

samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

JOONAS ROUHIAINEN

Hydraulisen tarttujan varmistusrautojen suunnittelu ja testaus

SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOTEKNIikka
2024

TIIVISTELMÄ

Rouhiainen, Joonas: Hydraulisen tarttujan varmistusrautojen suunnittelu ja testaus

Opinnäytetyö, AMK

Insinööri (AMK), sähkö- ja automaatiotekniikka

Kesäkuu 2024

Sivumäärä: 36

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin hydrauliseen tarttujaan varmistusraudat. Varmistusrautojen tarkoituksena on estää nostettavien puupinojen tippuminen tilanteessa, jossa tarttujan ote pinoista pettää. Toimeksiantaja oli jo valmistanut prototyypin tarttujasta ilman varmistusrautoja. Prototyypistä saatiin piirustukset sekä 3D-mallit tukemaan varmistusrautojen suunnittelutyötä.

Tarttujasta valmistettiin toiminnallinen pienoismalli, jota testattiin UR5e-käsivarsirobotilla. Kappaleiden noutamiseen käytettiin konenäköä. Varsinainen tarttuja varmistusrautoineen sekä materiaalinkäsittelykoneen toiminta simuloitiin Visual Components-ympäristössä.

Tarttujan pienoismallin suunnittelu sekä toteutus onnistui hyvin. Suunnittelun ja kokoonpanon jälkeen tarttujaa päästiin ilman ylimääräisiä revisioita suoraan testaamaan käsivarsirobotilla. Testit käsivarsirobotilla onnistuivat suunnitellusti. Tarttujan nostokyky riitti nostamaan kappaleita, varmistusrautojen ohjaus toimi suunnitellusti ja tarttujan asemointi tapahtui konenäköavusteisesti. Simulaatio auttoi havainnollistamaan varsinaisen tarttujan toimintaa satamaympäristössä.

Avainsanat: Tarttuja, robotisoitu poiminta, konenäkö, robotiikka

ABSTRACT

Rouhiainen, Joonas: Designing and testing safety clamps for a hydraulic gripper

Bachelor's thesis

Electrical and Automation Engineering

June 2024

Number of pages: 36

In this thesis, safety clamps were designed for a hydraulic gripper. The purpose of the clamps is to prevent stacks of wood from falling in the event of the gripper losing its grip on the stacks. The client had already manufactured a prototype of the gripper without the safety clamps. Drawings and 3D-models of the prototype were provided to support the designing of the clamps.

A functional scale model of the gripper was fabricated and tested with the UR5e industrial collaborative robot. Machine vision was utilized for picking up the objects. The actual gripper with safety clamps, along with the operation with the material handling machine, was simulated in the Visual Components environment.

The design and implementation of the gripper model were successful. After the design and assembly, the gripper was able to be tested directly on the robotic arm without any additional revisions. The tests on the robotic arm went as planned. The gripper's lifting capacity was sufficient to lift the objects, the control of the safety clamps functioned as intended, and the gripper's positioning was carried out with the assistance of machine vision. The simulation helped to illustrate the actual operation of the gripper in a real environment.

Keywords: Gripper, robotics, machine vision, robotic picking

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	5
2 TYÖN TOIMEKSIANTAJA	5
3 TYÖN ETENEMISSUUNNITELMA	6
4 KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO	8
4.1 HAAS VF-1 -työstökeskus	8
4.2 Prusa i3 MK3S+ -3D-tulostin	9
5 PIENOISMALLIN SUUNNITTELU	10
5.1 Paineilmasyliinterien valinta	10
5.2 3D-mallinnus	13
5.3 Työstöradat	16
6 PIENOISMALLIN RAKENTAMINEN	19
6.1 3D-tulostaminen	19
6.2 Koneistaminen	19
7 PIENOISMALLIN TOIMINNALLISUUS	21
7.1 Ohjelmointi	21
7.2 Piirilevyn suunnittelu	22
8 KONENÄKÖ	24
ROBOTIN OHJELMOINTI	26
9 SIMULAATIO	27
9.1 Varsinaisen tarttujan mallintaminen	27
9.2 Visual Components	31
10 TULOKSET	32
11 YHTEENVETO	34
LÄHTEET	36

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on varmistusrautojen suunnittelu hydrauliseen tarttujaan. Tavoitteena on suunnitella varmistusraudat tarttujan valmiiseen prototyyppiin ja luoda tarttujasta 1:10 pienoismalli sekä simulaatio. Pienoismallin toiminnallisuus myös testataan käsivarsirobotilla.

Tarttujan puristus- sekä avausliikkeet tulevat tapahtumaan pienoismallissa pneumaattisesti. Tarttujaan kytketään sähköiset toimilaitteet sekä anturointi. Robottiohjelmaan liitetään konenäkö mahdollistamaan pinojen automatisoitu nouto sekä lastaus.

2 TYÖN TOIMEKSIANTAJA

Toimeksiantaja on Huhtaware Oy. Huhtaware on Porin Mäntyluodossa toimiva satamien logistista toimintaa suunnitteleva ja tukeva yritys. Yritys työllistää noin kymmentä henkilöä.

3 TYÖN ETENEMISSUUNNITELMA

Tämän työn eteneminen suunniteltiin seuraamalla Design Science Research - tutkimusmenetelmän (DSR) vaiheita. DSR:n tarkoitus on luoda uusia innovatiivisia ratkaisuja ongelmiin ja pyrkiä samalla lisäämään aiheen tietämystä ja osaamista. Tämä tapahtuu yhdistämällä tieteellinen tutkimus sekä käytännön suunnittelutyö. (vom Brocke, 2020, s. 1.)

Tässä opinnäytetyössä hyödynnetään Peffersin ym. esittämää Design Science Research -prosessin etenemistä. Sen mukaan DSR-tutkimusmenetelmän prosessi jakautuu kuuteen eri vaiheeseen;

1. Ongelman tunnistaminen
2. Ratkaisun tavoitteet
3. Suunnittelu sekä toteutus
4. Demonstraatio
5. Arviointi
6. Kommunikaatio

(Peffers, 2006, s. 91.)

Tässä opinnäytetyössä lähtökohdaksi ja kehittämistarpeeksi tunnistettiin puupinoja käsittelevän tarttujan varmistamisominaisuuksien kehittäminen. Varmistamisominaisuuksia ei ollut aiemmin olemassa, mutta niiden tarve oli selvästi tunnistettu.

Tavoitteeksi työlle asetettiin toiminnallisen pienoismallin suunnittelu sekä rakentaminen, pienoismallin kytkeminen käsivarsirobottiin ja testaaminen sekä konenäköavusteinen kappaleen nouto. Tavoitteena oli myös suunnitella varsinainen varmistusrautamekanismi sekä simuloida tarttujan sekä materiaalikäsittelykoneen toiminta Visual Components -ympäristössä.

Pefferin ym. mallin mukaan työn kolmannessa vaiheessa suunnitellaan ja toteutetaan pienoismallin mekaaninen osuus ottaen huomioon valmistustavat sekä pneumaattinen osuus sylinterien valinnan suhteen, jotta pienoismalli pystyy suorittamaan leukojen puristusliikkeen riittävällä voimalla kappaleiden nostamiseksi. Lisäksi on suunniteltava piirilevy varmistusrautojen ohjausta ja käsivarsirobotin kanssa kommunikointia varten. Myös konenäköohjelman kehittäminen kappaleiden noutamisen avustamiseksi on osa suunnittelu- ja toteutusvaihetta.

Pienoismallin sekä konenäköohjelman toiminta demonstroidaan käsivarsirobotilla. Varsinaisen tarttujan varmistusrautojen toiminnallisuus simuloidaan Visual Components -ympäristössä, ja siitä lähetetään video toimeksiantajalle.

Työn onnistumisen arviointi vaihtelee työn eri osa-alueiden välillä. Arvioinnille annetaan suurempi painoarvo osuuksissa, joista osaamiskertymä on suurempi, kun taas niille osuuksille, joista käytännön kokemusta on kertynyt vähemmän, annetaan pienempi painoarvo. Arviointi perustuu pitkälti lopputuloksen vertailuun asetettuihin tavoitteisiin, jolloin tunnustetaan, miten lopputulos vastaa työn toimeksiantajan asettamiin kehittämistarpeisiin.

Edellisistä opintoihin sisältyneistä projekteista osaamista on kertynyt mm. mekaanisesta suunnittelusta, mekaanisten kokoonpanojen valmistusprosessista, konenäöstä, robotin ohjelmoinnista, 3D-tulostamisesta sekä piirilevyn suunnittelemisesta. Aihealueet, joissa osaamiskertymää on vähemmän, ovat mm. Visual Components -simulointi sekä käsivarsirobotin ja konenäköohjelman välinen kommunikointi.

Tämän opinnäytetyön kirjallinen osuus on työn tulosten julkaisun päätuotos. Tässä kirjallisessa osuudessa esitellään kaikki työn vaiheet sekä niiden tulokset ja arvioidaan lopputuloksen hyödyllisyyttä.

4 KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO

4.1 HAAS VF-1 -työstökeskus

Keskeisin työkalu pienoismallin metallikappaleiden valmistuksessa oli HAAS VF-1 -työstökeskus (kuva 1). VF-1-työstökeskuksen ominaisuuksiin kuuluu mm. 22,4 kW pystykara, jonka suurin pyörimisnopeus 8100 rpm sekä automaattinen työkalunvaihdin. Koneen ohjaus tapahtuu tietokoneella numeerisesti. Työstökeskuksella valmistettiin tarttujan pienoismallin leuat sekä sovitin käsivarsirobottiin.

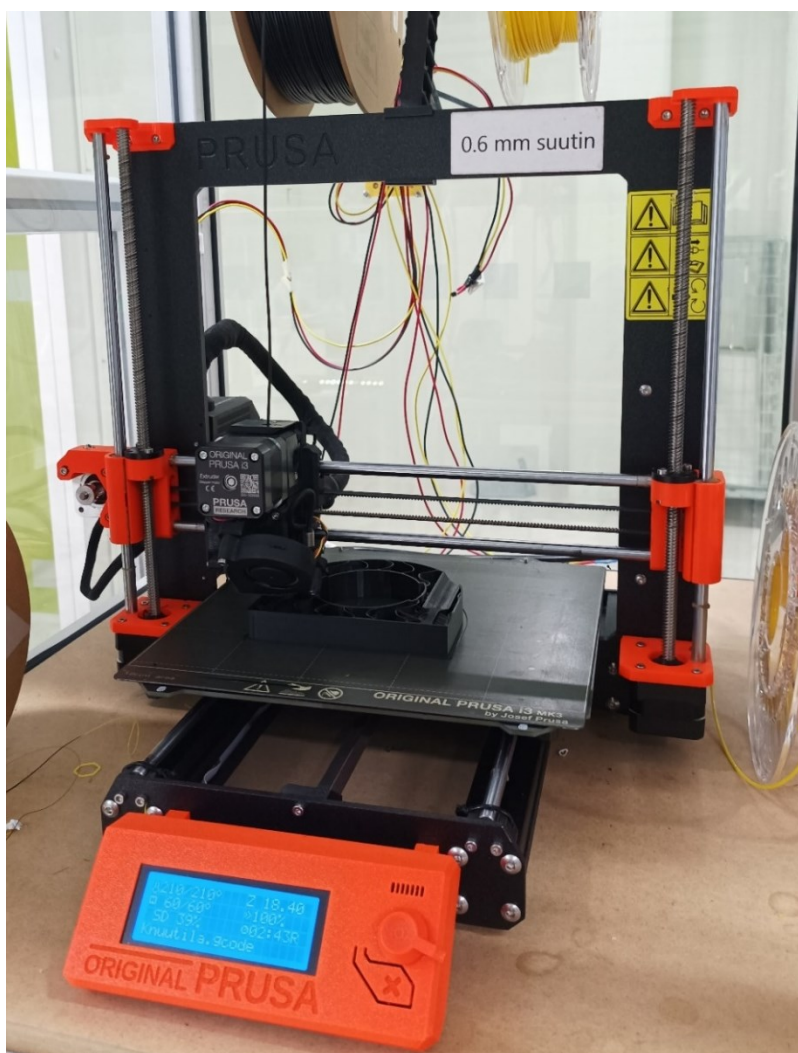


Kuva 1. Työssä käytetty HAAS VF-1 -työstökeskus.

G-koodi työstökeskukselle generoitiin SolidWorks-ohjelmiston CAM-lisäosalla. Näin pystyttiin työstöratoja luodessa myös tarvittaessa tekemään muutoksia 3D-malleihin samassa ympäristössä.

4.2 Prusa i3 MK3S+ -3D-tulostin

Pienoismallin muoviosat 3D-tulostettiin Prusa i3 -3D-tulostimella (kuva 2). Prusa i3 -tulostin käyttää FDM-tekniikkaa, jossa kuumennettu filamentti pursetaan suuttimelta lämmitetylle tulostuspedille. Työssä käytettiin polyaktidi (PLA)-filamenttia, jonka ominaisuuksiin kuuluu mm. alhaiset tulostuslämpötilat ja helppo tulostaminen. 3D-tulostamalla valmistettiin pienoismallin leukojen kuoret sekä varmistusrautojen piikit.



Kuva 2. Prusa i3 MK3S+ -3D-tulostin.

5 PIENOISMALLIN SUUNNITTELU

5.1 Paineilmasyylinterien valinta

Paineilmasyylinterien valintaan tarttujan kannalta vaikuttavat tekijät ovat moninaisia. Valintaan vaikuttavat tarttujan leukojen kosketuspinnan materiaali, nostettavan kuorman massa ja materiaali sekä syöttöpaine. Jotta pienoismalli säilyisi mahdollisimman uskollisena suunnitellulle 1:10-suhteelle, sylinterin valintaa ei suoraan yllämmuttu, vaan ensin laskettiin teoreettinen sylinterin voiman vähimmäistarve. Koska tarttujan puristusliike tapahtuu tässä tapauksessa sylinterin negatiivisella liikkeellä, laskelmissa tuli ottaa huomioon myös männän akselin halkaisija.

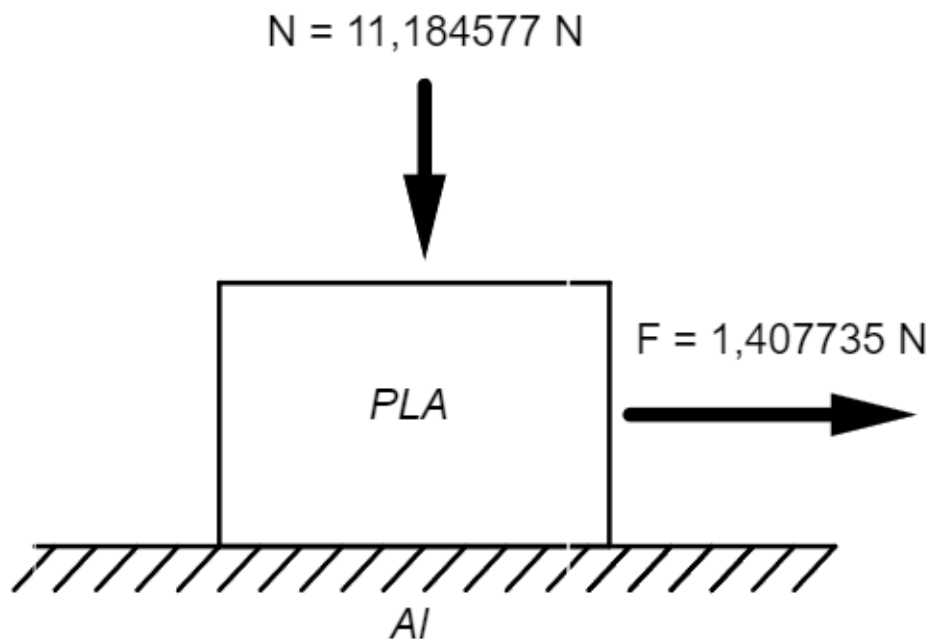
Positiivisessa liikkeessä paine työntää mäntää ulospäin sylinteristä, kun taas negatiivisessa liikkeessä mäntä työntyy sisäänpäin. Negatiivisessa liikkeessä männän akseli vie osan männän pinta-alasta, johon paine voi vaikuttaa, joten liike on heikompi kuin positiivisessa työntöliikkeessä.

Pienoismallin nostettava kuorma oli valmistettu PLA-muovista FDM-tekniikalla, ja tarttujan leukojen kontaktipinta oli alumiinia. Koska materiaalien välistä kitkakerrointa ei voitu suoraan päätellä taulukoista, suuntaa antava arvio kitkakertoimesta määritettiin vetämällä PLA-muovista tulostettua kappaletta alumiinipintaa pitkin (kuva 3) samalla mitaten, kuinka suuren voiman muovikappaleen liikkeellelähtö vaatii. Kokeen tulokset dokumentoitiin toistamalla mitaukset 10 kertaa ja laskemalla tulosten keskiarvo. Saaduilla tuloksilla voitiin laskea arvio PLA-muovin sekä alumiinin välisestä kitkakertoimesta käyttäen kaavaa (1)

$$\mu = \frac{F}{N}, \quad (1)$$

jossa μ on kitkakerroin, F on tarvittava voima kappaleen liikuttamiseen ja N on vedettävän kappaleen massan sekä maan vetovoiman kiihtyvyyden tulo.

Tuloksista tehtiin taulukko, jota käytettiin seuraavassa vaiheessa (taulukko 1).



Kuva 3. Vetomittauksen periaate.

Taulukko 1. Vetomittauksen tulokset ja niistä laskettu kitkakertoimen keskiarvo.

m	1,14012 g
N	11,184577 N
F	1,407735 N
μ	≈ 0.13

Saaduilla tuloksilla päästiin laskemaan paineilmasylinterin negatiivisen liikkeen voiman vähimmäisvaatimus. Kun tiedetään nostettavan kappaleen massa ja kappaleen sekä leuan kontaktipinnan välinen kitkakerroin, voidaan vähimmäisvoima selvittää käyttämällä kaavaa (2)

$$F_g = \frac{m \times (g + a)}{\mu}, \quad (2)$$

jossa F_g on paineilmasylinterin puristusvoima, m on nostettavan kappaleen massa, g on maan vetovoiman kiihtyvyys, a on tarttujan suurin kiihtyvyys ja μ

on edellisessä vaiheessa laskettu kitkakerroin. Tunnetuilla arvoilla saadaan voima ratkaistua edellisen kaavan avulla yhtälöllä (3)

$$F_g = \frac{0.56 \text{ kg} \times \left(9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}{0.13} = 50.860923076923076923 \text{ N}, \quad (3)$$

Näin ollen teoreettinen vähimmäisvaatimus sylinterin puristusvoimasta on noin 51 N. Kun puristusvoiman vähimmäisvaatimus sekä 8 baarin syöttöpaine tiedetään, pystytään laskemaan männän vähimmäispinta-ala. Pinta-ala saadaan selvitettyä hyödyntämällä kaavaa (4)

$$A = \frac{F_g}{P}, \quad (4)$$

Jossa F_g on aiemmassa vaiheessa laskettu vähimmäisvoima ja P sylinterille syötetty paine Pascaleina. Kun lisätään tunnetut arvot edelliseen kaavaan, saadaan pinta-ala laskettua yhtälöllä (5)

$$A = \frac{50.860923076923076923 \text{ N}}{800\,000 \text{ Pa}} = 6.358 \times 10^{-5} \text{ m}^2, \quad (5)$$

Näin ollen männän pinta-alan tulisi olla vähintään noin 63,6 mm². Työssä päädyttiin käyttämään Feston DSNU-12-30-P-A-paineilmasyylinteriä, jossa männän halkaisija on 12 mm ja akselin halkaisija 6 mm, joten sylinterin teoreettinen voima negatiivisella liikkeellä saadaan laskettua yhtälön (6) avulla

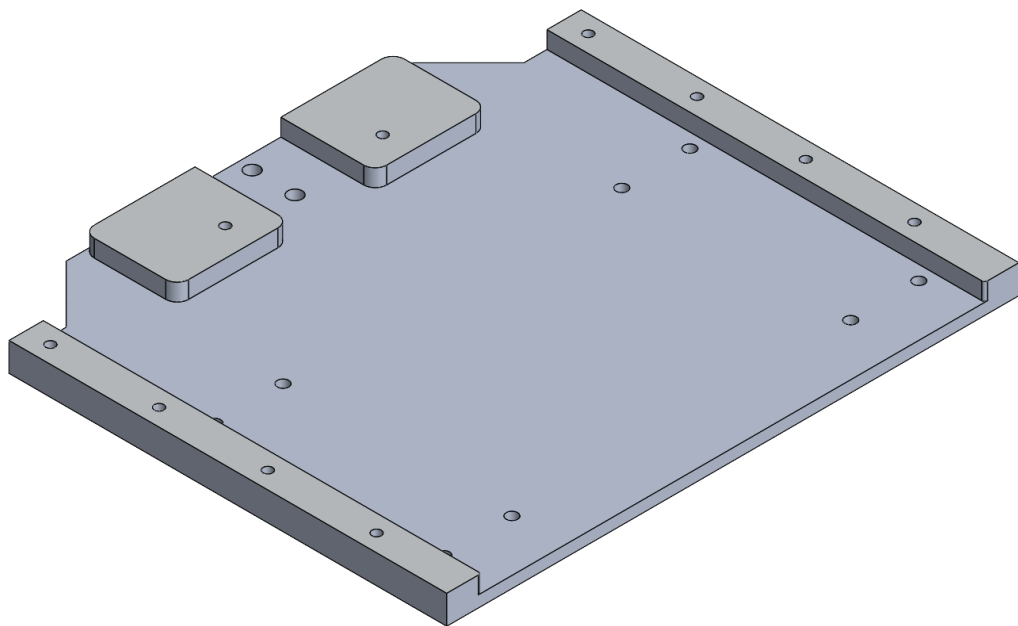
$$\pi \times \frac{\left(\frac{12 \text{ mm}}{2}\right)^2 - \left(\frac{6 \text{ mm}}{2}\right)^2}{1000000} \times 800000 \text{ Pa} = 67.858 \text{ N}, \quad (6)$$

Laskussa männän sekä akselin pinta-alojen erotus kerrotaan syöttöpaineella. Tulos on negatiivisen liikkeen voima Newtonina.

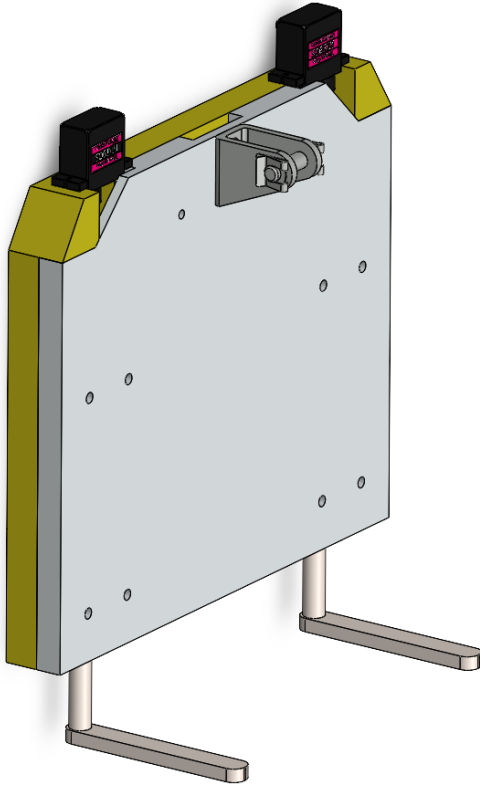
5.2 3D-mallinnus

Tarttujan pienoismalli suunniteltiin SolidWorks-ohjelmistolla, jonka avulla voitiin tarkasti suunnitella ja visualisoida lopputulosta. Toimeksiantajalta saatiin piirustukset sekä 3D-mallit tarttujan prototyypistä, joita käytettiin apuna pienoismallin suunnittelussa.

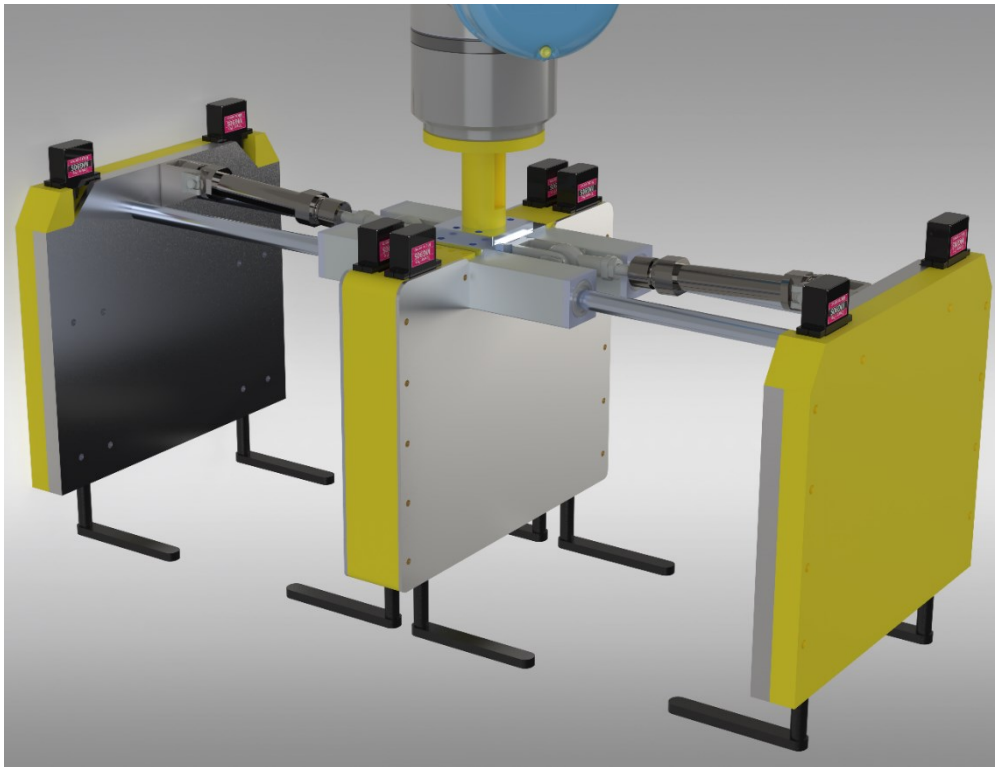
Pienoismallin tavoitteena oli saavuttaa noin 10 % kokoinen mittasuhteellisuus suhteessa varsinaiseen tarttujaan. Tarttujan osat mallinnettiin erikseen omina kappaleinaan (kuva 4) samalla mieltien valmistustapaa sekä materiaalia. Pienoismallin painossa piti ottaa huomioon myös käsivarsirobotin nostokyky. Yksittäisistä osista tehtiin omat kokonaisuutensa (kuva 5), jotka yhdistettiin mallinnusohjelmistossa lopulliseen kokoonpanoon (kuva 6).



Kuva 4. Yksittäinen mallinnettu osa.

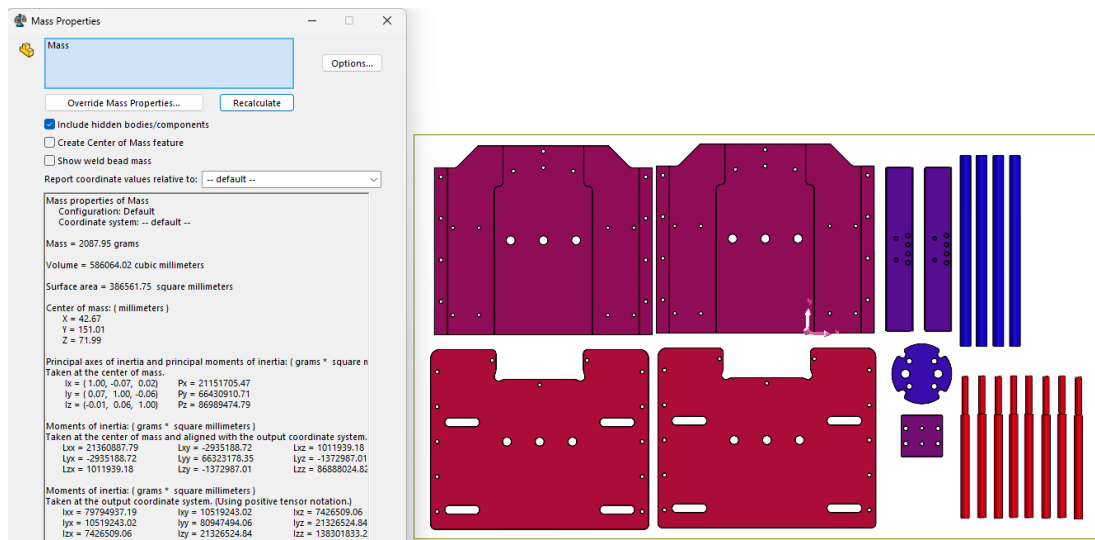


Kuva 5. Yhden leuan kokonaisuus.



Kuva 6. Renderöity kuva kokoonpanosta.

3D-suunnittelun jälkeen tarkistettiin vielä pienoismallin kokonaismassa. Metallisten osien (leuat, akselit, sovitinpalat sekä neliöprofiilit) massa pystyttiin selvittämään mallinnusohjelmistoa avuksi käyttäen (kuva 7).



Kuva 7. Tarttujan metallisten osien arvioitu kokonaismassa.

3D-tulostettavien osien (leukojen kuoret, varmistusrautojen piikit) massa saatiin selville slicer-ohjelmistolla. Slicer on ohjelmisto, joka muuntaa 3D-mallin G-koodiksi, jonka 3D-tulostin tulkitsee liikkeiksi. Tässä tapauksessa käytettiin PrusaSliceria. Ohjelmasta nähtiin, kuinka monta grammaa filamenttia kuhunkin kappaleeseen menee. Tästä saatiin arvio kappaleiden painosta (kuva 8).

Sliced Info

Used Filament (m)	39.11
Used Filament (mm ³)	94063.40
Used Filament (g)	116.64

Kuva 8. Yhteen osaan käytettävä filamentti.

Kaikkien osien massat laskettiin yhteen. Näin saatiin arvio pienoismallin kokonaismassasta (taulukko 2).

Taulukko 2. Pienoismallin arvioitu kokonaismassa

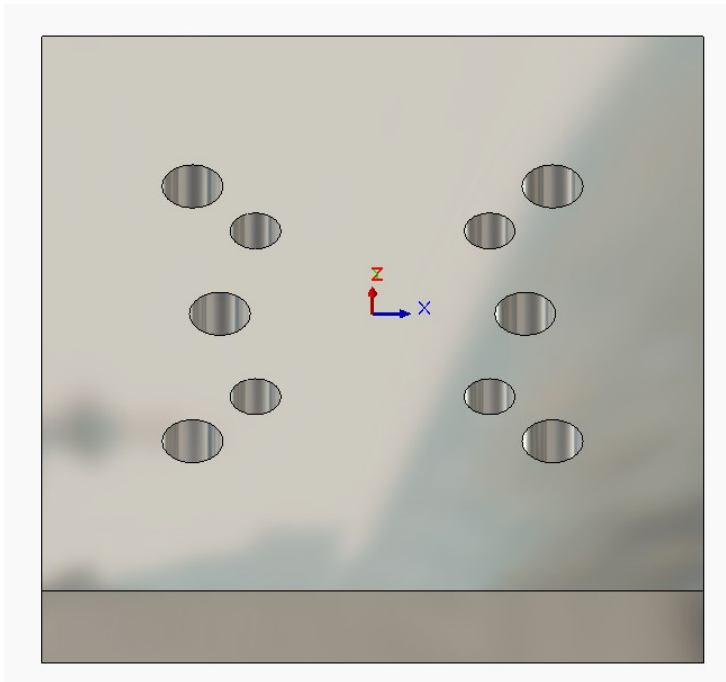
Materiaali	Paino
PLA	647 g
Metalliosat	2088 g
Sylinterit ja kiinnikkeet	289 g
Moottorit	104 g
Nostettava kuorma	440 g
Kamera	51 g
Lineaarilaakerit	144 g
Yhteensä	3831 g

Pienoismallin todelliseksi painoksi saatiin punnitsemalla 4370 grammaa. Ero arvioituun massaun voidaan selittää sillä, että arviossa ei huomioitu kiinnitystarvikkeita, johdotuksia, paineilmaletkuja, piirilevyn painoa ja kameran linssiä. Paino kuitenkin pysyi alle robotin nostokyvyn.

5.3 Työstöradat

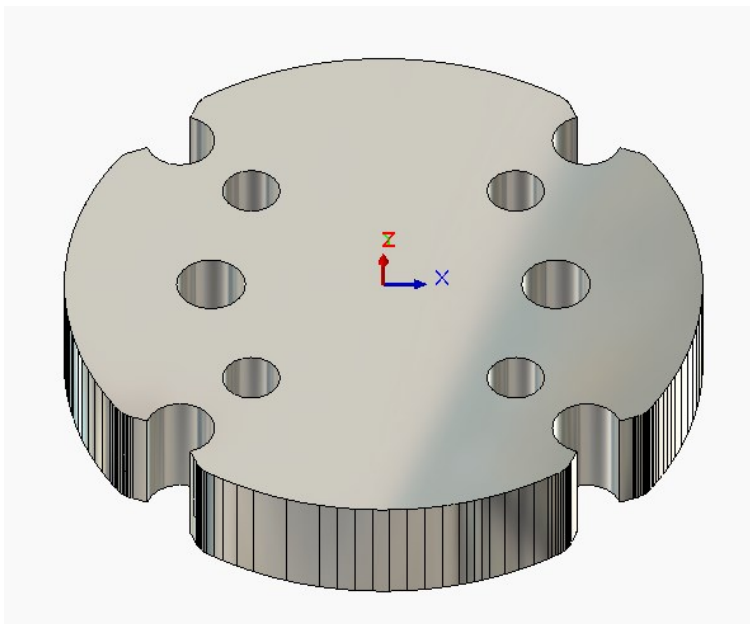
HAAS VF1 -työstökoneetta käytettiin metallisten osien koneistamiseen. Sitä varten tarvittavat työstöradat luotiin SolidWorksin CAM-lisäosalla. Kappaleet pyrittiin työstämään enintään yhdellä käännöllä. Sillä kappaleiden pinnankarheudella ei ollut merkittävää vaikutusta pienoismallin toimintaan, jätettiin yläpinnat kokonaan plaanaamatta, mikäli materiaalinvahvuus aihiossa oli sopiva.

Otetaan työstön esimerkiksi sovitin, jolla pienoismalli kiinnittyy käsivarsirobotiin. Työstöprosessi aloitettiin reikien poraamisella (kuva 9). Reiät porattiin ensin, jotta nähtäisiin helposti varsinaisessa työstämisvaiheessa, että kappaleen nollapisteen asettaminen on tapahtunut onnistuneesti. Kappaleessa origo on asetettu X- ja Y-akselien suhteen kappaleen keskelle. Z-akselin nollapiste asetettiin kaikissa kappaleissa työstettävän aihion yläpintaan.



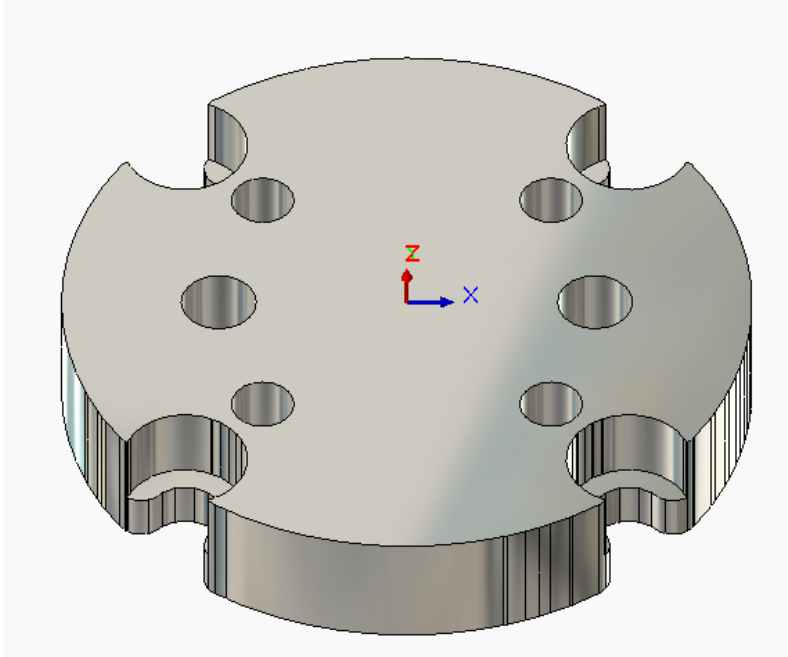
Kuva 9. Työstäminen alkoi reikien poraamisella.

Reikien poraamisen jälkeen vuorossa oli ulkoprofiilin karhea rouhinta kaksileikkisellä jyrsintapilla (kuva 10). Pintoihin jätettiin 0,25 millimetrin viimeistelyvara. Jotta koko ulkoprofiili voitaisiin rouhia kerrallaan, pultattiin työstettävä kappale alumiiniseen fiksturiin käyttäen edellisessä vaiheessa porattuja reikiä. Samaa fiksturia hyödynnettiin muissakin kappaleissa.



Kuva 10. Kappaleen ulkoprofiili rouhittuna.

Karkean rouhimisen jälkeen viimeisteltiin kappaleen loput muodot nelileikkuisella jysintapilla (kuva 11). Koska käytössä ei suunnitteluvaiheessa ollut sopivaa työkalua, ei työstöratoihin sisällytetty purseenpoistoa tai viisteytystä. Purseet sekä terävät reunat poistettiin manuaalisesti käsityökaluilla.



Kuva 11. Valmis kappale.

Valmiit työstöradat muunnettiin HAAS-postproessorilla G-koodiksi työstökeskukselle. Vaikkakin lähestulkoon kaikki CNC-työstökeskukset käyttävät ohjelmointikielenään G-koodia, on kielestä olemassa eri valmistajien välillä useita variaatioita. Tämän takia on tärkeää valita oikea postproessori käytettävälle työstökoneelle. (Ye, 2023.) Samaa prosessia noudattaen tehtiin työstöradat pienoismallin kaikkiin alumiiniosiin.

6 PIENOISMALLIN RAKENTAMINEN

6.1 3D-tulostaminen

Pienoismallin vähemmän kriittiset osat 3D-tulostettiin PLA-muovista. PLA (polylaktidi) on uusiutuvista raaka-aineista valmistettu biohajoava muovi.

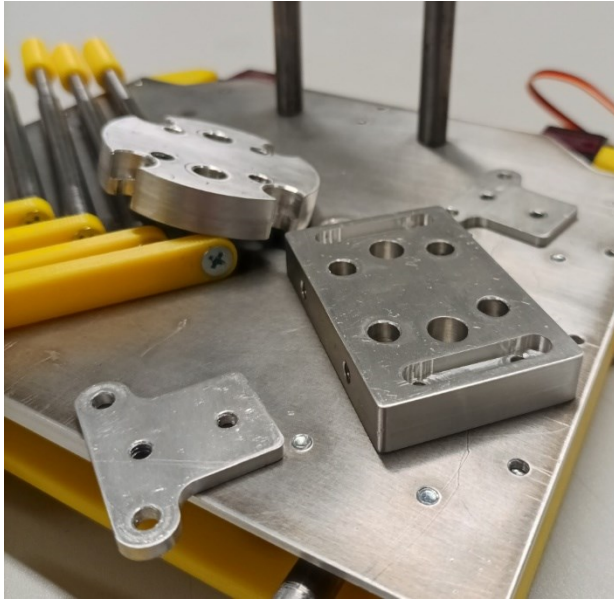
Osat tulostettiin Prusa i3 -tulostimella. Osista suunniteltiin ensin 3D-mallit SolidWorks-ohjelmistolla, josta ne tallennettiin STL-tiedostomuotoon. STL-tiedostot muutettiin G-koodiksi PrusaSlicer-ohjelmistolla. G-koodi on hyvin yleinen ohjelmointikieli CNC-koneille ja 3D-tulostimille.

6.2 Koneistaminen

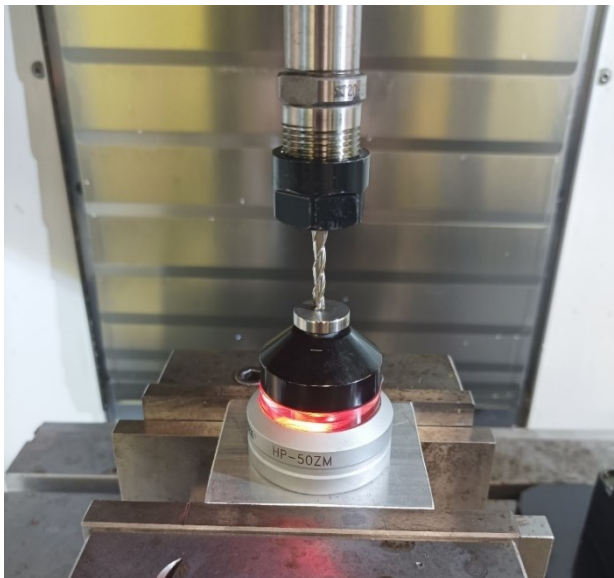
Pienoismallin kriittiset osat valmistettiin 6063-T6-alumiiniseoksesta (kuva 12). Alumiini valittiin materiaaliksi, koska tavoitteena oli pitää kokoonpanon kokonaispaino mahdollisimman alhaisena.

Koska työstöradat oli jo edellisessä vaiheessa kirjoitettu, leikattiin seuraavaksi sopiva aihio alumiinista ja tehtiin asetus työstökeskukselle. Koneelle kiinnitettiin työstämiseen valitut terät, jotka nollattiin aihion pintaan (kuva 13). Ahiosta täytyi myös hakea X- ja Y-akselien nollapisteen, joita absoluuttinen koordinaattijärjestelmä käytti referenssipisteinä (kuva 14).

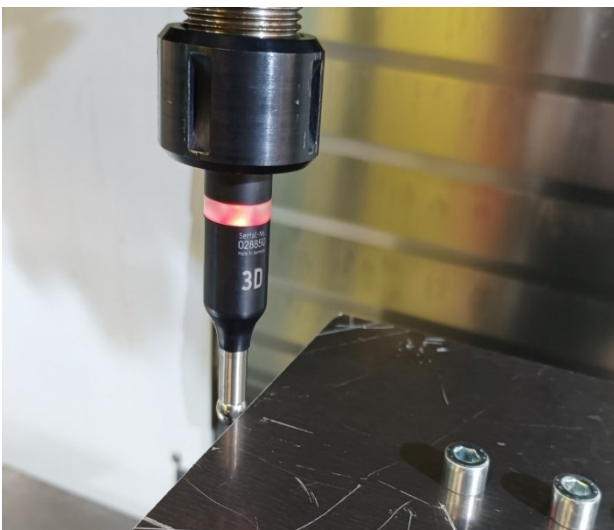
Karkeaan rouhimiseen käytettiin pääosin kaksileikkuisia jysintappeja hyvän lastunpoiston vuoksi. Viimeistelyrouhinta tehtiin nelileikkuisilla jysintapeilla hyvän pinnankarheuden saavuttamiseksi. Työssä käytettiin pikateräksestä valmistettuja työkaluja. Varmistusrautojen akselit valmistettiin manuaalisesti karkisorvilla. Osien valmistamisessa käytettiin työstökeskuksen lisäksi myös muita työstökoneita, kuten plasmaleikkuria, levyleikkuria sekä pylväsporakonetta.



Kuva 12. Alumiinista valmistettuja osia.



Kuva 13. Jyrsintapin nollaaminen aihion pintaan.



Kuva 14. X-askelin nollapisteen määrittely.

7 PIENOISMALLIN TOIMINNALLISUUS

7.1 Ohjelmointi

Tarttujan varmistusrautojen servomoottorien ohjaamiseen kirjoitettiin lyhyt ohjelma Arduino IDE:ssä (kuva 15). Ohjelmassa mikrokontrolleri kääntää varmistusrautoja saatuaan robotilta signaalin.

```

58 void loop() {
59     byte inputState = digitalRead(closeOpen);
60
61     if (inputState == LOW && piikkiState == 0) {
62
63         for (uint16_t pulselen = SERVOMIN; pulselen < SERVOMAX; pulselen++) {
64             pwm.setPWM(7, 0, pulselen);
65             pwm.setPWM(3, 0, pulselen);
66             pwm.setPWM(4, 0, pulselen);
67             pwm.setPWM(2, 0, pulselen);
68         }
69         delay(100);
70         for (uint16_t pulselen = SERVOMAX; pulselen > SERVOMIN; pulselen--) {
71             pwm.setPWM(0, 0, pulselen);
72             pwm.setPWM(5, 0, pulselen);
73             pwm.setPWM(6, 0, pulselen);
74             pwm.setPWM(1, 0, pulselen);
75         }
76         piikkiState = 1;
77         delay(1000);
78     } else if (inputState == LOW && piikkiState == 1) {
79         for (uint16_t pulselen = SERVOMAX; pulselen > SERVOMIN; pulselen--) {
80             pwm.setPWM(7, 0, pulselen);
81             pwm.setPWM(3, 0, pulselen);
82             pwm.setPWM(4, 0, pulselen);
83             pwm.setPWM(2, 0, pulselen);
84         }
85         delay(100);
86
87         for (uint16_t pulselen = SERVOMIN; pulselen < SERVOMAX; pulselen++) {

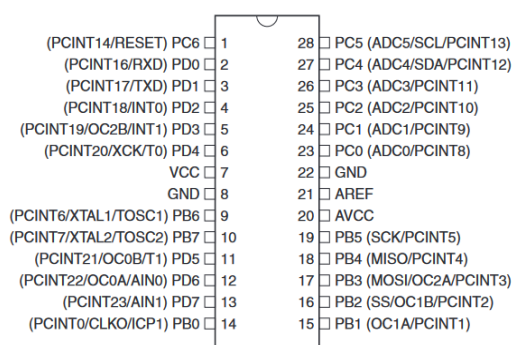
```

Kuva 15. Ote varmistusrautoja ohjaavasta ohjelmasta.

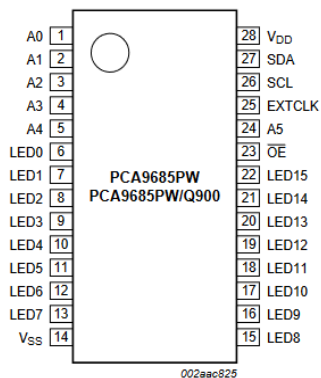
Arduino on avoimen lähdekoodin prototyypialusta, joka yhdistää mikrokontrollerin ja integroidun kehitysympäristön (IDE). Mikrokontrolleriin ladataan Arduinon käynnistysohjelma, joka mahdollistaa saman koodin käytön sekä Arduinossa prototyypin rakentamisen vaiheessa että varsinaisessa suunnittelussa piirilevyssä.

7.2 Piirilevyn suunnittelu

Pienoismalliin suunniteltiin ohjauskortti, jotta servo-ohjaus sekä käsivarsirobotin kanssa kommunikointi pystyttiin hoitamaan vain yhdellä piirilevyllä. Mikrokontrolleriksi valittiin ATmega328P (kuva 16). Pienoismallin servomoottoreita ohjattiin I²C-tiedonsiirtoväylää käyttäen 16-kanavaisella PCA9685PW,118-LED-ohjaimella (kuva 17).



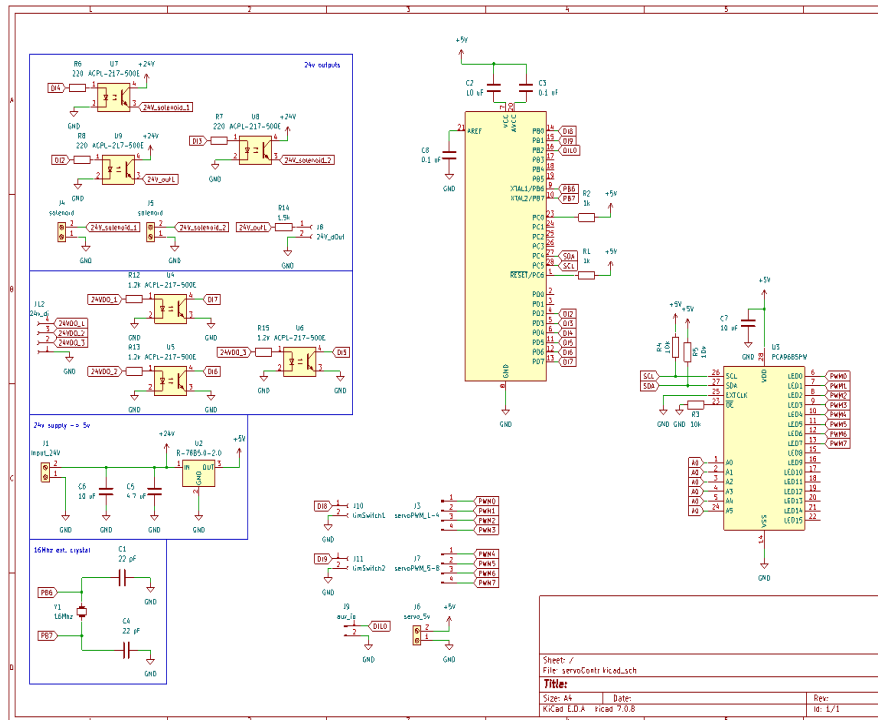
Kuva 16. Atmega328P 28DIP pakkauksessa (Microchip Technology Inc, 2019, s. 12).



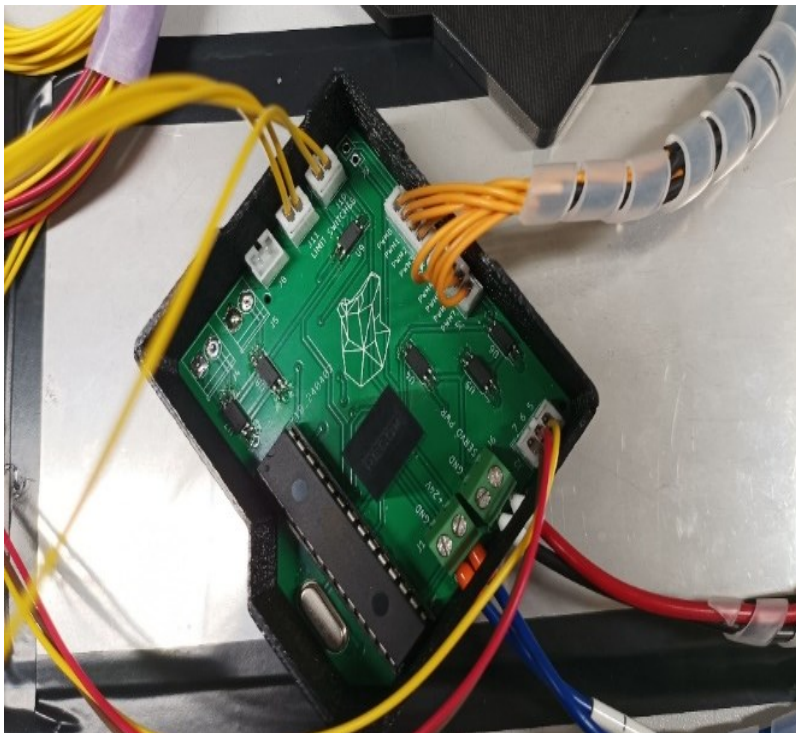
Kuva 17. PCA9685 SSOP28 pakkauksessa (NXP, 2015, s. 6).

Piirilevyssä käytettiin 24 voltin syöttöjännitettä. Jotta mikrokontrollerille, LED-ohjaimelle sekä servomoottoreille saataisiin sopiva syöttöjännite, alennettiin 24 voltin jännite viiteen volttiin R-78B5.0-2.0-hakkuriregulaattorilla. Optoerottimilla muutettiin robotilta mikrokontrollerille tulevat 24 voltin kättelysignaalit viiteen volttiin ja mikrokontrollerilta lähtevät viiden voltin signaalit 24 volttiin.

Piirilevyt suunniteltiin KiCad 7.0 -ohjelmistolla (kuva 18). Suunnitellut piirilevyt tilattiin ja kytkettiin tarttujaan (kuva 19).



Kuva 18. Piirikaavio.



Kuva 19. Piirilevy kytkettynä.

8 KONENÄKÖ

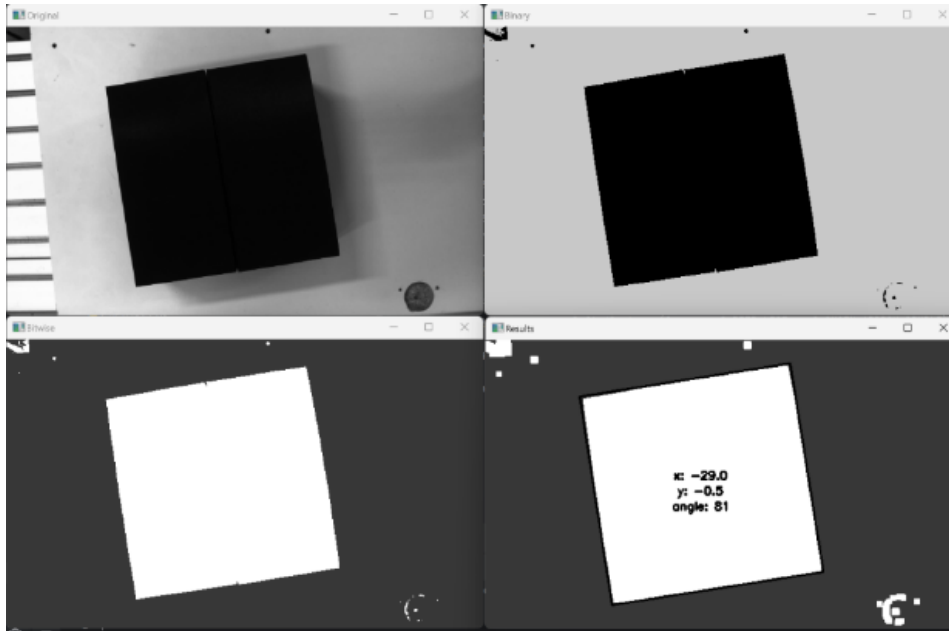
Konenäköohjelma kirjoitettiin Python-ohjelmointikielellä. Kamerana käytettiin IDS UI-5880CP Rev. 2.2 -kameraa (kuva 20). Konenäköä käytettiin robotin ja tarttujan pienoismallin asemointiin X- ja Y-akselissa nostettavaan kappaleeseen nähden.



Kuva 20. IDS UI-5880CP Rev. 2.2 (IDS Imaging Development Systems GmbH, 2024).

Kirjoitetussa ohjelmassa alustetaan ensin yhteys kameraan käyttämällä pyeye-kirjastoa. Yhteyden muodostamisen jälkeen tuodaan uEye Cockpit-ohjelmistolla luodut kameran parametrit konenäköohjelmaan.

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) on avoimen lähdekoodin konenäkökirjasto. Kirjastoa käytettiin apuna nostettavien kappaleiden tunnistamiseen kuvasta. Kuva muutettiin aluksi helpommin prosessoitavaan muotoon (kuva 21). Oikeanlaisen suorakulmion löydyttyä tallennetaan kappaleen asento sekä sijainti kuvaruutuun nähden. Näitä muuttujia käytettiin tarttujan asemointiin X- ja Y-akselissa.



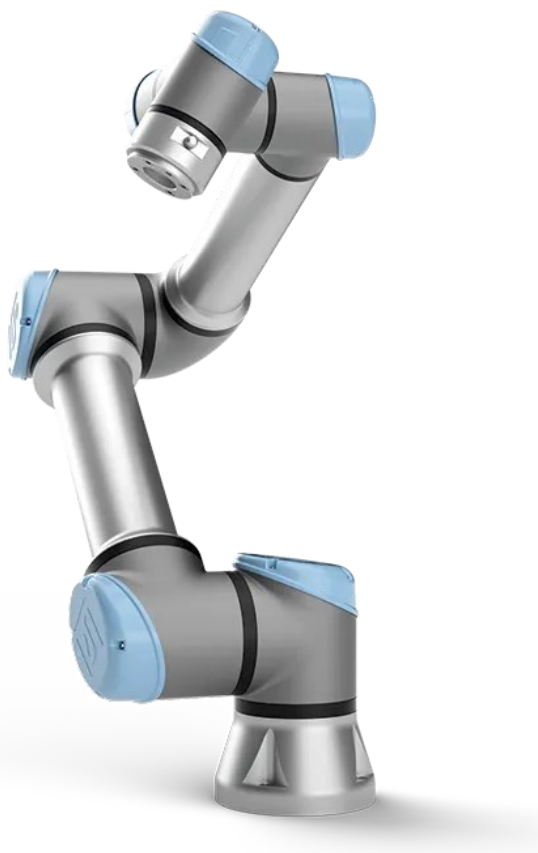
Kuva 21. Konenäköhjelma vaiheittain. Skaalaus, binäärisen kynnyksarvon asettaminen ja kappaleen asennon sekä sijainnin määrittely.

Kuvan resoluutio skaalataan melko pieneksi, sillä kyseisessä sovelluksessa pienistä yksityiskohdista kuvassa on enemmän haittaa kuin hyötyä. Pienemässä kuvassa on myös vähemmän prosessoitavaa konenäköohjelmalle. Näin ollen ohjelman suorituskyky paranee. Kuvalle asetetaan binäärinen kynnyksarvo. Pikselit, joiden intensiteetti on kynnyksarvoa suurempi, muutetaan valkoiseksi. Pikselit, joiden intensiteetti on kynnyksestä pienempi muuttuvat mustaksi. Näin saadaan etsittävä kohde erotettua taustasta. Jotta seuraava vaihe toimisi, muutetaan binäärinen kuva käänteiseksi. Kun haettavia kappaleita oli kaksi, voi näiden kahden kappaleen välillä olla rako. Rako aiheuttaisi ongelmia kappaleiden noutoon, sillä ohjelmassa etsittiin vain yhtä neliskulmaista kappaleita. Tämän ratkaisemiseksi hyödynnetään `cv2.dilate`-operaatiota. Dilate (dilaatio) lisää pikseleitä kohteen reunoihin, näin ollen yhdistäen lähemmäs olevat kappaleet.

Prosessoidusta kuvasta tunnistetaan ensin reunat Canny-menetelmällä. Menetelmän kehitti John F. Canny vuonna 1986, jonka mukaan algoritmi on nimetty (Berkeley, n.d). Tunnistetuista reunoista haetaan tämän jälkeen oikean kokoinen nelikulmainen muoto. Muodon sijainti sekä asento tallennetaan muuttujiin, joita hyödynnetään käsivarsirobotin ohjelmassa.

ROBOTIN OHJELMOINTI

Robottina pienoismallin testauksessa käytettiin Universal Robotsin UR5e-käsivarsiyhteistyörobottia (kuva 22). Kommunikaatioon konenäköohjelmaa pyörittävän tietokoneen ja käsivarsirobotin välillä käytettiin RTDE-menetelmää. RTDE eli REAL-TIME DATA EXCHANGE mahdollistaa ulkoisten sovellusten synkronoimisen käsivarsirobotin ohjaimen kanssa TCP/IP-protokollia käyttäen.



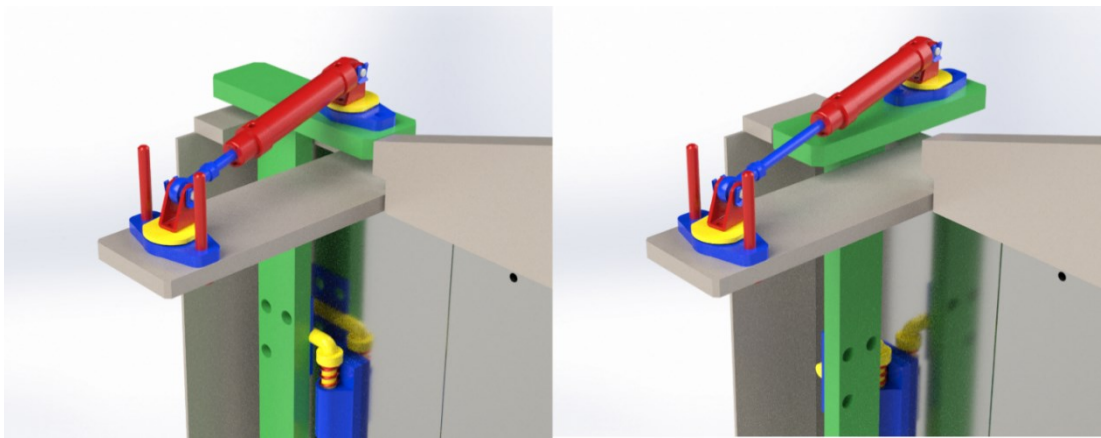
Kuva 22. UR5e (Universal Robots A/S, n.d).

Saatuaan konenäköohjelmalta nostettavan kappaleen asennon ja sijainnin X- ja Y-suunnassa, robotti ajaa tarttujan asentoon, jossa suorakulmio on horisontaalisesti yhdensuuntainen tarttujan kanssa ja keskellä kameran ottamaa kuvaa. Kun sijainti kameran linssin keskipisteestä tarttujan nostopisteeseen nähdä tiedetään, pystytään tarttuja liikuttamaan sopivaan sijaintiin kappaleen nostamiseksi.

9 SIMULAATIO

9.1 Varsinaisen tarttujan mallintaminen

Toisin kuin pienoismallissa, varsinaisen tarttujan varmistusrautojen kääntöliike suunniteltiin tapahtuvan hydraulisesti (kuva 23). Tarttujan mallina käytettiin yrityksestä saatuja 3D-malleja sekä teknillisiä piirustuksia, joihin pyrittiin mahdollisimman vähäisillä muutoksilla lisäämään varmistusrautojen mekanismi.



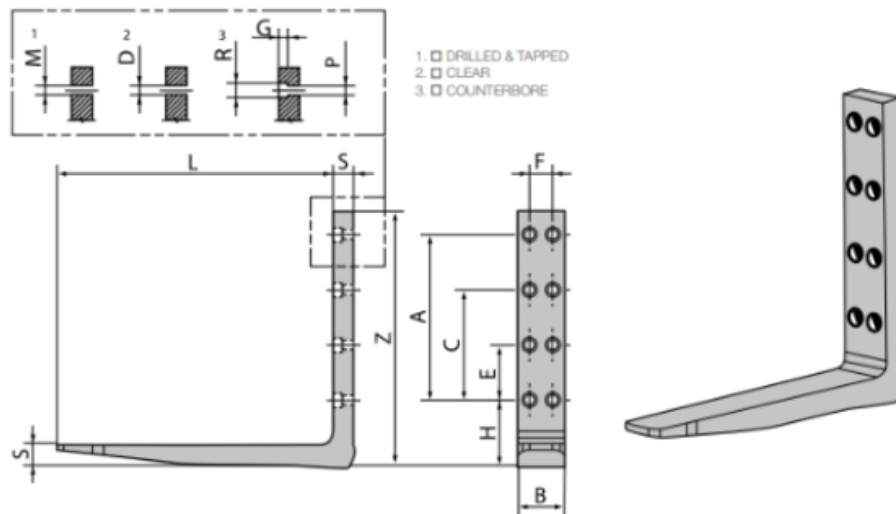
Kuva 23. Hydraulinen kääntömekanismi.

Suunnitellussa mekaniismissa varmistusraudat liikkuvat hydraulisten sylinterien avulla. Kun sylinterin mäntä on ensimmäisessä ääriasennossaan, varmistusraudan piikit ovat avoinna. Toisessa ääriasennossa piikit ovat suljettuina. Avoimessa asennossa piikit ovat kuorman alla ja suljetussa asennossa eivät.

Varmistusrautoihin suunniteltiin myös aksiaalivällys. Vällys on tarpeellinen, jotta kuormaa nostaessa maan tasalta piikit voitaisiin kääntää kuorman alle. Haettaessa kuormaa piikit painuvat varmistusrautojen akselin suuntaisesti ylöspäin. Kun kuorma nostetaan, laskeutuvat piikit takaisin alkuasentoon. Näin piikit eivät törmää nostettavaan kuormaan varmistusrautoja käännettäessä. Lisäksi tilanteessa, jossa kuorma on jo asettunut piikkien päälle, aksiaalivällys on tarpeellinen, jotta varmistusraudat voidaan kääntää pois kuorman alta sen laskemisen yhteydessä.

Kuorman ollessa varmistuspiikkien päällä varmistusrautojen ylälaippa makaa tarttujan leuan rungossa. Jotta varmistusraudat pystyisivät kuormattomassa tilassa kääntymään mahdollisimman kitkattomasti, asetettiin varmistusrautojen saranatappeihin jouset, jotka pitävät laipan irti leuan rungosta. Jousien valinnassa tulee tietää varmistusraudan kuormaton kokonaismassa, jotta voidaan laskea sopiva jousen pituus sekä jousivakio.

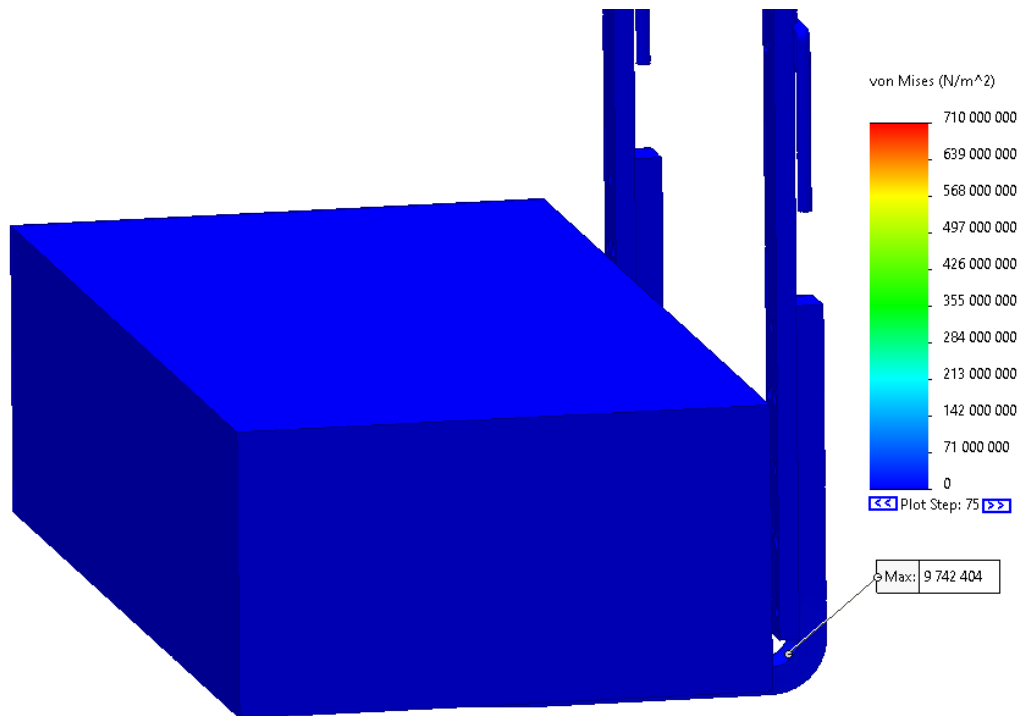
Varmistusrautojen suunnittelussa käytettiin apuna verkosta löytyvää tietoa trukkipiikeistä. Rautojen piikit suunniteltiin pulttavaksi (kuva 24) varmistusrautojen kääntyvään akseliin.



Kuva 24. Pultattavat piikit (Conger Industries Inc. 2024).

Piikkien materiaaliksi alustaviin lujuuslaskentasimulaatioihin (kuva 25) valittiin aluksi 40CrMnMo7 (AISI P20) -työkaluteräs. Koska kyseessä on nuorrutusteräs, kuuluu sen ominaisuuksiin mm. korkea myötö- ja murtolujuus sekä sitkeys.

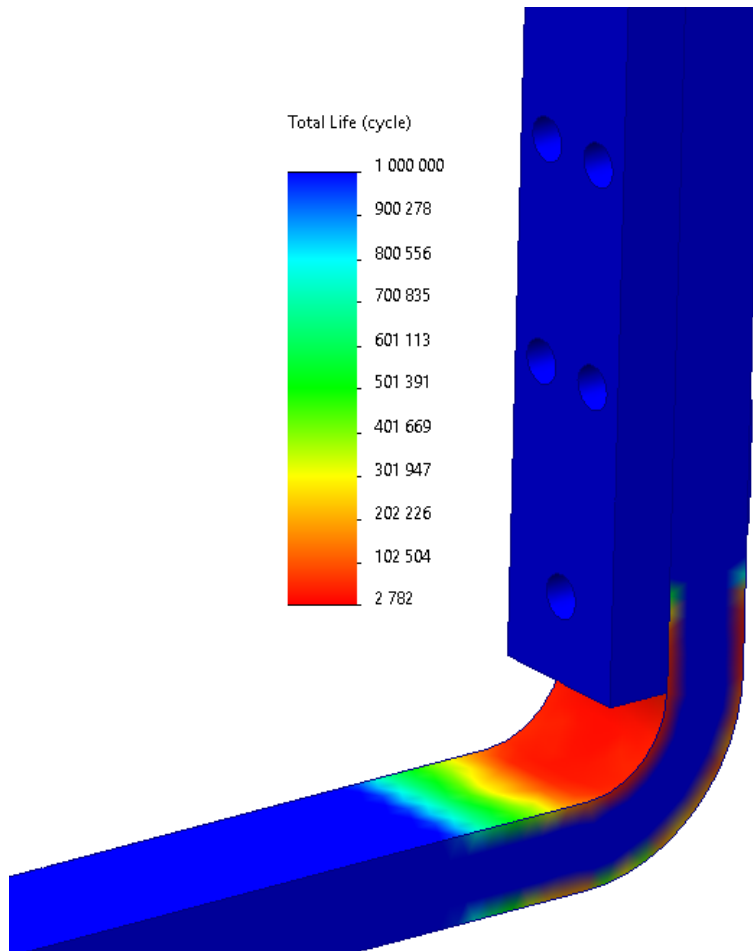
Staatististen lujuuslaskelmien jälkeen vaihdettiin materiaali normalisoituun AISI 4340 -teräkseen, jossa on huomattavasti suurempi myötölujuus kuin alun perin valitussa teräksessä. Piikit kiinnitettiin varmistusrautojen akseleihin M20 10.9 -pulteilla, joille asetettiin taulukon mukainen kiristysmomentti 690 Nm (The Engineering ToolBox, 2018).



Kuva 25. Epälineaarinen dynaaminen simulaatio.

Tarttujaan suunniteltujen varmistusrautojen simulaatiossa rautojen päälle pudotettiin 10 senttimetrin korkeudelta 1750 kilogramman painoinen puukuorma. Koska rautoihin kohdistuvat voimat eivät ylittäneet materiaalin myötölujuutta, ei rautoihin myöskään pudotuksesta tapahtuisi plastisia muutoksia. Plastisella muodonmuutoksella tarkoitetaan muutosta, jossa kappale ei enää palaudu alkuperäiseen muotoonsa (Kurkela, 2016, s. 14).

Tässä vaiheessa tuli myös selvittää, kuinka monta kertaa varmistusrautoja voi syklisesti kuormittaa turvallisesti, joten suoritettiin myös väsymisanalyysi (kuva 26). Saatujen tulosten perusteella varmistusrautojen rakenneominaisuudet heikkenisivät kriittisesti noin 2700 syklin jälkeen.



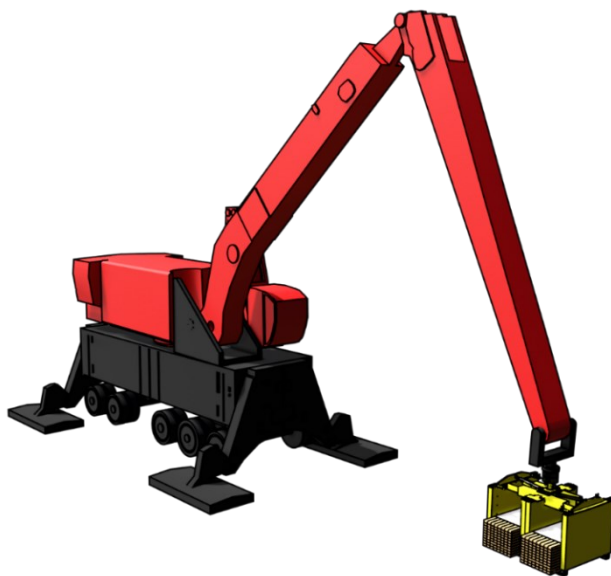
Kuva 26. Väsymisanalyysi.

Laskuissa ei kuitenkaan pystytty huomioimaan kaikkia tekijöitä, jotka vaikuttisivat rautojen todelliseen kestävyYTEEN. Tällaisia tekijöitä ovat muun muassa, kuinka paljon kineettistä energiaa törmäyksestä siirtyisi nosturi- ja tarttujakonaisuuden komponentteihin varmistusrautojen sijaan sekä kuorman todellinen nopeus törmäystilanteessa. Oletuksena on, että puupino ei putoaisi vapaasti, vaan liukuisi tarttujan leukojen pintoja pitkin varmistusrautojen päälle.

9.2 Visual Components

SolidWorksissa mallinnetusta tarttujasta tehtiin toiminnallinen malli Visual Component -ohjelmistossa simulaatiota varten. Tarttujan rakentamisessa Visual Componentsissa käytettiin apuna Visual Components *Academyn Model a Robot Gripper* -kurssia (Visual Components, 2023). Tarttujan liikkuvat komponentit tallennettiin STEP-tiedostomuotoon ja tuotiin Visual Components-ympäristöön. Liikkuvien osien välille luotiin linkit, ja tarttujan laippaan asetettiin kiinnityskohta materiaalikäsittelykoneelle. Robottiohjaimelta tulevilta signaaleilla pystyttiin sulkemaan sekä avaamaan tarttujan leuat, ja ohjaamaan varmistusrautoja.

Myös materiaalinkäsittelykone mallinnettiin ja lisättiin simulaatioon (kuva 27). Nosturiin lisättiin kinematiikat Visual Components *Academyn Model an Articulated Robot* -kurssin mukaisesti (Visual Components, 2018). Kuten tarttujassa, käsittelykoneen liikkuvat komponentit tallennettiin STEP-tiedostomuotoon ja tuotiin Visual Components-ympäristöön. Ympäristöstä valittiin Visual Componentsin käsivarsirobotti, jonka kinematiikat siirrettiin linkkien luomisen jälkeen materiaalinkäsittelykoneen hierarkiaan. Tämän jälkeen liikkuvien nivelien määrä ja sijainnit asetettiin sopivaksi nosturille. Simulaatiosta tallennettiin lopulta video käyttäen Visual Componentsiin ladattua Blenderer-lisäosaa. Video jaettiin eteenpäin työn toimeksiantajalle.



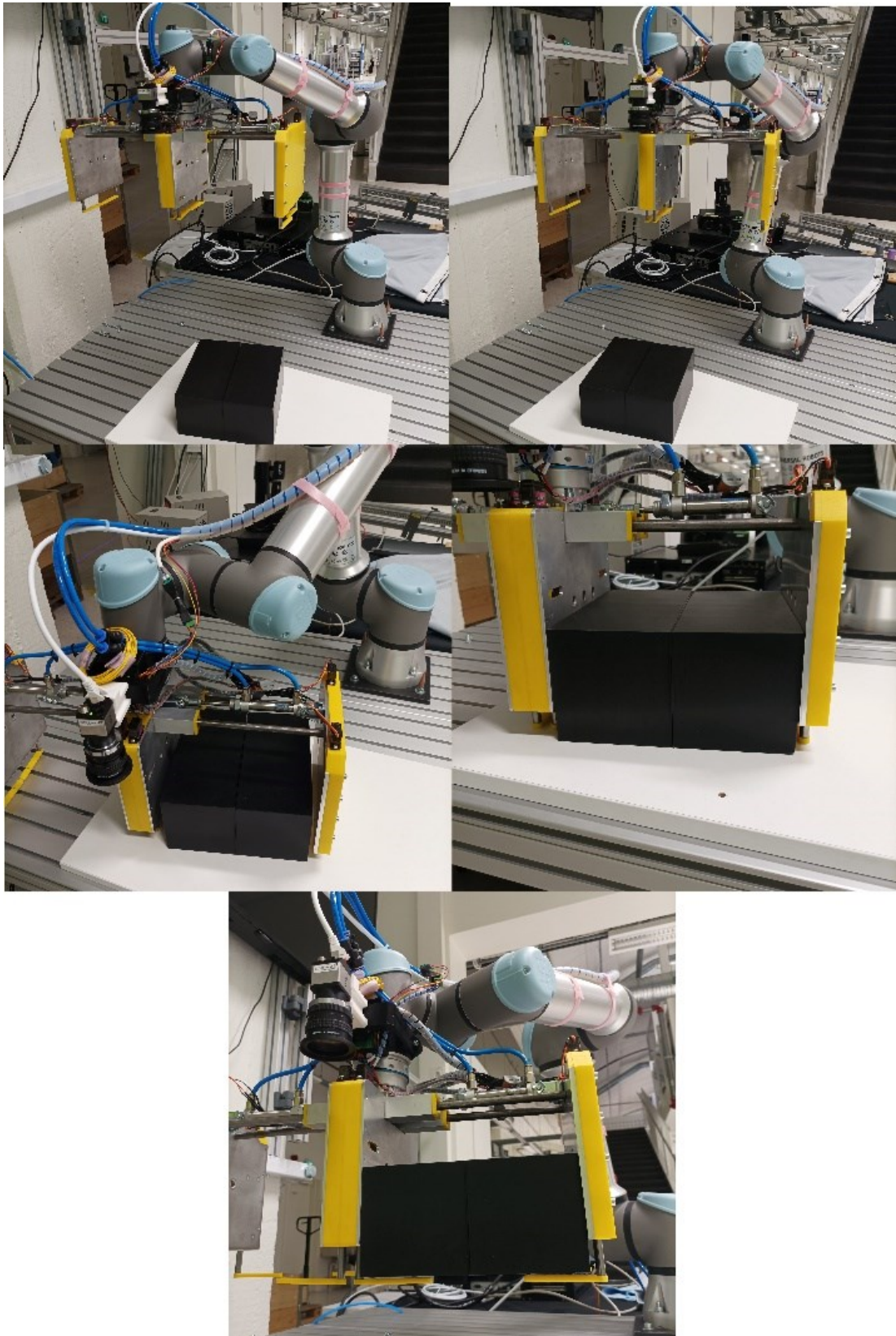
Kuva 27. Materiaalinkäsittelykone ja tarttuja.

10 TULOKSET

Tässä opinnäytetyössä saavutettiin kaikki sille asetetut tavoitteet seuraamalla Design Science Research -tutkimusmenetelmän vaiheita. Tarttujasta tehtiin koneistamalla sekä 3D-tulostamalla toiminnallinen pienoismalli, joka kiinnitettiin käsivarsirobottiin. Kääntyviin varmistusrautoihin ja käsivarsirobotin sekä tarttujan väliseen IO-käyttelyyn suunniteltiin piirilevy.

Kappaleiden noudossa käytettiin apuna Pythonilla kirjoitettua konenäköohjelmaa. Tarttujaa testattiin robotilla, ja testit menivät suunnitellusti; tarttujan nostokyky oli riittävä (kuva 28), varmistusrautojen ohjaus toimi suunnitellusti ja asemointi tapahtui konenäköavusteisesti.

Varsinaiseen hydrauliseen tarttujaan suunniteltiin sekä mallinnettiin varmistusraudat sekä mekanismi rautojen liikkeeseen. Tarttujasta sekä materiaalinkäsittelykoneesta tehtiin simulaatio Visual Components -ympäristössä. Simulaatiossa nosturi lastaa puupinoja satamalta rahtilaivaan.



Kuva 28. Kappaleen nosto vaiheittain.

11 YHTEENVETO

Tämä opinnäytetyö tehtiin Satakunnan ammattikorkeakoulun Porin kampuksella. Työn tarkoituksena oli suunnitella hydraulisen tarttujan prototyyppiin varmistusraudat, jotka estäisivät nostettujen pinojen putoamisen tilanteessa, jossa tarttujan puristusvoima pettää.

Työ tehtiin seuraamalla Peffersin ym. esittelemää Design Science Research - tutkimusmenetelmän prosessia. Työssä valmistettiin tarttujan prototyypistä varmistusrautoineen toiminnallinen pienoismalli, joka konenäön avustuksella pystyi nostamaan 3D-tulostettuja kappaleita UR5e-käsivarsirobotilla.

Varsinaista tarttujan prototyyppiä pohjana käyttäen suunniteltiin varmistusraudoille hydraulinen mekanismi. Suunnitellusta tarttujasta sekä mekaniismista tehtiin simulaatio Visual Components -ympäristössä, johon mallinnettiin myös materiaalinkäsittelykone tarttujalle.

Pienoismallin valmistus, konenäön liittäminen käsivarsirobotin ohjelmaan sekä simulaation tekeminen onnistui hyvin. Pienoismallin nostokyky oli riittävä, ja varmistusrautojen ohjaus piirilevyllä toimi suunnitellusti. Pythonilla kirjoitetun konenäköohjelman liittäminen käsivarsirobotin ohjaukseen tuotti aluksi haasteita, mutta lopulta saatiin toimimaan tavalla, joka riitti kyseiseen sovellukseen; tarttuja pystyttiin asemoida konenäköavusteisesti sopivaan pisteeseen nostoa varten. Simulaatio saatiin toimimaan toivotulla tavalla, jossa jokaista paikkapistettä ei ohjelmoitu erikseen. Nosturille kerrottiin vain mitä nostetaan, ja minne lasketaan. Simulaatio havainnollisti hyvin tarttujan sekä nosturin toimintaa satamaympäristössä.

Tämä opinnäytetyö opetti paljon mm. Visual Components -simulointiympäristön mahdollisuuksista suunnittelutyössä, Design Science Research -tutkimusmenetelmän vaiheista ja menetelmän hyödynnettävyydestä suunnittelututkimuksessa sekä Python-koodin hyödyntämisestä osana käsivarsirobotin ohjelmaa. Koko opinnäytetyö oli iso kokonaisuus, jonka eri vaiheet vaikuttivat

toisiinsa. Samalla tällaisen kokonaisuuden suunnittelu ja toteutus itsenäisenä työnä kasvatti ammatillista itsetuntoa ja loi uskoa tulevaisuuden vieläkin mielenkiintoisempien työtehtävien löytämiseen ja tekemiseen.

LÄHTEET

Berkeley. (n.d). John F. Canny. <https://www2.eecs.berkeley.edu/Faculty/Homemessages/canny.html>

Conger Industries Inc. (2024). Bolt-on forks are fairly rare and best used for applications where all loads are the same [kuva]. <https://www.conger.com/forklift-forks/>

IDS Imaging Development Systems GmbH. (2024). UI-5880CP Rev. 2.2 [kuva]. <https://en.ids-imaging.com/store/ui-5880cp-rev-2-2.html>

Kurkela, W. (2016). Kiteiden plastisuus ja dislokaatiot [LuK-tutkielma]. OuluREPO. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201611253119>

Microchip Technology Inc. (2019). ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P megaAVR® Data Sheet. <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/ProductDocuments/DataSheets/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf>

NXP. (2015). PCA9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller Product data sheet. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9685.pdf>

Peffer, K., Tuunanen, T., Gengler, C. E., Rossi, M., Hui, W., Virtanen, V. & Bragge, J. (2006). The Design Science Research Process: A Model for Producing and Presenting Information Systems Research. In 1st International Conference, DESRIST 2006 Proceedings. (pp. 83-106). Claremont Graduate University. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:jyu-201904092111>

The Engineering ToolBox. (2018). Metric Bolts - Tightening Torques. https://www.engineeringtoolbox.com/metric-bolts-maximum-torque-d_2054.html

Universal Robots A/S. (n.d). [Kuva UR5e robotista] <https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot/>

VISUAL COMPONENTS. (2018). Model an Articulated Robot. <https://academy.visualcomponents.com/lessons/model-an-articulated-robot/>

VISUAL COMPONENTS. (2023). Model a Robot Gripper – Part I. <https://academy.visualcomponents.com/lessons/model-a-robot-gripper-part-i/>

vom Brocke J., Hevner A., Maedche A. (2020). Introduction to Design Science Research. In: vom Brocke J., Hevner A., Maedche A. (eds) Design Science Research. Cases, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46781-4_1

Ye, R. (2023). G-code For CNC Machine: Commands & Uses. <https://www.3erp.com/blog/g-code-for-cnc/>