

Tony Lam

Hammasvaihteistojen suunnittelu robottikäteen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

17.5.2016

Tekijä Otsikko	Tony Lam Hammasvaihteistojen suunnittelu robottikäteen
Sivumäärä Aika	50 sivua + 7 liitettä 17.5.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotesuunnittelu
Ohjaajat	Lehtori Heikki Paavilainen Teknologiapäällikkö Sami Kalliokoski
<p>Insinöörityössä suunniteltiin hammasvaihteistot robottikäteen, joka on tarkoitettu ohjelmoinnin opetusvälineeksi. Suunnitteluvaiheen alussa robottikäden hammasvaihteistolle asetettiin seuraavat vaatimukset: kompakti koko, keveys ja kustannustehokkuus. Insinöörityön toimeksiantajana oli Electria, joka on Metropolia Ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehitysyksikkö.</p> <p>Insinöörityö alkoi määrittämällä robottikäden fyysiset ominaisuudet, joiden perusteella aloitettiin hammasvaihteistojen suunnittelutyö. Fyysisten ominaisuuksien määrittelyn jälkeen hammasvaihteistolle mitoitettiin moottori ja vaihteistolle määriteltiin alustava välityssuhde.</p> <p>Moottoreiden mitoituksen jälkeen hammasvaihteiston sisällä oleville hammaspyörille määriteltiin hammasluvut ja -moduulit. Seuraavaksi hammaspyörille tehtiin lujuuslaskenta, jolla varmistettiin hammaspyörien kestävänsä sille kohdistuvia rasituksia. Myös hammasvaihteistojen akseleille tehtiin lujuuslaskenta. Hammaspyörien lujuuslaskennoissa käytettiin Lewisin kaavaa. Hammasmoduuleja ja -lukuja sekä välityssuhdetta iteroitiin, kunnes lujuuslaskennasta saatiin halutut tulokset. Lopputuloksena kehitettiin viisi erilaista hammasvaihteistoa robottikädelle.</p> <p>Laskentaosuuden jälkeen hammaspyörät mallinnettiin CAD-mallinnusohjelmalla. Hammasvaihteen komponentit asetettiin haluttuun järjestykseen CAD-avaruuteen, jossa mallinnettiin hammasvaihteen kotelo. Valmis kotelo tulostettiin 3D-tulostimella.</p> <p>Lopuksi hammasvaihteistot testattiin laboratorio-olosuhteissa kuormattomana ja kuormallisena. Testien perusteella hammasvaihteistot toimivat suunnitellusti niille asetuille kuormituksille.</p>	
Avainsanat	Robottikäsi, hammasvaihte, hammaspyörä, Lewis, 3D-tulostin

Author Title	Tony Lam Design of Gearboxes for a Robot Hand
Number of Pages Date	50 pages + 7 appendices 17 May 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Specialisation option	Machine Design
Instructors	Heikki Paavilainen, Senior Lecturer Sami Kalliokoski, Chief of Technology
<p>This Bachelor's thesis describes the design process of creating gearbox models for a robot hand which will be used as an educational tool for programming. At the beginning of the design phase, the following requirements were set for the gearbox of the robot hand: compact size, light weight and cost-effectiveness. This thesis was commissioned by Electria which is the research and development unit of Helsinki Metropolia University of Applied Sciences.</p> <p>The thesis was started by defining the physical properties of the robot hand. After defining the physical properties, a motor was dimensioned for the gear teeth and a pre-gear ratio was defined for the gearbox.</p> <p>After the dimensioning of the motor, the numbers of the gear teeth and modules were defined for the gears located inside the gearbox. Secondly, strength calculations were made to gears in order to ensure that the gears have enough strength for the designed requirements. Strength calculations were also carried out for the axis of the gears. Lewis factor equation was used in strength calculations. The module and gear ratio were iterated until the wanted results were obtained in strength calculation. In conclusion, five different gearbox models were designed for the robot hand.</p> <p>After the strength calculation phase, the gears were 3D modeled using CAD software. The components of the gearbox were placed in the wanted position in the CAD space, where the case of the gearbox was modeled. The case of the modeled gearbox was printed with a 3D printer.</p> <p>Finally, the gearboxes were tested in a laboratory environment with and without a load. As a result, it was discovered that the gearbox works according to the designed requirements.</p>	
Keywords	Robot hand, gearbox, gear, Lewis, 3D printing

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Robottikäden konsepti	3
3	Servo	7
3.1	RC-, teollisuus- ja robottiservot	7
3.2	Sähkömoottorit	9
3.3	Hammasvaihteet	10
4	Robottikäden vaihdelaatikoiden vaatimukset	15
4.1	Momentti	15
4.1.1	Staattinen momentti	15
4.1.2	Dynaaminen momentti	16
4.2	Välityssuhde	17
4.3	Moottorin mitoitus	18
5	Vaihteiston suunnittelu	19
5.1	Hammaslukujen ja -parien määrittäminen	21
5.2	Akselivälin määrittäminen	23
5.3	Hammasvoimien laskeminen	24
5.4	Hammasakselin mitoitus	26
5.5	Hampaan lujuuslaskenta	26
5.6	Hammaspyörän materiaalivalinta	30
5.7	Kotelon suunnittelu	31
6	Suunnittelun tulokset	33
6.1	Olka- ja kyynärpää	33
6.2	Jalusta	35
6.3	Ranne	37
6.4	Ranteen rotaatio	38
7	Hammasvaihteistojen testaus	40

8	Robottikäden ohjelmisto	44
9	Parannusideoita robottikädelle ja vaihteistolle	45
10	Yhteenveto	46
	Lähteet	48

Liitteet

Liite 1. Robottikäden fyysisten ominaisuuksien alustava arviointi

Liite 2. Hammasakselin mitoitus

Liite 3. Potentiometri 3310

Liite 4. RS-380PH

Liite 5. RS-365SH

Liite 6. FC-280SC

Liite 7. Olkavarren hammasvaihteiston tiedot

Lyhenteet

ABS	<i>Acrylonitrile butadiene styrene.</i> Muovilaatu.
CAD	<i>Computer-aided design.</i> Tietokoneavusteinen suunnittelu.
DIY	<i>Do-It-Yourself.</i> Tee se itse.
FDM	<i>Fused deposition modeling.</i> 3D-tulostustekniikka, jossa muovilankaa sulattamalla 3D-tulostin rakentaa fyysisen mallin kerros kerrokselta 3D-mallin mukaisesti.
IFR	<i>International Federation of Robotics.</i> Kansainvälinen robottiliitto.
PLA	<i>Polyactid acid.</i> Muovilaatu.
PWM	<i>Pulse-width modulation.</i> Pulssinleveysmodulaatio.
RC	<i>Radio control.</i> Radio-ohjaus.
SLS	<i>Selective laser sintering.</i> 3D-tulostustekniikka, jossa muovipulveri sulatetaan laserilla.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä suunniteltiin hammasvaihteistot robottikädelle. Työn toimeksiantajana toimi Metropolia ammattikorkeakoulun sovelletun elektroniikan tutkimus- ja kehityksyksikkö Electria.

Suurelta osin Electrian toiminta perustuu erilaisiin asiakasyrityksille tehtäviin projekteihin, joissa elektroniikan tutkimustuloksista kehitetään sovelluksia asiakasyrityksille. Toimintaan kuuluu myös asiakkaiden tilauskouluttaminen. Electrian tiloissa on koetuantotehdas, jossa voidaan valmistaa piensarjoja sekä suorittaa elektroniikan testaus- ja tarkastuspalveluita. Electrian toiminnan pääpaino on vähävirtaisessa langattomassa elektroniikassa ja sen toiminta on käynnistynyt vuonna 2004. Viime aikoina Electria on kuitenkin laajentanut tutkimuskohteitaan myös muihin lupaaviin tekniikan osa-alueisiin, kuten robotiikkaan ja terveelliseen rakentamiseen. Muita Electrian tarjoamia palveluita ovat prototyyppien ja piensarjojen valmistus, koulutus sekä testaus- ja tarkastuspalvelut. [1.]

Robottikäsiprojekti alkoi vuoden 2013 lopulta automaatiotekniikan koulutusohjelman innovaatioprojektista. Projektin ideana oli kehittää robottikäsi alle tuhannen euron hintaluokassa käyttäen 3D-tulostettuja osia sekä edullisia moottoreita ja komponentteja. Halpojen komponenttien aiheuttamia toleransseja oli tarkoitus kompensoida sekä anturoinnilla että ohjelmallisesti. Projektia työsti aluksi kaksihenkinen opiskelijaryhmä. Projektin ensimmäisessä vaiheessa tehtiin selvitystyö robottikäden markkinatilanteesta sekä tutkittiin erilaisia valmistustekniikoita, joilla robottikäden tavoitteet toteutuisivat. Esiselvitystyön lopputulos oli, että markkinoilla on kysyntää edulliselle robottikädelle, koska markkinoilla saatavilla olevat robottikädet ovat kalliita ja ne on pääosin suunniteltu teollisuuskäyttöön. IFR:n (International Federation of Robotics) tutkimuksen mukaan robottisovelluksien siirtyminen teollisuudesta palvelu- ja kuluttajakäyttöön on kasvanut vuosi vuodelta ja tutkimuksen ennusteen mukaan kasvu on kiihtyvää erityisesti Aasiassa [2]. Hyvillä robottisovelluksilla on suurta potentiaalia kehittyvillä markkinoilla. Selvitystyön perusteella päätettiin kehittää robottikäsi opetuskäyttöön, koska lakisääteisen päätöksen myötä Suomessa ohjelmointia aletaan opettaa myös peruskouluissa syksystä 2016 alkaen [3]. Tästä pääteltiin, että ohjelmoinnin opetukseen tarkoitettujen laitteiden kysyntä on kasvussa.

Esiselvitystyön jälkeen alettiin kehittää robottikäden prototyyppiä opetuksen apuvälineeksi. Ensimmäisten prototyyppien kehityksestä saatujen käyttökokemuksen ja havaintojen perusteella käden tulisi olla pieni ja pöydällä pidettävä, koska luokahuoneopetuksessa on hyvä, että käsiä voi siirtää haluamaansa paikkaan ja useampia pieniä käsiä mahtuu samalle pöydälle. Lisäksi nähtiin, että robottikädessä on hyvä olla verkkoyhteys ulkoista kommunikointia ja ohjelmointia varten. Lopputuloksena saatiin pieni kompakti käsi (kuva 1). Projektin tekijät osallistuivat kansainväliseen The World Embedded Software Contest 2014 -kilpailuun. Robottikäsi pääsi kilpailun finaalin ja sijoittui viidenneksi. Hyvän sijoituksen vuoksi käden kehitystyötä päätettiin jatkaa.



Kuva 1. Robottikäsi.

Edellisen prototyypin kehityksessä käytetyt servot ja niiden komponentit olivat suurikokoisia ja painavia. Käytettyjen servomootoreiden komponentit koostuivat hammasvaihteistoista, moottorista ja ohjauselektronikasta. Ylimääräinen massa käsivarressa lisää momenttia olkavarressa, joten massaa on eduksi keventää. Havaittiin, että DC-moottoreita käytettäessä voidaan asettaa ohjauspiirejä jalustan koteloon. Tällä voidaan siirtää osa servomoottorin painosta jalustaan, jossa siitä on enemmän hyötyä tasapainon kannalta.

Projekti päättyi automaatio-opiskelijoiden osalta vuonna 2014 opiskelijoiden valmistumisen ja työllistymisen johdosta. Projektin kehitystyötä jatkettiin uusien tekijöiden voimin. Uutta prototyyppiä alettiin kehittää edellisten tekijöiden havaintojen ja kokemusten perusteella. Uusi nelihenkinen monialainen tiimi koostui konetekniikan, tietotekniikan ja teollisen muotoilun opiskelijoista. Konetekniikan opiskelijan tehtävänä oli suunnitella käden mekaanisia ratkaisuja, kokoonpantavuutta ja moottorin mitoitus. Tietotekniikan opiskelijan vastuualueisiin kuuluivat käden ohjelmointi, elektronisten komponenttien valinta sekä piirilevysuunnittelu. Teollisen muotoilun opiskelijoiden tehtävänä oli suunnitella ja mallintaa käden ulkoasu sekä konseptikuvien tekeminen.

Vaihdelaatikkoa alettiin kehittää, koska aiempien projektin tekijöiden havaintojen mukaan servot eivät ole toimiva ratkaisu. Ylimääräinen massa käsivarressa lisää momenttia olkavarressa. Servojen tilalle ryhdyttiin kehittämään DC-moottoriratkaisua. Oman vaihdelaatikon suunnittelulla voidaan räätälöidä voimansiirtoratkaisuja robottikädelle, joka on mahdollisimman pienikokoinen ja edullinen.

2 Robottikäden konsepti

Yksi robottikädelle suunniteltu sovellus on ohjelmoinnin apuväline. Uudenlainen opetusväline tekee ohjelmoinnin opetuksesta mielekkäämpää. Perinteiseen ohjelmointiin verrattuna robottikäsi antaa konkreettisen ja fyysisen palautteen, kun sitä ohjelmoidaan. Perinteisessä ohjelmoinnissa palaute näkyy tietokoneen ruudulla, joka voi olla opiskelijoille puuduttavaa. On uskottavaa, että tämäntyyppinen ohjelmointikonsepti motivoi opiskelijoita kehittämään omia ohjelmointitaitojaan. Robottikäden suunnittelussa on pyritty hyödyntämään 3D-tulostusta mahdollisimman paljon. 3D-tulostimet ovat kehittyneet paljon, sillä esimerkiksi halvimmat FDM-tulostimet maksavat nykyään noin 500 euroa [4]. Tulevaisuudessa 3D-tulostustekniikan kehittyessä 3D-tulostimien hinnat tulevat todennäköisesti laskemaan entisestään. Jos 3D-tulostimien nykyinen hintakehitys jatkuu samansuuntaisena, on mahdollista, että muutamien vuosien päästä jokaisella oppilaitoksella on oma 3D-tulostin käytettävissä. Tästä syntyi idea, jossa oppilaitoksille voidaan tarjota robottikäden 3D-tiedostot. Oppilaat voivat 3D-tulostaa saaduilla tiedostoilla oman robottikäden ja koota sen itse, minkä jälkeen oppilas voi ohjelmoida käden logiikkaa. Tämän tapainen DIY-konsepti (Do-It-Yourself) nähtiin mielekkäänä oppimisprosessina, jossa opiskelija oppii 3D-tulostamisen ja ohjelmoinnin perusteet.

Toisena sovelluksen ideana on kehittää ihmisen kokoinen etäohjattava käsi, jota voidaan ohjata paikasta riippumatta internetin välityksellä. Etäohjattavan käden sovelluksissa vain mielikuvitus on rajana. Sovellusideoita on tullut laidasta laitaan. Robottikäden suurimmat hyödyntämismahdollisuudet tulevat todennäköisesti olemaan sosiaali- ja hyvinvointialoilla, sillä perinteinen robotiikka on raskas eikä sovellu kotikäyttöön.

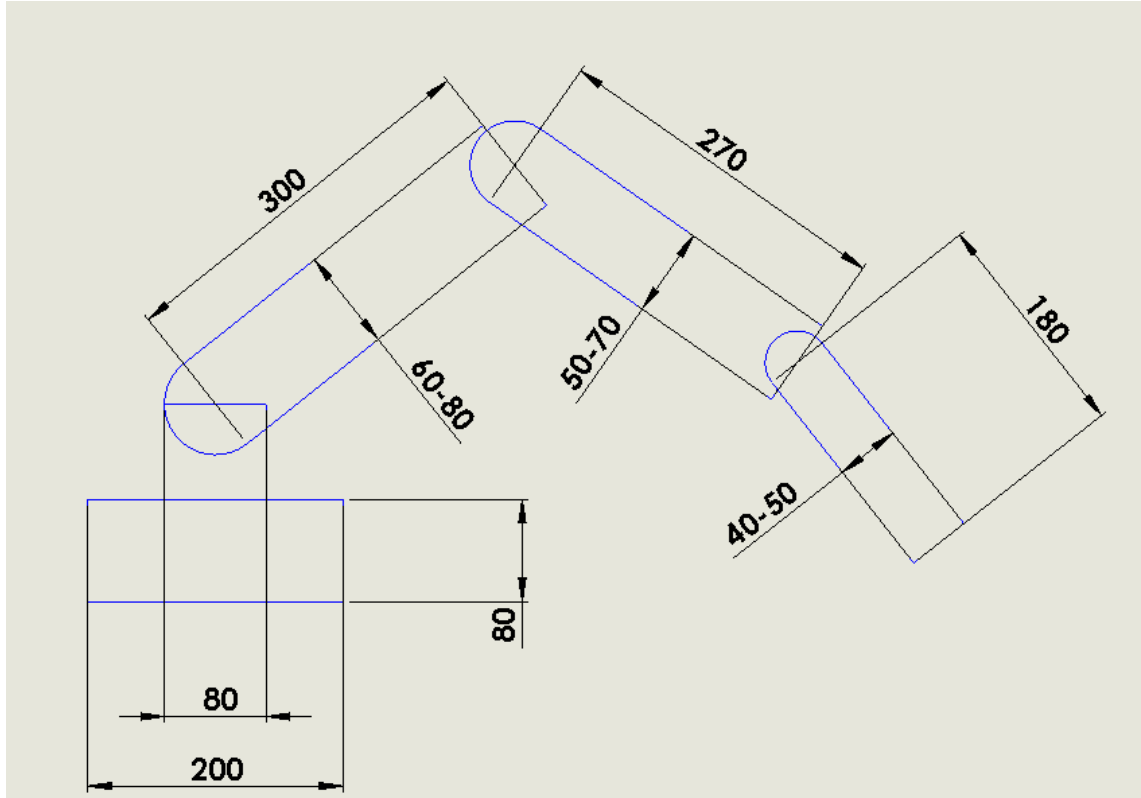
Robottikättä tullaan ohjaamaan joko anturoidulla käsineellä tai Leap Motion -anturilla. Anturoituun käsineeseen kiinnitetään kiihtyvyysantureita, joilla saadaan rekisteröityä käden asentotiedot kolmiulotteisesti. Kiihtyvyysantureita kiinnitetään myös kyynär- ja olkavarteen, joiden asentotiedot täydentävät olemassa olevaa tietomatriisia. Saadut asentotiedot siirretään robotille, joka ohjaa manipulaattoreita saatujen tietojen perusteella. Toinen robottikäden ohjaustapa toimii siten, että anturoidun käsineen sijasta käytetään Leap Motion -anturia. Leap Motion on Kickstarter-joukkorahoituskampanjan avulla pinnalle ponnahtanut yritys. Leap Motion -anturi on infrapunavaloa hyödyntävä anturi, joka pystyy tunnistamaan käden asentotietoja, kun käsi asetetaan anturin päälle. Leap Motion -anturi on hyvä ohjaustapa esittelykäyttöön, koska se pystyy tunnistamaan tarkasti sormien ja ranteen asentotietoja eikä se vaadi lisälaitteen asentamista käyttäjän käteen. Valitettavasti sillä ei pysty tunnistamaan olka- ja kyynärvarren asentoja, koska Leap Motion -anturi lukee vain asentotiedot kämmenestä ja ranteesta. Olka- ja kyynärvarren asentotiedot voidaan kuitenkin arvioida matemaattisilla kaavoilla, kun ranteen asentotiedot ovat tunnettuja. Olka- ja kyynärvarren asentotiedot ovat mahdollista tunnistaa tarkasti yhdistämällä Leap Motion -anturin tietomatriisi Microsoftin kehittämää Kinect-liikeohjaimen tuottamaan lisätietoon.

Ennen kuin robottikättä alettiin suunnitella, sille asennettiin seuraavat vaatimukset:

- ihmiskäden kokoinen
- kokonaan 3D-tulostettava
- valmistuskustannukset alle 1000 euroa
- ihmiskäyttä jäljittelevät vapausasteet.

Robottikäden tulee olla ihmiskäden kokoinen, jotta sillä pystyisi käyttämään ihmiselle suunniteltuja työkaluja. Lisäksi valmiit käden rajatiedot helpottivat muotoilijoiden työtä suunnitella muotoilu robottikädelle. Robottikäden koko saatiin Leonardo Da Vincin tutkimuksesta, jonka avulla Da Vinci on piirtänyt kuuluisan Vitruviuksen miehen. Da Vincin

tekemän tutkimuksen mukaan etäisyys kyynärpäältä kainaloon on kahdeksasosa miehen pituudesta, kyynärä on kuusi kämmenleveyttä, miehen pituus on 24 kämmenleveyttä ja kämmenleveys on neljä sormenleveyttä.[5] Näillä tiedoilla saatiin laskettua 170 cm pituisen henkilön olkavarren, kyynärvarren sekä kämmenen mitat (kuva 2).



Kuva 2. Robottikäden alustava mitoitus.

Robottikäsi on kokonaan 3D-tulostettava, koska 3D-tulostettavuus kuuluu opetuksen apuvälinekonseptiin. 3D-tulostus on myös helppo ja nopea tapa tehdä prototyyppejä. 3D-tulostettavuudella tarkoitetaan, että 3D-mallinnuksia voidaan tulostaa vaivattomasti 3D-tulostimella ilman vaativia tukirakenteita. Yleisimmin käytetty 3D-tulostustekniikka on FDM (Fused Deposition Modeling), jota käytetään yleisesti edullisimman hintaluokan tulostimissa. FDM-tekniikassa tulostuslankaa tulostetaan kerros kerrokselta, kunnes tuloste on valmis. FDM-tulostustekniikan yleisimmät tulostusmateriaalit ovat ABS ja PLA. FDM asettaa omat rajoitteensa tulostuksille muun muassa siten, että tulostekerroksen pohjalla on oltava tukirakenne, koska tyhjän päälle ei voi tulostaa. Robottikäden suunnittelussa on otettu FDM-tekniikalla toimivien tulostimien rajoitteet huomioon. Lisäksi malleja voi muokata sopiviksi muille 3D-tulostustekniikoille, muun muassa Selective Laser Sintering -tulostusmenetelmälle (SLS).

Hinta on myynnin kannalta kriittisin tekijä. Markkinoilla olemassa olevat robottikädet maksavat kymmeniä tuhansia euroja, joten hinta on yksi suurimpia kilpailukeinoja [6]. Edullinen robottikäsi alentaa mahdollisten asiakkaiden kynnystä hankkia robottikäsi. Toki käden on oltava myös mahdollisimman toiminnallinen ja laadukas. Robottikädelle asetettiin valmistuskustannustavoitteeksi alle 1 000 euroa. Menestymisen kannalta kädelle on löydettävä hyödyllisiä sovelluksia, jotka tuottavat lisäarvoa asiakkaalle.

Käden on toimittava ihmismäisesti, jotta käden ohjaaminen etänä tuntuu luonnolliselta. Tämän takia ihmisen kokoisen robottikäsivarren lisäksi robottikädellä on oltava mahdollisimman samat vapausasteet kuin ihmiskädellä. Ihmiskädessä on kuusi vapausastetta pois lukien sormet. Tulevaan käteen (kuva 3) suunniteltiin viiden vapausasteen robottilukuun ottamatta sormia. Verrattuna aikaisemman version vapausasteisiin, uudesta kädestä on poistettu yksi olkapään vapausasteista, koska se oli teknisesti liian vaikea toteuttaa. Lisäksi uuteen malliin on lisätty ranteeseen rotaatio, joka puuttui edellisestä prototyypistä kokonaan.

Uudessa prototyypissä moottoreiden ohjauspiirit on jaettu kolmeen osaan. Piirilevyt sijoitettiin kämmeneen, kyynärvarteen sekä jalustaan. Ohjauslevyn tarkoitus on ohjata moottoreita. Kämmeneen sijoitettu ohjauspiiri ohjaa robottikäden sormia. Kyynärvarteen sijoitettu ohjauspiiri ohjaa ranteen rotaatiota ja taipumaa. Jalustassa oleva piiri ohjaa alustan rotaatiota, olkapäätä sekä kyynärpäätä. Ohjauslevyn jakamisella yritettiin vähentää johtojen määrää. Edellisessä prototyypissä ohjauslevy oli robottikäden jalustassa, minkä takia kaikki johdot kulkivat jalustan pohjalle. Ohjauslevyjen jakamisella osiin saatiin vähennettyä merkittävästi johtojen määrää.



Kuva 3. Robottikäden konseptikuva.

3 Servo

Servolla tarkoitetaan toimintalaitetta, jolla on takaisinkytkentä asema-anturiin. Servojärjestelmässä ohjauslaite antaa ohjearvon servomoottorille, joka toteuttaa annetun ohjearvon. Moottorin ohjausarvo siirtyy takaisinkytkennän vuoksi takaisin ohjauslaitteeseen. Kun ohjauslaite huomaa annetusta ja moottorin omasta ohjearvosta eron, antaa ohjauslaite korjausarvon, kunnes moottori saa halutun arvon. Servomoottoreissa ohjausarvot ovat yleensä moottorin asema ja nopeus. [7, s. 5.]

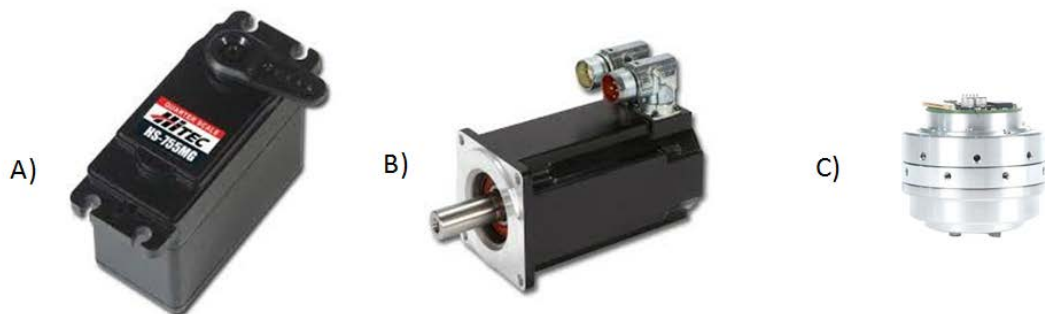
Servomoottori koostuu moottorista ja servopiiristä. Usein servomoottoriin on myös asennettu hammasvaihteisto, joka muuttaa pyörimisnopeuden momentiksi. Servomoottoreita käytetään useissa sovelluksissa muun muassa työstökoneissa, robotiikkasovelluksissa ja automaatioissa.

3.1 RC-, teollisuus- ja robottiservot

RC-servomoottorit (kuva 4) (radio control) ovat ominaisuuksiltaan lähes samoja kuin teollisuusservot. Ne koostuvat moottorista, asentoanturista, ohjauspiiristä ja hammasvaihteistosta. Hyvinä puolina RC-servot ovat fyysisesti pienempiä ja toimivat usein 4,8 - 6

V:n tasajännitteellä, ja ne ovat edullisempia kuin teollisuusservomoottorit. Tällaisen harrastelijakäyttöön tarkoitetun servomoottorin huonoina puolina ovat pieni vääntömomentti ja pääakselin rajoitettu pyörimisliike, joka on 90 tai 180 astetta. Pääakselin pyörimisliikettä on rajoitettu, koska asennon tunnistus on toteutettu potentiometrillä. Verrattuna teollisuusservoon, RC-servossa on myös heikompi tarkkuus ja elinikä. Edullisen hinnan ja hyvän saatavuuden takia RC-servot ovat suosittuja harrastelijoiden parissa. Teollisuusservoilla ei ole liikelaajuudessa rajoituksia ja ne toimivat laitteista riippuen vaihto- ja tasajännitteellä.

Robottiservot (kuva 4) ovat nimensä mukaisesti suunniteltu roboteille. RC-servoissa moottorinohjaus tapahtuu PWM-signaaleilla. Tämän signaalin avulla voidaan lähettää akselin aseman arvoja, mutta asematietoja ei pystytä saamaan takaisin käyttäen samaa signaalia. Robottiservoissa tietoa voidaan lähettää kumpaakin suuntaan tietoliikenneväylän avulla. Asematiedon lisäksi robottiservot voivat aistia lämpötilaa, virranmuutosta ja vääntömomenttia. Näiden aistien ansiosta robottiservoja voidaan hyödyntää erilaisissa robottisovelluksissa, joihin teollisuus- ja harrastelijakäyttöön suunniteltu servo ei kykene. Robottiservoja voidaan kytkeä useita sarjaan yhdellä kaapelilla, kun taas RC-servot johdot joudutaan kytkemään erikseen ohjauspiirille. [8.] Robottiservoissa käytetään hammasvaihteistoina cyclo- tai harmonic drive -vaihteistoja, koska ne ovat kooltaan pienempiä kuin perinteiset lieriö- ja planeettavaihteistot. Robottisovelluksissa kompakti koko on ehdoton.



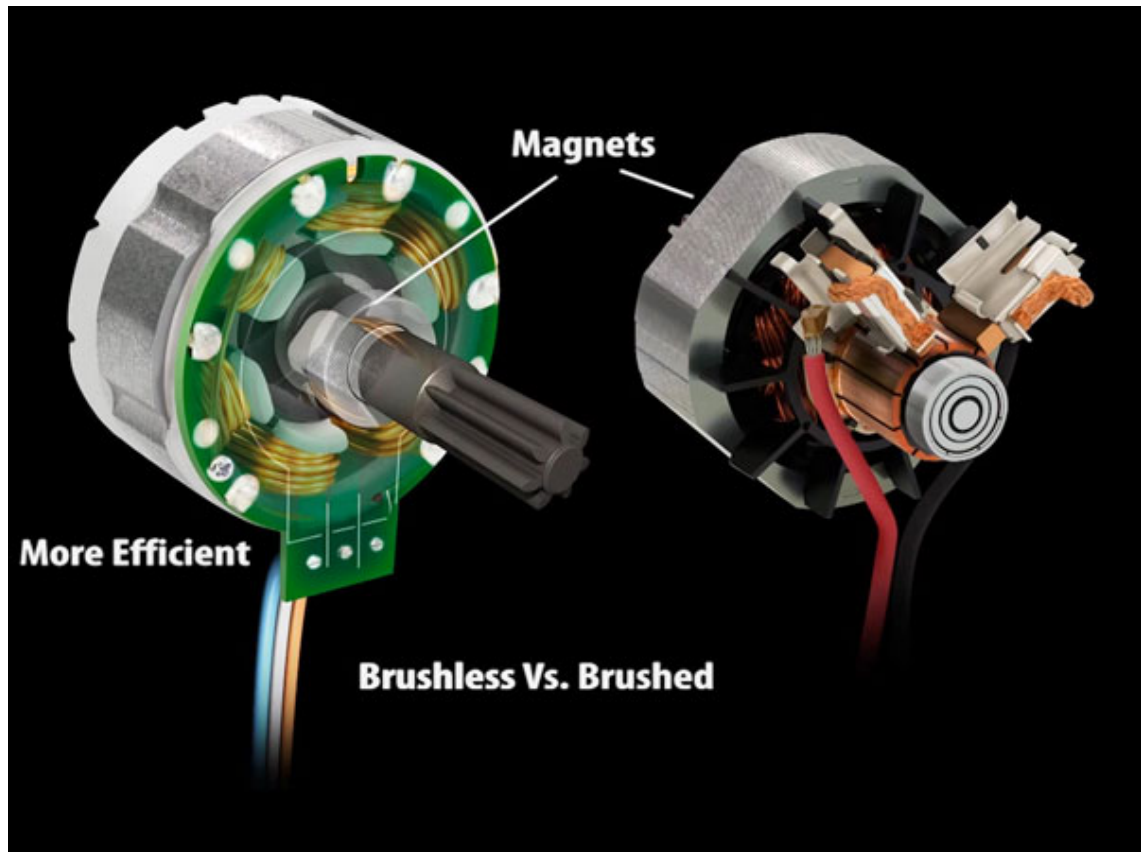
Kuva 4. A) RC-servo [9] B) teollisuusservo [10] C) robottiservo [11].

3.2 Sähkömoottorit

Servomoottoreissa käytetään joko DC- tai AC-moottoreita. AC-moottoreita on monenlaisia, joista yleisimmät ovat oikosulku- ja kestopagneettimoottori. DC-moottoreita on harjallisia ja harjattomia. Sähkömoottorin toiminta perustuu siihen, että magneettisuus saadaan kytkettyä päälle ja pois. Sähköinen magneetti saadaan aikaan kelalla, joka magnetisoituu, kun johtimessa kulkee virta. Heikkoa magneettisuutta voidaan vahvistaa kiertämällä johdinta useita kierroksia rullalle. [12.]

Harjallisissa DC-moottoreissa magneettien napaisuutta vaihdetaan roottorissa kommutaattorin avulla (kuva 5). Kommutaattori on valmistettu hiilestä, ja hiilet ovat kontaktissa roottoriakseliin. Kommutaattorissa roottoriakselin pyörimisliike saa aikaan napaisuuden vaihdon. Kommutaattoriin on johdettu sähkövirta, joka magnetisoi käämin. Kun käämi tulee kestopagneetin vetovoiman seurauksena kestopagneettia kohti, kommutaattori katkaisee virran ja magnetisoi heti toisen käämin. Koska harjallisessa moottorissa harja ja kommutaattorit ovat fyysisessä kosketuksesta toisiinsa, moottorin hyötösuhde on huonompi kuin harjattoman moottorin. Lisäksi harjan ja kommutaattorin kosketus aiheuttaa myös suuremman käyttöönsä sekä lämpenemisen. [12.]

Harjaton DC-moottori on kuin käännetty harjallinen moottori (kuva 5). Harjattomassa DC-moottorissa staattori on käämitetty ja roottoriin on kiinnitetty kestopagneetit. Tämän takia harjattomassa moottorissa ei tarvita kommutaattoria. Tämä parantaa merkittävästi harjattoman moottorin hyötysuhdetta. Lisäksi harjaton moottori on hiljaisempi ja lämpeä vähemmän kuin harjallinen moottori. [12.]



Kuva 5. Harjattoman ja harjallisen moottorin rakenne [13].

3.3 Hammasvaihteet

Hammasvaihte on laite, joka siirtää moottorin tehoa akselille. Hammasvaihte koostuu vähintään yhdestä hammasparista, joiden hammasmuodot ovat identtisiä. Hammasvaihteiston välityssuhdetta muuttamalla saadaan muutettua ensiö- ja toisioakselin välistä nopeutta ja vääntömomenttia. Välityssuhteella tarkoitetaan hammasparien välistä suhdetta. Vaihteistoa käytetään yleensä, kun halutaan hidastaa käytettävän akselin nopeutta ja muuttaa moottorin vääntömomenttia isommaksi vaihteiston avulla. Iso välityssuhteinen hammasvaihteisto tarjoaa pienemmän pyörimisnopeuden, mutta isomman momentin. Pieni välityssuhteinen hammasvaihteisto tarjoaa suuremman pyörimisnopeuden, mutta pienemmän momentin. [14, s. 658.]

Hammasmuotoja on monen tyyppisiä, mutta yleisimmin käytetty hammasmuoto on evolventtihammastus. Helppo valmistettavuus ja pieni akselivälivirheen vaikutus välityssuh-

teeseen ovat tehneet siitä parhaan hammasmuodon. [14, s. 494.] Insinööriyössä käytettiin evolventtiammasmuotoja edellä mainittujen ominaisuuksien perusteella sekä helpon mallinnettavuuden ja valmistettavuuden takia.

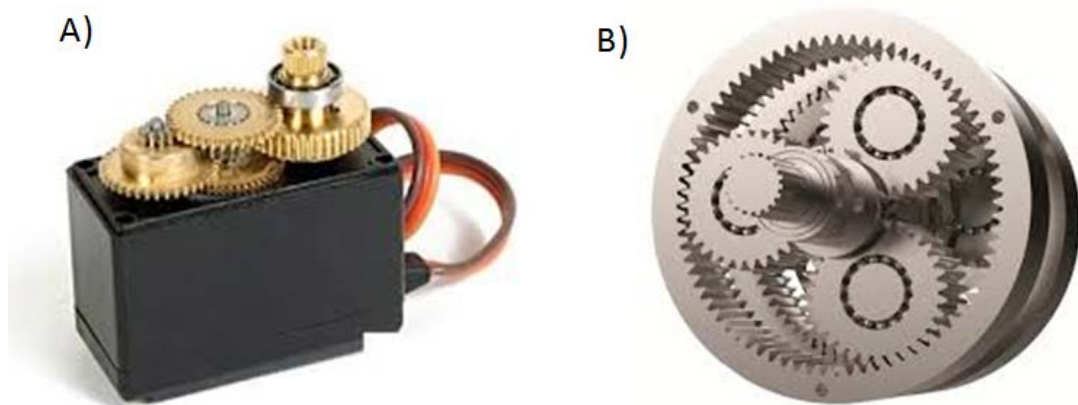
Hammasmoduuli on hammaspyörän suure, jonka yksikkö on millimetri. Vakiota merkitään m -kirjaimella. Se saadaan kaavalla

$$m = \frac{p}{\pi}, \quad (1)$$

jossa p on jakohalkaisijasta mitattu etäisyys kahden peräkkäisen hampaan kyljestä toisen hampaan samaan kylkeen. [14, s. 494.]

Hammasmoduuli muodostaa hammasluvun ja ryntökulman kanssa perustan kokohammasruksen geometrialle. Valmistusta ja laskuja varten hammasmoduulien arvot ovat standardoituja. Hammaspyöräparit toimivat vain, kun hammasmoduuli on sama. Hammaspyöräparien geometriset arvot määritetään SFS 3389 -standardin mukaan. [14, s. 494.]

Yleisimpiä hammasvaihteistoja ovat lieriö- ja planeettavaihteistot (kuva 6). RC-servoissa vaihteistot ovat usein lieriövaihteistoja. Perus planeettavaihteisto koostuu sisäpuolella olevasta renkaasta eli aurinkopyörästä ja planeettapyörästä sekä ulkohammastetusta pyörästä, jota kutsutaan keskuspyöräksi. Planeettavaihteiston etuina ovat tehonjakautuminen useille akseleille, suuri välityssuhde, symmetrinen rakenne sekä kompakti koko [14, s. 494]. Valitettavasti planeettavaihteisto ei soveltunut robottikäden käyttöön, koska robottikädessä momentin tarve on suuri. Suuri momentti nostaa välityssuhdetta, mikä kasvattaa planeettavaihteiston kokoa ja painoa.



Kuva 6. A) lieriövaihteisto [15] B) planeettavaihteisto [16].

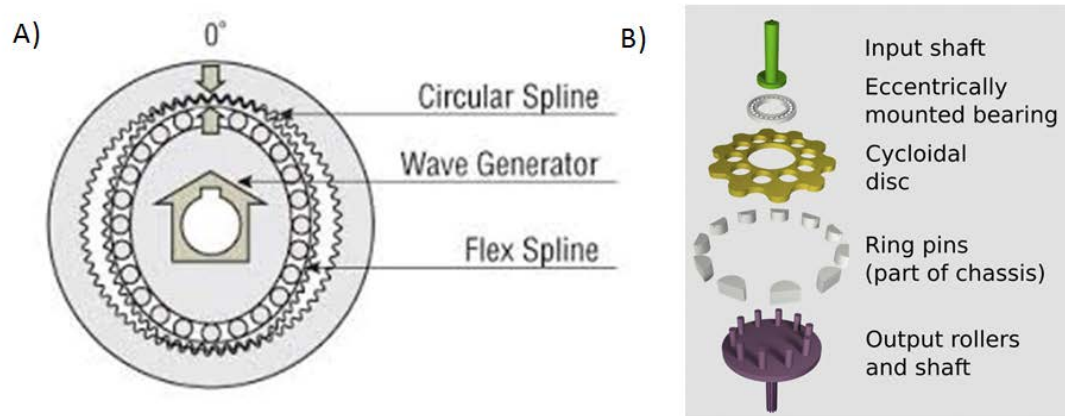
Erikoisimpia hammasvaihteistoja robottisovelluksissa ovat Cyclo- ja Harmonic Drive -vaihteistot. Nämä vaihteistot poikkeavat merkittävästi rakenteellisesti lieriö- ja planeettavaihteistoista. Cyclo- ja Harmonic Drive -vaihteistot ovat rakenteeltaan ja toiminnallisuudeltaan erilaisia, mutta mekaaniset ominaisuudet ovat lähes samoja (kuva 7).

Cyclo-vaihteisto (kuva 7) koostuu tappikehästä, cyclo-muotoisesta kaarilevyistä, epäkeskosta, rullalaakerista ja toisioakselista, johon on kiinnitetty mukaanottajatapit. Cyclo-vaihteiston käynnistysvaiheessa sähkömoottori alkaa pyörittämään ensiöakselia, johon on kiinnitetty epäkesko alkaa pyöriä. Epäkeskon pyöriessä se välittää voiman tappikehälle, joka siirtää voiman toisioakseliin kiinnitettyihin mukaanottajatapeihin. [17.]

Harmonic Drive -hammasvaihteisto (kuva 7) koostuu kolmesta peruselementistä: hammastetusta pyöreästä kehästä, taipuisasta kehästä sekä aaltogeneraattorista. Tässä vaihteistossa aaltogeneraattori on kiinnitetty moottorin akseliin. Moottorin pyöriessä aaltogeneraattori liikuttaa taipuisaa kehää, johon toisioakseli on kiinnitetty. [18, s. 33.]

Cyclo- ja Harmonic Drive -vaihteistojen suurimpana etuna verrattuna planeettavaihteistoon on niiden kompakti koko. Samalla välityssuhteella vaihteistot voivat olla jopa kolmanneksen pienempiä kuin vastaavanlainen planeettavaihteisto. Muita hyviä puolia molemmissa vaihteistoissa ovat niiden välyksettömyys, tarkkuus sekä pitkäikäisyys. Suu-

rimpana heikkoutena ovat niiden hinta ja saatavuus. [17; 18, s. 33.] Kalleuden takia Cyclo- ja Harmonic Drive -vaihteistot eivät soveltuneet robottikäden alle tuhannen euron valmistuskustannustavoitteeseen.



Kuva 7. A) Harmonic Drive -vaihteiston [18, s. 34] ja B) cyclo-vaihteiston rakenne [19].

Taulukossa 1 on listattu valmiita kaupallisia vaihteistoja, joiden mekaaniset ominaisuudet ovat lähes samanlaisia. Taulukon tarkoituksena on vertailla robottikäteen soveltuvien vaihteistomootoreiden mekaanisten ominaisuuksien lisäksi hintaa ja kokoa. Taulukossa olevat moottorit on poimittu roboshop.com-verkkokaupasta. Vertailu ei ole tasavertainen ominaisuuksiin nähden. Kalleimmissa versioissa Dynamixel Pro- ja K-75+ -servoissa on normaalin asentotunnistuksen lisäksi momenttisensoiri sekä virta- ja lämpötila-anturi. Planeettavaihteisto ei ole anturoitu. Taulukosta nähdään, että vaihteistojen hinnat poikkeavat toisistaan merkittävästi. Lisäksi hammasvaihteistojen tyyppi vaikuttaa vaihde-moottorin kokoon merkittävästi.

Taulukko 1. Vaihdelaatikoiden ominaisuuksien vertailutaulukko.

				
Nimi	H54-100-S500-R Dynamixel Pro Smart Servo Motor [20]	K-75+ Kinova Modular Actuator [21]	Planetary Gearmotor AndyMark PG188 [22]	Torxis i01856 12V High Torque Industrial Servo Motor [23]
Vaihteisto	Cyclo	Harmonic Drive	Planeetta	Lieriö
Pyörimisnopeus (ilman rasitusta)	35,2 RPM	12,2 RPM	28 RPM	60 deg/s
Virta (ilmanrasitusta)	1,06A	-	0,6A	
Käyttöjännite	24 VDC	18-29 VDC	12 VDC	12 VDC
Välityssuhde	502	-	188	1044
Maksimi momentti	37 Nm	37 Nm	45 Nm	22,6 Nm
Maksimi virta	9,7 A	2,6 A	22 A	3 A
Koko	54*54*108 mm	Ø74,5*79,9 mm	Ø45*170 mm	140*99*61 mm
Paino	732 g	570 g	1050 g	1072 g
Hinta	2 590 EUR	5 200 EUR	79 EUR	345 EUR

4 Robottikäden vaihdelaatikoiden vaatimukset

4.1 Momentti

Momentti kuvaa systeemiin kohdistuvaa vääntövaikutusta. Momentin tunnus on M ja yksikkö newtonmetri. Momentti on tärkein suure hammasvaihteistosuunnittelussa. Momentti määrittää hammasvaihteiden ja akseleiden koon sekä hammaspyörän materiaalin. Kokonaismomenttia määriteltäessä tulee ottaa huomioon sekä staattinen että dynaaminen momentti. Momenttia tarvitaan käsivarren nostamiseen ja paikalla pysymiseen. Staattisella momentilla tarkoitetaan kappaleen omasta painosta aiheutuvaa momenttia. Dynaamisella momentilla tarkoitetaan kulmakiiktyvyydestä aiheutuvaa momenttia.

4.1.1 Staattinen momentti

Staattiseen momenttiin vaikuttaa robottikäden massan lisäksi myös hammasvaihteiston, moottorin ja muiden lisäpainoa aiheuttavien komponenttien massat. Kaikki lisämassat pitää huomioida staattista momenttia laskettaessa. Jokaiselle moottorille lasketaan staattinen kuorma, joka sen pitää jaksaa nostaa. Jos oletetaan, että robotin käsivarsi on jäykkä, voidaan käyttää seuraavaa kaavaa (2) staattisen momentin laskemiseen.

$$M = F * r, \quad (2)$$

missä F on voiman vektori ja r on etäisyys voiman vaikutuspisteestä pyörimisakseliin.

Olka- ja kyynärvarressa on kolme manipulaattoria. Kaksi manipulaattoreista tekee taipumaliikettä (kyynärpää ja ranne). Yksi tekee rotaatioliikettä (ranne). Jokaiselle moottorille on laskettava oma staattisen momentin tarve. Tämä saadaan samalla kaavalla (2), mutta siihen lisätään tekijöitä, jotka vain vaikuttavat sen moottorin staattiseen momenttiin. Näitä tekijöitä ovat laskettavan moottorin edessä olevat massat ja niiden etäisyydet laskettavasta moottorista [liite 1]. Kaavan 2 mukaisesti staattinen momentti on suurimmillaan, kun käsi on kohtisuorassa.

Uuden robottikonseptin takia ei tiedetä, paljonko robottikäden osat ja hammasvaihteistot painavat, joten käsivarren massaa arvioitiin vanhan käsimallin Solidworks 3D-mallinnus-ohjelman mass properties -toiminnon perusteella. Työkalun avulla saatiin mallinnettujen kappaleiden massojen tiedot, kun osien materiaalitiedot ovat tunnettuja. Koska uuden konseptin mukaan käden koko vastaa ihmisen käden kokoa, vanhan mallin massa kolminkertaistettiin. Hammasvaihteiston massaa arvioitiin samalla periaatteella.

4.1.2 Dynaaminen momentti

Dynaamiseen momenttiin vaikuttaa kappaleen hitausmomentti ja hammasvaihteiston toisioakselin kulmakiiktyvyys. Dynaaminen kiihtyvyys on otettava huomioon, koska levosta lähtevä liike tarvitsee kiihtyvyyden, joka aiheuttaa moottoriin ylimääräisen vääntömomentin. Myös nopeuden muutoksesta syntyvä kiihtyvyys vaikuttaa dynaamiseen momenttiin. Dynaaminen momentti on otettava huomioon toiminnan kannalta.

$$M = J * a, \quad (3)$$

jossa J on kappaleen hitausmomentti ja a on kappaleen kulmakiiktyvyys.

Robottikäden varsien haluttu asento on 90 astetta lukuun ottamatta ranteen ja jalustan kiertoa. Arvioitiin, että turvallisuuden varmistamiseksi käden nopeus olisi hyvä rajoittaa 90 asteeseen yhdessä sekunnissa. Hidas kulmakiiktyvyys vähentää myös moottorin momentin tarvetta. Kulmakiiktyvyyden kaavassa kulmanopeuden yksikkönä käytetään rad/s, joten asteina määritetty käden maksiminopeus on muutettava kaavassa käytetyn yksikön muotoon. Kun 90 deg/s muutetaan rad/s-muotoon, saadaan kulmanopeuden arvoksi 1,571 rad/s. Kulmakiiktyvyys saadaan määriteltä syöttämällä kiihtyvyyden kaavaan 4 kulmanopeus ω ja ajan t muutos, jolloin moottori saavuttaa halutun aseman vaikiokulmanopeudessa.

$$\alpha = \omega/t \quad (4)$$

Hitausmomenttia ei voitu tietää, koska käden runkoa ei ole laskennan hetkellä suunniteltu. Käden osien hitausmomentit arvioitiin siten, että käsivarsi olisi ohut seinämäinen lieriö, jonka seinämän paksuus on 3 mm. Kun olkavarren, kyynärvarren ja kämmenen pituudet on määritetty, voidaan käyttää kaavaa 5 pistemäisten kappaleiden ja ohuiden ympyrärenkaisten hitausmomenttien määrittämiseen.

$$J = m * r^2 \quad (5)$$

Lisäksi on otettava huomioon moottorin hitausmomentti J_m sekä moottorin akselin ja vaihteiston yli aiheutuva hitausmomentti redusoituna J_{red} .

$$J_{red} = \frac{J}{i^2} \quad (6)$$

Tällöin kokonaishitausmomentiksi saadaan

$$J_{tot} = J + J_{red} + J_m \quad (7)$$

4.2 Väliytysuhde

Väliytysuhteella muutetaan ensiö- ja toisioakselin pyörimisnopeutta. Tässä projektissa pyörimisnopeutta muutetaan suoraan hammaspyörillä. Väliytysuhdetta voidaan muuttaa myös ketju- ja hihnaväliytysellä. Isoissa väliytysuhteissa toisioakselin pyörimisnopeus on pieni, mutta vääntömomentti on iso. Vastaavasti pienissä väliytysuhteissa toisioakselin pyörimisnopeus on iso, mutta vääntömomentti on pieni. [14, s. 678.]

Väliytysuhteen määrittelyssä on otettava huomioon ensiö- ja toisioakselin pyörimisnopeudet ja vääntömomentit. Edellisessä osiossa määriteltiin toisioakselien nopeudet ja tarvittavat momentit, mitä voidaan hyödyntää väliytysuhteen määrittelyssä.

Väliytysuhteen kaava on

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}, \quad (8)$$

jossa ω on kulmanopeus, n on pyörimisnopeus ja z on hammasluku.

Ensiö- ja toisiomomentin suhde on sama kuin hammasvaihteen väliytysuhde.

$$i = \frac{M_1}{M_2} \quad (9)$$

4.3 Moottorin mitoitus

Moottoriin kiinnitetään hammasvaihteisto, joka muuttaa moottorin pyörimisnopeutta hi-
taammaksi samalla nostaen toisioakselin vääntömomenttia. Tämän takia on tiedettävä
ensiö- ja toisioakselin pyörimisnopeudet sekä vääntömomentit, jolloin pystytään määrit-
tämään välityssuhde hammasvaihteistolle. Momenttiosiossa määriteltiin hammasvai-
hteistolle toisioakselin pyörimisnopeus ja vääntömomentti. Ensiöakselin eli moottorin ak-
selin tiedot saadaan moottorin valmistajan sivuilta.

Projektiin valittiin Mabuchin harjalliset moottorit niiden hyvän saatavuuden ja edullisen
hinnan vuoksi. Mabuchin erimallisista moottoreista löytyivät hyvät datalehdet, joissa ker-
rottiin tarkasti moottoreiden ominaisuudet. Kiinalaisten yritysten valmistamisista saman-
hintaista moottoreista ei löytynyt kunnollisia datalehtiä.

Moottoreiden valintaan vaikuttivat useat eri tekijät. Moottorin pitää olla fyysisesti mahdol-
lisimman pieni ja sen on toimittava 12 V:n käyttöjännitteellä. Ensiksi määriteltiin välitys-
suhde momentin suhteen. Moottorivalmistajan antamissa datalehdissä esitetään käyttö-
jännite- ja kierroslukukombinaatioita, joissa moottori toimii parhaimmalla hyötysuhteella.
Datalehden arvoja käytettiin hyväksi moottoreiden mitoituksessa.

Määritetään välityssuhde i momentin mukaan.

$$i = \frac{M_{toisio}}{M_{ensiö}}, \quad (10)$$

jossa M_{toisio} on toisioakselin momentti ja $M_{ensiö}$ ensiöakselin momentti eli moottorin tuot-
tama momentti ilman vaihteistoa.

Välityssuhteen määrittämisen jälkeen määritetään toisioakselin pyörimisnopeus

$$n_{toisio} = \frac{n_{eff,ensiö}}{i}, \quad (11)$$

jossa $n_{eff,ensiö}$ on moottorin tehollinen pyörimisnopeus. $n_{eff,ensiö}$ saadaan valmistajan data-
ledestä.

Näitä kaavoja iteroidaan, kunnes löydetään vaatimukset täyttävät moottorit. Moottorin mitoituksessa on otettava huomioon myös *stall current* ja *stall torque*. *Stall torque* tarkoittaa momenttia, joka pystyy pysäyttämään moottorin pyörimisliikkeen kokonaan. Sen seurauksena moottori ottaa sähköverkosta lisää virtaa. Kun virta saavuttaa *stall current* -arvon, moottori rikkoutuu. [24.]

Sähkömoottorin mitoituksessa on otettava myös huomioon moottorin hyötysuhde. Käytössä olevien harjallisten moottoreiden hyötysuhde on noin 60 - 80 %. Lisäksi hammaspyörien kitka vähentää hammasvaihteiston hyötysuhdetta. Moottorin todellinen momentin tarve on siis suurempi kuin laskuissa. Tarve ratkaistaan kaavalla 10.

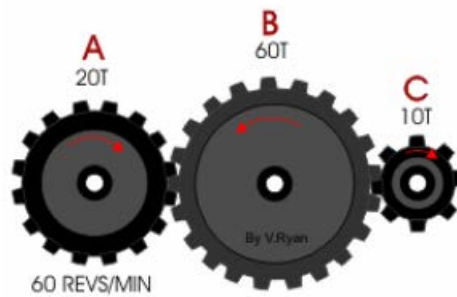
$$M_{eff} = \frac{M}{\eta}, \quad (12)$$

jossa η on moottorin hyötysuhde ja M_{eff} on moottorin tehollismomentti.

5 Vaihteiston suunnittelu

Jokaisessa vaihteistossa on joko yksi tai useampi hammaspari. Yksiparisessa hammasvaihteistossa välityssuhde on yleensä pieni, koska suurissa välityssuhteissa on suuria hammaslukuja, mikä kasvattaa hammaspyörän halkaisijaa. Esimerkiksi kun yksiparisen hammasvaihteiston välityssuhde on 10, toisiohammaspyörä on kymmenenkertaisesti suurempi kuin ensiöhammaspyörä. Jos välityssuhde on 100, toisiohammaspyörä on satakertaisesti suurempi kuin ensiöhammaspyörä. [14, s. 491.]

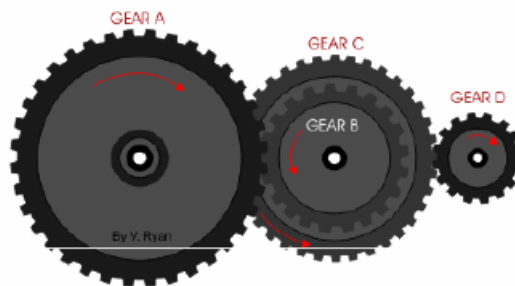
Yksinkertaisessa hammasvaihteistossa jokainen hammaspyörä on kiinnitetty omaan akseliin (kuva 8). Yleensä yksinkertaisia hammasvaihteistoja käytetään, kun ensiöakselin ja toisioakselin etäisyys on pitkä. Yksinkertaisilla vaihteistoilla ei päästä isoihin hammasuhteisiin, koska vain ensiöakselin ja toisioakselin hammasluvut merkitsevät. Kaikki näiden akselien väliset hammaspyörät eivät vaikuta välityssuhteeseen. Näitä hammaspyöriä kutsutaan tukipyöräksi (*idler*). Tukipyörät eivät vaikuta toisioakselin pyörimisnopeuteen, mutta vaikuttavat sen pyörimissuuntaan. [25, s. 678.]



Kuva 8. Yksinkertainen hammasvaihteisto [26].

$$i = \left(-\frac{z_B}{z_A}\right) \left(-\frac{z_C}{z_B}\right) = \frac{z_C}{z_A} \quad (13)$$

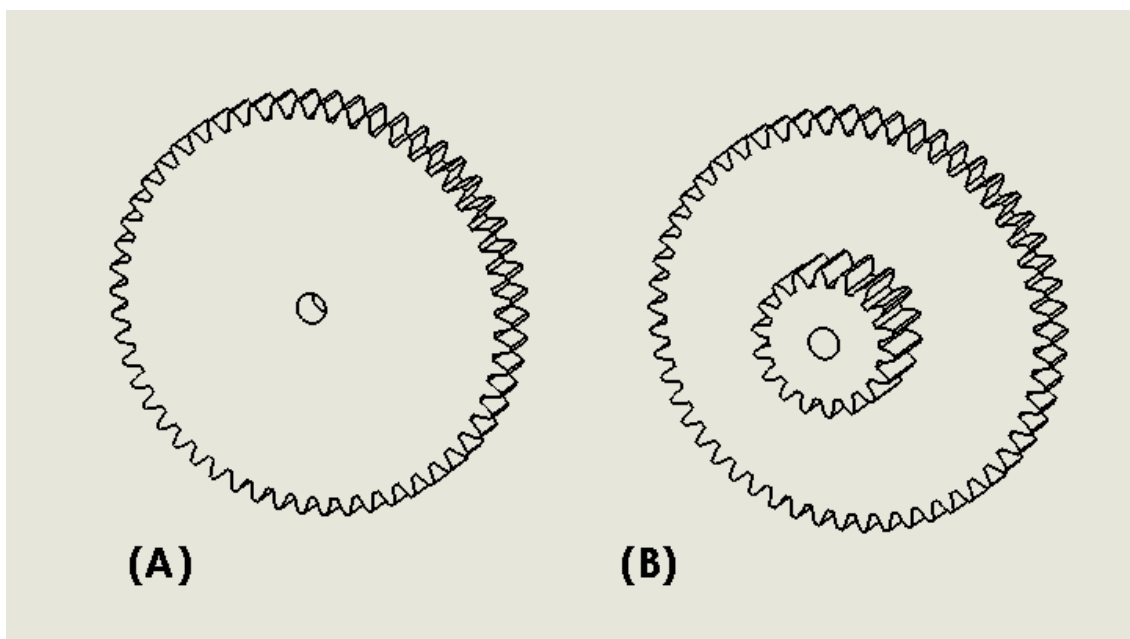
Ison välityssuhteen hammasvaihteistossa (kuva 9) käytetään yleensä yhdistettyjä hammaspyöriä (kuva 10). Yhdistetyllä hammaspyörällä tarkoitetaan kahta hammaspyörää, jotka ovat kiinnitetty toisiinsa samaan akseliin. Yhdistetyt hammaspyörät pyörivät myös samalla nopeudella. Tämän takia ensiö- ja toisioakselin välissä olevat yhdistetyt hammasrattaat saavat aikaan suuren välityssuhteen. [25, s. 679.]



Kuva 9. Hammasvaihteisto, jossa on yhdistetty hammaspyörä [27].

$$i = \left(-\frac{z_B}{z_A}\right) \left(-\frac{z_D}{z_C}\right), \quad (14)$$

jossa i on välityssuhde ja z hammaspyörien hammasluvut.



Kuva 10. (A) hammaspyörä (B) yhdistetty hammaspyörä.

5.1 Hammaslukujen ja -parien määrittäminen

Hammastuksen moduuli ja lukumäärä vaikuttavat hampaiden kuormitukseen. Hampaita mitoitetaan alustavasti koneenosien suunnittelukirjan mukaan, minkä jälkeen hammastusta mitoitetaan tarkemmin hampaiden lujuuslaskentakaavoja käyttäen.

Hampaiden minimimäärää rajoittaa ryntösuhde, jonka tulee olla suurempi kuin 1,1, jotta vaihteen käynti on mahdollisimman tasainen. Taulukossa 2 esitetään ohjearvoja hammaspyörien minimihammasluvulle. [14, s. 501]

Taulukko 2. Hammaspyörien minimihammastuslukujen ohjearvoja [14, s. 501].

	Ohjearvo
Nopeakäyntiset vaihteet	$z_{1\min} = 16$
Keskinopeat vaihteet	$z_{1\min} = 12$
Hidaskäyntiset vaihteet	$z_{1\min} = 10$
Ulkopuolinen hammaspyöräpari	$z_1 + z_2 \geq 24$
Sisäpuolinen hammaspyöräpari	$z_2 - z_1 \geq 10$

Isomman hampaan hammastukseen voidaan käyttää seuraavaa kaavaa, jossa z_2 :n arvo pyöristetään lähimpään kokonaislukuun.

$$z_2 = z_1 * \sqrt[n]{i}, \quad (15)$$

jossa n on hammasparien lukumäärä ja i on välityssuhde.

Hammastuksen leveys vaikuttaa hampaan kuormitukseen. Hammastuksen leveyttä rajoittaa akseleiden yhdensuuntaisuus. Jos hammastus on laakereiden välissä, tulee hammastuksen leveyden b olla [14, s. 501]

$$b \leq 1,2d, \quad (16)$$

jossa d on jakohalkaisija.

Jos hammastus on laakereiden välin ulkopuolella, tällöin

$$b \leq 0,75d \quad (17)$$

Myös moduuli (m) rajoittaa hammastuksen leveyttä.

$$b_{\max} = \lambda m \quad (18)$$

jossa λ on kerroin, jonka arvo saadaan taulukosta 3.

Taulukko 3. λ -kertoimen mahdolliset arvot [14, s. 501].

Hammastuksen valmistustapa	Laakerointi	λ
Valaminen	-	10
Jyrsintä, höyläys	Laakerointi ei ole vaihdekotelossa	15
Jyrsintä, höyläys	Hammastus laakerivälin ulkopuolella	15
Jyrsintä, höyläys	Hyvä laakerointi vaihdekotelossa	25
Jyrsintä, höyläys	Tarkkuuslaakerointi	30

Moduuli (m) alaraja määräytyy hampaan tasaisen kuormituksen mukaan.

$$m_{\min} = b/\lambda \quad (19)$$

Yläraja määräytyy jakohalkaisijasta ja minimihammasluvusta.

$$m_{\max} = d/z_{\min} \quad (20)$$

5.2 Akselivälin määrittäminen

Moduulin ja hammasluvun valinta määrittää akselivälin. Akseliväli on kahden hammaspyörän akseleiden välinen etäisyys, joka voidaan ratkaista kaavalla

$$a = \frac{m(z_1 + z_2)}{2} \quad (21)$$

Jos akseliväli on liian pieni, hampaan tyvi ottaa hampaan kärjestä kiinni, mikä voi aiheuttaa hammaspyörän jumittumisen tai hampaiden murtumisen. Koska hammaslukujen on oltava tasalukuja, akseliväli ei ole aina halutun suuruinen. Akseliväli halutaan usein standardin mittaiseksi. Akseliväliä voidaan säätää profiilinsiirtokertoimella. Profiilinsiirtokerrointa tarvitaan myös, kun halutaan parantaa hampaan lujuutta paksuntamalla sitä tyvestä. Profiilinsiirtokerroin toteutetaan valmistuksessa työntämällä hammasterää pois päin aihion keskiöstä, jolloin saadaan positiivinen profiilinsiirto. Kun terää työnnetään keskiötä kohti, saadaan negatiivinen kerroin. [14, s. 498]

Projektissa pyrittiin määrittämään hammasvaihteiden akseliväli siten, ettei profiilinsiirtokerrointa tarvitse käyttää. Koska projektissa käytettiin 3D-tulostimella tulostettuja hammaspyöriä, olisi hammaspyörien mallintamisessa otettava huomioon profiilinsiirtokerroin. Akseliväli määriteltiin halutun mittaiseksi, minkä jälkeen arvataan yhden hammaspyörän hammasluku. Tällöin voidaan alla olevalla kaavalla 22 laskea toisen hampaan hammasluku siten, että haluttu välityssuhde toteutuu. Kaavalla voidaan määritellä toisen hammaspyörän hammasluku.

$$z_2 = \frac{2a}{m} - z_1 \quad (22)$$

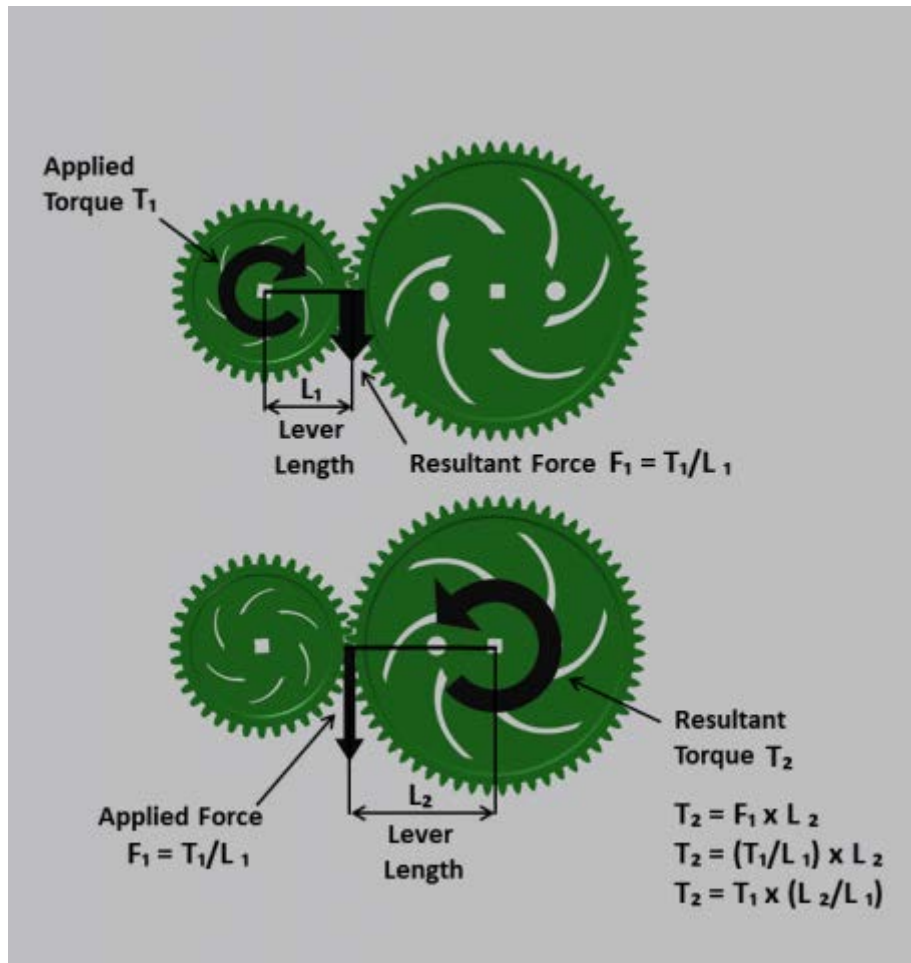
5.3 Hammasvoimien laskeminen

Projektissa käytettiin suorahampaisia hammaspyöriä. Suorahampainen lieriöpyörä aiheuttaa vastapyörään hammasvoiman F_n , joka on kohtisuorassa hammaskylkeen. Käytettävä momentti saadaan valitusta moottorista, jonka suuruus saadaan datalehdessä. Kun momentti välittyy hammaspariin, välityssuhde vaikuttaa seuraavaan hammaspariin eli momentti kasvaa parista seuraavaan (kuva 11). Kehävoimasta aiheutuva voima F_n voidaan jakaa kahteen komponenttiin, tangenttivoimaksi F_t ja säteisvoimaksi F_r . [14, s. 509]

$$F_t = F_n * \cos(\alpha) = M/r \quad (23)$$

$$F_r = F_n * \sin(\alpha) = F_t * \tan(\alpha), \quad (24)$$

missä M on käytettävän hammaspyörän momentti, α on hampaan ryntökulma ja r pyörän jakohalkaisijan säde.



Kuva 11. Momentin muuttuminen hammaspyörästä toiseen [28].

Kaavan 23 mukaisesti hammasparin kohdalla hammasvoimat ovat molemmilla ham-pailla samat, mutta hammaspyörien halkaisijat ovat erikokoisia. Tällöin momentit mole-milla pyörillä ovat erisuuruiset.

Momentti muuttuu seuraavien hammasparien jälkeen kaavan 25 mukaisesti

$$M_{out} = M_{in} * i, \quad (25)$$

jossa M_{out} on käytettävän hammaspyörän vääntömomentti, M_{in} on käytettävän hammas-pyörän vääntömomentti ja i on hammaspyörien välinen välityssuhde.

5.4 Hammasakselin mitoitus

Hammasakselin tarkoitus on kannatella pyöriviä hammaspyöriä. Pyörivät hammasakselit siirtävät vääntömomenttia hampaasta toiseen. Vääntömomenttien siirrosta syntyy hammasvoimia, jotka aiheuttavat hammasakseliin taivutusmomenttia. Akseleiden mitoituksen tarkoituksena on varmistaa, että akseli kestää hammasvoimien aiheuttamat rasitukset ja muodonmuutokset. [25, s. 535.]

Hammasakselit mitoitettiin selvittämällä ensiksi akseliin kohdistuvat hammasvoimat, jotka saadaan kaavojen 23 ja 24 avulla. Hammasvoimien selvityksen jälkeen piirretään hammasakselista vapaakappalekuva, johon on merkitty akseliin kohdistuvat voimat. Vapaakappalekuvan perusteella muodostetaan tasapainoyhtälöt, joiden perusteella ratkaistaan hammasakseleiden tukivoimat ja taivutusmomentit. Tämän jälkeen voidaan mitoitaa akselin halkaisija kaavojen 26 ja 27 mukaisesti [liite 2]. Kaavassa 26 ei huomioida vääntöjännitystä. Kaavassa 27 otetaan huomioon taivutus- ja vääntöjännitys. [26, s. 32.]

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{\max}}{s_n \cdot \pi}}, \quad (26)$$

jossa d on akselin halkaisija, M_{\max} on akseliin kohdistuva maksimi taivutusmomentti ja s_n on akselimateriaalin väsymislujuus.

$$d = \left[\frac{32}{\pi} \sqrt{\left(\frac{M_{\max}}{s_n} \right)^2 + \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{T}{s_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (27)$$

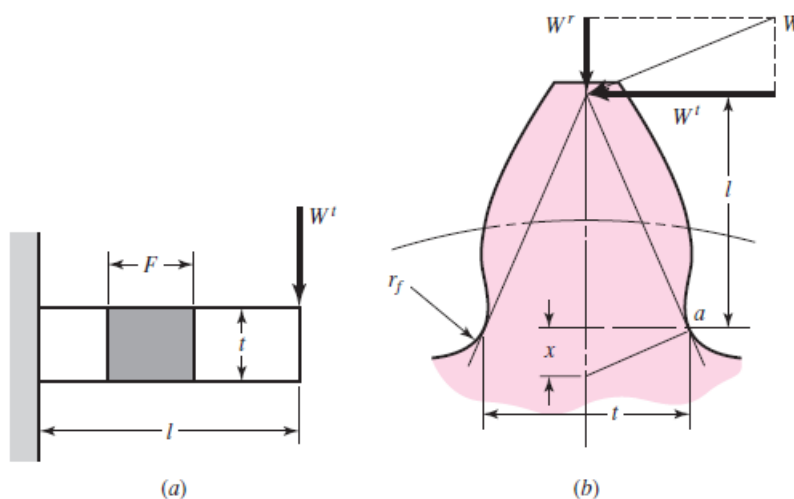
jossa T on vääntömomentti ja s_y akselimateriaalin myötölujuus.

5.5 Hampaan lujuuslaskenta

Hampaan lujuuslaskenta on tärkein vaihe hammasvaihteiden suunnittelussa, koska voimaa siirrettäessä hampaisiin kohdistuu rasitusta. Jos voima on liian iso, hammas murtuu. Lujuuslaskennan tehtävänä on varmistaa, että hampaat ovat tarpeeksi kestäviä suunniteltuun toimintaan.

Hammasvaihteiden lujuuslaskennassa on monia laskentamenetelmiä. Suomessa on hammastusten tehonsiirtokyvyn määrittämiseksi oma SFS 4790 -standardi, missä tehonsiirtokyky määritellään pintapaineen ja tyvilujuuden mukaan. Standardissa on kertoimia A:sta D:hen, missä D on karkein ja A on tarkin. Yhdysvalloissa käytetään omaa ANSI/AGMA 2001-D04 -standardia. Molemmat standardit ovat melko työläitä laskea ja nykyisessä projektissa ne eivät soveltuneet tähän työhön, koska robottikättä ei ole tarkoitus suunnitella teollisuuteen. Hampaiden lujuuslaskennassa käytettiin Lewisin kaavaa, joka on paljon yksinkertaisempi kuin yllä mainitut kaavat. Lewisin kaavalla pystytään pelkistetysti arvioimaan melko hyvällä tarkkuudella hampaan lujuutta. [14, s. 514; 27, s. 714.]

Lewisin kaava on ensimmäisiä kaavoja, joita on otettu käyttöön hammasvaihteiden lujuuden analysointiin. Kaava perustuu seinään jäykästi kiinnitettyyn palkkiin, jonka päähän on kohdistettu pistemäinen voima. Suurin taivutusjännitys on hampaantyvessä, pisteessä a (kuva 12). Hammasmuoto voidaan yksinkertaistaa kolmiolla. Lewisin kaavalla pystytään laskemaan vain hampaan taivutusjännitystä eikä siinä ole otettu huomioon säteisvoimaa eikä kitkaa. Lisäksi hammasvoiman oletetaan olevan vain hampaan kärjessä, mikä ei ole totta. Hammasvoima liikkuu hammaspyörän pyöriessä hampaan kyljen tyvestä hampaan kärkeen. [27, s. 714.]



Kuva 12. Kaava seinään kiinnitetylle palkille, johon on kohdistettu pistemäinen voima [27, s.714].

Palkin taipumisjännityksen kaava on

$$\sigma_b = \frac{6W_t l}{F t^2}, \quad (28)$$

jossa W_t on palkkiin kohdistuva tangentialinen voima, l on palkin pituus, t on palkin paksuus ja F on palkin leveys.

Kaava jossa palkkiin otetaan huomioon hampaan muoto.

$$\sigma_b = \frac{W_t}{F Y_m}, \quad (29)$$

jossa m on hammasmoduuli, F on hampaan leveys ja Y on Lewisin kerroin.

Lewisin kerroin voidaan laskea joko digitaalisesti tai käyttämällä graafista taulukkoa 4.

Taulukko 4. Lewisin kerroin, kun ryntökulma on 20 astetta [27, s.714].

Number of Teeth	Y	Number of Teeth	Y
12	0.245	28	0.353
13	0.261	30	0.359
14	0.277	34	0.371
15	0.290	38	0.384
16	0.296	43	0.397
17	0.303	50	0.409
18	0.309	60	0.422
19	0.314	75	0.435
20	0.322	100	0.447
21	0.328	150	0.460
22	0.331	300	0.472
24	0.337	400	0.480
26	0.346	Rack	0.485

Kun hammaspyöräparit pyörivät, syntyy dynaaminen vaikutus. Dynaamisen lisäkuormituksen seurauksena nopeasti pyörivässä hammaspyörässä hampaaseen kohdistuu suurempi tangentialivoima kuin hitaammassa hammaspyörässä. Tätä kutsutaan dynaa-

miseksi vaikutukseksi. Tämän takia tarvitaan dynaaminen kerroin K_v , jonka suuruus saadaan Barthin kaavalla. Hampaiden valmistusmenetelmät vaikuttavat dynaamiseen kerrotimeen. [27, s. 714.]

$$K_v = \frac{3.05 + V}{3.05} \quad (\text{cast iron, cast profile})$$

$$K_v = \frac{6.1 + V}{6.1} \quad (\text{cut or milled profile})$$

$$K_v = \frac{3.56 + \sqrt{V}}{3.56} \quad (\text{hobbed or shaped profile})$$

$$K_v = \sqrt{\frac{5.56 + \sqrt{V}}{5.56}} \quad (\text{shaved or ground profile})$$

Kun dynaaminen kerroin lisätään Lewisin kaavaan, saadaan paranneltu kaava.

$$\sigma_b = \frac{K_v W_t}{F Y_m} \quad (30)$$

Taivutuksen lisäksi hampaisiin kohdistuu myös pintajännitys. Pintajännityksen suuruus saadaan kaavalla

$$\sigma_c = -C_p \left[\frac{K_v W_t}{F \cos(\alpha)} * \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \right]^{1/2} \quad (31)$$

$$r = \frac{d}{2} * \sin(\alpha) \quad (32)$$

$$C_p = \left[\frac{1}{\pi \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)} \right]^{1/2}, \quad (33)$$

missä C_p on elastinen kerroin, E on hammaspyörän kimmokerroin ja ν liukukerroin. R on säde, johon hampaiden pintajännitys kohdistuu. Yleensä hampaat kuluvat lähellä nimellishalkaisijaa d . Pintajännityksen kohdistuspisteen arvon laskemiseksi käytetään kaavaa 31. [27, s. 724.]

5.6 Hammaspyörän materiaalivalinta

Hammaspyörrien materiaalien tärkeimmät ominaisuudet ovat vetolujuus, väsymislujuus, kovuus, jäykkyys ja vähäinen kitka. Myös helposti työstettäviä materiaaleja arvostetaan teollisuudessa. Yleisesti hammasvaihteet valmistetaan muun muassa teräksestä, messingistä, pronssista sekä monista seosmetalleista. Metallin etu muoviin hammaspyörrien materiaalina ovat sen korkeat lujuusominaisuudet, joiden takia metallisia hammaspyöriä käytetään paljon lujuutta vaativissa sovelluksissa. Huonoina puolina metallipyörissä ovat niiden aiheuttama melu, värähtely ja korroosio. Muovia käytetään myös usein hammaspyörrien materiaalina. Verrattuna metallisiin hammaspyöriin muovilla ei ole yhtä hyvät lujuusominaisuudet, mutta muilta ominaisuuksiltaan muovi on parempi kuin metalli. Muovissa ei tapahdu korroosiota toisin kuin metallissa. Muovipyörät vaimentavat pyörimisessä syntyvää värähtelyä, minkä ansiosta hammaspyörät ovat myös hiljaisempia kuin metalliset hammaspyörät. Lisäksi muovimateriaalit ovat kevyempiä kuin metalliset, mikä vähentää pyörrien hitausmomenttia parantaen vaihteiston hyötysuhdetta. Muovihammaspyörrien valmistuskustannukset ovat myös alhaisempia kuin metallipyörrien. Yleisimmät muovimateriaalit, joita käytetään hammaspyörrien valmistuksessa ovat muun muassa PA 6, PA66 ja POM-C. [29; 30.]

Robottikädessä ranteen rotaation ja kierron hammaspyörät 3D-tulostettiin tilaustyönä suomalaiselta 3D-tulostusyritykseltä. Hammaspyörät tulostettiin SLS-tekniikalla ja materiaalina oli PA3200GF. Se on polyamidi, jota on vahvistettu lasikuidulla. Verrattuna normaaliin polyamidimateriaaliin, PA3200GF on lähes kaksi kertaa vahvempaa. Yleisesti käytetyillä ABS- ja PLA-tulostusmateriaaleilla voidaan tulostaa hammaspyöriä, mutta niiden lujuusominaisuudet eivät ole yhtä hyviä kuin PA3200GF:n. Materiaaleilla, joilla on hyvät lujuusominaisuudet, voidaan suunnitella kappaleet pienemmäksi kuin niillä, joilla on huonommat lujuusominaisuudet. Myös 3D-tulostin vaikuttaa hammasvaihteen fyysiseen kokoon. Suurimassa osassa saatavilla olevista 3D-tulostimista suuttimen koko on noin 0,3 mm, joten hammasmoduuli ei saa olla pienempi kuin suuttimen koko. Jos moduuli on pienempi kuin tulostimen suutin, hampaiden muoto vääristyy. Tällöin hampaiden voimat eivät välity oikein hammaspyörrien hampaisiin. Moduulin pitää olla reilusti suurempi kuin suuttimen koko, jotta hammasvaihte toimii.

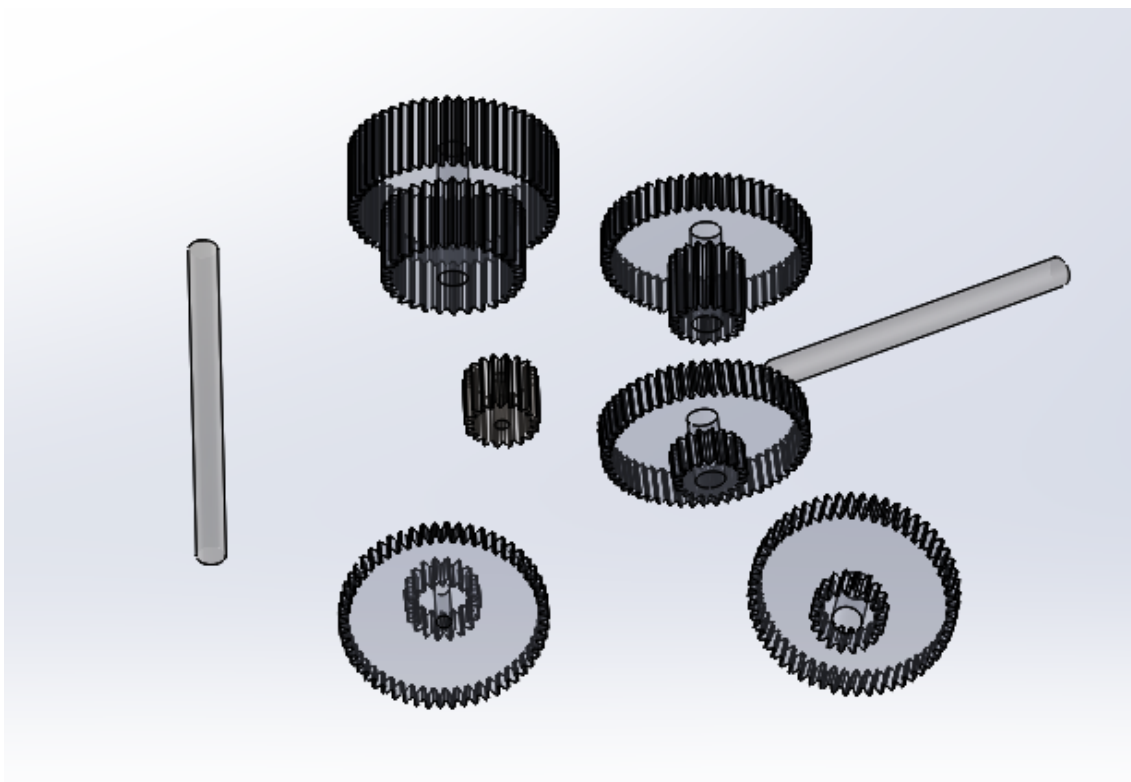
PA3200GF-materiaalia käytettiin ranteen rotaation ja kiertymisen vaihteistoihin, koska käsi haluttiin kevyeksi. Liika paino käden yläosalle aiheuttaa ylimääräisen rasituksen käden alustalle ja olkapään hammasvaihteistolle. Käyttämällä kevyempiä hammaspyöriä,

alustaan kohdistuu vähemmän rasitusta. Muoviset hammaspyörät olivat myös edullisempia kuin metalliset. Kevyemmät vaihdelaatikot käden yläpäässä säästävät myös olka- ja kyynärpään moottoreita. Metallisia hammasvaihteita käytettiin olka- ja kyynärpäähän, koska niiden hampaisiin kohdistuu suurimmat voimat.

5.7 Kotelon suunnittelu

Kun kaikki hammaspyörän moduulit, hammasluvut, välityssuhteet ja lujuuslaskenta oli tehty, voitiin aloittaa kotelon suunnittelu hammasvaihteille. Kotelosta haluttiin mahdollisimman pieni, koska hammasvaihteisto haluttiin sijoittaa robottikäden sisälle.

Kotelon suunnittelu alkoi hammaspyörien asettamisella CAD-ohjelman avaruuteen (kuva 13), jossa ne laitettiin alustavasti kokoon. Aluksi pyörät saivat olla avaruudessa missä asennossa vain. Koottaessa hampaiden tulee olla yhdensuuntaisia ja samojen parien on oltava samassa portaassa. Suorahampaisessa vaihteistossa jokainen hammaspari on joko yksi- tai kaksiportainen. Portailla tarkoitetaan kotelon kerrosta, jossa hammasvaihteen pari tai parit ovat. Kun hampaat on asetettu CAD-avaruudessa haluttuun paikkaan, määritellään avaruuteen hammaspareille akselivälit. Tässä vaiheessa voidaan vielä hienosäätää hampaiden moduuleja ja hammaslukuja. Moduulien ja hammaslukujen muuttamisella saadaan hampaat pienempään tilaan. Tällöin myös kotelon kokoa saadaan pienemmäksi, koska moduuli ja hammasluku vaikuttavat hammaspyörän halkaisijan kokoon. Lujuuslaskenta on tehtävä uudestaan, jos hampaita muutetaan.



Kuva 13. Hammaspyörät ja akselit CAD-avaruudessa.

Kun hampaat ovat koossa ja laskut tarkastettu, voitiin aloittaa kotelon mallintaminen. Kotelon mallintamisessa on otettava huomioon moottorin ja potentiometrin kiinnitys sekä se, että hampaat pääsevät vapaasti pyörimään. Akselin taipumien määrittelyyn käytetyssä kaavassa ehtona oli, että akseli on molemmista päistään jäykästi kiinnitetty. Tätä ehtoa oli otettava mallinuksissa huomioon.

Kotelon suunnittelussa huomioitiin myös toisioakselin liikkeen laajuudet. Hammasvaihteistoissa asennon tunnistukseen asennettu potentiometrin mittausalue on 270 astetta. Koska potentiometri on kiinnitetty toisioakseliin, potentiometri voi rikkoutua kun toisioakseli pyörii yli potentiometrin mittausalueen. Tämän takia on hyvä suunnitella vaihteistoon mekaaninen rajoitus, joka estää toisioakselia menemästä mittausalueen ulkopuolelle. Mekaaninen rajoitus toteutettiin mallintamalla hammaspyörään tappi ja koteloon sitä vastaava rajoitin.

6 Suunnittelun tulokset

Tavoitteena oli suunnitella mahdollisimman kompaktin kokoiset vaihdelaatikot, joilla on tarpeeksi hyvät mekaaniset ominaisuudet niille suunniteltuun käyttötarkoitukseen. Lopputuloksena saatiin viisi toimivaa vaihdelaatikkoa, jotka jaksavat nostaa niille asetetuilla vaatimuksilla. Suunnittelussa yritettiin käyttää mahdollisimman samoja hammasmoduuleja. Tämä ei ollut kaikissa tapauksissa mahdollista, koska hammasvoimat kasvoivat porras portaalta isommaksi johtaen hammasmoduulin ja akselin koon kasvamiseen. Hammasmoduulia kasvattamalla saadaan lisää kestävyyttä hampaisiin. Osa hammaspyöristä teetettiin suomalaisessa konepajassa. Valmistajalla oli suppea valikoima hammaspyörrien valmistamiseen tarkoitettuja teriä, mikä aiheutti omat rajoitteensa suunnittelulle. Hammasvaihteet, joihin kohdistuivat pienemmät voimat, tulostettiin 3D-tulostimilla. 3D-tulostimet aiheuttivat omat rajoitteensa hammaspyörrien suunnittelulle. 3D-tulostettavien hammaspyörrien suunnittelussa on huomioitava materiaalin ominaisuuksien lisäksi 3D-tulostimen tulostustarkkuus.

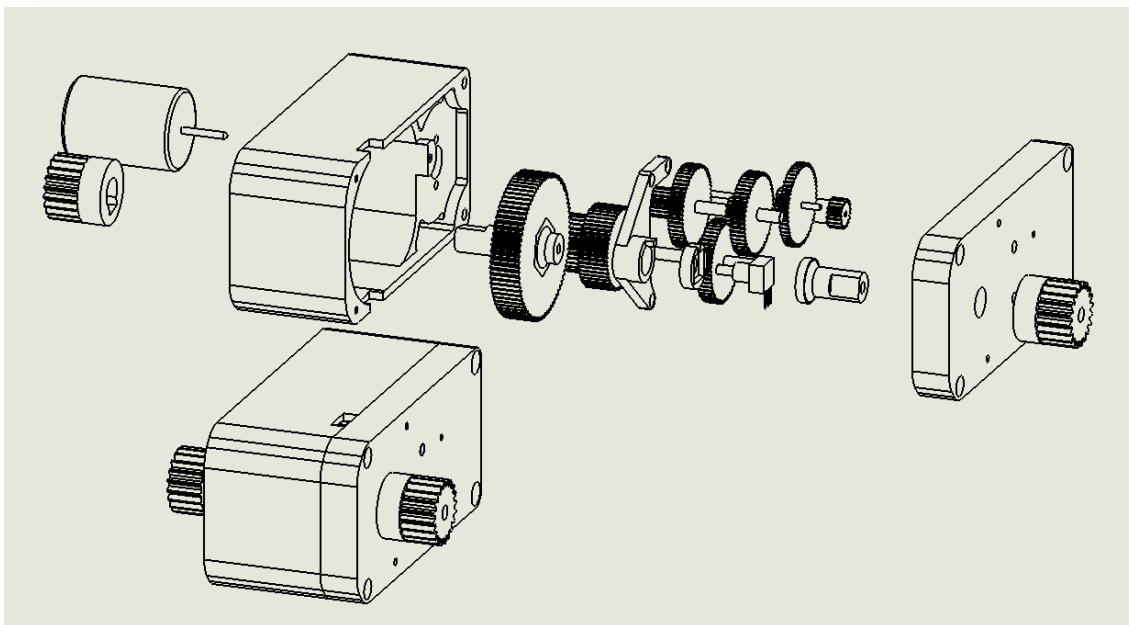
Suunnittelussa pyrittiin pitämään akselivälit samana, koska akselivälin muuttaminen saattaa vaatia lisääkselin. Lisääkseli lisää vaihdekotelon tilan tarvetta ja tekee vaihteistosta monimutkaisen. Kaikissa vaihteistoissa aseman tunnistimena käytettiin potentiometriä [liite 3], jonka mittausalue on 270 astetta.

6.1 Olka- ja kyynärpää

Robottikäden olkavarteen kohdistui suurin momentti. Suuri momentti olkavarressa kasvatti vaihdelaatikon fyysistä kokoa, ja tämän seurauksena se vaati kestävämmät hampaat. Olkapään hammasvaihteistosta tuli robottikäden suurin vaihdelaatikko. Samaa vaihdelaatikkoa päätettiin käyttää myös kyynärvarteen, koska suunnittelussa pyrittiin suunnittelemaan sellaisia hammasvaihteistoja, joita pystytään hyödyntämään myös muissa robottikäsivarren osissa. Olkapäähän suunniteltu hammasvaihteisto sopi kyynärpäähän ja vaihteiston vääntömomentti oli riittävän suuri kyynärvarren nostamiseen.

Olka- ja kyynärpään kuusiportainen hammasvaihteisto (kuva 14) sisältää 12 hammaspyörää, joista viisi ovat yhdistettyjä hammaspyöriä (taulukko 5). Hammaspyörrien moduulit ovat $m\ 0,5$ ja $m\ 1$. Hammaspyörät valmistettiin metallista hampaisiin kohdistuvan suuren voiman takia. Koska hammaspyörät on valmistettu metallista, pyrittiin suunnittelussa

käyttämään mahdollisimman paljon samoja hammasmoduuleja ja pitämään hammaspyörien halkaisija samana. Hammasmoduulia ja pyörien halkaisijoiden pitäminen samana nopeuttaa hammaspyörien valmistusta ja vähentää niiden valmistuskustannuksia. Hammasvaihteiston välityssuhteeksi saatiin 729.



Kuva 14. Räjätyskuva olkapään hammasvaihteistosta.

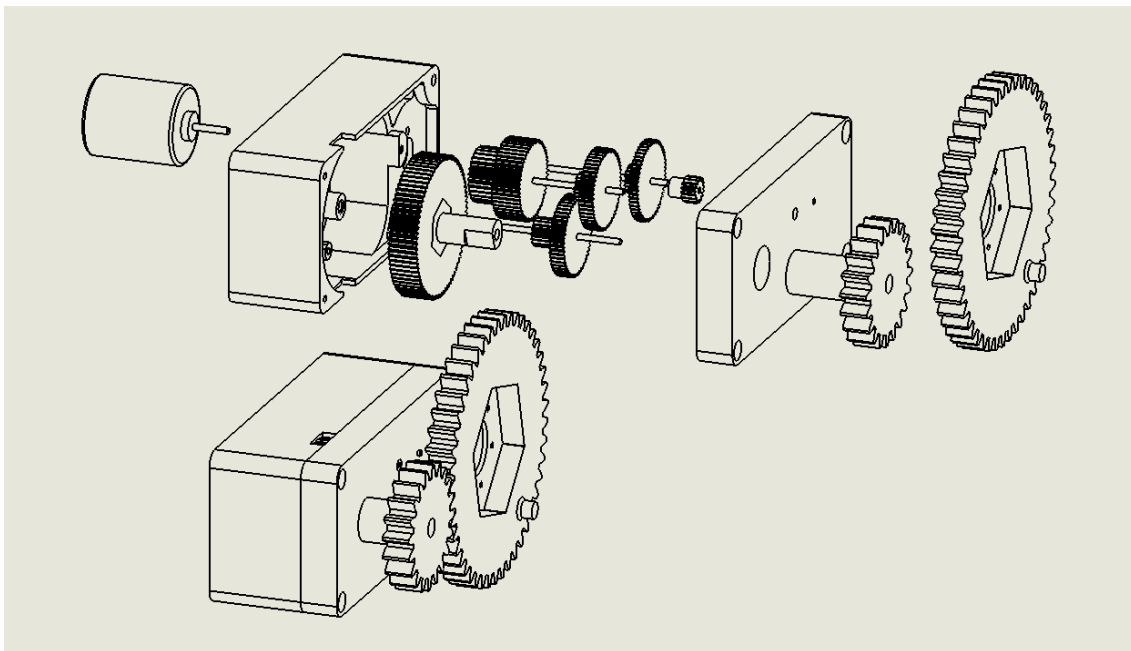
Hammasvaihteiston moottoriksi valittiin Mabuchin tasavirtamoottori, jonka malli on RS-380PH-3270 [liite 4]. Valittu moottori toimii 12 V:n jännitteellä, ja se pyörii ilman kuormaa 16 400 kierrosta minuutissa virran ollessa 0,37 A. Moottorin maksimivirta on 14 A. Vaihteisto on suunniteltu kestäämään 10 Nm:n kuorma. Olkapään hammasvaihteistoon yhdistetty moottori tuottaa datalehden mukaan parhaimmalla hyötysuhteella noin 9,6 Nm:n momentin, kun käyttöjännite on 12 V ja virta 2,28 A. Teoriassa olkapään vaihdelaatikon maksimi momentti on 68 Nm, mutta käytännössä tätä ei voi saavuttaa, koska mekaaniset rajoitteet tulevat silloin vastaan.

Taulukko 5. Olkapään vaihteiston hammaspyörien tiedot: z on hammasluku, d on halkaisija millimetreinä, i on välityssuhde, a on akseliväli millimetreinä ja l on hammasleveys millimetreinä.

Pari	z_1	z_2	m	d_1	d_2	r_1	r_2	i	a	l
1	16	54	0,5	8	27	4	13,5	3,375	17,5	3
2	18	54	0,5	9	27	4,5	13,5	3	18	5
3	18	54	0,5	9	27	4,5	13,5	3	18	5
4	18	54	0,5	9	27	4,5	13,5	3	18	5
5	18	54	0,5	9	27	4,5	13,5	3	18	10
6	18	48	1	18	48	9	24	2,666667	33	10

6.2 Jalusta

Jalustan rotaation hammasvaihteiston (kuva 15) suunnittelussa on pyritty hyödyntämään olkapään vaihteiston hammaspyöriä (taulukko 6) ja koteloa. Jalustan rotaation hammasvaihteisto sijoitetaan robottikäden jalustan alle, jotta siihen ei kohdistuisi yhtä suurta vääntöä kuin olkapään vaihdelaatikossa. Tällöin alustan vaihdelaatikon vääntömomentin tarve on pienempi kuin olkapään. Lisäksi jalustassa on enemmän tilaa, jota voidaan hyödyntää vaihdelaatikon suunnittelussa. Jalustan suuren tilan ansiosta hammaspyörien kokoa voidaan kasvattaa vaihteiston viimeisessä hammasparissa. Vaihteiston viimeisen hammaspyöräparin hammaskoon kasvattaminen vähentää hampaisiin kohdistuvaa rasitusta, minkä takia hammaspyörän materiaalina voidaan käyttää muovia. Vaihteiston muissa pareissa käytettiin samoja metallisia hammaspyöriä kuin olkapään vaihteistossa. Vaihteen välityssuhteeksi saatiin 486.



Kuva 15. Räjätyskuva jalustan hammasvaihteistosta.

Jalustaa pyörittäväksi moottoriksi valittiin RS-365SH-2080 [liite 5], joka toimii 12 V:n jännitteellä ja pyörii ilman kuormaa 19 400 kierrosta minuutissa virran ollessa 0,25 A. Moottorin maksimivirta on 5,2 A. Vaihteisto on suunniteltu nostamaan noin 4 Nm:n kuormia. Jalustan hammasvaihteistoon yhdistetty moottori tuottaa datalehden mukaan parhaimmalla hyötysuhteella noin 3,7 Nm:n momentin, kun käyttöjännite on 12 V ja virta 1,14 A. Teoriassa olkapään vaihdelaatikon maksimi momentti on 13 Nm.

Jalustan haluttiin pyöriä yli 360 astetta, mikä osoittautui mahdottomaksi asennon tunnistusanturin takia. Potentiometri toimii vaihteiston asennon tunnistimena. Valittu asennon tunnistusalue on 270 astetta, joka rajoitti 360 asteen tavoitetta. Jos jalustan pyörimistavoitteeksi olisi asetettu 270 astetta, anturi olisi pitänyt asentaa jalustan keskelle. Keskelle sijoitettu anturi taas aiheutti ongelmia, koska robottikäden sähkönsyötön ja tiedonsiirtoväylän kaapeleiden läpivienti sijaitsee jalustan keskellä. Kaapelit voivat katketa jalustan pyöriessä. Anturi päätettiin kiinnittää kuudennen hammasparin pienemmälle pyörälle, koska pienemmässä hammaspyörässä oli tilaa kiinnittää anturi eikä se aiheuta kaapeleille leikkautumisongelmaa. Valitettavasti tällöin jalusta pyörii vain 120 astetta, koska kuudennen hammasparin välityssuhde on 2,25. Tämä ei ollut toivottu tulos. Jalusta on mahdollista saada pyörimään 360 astetta, mutta aikataulun takia sitä ei ehditty toteuttamaan.

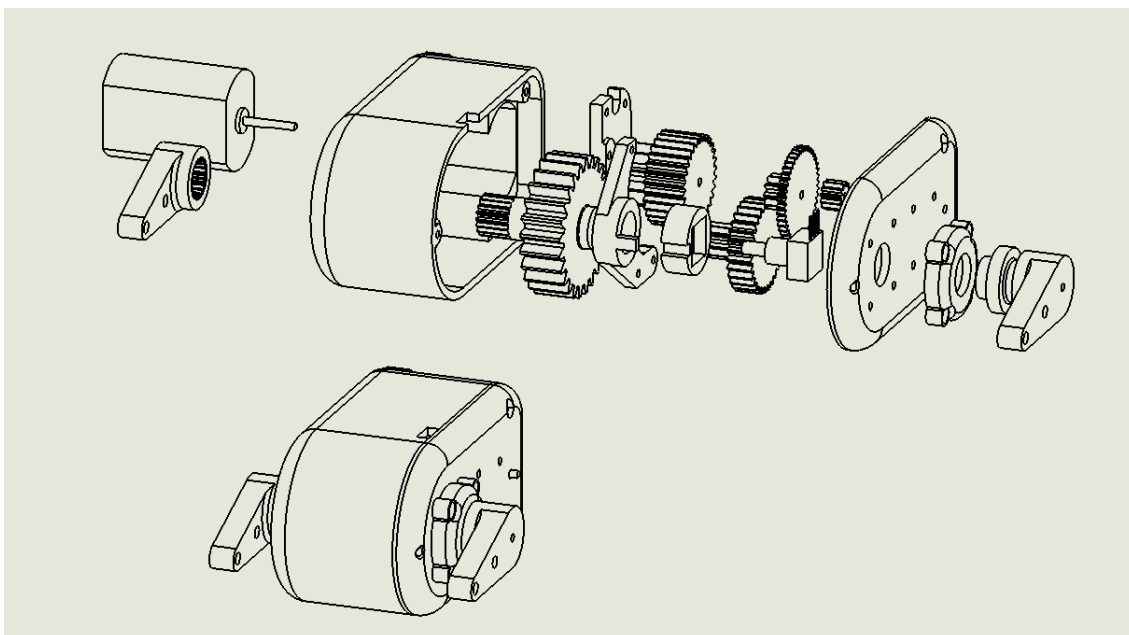
Taulukko 6. Jalustan vaihteiston hammaspyörien tiedot: z on hammasluku, d on halkaisija millimetreinä, i on välityssuhde, a on akseliväli millimetreinä ja l on hammasleveys millimetreinä.

Pari	z_1	z_2	m	d_1	d_2	r_1	r_2	i	a	l
1	18	54	0,5	9	27	4,5	13,5	3	18	3
2	18	54	0,5	9	27	4,5	13,5	3	18	5
3	18	54	0,5	9	27	4,5	13,5	3	18	5
4	18	54	0,5	9	27	4,5	13,5	3	18	5
5	18	48	1	18	48	9	24	2,67	33	10
6	20	45	2	40	90	20	45	2,25	65	7

6.3 Ranne

Robottikäden ranteeseen kohdistuivat pienemmät voimat kuin olka- ja kyynärpäässä. Tämän takia ranteessa voitiin käyttää 3D-tulostettuja hammaspyöriä. Jos robottikäsi tulevaisuudessa kaupallistetaan, hammaspyörät voitaisiin valmistaa ruiskuvalutekniikalla paremman tarkkuuden ja kestävyuden saavuttamiseksi. Suunniteltaessa 3D-tulostettavia hammaspyöriä, on otettava huomioon tulostimen tarkkuus, koska pienimoduulisissa hammasvaihteissa tarvitaan tarkkaa 3D-tulostinta. Jos yrittää tulostaa liian pientä hammasmoduulia huonolla tulostustarkkuudella, hammaspyörien hammasmuodot eivät tule esille. Tällöin niitä ei voida käyttää, koska voimat eivät välity hampaisiin. Kokemusten perusteella 3D-tulostettavien hammaspyörien pienin hammasmoduuli on 0,5. Ranteen hammasrattaat tulostettiin SLS-tulostimella.

Ranteeseen suunniteltu viisiportainen vaihteisto (kuva 16) sisältää 10 hammaspyörää, joista kolme ovat yhdistettyjä hammaspyöriä (taulukko 7). Hammaspyörien moduulit ovat m 0,5, m 0,7 ja m 1,25. Hammasvaihteen välityssuhteeksi saatiin 165. Moottoriksi valittiin FC-280SC-18180 [liite 6], joka toimii 12 V:n jännitteellä ja pyörii ilman kuormaa 9 600 kierrosta minuutissa virran ollessa 0,07 A. Moottorin maksimivirta on 2,7 A. Vaihteisto on suunniteltu nostamaan 0,5 Nm:n kuorman. Ranteen hammasvaihteistoon yhdistetty moottori tuottaa datalehden mukaan parhaimmalla hyötysuhteella noin 0,6 Nm:n momentin, kun käyttöjännite on 12 V ja virta 0,43 A. Teoriassa olkapään vaihdelaatikon maksimimomentti on 4 Nm.



Kuva 16. Räjätyskuva ranteen hammasvaihteistosta.

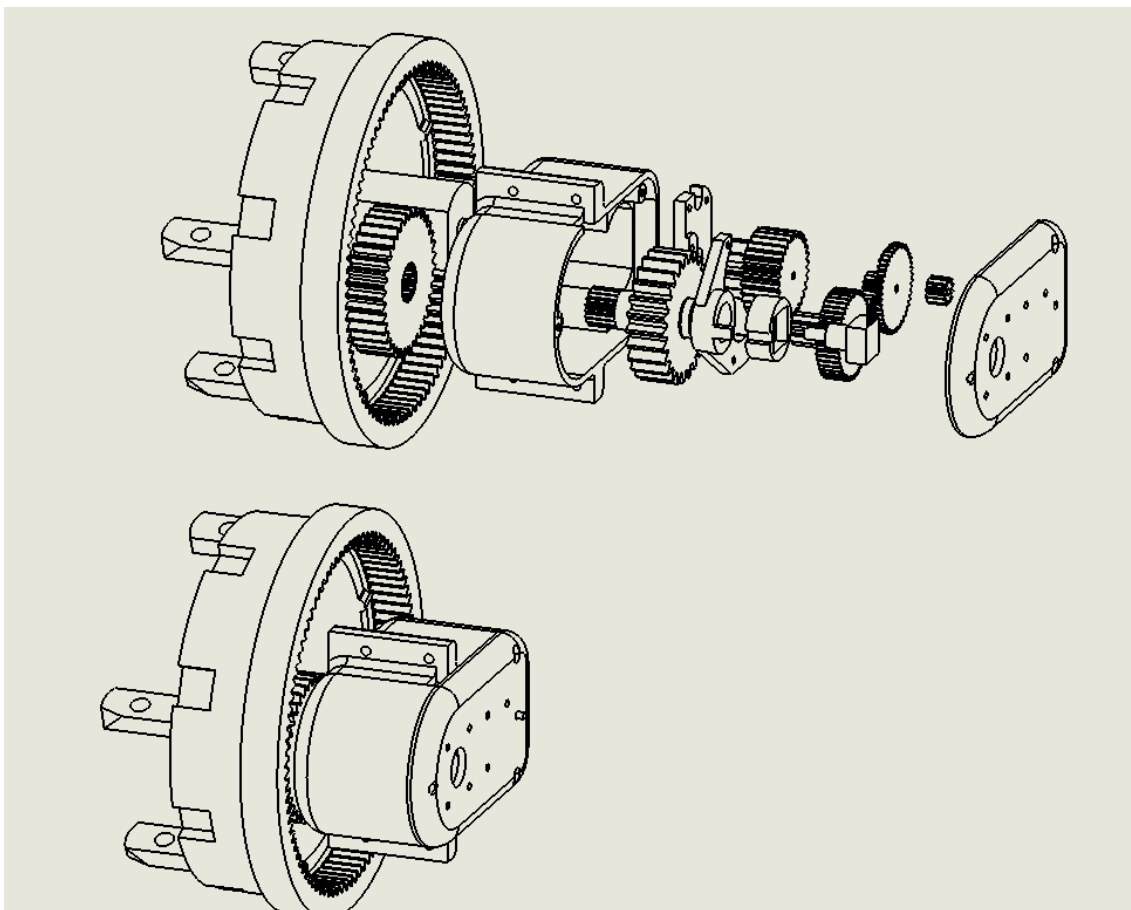
Taulukko 7. Ranteen vaihteiston hammaspyörien tiedot: z on hammasluku, d on halkaisija millimetreinä, i on välityssuhde, a on akseliväli millimetreinä ja l on hammasleveys millimetreinä.

Pari	z_1	z_2	m	d_1	d_2	r_1	r_2	i	a	l
1	12	24	0,5	6	12	3	6	2	9	2
2	12	44	0,5	6	22	3	11	3,67	14	2
3	10	30	0,7	7	21	3,5	10,5	3	14	6
4	10	30	0,7	7	21	3,5	10,5	3	14	10
5	10	25	1,25	12,5	31,25	6,25	15,625	2,5	21,875	10

6.4 Ranteen rotaatio

Ranteen rotaation toteutuksessa (kuva 17) on hyödynnetty ranteen hammasvaihteistoa. Erona ranteen vaihdelaatikkoon ranteen rotaatiossa on yksi ylimääräinen sisähammastettu hammaspari. Muutoin molemmat hammasvaihteistot ovat identtisiä. Sisähammastetun parin tarkoitus on pyörittää rannetta. Ranteeseen päätettiin lisätä sisähammastus ranteen pyörittämiseksi, koska toteutus vie vähiten tilaa ja on helppo toteuttaa. Toinen vaihtoehto on kiinnittää ranteen vaihteisto keskelle pyöritettävää akselia, mutta tämä olisi aiheuttanut ongelmia vaihdelaatikolle ja kyynärvarren kiinnitykselle. Vaihdelaatikko olisi pitänyt kiinnittää tarkasti pyöritettävän akselin keskipisteeseen, mikä on melko hankalaa

rungon valmistustekniikan vuoksi. Lisäksi kiinnitykselle on mallinnettava paikka kyynärvarren runkoon, mikä lisää kyynärvarteen ei-toivottua painoa. On järkevämpää käyttää sisähammastusta ranteen pyörittämiseen, koska se sallii pienen asennusvirheen ja epätarkkuutta toisin kuin akseliin kiinnitettävä toteutustapa.



Kuva 17. Räjätyskuva ranteen hammasvaihteiston rotaatiosta.

Sisävaihteiston takia vaihteiston välityssuhde muuttuu 165:stä 412,5:een, koska viimeisen hammasparin välityssuhde on 2,5 (taulukko 8). Ylimääräinen hammaspari kasvattaa välityssuhdetta 2,5-kertaisesti. Välityssuhteen kasvattaminen rajoitti ranteen rotaation liikelaajuutta, koska asennontunnistin on kiinnitetty vaihdelaatikon sisälle (kuva 16). Tämä tarkoittaa sitä, että rannetta ei voi pyörittää 108 astetta enempää, koska anturi on kiinnitetty viidennen hammasparin viimeiselle akselille. Anturin mittausalue on 270 astetta ja jakamalla se 2,5 saadaan 108 astetta. Ranteen rotaatio on rajoitettu ohjelmallisesti 90 asteeseen. Alun perin ranteen rotaation haluttiin olevan 180 astetta. Tätä ei toistaiseksi vielä pystytty toteuttamaan, koska vaihtoehtoiset aseman mittausanturit ovat joko liian kalliita tai ne eivät sovellu nykyiseen robottikäden ohjelmistoon.

Taulukko 8. Ranteen rotaatiovaihteiston hammapyörien tiedot: z on hammasluku, d on halkaisija millimetreinä, i on välityssuhde, a on akseliväli millimetreinä ja l on hammasleveys millimetreinä.

Pari	z1	z2	m	d1	d2	r1	r2	i	a
1	12	24	0,5	6	12	3	6	2	9
2	12	44	0,5	6	22	3	11	3,67	14
3	10	30	0,7	7	21	3,5	10,5	3	14
4	10	30	0,7	7	21	3,5	10,5	3	14
5	10	25	1,25	12,5	31,25	6,25	15,63	2,5	21,88
6	36	90	1	36	90	18	45	2,5	63

7 Hammasvaihteistojen testaus

Hammasvaihteistot tarkastetaan ja testataan ennen asentamista robottikäteen. Tarkoituksena on varmistaa, että vaihteisto toimii oikein. Vaihdelaatikoiden testaus suoritettiin laboratorio-olosuhteissa käyttämällä testaukseen tarkoitettuja instrumentteja, joilla voitiin asettaa haluttu jännite ja maksimivirta. Virtaa rajoittamalla voidaan ehkäistä moottorin virran nousua liian korkeaksi, mikä voi aiheuttaa moottorin rikkoutumisen. Hammasvaihteistoja testattiin sekä kuorman kanssa että ilman.

Valitettavasti kaikkia hammasvaihteistoja ei ehditty testaamaan perusteellisesti tiukan aikataulun takia. Ainoastaan olka- ja kyynärpään vaihdelaatikoita kyettiin testaamaan kuormien kanssa, koska olkapään hammasvaihteisto oli suunniteltu ensimmäiseksi. Ensimmäisen suunnitellun vaihteiston varhaiset testit antoivat runsaasti tietoja seuraavien hammasvaihteistojen suunnittelussa. Testin jälkeen tiedettiin, mitä kannattaa ottaa huomioon seuraavan vaihteiston suunnittelussa. Näiden tietojen ja havaintojen perusteella muiden vaihdelaatikoiden suunnitteluprosessit olivat nopeampia kuin olkapään vaihteiston. Kaikki vaihteistot testattiin ilman kuormaa ennen robottikäteen asentamista.

Ensimmäisessä testissä hammasvaihteistot testattiin ilman kuormaa 12 V:n jännitteellä (kuva 18). Testin tarkoituksena on varmistaa, että vaihteisto pyörii tasaisesti ilman epämääräisiä sinne kuulumattomia liikeitä tai ääniä. Ensimmäisessä testissä selviävät yleensä suurimmat suunnittelu- ja valmistusvirheet. Testauksen aikana havaittiin monia suunnitteluvirheitä, joita ei tullut mieleen vaihteistojen suunnittelussa. Lisäksi hammasvaihteiston moottori ylitti datalehdessä ilmoitetun virran arvon, kun vaihteistoa rasi.

ilman kuormaa. Suurempi virrankulutus on ymmärrettävää, koska hammaspyörissä on kitkaa, joka heikentää vaihteiston hyötysuhdetta.

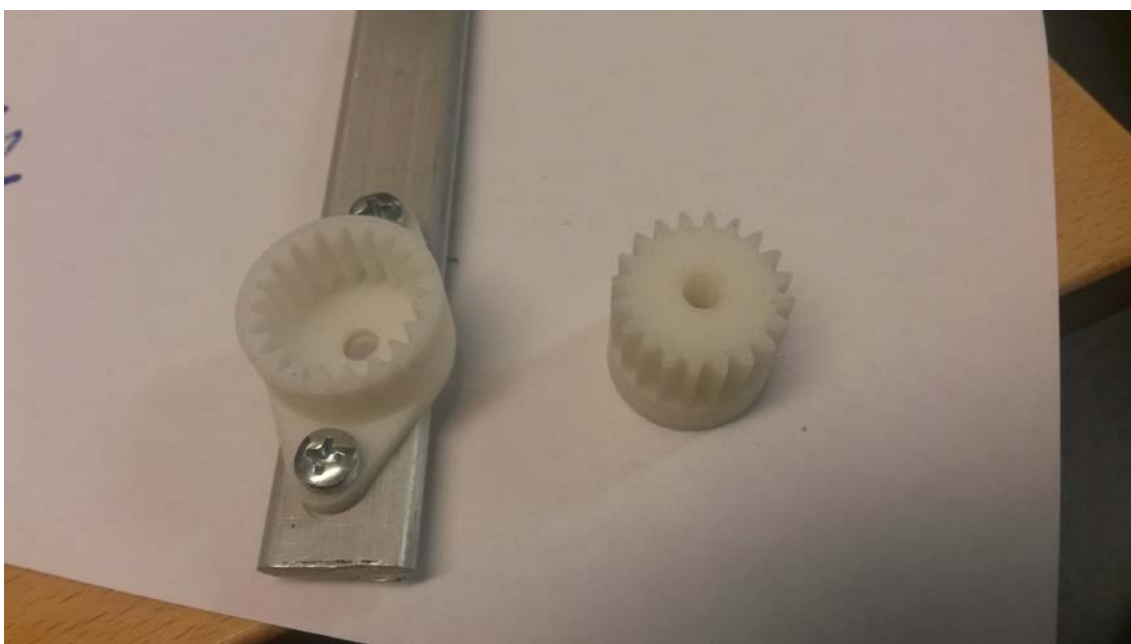
Vaihteiston testauksessa ilman kuormaa huomattiin puutteita, joita suunnittelussa ei ollut otettu huomioon. Yksi ongelmakohdista oli hammaspyörien akseli. Suunnittelun alkuvaiheessa hammaspyörien akseleiden suunnitteluun ei kiinnitetty tarpeeksi paljon huomiota. Hammaspyörien akselin halkaisijaa ei ollut mitoitettu ja akselimateriaalina käytettiin rautakaupasta ostettua 2 mm:n rautalankaa. Rautalanka osoittautui huonoksi ideaksi, koska lanka ei ollut tarpeeksi suora. Epäsuoruus aiheutti epäsymmetrisen pyörimisliikkeen, jonka seurauksena akseli jäi hammaspyörän reikään kiinni sitä pyöritettäessä. Akselin jumittuminen hammaspyörään aiheutti tahattoman akselin pyörimisen, joka johti vaihdekotelon kannen hajoamiseen.

Akselin epäsuoruuden lisäksi akseleihin kohdistuva radiaalinen voima aiheutti akseleiden taipumisen. Kun akseleiden taipuma on suurempi kuin hammasmoduuli, alkavat hammaspyörät naksua. Kyseinen ääni on merkki siitä, etteivät hammaspyörät kosketa enää toisiaan. Tällöin voimansiirtoa ei tapahdu hampaissa. Akselit toimivat tässä tilanteessa kuten taivutusjousi, joka liikkuu sivuttain edestakasin aiheuttaen naksuttavan äänen. Ongelmat korjattiin mitoittamalla akselit kaavojen 23 ja 24 mukaisesti ja ostamalla suorat akselit.



Kuva 18. Vaihteistotestaus ilman kuormaa.

Kun vaihteisto läpäisee ensimmäisen testin, siirrytään toiseen testiin. Toisessa testissä vaihteistoja testattiin kuorman kanssa. Testaukseen rakennettiin 40 mm:n pituinen alumiinista valmistettu vipuvarsi. Vipuvarren molempiin päihin on porattu reiät. Toisessa päässä olevaan reikään kiinnitettiin koukku ja koukkuun asetettiin paino, jota moottori nostaa. Toiseen vipuvarren päähän tulee kaksi reikää, joihin kiinnitetään 3D-tulostettu kappale, joka on samanmuotoinen kun toisioakselin kiinnityskappale (kuva 19). Testi aloitettiin ensin pienillä painoilla, minkä jälkeen painoja lisättiin vähän kerrallaan, kunnes vaihteisto saavutti sille asetetun maksimikuorman. Testin tarkoituksena on varmistaa, että vaihteisto jaksaa nostaa sille suunnitellun kuorman. Testillä varmistetaan myös se, että akselit ja hammaspyörät kestävät ulkoisen kuorman aiheuttamia rasituksia.



Kuva 19. Toisioakselin kiinnityskappaleet vipuvarteen.

Alun perin toisioakseliin mallinnettiin kahdeksankulmion muotoinen kiinnityskappale. Kiinnityskappale kiinnitetään toisioakseliin ja kiinnityskappaleen vastakappale kiinnitetään vipuvarteen. Testissä huomattiin, että kahdeksankulmion muotoinen kiinnityskappale alkoi pyöristyä ja menettää muotonsa, kun siihen kohdistetaan pienikin rasitus. Kiinnityskappale suunniteltiin uudestaan, jotta se kestäisi paremmin käyttöä. Nykyisen kiinnityskappaleen suunnittelussa on hyödynnetty kaupallisten harrastusservomootoreiden toisioakselin muotoa. Harrastusservomootorien toisioakselit ovat usein hammaspyörän näköisiä. Hammaspyörän muotoinen toisioakseli jakaa rasituksen tasaisesti hampaiden

välille, mikä tekee akselista kestävämmän. Testissä kuormituksen kanssa kiinnityskappaleen on todettu kestävän kuormitusta reilusti paremmin kuin kahdeksankulmion muotoisen kiinnityskappaleen.

Olkapään hammasvaihteisto oli ainoa vaihteisto, jota päästiin testaamaan kuorman kanssa kuvan 20 mukaisesti. Olkapään hammasvaihteiston testaus aloitettiin kuorman kanssa ensin 0,5 kg:n painolla, jonka jälkeen painoa lisättiin 0,5 kg:n verran 3 kg:n asti. 3 kg:n paino 40 mm:n mittaisessa vipuvarressa vastaa 11,8 Nm:n. Olkavaihteisto jaksoi nostaa 3 kg:n painon 12 V:n jännitteellä ja 5 A:n virralla. Vaihteistossa ei esiintynyt naksumista eikä muutenkaan epämääräistä liikettä tai ääntä. Vaihteisto olisi todennäköisesti jaksanut nostaa isompiakin kuormia, koska olkapään moottori pystyy ottamaan maksimissaan 14 A virtaa. Testissä huomattiin, että hammasvaihteiston välityssuhde ja kitkoista syntyvä momentti oli riittävän suuri kannattamaan 3 kg:n kuorman. Tämä tarkoittaa, että robottikäden oman massan kannattamiseen ei tarvita sähköä.



Kuva 20. Olkapään vaihteiston testaus kuorman kanssa.

Ranteen hammasvaihteistoa ei ehditty suorittaa tiukan aikataulun takia. Tästä syystä ei tiedetä, mikä on ranteen vaihteistomoottorin virrankulutus kuormaa nostettaessa. Ranteen hammasvaihteisto asennettiin suoraan robottikäteen, jossa testaus suoritettiin. Virta syötettiin vanhasta tietokoneen virtalähteestä ranteen moottorille. Kämmen toimi tässä

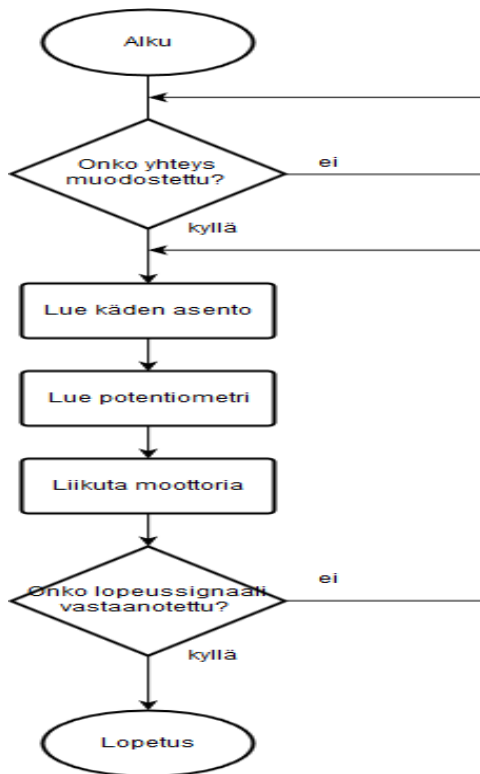
tapauksessa vaihteiston kuormana. Testissä ranteen vaihteisto jaksoi nostaa kämmenestä aiheutuvan kuorman. Nostossa havaittiin ranteen vaihteiston liikkeen olevan nykyä, mikä saattaa johtua suunnittelussa tehdyistä kompromisseista, joita ovat hammasmoduuli ja -luku yhdistettynä hammaslujuuteen. Hammaspyörän hammasluku saattaa olla liian pieni, minkä takia nopeassa liikkeessä ranteen vaihteistomoottori näyttää nykyä.

Ranteen kiertymää ja jalustan rotaatiota testattiin samalla tavalla kuin ranteen vaihteistomoottoria. Vaihteisto asennettiin suoraan robottikäteen ja itse testaus tapahtui työpöydällä. Ranteen kiertymä ja jalustan rotaatio vaikuttivat toimivan hyvin ilman mitään epämääräistä ääntä tai liikettä.

8 Robottikäden ohjelmisto

Robottikäden toiminnallisuuden esittämiseen tehtiin ohjelma, jolla voidaan etäohjata robottikättä Leap Motionin avulla. Robottikättä ohjattiin Raspberry Pi:llä. Ohjelmiston ovat kehittäneet Metropoliasissa korealainen vaihto-opiskelija ja tietotekniikan opiskelija.

Robottikäsi toimii kuvan 21 mukaisesti. Robottikäsi muodostaa Leap Motioniin yhteyden. Kun yhteys on muodostettu, tuomalla käsi Leap Motionin päälle ohjelmisto lukee käden asentotiedot. Asentotiedot lähetetään internetin kautta robottikädelle. Robottikäden ohjelma lukee lähetetyt käden asentotiedot ja vertailee robottikäden nykyisiin asentotietoihin. Jos robottikäden asentotiedot eivät vastaa Leap Motionin antamiin asentotietoihin, robottikäden ohjelma liikuttaa moottoreita, kunnes se saavuttaa halutun arvon. Robottikäden ja Leap Motionin ohjelmistot ovat käynnissä niin kauan, kunnes niille annetaan lopetussignaali. Lopetussignaalin saatuaan ohjelmisto pysähtyy.



Kuva 21. Robottikäden ohjelmiston vuokaavio.

9 Parannusideoita robottikädelle ja vaihteistolle

Itse suunniteltua hammasvaihteistoa voidaan vielä parantaa. Hammaspyörät on suunniteltu siten, että niitä on mahdollista valmistaa olemassa olevilla työkaluilla ja laitteilla. Hammasvaihteisto pystytään vielä optimoimaan, jos käytössä on parempia työkaluja ja tarkempia laitteita. Vaihteistoa voidaan suunnitella pienemmäksi. Tällöin myös vaihteiston kokoa voidaan pienentää.

Robottikäden asennon tunnistukseen on käytetty potentiometriä. Potentiometri asetti omat rajoitteensa suunnittelussa. Rajoite oli potentiometrin mittausalue. Käytössä olevan potentiometrin mittausalue on 270 astetta ja potentiometri on asennettava toisioakselille, jotta 270 astetta voidaan hyödyntää. Tämä ei ollut kaikissa vaihteistoissa mahdollista muun muassa alustan ja ranteen rotaatiossa, koska potentiometrin sijoittaminen toisioakseliin kiinni aiheuttaa leikkautumisongelmia sen vieressä kulkeville sähköjohtoille. Seuraavassa robottikäsiversiossa voitaisiin käyttää asennon tunnistamiseen kiertoenkooderia (*rotary encoder*), koska sen mittausalue on rajaton. Lisäksi kiertoenkooderi on kooltaan pienempi kuin potentiometri, ja se voidaan kiinnittää suoraan moottorin akseliin.

Kiertoenkooderin pienempi koko ja sen helpompi kiinnitettävyyys moottoriin helpottaisi vaihteiston mekaanista suunnittelua.

Robottikädestä olisi kannattanut tehdä pienempi versio, koska ison robottikäden kehitykseen kului paljon aikaa. Suurin osa ajasta meni 3D-tulostukseen, osien odottamiseen ja suunnitteluvirheiden korjaamiseen. Aikaa vievän prosessin ja lyhyen aikataulun takia robottikättä ei ehditty testaamaan tarpeeksi. Pienempi käsi nopeuttaisi suunnittelu- ja kehittämisprosessia. Lisäksi olisi hyvä pohtia uudelleen, kannattaako kehittää omia vaihteistoja, koska suunnitellut vaihteistot maksavat lähes yhtä paljon kuin ominaisuuksillaan samankaltainen kaupallinen servomoottori. Lisäksi moottorit ovat lähes samankokoisia. Kaupallisia servoja käyttämällä ei tarvitsisi käyttää niin paljon aikaa hammasvaihteistojen kehittämiseen. Hammasvaihteiston suunnitteluun kulutettu aika olisi voitu käyttää itse robottikäden suunnitteluun.

10 Yhteenveto

Robottikäden suunnittelu aloitettiin vuonna 2014 kahden automaatio-opiskelijan innovaatioprojektina. Tavoitteena oli kehittää alle 1 000 euron robottikäsi ohjelmoinnin ope-
tuksen apuvälineeksi. Robottikättä kehitettiin projektin edellisten harjoittelijoiden havain-
tojen ja kokemusten perusteella. Edellisten harjoittelijoiden mukaan halpojen servomoot-
torien vääntömomenteissa on suurta eroa. DC-moottorien käyttö ja vaihteiston räätälöinti
jokaiselle nivelelle mahdollistaa voimakkaamman ja kestävämmän rakenteen robottikä-
delle. Tehtäväni oli kehittää tätä ideaa eteenpäin ja samalla tästä tuli myös insinööriyöni.

Ensimmäinen robottikäden prototyyppi oli pieni pöydän päällä operoitava versio. Robot-
tikäden seuraavasta versiosta haluttiin ihmiskäden kokoinen, jotta sillä pystyy manipu-
loimaan ihmisille suunniteltuja työkaluja. Isompi käsi tarkoittaa painavampaa käsivartta,
jonka seurauksena robottikäteen tarvitaan isommat moottorit. Ihmiskokoiseen käteen so-
veltuvat kaupalliset servomoottorit olivat kalliita. Sopivat servomoottorit ovat hintaluokal-
taan 250 - 5 000 euroa. Vaihteistoja pyörittävien moottoreiden hintaluokka on 5 - 15
euroa. Päätettiin kehittää omat räätälöidyt vaihteistot robottikädelle.

Ihmiskäden kokoisien robottikäden suunnittelu osoittautui haastavaksi ja aikaa vieväksi
tehtäväksi. Haasteita oli sekä suunnittelussa että valmistuksessa. Lopputuloksena saa-

tiin toimivat vaihteistot, jotka jaksavat nostaa niille asetetut kuormat. Valitettavasti vaihteiston valmistuskustannus oli kalliimpi, mitä odotettiin. Vaikka DC-moottorit maksoivat 5 - 15 euroa, kalleimmaksi osaksi osoittautuivat kustomoidut hammaspyörät. Hammaspyörät maksoivat noin 20 euroa kappaleelta. Vaihteistojen hammaspyörät maksoivat kaiken kaikkiaan noin 2 000 euroa. Toki hammaspyörien valmistuskustannukset pienenevät, kun niitä massatuotetaan. Yksittäisen vaihteiston teettäminen on kallista. Lisäksi ihmiskokoisen robottikäden tulostaminen 3D-tulostimella osoittautui kalliiksi ja aikaa vieväksi. Alle tuhannen euron hintatavoite ylitettiin merkittävästi.

Hammasvaihteiston suunnittelu robottikädelle oli haastava projekti, mutta myös erittäin hyvä oppimisprosessi. Monialaisessa tiimissä oppii paljon uusia asioita muilta aloilta. Projektissa pääsin hyödyntämään koulussa opittuja asioita ja kehittämään opittuja taitoja eteenpäin. Esimerkiksi 3D-mallinnusohjelma on ollut projektin aikana ahkerasti käytössä. Projektissa opin myös uusia asioita muun muassa 3D-tulostuksesta ja robotiikasta, mitä koulussa ei opeteta. Robottikäsiprojekti oli kiinnostava. Oli hienoa olla tässä projektissa mukana.

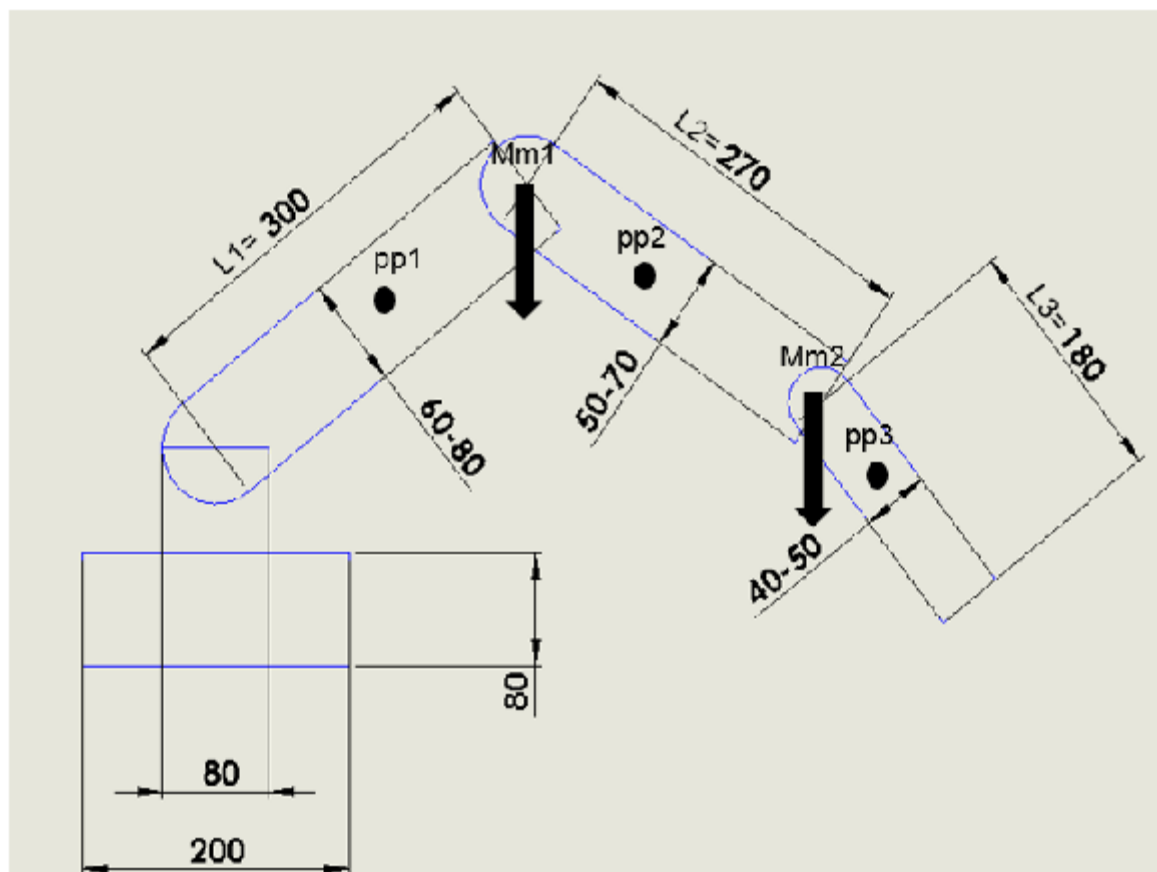
Lähteet

- 1 Tuomme digitaalisuuden arkipäivän esineisiin. 2012. Verkkodokumentti. Electria. <[Http://electria.metropolia.fi/](http://electria.metropolia.fi/)>. Luettu 30.10.2015.
- 2 World Robotics 2015 Service Robots. 2015. Verkkodokumentti. <http://www.ifr.org/service-robots/statistics/>. Luettu 30.10.2015.
- 3 Ohjelmointi perusopetuksessa. 2015. Verkkodokumentti. Opinsys. <<http://ohjelmointi.opinsys.fi/>> Luettu 29.3.2016.
- 4 Kit/DIY. 2016. Verkkodokumentti. 3D Hubs. <<https://www.3dhubs.com/best-3d-printer-guide#kit>> . Luettu 29.3.2016.
- 5 Vitroviuksen mies. 2016. Verkkodokumentti. Wikipedia. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Vitruvisuksen_mies>. Luettu 29.3.2016.
- 6 Robotshop. 2016. Verkkokauppa. <<http://www.robotshop.com/en/robotic-arms.html?dir=desc&order=price>>. Luettu 29.3.2016.
- 7 Sawicz, Darren. 2002. Hobby Servo Fundamentals. Verkkodokumentti. Princeton.edu. <<http://www.princeton.edu/~mae412/TEXT/NTRAK2002/292-302.pdf>>. Luettu 08.2.2016.
- 8 Kinova robotics. 2016. Verkkodokumentti. <<http://www.kinovarobotics.com/service-robotics/products/actuators/>>. Luettu 08.2.2016.
- 9 AliExpress. 2016. Verkkokauppa. <http://www.aliexpress.com/popular/hitec-rc-servo.html>. Luettu 29.3.2016.
- 10 Technical Training Solution. Stepper and servo training. 2016. Verkkodokumentti. <<http://www.technicaltrainingsolutions.co.uk/courses/stepper-and-servo-training.html>>. Luettu 29.3.2016.
- 11 Kinova robotics. 2016. Verkkodokumentti, <<http://www.kinovarobotics.com/service-robotics/products/actuators/>>. Luettu 29.3.2016.
- 12 Dirjish, Mat. 2012. What's The Difference Between Brush DC And Brushless DC Motors?. Verkkodokumentti. Electronic Design. <<http://electronic-design.com/electromechanical/what-s-difference-between-brush-dc-and-brushless-dc-motors>> Luettu 08.2.2016.
- 13 Mahoney, Dough. 2012. What's So Great About Brushless Motor Power Tools. Verkkodokumentti. Popular Mechanics. <<http://www.popularmechanics.com/home/reviews/a8109/whats-so-great-about-brushless-motor-power-tools/>>. Luettu 29.03.2016.

- 14 Airala, Mauri. 1995. Koneenosien suunnittelu. Porvoo: WSOY.
- 15 Robot Savvy. 2016. Verkkokauppa. <<https://robosavvy.com/store/dagu-towerprog945-metal-gear-servo-12kg-cm.html>>. Luettu 29.03.2016.
- 16 Osygus, Thomas. 2015 Helical Planetary Gearboxes: Understanding the Tradeoffs. Verkkoartikkeli. Design News. <http://www.designnews.com/author.asp?doc_id=277413>. Luettu 29.03.2016.
- 17 Mraz, Stephen. 2011. Comparing Cycloidal and Planetary Gearboxes. Verkko-dokumentti. Machine Design. <<http://machinedesign.com/news/comparing-cycloidal-and-planetary-gearboxes>>. Luettu 8.2.2016.
- 18 Lauletta, Anthony. 2006. Harmonic Drive Gearing. Verkkodokumentti. Gear Product News. <<http://www.gearproductnews.com/issues/0406/gpn.pdf>>. Luettu 8.2.2016.
- 19 Cycloidal Drive. 2016. Verkkodokumentti. Wikipedia. 2016. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cycloidal_drive> Luettu 29.03.2016.
- 20 Robotshop. 2016. Verkkokauppa. <<http://www.robotshop.com/en/h54-100-s500-r-dynamixel-pro-smart-servo-motor.html>> Luettu 29.03.2016.
- 21 Robotshop. 2016. Verkkokauppa. <<http://www.robotshop.com/en/k-75-plus-kinova-modular-actuator.html>>. Luettu 29.03.2016.
- 22 Robotshop. 2016. Verkkokauppa. <<http://www.robotshop.com/en/encoder-ready-pg188-planetary-gearmotor.html>>. Luettu 29.03.2016.
- 23 Robotshop. 2016. Verkkokauppa. <<http://www.robotshop.com/eu/en/torxis-i01856-12v-high-torque-industrial-servo-motor.html>>. Luettu 29.03.2016.
- 24 Understandin DC Motors. 2014. University of Minnesota. Verkkodokumentti. <<http://www.me.umn.edu/courses/me2011/arduino/technotes/dcmotors/motor-tutorial/>>. Luettu 29.03.2016.
- 25 Mott, Robert L. 2004. Machine Elements In Mechanical Design. 4th edition. New Jersey. Pearson Prentice Hall. Luettu 8.4.2016.
- 26 Maciejczyk, Andrej. 2008. Design Basic of Industrial Gear Boxes. Verkkodokumentti. Technical University of Lodz. <<http://cybra.lodz.pl/Content/3714/Design-BasicInd.pdf>>. Luettu 8.4.2016.
- 27 Shigley, Josepht Edward. 2006. Shigley's Mechanical Engineering Design. 8th edition. New York: McGraw-Hill. Luettu 29.03.2016.

- 28 Ryan, V. 2009. Gear Ratios and Gear Trains. Verkkodokumentti. Technology Student. <<http://www.technologystudent.com/gears1/gears7.htm>>. Luettu 29.3.2016.
- 29 Ryan, V. 2009. Gear Ratios and Gear Trains. Verkkodokumentti. Technology Student. <<http://www.technologystudent.com/gears1/gears3.htm>>. Luettu 29.3.2016.
- 30 Gear ratios. 2015. Verkkodokumentti. Vexrobotics. <<http://curriculum.vexrobotics.com/curriculum/mechanical-power-transmission/gear-ratios>>. Luettu 29.3.2016.
- 31 Borak, D., Gligorijevic, R., Jevtic J. 2008. Material selection in gear design. Verkkodokumentti. Machine Design. <http://www.mdesign.ftn.uns.ac.rs/pdf/2008/389-394_for_web.pdf> Luettu 15.2.2016.
- 32 Walter, Rudy. 2004. Engineering Principles for Plastic Gears. Verkkodokumentti. Gear Solutions. <http://www.mdesign.ftn.uns.ac.rs/pdf/2008/389-394_for_web.pdf> Luettu 15.2.2016.

Robottikäden fyysisten ominaisuuksien alustava arviointi



Varren pituus

$$l_1 := 0.3 \quad l_2 := 0.27 \quad l_3 := 0.18 \quad [\text{m}]$$

Varren painopiste

$$pp_1 := \frac{l_1}{2} = 0.15 \quad pp_2 := \frac{l_2}{2} = 0.135 \quad pp_3 := \frac{l_3}{2} \quad [\text{m}]$$

Varren massa

$$m_1 := 0.4 \quad m_2 := 0.532 \quad m_3 := 0.350 \quad [\text{kg}]$$

Moottorin ja vaihteiston massa

$$Mm_1 := 0.5 \quad Mm_2 := 0.250 \quad [\text{kg}]$$

Operoitava massa

$$\underline{\underline{m}} := 0.1 \quad [\text{kg}] \quad \underline{\underline{g}} := 9.81 \quad [\text{kgm/s}^2]$$

Moottorin kulmakihtyvyys

$$\alpha_1 := 1 \quad \alpha_2 := 1 \quad \alpha_3 := 1 \quad [\text{rad} / \text{s}^2]$$

Staattinen momentti

$$M_{\text{sta}} := g \cdot \begin{pmatrix} pp_1 & l_1 & l_1 + pp_2 & l_1 + l_2 & l_1 + l_2 + pp_3 & l_1 + l_2 + l_3 \\ 0 & 0 & pp_2 & l_2 & l_2 + pp_3 & l_2 + l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & pp_3 & l_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_1 \\ Mm_1 \\ m_2 \\ Mm_2 \\ m_3 \\ m \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 8.7301152 \\ 3.0442392 \\ 0.485595 \end{pmatrix} \quad [\text{Nm}]$$

Hitausmomentti

$$\begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} pp_1^2 & l_1^2 & (l_1 + pp_2)^2 & (l_1 + l_2)^2 & (l_1 + l_2 + pp_3)^2 & (l_1 + l_2 + l_3)^2 \\ 0 & 0 & pp_2^2 & l_2^2 & (l_2 + pp_3)^2 & (l_2 + l_3)^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & pp_3^2 & l_3^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_1 \\ Mm_1 \\ m_2 \\ Mm_2 \\ m_3 \\ m \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.4446027 \\ 0.0935307 \\ 0.006075 \end{pmatrix} \quad [\text{kgm}^2]$$

Hammasvaiheteiden välityssuhteet

$$i_1 := 729 \quad i_2 := 729 \quad i_3 := 165$$

Massan redusointi

$$J_{1\text{red}} := \frac{J_1}{i_1^2} = 8.366 \times 10^{-7} \quad [\text{kgm}^2]$$

$$J_{2\text{red}} := \frac{J_2}{i_2^2} = 1.76 \times 10^{-7} \quad [\text{kgm}^2]$$

$$J_{3\text{red}} := \frac{J_3}{i_3^2} = 2.231 \times 10^{-7} \quad [\text{kgm}^2]$$

Kokonaishitautusmomentti

$$J_{1\text{kok}} := J_1 + J_{1\text{red}} = 0.445 \quad [\text{kgm}^2]$$

$$J_{2\text{kok}} := J_2 + J_{2\text{red}} = 0.094 \quad [\text{kgm}^2]$$

$$J_{3\text{kok}} := J_3 + J_{3\text{red}} = 6.075 \times 10^{-3} \quad [\text{kgm}^2]$$

Dynaaminen momentti

$$M_{\text{dyn}} := \begin{pmatrix} J_{1\text{kok}} & 0 & 0 \\ 0 & J_{2\text{kok}} & 0 \\ 0 & 0 & J_{3\text{kok}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.445 \\ 0.094 \\ 6.075 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \quad [\text{Nm}]$$

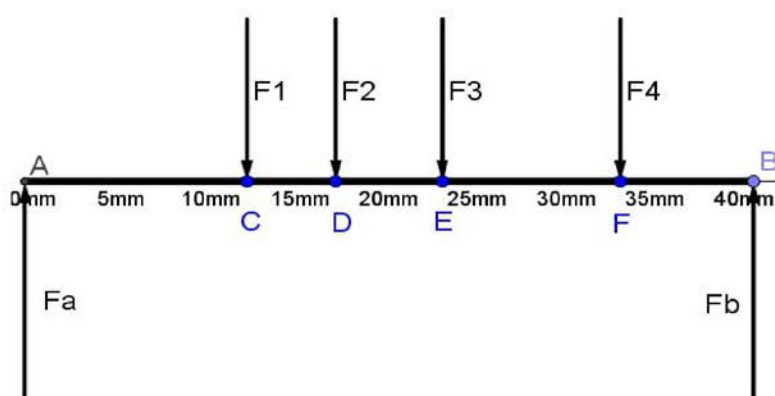
Kokonaismomentti

$$M_{\text{kok}} := M_{\text{sta}} + M_{\text{dyn}} = \begin{pmatrix} 9.175 \\ 3.138 \\ 0.492 \end{pmatrix} \quad [\text{Nm}]$$

Realistinen momentin tarve, jos $n=75\%$

$$M_{\text{rea}} := \frac{M_{\text{kok}}}{0.75} = \begin{pmatrix} 12.233 \\ 4.184 \\ 0.656 \end{pmatrix} \quad [\text{Nm}]$$

Hammasakselin mitoitus



Akselimateriaalina hiiliterästä 070M20.

Materiaalitiedot

$S_n := 200 \cdot 10^6$ [Pa] Endurance strenght

$S_y := 430 \cdot 10^6$ [Pa] Yield strenght

$\alpha := 20^\circ$ Ryntökulma

Hampaan tangenttivoimat.

Hampaan säteisvoimat

$$\begin{pmatrix} x \\ F_t \end{pmatrix} :=$$

x[m]	Ft[N]
0,0125	29,25
0,0175	263,25
0,0275	263,25
0,0335	1053

$$F_r := F_t \cdot \tan(\alpha) = \begin{pmatrix} 10.646 \\ 95.815 \\ 95.815 \\ 383.261 \end{pmatrix}$$

Tangentiaalinen tukivoima

$$F_{tA} := 1 \quad F_{tB} := 1$$

Given

$$F_{tA} + F_{tB} - F_{t1} - F_{t2} - F_{t3} - F_{t4} = 0$$

Momentti pisteessä A, myötäpäivään

$$F_{t1} \cdot x_1 + F_{t2} \cdot x_2 + F_{t3} \cdot x_3 + F_{t4} \cdot x_4 - F_{tB} \cdot 0.04 = 0$$

Tukivoimat pisteessä A ja B.

$$\begin{pmatrix} F_{tA} \\ F_{tB} \end{pmatrix} := \text{Find}(F_{tA}, F_{tB}) = \begin{pmatrix} 421.566 \\ 1.187 \times 10^3 \end{pmatrix} \quad [\text{N}]$$

Tangenttivoiman aiheuttama taivutusmomentti

$$0 < x < 12.5 \text{ mm}$$

$$M_{tC} := F_{tA} \cdot x_1 = 5.27 \quad [\text{Nm}]$$

$$12.5 \text{ mm} < x < 17.5 \text{ mm}$$

$$M_{tD} := F_{tA} \cdot x_2 - F_{t1} \cdot (x_2 - x_1) = 7.231 \quad [\text{Nm}]$$

$$17.5 < x < 27.5 \text{ mm}$$

$$M_{tE} := F_{tA} \cdot x_3 - F_{t1} \cdot (x_3 - x_1) - F_{t2} \cdot (x_3 - x_2) = 8.522 \quad [\text{Nm}]$$

$$27.5 < x < 33.5 \text{ mm}$$

$$M_{tF} := F_{tB} \cdot (0.04 - x_4) = 7.717 \quad [\text{Nm}]$$

Radiaalinen tukivoima

$$FrA := 1 \quad FrB := 1$$

Given

$$FrA + FrB - Fr_1 - Fr_2 - Fr_3 - Fr_4 = 0$$

Momentti pisteessä A, myötäpäivään

$$Fr_1 \cdot x_1 + Fr_2 \cdot x_2 + Fr_3 \cdot x_3 + Fr_4 \cdot x_4 - FrB \cdot 0.04 = 0$$

Tukivoimat pisteessä A ja B.

$$\begin{pmatrix} FrA \\ FrB \end{pmatrix} := \text{Find}(FrA, FrB) = \begin{pmatrix} 153.437 \\ 432.1 \end{pmatrix} \quad [N]$$

Radiaalisen voiman aiheuttama taivutusmomentti

$$0 < x < 12.5 \text{ mm}$$

$$MrC := FrA \cdot x_1 = 1.918 \quad [Nm] \quad [Nm]$$

$$12.5 \text{ mm} < x < 17.5 \text{ mm}$$

$$MrD := FrA \cdot x_2 - Fr_1 \cdot (x_2 - x_1) = 2.632 \quad [Nm]$$

$$17.5 < x < 27.5 \text{ mm}$$

$$MrE := FrA \cdot x_3 - Fr_1 \cdot (x_3 - x_1) - Fr_2 \cdot (x_3 - x_2) = 3.102 \quad [Nm]$$

$$27.5 < x < 33.5 \text{ mm}$$

$$MrF := FrB \cdot (0.04 - x_4) = 2.809 \quad [Nm]$$

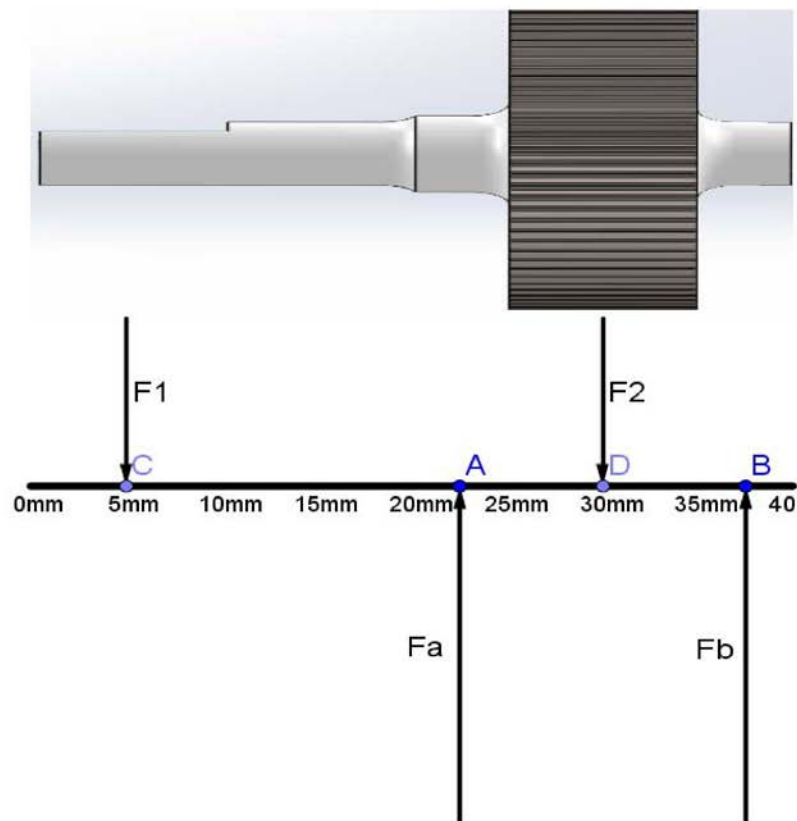
Suurin taivutusmomentti pisteessä E.

$$ME := \sqrt{(MrE)^2 + (MrF)^2} = 9.069 \quad [Nm]$$

Kyseessä on kannatinakseli. Kannatinakseliin ei vaikuta vääntömomenttia, joten sitä ei tarvitse huomioida. Käytetään kaavaa 24.

Akselin halkaisija täytyy olla vähintään

$$d := \sqrt[3]{\frac{ME \cdot 32}{S_n \cdot \pi}} \cdot 10^3 = 7.73 \quad [mm]$$



$x_a := 0.0225$ [m] $x_b := 0.0375$ [m]
 $x_1 := 0.005$ [m] $x_2 := 0.030$ [m]
 Voimat
 $F_{t1} := 100$ [N] $F_{t2} := 395.875$ [N]

Tangentiaalinen tukivoima

$$F_{t_a} := 1 \quad F_{t_b} := 1$$

Given

$$F_{t_a} + F_{t_b} - F_{t_1} - F_{t_2} = 0$$

Momentti pisteessä A, myötäpäivään

$$-F_{t_1} \cdot (x_a - x_1) - F_{t_b} \cdot (x_b - x_a) + F_{t_2} \cdot (x_2 - x_a) = 0$$

$$\begin{pmatrix} F_{t_a} \\ F_{t_b} \end{pmatrix} := \text{Find}(F_{t_a}, F_{t_b}) = \begin{pmatrix} 414.604 \\ 81.271 \end{pmatrix} \quad [\text{N}]$$

Tangenttivoiman aiheuttama taivutusmomentti

$$5 \text{ mm} < x < 22.5 \text{ mm}$$

$$M_{t_a} := -F_{t_1} \cdot (x_a - x_1) = -1.75 \quad [\text{Nm}]$$

$$22.5 < x < 30 \text{ mm}$$

$$M_{t_d} := -F_{t_1} \cdot (x_2 - x_1) + F_{t_a} \cdot (x_2 - x_a) = 0.61 \quad [\text{Nm}]$$

$$30 < x < 37.5 \text{ mm}$$

$$M_{t_b} := -F_{t_b} \cdot (x_b - x_2) = -0.61 \quad [\text{Nm}]$$

Radiaaliset tukivoimat ja hammasvoimat

$$F_{r_a} := F_{t_a} \cdot \tan(\alpha) = 150.904 \quad [\text{N}] \quad F_{r_b} := F_{t_b} \cdot \tan(\alpha) = 29.58 \quad [\text{N}]$$

$$F_{r_1} := 0 \quad [\text{N}] \quad F_{r_2} := F_{t_2} \cdot \tan(\alpha) = 144.087 \quad [\text{N}]$$

Radiaalisen voiman aiheuttama taivutusmomentti

$$5 \text{ mm} < x < 22.5 \text{ mm}$$

$$M_{r_a} := -F_{r_1} \cdot (x_a - x_1) = 0 \quad [\text{Nm}]$$

$$22.5 < x < 30 \text{ mm}$$

$$M_{r_d} := -F_{r_1} \cdot (x_2 - x_1) + F_{r_a} \cdot (x_2 - x_a) = 1.132 \quad [\text{Nm}]$$

$$30 < x < 37.5 \text{ mm}$$

$$M_{r_b} := -F_{r_b} (x_b - x_2) = -0.222 \quad [\text{Nm}]$$

Suurin taivutusmomentti pisteessä A.

$$M_a := \sqrt{M_{r_a}^2 + M_{t_a}^2} = 1.75 \quad [\text{Nm}]$$

Akseliin vaikuttaa myös vääntöjännitys T, jonka suuruus on 10 Nm.

$$T := 10 \quad [\text{Nm}]$$

Akselin halkaisija täytyy olla vähintään.

$$S_n = 2 \times 10^8 \quad [\text{Pa}] \quad \text{Endurance strenght} = \text{tensile strenght}/2 \text{ teräksiissä}$$

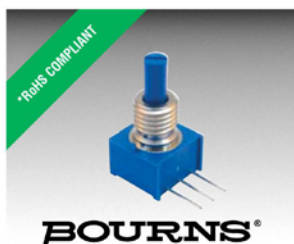
$$S_y := 275 \cdot 10^6 \quad [\text{Pa}] \quad \text{Yield strenght}$$

$$d := \left[\frac{32}{\pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{M_a}{S_n} \right)^2 + \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{T}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot 10^3 = 6.632 \quad [\text{mm}]$$

LÄHTEET

http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Fatigue/Fatigue.html

Potentiometri 3310



Features

- Conductive plastic
- PC board and bushing mount
- Plastic or metal bushing and plastic shaft
- Withstands typical industrial washing processes
- Compact package saves board and panel space



3310 - 9 mm Square Sealed Panel Control

Electrical Characteristics

Standard Resistance Range - Linear	1 K ohms to 1 megohm
Total Resistance Tolerance - Linear Tapers	±20 %
Independent Linearity	±5 %
Absolute Minimum Resistance	2 ohms maximum
Effective Electrical Angle	270 ° ±15 °
Contact Resistance Variation	1 % or 1 ohm (whichever is greater)
Dielectric Withstanding Voltage (MIL-STD-202 - Method 301)	
Sea Level	900 VAC minimum
70,000 Feet	350 VAC minimum
Insulation Resistance	1,000 megohms minimum
Power Rating @ 70 °C (Derate to 0 at 125 °C - Voltage Limited By Power Dissipation or 200 VAC, Whichever is Less)	0.25 watts
Theoretical Resolution	Essentially infinite

Environmental Characteristics

Operating Temperature Range	-40 °C to +125 °C (-40 °F to +257 °F)
Storage Temperature Range	-55 °C to +125 °C (-67 °F to +257 °F)
Temperature Coefficient Over Storage Temperature Range	±1,000 ppm/°C
Vibration	30 G
Total Resistance Shift	±1 % maximum
Voltage Ratio Shift	±1 % maximum
Shock	100 G
Total Resistance Shift	±1 % maximum
Voltage Ratio Shift	±1 % maximum
Load Life	1,000 hours
Total Resistance Shift	±10 % TRS maximum
Rotational Life (No Load)	50,000 cycles
Total Resistance Shift	±5 % TRS maximum
Contact Resistance Variation	3 % or 3 ohms, whichever is greater
Moisture Resistance	MIL-STD-202, Method 103, Condition B
Total Resistance Shift	±10 % TRS maximum
IP Rating	IP67

Mechanical Characteristics

Stop Strength	5.65 N-cm (8 oz.-in.)
Mechanical Angle	300 ° nominal
Torque	
Starting	3.53 N-cm (5.0 oz.-in.) maximum
Running	3.53 N-cm (5.0 oz.-in.) maximum
Mounting (Torque on Bushing)	45 N-cm (4.0 lb.-in.) max [plastic bushing]; 79 N-cm (7.0 lb.-in.) max [metal bushing]
Weight (Single Section)	4.5 grams
(Each Additional Section)	2.5 grams
Terminals	Solderable pins
Soldering Condition	
Manual Soldering	96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu solid wire or no-clean rosin cored wire; 370 °C (700 °F) max. for 3 seconds
Wave Soldering	96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu solder with no-clean flux; 260 °C (500 °F) max. for 5 seconds
Wash Processes	For recommended wash processes, please refer to http://www.bourns.com/pdfs/sdclen.pdf
Marking	Manufacturer's trademark, model number, product code, terminal style, resistance code and date code
Ganging	2 cups maximum
Hardware	One lockwasher and one mounting nut is shipped with each potentiometer, except where noted in the part number.
Flammability	Conforms to UL94V-0
Epoxy	Conforms to UL 94V-1
IP Rating	IP67

Switch Characteristics

Switch Life	10K cycles
Contact Resistance	2 ohms max.
Dielectric Strength	350 VDC
Detent Torque	0.5 oz-in min.
Power Rating (Resistive Load)	100 mA @ 16 VDC

* RoHS Directive 2002/95/EC Jan. 27, 2003 including annex and RoHS Recast 2011/65/EU June 8, 2011.
 Specifications are subject to change without notice.
 Customers should verify actual device performance in their specific applications.

RS-380PH



RS-380PH

MABUCHI MOTOR

Carbon-brush motors

OUTPUT : 0.9W-45W (APPROX)

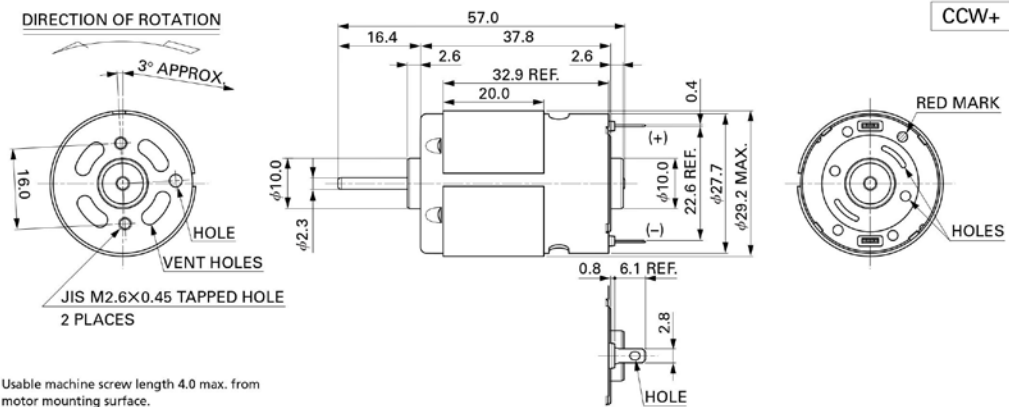
WEIGHT : 80g (APPROX)

Typical Applications Automotive Products : Car Antenna
Home Appliances : Vacuum Cleaner
Cordless Power Tools : Drill / Screwdriver

MODEL		VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY				STALL		
		OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED r/min	CURRENT A	SPEED r/min	CURRENT A	TORQUE mN·m	TORQUE g·cm	OUTPUT W	TORQUE mN·m	CURRENT A
RS-380PH-4045	(*)	2.4~12.0	10.5V CONSTANT	21900	0.70	18570	3.90	14.3	146	27.8	94.1	959
RS-380PH-3270		4.5~15.0	12V CONSTANT	15200	0.34	13150	2.18	12.6	128	17.3	93.1	949

(*) CCW shifted commutation (CCW+)

The terminal position against the tapped holes varies depending on CW+/NEUTRAL. (Refer to P17)

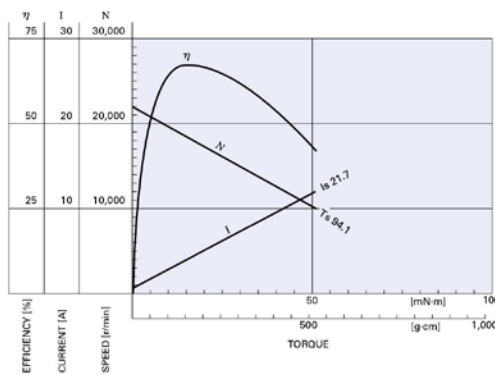


Usable machine screw length 4.0 max. from motor mounting surface.

UNIT: MILLIMETERS

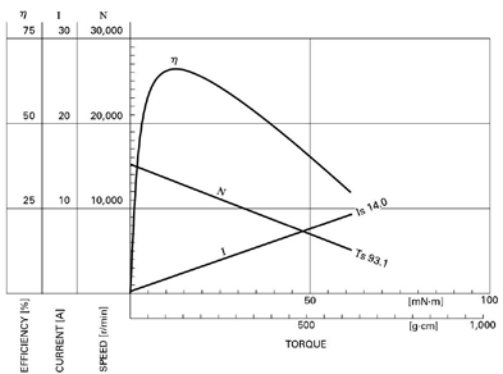
RS-380PH-4045

10.5V

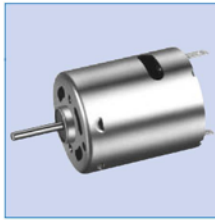


RS-380PH-3270

12.0V



RS-365SH



RS-365SH

MABUCHI MOTOR
Carbon-brush motors

OUTPUT : 0.7W-35W (APPROX)

WEIGHT : 54g (APPROX)

Typical Applications Home Appliances : Hair Dryer / Massager / Vibrator

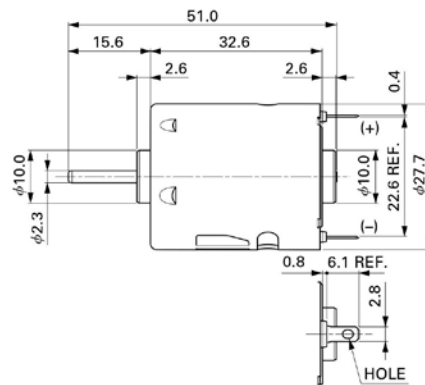
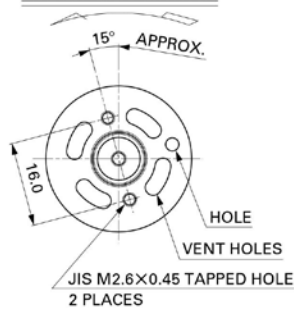
MODEL		VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY					STALL		
		OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED r/min	CURRENT A	SPEED r/min	CURRENT A	TORQUE mN·m g·cm		OUTPUT W	TORQUE mN·m g·cm		CURRENT A
RS-365SH-2080	(*1)	6~20	18V CONSTANT	19400	0.22	16060	1.06	7.09	72.2	11.9	41.2	420	5.10
RS-365SH-12190	(*2)	12~32	24V CONSTANT	10500	0.080	8430	0.32	5.04	51.4	4.44	25.5	260	1.32

(*1) CCW shifted commutation (CCW+)

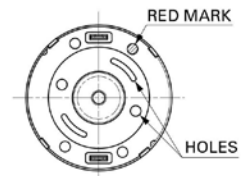
(*2) CCW shifted commutation (CCW+), Without vent holes

The terminal position against the tapped holes varies depending on CW+/NEUTRAL.

DIRECTION OF ROTATION



CCW+

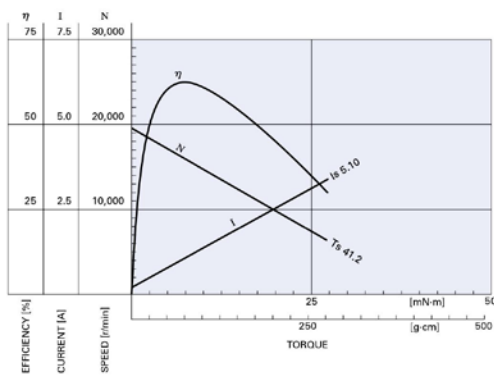


Usable machine screw length 3.0 max. from motor mounting surface.

UNIT: MILLIMETERS

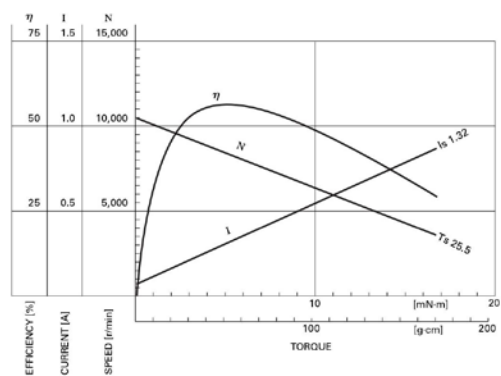
RS-365SH-2080

18.0V



RS-365SH-12190

24.0V



FC-280SC



FC-280SC

MABUCHI MOTOR

Carbon-brush motors

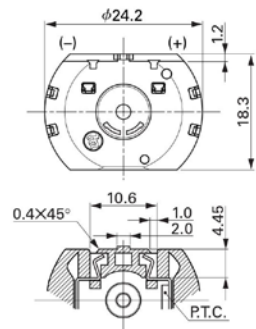
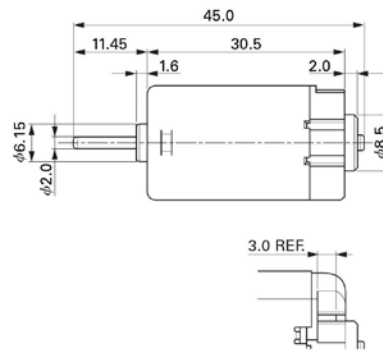
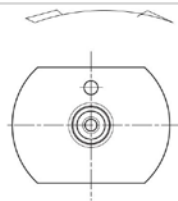
OUTPUT : 0.1W~4.0W (APPROX)

WEIGHT : 38g (APPROX)

Typical Applications Automotive Products : Retractable Rearview Mirror / Door Lock Actuator

MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY						STALL	
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED r/min	CURRENT A	SPEED r/min	CURRENT A	TORQUE mN·m	TORQUE g·cm	OUTPUT W	TORQUE mN·m	TORQUE g·cm	CURRENT A
FC-280SC-20150	8~15	12V CONSTANT	11800	0.081	10310	0.56	4.14	42.2	4.47	32.9	335	3.90
FC-280SC-18180	8~15	12V CONSTANT	9700	0.16	7880	0.69	5.33	54.3	4.39	28.4	290	3.00
FC-280SC-16200	9~14	12V CONSTANT	8700	0.060	7420	0.35	3.40	34.6	2.63	23.0	234	2.00

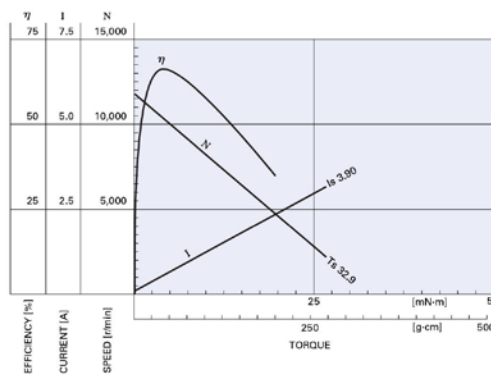
DIRECTION OF ROTATION



UNIT: MILLIMETERS

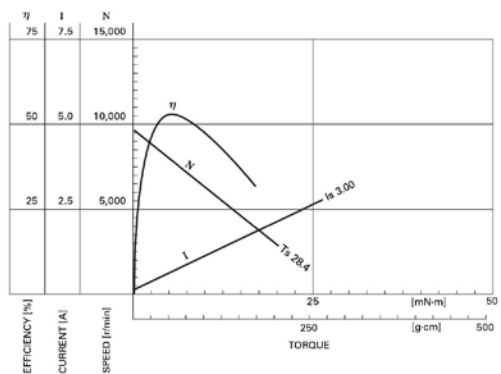
FC-280SC-20150

12.0V



FC-280SC-18180

12.0V



1 (1)

Olkavarren hammasvaihteiston tiedot

Moottorin tiedot

koko[mm]	paino[g]	malli	n[rpm]	w[rad/s]	M[mNm]	A	A[Max]	V	i	nout[rpm]	w[rad/s/i]	t[90aste]	M[mNm]	
28*57		80 RS-380PH	14110	1477,6		13	2,28	14	12	800	1,846995	1,84699468	0,850461	10400

	Hammasluvut		Moduuli	Nimellishalkaisija[mm]		Säde[mm]		Välityssuhde	Akseliväli[mm]
	z1	z2	m	d1	d2	r1	r2	i	a
Pari1	16	54	0,5	8	27	4	13,5	3,38	17,5
Pari2	18	54	0,5	9	27	4,5	13,5	3	18
Pari3	18	54	0,5	9	27	4,5	13,5	3	18
Pari4	18	54	0,5	9	27	4,5	13,5	3	18
Pari5	18	54	0,5	9	27	4,5	13,5	3	18
Pari6	18	48	1	18	48	9	24	2,67	33

Hammas1		Hammas2	
Lewis	leveys	Lewis	leveys
0,296	3	0,34	3
0,309	5	0,415	5
0,309	5	0,415	5
0,309	5	0,415	5
0,309	10	0,415	10
0,309	10	0,4	10

Paksuus 38

n[rpm]	M[mNm]	w	ratio	i	Ft1[N]	v1[m/s]	Kv1	q1[Mpa]	Ft2[N]	v2	Kv2	q2[Mpa]
14110	13	1477,5957	1	1								
4180,741	43,875	437,80615	3,375	3,375	10,96875	1,75122459	1,287085998	31,79667689	3,25	5,91038298	1,968915242	12,547009
1393,58	131,625	145,93538	10,125	3	29,25	0,65670922	1,107657249	41,94042011	9,75	1,97012766	1,322971747	12,432747
464,5267	394,875	48,645127	30,375	3	87,75	0,21890307	1,03588575	117,6685755	29,25	0,65670922	1,107657249	31,227927
154,8422	1184,625	16,215042	91,125	3	263,25	0,07296769	1,011961917	344,8530415	87,75	0,21890307	1,03588575	87,613469
51,61408	3553,875	5,4050142	273,375	3	789,75	0,02432256	1,003987306	513,2032198	263,25	0,07296769	1,011961917	128,38505
19,35528	9477	2,0268803	729	2,666667	1053	0,01824192	1,002990479	341,7957846	394,875	0,04864513	1,007974611	99,505994

Ryntökulma

20 astetta

Voimat

Ft1[N]	Fr1[N]	Ft2[N]	Fr2[N]
10,96875	3,992	3,25	1,183
29,25	10,646	9,75	3,549
87,75	31,938	29,25	10,646
263,25	95,815	87,75	31,938
789,75	287,445	263,25	95,815
1053	383,261	394,875	143,723

Akseliin kohdistuva voima

Akseli 1		Akseli 2		Akseli 3		Akseli 4	
Etäisyys[mm]	Voima[N]	Etäisyys[mm]	Voima[N]	Etäisyys[mm]	Voima[N]	Etäisyys[mm]	Voima[N]
2,5	3,25						
7,5	29,25	7,5	9,75				
		12,5	87,5	12,5	29,25		
		17,5	87,5	17,5	263,25		
		27,5	789,75	27,5	263,25		
				33,5	1053	33,5	395,875