



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUHA KOLJONEN
ROBOTTIKÄSIVARREN RAKENTAMINEN MATERIAALIA
LISÄÄVÄÄ VALMISTUSTA HYÖDYNTÄEN

Kandidaatintyö

Vastuopettaja: DI Timo Prusi
Työn ohjaaja: TkL Jorma Vihinen
Työn ohjaaja: Prof. Risto Ritala

TIIVISTELMÄ

JUHA KOLJONEN: Robottikäsi­varren rakentaminen materiaalia

lisäävää valmistusta hyödyntäen

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 30 sivua

Elokuu 2015

Konetekniikan kandidaatin tutkinto

Pääaine: Integroitu tuotekehitys ja tuotanto

Työn ohjaaja: TkL Jorma Vihinen, Prof. Risto Ritala

Avainsanat: robotti, robottikäsi­varsi, AM-menetelmät, materiaalia lisäävä valmistus, 3D-tulostus, ohjaus, PID, säädin, kaskadisäädin

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on toteuttaa neliakselinen robottikäsi­varsi materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntäen. Työ toteutetaan Tampereen teknillisen yliopiston systeemitekniikan laitokselle.

Työn alussa perehdytään yleisimpiin materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiin ja niiden sovelluskohteisiin. Robottikäsi­varren valmistamiseen käytettävään pursotusmenetelmään perehdytään syvemmin. Tämän jälkeen esitellään robottikäsi­varren ohjaukseen käytettävät säätimet teoreettisella tasolla.

Rakennettu robottikäsi­varsi esitellään nivel kerrallaan. Nivelistä esitellään sekä mekaniikka että elektroniikka. Erilaisia robottikäsi­varren rakentamisessa vastaan tulleita haasteita käydään läpi ratkaisuineen. Robottikäsi­varren ohjauselektroniikka ja robottikäsi­varren ohjaamiseksi implementoidut säätimet esitellään. Lopuksi arvioidaan materiaalia lisäävän valmistuksen soveltuvuutta robottikäsi­varren nivelten mekaniikan eri käyttökohteisiin ja esitellään siinä hyväksi havaittuja käytäntöjä.

Työn lopputuloksena voidaan todeta materiaalia lisäävän valmistuksen soveltuvan robottikäsi­varren osien valmistamiseen. Robottikäsi­varteen tehtiin materiaalia lisäävästi sekä rakenteellisia että välityksen osia, kuten hammasrattaita. Osien valmistuksessa tulee ottaa huomioon käytetyn materiaalia lisäävän menetelmän rajoitteet ja haasteet.

ABSTRACT

JUHA KOLJONEN: Building a robot arm using additive manufacturing

Tampere University of Technology

Bachelor's thesis, 30 pages

August 2015

Bachelor's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Integrated Product and Production Development

Examiner: Lic.Sc. (Tech.) Jorma Vihinen, Prof. Risto Ritala

Keywords: robot, robot arm, additive manufacturing, 3D-printing, controller, cascade, PID

The purpose of this bachelor's thesis is to design and build a 4-axis robot arm by utilizing additive manufacturing and to evaluate the feasibility of additive manufacturing for robot arm's parts. The robot arm will be built for Tampere University of Technology, Department of Automation Science and Engineering.

First, the basics of the most common additive manufacturing techniques and their applications are presented. Important factors regarding material extrusion method, that is used to fabricate the robot arm's parts, are addressed. The theory of controllers that will be used to control the robot arm is also presented.

The robot arm is presented one axis at a time. The mechanics and electronics involved with each axis are explained. Problems faced when building the robot arm are presented with their respective solutions. The robot arm's control electronics and controllers are also shown. Finally, the applications and performance of additive manufacturing in the building of mechanical assemblies is evaluated, and found good practises in using it are introduced.

Additive manufacturing proved itself suitable for making parts for the robot arm. Both static and moving parts, such as transmission gears, were fabricated using additive manufacturing during the project. The limitations and challenges related to additive manufacturing must be taken into account when fabricating parts with additive methods.

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Materiaalia lisäävä valmistus	3
2.1 Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiä	4
2.2 Huomioitavaa pursotusmenetelmässä	6
3. Säädön teoriaa	7
3.1 Proportionaalinen säädin	7
3.2 PID-säädin	8
3.3 Kaskadisäätö	10
4. Robottikäsi	11
4.1 Robotin 1. nivel	13
4.2 Robotin 2. nivel	15
4.3 Robotin 3. nivel	17
4.4 Robotin 4. nivel	19
4.5 Robottikäsiarven säätö	21
5. Materiaalia lisäävän valmistuksen soveltuvuus robottikäsiarven	25
6. Yhteenveto	27
Lähteet	29

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ABS	Akryylinitriilibutadienistyreeni
AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer Assisted Design
DED	Directed Energy Deposition
FDM	Fused Deposition Modeling
NPN	Negative Positive Negative
PBF	Powder Bed Fusion
PET	Polyetyleenitereftalaatti
PLA	Polylaktidi
PWM	Pulse Width Modulation
SLA	Stereolitografia

$e(t)$	Säätimen erosuure
K_p	Säätimen proportionaaliparametri
K_i	Säätimen integraaliparametri
K_d	Säätimen derivaattaparametri
$pv(t)$	Prosessista mitattava arvo
$r(t)$	Säätimen asetusarvo

1. JOHDANTO

Teollisuuden automaatioasteen noustessa tarvitaan jatkuvasti erilaisia tehdasautomaation ratkaisuja. Tuotannon halutaan olevan joustavaa, minkä vuoksi myös automaatiojärjestelmän tulee mukautua uusiin käyttötarkoituksiin valmistusprosessin tarpeiden mukaisesti. Eräs ratkaisu on käyttää valmistusjärjestelmässä teollisuusrobotteja, sillä robotin voi ohjelmoida palvelemaan uutta käyttötarkoitusta, jolloin säästetään aikaa ja rahaa valmistusjärjestelmää muunneltaessa.

Tämä opinnäytetyö käsittelee kustannustehokkaan robottikäsi-robotin rakentamista materiaalia lisäävän valmistuksen avulla. Työn tarkoituksena on toteuttaa 4-akselinen robottikäsi-robotti, joka kykenee suorittamaan liikkeitä ja liikesarjoja. Robottikäsi-robotin tulee olla valmistettavissa perustyökalujen avulla kuluttajahintaisista, helposti saatavilla olevista komponenteista. Robottikäsi-robotti toteutetaan Tampereen teknillisen yliopiston systeemitekniikan laitokselle. Robottikäsi-robotti toimii demonstraationa säädon toteutuksesta ja sitä on tarkoitus hyödyntää tutkimus- ja harjoituskäytössä.

Materiaalia lisäävien valmistuslaitteiden määrä markkinoilla on kasvanut viime vuosina, koska osa siihen liittyvistä patenteista on rauennut ja uudet yritykset voivat hyödyntää niitä. Markkinoille on saapunut uusi kategoria edullisia, noin 1000 € hintaisia 3D-tulostimia. Kuluttajahintaisia 3D-tulostimia voidaan hyödyntää nykyään myös haastavien kappaleiden valmistukseen tulostustarkkuutensa puolesta. Siksi tässä työssä pyritään rakentamaan robottikäsi-robotti pääosin edullista 3D-tulostinta hyödyntäen. Materiaalia lisäävän valmistuksen kustannusten alenemiseen on havahduttu myös teollisuudessa, jossa 3D-tulostimia käytetään yhä enemmän prototyyppien pikavalmistukseen. Työn seuraavassa luvussa käsitellään erilaisia materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiä. Siinä esitellään yleisimmät käytössä olevat menetelmät ja niiden toimintaperiaatteet. Robottikäsi-robotin osien valmistamiseen käytettävään materiaalia lisäävään menetelmään ja sen käyttöön liittyviin periaatteisiin perehdytään tarkemmin.

Työn kolmannessa luvussa käydään läpi yleisesti käytettyjen säätimien toiminta teorian tasolla. Säätimet esitellään lohkoaviona ja yhtälön muodossa. Lisäksi annetaan menetelmiä säätimien virittämiseen. Esiteltäviä säätimiä hyödynnetään robottikäsi-
varren nivelten ohjauksessa.

Neljännessä luvussa esitellään 4-akselinen robottikäsi-
varsi nivel kerrallaan. Nivelistä käydään läpi sekä elektroniikka että mekaniikka. Robottikäsi-
varren nivelten mekaniikan rakentamiseen hyödynnetään materiaalia lisäävää valmistusta. Robottikäsi-
varren rakentamisessa vastaan tulleet ongelmat käydään läpi ratkaisuineen. Luvussa esitellään myös robottikäsi-
varren ohjaukseen käytetyt komponentit ja robottikäsi-
varren ohjauksen toimintaperiaate.

Viidennessä luvussa arvioidaan materiaalia lisäävällä valmistuksella tehtyjen osien sopivuutta robottikäsi-
varren rakenteisiin. Paikallaan pysyvät ja liikkuvat osat, kuten hammasrattaat käsitellään erikseen. Viidennessä luvussa esitellään myös työn aikana havaittuja hyviä käytäntöjä materiaalia lisäävän valmistuksen käytössä. Kuudennessa luvussa käydään läpi työn aikana ilmenneitä robottikäsi-
varren ongelma-
kohtia ratkaisuehdotuksineen ja annetaan suosituksia rakennetun robottikäsi-
varren kehittämiseksi. Kuudennessa luvussa esitetään myös päätelmiä materiaalia lisäävän valmistuksen käytettävyydestä valmistusmenetelmänä robottikäsi-
varren rakentami-
sessa saatujen kokemusten perusteella.

2. MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS

Termiä materiaalia lisäävä valmistus käytetään valmistusmenetelmistä, jotka perustuvat kappaleiden muodostamiseen materiaalia lisäten. Menetelmiin voidaan viitata myös termillä AM-menetelmät, joka tulee menetelmän englanninkielisestä vastineesta Additive Manufacturing. Pohja materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmille on kehitetty 1980-luvun alussa Nagoya Municipal Industrial Research Institutessa [13]. Materiaalia lisäävä valmistus käsittää terminä metallia, keraameja ja muovimateriaaleja lisäävät menetelmät. 2000-luvun alkupuolella 3D-tulostaminen koski käsitteenä muovia lisääviä valmistusmenetelmiä, mutta nykyään 3D-tulostamista käytetään synonyyminä materiaalia lisäävälle valmistukselle. Terminä materiaalia lisäävä valmistus on tarkempi, ja se kuvaa ammattimaista valmistusmenetelmää [6].

Materiaalia lisäävän valmistuksen suosion kasvua selittää kappaleiden suunnittelun vapaus ja valmistuksen nopeus verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Esimerkiksi valamiseen perustuvissa menetelmissä joudutaan ottamaan huomioon päästökulmat ja kappaleen sujuva poistuminen valumuotista, mikä saattaa hankaloittaa monimutkaisen kappaleen suunnittelua merkittävästi. Terällä lastuavissa menetelmissä, kuten sorvauksessa ja jyrsinnässä, tulee huomioida esimerkiksi lastuavan työkalun ulottuvuus ja työstökoneen akselien lukumäärä. AM-menetelmissä ei ole edellä mainittuja rajoituksia, vaan kappaleen suunnittelija voi toimia vapaasti ja keskittyä toimivan kappaleen suunnitteluun, sen sijaan, että aikaa kuluu valmistusmenetelmän rajoitusten huomioimiseen.

Kappaleen valmistus AM-menetelmillä ei vaadi erikseen suunniteltua työstökoneeseen kiinnitystä tai esimerkiksi valumuotteja, joten kappaletyypin vaihtamiseen kuuluva koneen asetus aika on AM-menetelmillä pieni. Tämä mahdollistaa joustavan tuotannon ja tuotteiden tehokkaan räätälöinnin asiakkaan toivomusten mukaisesti. Kappaleet valmistetaan aina samanlaiselle alustalle, joten valmistettavasta kappaletyypistä toiseen vaihtaminen onnistuu valvotun tuotannon lisäksi miehittämättömässä tuotannossa.

Kappaleisiin voidaan materiaalia lisäävällä valmistuksella tehdä esimerkiksi muotoja, jotka on mahdotonta valaa tai lastuta. Ruotsalainen superautovalmistaja Koe-

nigsegg hyödyntää materiaalia lisäävää valmistusta Agera One:1 -autonsa turboah-
timessa, jonka virtausgeometriaa voidaan muuttaa moottorin tarpeiden mukaisesti
[24]. Ahdin sisältää kaksi spiraalimaisesti kulkevaa kanavaa, joissa kulkevaa virtaus-
ta säädellään mekaniikalla, joka muodostetaan jo valmistusvaiheessa turboah-
timen sisään. Spiraalin muotoiset kanavat ja turbon sisällä oleva venttiilimekaniikka olisi-
vat käytännössä mahdotonta valmistaa perinteisin menetelmin.

2.1 Materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiä

Materiaalia lisääviä valmistusmenetelmiä on käytössä useita eri käyttötarkoituksiin
ja eri materiaaleille. Yhteistä menetelmille on kerrosmainen valmistus, eli valmistet-
tava kappale muodostetaan kerros kerrokselta materiaalia lisäten. Ennen valmistuk-
sen aloittamista tietokoneohjelma muuntaa kappaleen 3D-mallin kerroksittaiseksi,
minkä jälkeen päällekkäisistä viipaleista muodostetaan työstömenetelmän vaatimus-
ten mukainen tiedosto. Valmistusprosessin kerrosmaisuus aiheuttaa monille materi-
aalia lisäävästi valmistetuille kappaleille ominaisen raidallisen pintatekstuurin [16,
pp. 274–276]. Materiaalia lisäävät laitteet käyttävät lastuavien työstökoneiden ta-
paan jotain varianttia RS-274 -tyypin numeerisen ohjauksen ohjelmointikielestä.

Valmistettavan kappaleen kerroksen valmistuessa siirrytään järjestyksessä seuraa-
vaan kerrokseen, joka kiinnittyy edelliseen kerrokseen prosessin edetessä. Materi-
aalin kiinnittymismekanismi riippuu työstömenetelmästä. Kerrosten kiinnittyminen
saavutetaan joko kemiallisella sidoksella, sulattamalla, sintraamalla tai erillisellä si-
dosaineella. Edullisen hintaluokan materiaalia lisäävän valmistuksen laitteet hyödyn-
tävät ensisijaisesti muovikappaleiden valmistukseen sopivaa Fused Deposition Mo-
deling (FDM)-menetelmää, jonka kerrosten kiinnittymismekanismi on kemiallinen
sidon [14, p. 19].

2.1.1 Metallikappaleiden valmistus

Metallisten kappaleiden valmistamiseen voidaan käyttää Powder Bed Fusion (PBF)
eli jauhepetimenetelmää, jossa metallijauhetta levitetään työalustalle ja kappale
muodostetaan kerros kerrokselta. Lasersäde käy jokaisessa kerroksessa sulattamas-
sa ne kohdat, joiden halutaan muodostavan kappaleen [7, pp. 103–105]. Menetel-
mä tuottaa tarkkoja kappaleita, jotka voidaan valmistuksen jälkeen jatkokäsitel-
lä esimerkiksi hiekkapuhaltamalla tai lastuavilla työkaluilla, mikäli kappaleella on
tiukkoja toleranssivaatimuksia. Jauhepetimenetelmä sopii kappaleille, joilta vaadi-
taan erityisominaisuuksia, sillä menetelmällä voidaan tehdä kappaleita monenlaisis-
ta metalliseoksista. Joidenkin materiaalien sintraaminen voi aiheuttaa työstettävään

kappaleeseen sisäisiä jännityksiä, jotka joudutaan poistamaan jälkeenpäin erillisellä lämpökäsittelyllä. Eräs vaativa käyttökohde jauhepetimenetelmälle on SpaceX:n SuperDraco-rakettimoottori, joka on lähes kokonaan valmistettu materiaalia lisäävin menetelmin [22].

Metallikappaleiden valmistamiseen voidaan käyttää myös Directed Energy Deposition (DED) eli suorakerrostusmenetelmää. Menetelmässä suutinlaitteisto suihkuttaa sulaa metallia kappaleen pinnalle [8, p. 245]. Sula metalli kiinnittyy valmistettavaan kappaleeseen muodostaen uuden pienen osan kappaletta. Robotti liikuttaa metallia suihkuttavaa laitteistoa suunnitellun työstöradan mukaisesti. Menetelmän etuna on mahdollisuus lisätä materiaalia olemassa oleviin kappaleisiin ja siten esimerkiksi korjata rikkoutuneita osia. Laitteiston kompakti koko mahdollistaa sen integroimisen muihin valmistuslaitteisiin, kuten koneistuskeskukseen.

2.1.2 Muovikappaleiden valmistus

Koska metallikappaleille sopivien AM-menetelmien käyttökustannukset ovat edelleen melko korkeat, eivät ne aina sovellu prototyyppien valmistamiseen. Muovikappaleiden materiaalia lisäävä valmistus on edullisempaa kuin metallisten. Eräs ensimmäisiä materiaalia lisääviä menetelmiä on stereolitografia (SLA), jossa UV-herkkä nestemäinen polymeeri jähmetetään tarkasti ohjatun valon avulla [11]. Menetelmä on jauhepetimenetelmän tapaan toiminnaltaan kerrosmainen. SLA on käyttökustannuksiltaan edullisempi menetelmä kuin metallien kanssa toimivat AM-menetelmät, mutta se on jäänyt vieläkin edullisempien menetelmien varjoon. Stereolitografialla valmistettujen muovikappaleiden pinnanlaatu on korkea.

Edullisin, ja siksi myös tällä hetkellä yleisin tapa valmistaa muovisia kappaleita materiaalia lisäävästi on Material Extrusion eli materiaalin pursotusmenetelmä, jossa kappaleet muodostetaan pursottamalla kuumaa muovia. Menetelmä toimii monien muovilaatujen kanssa. Yhdysvaltalainen Stratasys -niminen yritys on kehittänyt ja patentoinut menetelmän Fused Deposition Modeling -nimellä 1990-luvun taitteessa [5, p. 124]. Sitten patentti on rauennut, minkä jälkeen markkinoille on tullut lukuisia menetelmää hyödyntäviä 3D-tulostimia. Harrastelijoiden rakentamat 3D-tulostimet toimivat pursotusmenetelmällä, mutta ne tunnetaan FDM-laitteina.

FDM-laitteet käyttävät kappaleiden raaka-aineena muovilankaa, jota on saatavissa noin yhden kg:n keloilla. Laitteissa käytetään yleisesti sekä 1,75 mm että 3 mm halkaisijan muovilankoja. Tyypillisiä pursotinlaitteen käyttämiä materiaaleja ovat akryylnitriilibutadieenistyreeni (ABS)-, polylaktidi (PLA)- ja polyetyleenitereftalaatti (PET)-muovit. Valmistuskustannukset muodostuvat FDM-menetelmässä lä-

hinnä raaka-aineesta, joka maksaa noin 25 €/kg. Raaka-ainekustannusten lisäksi laite kuluttaa sähköä noin 200 W.

2.2 Huomioitavaa pursotusmenetelmässä

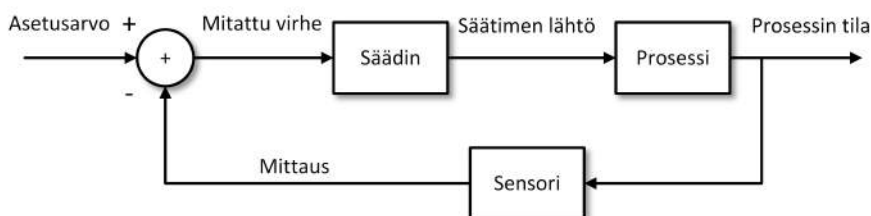
Pursotusmenetelmä on joustava valmistettavan mallin suhteen. Menetelmällä voidaan valmistaa minkä tahansa muotoisia kappaleita, mutta valmistettavan kappaleen laadun parantamiseksi ja tuotantokustannusten minimoimiseksi on hyvä ottaa huomioon menetelmän haasteet. Tässä luvussa esitellään niistä tärkeimpiä. Laaduksi voidaan käsittää kappaleen sopivuus aiottuun käyttötarkoitukseen, mikä tässä työssä on erityisesti mekaanisten kokoonpanojen valmistus [10, p. 9].

Pursotusmenetelmässä laitteen mekaniikka liikuttaa valmistettavan kappaleen päällä pursotinlaitteistoa, joka sulattaa ja pursottaa muovilankaa kappaleen muodostamiseksi. Laite muodostaa kappaleen tyypillisesti noin 0,2 mm korkeista kerroksista. Kerrokseen pursotettavat piirteet jähmettyvät sekunneissa. Kappaleen valmistuva osuus lämpenee paikallisesti, jolloin uusi muovi tarttuu edelliseen kemiallisesti. Prosessissa tapahtuva jatkuva lämpeneminen ja jäähtyminen aiheuttavat kappaleeseen lämpöjännityksiä, jotka heikentävät valmiin kappaleen mekaanista kestävyyttä ja voivat jopa väännellä tai halkaista kappaleen tiettyjä muovilaatuja, kuten ABS-muovia käytettäessä [17, p. 59][25, p. 1088]. Siten mekaanisessa kokoonpanossa käytettävät kappaleet on hyvä suunnitella tulostettavaksi sellaisessa asennossa, että suurimmat voimat kohdistuvat kappaleeseen pääasiassa kerrosten suuntaisesti [3, p. 263]. Valmistuksen aikaisen lämpölaajenemisen vuoksi suurten, halkaisijaltaan noin yli 10 cm kokoisten kappaleiden materiaaliksi kannattaa valita sellainen polymeeri, jolla on matala lämpölaajenemiskerroin. Tällaisia ovat esimerkiksi PLA- ja PET-muovit.

Pursotusmenetelmällä valmistettujen kappaleiden tarkkuus muodostuu sekä laitteen mekaanisesta tarkkuudesta että materiaalia pursottavan suuttimen halkaisijasta. Muodostettavan kappaleen kulmien pienin teoreettinen pyörityssäde on suoraan riippuvainen suuttimen halkaisijasta. Laitteen mekaanisten liikkeiden tarkkuus ja pursotinlaitteiston materiaalin syötön kalibrointi on huomioitava erityisesti mekaanisissa kokoonpanoissa, kuten mekaanisten välitysten rattaissa, joissa osien keskinäinen yhteensopivuus on ensisijaisen tärkeää. Pursotusmenetelmällä valmistettavan kappaleen reiät muodostuvat usein hieman pienemmäksi kuin 3D-mallissa, sillä pursotettava muovi kerääntyy paksummin reikien sisäreunoille pursotinlaitteiston liikkeessä suunnitellun työstöradan keskilinjaa. Reikien koon muuttumiselle on kehitteillä kompensointimenetelmiä, jotka eivät ole toistaiseksi yleistyneet [20].

3. SÄÄDÖN TEORIAA

Säädin on laite tai järjestelmä, joka ohjaa laitteiden tai prosessien toimintaa. Säädin kerää mittaustietoa, käsittelee sen ja laskee tarvittavat korjaavat toimenpiteet, jotta säädettävä laite tai prosessi saadaan kulkemaan kohti tavoitetta eli säätimen asetusarvoa. Tuotanto- ja automaatiojärjestelmissä on tyypillisesti tarpeellista säätää laitteiden tai prosessien toimintaa, ja säätö onkin automaatiotekniikan peruskomponentti [12, s. 35].



Kuva 3.1 Takaisinkytketyn säädön lohkokaaavioesitys.

Kuvassa 3.1 on esitetty periaatekuva takaisinkytketystä säädöstä, jossa säädin saa tiedon prosessin tilasta anturilta ja tekee korjaavat toimenpiteet prosessin tilan ja prosessille asetetun tavoitteen perusteella [12, s. 35]. Säätimellä on aina tulo ja lähtö. Säätimen tulolla tarkoitetaan säätimelle annettavaa asetusarvoa ja säätimen lähdöllä arvoja, jotka lähtevät säätimeltä eteenpäin. On olemassa tilanteita, joissa prosessia käsketään ilman takaisinkytkentää eli tietoa prosessin nykytilasta. Tällaista prosessin hallintaa kutsutaan avoimeksi ohjaukseksi. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi tehtaan prosessien hallitussa alajajossa [12, s. 27].

3.1 Proportionaalinen säädin

Proportionaalinen säädin eli P-säädin on yksinkertaisin takaisinkytketty lineaarinen säädin. P-säädin on suljetun säätöpiirin säädin, ja siten se kykenee kompensoimaan lähtöään prosessin tilan virheen eli erosuureen suhteen [9, s. 45]. Vaikka P-säädin on matemaattisesti yksinkertainen, se on usein riittävän hyvä yksinkertaisen prosessin säätöön.

Säätötahtuman työkierron alussa säädin laskee erosuureen $e(t)$ yhtälöstä (3.1)

$$e(t) = r(t) - pv(t), \quad (3.1)$$

jossa $r(t)$ on säätimelle ulkopuolelta annettu asetusarvo eli referenssiarvo ja $pv(t)$ prosessista mitattava lukuarvo [12, s. 36].

P-säätimen lähtö riippuu erosuureesta painotettuna vahvistusparametrilla K_p . Lähtö $u(t)$ lasketaan yhtälön (3.2)

$$u(t) = K_p e(t) \quad (3.2)$$

mukaisesti. Vahvistusparametria kutsutaan usein proportionaaliparametriksi. Säätimen toimintasuunta voi olla suora, jolloin erosuureen kasvu kasvattaa säätimen lähtöä, tai käänteinen, jolloin erosuureen kasvu pienentää säätimen lähtöä [9, s. 47].

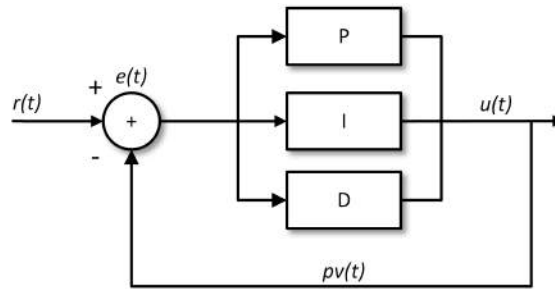
Proportionaalisen säätimen työkiertoa voidaan suorittaa niin nopealla taajuudella kuin on tarpeellista säädettävän systeemin tasaisen toiminnan saavuttamiseksi. Kun prosessin tila lähenee asetusarvoa ja säädin saavuttaa tasapainotilan, jäljelle jäävä pieni virhe asetusarvon ja prosessin tilan välillä on käänteisesti verrannollinen säätimen vahvistukseen K_p [9, s. 45].

Proportionaalista säädintä voidaan käyttää esimerkiksi lämpökattilan polttoainesyötön venttiilin säätöön, jolloin asetusarvo $r(t)$ on lämpökattilan tavoitelämpötila ja $pv(t)$ saadaan mittaamalla lämpökattilalta lämpötila sopivan sensorin avulla. Säätimen lähtö $u(t)$ syötetään polttoaineen virtausta säätelevälle venttiilille. Mikäli tavoitelämpötilan ja nykyisen lämpötilan ero on suuri, polttoainetta virtaa paljon lämpökattilalle. Esimerkkitapauksessa säätimen toimintasuunta on siten suora.

3.2 PID-säädin

P-säädintä hienostuneempi PID-säädin on yksi säätötekniikan perussäätimistä ja yleisin teollisuudessa käytettävä säädin. PID-säädin on kehitetty P-säätimen pohjalta, kun Yhdysvaltain laivaston sotalaivojen ohjauksessa havaittiin tarve säätää prosessia nykyisen erosuureen lisäksi aiempien erosuureiden ja tulevan erosuureen ennusteen perusteella [4, p. 18]. Säätimen lyhenteen kirjaimet tulevat sen kolmesta toiminnosta: proportionaali, integroiva ja derivoiva. Proportionaaliosuuden toiminta on aiemmin kuvailtu alaluvussa 3.1. Integraaliosuus lisää yhteen aikaisempien säätimen työkiertojen erosuureet, joten mitä pidempään virhe systeemissä ilmenee, sitä suurempi vaikutus sillä on säätimen lähtöön. Integraaliosuus ajaa siten prosessin jatkuvan virheen nollassa. Derivaattiosuus reagoi erosuureen nopeisiin muutoksiin

tekemällä nopeita korjauksia säätimen lähtöön ja siten mahdollistaa tulevien virheiden ennustamisen [1, pp. 64–70].



Kuva 3.2 PID-säätimen lohkokaaavioesitys.

Kuvassa 3.2 on esitetty rinnakkaismuotoinen PID-säädin lohkokaaaviona [12, s. 137]. Säätimeen tulee asetuservo vasemmalta. Säätimessä lasketaan erosuure $e(t)$ asetuservon $r(t)$ ja mittauksen $pv(t)$ perusteella, minkä jälkeen säätimen P-, I- ja D-osuudet toimivat rinnakkain itsenäisesti. Saadut arvot summataan yhteen ja summan lopputulos eli säätimen lähtö siirtyy eteenpäin toimilaitteelle. Kuvassa 3.2 esitetty PID-säädin voidaan kirjoittaa yhtälöksi (3.3)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t), \quad (3.3)$$

jossa $u(t)$ on säätimen lähtö, K_p säätimen proportionaaliparametri, K_i säätimen integraaliparametri ja K_d säätimen derivaattaparametri. Integrointimuuttuja τ saa arvot nollassa nykyiseen t :hen. Erosuure $e(t)$ voidaan P-säätimen tapaan laskea yhtälöstä (3.1). Esitetty PID-säätimen rinnakkainen muoto on eräs PID-säätimen variaatio. PID-säätimestä on olemassa myös ei-rinnakkaisia muotoja, joissa esimerkiksi proportionaaliosuuden muuttaminen voi vaikuttaa säätimen integraali- ja derivaattasuusien toimintaan [9, s. 60].

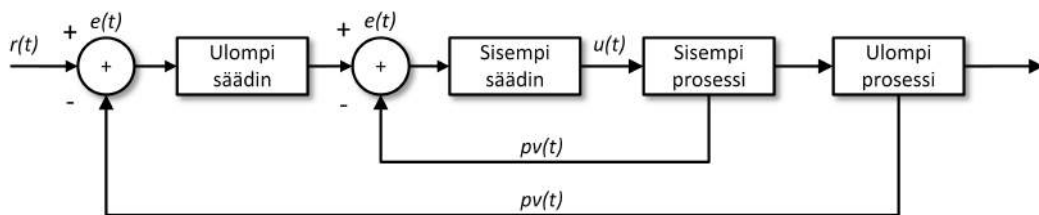
Säädin viritetään prosessille sopivaksi muuttamalla K_p -, K_i - ja K_d -termejä. Proportionaalitermin kasvattaminen saa säätimen lähdön reagoimaan lineaarisesti voimakkaammin erosuureeseen. Integraalitermin kasvattaminen saa säätimen reagoimaan nopeammin ja voimakkaammin pitempiäaikaiseen virheeseen systeemissä. Säätimen derivaattatermin suuruus vaikuttaa siihen, kuinka paljon erosuureen nopeisiin muutoksiin reagoidaan.

PID-säätimen säätöparametrien eli K_p :n, K_i :n ja K_d :n hakemiseen on olemassa useita erilaisia menetelmiä. Eräs tunnettu menetelmä on Zieglerin-Nicholsin jatkuvan värähtelyn menetelmä. Siinä säädettävään prosessiin aiheutetaan häiriö ja kokeillaan, millä parametrin K_p -arvolla säätimen lähtö alkaa oskilloida K_i :n ja K_d :n ollessa arvoltaan nolla. Saavutetusta K_p -kriittisen vahvistuksen arvosta ja oskilloinnin

jaksonajasta lasketaan K_i ja K_d . Toisaalta PID-säädin reagoi loogisesti säätöparametrien muutoksiin, joten säätöparametrien määrittäminen kokeellisesti on mahdollista. Kokeellinen säätäminen on usein aikaa vievää ja häiritsee säädettävää prosessia [12, s. 140–143].

3.3 Kaskadisäätö

Kaskadisäädössä prosessin yhtä toimilaitetta säädetään kahdella säätimellä. Kaskadikytkennässä kytketään kaksi säädintä sisäkkäin siten, että ulomman säätimen lähtöä käytetään sisemmän säätimen asetusarvona. Kuvassa 3.3 on esitetty kaskadikytkentä lohkokaavioesityksenä. Prosessin tilan asetusarvo $r(t)$ annetaan ulomalle, primääriselle säätimelle. Kummallekin säätimelle lasketaan oma erosuure $e(t)$. Sisemmän eli sekundäärisen säätimen lähtö $u(t)$ syötetään prosessiin, esimerkiksi säädettävälle venttiilille tai toimilaitteelle. Säätöpiirissä on siis kaksi erikseen viritettävää säädintä, jotka kumpikin saavat omat mittauksensa $pv(t)$ prosessista. Säätimet voivat olla esimerkiksi edellä esitellyn PID-säätimen tyyppisiä [12, s. 136].



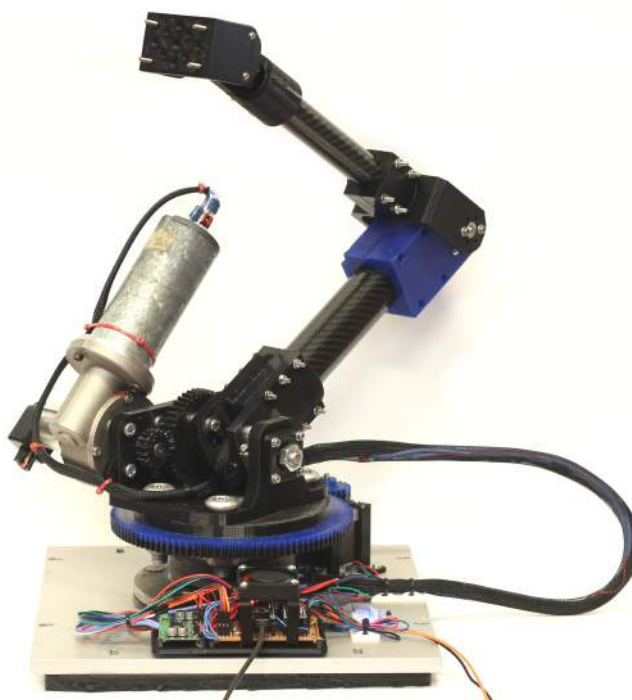
Kuva 3.3 Kaskadisäädön lohkokaavioesitys.

Kaskadisäädöllä on usein mahdollista saavuttaa sekä parempi prosessin vakaus että nopeampi ja tarkempi prosessin toiminnan säätö. Toisaalta kaskadisäätö voi olla monimutkainen, ja se vaatii toimiakseen enemmän laitteistoa kuin yksittäinen säädin. Kaskadisäädössä sisempi säädin toimii tyypillisesti noin 3-5 kertaa nopeammin kuin ulompi säädin [12, s. 136].

Hyvä esimerkki kaskadisäädöstä on vesitankin pinnankorkeuden säätö. Primäärinen pinnankorkeuden PID-säädin saa asetusarvon esimerkiksi järjestelmän ohjauspaneelilta ja mittauksen säiliössä sijaitsevalta pinnankorkeussensorilta. Primäärisen säätimen lähtö syötetään sekundääriselle säätimelle, joka säätää säiliöön johtavan putkiston virtausta ohjaavaa venttiiliä. Sekundäärinen säädin saa mittauksen putkiston virtauksesta. Kaskadisäädin kompensoi tässä tapauksessa esimerkiksi veden syöttöpaineen ja siten veden virtauksen muutoksia huomattavasti yksittäistä pinnankorkeuden säädintä paremmin.

4. ROBOTTIKÄSIVARSI

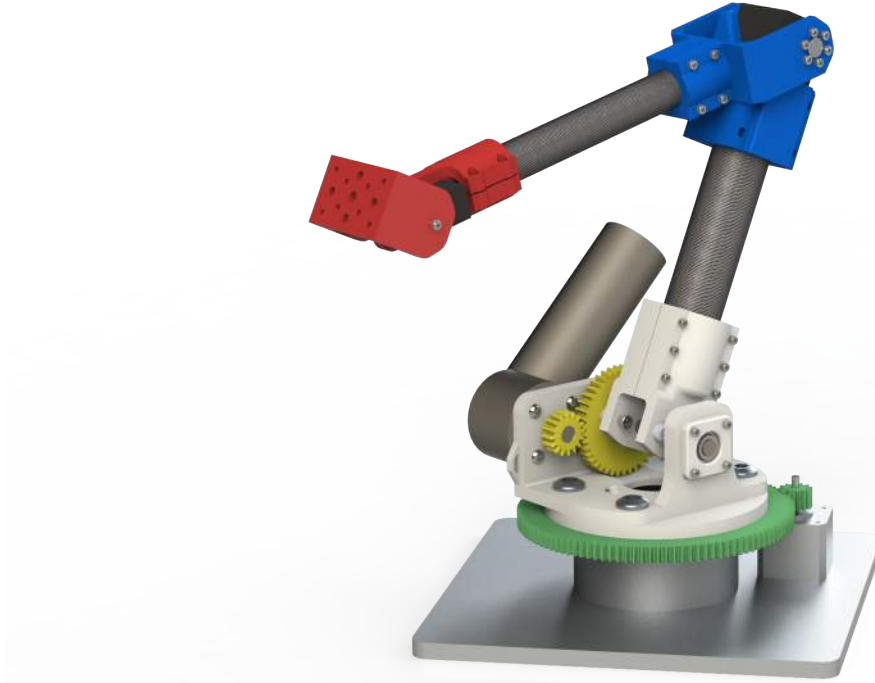
Tämä osuus käsittelee kuvassa 4.1 esitetyn robottikäsi­varren suunnittelua ja valmistusprosessia. Robotin neljä niveltä käydään läpi järjestyksessä robotin pohjasta lähtien. Robottikäsi­varsi on sarjatyyp­pinen, eli sen nivelet rakentuvat peräkkäin. Monissa teollisuudessa käytettävissä robottikäsi­varsissa on käytössä kuusi akselia, mikä mahdollistaa neliakselista robottia vapaammat liikeradat. Neljä akselia riittää kuitenkin useimpiin tilanteisiin, kuten tavaran siirtelyyn ja kappaleiden latomiseen. Neljä akselia on myös tarpeeksi demonstroimaan erilaisia tapoja toteuttaa robotin akselointi materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntäen.



Kuva 4.1 4-akselinen robottikäsi­varsi.

Robottikäsi­varren yleinen tarkoitus on liikuttaa työkalua, joka kiinnitetään robot­tikäsi­varren päähän. Robottikäsi­varren nivelten tulee voida liikkua vakionopeudella ja robottikäsi­varren työkalua tulee voida siirtää eri koordinaatteihin riittävällä tark­kuudella. Erilaisten liikkeiden toistettavuus on tärkeää, eli robotin antureiden ja mekaniikan deterministinen toiminta on ensisijainen kriteeri niveliä suunniteltaessa.

Jokaisen nivelen on kyettävä kannattelemaan seuraavien nivelten massa ja robotin päähän asennettavan työkalun massa myös robotin ääri-asennoissa. Työkalu voi olla sovelluksesta riippuen esimerkiksi pneumaattinen imukuppi, mekaaninen tarttuja tai optinen sensori.



Kuva 4.2 Robottikäsivarren CAD-malli.

Robottikäsivarren mekaaniset osat valmistettiin soveltuvilta osin pursotusmenetelmällä toimivalla 3D-tulostimella. Kuvassa 4.2 esitetty robottikäsivarren Computer Assisted Design (CAD)-malli suunniteltiin pursotusmenetelmän rajoitukset ja hyvät käytännöt huomioon ottaen siten, että osia voi parametrisesti muuttaa tarpeen tullen erilaisten robottikäsivarsien valmistamiseksi. CAD-malli suunniteltiin SolidWorks CAD-suunnitteluohjelmalla. Osien valmistukseen käytettiin pursotusmenetelmää.

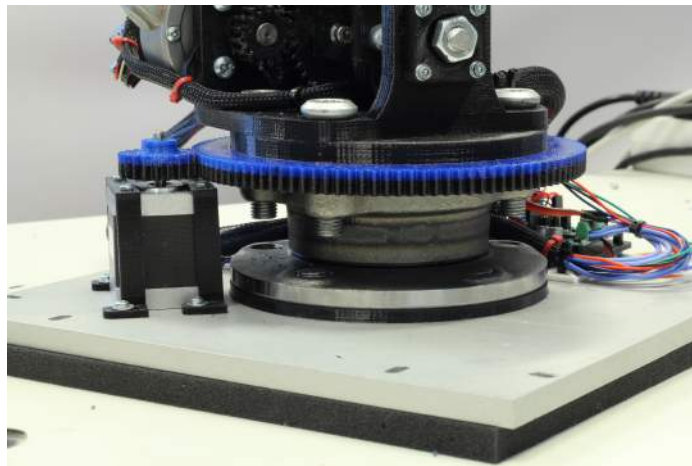
Robottikäsivarren nivelten suunnittelussa otettiin huomioon tasapaino nivelten vääntötarpeissa. Robottikäsivarrelle on luonnollista, että sen alkupään nivelten maksimivääntö on suurempi kuin myöhempien nivelten vääntö. Nivelten vääntötarpeet on hyvä ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa, sillä robottikäsivarren loppupään akselien pienet vaatimukset mahdollistavat kevyiden ratkaisujen hyödyntämisen. Näin voidaan välttää ylimääräisen massan kantaminen robottikäsivarren nivelillä.

4.1 Robotin 1. nivel

Robottikäsi­varren perustana on 10 mm paksu alumiinilevy, joka voidaan kiinnittää esimerkiksi pöytään tai muuhun vastaavaan alustaan, jolle robottikäsi­varsi halutaan asentaa. Robotin ensimmäinen nivel sijoittuu robottikäsi­varren pohjalevyn ja varsinaisen käsi­osan väliin. Nivel mahdollistaa robottikäsi­varren alustan pyörivän liikkeen, jossa ensimmäinen nivel pyörittää robottikäsi­vartta systeemin kiinnityspinnan normaalin ympäri. Tämä muodostaa perustan robotin ympyrän muotoiselle ulottuvuudelle. Robottikäsi­varren ensimmäinen nivel on esitetty kuvassa 4.2 harmaalla värillä, ja nivelen rattaat vihreällä värillä.

4.1.1 Nivelen mekaniikka

Nivelen mekaniikan tulee olla jäykkä, sillä robottikäsi­varsi rakentuu ensimmäisen nivelen varaan. Pieni väljyys tai laakeroinnin epätarkkuus ensimmäisessä nivelessä aiheuttaa epätarkkuutta robottikäsi­varren päässä olevalla työkalulla, sillä etäisyys laakeroinnin ja työkalun välissä on suuri. Ensimmäisen nivelen laakerointi on ratkaistu käyttämällä auton etupyörän laakeripakkaa, jonka kummassakin päässä on tämän työn kannalta hyödylliset kiinnityslaipat pultteja varten. Laakeripakassa ollut nivelelle tarpeeton etupyörän keskittämiseen tarkoitettu holkki on sorvattu irti.



Kuva 4.3 Robottikäsi­varren 1. nivel.

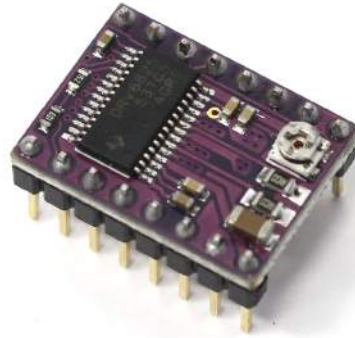
Kuvassa 4.3 esitetty nivel on moottorisoitu käyttäen 400 paikoitusaskeleen askelmoottoria ja materiaalia lisäävästi valmistettuja hammasrattaita. Moottorin akselille puristusliitoksella asennetun rattaan hammasluku on 21. Laakeripakkaan kiinnitettävän rattaan hammasluku on 110, joten ratastuksen välityssuhde on suuri. Hammasvälityksen moduuli on 1,5, joka on kahden prototyypin perusteella valmistettavissa ongelmitta edullisen hintaluokan FDM-tyyppisellä 3D-tulostimella. Valmistusta hankaloittaa joidenkin pursotinlaitteiden tapa valuttaa muovimateriaalia teräviin

muotoihin, kuten hammasrattaan hampaiden päihin. Tarkkoja osia valmistettaessa FDM-laitteen pursottimen tulee olla hyvin kalibroitu, kuten alaluvussa 2.2 on esitetty.

Ensimmäinen versio nivelen välityksestä ei ollut välityssuhteeltaan tarpeeksi suuri, jolloin askelmoottorin vääntö loppui kesken nopeissa kiihdytyksissä. Välityssuhdetta kasvatettiin 40%. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollisti uusien hammasrattaiden valmistamisen nopealla aikataululla, alle vuorokaudessa.

4.1.2 Nivelen elektroniikka

Askelmoottoria liikutellaan vaihtelemalla moottorin staattorin kelojen muodostaman magneettikentän suuntaa. Askelmoottorin ohjaamiseen on olemassa erityisiä askelmoottoriohjaimia, joille annetaan liikekomentoja digitaalisesti. Käyttöön valikoitui Texas Instrumentsin valmistama DRV8825-askelmoottoriohjain, sillä se on pienikokoinen ja kestää 2,2 A virran, joka riittää käytetylle askelmoottorille [23]. DRV8825 on esitetty kuvassa 4.4. Askelmoottorin vääntö kasvaa moottorille syötettävän virran kasvaessa, joten riittävä virransyöttö on tärkeää nivelen oikean toiminnan varmistamiseksi.



Kuva 4.4 DRV8825-askelmoottoriohjain.

Askelmoottorille tyypillinen itsestään paikoittuminen on hyödyllistä robotin ohjauksen kannalta. Moottorin paikoitusaskelien määrä yhden moottorin kierroksen aikana tiedetään, minkä ansiosta nivelen paikka tiedetään kun suoritettujen askelien määrä tiedetään. Askelmoottorille luonnollisen paikoittumisen ansiosta ensimmäinen nivel ei tarvitse erillistä nivelen paikan tunnistavaa anturointia. DRV8825 kykenee porrastamaan moottorin keloille lähetettävää siniaaltoa siten, että moottorin paikoitusresoluutio on 32 kertaa suurempi kuin moottorin varsinaisten askeleiden määrä.

Porrastus eli mikrosteppaus parantaa liikkeiden sulavuutta ja vähentää nivelen mekaanista resonointia, muttei käytännössä paranna nivelen paikoitustarkkuutta [15].

4.2 Robotin 2. nivel

Robottikäsi­varren toinen nivel rakentuu ensimmäisen nivelen muodostamalle kiinnityspinnalle. Toinen nivel kääntää robotin käsiosan ensimmäistä runkoputkea, eli se muuttaa robottikäsi­varren korkeutta. Toinen nivel on samalla ensimmäinen varsinainen käsi­varren nivel. Robottikäsi­varren toinen nivel on esitetty kuvassa 4.2 valkoisella värillä, ja nivelen rattaat keltaisella värillä.

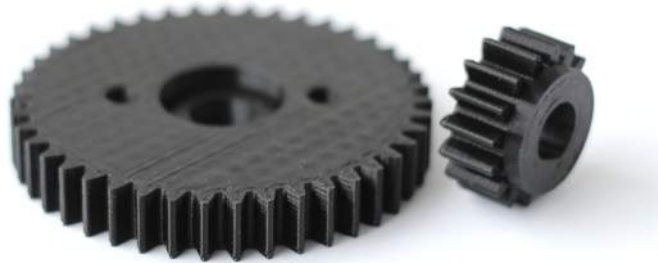
4.2.1 Nivelen mekaniikka

Robottikäsi­varren toiseen niveleen kohdistuu tyypillisesti nivelistä suurin vääntö. Niveleltä vaaditaan suurta vääntöä liikkeissä, sillä robottikäsi­varren työkalun etäisyys nivelestä on suuri tietyissä robottikäsi­varren asennoissa. Nivelen moottorina toimii VDO:n valmistama 24 voltin DC-moottori. Moottori on kiinnitetty Osvald Jensen A/S:n valmistamaan C-32 -kaksiakseliseen matovaihteeseen. Matovaihteessa on kiinni ratas, jonka pari ajaa robottikäsi­varren seuraavan runkoputken kiinnityspistettä kuvassa 4.5 esitetyllä tavalla. Kuvassa nähdään robottikäsi­varren toisen nivelen DC-moottori, matovaihteisto, matovaihteiston ja nivelen välinen hammasratastus ja niveleltä lähtevä runkoputki.



Kuva 4.5 Robottikäsi­varren 2. nivel.

Toisen nivelen mekaniikan runko ja iso osa sen mekaniikasta on valmistettu FDM-menetelmällä. Koska runko on suuri osa, sen materiaaliksi on valittu lämpöjännityksien kannalta lähes neutraali PLA-muovi. Esimerkiksi ABS-muovin käyttäminen olisi aiheuttanut osan valmistuksen epäonnistumisen, kuten alaluvussa 2.2 on esitetty. Kuvassa 4.5 nähdään nivelen pääakselin päässä laakerointipiste, jonka ympäri nivel liikkuu. Matovaihteen ja nivelen pääakselin välinen ratastus on valmistettu FDM-menetelmällä, ja sen moduuli on robottikäsi­varren ensimmäisen nivelen ratastuksen tapaan 1,5. Vaihderattaat on esitetty kuvassa 4.6, ja niiden välityssuhde on $\frac{43}{16}$. Rattaiden materiaali on PLA-muovia, jonka kestävyys ja kestoikä riittää tähän sovellukseen varsinkin voideltuna litium-molybdeenirasvalla.



Kuva 4.6 Toisen nivelen FDM-valmistetut rattaat.

Toisen nivelen rakentaminen oli eräs suurimpia mekaanisia haasteita tässä työssä. Nivel rakennettiin ensin siten, että Osvald Jensen A/S:n matovaihde ajoi suoraan nivelen pääakselia. DC-moottorin nopeus ja matovaihteen välityssuhde toimivat hyvin tässä järjestelyssä, mutta robottikäsi­varrtta kuormittaessa matovaihteessa alkoi esiintyä stick-slip -ilmiötä. Stick-slip -ilmiöllä tarkoitetaan kahden pinnan välisessä liikkeessä tapahtuvaa ajoittaista takertelua, joka johtuu pintojen välisen kitkan vaihtelusta [18, pp. 17–19]. Stick-slip oli pahimmillaan tilanteissa, jossa painovoima yritti kiihdyttää nivelen pääakselia, eli vääntö matovaihteella oli eri suuntaan kuin normaalisti matovaihteessa. Matovaihteen itsestään lukittuva geometria on todennäköisesti eräs ongelman pääsyyistä. Ongelmaa yritettiin ratkaista vaihtamalla matovaihteen rasva suuren painekeston EP-öljyyn ja lisäämällä pneumatiikassa käytettävä dither-tyyppinen häiriösignaali moottorin ohjaussignaaliin. Häiriösignaali pienensi ongelmaa, mutta ei ratkaissut sitä. Ongelma ratkaistiin lopulta lisäämällä edellä kuvattu materiaalia lisäävästi valmistettu välitys matovaihteen ja nivelen pääakselin väliin.

4.2.2 Nivelen elektroniikka

Matovaihteen toisella akselilla on kiinni HP HEDS-5600 I12 -kaksikanavainen optinen inkrementtimuotoinen pulssianturi eli enkooderi. Enkooderilta saadaan nimellisesti 512 akselin paikan mittausjaksoa per akselin kierros. Enkooderin kanavien kanttiaaltosignaaleilla on 90 asteen vaihe-ero, minkä ansiosta signaaleista on mahdollista määrittää akselin suunta ja paikka neljä kertaa enkooderin nimellistä resoluutiota useammin, kun havainnoidaan kummankin signaalin nousu ja lasku. Siten matovaihteistolta ulos tulevan akselin paikka voidaan määrittää 2048 kertaa akselin yhden pyörähdyksen aikana. Nivelen nopeus voidaan määrittää enkooderilta saatavien pulssien taaajuudesta [21, s. 35].

Nivelen moottori on tyypiltään DC-moottori. Moottorin käyttö vaatii erillisen moottorinohjaimen, jotta moottorille lähtevää vääntöä voidaan ohjata digitaalisesti. Moottorinohjaimena käytetään Freescalen MC33926 H-siltaa, jonka jatkuva virrankesto on 3 A. Moottorinohjaimelle voidaan antaa moottorin vääntö- ja suuntakäsky Pulse Width Modulation (PWM)-signaalina. Ohjain raportoi moottorille lähtevän virran ja vikatilanteet, kuten ohjainpiirin ylikuumentumisen, joten se toimii kokonaisvaltaisena ratkaisuna DC-moottorin ohjaukseen.

4.3 Robotin 3. nivel

Robottikäsi­varren kolmas nivel on robotin kynärpää. Nivel on viimeinen robotin työkalun paikkaan suuresti vaikuttava nivel, sillä robotin neljäs nivel kääntää ainoastaan työkalun kulmaa. Nivelen suunnittelussa kiinnitettiin huomiota kompaktiin kokoon ja nivelen massa­an, koska painava kolmannen nivelen mekaniikka aiheuttaisi paljon ylimääräistä kuormaa toiselle nivelelle. Robottikäsi­varren kolmas nivel on esitetty kuvassa 4.2 sinisellä värillä.

4.3.1 Nivelen mekaniikka

Kolmannen nivelen erikoisuus on sekä moottorin että vaihteiston sijoitus robotin runkoputken sisälle. Moottori on D&J WITH Co:n valmistama kaksiakselinen DC-moottori, jossa on toisella akselilla planeettavaihteisto ja toisella akselilla kaksikanavainen enkooderi. Planeettavaihteiston ulostuloakselilla on kulmavaihde, joka liikuttaa robottikäsi­varren seuraavaa runkoputkea. Moottori ja vaihteisto on liitetty nivelelle tulevaan ja niveleltä lähtevään robottikäsi­varren runkoputkeen kuvassa 4.7 esitetyillä materiaalia lisäävästi valmistetuilla kiinnikkeillä.



Kuva 4.7 Robottikäsiwarren 3. nivel.

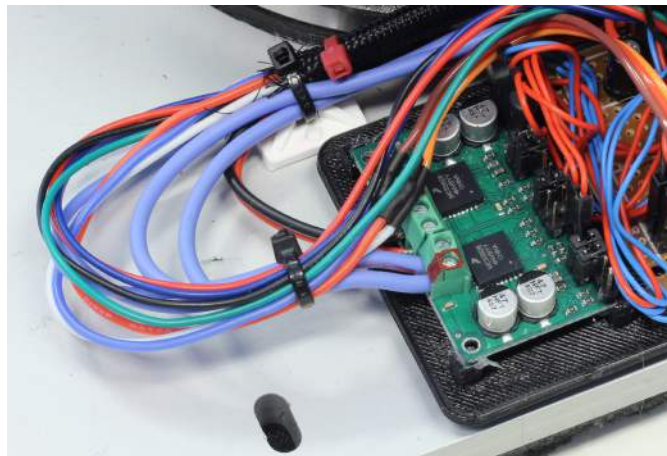
D&J WITH Co:n valmistama kulmavaihte ei ole sellaisenaan sopiva nivelessä käytettäväksi, sillä kulmavaihteessa on noin viisi astetta välystä. Välys ei ole ongelma, mikäli kulmavaihteen akselia kuormitetaan vain yhteen suuntaan. Mikäli robotin asento muuttuu suuresti puolelta toiselle, kuten yleensä robottikäsiä käytettäessä, välys aiheuttaa ongelmia nivelen paikoitustarkkuudessa. Ongelma ratkaistiin vaihtamalla kulmavaihteen sisälle kuvassa 4.8 esitetyt laadukkaammat 20-hampaiset kulmarattaat, joissa on evolventti hammasprofiili. Uusien rattaiden moduuli on yksi.



Kuva 4.8 Nivelen kulmarattaat.

4.3.2 Nivelen elektroniikka

Nivelen DC-moottorin akselille asennettu enkooderi toimii hall-periaatteella. Siinä on robottikäsi­varren toisen nivelen enkooderin tapaan kaksi kanavaa, joista voidaan tunnistaa nivelen paikka, nopeus ja suunta. Enkooderilta saadaan 26 mittausta per moottorin akselin kierros. Vaikka enkooderin resoluutio on matala verrattuna robottikäsi­varren toisen nivelen enkooderiin, moottorin planeettavaihteen $\frac{1}{264}$ välityssuh­teen ansiosta varsinainen nivelen paikoitusresoluutio on suuri, noin 76,27 mittausta per nivelen aste.



Kuva 4.9 Freescale MC33926 H-silta.

Nivelen moottoria ohjataan samanlaisella kuvan 4.9 mukaisella Freescalen MC33926 H-sillalla kuin robottikäsi­varren toisen nivelen DC-moottoria. Kuvassa nähdään MC33926 asennettuna ja valmiina käyttöön. Robottikäsi­varren toisen nivelen moot­torinohjaimen tapaan se raportoi moottorille lähtevän virran suuruuden ja ohjaimen sisäiset vikatilanteet. Käytettävä H-siltaratkaisu on kahden MC33926-ohjaimen pa­ketti.

4.4 Robotin 4. nivel

Robottikäsi­varren neljäs nivel muuttaa robotin työkalun asentoa. Samalla neljännen nivelen mekaaniset osat tarjoavat kiinnityspisteet robotin työkalulle tai mahdolliselle myöhemmin rakennettavalle seuraavalle robotin akselille. Työkalun asennon muutta­minen mahdollistaa esimerkiksi sen, että robotin liikuttaessa työkalua pöydän pääl­lä, työkalu pysyy koko ajan suorassa pöydän normaaliin nähden. Robottikäsi­varren neljäs nivel on esitetty kuvassa 4.2 punaisella värillä.

4.4.1 Nivelen mekaniikka

Neljäs nivel on toteutukseltaan lähellä harrastelijoiden tyypillisiä robottikäsi- koonpanoja. Nivelessä käytetään radio-ohjattaviin malleihin tarkoitettua servoa, jossa on servon ulostuloakselin paikan anturointi sisäänrakennettuna. Servo on malliltaan metallirattainen TowerPro MG996R, jossa on vääntöä noin 1 Nm. Servo on kuulalaakeroitu ja sen nopeus on noin $360^\circ/\text{s}$.



Kuva 4.10 Robottikäsi- varren 4. nivel.

Neljännän nivelen mekaniikka on esitetty kuvassa 4.10. Nivelen servo kiinnittyy robotin kolmannen ja neljännen nivelen väliseen runkoputkeen materiaalia lisäävästi valmistetulla kiinnikkeellä. Kiinnike liittyy nivelelle tulevaan runkoputkeen puristusliitoksella. Kiinnikkeessä on servon ulostuloakselin vastapuolella ahdistussovitteella kuulalaakeri, joka tukee robotin työkalua. Robotin työkalun kiinnityslevy tukeutuu servon akseliin ja vastapuolen kuulalaakeriin. Kiinnityslevyssä sarja pulttijakoja erilaisten työkalujen kiinnitystä varten.

4.4.2 Nivelen elektroniikka

MG996R-servossa on sisäänrakennettu paikoituslogiikka. Servo lukee akselinsa paikan potentiometriltä ja servon mikrokontrolleri käyttää alaluvussa 3.2 esiteltyä PID-säädintä servon sisäisen moottorin virran säätöön. Servon absoluuttipaikan asetusarvo syötetään servolle PWM-signaalina, jonka generoi robottikäsi- vartta ohjaava mikrokontrolleri.

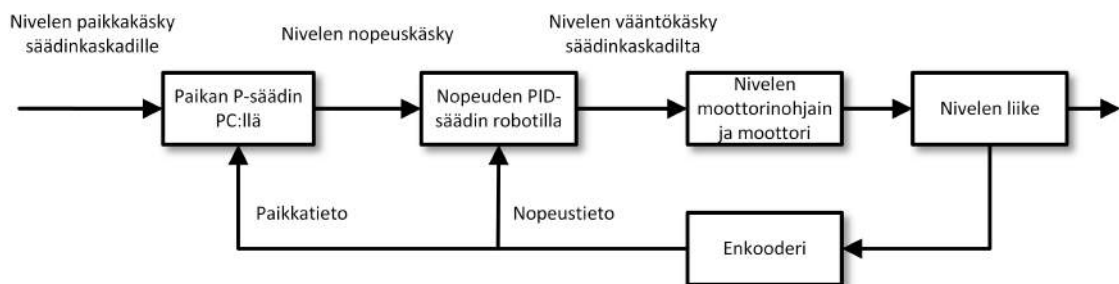
Robottikäsi- vartta ohjaava mikrokontrolleri käyttää 3.3 V logiikkatasoa, mutta servo vaatii toimiakseen 5 V logiikkatason. Ongelman ratkaisemiseksi mikrokontrollerin

ja servon välissä käytetään Negative Positive Negative (NPN)-tyyppistä transistoria, jonka avulla mikrokontrollerin signaalitaso saadaan nostettua servolle sopivaksi. Kääntöpuolena NPN-transistorin käyttämiselle on PWM-signaalin 1:n ja 0:n kääntyminen toisinpäin, mutta signaalin kääntymisen otetaan huomioon ohjelmallisesti.

4.5 Robottikäsi­varren säätö

Tässä osuudessa käsitellään robottikäsi­varren paikan säätöä alaluvuissa 3.1 ja 3.2 esitellyillä P- ja PID-säätimillä. Käsiteltävässä säätöongelmassa robottikäsi­varren antureilta ja robottikäsi­varrta käskävältä tietokoneohjelmalta saadaan signaaleja, joiden perusteella pyritään laskemaan robottikäsi­varren nivelten toimilaitteille sellaisia käskyjä, jotka saavat aikaiseksi toivotunlaisen liikkeen. Liikkeiden päämääränä on siirrellä robotin työkalua tarkasti paikasta toiseen. Säätöongelmaa hankaloittaa robottikäsi­varren ihmiskäden tyyppinen kiertyvänivelinen muoto, minkä vuoksi säädettävän systeemin malli on hyvin dynaaminen ja epälineaarinen. Erilaisiin liikkeisiin vaadittava robotin nivelten moottorien vääntö muuttuu robotin ollessa eri asennoissa.

Säädön toimivuuden parantamiseksi nivelten säätöön voidaan käyttää kuvan 4.11 mukaista kahden säätimen kaskadisäädintä, jossa ulomman säätimen lähdöstä saadaan sisemmän säätimen asetusarvo alaluvussa 3.3 esitetyllä tavalla. Kaskadisäätimen primäärinen säädin säätää nivelen asentokulmaa eli paikkaa ja sekundäärinen säädin nivelen nopeutta. Kumpikin säädin saa oman mittauksensa niveleltä.



Kuva 4.11 Robottikäsi­varren kaskadisäädin.

Kaskadijärjestelyn primäärinen säädin on tyypiltään P-säädin, sillä PID-säätimen käyttäminen robottikäsi­varren nivelten paikan säätämiseen aiheuttaisi säätimen asetusarvon ylittymisen liikkeissä säätimen integraaliosuuden toiminnan vuoksi. Sekundäärinen säädin on tyypiltään PID-säädin, jonka integraali- ja derivaattaosuuden ansiosta säädin kykenee kompensoimaan muutoksia nivelen vääntötarpeessa ja kompensoimaan nivelen mallin epälineaarisuutta. Nivelten säätimien viritysparametrien arvot on esitetty taulukossa 4.1. Kaikkien säätimien toimintasuunta on suora.

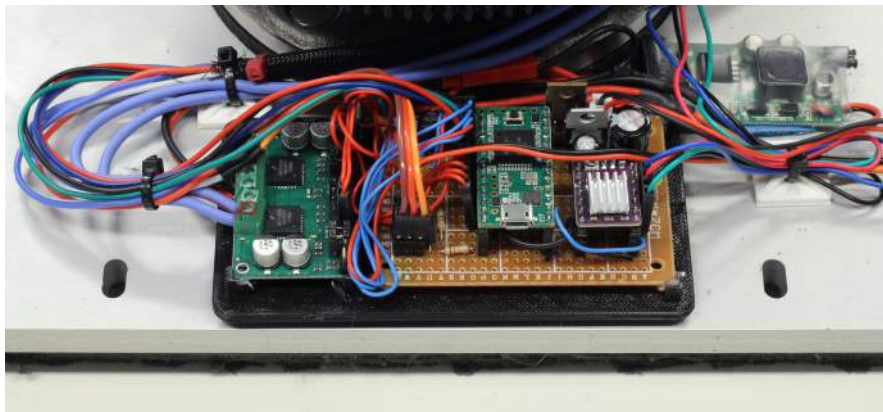
Taulukko 4.1 Nivelten säätimien viritysparametrit

Nivel	P-säädin	PID-säädin		
	K_p	K_p	K_i	K_d
Nivel 1	8,0	-	-	-
Nivel 2	1,0	0,5	20,0	0,001
Nivel 3	1,0	1,0	8,0	0,01
Nivel 4	8,0	-	-	-

Robottikäsiarven toinen ja kolmas nivel toimivat suoraan kuvaillun kaskadisäädön mukaisesti. Ensimmäisen nivelen moottorinohjaimelle voidaan syöttää primäärisen säätimen lähtö, jolloin sekundääristä säädintä ei tarvita. Neljännen nivelen servo on toiminnaltaan poikkeustapaus, sillä servo hyväksyy nopeus- tai vääntökäskeyjen sijaan paikan asetusarvon. Robottikäsiarven nivelten yhtenevyyden vuoksi neljännelle nivelelle lähetettävät paikkakäskeyt lasketaan vierittämällä paikan asetusarvoa kaskadijärjestelyn primäärisen säätimen lähdöstä saatavan nopeuskäskeyn mukaisesti. Näin jokaista niveltä voidaan ajaa ulkoisesti sekä paikka- että nopeuskäskeyin.

4.5.1 Robottikäsiarven ohjauselektroniikka

Robottikäsiarven nivelten säätöalgoritmit on jaettu nopeus- ja paikkasäätimiin alaluvussa 4.5 esitellyllä tavalla. Nopeussäätimet ovat luonnollisesti säädettävää prosessia lähempänä, joten ne on implementoitu käytännön tasolla samalle mikrokontrollerille, joka lukee eri nivelten nopeus- ja paikkatiedot. Nivelten paikkasäätimet on implementoitu robottikäsiarven PC-käyttöliittymän puolella. Primääriset ja sekundääriset säätimet ovat erillään toisistaan, sillä robottikäsiarvta rakentaessa haluttiin säilyttää mahdollisuus ajaa robotin niveliä suoraan nopeussäädöllä paikkasäädön lisäksi.

**Kuva 4.12** Robottikäsiarven ohjauselektroniikka.

Robotin ohjauselektronikkana toimii 96 MHz taajuudella käyvä 32-bittinen C++:lla ohjelmoitava Teensy 3.1 -mikrokontrolleri¹. Mikrokontrolleri on liitetty anturien ja toimilaitteiden signaalit yhdistävälle piirikortille. Piirikortti ja robottikäsiarven niveliin liittyvä oheiselektronikka on esitetty kuvassa 4.12. Mikrokontrolleri on vaihdettavissa uuteen modulaarisesti tarpeen tullen. Nopeutensa ansiosta se kykenee käskemään robottikäsiarven jokaisen nivelen toimilaitetta käytännössä samanaikaisesti, ja keskeytyksin lukemaan eri antureilta saatavaa tietoa. Mikrokontrolleri keskustelelee tietokoneen kanssa USB-virtuaalisarjaportin välityksellä. Mikrokontrolleri kirjoittaa robottikäsiarven nivelten paikan sarjaporttiin 500 Hz taajuudella ja lukee samalla sarjaporttiin mahdollisesti saapuneet uudet nivelten nopeuksien asetusarvot ja muut käskyt. Myös mahdolliset virhetilanteet robottikäsiarven toiminnassa kirjoitetaan sarjaporttiin.

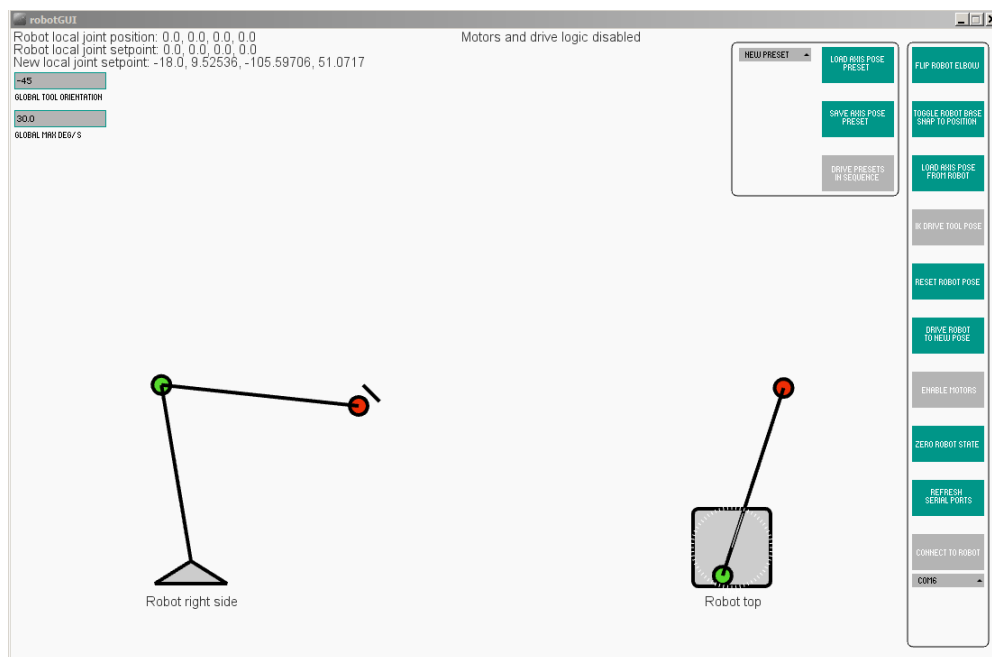
Ohjauselektronikan rakentamisessa ratkaistiin kaksi isoa ongelmaa. Ohjauselektronikkaa testattaessa robottikäsiarven ensimmäisen nivelen moottorinohjain syttyi ajoittain tuleen ilman tunnistettavaa syytä. Ongelma ei ollut helposti toistettavissa, eikä se usein toistunut uutta moottorinohjainta käytettäessä samassa tilanteessa kuin edellinen moottorinohjain petti. Vika löydettiin DRV8825-askelmoottorinohjaimen ja mikrokontrollerin välisestä maatasoista, joiden välillä kulki yleismittarin mukaan noin 7 voltin vaihtovirta. Ongelma ratkaistiin sitomalla moottorin virransyötön maa ja moottorinohjaimen logiikkamaa yhteen. Moottorinohjaimen tuotesivun mukaan maatasoja ei ole tarpeen sitoa yhteen [19].

Toinen ongelma ohjauselektronikassa oli 2. ja 3. nivelen enkooderien lukemisessa. Enkooderit tuottavat suurilla nivelten nopeuksilla paljon dataa, joka pitää kaikki käsitellä ja tunnistaa oikein, jotta nivelten paikka ja suuntatieto säilytetään. Koekäytön aikana enkoodereilta tulevia signaaleja ei aina tunnistettu oikein, mikä johti erilaisiin virhetilanteisiin, kuten hyvin suureen erosuureeseen robottikäsiarven kaskadisäätimen sekundäärisellä säätimellä. Enkooderien datalehtien mukaan datalinjoihin voidaan lisätä valinnaiset ylösvetovastukset, jotka parantavat signaalien nousuaikaa [2]. Ylösvetovastuksien lisääminen datalinjoihin ratkaisi ongelmat enkooderien lukemisessa.

¹Ohjauselektronikan mikrokontrollerilla käytettävä lähdekoodi on saatavissa osoitteesta: <https://github.com/jkoljo/RobotArm/tree/master/robotJointDriver>

4.5.2 Robottikäsivarren PC-käyttöliittymä

Robottikäsivarren toiminnan testaamiseksi työssä kirjoitettiin tietokoneohjelma², joka kommunikoi robottikäsivarren ohjauselektronikan kanssa. Ohjelma on toteutettu Processing-ohjelmointikielellä, joka perustuu Javaan. Processingilla voidaan toteuttaa graafisia käyttöliittymiä, joiden taustalla voi ajaa tehokkaita ohjelmatoteutuksia. Toteutettu käyttöliittymä tarjoaa käyttäjälle mahdollisuuden syöttää erilaisia robotin asentokäsikyjä tai niiden sarjoja järjestelmään. Taustalla ohjelma suorittaa robottikäsivarren nivelten paikkasäätimiä 200 Hz taajuudella.



Kuva 4.13 Robottikäsivarren PC-käyttöliittymä.

Ohjelman käyttöliittymä on esitetty kuvassa 4.13. Käyttöliittymä mahdollistaa robottikäsivarren asennon muuttamisen visuaalisesti. Robottikäsivarren työkalun paikkaa liikutellaan robotin sivunäkymässä hiiren oikealla näppäimellä raahaamalla. Robottikäsivarren ensimmäisen nivelen kulmaa muutetaan ylhäältäpäin kuvaavassa näkymässä hiiren vasemmalla näppäimellä. Taustalla ohjelma laskee käänteisen kinematiikan yhtälöiden avulla robotin jokaiselle nivelelle optimaalisen kulman, jotta robotin työkalu päätyy sinne, minne on käsketty. PC-ohjelma myös päivittää robotin ohjauselektronikan raportoimien nivelten kulmien perusteella neljännen nivelen kulman asetusarvoa jatkuvasti, jotta robottikäsivarren työkalu on jokaisen liikesarjankin aikana aina oikeassa asennossa.

²PC-käyttöliittymän lähdekoodi on saatavissa osoitteesta: <https://github.com/jkoljo/RobotArm/tree/master/Processing>

5. MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN SOVELTUVUUS ROBOTTIKÄSIVARTEEN

Suurin osa robottikäsi­varren osista valmistettiin muovikappaleiden valmistamiseen soveltuvalla materiaalia lisäävällä pursotusmenetelmällä, joka on esitelty alaluvussa 2.1.2. Materiaalia lisäävästi valmistetut osat toimivat robottikäsi­varren komponentteina hyvin, ja vain harvan osan korvaaminen perinteisin menetelmin valmistetulla vastineella toisi hyötyä robottikäsi­varren toimivuuden kannalta.

Staattiseen käyttöön eli voimien kantamiseen, osien kiinnittämiseen ja yhdistämiseen tarkoitettut osat valmistettiin nopealla mutta epätarkalla LulzBot-merkkisellä FDM-laitteella. Osien nopea valmistus oli hyödyllistä suunnitteluprosessin kannalta. Robottikäsi­varren nivelet voitiin valmistaa ja kasata osa kerrallaan, mikä mahdollisti nopean iteroivan suunnittelun ja minimoi hukkaan menneiden osien lukumäärän. Tyypillisesti aamupäivällä suunnitellut robottikäsi­varren osat olivat robottikäsi­varressa käytössä jo samana päivänä. Robottikäsi­varren toiselta niveleltä lähtevän runkoputken kannake oli ainoa osa, josta jouduttiin tekemään toinen iteraatio alkuperäisen osan rakenteellisen pettämisen vuoksi. PLA-muovi halkeaa pitkällä aikavälillä suuressa jännituksessä, oletettavasti mikrohalkeamien etenemisen vuoksi. Suurien voimien kesto­a vaativiin osiin on siten hyvä käyttää jotain muuta FDM-menetelmälle soveltuvaa muovilaatua, kuten ABS- tai PET-muovia.

Työssä rakennettiin robottikäsi­varren ensimmäiseen ja toiseen niveleen mekaaninen hammasratasvälitys PLA-muovista materiaalia lisäävästi. Valmistukseen käytettiin tarkkaa ja hyvin kalibroitu­ta 3D-tulostinta. Tarkan laitteen käyttäminen on tärkeää, sillä epätarkemmalla laitteella ensin valmistetut rattaat eivät toimineet sulavasti. Valmistetut hammasrattaat toimivat hyvin nivelissä. Robottikäsi­varren toisen nivelen hammasratasvälityksen välitys on alle yksi aste jokaisessa välityksen asennossa. Ensimmäisen nivelen hammasratasvälitys on esijännitetty ja siinä ei ole havaittavaa välystä. Kummankin välityksen hammasrattaat on voideltu litium-molybdeenirasvalla, joka soveltuu kokemuksen perusteella erinomaisesti PLA- ja ABS-muovista valmistettujen osien voitelemiseen. Materiaalin pursotusmenetelmällä valmistettavien hammasrattaiden moduuliksi voidaan suositella moduulia 1,5.

Materiaalin pursotusmenetelmällä valmistettujen osien voidaan sanoa soveltuvan robottikäsiin mekaanisten kokoonpanojen rakentamiseen. Valmistettujen osien lujuus ja jäykkyys ovat tarpeeksi hyviä ihmisen käden kokoisen robottikäsiin komponenteiksi, kun robottikäsiin työkalun massa ei ylitä puolta kilogrammaa. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollisti robottikäsiin komponenttien suoraviivaisen ja funktionaalisen suunnittelun. Parhaan tuloksen varmistamiseksi osien valmistuksessa tulee ottaa huomioon eri materiaalien ominaisuudet ja hyvät käytännöt pursotusmenetelmän käytössä. Pursotusmenetelmällä toimivissa laitteissa on eroja, ja valmistettavien osien laatuvaatimusten kasvaessa kasvaa myös valmistuslaitteen hinta.

6. YHTEENVETO

Työssä materiaalia lisäävin menetelmin rakennettu robottikäsi toimii sille asetettujen tavoitteiden mukaisesti. Robottikäsin jokaisen nivelen paikkaa ja nopeutta voidaan ohjata. Robottikäsi kykenee suorittamaan liikkeitä ja liikesarjoja. Robottikäsin jokaiselta niveleltä saadaan paikan mittauksia vähintään 0,1 asteen resoluutiolla. Nivelten paikoituksen tarkkuus jää mitattavaksi tulevaisuudessa, mutta tarkkuus on riittävän hyvä robottikäsin käyttökohteisiin nähden. Rakennetun robottikäsin osien kokonaiskustannukset ovat alle 400 € . Ilman materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämistä robottikäsin osien kokonaiskustannukset olisivat moninkertaiset. Robottikäsin ohjauselektronikan suorituskyky riittää viidennen ja kuudennen akselin ajamiseen nykyisten neljän akselin lisäksi.

Työssä havaittiin useita hyviä käytäntöjä materiaalin pursotusmenetelmän käytössä, kuten materiaalin valinnan tärkeys osien käyttökohteen mukaan. Mikäli robottikäsi-varresta halutaan tulevaisuudessa rakentaa erikokoisia tai erimuotoisia variantteja, niiden rakentaminen on nopeaa työssä tehtyjen CAD-mallien parametrisuuden ansiosta. Nykyinen nivelten mekaniikka kykenee siirtelemään noin 0,5 kg:n työkalua. Mikäli työkalun massaa halutaan kasvattaa, materiaalia lisäävästi valmistettujen osien ja nivelten moottorien kokoa tulee lisätä tai robotin runkoputkia lyhentää.

Robottikäsin toisen ja kolmannen nivelen paikan ja nopeuden mittaaminen on toteutettu enkoodereilla. Koska enkooderilta voidaan kokemusten perusteella lukea paikka tarkasti, mutta ei havaita pienä nopeutta luotettavasti, on perusteltua siirtyä tulevaisuudessa kaskadisäädöstä yksittäiseen paikka-voimasäätimeen pienillä nivelen nopeuksilla. Nopeuden lukemisen epätarkkuus voi aiheuttaa matalan amplitudin oskillointia nivelellä. Nopeustiedon lukemiseen voidaan tulevaisuudessa implementoida alipäästösuodatus. Mahdollinen ratkaisu ongelmaan olisi myös lisätä nivelen moottorin akselille takogeneraattori, jonka tuottama nopeustieto on laadukkaampaa.

Materiaalia lisäävä valmistus osoitti hyödyllisyytensä robottikäsivartta rakennettaessa. Pursotusmenetelmällä valmistetut osat toimivat hyvin robottikäsivarressa. Robottikäsivarren osien prototypointi ja valmistus oli materiaalia lisäävällä valmistuksella nopeaa. Osien sopivuus robottikäsivarteen voitiin varmistaa usein jo samana päivänä, kun osat suunniteltiin. Materiaalia lisäävän valmistuksen voi odottaa yleistyvän teollisuudessa, sillä sen avulla osien prototypointi on perinteisiä menetelmiä edullisempaa ja nopeampaa. Materiaalia lisäävän valmistuksen laitteet ovat kehittyneet viime vuosina. Nykyisin materiaalin pursotukseen perustuvia laitteita voidaan hyödyntää prototyyppien valmistamisen lisäksi myös toiminnallisten kokoonpanojen osien valmistamisessa.

LÄHTEET

- [1] K. J. Astrom, “Pid controllers: theory, design and tuning,” *Instrument society of America*, 1995.
- [2] “Hedm-55xx/560x & heds-55xx/56xx,” <http://www.avagotech.com/docs/AV02-1046EN>, Avago Technologies, 2014.
- [3] A. Bellini and S. Güçeri, “Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 9, no. 4, 2003, saatavissa <http://dx.doi.org/10.1108/13552540310489631>.
- [4] S. Bennett, *A history of control engineering, 1930–1955*. IET, 1993, no. 47.
- [5] C. Chua, K. Leong, and C. S. Lim, *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, ser. Rapid Prototyping: Principles and Applications. World Scientific, 2003, no. v. 1, saatavissa <https://books.google.fi/books?id=hpNT01xw4EEC>.
- [6] “Additive manufacturing,” (29.7.2015) http://www.eos.info/additive_manufacturing/for_technology_interested, EOS.
- [7] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, “Powder bed fusion processes,” in *Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 2010, pp. 120–159.
- [8] ———, “Directed energy deposition processes,” in *Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 2015, pp. 245–268.
- [9] A. Harju, T. ja Marttinen, *Säätöpiirin virityksen perusteet*. Control CAD Oy, 2000.
- [10] L. Harvey and D. Green, “Defining quality,” *Assessment & evaluation in higher education*, vol. 18, no. 1, 1993.
- [11] C. Hull, “Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography,” 1986, patentti US 4,575,330. Saatavissa <http://www.google.com/patents/US4575330>.
- [12] A. Kippo and A. Tikka, *Automaatiotekniikan perusteet*. Edita Publishing Oy, 2008.
- [13] H. Kodama, “A scheme for three dimensional display by automatic fabrication of three dimensional model, iece, vol,” *J64 C*, no. 4, p. 237, 1981.

- [14] P. Kulkarni, A. Marsan, and D. Dutta, "A review of process planning techniques in layered manufacturing," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 6, no. 1, 2000.
- [15] "Microstepping myths and realities," (25.7.2015) <http://www.micromo.com/microstepping-myths-and-realities>, Micromo.
- [16] P. Mohan Pandey, N. Venkata Reddy, and S. G. Dhande, "Slicing procedures in layered manufacturing: a review," *Rapid prototyping journal*, vol. 9, no. 5, 2003.
- [17] A. Nickel, D. Barnett, and F. Prinz, "Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 317, no. 1, 2001.
- [18] B. N. Persson, *Sliding friction: physical principles and applications*. Springer Science & Business Media, 2000, vol. 1.
- [19] "Drv8825 stepper motor driver carrier, high current," (19.8.2015) <https://www.pololu.com/product/2133>, Pololu.
- [20] "Arc compensation," (30.7.2015) <http://reprap.org/wiki/ArcCompensation>, RepRap.
- [21] L. Siitonen, "Malliprediktoivan säätäjän soveltaminen teollisuusrobotin säätöön," Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, 1990.
- [22] "Printed engine chamber," (28.7.2015) <http://www.spacex.com/news/2014/07/31/spacex-launches-3d-printed-part-space-creates-printed-engine-chamber-crewed>, SpaceX.
- [23] "Drv8825 stepper motor controller ic," <http://www.ti.com/lit/gpn/drv8825>, Texas Instruments, 2014.
- [24] M. Wan, "Turbocharging variable-volume turbine by koenigsegg," (16.7.2015) http://www.autozine.org/technical_school/engine/Forced_Induction_2.html.
- [25] T.-M. Wang, J.-T. Xi, and Y. Jin, "A model research for prototype warp deformation in the fdm process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 33, no. 11-12, 2007.