

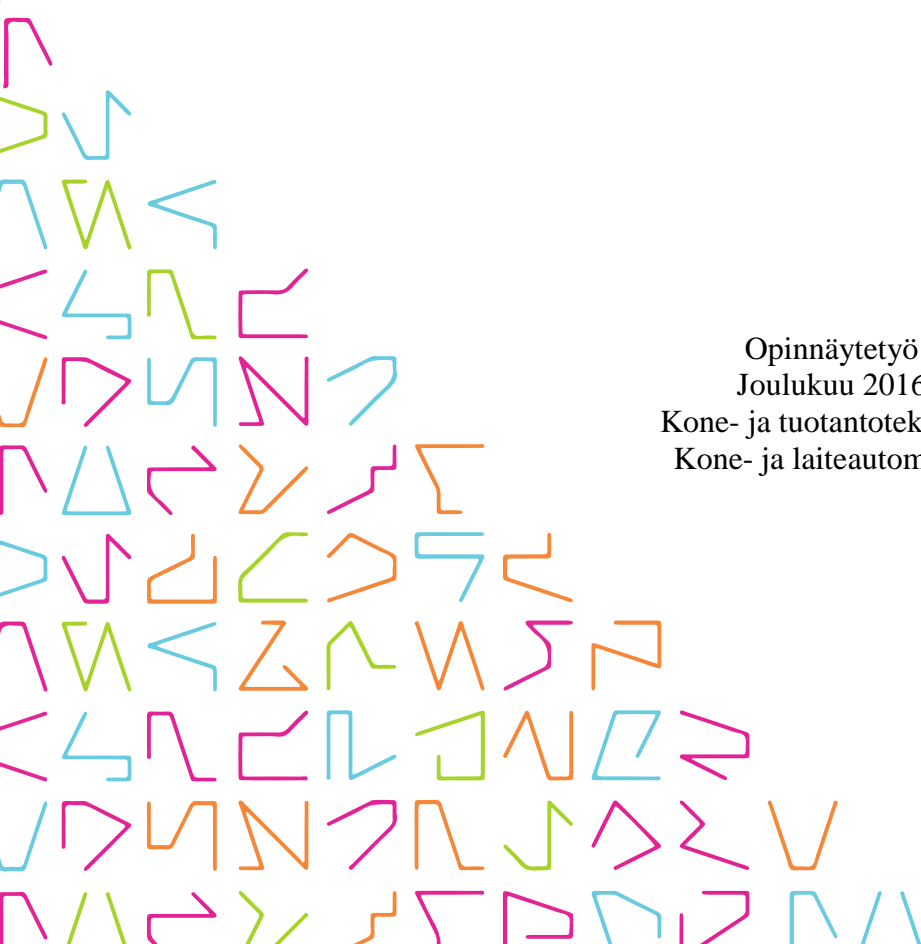


TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

NIVELROBOTIN STANDARDINMUKAINEN KEHITTÄMINEN

Janne Mäkinieniemi

Opinnäytetyö
Joulukuu 2016
Kone- ja tuotantotekniikka
Kone- ja laiteautomaatio



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Kone- ja laiteautomaatio

MÄKINIEMI, JANNE:

Nivelrobotin standardinmukainen kehittäminen

Opinnäytetyö 49 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Joulukuu 2016

Opinnäytetyön aiheena oli jatkokehittää pientä, alun perin harrastelijakäyttöön tarkoitettua robottia standardin ISO 10218 mukaisesti. Muita jatkokehityksen vaatimuksia olivat robotin ulottuvuuden kasvattaminen, rakenteen tukevoittaminen sekä moottoreiden vaihto. Oletettuna loppukäyttökohteena olisivat yleiset kevyet kokoonpano- ja testaustehdävät. Suunniteltu robotti rakennettiin Tampereen Ammattikorkeakoulun automaatiotekniikan laboratorioon. Työ oli rajattu koskemaan lähinnä fyysistä robottia, eivätkä sen asennusympäristö, sähkönsyöttö tai tarkempi ohjausjärjestelmän kehittäminen olleet työn piirissä.

ISO 10218 on teollisuusrobottien turvallisuusvaatimuksia määrittelevä kansainvälinen standardi, johon kuuluvat olennaisena osana koneturvallisuusstandardi ISO 12100 ja kone-sähköturvallisuusstandardi IEC 60204-1. Robottia suunnitellessa täytyi siten ottaa huomioon näiden kolmen standardin asettamia vaatimuksia, joita on esitelty tämän raportin alkupuolella.

Robotin vakauden parantamiseksi rakenne suunniteltiin tietyiltä osin laserleikatuista alumiinilevyistä koottavaksi. Työn tilaajan toiveesta alkuperäiset servomoottorit vaihdettiin askelmoottoreiksi. Tämä vaihdos edellytti myös kunkin moottorin asemantunnistuksen uudelleen suunnittelua.

Suunniteltu robotti on työn tavoitteiden osalta onnistunut. Standardien vaatimuksia noudatettiin kehitystyössä, ja rakenteellista vakautta saatiin parannettua ulottuvuuden kasvattamisen ohella. Moottoreiden teho jäi suunnittelun aikana tehtyjen virheiden vuoksi muuta rakennetta vaatimattommaksi.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Mechanical and Production Engineering
Machine Automation

MÄKINIEMI, JANNE:

Development of a Standardized Articulated Robot

Bachelor's thesis 49 pages, appendices 0 pages

December 2016

The purpose of this thesis was to further develop an existing robot, which was originally developed for hobbyist purposes. The goals of this work were for the developed robot to adhere to the ISO 10218 standard, and to increase the reach and stability from the original. Also the motors used needed to be switched from the original servo motors to stepper motors.

ISO 10218 is an international standard dealing with safety requirements of industrial robots. Other essentially related standards are the general safety of machinery standard ISO 12100, and the electric safety of machinery standard IEC 60204-1. Adherence to these three standards was essential in the design process of this robot.

In order to improve the stability of the robot, certain parts were planned to be made of laser-cut aluminum sheet. Along with changing of the motors, the redesign of motor positioning system for each motor was also required.

The designed robot met the development goals set for it. The robot was designed according to relevant standards. Along with an increase in its reach, the structural stability of the robot was improved. The performance of the motors used is somewhat lacking, when compared to the rest of the structure.

Key words: industrial robot, standard, ISO 10218

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	ROBOTTIEN TURVALLISUUSSTANDARDI ISO 10218.....	7
2.1	Vaarojen tunnistaminen ja riskien arviointi.....	7
2.2	Suunnitteluvaatimukset ja suojaustoimenpiteet.....	8
2.3	Turvallisuuteen liittyvän ohjausjärjestelmän suorituskyky	10
2.4	Pysäytystoiminnot.....	11
2.5	Nopeuden ohjaus.....	11
2.6	Akseleiden liikkeen rajoittaminen	12
2.7	Turvallisuusvaatimusten ja suojaustoimenpiteiden vahvistaminen	14
3	KONETURVALLISUUSSTANDARDI ISO 12100	15
3.1	Riskien arviointi- ja pienentämisprosessi	15
3.1.1	Raja-arvojen määrittäminen	16
3.1.2	Vaarojen tunnistaminen	17
3.1.3	Riskin suuruuden ja merkityksen arviointi	18
3.2	Riskin pienentäminen	20
3.2.1	Luontaisesti turvalliset suunnittelutoimenpiteet	20
3.2.2	Suojaustekniset toimenpiteet.....	22
3.3	Käyttöä koskevat tiedot, sekä tehdyn riskin arvioinnin asiakirjat	23
4	KONEIDEN SÄHKÖTURVALLISUUSSTANDARDI EN 60204-1.....	25
4.1	Yleisiä vaatimuksia.....	25
4.2	Sähkön syöttö, ja ympäristö- ja käyttöolosuhteet	26
4.3	Syöttöjohtimien sekä erotus- ja katkaisulaitteiden vaatimuksia	27
4.4	Suojaus sähköiskulta.....	28
4.5	Laitteiston suojaaminen	29
4.6	Johdotus	30
4.7	Merkinnät ja dokumentaatio	31
5	MEKANIIKAN & ELEKTRONIIKAN SUUNNITTELU.....	32
5.1	Varsien suunnittelu	33
5.2	Moottoriakselien suunnittelu	34
5.3	Varsien tuottamien voimien kevennys.....	35
5.4	Ohjausjärjestelmä.....	37
5.5	Moottorit	38
5.6	Johdotus ja liitännät	40
6	OHJELMOINTI	41
6.1	Moottorikulmien laskenta	41
6.1.1	Kulma α	42

6.1.2 Kulma β	43
6.2 Antureiden säätö	43
7 POHDINTA.....	45
LÄHTEET.....	47

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli jatkokehittää alun perin harrastelijakäyttöön tarkoitettua uFactory uArm -nivelrobotia. Kehitellyn uuden robotin tulisi olla robottien turvallisuusstandardin ISO 10218 mukaisesti suunniteltu. Työn tilaaja oli Tampereen Ammattikorkeakoulu. Osana työtä suunnitellusta robotista rakennettiin myös fyysinen kappale koulun automaatiotekniikan laboratorioon. Työn rajauksena olivat robotin mekaanisen ja sähköisen rakenteen suunnittelu. Robotin asennusympäristöön, sähkönsyöttöön ja ohjaimiin liittyvät vaatimukset sekä tarkempi ohjelman suunnittelu ovat työn rajauksen ulkopuolella.

ISO 10218 on kansainvälisen standardoimisjärjestö ISO:n kehittämä, teollisuusrobottien turvallisuusvaatimuksia käsittelevä standardi. Standardiin liittyvät olennaisesti myös koneurallisuusstandardi ISO 12100, sekä konesähköturvallisuusstandardi IEC 60204-1. Työssä on esitelty näiden standardien esittämiä vaatimuksia niiltä osin, miten ne liittyvät robotin jatkokehiteltyyn versioon.

Jatkokehittelyn robotin muita vaatimuksia olivat ulottuvuuden kasvattaminen n. 1,5 -kertaiseksi sekä rakenteen tukevoittaminen. Alkuperäinen uArm on hieman heikko etenkin sivuttaissuunnassa työkalupäähän tuleville voimille, joka näkyy sen työkalupään ajoittaisena heilumisena liikkeessä. Lisäksi työn tilaaja halusi robotin servomootorit vaihdettavan askelmoottoreiksi. Tämä muutos vaatii siten muutoksia myös robotin koko elektronikassa ja ohjauksessa. Robotin komponenttien hinnan ylärajaksi oli asetettu 1000 €. Suunnitellun käyttöiän ei tarvinnut olla erityisen pitkäkestoinen. Lopullinen käyttöympäristö- ja tarkoitus eivät ole vielä päätettynä työn tilaajan toimesta, mutta robotin loppukäyttökohteen voidaan olettaa olevan harjoitteluun, tai kevyisiin testaus- ja kokoonpanotehtäviin liittyvää. Käyttöympäristö olisi näin laboratoriotilassa tai puhtaahkossa teollisuushallissa.

Raportissa käydään ensin läpi standardeja yleisemmin kappaleissa 2 - 4, ja esitellään mitä vaatimuksia ne robotille asettavat suunnitteluun liittyen. Varsinaisia käytettyjä ratkaisuja, ja kuinka standardien vaatimukset tarkemmin työssä näkyvät, on esitelty myöhemmissä kappaleissa 5 ja 6.

2 ROBOTTIEN TURVALLISUUSSTANDARDI ISO 10218

Teollisuusrobottien turvallisuusvaatimuksia määritellään C-tyyppin standardissa SFS-EN ISO 10218, joka on jaettu kahteen osaan. C-tyyppin standardissa esitetyt vaatimukset ovat ensisijaisia muissa standardeissa esitettyihin vaatimuksiin nähden. 1-osassa keskitytään robottien turvallisuuden suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa, ja 2-osassa keskitytään enemmän loppukäyttökohteessa ilmeneviin turvallisuusvaatimuksiin. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 8.)

Näin ollen keskityn tarkastelussa yksinomaan standardin ensimmäiseen osaan. Itse standardi on laadittu ottaen huomioon teollisuusrobotit ja teollisuusrobottijärjestelmät, jossa järjestelmällä tarkoitetaan kokonaisuutena robotin asennusympäristöä sekä robotin toimimista muiden laitteiden kanssa. Koska oma työni koskee vain yksittäisen robotin suunnitteleminen, keskityn vain itse fyysiseen robottiin liittyviin säädöksiin.

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi standardin asettamia vaatimuksia suunniteltaville roboteille, ja kerrotaan kuinka nämä liittyvät, tai on huomioitu suunnittelemani robotin kohdalla. Koska työni aihe on rajattu koskemaan vain itse fyysistä robottia, en käsittele asennusympäristöön tai ohjaimen liittyviä vaatimuksia.

2.1 Vaarojen tunnistaminen ja riskien arviointi

Robotin suunnittelussa on tunnistettava, ja pyrittävä vähentämään, koko sen elinkaaren aikana esiintyviä vaaroja. Vaarojen tunnistamisessa voidaan käyttää apuna standardin liitteestä A löytyvää luetteloa robottien yhteydessä yleisesti esiintyvistä vaaroista. Muiden vaarojen tunnistamiseksi on tehtävä vaara-analyysi. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 20.) Vaara-analyysistä, vaarojen tunnistamisesta ja riskien vähentämisestä on esitetty opastusta koneturvallisuusstandardissa ISO 12100, jota käyn läpi tämän raportin luvussa 3.

Seuraavassa luettelossa on standardin liitettä A apuna käyttäen listattu omalla työlleni olennaisimmat vaaranpaikat, huomioon ottaen työn rajauksen, robotin koon sekä sen tuottamat voimat;

- Mekaaniset vaarat

- robotin osien, käsivarren tai työkalun tahalliset ja tahattomat liikkeet
- irtonaisen vaatetuksen tai pitkien hiuksien joutuminen liikkuvien osien väliin.
- Sähköstä johtuvat vaarat
 - jänniteisiin osiin koskettaminen
 - eri jännitteiden sekaannus järjestelmässä.
- Lämpötilasta johtuvat vaarat
 - kuumenevat moottorit tai sähköiset osat.
- Tärinästä johtuvat vaarat
 - tärinästä johtuva osien löystyminen, joka johtaa robotin odottamattomaan käyttäytymiseen.

(SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 48-56.)

Tunnistamisvaiheessa tulee vaaroille tehdä myös riskien arviointi. Arvioinnissa tulee kiinnittää huomiota robotin tarkoitettuun käyttöön ja ennakoitavissa olevaan väärinkäyttöön, odottamattomaan käynnistymiseen, ohjausjärjestelmän vikaantumiseen sekä ihmisten käyttäytymiseen robotin ympärillä. Ensisijainen keino riskien poistamiseen tai vähentämiseen on muuttaa suunnitelmia siten, ettei riskiä pääse syntymään. Toissijainen keino on eristäminen suojuksilla ja turvalaitteilla. Mikäli riskejä ei saada näillä keinoilla poistettua, muiden menetelmien käyttö on hyväksyttävää (varoitukset, ohjekilvet, koulutus). (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 20.)

2.2 Suunnitteluvaatimukset ja suojaustoimenpiteet

Ominaisten vaarojen osalta robotti on suunniteltava koneturvallisuusstandardin ISO 12100 mukaisesti. Voimansiirtoelimien, kuten moottoreiden akselien, hammaspyörien, käyttöhihnojen ja vivustojen tulisi olla suojattuna kansilla. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 20). Omassa työssäni ei esiinny nopeasti pyöriviä akseleita joista olisi käyttäjälle vaaraa. Robotin varret liittävässä korissa olevien moottoreiden akselit ovat avoinna, mutta käytännössä alhaisten akselien kierrosnopeuksien sekä voimien myötä olennaista suurta vaaraa ei tästä ilmaannu.

Hammaspyöriä ei ole tarpeen robotissa käyttää muualla moottorinakseleiden ja kulmaantureiden välillä. Näiden hammaspyörien vaarallisuus riippuu käytettyjen moottoreiden

tehosta. Hammaspyörästön kontaktipinnassa esiintyvä puristusvoima voidaan laskea kaavan 1 avulla.

$$F = \frac{M}{r} \quad (1)$$

Jossa F on puristusvoima, M on ajavalle pyörälle syötetty momentti, ja r hammaspyörän säde. (Mäkelä 2010, 92.)

Mikäli hammaspyörästöä tai moottorinakseleita ei peitetä, on myös riski käyttäjän avonaisena pidettyjen hiuksien ajautumisesta koneikkoon. Työssäni nämä akselit eivät kuitenkaan kierry yhteen suuntaan 360° enempää, joten robotti ei pysty vetämään hiuksia niin pitkälle koneikkoon, että siitä syntyisi vakavaa vaaraa. Vaikka riskit näissä tapauksissa eivät välttämättä olisikaan kovin merkittäviä, olisi hammaspyörästö silti hyvä peittää.

Robotin rakenneosien virhetoiminnot tulisi rakentaa niin, että näistä ilmaantuva vaara olisi mahdollisimman pieni (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 22). Robotissani suurin tähän liittyvä riski olisi kiinnityksessä käytettyjen muttereiden löystyminen, ja näin osien irtoaminen. Kiinnityksen varmistus voidaan toteuttaa käyttämällä lukitusmuttereita, tai liimaamalla mutterit kiinni. Osien löystyminen näkyy myös robotin vakauden heikkenemisenä etenkin varsissa, jolloin voidaan huoltotoimenpiteisiin ryhtyä ajoissa.

Robotin sähkölaitteisto on suunniteltava ja rakennettava konesähköturvallisuusstandardin IEC 60204-1 mukaisesti, jota käyn läpi tämän raportin luvussa 4. Energialähteet olisi voitava tarvittaessa erottaa robotista. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 22.) Robotin ainoa energianlähde on sähköenergia, joten tällä voidaan käsittää joko robotin erottamista virtalähteestä, tai virtalähteen erottamista verkkovirrasta. Virtalähteen suunnittelu on rajattu työn ulkopuolelle, joten en keskity tähän vaatimukseen erityisemmin.

Varastoituneen energian purkamiseen tulisi olla soveltuvat työkalut (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 22). Robotin energiaa varastoivien komponenttien määrä on vähäinen, ja energian varastointikyky pieni. Varsien kevennysjousi varastoi mekaanista energiaa, mutta vapauttaa sen varsia nostettaessa. Moottorinohjaimissa käytettävät $100 \mu\text{F}$ kondensaattorit (Pololu, 2016) ovat niin pieniä, ettei niihin varastoitunut sähköenergia ole merkittävää.

Robotin hallintaelimiin kohdistuvia vaatimuksia käsitellään standardin kappaleessa 5.3. Hallintaelimet on sijoitettava siten, että ne ovat suojassa tahattomalta vaikuttamiselta. Hallintaelimen tila (tehon syöttö kytketty, vika havaittu, jne.) on ilmaistava selkeästi, ja siinä on oltava toiminnon selkeästi ilmaisevat merkinnät. Jos robottia käytetään paikallisesti käytettävällä ohjelmointilaitteella, robotin liikkeiden käynnistäminen muualta on esitettävä. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 22.)

2.3 Turvallisuuden liittyvän ohjausjärjestelmän suorituskyky

Robotin suorituskyvyn turvallisuuden liittyvien komponenttien tasot on määritetty standardin ISO 13849-1 (Koneturvallisuus, turvallisuuden liittyvät ohjausjärjestelmien osat) kappaleessa 4.5.1, ja turvallisuuden eheyden tasot ja laitteiston vikatoleranssien vaatimukset standardin IEC 62061:2005 kappaleessa 5.2.4. Suunnittelija voi käyttää näistä haluamaansa, joten tarkastelen vain ISO 13849-1:tä. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 24.)

Standardin ISO 13849-1 kappale 4.5.1 määrittelee suorituskyvyn luokat (PL, Performance Level), jotka ovat määritetty kirjaimilla A - E. PL:llä tarkoitetaan turvallisuuden liittyvien osien kykyä suorittaa turvallisuustoiminto ennustettavissa olevien olosuhteiden alaisena. Näitä luokituksia ei ole kumminkaan tarpeen tehdä muille kuin varsinaisille turvallisuuden suoraan liittyville komponenteille. (SFS-EN ISO 13849-1, 2015, 11). Ohjausjärjestelmän turvallisuuden liittyvät osat tulisi suunnitella siten, että niissä suorituskyvyn luokka PL on D, rakenneluokassa 3. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että turvatoiminto (koneen toiminto, jonka vikaantuminen aiheuttaa välittömän riskin kasvamisen) täyttää seuraavat vaatimukset;

- Yksittäinen vika missä tahansa osassa ei johda turvatoiminnon menettämiseen.
- Mikäli mahdollista, yksittäinen vika olisi voitava havaita turvatoimintoa seuraavan kerran käytettäessä.
- Yksittäisen vian ilmetessä turvatoiminto suoritetaan aina, ja turvallinen tila säilytetään niin pitkään, että vika korjataan.
- Kaikki kohtuudella ennakoitavat viat on havaittava.

(SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 24.)

2.4 Pysäytystoiminnot

Jokaisella robotilla olisi oltava suojauspysäytystoiminto sekä itsenäinen hätäpysäytystoiminto, jotka on voitava yhdistää ulkopuolisiin turvalaitteisiin. Hätäpysäytystoiminnolla tarkoitetaan hätätilanteisiin liittyvää pysäytystä, jonka tarkoitus on pysäyttää koko järjestelmä vaaratilanteessa tai sen uhatessa. Suojauspysäytystoiminnolla tarkoitetaan enemmänkin riskin pienentämiseen liittyviä toimintoja. Esimerkiksi hätäpysäytys tulisi pystyä tekemään ja lopettamaan vain käsin, kun taas suojauspysäytyksen alkamista ja loppumista voidaan säädellä automaattisesti turvalaitteilla. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 26).

Koska hätäpysäytys- tai suojauspysäytystoiminnon toiminnon toteuttaminen ei varsinaisesti liity itse robotin rakenteelliseen suunnitteluun, vaan enemmän asennusympäristöön, virransyöttöön, sekä ohjelmalliseen käyttäytymiseen, ovat nämä toiminnot rajattuna tämän raportin ulkopuolelle. Jälkikäteen toiminnot on helppo lisätä ohjelmaa päivittämällä.

2.5 Nopeuden ohjaus

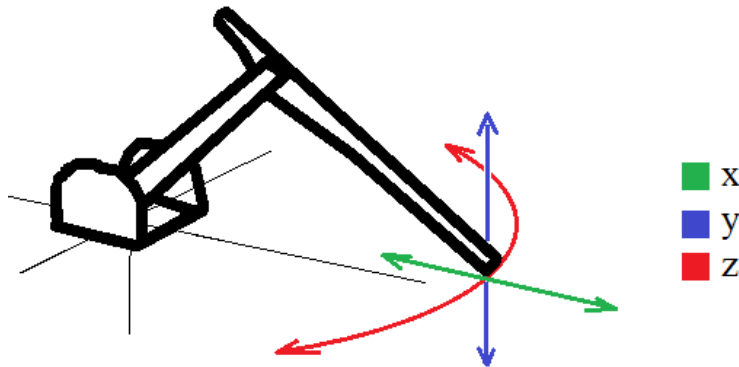
Robotin työkalun kiinnityslaipan ja työkalun keskipisteen nopeuden olisi oltava ohjattavissa valittavilla nopeuksilla. Robotin nopeudelle ei ole varsinaista ylärajaa, mutta turvalluo-
luokitellun alennetun nopeuden yläraja on 250 mm/s, ja haluttaessa hitaampi. Käsinohjaus täydellä nopeudella vaatisi erillisen varmistinkytkimen ohjaimeen. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 28.) Moottorin maksimikulmanopeus voidaan laskea kaavan 2 avulla.

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2)$$

Jossa ω on kulmanopeus, r on robotin ulottuvuus x-akselilla ja v on kehänopeus. (Salmi & Virtanen 2006, 49.)

Näin robotin suurimmalla ulottuvuudella 460 mm, ja kehänopeudella 250 mm/s, saadaan Z-akselia kiertävän moottorin maksimikulmanopeudeksi ω_{460} 0,54 1/s (radiaania sekunnissa). Jos työkalupään etäisyys on 100 mm, maksimikulmanopeus ω_{100} on 2,5 1/s. Samoin voidaan laskea myös käsivarsia liikuttavien moottorien kulmanopeudet. Varsien pituudet ovat 240 mm ja 222 mm, joille voidaan laskea arvot ω_{240} on 1,04 1/s ja ω_{222} on

1,13 1/s. Mikäli moottoreiden nimelliset kierrosnopeudet ovat tätä suurempia, täytyy nopeutta ohjelmallisesti rajoittaa alennettuun nopeuteen pääsemiseksi.



KUVIO 1. Robotin koordinaatistoa selventävä kuva

Robotin kannettavalle ohjauslaitteelle esitellään vaatimuksia standardin kappaleessa 5.8, mutta sivuutin nämä vaatimukset suunnittelussa tämän työn ohjaimen ollessa tilapäinen, itse robotin toimintojen toimivuuden toteamiseen. Standardin kappaleet 5.9 ja 5.10 käsittelevät useamman robotin yhtäaikaista toimintaa, jotka jäävät myös oman työni rajauksen ulkopuolelle.

Standardin kappaleessa 5.11 käsitellään käyttäjää erikoispisteistä aiheutuvilta vaaroilta varoittamisesta. Erikoispisteen läheltä karteesisessa koordinaatistossa liikuttaessa robotin jonkin nivelen kulmanopeus voi kasvaa yllättäen erittäin suureksi. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 38.) Näitä erikoispisteitä voi esiintyä, jos tietty koordinaatiston piste voidaan saavuttaa useammilla varsien eri asennoilla (Adept Technology, 2007, 4). Omassa työssäni tätä ei varsien rakenteesta johtuen voi tapahtua normaalitoiminnan aikana.

2.6 Akseleiden liikkeiden rajoittaminen

Standardin kappaleessa 5.12 käsitellään akselien liikkeiden rajoittamista. Robotin pääakselin (akseli, jonka siirtymisliike on suurin) liikkeen rajoittamiseksi olisi oltava mahdollista asentaa säädettävissä olevia mekaanisia pysäyttimiä, jotka nimelliskuormalla pystyvät pysäyttämään liikkeen. Lisäksi toisen ja kolmannen akselin liikkeet olisi pystyttävä rajoittamaan joko mekaanisilla tai sähkömekaanisilla rajoittimilla. Työssäni pääakseliin, eli z-akselin ympäri kiertyvään pohjimmaiseen niveleen, olisi haluttaessa kyettävä

lisäämään mekaaniset rajoittimet. Toisen ja kolmannen akselin liikettä rajoittaa mekaanisesti korin takaama liikkumatila. Näihin akseleihin säädettävän mekaanisen rajoittimen lisääminen olisi haasteellisempaa. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 38.)

Mekaanisten keinojen lisäksi liikettä voidaan rajoittaa ohjelmallisesti. Mikäli erillisiä jarruja ei käytetä, tämä edellyttää maksimiliikenopeuden rajoittamista siten, että robotti pysyy pysäyttämään liikkeen täydellä nimelliskuormalla täydestä nopeudesta. Omassa työssäni tämä tarkoittaisi maksimiliikenopeuden säätämistä siten, että maksiminimelliskuormaa liikuteltaessa moottoreiden teho riittää pysäyttämään liikkeen. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 40.)

Moottorin kykyä pysäyttää liike määrittää sen tuottama vääntömomentti, joka voidaan laskea z-akselia kiertävälle liikkeelle seuraavan kaavan (3) mukaan:

$$M = \frac{m \Delta v r}{\Delta t} \quad (3)$$

Jossa M on vääntömomentti, m on liikuteltavan kappaleen massa, Δv on nopeuden muutos, r on massakeskipisteen etäisyys liikkeen keskipisteestä ja Δt on pysähtymisaika. (Mäkelä ym. 2010, 91-93.)

Oletetaan 0,5 sekunnin pysäytysaika riittäväksi, liikkuvaksi massaksi 2 kg (sisältää liikutettavan kappaleen, sekä robotin varret), massakeskipisteen etäisyydeksi 0,46 m ja nopeudeksi 250 mm/s. Edellä mainitulla kaavalla (3) saadaan vääntömomentin M arvoksi 0,46 Nm. Riippuen suunnittelutavoitteista, voidaan tällaisessa tapauksessa joko muuttaa suurinta nopeutta, liikuteltavaa massaa tai vaihtaa moottoria. Mikäli moottoria käytetään liikkeen rajoittamiseen ensisijaisena turvatoimintona, se lasketaan turvallisuuteen suoraan liittyviksi komponenteiksi, ja niille on tehtävä suorituskyvyn luokitus, kuten tämän raportin kappaleessa 2.3 on kerrottu. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 40.)

Robottia olisi pystyttävä liikuttamaan hätätilanteessa käsin ilman tehon syöttöä. Askelmoottoreilla on virrattomanakin pieni pidättyvä vääntömomentti. Robotin ja sen moottoreiden koon huomioiden, tästä ei kuitenkaan ole mitään estettä sen käsin liikuttelemiselle.

Koko robotin nostamiseen olisi robotissa oltava paikat nostovälineille, mutta robotin pienestä koosta ja keveydestä johtuen tämä ei ole tässä työssä tarpeellista. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 42.)

Lisäksi sähköliittimet jotka voivat vahingossa irrotessaan aiheuttaa vaaraa, olisi suunniteltava niin että ne eivät voi irrota (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 42). Robotin käyttämät jännitteet eivät ole niin suuria, että irtonaiset johtimet itsellään aiheuttaisivat suurta vaaraa, mutta irtoavat johdot voivat aiheuttaa robotin ohjausjärjestelmän virhetiloja, ja siten odottamattomia liikkeitä.

2.7 Turvallisuusvaatimusten ja suojaustoimenpiteiden vahvistaminen

Robotin valmistajan olisi huolehdittava, että robotin turvallisuusvaatimukset suunnittelun ja rakentamisen, mukaan lukien turvalaitteiden, osalta olisi täytetty. Todentaminen ja vahvistaminen voidaan tehdä muun muassa silmämääräisellä tarkastuksella, toimintakokeilla, mittauksilla ja muilla tarkastuksilla. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 42.) Standardin ISO 10218-1 liitteessä F on luetteloitu kohtia robotin turvallisuuteen liittyen. Tämän liitteen vaatimuksia voidaan vertailla sitten tuotettuun robottiin.

Standardin kappaleessa 7 käydään vielä läpi käyttöohjeen sekä tarvittavien merkintöjen vaatimuksia. Käyttöohjeen laatimista en työni rajauksen puitteissa suorita. Robottiin tulisi merkitä selvästi ja kestävästi seuraavat merkinnät:

- valmistajan nimi ja täydellinen osoite
- koneen tyyppimerkintä, mallinumero tai tunnistetiedot
- valmistusaika kuukauden tarkkuudella
- koneen massa
- ulottuvuusalue ja kuormitettavuus
- sähkön, tai muun tehonlähteen syöttöä koskevat tiedot
- nostokohdat siirtämistä ja asennusta varten, jos tarvitaan.

(SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 46.)

3 KONETURVALLISUUSSTANDARDI ISO 12100

ISO 12100 on yleisesti koneiden turvallisuuden kehittämisessä ohjaava A-luokan standardi. A-luokan standardi tarkoittaa tässä tilanteessa sitä, että A- ja C-tyyppien ollessa ristiriidassa C-tyypin standardin määräyksiä tulee noudattaa. (SFS-EN ISO 12100, 2010, 10.) A-luokan standardi on myös laaja-alaisempi, eikä esitä niinkään yksityiskohtaisia vaatimuksia, vaan enemmänkin yleisiä periaatteita turvallisten koneiden kehittämiseksi. Suuri osa standardista on enimmäkseen turvallisten suunnitteluratkaisujen ja turvallisuuden kannalta oleellisten näkökulmien esittämistä. Siinä käydään menettelytapoja koneiden vaarojen tunnistamiseksi ja riskien arvioinniksi, sekä vaarojen poistamiseksi tai riskien pienentämiseksi.

Koneiden turvallisuuden suunnittelu tulisi aloittaa riskien arvioinnista, jonka jälkeen tavoitteena on suurin käytännössä mahdollinen riskien pienentäminen. Suunnitteluprosessissa tärkeimpiä huomioon otettavia tekijöitä ovat, tärkeysjärjestyksessä

- koneen turvallisuus koko elinkaaren aikana
- sen kyky suorittaa toimintonsa
- käytettävyys
- valmistus- käyttö- ja purkukustannukset.

(SFS-EN ISO 12100, 2010, 28.)

3.1 Riskien arviointi- ja pienentämisprosessi

Koneturvallisuusstandardissa on ohjeet riskien arviointiin, jota voidaan käyttää, mikäli robottistandardin liitteessä A esitetyt yleiset riskiesimerkit koetaan riittämättömiksi. Riskien arviointiprosessi etenee seuraavasti;

- Riskianalyysin teko, johon kuuluu
 - koneen raja-arvojen määrittäminen, eli tarkoitettu käyttö sekä kohtuudella odotettavissa oleva väärinkäyttö
 - vaarojen tunnistus ja liittyvät vaaratilanteet
 - riskin suuruuden arviointi.
- Arvioidaan riskin merkitys ja päätetään riskin pienentämisen tarpeellisuudesta.
- Poistetaan tai pienennetään vaaraan liittyvää riskiä.

Standardin kappaleessa 4 esiteltyjä kuvioita 1 & 2 voidaan käyttää apuna riskien pienentämisprosessissa. Riskien arviointia varten tarvitaan tietoja koneen kuvauksesta, siihen liittyvistä säädöksistä, käyttäjäkokemuksista sekä asiaankuuluvasta ergonomiasta. Koneen raja-arvojen määrittämisessä tulee ottaa huomioon sen koko elinkaari. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 28.)

Riskien arviointiin kuuluvat riskianalyysin teko, sekä riskin merkityksen arviointi. Tekeillä riskianalyysi voidaan arvioida riskin merkitystä ja siten auttaa päätöksessä mahdollisesta riskin pienentämisestä. Riskin arviointia varten tarvittavia tietoja on lueteltu standardin kappaleessa 5.2. Pääpiirteittäin riskin arviointiin tarvitaan tietoja koneen kuvauksesta, säädöksiin ja standardeihin liittyviä tietoja, käyttäjäkokemuksiin liittyviä tietoja, sekä asiaankuuluvia ergonomisia periaatteita. (SFS-EN ISO 12100, 2010, 34-36.)

3.1.1 Raja-arvojen määrittäminen

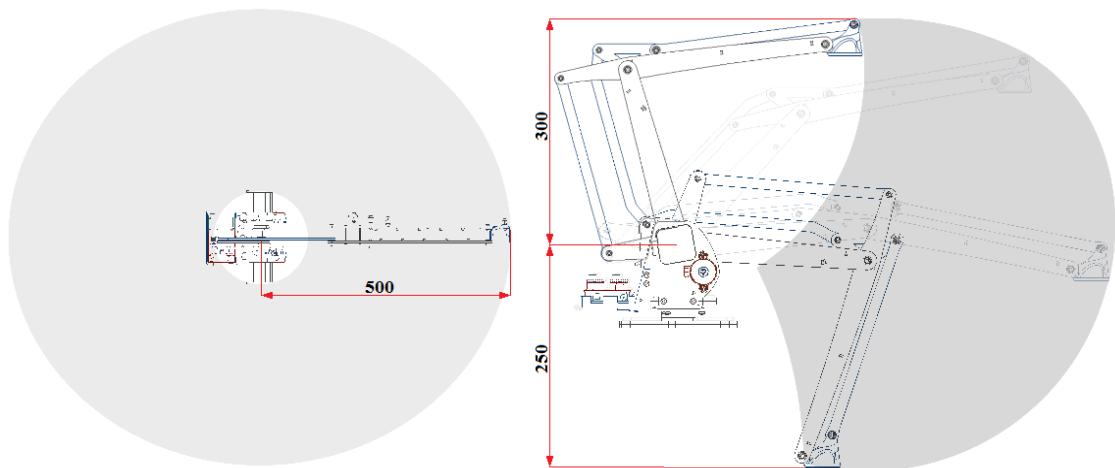
Riskien arviointi aloitetaan raja-arvojen määrittämisellä, jota käsitellään standardin kappaleessa 5.3. Tällä määrittämisellä tarkoitetaan koneen ominaisuuksien ja suoritusarvojen, sekä niihin liittyvien ihmisten, ympäristön ja tuotteiden tunnistamista koko tuotteen elinkaaren aikana. Käyttörajoilla tarkoitetaan tarkoitettua käyttöä sekä kohtuudella ennakoitavissa olevaa väärinkäyttöä. Huomioitavia näkökohtia ovat;

- Koneen erilaiset toimintatavat ja sen hyödyntäjien puuttuminen toimintaan, mukaan lukien toimintahäiriöiden aiheuttamat toimintaan puuttumiset.
- Koneen käyttö (teollinen, ei-teollinen) ja käyttäjän ominaisuudet (ikä, kätisyys, fyysiset rajoitukset).
- Käyttäjien oletettu koulutustaso, kokeneisuus ja kyvyt.
- Muiden henkilöiden kuin käyttäjän altistuminen koneelle ja siinä esiintyville vaaroille.

(SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 36.)

Tilarajoilla käsitetään koneen liikkeen laajuutta, koneen kanssa työskentelevien vaatimista tila, koneen vuorovaikutus ihmisen kanssa, sekä koneen tehonsyötön rajapinta. Aikarajat ovat koneen komponenttien ennakoitavissa oleva elinikä, sekä suositellut huoltovälit. Muita raja-arvoja ovat koneen käsittelemän materiaalin ominaisuudet, puhtaanapitoon sekä käyttöympäristöön liittyvät raja-arvot. (SFS-EN ISO 12100, 2010, 38).

Työni aiheen mukaiselle robotille voitaisiin määrittellä seuraavanlaiset raja-arvot: Robotin toimintatavat voidaan rajata kappaleiden siirtelyyn tai ulkoisiin kappaleihin vaikuttamiseen. Käyttäjien puuttumiseen toimintaan vaikuttaa suuresti se, mitä työtä robotilla tehdään. Koneita käytettäisiin teollisuus- tai oppilaitosympäristössä. Käyttäjän oletettu kyky käyttää robottia riippuu robotin lopullisesta käyttörajapinnasta, joka on rajattu tämän työn ulkopuolelle. Myös muiden henkilöiden altistuminen koneen vaaroille riippuu paljon lopullisesta asennuspaikasta ja -ympäristöstä. Koneen tilarajat ovat robotin liikkeen laajuuden osalta alla olevan kuvion 2 mukaiset, jos työkalua ei ole liitettyinä. Koneen käyttäjän vaatima tila, vuorovaikutus ihmisen kanssa, sekä tehonsyötön rajapinta liittyvät taas enemmän robotin loppusijoituspaikkaan, joita on tässä vaiheessa vaikea määrittellä. Koneen eliniän osalta työlle ei ole asetettu tilaajan toimesta rajoja.



KUVIO 2. Robotin työalue ja ulottuvuus

3.1.2 Vaarojen tunnistaminen

Koneen vaarojen, ennakoitujen ja ennakoimattomien, tunnistamisessa tulee ottaa huomioon koko sen elinkaari. Elinkaari käsittää asennuksen, käyttöönoton, käytön, sekä käytöstä poistamisen. Vaarojen tunnistamisessa on otettava huomioon;

- Ihmisten vuorovaikutus, johon kuuluu asetusten teko, käytön kaikki vaiheet, vioittuminen ja kunnossapito.
- Koneen mahdolliset toimitilat, joilla käsitetään koneen toimiminen odotetusti, sekä virhetila, joka voi johtua mistä tahansa ulkoisesta tai sisäisestä häiriöstä.
- Käyttäjän tarkoittamaton käyttäytyminen ja ennakoitavissa oleva väärinkäyttö.

(SFS-EN ISO 12100, 2010, 38-40.)

Oman robottini kuljetuksessa, kokoonpanossa tai asennuksessa ei voida olettaa olevan suuria riskejä, sillä robotin ja sen osien painot ovat pieniä, eikä robotissa käytetä suuria jännitteitä. Sama koskee myös purkamista ja käytöstä poistoa. Yleisesti robotin käyttöönotto ja käyttö on melko vaaratonta, ja kaikkien ennakoitavissa olevien vaarojen voidaan olettaa liittyvän itse käyttöön.

3.1.3 Riskin suuruuden ja merkityksen arviointi

Vaaran tunnistamisen jälkeen vaaratilanteille on tehtävä riskin suuruuden arviointi. Vaaratilanteeseen liittyvä riski riippuu vahingon vakavuudesta ja vahingon esiintymistodennäköisyydestä. Vahingon vakavuuden arvioinnissa otetaan huomioon vamman vakavuus (lievä, vaikea, kuolema), sekä vahingon laajuus (moneenko henkilöön vaikuttaa). Vahingon esiintymistodennäköisyyden arvioinnissa otetaan huomioon;

- Henkilön altistuminen vaaroille
 - vaaravyöhykkeelle pääsyn tarve, taajuus, oloaika sekä henkilöiden, joilla on tarve pääsyyn, lukumäärä.
- Vaarallisten tapahtumien esiintyminen
 - tilastollista tietoa vaarallisen tapahtuman esiintymistiheydestä.
- Vahingon välttämisen tai rajoittamisen mahdollisuus
 - vaaravyöhykkeellä olevien henkilöiden ammattitaito, vaarallisen tapahtuman vahinkoon johtamisen nopeus ja tietoisuus riskin olemassaolosta.
 - Inhimilliset kyvyt (refleksit, notkeus, ym.) ja käytännön kokemukset laitteesta.

(SFS-EN ISO 12100, 2010, 42-50.)

Suunnittelemani robotissa vahinkojen vakavuus yleisesti ottaen ei olisi suuri. Vamman vakavuus sormien tai hiusten joutuessa hammaspyörästöjen tai akselien väliin olisi lievä, ja vahingon laajuus koskettaisi vain yhtä henkilöä. Hammaspyörästön vaaran vakavuus on laskettu myöhemmin raportin kappaleessa 5.2. Robotin varsien liikkeiden vaarallisuus suhteessa sen liikenoiteeseen voidaan laskea voiman ja kiihtyvyyden kaavoista johtamalla (kaava 4).

$$F = \frac{m \Delta v}{\Delta t} = \frac{m \omega r}{\Delta t} \quad (4)$$

Jossa F on lyövän robotin voima, m iskeytyvän kappaleen massa, ω moottorin kulmanopeus, r iskevän kohdan etäisyys moottorista ja Δt pysähtymisaika. (Mäkelä ym. 2010, 91)

Käytetyn suurempitehoisen moottorin suurimmaksi kulmanopeudeksi ω voidaan laskea 3.08 1/s raportin sivun 40 kaavan (12) avulla. Oletetaan, että m on 4 kg, r on 500 mm ja Δt on 0,1 s. Näillä ääriarvoilla iskun voimaksi saataisiin 61,5 N, joka osumapaikasta riippuen on tarpeeksi suuri aiheuttamaan lievän tai vakavan vamman. Henkilön vaaralle altistuminen riippuu paljon robotin loppusijoituspaikasta ja siitä mitä sillä tullaan tekemään. Oletettavasti robottia tulnaisiin käyttämään itsekseen työskentelyyn, erillään muista ihmisistä. Vaara-alueella, eli robotin rungon lähellä, käytäisiin siten vain harvakseltaan, vikatilanteissa sekä huollon ja asennuksen yhteydessä.

Jotta voitaisiin päättää riskin pienentämisen tarpeellisuudesta, riskin merkityksen arviointi tehdään riskin suuruuden arvioinnin jälkeen. Riskiä on pienennetty riittävästi, kun

- kaikkia toimintaolosuhteita ja näkökulmia on tarkasteltu
- vaarat on poistettu tai niitä on pienennetty niin alas kuin mahdollista
- suojaustoimenpiteiden aiheuttamat mahdolliset uudet vaarat on käsitelty asianmukaisesti
- jäljelle jääneistä riskeistä on varoitettu käyttäjiä
- on kiinnitetty riittävää huomiota myös niihin seurauksiin joita voi syntyä, jos konetta käytetään muualla kuin suunnitellussa käyttöympäristössä
- suojaustoimenpiteillä ei ole kielteistä vaikutusta koneen käytettävyyteen tai työskentelyolosuhteisiin.

Osana arviointiprosessia voidaan myös vertailla samanlaisten koneiden riskejä, edellyttäen että koneet ovat vertailukelpoisia standardoinnin, käytön, käyttöolosuhteiden, vaarojen osatekijöiden ja teknisten tietojen osalta. (SFS-EN ISO 12100, 2010, 50.) Suurin osa robottien yleisimmistä vaaroista, eli robotin varsien liikkeet on käsitelty jo aiemmin robottistandardissa. Merkittävin muista vastaavista tuotteista poikkeava vaaranpaikka omassa työssäni onkin lähinnä antureiden hammaspyörien avonaisuus.

3.2 Riskin pienentäminen

Riskin pienentämistä käsitellään standardin kappaleessa 6. Riskin pienentämisen tavoitteena on poistaa tai pienentää vaarasta aiheutuvan vahingon vakavuutta sekä vahingon esiintymistodennäköisyyttä. Näiden tavoitteiden saavuttamisessa on sovellettava ”kolmen askeleen menetelmä;”

- Luontaisesti turvalliset suunnittelutoimenpiteet
 - koneen suunnittelu siten, että näitä vaaroja ei pääse edes syntymään.
- Suojaustekniset toimenpiteet ja/tai täydentävät suojaustoimenpiteet
 - mikäli konetta ei voi suunnitella ilman vaaraa aiheuttavaa ominaisuutta, tulisi käyttäjä eristää vaaran aiheuttajasta suojausteknisillä toimenpiteillä.
- Käyttöä koskevat tiedot
 - jos eristäminen ei ole mahdollista, riittävän tiedon saattaminen käyttäjälle koneen vaaroista.

(SFS-EN ISO 12100, 2010, 52.)

3.2.1 Luontaisesti turvalliset suunnittelutoimenpiteet

Luontaisesti turvallisten suunnittelutoimenpiteiden tulisi olla ensisijaisia riskin pienentämiseen. Näillä suunnittelutoimenpiteillä tarkoitetaan koneen suunnittelua siten, että vaarat vältetään, tai riskejä voidaan pienentää koneen rakenteen, tai henkilöiden ja koneen vuorovaikutustavan oikeanlaisella valinnalla. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 52.) Standardin kappaleessa 6.2 käydään kattavasti läpi erilaisia huomioonotettavia näkökulmia, joista olen poiminut omaan työhöni liittyvät näkökulmat alle, ja kertonut kuinka ne on otettu huomioon.

Geometriset tekijät

Koneen ulkomuoto olisi suunniteltava siten, että käsin ohjattaessa on käyttäjältä työalueelle mahdollisimman hyvä suora näkyvyys. Näkyvyys työalueelle riippuu paljon käyttäjän ja ohjelmointityökalun sijoituksesta loppusijoituspaikassa, joten tämä ei ole oman työni rajauksen kannalta oleellinen näkökohta. Mekaanisten komponenttien muotoa ja suhteellista sijaintia muuttamalla tulisi minimoida puristumis- ja leikkaantumisvaaraa. Robotin liikkuvia akseleita ei kuitenkaan voi sijainniltaan muuttaa vaikuttamatta suuresti sen toimintaan. Moottorinakselien kulman välitys antureille on vaikea toteuttaa ilman

hammaspyörästä tai vastaavaa välitystä, ja suoraan moottoriin integroidun asemantun-
nituksen käyttäminen nostaisi robotin hintaa. Teräviä reunoja ja ulkonevia osia, jotka
voivat aiheuttaa vamman, eikä aukkoja, joihin vaatteet tai kehonosat voivat jäädä louk-
kuun, ei saa esiintyä. Robotissa suurimmat ulkonevat osat ovat sen käsivarret, joita ei
voida poistaa. Alumiinilevyjen leikkauspurseet ja muut terävät kulmat voidaan kuitenkin
kokoamisvaiheessa hioa pois. (SFS-EN ISO 12100, 2010, 54.)

Fyysiset näkökohdat

Koneen käyttövoimaa tai liikkuvien osien massaa tulisi rajoittaa, mikäli tarpeen. Työssäni
käytetyt pienitehoiset moottorit eivät kuitenkaan ole niin suuri riski, että rajoittaminen
olisi tarpeellista. Myöskään liikkuvien osien massan alhaisuudesta johtuen ei massan ra-
joitus erikseen ole tarpeellista. Myös robotin aiheuttama melu- ja värinätaaso on luonnos-
taan niin alhainen, etteivät ne vaadi erityistoimenpiteitä. (SFS-EN ISO 12100, 2010, 54.)

Koneensuunnittelua yleisesti koskeva tekninen tietämys

Yleinen tekninen tietämys mekaanisista rasituksista ja materiaaleista ja niiden ominai-
suuksista tulisi ottaa huomioon. Näitä tietoja voidaan saada esimerkiksi standardeista tai
suunnitteluohjeista. Mekaaniset rasitukset on otettu huomioon käyttämällä standardoituja
kiinnitysosia. Yleisesti rasitusten aiheuttamaan väsymiseen en kiinnittänyt paljoa hu-
omiota, sillä robotin toivotun käyttöiän ei tarvinnut olla niin suuri, että väsymisestä tarvit-
sisi kantaa huolta. Materiaalien ominaisuuksista kiinnitin huomiota tulostettujen muo-
viosien heikkouteen, joten muoviosia on käytetty vain vähäisille voimille altistuvissa
osissa. (SFS-EN ISO 12100, 2010, 56.)

Vakavuudesta huolehtiminen

Robotti olisi suunniteltava niin vakaaksi, että määritetyissä olosuhteissa sen epävaka-
udesta ei syntyisi vaaraa (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 58). Perustuksen geometriaan ja
painon jakautumiseen en kiinnittänyt erityisemmin huomiota, sillä oletan alkuperäisen
robotin alustaratkaisujen olevan riittäviä myös jatkokehittämälläni versiolle. Ulkoinen
massa jota robotti kykenee liikuttamaan on vähäinen. Suositelluissa nostorajoissa pysyt-
täessä painon jakautumisesta ei siis tule suuria vaikutuksia vakavuuteen.

Soveltaminen ohjausjärjestelmiin

Ohjausjärjestelmä olisi suunniteltava siten, että koneen ennalta arvaamaton ja vaarallinen käyttäytyminen voidaan välttää. Sähkönsyötön päälle kytkeminen tai tehonsyötön katkoksen jälkeen uudelleen päälle kytketyminen ei saisi aiheuttaa liikettä. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 64-66.) Näissä tilanteissa esiintyvä liike voidaan ehkäistä ohjelmassa pitämällä koordinaatiston aloituspisteen ”kelluvana”, eli aloituspiste olisi sama, kuin mikä antureista aloitushetkellä luetaan. Käytetyistä moottorinohjainten kytkennöistä johtuen moottorit eivät voi liikkua ohjausjärjestelmän ohittamalla. Ohjausjärjestelmien yhden tai useamman komponentin ohimenevä tai pysyvä virhe, tehonsyötön vaihtelu tai vikaantuminen tulisi huomioida. Näiden vikatilojen tunnistus voidaan toteuttaa ohjelmallisesti, mutta työni rajauksen puitteissa en itse tätä suunnittele. (SFS-EN ISO 12100, 2010, 62-70.)

Turvatoimintojen vikaantumistodennäköisyyden minimointi

Luotettavien komponenttien käytöllä voidaan pienentää koneen väliintuloa vaativien häiriöiden esiintyvyyttä. Turvatoimintoihin vaikuttavien komponenttien tulisi ”luotettavia komponentteja,” eli sellaisia, jotka tietyn käyttöön sidotun ajan sietävät kaikki laitteen normaalin käsittelyn häiriöt ja kuormitukset, aiheuttamatta vaarallista koneen virhetoimintaa. Turvatoiminnoissa esiintyvien komponenttien vikojen tunnistusta voidaan parantaa ”tietyllä tavalla vikaantuvilla” komponenteilla, joiden pääasiallinen vikaantumistapa on ennalta tiedossa ja vaikutus koneen toimintaan on ennakoitavissa. Turvallisuuden liittyviä osia voidaan käyttää kahdentaen, eli siten, että yhden komponentin vikaantuessa toinen on vielä toimintakunnossa. Tällainen kahdentaminen vaatii komponentin automaattisen vikaantumisen tunnistuksen. (SFS-EN ISO 12100, 2010, 70-74.) Suunnittelemani robotissa turvatoimintoja suorittavia osia ovat käytetyt moottorit, joiden vikaantumisen voi todeta helposti. Kahdentamista en robottiin suunnitellut, mutta tämä voitaisiin toteuttaa esim. pääakseliin jarru lisäämällä.

3.2.2 Suojaustekniset toimenpiteet

Mikäli vaaraa ei muuten suunnitteleamalla pystytä estämään, henkilöiden suojauksessa tulisi käyttää aina suojuksia ja turvalaitteita. Suojausteknistä laitetta valittaessa on huomioitava vaaravyöhykkeelle pääsytaajuuden tarve. Jos tarve on tiheä, edellytetään myös

vaihtoehtoisen suojaustoimenpiteen käyttöä ensisijaisen suojauksen ohittamisen estämiseksi. Jos koneen normaalitoiminnan aikana ei ole tarpeellista päästä vaaravyöhykkeelle, voidaan suojaustekniseksi laitteeksi valita:

- kiinteä suojus
- lukittava tai ei-lukittava toimintaankytketty suojus
- itsestään sulkeutuva suojus
- tunnistava turvalaite.

(SFS-EN ISO 12100, 2010, 78.)

Robotin muiden liikkuvien osien kuin varsien suojaukseen paras vaihtoehto olisi harvan pääsytiheystarpeen vuoksi kiinteä suojus. Kiinteiden suojusten vaatimuksia eritellään standardin kappaleessa 6.3.3. Kaikki suojuukset on suunniteltava siten, että ne täyttävät seuraavat vaatimukset:

- niitä ei helposti voida ohittaa tai tehdä toimimattomaksi
- ne ovat rakenteeltaan tukevia
- ne eivät saa aiheuttaa lisävaaraa
- sijaitsevat riittävällä etäisyydellä vaaravyöhykkeestä
- ne estävät tuotantoprosessin tarkkailua mahdollisimman vähän
- jos suojatulle alueelle on tarvetta päästä, ne sallivat pääsyn vain sille alueelle, johon on tarvetta päästä.

(SFS-EN ISO 12100, 2010, 84.)

Lisäksi kiinteiden suojusten vaatimukseen kuuluu, että ne ovat joko pysyvästi kiinnitetty (esim. hitsaamalla), tai että suojuksen avaaminen ilman työkaluja ei ole mahdollista. Ilman kiinnittimiä suojus ei saisi pysyä kiinni-asennossaan. (SFS-EN ISO 12100, 2010, 86.) Suojusten kiinnittäminen olisi omassa tapauksessani riittävää esim. ruuviliitoksilla.

3.3 Käyttöä koskevat tiedot, sekä tehdyn riskin arvioinnin asiakirjat

Standardin kappaleessa 6.4 käsitellään vielä käyttöä koskevien tietojen laadintaa. Näillä tarkoitetaan tiedon välittämiseen tarkoitettuja tekstiä, kilpiä, signaaleita, symboleita ja kaavioita, jotka tulisi toimittaa joko itse koneeseen kiinnitettynä, mukana toimitettavissa

asiakirjoissa, tai muilla tavoin. (SFS-EN ISO 12100, 2010, 94.) Käyttöä koskevien tietojen tarpeellisuus riippuu loppusijoituspaikasta, esimerkiksi varsinaisen robotin ulkopuolisten turvalaitteiden kattavuudesta.

Lisäksi riskin arviointi- ja pienentämisprosessista tulisi laatia asiakirjat, joista voidaan nähdä tiedot itse koneesta, noudatetusta menettelystä, sen lopputuloksista, sekä muista oleellisista asioista. (SFS-EN ISO 12100, 2010, 102.) Tämän työn tarkoituksena ei ole kuitenkaan tehdä loppukäyttäjälle täysin myyntivalmista, standardihyväksyttyä tuotetta, joten olen rajannut asiakirjojen teon työni ulkopuolelle.

4 KONEIDEN SÄHKÖTURVALLISUUSSTANDARDI EN 60204-1

Standardi SFS-EN 60204 määrittelee koneiden sähkölaitteistoille vaatimuksia ja suosituksia, joiden tarkoituksena on edistää koneiden yleistä turvallisuutta, ohjauksen yhdenmukaisuutta, sekä huollon helppoutta. Standardi on rajattu koskemaan laitteita, jotka eivät ole suunniteltu käytettäväksi ulkoilmassa tai eivät muuten ole erityisvaatimuksia vaativia laitteita (esim. räjähdysvaaralliset materiaalit tai ympäristöt). (SFS-EN 60204-1, 2006, 20.)

Standardin laatija on kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio IEC. IEC 60204 on luokitukseltaan B-luokan turvallisuuden ryhmästandardi, eli standardien välisessä ristiriitatilanteessa standardi sijoittuu A:ta ylemmäs, mutta C:tä alemmas (JB Titus, 2014). Robottistandardin ISO 10218 kanssa mahdollisten ristiriitojen ilmetessä, on IEC 60204-1 toissijainen.

4.1 Yleisiä vaatimuksia

Standardin kappaleessa 4 käsitellään yleisiä vaatimuksia, joita koneiden sähköosien suunnittelussa tulisi ottaa huomioon, sekä listataan yleisiä sähköjärjestelmiin liittyviä vaaroja. Standardin kappaleessa 4.1 on listattu mahdollisia vaaratilanteita, joista omaan työhöni liittyvät seuraavat:

- sähkölaitteiston viat tai vikaantumiset, jotka voivat johtaa tulipaloon
- vikaantumiset ohjauspiirissä, jotka voivat johtaa virheelliseen toimintaan
- virransyötön häiriöt, katkokset ja viat
- liukuvaan kosketukseen perustuvassa virtapiirissä tapahtuva katkos
- pintalämpötilat, jotka voivat aiheuttaa vamman.

(SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 40.)

Kappaleessa 4.2.1 listataan yleisiä vaatimuksia itse sähkökomponenteille ja -laitteille. Komponenttien tulisi olla sopivia niille tarkoitettuun käyttöön, oltava olemassa olevan IEC 60439 -standardin mukaisia, sekä käytön olisi oltava valmistajan ohjeiden mukaista. (SFS-EN 60204-1, 2006, 40.)

4.2 Sähkön syöttö, ja ympäristö- ja käyttöolosuhteet

Koneen sähkön syöttö on suunniteltava siten, että se toimii oikein alla listatuissa syötön olosuhteissa. Eritellyt vaatimukset koskevat enemmän virtalähdettä, joka on rajattu oman työni ulkopuolelle, mutta on hyvä ottaa huomioon lopulta virtalähdettä valittaessa. Luetellut vaatimukset ovat tasasähkösyötölle;

- Jännite
 - paristo- ja akkusyötölle 0,85...1,15 osa nimellisjännitteestä
 - muuttajalaitesyötölle 0,9...1,2 osa nimellisjännitteestä.
- Jännitekatkos
 - paristo- ja akkusyötölle alle 5 ms
 - muuttajalaitesyötölle alle 20 ms, perättäisten katkosten välisen ajan oltava vähintään 1s.
- Vaihtosähkökomponentti ei ylitä 0,15 osaa nimellisjännitteestä.

(SFS-EN 60204-1, 2006, 42.)

Sähkölaitteisto on suunniteltava sopivaksi sille tarkoitetun käytön ympäristö- ja käyttöolosuhteisiin. Laitteen on oltava sähkömagneettisesti yhteensopiva, eli se ei saa tuottaa ympäristöönsä nähden yli sopivan tason suuruisia sähkömagneettisia häiriöitä, eivätkä ulkopuoliset häiriöt saisi vaikuttaa laitteeseen. (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 44.) Käytetyt robotin moottorit eivät kykene tuottamaan niin voimakasta magneettikenttää, että siitä olisi häiriötä. Robottia ei suunnitella soveltuvaksi hitsaukseen tai muuhun suurten magneettikenttien läheisyydessä työskentelyyn, joten voidaan olettaa robottiin vaikuttavien ulkoisten kenttien olevan heikkoja. Robotissa ei käytetä niin herkkiä sähköisiä osia, että tässä oletetussa käyttöympäristössä esiintyvät magneettikentät pystyisivät vaikuttamaan niihin.

Kaikkien sähkölaitteiden tulisi toimia oikein ympäristön lämpötila-alueella +5 ... +40 °C (SFS-EN ISO 10218-1, 2011, 46). Käyttämistäni komponenteista lämpötilaherkimmät toimivat vaaditulla lämpötila-alueella; A4988 moottorinohjainten lämpötila-alue on -20 ... +85 °C (Allegro, 2016), ja Arduino Megan -40 ... +85 °C (Atmel, 2014). Mikropiirien toiminta, ja mahdollisen lisäjäähdetyksen tarpeellisuus +40 °C:n tuntumassa voitaisiin todeta mittaamalla. A4988:aan tulisi jo valmistajan ohjeidenkin mukaan käyttää lisäjäähdetystä yli 1 A:n virtoja käytettäessä (Pololu, 2016).

Sähkölaitteiden olisi kyettävä toimimaan oikein suhteellisen ilman kosteuden ollessa korkeintaan 50 % enintään +40 °C lämpötilassa. Käytetyille komponenteille ei ole ilmoitettu hyväksytyä ilmankosteuden rajoja, mutta voidaan olettaa toimintakyvyn säilyvän näissä rajoissa. Laitteiston tulisi olla suojattu riittävästi ympäristön epäpuhtauksilta, eli kiinteiden aineiden ja nesteiden sisäänpääsystä. Kotelointia on käsitelty raportin kappaleessa 4.4. Suunnittelussa olisi kiinnitettävä huomiota tärinän, iskujen, ja töytäisyjen haitallisen vaikutuksen minimointiin. Robotissa ohjausjärjestelmä on kiinni itse robotissa, jossa se on suojassa itsensä aiheuttamilta iskuilta, eikä toiminnasta ei aiheudu selkeätä tärinää. (SFS-EN 60204-1, 2006, 46.)

Oletettu käyttöympäristö olisi laboratorio- tai kevyt teollisuusympäristö, jossa lämpötilavaihtelut pysyvät n. +20 °C:n tienoilla, ja ilmankosteudenkin voidaan olettaa olevan standardin hyväksymissä rajoissa. Ympäristön epäpuhtauksien määrän voidaan olettaa olevan myös pieni. Tärinää oletetussa työtilassa ei ilmenisi suuremmin, ellei robottia ole asetettu tärisevän alustan päälle.

4.3 Syöttöjohtimien sekä erotus- ja katkaisulaitteiden vaatimuksia

Standardin kappaleessa 5.1 eritellään syöttöjohtimien liitännöille vaatimuksia. Mikäli koneessa käytetään useampaa eri käyttöjännitettä, tulisi niiden, mikäli mahdollista, tulla samasta sähkönsyöttöjärjestelmästä. Nämä kuuluvat enemmän kuitenkin työni aiheesta ulos rajaamaani virtalähteen ominaisuuksiin, joten en ota syöttöjohtimien vaatimuksia huomioon. (SFS-EN 60204-1, 2006, 48.)

Standardissa määritellään ulkoisen suojamaajohdon pienin poikkipinta-ala kappaleessa 5.2. Annetun taulukon perusteella suojajohtimen poikkipinta-alan tulisi olla yhtä suuri kuin laitteistolle syöttävien vaihejohtimien pinta-ala. Standardin vaatimaa syötönerotuskytkintä ei ole omassa robotissani erillisenä, joten käytettävässä tehonlähteessä tulisi olla syötönerotuskytkin liitettynä. Syötönerotuskytkimelle on listattu vaatimuksia standardin kappaleissa 5.3.2 ja 5.3.3. (SFS-EN 60204-1, 2006, 50.)

Robotin mahdollisia huoltotoimenpiteitä varten voidaan kaikki virransyöttö katkaista irrottamalla virtajohdot, jolloin erillistä odottamattoman käynnistymisen estäviä poiskytkentälaitteita ei tarvitse. Samaten myöskään standardin kappaleessa 5.5 mainittuja sähkölaitteiston erotuslaitteita ei tarvita. (SFS-EN 60204-1, 2006, 56.)

4.4 Suojaus sähköiskulta

Sähkölaitteisto on suojattava siten, että estetään niin suorasta kuin epäsuorasta kosketuksesta aiheutuvan sähköiskun vaara (SFS-EN 60204-1, 2006, 56). Mikäli koneessa käytetään PELV-jännitettä, erillisen suojauksen käyttäminen ei ole välttämätöntä. PELV-jännitteen, eli suojaavan pienoisjännitteen käyttäminen suojaa myös henkilöitä sähköiskuilta epäsuorassa tai rajoitetun alueen suorassa kosketuksessa. Piiri ei saa sykkeetöntä tasajännitettä käytettäessä ylittää 60 V nimellisjännitettä, mikäli piirin käyttökohde on kuivissa tiloissa, tai jos kosketus laaja-alaisiin jännitteisiin osiin ei ole odotettavissa. Muissa olosuhteissa piiri ei saa ylittää 15 VDC nimellisjännitettä. PELV-piirin toinen puoli tai piirin tehonlähteen yksi piste on kytkettävä suojajohdinpiiriin. (SFS-EN 60204-1, 2006, 64.) Mikäli kosketeltavissa olevaan pintaan ei voi tarttua tai se on laajuudeltaan pieni (alle 50 mm × 50 mm), tai niiden kosketus jännitteeseen osaan on epätodennäköistä, niitä ei tarvitse liittää suojajohdinpiiriin (SFS-EN 60204-1, 2006, 80).

Jos työssä käytetään myös muita piirejä, PELV-piirin jännitteiset osat on selkeästi erotettava muista jännitteisistä piireistä. Myös johtimet on erotettava muiden piirien johtimista. Pistokytkimiä ja -rasioita ei saa olla mahdollista kytkeä muiden järjestelmien kytkimiin ja rasioihin. Lisäksi PELV-jännitelähteen täytyy täyttää jokin seuraavista vaatimuksista:

- IEC 61558-1 ja IEC 61558-2-6 mukainen suojajännitemuuntaja
- suojajännitemuuntajan turvallisuustasoa vastaava virtalähde
- suuremmista jännitteistä riippumaton virtalähde (esim. akku tai generaattori).

(SFS 60204-1, 2006, 64.)

Robotin oletetun käyttöympäristön oletetaan olevan kuivissa tiloissa, ja 60 V jänniterajaa tuskin tarvitsee ylittää tämän kokoluokan robotissa. Voidaan siis todeta, että PELV-jännitteen käyttö on riittävä suojauskeino sähköiskuilta. PELV-jännitteen käyttö ei aseta sähkölaitteiden koteloinnille vaatimuksia. Suuremmille jännitteille vaatimuksena on IEC

60529 -standardin mukainen IP2X-vaatimustason koteloointi. Tämä tarkoittaa koteloa, johon on yli 12,5 mm paksuisen esineen pääsy estetty, mutta kotelossa ei ole muulle eristykselle vaatimuksia (SFS-EN 60529, 2000, 28-30). IP2X-vaatimustasoa voisi hyvinkin käyttää myös robotin kotelon suunnittelussa minimitasona.

4.5 Laitteiston suojaaminen

Standardin kappaleessa 7.2 esitetään vaatimuksia laitteen ylivirtasuojaukselle. Virtajohdojen nolla- ja maadoitettuja johtimia ei saa olla mahdollista kytkeä irti ilman, että jännitteisetkin johtimet on kytketty irti. Loput vaatimukset on rajattu työn ulkopuolelle, sillä ne ovat kohdistettu enemmänkin jännitelähteille. (SFS-EN 60204-1, 2006, 66.)

Standardin kappaleessa 8 annetaan vaatimuksia potentiaalintasaukselle, joka on tärkeä jo kosketusjännitesuojauksen toiminnalle. Tähän potentiaalintasauksen piiriin kuuluvat kaikki sähköä johtavat rakenteelliset osat, eli omassa tapauksessani robotin alumiininen runko. Jos sähkölaitteiston tai koneen rakenneosan johtokyky on pienempi, kuin jännitteelle alttiisiin osiin yhdistetyllä suojajohtimella, on asennettava lisäpotentiaalintasausjohdin. (SFS-EN ISO 60204-1, 2006, 78.) Robotin varret ovat alumiinia ja niihin on helppo tarttua kiinni, joten lisäpotentiaalintasausjohtimet tulee liittää varsiin.

Robottiin tulisi liittää kuparinen, väriltään kelta-vihreä suojajohdin, joka on poikkipinta-alaltaan vähintään yhtä suuri kuin laitteelle syöttävien kuparisten vaihejohtimien poikkipinta-ala. Potentiaalintasauspiiristä lasken muut kuin johtimen sekä varsinaiseen robotin runkoon kiinni tulevien osien kuuluvan työni rajauksen ulkopuolelle, joten en kiinnitä näihin vaatimuksiin huomiota. (SFS-EN ISO 60204-1, 2006, 78.)

Standardin kappaleessa 9 on esitelty koneiden ohjauspiireille vaatimuksia. Koneita käynnistettäessä ei saisi esiintyä ylimääräisiä odottamattomia liikkeitä (SFS-EN ISO 60204-1, 2006, 86). Tämä voidaan estää ohjelmallisesti, määrittämällä robotti pitämään sama asema kuin mikä sillä käynnistyshetkellä oli. Monet muut standardissa esitellyt ohjausjärjestelmän vaatimukset kuuluvat joko oman työni rajauksen ulkopuolelle, tai ovat jo käsitelty ensisijaisessa robottistandardissa ISO 10218.

Standardin kappaleessa 10 käsitellään käyttäjärajapintaa sekä koneeseen asennettuja ohjauslaitteita, sekä kappaleessa 11 ohjauslaitteiston sijoitusta, asennusta ja kotelointia. Mutta kuten aiemmin ilmoitettu, varsinainen lopulliseen käyttöön tuleva käyttäjärajapinta sekä ohjauslaitteet on rajattu työni ulkopuolelle.

4.6 Johdotus

Johtimille asetettuja vaatimuksia löytyy standardin kappaleesta 12. Standardin taulukon 5 mukaisesti, monijohdinkaapeleita käytettäessä pienin kaapelin poikkipinta-ala olisi päävirtapiireille $0,75 \text{ mm}^2$ ja ohjausvirtapiireille $0,5 \text{ mm}^2$. Standardin taulukosta 6 katsomalla voidaan todeta että $0,75 \text{ mm}^2$ kaapelin kuormitettavuus on alimmillaankin $8,6 \text{ A}$. Tätä suurempiin virtoihin tarvitaan paksumpia johtimia. Lisäksi jännitteen alenema ei saa ylittää normaalitilanteissa 5% nimellisjännitteestä. (SFS-EN ISO 60204-1, 2006, 122-126.) Johtimen suurin sallittu pituus voidaan laskea kaavan (5) avulla:

$$l = \frac{0,05 U A}{I \rho} \quad (5)$$

Jossa l on johtimen suurin sallittu pituus, U on käytetty jännite, A on johtimen poikkipinta-ala, I johtimen läpi kulkeva virta ja ρ johdinaineen ominaisresistanssi. (Mäkelä ym. 2010, 120.)

Oletetaan, että U on 3 V , A on $0,75 \text{ mm}^2$, I on $8,6 \text{ A}$. Kuparin ominaisresistanssi ρ on $17,2 \times 10^{-9} \Omega \text{ m}$ (Mäkelä ym. 2010, 177). Näillä arvoilla saadaan johtimen suurimmaksi pituudeksi $0,77 \text{ m}$. Tästä esimerkistä voidaan huomata, että varsinkin koko laitteen virransyötössä ja pidemmällä matkoilla johtimien poikkipinta-alan riittävyyteen tulee kiinnittää huomiota.

Kaikki johtojen liitännät olisi varmistettava irtoamiselta (SFS-EN ISO 60204-1, 2006, 132). Työssäni tämä näkyisi varsinkin ohjauspiirissä, jossa Arduino -piirikortin valmiiksi asennettu liitinryhmä jouduttaisiin irrottamaan, ja tilalle asentamaan joko ruuviliitospohjainen liitinryhmä, tai juottamaan kaapelit kiinni suoraan piirikorttiin. Johtimet on kyettävä tunnistamaan käyttämällä hyväksi joko merkintöjä, sijaintia, muotoa tai värejä. Mi-

käli johdotuksen tunnistaminen on suunniteltu värein, tulisi johtimien värien olla taulukon 1 mukaiset. Suojajohtimien on aina oltava värimerkittyjä, eikä sen värejä, keltaista, vihreää tai näiden yhdistelmää saisi käyttää missään muualla kuin suojajohtimissa. (SFS-EN ISO 60204-1, 2006, 134-136.)

TAULUKKO 1. Standardin suosittelemat värit laitteissa käytettäville eri johtimille (SFS-EN 60204-1, 2006, 136)

Suojajohdin	Keltavihreä
Nollajohdin	Sininen
AC ja DC pääpiirit	Musta
AC ohjauspiirit	Punainen
DC ohjauspiirit	Vaaleansininen
Piirit, joita ei ole erotettu suojaerotuskytkimellä	Oranssi

4.7 Merkinnät ja dokumentaatio

Standardin lopuissa kappaleissa käsitellään moottoreita, lisälaitteita ja valaistusta sekä varoituskilpiä, joista lähinnä varoituskilvet vaativat työssän hieman erityistoimia. Koteloiden tulisi selvästi osoittaa sisältävänsä sähköiskun riskin aiheuttavia laitteita, joko standardin IEC 60417-5036 mukaisella varoitusmerkillä (kuvio 3), tai muuten selkeästi ilmoittamalla. (SFS-EN ISO 60204-1, 2006, 150.)



KUVIO 3. Standardin IEC 60417-5036 (DB:200-10) mukainen sähköiskun vaaran osoittava varoitusmerkki (SFS-EN 60204-1, 2006, 150)

Robotin mukana toimitettavissa dokumenteissa tulisi ainakin ilmetä

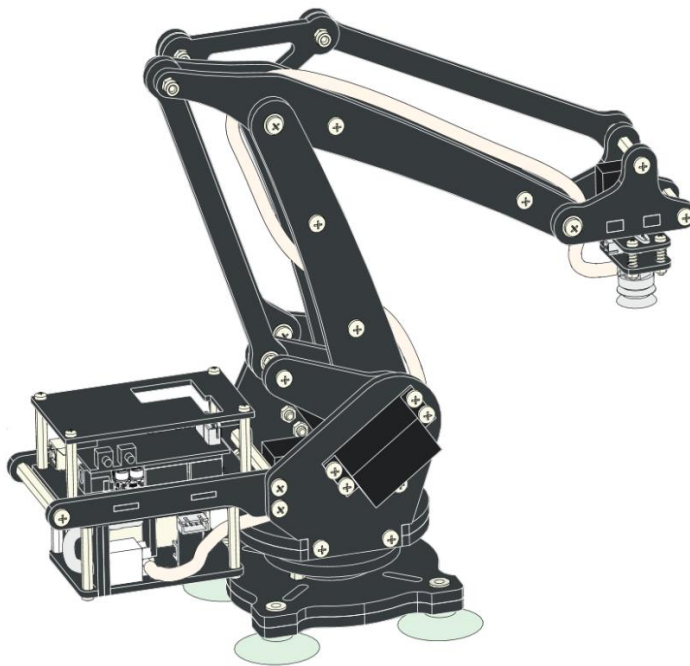
- kattava kuvaus laitteistosta ja sen asennuksesta
- sähkön syötön vaatimukset
- yleis- ja piirikaaviot
- kuvaukset ja johdotuskaaviot turvalaitteista.

Kaikkien dokumenttien tulisi noudattaa kunkin dokumenttityypin vastaavaa standardia. (SFS-EN ISO 60204-1, 2006, 152-158.)

5 MEKANIIKAN & ELEKTRONIIKAN SUUNNITTELU

Työn tavoitteena oli tuottaa TAMK:n automaatiotekniikan laboratorioon päivitetty versio uArm -robotista, joka olisi aiemmin tarkastellun standardin ISO 10218 mukainen. Työlle toivottu alhainen hinta (hintakatto 1000 €) ohjasi komponenttien valintaa standardien asettamien vaatimusten lisäksi. Työn tilaaja halusi vaihtaa aiemmat servomootorit askelmootoreihin, joten jouduin suunnittelemaan kunkin moottorin asemantunnistuksen ja akselien kiinnityksen uudelleen.

Robotin ulottuvuutta tuli kasvattaa 1,5-kertaiseksi sekä sen rakennetta tukevoittaa. Alkuperäinen uArm-robotti on suunniteltu enemmänkin harrastuskäyttöön, jonka takia kokoamisen helppoutteen on panostettu rakenteen tukevuuden kustannuksella. Tämä näkyy selvästi käsivarsissa, jotka on toteutettu kahdella toisiinsa kiinni ruuvatulla levyllä. Sivuttaissuunnassa tulevat voimat voivat siten helposti taivuttaa varsia, joka näkyy työkalupään heilumisena.



KUVIO 4. UFactory uArm -robotti (uArm assembly instructions, uFactory, vers. 1.2.3)

5.1 Varsien suunnittelu

Ratkaisuiksi rakennetta tukevoittamaan valitsin materiaalin vaihdon muovista jäykempään alumiiniin, sekä varsien profiilin muuttamisen. Föpplin kaavoilla voidaan laskea mahdollisimman tukeva varren sivuprofiilimuoto, jos poikkileikkaus koostuu useista kapeista suorakulmioista (kaava 6):

$$W_v \approx \frac{1}{3} \frac{\sum s_i t_i^3}{t_{max}} \quad (6)$$

Jossa W_v on vääntövastus, s kappaleen ulkomitat ja t seinämäpaksuus. (Salmi & Pajunen 2010, 261.)

Olettamalla seinämävahvuudeksi t 4 mm, ja ulkomitoiksi s tuntematon x ja sijoittamalla ne edellä mainittuun kaavaan (6), voidaan laskea vertailuarvoja eri profiilimuotojen vääntövastuksiksi. Saadut vertailuarvot on esitelty taulukossa 2. Koska C- ja I-palkkien vääntövastukset ovat yhtä suuret, voitaisiin varsissa käyttää kummankin välimuotoa tarvittaessa. CAD-mallinnusohjelma Autodesk Inventorin stressianalyysityökalun avulla hain varsille lopullisen muodon ja seinämien paksuuden. Lopulta päädyin valitsemaan materiaaliksi 4 mm paksuiseen alumiiniin. Kaikki robotin rakenteelliset osat laserleikattaisiin samasta materiaalista, ja varsien U/I-profiilimuodot yhdistettäisiin hitsaamalla. Osa osista, jotka eivät ole rakenteen tukevuuden kannalta oleellisia voitaisiin 3d-tulostaa ABS- tai PLA-muovista.

TAULUKKO 2. Varren profiilin vääntövastuksen vertailuarvoja

Profiilin muoto	Vääntövastus W_v
Levy	$16x / 3$
C-palkki	$16x$
I-palkki	$16x$
Neliöputki	$21,3x$

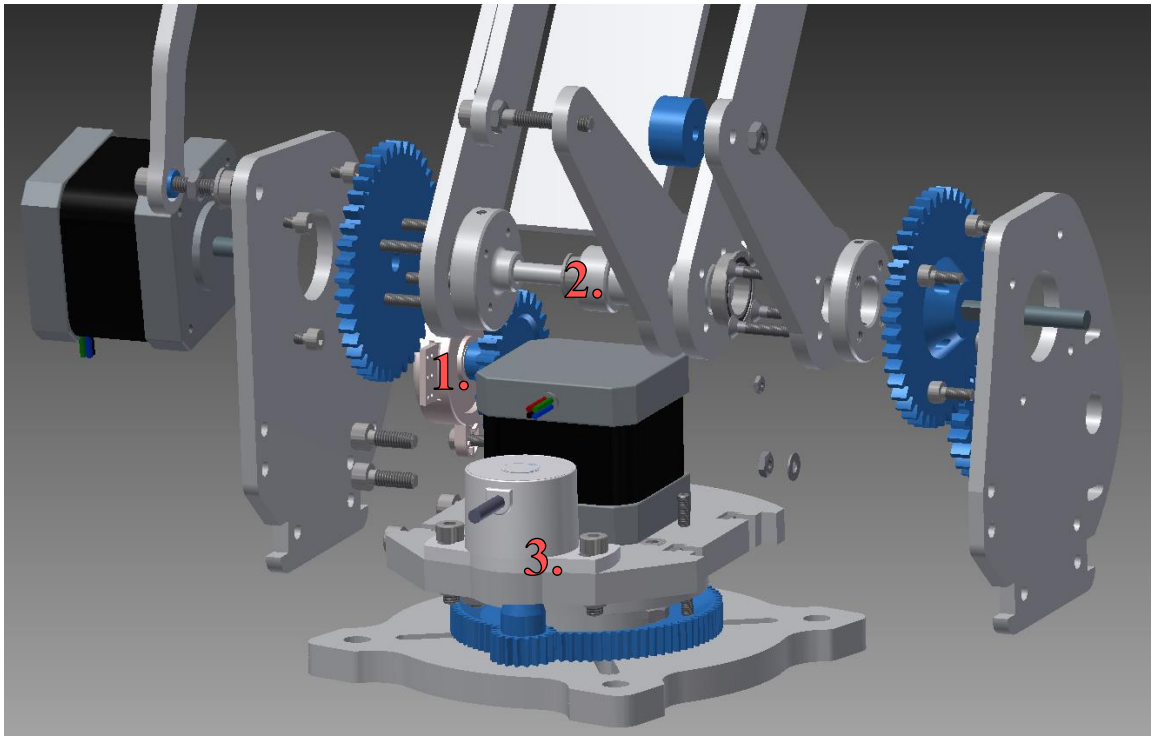
5.2 Moottoriakselien suunnittelu

Robotin moottoreiden vaihdon yhteydessä myös moottoreiden kiinnitys robottiin tuli suunnitella uudelleen. Alkuperäisessä robotissa käytettyjen servomoottoreiden akseleiden kiinnitys oli hieman heikko. NEMA-standardin mukaisten askelmoottorien käyttö, jossa on vahvempi ulospäin työntyvä akseli, parantaisi varsien tukevuutta. Moottoreiden vaihto askelmoottoreiksi vaatisi myös erillisen asemantunnistuksen suunnittelun.

Asemantunnistukseen päädyin valitsemaan Contelec WAL 305 5K -potentiometripohjaisen 5 k Ω :n kulma-anturin. Valmistaja on antanut antureille 2×10^6 jakson käyttöiän, joka on robotin suunniteltuun käyttöikään nähden aivan riittävä. Anturilla on 340 asteen sähköinen kulma. (Contelec, 2005.) Suurin tekijä kyseisen anturin valitsemiseen oli edullinen hinta. Anturit asennettaisiin moottorin vierelle, joka hammasrattaiston kautta välittäisi kulman anturille (kuva 1, 1). Olettamalla anturin vastustavan liikettä vain hieman, voidaan olettaa myös hammaspyörästäön kautta kulkevien voimien olevan niin vähäisiä, että materiaaliksi riittäisi 3d-tulostettu ABS- tai PLA-muovi. Hammaspyörästäön suunniteltiin 2:1 -suhteelle, jotta varsien n. 120° liikkuma-alue voidaan hyödyntää koko anturin tunnistusalueella.

Hammaspyörärien aiheuttaman vaaran vakavuus voidaan laskea sivulla 9 esitetyllä kaavalla 1. Jos moottorin vääntömomentti on 0,65 Nm, ja ajavan pyörän säde on n. 27 mm, voidaan laskea pyörästäön väliin joutuvaan esineeseen kohdistuvan 24 N puristuksen. Jos oletetaan esim. sormen joutuessa rattaiston väliin kontaktialueen olevan 35 mm², kohdistuisi sormeen 0,68 MPa paine. Ihmisen ihon rikkomiseen tarvitaan 0,69 MPa paine (Martin & Kueh, 2009), joten hammaspyörästäön voidaan todeta aiheuttavan lievän riskin käyttäjälle. Hammaspyörästäöstä ei voida luontaisesti turvallisilla suunnittelutoimenpiteillä luopua, joten pyörästäö täytyy eristää käyttäjästä kiinteällä suojuksella.

Moottorin akselit ovat yhdistetty toisiinsa laakeroidulla yhteydellä (kuva 1, 2). Tämän käytännön tarkoituksena on parantaa tukevuutta jakamalla varsien painoa molemmille akseleille. Akseliratkaisujen toteuttaminen vaati koneistettujen osien käyttöä, joka myös hieman nostaa valmistuskustannuksia

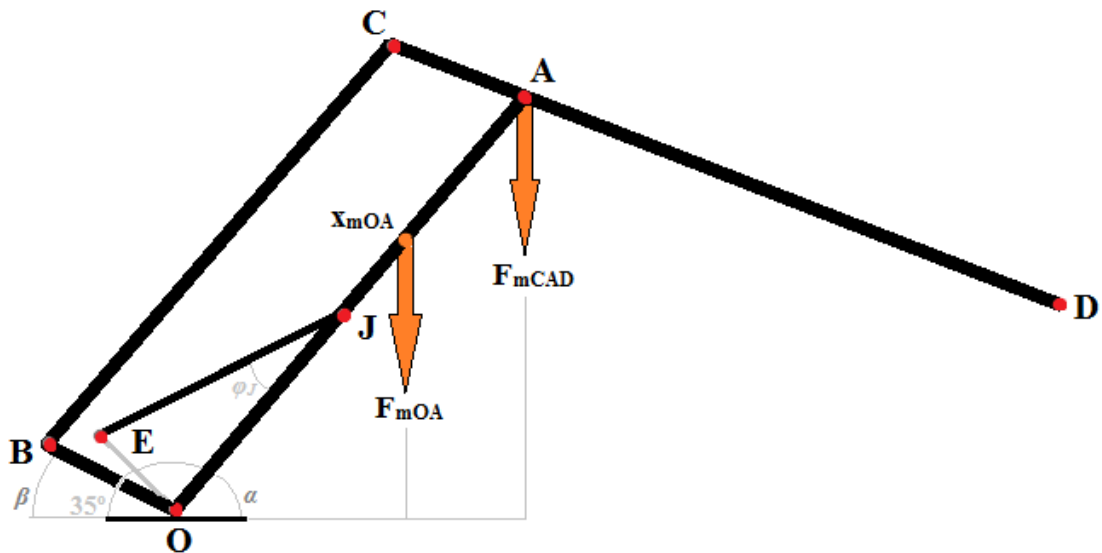


KUVA 1. Moottoriakselien suunnittelua Autodesk Inventor -ohjelmassa

Alun perin suunnittelin toetuttavani Z-akselin asemantunnistuksen toteutettavaksi Contelec Vert-X 28 -kulma-anturilla (kuva 1, 3). Anturi on akselinsa ympäri pyörivä, 360° kulman tunnistava magneettipohjainen anturi. Moottorin akselista kulmanvälitys toteutettaisiin 3d-tulostetulla hammaspyörästöllä, jossa suurempi pyörä on kiinni alustassa. Valitsemani anturin toimituksessa ilmaantui kuitenkin huomattavia toimitusvaikeuksia robotin runko-osien tilauksen jälkeen, joten anturointia ei voitu toteuttaa. Z-akselia kiertävän moottorin asemantunnistus voitaisiin kuitenkin toteuttaa laskennallisesti moottorin askeleita laskemalla. Ilman ulkoista anturointia moottorin virheaskeleet jäävät huomaamatta, joten liikenopeutta joudutaan rajoittamaan tiukasti.

5.3 Varsien tuottamien voimien kevennys

Varsissa käytetty 4 mm alumiinilevy on enemmän kuin tarpeeksi jykevää estääkseen varsien taipuilua, mutta tästä seuraa myös painon kasvua – varret *OA* ja *CAD* (kuvio 5) painavat kumpikin n. 0,2 kg. Tätä painoa voidaan kompensoida joko tehokkaammilla moottoreilla tai mekaanisesti keventämällä moottoreiden taakkaa.



KUVIO 5. Robotin nivelet sekä varsien painosta aiheutuvat voimat

Vartta OA liikuttavalle moottorille kerääntyy suurempi massa liikutettavaksi: varren CAD massa kokonaisuudessaan sekä osa varresta OA . Kevennyksen toteutin lisäämällä jousen pisteiden E ja J välille. Moottorille kohdistuva momentti on suurimmillaan OA :n ollessa vaakatasossa. Jousen suurimmaksi venymäksi voidaan siten laskea pisteiden E ja J välinen etäisyys, kun OA on vaakatasossa. Kun tiedetään varsien painosta pisteessä O vaikuttava momentti (kaava 7), voidaan laskea myös jousen vaatima voima F_{JE} näiden varsien voimien kumoamiseksi (kaava 10).

$$M_{OA} = (m_{CAD} x_{OA} + m_{OA} x_{mOA}) g \cos(\alpha) \quad (7)$$

Jossa M_{OA} on pisteessä O vaikuttava varsien painosta johtuva momentti, α on varren OA kulma vaakatasoon nähden, m_{CAD} on varren CAD massa (0,23 kg), x_{OA} on varren OA pituus (222 mm), m_{OA} on varren OA massa (0,22 kg) ja x_{mOA} on varren OA massakeskipisteen etäisyys pisteestä O (102 mm). g on gravitaatiovakio 9.81 m/s.

Jousen venymä OA :n ja vaakatason kulman α suhteen voidaan laskea kosinilauseen avulla (kaava 8).

$$x_{EJ} = \sqrt{-2 \cos(180^\circ - 35^\circ - \alpha) x_{OJ} \times 42\text{mm} + (42\text{mm})^2 + x_{OJ}^2} \quad (8)$$

Jossa x_{EJ} on jousen venymä ja x_{OJ} on jousen kiinnityspisteen J etäisyys O :sta (100 mm). Samoin voidaan kosinilauseella laskea pisteiden EJO muodostama kulma (kaava 9), ja edelleen voima F_{JE} , joka jousen täytyisi tuottaa kumotakseen varsien painon (kaava 10).

$$\varphi_J = \cos^{-1} \left(\frac{x_{OJ}^2 + x_{EJ}^2 - (42\text{mm})^2}{2 x_{OJ} x_{EJ}} \right) \quad (9)$$

$$F_{JE} = \frac{M_{OA}}{\sin(\varphi_J) x_{OJ}} \quad (10)$$

Jossa φ_J on pisteiden EJO muodostama kulma, F_{JE} on jousen tuottama voima ja 42 mm on pisteiden O ja E etäisyys. Antamalla kulman α arvoksi 0° , jolloin momentti M_{OA} on suurimmillaan, saadaan jousen voimaksi F_{JE} laskettua 40,5 N. Robotin nostokykyä voidaan tästä vielä halutessa korottaa kasvattamalla jousen voimaa, kunhan tästä syntyvä ylimitoitettun jousen voima ääriasennossa on alle moottorin tuottaman momentin suuruinen.

Lisäksi voidaan parantaa varteen OB liitetyn moottorin nostokykyä lisäämällä pisteeseen B vastapaino. Painon suuruus voidaan laskea voiman tuottaman momentin kaavaa johtamalla (kaava 11).

$$m_{vB} = \frac{90\text{mm} \times \cos(\beta) m_{CAD} g}{81\text{mm} \times \cos(\beta) g} = \frac{10 \times m_{CAD}}{9} \quad (11)$$

Jossa m_{vB} on pisteeseen B liitettävä paino, β on varren CAD kulma vaakatasoon nähden, m_{CAD} on varren CAD massa (0,226 kg) ja g putoamiskiihtyvyys. 90 mm on varren CAD massakeskipisteen etäisyys pisteestä A , ja 81 mm on varsien CA ja OA pituus. Vastapainon suuruudeksi saadaan näin 0,25 kg.

5.4 Ohjausjärjestelmä

Askelmoottorien ohjaukseen tarvitaan erilliset askelmoottoriohjaimet. Valitsemani Pololu A4988 -askelmoottoriohjan kykenee 1/16-mikroaskeltarkkuuteen, ja kestää jäähdy-

tettynä virtaa 2 A kutakin moottorin vaihetta kohti. Ohjaimessa on säädettävä virranrajoitus, jolla voidaan säätää kullekin moottorille päästettävä maksimivirta. Näin moottoreita voidaan ajaa myös nimellisjännitettä suuremmalla jännitteellä vahingoittamatta moottoreita. (Pololu, 2016).

Varsinaiseksi ohjainkortiksi valitsin Arduino Mega 2560 -mikro-ohjainpiirin. Megan hyväksymä jännite on 7 - 12 V. Arduino kykenee syöttämään 5 V jännitettä 200 mA virralla, ja kykenee lukemaan analogiasignaalia 0 - 5 V välillä joten potentiometriantureita voidaan käyttää suoraan Arduinolta. (Arduino, 2016.)

Moottorinohjainten liittämiseksi arduinoon valitsin Protoneer.co.nz:n suunnitteleman Arduino CNC Shieldin. Arduino Shield on Arduino -kehitysalustalle tarkoitettu laajennusalausta, jonka voi liittää suoraan piirilevyn päälle. CNC Shield on siis lähinnä Arduinoon liitettävä piirilevy, jossa on A4988:n vaatimat elektroniset komponentit valmiiksi liitettyinä.

5.5 Moottorit

Moottorit ovat ulkomitoiltaan NEMA17 -standardin mukaisia, bipolaarisia hybridiaskelmoottoreita. Robotin käsivarsia liikuttavat moottorit kykenevät tuottamaan 0,65 Nm:n pitomomentin ja ovat nimellisvirraltaan 1,5 A. Nimellisjännite on 4 V, mutta kuten aiemmin todettu, A4988:n virranrajoitustoiminnon avulla voidaan käyttää suurempia jännitteitä. Moottoreiden askelkulma on $1,8^\circ$. Kyseiset moottorit ovat hieman alitehoisia suhteessa robotin käsivarsien pituuteen. Alennusvaihteen liittäminen parantaisi robotin nostokykyä ja liikkeen tarkkuutta. Suunnitteluprosessissani olleen laskentavirheen vuoksi robotti on suunniteltu pienempitehoisille, yleisesti akselinhalkaisijaltaan 5 mm moottoreille. Tehdasvalmisteiset alennusvaihteelliset moottorit käyttävät yleisesti 8 mm akselia, joten joudun käyttämään työssä muuhun rakenteeseen nähden hieman alitehoisia moottoreita.

Suurin moottorin nopeus voidaan laskea seuraavan kaavan (12) mukaan.

$$\omega_M = \frac{U}{2 L I_{max} spr} \quad (12)$$

Jossa ω_M on moottorin nopeus, U on käytetty jännite, I_{max} on suurin käytetty virta, L askelmoottorin induktanssi ja spr moottorin askeleet kierrosta kohti. (Allaboutcircuits.com, 2016).

0,65 Nm:n moottoreiden induktanssiksi on valmistajan toimesta ilmoitettu 6,5 mH. Jos käytetään 12 V jännitettä, saadaan kulmanopeudeksi $\omega_{M0,65}$ 3.08 1/s. Robotin varsien suurimmat nopeudet, ω_{240} on 1,04 1/s ja ω_{222} on 1,13 1/s, ovat laskettu raportin luvussa 2.5. Moottoreiden kierrosnopeutta tulisi siis ohjelmallisesti rajoittaa, ettei nopeus 250 mm/s ylittyisi.

0,65 Nm:n moottoreita ja kappaleessa 5.3 esiteltyä kevennysjousta käytettäessä voidaan laskea robotin kykenevän nostamaan suurimmillaan 0,29 kg:n painon varrella OA . Varsi CAD kykenee taas nostamaan 0,19 kg ilman vastapainoa, ja 0,27 kg vastapainon kanssa. Robotin nostokyky ääriasennossa määräytyy näistä pienemmän mukaan, eli 0,19 kg.

Z-akselia kiertävää pääakselia liikuttamaan olin suunnitellut käytettäväksi 0,42 Nm:n ja 1,68 A:n NEMA17-askelmoottoria. Moottorissa olisi ollut $0,9^\circ$ askelkulma, jotta tarkkuutta suurilla ulottuvuuksilla olisi saatu parannettua. Moottori ei kuitenkaan mahtunut paikalleen alumiinileikkausosissa olleen mittavirheen vuoksi. Paikalle sain mahtumaan kuitenkin pienemmän, 0,27 Nm:n ja $1,8^\circ$ askelkulman moottorin. Korvaava moottori jää suoritusarvoiltaan jälkeen suunnitellusta selvästi. Alla olevissa laskuissa olen laskenut molemmille moottoreille arvoja.

0,42 Nm:n moottorin induktanssiksi on ilmoitettu 4,3 mH. Käyttämällä taas 12 V jännitettä, voidaan laskea kulmanopeudeksi $\omega_{M0,42}$ on 2.08 1/s. 0,27 Nm:n moottorin induktanssi on 34 mH, josta saadaan $\omega_{M0,27}$ on 2,21 1/s. Sivun 11 kaavaa (2) johtamalla voidaan laskea, että alle n. 133 mm etäisyydellä työkalupään liike ylittää 250 mm/s, mikäli liikettä ei rajoiteta.

Kun käytetty moottori on tiedossa, voidaan sivun 13 kaavalla (3) laskea myös kykeneekö moottori pysäyttämään liikkeen 250 mm/s nopeudella.

$$M_z = \frac{m \Delta v r}{\Delta t} = \frac{0,8kg \times 250 \text{ mm/s} \times 0,4m}{0,5s} = 0,16Nm \quad (13)$$

Kumpikin moottori olisi siis riittävä, mikäli varsien ja liikuteltavan painon summa on alle 0,8 kg. 0,27 Nm:n moottoria käytettäessä voidaan päästä 0,3 s, ja 0,42 Nm:n moottorilla n. 0,2 s pysäytysaikaan.

5.6 Johdotus ja liitännät

Koska moottoreita voidaan ohjata pienimmillään 4 V, ja 2,8 V, ja Arduinoa 7 - 12 V tasajännitteillä, voidaan koko robotin sähkönsyöttö hoitaa helposti samalla jännitesyötöllä. A4988:n suositeltu moottorin jännitealue on 8 - 35 V. Näin 12 V PELV-jännitettä voidaan käyttää koko robotin ohjaamiseen. Myös sähkönsyötön liitännät ovat näin yksinkertaisempia.

Johtimien suurin sallittu pituus suhteessa sen poikkipinta-alaan voidaan laskea tämän raportin sivulla 30 olleen kaavan (5) avulla. Jos järjestelmän koko virrankulutukseksi arvioidaan 10 A ja käytetään 12 V jännitettä, voidaan laskea minimivaatimuksia johtimien poikkipinta-aloille (taulukko 3).

TAULUKKO 3. Johtimien laskettuja maksimipituuksia kullekin johtimen poikkipinta- alalle

Poikkipinta-ala, mm ²	Johtimen suurin pituus, m
0,75	2,62
1	3,49
1,5	5.23
2,5	8.72
4	13.95
6	20.93

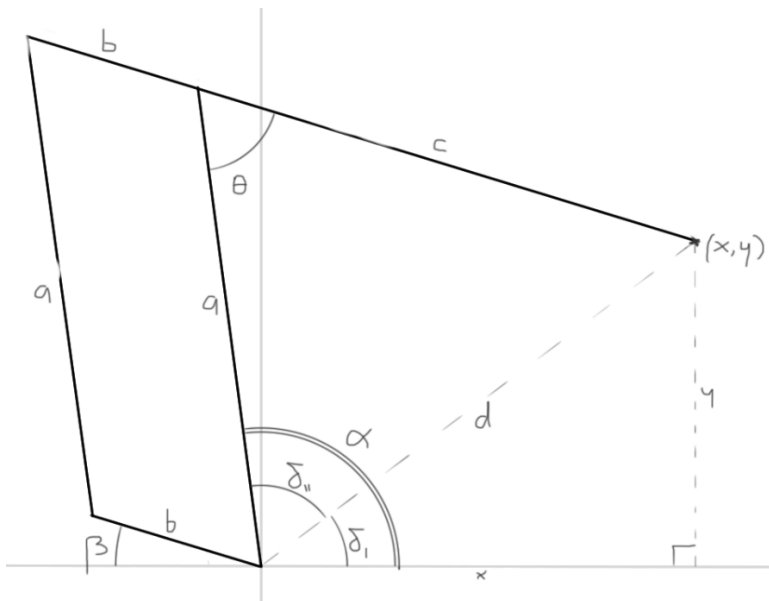
6 OHJELMOINTI

Työn rajauksen mukaisesti suunnittelin robotille vain yksinkertaisen ohjausjärjestelmän. Robottia liikutetaan x,y -koordinaateilla, jotka ohjaavat työkalupään etäisyyttä korista (x) ja korkeutta (y). Z-akselin liike on koordinaateista erillinen, ja sitä ohjataan suoraan moottorin kiertokulmaa muuttamalla. Tämä ohjaus on tarkoitettu vain väliaikaiseksi, eikä siinä ole lainkaan huomioitu mitään standardien sille asettamia vaatimuksia.

Seuraavissa kappaleissa esitellään kuinka x,y -koordinaatiston arvot voidaan laskea moottorin varsien kulmiksi. Lisäksi esitellään kuinka lasketut moottorikulmat sekä antureiden kulmatiedot voidaan säätää vastaamaan toisiaan.

6.1 Moottorikulmien laskenta

Moottoreiden kiertymäkulmat suhteessa työkalupisteen koordinaatistoon voidaan laskea perusgeometriaa käyttäen. Alussa oletetaan tiedossa olevan vain käyttäjän antamat päätepisteen koordinaatit x ja y , sekä varsien mitat a , b ja c . Kulmat α ja β kuvaavat moottoreiden kulmia.



KUVIO 6. Vapaakappalekuva moottorikulmien laskemisessa käytettävistä mitoista

Varsinaisessa ohjelmassa koordinaatiston arvot on rajoitettava alueelle, jolla alla esitetyt kaavat pitävät paikkansa. Esimerkiksi rajoittamalla janan d pituus pienemmäksi kuin janojen a ja c summa, kaavojen toimivuus voidaan varmistaa. Ohjaava logiikka ei pysty laskemaan tällaisessa ylitystilanteessa laskemaan moottorikulmia, joka voi johtaa robotin arvaamattomaan käyttäytymiseen. Lisäksi rajoitukset täytyy tehdä niille alueille, joita ei fyysisesti voida tavoittaa, esim. liian lähelle koordinaatiston origoa liikkuminen.

6.1.1 Kulma α

Kulma α saadaan laskemalla yhteen kulmat δ' sekä δ'' . Janat x , y ja d muodostavat suorakulmisen kolmion, joten kulma δ' saadaan selville arkustangentin avulla.

$$\delta' = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (14)$$

Samasta suorakulmaisesta kolmiosta saadaan selville janan d pituus pythagoraan lauseen avulla.

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (15)$$

Janat d , a ja c muodostavat kolmion, joten kulma δ'' saadaan selville kosinilauseella. (Mäkelä ym. 2010, 18.)

$$\delta'' = \cos^{-1}\left(\frac{a^2 + d^2 - c^2}{2 a d}\right) \quad (16)$$

Näin ollen saadaan seuraavanlainen kaava, joka antaa α -kulman suoraan (x,y) -koordinaateista.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{a^2 + d^2 - c^2}{2 a d}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (17)$$

6.1.2 Kulma β

Kulma β saadaan selville kulmien θ sekä α avulla.

$$\beta = 180^\circ - \alpha - \theta \quad (18)$$

Kun kulma δ'' tiedetään, kulma θ saadaan selville sinilauseen avulla.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{d \sin(\delta'')}{c}\right) \quad (19)$$

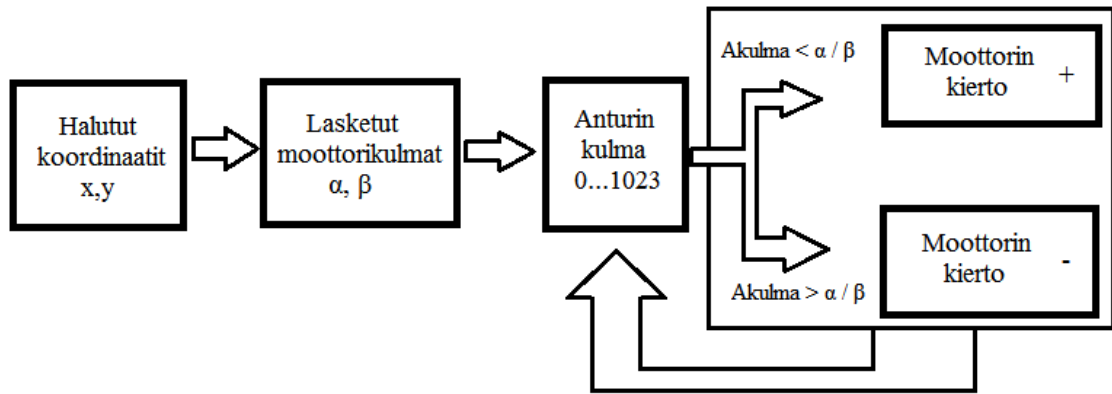
Sijoittamalla kaavat 17 ja 19 kaavaan 18, saadaan seuraavanlainen yhtälö kulma β :lle.

$$\beta = 180^\circ - \left(\cos^{-1}\left(\frac{a^2 + d^2 - c^2}{2 a d}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \right) - \sin^{-1}\left(\frac{d \sin(\delta'')}{c}\right) \quad (20)$$

Koska janat a , b , a ja b muodostavat suunnikkaan, on alhaalla olevan vivun b kulma koordinaatistoon nähden sama kuin ylhäällä olevan varren BC kulma. (Mäkelä ym. 2010, 17.)

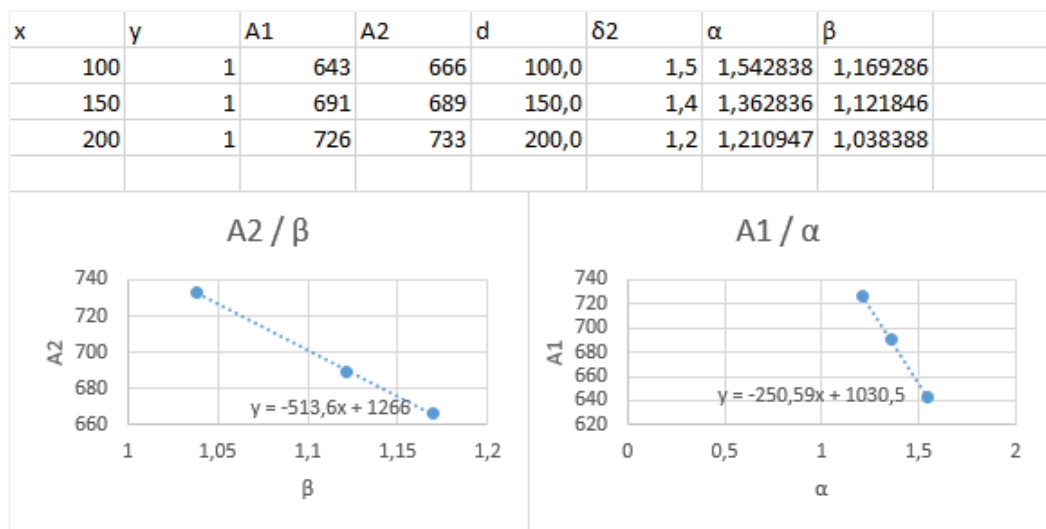
6.2 Antureiden säätö

Kuten kappaleessa 6.1 on esitetty, voidaan moottoreiden kulmat laskea käyttäjän antamista x, y -koordinaateista. Varsinainen ohjelman käymä prosessi fyysisten moottorikulmien hakemiseksi on esitetty kuviossa 7. Lasketut moottorikulmat käännetään arvoihin 0 ... 1023, joita sitten vertaillaan antureiden mittaamiin saman alueen numeroarvoihin.



KUVIO 7. Moottorikulmien haun periaatekaavio

Moottorikulmat α ja β muunnetaan antureiden kulmia vastaaviksi numeroarvoiksi mittamalla saadun yhtälön avulla. Yhtälö voidaan laskea vertailemalla antureiden antamaa numeroarvoa fyysisen robotin tartuntapään etäisyyteen moottorinakseleiden keskipisteestä. Mittaamalla usealta eri etäisyydeltä antureiden arvot, ja piirtämällä näistä kuvaaja, saadaan kuvaajan trendiviivan kulmakertoimesta ensimmäisen asteen yhtälö. Esimerkkinä kuviossa 8 kulmaa β mittaavalle anturille A2 on laskettu yhtälö $y = -513,6x + 1266$. Sijoittamalla yhtälöön laskettu β :n arvo, saadaan anturin A2 arvo, joka vastaa fyysistä anturin mittatulosta vastaavilla x, y -koordinaateilla.



KUVIO 8. Microsoft Excelissä lasketut, robotin koordinaatiston säädössä käytetyt kaavat

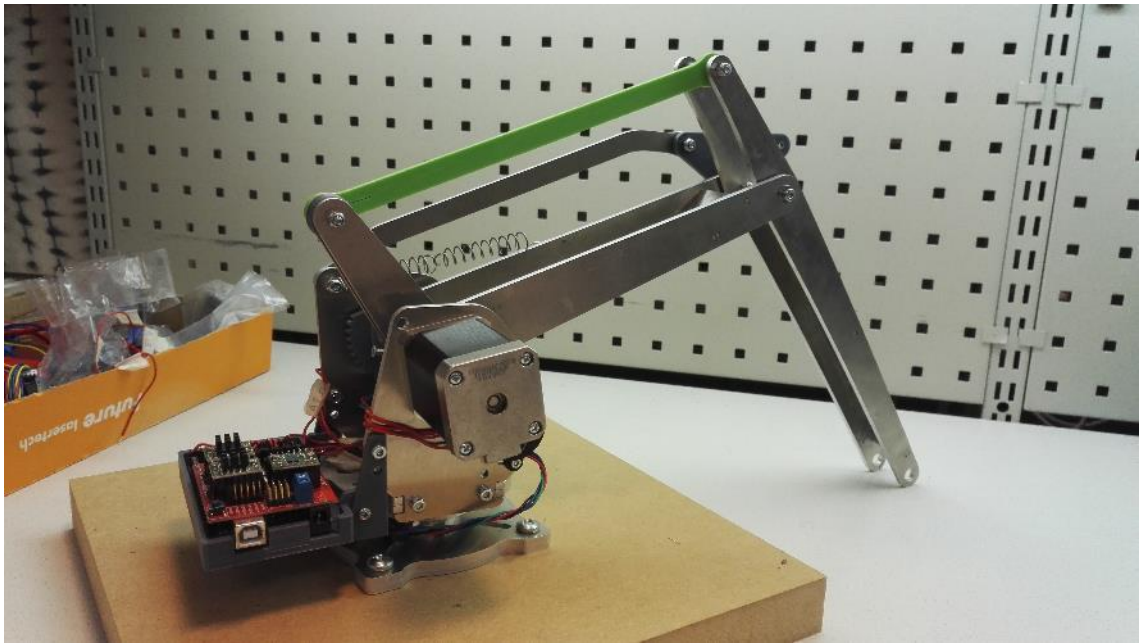
7 POHDINTA

Raportin alkuosassa käytiin läpi standardien ISO 10218-1, ISO 12100 ja IEC 60204-1 vaatimuksia robottien suunnittelussa. Standardeista on poimittu työn rajauksen puitteissa siihen vaikuttavat osat, ja tiivistetty ne raporttiin. Raportin loppuosissa käytiin läpi itse valittuja suunnitteluratkaisuja, sekä standardien vaatimuksia tarkemmin läpi.

Lopputuloksena suunniteltuun robottiin olen tietyiltä osin tyytyväinen. Robotti on suunniteltu standardien määrittelemiä vaatimuksia noudattaen. Standardinmukaisten virtalähteen, ohjaimen ja muun asennusympäristön myötä koko robotti olisi täysin ISO 10218 - yhteensopiva. Robotin ulottumaa on kasvatettu 1,5-kertaiseksi, ja alkuperäisen uArmin työkalupään vakausongelma saatiin poistettua. Koko robotin suorituskyvyn pullonkaulaksi jäivät hieman alitehoiset moottorit, muu rakenne kestäisi hyvin painavampienkin kappaleiden käsittämisen. Varsia ohjaavien moottoreiden kulmantunnistus on riittävän onnistunut, mutta pääakselille suunnitellun anturin puute aiheuttaa suuria rajoituksia z-akselin liikkeen nopeudelle.

Ohjausjärjestelmä ohjaimineen on, kuten tarkoitettukin, suunniteltu vain väliaikaiseksi, muiden toimintojen toimivuuden toteamiseen. Loogisin työn jatkokehitysehdotus onkin kunnollisen ohjausjärjestelmän kehittäminen. Myös pääakselin anturointi tulisi lisätä, jotta saavutettaisiin vakaampi asemantunnistus. Mikäli robotin nostokykyä halutaan korottaa, moottorit tulisi vaihtaa tehokkaampiin, mutta vaihto todennäköisesti edellyttäisi myös pieniä muutostöitä akseleiden kiinnityksessä.

Aikarajoitteiden puitteissa en ehtinyt rakentamaan itse fyysistä robottia täysin standardia vastaavaksi; mainitun z-akselin anturoinnin puutteen lisäksi osaa käytetyistä sähköliitännöistä ei ole liitetty tarpeeksi tukevasti. Kevennysjousi on itsetehty kahdesta erillisestä jousesta, jonka tuottamasta voimasta ei ole täyttä varmuutta.



KUVA 2. Vielä viimeistelemätön, mutta muuten toimintakykyinen robotti

Robotin suorituskyvyn arvot, ja sen virransyötölle asettamat vaatimukset ovat nykyisellä kokoonpanolla seuraavanlaiset;

- Robotin käyttämä jännite on 12 V ja virrankulutuksen oletettu huippuarvo n. 5 A. 12 V jännitteen ylittäminen voi aiheuttaa Arduinon rikkoontumisen.
- Virtalähteen tulee olla PELV-virtalähde.
- Robottiin kiinnitettävät ulkoiset johtimet ovat virransyötön positiivinen ja nollajohdin, sekä runkoon kiinnitettävä suojamaajohdin.
- Robotin nostokyky on 0,19 kg työkalupään ollessa 450 mm etäisyydellä moottorin akselistosta.
- Ilman moottoreiden kulmanopeuden ohjelmallista rajoitusta liikenopeudet ylittävät alennetun nopeuden rajan (250 mm/s).

LÄHTEET

- Adept Technology 2007. Six-Axis Robot Configuration Singularities [PDF]. <http://www1.adept.com/main/KE/DATA/Procedures/Singularity/Singularity.pdf>
- Allegro Microsystems LLC. 2016. Allegro A4988 -datalehti [PDF]. <http://www.allegromicro.com/~media/files/datasheets/a4988-datasheet.ashx>
- Arduino. 2016. Arduino language reference – AnalogRead(). Luettu 13.09.2016. <https://www.arduino.cc/en/Reference/AnalogRead>
- Arduino. 2016. Arduino Mega -tuote-esittely. Luettu 12.12.2016. <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>
- Atmel Corporation. 2014. Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V - datalehti [PDF]. http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf
- Contelec AG. 2005. WAL 305 –datalehti [PDF]. http://www.contelec.ch/fileadmin/user_upload/contelec/Downloads/Datenblaetter/Englisch/Potentiometer_Leitplattik/WAL305_e.pdf
- EETech Media, Allaboutcircuits.com. Askelmoottoreiden ominaisuuksien laskentakaavoja. Luettu 25.09.2016. <http://www.allaboutcircuits.com/tools/stepper-motor-calculator/>
- JB Titus. 2014. Machine Safety: Which takes precedence, a Type-B or a Type-C safety standard? Luettu 27.11.2016. <http://www.controleng.com/blogs/machine-safety/blog/machine-safety-which-takes-precedence-a-type-b-or-a-type-c-safety-standard/d37b985bc1b06792871e8972bd877cb3.html>
- Martin, C. & Kukup, N. 2009. Updates from the WorkSafeBC. Luettu 8.11.2016. <http://www.bcmj.org/worksafebc/updates-worksafebc>
- Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomela, S. & Öistämö, J. 2010. Tekniikan kaavasto. 9. painos. Tampere: Tammertekniikka.
- Pololu Corporation. A4988 -askelmoottoriohjaimen tuoteseloste. Luettu 25.09.2016. <https://www.pololu.com/product/1182>
- Salmi, T. 2005. Statiikka. 3. painos. Tampere: Pressus Oy.
- Salmi, T. & Pajunen, S. 2010. Lujuusoppi. Tampere: Pressus Oy.
- Salmi, T. & Virtanen, S. 2006. Dynamiikka. Tampere: Pressus Oy.
- Suomen Standardoimisliitto SFS. 2000. SFS-EN 60529 + A1. Sähkölaitteiden koteloitiluokat (IP-koodi). 2. painos.
- Suomen Standardoimisliitto SFS. 2006. SFS-EN 60204-1. Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: yleiset vaatimukset. 3. painos.

Suomen Standardoimisliitto SFS. 2010. SFS-EN ISO 12100. Koneturvallisuus. Yleiset suunnitteluperiaatteet, riskin arviointi ja riskin pienentäminen. 3. painos.

Suomen Standardoimisliitto SFS. 2011. SFS-EN ISO 10218-1. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: teollisuusrobotit. 3. painos.

Suomen Standardoimisliitto SFS. 2015. SFS-EN ISO 13849-1. Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Osa 1: Yleiset suunnitteluperiaatteet.