



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

VAIJERIDRONEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Henry Mäkäräinen

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö

Lokakuu 2020

TIIVISTELMÄ

Vaijeridronen suunnittelu ja toteutus

Henry Mäkäräinen

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2020, 78 s. + 5 liitettä

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: DI Antti Tikanmäki ja yliopistonlehtori, TkT Toni Liedes

Tämän diplomityön tavoitteena on suunnitella ja kehittää vaijeridrone, jota on tarkoitus käyttää sekä sisätiloissa että ulkoilmassa. Vaijeridronella tullaan suorittamaan ympäristön tarkkailua siihen kiinnitettävän kameran ja muiden mittausantureiden avulla. Laitteesta pyritään luomaan ainakin edestakaisin liikkuva ja lisäksi liikettä pyritään laajentamaan sekä sivuttais- että pystysuunnassa.

Työn teoriaosassa käydään läpi robotiikkaa yleisesti ja lisäksi tarkastellaan olemassa olevia kaupallisia sekä prototyypitasolla olevia vaijerikameraratkaisuja. Teoriaosuudessa käydään läpi myös eri materiaalivaihtoehtoja kulkuvaijeria varten. Teoriaosuuden lopussa käsitellään robotteihin liittyvää kinematiikkaa. Työn toteutusosassa esitellään kulkuvaijerin valinta laitetta varten. Vaijeridronen liikkuminen pisteestä pisteeseen mahdollistetaan vaijereiden pituuksia säätämällä ja pituuksien määrittämistä varten tarvittava laskeinta käydään läpi käänteiskinematiikan muodossa. Työssä toteutetaan myös prototyypilaitetta varten tarvittavien moottoreiden mitoitus ja valinta. Työn loppuosassa käydään läpi mekaniikkasuunnittelu ja esitetään toteutus, jolla moottorit saadaan liitettyä kelojen yhteyteen.

Työn tuloksena saatiin toteutettua kaksi erilaista vaijeridronejärjestelmää. Ensimmäisenä ratkaisuna on hankittu kaupallinen vaijeridrone. Toisena ratkaisuna työssä on kehitetty harjattomilla tasavirtamoottoreilla ja niihin kytketyillä keloilla ohjattava 2D-vaijeridrone, jolla voidaan simuloida tavallisen dronen lentoa tasotapauksessa. Laite saatiin toteutettua siten, että kela-moottoriyhdistelmät ja kelojen sisältämä vaijeri pystyttiin kiinnittämään itse prototyypin runkoon.

Asiasanat: robotiikka, miehittämättömät ilma-alukset, liikeoppi

ABSTRACT

Design and implementation of a cable drone

Henry Mäkäräinen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Master's thesis 2020, 78 pp. + 5 Appendixes

Supervisor(s) at the university: M.Sc. (Tech.) Antti Tikanmäki and University Lecturer, D.Sc. (Tech.) Toni Liedes

The aim of this Master's thesis is to design and develop a cable drone, which will be used both indoors and outdoors. Cable drone will be used to observe the environment with the help of camera and other measuring sensors attached to it. The target is to create at least back and forth moving device and if possible, to expand the movement both laterally and vertically.

In the theoretical part of this thesis robotics is reviewed generally and existing commercial cable cameras and prototype solutions are considered. Different material options for the cable are also considered in the theoretical part. In the end of this part kinematics related to robots is discussed. In the practical part of the thesis the cable selection for the device is presented. The movement of a cable drone from point to point is made possible by changing the lengths of the cables and the calculation required to determine these lengths is carried out by inverse kinematics. The thesis also involves the dimensioning and selection of motors for the desired prototype. At the end of the thesis the mechanical design is reviewed as well as the construction, where the motors are attached to the reels.

As the result of the thesis two different cable drone systems were accomplished. As a first solution a commercial cable camera has been bought. As a second solution 2D cable drone system, controlled by brushless DC motors with round reels attached to them, has been developed. This system can be used to simulate the flight of a normal drone in a plane. The device was designed so that the motor-round reel assemblies and the cable could be attached to the prototype's body itself.

Keywords: robotics, unmanned aerial vehicles, kinematics

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Oulun yliopiston Biomimetiikka ja älykkäät järjestelmät - tutkimusyksikössä (BISG) lokakuun 2019 ja syyskuun 2020 välisenä aikana. Diplomityö on osa VED- ja 5G!Drones-hankkeita.

Haluan kiittää professori Juha Röningiä, joka mahdollisti tämän diplomityön tekemisen. Erityiset kiitokset ohjaajalleni Antti Tikanmäelle asiantuntevista kommentteista ja hyvästä ohjauksesta sekä suunnitteluideoista, joita olen koko diplomityön suorittamisen aikana saanut. Kiitokset myös muille BISG-tutkimusyksikön jäsenille saamastani avusta työhöni liittyen. Haluan kiittää myös ohjaajaani Toni Liedestä, jonka kautta sain tiedon tästä mielenkiintoisesta diplomityömahdollisuudesta ja lisäksi diplomityön aikana saamastani ohjauksesta. Kiitokset myös Fab Labille ja Oulun yliopiston konepajalle, joiden henkilökunta edesauttoi diplomityöni valmistumista ohjaamalla ja avustamalla tarvittavien komponenttien valmistuksessa.

Lopuksi haluaisin vielä kiittää avovaimoani Pauliinaa, ystäviäni ja perhettäni, jotka ovat olleet apuna sekä tukena koko opiskelu-urani ja ennen kaikkea diplomityöni aikana.

Oulu, 18.09.2020

Henry Mäkäräinen
Henry Mäkäräinen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	7
2 ROBOTIIKKA	10
2.1 Robottien luokittelu.....	10
2.2 Rinnakkaisrobotit	12
2.2.1 Vajjereilla ohjattavat rinnakkaisrakenteiset robotit	13
2.2.2 Vajjerikamerat	14
3 VAIJERIMATERIAALIT	17
3.1 Teräsvaijeri.....	17
3.2 Kiipeilyköysi	18
3.3 Muut tekokuituköydet	20
3.4 Siima	22
4 SÄHKÖMOOTTORIKÄYTTÖ	24
4.1 Servotekniikka.....	24
4.2 Servomootorit.....	26
4.2.1 Harjalliset tasavirtaservomootorit.....	27
4.2.2 Harjattomat tasavirtaservomootorit	28
4.3 Askelmootorit.....	29
5 KINEMATIikka	32
5.1 Suora kinematiikka.....	33
5.2 Käänteiskinematiikka	33
6 DRONEJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU	34
6.1 Vaatimusmäärittely	34
6.2 Käytettävän vaijerin valinta	35
6.3 Moottorin mitoitus	36
6.4 Moottorin anturointi	42
6.5 Vajjereiden pituuksien määrittäminen	43
6.6 Vajjeridronen mekaniikkasuunnittelu	48
6.6.1 Kelat.....	48

6.6.2 Sovittimet.....	49
6.6.3 Siimaohjaimet.....	53
6.6.4 Moottoreiden ja kelojen telineet.....	54
6.6.5 Muut komponentit ja runko.....	55
7 VAIJERIDRONERATKAISUT JA TESTAUS.....	59
7.1 1D-vaijeridrone.....	59
7.2 2D- ja 3D-vaijeridronet.....	62
7.2.1 2D-prototyypin testiajot.....	64
8 HAVAINNOT JA KEHITYSKOHTTEET.....	69
9 YHTEENVETO.....	71

LÄHDELUETTELO

LIITEET:

Liite 1. Moottorin datalehti.

Liite 2. Vaijeridronen kinematiikkatarkastelu.

Liite 3. Puolasovittimen osapiirustus.

Liite 4. Moottorisovittimen osapiirustus.

Liite 5. Puolapyörittimen osakokoonpanopiirustus.

MERKINNÄT JA LYHENTEET

AC	vaihtovirta (alternating current)
CAN	automaatioväylä (controller area network)
CDPR	vaijereilla ohjattava rinnakkaisrobotti (cable driven parallel robot)
DC	tasavirta (direct current)
dolly	kamerateline
HMW	korkea molekyylipaino (high molecular weight)
UHMW	erittäin korkea molekyylipaino (ultra high molecular weight)

n	pyörimisnopeus
P	teho
r	säde
T	jännitysvoima
v	nopeus

α	kulman merkki alfa
Δ	kahden arvon erotus
η	hyötysuhde
θ	kulman merkki theeta
π	pii
τ	vääntömomentti
ω	kulmanopeus

1 JOHDANTO

Robottiikalla on syvät juuret ihmiskunnan historiassa, koska ihmiset ovat historian saatossa jatkuvasti etsineet ratkaisuja, jotka pystyisivät matkimaan ihmisten käytöstä erilaisissa toimissa. Ratkaisujen etsimisen taustalla ovat olleet muun muassa sosiaaliset, taloudelliset ja tieteelliset aspektit. Termin robot toi ensimmäisen kerran esille tšekkiläinen näytelmäkirjailija Karel Čapek vuonna 1920 näytelmässään *Rossum Universal Robots* (R.U.R.). Kyseinen robot-termi oli johdettu sanasta *robota*, joka slaavikielillä tarkoittaa pakkotyötä. 1940 venäläinen Isaac Asimov laitto alulle käsityksen roboteista mekaanisina tuotteina. Hän kuvasi robottia ihmisen kaltaisena mutta ilman tunteita. Robotin toiminnan ja käyttäytymisen määrittivät ihmisen ohjelmoimat aivot. Asimov on määritellyt myös robottien toimintaa määrittelevät kolme peruslakia, joita käytetään edelleen robottien suunnittelussa apuna. Ensimmäisen lain mukaan robotti ei saa vahingoittaa ihmistä tai edesauttaa ihmisen vahingoittumista. Toisen lain mukaan robotin on noudatettava ihmisen antamia käskyjä, jos nämä eivät aiheuta ristiriitaa ensimmäisen lain kanssa. Kolmannen lain mukaan robotin on suojeltava olemassaoloaan niin kauan, kun se ei aiheuta ristiriitaa kahden aiemman lain kanssa. Näiden kolmen lain lisäksi on vielä nollas laki, jonka mukaan robotti ei saa aiheuttaa vahinkoa ihmiskunnalle eikä antaa ihmiskunnan vahingoittua. (Kurfess 2005, s. 12; Siciliano et al. 2009, s. 1–2)

Suurimmaksi osaksi nykyisin käytössä olevien robottien rakenne pyrkii mallintamaan ihmisen kättä. Tällaiset robotit ovat pääasiassa sarjarakenteisia robotteja ja niiden rakenne on toteutettu yhdistämällä jäykkiä linkkejä toisiinsa nivelillä. Avoimen kinemaattisen rakenteen omaavien sarjarobottien hyvänä puolena on niiden laaja työskentelyalue. Huonoja puolia ovat vastaavasti pieni hyötykuorma suhteessa robotin painoon ja hidas työskentelynopeus sekä kiihtyvyys. Sarjarobottien haittapuolia voidaan osittain ratkaista yhdistämällä robotin työkalu liikkumattomaan alustaan usean kinemaattisen ketjun välityksellä. Näin saadaan aikaiseksi suljetun kinemaattisen rakenteen omaava mekanismi, jota kutsutaan rinnakkaisrakenteiseksi robotiksi.

Rinnakkaisroboteiksi luetaan myös vajjereilla ohjattavat rinnakkaisrobotit. Näissä roboteissa perinteiset jäykät linkit on korvattu joustavilla vajjereilla, jotka yhdistävät liikkuvan alustan kiinteään alustaan. Liikkuvan alustan paikka voidaan määrittää muuttamalla vajjereiden pituuksia kelaamalla ja purkamalla niitä moottoroitujen kelojen avulla. Vai-

jereilla ohjattavat ja yleisesti rinnakkaisrakenteiset robotit mahdollistavat isojen hyötykuormien siirtämisen, koska siirrettävä kuorma pystytään jakamaan useamman toimilaitteen kesken. Jäykkien linkkien korvaaminen vaijereilla mahdollistaa robotin suuremman työskentelyalueen ja lisäksi vaijerit voidaan kytkeä ja irrottaa huomattavasti helpommin ja näin ollen robottia voidaan siirtää paikasta toiseen vaivattomasti. Vaijerit mahdollistavat myös robotin kevyemmän rakenteen verrattuna perinteiseen jäykillä linkeillä varustettuun rinnakkaisrobottiin.

Ensimmäisiä vaijereilla ohjattavia manipulaattoreita kehitti yhdysvaltalainen NIST (National Institute of Standards and Technology) 1980-luvulla. Kyseessä oli kuuden vapausasteen RoboCrane, jota käytettiin erityisesti paikoitus-, hitsaus- ja nostotehtävissä. Yksi merkittävimmistä toteutuksista on Kiinassa vuonna 2016 käyttöön otettu maailman suurin radioteleskooppi FAST. Kyseinen teleskooppi on halkaisijaltaan 500 metriä ja siinä lautasen päällä liikkuvaa kevyttä kohdennushyttiä ohjataan kuuden vaijerin avulla. Vaijereilla ohjattavien robottien prototyyppejä on käytetty myös kuntoutus- ja haptisina laitteina johtuen vaijereiden joustavuudesta yhdistettynä niiden muokattavuuteen ja helppoon asennukseen. (Berti 2015, s. 9–11; Qian et al. 2018, s. 1; Schmidt 2017, s. 4)

Tämän diplomityön tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa vaijereilla ohjattava drone. Ensisijaisesti laitteesta halutaan edestakaisin liikkuva, mutta tavoitteena on myös, että sitä pystytään liikuttamaan kolmiulotteisessa tilassa moottoroitujen kelojen ja vaijereiden avulla. Vaijeridronen tulee olla suhteellisen kevyt ja helposti liikuteltavissa oleva, jotta sitä voidaan käyttää eri testiympäristöissä.

Vaijeridronen rakenteen suunnittelussa hyödynnetään mahdollisuuksien mukaan kaupallisten ratkaisujen ja aiemmin suunniteltujen prototyyppien toteutusratkaisuja. Työssä olennaisena osana on laitetta varten tulevan kulkuvaijerin valinta. Mekaniikkasuunnittelussa pyritään luomaan helposti kasattavissa ja runkoon kiinnitettävissä oleva kela-moottorikokoonpano, johon vaijeria kelataan. Valmistusmenetelminä työssä käytetään laserleikkausta ja 3D-tulostusta. 3D-tulostuksen materiaali on PLA-muovia ja puolestaan laserleikkauksessa materiaaleina hyödynnetään sekä akryyli- että polypropeenilevyä. 3D-tulostus ja laserleikkaus ovat erityisen hyviä valmistusmenetelmiä, koska ne ovat suhteellisen halpoja ja lisäksi ne soveltuvat hyvin prototyyppien valmistukseen. Tulostuksen ja laserleikkauksen ohella tietyt osat teetetään Oulun yliopiston konepajalla.

Tämä diplomityö on osa VED- ja 5G!Drones-hankkeita. Vähähiilisyttä edistävät drooniratkaisut (VED) – hyödyntämismallit ja käyttöönoton toimenpidesuosituksset -hankkeen tarkoituksena on selvittää, miten erilaisia drooniratkaisuja voidaan hyödyntää vähähiilisyiden edistämiseksi ja sitä kautta löytää uusia sovelluskohteita droonien käytön laajentamiseksi. Hankkeessa rakennetaan drooniratkaisujen pilotointi- ja testausympäristö Pohjois-Pohjanmaan yritysten ja toteuttajaorganisaatioiden käyttöön. (Oulun yliopisto 2019)

Hankkeessa pyritään ideoimaan uusia drooneja hyödyntäviä ratkaisuja ja toimintatapoja eri sovelluskohteisiin. Tavoitteena on melun, ympäristökuormituksen ja muiden haittekkijöiden vähentäminen. Lisäksi pyritään myös herättämään yritysten kiinnostus kehittämistoimenpiteiden käynnistämiseksi, jotta erilaisten drooniratkaisujen käyttö lisääntyisi Pohjois-Pohjanmaalla. Droonit ovat erinomainen ratkaisu kasvihuonepäästöjä aiheuttavien ratkaisujen sijaan, koska ne toimivat lähes poikkeuksetta sähköllä. Suomessa drooneja käytetään esimerkiksi rajavalvontaan poliisien ja viranomaisten toimesta. Niitä voidaan käyttää myös ympäristön ja sään havainnointiin, sähkölinjojen kunnon tarkkailuun ja lannoituksen sekä maatilojen kastelun optimointiin. (Oulun yliopisto 2019)

5G!Drones-hankkeen tarkoituksena on puolestaan käyttää lentäviä drooneja 5G-verkkojen mittaamiseen ja paikantamiseen. Tavoitteena on muun muassa toteuttaa 5G-verkkojen testausta erilaisissa haastavissa tilanteissa ja osoittaa, että 5G kykenee suoriutumaan näistä tapauksista, joissa verkolta vaaditaan samanaikaisesti luotettavaa yhteyttä, alhaista viiveaikaa, valtavaa määrää eri yhteyksiä ja suurta kaistanleveyttä. Tällaisia haastavia tilanteita, joissa 5G-verkolle ja jopa drooneille on erittäin suuri tarve, ovat esimerkiksi julkisilla paikoilla järjestettävät yleisötapahtumat ja luonnonkatastrofit. (5G!Drones 2019)

2 ROBOTIIKKA

Yleisesti ottaen robotit ovat laitteita tai koneita, jotka toimivat joko automaattisesti tai kauko-ohjauksella. Tekniikan kehittyessä robottien käyttömahdollisuudet ja –kohteet ovat lisääntyneet rajusti. Robotteja voidaan nykyisin käyttää hitsaukseen, autojen koonpanoon, tutkimaan ihmiselle vaarallisia kohteita ja jopa ulkoavaruuden kartoittamiseen. (Kurfess 2005, s. 3)

Yhtä ainuttakaan ja oikeaa määritelmää roboteista ja robotiikasta ei kuitenkaan ole, vaan eri järjestöillä sekä tahoilla on omat näkemyksensä roboteista. Kansainvälinen standardisointijärjestö määrittelee robotin olevan automaattisesti ohjattava ja uudelleenohjelmoitava manipulaattori, jolla on akseleita kolme tai useampi. Amerikan robotti-instituutin mukaan robotti on puolestaan uudelleenohjelmoitava manipulaattori, joka on suunniteltu kappaleiden, työkalujen, erikoislaitteiden ja materiaalien siirtelyyn ennakkoon ohjelmoidulla tavalla. (Kurfess 2005, s. 9)

Robotti nähdään yleensä koneena, joka itsenäisesti pystyy muokkaamaan ympäristöönsä, jossa se työskentelee ja toimii. Tämä tietysti mahdollistetaan toimien avulla, joita säätelevät tietyt koneelle ominaiset käyttäytymissäännöt ja lisäksi datan avulla, jota koneelle syötetään ja jota se hankkii ympäristöstään. Robotit ja yleisesti robotiikka kuvataan usein tieteenä, joka tutkii älykästä yhteyttä havaintokyvyn ja toiminnan välillä. (Siciliano et al. 2009, s. 2)

Joka tapauksessa robotti on hyvin moniosainen systeemi, joka koostuu muun muassa mekaniikasta, ohjauksesta, elektroniikasta ja tietotekniikasta. Mekaaninen systeemi on olennainen osa robottia ja se voidaan jakaa edelleen liikkuviin osiin ja manipulointilaitteisiin. Liikkuvia osia ovat renkaat ja jalat ja vastaavasti manipulointilaitteilla tarkoitetaan mekaanisia raajoja ja itse robottien alustoja. (Siciliano et al. 2009, s. 2–3)

2.1 Robottien luokittelu

Robotit voidaan pääsääntöisesti luokitella kahteen eri luokkaan niiden mekaanisen rakenteen perusteella. Robotit voidaan ryhmitellä robottimanipulaattoreihin ja liikkuviin roboteihin. Manipulaattoreilla on yleisesti ottaen jokin kiinteä/paikallaan pysyvä alusta, kun taas liikkuvilla roboteilla on siirtymisen mahdollistava alusta. Manipulaattorit koostuvat

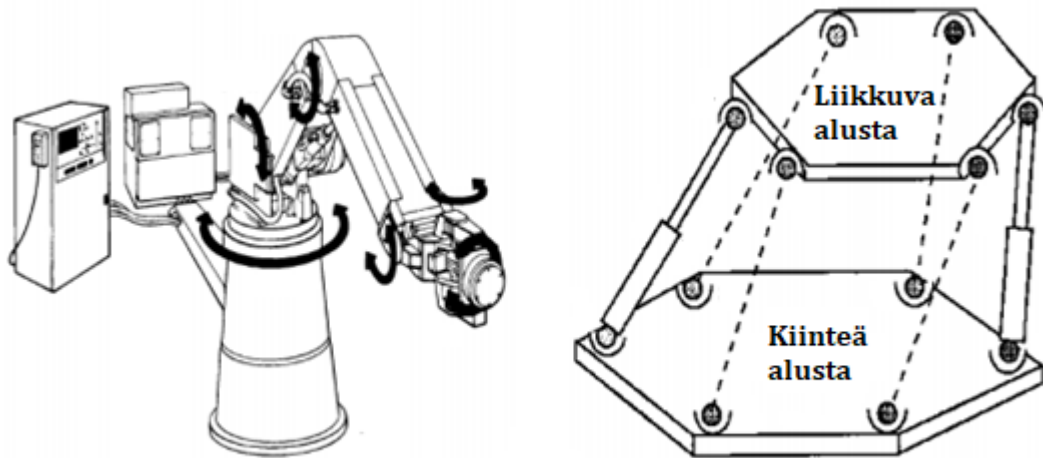
peräkkäisistä jäsenistä, jotka on yhdistetty toisiinsa nivelillä. Manipulaattorikonaisuus sisältää käsivarren, ranteen ja työkalun. (Siciliano et al. 2009, s. 3–4)

Liikkuvien robottien alusta mahdollistaa niiden vapaan liikkumisen ympäristössään. Tämän vuoksi niitä käytetäänkin manipulaattoreiden sijaan erityisesti palveluammateissa, joissa vaaditaan itsenäistä ja kauaskantoista liikkumista. Liikkuvat robotit koostuvat yhdestä tai useammasta jäykästä rungosta ja lisäksi runkoon kiinnitetystä liikkumisen mahdollistavasta järjestelmästä. (Siciliano et al. 2009, s. 10)

Useimmin käytetyt vaihtoehdot liikkumisen toteuttamiseen ovat renkaat. Renkaalliset robotit koostuvat kiinteästä rungosta ja liikkumisen mahdollistavista pyöristä. Pyörät voivat olla kiinteitä, ohjattavia tai rullapyöriä. Kiinteät pyörät voivat pyöriä ainoastaan niiden keskipisteen läpäisevän akselin ympäri. Kyseiset pyörät on kiinnitetty jäykästi alustaan ja näin ollen alustan orientaatio pyörien suhteen on vakio. Ohjattavilla pyörillä on kaksi pyörimisakselia. Ensimmäinen pyörimisakseli on samainen kuin kiinteillä pyörillä. Toinen pyörimisakseli on pystysuuntainen ja kulkee pyörän keskipisteen lävitse. Tämä mahdollistaa sen, että pyörä voi muuttaa orientaatiotaan alustan suhteen. Rullapyörät omaavat samat pyörimisakselit kuin ohjattavat pyörätkin. Erona kuitenkin on, että pystysuuntainen akseli ei kulje pyörän keskipisteen lävitse. Tämä johtaa siihen, että pyörä pyrkii nopeasti kohdistamaan itsensä alustan liikesuuntaan nähden. Kyseisiä pyöriä käytetään yleisesti ostoskärryissä. (Siciliano et al. 2009, s. 10–11)

Renkaiden ohella robotin liikkuvuus voidaan toteuttaa raajojen avulla. Raajalliset liikkuvat robotit koostuvat useista jäykistä rungoista, jotka kytkeytyvät toisiinsa kiertyvillä tai prismaattisilla nivelillä. Osa rungoista muodostavat alaraajat, joihin niin sanotut robotin jalat kiinnittyvät. Jalat ovat jaksoittain kosketuksissa maan kanssa mahdollistaen liikkumisen. (Siciliano et al. 2009, s. 10–11)

Robotit ja erityisesti robottimanipulaattorit voidaan edelleen jakaa eri ryhmiin niiden ominaisuuksien mukaan. Ryhmittelyä voidaan tehdä esimerkiksi vapausasteiden, kinemaattisen rakenteen, työalueen koon, ohjauksen ja liikeominaisuuksien perusteella. Kinemaattisen rakenteen mukaan manipulaattorit voidaan jakaa sarja- ja rinnakkaisrakenteisiin robotteihin. Sarjaroboteilla kinemaattinen ketju on avoin, kun taas rinnakkaisrobo- teilla kinemaattinen ketju on suljettu. Hybridirobotit koostuvat sekä avoimista että sulje- tuista kinemaattisista ketjuista. Kuvassa 1 on esitetty sarjarakenteinen ja rinnakkaisraken- teinen robotti. (Pandilov & Dukovski 2014, s. 144)



Kuva 1. Vasemmalla sarjarobotti ja oikealla rinnakkaisrobotti (mukaillen Pandilov & Dukovski 2014, s. 144).

2.2 Rinnakkaisrobotit

Rinnakkaisroboteissa robotin liikkuva alusta (end-effector) on kiinnittynään liikkumattomaan alustaan vähintään kahden itsenäisen kinemaattisen jäsenen välityksellä. Näistä jäsenistä voidaan käyttää myös nimitystä raajat tai jalat. Rinnakkaisroboteille on ominaista, että yksittäistä raajaa käyttää aina yksi toimilaite. Useampi toimilaite mahdollistaa sen, että ulkoinen kuorma pystytään jakamaan. Tästä syystä rinnakkaisroboteilla on yleensä ottaen hyvä kuormankantokyky. (Pandilov & Dukovski 2014, s. 150)

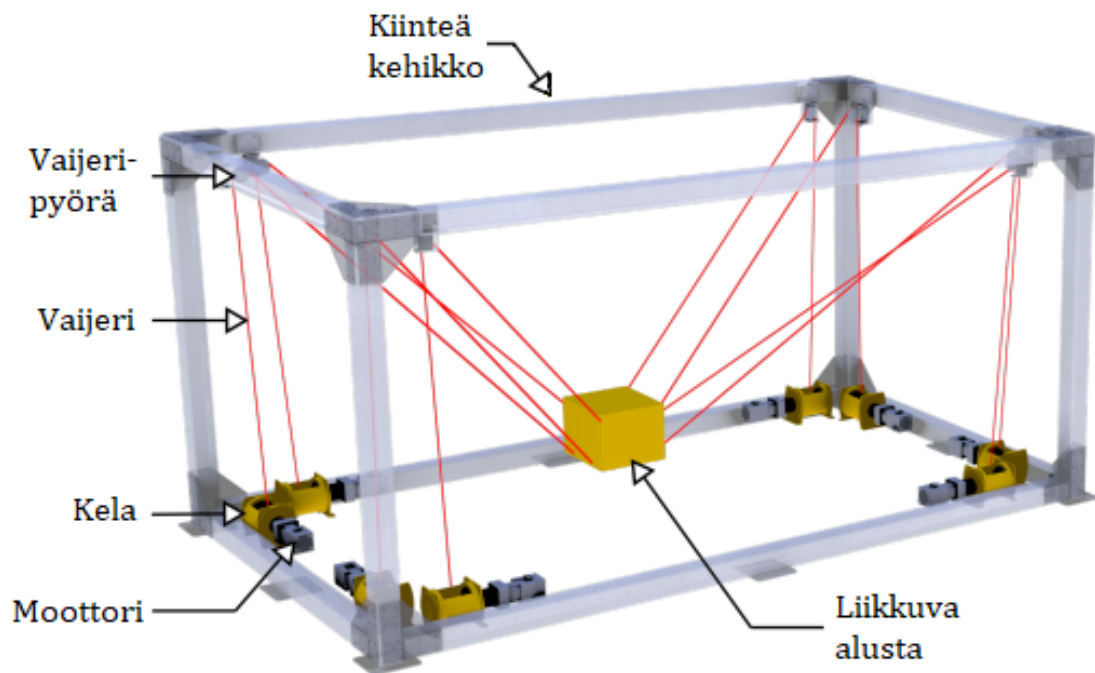
Rinnakkaisrobotit voidaan jaotella ryhmiin niiden liikeominaisuuksien mukaan. Liikkuminen voi tapahtua tasossa, liike voi kattaa ympyränmuotoisen alueen tai liikkuminen voi tapahtua laajemmalla alueella. (Pandilov & Dukovski 2014, s. 150)

Rinnakkaisrobottien rakenne mahdollistaa monia hyviä ominaisuuksia. Niillä on erittäin suuri tarkkuus, jäykkyys ja nopeus sekä ne omaavat jo edellä mainitun hyvän kantavuuden. Niillä on kuitenkin myös huonoja puolia, kuten suljetusta kinemaattisesta ketjusta johtuva rajoitettu, ja usein myös suhteellisen pieni työskentelyalue. Kyseisten robottien kinematiikan ja dynamiikan ratkaiseminen voi osoittautua myös haasteelliseksi. Ominaisuuksiensa puolesta rinnakkaisroboteja käytetään tarkkuuspaikoituksessa, simulaattoreina, äärimmäisen nopeissa pick-and-place-käyttökohteissa esimerkiksi lääketeollisuudessa, haptisissa laitteissa ja jopa terveydenhuollossa avustamaan leikkauksissa. (Pandilov & Dukovski 2014, s. 152–154)

2.2.1 Vaijereilla ohjattavat rinnakkaisrakenteiset robotit

Rinnakkaisrobotteihin luetaan myös vaijereilla ohjattavat robotit, joista käytetään englanniksi nimitystä cable driven parallel robots (CDPRs). Kyseisissä roboteissa rinnakkaisroboteille ominaiset jäykät raajat on korvattu joustavilla vaijereilla/kaapeleilla. Tämä mahdollistaa robotin suuremman työskentelyalueen, suuremman kuormankantokyvyn suhteutettuna painoon, yksinkertaisemman rakenteen ja pienemmät valmistuskustannukset verrattuna perinteisiin rinnakkaisrobotteihin. (Pott & Bruckmann 2015, s. 239; Qian et al. 2018, s. 1; Wei et al. 2016, s. 1)

Vaijereilla ohjattavien robottien alustan paikka pystytään määrittämään joustavien vaijereiden avulla. Vaijereiden ulos- ja sisäänkelaus on toteutettu yleensä kelojen avulla, joiden toimintaa ohjataan moottoreiden avulla (kuva 2). Vaijerit pystyvät jäykkiin linkkeihin verrattuna ainoastaan välittämään voimaa yhteen suuntaan, koska ne pystyvät vetämään robotin alustaa paikasta toiseen, mutta eivät ollenkaan työntämään. (Ottaviano 2008, s. 1583)



Kuva 2. Vaijereilla ohjattavan rinnakkaisrakenteisen robotin toteutus (mukaillen Picard et al. 2018, s. 1430).

Vaijerirobotit voidaan luokitella edelleen täysin rajoitettuihin (fully-constrained) ja alirajoitettuihin (under-constrained) ohjausvaijereiden ja vapausasteiden lukumäärän mukaan.

Täysin rajoitettujen vaijerirobottien liikkuvan alustan paikka voidaan määrittää täsmällisesti vaijereiden pituuksien avulla. Alirajoitettujen robottien tapauksessa niiden alustan asemaa ei voida täysin määrittää vaijereiden pituuksien avulla. Tämä johtuu siitä, että sijaintiin vaikuttaa merkittävästi myös painovoiman vaikutus. Luokittelu edellä mainittuihin ryhmiin voidaan toteuttaa sen mukaan, kuinka monta vapausastetta robotilla on ja kuinka monella vaijerilla robottia ohjataan. Vaijerirobotti, jolla on n määrä vapausasteita ja m määrä ohjausvaijereita on alirajoitettu, mikäli $n + l > m$. Robotti on puolestaan täysin rajoitettu, jos $n + l \leq m$. Alirajoitettujen vaijerirobottien ongelmaksi voi muodostua se, että ne ovat suhteellisen herkkiä heilumiselle. (Ottaviano 2008, s. 1583; Qian et al. 2018, s. 4)

Teoriassa vaijerirobottien liikkuvaan alustaan voidaan kiinnittää minkäläinen työkalu tahansa. Tästä huolimatta vaijerirobotteja käytetään suhteellisen vähän teollisuuden soveluksissa johtuen siitä, että nykyaikaisilla teollisuusroboteilla on jo pitkä optimointi- ja käyttöhistoria takanaan. Vaijerirobottien suurin kaupallinen käyttökohde on konserteissa ja urheilukisoissa kuvaukseen ja televisiointiin käytettävä vaijerikamera. (Schmidt 2017, s. 3)

2.2.2 Vaijerikamerat

Urheilutapahtumissa käytettävät vaijerikamerat ovat tuoneet uuden ulottuvuuden televisiointiin. Vaijerikamerat mahdollistavat esimerkiksi jalkapallo-ottelun seuraamisen lintuperspektiivistä, mikä tuo katsojan entistä lähemmäksi itse ottelua. Nykyisin Skycam ja Spidercam ovat tunnetuimmat vaijerikamerat, joita televisioinneissa käytetään. Skycamin kehitettiin 1980-luvun alussa ja ensimmäisiä käyttökohteita olivat NFL-ottelut. Skycamin perusajatuksena oli kolmiulotteisen liikkeen tuominen elävään kuvaan ja ylipäänsä kamerakuvaamiseen. (Chandler 2014; Qian et al. 2018, s. 1; Cone 1985, s. 122–123)

Kyseisiä vaijerikameroita ohjataan neljän Kevlar-vaijerin avulla, joiden pituuksia säädelään isojen moottoroitujen kelojen avulla. Vaijerit kannattelevat gyrostabiloitua dollya eli kameratelinettä, mikä mahdollistaa vakaan kuvan sekä hallitut kameraliikkeet ja zoomauksen. Kaiken tämän mahdollistaa erittäin tarkka tietokoneohjaus. (Chandler 2014; Chesher 2015, s. 103; Cone 1985, s. 122; Spidercam 2019)

Spidercamin (kuva 3) ja Skycamin huippunopeudet vaihtelevat välillä 34–40 km/h, ne painavat noin 25 kg ja niiden kuormankantokyky on vajaat 10 kg (Skycam 2019a; Spidercam 2019). Nämä vaijerikamerat ovat pitkälle kehitettyjä laitteita ja siksi niitä käytetäänkin pääasiassa ammattikäytössä. Kameroiden käyttäminen vaatii paljon tietotaitoa ja yleensä yhtä vaijerikameraa käyttää kaksi henkilöä erillisen ohjauskeskuksen välityksellä. Toinen ohjaa kameratelineen liikkumista paikasta toiseen samalla kun toinen vastaa itse kameran suuntaamisesta ja näin ollen kuvan kohdentamisesta oikeaan paikkaan. (Chesher 2015, s. 103; Cone 1985, s. 123)



Kuva 3. Spidercam (Spidercam 2019) (julkaistaan Spidercam GmbH:n luvalla).

Spidercamin ja Skycamin eräänä huonona puolena on systeemin aikaa vievä kasaus ja purkaminen. Lisäksi nämä ratkaisut hinnoitellaan aina tapahtumakohtaisesti ja tavallisesti ne maksavat useita kymmeniä tuhansia euroja. Tästä syystä markkinoille on tullut useita pisteestä pisteeseen kulkevia vaijerikameraratkaisuja, joilla videokuvaaminen voidaan toteuttaa huomattavasti pienemmällä vaivalla. Tällaiset vaijerikamerat on toteutettu siten, että liikkuva kamerateline on erillään kulkuvaijerista. Pystyttämiseen tarvitaan ainoastaan kaksi kiinteää pistettä, joiden välille vaijeri voidaan kiinnittää. Tämän jälkeen kamerateline on mahdollista asettaa kulkemaan vaijeria edestakaisin. Vaijerikameran kulku vaijeria pitkin on toteutettu pyörien avulla, joista yleensä yksi on moottoroitu.

Yksi esimerkki tällaisesta point-to-point-vaijerikamerasta on Wiral LITE, joka voitti vuonna 2019 Red Dot –muotoilupalkinnon. Kuvan 4 Wiral LITE kulkee vaijeria pitkin kolmen pyörän avulla, joista keskimäinen on moottoroitu. Vaijerikameran huippunopeus on 35 km/h ja sitä voidaan ajaa vaijeria edestakaisin kauko-ohjaimen avulla. Se voidaan asettaa myös timelapse-tilaan, jolloin kamera liikkuu itseksensä ennalta määrättyä

vauhtia vaijeria pitkin. Kamerateline painaa itsessään ainoastaan 600 g, kuormankantokyky on 1,5 kg ja myyntihinta 399 euroa. Kameratelineeseen voidaan kiinnittää GoPro-kameroiden ohella myös muita kameroita ja gimbaaleja, joissa on 1/4"-kierre. Wiral LITE:n käyttövalmiiksi asentaminen vie vain muutaman minuutin, eikä sen käyttö vaadi erityistä koulutusta tai todistusta osaamisesta. Point-to-point-vaijerikamerasysteemit voidaan pystyttää lähes minne tahansa. (Kickstarter PBC 2019; Wiral Technologies AS 2019a)

Vaijerikamerat ovat korvaamassa dronet kuvauskäytössä, koska ne ovat helpompia ja turvallisempia käyttää sekä ne mahdollistavat kuvaamisen ahtaissa paikoissa ja sisätiloissa. Lisäksi vaijerikameroiden käyttäminen on sallittua alueilla, jotka ovat no drone zone -kieltoalueita. (Wiral Technologies AS 2019b)



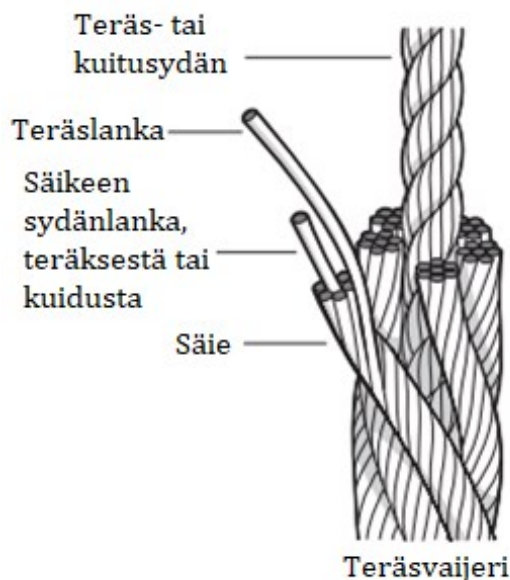
Kuva 4. Wiral LITE varustettuna GoPro-kameralla (Wiral Technologies AS 2019a) (julkaistaan Wiral Technologies AS:n luvalla).

3 VAIJERIMATERIAALIT

Kulkuvaijeri on olennainen osa koko toimivaa systeemiä. Työssä käydään seuraavaksi läpi erilaisia materiaalivaihtoehtoja vaijerille. Vaijerivaihtoehtoissa pureudutaan erityisesti materiaalien fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin.

3.1 Teräsvaijeri

Teräsvaijereita käytetään paljon erityisesti köysiradoissa liukuvaijereina ja lisäksi niitä käytetään myös nostureissa, hisseissä ja riippusilloissa. Kuvassa 5 on esitetty teräsvaijerin rakenne. Teräsvaijeri koostuu langoista, jotka on kierretty säikeiksi. Nämä säikeet on puolestaan kierretty vaijerin sydämen ympärille. Teräslangan raaka-aineena on runsashiilinen valssilanka. Teräsvaijerin ominaisuudet muodostuvat lankojen määrästä ja niiden halkaisijoista. Paksummat langat antavat teräsvaijerille kulutuksen- ja korroosionkestävyyttä. Puolestaan ohuemmat langat muokkaavat vaijerista notkeamman ja näin ollen helpomman käsitellä. Yleisesti teräsvaijerin vahvuuksia ovat luotettava toiminta, suuri vetolujuus ja kyky kestää kuormitusta. (Certex Finland Oy 2019b; Zhou et al. 2019, s. 1)



Kuva 5. Teräsvaijerin rakenne (mukaiillen Certex Finland Oy 2019b).

Teräsvaijerin sydän on joko kuitu- tai terässydän. Kuitusydämen vaihtoehtoja ovat joko luonnonkuitu tai tekokuitu. Puolestaan terässydämen vaihtoehtoja ovat teräsköysi tai te-

rässäie. Näiden lisäksi on myös mahdollista, että teräsvaijerin sydän on pinnoitettu muovilla. Tämä antaa köydelle kestävyyttä ja vähentää sisäistä kulumista, estämällä teräslankojen hankausta keskenään. Jos puolestaan verrataan kuitu- ja terässydämistä teräsköyttä keskenään, niin terässydäminen antaa paremman tuen köydelle ja lisäksi se kestää paremmin räsitusta. (Certex Finland Oy 2019b)

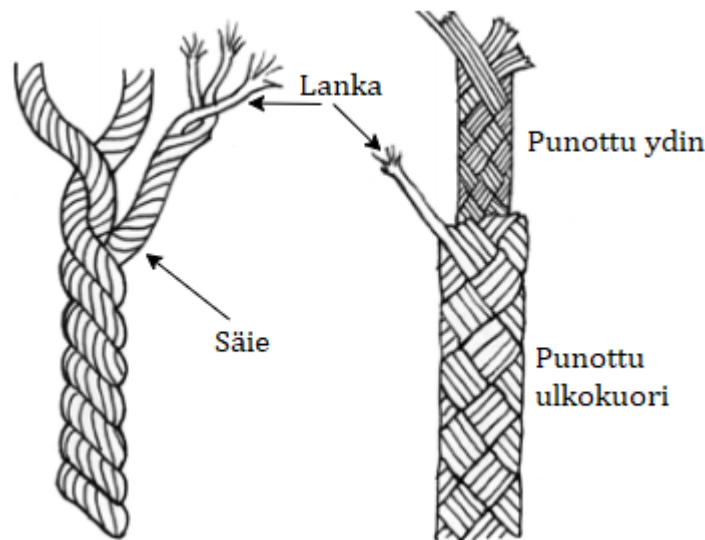
Jotta teräsköysi säilyisi mahdollisimman hyvänä, on sitä huollettava säännöllisesti. Teräsköysi voi vaurioitua useista eri syistä ja näin ollen heikentää köyden kestävyyttä sekä turvallista käyttöä. Yksi huoltotoimenpiteistä on voitelu. Voitelu vähentää sydänsäikeiden välistä kitkaa ja parantaa näin ollen köyden toimintaa ja lisää myös sen käyttöikä. Voitelu vähentää sisäisen kulumisen ohella myös merkittävästi ulkoista kulumista. Yhtenä merkinä voitelun laiminlyönnistä on ruoste. Vaijerin ulkolankojen pistemäinen ruoste aiheuttaa nopeasti langan katkeamisen. Langan katkeaminen vähentää huomattavasti teräsköyden käyttöikä ja lisäksi esiinnousseet terävät langanpätkät altistavat vaaratilanteille. Ruostetta voi esiintyä ulkopintojen ohella myös köyden sisällä. Tällainen ruostuminen voi olla erittäin haitallista, koska sitä ei välttämättä voi havaita ulkoapäin. Näin ollen tilanteeseen ei ehditä reagoida, ennen kuin on liian myöhäistä. Ruosteelle altistavia tekijöitä ovat ennen kaikkea lämpötilan- ja säänvaihtelut. Muita yleisiä teräsköyden vaurioita ovat käytön aiheuttama kuluminen, kokonaisen säikeen katkeaminen ja väsyminen. (Certex Finland Oy 2019a; Zhou et al. 2019, s. 2–3)

3.2 Kiipeilyköysi

Köysi on yleisnimitys kuiduista kierretyille tai punotuille työvälaineille. Yksinkertaisimpia köysiä ovatkin narut ja langat, jotka on valmistettu useammasta yksittäisestä kuidusta. Kierretty köysi valmistetaan siten, että seuraava kierrettävä kierros kierretään aina eri suuntaan kuin edellinen. Näin syntyvät kierteet ja vastakierteet, jotka antavat köydelle muodon, joustavuuden ja lujuuden. Kierretty köysi voi olla joko myötäpäivään (S) tai vastapäivään (Z) kierretty ja se koostuu usein kolmesta, neljästä tai kahdeksasta säikeestä. (Cardia & Lovatelli 2015, s. 58; PartioWiki 2016)

Kasvikuituköydsissä ei esiinny paljoakaan punottuja köysiä, mutta valtaosa tekokuituköydsistä on punottuja. Punottuja köysiä suositellaankin kierrettyjen köydsien sijasta ja ne voivat koostua esimerkiksi kahdeksasta, 12 tai 16 säikeestä. Punotut köydet ovat ominaisuuksiltaan taipuisampia ja ne venyvät kierrettyjä köysiä vähemmän. Ne eivät myöskään

pyri kiertymään tai mene sykkyrälle kuormitettuna. Punotut köydet voivat olla sisältä onttoja mutta useimpien sisällä on kuitenkin ydin (kuva 6). Kyseinen ydin saa aikaan köyden elastisuuden ja lujuuden. Ulkokuori sitä vastoin huolehtii pinnan ominaisuuksista kuten kitkasta ja hankauskestävyydestä. Näin ollen köysi, jossa on punottu ydin punotun kuoren sisällä, on kaikkein monipuolisin ja kestävin. Ydinkuoriköysiä käytetäänkin monesti kiipeilyköysinä. (Cardia & Lovatelli 2015, s. 58; PartioWiki 2016)



Kuva 6. Vasemmalla kierretty ja oikealla punottu köysi (mukaiillen Cardia & Lovatelli 2015, s. 58).

Köydet ovat yleisesti joko luonnonkuituköysiä tai tekokuituköysiä. Luonnonkuituköysille on ominaista niiden karvainen ulkonäkö. Tämä johtuu siitä, että kasvikuudit ovat lyhyitä, joten ne pitää kehrätä ja kiertää pitkiksi langoiksi. Näin ollen luonnonkuituköysi koostuu lukemattomista kuitujen päistä, jotka saavat aikaan ulkonäön. Tekokuidut voivat puolestaan olla kokonaisen köyden mittaisia, jonka vuoksi niillä saavutetaan hyvin sileä ja liukas lopputulos. Luonnonkuitujen käyttöä puoltaa se, että ne ovat uusiutuvia luonnonvaroja ja lisäksi ne ovat suhteellisen edullinen sekä ympäristöystävällinen valinta verrattuna tekokuituihin. (PartioWiki 2016; Rahman & Putra 2019, s. 99)

Luonnonkuituköysissä on kuitenkin monia puutteita verrattuna tekokuituköysiin. Luonnonkuituköysillä ei päästä samanlaisiin murtolujuuksiin kuin tekokuituköysillä. Luonnonkuituköydet myös hapertuvat ajan saatossa huomattavasti enemmän. Huonona puolesta tekokuituköysiin verrattuna on myös taipumus lahota ja mädäntyä. Ne myös kutistuvat kostuessaan. (PartioWiki 2016; Rahman & Putra 2019, s. 99)

Tekokuituköysiä esiintyy sekä kierrettyinä että punottuina. Näiden köysien kestävyys on huomattavasti luonnonkuituköysiä parempi. Tekokuituköydet soveltuvat yleiskäyttöön huomattavasti paremmin, koska ne eivät esimerkiksi heikkene kastuessaan. Auringonvalo voi jossain määrin hapertaa tekokuituköyttä. Kitkalämpö voi myös pehmittää köyttä. (PartioWiki 2016)

Polyamidi eli nailon oli ensimmäinen keinokuitu, jota käytettiin köysien valmistukseen. Nailonköysi on erittäin elastista ja venyy jopa 10–25 % kuormitettaessa. Nailon palautuu takaisin muotoonsa kuormituksen hävitessä. Näin ollen sitä käytetään usein kiipeilyköytenä. Nailon kestää myös erittäin hyvin hankausta. Se kuitenkin heikkenee kastuessaan ja samalla se voi myös kutistua. (Cardia & Lovatelli 2015, s. 56; PartioWiki 2016)

Nykyisin kiipeilyssä käytetyt ydinkuoriköydet ovat joko staattisia tai dynaamisia. Staattinen köysi ei joustaa tai veny, kun taas dynaaminen köysi joustaa. Staattisia köysiä käytetäänkin kiipeilyssä laskeutumiseen ja lisäksi kuormien nostamiseen sekä laskemiseen. Dynaamisia köysiä käytetään kiipeilyssä enemmän, koska ne mahdollistavat turvallisen kiipeilyn niiden joustavuuden takia. Kiipeilijän pudotessa köysi joustaa ja poistaa ison osan putoamisenergiasta. Ensimmäisellä pudotuskerralla dynaamiset köydet venyvät jopa yli 30 %, jonka jälkeen ne eivät enää palaa alkuperäiseen mittaansa. Dynaamisia köysiä on kolmenlaisia ja näistä yleisin kiipeilyssä käytetty tyyppi on singleköysi. Singleköysien murtolujuudet ovat luokkaa 19,6–23,5 kN. (Camu Oy 2016; McLaren 2006, s. 9)

3.3 Muut tekokuituköydet

Kiipeilyköyden ohella on myös muita erittäin hyviä tekokuituköysiä. Polyesterillä on monia fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia, jotka soveltuvat erittäin hyvin köysisoveluksiin. Polyesterillä on suhteellisen hyvä murtolujuus ja pieni venyvyys. Se kestää hyvin kulutusta ja hankausta sekä sietää kosteutta, kemikaaleja ja UV-säteilyä erittäin hyvin. Sulamislämpötila polyesterillä on noin 250 astetta. (Cardia & Lovatelli 2015, s. 56–57; Safety at Sea Finland Marnela Oy Ltd 2019; Teufelberger Fiber Rope GmbH 2019)

Polypropyleeni eli polypropeeni on yksi keveimmistä kuiduista ja se on hinnaltaan edullinen. Polypropyleeniköysi sietää kohtuullisesti UV-valoa ja sillä on myös hyvä veden

sekä lämpötilan sietokyky. Kyseisellä materiaalilla on myös riittävän hyvä kulutuskestävyys. Polypropyleeni ei kuitenkaan ole vahvimmaasta päästä tekokuituja. (Cardia & Lovatelli 2015, s. 57; Teufelberger Fiber Rope GmbH 2019)

Polyetyleeni eli polyeteeni on kaikista tekokuituköysimateriaaleista halvin. Se on kevyttä ja melko kestävä. DSM on alankomaalainen kemian alan yhtiö, joka muokkaa polyeteeniä molekyyllitasolla. Muokkauksessa kuidut käännetään yhdensuuntaisiksi ja näin ollen polyeteenistä saadaan valmistettua UHMW- tai HMW-polyeteeniä. UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene) koostuu erittäin pitkistä polyeteeniketjuista, joista lähes tulkoon kaikki ovat järjestäytyneet samansuuntaisesti. Pitkät molekyyliketjut mahdollistavat kuorman tehokkaan siirtämisen ja tasaamisen. UHMWPE on raaka-aine, josta valmistetaan maailman vahvimaksi kuiduksi nimitettyä Dyneemaa. Kuten taulukosta 6 nähdään, Dyneeman murtolujuus on suuri ja venymä hyvin pieni. Materiaali on kelluvaa Dyneema-kuidun pienen ominaispainon ansiosta. Materiaali sietää erityisen hyvin UV-säteilyä, kemikaaleja ja kulutusta. Dyneemaköydet ovat pyöreitä ja tasapintaisia sekä niillä on erinomaiset liukkausominaisuudet. Dyneema tarjoaa maksimaalisen kestävyys-suhteutettuna hyvin pieneen ominaispainoon. (Dimeski & Srebrekoska 2014, s. 91; DSM Dyneema 2019, s. 2; Marissen 2011, s. 319; Ramos 1999, s. 7; Teufelberger Fiber Rope GmbH 2019)

Dyneema on painossa suhteutettuna jopa 10–15 kertaa vahvempaa kuin teräs ja 40 % vahvempaa kuin aramidikuidut (Kevlar). Dyneemakuitua käytetäänkin monipuolisuutensa vuoksi hyvin erilaisiin tarkoituksiin. Sitä esiintyy esimerkiksi köysissä, kaapeleissa, urheilu- ja kalastustarvikkeissa sekä meriteollisuudessa. Lisäksi sitä käytetään Kevlarin ohella suojaamistarkoitukseen esimerkiksi työkasineissa ja luotiliiveissä. (DSM Dyneema 2019, s. 8; Leech et al. 1993, s. 370; Marissen 2011, s. 322–324)

Tekokuitumateriaaleja löytyy muitakin. Jo aikaisemmin tuli esille aramidikuitu, joka esiintyy tunnetummin nimellä Kevlar. Aramidikuitu on lähes venymätön, sillä on suuri murtolujuus ja se kestää äärimmäisen hyvin lämpöä. Aramidia käytetään usein vinssiköytenä. Aramidikuitu on kuitenkin herkkä taivutukselle jyrkkien kulmien yli ja se sietää myös huonosti UV-valoa. Aramidikuidun ohella PBO-kuitu kestää erittäin hyvin lämpöä. Kyseisessä high-tech-kuidussa yhdistyvät myös minimaalinen venymä ja korkea murtolujuus. Sillä onkin suurin lujuus ja pienin venymä suhteessa halkaisijaan. Kuidun huonona puolena on kuitenkin heikkous UV-säteilylle ja jopa suolavedelle. (McLaren 2006,

s. 21–24; Rahman & Putra 2019, s. 97; Safety at Sea Finland Marnela Oy Ltd 2019; Teufelberger Fiber Rope GmbH 2019)

LCP eli nestekidepolymeeri koostuu hyvin monimutkaisista muokatuista polyesteriketjuista. Kyseinen kuitu venyy hyvin vähän ja sen murtolujuudet ovat suuria. Lämpötilansieto on myös erittäin hyvää luokkaa ja kuitu kestää taivutusta jyrkkien kulmien ylitse. Tämänkin kuidun heikkoutena on kuitenkin UV-säteilyn sietokyky ja lisäksi valmistusmateriaalit ovat hintavia. Monesti kyseistä kuitua käytetäänkin ainoastaan ytimissä, jotka on päällystetty UV-säteilyä sietävällä kuorella. Taulukossa 1 on eritelty yleisimpien köyssissä käytettävien tekokuitumateriaalien ominaisuuksia. (Safety at Sea Finland Marnela Oy Ltd 2019; Teufelberger Fiber Rope GmbH 2019)

Taulukko 1. Tekokuitumateriaalien ominaisuuksia (mukaillen Cardia & Lovatelli 2015, s. 58; Peijs 2018, s. 88; Teufelberger Fiber Rope GmbH 2019; Wang 2017, s. 2).

Köysi	Ominaispaino (g/cm ³)	Veden imeytyminen (%)	UV-säteilyn sietokyky	Murtovenymä (%)	Kulutuksen kestävyys	Viruminen	Sulamislämpötila (°C)	Murtolujuus (GPa)
Dyneema/ Spectra	0,97	0	hyvä	3,0–4,0	erittäin hyvä	suurilla kuormituksilla	140–152	3,0–4,0
PBO	1,54	0,5–2,0	heikko	2,5–3,5	erittäin hyvä	ei mitattavaa	-	5,8
Aramidi	1,44	3,0	heikko	2,4–3,6	erittäin hyvä	hyvin vähäinen	450	3,0
Polyesteri (PES)	1,38	0,2–0,5	erittäin hyvä	20	erittäin hyvä	hyvin vähäinen	250–260	0,8–1,1
Polyamidi (PA)	1,14	3,4–4,5	heikko	25	erittäin hyvä	vähäinen	255–260	0,7–1,1
Polypropeeni (PP)	0,91	0	keskinkertainen	18	riittävä	suurilla kuormituksilla	160–175	0,53–1,0

3.4 Siima

Siimoja on tänä päivänä lukuisia eri vaihtoehtoja, mutta ne voidaan jaotella kuitenkin kahteen pääryhmään: monofiilisiimat ja kuitusiimat. Perinteisesti kalastuksessa käytetty siima on monofiilisiimaa. Monofiilisiima on halvempaa verrattuna kuitusiimaan ja se kestää kulutusta suhteellisen hyvin, mutta se ei ole läheskään yhtä vahvaa kuin kuitusiima. Se on yksisäikeistä ja sen valmistusmateriaalina ovat erilaiset muovit, joista yleisimmin

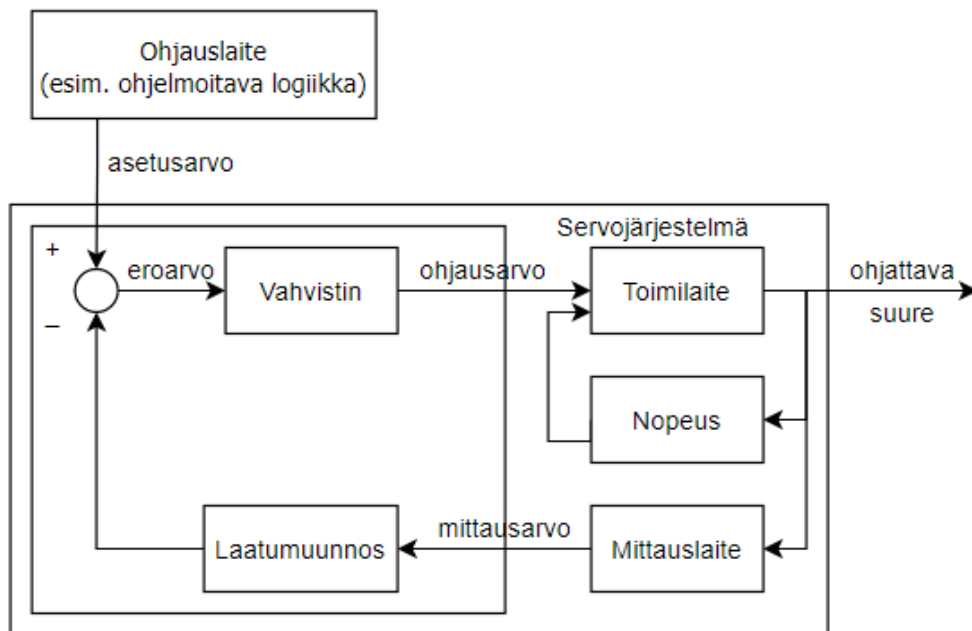
käytetään nailonia. Nailonin vuoksi monofiilisiimalla on tapana heiketä UV-säteilyn vaikutuksesta ajan saatossa. Monofiilisiiman heikkoutena on myös niin sanottu siiman muisti. Tämä tarkoittaa sitä, että siima tahtoo säilyttää kelalle käärityn muodon purkauessaan. Monofiilisiimojen alle luetaan myös yksikuituiset fluorocarbonsiimat ja fluorocarbonpäällysteiset siimat. Kyseiset siimat ovat painoltaan raskaampia verrattuna perinteisiin monofiilisiimoihin ja ne kestävät myös kulutus sekä hankausta paremmin. Niiden vetolujuus on kuitenkin monofiilisiimoja alhaisempi. (Suomen Vapaa-ajankalastajien Keskusjärjestö 2011, s. 2; The Recreational Boating & Fishing Foundation 2019)

Kuitusiimojen käyttö on yleistynyt niiden erittäin hyvien lujuusominaisuuksien vuoksi. Kuitusiimoissa käytetään samoja dyneema-, dacron- tai spectrakuituja, joita esiintyy myös tekokuituköysissä. Kuitusiima voi koostua jopa sadoista ohuista ja pitkittäisistä kuituista, jotka saavat aikaan siimalle ominaisen liukkauden. Kuitusiimat ovatkin monofiilisiimoja ohuempia mutta siitä huolimatta ne omaavat huomattavasti suuremmat vetolujuudet. Ne kestävät jopa yli kaksi kertaa suurempia voimia kuin monofiilisiimat. Kuitusiimojen vahvuutena on myös niiden venymättömyys, johtuen dyneematekokuitujen käytöstä. Kuitusiimat kestävät jokseenkin heikommin hankausta monofiilisiimoihin verrattuna ja lisäksi ne voivat talvella jäätyä herkästi. Kuitusiimojen käyttöä keloissa puoltaa se, ettei niillä ole muistia ja näin ollen ne oikenevat nopeasti kelalta purkautuessaan. Ne eivät myöskään heikkene auringonvalosta. Eri siimatyypeille suuntaa antaa se, että kokoluokassa 0,20 mm monofiilisiiman vetolujuus on noin 50 N, fluorocarbonsiiman noin 30 N ja kuitusiiman noin 140 N. (Suomen Vapaa-ajankalastajien Keskusjärjestö 2011, s. 2–3; The Recreational Boating & Fishing Foundation 2019)

Yksi vahvojen kuitusiimojen valmistajista on Spiderwire, joka tekee yhteistyötä alankomaalaisen DSM Dyneeman kanssa. Siiman valmistaminen aloitetaan lähes näkymättömän ohuista dyneemakuidun langoista, joita voidaan verrata ihmisen hiuksen paksuuteen. Nämä lukemattoman ohuet langat niputetaan yhteen, jolloin saadaan aikaan säie. Lopuksi lukuisat säikeet punotaan yhteen, jolloin saadaan dyneemakuidusta valmistettua erittäin kevyttä ja kestävä kuitusiimaa. Yksi siima voi sisältää useasta langasta koostuvia säikeitä 4–16 kappaletta. Esimerkkinä Spiderwiren mallistosta löytyy Spiderwire Ultracast Braid -kuitusiima, joka on pituudeltaan 150 m ja jota saa halkaisijakoossa 0,05–0,41 mm. Siima on punottu kahdeksasta säikeestä ja siiman vetolujuudet vaihtelevat välillä 17–444 N. (Spiderwire 2019a, Spiderwire 2019b)

Servotekniikassa järjestelmä pyrkii ohjamaan toimilaitteen haluttuun arvoon. Haluttuja arvoja voivat olla tietty kappaleen nopeus ja asema. Järjestelmän toimilaitteina ovat yleensä erilaiset sylinterit ja moottorit. Säädetävän suureen mukaan puhutaan esimerkiksi nopeus- ja asemaservoista. Nämä ovatkin koneautomaation yleisimpiä servoja. (Fonselius ym. 1998, s. 7)

Takaisinkytkentä on oleellinen osa servojärjestelmää. Sen avulla varmistetaan toimilaitteelle annetun asetusarvon toteutuminen. Koneautomaatiossa käytetään muun muassa nopeus- ja asematakaisinkytkentöjä. Kuvassa 8 on esitetty servojärjestelmän periaatteellinen rakenne. (Fonselius ym. 1998, s. 8)



Kuva 8. Servojärjestelmän rakenne (mukaillen Fonselius ym. 1998, s. 8).

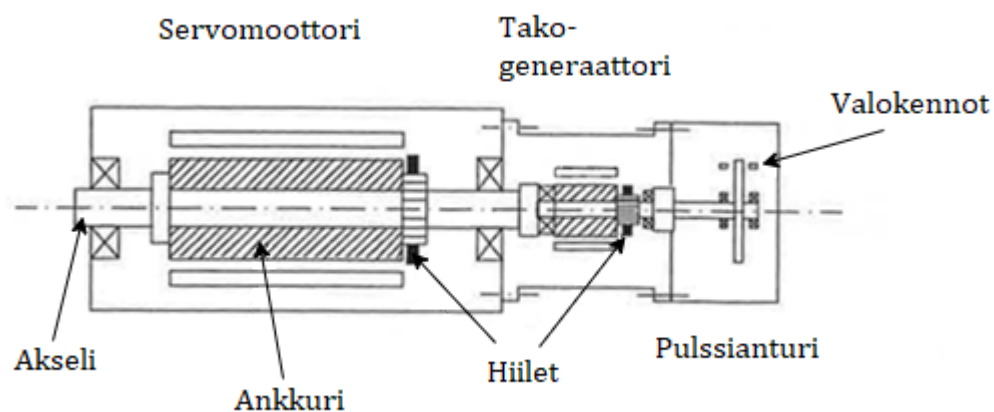
Järjestelmän ohjauslaitteena on yleensä tietokone tai ohjelmoitava logiikka. Ohjauslaitteen asettama asetusarvo johdetaan eroelimeen, josta se kulkee edelleen vahvistimeen. Vahvistin, joka sisältää erilaisia signaalinsäätömahdollisuuksia, muokkaa asetusarvon toimilaitteelle sopivaksi. Servomoottoria käytetään usein toimilaitteena. Servomoottori toteuttaa ohjauksen mukaisen toiminnan ja ohjattavana suureena voi olla esimerkiksi nopeus tai asema. Takaisinkytkennässä voidaan käyttää pulssianturia mittaamaan asemaa ja vastaavasti takogeneraattoria mittaamaan nopeutta. Takaisinkytkennässä mittausarvo muutetaan sopivaksi ja johdetaan eroelimeen. Eroelimessä mittausarvoa eli todellista ar-

voa ja alkuperäistä ohjeellista arvoa verrataan keskenään. Jos kyseiset arvot ovat keskenään yhtä suuret, toimilaite on saavuttanut halutun suureen esimerkiksi nopeuden. Mikäli näin ei ole, servovahvistin tekee tarvittavat korjaukset muuntaakseen eroarvon sopivaksi ohjausarvoksi. (Fonselius ym. 1998, s. 8)

Servotekniikan muuttuminen digitaaliseksi helpottaa huomattavasti servojärjestelmien suunnittelutyötä. Nykyiset tietokoneohjelmat ovat erittäin käyttökelpoisia apuvälineitä servojärjestelmien mallintamisessa. Lisäksi on saatavilla valmiita ja helppokäyttöisiä laitteita, kuten ohjelmoitavia logiikoita, servo-ohjaimia ja servomootoriajureita, jotka nopeuttavat entisestään suunnittelutyötä. (Fonselius ym. 1998, s. 7)

4.2 Servomootorit

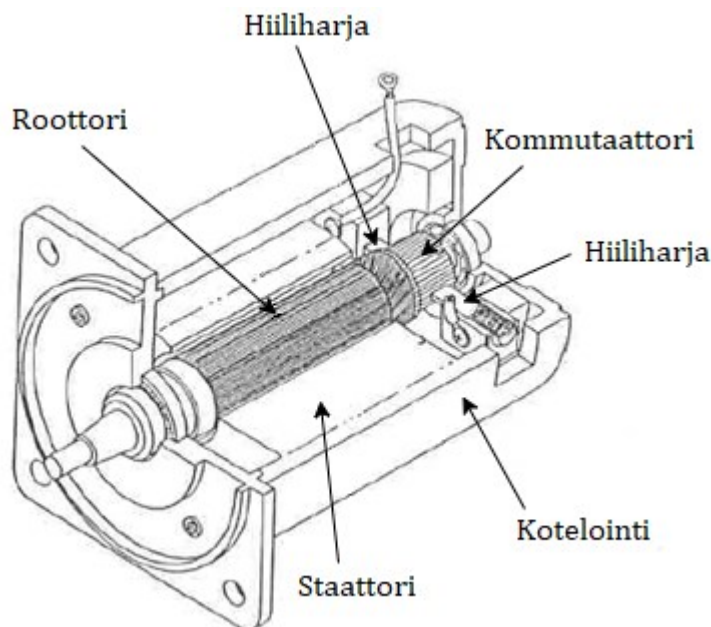
Automaatiolaitteissa ja –järjestelmissä käytetään yleisimmin servomootoreita ja askelmootoreita. Servomootoreita ovat DC- eli tasasähköservomootori (kuva 9), harjaton tasasähköservomootori ja AC- eli vaihtosähköservomootori. Servomootorit ovat erikoisrakenteisia tasa- tai vaihtovirtamootoreita. Niitä käytetään tyypillisesti asentosäätöön esimerkiksi robotin käsivarren siirtämiseen. Tällaisissa tarkoituksissa liikkeiden on oltava nopeita, joten moottorilta vaaditaan pientä hitausmomenttia. Servomootorit eroavatkin muista sähkömootoreista niille ominaisen roottorin pienen hitausmomentin osalta, mikä mahdollistaa suuret hidastuvuudet sekä kiihtyvyydet. Pienen hitausmomentin mahdollistava roottori on materiaaleiltaan normaali, mutta pitkä ja ohut. Tämä ei ole kuitenkaan ainoa vaihtoehto, vaan roottori voi olla pelkästään akselilla oleva eristekiekko, johon käämitys on tehty syövyttämällä aivan kuten piirikorteissa. (Airila 1999, luku 5 s. 4; Niiranen 1999, s. 38, Fonselius ym. 1998, s. 10)



Kuva 9. Tasavirtaservomoottori (mukaihen Fonselius ym. 1998, s. 10).

4.2.1 Harjalliset tasavirtaservomoottorit

Tavanomaiset harjalliset DC-moottorit ovat hyvien servokäyttöominaisuuksiensa vuoksi erittäin yleisiä servomoottoreita. Kuvassa 10 on kuvattu harjallisen DC-moottorin perusrakenne.



Kuva 10. Harjallisen DC-moottorin rakenne (mukaillen Airila 1999, luku 5 s. 4).

DC-moottoriin kuuluu pyörivä roottori, jonka ympärillä on kiinteä staattori. Roottoria nimitetään myös ankkuriksi. Staattori koostuu yhdestä tai useammasta kestopagneetista ja rautaikeestä. Kestomagneetit saavat aikaan staattisen magneettikentän. Roottorissa on puolestaan ankkurikäänitys, jota syötetään vaihtosähköllä. Tämän vaihtosähkön saa aikaiseksi roottorin kanssa samalla akselilla oleva kommutaattori. Tasasähkö tuodaan kommutaattoriin, joka mekaanisesti vaihtosuuntaa harjojen välityksellä kommutaattorin liuskoille syötetyn tasavirran. (Airila 1999, luku 5 s. 5; Niiranen 1999, s. 27)

DC-moottori voidaan toteuttaa myös niin sanottuna kenttäkäämittyinä moottorina. Tämä tarkoittaa sitä, että moottorissa ei ole kestopagneetteja, vaan ne on korvattu sähkömagneettisilla keloilla. Näin ollen moottorin kenttäkäämi on staattorissa ja työkäämi ankkurissa. Moottoriin saadaan tarvittava magneettikenttä aikaiseksi tuomalla kenttäkäämiin tasasähköä. Kommutaattori huolehtii edelleen ankkurikäänin oikeasta napaisuudesta ankkurin pyöriessä. (Fonselius ym. 1998, s. 140–141)

Magnetointikäämitysten mukaan tasaservomoottorit voidaan jakaa sivuvirta-, sarja- ja kompondimoottoreihin. Sivuvirtamoottorissa magnetointi- ja ankkuripiiri ovat rinnakkain. Näille moottoreille on ominaista pyörimisnopeuden vähäinen hidastuminen kuormituksen kasvaessa. Sarjamoottoreissa magnetointivirta on sama kuin ankkurivirta eli magnetointi on ankkuripiirin kanssa sarjassa. Sarjamoottoreilla pyörimisnopeus laskee rajusti kuormituksen kasvaessa. Kompoundimoottoreissa magnetointi on toteutettu kahden edellä mainitun moottorin risteytyksenä. Toinen on ankkurin rinnalla ja toinen puolestaan ankkurin kanssa sarjassa. Näin ollen kompondimoottoreissa yhdistyvät sarja- ja sivuvirtamoottoreiden ominaisuudet. (Fonselius ym. 1998, s. 140–141)

Tavanomaisen kestmagnetoidun DC-moottorin vahvuuksia ovat tasainen ja vakaa magneettikenttä sekä hyvä hyötysuhde. Harjallisten tasavirtamoottorien heikkous on kuitenkin hiiliharjojen kulumisen ja tästä aiheutuvat huoltotoimenpiteet. (Airila 1999, luku 5 s. 19)

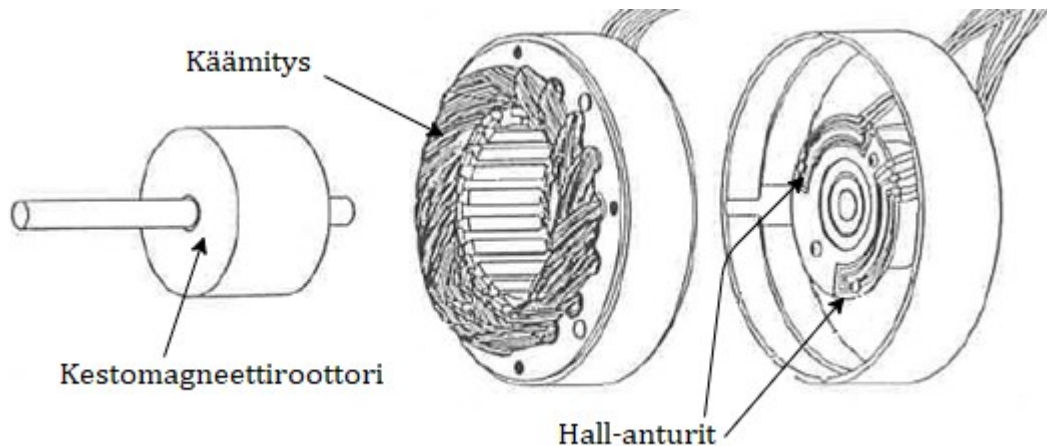
4.2.2 Harjattomat tasavirtaservomoottorit

Hiiliharjoista johtuvat toiminnalliset, luotettavuus- ja huolto-ongelmat ovat johtaneet harjattomien servomoottorien käyttöön yhä lisääntyvässä määrin. Harjattomassa servomoottorissa kommutointi on toteutettu elektronisesti, jolloin mekaaninen kommutaattori hiiliharjoineen voidaan unohtaa. (Airila 1999, luku 5 s. 19)

Harjattoman DC-servomoottorin erona harjalliseen tasavirtaservomoottoriin on se, että käämityksen ja kestmagneettien paikat ovat vaihtuneet. Nyt siis käämitys on staattorikehällä ja vastaavasti roottorissa sijaitsevat kestmagneetit (kuva 11). Lisäksi kommutointi toteutetaan elektroniikan avulla. Kestomagneetteja on roottorissa yksi tai useampia ja staattorissa on käämityksiä yleensä kolme. (Airila 1999, luku 5 s. 19)

Tieto roottorin asemasta on erittäin tärkeää, koska tämän avulla virran ohjaaminen staattorikämeihin osataan ajoittaa oikein. Tämän vuoksi harjattomissa DC-servomoottoreissa on roottorin asemanmittausanturi. Käytössä on esimerkiksi optisia antureita, Hall-antureita ja synkroja. Moottoreissa on usein myös pyörimisnopeuden mittaamista varten harjaton takogeneraattori. (Fonselius ym. 1998, s. 143)

Harjattomat servomootorit soveltuvat erityisesti kohteisiin, joissa tarvitaan nopeita jarrutuksia ja kiihdytyksiä. Harjallisten moottoreiden hitausmomentteihin verrattuna vastaavan tehoisten harjattomien moottoreiden hitausmomentit ovat vain noin viidesosa. Harjattomat servomootorit ovat kuitenkin jokseenkin kalliimpia verrattuna harjallisiin. (Fonselius ym. 1998, s. 145)



Kuva 11. Harjattoman DC-servomootorin perusrakenne (mukaillen Airila 1999, luku 5 s. 20).

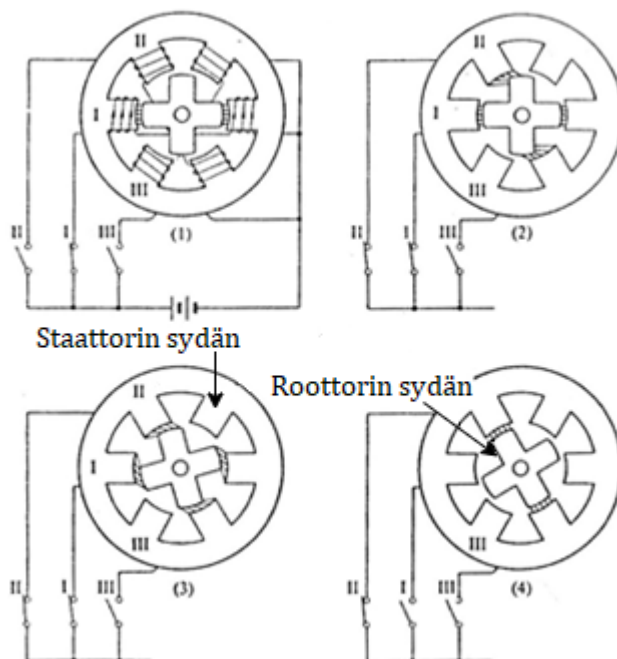
4.3 Askelmoottorit

Servomootoreiden ohella myös askelmoottoreita käytetään toimilaitteina koneautomaatiossa. Niitä käytetään yleensä sovelluksissa, joissa ei vaadita suuria vääntömomentteja ja niiden etuna on ohjauksjärjestelmän täydellinen digitaalisuus. Järjestelmän hyvä tunteminen ja huolellinen suunnittelu mahdollistavat sen, että askelmoottoreilla voidaan päästä hyvinkin tarkkoihin liikenopeuksiin ja loppuasemiin. (Airila 1999, luku 5 s. 4; Niiranen 1999, s. 38, Fonselius ym. 1998, s. 10)

Askelmoottoreita käytetään esimerkiksi robottien ja työstökoneiden ohjaukseen. Niitä ohjataan askel kerrallaan jännitepulsseiden avulla. Askel toistuu samansuuruisena jokaista ohjauslaitteen antamaa jännitepulssia kohti. Oikealla toiminta-alueella käytettynä jännitepulsseista voidaan laskea roottorin tarkka pyörimisnopeus ja asema ilman nopeus- tai asematakaisinkytkentää. Askelten välinen asemointivirhe on tyypillisesti ainoastaan noin 0,1 astetta eikä se kasva siitä pitkissäkään liikkeissä. Tämä pätee kuitenkin vain oikealla toiminta-alueella käytettynä, koska ylikuormitustilanteessa moottori hukkaa askeleita hyvinkin helposti ja näin pulsseista saatava asematieto menetetään. Tästä syystä vaativissa

sovelluksissa askelmoottoreissakin käytetään suljettua säätöpiiriä. Järjestelmään kuuluu moottorin lisäksi ohjain, jonka tehtävänä on muodostaa ja ohjata jännitepulssit oikeaan aikaan ja oikealla taajuudella käämeille. (Airila 1999, luku 5 s. 28; Fonselius ym. 1998, s. 148)

Askelmoottorit voidaan jakaa reluktanssi-, kestmagneetti- ja hybridiaskelmoottoreihin. Askelmoottorin perustyyppi on muuttuvan reluktanssin askelmoottori, joka on esitetty kuvassa 12. Kuvan kolmivaiheinen moottori koostuu kuudesta staattorin navasta ja nelihampaisesta roottorista. Staattorin navoista kaksi vastapäistä magnetoidaan samanaikaisesti käämin avulla ja kukin napapari muodostaa yhden vaiheen. Roottorin liike saadaan aikaiseksi aktivoimalla kukin näistä vaihteista erikseen. Kyseisen moottorin askelkulma saadaan laskettua jakamalla 360 astetta hampaiden ja vaiheiden lukumäärän tulolla. Näin ollen kuvan 12 muuttuvan reluktanssin askelmoottorin askelkulma on 30 astetta. Moottorissa on mahdollista päästä puoliaskellukseen tai mikroaskellukseen aktivoimalla useampia vaihteita yhtä aikaa. Tämä kuitenkin johtaa epätarkempaan asemointiin ja alentuneeseen vääntömomenttiin. (Airila 1999, luku 5 s. 28; Fonselius ym. 1998, s. 150)



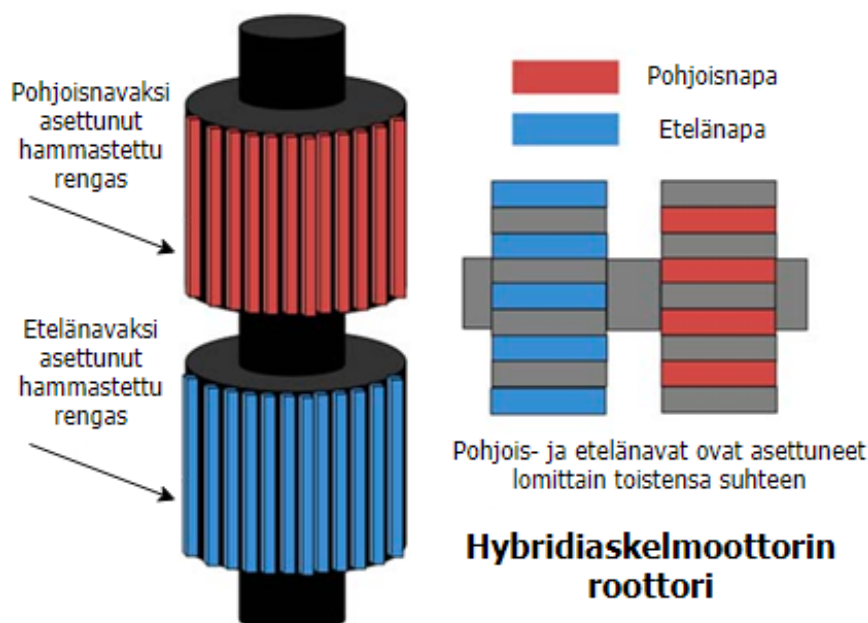
Kuva 12. Muuttuvan reluktanssin askelmoottori (mukaillen Airila 1999, luku 5 s. 29).

Kestomagnetoidussa askelmoottorissa on roottorina sylinterimäinen kestmagneetti. Tällainen askelmoottori on hinnaltaan melko edullinen, mutta kuitenkin ominaisuuksiltaan vaatimaton. Kyseisen moottorin askelkulma on tavallisesti noin 45 astetta. Tämä johtuu

siitä, että kestmagnetoituun askelmoottoriin on hankala saada useita käämejä ja tästä syystä askelkulma jää suureksi. (Airila 1999, luku 5 s. 28; Fonselius ym. 1998, s. 150)

Hybridiaskelmoottori on nimensä mukaisesti reluktanssi- ja kestmagneettiaskelmoottorin yhdistelmä. Hybridimoottorissa on kestmagnetoidun tapaan roottorissa kestmagneetti. Suurimpana erona muihin moottoreihin verrattuna on kahden vaiheen käämityksen sijoittaminen samaan staattorin napapariin. Roottorin kestmagneetin navat sijaitsevat päädyissä. Kuvassa 13 on kuvattu hybridiaskelmoottorin roottorin rakenne. Roottori koostuu kahdesta hammastetusta renkaasta, joiden sisällä kestmagneetti sijaitsee. Johdun kestmagneetin pohjois- ja etelänapojen sijainnista, toinen hammastetusta renkaasta on pohjoisnapa ja toinen on etelänapa. Renkaiden hammastuksissa on puolen hampasmaajan suuruinen vaihesiirto ja tämä on oleellinen ominaisuus moottorin toiminnan kannalta. Myös staattori on hybridiaskelmoottorissa hammastettu. Yleensä hybridiaskelmoottorin staattorissa on kahdeksan viisihampaista napaa. Tyypillinen askelkulma näille moottoreille on 1,8 astetta. (Agnihotri 2011; Airila 1999, luku 5 s. 28; Fonselius ym. 1998, s. 150)

Kaiken kaikkiaan askelmoottoreiden käyttöä puoltaa monesti se, että niiden käytössä ei tarvita asema- eikä nopeustakaisinkytkentää ja lisäksi niitä on helppo ohjata digitaalisesti. Moottoreiden huonona puolena kuitenkin on se, että ne vaativat virtaa suhteellisen paljon. Pyörimisnopeuskaan ei ole kovin tasainen ja lisäksi askelmoottorit voivat joutua resonanssiin, joka on huomioitava mitoituksessa. (Fonselius ym. 1998, s. 150)

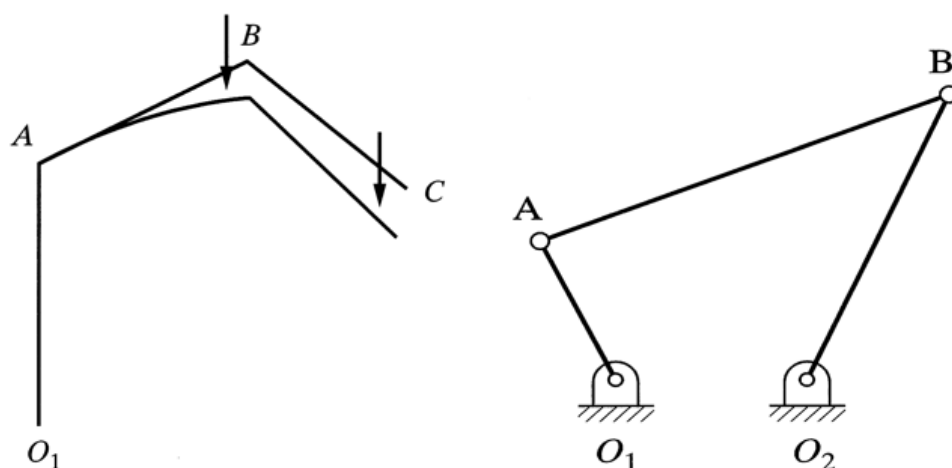


Kuva 13. Hybridiaskelmoottorin roottorin rakenne (mukaillen Agnihotri 2011).

5 KINEMATIikka

Dynamiikka eli liikeoppi on mekaniikan osa-alue, joka voidaan jakaa edelleen kinematiikkaan ja kinetiikkaan. Näistä kahdesta kinematiikka tutkii liikettä geometriselta kannalta ottamatta huomioon syitä, kuten voimia ja momentteja, jotka aiheuttavat liikkeen. Kinematiikkaa kutsutaankin myös geometriseksi liikeopiksi, jossa nopeus, kiihtyvyys sekä paikka ovat keskeisiä suureita. Kinematiikka perustuu geometrian käsitteisiin ja peruslakeihin. Kinematiikalla ja sen soveltamisella on merkittävä rooli koneiden ja laitteiden suunnittelussa. Kinetiikka tutkii puolestaan systeemiin vaikuttavien voimien ja niiden ylläpitämien liikkeiden välisiä suhteita. Kinematiikka toimii perustana myös kinetiikalle. (Airila 1999, luku 3 s. 2; Salmi & Virtanen 2005, s. 15)

Kinematiikka on vahvasti läsnä roboteissa ja robotiikassa. Robottien käsivarret muodostavat kinemaattisen ketjun, joka koostuu jäykistä jäsenistä ja näitä yhdistävistä nivelistä. Tämän kinemaattisen ketjun toinen pää on kiinnitetty johonkin tiettyyn alustaan (base) ja toinen pää on kiinnitettynä esimerkiksi työkaluun tai robotin leukoihin (end-effector). Kinemaattinen ketju voi olla joko avoin tai suljettu (kuva 14). Ketju on avoin silloin, kun se sisältää ainoastaan yhdessä sarjassa olevia linkkejä. Yksikäätisten teollisuusrobottien kinemaattinen ketju on usein avoin, koska käsivarren kaikki osat ovat yhdessä sarjassa. Kinemaattinen ketju on vastaavasti suljettu, jos linkit muodostavat suljetun silmukan. (Siciliano et al. 2009, s. 58)



Kuva 14. Vasemmalla avoin kinemaattinen ketju ja oikealla suljettu (mukaillen Eastern Mediterranean University 2019, s. 2).

Robottikäden mekaanista toimintaa voidaan kuvata vapausasteen avulla. Nivelet mahdollistavat robotin jäsenien liikkumisen ja näin ollen ne määräävät myös vapausasteen. Nivelet mahdollistavat robotin jäsenten keskinäisten asentojen ja asemien muuttamisen. Vapausaste on siis luku, jonka avulla kuvataan robotin mahdollisia liikesuuntia. Vapausasteita on teollisuusroboteissa sekä kiertyviä että suorita. Tavallisesti roboteissa vapausasteita kutsutaan akseleiksi. Roboteissa akseleita on tyypillisesti 4–6. Robotin tarkoituksena on hallita liikettä ja työkalun asemaa käyttäjän määräämällä tavalla. Tätä varten tarvitaan suoraa kinematiikkaa ja käänteiskinematiikkaa, jotta robotti osaa muuttaa halutun työkalun aseman vaadituiksi vapausasteiden ohjearvoiksi. Vastaavasti robotti voi joutua laskemaan työkalun sijainnin ennalta määrättyjen nivelten paikka-arvojen mukaan. (Airila 1999, luku 2 s. 4; Kuivanen 1999, s. 15; Siciliano et al. 2009, s. 58)

5.1 Suora kinematiikka

Suoran kinematiikan ajatuksena on ratkaista robotin työkalun sijainti ja orientaatio suhteessa peruskoordinaatistoon, kun sitä edeltävien linkkien ja näitä yhdistävien nivelten asematiedot tunnetaan. Peruskoordinaatistoksi valitaan usein alustan runkokoordinaatisto. Suora kinematiikka on mahdollista ratkaista, kun tiedetään jokaisen jäsenen pituus ja kiertymä sekä kahden jäsenen välinen nivelkulma ja –siirtymä. (Airila 1999, luku 3 s. 2; Craig 1986, s. 97)

5.2 Käänteiskinematiikka

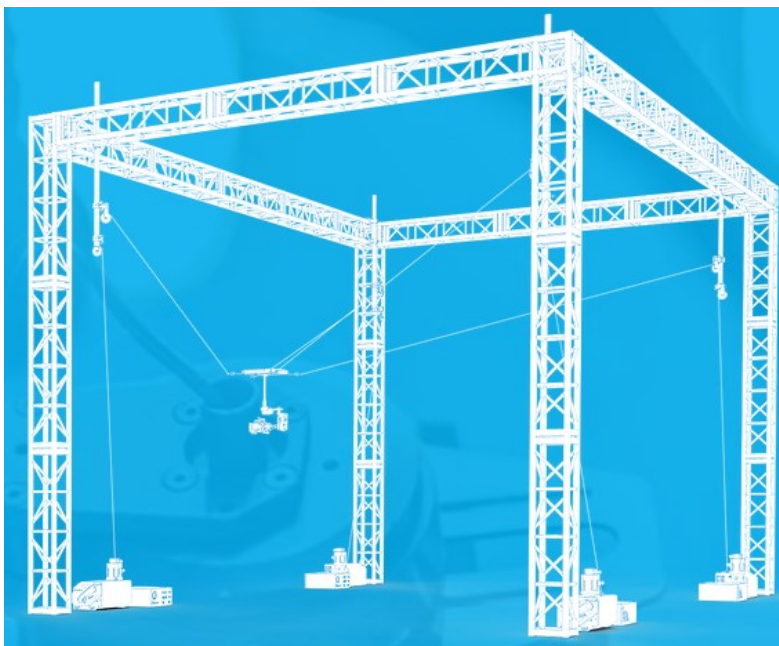
Käänteiskinematiikka toimii päinvastaiseen suuntaan verrattuna suoraan kinematiikkaan. Siinä robotin työkalun sijainti ja orientaatio tunnetaan suhteessa alkuasemaan, joten on selvittävää niveliltä vaadittavat asematiedot, jotta tämä kyseinen työkalun paikka ja orientaatio voidaan saavuttaa. Käänteiskinematiikka on monimutkaisempaa verrattuna suoraan kinematiikkaan johtuen siitä, että kyseistä paikkaa ei välttämättä voida saavuttaa tai vastaavasti ratkaisuita voi löytyä useita. Ratkaisuita löytyy ainoastaan siinä tapauksessa, jos työkalun haluttu sijainti on robotin työskentelyalueen sisäpuolella. (Craig 1986, s. 97)

6 DRONEJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

6.1 Vaatimusmäärittely

Vaijeridronen suunnittelussa oli huomioitava muutamia eri vaatimuksia. Systeemiä testataan sisätiloissa sekä lähiympäristössä, joten käytettävän vaijerin tulee soveltua molempiin käyttöolosuhteisiin. Vaijerin tulee kestää myös kulutusta ja hankausta, jota laitteen sekä sään vaikutuksesta aiheutuu. Lisäksi vaijeridronen on oltava vaivattomasti siirrettävissä ja kytkettävissä eri olosuhteissa.

Yleisesti vaijereilla ohjattavissa rinnakkaisrakenteisissa roboteissa kela-moottoriyhdistelmät ovat kiinnitettynä jäykkään kehikkoon tai kiinnityspisteisiin. Kuvassa 15 on esitetty tällainen rakennelma toimintaa varten. Työssä suunniteltavaa prototyyppiä varten moottoroitujen kelojen tulisi olla kiinnitettävissä liikkuvaan alustaan. Alustaan pitää pystyä kiinnittämään myös kamera tai jopa perinteinen drone, jolloin sen lentoa voidaan simuloida laitteen avulla.



Kuva 15. Vaijeridronetoteutus (DynamyCam 2019) (julkaistaan DynamyCam LTD:n luvalla).

Vaijeridronessa moottoreiden energianlähteenä käytetään akkuja. Laitteen painon tulisi olla suhteellisen kevyt ja koon riittävän pieni käytön helpottamiseksi. Lisäksi sillä pitää

pystyä liikuttamaan hyötykuormaa, jonka suuruus on 5–10 kg luokkaa. Tarvittavien komponenttien suunnittelussa on pyrittävä siihen, että suurin osa voidaan valmistaa halvoilla valmistusmenetelmillä kuten laserleikkaamalla tai 3D-tulostamalla.

6.2 Käytettävän vaijerin valinta

Vaijeri on tärkeässä osassa koko toimivaa systeemiä. Yhdellä vaijerilla on mahdollista toteuttaa yksiulotteinen liike esimerkiksi vaijeridronen kulkeminen edestakaisin. Vastavasti kahden ohjausvaijerin avulla on mahdollista saada aikaan tasossa tapahtuva liike. Kolmella ja tätä useammalla ohjausvaijerilla voidaan puolestaan toteuttaa liike haluttuun pisteeseen kolmiulotteisessa tilassa.

Teräsvaijereiden murtolujuudet ovat käyttötarkoitukseemme varmasti riittäviä, koska teräsvaijereita käytetään yleisesti ihmisten käyttämissä köysiradoissa ja prototyypilaitte lisävarusteineen ei tule painamaan ihmistä enempää. Teräsvaijerin valinnassa tulee kuitenkin esille muita huonoja puolia. Mitä pidempi teräsvaijeri on, sitä enemmän se luonnollisesti painaa. Köyden/vaijerin on oltava mahdollisimman helposti siirrettävissä paikasta toiseen, joten tässä suhteessa teräsvaijeri on liian jyrävä. Lisäksi köyden yksinkertainen kiinnitys esimerkiksi puuhun on ensiarvoisen tärkeää. Teräsvaijeri vaatii myös säännöllistä huoltoa ja voitelua pysyäkseen jatkuvasti turvallisessa käyttökunnossa.

Kiipeilyköyden käyttäminen kulkuvaijerina olisi myös mahdollista. Köyden täytyisi olla staattinen köysi, jotta se ei anna periksi. Lisäksi kiipeilyköyden hyvänä puolena on se, että ne ovat suhteellisen kevyitä. Esimerkiksi 11 mm paksu ja metrin pitkä staattinen kiipeilyköysi painaa noin 80 g metriä kohden. Samaisen köyden vetolujuus on 33 kN. Kiipeilyköysi olisi huomattavasti kevyempi ja helpommin siirrettävissä teräsköyteen verrattuna. Kiipeilyköysi riittäisi varmasti kestävyytensäkin puolesta. Lisäksi staattiset köydet on suunniteltu kestämaan kitkaa ja kulutusta hyvin. Kiipeilyköysiä paremmat ominaisuudet on kuitenkin mahdollista saavuttaa muilla tekokuituköysillä huomattavasti ohuemmassa ja kevyemmässä muodossa.

Vaijerin materiaaliksi 1D-vaijeridronea varten on valittu Dyneema. Dyneemaköysi on hyvin yleinen tänä päivänä kaupallisesti myytävissä vaijerikameroissa. Dyneemaköysi on erittäin luja, kevyt ja lisäksi se kestää hyvin kulutusta. Köysi omaa myös hyvät liukkaus-

ominaisuudet ja se soveltuu käytettäväksi niin sisä- kuin ulkotiloissakin, mikä on välttämättömyys vaijeridronea ajatellen. Tekokuitu ei myöskään ruostu ulkona toisin kuin esimerkiksi teräsvaijeri.

Työssä toteutettavaa prototyyppiä ajatellen vaijerimateriaalin valinnassa on päädytty myös dyneemakuituun. Dyneemakuidun ominaisuuksia hyödynnetään kuitusiiman muodossa. Kuitusiima mahdollistaa monia eri asioita. Siimoja hyödyntämällä laitteen yhteyteen kiinnitetään hyrräkeloja, joilla toteutetaan siiman kelaaminen ja vastaavasti purkaminen. 1D-vaijeridronen tapauksessa tekokuituköysi mahdollistaa liikkumisen ainoastaan edestakaisin, mutta siimoja ja keloja hyödyntämällä liikettä saadaan laajennettua myös sivuttais- ja pystysuunnassa. Siimaksi on hankittu 137 metriä 0,40 mm paksuista Spiderwiren Dura-Silk -kuitusiimaa, joka on valmistettu 100 % Dyneema-kuidusta. Kyseinen siima on erittäin vahvaa ja notkeaa sekä se soveltuu tilanteisiin, joissa voi syntyä hankausta. Kyseisellä siimalla on myös hyvä solmunkestävyys ja vetolujuudeksi luvataan 574 N.

6.3 Moottorin mitoitus

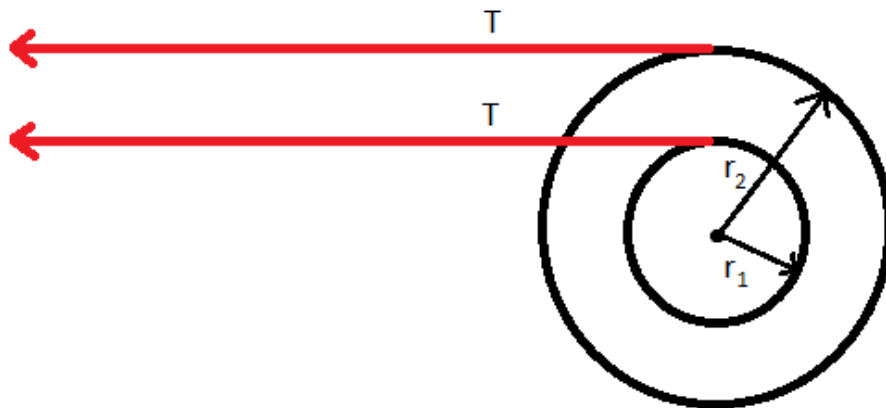
Vaijeridronea varten tarvitaan moottorit, jotka ohjaavat kelojen pyörimistä ja näin ollen ne säätelevät siiman kelaamista ja purkamista. Keloina voidaan käyttää kalastuksessa käytettäviä hyrräkeloja. Valmiiden kelojen etuna on se, että ne ovat jo hyvin pitkälle suunniteltuja mekaaniselta toiminnaltaan, ne ovat suhteellisen kestäviä ja lisäksi ne tarjoavat valmiit komponentit, joten keloja ei tarvitse lähteä suunnittelemaan itse alusta alkaen. Moottorin mitoittamisessa käytetään apuna moottorin datalehteä. Esimerkiksi tiedot moottorin pyörimisnopeudesta ja maksimivääntömomentista antavat hyvin suuntaa mahdollisen moottorin valintaan.

Moottorin mitoituksessa on otettava huomioon eri seikkoja. Ensiksi on tarkistettava käyttöolosuhteet ja käyttöjännite. Tämän jälkeen on hyvä pohtia prosessin asettamia vaatimuksia, kuten käytettävää kierrosaluetta. Lisäksi on otettava huomioon kyseessä olevan järjestelmän aiheuttama kuormitustyyppi. Sähkömoottorin on kyettävä tuottamaan tarvittava vääntömomentti. Moottorin on kestävä myös prosessin aiheuttamaa ylikuormitusta. Termistä ylikuormitettavuutta ei kuitenkaan saisi ylittää. Maksimimomenttia määritettäessä moottorin maksimimomentille on jätettävä noin 30 % marginaali. (ABB 2001, s. 7)

Mitoituksen lähtökohtana voidaan käyttää haluttua liikenopeutta. Liikenopeuden lisäksi käytetään katalogeista löytyviä tietoja hyrräkeloille. Hyrräkeloissa itsessään on sisäänrakennettu vaihteisto, jonka välityssuhde on yleisesti luokkaa $n_1:n_2 = 1:4,0$. Ammattikalastukseen käytetyissä keloissa pyörimisnopeuksien suhde voi olla tätäkin suurempi. Kyseinen välityssuhde kuvaa sitä, kuinka monta kierrosta kelan puola pyörii, kun kampea käännetään yhden kierroksen verran. Kyseessä on suuri vaihde, jossa vetävä pyörä on vedettävää pyörää suurempi. Tällainen välitys mahdollistaa nopeuden lisäämisen.

Hyrräkelan ylennysvaihde muuttaisi moottorin pyörimisnopeuden puolan pyörimisnopeudeksi siten, että puola pyörisi huomattavasti nopeammin kuin moottori. Tämä johtaisi siihen, että hyrräkelan pyörimisnopeus olisi erittäin suuri ja vastaavasti vääntömomentti pieni. Samalla moottorin pyörimisnopeuden laskiessa vääntömomentti kasvaisi tarpeettomasti. Ratkaisuna tähän on poistaa vaihteisto moottorin ja hyrräkelan välistä ja kytkeä moottori suoraan hyrräkelan puolalle. Näin välityssuhteeksi tulee yksi.

Laitteen liikuessa edestakaisin moottoreiden käyttämien kelojen halkaisijat muuttuvat sen mukaan, purkautuvatko vai kelautuvatko ne täyteen. Tarkoituksena on kuitenkin pitää kelan kehänopeus ja vaijerin jännitysvoima vakiona halkaisijan muuttuessa (kuva 16).



Kuva 16. Hyrräkelan toiminta.

Lähdetään mitoituksessa liikkeelle kehänopeudesta. Kehänopeuden yhteys kulmanopeuteen on:

$$v = \omega \cdot r, \quad (1)$$

jossa v on kehänopeus, ω on kulmanopeus ja r on säde. Kaavaa voidaan muokata edelleen, jotta päästään käsiksi kelan pyörimisnopeuteen. Kulmanopeus voidaan kirjoittaa myös pyörimisnopeuden n avulla:

$$\omega = 2\pi n \quad (2)$$

Sijoitetaan kaava (2) nyt kaavaan (1) ja ratkaistaan pyörimisnopeus n :

$$v = \omega r \leftrightarrow v = 2\pi n r \leftrightarrow v = \frac{2\pi n [\text{rpm}] r}{60} \leftrightarrow n [\text{rpm}] = \frac{60v}{2\pi r} \quad (3)$$

Kaavaan voidaan sijoittaa eri kehänopeuksien arvoja. Käyttötarkoitukseemme sopiva huippunopeus on 5–10 km/h. Lasketaan näitä nopeuksia vastaavat moottorin vääntömomentin ja pyörimisnopeuden arvot. Laskelmissa käytetään arvioita tyhjän ja täyden kelan halkaisijoiden mitoista.

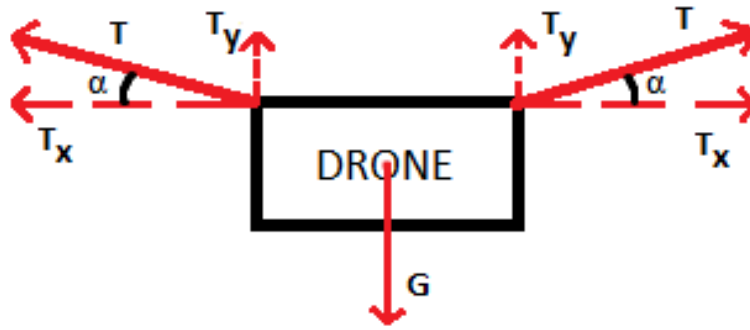
Lasketaan kelan pyörimisnopeus ensin ratanopeudella 10 km/h ja kelan ollessa tyhjä ($d = 0,02$ m):

$$n_1 = \frac{60 \cdot \frac{10 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}}{2\pi \cdot \frac{0,02 \text{ m}}{2}} = 2653 \text{ rpm}$$

Lasketaan seuraavaksi kelan pyörimisnopeus kelan ollessa täysi ($d = 0,03$ m):

$$n_2 = \frac{60 \cdot \frac{10 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}}{2\pi \cdot \frac{0,03 \text{ m}}{2}} = 1768 \text{ rpm}$$

Jotta moottorilta vaadittava vääntömomentti voidaan laskea, on selvitettävä kelasta lähtevässä siimassa vaikuttava jännitysvoima T . Siimalangat eivät todellisuudessa pysy vaakasuorassa johtuen laitteen aiheuttamasta painosta. Oletetaan, että siimat muodostavat vaakatason kanssa noin 20 asteen kulman. Lisäksi painoksi hyötykuormineen arvioidaan 10 kg. Lähdetään ratkaisemaan jännitysvoimaa vapaakappalekuvan avulla (kuva 17):



Kuva 17. Vaijeridronen vapaakappalekuva.

Neljä ohjausvaijeria mahdollistaa vaijeridronen liikuttamisen isommalla alueella. Laskuissa massan arvona käytetään nyt kokonaismassan puolikasta, koska massa jakautuu tasaisesti näille neljälle vaijerille. Käytetään dynamiikan peruslakia ja ratkaistaan jännitysvoiman T suuruus:

$$\text{Newton II: } \Sigma F = ma \quad (4)$$

$$\uparrow 2T_y - G = 0 \leftrightarrow 2 \cdot T \sin \alpha = mg \leftrightarrow T = \frac{mg}{2 \sin \alpha} = \frac{5 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2 \cdot \sin(20^\circ)} = 71,7 \text{ N}$$

Yllä olevan kaavan avulla voidaan havainnollistaa tilanne, jossa vaijerit olisivat vaakasuorat. Tällöin kulman α arvo lähestyy nollaa, jolloin vastaavasti jännitysvoiman T arvo kasvaa äärettömän suureksi.

Nyt voidaan määrittää kelan vääntömomentit, jotka sitten redusoidaan moottorin akselille. Vääntömomentti saadaan laskettua kaavalla (5).

$$\tau = T \cdot r \quad (5)$$

Vääntömomentti kelan ollessa tyhjä:

$$\tau_1 = T \cdot r = 71,7 \text{ N} \cdot \frac{0,02 \text{ m}}{2} = 0,717 \text{ Nm}$$

Vääntömomentti kelan ollessa täysi:

$$\tau_2 = T \cdot r = 71,7 \text{ N} \cdot \frac{0,03 \text{ m}}{2} = 1,076 \text{ Nm}$$

Kelan teho saadaan laskettua kaavalla (6).

$$P = T \cdot v \quad (6)$$

$$P = T \cdot v = 71,7 \text{ N} \cdot \frac{10 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} = 199,2 \text{ W}$$

Kelan pyörimisnopeudet, vääntömomentit ja teho on redusoitava moottorin akselille. Koska moottorin ja kelan välissä ei ole vaihdetta ($n_1:n_2 = 1:1$), moottorin pyörimisnopeus on sama kuin kelan.

Vastaavasti vääntömomentit saadaan redusoitua kuormituspuolelta moottoripuolelle kaavalla (7) (ABB 2001, s. 18):

$$\tau_1 = \frac{\tau_2}{\eta} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (7)$$

jossa τ_1 on käytävän puolen vääntömomentti, τ_2 on käytettävän puolen vääntömomentti, $\frac{n_2}{n_1}$ on vaihteen välityssuhde ja η hyötysuhde. Hyötysuhteena voidaan käyttää arvoa 0,98.

Redusoidaan yllä olevat momentit moottorin akselille:

$$\tau_1 = \frac{0,717 \text{ Nm}}{0,98} \cdot 1 = 0,73 \text{ Nm}$$

$$\tau_2 = \frac{1,076 \text{ Nm}}{0,98} \cdot 1 = 1,10 \text{ Nm}$$

Redusoidaan vielä teho moottorin akselille:

$$P = \frac{199,2 \text{ W}}{0,98} = 203,3 \text{ W}$$

Tehdään kelan pyörimisnopeustarkastelu vielä nopeudella 5 km/h. Kelan pyörimisnopeudet tyhjänä ja täytenä:

$$n_1 = \frac{60 \cdot \frac{5 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}}{2\pi \cdot \frac{0,02 \text{ m}}{2}} = 1326 \text{ rpm}$$

$$n_2 = \frac{60 \cdot \frac{5 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}}{2\pi \cdot \frac{0,03 \text{ m}}{2}} = 884 \text{ rpm}$$

Lasketaan seuraavaksi kelan teho:

$$P = T \cdot v = 71,7 \text{ N} \cdot \frac{5 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} = 99,6 \text{ W}$$

Pyörimisnopeutta ei tarvitse redusoida, joten redusoidaan ainoastaan kelan teho moottorin akselille:

$$P = \frac{99,6 \text{ W}}{0,98} = 101,6 \text{ W}$$

Laskelmien perusteella käyttötarkoitukseen on valittu moottoriksi TIGER MOTOR -yhtiön harjaton tasavirtamoottori malliltaan U8 Lite KV85. Yhtiö tarjoaa ratkaisuja ilmailualalle valmistaen moottoreita, moottorinohjaimia ja propelleita. Käyttökohteita ovat erityisesti ilmakeuhkaus ja teollisuuden sekä maatalouden sovellukset.

Kuvan 18 U8 Lite -moottori on erittäin tehokas. Työntövoimaa moottorista löytyy aina 72 N saakka ja avoimen rakenteen ansiosta se painaa ainoastaan 243 g. Avoin rakenne edesauttaa myös moottorin jäähtymistä eikä se näin ylikuumene herkästi. Moottorin hopeoitu käämitys vähentää häviöitä ja parantaa korroosionkestävyyttä. Rakennetta suojaa patentoitu suojaverkko, joka estää pölyä, hiekkaa ja muita vieraita aineita pääsemästä moottoriin. Tarkemmat tiedot moottorin toiminnasta löytyvät liitteen 1(2–3) testiraportista. (T-MOTOR 2019a)



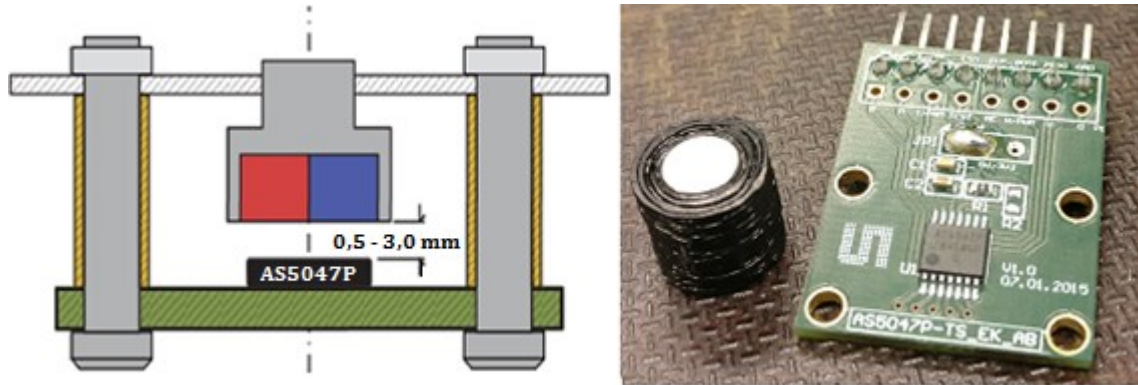
Kuva 18. U8 Lite -moottori.

6.4 Moottorin anturointi

Valittuun moottoriin on lisättävä anturointi, koska niissä itsessään sitä ei ole. Ilman anturointia moottorin pyörimisnopeuden ja hetkellisen asennon määrittäminen ei onnistu. Pyörimisnopeuden ja asennon määrittämistä varten moottoriin on kytketty 14-bittisen tarkkuuden omaava AS5047P magneettinen pyörimisanturi.

Kyseinen anturi soveltuu hyvin sovelluksiin, joissa esiintyy suuria kierrosnopeuksia ja se pystyy mittaamaan pyörimisnopeutta jopa 28000 kierrokseen minuutissa. Anturin erittäin hyvä tarkkuus perustuu sen käyttämään DAEC-kompensaatioalgoritmiin (Dynamic Angle Error Compensation). Tässä menetelmässä virheenkorojauksesta huolehtii anturi itse ja se adaptoituu automaattisesti pyörimisliikkeen muutoksiin. Magneettiantureiden tavallisena haittana on niiden kärsimä etenemisviive muunnettaessa magneettikentän voimakkuutta kulmanmittaukseksi. Viiveen aikana moottorin asema voi vielä muuttua ja näin ollen mitattu ja todellinen asema voivat poiketa toisistaan jonkin verran. Kulmavirhe kasvaa lineaarisesti pyörimisnopeuden kasvaessa ja näin ollen suurilla nopeuksilla virhe voi olla haitallisen suuri. DAEC-algoritmia hyödyntämällä etenemisviive saadaan lähes kokonaan poistettua ja näin ollen dynaaminen kulmavirhe saadaan hyvin lähelle nollaa. (Ams AG 2016, s. 1; Ams AG 2020)

Jotta moottorin pyörimistä mittaava magneettianturi toimii oikein, on se asetettava 0,5–3,0 mm päähän pyörivästä magneetista (kuva 19). Pyörivä magneetti tulee puolestaan asettaa moottorin pyörimisakselille. Työssä magneetille ja pyörimisanturin sisältämälle piirilevylle on tulostettu pidikkeet, joiden avulla ne on saatu kytkettyä moottoriin.

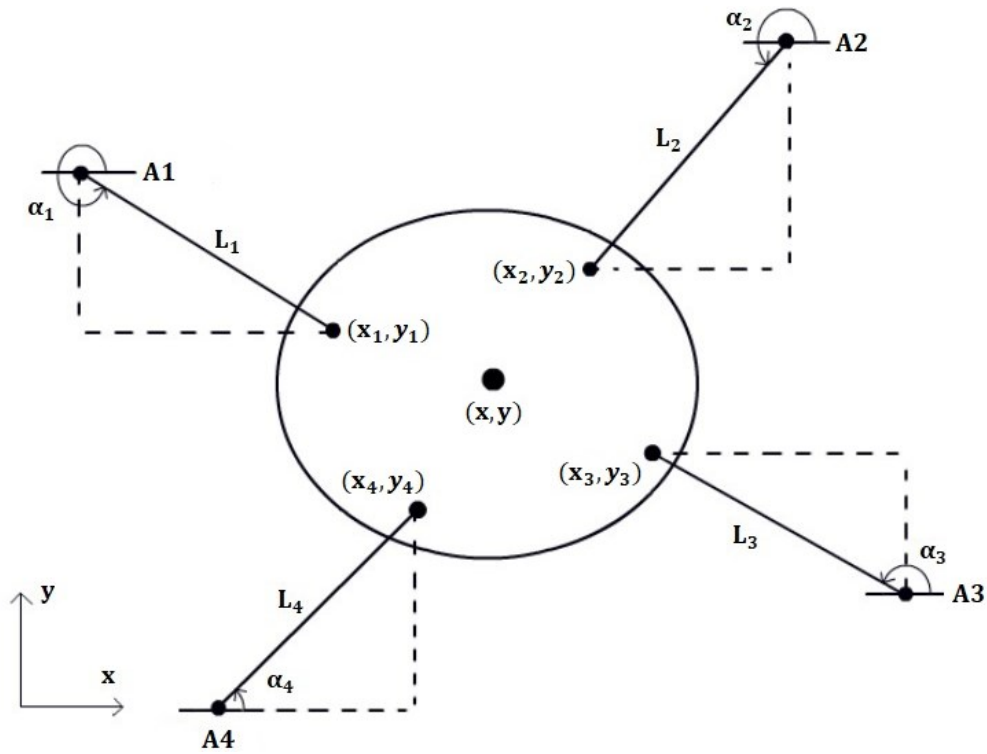


Kuva 19. AS5047P-magneettianturin aseointi (mukaillen Ams AG 2015, s. 5), 3D-tulostettu magneetin pidike ja AS5047P-anturin sisältämä piirilevy.

6.5 Vaijereiden pituuksien määrittäminen

Vaijereilla ohjattavien rinnakkaisrobottien alusta (end-effector) halutaan kulkemaan tiettyyn pisteeseen ja näin ollen on ratkaistava, millaiset mitat vaijereille on asetettava. Tästä syystä käänteiskinematiikan käyttäminen mittojen tarkastelussa on järkevämpi vaihtoehto kuin suora kinematiikka. Vaijereiden pituuksien määrittämistä varten tarvitaan koordinaatit tietyistä pisteistä kuten vaijereiden kiinnityspisteiden paikat suhteessa dronen keskipisteeseen. Lisäksi tarvitaan niin sanottujen ankkuripisteiden paikat, joista laite on asetettu roikkumaan. Seuraavaksi käydään läpi käänteiskinematiikkaa ja lasketaan vaijereiden pituuksille tarvittavat yhtälöt. Derivoimalla nämä yhtälöt kertaalleen ajan suhteen saadaan liikenopeudet vaijereille.

Määritetään vaijeridronen kinematiikka aluksi tasotapauksessa, jossa sitä tarkastellaan ylhäältä päin. Laskenta on toteutettu siten, että vaijereiden kiinnityspisteet sijaitsevat satunnaisissa paikoissa. Oikeassa tilanteessa kiinnityspisteet (x_1, y_1) ja (x_3, y_3) voivat esimerkiksi sijaita samalla suoralla toisiinsa nähden, mikä helpottaa laskentaa tässä tapauksessa. Tasolaskennan jälkeen tarkastelua laajennetaan kolmiulotteiseen avaruuteen. Kuvassa 20 on esitetty laitteen geometria ylhäältä päin.



Kuva 20. Vaijeridrone yläpuolelta kuvattuna.

Vaijereiden pituudet voidaan nyt ratkaista hyödyntämällä Pythagoraan lausetta.

$$L_1: (x_1 - x_{A1})^2 + (y_1 - y_{A1})^2 = L_1^2 \quad (8)$$

$$\rightarrow L_1 = \sqrt{(x_1 - x_{A1})^2 + (y_1 - y_{A1})^2}$$

$$L_2: (x_2 - x_{A2})^2 + (y_2 - y_{A2})^2 = L_2^2 \quad (9)$$

$$\rightarrow L_2 = \sqrt{(x_2 - x_{A2})^2 + (y_2 - y_{A2})^2}$$

$$L_3: (x_3 - x_{A3})^2 + (y_3 - y_{A3})^2 = L_3^2 \quad (10)$$

$$\rightarrow L_3 = \sqrt{(x_3 - x_{A3})^2 + (y_3 - y_{A3})^2}$$

$$L_4: (x_4 - x_{A4})^2 + (y_4 - y_{A4})^2 = L_4^2 \quad (11)$$

$$\rightarrow L_4 = \sqrt{(x_4 - x_{A4})^2 + (y_4 - y_{A4})^2}$$

Vaijereiden pituuksien yhtälöistä saadaan muodostettua yleinen muoto:

$$L_i = \sqrt{(x_i - x_{Ai})^2 + (y_i - y_{Ai})^2}, \quad (12)$$

jossa $i = 1, 2, \dots, n$.

Määritetään lisäksi vajereiden kulmat x-akselin suhteen:

$$\alpha_1 = 360^\circ - \arctan\left(\frac{y_{A1} - y_1}{x_1 - x_{A1}}\right) \quad (13)$$

$$\alpha_2 = 180^\circ + \arctan\left(\frac{y_{A2} - y_2}{x_{A2} - x_2}\right) \quad (14)$$

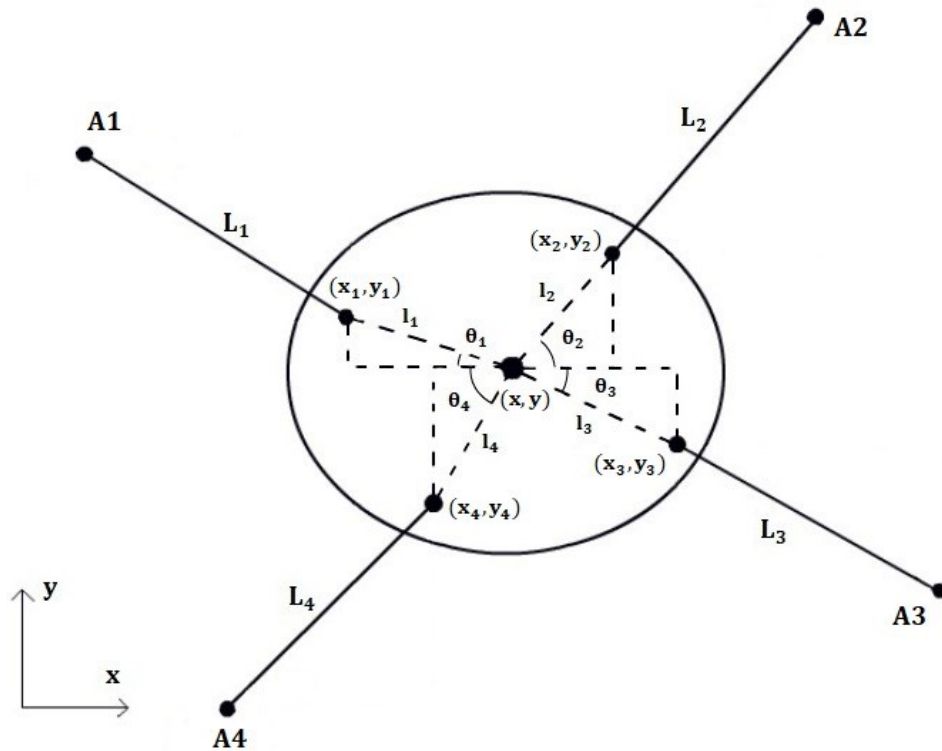
$$\alpha_3 = 180^\circ - \arctan\left(\frac{y_3 - y_{A3}}{x_{A3} - x_3}\right) \quad (15)$$

$$\alpha_4 = \arctan\left(\frac{y_4 - y_{A4}}{x_4 - x_{A4}}\right) \quad (16)$$

Edelliset vajereiden kulmien laskut on toteutettu kuvan 20 koordinaatiston sijainnin mukaan ja näin ollen koordinaattien erotuksista ei tule negatiivisia. Sekä y- että x-koordinaatit voidaan sijoittaa kaavoihin 13–16 myös siten, että erotuksien arvoista tulee negatiivisia. Tällöin on kuitenkin otettava tiettyjä ehtoja huomioon. Arkustangentti on määritelty ainoastaan välille $[-\pi/2, \pi/2]$. Tämän vuoksi kyseinen arctan-funktio antaa kulman arvon väliltä $[-90^\circ, 90^\circ]$. Jos kahden pisteen x-koordinaattien ja y-koordinaattien erotukset ovat positiivisia, voidaan vajerin kulma laskea suoraan funktiolla $\arctan(\Delta y/\Delta x)$. Jos x-koordinaattien erotus on negatiivinen ja y-koordinaattien erotus joko positiivinen tai negatiivinen, voidaan kulma laskea kaavalla $\arctan(\Delta y/\Delta x) + 180^\circ$. Jos taas x-koordinaattien erotus on positiivinen ja y-koordinaattien erotus on negatiivinen, voidaan kulma laskea kaavalla $\arctan(\Delta y/\Delta x) + 360^\circ$. Näin saadaan aina kulman alfa arvoksi positiivinen luku.

Toinen vaihtoehto määrittää vajereiden kulmat positiivisen x-akselin suhteen on käyttää funktiota atan2 . Kyseinen funktio eroaa perinteisestä arctan-funktiosta siten, että se on määritelty välille $[-\pi, \pi]$. Funktion antaman kulman arvon etumerkistä voidaan päätellä kiertosuunta x-akseliin nähden. Positiivinen kulman arvo vastaa kiertoa vastapäivään ja vastaavasti negatiivinen kulman arvo vastaa kiertoa myötäpäivään suhteessa positiiviseen x-akseliin.

Kuvassa 21 on esitetty kiinnityspisteiden (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) ja (x_4, y_4) etäisyydet keskipisteestä (x, y) .



Kuva 21. Kiinnityspisteiden etäisyydet keskipisteestä (x, y) .

Muodostetaan kiinnityspisteiden koordinaateille yhtälöt keskipisteen suhteen.

$$x_1 = x - l_1 \cos \theta_1 \quad (17a)$$

$$y_1 = y + l_1 \sin \theta_1 \quad (17b)$$

$$x_2 = x + l_2 \cos \theta_2 \quad (18a)$$

$$y_2 = y + l_2 \sin \theta_2 \quad (18b)$$

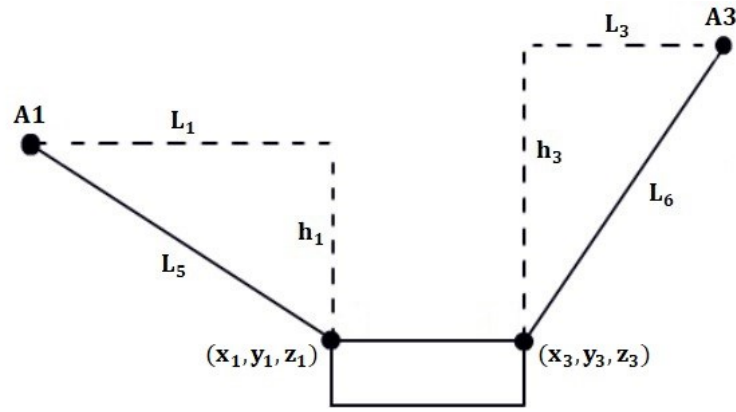
$$x_3 = x + l_3 \cos \theta_3 \quad (19a)$$

$$y_3 = y - l_3 \sin \theta_3 \quad (19b)$$

$$x_4 = x - l_4 \cos \theta_4 \quad (20a)$$

$$y_4 = y - l_4 \sin \theta_4 \quad (20b)$$

Edellä oleva kinematiikkatarkastelu on toteutettu siten, että laite pysyisi koko ajan vaakatasossa. Todellisuudessa tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa, vaan laite muodostaa kulman vaakatasoon nähden johtuen sen omasta painosta. Laajennetaan tarkastelua kolmiulotteiseen avaruuteen (kuva 22).



Kuva 22. Vaijeridrone sivusta A1A3 katsottuna

Korkeudet h_1 ja h_3 saadaan seuraavasti:

$$h_1 = z_1 - z_{A1} \quad (21)$$

$$h_3 = z_3 - z_{A3} \quad (22)$$

Määritetään pituudet vaijereille L_5 ja L_6 .

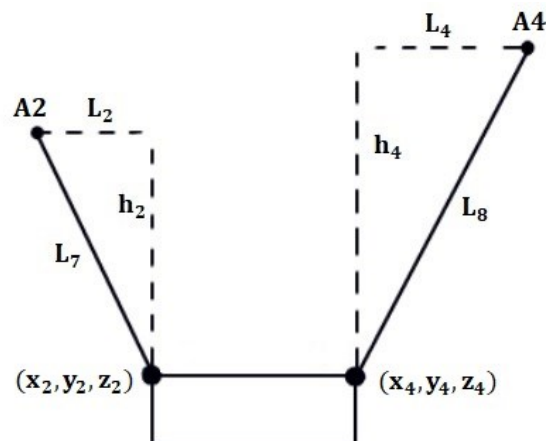
$$L_5: h_1^2 + L_1^2 = L_5^2 \quad (23)$$

$$\rightarrow L_5 = \sqrt{(z_1 - z_{A1})^2 + (x_1 - x_{A1})^2 + (y_1 - y_{A1})^2}$$

$$L_6: h_3^2 + L_3^2 = L_6^2 \quad (24)$$

$$\rightarrow L_6 = \sqrt{(z_3 - z_{A3})^2 + (x_3 - x_{A3})^2 + (y_3 - y_{A3})^2}$$

Kuvassa 23 on esitetty tilanne toiselta sivulta katsottuna.



Kuva 23. Geometria sivusta A2A4 katsottuna.

Korkeudet h_2 ja h_4 :

$$h_2 = z_2 - z_{A2} \quad (25)$$

$$h_4 = z_4 - z_{A4} \quad (26)$$

Määritetään pituudet vaijereille L_7 ja L_8 :

$$L_7: h_2^2 + L_2^2 = L_7^2 \quad (27)$$

$$\rightarrow L_7 = \sqrt{(z_2 - z_{A2})^2 + (x_2 - x_{A2})^2 + (y_2 - y_{A2})^2}$$

$$L_8: h_4^2 + L_4^2 = L_8^2 \quad (28)$$

$$\rightarrow L_8 = \sqrt{(z_4 - z_{A4})^2 + (x_4 - x_{A4})^2 + (y_4 - y_{A4})^2}$$

Siirtymän ensimmäisen aikaderivaatan avulla saadaan laskettua vaijereille liikenopeudet. Nämä yhtälöt on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2.

6.6 Vaijeridronen mekaniikkasuunnittelu

Mekaniikkasuunnittelu on toteutettu mallinnusohjelmilla Autodesk Inventor Professional 2020 ja Autodesk Fusion 360. Suunnittelussa tarkoituksena oli luoda hyrräkela-moottorikokonaisuudesta kompakti paketti, joka vaatisi suhteellisen vähän tilaa ja olisi helposti kiinnitettävissä prototyypin runkoon. Mallinnusohjelmilla suunnitellut kappaleet valmistettiin tarpeen mukaan laserleikkaamalla, 3D-tulostamalla tai työstämällä Oulun yliopiston konepajalla.

6.6.1 Kelat

Kelojen avulla toteutettiin laitteen liikkuminen paikasta toiseen sisään kelaamalla ja ulos purkamalla siimaa. Koska vaijerina toimi kuitusiima, luonnollinen valinta tästä syystä keloiksi olivat kalastukseen soveltuvat hyrräkelat. Hyrräkeloiksi hankittiin neljä kappaletta Abu Garcia Ambassadeur Classic 5000 Red -keloja. Kyseinen kela sisältää kaksi liu-kulaakeria ja työstetyn alumiinisen puolan. Kelan vaihteiston välityssuhde on 1:5,3. Tämä tarkoittaa sitä, että kelan puola pyörii 5,3 kierrosta, kun kampea käännetään yhden kierroksen verran.

Suunnittelussa tarkoituksena oli, että moottorit kytketään suoraan kelojen akseleille ilman, että välissä on vaihteistoa. Näin ollen kelojen koneistot täytyi purkaa, jotta moottorit pystyttiin kytkemään niihin. Hyrräkelojen purkaminen onnistui suhteellisen vaivattomasti eikä varsinaiseen vaihteistoon tarvinnut koskea ollenkaan.

Kelan toisen puolen poskea ei ollut tarpeellista poistaa, koska sen sisällä on mekanismi, jolla pyöritetään kelassa olevaa matoruuvia, joka puolestaan mahdollistaa siimaohjaimen kulkemisen edestakaisin. Kelasta tarvitsi siis purkaa ainoastaan koneiston sisältävä poski. Jäljelle jäivät kelan alumiinirunko, toisen puolen poski, liukulaakerit sisältävä alumiinipuola ja hyrräkelan akseli. Purettu hyrräkela on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Purettu hyrräkela.

6.6.2 Sovittimet

Hyrräkelan akseli ei ollut kiinnittynään itse kelan puolaan mitenkään. Näin ollen kelan puola ja akseli pääsivät pyörimään toistensa suhteen vapaasti. Tästä syystä moottorin kytkeminen suoraan kelan akselille ei ollut mahdollista, koska puolaa ei saatu tässä tapauksessa pyörimään. Toinen ongelma oli myös se, että hyrräkelan oma akseli oli erittäin ohut. Hyrräkelan puolalle päädyttiin suunnittelemaan sovitin, jonka avulla moottori saatiin pyörittämään kelan puolaa.

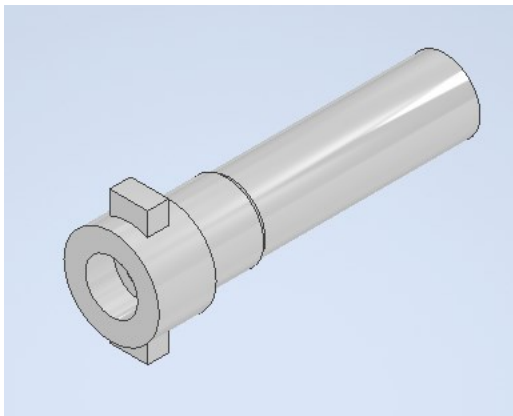
Hyrräkelan omaa akselia ei tarvinnut kuitenkaan poistaa kokonaan. Hyrräkelan akseli asettui kelan toisen puolen poskessa olevaan upotukseen ja lisäksi tällä puolen poskea

akselia ympäröi muovinen hammasratas, jolla mahdollistettiin matoruuvien pyörittäminen. Lisäksi akseli piti puolan oikealla paikallaan. Hyrräkelan oman akselin säilyttäminen vähensi sovittimen suunnittelutyötä huomattavasti.

Puolalle tuleva sovitin on suunniteltu siten, että hyrräkelan akseli asettui tämän osan sisään. Sovittimen päässä olevan kierteityksen avulla hyrräkelan akseli on mahdollista lukita. Kierteitys on tehty myös siltä varalta, jos hyrräkelan akselia halutaan katkaista myöhemmin lyhyemmäksi.

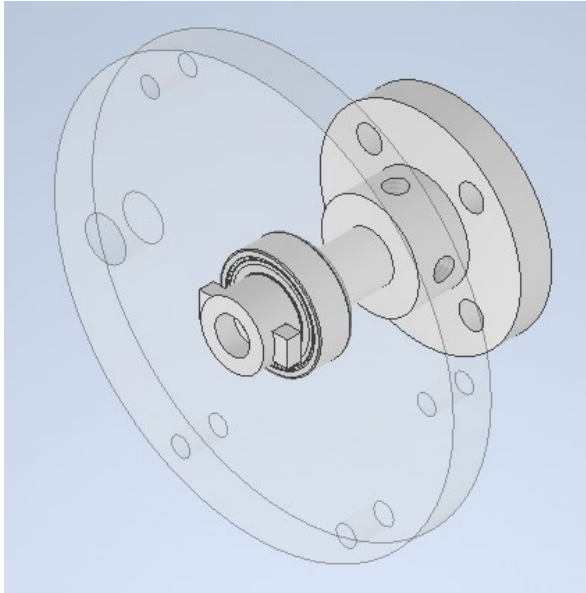
Puolasovitin on suunniteltu asettuvaksi hyrräkelan puolan liukulaakeria vasten. Puolasovittimeen tehtiin kaksi kappaletta sakaroita, jotka mahdollistivat sovittimen asettumisen puolan hahloihin ja näin ollen sen pyörittämisen. Puolasovittimen olaketta vasten tulevan kuulalaakerin ja hyrräkelan runkoa vasten tulevan kansiosan avulla puolasovitin saatiin kiristettyä tiukasti puolaa vasten.

Puolasovitin on valmistettu Oulun yliopiston konepajalla manuaalisesti sorvaamalla alumiinista. Puolasovittimen sakarat valmistettiin puolestaan CNC-koneistamalla. Kuvassa 25 on esitetty 3D-malli puolasovittimesta. Puolasovittimen 2D-mittapiirustus löytyy liitteestä 3.



Kuva 25. Puolasovittimen 3D-malli.

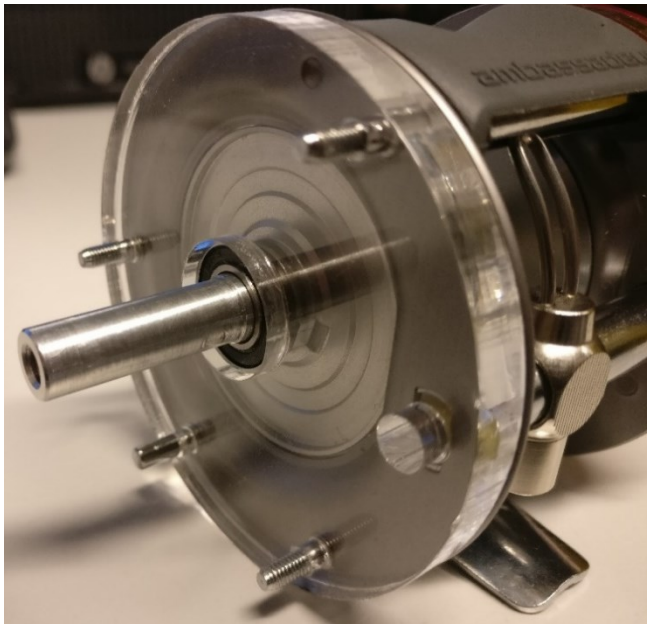
Valitussa U8 Lite KV85 –moottorissa ei itsessään ollut akselia. Moottorille on suunniteltu moottorisovitin, jotta se saatiin kytkettyä puolasovittimeen ja näin ollen mahdollistettua hyrräkelan pyörittäminen. Yleistä dronekäyttöä ajatellen moottorin etupuolella akselin sijaan on useita kiinnitysreikiä, jotka tarjoavat kiinnitysmahdollisuudet propelleille.



Kuva 27. Puolapyörittimen kokoonpanon 3D-malli.

Kansiosan suunnittelu oli kokonaisuudessaan haastava vaihe. Erityisesti kansiosaan tulevien reikien mitoittaminen oli työlästä. Kansiosan mitoittaminen hyrräkelan runkoon sopivaksi toteutettiin mitoittamalla ja mallia hienosäätämällä useaan kertaan. Puolan keskipisteen paikan mitoittaminen oli myös erityisen haastavaa, koska puolan keskipiste sijaitsi aavistuksen verran vasemmalla suhteessa hyrräkelan rungon keskipisteeseen. Kansiosan suunnittelussa oli otettava huomioon myös se, että kansiosan täytyi nostaa puola hieman ylöspäin, jotta puola ei hankaa alumiinirunkoa vasten ja pyörii sulavasti.

Kansiosasta valmistettiin useita koekappaleita, joiden avulla mallia saatiin tarkennettua riittävän tarkaksi. Kansiosa on valmistettu laserleikkaamalla akryylilevystä Oulun yliopiston Fab Lab -tiloissa. Kuvassa 28 nähdään hyrräkela, johon on asennettu laakeroitu puolasovitin ja kansiosa.



Kuva 28. Hyrräkela, laakeroitu puolasovitin ja akryylinen kansiosa.

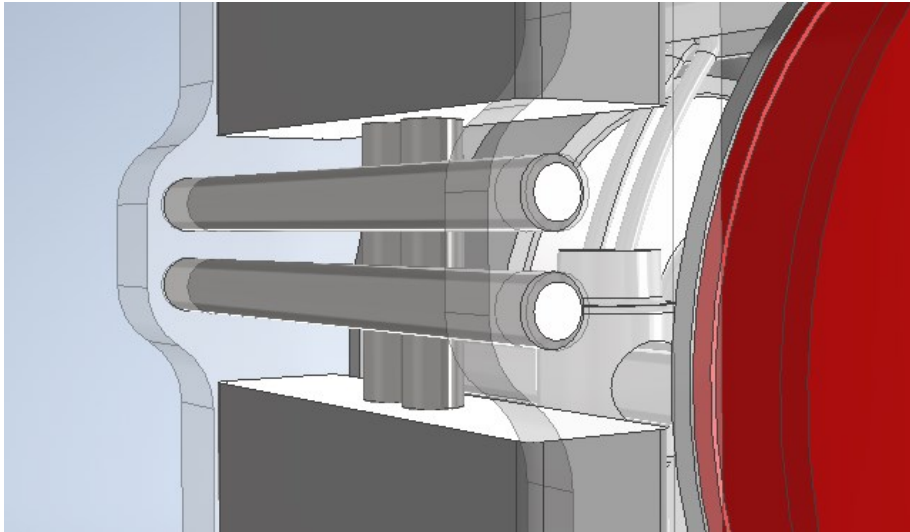
Kansiosan mallia on hyödynnetty pohjana, kun hyrräkelaan suunniteltiin isompaa sivulevyä. Kansiosan suunnittelu ensin pienemmässä koossa kelaan sopivaksi oli erittäin perusteltua, koska näin säästettiin materiaalia ja useamman testimallin toteuttaminen oli huomattavasti nopeampaa.

6.6.3 Siimaohjaimet

Hyrräkeloissa on itsessään siimaohjain, joka huolehtii siitä, että siima kelautuu tasaisesti puolalle. Siimaohjain liikkuu omalla akselillaan puolan edessä edestakaisin. Sen liikkuminen on synkronoitu hyrräkelan puolan pyörimisen kanssa. Vaijeridronen liikkeessä siima suuntautuu kelalta eri suuntiin. Kelan siimaohjain ei estä tilannetta, jossa siima suuntautuu sivulle ja näin ollen altistuu kulutukselle kelan alumiinirungon seinämää vasten. Tämän välttämiseksi kunkin hyrräkelan eteen suunniteltiin toinen siimaohjain, jolloin siima kulkeutui kahden siimaohjaimen läpi eikä hankautunut rungon reunoja vasten.

Toinen siimaohjain muodosti ristikkorakenteen kelan oman siimaohjaimen eteen. Siimaohjaimen tarvittavat komponentit on valmistettu Oulun yliopiston konepajalla. Siima voi purkautua keloilta eri kohdista ja pystysuuntaisten tankojen avulla siima saatiin tasattua lähtemään hyrräkelan keskikohdalta. Vastaavasti vaakasuuntaiset tangot estivät siiman

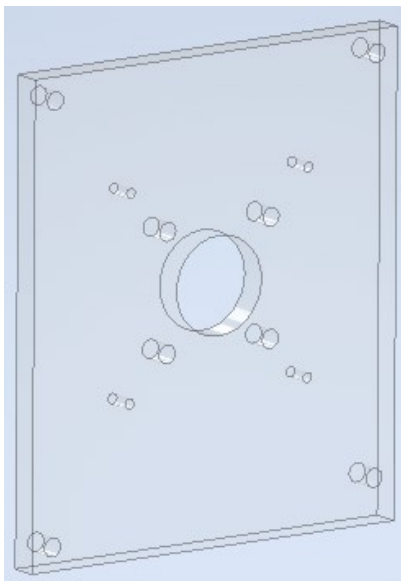
karkaamisen pystysuunnassa liian aikaisin. Kyseiset tangonpätkät toimivat ainoastaan siimaohjaimina ja näin ollen niiden ei tarvinnut olla esimerkiksi pyöriä. Hyrräkelan eteen asetetun siimaohjaimen rakenne on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Hyrräkelan edessä oleva siimaohjain.

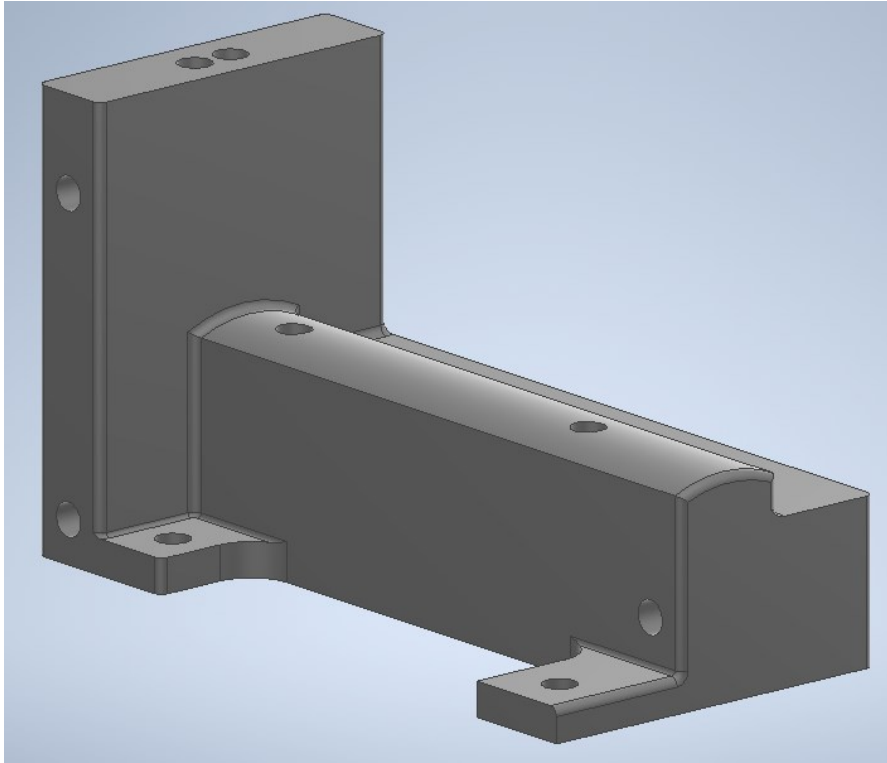
6.6.4 Moottoreiden ja kelojen telineet

Moottoreiden kiinnitystelineet on valmistettu akryylilevystä laserleikkaamalla. Kiinnitystelineessä on reiät moottorin, enkooderin ja välikappaleiden kiinnittämistä varten. Välikappaleista kerrotaan tarkemmin kappaleessa 6.6.5. Kuvassa 30 on esitetty moottorin kiinnitysteline.



Kuva 30. Moottorin kiinnitysteline.

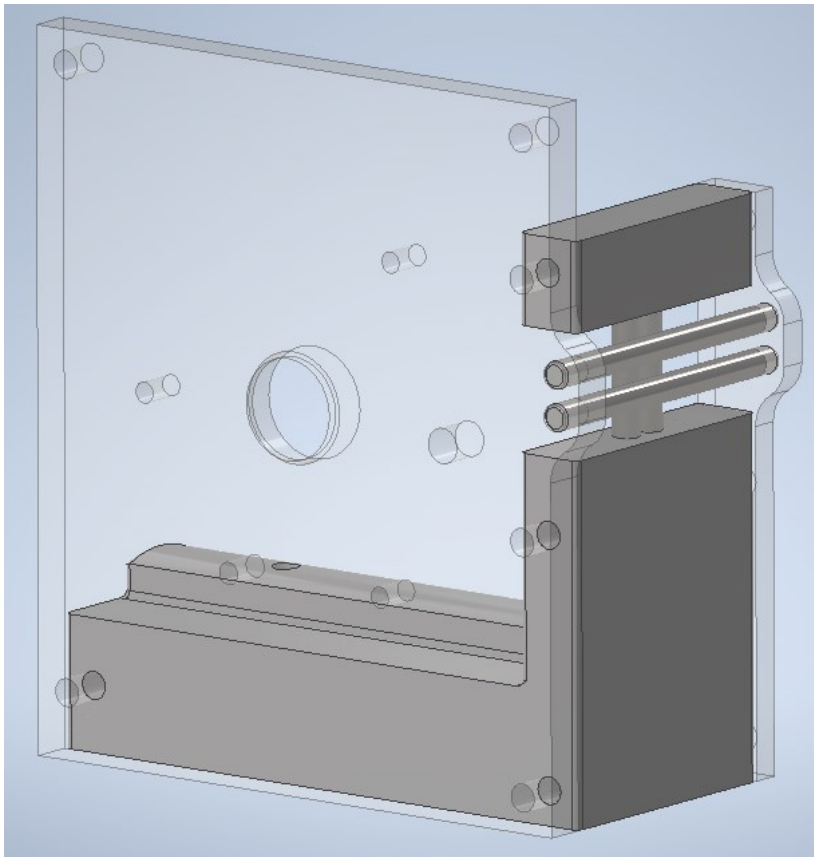
Hyrräkelojen kiinnitystelineet valmistettiin puolestaan 3D-tulostamalla. Kuvan 31 telineessä on upotukset erillisen siimaohjaimen pystysuuntaisia tangonpätkiä varten. Hyrräkela liitettiin jalustastaan kiinnitystelineeseen, jonka vuoksi hyrräkelan jalustaan porattiin reiät. Vastaavasti jalustan muotoa vastaavassa kiinnitystelineen kohdassa on läpireiät sekä telineen pohjaan on tehty upotukset muttereita varten. Lisäksi telineeseen on tehty korvakkeet, joiden avulla teline saatiin kiinnitettyä suunnitellun laitteen runkoon.



Kuva 31. Hyrräkelan kiinnitysteline.

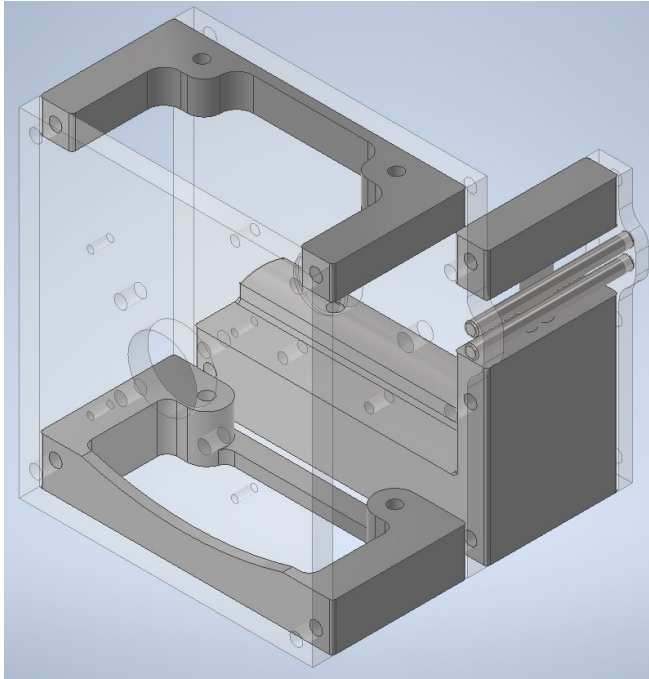
6.6.5 Muut komponentit ja runko

Hyrräkela-moottoriyhdistelmä pyrittiin kasaamaan tiiviiksi kokonaisuudeksi. Hyrräkela-telineen molemmille puolille on valmistettu akryylista laserleikkaamalla tarkoitukseen sopivat sivulevyt. Akryylisten sivulevyjen väliin saatiin puristettua erillisen siimaohjaimen osat. Pystysuoria siimaohjaimen tangonpätkiä varten levyjen väliin valmistettiin 3D-tulostamalla erillinen osa. Hyrräkelateline sivulevyineen on esitetty kuvassa 32.



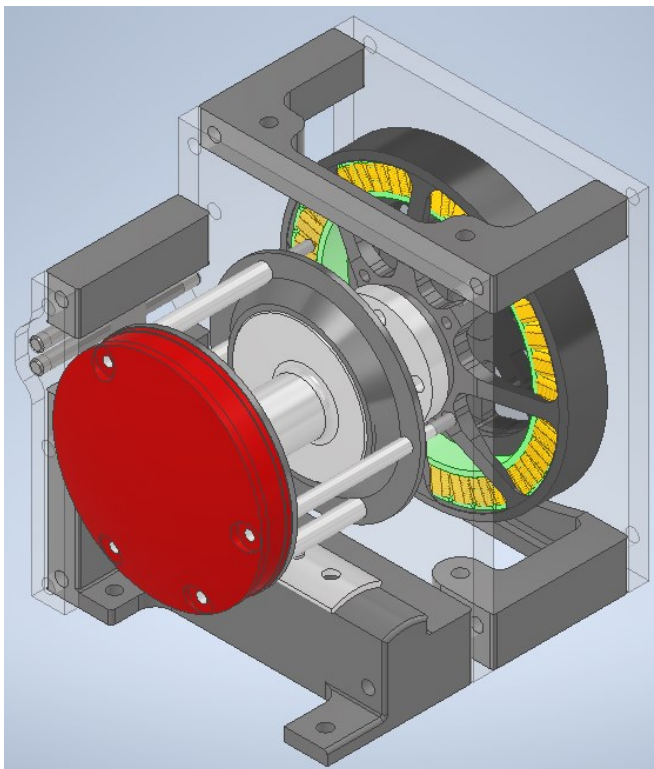
Kuva 32. Hyrräkelateline sivulevyineen.

Aiemmin suunniteltu hyrräkelaan sopiva kansiosa on nyt sulautettu osaksi sivulevyä. Moottorin kiinnitystelineen ja hyrräkelatelineen sivulevyn väliin valmistettiin 3D-tulostamalla välikappaleet, jotta kokonaisuudesta saatiin tukeva. Moottorin kiinnitystelineen ja hyrräkelatelineen sivulevyn yläpintojen väliin valmistettiin välikappale, jonka lävitse kiinnityspultit kulkevat. Alapintojen väliin on valmistettu myös erillinen välikappale. Tähän välikappaleeseen on tehty kiinnitysreiät, joiden avulla kokonaisuus saatiin kiinnitettyä vaijeridronen alapuoliseen runkolevyyn. Malli kokoonpanosta on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33. Kokonaisuus ilman moottoria ja hyrräkela.

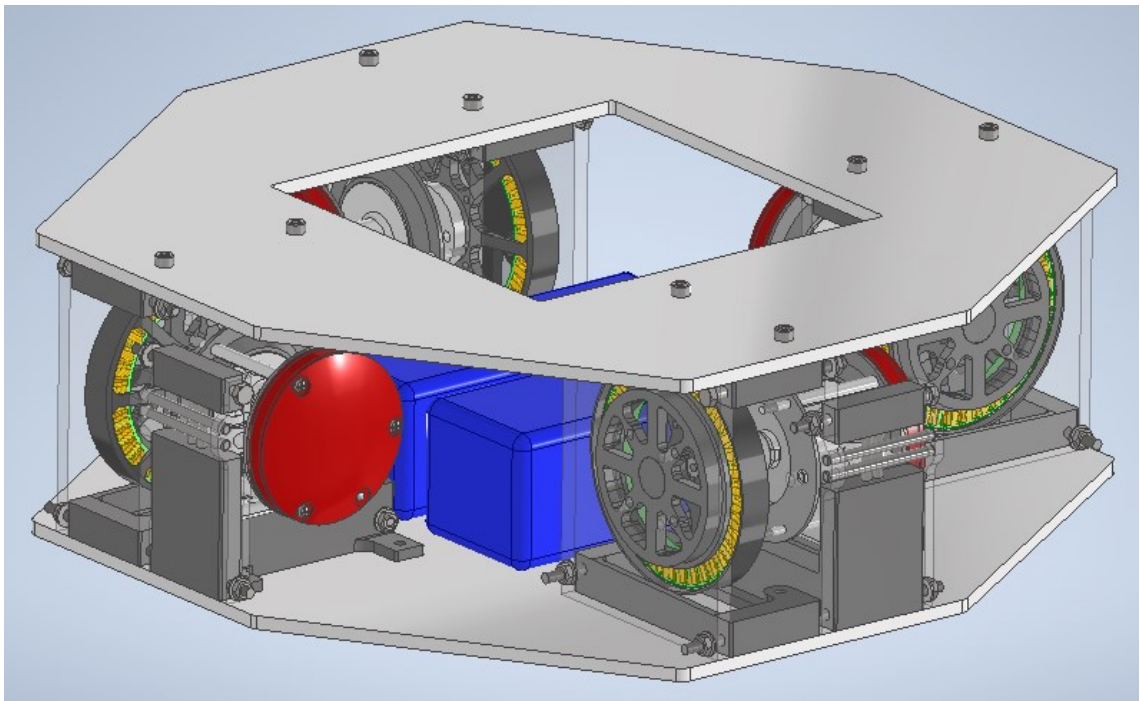
Lopullinen kokoonpano moottoreineen ja hyrräkeloineen on esitetty kuvassa 34.



Kuva 34. Moottoroidun hyrräkelan kokoonpano.

Kuvassa 35 on esitettyä 3D-vaijeridronen suunniteltu kokoonpano. Laite koostuu kahdesta runkolevystä, joiden väliin kela-moottoriyhdistelmät on asennettu. Runkolevyjen materiaaliksi on valittu polypropeenipohjainen Akyprint-kennolevy. Akyprint-kennolevyssä on kahden sileän pintakerroksen välissä kuplarakenteista polypropeenaa. Rakente tekee levystä jäykän ja erittäin kevyen. Kennolevy kestää hyvin sään vaihtelut ja erilaiset kemikaalit. Lisäksi se on UV-suojattu.

Runkolevyt on valmistettu isommasta levystä laserleikkaamalla. Kela-moottoriyhdistelmät on pultattu alapuoliseen ja yläpuoliseen runkolevyyn 3D-tulostettujen välikappaleiden avulla. Yläpuolisessa runkolevyssä on aukko, jonka kautta akkujen ja ohjauselektronikan asentaminen laitteeseen onnistuu ilman runkolevyn irrottamista.



Kuva 35. Laitteen kokoonpano.

7 VAIJERIDRONERATKAISUT JA TESTAUS

Työssä on valittu ja otettu käyttöön valmis 1D-vaijeridrone ja tämän lisäksi suunniteltu sekä toteutettu oma 2D-vaijeridrone, joka voidaan samoja moduuleja ja komponentteja käyttämällä laajentaa kappaleessa 6.6.5 esitettyksi 3D-vaijeridroneksi. Työssä toteutettujen ratkaisujen ominaispiirteet ja toteutukset käydään läpi seuraavissa kappaleissa kuin myös 2D-prototyypin toiminnan testaaminen.

7.1 1D-vaijeridrone

1D-vaijeridroneksi on valittu kuvan 36 kaupallinen Wiral LITE. Kyseinen Wiral LITE on valittu siitä syystä, että sillä pystytään kuvaamaan ympäristöä samalla tapaa kuin sitä vastaavilla, mutta huomattavasti kalliimmilla laitteilla. Wiral LITE on myös vastaavia ratkaisuja kevyempi ja yksinkertaisempi pystyttää, joten se soveltuu liikuteltavaan tarkoitukseen erittäin hyvin. Standardin kiinnitysruuvin ansiosta siihen voidaan kiinnittää esimerkiksi 360-kamera.



Kuva 36. Wiral LITE, kulkuvaijeri ja kauko-ohjain.

Wiral LITE:n mukana tulee 50 metriä pitkä kulkuvaijeri, jonka materiaali on Dyneeman raaka-aineena toimiva UHMWPE. 50-metrisen vaijerin lisäksi samaisia kulkuvaijereita

on hankittu kolme lisää. Nämä vaijerit ovat kuitenkin 100-metrisiä. Useampi kulkuvaijeri mahdollistaa sen, että niitä voidaan kytkeä pysyvästi testipaikoille. Näin ollen ainoastaan Wiral LITE:a tarvitsee kuljettaa mukana. Lisäksi 100-metriset vaijerit mahdollistavat erilaisten testien tekemisen pidemmällä matkaa. 50-metrinen vaijeri on kiinnitetty tieto- ja sähkötekniikan tiedekunnan huoneeseen TS391. Kyseisessä huoneessa vaijerin pituus ei ole useampaa kymmentä metriä pitkä, joten tämä mahdollistaa ainoastaan laitteen ajoa ja testausta pienessä mittakaavassa. Myöhempää käyttöä ajatellen testauspaikkana voidaan käyttää myös edellä mainitun huoneen läheisyydessä olevaa isoa aulatilaa (kuva 37). Aulatilassa on mahdollista kiinnittää kulkuvaijeri tilan poikki kahden kaiteen välille. Wiral LITE:n avulla tullaan toteuttamaan ainakin paikannuksen testausta ja ympäristön tarkkailua.



Kuva 37. Sähkö- ja tietotekniikan tiedekunnan kolmannen kerroksen aulatila.

Kyseinen kulkuvaijeri on erittäin helppo kiinnittää kahden kiinteän pisteen välille. Vaijeri on kelattu koko pituudeltaan patentoidulle kelasanysteemille. Uloskelattavan vaijerin päähän on solmittu karabiinihaka, joka kiinnitetään ensimmäiseen haluttuun kiinnityspisteeseen. Toiseen kiinnityspisteeseen kytketään pikalukkovyö. Pikalukkovyön molemmissa päissä on karabiinihaat, joista toisen avulla vyö kiinnitetään haluttuun kiinnityspisteeseen

ja toinen kiinnitetään vastaavasti patentoituun kelasysteemiin. Kelasysteemin päässä on itsessään pieni reikä, johon karabiinihaka asettuu helposti.

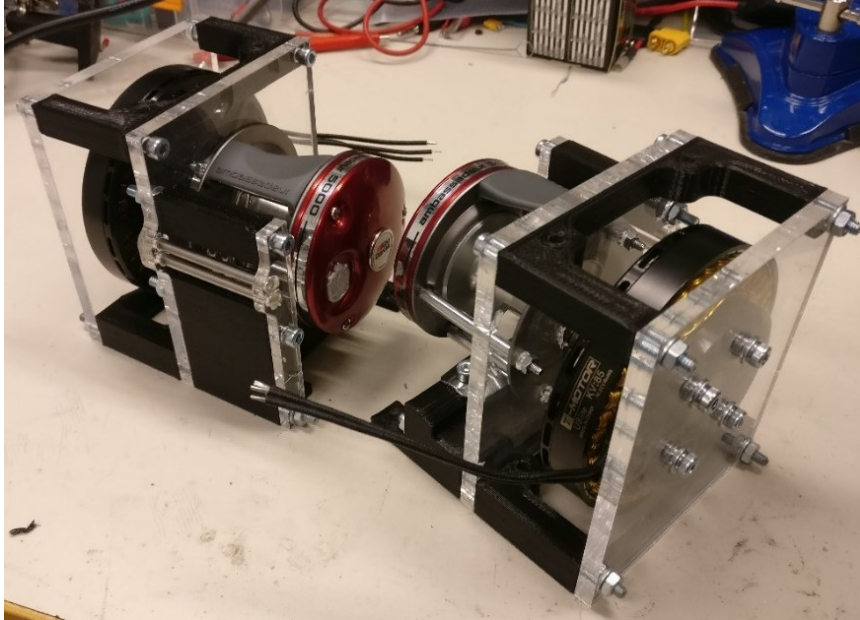
Pikalukkovyön huonona puolena on se, että kiristysmekanismi ei ole kovinkaan pitävä. Pikalukkovyö voi löystyä ajan saatossa ja kulkuvaijerissa tapahtuvien nykäyksien vuoksi. Näin ollen vaijerissa vaikuttavan jännitysvoiman suuruus laskee ja vaijeri painuu laitteen massan vuoksi. Valmistaja on ilmoittanut, ettei vaijerille asetettavan maksimijännitysvoiman arvo saa ylittää 390 N. Jotta kulkuvaijeri saatiin riittävälle kireydelle ja varmistettua kiinnityksen pitävyyttä, kulkuvaijerin kiinnitykseen hankittiin lisäosia. Pikalukkovyö on korvattu räikkäliinalla ja lisäksi jännitysvoiman mittaamiseksi räikkäliinan ja patentoidun kelasysteemin väliin on asetettu digitaalinen kalavaaka. Näillä muutoksilla pystyttiin varmistamaan, ettei jännitysvoima ylittänyt suurinta sallittua arvoa ja lisäksi räikkäliina takasi varmemman kiinnityksen pikalukkovyöhön verrattuna. Sekä alkuperäinen että päivitetty kiinnitys on esitetty kuvassa 38.



Kuva 38. Alkuperäinen ja muokattu kiinnitys.

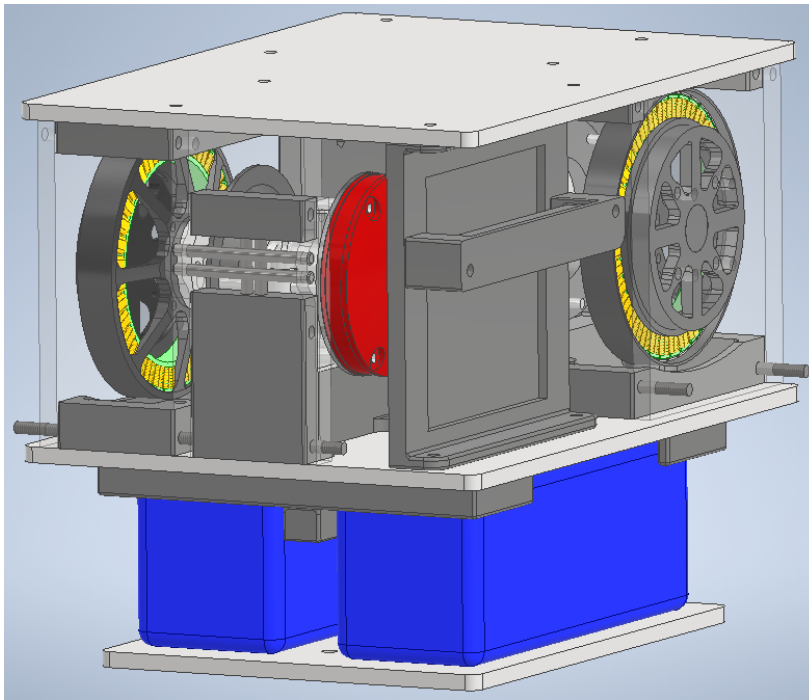
7.2 2D- ja 3D-vaijeridronet

Suunniteltua prototyypilaitetta varten valmistettiin ensimmäiseksi tarvittavat osat ja koottiin kela-moottoriyhdistelmät. Kuvassa 39 on esitetty valmiit moduulit.



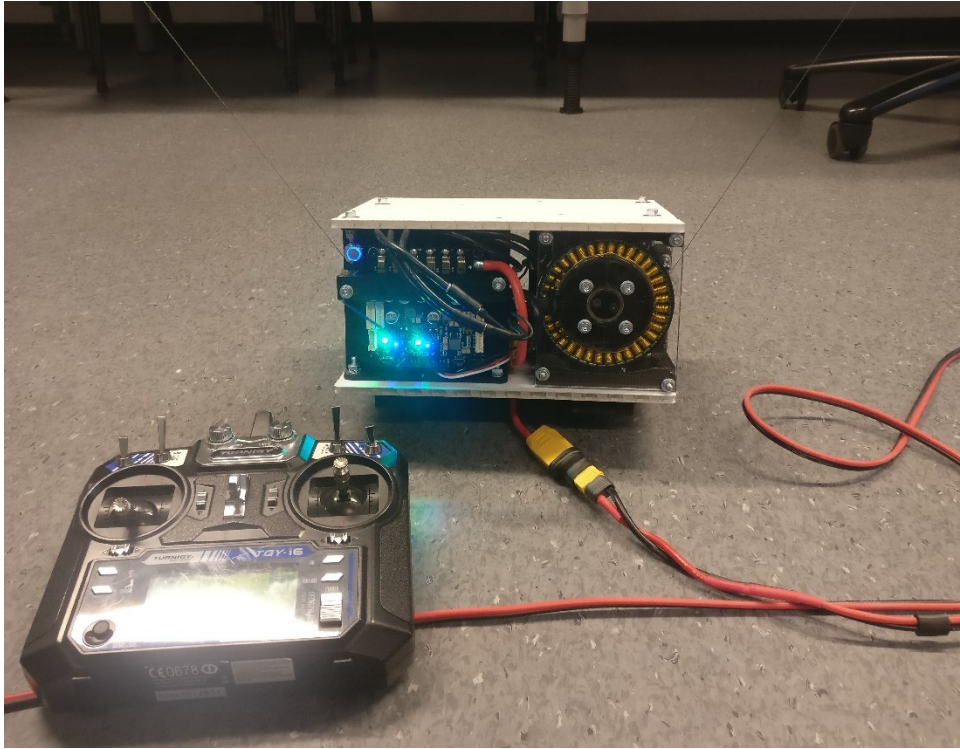
Kuva 39. Valmiit hyrräkela-moottoriyhdistelmät.

Kappaleessa 6.6.5 on esitetty suunnitellun 3D-vaijeridronen kokoonpano. Työssä päädyttiin kuitenkin toteuttamaan tasossa liikkuva laite, koska näin ollen kela-moottoriyhdistelmien ja muidenkin toimintojen testaaminen onnistui huomattavasti helpommin. Tasotapauksessa runkoon kiinnitettiin neljän kela-moottorimoduulin sijasta vain kaksi moottoroitua kelaä, moottoreiden ohjain ja tarvittavat lisälaitteet. Runko-osat valmistettiin samaisesta kennolevystä kuin mallinnetussa 3D-tapauksessa. Kuvassa 40 on esitetty 2D-vaijeridronen malli.



Kuva 40. Tasossa liikkuvan 2D-prototyypin malli.

Mallikuvassa on esitetty myös akut ja näiden paikka moottoroitujen kelojen alapuolella. Prototyypin testatessa akkujen sijasta käytettiin kuitenkin ulkoista virtalähdettä ja pitkää virtajohtoa. Moottoreiden ohjaimena käytettiin ruotsalaisen insinöörin Benjamin Vedderin suunnittelemaa VESC-moottorinohjainta. VESC-moottorinohjain (Vedder's Electronic Speed Controller) on jaettu vapaasti yleiseen käyttöön Open Source -lisenssillä ja siitä syystä sitä on käytetty usein sähkörullalautoissa, golfautoissa, sähköisissä kulkuvälineissä ja roboteissa (Flipsky 2020). Moottorinohjaimen konfigurointi oli helppoa ja nopeaa tarkoitukseen soveltuvan ilmaisen VESC Toolin avulla. Käytössä oli Dual VESC -moottorinohjain, jonka avulla yhdellä moottorinohjaimella pystyttiin ohjaamaan kahta moottoria samanaikaisesti. Laitteen ohjaamiseen käytettiin RC-ohjainta. Kuvassa 41 on esitetty 2D-vaijeridrone ja ajamiseen käytetty RC-ohjain.



Kuva 41. Tasossa liikkuva vaijeridrone ja RC-ohjain.

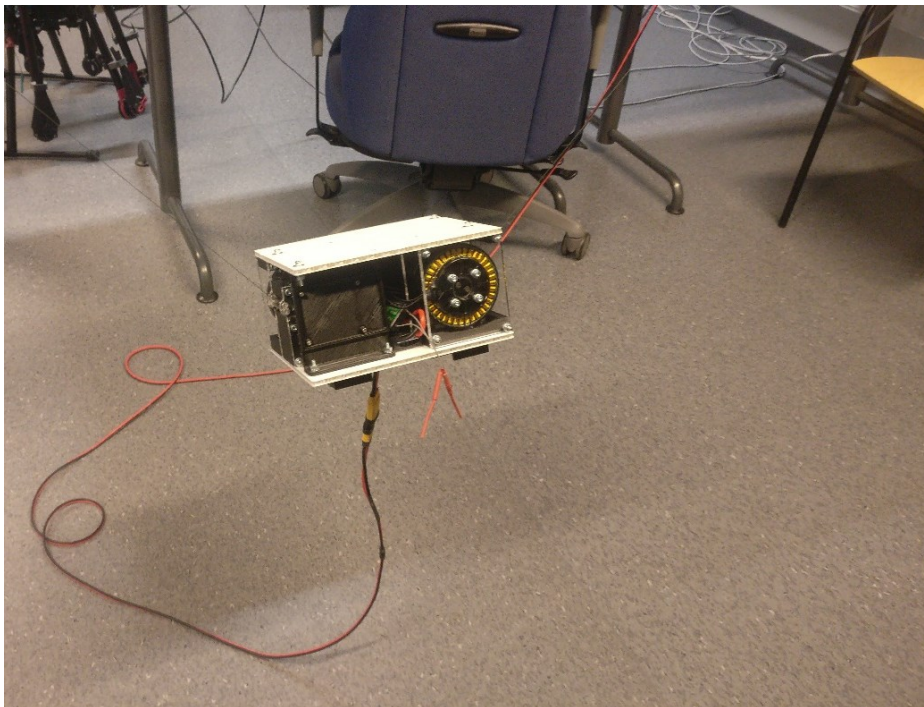
7.2.1 2D-prototyypin testiajot

Tässä kappaleessa käsitellään työssä toteutetun 2D-prototyypin käytettävyyttä ja yleistä toimintaa. Pääosassa testausta oli vaijeridronen perustoiminnallisuuksien kartoittaminen ja erityisesti laitteen liikkuminen. Tämän vuoksi työssä ei esitellä varsinaisia mittaustuloksia. Testiajojen avulla löydettiin laitteeseen liittyviä ongelmia ja näitä pyrittiin ratkaisemaan toimintavarmuuden parantamiseksi. Lisäksi testiajot toivat esiin jatkokehitysideoita, joilla mahdollistettaisiin se, että laitetta voitaisiin käyttää myöhemmin erilaisten mitausten toteuttamiseen.

2D-vaijeridronen liikkuminen saatiin toteutettua onnistuneesti. Testiajojen aikana moottoroidut kelat pystyivät kelaamaan ja purkamaan siimaa ilman ongelmia. Kuitusiiman käytössä ei esiintynyt myöskään ongelmia ja lisäksi keloista lähtevien siimojen päihin solmittiin karabiinihaat, joiden avulla laite saatiin kiinnitettyä katosta roikkumaan. Kahden moottoroidun kelan avulla laite saatiin nousemaan vaivattomasti ilmaan ja lisäksi sillä kyettiin ajamaan sekä pysty- että vaakasuunnassa. Testiajoissa pystyttiin nostamaan myös liikkuvaan alustaan kiinnitettyä kuormaa.

Koska laitetta ajettiin ilman antureita, ei sitä saatu pidettyä halutussa kohtaa paikallaan. Moottoreissa oli tästä huolimatta kuitenkin sen verran vääntöä, että ne kykenivät vastustamaan vajereiden niihin kohdistamaa vetoa suhteellisen hyvin. Tämä mahdollisti sen, ettei vajeridrone tullut holtittomasti maahan moottoreiden pyörimisliikkeen lakatessa vaan se laskeutui hiljalleen alaspäin.

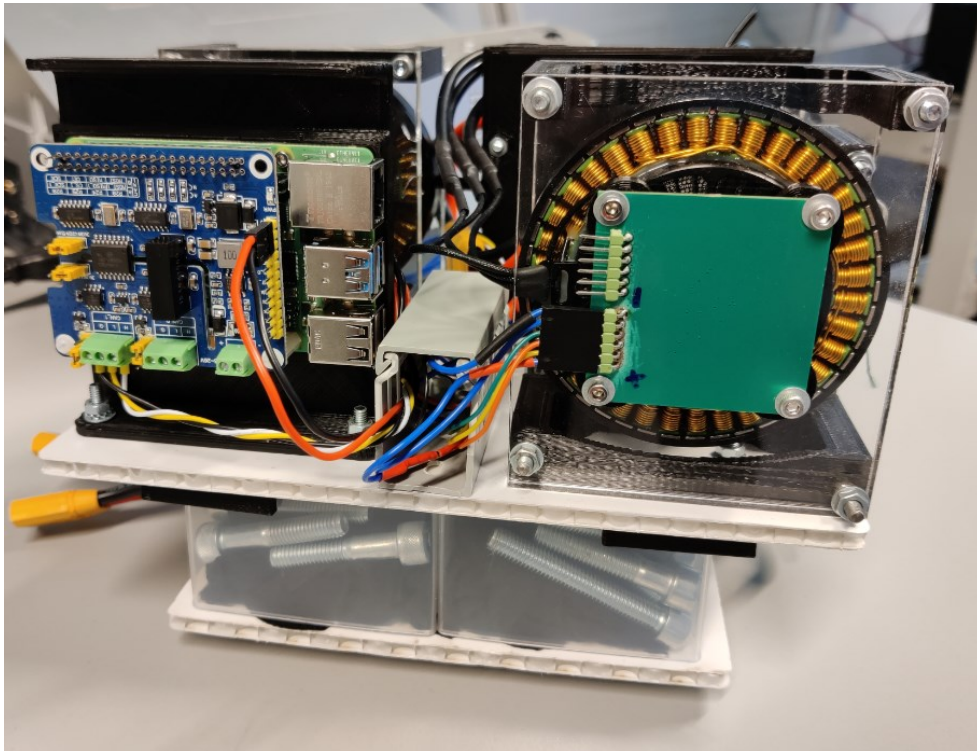
Yleisesti tasossa liikkuvien vajeridronejen huonona puolena on niiden herkkä taipumus heilumiselle. Tämä johtuu siitä, että niissä on liian vähän ohjausvajereita. Kyseinen ongelma ilmeni myös 2D-prototyypilaitteen testiajojen aikana (kuva 42). Ongelma korjaantuu lisäämällä ohjausvajereiden lukumäärää ja jo neljällä vajerilla pitäisi saada toteutettua ratkaisu, joka on tasossa liikkuvaan verrattuna huomattavasti stabiilimpi.



Kuva 42. 2D-vajeridronen testaus.

Jotta laitetta olisi mahdollista pitää tietyssä pisteessä paikallaan, moottoreihin kytkettiin enkooderikortit (kuva 43), jotka sisälsivät AS5047P-magneettianturin. Kyseinen magneettianturi oli yhteensopiva Dual VESC -moottorinohjaimen kanssa ja näin ollen sen konfigurointi onnistui helposti VESC Toolin avulla. Magneettianturi mahdollisti datan saamisen esimerkiksi moottorin pyörimisnopeudesta ja asennosta.

Moottorinohjaimen käskytyks toteutettiin puolestaan Raspberry Pi 4 -yhden piirilevyn tietokoneen avulla. Moottoriohjain ja mikrokontrolleri kytkettiin toisiinsa CAN-väylän välityksellä. CAN-väylä on automaatioväylä, jota käytetään ohjauks- ja mittaustiedon välittämiseen esimerkiksi ajoneuvoissa ja teollisuuden koneissa. Raspberry Pi -mikrokontrollerissa ei itsessään ole CAN-väylää, joten sen mahdollistamiseksi Raspberryn GPIO-pinneihin kytkettiin erillinen CAN-hattu.



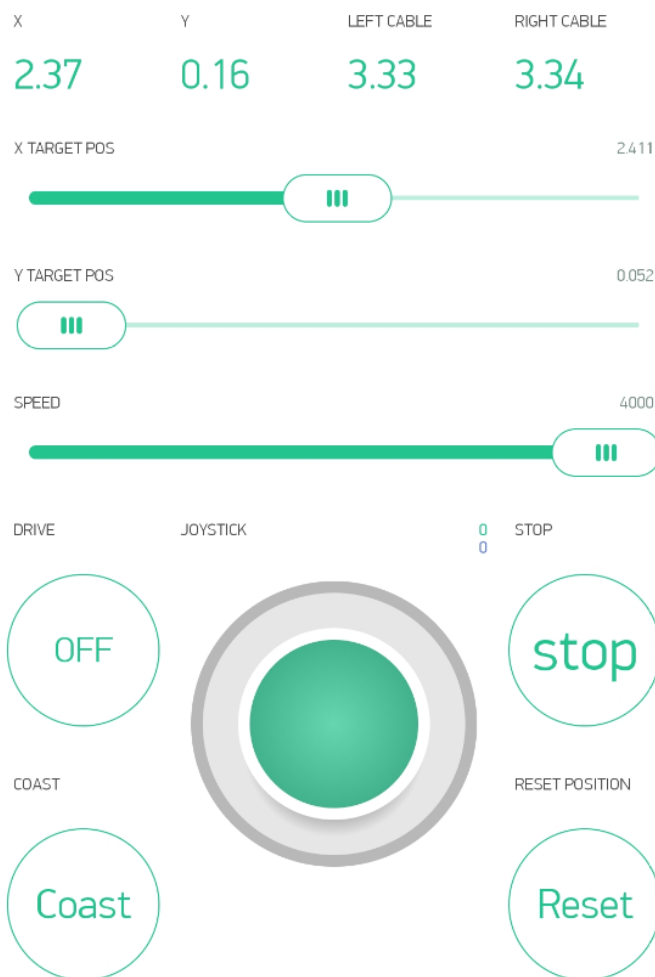
Kuva 43. Raspberry Pi CAN-laajennuksella ja moottoriin kytketty enkooderi.

Ohjelmakoodi prototyypin toimintaa varten on toteutettu Python-ohjelmointikielen avulla, ja sen on tehnyt toinen opiskelija BISG-tutkimusyksiköstä. Koodissa tapahtuvaa käänteiskinematiikan laskentaa varten koodiin on syötettävä tiettyjen pisteiden arvot alkutilanteessa. Ohjelma tarvitsee tiedot muun muassa vajeridronen ankkuripisteistä eli paikoista, joista se on ripustettu roikkumaan. Lisäksi tarvitaan tieto alkutilanteessa olevien vajereiden pituuksista. Ohjelmakoodiin on valmiiksi syötetty vajereiden alkupisteet laitteen keskipisteen suhteen.

Ohjaaminen pelkän tietokoneen näytöltä oli suhteellisen haastavaa ja tästä syystä ohjaukseen lisättiin erillinen sovellus, joka mahdollisti laitteen kauko-ohjauksen. Sovelluskaupasta Android- ja iOS-laitteille vapaasti ladattavan Blynk-sovelluksen avulla ohjaaminen oli huomattavasti helpompaa. Blynk-sovellus huolehtii kommunikoinnista Raspberry Pi

-minutietokoneen kanssa internetin välityksellä. Sovellus tarjoaa mahdollisuuden muokata kyseessä olevan laitteen ohjaustapaa halutulla tavalla tarjoamalla puhelimen näytölle erilaisia nappeja, liikusäätimiä ja jopa joystick-ohjaimia. Sovellus mahdollistaa myös käytössä olevien antureiden datan lukemisen ja näyttämisen suoraan puhelimen näytöltä.

Vaijeridronen liikkuminen onnistuttiin toteuttamaan ohjelmakoodin avulla. Laitetta ohjattiin puhelimen välityksellä ja Blynk-sovellus mahdollisti sen, että paikkaa xy-tasossa pystyttiin muuttamaan sovelluksessa olevan kahden liikusäätimen avulla. Puhelimen ruudulta nähtiin myös kyseisten liikusäätimien asettamat arvot x- ja y-koordinaatteina (kuva 44). Lisäksi laitteen liikenopeus pystyttiin määrittämään suoraan sovelluksesta.



Kuva 44. Blynk-sovelluksen käyttöliittymä.

Joka tapauksessa sijainnin täsmällinen määrittäminen on suhteellisen hankalaa, koska siirtoa purkautuu kelalta tilanteen mukaan eri määrä. Tämä johtuu siitä, että kelan halkaisija

vaihtelee sen mukaan, onko kela tyhjä vai täysi. Kelan ollessa täynnä siimaa purkautuu enemmän yhden kierroksen aikana verrattuna tilanteeseen, jossa kela on lähes tyhjä.

Enkooderien kytkeminen moottoreihin mahdollisti sen, että vaijeridronea kyettiin pitämään paikallaan halutussa pisteessä (kuva 45). Testien aikana paikallaan pitäminen onnistui hyvin eikä sen tai muunkaan testauksen aikana ilmennyt esimerkiksi moottoreiden ylikuumentumista. Laitteesta saatiin myös tasapainoisempi verrattuna RC-ohjaimella ajettuun versioon, kun akkujen paikalle lisättiin lisäpainoa. Kuitenkin pientä huojumista esiintyi edelleen johtuen ohjausvaijereiden vähäisestä lukumäärästä.



Kuva 45. Laitteen testaus ohjelmakoodilla.

8 HAVAINNOT JA KEHITYSKOhteet

Vaijeridronen toteuttaminen oli kaiken kaikkiaan erittäin haastava projekti. Laitteen suunnittelussa oli otettava huomioon useita eri aspekteja, jotta siitä saatiin ylipäänsä toimiva kokonaisuus. Suunniteltuun ja toteutettuun laitteeseen on mahdollista tehdä useita eri kehitystoimia ja parannuksia, jotta se olisi entistä turvallisempi sekä toimivampi kokonaisuus käyttäjän näkökulmasta.

Tämä diplomityö on osoittanut sen, että vajjereilla ohjattavan rinnakkaisrakenteisen robotin prototyyppi voidaan valmistaa jo suhteellisen halvoilla valmistusmenetelmillä. Suurin osa hyrräkela-moottorimoduulien komponenteista valmistettiin joko 3D-tulostamalla tai laserleikkaamalla. Kummassakin valmistusmenetelmässä materiaalina käytettiin muovia. Lisäksi runkorakenne valmistettiin niin ikään laserleikkaamalla muovimateriaalista. Ainoastaan tietyt osat jouduttiin valmistamaan koneistamalla alumiinista, jotta laite kestäisi paremmin rasitusta. Laserleikkurin ja 3D-tulostimen käyttö mahdollistivat sen, että halutun osan suunnittelu, valmistus ja testaus pystyttiin toteuttamaan jopa saman päivän aikana. Vaikka valmistusmenetelmät soveltuvat pääasiassa erilaisten prototyyppien valmistukseen, osat kestivät hyvin testauksen ja niihin kohdistuneen rasituksen eikä uusia osia jouduttu valmistamaan esimerkiksi rikkoutumisen takia.

Suunnitellun prototyyppilaitteen ensimmäisellä testauskerralla pyrittiin selvittämään, onnistuuko sen nostaminen ja liikuttaminen ylipäänsä keloihin kytkettyjen moottoreiden avulla. Suunnitellut kela-moottorimoduulit toimivat kuitenkin moitteetta eikä liikuttamisessa niiden avulla ilmennyt ongelmia. Kelojen edessä olevat siimaohjaimet edesauttoivat sitä, että siima kelautui puolalle tasaisesti ja vastaavasti purkautui oikeasta kohtaa. Jatkokehitystä ajatellen yksi ongelma liittyy tilanteeseen, jossa siima purkautuu loppuun kelan puolalta. Systeemi ei tällä hetkellä tunnista tällaista tilannetta, joten moottori voi jatkaa pyörittämistään ja luulla edelleen purkavansa siimaa. Tällöin siima kuitenkin vaihtaa suuntaansa ja näin ollen alkaa kelautumaan puolalle. Testiajoissa kyseistä ongelmaa ei tullut vastaan, koska keloissa oli ylimäärin siimaa verrattuna testialueen kokoon.

Yleisötapauksissa käytettävissä vaijeridroneissa on oltava erittäin hyvät turvajärjestelmät, koska ilman niitä tapaturmien ja loukkaantumisten riski kasvaa merkittävästi. Laitteen on kyettävä pitämään itsensä ilmassa esimerkiksi silloin, kun laitteesta katkeaa virrat. Työssä suunnitellun prototyypin tapauksessa virtojen katkeaminen aiheuttaa sen, että laite

tulee suhteellisen nopeasti alas. Tästä syystä erityisesti turvallisuuteen liittyvät asiat ovat isoja jatkokehityskohteita laitetta ajatellen. Paikallaan pitämiseksi olisi suunniteltava jarrutusmekanismi, joka estää moottoreiden vapaan pyörimisen virtojen katketessa.

Toinen turvallisuuteen liittyvä kehityskohde on CAN-yhteyden luotettavuus. Muutamia kertoja testiajojen aikana CAN-yhteyttä ei tietyllä hetkellä enää löytynyt ja tällöin käy samalla tavalla kuin virtojen katketessa. Virransyötössä ja kommunikoinnissa oli myös tiettyjä ongelmia VESC-moottorinohjaimen kanssa. Jostain syystä käytössä ollut moottorinohjain sammui lähes poikkeuksetta noin 20 minuutin kuluttua ja tähän ei löytynyt mitään varsinaista syytä.

Laitteen toimintaa varten alkutilanteessa on mitattava vaijereiden pituudet ja määritettävä kiinnityspisteiden paikat. Tällä hetkellä näiden määrittäminen on toteutettava mittamalla. Pienessä mittakaavassa tämä onnistuu helposti, mutta jos käytössä on suurempi testausala, mittaus voi muodostua haastavaksi. Jatkokehityksessä tähän olisi mahdollista pureutua ja pohtia, voitaisiinko kiinnityspisteiden määrittäminen toteuttaa jollain laskennallisella tai vastaavalla tavalla.

Tämänhetkinen vaijeridrone kykenee liikkumaan tasossa haluttuun pisteeseen. Paikoituksen tarkkuutta ei voida saada kuitenkaan täysin täsmälliseksi johtuen ainoastaan kahden ohjausvaijerin käytöstä, jolloin painovoima vaikuttaa jo osaltaan sijaintiin. Liikettä pysytään jatkossa laajentamaan kolmiulotteiseksi lisäämällä runkoon kaksi kappaletta samaisia hyrräkela-moottorimoduuleita. Moduulien ja ohjausvaijereiden lisääminen tasapainottaisi myös tasossa liikkuvalla vaijeridronelle ominaista heilumista. Tämä kuitenkin tarkoittaisi sitä, että runko pitäisi suunnitella uudestaan ja lisäksi tarvittaisiin toinen Dual VESC -moottorinohjain näitä kahta lisämoduulia varten. Kolmiulotteisuus luo omat haasteensa myös ohjelmakoodin toteutukselle ja erittäin haastavaa sen toteutuksessa on saada kaikki moottorit toimimaan toisiinsa nähden samanaikaisesti. Joka tapauksessa toteutus, jossa hyrräkela-moottorimoduulit on sijoitettu laitteen liikkuvaan alustaan, osoittautui toimivaksi ratkaisuksi.

9 YHTEENVETO

Diplomityön tavoitteena oli suunnitella ja kehittää vaijeridrone, jolla voidaan jatkossa suorittaa testejä niin sisä- kuin ulkotiloissa. Tarkoituksena oli luoda ainakin edestakaisin liikkuva laite, jonka liikesuuntia pystyttäisiin laajentamaan mahdollisuuksien mukaan. Suunnittelussa tuli pyrkiä ratkaisuihin, jotka mahdollistaisivat laitteen suhteellisen helpon kuljettamisen paikasta toiseen.

Työn alussa käsiteltiin robotiikkaa ja robottien luokittelua sekä esiteltiin valmiiden vaijereilla ohjattavien rinnakkaisrobottien rakennetta ja erityisesti sitä, minkälaisiin sovelluksiin näitä yleisesti käytetään. Aikaisemmin toteutetut ratkaisut toimivat myös hyvänä mallina työssä suunnitellulle prototyypilaitteelle. Tämän jälkeen olennaisena osana työn teoriaosaa oli eri vaijerimateriaalien pohdinta. Työssä käytiin läpi erilaisia tekokuitumateriaaleja, joita käytetään yleisesti köysissä sekä vaijereissa. Tämä loi pohjan vaijerimateriaalin valintaa varten ja lopulta työssä päädyttiin Dyneema-kuidun käyttöön. Dyneema-kuitu mahdollisti erittäin hyvät lujuusominaisuudet kevyessä ja ohuessa koossa.

Teoriaosassa käsiteltiin myös servotekniikkaa ja käytiin läpi muutamia eri moottorivaihtoehtoja, joita automaatiojärjestelmissä ja -laitteissa käytetään. Työssä esiteltiin muun muassa harjallisen ja harjattoman tasavirtaservomoottorin sekä askelmoottorin rakennetta ja toimintaa. Teoriaosuuden lopussa käytiin läpi kinematiikkaa, joka on vahvasti läsnä robottien toiminnassa. Kinematiikasta käsiteltiin suoraa kinematiikkaa ja käänteiskinematiikkaa yleisellä tasolla.

Työn toteutusosassa käytiin läpi vaatimusmäärittely suunniteltavaa prototyypilaitetta varten. Tämän jälkeen toteutettiin laitetta varten tarvittavien moottoreiden mitoitus, jonka pohjalta moottoriksi valittiin erittäin kevyt dronekäyttöön suunniteltu moottori. Moottorissa itsessään ei ollut anturointia, joten tätä varten siihen asennettiin erillinen magneettienkooderi mittaamaan pyörimisnopeutta ja asentoa. Toteutusosassa käytiin läpi myös laitteen käänteiskinematiikkatarkastelu ja muodostettiin vaijereiden pituuksille tarvittavat yhtälöt, joiden avulla vaijeridronen ohjaaminen haluttuun pisteeseen voitiin toteuttaa.

Toteutusosan loppupuolella esiteltiin vaijeridronen mekaniikkasuunnittelu. Suunniteltujen osien valmistuksessa päädyttiin pääosin käyttämään 3D-tulostinta ja laserleikkuria. Materiaaleina käytettiin akryyli- ja polypropeenilevyä sekä PLA-muovia. Kestävyyttä

vaativat osat, kuten puola- ja moottorisovitin, valmistettiin kuitenkin koneistamalla alumiinista.

Työn tuloksena saatiin aikaiseksi kaksi toisistaan poikkeavaa järjestelmää, jotka esiteltiin työn lopussa. Kaupallinen Wiral LITE mahdollistaa liikkeen yhden akselin suunnassa. Ratkaisussa kolmen pyörän avulla liikkuvaa vaijeridrona voidaan ajaa kauko-ohjauksella kahden pisteen välille kiinnitettyä vaijeria pitkin edestakaisin. Tämän lisäksi työssä toteutettiin moottoroitujen hyrräkelojen avulla tasossa liikuteltava vaijeridrone. Wiral LITE:n tapauksessa vaijeriksi valittiin Dyneema-kuituköysi ja suunnitellun prototyypin tapauksessa Dyneemapohjainen siima. Prototyypilaitteen hyrräkela-moottorimoduulit suunniteltiin omiksi packageiksi, joten niitä voidaan myöhemmin lisätä laitteen runkoon ja näin ollen laajentaa liikettä tasosta kolmiulotteiseksi. Moduulit kiinnitettiin liikkuvaan alustaan, mikä mahdollistaa dronen helpon liikuttamisen jatkossa testipaikasta toiseen. Laitteen ohjelmakoodi toteutettiin Pythonin avulla ja ohjauksessa käytettiin apuna Blynk-puhelinsovellusta. Kommunikaatio sovelluksen ja laitteen välillä toteutettiin puolestaan Raspberry Pi:n avulla.

Toteutetulla prototyypilaitteella suoritettiin testiajoja ja näissä ilmenneet ongelmat tuotiin esille ja niitä pyrittiin korjaamaan. Jatkokehitystä ajatellen laitteen turvallisuuden parantaminen on merkittävä tavoite. Lisäksi laitteen ohjaukseen ja yleiseen toimintaa tulee kiinnittää huomiota ja pyrkiä vähentämään sen huojuntaa ajon aikana sekä pysähdysten jälkeen. Laitteen tämänhetkisen paikoituksen tarkkuutta voitaisiin myös testata ajamalla tiettyä liikeprofiilia ja vertaamalla laitteen antamien koordinaattien arvoja mittaamalla saatuihin.

Yhteenvetona voidaan todeta, että työn alussa asetettuihin tavoitteisiin päästiin edellä mainittujen järjestelmien avulla. Toteutetun laitteen suunnittelu, rakentaminen ja toimintakuntoon saattaminen oli haasteellista, mutta siitä huolimatta mielekästä ja opettavaista. Työn aikana oppi paljon mekaniikkasuunnittelusta, elektroniikasta, moottoreiden ohjauksesta ja eri järjestelmien välisestä kommunikoinnista. Vaijereilla ohjattavien robottien suunnittelu pitää sisällään tietoa usealta eri tieteenalalta ja tästä syystä niihin liittyy paljon ongelmia ja epävarmuuksia. Vaikka työn aikana toteutetussa vaijeridronessa esiintyy vielä puutteita, siitä huolimatta sen tämänhetkinen tilanne ja esille tulleet kehitysideat toimivat hyvänä pohjana jatkoa ajatellen.

LÄHDELUETTELO

5G!Drones, 2019. Overview, Objectives [verkkodokumentti] 5G!Drones. Saatavissa: <https://5gdrones.eu/overview/objectives/> [viitattu 11.8.2020].

ABB, 2001. Tekninen opas nro 7 - Sähkökäytön mitoitus [verkkodokumentti]. Suomi: ABB Automation Group Ltd. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf [viitattu 14.10.2019]. 40 s.

Agnihotri N., 2011. Stepper Motor: Basics, Types and Working [verkkodokumentti]. Engineers Garage. Saatavissa: https://www.engineersgarage.com/article_page/stepper-motor-basics-types-and-working/ [viitattu 13.1.2020].

Airila M., 1999. Mekatroniikka. Viides korjattu painos. Helsinki: Otatieto, 405 s. ISBN 951-672-274-1

Ams AG, 2015. AS5047P, Adapter Board AS5047P-TS_EK_AB [verkkodokumentti]. Itävalta: ams AG. Saatavissa: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Austriamicrosystems%20PDFs/AS5047P-TS_EK_AB.pdf [viitattu 27.7.2020]. 12 s.

Ams AG, 2016. Angle position on-axis, AS5047P [verkkodokumentti]. Itävalta: ams AG. Saatavissa: <https://ams.com/as5047p> [viitattu 27.7.2020]. 40 s.

Ams AG, 2020. Position Sensing, Dynamic Angle Error Compensation [verkkodokumentti]. Itävalta: ams AG. Saatavissa: <https://ams.com/as5047p> [viitattu 27.7.2020].

Berti A., 2015. Kinematics and statics of cable-driven parallel robots by interval-analysis-based methods [verkkodokumentti]. Ranska: Université Nice Sophia Antipolis. Saatavissa: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01516606/document> [viitattu 4.5.2020]. 111 s.

Camu Oy, 2016. Blog, Näin valitset oikean kiipeilyköyden [verkkodokumentti]. Helsinki: Camu Oy. Saatavissa: <https://www.camu.fi/blog/kiipeilykoyden-valinta> [viitattu 1.10.2019].

Cardia F. & Lovatelli A., 2015. Aquaculture operations in floating HDPE cages: a field handbook. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, number 593. Rooma: FAO, 152 s. ISBN 978-92-5-108749-7

Certex Finland Oy, 2019a. Teräsköydet, Käsittely ja asennus [verkkodokumentti]. Espoo: Certex Finland Oy. Saatavissa: <https://www.certex.fi/Tekninen-osa/Teraskoydet/Kasittely-ja-asennus> [viitattu 1.10.2019].

Certex Finland Oy, 2019b. Teräsköydet, Tekninen määritelmä [verkkodokumentti]. Espoo: Certex Finland Oy. Saatavissa: <https://www.certex.fi/Tekninen-osa/Teraskoydet/Tekninen-maaritelma> [viitattu 1.10.2019].

Chandler N., 2014. Digital Cameras, How Skycam Works [verkkodokumentti]. Atlanta: HowStuffWorks. Saatavissa: <https://electronics.howstuffworks.com/cameras-photography/digital/skycam.htm> [viitattu 21.11.2019].

Chesher C., 2015. Robots and the moving camera in cinema, television and digital media. International Workshop on Cultural Robotics. Cham: Springer, S. 98–106.

Cone L. L., 1985. Skycam – An Aerial Robotic Camera System. Byte, 10 (10), S. 122–132.

Craig J., 1986. Introduction to Robotics: Mechanics & Control. Yhdysvallat: Addison-Wesley Publishing Company, 303 s. ISBN 0-201-10326-5

Dimeski D. & Srebrenkoska V., 2014. Predicting the ballistic strength of ultra high molecular weight polyethylene/fiber composites by implementing full factorial experimental design. Journal of Engineering & Processing Management, 6 (1), S. 91–98.

DSM Dyneema, 2019. Technical brochure: Dyneema® in marine and industrial applications [verkkodokumentti]. Yhdysvallat: DSM. Saatavissa: http://www.pelicanrope.com/pdfs/DyneemaSK75_Tech_Sheet.pdf [viitattu 2.10.2019]. 6 s.

DynamiCam, 2019. System [verkkodokumentti]. Israel: DynamiCam LTD. Saatavissa: <https://www.dynami-cam.com/system> [viitattu 3.10.2019].

Eastern Mediterranean University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering, 2019. Chapter 2 – Robot Kinematics: Position analysis [verkkodokumentti]. Pohjois-Kypros: Eastern Mediterranean University. Saatavissa: http://opencourses.emu.edu.tr/pluginfile.php/2205/mod_resource/content/0/lecture%20notes/Chapter%202%20-%20Robot%20Kinematics.ppt [viitattu 22.10.2019]. 35 s.

Flipsky, 2020. Flipsky ESC, Dual FSESC6.6 Based upon VESC6 with Aluminum Heatsink [verkkodokumentti]. Kiina: Flipsky technology LTD. Saatavissa: <https://flipsky.net/collections/electronic-products/products/dual-fsesc6-6-based-upon-vesc6-with-aluminum-heatsink> [viitattu 15.6.2020].

Fonselius J., Rinkinen J. & Vilenius M., 1998. Koneautomaatio: Servotekniikka. Helsinki: Opetushallitus, 194 s. ISBN 951-719-472-2

Kickstarter PBC, 2019. Wiral LITE | The Easy Cable Cam, For Impossible Film Shots. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.kickstarter.com/projects/1332617026/wiral-lite-the-easy-cable-cam-for-impossible-film> [viitattu 22.11.2019].

Kuivanen R., 1999. Robotiikka. Helsinki: Talentum Oyj/MetalliTekniikka, 188 s. ISBN 951-9438-58-0

Kurfess T., 2005. Robotics and Automation Handbook. Boca Raton: CRC Press, 579 s. ISBN 0-8493-1804-1

Leech C. M., Hearle J. W. S., Overington M. S. & Banfield S. J., 1993. Modelling tension and torque properties of fibre ropes and splices. Proceedings of the Third International Off-shore and Polar Engineering Conference. Singapore, Vol II, S. 370–376.

Marissen R., 2011. Design with ultra strong polyethylene fibers. Materials Sciences and Applications, 2 (5), S. 319–330.

McLaren A. J., 2006. Design and performance of ropes for climbing and sailing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 220 (1), S. 1–12.

Niiranen J., 1999. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Toinen korjattu painos. Helsinki: Otatieto, 381 s. ISBN 951-672-300-4

Ottaviano E., 2008. Analysis and design of a four-cable-driven parallel manipulator for planar and spatial tasks. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 222 (8), S. 1583–1592.

Oulun yliopisto, 2019. Robotics Projects, Low-carbon drone solutions utilization models and introduction action recommendations (VED) [verkkodokumentti]. Oulu: Oulun yliopisto. Saatavissa: <https://www.oulu.fi/bisg/node/193153> [viitattu 11.8.2020].

Pandilov Z. & Dukovski V., 2014. Comparison of the characteristics between serial and parallel robots. *Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering*, 7 (1), S. 143–160.

PartioWiki, 2016. Köysi [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://fi.scoutwiki.org/K%C3%B6ysi> [viitattu 1.10.2019].

Peijs T., 2018. 1.5 High Performance Polyethylene Fibers. Teoksessa: Beaumont P. W. R. & Zweben C. H. (toim.) *Comprehensive Composite Materials II, Volume 1*. Oxford: Elsevier, S. 86–126.

Picard E., Caro S., Plestan F. & Claveau F., 2018. Control Solution for a Cable-Driven Parallel Robot with High Variable Payload. Teoksessa: *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Quebec City: American Society of Mechanical Engineers, S. 1429–1436. ISBN 978-0-7918-5181-4

Pott A. & Bruckmann T., 2015. *Cable-Driven Parallel Robots, Volume 32: Proceedings of the Second International Conference on Cable-Driven Parallel Robots*. Cham: Springer, 324 s. ISBN 978-3-319-09488-5

Qian S., Zi B., Shang W. W., & Xu Q. S., 2018. A Review on Cable-driven Parallel Robots. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 31 (1), 11 s.

Rahman R. & Putra S. Z. F. S., 2019. Tensile properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*: Woodhead Publishing, S. 81–102.

Ramos J. M. L., 1999. *Chemical and Physical Properties of Synthetic Fibres Most Commonly Used in Fishing Gear, with Reference to Their Use in Cape Verde Fisheries*. [verkkodokumentti]. Reykjavik: The United Nations University - Fisheries Training Programme. Saatavissa: <https://www.grocentre.is/static/gro/publication/196/document/ramos99-ff.pdf> [viitattu 1.10.2019]. 26 s.

Safety at Sea Finland Marnela Oy Ltd, 2019. Varusteet ja tarvikkeet, Yleistä tietoa köysistä [verkkodokumentti]. Helsinki: Safety at Sea Finland Marnela Oy Ltd. Saatavissa: <http://www.marnela.fi/product/yleista-tietoa-koysista/> [viitattu 1.10.2019].

Salmi T. & Virtanen S., 2005. Dynamiikka 1, Kinematiikka. Tampere: Pressus Oy, 182 s. ISBN 952-9835-81-7

Schmidt V. L., 2017. Modeling Techniques and Reliable Real-Time Implementation of Kinematics for Cable-Driven Parallel Robots using Polymer Fiber Cables [verkkodokumentti]. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Saatavissa: <https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/9102/1/ValentinLorenzSchmidt65.pdf> [viitattu 11.11.2019]. 146 s.

Siciliano B., Sciavicco L., Villani L. & Oriolo G., 2009. Robotics: Modelling, Planning and Control. Lontoo: Springer, 632 s. ISBN 978-1-84628-642-1

Skycam, 2019a. What Is Skycam, Features [verkkodokumentti]. Fort Worth: Skycam LLC. Saatavissa: <http://skycam.tv.s28625.gridserver.com/sample-page-2/features/> [viitattu 21.11.2019].

Skycam, 2019b. What Is Skycam, International Leader [verkkodokumentti]. Fort Worth: Skycam LLC. Saatavissa: <http://skycam.tv.s28625.gridserver.com/sample-page-2/feat-of-engineering/> [viitattu 21.11.2019].

Spidercam, 2019. Spidercam FIELD, System Overview [verkkodokumentti]. Itävalta: Spidercam GmbH. Saatavissa: <https://www.spidercam.tv/spidercam-field/> [viitattu 21.11.2019].

Suomen Vapaa-ajankalastajien Keskusjärjestö, 2011. Kalastajan siimat [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen Vapaa-ajankalastajien Keskusjärjestö. Saatavissa: https://issuu.com/vapaa-ajankalastajat/docs/kalastajan_siimat [viitattu 3.10.2019]. 4 s.

Spiderwire, 2019a. Pro Tips, SpiderWire: Born from the World's Strongest Fiber [verkkodokumentti]. Yhdysvallat: Spiderwire. Saatavissa: <http://www.spiderwire.com/SpiderWire-pro-tips-spiderwire-born-from-the-worlds-strongest-fiber.html> [viitattu 3.10.2019].

Spiderwire, 2019b. Superline, Ultracast Braid [verkkodokumentti]. Yhdysvallat: Spiderwire. Saatavissa: <https://www.spiderwire.com/spiderwire-line-superline-spiderwire-ultracast-ultracast-braid/1509894.html#start=1> [viitattu 3.10.2019].

Teufelberger Fiber Rope GmbH, 2019. Services, Fiber Structures and fiber types [verkkodokumentti]. Itävalta: Teufelberger Fiber Rope GmbH. Saatavissa: <https://www.roblineropes.com/services/fiber-structures-and-fiber-types/> [viitattu 1.10.2019].

The Recreational Boating & Fishing Foundation, 2019. Fishing Gear and Tackle, Types of Fishing Line [verkkodokumentti]. Yhdysvallat: The Recreational Boating & Fishing Foundation (RBFF). Saatavissa: <https://www.takemefishing.org/how-to-fish/fishing-gear-and-tackle/types-of-fishing-line/> [viitattu 3.10.2019].

T-MOTOR, 2019a. U8 Lite, Features [verkkodokumentti]. Kiina: T-MOTOR. Saatavissa: http://uav-en.tmotor.com/html/uav/html/2018/u_0402/21.html [viitattu 23.3.2020].

T-MOTOR, 2019b. U8 Lite, Parameter [verkkodokumentti]. Kiina: T-MOTOR. Saatavissa: http://uav-en.tmotor.com/html/uav/html/2018/u_0402/21.html [viitattu 23.3.2020].

Wang P., 2017. Strength and strengthening of materials for rope applications. Teoksessa: Dohm M. A. R. (toim.) Rope – Present and Future. Ranska: Proceedings of the OIPEEC Conference, 19 s. ISBN 978-0-9552500-4-0

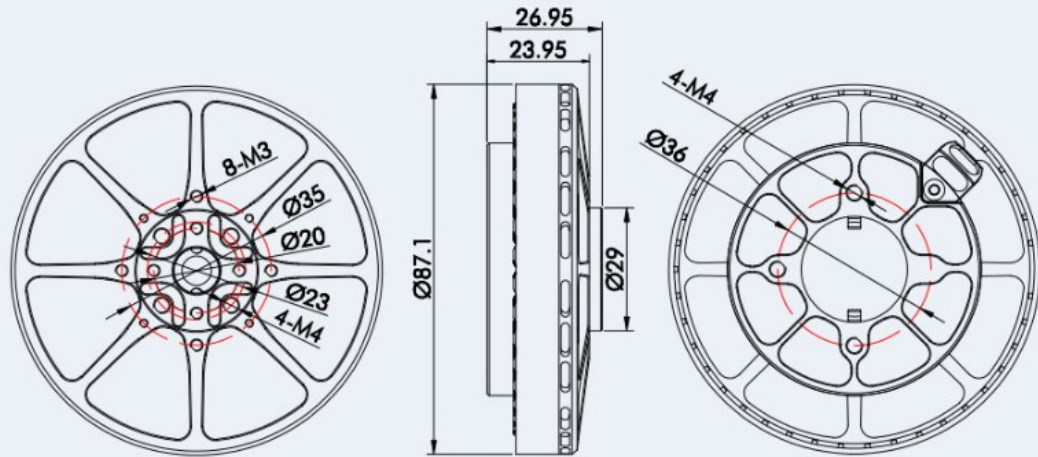
Wei H., Qiu Y. & Su Y., 2016. Motion control strategy and stability analysis for high-speed cable-driven camera robots with cable inertia effects. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13 (5), S. 1–14.

Wiral Technologies AS, 2019a. Products, Wiral Lite [verkkodokumentti]. Trondheim: Wiral Technologies AS. Saatavissa: <https://eu.wiralcam.com/products/wiral-lite> [viitattu 22.11.2019].

Wiral Technologies AS, 2019b. Wiralcam [verkkodokumentti]. Trondheim: Wiral Technologies AS. Saatavissa: <https://www.wiralcam.com/> [viitattu 22.11.2019].

Zhou P., Zhou G, Zhu Z., He Z., Ding X. & Tang C., 2019. A Review of Non-Destructive Damage Detection Methods for Steel Wire Ropes. *Applied Sciences*, 9 (13), S. 1–16.

Product Drawing-U8lite



Specifications-U8lite

Diameter	87.1mm
Height	27.05mm
Shaft Diameter	15mm
Configuration	36N42P
Lead Spec	90mm
Ingress Protection Level	IP35
Packing Size	130*111*50.6mm
Accessories	Φ32*10*3mm CPC*1、M3*12mm Screw for propeller installation*4、Φ11*14.5 locating pin*1、M4*12mm Screw for motor installation*4

KV	85	Rated Voltage (Lipo)	12S
Motor Weight (Incl. Cable)	243g	Propeller Recommendation	28-29"
Idle Current (18V)	0.5A	ESC Recommendation	FLAME 60A HV、ALPHA 60A HV
Internal Resistance	225±5mΩ	Quadcopter (28CF)	10kg
Peak Current (180s)	19.1A	Hexacopter (28CF)	15kg
Max. Power (180s)	916.8W	Octocopter (28CF)	20kg

Test Report-U8lite										
Item No.	Voltage (V)	Propeller	Throttle	Current (A)	Input power (W)	RPM	Torque (N·m)	Thrust (g)	Efficiency (g/W)	Operating Temperature
U8lite KV85	12S (48V)	T-motor G28*9.2CF	40%	1.8	86.4	1584	0.45	1465	16.96	88°C (Ambient Temperature : 26.9°C)
			42%	2	96	1631	0.48	1572	16.38	
			44%	2.3	110.4	1692	0.53	1717	15.55	
			46%	2.6	124.8	1748	0.58	1852	14.84	
			48%	2.9	139.2	1810	0.60	1997	14.35	
			50%	3.2	153.6	1872	0.66	2140	13.93	
			52%	3.4	163.2	1928	0.68	2256	13.82	
			54%	3.7	177.6	1988	0.71	2378	13.39	
			56%	4.1	196.8	2047	0.77	2528	12.85	
			58%	4.6	220.8	2124	0.84	2757	12.49	
			60%	5.1	244.8	2190	0.90	2957	12.08	
			62%	5.3	254.4	2232	0.91	3027	11.90	
			64%	5.7	273.6	2287	0.95	3171	11.59	
			66%	6.2	297.6	2349	1.00	3307	11.11	
			68%	6.6	316.8	2384	1.04	3448	10.88	
			70%	7.1	340.8	2439	1.08	3662	10.75	
75%	8.2	393.6	2570	1.17	4043	10.27				
80%	9.5	456	2680	1.28	4468	9.80				
90%	12.2	585.6	2917	1.47	5248	8.96				
100%	16.5	792	3200	1.80	6352	8.02				

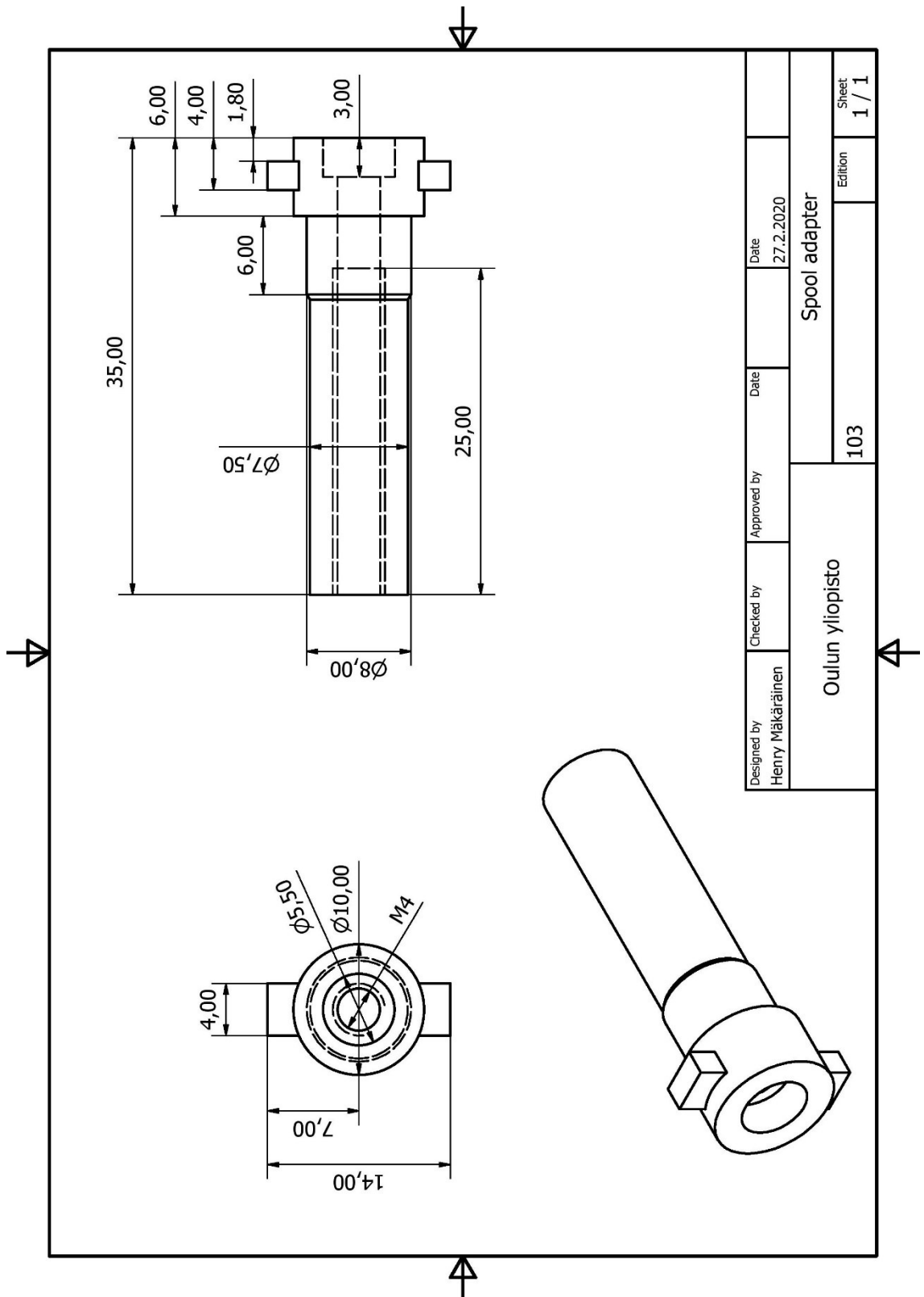
Item No.	Voltage (V)	Propeller	Throttle	Current (A)	Input power (W)	RPM	Torque (N·m)	Thrust (g)	Efficiency (g/W)	Operating Temperature
U8lite KV85	12S (48V)	T-motor G29*9.5CF	40%	2.1	100.8	1547	0.53	1696	16.83	HOT (Ambient Temperature : 27.6°C)
			42%	2.4	115.2	1607	0.59	1829	15.88	
			44%	2.7	129.6	1654	0.63	1959	15.12	
			46%	3	144	1720	0.68	2119	14.72	
			48%	3.2	153.6	1767	0.69	2248	14.64	
			50%	3.7	177.6	1837	0.78	2412	13.58	
			52%	4	192	1906	0.81	2610	13.59	
			54%	4.4	211.2	1958	0.86	2759	13.06	
			56%	4.7	225.6	2001	0.89	2885	12.79	
			58%	5.5	264	2100	1.01	3193	12.09	
			60%	5.8	278.4	2139	1.03	3285	11.80	
			62%	6.2	297.6	2184	1.07	3429	11.52	
			64%	6.5	312	2236	1.09	3561	11.41	
			66%	7.1	340.8	2285	1.15	3740	10.97	
			68%	7.7	369.6	2332	1.28	3953	10.70	
70%	8.2	393.6	2394	1.26	4094	10.40				
75%	9.5	456	2506	1.39	4517	9.91				
80%	11	528	2626	1.49	4961	9.40				
90%	14	672	2858	1.69	5875	8.74				
100%	19.1	916.8	3104	2.09	7130	7.78				

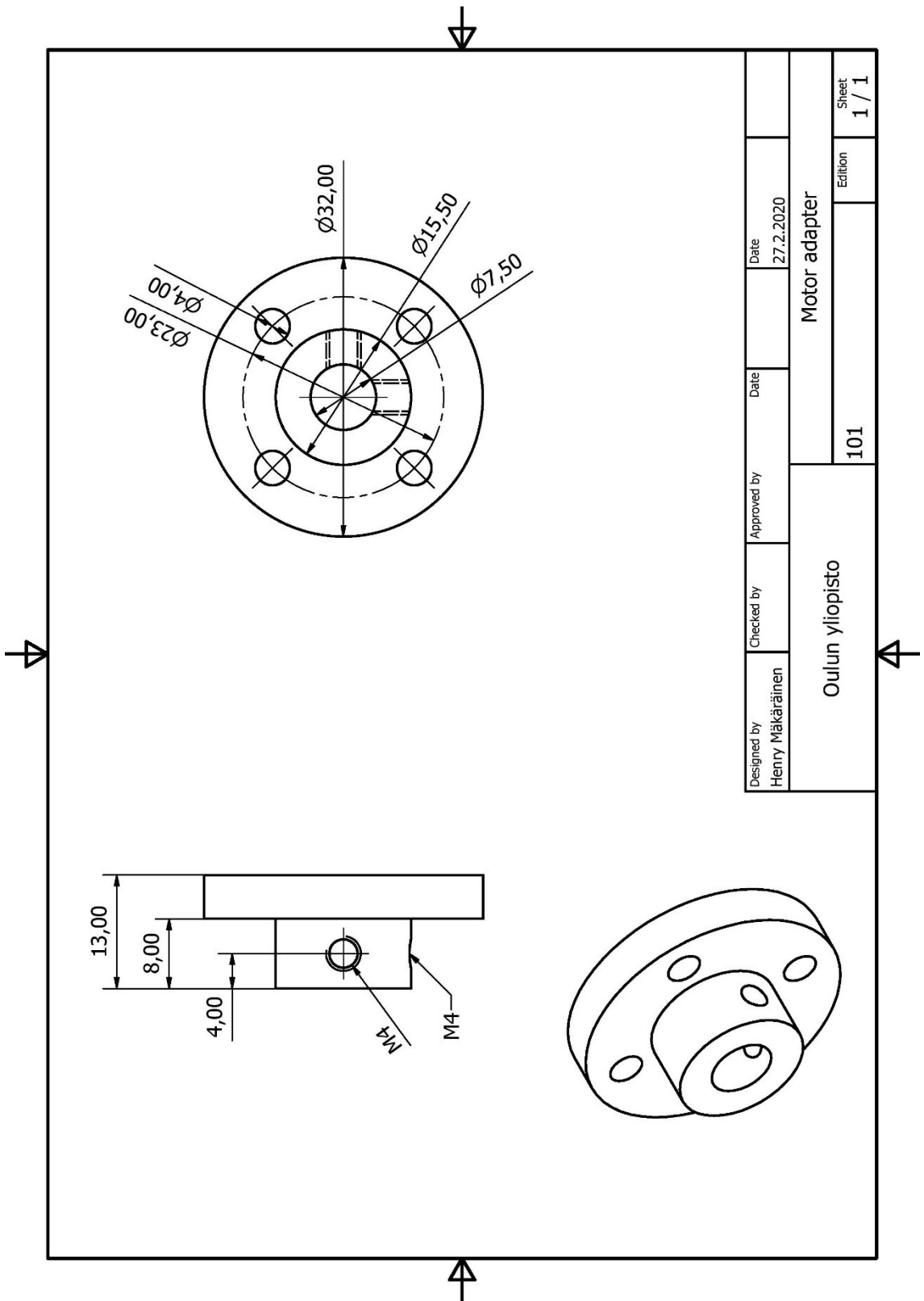
$$\begin{aligned}
 L_5 &= \sqrt{(z_1 - z_{A1})^2 + (x_1 - x_{A1})^2 + (y_1 - y_{A1})^2} \\
 \frac{d}{dt} L_5 &= \frac{d}{dt} \sqrt{(z_1 - z_{A1})^2 + (x_1 - x_{A1})^2 + (y_1 - y_{A1})^2} \\
 &= \frac{1}{2} * [(z_1 - z_{A1})^2 + (x_1 - x_{A1})^2 + (y_1 - y_{A1})^2]^{-\frac{1}{2}} * [2(z_1 - z_{A1})(\dot{z}_1 - \dot{z}_{A1}) + \\
 &2(x_1 - x_{A1})(\dot{x}_1 - \dot{x}_{A1}) + 2(y_1 - y_{A1})(\dot{y}_1 - \dot{y}_{A1})] \\
 &= \frac{1}{2\sqrt{(z_1 - z_{A1})^2 + (x_1 - x_{A1})^2 + (y_1 - y_{A1})^2}} * [2(z_1 - z_{A1})(\dot{z}_1 - 0) + 2(x_1 - x_{A1})(\dot{x} - 0) + \\
 &2(y_1 - y_{A1})(\dot{y} - 0)]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_6 &= \sqrt{(z_3 - z_{A3})^2 + (x_3 - x_{A3})^2 + (y_3 - y_{A3})^2} \\
 \frac{d}{dt} L_6 &= \frac{d}{dt} \sqrt{(z_3 - z_{A3})^2 + (x_3 - x_{A3})^2 + (y_3 - y_{A3})^2} \\
 &= \frac{1}{2} * [(z_3 - z_{A3})^2 + (x_3 - x_{A3})^2 + (y_3 - y_{A3})^2]^{-\frac{1}{2}} * [2(z_3 - z_{A3})(\dot{z}_3 - \dot{z}_{A3}) + \\
 &2(x_3 - x_{A3})(\dot{x}_3 - \dot{x}_{A3}) + 2(y_3 - y_{A3})(\dot{y}_3 - \dot{y}_{A3})] \\
 &= \frac{1}{2\sqrt{(z_3 - z_{A3})^2 + (x_3 - x_{A3})^2 + (y_3 - y_{A3})^2}} * [2(z_3 - z_{A3})(\dot{z}_3 - 0) + 2(x_3 - x_{A3})(\dot{x} - 0) + \\
 &2(y_3 - y_{A3})(\dot{y} - 0)]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_7 &= \sqrt{(z_2 - z_{A2})^2 + (x_2 - x_{A2})^2 + (y_2 - y_{A2})^2} \\
 \frac{d}{dt} L_7 &= \frac{d}{dt} \sqrt{(z_2 - z_{A2})^2 + (x_2 - x_{A2})^2 + (y_2 - y_{A2})^2} \\
 &= \frac{1}{2} * [(z_2 - z_{A2})^2 + (x_2 - x_{A2})^2 + (y_2 - y_{A2})^2]^{-\frac{1}{2}} * [2(z_2 - z_{A2})(\dot{z}_2 - \dot{z}_{A2}) + \\
 &2(x_2 - x_{A2})(\dot{x}_2 - \dot{x}_{A2}) + 2(y_2 - y_{A2})(\dot{y}_2 - \dot{y}_{A2})] \\
 &= \frac{1}{2\sqrt{(z_2 - z_{A2})^2 + (x_2 - x_{A2})^2 + (y_2 - y_{A2})^2}} * [2(z_2 - z_{A2})(\dot{z}_2 - 0) + 2(x_2 - x_{A2})(\dot{x} - 0) + \\
 &2(y_2 - y_{A2})(\dot{y} - 0)]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_8 &= \sqrt{(z_4 - z_{A4})^2 + (x_4 - x_{A4})^2 + (y_4 - y_{A4})^2} \\
 \frac{d}{dt} L_8 &= \frac{d}{dt} \sqrt{(z_4 - z_{A4})^2 + (x_4 - x_{A4})^2 + (y_4 - y_{A4})^2} \\
 &= \frac{1}{2} * [(z_4 - z_{A4})^2 + (x_4 - x_{A4})^2 + (y_4 - y_{A4})^2]^{-\frac{1}{2}} * [2(z_4 - z_{A4})(\dot{z}_4 - \dot{z}_{A4}) + \\
 &2(x_4 - x_{A4})(\dot{x}_4 - \dot{x}_{A4}) + 2(y_4 - y_{A4})(\dot{y}_4 - \dot{y}_{A4})] \\
 &= \frac{1}{2\sqrt{(z_4 - z_{A4})^2 + (x_4 - x_{A4})^2 + (y_4 - y_{A4})^2}} * [2(z_4 - z_{A4})(\dot{z}_4 - 0) + 2(x_4 - x_{A4})(\dot{x} - 0) + \\
 &2(y_4 - y_{A4})(\dot{y} - 0)]
 \end{aligned}$$





Designed by Henry Mäkäräinen	Checked by	Approved by	Date 27.2.2020	Date 27.2.2020	Sheet 1 / 1
Oulun yliopisto			101		Edition
Motor adapter					

