

likka Keltto

## **ROBOTIN MEKANIikka- JA AUTOMAATIOsuunnittelu**

# ROBOTIN MEKANIikka- JA AUTOMAATIOSUUNNITTELU

Ilkka Kelto  
Opinnäytetyö  
Syksy 2022  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma, koneautomaatio

---

Tekijä: Iikka Keltto  
Opinnäytetyön nimi: Robotin mekaniikka- ja automaatio suunnittelu  
Työn ohjaaja: Juha Juntila  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2022  
Sivumäärä: 36 + 1 liite

---

Tässä työssä tehtiin teknistä selvitys- ja suunnittelutyötä Insinööritoimisto Keltek Oy:lle. Työn tavoitteena oli robotin mekaniikka- ja automaatio suunnittelu sekä toiminnan testaus. Työssä tutustuttiin myös järjestelmän mahdollisuuteen toimia yhteistoiminnallisesti ihmisen kanssa.

Työssä käsiteltiin robotin mekaniikkasuunnittelun vaiheita ja suunnittelussa huomioitavia asioita. Konestandardia käsiteltiin mekaniikkasuunnittelun rinnalla turvallisen koneen rakentamiseksi. Mekaniikkasuunnittelun tavoitteena oli luoda järjestelmä, joka mahdollistaa toimintaperiaatteen kattavan testaamisen. Suunnittelun tuloksena valmistettiin testilaitteiston runko, johon kiinnitettiin toimilaitteet ja voimansiirto.

Automaatio suunnittelussa keskeisessä osassa oli moottoreiden tarkka ohjaaminen sekä moottoreiden tavoiteasentojen laskeminen. Ohjelmoinnissa pyrittiin ohjelmarakenteeseen, joka mahdollistaa järjestelmän laajentamisen ja jatkokehittämisen opinnäytetyön ulkopuolella.

Laitteistolle kehitettiin käänteiskinematiikkamalli, joka yhdessä automaatiojärjestelmän kanssa mahdollisti paikoituspisteisiin ajamisen ja erilaisten kuormitustilanteiden testaamisen. Järjestelmän toimintaperiaate saatiin todennettua valmistetun testilaitteiston avulla. Laitteiston avulla saatiin myös kerättyä toimeksiantajalle arvokasta testiaineistoa järjestelmän toiminnasta ja kehittämismahdollisuuksista.

---

Asiasanat: robotti, yhteistoiminnallisuus, käänteiskinematiikka, mekaniikkasuunnittelu, automaatio suunnittelu, konestandardit

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering, Option of Machine Automation Engineering

---

Author: Iikka Keltto

Title of thesis: Mechanical Engineering and Automation of Robot

Supervisor: Juha Juntila

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2022

Number of pages: 36 + 1 attachment

---

This thesis contains technical research work that is made for Insinööritoimisto Keltek Oy. The focus of the work is in mechanical and automation engineering of a robot. There is also an interest in finding out if this system can work as a collaborative machine.

The work studies all the necessary steps that need to be made to create safe and machine standard compatible designs. The goal of the mechanical engineering work is to create a test rig to see if the principles of automation design will work.

Automation engineering focuses on precision driving of the motor and calculating motor setpoints. Programming is an important part of this thesis. Carefully selected programming structures allow the future expansions of the program.

The result of this thesis was a test rig that proved the concept design to be functional for the future applications. Testing of this product provided a lot of important data to support future business decisions.

---

Keywords: robot, collaborative, inverse kinematics, mechanical engineering, automation engineering, machine standards

# SISÄLLYS

SANASTO.....	6
1 JOHDANTO.....	7
2 TEOLLISUUSROBOTTI.....	8
2.1 Robotin määritelmä.....	8
2.2 Rakenteiden jaottelu.....	8
2.3 Robotin yhteistoiminnallisuus.....	9
3 TURVALLISUUS JA STANDARDIT.....	11
3.1 Koneturvallisuusstandardit.....	11
3.2 Sähköturvallisuus.....	12
3.3 CE-merkintä.....	12
4 OHJAUSTEKNIikka.....	13
4.1 Kinematiikka.....	13
4.2 Liikkeen tuottaminen robotissa.....	14
4.3 Takaisinkytkentä.....	15
5 MEKANIikkASUUNNITTELU.....	16
5.1 Rakenne.....	16
5.2 Statiikan tarkastelu.....	18
5.3 Moottoreiden mitoituslaskenta.....	22
5.4 Valmistus.....	24
6 AUTOMAATIOSUUNNITTELU.....	26
6.1 Ohjelmointi.....	26
6.2 Kinematiikkaratkaisu.....	28
7 TOIMINNAN TESTAUS.....	30
7.1 Toteutus.....	30
7.2 Tulokset.....	31
8 YHTEENVETO.....	32
LÄHTEET.....	34
LIITTEET.....	37

## SANASTO

Creality Ender 3	Crealityn valmistama 3D-tulostinmalli
G-koodi	koneohjauksessa käytetty matalan tason komentokieli
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm (tiettyyn suuntaan joustava kokoonpanorobottikäsi)
Structured Text	tekstimuotoinen PLC-ohjelmointikieli
TCP	Tool Center Point (työkalun keskipiste)
TwinCAT Motion Designer	Bechhoffin moottorikäyttöjen mitoitusohjelma

# 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tehdään Insinööritoimisto Keltek Oy:lle kollaboratiivisen robotin mekaniikka- ja automaatio suunnittelua sekä toiminnan testausta. Suunnitelmiin pohjautuen yritykselle valmistetaan testijärjestelmä, jota testaamalla selvitetään, täyttääkö laite vaadittavat toiminnallisuudet ja viitearvot. Työ sisältää mekaniikkasuunnittelua ja automaatio suunnittelua konedirektiiviä noudattaen. Testijärjestelmän tavoitteena on myös selvittää, onko laitteistolla mahdollisuus toimia yhteistoiminnallisesti, ja mikä kollaboratiivisuustaso laitteella on saavutettavissa. Järjestelmää tul- laan mahdollisesti käyttämään myös muissa sovelluskohteissa, joten työn tavoitteena on järjestel- män suunnittelu siten, että se noudattaa laitteita koskevia standardeja.

Insinööritoimisto Keltek Oy:n asiakas tarvitsee toimivan ja ergonomisen vaihtoehdon useissa työ- pisteissä työskentelevien käsivarsirobottien tilalle. Ratkaisuksi valikoitui yhtenäinen ota-laitatoimin- toon perustuva järjestelmä, joka suorittaa kappaleenkäsittelyä vuorotellen eri työpisteissä. Järjes- telmän tulee pystyä työskentelemään työpisteillä yhdessä työntekijöiden kanssa poistaen työnteki- jöitä rasittavat toistuvat nostoliikkeet. Työssä tarkastellaan myös järjestelmän mahdollisuutta toimia älykkäänä syöttölaitteena esimerkiksi valmistus- ja kokoonpanosolujen roboteille.

Työn teoriassa käydään käsitteinä läpi robotti, robotin yleisimmät rakennevaihtoehdot sekä yhteis- toiminnallisuus. Tarkempaan käsittelyyn otetaan robottien ohjaustekniikka, jossa selvitetään kään- teiskinematikan käyttöä robotinohjauksessa sekä yleisimmät moottori- ja takaisinkytkentäteknolo- giat.

## 2 TEOLLISUUSROBOTTI

Tässä luvussa tutustutaan siihen, mitä robotilla tarkoitetaan teollisuudessa. Lisäksi tarkastellaan yleisimpiä teollisuudessa käytettäviä robottirakenteita sekä kollaboratiivisuuden määritelmää robotiikassa.

### 2.1 Robotin määritelmä

Robotti on laite, joka on edistyneesti ohjelmoitavissa. Robotin erottaa muista tietokoneohjatuista laitteista sillä, että se voidaan joustavasti ohjelmoida suorittamaan monipuolisia tehtäviä. Robottiin voidaan kiinnittää työkaluja, jolloin robotilla saadaan suoritettua kulloisenkin sovelluskohteen tarpeet. Yleisiä työkaluja teollisuusroboteissa ovat esimerkiksi alipainetarttijat, joita käytetään pakkaus- ja lajitteluovelluksissa. Teollisuudessa robotilla viitataan koneeseen, joka kykenee seuraamaan käyttäjän sille määrittelemää liikerataa. Liikkeitä tehdessään tulee sen noudattaa annettuja nopeus- ja kiihtyvyyssparametreja. (1.)

### 2.2 Rakenteiden jaottelu

Robotin rakenteet voidaan jakaa useaan eri luokkaan akselien asettelun perusteella. Lisäksi robottien vertailussa viitataan usein myös niiden vapausasteiden määrään. Teollisuudessa käytetään lukuisia robottien rakennevaihtoehtoja, joita ovat käsivarsirobotti, portaalirobotti, karteesinen robotti, delta-robotti sekä SCARA-robotti. (2.)

Teollisuudessa eniten käytetyt robotit ovat kuusiakselisia kiertyvänivelisiä robotteja eli käsivarsirobotteja. Kuuden vapausasteen vuoksi robotti pystyy suorittamaan vaativia liikeratoja, joita voidaan käyttää esimerkiksi maalaus- ja hitsaussovelluksissa. Niiden liike toteutetaan yleensä servomootoreilla. (3.)

Karteesinen robotti on kolmesta lineaariakselista koostuva robotti, jolla voidaan suorittaa lineaari-liikkeitä suurella toiminta-alueella. Karteesisen robotin etuja ovat helppo suunniteltavuus, asennet-

tavuus ja ylläpito. (2.) Portaalirobotti on karteesisen robotin variaatio, jonka runko muodostaa suljetun kehän. Portaalirobotti kestää hyvin kuormitusta ja kuormituksen vaihtelua, joten se on toimiva vaihtoehto silloin, kun kuorma on suuri. (4.)

Delta-robotti eli rinnakkaisrakenteinen robotti on robottimalli, joka on suunniteltu lyhyiden liikkeiden suorittamiseen erittäin suurella nopeudella. Tämän vuoksi sen pääasiallinen käyttötarkoitus onkin elintarvike- ja lääketieteellisyydessä. Delta-robotin liike on toteutettu sauvoilla, ja sen rakenne on yleensä hyvin keveä sallien suuret liikenopeudet. (5.)

SCARA-robotit ovat robotteja, joiden työalue muodostaa sylinterin. Robotin pääakselit liikkuvat yhdessä tasossa, jotka on korotettu yleensä työtasosta runkotolpalla. Pääakselien päässä on korkeuden säätö sekä mahdollinen pyörytys. (5.)

### **2.3 Robotin yhteistoiminnallisuus**

Yhteistoiminnallisuudella eli kollaboratiivisuudella tarkoitetaan robotin kykyä työskennellä turvallisesti yhdessä ihmisen kanssa. Robotin kollaboratiivisessa käytössä ihmiskontakti on mahdollinen, mikä luo lisävaatimuksia robotin ohjaukselle ja komponenteille. Ensin on kuitenkin tunnistettava millä tasolla robotin tulee pystyä työskentelemään ihmisen kanssa. Kollaboratiivisuutta on neljän tasoista:

1. Robotilla ja ihmisellä ei ole yhteistoimintaa. Ihminen ja robotti on erotettu fyysisellä esteellä toisistaan, esimerkiksi aitaamalla.
2. Robotilla ja ihmisellä on rinnakkaistoimintaa. Ihminen työskentelee robotin kanssa osittain tai kokonaan jaetussa työtilassa, mutta eri työtehtävän parissa.
3. Robotin ja ihmisen välillä on yhteistoimintaa. Ihminen ja robotti työskentelevät osittain tai kokonaan jaetussa työtilassa saman työkappaleen parissa.
4. Robotin ja ihmisen välillä on yhteistoimintaa. Ihminen ja robotti työskentelevät yhtäaikaista saman työkappaleen parissa yhteisessä työtilassa. (6, s. 95.)

Mitä korkeammalla tasolla robotin ja ihmisen yhteistoiminta on, sitä suuremmat vaatimukset lainsäädäntö asettaa robotin mekaniikalle ja ohjaukselle. Mahdollisia toimia yhteistoiminnallisuuden luomiseksi ovat robotin pysäyttäminen ihmisen lähestyessä sitä, nopeuden, voiman ja massojen

pienentäminen sekä lisäturvalaitteiden asettelu. Vaikka robotti olisi määritelty yhteistoiminnalliseksi, tulee sen käyttöönotossa huomioida käytettävät toimilaitteet sekä järjestelmän yleinen turvallisuus. Tämä selvitetään tekemällä järjestelmälle riskinarvio, joka tehdään riippumatta siitä, onko robotti lähtökohtaisesti kollaboratiivinen. Riskinarviossa arvioidaan järjestelmän turvallisuus sen koko elinkaaren ajalta käyttöönotosta käytöstä poistoon. Arviossa listataan kaikki mahdolliset riskit, niiden vakavuus sekä todennäköisyys, joiden mukaan lasketaan, aiheuttaako riski vaaraa. Mikäli jokin riski aiheuttaa käyttäjälle vaaraa, tulee järjestelmään tehdä muutoksia. (7.)

## 3 TURVALLISUUS JA STANDARDIT

Tässä luvussa tutustutaan yhteistoiminnallisen robotin suunnitteluun liittyviin turvallisuusstandardeihin ja -ohjeistuksiin. Suomessa lainsäädäntö ohjaa koneensuunnittelua, minkä vuoksi standardien lukeminen ja standardirakenteiden ymmärtäminen on tärkeää.

### 3.1 Koneturvallisuusstandardit

Standardit ovat julkaisuja, joissa on yhteisesti sovittuja suosituksia ja vaatimuksia tuotteille ja järjestelmille sekä niiden valmistukselle ja testaukselle (8). Konestandardit ovat EU:n konedirektiivin määrittelemiä ja Suomessa valtioneuvoston toimeenpanemia (9).

Koneturvallisuusstandardit on jaoteltu hierarkiansa mukaan tyypeihin A, B ja C. Standardihierarkiasta on erityisesti hyötyä niitä laadittaessa sekä niitä lukiessa, sillä hierarkiassa alempia standardityyppejä voidaan hyödyntää useissa eri koneissa. A-tyyppin standardi on turvallisuuden perustandardi, joka kertoo kaikkien koneiden turvallisuuteen liittyvät periaatteet, yleiset näkökohdat sekä sen miten standardia voidaan soveltaa eri koneisiin. B-tyyppin standardi on standardi, joka käsittelee turvallisuusnäkökohtia ja turvalaitteita, jotka ovat sovellettavissa useisiin eri koneisiin. B-tyyppin standardi on jaettu kahteen alastandardiin B1 ja B2 riippuen siitä, kumpaa aihetta se kulloinkin käsittelee. C-tyyppin standardissa käsitellään koneen tai koneryhmän turvallisuusvaatimuksia. Koneryhmäksi katsotaan laitteet, joissa ilmenee yhdenmukaisia turvallisuusvaatimuksia tai rakenteen piirteitä. (10.)

Konestandardien avulla varmistetaan, että koneen valmistaja täyttää valmistajan velvollisuudet, ja että suunnittelu ja rakentaminen täyttävät olennaiset terveys- ja turvallisuusvaatimukset. Esimerkiksi teollisuusroboteille on julkaistu C-tyyppin standardi SFS-EN ISO 10218-1, joka määrittää robottien turvallisuuslinjaukset. Tässä työssä ollaan kiinnostuneita robotteja ja erityisesti yhteistoiminnallisia robotteja koskevista standardeista, minkä vuoksi edellä mainittu standardi toimii merkittävänä ohjenuorana. Standardien käyttäminen ei ole välttämätöntä, mutta standardien mukainen suunnittelu varmistaa koneen lainmukaisuuden.

### **3.2 Sähköturvallisuus**

Koneasetus määrittää koneiden sähköturvallisuuden standardit. Koneet tulee suunnitella ja valmistaa noudattaen terveys- ja turvallisuusvaatimuksia. Tämä voidaan tehdä joko noudattaen standardeja tai muuten osoittamalla, että koneella on standardeja vastaavat turvallisuusominaisuudet. (11.) Koneen sähköturvallisuudesta on vastuussa koneen rakentaja tai sähkötöiden urakoitsija. Sähköturvallisuutta valvoo Suomessa Tukes.

### **3.3 CE-merkintä**

CE-merkinnällä tuotteen valmistaja tai edustaja vakuuttaa, että tuote täyttää sitä koskevat EU:n direktiivien ja asetusten vaatimukset. CE-merkitty tuote saa myös liikkua vapaasti EU:n alueella. Linjaston CE-merkintä on tarpeellista huomioida silloin, jos kone suunnitellaan osaksi valmista järjestelmää, jossa se toimii yhdessä muiden koneiden kanssa. Linjastolle tulee tällöin suorittaa kokonaisuutena riskinarvio. Linjaston rakennuttaja myöntää CE-merkinnän linjastolle. (12.)

## 4 OHJAUSTEKNIikka

Tässä luvussa käydään läpi yhteistoiminnallisen robotin ohjaustekniikkaan liittyvää pohjatietoa. Käsitellyssä ovat moottoritekniikat ja niiden takaisinkytkentä.

### 4.1 Kinematiikka

Robotin rakenteessa jäsenet muodostavat kinemaattisen ketjun. Ketju voi olla joko suljettu tai avoin riippuen jäsenten asettelusta. Käsivarsirobotin kinemaattinen ketju on avoin, kun taas delta-robotissa ketju on suljettu. Robotin ohjaamiseksi tarvitaan kahta erilaista kinematiikkamenetelmää, jotka ovat suora kinematiikka ja käänteiskinematiikka. (13.)

Suora kinematiikka on dynamiikan osa, jossa tutkitaan kappaleen paikkaa, nopeutta ja kiihtyvyyttä. Kinematiikassa ei huomioida kappaleeseen vaikuttavia voimia tai momenteja. Suora kinematiikka keskittyy selvittämään, missä asemassa työkalu on peruskoordinaatistoon nähden, kun tiedetään robotin nivelten asento. Peruskoordinaatistona käytetään yleensä robotin runkokoordinaatistoa. Robotin asento voidaan ratkaista suoran kinematiikan avulla, mikäli rakenteen geometria tunnetaan. Jotta suoran kinematiikan ratkaiseminen on mahdollista, tulee tietää jäsenten pituudet, nivelsiirtymä, nivelkulma sekä jäsenten kiertymä toisiinsa nähden. (14.)

Käänteiskinematiikka on robotiikan laskentamenetelmä, jolla pyritään vastaamaan kysymyksiin robotin moottoreiden liikkeen suuruudesta ja nopeudesta. Käänteiskinematiikan tavoitteena on ratkaista robotin nivelten asemat, joilla työkalu saadaan haluttuun tavoitepisteeseen. Laskennassa tulee ottaa huomioon robotin geometria sekä robotin rakenteen osien eli jäsenten pituudet. Käänteiset kinemaattiset tehtävät voivat olla vaikeita tai mahdottomia ratkaista, sillä ratkaisua ei aina ole tai niitä voi olla useita (14).

Toimilaite voi ohjata robotissa joko kiertoniveltä tai siirtoniveltä. Kiertonivel voi olla esimerkiksi rataspari, jolla muutetaan robotin jäsenen kiertoa. Toinen vaihtoehto on siirtonivel, joka voi koostua esimerkiksi ruuviparista. Siirtonivelen avulla robotin asentoa pystytään muuttamaan jäsenen pituuden tai kiertoon vaikuttamalla. (14.)

Robotin käänteiskinematikka voidaan laskea monella eri tavalla, mutta Jacobin matriisin käyttö on vakiintunut pitkien kinemaattisten ketjujen sovelluksissa (kuva 1). Jacobin matriisilla kuvatuilla lineaari- ja kulmanopeusvektoreilla päästään nykyisestä asemasta haluttuun loppuasentoon. (15.) Matriisi kertoo, miten minkä tahansa rakenteen jäsenen aseman muuttaminen vaikuttaa päätepiirteen asemaan. Kun robotille luodaan liikeratoja, sen lineaari- ja kulmanopeusvektorit voidaan selvittää Jacobin matriisin avulla liikuttamalla matriisin kulmavaikuttajaa pienin askelin kohti haluttua pistettä. (16.)

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_x}{\partial \theta_A} & \frac{\partial p_x}{\partial \theta_B} & \frac{\partial p_x}{\partial \theta_C} \\ \frac{\partial p_y}{\partial \theta_A} & \frac{\partial p_y}{\partial \theta_B} & \frac{\partial p_y}{\partial \theta_C} \\ \frac{\partial p_z}{\partial \theta_A} & \frac{\partial p_z}{\partial \theta_B} & \frac{\partial p_z}{\partial \theta_C} \end{bmatrix}$$

KUVA 1. Jacobin matriisi kolmiulotteisessa tilassa (17)

Robotinohjauksessa käytetään yleensä useita koordinaatistoja, kuten rungon koordinaatistoa ja työpisteen eli TCP:n koordinaatistoa. Koordinaatistomuutoksien tekeminen matriisilaskennan avulla on mielekäs ratkaisu, sillä koneohjaus pystyy tekemään muunnokset tehokkaasti ja reaaliaikaisesti. Erilaiset koordinaatistot helpottavat robotin ohjelmoitavuutta ja lisäävät käyttäjäturvallisuutta. (14.)

## 4.2 Liikkeen tuottaminen robotissa

Liikkeen tuottaminen robotissa tapahtuu useimmiten moottoreiden avulla. Lisäksi liikkeen tuottamiseen voidaan raskaissa teollisuussovelluksissa käyttää muun muassa hydraulikkaa, eli pumppu-toimilaite-yhdistelmää (18). Ota-laita-sovelluksissa liikenopeudet ovat suuria ja kuormat maltillisia, minkä vuoksi tässä työssä keskitytään voiman tuottamiseen moottoreiden avulla. Moottorin asennotieto lasketaan käänteiskinematikkamallin mukaan, ja ohjaussignaali välitetään ohjauskomponenttien kautta moottorille.

Robottisovelluksissa käytetään useimmiten servomoottoreita niiden ylikuormitettavuuden, paikoitustarkkuuden ja monikäyttöisyyden vuoksi. Servomoottori muodostaa yhdessä anturin ja servo-ohjaimen kanssa suljetun säätöjärjestelmän. Servomoottorin kanssa tarvitaan aina servo-ohjain,

jonka tehtävänä on tarkkailla moottorinaseman ja tavoiteaseman välistä asentoeroa ja ohjata mahdollinen korjausliike. (14.) Mikäli servomootoria poikkeutetaan ulkoisella voimalla tavoiteasemastaan, pyrkii se palauttamaan asemansa. Servomootorit on yleensä varustettu absoluuttiantureilla, minkä vuoksi niiden paikkatieto säilyy esimerkiksi laitteen sammutuksesta tai sähkökatkoksesta huolimatta. Servomootorit ovat monikäyttöisiä ja useimmiten toimivin ratkaisu automaatiosovelluksissa. (19.)

Askelmootoreita käytetään pienemmän paikoitustarkkuuden automaatiosovelluksissa. Askelmootorit ovat mootoreita, joita ohjataan nimensä mukaisesti askel kerrallaan. Moottorin askellus tapahtuu jännitepulsseilla. Moottorin asema voidaan laskea annetuista pulsseista, jolloin moottorin aseman selvittämiseksi ei tarvita takaisinkytkentää. (14.) Askelmootoreita suositetaan automaatiosovelluksissa niiden edullisuutensa ja painoonsa suhteutettuna hyvän vääntömomentin vuoksi. Askelmootorit ovat myös kokonsa puolesta kilpailukykyisiä verrattuna servomootoreihin. Askelmootoreissa pulssitieto katoaa sammuttamisen yhteydessä. Tämän vuoksi tarkan paikoituksen sovelluksissa, esimerkiksi CNC-jyrsimissä, askelmootorilla ajatut akselit ajetaan käynnistyksen yhteydessä referenssipisteeseen rajakytkintä vasten. Ylikuormitustilanteessa askelmoottori hukkaa asematietonsa, minkä vuoksi se ei sovellu tässä työssä valmistettavaan laitteistoon. (20.)

### 4.3 Takaisinkytkentä

Takaisinkytkentä on merkittävä osa automaatio suunnittelua, koska sen avulla ohjausjärjestelmälle saadaan tieto liikeakselien asennosta kullakin hetkellä. Tätä tietoa tarvitaan muun muassa kinematiikkalaskennassa. Takaisinkytkennän avulla myös korjataan ohjaussignaalia moottorin todellisen aseman mukaan. Törmäyksen tunnistaminen voidaan tehdä takaisinkytkennän avulla tarkkailemalla moottorilta tulevia virtapiikkejä. (21.) Servomootoreiden jättämää seuraamalla voidaan huomata vääntömomenttirajan ylittyminen tai mahdollinen törmäys.

Takaisinkytkennän tarkkailuun käytettäviä antureita ovat pulssianturi, absoluuttianturi sekä resolveri. Absoluuttianturi on useissa käyttökohteissa käyttökelpoisen sen vuoksi, ettei se hukkaa asemansa virran katketessa. Pulssianturi saattaa hukata asemansa, jolloin sen nollaamiseksi robotin tulee ajaa nollassipisteeseensä. Resolveri on analoginen asema-anturi, joka tuottaa analogista asentosignaalia. Robottiikassa on käytetty resolvereita, mutta nykyään käytetään enemmän edellä mainittuja optisia antureita. (14.)

## 5 MEKANIKKASUUNNITTELU

### 5.1 Rakenne

Tässä työssä käsiteltävä robotti vastaa kinemaattiselta malliltaan eniten delta-robottia (kuva 2), mutta voiman välittämiseksi käytetään sauvojen sijaan vaijereita. Rakenteen suunnittelussa on pyritty suureen työalueen kattamiseen säilyttäen kevyen rakenteen. Rakennerratkaisulla tavoitellaan kilpailukykyisyyttä suhteessa kuormakeventimiin ja olemassa oleviin robottiratkaisuihin.



KUVA 2. ABB delta-robotti (22)

Työssä testataan järjestelmästä kahta erilaista versiota. Ensimmäisessä näistä tarttuja on kiinnitetty suoraan vaijereiden päähän, jolloin robotissa on kolme liikeakselia X, Y ja Z (kuva 3). Toisessa rakennevaihtoehdossa rakenteeseen on lisätty vapaasti liikkuva puomisto, jolla tarttujaan saadaan lisättyä kiertöjäykkyyttä tai halutessaan neljäs liikeakseli eli kierto (kuva 4). Rakenne on delta-robotin rakenteesta poiketen neliskulmainen, jolloin työalueesta saadaan mahdollisimman laaja. Työssä suunnitellun robotin ja delta-robotin yhtäläisyys näkyy siis sauvojen ja vaijereiden asettelussa, kun taas robottien väliset erot liittyvät rungon rakenteeseen.



*KUVA 3. Vapaasti roikkuva rakennevaihtoehto*



*KUVA 4. Puomillinen rakennevaihtoehto*

Vapaasti roikkuva rakennevaihtoehto on tilatehokas ratkaisu, sillä se ei vaadi kiinteää runkoa (kuva 3). Moottorit voidaan sijoittaa yksittäisten tolppien päälle tai hallin kulmiin. Kun robotti ei ole käytössä, vaijerit voidaan nostaa vaakasuoraan katonrajaan. Vapaasti roikkuva rakenne mahdollistaa suuren työalueen kattamisen edullisesti, mutta toisaalta liikenopeus ja tarkkuus kärsivät. Tämä ratkaisu on erittäin kevytrakenteinen ja edullinen valmistaa, minkä vuoksi se soveltuu moneen sellaiseen käyttökohteeseen, jossa tehdään paljon esimerkiksi toistuvaa nostoliikettä.

Puomiston avulla saavutetaan parempi tarkkuus ja suurempi liikenopeus kuin puomittomalla rakenneratkaisulla (kuva 4). Puomillinen rakennevaihtoehto muistuttaa rakenteeltaan portaalirobottia, mutta niiden liikkeen tuottamisen periaatteet ovat erilaisia. Puomillisessa versiossa voima välitetään puomittoman version tavoin vaijereiden avulla, kun taas portaalirobotissa voima välitetään hammastangoilla, -hihnoilla tai ruuveilla. Vaijereilla välitetyn voiman etu on se, että puomiston tuki piste saadaan lähemmäksi nostopistettä, jolloin puomistosta tulee erittäin kevyt. Toisin kuin portaalirobotissa, vaijerivälitteinen rakenneratkaisu mahdollistaa sen, ettei puomiston joustoja ja värtähtelyjä tarvitse huomioida.

Sekä puomiton että puomillinen rakennevaihtoehto mahdollistavat törmäyksen tunnistamisen. Mikäli kaksi neljästä vaijerista löystyvät, tilanne tulkitaan törmäykseksi. Tämän vuoksi pienetkin törmäysvoimat tunnistetaan ja liike pysäytetään. Molempien rakennevaihtoehtojen etuja ovat keveys, edullisuus ja muokattavuus, kun taas huonona puolena on ohjauksen monimutkaisuus.

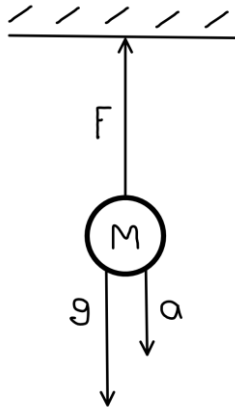
Samankaltaisen rakenteen käyttämistä on tutkittu kolmiulotteisen vaijerikameran luomiseksi. Sovellukselle olisi käyttöä esimerkiksi urheilutapahtumissa. Työt eroavat toisistaan kuitenkin ohjaustarkkuuden ja tekniikan osalta huomattavasti. Kolmiulotteisen vaijerikameran ohjauksessa riittää pienempi paikoitustarkkuus, mutta liikenopeudet ovat suuret, jopa 40 km/h. Tämän vuoksi vaijerikameran ohjaamiseksi on valittu taajuusmuuntaja ja voiman tuottamiseksi oikosulkumoottori. (23.)

## 5.2 Statiikan tarkastelu

Statiikan tarkastelussa tärkeää on selvittää vaijeriin kohdistuvat maksimivoimat moottoreiden ja vaijereiden mitoittamista varten. Ensin tulee selvittää, mitä voimia järjestelmään kohdistetaan ja

missä tilanteessa järjestelmän maksimivoimat saavutetaan. Tämä voi olla vaikea hahmotettava tilanteessa, jossa on useita erisuuntaisia voimia.

Vaijerivoiman laskemiseksi tulee tietää nostopisteeseen kohdistuva maksimivoima (kuva 5). Maksimivoimaan vaikuttaa nostettavan kappaleen massa sekä ylöspäin suuntautuva maksimikihtyvyys (kaava 1). Kun järjestelmän kuormitukset tiedetään, voidaan vaijerivoimat laskea.



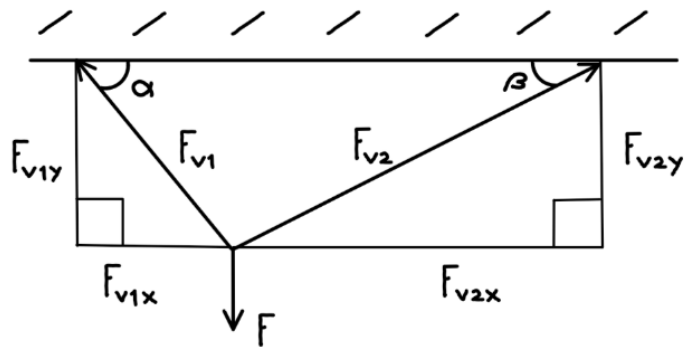
KUVA 5. Massan ja kiihtyvyyden aiheuttama voima nostopisteeseen

$$F := (g + a) \cdot m$$

$F$  = vaijeriin kohdistuva voima  
 $g$  = maan vetovoiman kiihtyvyys  
 $a$  = nostopisteen kiihtyvyys  
 $m$  = liikuteltavan kappaleen massa

KAAVA 1. Nostopisteeseen kohdistuva voima

Statiikan näkökulmasta tällaisessa sovelluksessa maksimivoima ilmenee silloin, kun vaijereiden tukipisteet ovat kauimmillaan toisistaan ja nosto suoritetaan työalueen ylärajalla. Tukipisteet ovat kauimmillaan toisistaan silloin, kun kuorma on kulmittaisten vaijereiden varassa. Kun vaijerikulma alkaa lähestymään vaakasuoraa, vaijerivoimien pystysuora komponentti pienenee (kuva 6). Tämän seurauksena vaijerivoima kasvaa eksponentiaalisesti. Vaijerivoima voidaan laskea, kun tiedetään vaijerikulmat sekä laitetta kuormittavan voiman suuruus (kaava 2).



KUVA 6. Kuva nostotilanteen statiikasta, jossa voimat on jaettu pysty- ja vaakasuoriin komponentteihin

$$F_{v1} = \frac{F}{\tan(\beta) \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)}$$

$F_{v1}$  = Vaijerivoima

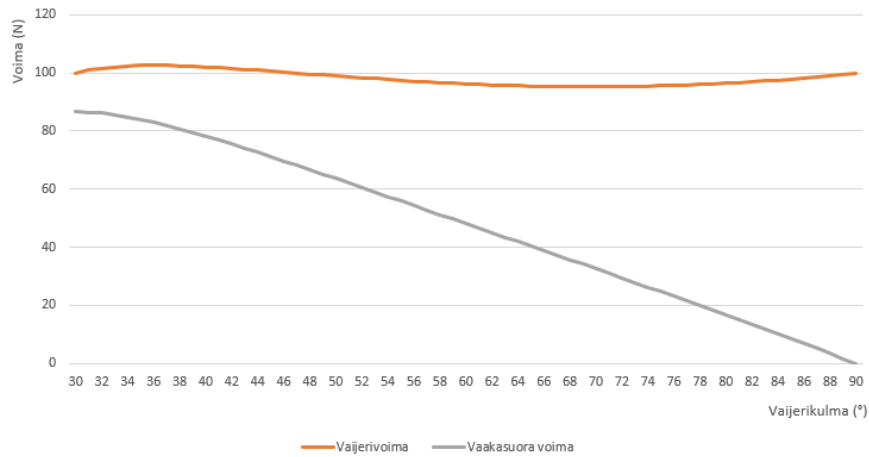
$F$  = Robotin kuormaus

$\alpha$  = Vaijerin 1 kulma

$\beta$  = Vaijerin 2 kulma

KAAVA 2. Vaijerivoiman laskenta (liite 1)

Järjestelmän maksimikuormituksen rajoittamiseksi vaijereiden kulmien  $\alpha$  ja  $\beta$  minimiarvoiksi on määritetty 30 astetta, kun kuorma on työalueen keskellä. Kun nostopiste on keskellä, molempien vaijereiden kuormitukset ovat yhtä suuret. Jos nostopiste viedään työalueen reunalle, eli  $\alpha$  tai  $\beta$  on 90 astetta, toinen vaijereista kantaa koko kuorman. Vaijerin maksimivoima ilmenee tilanteessa, jossa toinen vaijerekulmista on 36 astetta. Tällöin vaijerivoiman suuruus on 2,5 % suurempi verrattuna nostoon työalueen keskeltä tai reunalta (kuvaaja 1).



KUVAAJA 1. Vaijerivoiman ja sivuttaisvoiman kuvaaja eri vaijerikulmilla

Robotin toiminnan ja tarkkuuden kannalta on oleellista myös selvittää, miten paljon vaijerin riippuma luo virhettä ohjaukseen. Riippumalle on määritetty yhtälö, jonka avulla voidaan laskea, paljonko vaijerin oma paino aiheuttaa siihen pituuden muutosta (kaava 3). Laskennan avulla voidaan todeta, ettei vaijerin pituuden muutos ole tässä sovelluksessa merkittävä, sillä vaijerit ovat jatkuvasti jännittyneitä, ja käytettävien vaijereiden metrikohtainen massa on pieni.

$$D = \frac{H \left( \cosh \left( \frac{w \sqrt{h^2 + s^2}}{2H} \right) - 1 \right)}{w}$$

D = pituuden muutos  
 H = vaijerin kireys  
 h = päiden korkeusero  
 S = päiden etäisyys toisistaan  
 w = vaijerin massa metriä kohden

KAAVA 3. Vaijerin riippuman kaava (24)

Statiikan näkökulmasta robotin työalue rajoittuu siihen, milloin jonkin vaijerin voiman vaakasuora tai pystysuora komponentti menee nolaksi (kuva 6). Todellisuudessa työalue on hieman teoreettista työaluetta pienempi, sillä pystysuoraan kääntynyt vaijeri ei antaisi tukea nostettavalle kappaleelle tai ainakin merkittävästi rajoittaisi sen kiihdytysmahdollisuuksia (kuvaaja 1).

Vaijeriohjatussa robottiratkaisussa rakenne on kuormankantokyvyn ja liikenopeuden kompromissi, minkä vuoksi optimaalinen rakenne ja mittasuhteet voidaan selvittää statiikan avulla. Mitä suurempi järjestelmän korkeus on suhteessa leveyteen, sen suurempi kuormankantokyky on järjestelmällä

saavutettavissa. Suurempi liikenopeus saavutetaan taas sillä, että järjestelmän leveys on suurempi suhteessa sen korkeuteen. Kun järjestelmän mitat on päätetty, voidaan laskennallisesti määrittää maksimiliikenopeudet työalueen eri sektoreilla. Järjestelmä tulisi sijoittaa siten, että suurimmat liikenopeudet tapahtuisivat työalueen keskivaiheilla mahdollisimman ylhäällä. Maksimikuormauksen tulisi sen sijaan tapahtua työalueen keskellä mahdollisimman alhaalla. Käytännön testauksessa nähdään, onko liikenopeuksien rajoittamiselle tarvetta työn reunamilla, ja voidaanko eri nostokorkeuksille luoda erilaiset hyötykuormarajat.

### 5.3 Moottoreiden mitoituslaskenta

Testijärjestelmässä käytetty Beckhoffin servomoottori on korkeakiertoinen pienen vääntömomentin moottori, joka robottisovelluksessa toimiakseen tarvitsee suuren alennusvaihteen. Alennusvaihteella saadaan moottorin koko kierrosalue käyttöön sekä kasvatetaan vaijerikelan vääntömomenttia. Vaihteen välityssuhde voidaan laskea kaavalla (kaava 4).

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

$i$  = välityssuhde

$z_2$  = hammasluku toisiorattaalla

$z_1$  = hammasluku ensiorattaalla

$D_2$  = halkaisija toisiopyörällä

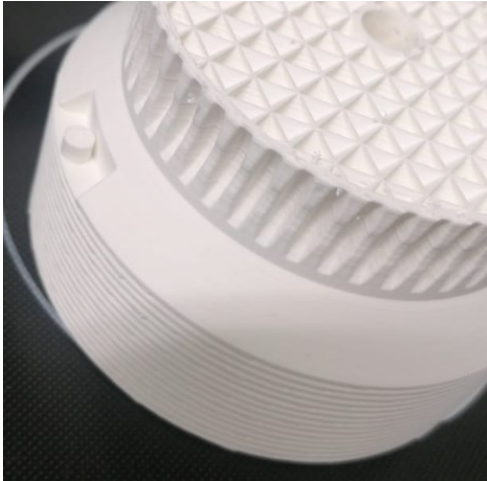
$D_1$  = halkaisija ensiöpyörällä

$n_2$  = pyörimisnopeus toisiorattaalla

$n_1$  = pyörimisnopeus ensiorattaalla

*KAAVA 4. Välityssuhteen laskenta (25)*

Moottorin voimansiirto kelalle toteutettiin kierukkavaihteella. Kela on yhdessä rataan kanssa samaa osaa, joka valmistettiin pikamallina (kuva 7). Kierukkavaihteella on alennusvaihte, jossa jokaisella ruuvin pyörytyksellä hammaspyörä liikaa yhteen hampaan verran eteenpäin. Tässä tulee kuitenkin huomioida ruuvin pääluku, eli mikäli käytössä on kaksipäinen ruuvi, alennussuhde puolittuu suhteessa yksipäiseen ruuviin. Testilaitteistossa vaihteen ruuvina toimii trapetsikierre, johon on sorvattu olakkeet laakeroinnille.



KUVA 7. Kierukkavaihteen PLA-muovista valmistettu hammaspyörä

Moottorin momentti- ja tehotarpeen laskemiseksi tuli ensin statiikan avulla selvittää vaihteen alennus, vaijerilta haluttu maksiminopeus sekä -voima (kaava 5). Momenttitarpeen laskemisessa huomioidaan myös hyötysuhde (kaava 6 ja 7). Hyötysuhteen huomioiminen korostuu muovi-metalliratasparilla, koska osien kitkakerroin on merkittävästi suurempi kuin ratasparilla, jossa metalli on metallia vasten.

$$M = \frac{F \cdot r}{i \cdot \eta}$$

M = moottorilta maksimimomentti  
F = voima vaijerissa  
r = kelan säde  
i = välityssuhde  
 $\eta$  = vaihteen hyötysuhde

KAAVA 5. Moottorin momenttitarpeen laskenta

$$P = \frac{F \cdot v}{\eta}$$

P = teho  
F = voima vaijerissa  
v = vaijerin nopeus  
 $\eta$  = vaihteen hyötysuhde

KAAVA 6. Moottoritehon laskenta vaijerin lineaarivoiman avulla

$$P = \frac{M \cdot w}{\eta}$$

P = teho

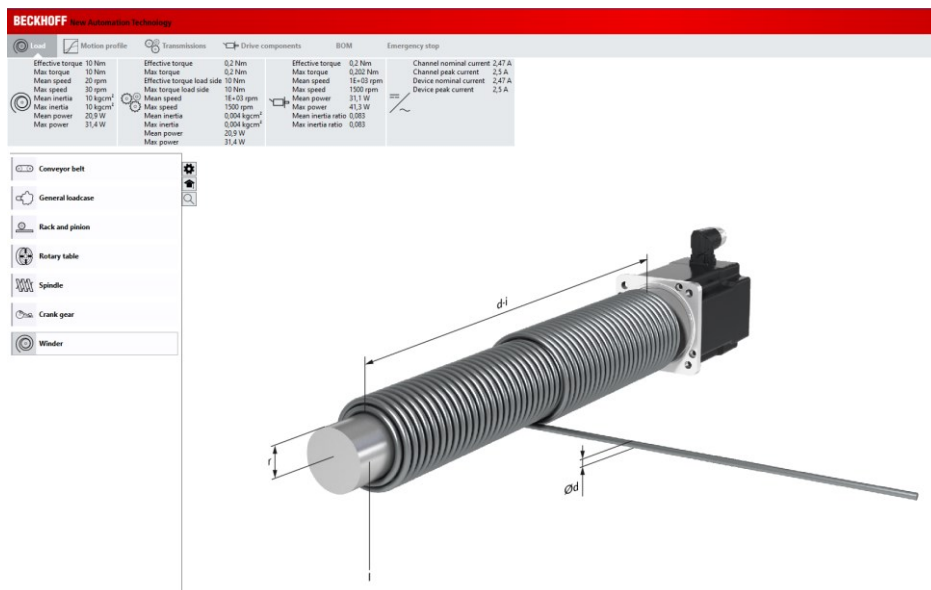
M = momentti vaijerikelalla

w = vaijerikelan kulmanopeus

$\eta$  = vaihteen hyötysuhde

KAAVA 7. Moottoritehon laskenta vaijerikelan momentin ja kulmanopeuden avulla

Moottorin ja sen ohjauskomponenttien valinnat tarkastettiin lopuksi vielä Beckhoffin TwinCAT Motion Designer -ohjelmalla (kuva 8). Ohjelmaan syötettiin kuormitusilanne ja -tapa sekä halutun alennusvaihteen tiedot. Tämän jälkeen ohjelmasta oli valittavissa moottorin kiihdytysprofiili, jonka avulla ohjelma laski käyttökohteeseen sopivimman moottorivaihtoehdon. Lisäksi ohjelmalla oli helppo valita moottorille sopiva servovahvistin ja virtalähde.



KUVA 8. TwinCAT Motion Designer

## 5.4 Valmistus

Prototyypin valmistuksessa painotettiin käytännöllisyyttä ja testitarkkuutta. Lisäksi rakenteessa pyrittiin kustannustehokkuuteen materiaalin käytön optimoinnilla sekä osien kokonaismäärää rajoittamalla. Kokoonpanossa käytettiin ruuviliitoksia, jolloin testilaitteisto voidaan purkaa tai sitä voidaan

muokata tarpeen vaatiessa. Testilaitteiston valmistusmateriaaleiksi valikoitui alumiini ja PLA-tulosteet. Alumiini valikoitui pääasialliseksi valmistusmateriaaliksi keveytensä vuoksi, erityisesti robotin puomistossa. Puomistolta vaaditaan ainoastaan kiertojäykkyyttä, minkä vuoksi massa puomistossa lisäisi vain moottoreita kuormittavaa massaa.

3D-tulosteita käytettiin ensimmäisessä prototyypissä kierukkavaihteen ja vaijerikelojen rakentamiseen. Näillä rakenneratkaisuilla pyrittiin edullisuuteen, mutta myös nopeaan saatavuuteen ja iterointiin. 3D-tulosteiden tulostamiseen käytettiin Crealityn Ender 3 - ja Ender 3 pro -mallisia tulostimia. Tulostimien ominaisuudet ovat keskenään yhtenäiset, minkä vuoksi suunnittelussa sopivien välysten ja tulostusarvojen valinta oli helppoa. Tulosteiden suunnittelussa tulostustarkkuuteen vaikuttaa kerrospaksuus; mitä suurempi on kerrospaksuus, sitä huonompi on tulosteen tarkkuus. Tulostussuunta on tärkeä huomioitava tekijä G-koodia luotaessa. Tuloste on kestävimillään, kun siihen kohdistetaan voimaa tulostettavan tason suuntaisesti. 3D-tulostetta suunniteltaessa on hyvä huomioida, että akselin ja reiän väliin tulee suunnitella 0,2 mm välys. Näin suunniteltaessa osien välille saadaan sopiva ahdistussovite.

Pikamallien lisäksi prototyypin valmistamisessa käytettiin alumiinista laserilla leikattuja ohutlevyosia sekä neliöprofiileita. Tarkan toleranssin ohutlevyleikkeiden tilaamisessa voidaan käyttää valmistajan antamia suunnitteluohjeita. Tähän prototyyppiin osat tilattiin tutulta valmistajalta, jolloin sopivat välykset tiedettiin ennestään. Oman kokemuksen mukaan toimivaksi välykseksi on näytetty 0,5 mm. Tällöin osat sopivat jäysteenpoiston jälkeen napakasti yhteen, mahdollistaen tarkan kokoonpanon.

Prototyypin puomiston suunnittelussa oli useita laakerointivaihtoehtoja, joista otollisimpia olivat liinaarijohde tai itse suunniteltu laakerointi. Vertailun tuloksena puomeille suunniteltiin laakerointi, jossa laakerit kiinnitettiin pultein ohutlevyosiin. Tämä mahdollisti laakereiden vapaan asettelun sekä järjestelmän vaivattoman laajentamisen kulloisenkin testitilanteen mukaan. Laakerit aseteltiin mahdollisimman kauas toisistaan, jotta puomistosta saataisiin mahdollisimman kevytliikkeinen ja tukeva.

## 6 AUTOMAATIOSUUNNITTELU

### 6.1 Ohjelmointi

Tässä työssä päätavoite ohjelmoinnin osalta oli luoda robotin yksinkertaistettu ohjaus. Ohjausjärjestelmän avulla robotin pitää pystyä ajamaan ”pisteestä pisteeseen” -liikkeitä erilaisilla liikenopeuksilla ja kiihtyvyyksillä. Valmiilla ohjelmalla voidaan todentaa niin ohjauksen kuin fyysisen laitteiston toiminta testiajojen muodossa.

Tavoitteiden hahmottaminen ja tarkka rajaaminen olivat tärkeitä työvaiheita ennen varsinaisen ohjelmoinnin aloittamista. Toimintojen hahmottamiseksi voi olla tarvetta luoda esimerkiksi vuokaavio. Tässä työssä selkeämpi ratkaisu oli listaus, joka laadittiin vaadittavien ominaisuuksien mukaan. Listausta toimi hyvin ohjelmoinnin tukena, ja siihen oli helppo palata työn edetessä.

Ohjelmointi tapahtui Beckhoffin TwinCAT 3 -ohjelmointiympäristössä Structured Text -ohjelmointikielellä (kuva 9). Selkeä etu TwinCAT 3:n käytössä oli esimerkiksi komponenttien skannaus, joka toimi saumattomasti käytettäessä Beckhoffin komponentteja. Aiempi kokemus Structured Text -ohjelmointikielestä vaikutti ohjelman valintaan. Ohjelmointikieli soveltui robotin ohjauksen luomiseen hyvin etenkin joustavuutensa ja monipuolisuutensa vuoksi. TwinCAT 3 -ohjelmointiympäristö sisältää myös ohjelmointia helpottavia simulointi- ja debuggaustoimintoja, jotka ovat suureksi avuksi ohjelman laajentuessa.

Ohjelma rakennettiin parametrisesti, jotta se voidaan mukauttaa erilaisiin testijärjestelmiin vaivatonta. Ohjelmoinnissa pyrittiin pitämään rakenne selkeänä ja jaottelemaan ohjaus siten, että sen laajentaminen olisi mahdollisimman vaivatonta. Esimerkiksi konenäön ja käyttöliittymän liittäminen myöhemmissä kehitysvaiheissa tulisi olla mahdollista ilman aiemman ohjauksen merkittävää muuttamista.

Ohjelmoinnissa käytetään ohjelmarakenteita luettavuuden, muokattavuuden ja selkeyden parantamiseksi. Ohjelma rakentuu pääohjelmasta, aliohjelmista ja toimilohkoista. Pääohjelmaan tuodaan erilaisten aliohjelmien kootut tiedot ja toiminnot. Aliohjelmat suorittavat useimmiten pääohjelman laskentaa tai toimintoja. Monessa sovelluksessa tehokkain tapa tiedonsiirtoon eri ohjelmien välillä

on globaalien muuttujien käyttö. Toimilohkot ovat tehokas tapa käyttää globaaleja muuttujia (kuva 9 ja 10). Globaalien muuttujien arvot voidaan kirjoittaa mistä tahansa ohjelmasta, välttämättä kuitenkin päällekkäiskirjoittamista. Beckhoffilla on kattavat toimilohkokirjastot, joita voidaan käyttää monissa automaatio- ja robottisovelluksissa, kuten moottorinohjauksessa. Ohjelmarakenne on aina sovel-luskohtainen, ja rakenne voi muuttua ohjelmointiprojektien edetessä.

```
//Lukee jatkuvasti moottorin 1 asentoa
servoPosition1(
    Axis:= servoRef1,
    Enable:= TRUE ,
    Valid=> ,
    Busy=> ,
    Error=> ,
    ErrorID=> ,
    Position=> GVL_motorValues.cableLenght1 );
```

*KUVA 9. Beckhoffin ohjelmakirjastosta saatava toimilohko, jolla luetaan servomoottorin asentoa Structured Text -ohjelmointikielellä*

```
//Laskee kaapelin 1 pituuden päätepisteessä
cableLenghtAtEndpoint1(
    currentPos1:= GVL_motorValues.targetPosX ,
    currentPos2:= GVL_motorValues.targetPosZ ,
    currentPos3:= GVL_motorValues.targetPosY ,
    targetPos1:= GVL_motorPositions.M1PosX ,
    targetPos2:= GVL_motorPositions.M1PosZ ,
    targetPos3:= GVL_motorPositions.M1PosY ,
    distanceBetweenPoints=> GVL_motorValues.servoTargetPos1 );
```

*KUVA 10. Itse ohjelmoitu toimilohko, joka selvittää vaijerin pituuden muutostarpeen*

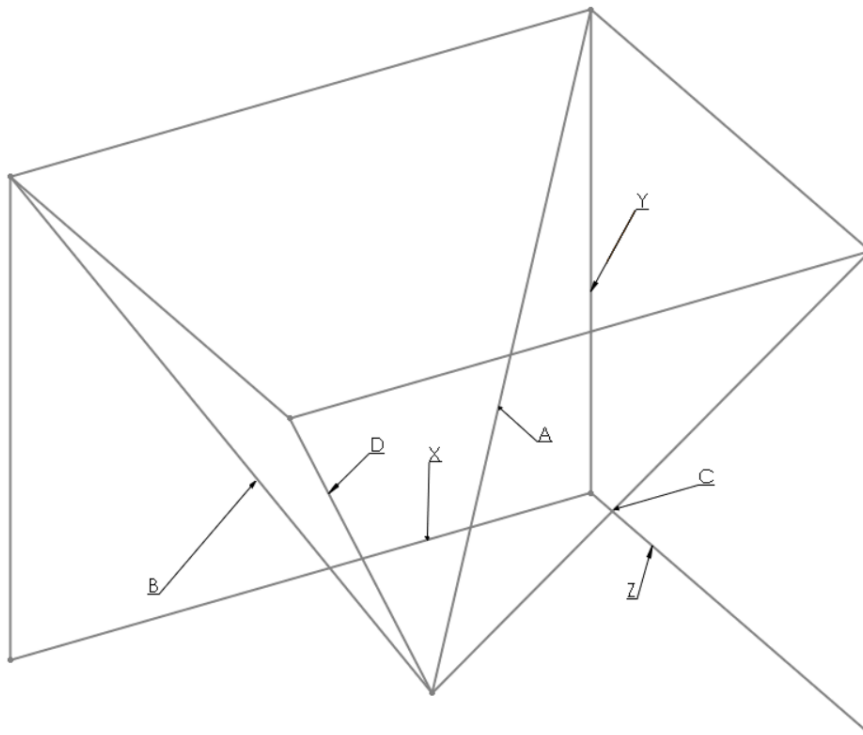
Robotin ohjauksen rakenne on pääpiirteittäin seuraavanlainen: Ensimmäisenä ohjaukselle syötetään uusi tavoiteasema ja haluttu liikenopeus. Käänteiskinematiikkalaskennan mukaan sovellus-ohjelma laskee moottorin pyörimistarpeen sekä liikeprofiilin. Seuraavaksi ajo voidaan käynnistää. Sovellusohjelma seuraa moottoreilta saatavaa takaisinkytkentätietoa, jonka avulla se seuraa py-syykö moottorin liikerata halutulla profiililla. Mikäli moottorin liikerata ei pysy halutulla profiililla, kor-jaa ohjaus moottorin liikettä kiihdyttämällä tai hidastamalla sitä. Jokaiselle moottorille suoritetaan samankaltaista seurantaa, ja mikäli jonkin arvossa on liian suuri poikkeama, ajo pysäytetään. Kun liike pääsee uuteen pääteasemaansa, moottoreilta tulee tieto ohjaukselle pääteaseman saavutta-misesta ja järjestelmä on valmiina vastaanottamaan uuden tavoiteaseman.

## 6.2 Kinematiikkaratkaisu

Tässä opinnäytetyössä käytettiin Beckhoffin automaatiotekniikkaa. Beckhoff tarjoaa useita erilaisia valmiita kinematiikkapohjia robottien ohjelmoimiseksi. Niitä on olemassa esimerkiksi delta-roboteille ja kiertyvänivelisille roboteille. Beckhoffilla ei kuitenkaan ollut tarjolla valmista kinematiikkaratkaisua tässä työssä suunniteltavan robotin rakenteelle, minkä vuoksi se oli luotava itse.

Käänteiskinematiikan luominen alkoi tilanteen hahmottelemisella. Piirustusten avulla sai hahmotettua hyvän yleiskuvan robotin toimintaperiaatteesta. Käänteiskinematiikkamallin luominen aloitettiin 2D-versiolla Mathcadia käyttäen. Mathcad on matemaattinen laskentaohjelma, jolla pystytään parametrisesti ratkaisemaan matemaattisia laskutoimituksia. Ohjelma mahdollisti kinematiikkamallin testaamisen ja muokkaamisen helposti tarpeen mukaan. 2D-toimintaa testattiin testiajoilla, joiden tarkoituksena oli tehdä väliarvio laitteen toimintamahdollisuuksista. 2D-version käänteiskinematiikkamalli on huomattavasti yksinkertaisempi verrattuna 3D-versioon.

3D-käänteiskinematiikkamalliin siirtyessä käytettiin apuna sekä Mathcad- että SolidWorks-ohjelmia. Mathcad yhdessä SolidWorksin kanssa helpotti käänteiskinematiikan luomista, sillä laskentaa pystyi testaamaan ennen koodiin siirtymistä. SolidWorks-ohjelmalla tarkistettiin, että Mathcad-laskenta toimisi laitteiston kanssa. Yksinkertaistettu rakenteen SolidWorks-malli mahdollisti rakenteen simuloinnin (kuva 11). Malli auttoi rakenteen toiminnan ja laskennan havainnollistamisessa. Malli piirrettiin siten, että se oli helposti muutettavissa, ja sen avulla pystyi tutkimaan rakenteen eri rajatilanteita. Tällaisia ovat esimerkiksi nostotilanteet työalueen reunoilla sekä ylärajalla. SolidWorks auttoi myös hahmottamaan robotin statiikkaa 3D-tilanteessa, mikä olisi ilman ohjelmaa saattanut olla haastavaa.



KUVA 11. SolidWorks-ohjelmalla mallinnettu käänteiskinematikkamalli

Käänteiskinematikkamallin kääntäminen Mathcadista TwinCAT 3:n ymmärtämään muotoon tehtiin manuaalisesti. Matemaattisten operaattoreiden käyttö tekstimuotoisessa ohjelmoinnissa eroaa asettelultaan matemaattisesta laskentaohjelmasta (kuva 12 ja 13). 3D-ohjauksessa matemaattinen malli oli jo huomattavan laaja, minkä vuoksi käännytyö vaati paljon aikaa. Lisäksi ohjelmassa käytettiin useita lisämuuttujia väliarvojen tallentamiseen oikean laskujärjestyksen ja ohjelma luetavuuden takaamiseksi. Vaihtoehtoisesti matemaattisen mallin tekemiseen olisi voitu käyttää MATLAB-ohjelmaa. Ohjelman laskentaa voidaan lukea suoraan TwinCAT 3:een saatavalla laajennuksella, jota käyttämällä ylimääräiseltä työvaiheelta olisi välttytty.

#### Apumuuttujan laskenta

$$frontH := \sqrt{cableLenght1^2 - currentCordinateX^2} = 2753.618$$

KUVA 12. Käänteiskinematikkamallin apumuuttujan laskenta Mathcadilla

```
//Apumuuttujan laskenta
frontH := SQRT(EXPT(GVL_motorValues.cableLenght1,2)-EXPT(currentCordinateX,2));
```

KUVA 13. Käänteiskinematikkamallin apumuuttujan laskenta TwinCAT 3 -ohjelmassa

## 7 TOIMINNAN TESTAUS

### 7.1 Toteutus

Toiminnantestauksen tarkoituksena on selvittää fyysisen laitteiston avulla, miten laskennalliset laitteen raja-arvot toteutuvat. Käytännön kokeilla pyrittiin osoittamaan laitteiston toimivuus. Testauksessa pyrittiin mahdollisimman kattaviin testituloksiin, jotta järjestelmän mahdolliset puutteet ja rajoitteet huomattaisiin jo testilaitteiston avulla.

Järjestelmän testauksessa tutkittiin kahta suurempaa kokonaisuutta, joita ovat yleinen toimivuus ja raja-arvot. Yleisen toimivuuden testaamisessa haluttiin selvittää periaatetasolla, toimiiko järjestelmän ajaminen yhdessä vapaasti liikkuvan puomiston kanssa, pysyvätkö liikkeet toivotulla tarkkuusalueella ja miten tukevalta nostopiste tuntuu. Raja-arvojen testaamisessa keskityttiin tekemään testejä järjestelmän laskennallisilla maksimiarvoilla. Testeillä etsittiin vastausta muun muassa siihen, onko järjestelmä stabiili, ja miten se reagoi erilaisiin kiihdytyksiin ja ajoihin suurella liikenopeudella.

Testauksissa edettiin vaiheittain. Testit aloitettiin ensin tyhjillä vaijerikeloilla, jotta niiden pyörimissuunta voitaisiin todeta olevan oikea. Testeissä huomattiinkin, että kahden kelan pyörimissuuntaa tuli kääntää, jolloin tehtiin tarvittavat ohjelmistomuutokset. Seuraavissa testeissä vaijerit kiinnitettiin keloille, mutta puomiston sijaan niiden toiset päät kiinnitettiin punnuksiin. Tällä konfiguraatiolla ajettaessa huomattiin, että yhden kelan liike oli suhteettoman pieni verrattuna muihin keloihin. Ohjelmaa tarkasteltaessa huomattiin, että eräs testijärjestelmän mittaparametri ei ollut päivittynyt ohjelmaan ja aiheutti siten moottorinohjaukselle virheellistä arvoa. Seuraavassa testissä kiinnitettiin vaijerit puomistoon. Ajot tehtiin aluksi alennetulla liikenopeudella ja lyhyillä liikematkoilla, joita alettiin vaiheittain kasvattamaan. Testiajoissa huomattiin, että ensimmäisenä periksi antoi vaijerin kiinnitys puomistosta, joka toimii järjestelmän sulakkeena.

## 7.2 Tulokset

Perustoimintoja testattaessa huomattiin, että laitteen perustoiminnot toimivat toivotulla tavalla. Puomiston toteutus oli onnistunut. Vapaasti liikkuva puomisto toimii tarpeeksi kevyesti, jotta se ei esimerkiksi jumiudu kesken ajon tai väännä tarpeettomasti. Myös laakereiden välyksien säätäminen onnistui hyvin, mikä edesauttoi puomiston toimivuutta. Seuraavassa laiteversiossa oman laakeroinnin voisi kuitenkin korvata lineaarijohteella osien määrän pienentämiseksi.

Toimintaa testatessa huomattiin, että liiallisia värähdyksiä ei ilmene millään robotin toiminnallisella nopeusalueella, ja nostopiste vaikuttaa stabiililta. Vaijerit kelautuvat odotetulla tavalla ja todennäköisesti hakeutuvat entistä paremmin paikoilleen vielä myöhemmissä ajoissa kulumisen myötä. Alennusvaihteen välityssuhde on sellainen, että moottorin kierrosnopeus riittää nopeiden ajojen suorittamiseen, mutta vääntömomenttia riittää kuitenkin myös nostojen tekemiseen. Puomin omasta massasta aiheutuva kuormitus vaijeriin lisäsi vaijerivoimaa, mikä paransi kelaustarkkuutta.

Seuraavana työvaiheena tämän opinnäytetyön ulkopuolella on liikesarjojen ajaminen järjestelmällä. Jatkokehittämisessä ohjelmaan tulee tehdä kompensointi, jolla huomioidaan vaijereiden kiinnityspisteiden etäisyys nostopisteestä. Lisäksi käyttöliittymä parantaisi laitteen käyttäjäystävällisyyttä huomattavasti. Myöhemmässä vaiheessa järjestelmää voidaan testata yhdessä konenäön tai ulkoisen anturoinnin ja toimilaitteiden kanssa. Tämän jälkeen järjestelmää voitaisiin käyttää markkinointitarkoituksessa simuloimaan asiakkaalle järjestelmän toimintaperiaatetta, minkä jälkeen voitaisiin valmistaa asiakkaan tarpeisiin vastaava järjestelmä.

## 8 YHTEENVETO

Työssä suunniteltiin ja testattiin robotin toimintaa pienoisjärjestelmällä toimintaperiaatteen todentamiseksi. Työn tavoitteena oli tehdä järjestelmän mekaniikka- ja automaatio suunnitelmat, jotka mahdollistavat konseptin testauksen ja toteutuksen. Järjestelmälle tehtiin useita testiajoja ja testejä mahdollisten muutostarpeiden huomioimiseksi ja korjaamiseksi sekä toimintaperiaatteen todentamiseksi.

Mekaniikkasuunnittelussa haastetta aiheutti pyrkimys pulttiliitoksin koottavaan rakenteeseen, mikä mahdollistaisi järjestelmän purkamisen, kokoamisen sekä sen rakenteen muokkaamisen. Automaatio suunnittelussa suurin työ oli käänteiskinematiikan tekemisessä, sillä vastaavasta käänteiskinematiikkamallista ei ollut valmista ratkaisua saatavilla. Ongelma onnistuttiinkin ratkaisemaan vertaamalla rakennetta delta-robottiin.

Projekti eteni tasaiseen tahtiin, ja aikataulutavoitteessa pysyttiin. Mekaniikan ja pikamallinnettujen osien valmistamiseen kului kuitenkin odotettua enemmän aikaa. Lisäksi pikamallien viimeisteleminen ja ohjelmaparametrien muuttaminen testejä varten vaati oman aikansa.

Työn edetessä yhteistyö toimeksiantajan ja ohjaavan opettajan kanssa toimi hyvin. Tässä projektissa kommunikointi yhdessä toimeksiantajan kanssa oli tärkeää, jotta kaikilla osapuolilla oli yhteinen näkemys työn tavoitteista ja laitteen toimintavaatimuksista. Lisäksi keskustelua käytiin muun muassa Beckhoffin edustajien kanssa.

Tämä opinnäytetyö saavutti sille asetetut tavoitteet, ja työ valmistui hyvin, vaikka aihe oli melko laaja sisältäen sekä mekaniikkasuunnittelua, automaatio suunnittelua, valmistusta että toiminnan testausta. Opinnäytetyötä tehdessä ongelman ratkaisemiseen käytettiin useita erilaisia ohjelmistoja ja menetelmiä. Aiempi kokemus ohjelmien käytöstä ja mekaniikkasuunnittelusta mahdollisti työssä onnistumisen. Työ opetti kuitenkin myös paljon uutta ja antoi valmiuksia aiemman osaamisen soveltamiseen.

Opinnäytetyön avulla saatiin kerättyä tarpeeksi pohjatietoa järjestelmän toiminnasta jatkokehitystä varten. Järjestelmä siis todettiin toimivaksi, mutta myös muutostarpeet huomattiin. Tulevaisuudessa järjestelmällä tullaan tekemään lisätestausta, ja toiminnan sujuvoittamiseksi ohjaukseen tehdään joitain muutoksia.

## LÄHTEET

1. Wallen, Johanna 2008. The history of industrial robot. Technical report from Automatic Control at Linköpings universitet 8.5.2008. Hakupäivä 22.9.2022. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:316930/fulltext01.pdf>.
2. Nyman, Sakari 2019. Kokoonpanolinjan automatisoinnin syöttölaite- ja layout-suunnittelu. Oulun ammattikorkeakoulu. Konetekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 23.9.2022. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/261116/Nyman\\_Sakari.pdf?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/261116/Nyman_Sakari.pdf?sequence=2).
3. Holkkola, Johannes 2013. Robottien etäpalvelu. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Hakupäivä 26.11.2022. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/61788/Robottien%20etapalvelu.pdf?sequence=1>.
4. D'Imperio, Simone, Berutti, Teresa Maria, Gastaldi, Chiara & Soccio, Pietro 2022. Tunable Vibration Absorber Design for a High-Precision Cartesian Robot. Hakupäivä 23.9.2022. <https://doi.org/10.3390/robotics11050103>.
5. Kitunen, Petteri 2016. SCARA-robottisolun käyttö ja kunnostus. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Hakupäivä 26.11.2022. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/111918/SCARA-robottisolun%20kaytto%20ja%20kunnostus.pdf?sequence=1>.
6. Aaltonen, Iina, Marstio, Ilari & Salmi, Timo. Refining levels of collaboration to support the design and evaluation of human-robot interaction in the manufacturing industry. Hakupäivä 23.9.2022. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.214>.
7. Metalliteollisuuden standardoimisyhdistys ry 2022. Riskin arviointi. Hakupäivä 26.11.2022. <https://metsta.fi/koneturvallisuuden-standardit-metsta/turvallisuusstandardien-laadintaperiaatteet/riskin-arviointi/>.
8. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2022. Koneita koskevat vaatimukset. Hakupäivä 26.9.2022. <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/koneet>.
9. Suomen standardoimisliitto 2022. Mitä on standardi? Hakupäivä 26.9.2022. <https://sfs.fi/standardeista/mika-on-standardi/>.
10. Metalliteollisuuden standardoimisyhdistys ry 2022. Koneturvallisuusstandardien hierarkia. Hakupäivä 26.9.2022. <https://metsta.fi/koneturvallisuuden-standardit-metsta/standardisointi/standardien-hierarkia/>.
11. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2022. Sähkölaitteiden vaatimukset. Hakupäivä 29.9.2022. <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/sahkolaitteet>.

12. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2022. CE-merkintä. Hakupäivä 29.9.2022. <https://tu-kes.fi/tuotteet-ja-palvelut/ce-merkinta>.
13. Välimäki, Pasi 2015. Delta-robotin mekaniikkasuunnittelu. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Automaatiotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 14.11.2022. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/90191/Valimaki\\_Pasi.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/90191/Valimaki_Pasi.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
14. Airila, Mauri 1999. Mekatronikka. Helsinki: Hakapaino Oy.
15. Buss, Samuel 2009. University of California. Department of Mathematics. Hakupäivä 14.11.2022. <https://mathweb.ucsd.edu/~sbuss/ResearchWeb/ikmethods/iksurvey.pdf>.
16. Fält, Simo 2015. Liikkeenhallinta tietokoneanimaatiossa. Tampereen yliopisto. Tietojenkäsittelyn tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 16.11.2022. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/98197/GRADU-1448969873.pdf?sequence=1>.
17. Bermudez, Luis. Overview of Jacobian IK. Hakupäivä 14.11.2022. <https://medium.com/unity3danimation/overview-of-jacobian-ik-a33939639ab2>.
18. EVS 2022. Hydraulic Robotic Arm in Manufacturing Industry: A Definitive Guide. Hakupäivä 16.11.2022. <https://www.evsint.com/hydraulic-robotic-arm-in-manufacturing/>.
19. Heinonen, Samuli 2020. Servo-ohjauksen suunnittelu, ohjelmointi ja toteutus koulutus- ja demokäyttöön. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Hakupäivä 26.11.2022. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/335771/Heinonen\\_Samuli.pdf?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/335771/Heinonen_Samuli.pdf?sequence=2).
20. Finnilä, Aaron 2010. 3-akselisen jyrsimen CNC-ohjauksen toteutus. Vaasan ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Hakupäivä 26.11.2022. <https://core.ac.uk/download/pdf/38013264.pdf>.
21. Korhonen, Jaakko 2011. Servotekniikka toisen asteen opetuksessa. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Tekniikan ja liikenteen ala. Opinnäytetyö. Hakupäivä 16.11.2022. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/29482/ONT\\_Servot\\_v2\\_JaakkoKorhonen\\_YAMK.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/29482/ONT_Servot_v2_JaakkoKorhonen_YAMK.pdf?sequence=1).
22. Fraser, Roy 2021. Kuvakaappaus. Product Presentation IRB 390 FlexPacker. Hakupäivä 22.9.2022. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A9974&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
23. Lindström, Kari 2012. Sähkökäyttöjen suunnittelu kolmiulotteinen vaijerikamera. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 18.11.2022. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/44583/Lindstrom\\_Kari.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/44583/Lindstrom_Kari.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

24. Wolfram 2018. Inclined Span Catenary Sag. Hakupäivä 9.11.2022. <https://resources.wolframcloud.com/FormulaRepository/resources/Inclined-Span-Catenary-Sag>.
25. Oravasaari, Timo 2013. Moottorin suorahampaisen jakohammaspyörästön suunnittelu. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Hakupäivä 26.11.2022. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/58961/Oravasaari\\_Timo.pdf?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/58961/Oravasaari_Timo.pdf?sequence=2).

# LIITTEET

# VAIJERIVOIMAN LASKENTA

Vaijerivoima 1	$F_{v1}$	
Vaijerivoima 1 vaakasuora komponentti	$F_{v1x}$	
Vaijerivoima 1 pystysuora komponentti	$F_{v1y} = \sin\alpha \cdot F_{v1}$	
Vaijerivoima 2	$F_{v2}$	
Vaijerivoima 2 vaakasuora komponentti	$F_{v2x}$	
Vaijerivoima 2 pystysuora komponentti	$F_{v2y}$	
Voima	$F := 100$	
Pienin sallittu vaijerikulma kuorman ollessa keskellä	$\gamma := 30 \text{ deg} \quad \alpha = \beta = \gamma$	
Vaijerin 1 kulma	$\alpha := 30 \text{ deg}$	
Vaijerin 2 kulma	$\beta := \text{atan}\left(\frac{1}{\frac{2}{\tan(\gamma)} - \frac{1}{\tan(\alpha)}}\right) = 30 \text{ deg}$	
Vaakasuorat voimat yhtä suuria keskenään	$F_{v1x} = F_{v2x}$	
Pystysuorat komponentit yhtäsuuria kuorman kanssa	$F = F_{v1y} + F_{v2y}$	
Vaakasuoran voiman ja vaijerivoiman välinen suhde	$\cos\alpha = \frac{F_{v1x}}{F_{v1}} \Rightarrow F_{v1x} = \cos\alpha \cdot F_{v1}$	
2 vaijerin vaaka- ja pystysuorien voimien suhde	$\tan\beta = \frac{F_{v2y}}{F_{v1x}}$	
Sijoitetaan $F_{v2y}$ ja $F_{v1x}$ arvot	$\tan\beta = \frac{F - (\sin\alpha \cdot F_{v1})}{F_{v1x}}$	
Sievennetään	$\Rightarrow \tan\beta = \frac{F - (\sin\alpha \cdot F_{v1})}{\cos\alpha \cdot F_{v1}}$	
	$\Rightarrow \tan\beta \cdot \cos\alpha \cdot F_{v1} = F - (\sin\alpha \cdot F_{v1})$	
	$\Rightarrow \tan(\beta) \cdot \cos(\alpha) \cdot F_{v1} = F - (\sin(\alpha) \cdot F_{v1})$	
	$\Rightarrow F_{v1} \cdot (\tan(\beta) \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) = F$	
	$\Rightarrow F_{v1} := \frac{F}{\tan(\beta) \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)} = 100$	