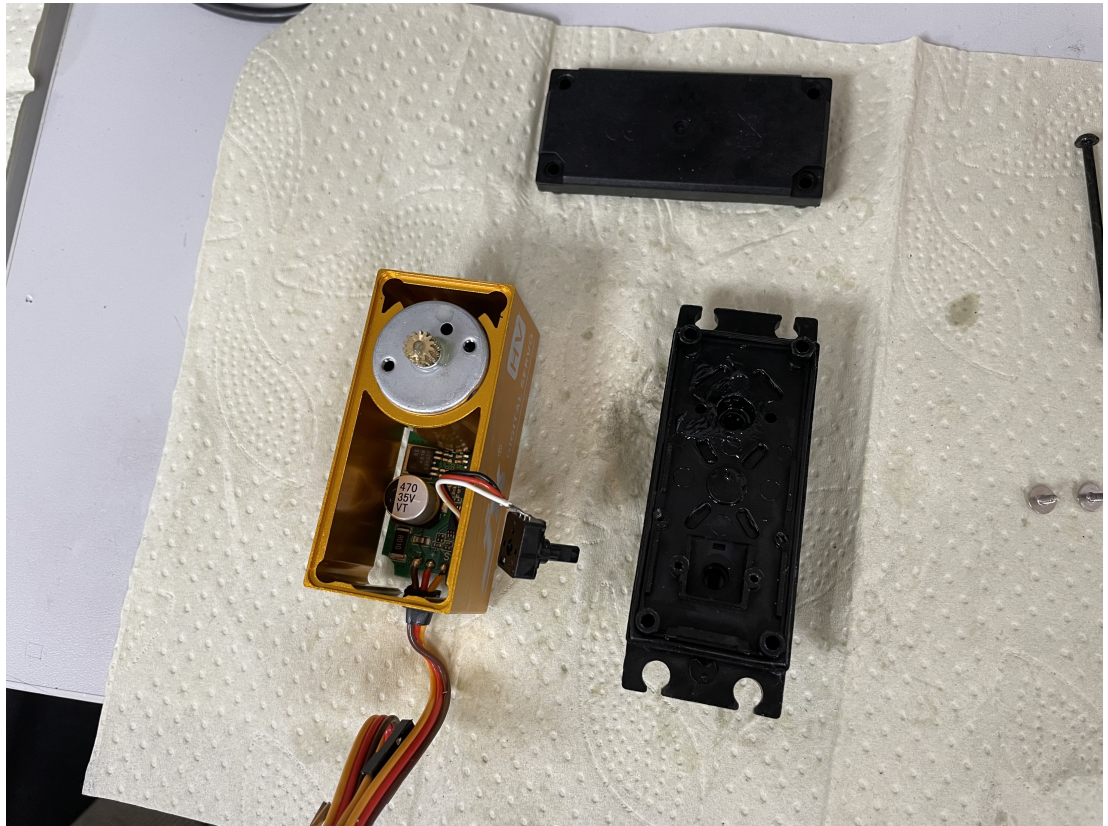
Osat tulostettiin käyttämällä Ender 3 S1 -tulostinta. Tulostusmateriaaliksi valittiin Polyetyleenitereftalaatti (eng. Polyethylene Terephthalate Glycol, PETG) yleisesti käytetyn polyaktidin (eng. Polylactic acid, PLA) sijaan. PETG on kestävämpi ja joustavampi verrattuna PLA:han. Mustanvärisissä osissa käytettiin Extrudr XPETG matta-tulostuslankaa ja valkoisissa Fiberlogyn Easy PETG-lankaa. Yhteensä lankaa meni hieman yli 3 kiloa. Tulostusasetuksissa käytettiin 30% sisätäyttöä (eng. infill), 0,2mm kerroskorkeutta, 2mm seinäleveyttä ja tukirakenteita siellä missä niitä tarvittiin.

3.2. Servot

Hauiksissa ja hartioissa päätimme käyttää pdi-hv2070mg -servoja. Päädyimme tähän valintaan vertailemalla eri servojen tehoa, saatavuutta ja hintaa. Servot eivät ole sopivia suoraan robottiin, vaan niihin täytyy tehdä muutoksia. Potentiometri täytyy irroittaa servon sisältä ja siirtää se suoraan niveleen. Tällä tavalla hammasrattaita käyttäen

⁶Kuvan omistaja Waltteri Rasila, lisenssi CC BY 4.0

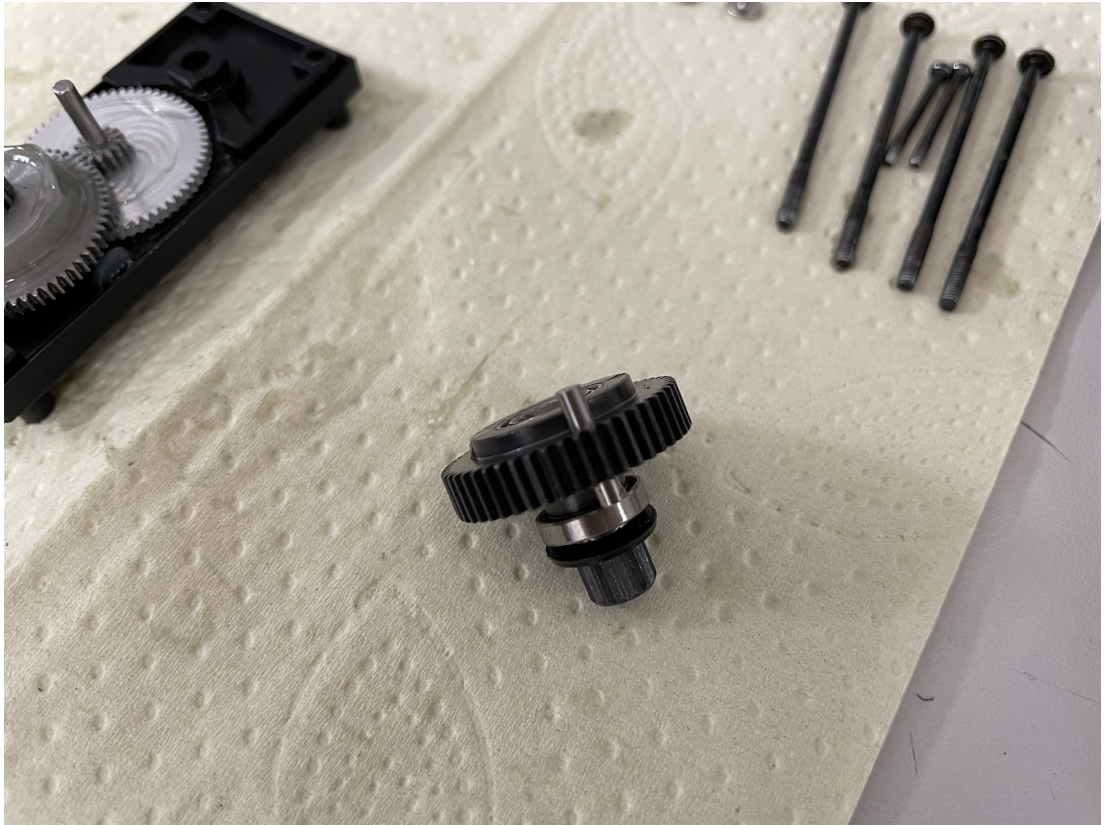
saadaan enemmän liikerataa servolle ja täten enemmän vääntöä niveleen. Aluksi servon pohja ja yläosa irroitetaan metallikuoresta.



Kuva 7. Potentiometri irroitettu yläosasta ⁷

Seuraavaksi yläosa puretaan ja yhdessä hammasrattaassa oleva metallitappi, mikä estää servon pyörimisen, poistetaan. Metallitappi on tiukasti kiinni hammasrattaassa, joten leikkasimme sen irti rautasahalla ja jäljelle jäänyt osa tasoitettiin pienoisporakoneella hiomalla. Metallitapin poiston jälkeen yläosa kasattiin uudelleen. Poistettava metallitappi on näkyvässä kuvassa 8.

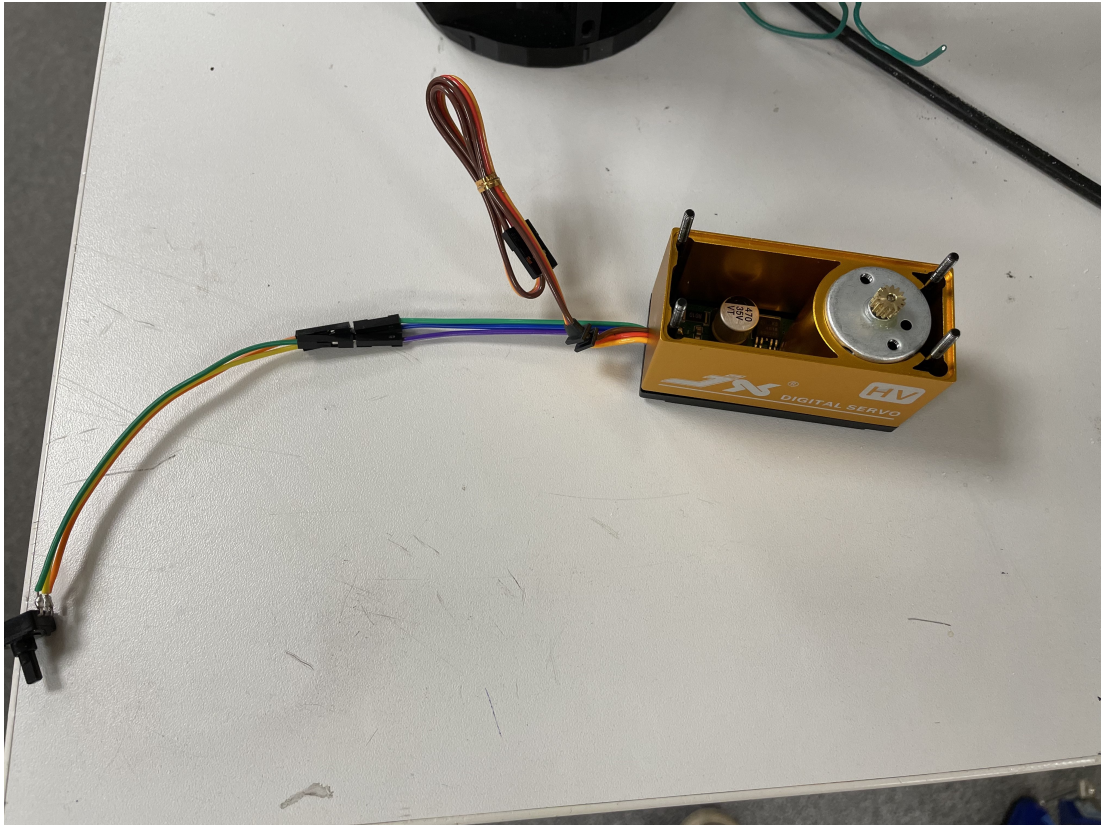
⁷Kuvan omistaja Walteri Rasila, lisenssi CC BY 4.0



Kuva 8. Poistettava metallitappi ⁸

Metallitappin poiston lisäksi potentiometri tarvitsee pidemmät johdot, sillä se kiinnitetään käteen eri paikkaan, kuin itse servo. Aluksi potentiometri irroitetaan siinä olevista johdoista, jonka jälkeen johdot irroitetaan servon piirilevystä. Johdot korvataan pidemmillä hyppylangoilla. Kun pohja kiinnitetään takaisin servoon, tulevat servon virtajohdot ja potentiometrin pidennetyt johdot ulos samasta raosta. Lopuksi potentiometriin yhdistetään vastakkaiset hyppylangat, jotta se voidaan yhdistää servoon.

⁸Kuvan omistaja Waltteri Rasila, lisenssi CC BY 4.0



Kuva 9. Potentiometri kiinnitetty hyppylangoilla⁹

3.3. Kokoaminen

Hauisten ja olkapäiden osien mallit saatiin InMoov-robotin STL-galleriasta [40, 41] osioista ”Bicep” ja ”Shoulder and torso”, ja ne tulostettiin käyttäen 3d-tulostinta. Hauikset ja olkapäät kasattiin samoilta InMoov-robotin sivuilta löytyvien kasausohjeiden mukaisesti. InMoov-robotin sivuilta saatavista osista ainoastaan hauiksen suojapaloja piti hieman hioa.

3.3.1. Hauikset

Käsivarren kokoaminen aloitettiin hauiksesta, jonka rungon osat liimattiin yhteen. Tämän jälkeen servomoottori ruuvattiin kiinni sille tarkoitettuun pesään ja servomoottoriin kiinnitettiin suurempi ruuvia muistuttava osa, jonka tarkoitus on liikkua ylös-alas servomoottorin pyöriessä, mahdollistaen olkavarren liikkeen. Tämä moottoripaketti sijoitettiin hauiksen rungon sisälle. Lopuksi hauiksen rungon ympärille kiinnitettiin suojakuoret, joista paria jouduttiin hieman hiomaan, että ne saatiin loksauttamaan paikalleen. Valmiit hauikset näkyvät kuvassa 10.

⁹Kuvan omistaja Waltteri Rasila, lisenssi CC BY 4.0

¹⁰Kuvan omistaja Waltteri Rasila, lisenssi CC BY 4.0

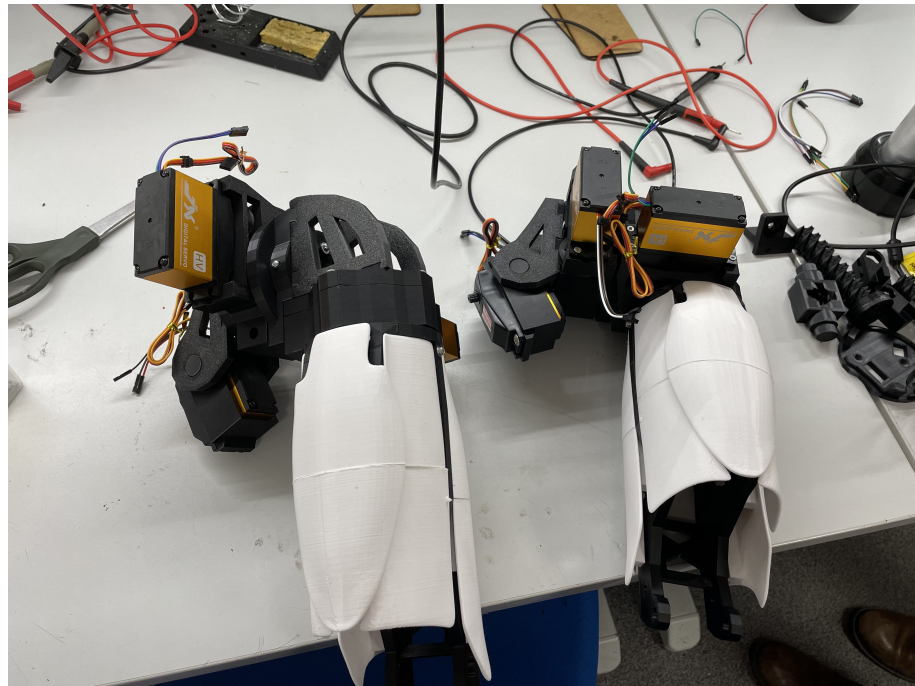


Kuva 10. Valmiit hauikset ¹⁰

3.3.2. *Olkavarret*

Seuraavaksi siirryttiin kokoamaan robotin olkapäätä. Kokoaminen aloitettiin jälleen rungon liimaamisesta yhteen ja servomoottoreiden kiinnittämisestä niille tarkoitettuihin pesiin. Yksi servomoottoreista kiinnitettiin hammasratasrakenteeseen, joka tulee hauiksen ja olkapään väliin. Servomoottori on kiinni ruuvissa, joka pyöriessään pyörittää hammasratasta mahdollistaen olkavarren pyörimisliikettä pysty akselinsa ympäri. Olkavarren vartaloon kiinnitettävään päähän tulee vastaava hammasratasrakente, jossa on sisällä kuula-aseen kuulia toimien myös laakerina, antaen käsivarrelle mahdollisuuden liikkua. Kuvassa 15 on esitetty kumpikin valmis olkavarsi.

¹¹Kuvan omistaja Walteri Rasila, lisenssi CC BY 4.0



Kuva 11. Valmiit olkkavarret ¹¹

Lopuksi valmiiseen oikean käsivarren olkkavarteen kiinnitettiin valmiina oleva kynärvarsi ja näin saatiin valmiiksi koko oikea käsivarsi.

3.4. ROS2

ROS2 on kokoelma ohjelmointikirjastoja ja työkaluja robottien ohjelmiston luomiseen. ROS1 luotiin vuonna 2007, josta lähtien sitä on kehitetty. ROS2:sta on monta jakeluversiota, joista ensimmäinen alfa-versio julkaistiin vuonna 2015. Ensimmäinen täysi jakelu, Ardent Apalone, julkaistiin pari vuotta myöhemmin vuonna 2017. Robottimme käyttää Foxy Fitzroy -jakeluversiota, joka julkaistiin vuonna 2020. Foxy Fitzroy:n tuki on loppunut kesäkuussa vuonna 2023. Tästä syystä robotin ohjelmiston ROS2 jakeluversio päivitetäänkin Humble Hawksbill versioon myöhemmin lähitulevaisuudessa. Humble Hawksbill jakelun ennustettu tuen loppuminen tapahtuu vuonna 2027.

ROS2:n avulla robottien tekijät voivat luoda virtuaalisen työtilan, jossa kaikki robotin toimintaan tarvittavat tiedostot ja ohjelmat ovat helposti löydettävissä. Työtilan muutokset tapahtuvat ROS2 komentojen avulla. ROS2 komentojen avulla luotuja paketteja voi rakentaa ROS2:n mukana tulevan colcon ohjelman avulla. ROS2:sen käyttämää koodia voi kirjoittaa joko Python tai C++ -kielillä. Molempia ohjelmointikieliä voi käyttää samanaikaisesti ja colcon-ohjelma varmistaa kaiken koodin yhteensopivuuden. Esimerkiksi ROS2 käyttää yksinkertaisia .msg tiedostoja tavanomaisten C++ header-tiedostojen sijasta. Jokainen kerta, kun paketit rakennetaan colcon:in avulla, luo colcon Python:lle ja C++:lle sopivat header-tiedostot .msg tiedoston tiedoilla.

ROS2 tarjoaa paljon eri keinoja ohjelmien väliseen kommunikointiin ja robotin ohjaamiseen. ROS2:n avulla robotin voi myös täysin simuloida ja simuloitua

robottia voi ohjata samalla tavalla, kuin oikeaa robottia. Tämä mahdollistaa myös harrastelijoiden robottien tekoa, sillä heidän ei tarvitse hankkia yhtään osaa robottia varten, ennenkuin se on simuloitu koneella ja ohjelmisto testattu. ROS2:sta voi myös käyttää robottien prototyypin tekemiseen nopeasti, sillä se ei vaadi yhtään fyysistä osaa. Ainoastaan moottorien ja tietokoneen välistä viestinlähetystä ei voida testata simulaatioversiolla.

3.5. Arduino

Käsien ohjaus tapahtuu Arduino Zero:n avulla. Arduinon käyttö on paras löytämämme vaihtoehto monen servon samanaikaiseen ohjaukseen, jos servoilla ei ole yhteistä käyttöliittymää. Robotin oikean käden sormien ohjaus toimii tietokoneella pyörivän Dynamixel Wizard sovelluksen avulla. Kaikki 5 servoa on yhdistetty yhteen johtoon, joka liitetään U2D2-virranjakajaan, jotta servot saavat tarpeeksi virtaa. Nämä ovat ainoat servot robotin käsissä, jotka toimivat näin. Hartiat tarvitsivat vahvemmat servot ja dynamixel ei tuota tarpeeksi vahvoja, joten käytetyt servot täytyy yhdistää erikseen. Tässä tapauksessa Arduino-piirit ovat parempia, sillä käytetyssä Arduino Zero:ssa on 13 liitäntää servoille, mikä on riittävästi käsissä olevalle kahdeksalle servolle.

3.6. Ohjelmisto

Hartioiden ohjaus tapahtuu ohjelmalla, jonka käyttöliittymänä toimii komentorivi. Ohjelma kysyy käyttäjältä käskyä, jonka jälkeen käyttäjällä on mahdollisuus kirjoittaa jokin komento. Jos ohjelma ei tunnista komentoa, se kertoo käyttäjälle listan kaikista hyväksyttävistä komennoista. Suurin osa komennoista toimii samalla tavalla. Ohjelmaan on tallennettu komentoon liittyvät servojen kulmat, jotka ohjelma lähettää eteenpäin julkaisemmalla komennon FollowJointTrajectory ohjaimen luomaan topic:iin. Ainut eroava komento ohjelmassa on "trial", jonka avulla käyttäjä voi asettaa itse määräämänsä kulmat jokaiselle servolle tiettyjen rajojen sisällä, sillä robotti voi rikkoo itsensä, jos servoille annetaan vääriä arvoja servojen voiman vuoksi.

Itsekirjoitetun sarjayhteyden käyttöä haluttiin alussa välttää, sillä arduinon serial-kommunikointi pystyy vastaanottamaan vain numeroita tai merkkijonoja, ja se tekee koodikannasta hieman monimutkaisemman. Sarjayhteyden käyttäminen vaatii yksinkertaisemman asennuksen, mutta siinä on vähiten valmiita toimintoja. Tämän ongelman kiertämiseksi luotiin kommunikaatio-ohjelma, joka lukee topic:ia, johon kaikki komentoviestit tulevat ja erottelee FollowJointTrajectory-viestistä kaikki kulmat. Kulmien erottelun jälkeen ohjelma luo merkkijonon, jossa kaikki komennon kulmat ovat järjestyksessä ", "merkillä erotettuina ja lähettää merkkijonon pyserialin avulla arduinolle. Pyserial on python ohjelmointikielelle tehty sarjayhteyden kanssa keskusteluun käytetty kirjasto. Arduino saa sarjayhteyden kautta merkkijonon, joten Arduinoon kirjoitettiin koodia, joka erottelee kulmat merkkijonoista ja muokkaa ne servoille sopiviksi. Simulaation ja oikean robotin ohjaamiseen on käytössä sama ohjelma, mutta simulaatorobotin nivelet liikkuvat -2 ja 2 arvojen välissä ja servot hyväksyvät lukuja vain 0 ja 180 väliltä. Kaikki arvot tulee siis muuttaa vastaamaan toisiaan simulaation ja oikean robotin välillä.

Robotin ohjaukseen käytetty toimintapalvelin jouduttiin vaihtamaan publisher node:ksi, sillä palvelin ei lähetä komentoja topic:in, josta ne voitaisiin lukea. Käyttäen followjointtrajectory -kontrollereita, robottia voidaan ohjata joko toimintapalvelimen, tai julkaisijan kautta. Yleisesti ottaen palvelin on parempi vaihtoehto, mutta koska tässä tapauksessa viestin lähettäminen Arduinolle vaati komentojen julkaisun topic:iin, jouduttiin palvelin vaihtamaan julkaisijaan.

3.7. Kommunikointi

ROS2 hoitaa kommunikoinnin sisäisesti controllermanagerilla ja ohjaimilla. Edelliset robotin kehittäjät käyttivät FollowJointTrajectory-ohjainta, joten meidänkin täytyi käyttää samaa ohjainta. Meidän olisi pitänyt kirjoittaa kaikki olemassa olevat ohjelmistot uusiksi, jos olisimme halunneet käyttää jotain toista ohjainta.

FollowJointTrajectory ohjainta voi käyttää kahdella eri tavalla. Sormien ohjaukseen käytettiin actionclient ja actionserver -paria. Actionclient vastaanottaa käyttäjältä komennot ja välittää ne JointTrajectory.goal tyyppisenä viestinä actionserver:ille. Actionserver puolestaan lähettää viestistä tiedot laiterajapinnan kautta laiterajapinnan määrittelemiin laitteistoihin.

Toinen tapa käyttää FollowJointTrajectory ohjainta on hyödyntää ohjaimen luomaa topic:ia. Jos Ros2:n kautta pyörittää simulaatiota laitteesta oikeiden laitteiden liikuttamisen sijaan actionserver ja topic:iin viestien julkaiseminen toimii samalla tavalla. Simulaatioympäristö pystyy lukemaan komentoja molemmista samalla tavalla, mutta vain actionserver pystyy lähettämään komennot automaattisesti laitteille. Viestien topic:iin julkaiseisen lisäksi täytyy kirjoittaa ylimääräinen ohjelma, joka pystyy lukemaan ohjaimen topic:ia ja jatkolähettämään viestit laitteille.

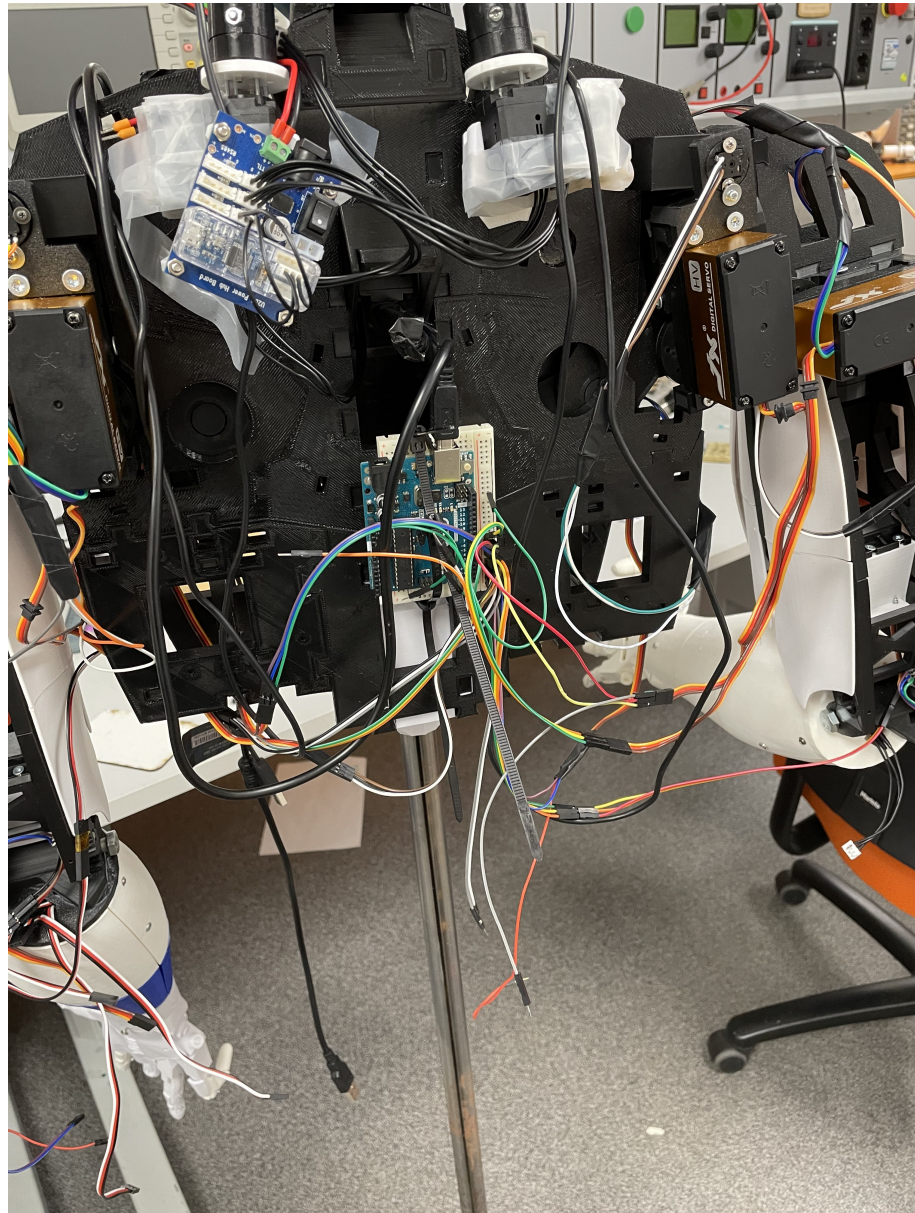
Shoulder controller ohjelmalla voi ohjata molempien puolien hartioita kirjoittamalla ohjelmaan valmiita komentoja tai antamalla itse määrätyt kulmat servoille trial komennon avulla. Saatuaan komennon ohjelmassa pyörivä ROS2 julkaisija julkaisee komennon ohjaimen topic:iin JointTrajectory tyyppisenä viestinä. Kun simuloitua robottia pidetään päällä, se lukee liikkumiskäskyn tästä topic:sta.

Käyttäksemme Arduinoa ROS2 järjestelmän kanssa olemme kirjoittaneet kommunikaattori ohjelman, jossa pyörii ROS2 tilaaja, joka lukee tietyistä topic:sta. Meidän tapauksessamme kommunikaattorin tilaaja lukee FollowJointTrajectory ohjaimen topic:ia. Luettuaan viestin topic:sta ohjelma lukee viestissä olevat kulmat ja luo merkkijonon kaikista kulmista erottaen ne vain pilkulla. Tämän jälkeen ohjelma lähettää merkkijonon arduinolle käyttäen Pyserial:ia. Pyserial lähettää merkkijonon käyttäen usb-serial yhteyttä tietokoneen ja arduinon välillä. Valitettavasti tämä tarkoittaa sitä, että toimiakseen täytyy arduinon olla yhdistettynä usb kaapelilla tietokoneeseen jatkuvasti.

3.8. Ongelmia

Kun käsivarret ja ohjelmisto olivat valmiit, kiinnitettiin ne muuhun ylävartaloon kiinni, jonka jälkeen liikkeiden sekä toimivuuden testaus aloitettiin. Aika nopeasti kävi ilmi kaksi ongelmaa liittyen käsien liikkumiseen: johdot pysyivät heikosti kiinni ja

tehokkaat servomootorit pääsivät pyörittämään liikkuvia osia irti käsien kiinnityksistä. Ongelma johtojen kanssa ratkaistiin uusimalla johdotus täysin käyttämällä parempia

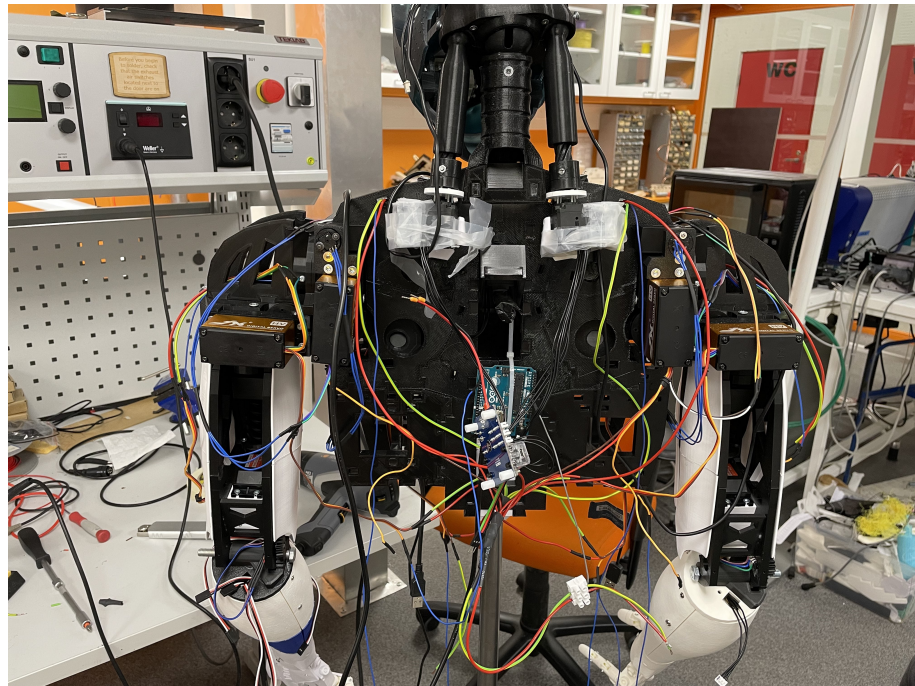


Kuva 12. Alkuperäinen johdotus ¹²

johtoja, jotka sitten kolvattiin kiinni toisiinsa. Kolvatut liitokset suojattiin sen jälkeen kutistesukalla. Kuvassa 12 näkyvät alkuperäiset johdot, jotka vain liitettiin toisiinsa kiinni, eivät pysyneet kiinni käsien liikkeessa. Johtojen uusiminen ratkaisi myös osaltaan moottorien tehokkuudesta johtuneen johtojen irtoilun. Uudet johdot näkyvät kuvassa 13. Käsien irti pyöriminen ratkaistiin yksinkertaisesti etsimällä liikkeiden rajat ja lisäämällä ne ohjelmistoon. Rajojen hakemisessa ongelmaksi muodostui käsien irtoilu ja potentiometriä liikahtelu. Käsien irroituksen jälkeen niiden uudelleenkiinnittäminen ja uudelleenjohdotus olivat hankala tehdä osumatta

¹²Kuvan omistaja Waltteri Rasila, lisenssi CC BY 4.0

¹³Kuvan omistaja Waltteri Rasila, lisenssi CC BY 4.0



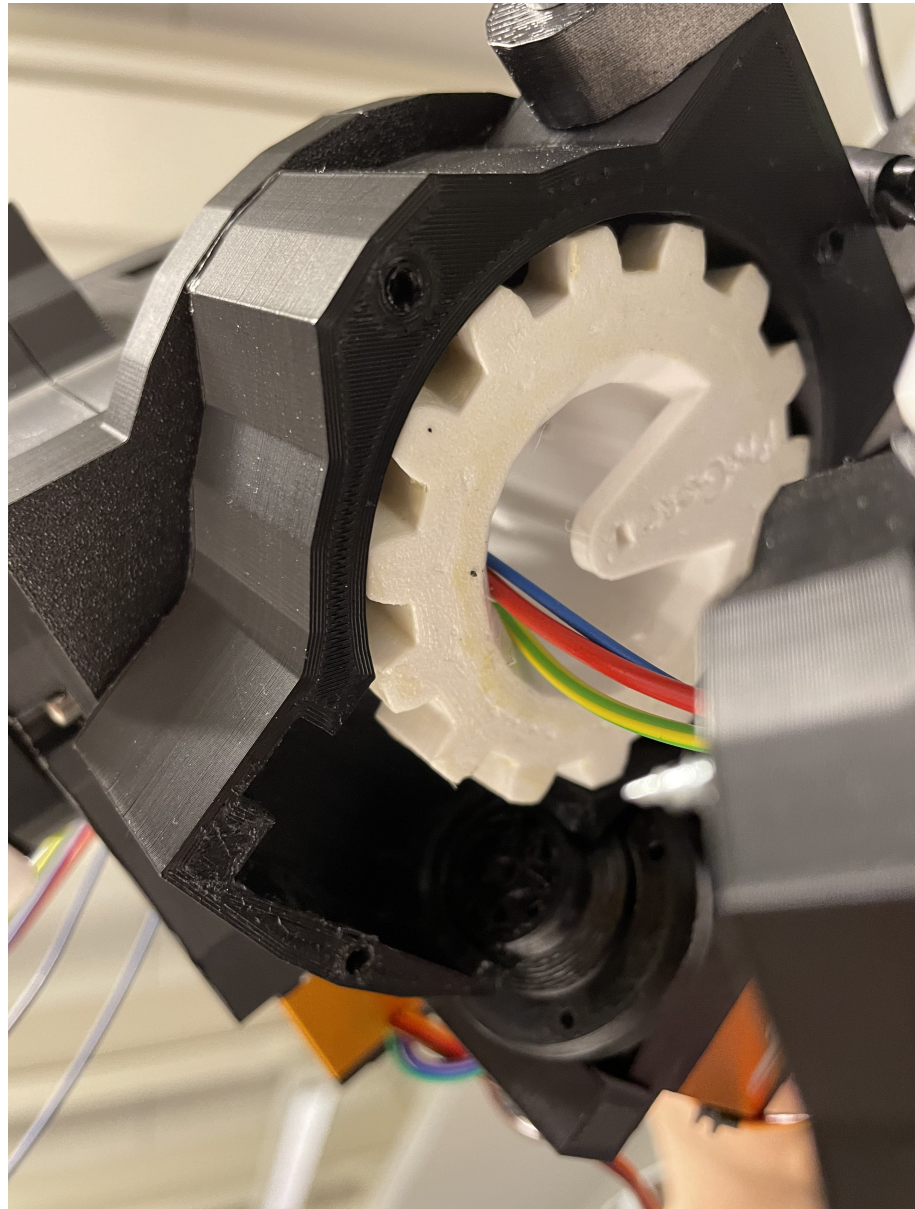
Kuva 13. Korjattu johdotus ¹³

potentiometriin, joka pääsi liikahtamaan melkein jokaisesta hipaisusta. Tämä johti raja-asteiden pieneen muutokseen joka kerta ja vaikeutti rajojen hakua. Samasta syystä käsien rajat eivät ole identtiset käsien välillä. Esimerkiksi oikean käden noston rajat ovat 0–60 astetta, missä vasemman käden nostolle ne ovat 55–115 astetta.

Myöhemmin olkapäitä testatessa ilmeni vakava ongelma olkapäiden nostomekanismin kanssa. Ensin toisesta kädestä hajosi olkapään liikuttamiseen tarkoitettu hammasratassysteemi ja koko olkavarsi jouduttiin purkamaan ja kokoamaan uudestaan uudella osalla. Sitten toisesta kädestä katkesi hammasratasta liikuttava ruuvi, jonka vaihtaminen oli onneksi paljon helpompi tehtävä, kuin koko hammasratarakenteen uusiminen. Epäilemme hammasratassysteemin päässeen halkeamaan testauksessa, kun robotin käsi on päässyt retkahtamaan pois pidikkeistään rajoja haettaessa. Ruuvi taas katkesi servon koittaessa vääntää kättä ylöspäin, mutta jostain syystä nostossa on ollut mekaanista estoa. Kuvassa 14 näkyy tyhjä ruuvipesä ja katkenneen ruuvin servomoottoriin jäänyt pää.

Osia tulostaessa suosittelemme myös käyttämään suurempaa sisätäyttöä, kuin InMoovin sivuilta löytyvä 30% suositus. Lisäksi korkeampi seinän paksuus tekee osista kestävämpiä. Tällä hetkellä seinät ovat vain 2mm, mutta ne kannattaa tulostaa jopa 1cm paksuisina. PETG materiaalina muuten sopii tähän käyttötarkoitukseen sen kestävyden takia.

¹⁴Kuvan omistaja Waltteri Rasila, lisenssi CC BY 4.0



Kuva 14. Katkennut ruuvi ja ehjä hammasratassysteemi ¹⁴

3.8.1. Ohjelmisto-ongelmia

Ros2Arduino on Arduino-paketti subscriber- ja publisher-nodejen tekemistä varten arduinoissa. Ros2Arduino-paketti ei sisältänyt sopivaa header-tiedostoa toimintapalvelimen komennon vastaanottamiseksi, joten kaksi uutta header-tiedostoa luotiin. Kun robotin ohjelmistoa pyöritetään tietokoneella, ei tätä ongelmaa ole, sillä colcon-työkalu luo automaattisesti header-versiot .msg tiedostoista, mutta Arduino ei tue colcon työkalun käyttöä.

Uusien header-tiedostojen avulla Arduino pystyy vastaanottamaan JointTrajectory sekä JointTrajectoryPoint tyyppisiä viestejä. Ominaisuudet tarvitaan molempien vastaanottamiselle, koska toimintapalvelimen komento tulee Arduinolle JointTrajectory tyyppisenä viestinä ja JointTrajectory viesti sisältää header-tyyppisen viestin, merkkijonolistan ja JointTrajectoryPoint listan.

Lopulta huomattiin, että Ros2arduino ei ole saanut päivityksiä vuosiin. Uusin ROS2-jakelu jolla se toimii, on jo vuosia sitten vanhentunut dashing-jakelu. Robotti pyörii ROS2 foxy-jakelulla, joka on kolme vuotta uudempi. Ros2arduino taas ei toimi foxy-jakelun kanssa, joten suunnitelma vaihtui micro-ROS:in käyttöön, joka on uudempi mikrokontrollereilla pyörittävä ROS2-ympäristö.

Micro-ROS keskustelee tietokoneella olevan ROS2-ympäristön kanssa samalla tavalla kuin Ros2arduino keskusteli käyttäen samaa eProsiman Micro XRCE-DDS agentin avulla. Toisin kuin Ros2arduino, micro-ROS tarvitsee tietokoneelle ROS2-ympäristöön asennettavan agentin. Tämän agentin ja muiden micro-ROS ohjelmistojen asentaminen oli haastavaa, sillä komentojen väärässä järjestyksessä ajaminen aiheutti ongelmia. Tämä ei olisi ollut ongelma, jos micro-ROS agenttia ei olisi tarvinnut rakentaa ja ajaa jokaisella käynnistyksellä erikseen. Micro-ROS myös tarjoaa keskustelun käyttäen FollowJointTrajectory viestejä, joten luotuja header-tiedostoja ei enää tarvittu.

Micro-ROS agentti saatiin toimimaan tietokoneella ja Arduino Zero:n kanssa yhteensopiva esimerkkiohjelma ladattua. Tietokoneella pyörivä agentti vahvisti yhteyden ja topicin luonnin onnistuneen. Ongelmat ilmenivät, kun agentti ei voinut vahvistaa arduinon lähettämiä viestejä saapuneiksi. Viestien puutteen lisäksi agentin luoma topic ei ilmestynyt ROS2-ympäristöön. Ongelma johtune domain id virheestä. ROS2-ympäristössä voi olla monta domainia, joihin kuuluvat ohjelmat erotellaan domain id:n avulla. Ohjelmat, joille on asetettu eri domain id, eivät pysty keskustelemaan keskenään.

Micro-ROS voisi helpottaa ajettavuutta, mutta robotti ei tunnistanut micro-ROS -ympäristöä, joten toteutukseen käytettiin lopulta sarjayhteyttä.

3.9. Nykytilanne

Robotilla on nyt toimivat käsivarret. Ohjelmistopuolella kokonaisuudessaan on parannettavaa, etenkin yhtenäisyydessä. Käsivarsille on kuitenkin toteutettuna muutama yksinkertainen liike, kuten käsien avaus sivulle ja takaisin sarjaväylän kautta. Nämä tarjoavat hyvän pohjan jatkokehitykselle.

4. JATKOKEHITYS

Tällä hetkellä robottia ajettaessa joudutaan käyttämään useita eri terminaaleja samanaikaisesti. Koodikannan uudelleenkirjoittaminen olisi tarpeen jatkuvuuden kannalta, sillä koko robotin käytettävyys alkaa pikkuhiljaa heikentyä. Yleisesti ottaen yhtenäistäminen olisi tärkeää jatkokehityksen kannalta. ROS2:n käyttö saattaa olla haastavaa uusille käyttäjille, ja lisäksi koodikanta on hajautunut.

Valmiiden käsivarsien ansiosta olemme saaneet toimivan kokonaisuuden InMoov-robotin ylävartalolle. Joten laitteiston osalta robotti alkaa olemaan paremmassa tilanteessa. Tulevaisuudessa robottiin voidaan alkaa kehittää eleitä yhdessä ilmeiden tai puheen kanssa, mikä mahdollistaa ihmismäisemmän kommunikoinnin robotin kanssa. Tällä hetkellä robotin käsivarren nosto sivulle on hyvin rajoitettu verrattuna ihmisen käsivarteen. Jos nostoliikkeestä halutaan tehdä luontevampi, tulee tällä hetkellä robotin nostoliikkeen mahdollistavasta ruuvista luopua ja kehittää tilalle jokin toinen ratkaisu. Mutta nykyiselläänkin liikeradat ovat varsin hyvät, että ohjelmistopuolta voidaan alkaa kehittää lisää.

Koska robotin ohjaamiseen käytetään ROS2-ohjelmistoa, olisi hyödyllistä saada Arduino-yhteensopivuus micro-ROS:n avulla. Tällöin muutosten tekeminen robotin ohjelmistoon olisi helpompaa, kuin nykyisen itsekirjoitetun sarjayhteyden käytön aikana. Tällä hetkellä jokainen muutos servojen kiinnityksissä on tehtävä molemmissa päissä kommunikaatiota. Micro-ROS mahdollistaisi yksinkertaisemman ohjelmiston Arduino-puolelle, ja jokaisessa Arduinossa voisi olla sama koodi. Micro-ROS mahdollistaisi myös langattoman yhteyden mikrokontrollerien kanssa, joissa on joko Bluetooth- tai Wi-Fi-yhteysmahdollisuus. Jokainen mikrokontrolleri vaatii USB-yhteyden tietokoneeseen kommunikaatiota varten. Sarjayhteydellä toimiva kommunikointi on kuitenkin itsessään yksinkertainen ja sen vuoksi näiden parannusten tekeminen on helpompaa, nyt kun kädet ovat rakennettu. Tulevaisuudessa robotista voisi tulla täysin itsenäinen, jos tietokoneen tilalle saadaan riittävän tehokas mikrokontrolleri.

5. YHTEENVETO

Työssä esiteltiin ja toteutettiin yksinkertainen ja toimiva toteutus robotin olkavarrelle. Kohdatut ongelmat ja onnistuneet ratkaisut on myös esitetty, ja epäonnistuneisiin toteutuksiin mietittiin vaihtoehtoisia ratkaisuja. Ohjelmistopuolella toteutettiin kommunikointiohjelma ROS2-järjestelmälle Arduinon käyttämiseksi robotin kanssa. Lisäksi työssä käytiin läpi nykyisen robotiikan kehitystä ja sen tarjoamia mahdollisuuksia, samoin kuin yleisesti robotiikan tulevaisuudennäkymiä.

Jotta voitaisiin välttää ongelmia, on tärkeää varmistaa, että käytetään oikeaa ROS2-versiota. Sovellukset, jotka on luotu vanhalle jakeluversiolle, eivät toimi uudessa jakeluversiossa ilman tarvittavia muutoksia. Micro-ROS:n dokumentaatio on tällä hetkellä saatavilla vain Teensy-mikrokontrollerille, joten niiden käyttö voisi olla helpompaa kuin virallisen Arduinon käyttö. On myös hyvä huomioida, että kirjoitushetkellä micro-ROS Arduino tukee vain Foxy-jakelua. Servojen johdotusta on syytä harkita huolellisesti, sillä hyvin johdotettu robotti helpottaa testausta huomattavasti. Johdot saisi paremmin piiloon suunnittelemalla mikrokontrollerille kiinnityspaikka robotin 3d-tulostettuihin selkäosiin ja lisäämällä rakoja johdoille robotin sisäisiin osiin.

Tulevaisuuden kannalta sarjaväyläyhteyden käyttö tekee ohjelmiston ylläpidon helpommaksi, sillä käsien viestien vastaanottaminen ei vaadi ohjelmistopäivityksiä koskaan. Käsien toiminnallisuus on erittäin helppo siirtää tarvittaessa ROS2-järjestelmästä pois johonkin muuhun järjestelmään. Käsien liikkuminen toimii myös itsenäisesti muiden järjestelmien ulkopuolella pienen työmäärän jälkeen.

Jatkokehitysideoita on esitelty työn loppupuolella.

6. VIITTEET

- [1] Grau A., Indri M., Bello L.L. & Sauter T. (2017) Industrial robotics in factory automation: From the early stage to the internet of things , ss. 6159–6164.
- [2] D. E.L., Tone G., I. G.E. & Gabor S. (2020) Trends in smart manufacturing: Role of humans and industrial robots in smart factories. *Current Robotics Reports* 1, ss. 35–41. URL: <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00006-5>.
- [3] Holland J., Kingston L., McCarthy C., Armstrong E., O’Dwyer P., Merz F. & McConnell M. (2021) Service robots in the healthcare sector. *Robotics* 10. URL: <https://www.mdpi.com/2218-6581/10/1/47>.
- [4] Huang Q. (2022) Weight-quantized squeezeNet for resource-constrained robot vacuums for indoor obstacle classification. *AI* 3, ss. 180–193. URL: <https://www.mdpi.com/2673-2688/3/1/11>.
- [5] Hamet P. & Tremblay J. (2017) Artificial intelligence in medicine. *Metabolism* 69, ss. S36–S40. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002604951730015X>, insights Into the Future of Medicine: Technologies, Concepts, and Integration.
- [6] Amisha, P M., M P. & VK. R. (2019) Overview of artificial intelligence in medicine. *IEEE Transactions on Patterns Analysis and Machine Intelligence* 8, ss. 2328–2331.
- [7] Khanna, MD O., PhD B.R., MD F.D. & PhD D.S. (2021) The path to surgical robotics in neurosurgery. *Operative Neurosurgery* 20, ss. 514–520. URL: https://journals.lww.com/onsonline/Fulltext/2021/06000/The_Path_to_Surgical_Robotics_in_Neurosurgery.2.aspx.
- [8] Peters B.S., Armijo P.R., Krause C., Choudhury S.A. & Oleynikov D. (2018) Review of emerging surgical robotic technology. *Surgical endoscopy* , s. 1636–1655 DOI: <https://doi.org/10.1007/s00464-018-6079-2>.
- [9] Attanasio, Aleks, Scaglioni, Bruno, Momi D., Elena, Fiorini, Paolo, Valdastrì & Pietro (2021) Autonomy in surgical robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 4, ss. 651–679. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev-control-062420-090543>.
- [10] Musk E. (2019) An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels. *J Med Internet Res* 21, s. e16194. URL: <https://doi.org/10.2196/16194>.
- [11] Galvani M. (2019) History and future of driver assistance. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* 22, ss. 11–16. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:59600916>.

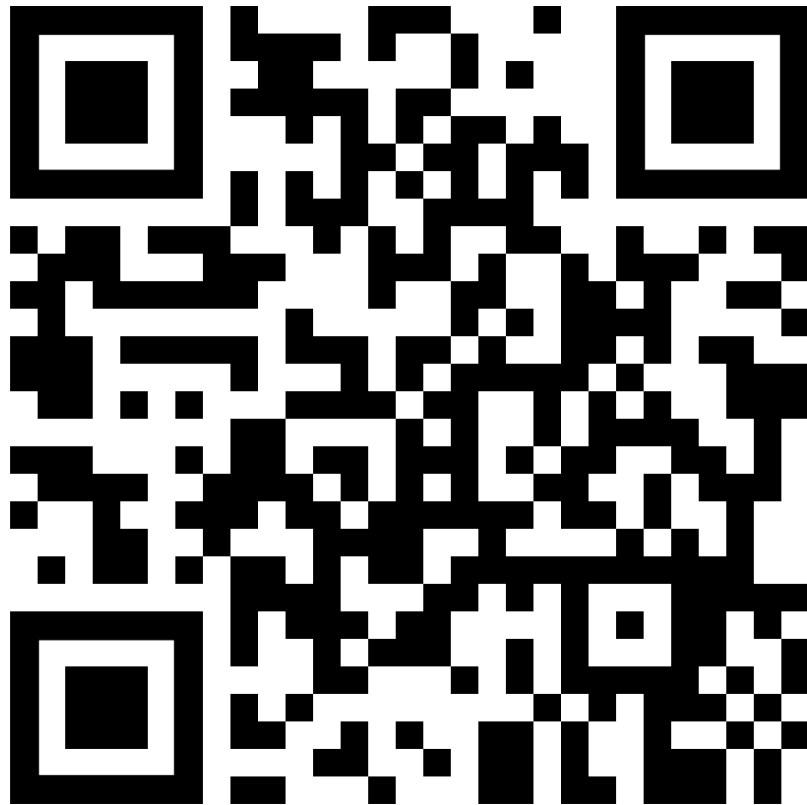
- [12] Cañizares A., Pazos J. & Benítez D. (2017) On the use of 3d printing technology towards the development of a low-cost robotic prosthetic arm. Teoksessa: 2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), ss. 1–6.
- [13] Moodley K., Fourie J. & Imran Z. Touch hand 4.5: low-cost additive manufacturing prosthetic hand participated in cybathlon 2020 arm discipline. *J NeuroEngineering Rehabil* 19, s. 130. URL: <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01112-5>.
- [14] Santina C.D., Piazza C., Grioli G., Catalano M.G. & Bicchi A. (2018) Toward dexterous manipulation with augmented adaptive synergies: The pisa/iit soft hand 2. *IEEE Transactions on Robotics* 34, ss. 1141–1156.
- [15] Shibanoki T. & Jin K. (2020) A 3d-printable prosthetic hand considering dual-arm operation. Teoksessa: 2020 IEEE 2nd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech), ss. 262–263.
- [16] Shibanoki T. & Jin K. (2021) A 3d-printable prosthetic hand based on a dual-arm operation assistance model. Teoksessa: 2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech), ss. 133–134.
- [17] Condori K.A., Urquizo E.C. & Diaz D.A. (2016) Embedded brain machine interface based on motor imagery paradigm to control prosthetic hand. Teoksessa: 2016 IEEE ANDESCON, ss. 1–4.
- [18] Khoramshahi M., Roby-Brami A., Parry R. & Jarrassé N. Identification of inverse kinematic parameters in redundant systems: Towards quantification of inter-joint coordination in the human upper extremity. *PLoS ONE* 17, s. 0278228. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278228>.
- [19] Shin S.Y. & Kim C. (2015) Human-like motion generation and control for humanoid's dual arm object manipulation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62, ss. 2265–2276.
- [20] Rasch R., Wachsmuth S. & König M. (2018) A joint motion model for human-like robot-human handover. Teoksessa: 2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), ss. 180–187.
- [21] Rasch R., Wachsmuth S. & König M. (2019) Combining cartesian trajectories with joint constraints for human-like robot-human handover. Teoksessa: 2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), ss. 91–98.
- [22] Llorens Bonilla B., Parietti F. & Asada H.H. (2012) Demonstration-based control of supernumerary robotic limbs. Teoksessa: 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, ss. 3936–3942.
- [23] Parietti F. & Asada H.H. (2017) Independent, voluntary control of extra robotic limbs. Teoksessa: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), ss. 5954–5961.

- [24] Fortunati L., Manganelli A.M., Höflich J. & Ferrin G. (2021) Exploring the perceptions of cognitive and affective capabilities of four, real, physical robots with a decreasing degree of morphological human likeness. *Int. J. Soc. Robot.* .
- [25] Paik J.K., Shin B.H., Bang Y.B. & Shim Y.B. (2012) Development of an anthropomorphic robotic arm and hand for interactive humanoids. *J. Bionic Eng.* 9, ss. 133–142.
- [26] Gushi S., Shimabukuro Y. & Higa H. (2020) A self-feeding assistive robotic arm for people with physical disabilities of the extremities. *Teoksessa: 2020 5th International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS)*, ss. 61–64.
- [27] Jahnvi K. & Sivraj P. (2017) Teaching and learning robotic arm model. *Teoksessa: 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, ss. 1570–1575.
- [28] Yenorkar R. & Chaskar U.M. (2018) Gui based pick and place robotic arm for multipurpose industrial applications. *Teoksessa: 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, ss. 200–203.
- [29] Liu T., Li W., Sun X., Wang W., Fang Y., Zhu X., Zhong L., Liu G. & Zhao J. (2020) Mechanical design and path planning of a robotic arm for gis pipeline inspection. *Teoksessa: 2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, ss. 1371–1376.
- [30] Bruun J., Tuovinen A. & Hokkinen V. (2022) Robotin käden ja kyynärvarren toteutus URL: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-202210133491.pdf>.
- [31] Broota S. (2022) Building of inmoov robotic arm for performing various operations. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 10, ss. 205–212.
- [32] Llop-Harillo I., Pérez-González A. & Andrés-Esperanza J. (2020) Grasping ability and motion synergies in affordable tendon-driven prosthetic hands controlled by able-bodied subjects. *Front. Neurobot.* 14.
- [33] Sidher A. & Shen Y. (2017) Improving a 3d-printed artificial anthropomorphic hand using the human hand model. *Teoksessa: 2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*, ss. 739–744.
- [34] Axelsson M. (2018) Designing an InMoov Robot to Teach Assistive Sign Language to Children with Autism. Master's thesis, Aalto University. School of Science. URL: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201810055265>.
- [35] Maliki R., Alhaidar D., Attallah K., Alsalem S., Morris M. & Tosunoglu S. (2017) Robotic hands to teach sign language.
- [36] Mori M., MacDorman K. & Kageki N. (2012) The uncanny valley. *IEEE Robotics and Automation Magazine* 19, ss. 98–100.

- [37] Mara M., Appel M. & Gnambs T. (2022) Human-like robots and the uncanny valley: A meta-analysis of user responses based on the godspeed scales. *Zeitschrift für Psychologie* 230, ss. 33–46.
- [38] Yu C.E. (2020) Humanlike robots as employees in the hotel industry: Thematic content analysis of online reviews. *Journal of Hospitality Marketing & Management* 29, ss. 22–38.
- [39] Thepsoonthorn C., Ogawa K.i. & Miyake Y. (2021) The exploration of the uncanny valley from the viewpoint of the robot's nonverbal behaviour. *International Journal of Social Robotics* 13, ss. 1443–1455. URL: <https://doi.org/10.1007/s12369-020-00726-w>.
- [40] URL: <https://inmoov.fr/bicep/>.
- [41] URL: <https://inmoov.fr/shoulder-and-torso/>.

7. LIITTEET

	Walteri Rasila	Samuli Körkkö	Antti Korpi
Taustatutkimus	47	48	47
Fyysinen toteutus	61	95	55
Ohjelmisto	24	24	84
Kirjoittaminen	53	33	15
Yhteens�	185	200	201



Kuva 15. <https://youtu.be/EB6Ec3EYqbc> ¹⁵