

Matti Hoikkala

Teollisuusrobotin käyttöönotto

Insinööritö 22.8.2010

Ohjaaja: yliopettaja Jouni Jokelainen

Ohjaava opettaja: yliopettaja Jouni Jokelainen

Tekijä Otsikko	Matti Hoikkala Teollisuusrobotin käyttöönotto
Sivumäärä Aika	38 sivua 22.8.2010
Koulutusohjelma	automaatiotekniikka
Tutkinto	insinööri (AMK)
Ohjaaja Ohjaava opettaja	yliopettaja Jouni Jokelainen yliopettaja Jouni Jokelainen
<p>Teollisuusroboteista on tullut tärkeä osa yrityksen toimintaa. Ilman niitä yrityksen kilpailukyky ei välttämättä olisi riittävä kovassa kansainvälisessä kilpailussa. Tämän takia tuotanto on yleensä pitkälle automatisoitu. Ihmisellä on kuitenkin edelleen tärkeä osa robottien käytössä. Ihminen suunnittelee ja kokoaa järjestelmät, tekee tarvittavat ohjelmat ja pitää järjestelmän toimintakunnossa.</p> <p>Tässä työssä keskitytään käsivarsityyppisen teollisuusrobotin käyttöönottoon liittyviin asioihin. Pääpaino oli robottijärjestelmän turvallisuudessa, mutta työssä tarkastellaan myös robotin ohjelmointiin ja muuhun käyttöön liittyviä asioita. Robotti sijaitsee Metropolia Ammattikorkeakoulun automaatiotekniikan laboratoriossa.</p> <p>Robottijärjestelmälle tehtiin riskien kartoitus, jossa selvitettiin robotin käyttöön liittyvät ennakoitavissa olevat vaaratilanteet. Myös kunkin riskin vakavuus arvioitiin sen toteutumisesta seuraavien vahinkojen ja toteutumisen todennäköisyyden mukaan. Tämän kartoituksen perusteella tehtiin suunnitelma suojaustoimenpiteistä, joilla havaitut riskit saadaan poistettua kokonaan tai niiden vakavuus saadaan pienennettyä siedettävälle tasolle. Tämän yhteydessä syntyi myös suunnitelma robotin alustasta ja järjestelmän layoutista eli robotin ja sen oheislaitteiden sijoittelusta.</p> <p>Työssä tehtiin myös suunnitelma robotilla tulevaisuudessa tehtävistä laboratoriotöistä. Laboratoriotöiden tavoitteena on, että opiskelija saa näkemyksen robottien yleisistä ominaisuuksista, ohjelmoinnista ja erilaisten robottisovellusten vaatimuksista. Tärkeimmät asiat ovat oikeanlaisen ohjelmointitekniikan löytäminen ja käyttöliittymän sujuvan käyttö. Ohjelmoinnin myötä tulee myös usein tarpeelliseksi robottijärjestelmän säätö ja asetusten vaihtaminen. Syntyneiden suunnitelmien perusteella laadittiin laboratoriotöihin työohjeet, joita käytetään tulevilla robotiikan kursseilla Metropolia Ammattikorkeakoulussa.</p>	
Hakusanat	robotiikka, koneturvallisuus, turvalaitetekniikka

Author Title	Matti Hoikkala Commissioning of an industrial robot
Number of Pages Date	38 22 August 2010
Degree Programme	Automation technology
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor Supervisor	Jouni Jokelainen, Principal Lecturer Jouni Jokelainen, Principal Lecturer
<p>Industrial robots have become an important part of daily operation to many businesses. Without the use of automatic machines, a business might not be able to meet the tough requirements of today's international market competition. Thus, many production-related tasks are nowadays performed by a machine rather than a human. Humans still, however, have an important role. Skilled personnel are still needed in the design, assembly, programming and maintenance of the machine.</p> <p>This thesis focuses on matters related to the commissioning of an industrial robot. The main emphasis is on the safety aspects, but programming and other matters related to the use of the robot are also considered. The robot is located in automation laboratory of Metropolia University of Applied Sciences.</p> <p>A survey of possible safety risks concerning the use of the robot was conducted. The severity of the found risks was then assessed based on the worst possible effects of the risk and its probability. Based on this survey, a plan of safety measures was made to prevent the risks from happening or to remove them entirely. In addition, a plan of the system layout representing the location of the robot and its supplementary equipment was made. Also a model of the platform where the robot is to be mounted was sketched.</p> <p>A plan of future laboratory exercises was also made. The objective of the exercises is to give the student a sense of the general features of industrial robots and their programming as well as the requirements of different robot applications. The most important things are learning of the programming technique and fluent use of the robot's operating system. Programming also usually requires making different adjustments to the robot. Based on this plan, work instructions for each exercise were drafted. These instructions will be used in future robotics courses.</p>	
Keywords	robotics, machine safety, safety devices

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

1. Johdanto	5
1.1 Työn tarkoitus ja tavoitteet.....	5
1.2 Robottien turvallisuutta koskevat säädökset	6
1.3 Riskien tunnistaminen ja arviointi	7
1.4 Riskien poistaminen.....	7
2. Robottijärjestelmän kuvaus.....	8
2.1 Robotin mekaaninen rakenne.....	8
2.2 Robotin ohjausjärjestelmä.....	9
2.3 Robotin ohjelmointi	10
2.4 Robotin koordinaatistot.....	12
2.5 Imukuppitarttuja.....	13
3. Turvallisuusriskit ja vaaratekijät	14
3.1 Robotin voimakkuus	14
3.2 Robotin liikealue	15
3.3 Robotin pysähtyminen	15
3.3.1 Tuotantopysäytys	16
3.3.2 Turvapysäytys	16
3.3.3 Hätäpysäytys	16
4. Yleistä robotin turvallisuussuunnittelusta.....	16
4.1 Aitaratkaisut	17
4.2 Turva-anturit	19
4.2.1 Tuntomatot.....	19
4.2.2 Mekaaniset rajakytkimet.....	20
4.2.3 Magneettiset rajakytkimet.....	21
4.2.4 Optiset anturit.....	21
4.2.5 Ultraäänianturit	22
4.2.6 Mikroaltoaanturit.....	22
4.2.7 Infrapuna-anturit	23

4.2.8 Laserskannerit	23
4.2.9 Turvakamerajärjestelmät	24
4.3 Hätäpysäytyslaitteet	24
4.4 Sallintakytkin	25
4.5 Alennettu liikenopeus	25
5. Suojaustoimenpiteet	25
5.1 Robotin kiinnitys	26
5.2 Robotin toiminta-alueen erottaminen	26
5.3 Vaara-alueelle kulkeminen	27
5.5 Hätäpysäytyslaitteet	28
5.6 Muut suojaustoimenpiteet	28
6. Robotin ohjelmointiharjoitukset	28
6.1 Robotin tarkkuus	28
6.2 Robotin käyttö pinoamisessa	30
7. Yhteenveto	32
Lähteet	34
Liite 1: Robotin alustan malli	
Liite 2: Robottijärjestelmän layout	
Liite 3: Esimerkkiohjelmat	

1. Johdanto

Teollisuusrobotit ovat tuoneet mukanaan uudenlaisia työtehtäviä ja -tapoja. Kone suorittaa usein raskaat ja yksitoikkoiset tehtävät ja ihminen huolehtii ainoastaan koneen suunnittelusta, käyttöönotosta, valvonnasta ja kunnossapidosta. [1, s. 5.]

Vaikka uudesta tekniikasta saatavat hyödyt ovat kiistattomia, se tuo kuitenkin mukanaan myös vaaratekijöitä. Koneen lähiympäristö voi olla jopa hengenvaarallinen, jos vaaratekijöihin ja niiden poistamiseen ei kiinnitetä riittävästi huomiota.

Automaattiset koneet ovat usein teknisesti monimutkaisia, eikä ihminen välttämättä tunne tarkasti koneen kaikkia toimintoja tai omien toimenpiteidensä seurauksia.

Teollisuusrobottien kohdalla vaaratekijät ovat merkittäviä, ja ne luovat erittäin suuren henkilövahinkoriskin. Ihmiselle on luotava turvallinen ja mahdollisimman hyvä työympäristö, ja samalla on tyydytettävä tuotannolliset tarpeet. Riskit eivät rajoitu pelkästään ihmisiin, vaikka ihminen onkin päällimmäisenä riskien vakavuutta tarkasteltaessa. On nimittäin otettava huomioon myös esimerkiksi rakenteisiin ja muihin koneisiin kohdistuvat vauriot. [1, s. 5.]

Työskentelyn tulee olla turvallista myös kaikissa kuviteltavissa olevissa poikkeustilanteissa, kuten erilaisissa häiriö- ja vikatilanteissa. Robotin turvalaitteita mietittäessä onkin huomioitava monia seikkoja: vaaratekijät ja -alueet, turvallisuusjärjestelmän ja työtehtävien yhteensovittaminen sekä koneen ja ihmisen väliset vuorovaikutussuhteet. [1, s. 8.]

1.1 Työn tarkoitus ja tavoitteet

Tämän työ käsittelee teollisuusrobotin käyttöönottoa. Työssä keskitytään robotin käyttöturvallisuuteen liittyviin asioihin, mutta myös robotin ohjelmointia ja muita robottiin sekä sen käyttöön liittyviä asioita sivutaan. Robotti sijaitsee Metropolia Ammattikorkeakoulun automaatiotekniikan laboratoriossa.

Työssä kartoitettiin robotin käyttöön liittyvät turvallisuusriskit, minkä perusteella robotille suunniteltiin tarvittavat suojaustoimenpiteet. Tehdyt kartoitus-, arviointi- ja suojaustoimenpiteet on selostettu tarkemmin seuraavissa luvuissa. Tuloksena syntyi suunnitelma niistä toimenpiteistä, joilla kartoituksessa havaitut riskit saadaan joko poistettua kokonaan tai niiden vakavuus saadaan minimoitua siedettävälle tasolle.

Työn toinen osa koostui työohjeiden laatimisesta laboratoriotöihin. Työohjeet tehtiin kahteen laboratoriotyöhön. Laboratoriotöissä simuloidaan todenmukaista robottisovellusta. Töiden tavoitteena on antaa opiskelijalle käsitys robottien yleisistä ominaisuuksista, ohjelmoinnista ja erilaisten robottisovellusten vaatimuksista. Tärkeimmät asiat ovat ohjelmointitekniikan oppiminen ja robotin käyttöliittymän sujuva käyttäminen, sillä ohjelmoinnin yhteydessä täytyy usein myös säätää ja muuttaa robotin asetuksia.

1.2 Robottien turvallisuutta koskevat säädökset

Suomessa robottien turvallisuutta koskevista päätöksistä keskeisin on konepäätös, joka astui voimaan vuonna 1995. Konepäätös koskee pääsääntöisesti kaikkia koneita. Sen ulkopuolelle jäävät ainoastaan käsivoimalla toimivat koneet ja muiden direktiivien säädösten kattamat koneet, kuten esimerkiksi ajoneuvot. Konepäätöstä sovelletaan siihen osapuoleen, joka saattaa koneen markkinoille. Päätöstä sovelletaan myös jokaiseen, joka kokoaa koneen tai konelinjan eri alkuperää olevista osista tai koneista. Yleensä tällä osapuolella tarkoitetaan koneen valmistajaa, mutta sillä voidaan myös tarkoittaa maahantuojaa tai jälleenmyyjää. Olennaista on, että joku vastaa kokonaisuudesta ja antaa siitä vaatimustenmukaisuusvakuutuksen. Jos muut eivät sitä tee, vastuu siirtyy ostajalle. [2, s. 160-161.]

Koneen on täytettävä sille asetetut turvallisuusvaatimukset. Yhdenmukaistettuja standardeja voidaan käyttää hyväksi turvallisuusvaatimuksia täytettäessä konetta suunniteltaessa ja rakennettaessa. Jos kone poikkeaa standardeissa esitetystä vaatimuksista, on koneesta vastuussa olevan tahon osoitettava, että vastaava

turvallisuustaso on saavutettu jollakin muulla tavalla. Standardien mukaan toimittaessa tällaista todistelua ei tarvitse tehdä. [2, s.164.]

1.3 Riskien tunnistaminen ja arviointi

Koneeseen liittyvät riskit tunnistetaan ja luetteloidaan ottamalla huomioon koneen tarkoitettu käyttö, vaaravyöhykkeet, käyttötavat ja -olosuhteet sekä muut ennakoitavissa olevat vaaratilanteet. Riskien vakavuus arvioidaan niiden toteutumisen todennäköisyyden ja niistä aiheutuvien ennakoitavissa olevien vahinkojen mukaan. Vaaratekijöiden tunnistamisen ja arvioimisen apuna voidaan käyttää standardeja SFS-EN 1050, SFS-EN 414 ja SFS-EN 292. Konepäättökseen liittyvä standardi SFS-EN 775 kohdistuu lähinnä robottiin laitteena, mutta siinä on kuitenkin myös joitakin koneen suojaukseen liittyviä kohtia, jotka voivat olla hyödyksi. Riskien arvioinnin perusteella koneelle suunnitellaan tarvittavat toimenpiteet havaittujen vaaratekijöiden poistamiseksi tai niiden vakavuuden minimoimiseksi. [2, s. 163-164.]

1.4 Riskien poistaminen

Riskien poistamiseksi on kolmenlaisia toimenpiteitä: suunnittelu, suojaus ja varoittaminen. Varminta on käyttää ensin mainittua. Varoittamista käytetään vasta, jos mikään muu keino ei ole mahdollinen. Muilla tavoin vältettävissä olevia vaaratilanteita ei saa hoitaa pelkästään varoittamalla. [2, s. 164.]

Riskien poistamiseen voidaan käyttää erilaisia turvalaitteita, jos niitä ei ole mahdollista poistaa suunnittelun avulla. Roboteille ei ole olemassa tarkkaa standardia, jossa kuvataan yksityiskohtaisesti käytettävissä oleva turvalaitetekniikka, minkä takia käytetään yleisiä standardeja. Turvalaitteiden yleiset vaatimukset on esitetty standardissa SFS EN-292. [2, s. 164.]

Jos koneeseen jää suojaustoimenpiteistä huolimatta vaaratekijöitä, niistä on varoitettava koneen käyttöohjeissa. Varoituksia voi olla myös koneeseen ja sen osiin kiinnitettyinä. Tarpeen vaatiessa henkilökunnalle on järjestettävä koulutusta koneen turvalliseen ja

oikeaan käyttöön. Myös erilaisia henkilösuojaimia voidaan käyttää tarpeen niin vaatiessa. [2, s. 164-165.]

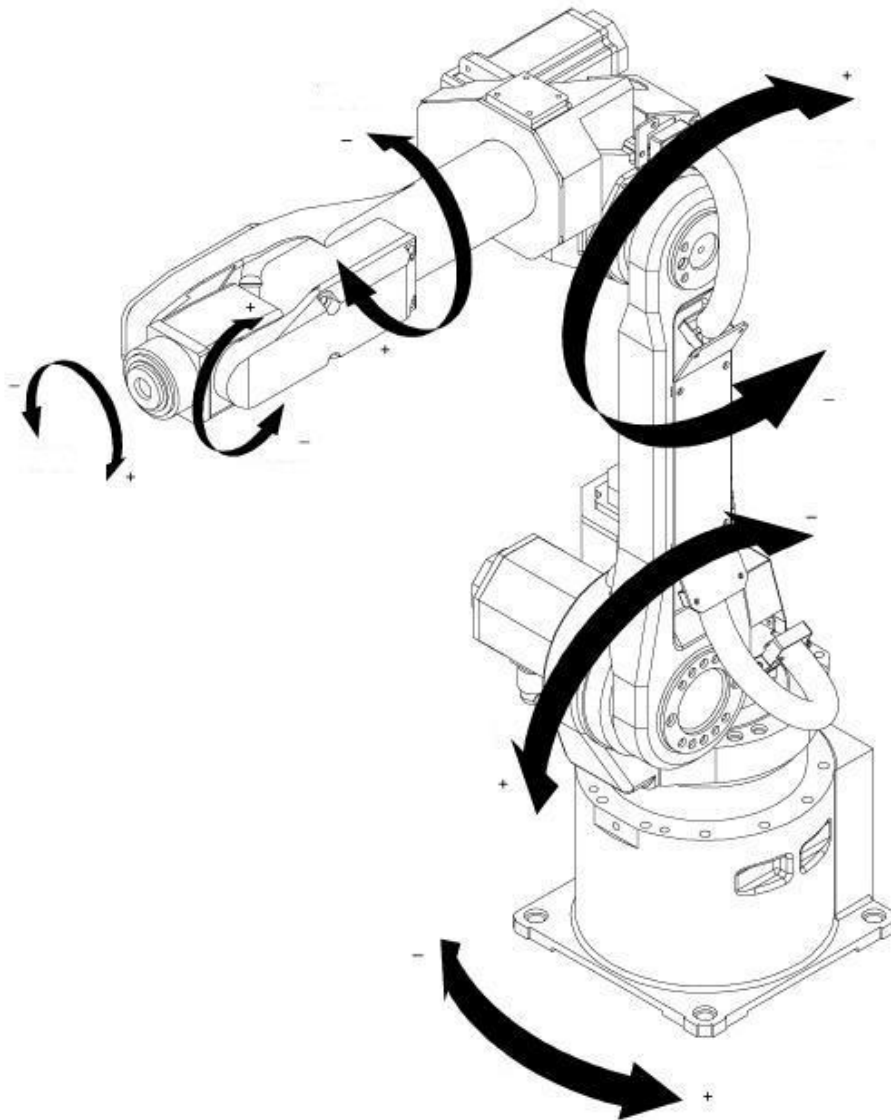
2. Robottijärjestelmän kuvaus

Kansainvälisen robottiyhdistyksen määritelmän mukaan robotti on uudelleenohjelmoitavissa oleva vähintään kolminivelinen mekaaninen laite, joka on suunniteltu liikuttamaan kappaleita, työkaluja tai erikoislaitteita ohjelmoitavin liikkein monenlaisten tehtävien suorittamiseksi. Hieman yksinkertaistettuna robotti on mekaaninen kone, joka siirtää työkalun haluttuun asemaan halutulla tavalla. Liikkeet voivat olla etukäteen määritettyjä, ympäristön mukaan valittavissa tai erilaisten antureiden havaintojen avulla luotuja. [2, s. 13.]

Robottijärjestelmä koostuu liikkeet toteuttavasta mekaanisesta yksiköstä ja sen toimintoja ohjaavasta ohjausjärjestelmästä. Tässä työssä käsiteltävässä robottijärjestelmässä mekaaninen yksikkö on Fanucin valmistama M6iB ja ohjausjärjestelmä on saman valmistajan R-3iC.

2.1 Robotin mekaaninen rakenne

Robotin mekaaninen käsivarsi koostuu tukivarsista, jotka on kiinnitetty peräkkäin ns. avoimeksi kinemaattiseksi rakenteeksi [2, s. 16]. Tukivarret voivat liikkua toistensa suhteen joko jonkin tietyn suoran suuntaisesti tai suoran ympäri. Tällaista akselia kutsutaan niveleksi. Nivelten avulla robotin tukivarret muuttavat asentoaan ja asemaansa. Niveleitä kutsutaan myös vapausasteiksi [2, s. 16]. Tämän työn robotissa niveleitä on kaiken kaikkiaan kuusi. Jokaisen nivelen liikkeitä ohjaa oma servomoottori. Robotin kuudenteen niveleen liitetään kulloinkin tarvittava työkalu, kuten esimerkiksi tarttuja tai hitsauslaite. Kuvassa 1 näkyy robotin mekaaninen rakenne ja sen akselien liikesuunnat.



Kuva 1: Robotin mekaaninen rakenne ja akselien liikesuunnat [3, s. 75].

2.2 Robotin ohjausjärjestelmä

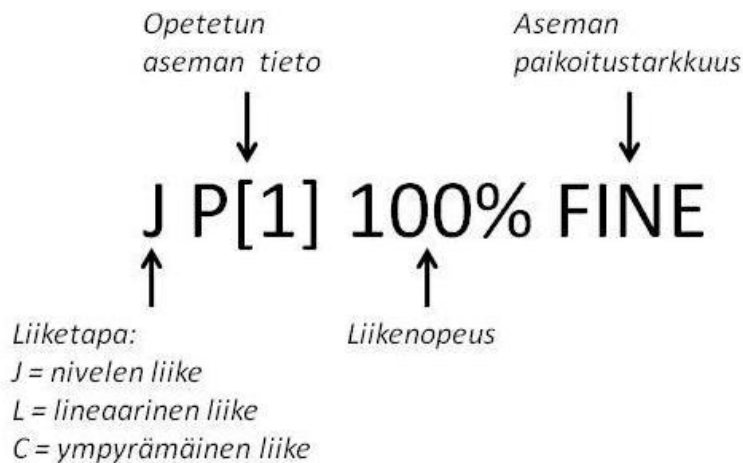
Robotin ohjausjärjestelmä ohjaa kaikkia robotin nivelien servomoottoreita. Servomoottorin akselin aseman mittaus ja virtaohjeen antaminen suoritetaan useita kertoja sekunnissa, jotta ohjaus olisi mahdollisimman reaaliaikaista. Ohjausjärjestelmä sisältää RAM-muistia, johon ohjelmat voidaan tallentaa ja josta ne tarvittaessa ladataan käyttöön. Ohjausjärjestelmä hoitaa myös kommunikoinnin robotin ulkoisten oheislaitteiden kuten esimerkiksi antureiden kanssa. Ohjausjärjestelmän käyttöpaneelista voidaan valita robotin tila ja kuitata hälytykset.

Ohjausjärjestelmään on liitetty käsiohjain, jolla voidaan liikuttaa ja ohjelmoida robottia sekä muuttaa robottiin ja sen toimintaan liittyviä asetuksia. Käsiohjain otetaan käyttöön kääntämällä siinä oleva kiertokytkin ON-asentoon. On huomattava, että käsiohjaimen päälle kytkeminen estää kaikki muualta robotille tulevat ohjaukset ja ohittaa näin ollen myös turvajärjestelmän. Käsiohjaimen ollessa käytössä täytyy sen takana oleva sallintakytkin pitää painettuna keskiasentoon koko ajan, jotta robotti liikkuu. Jos sallintakytkimen vapauttaa tai painaa pohjaan asti robotin liikkuessa, robotti pysähtyy välittömästi.

2.3 Robotin ohjelmointi

Ennen ohjelmointia on varmistettava, että robotin toiminta-alueella ei ole sinne kuulumattomia esineitä. Kaikki ylimääräiset esineet ja materiaalit tulee poistaa ennen käytön aloittamista. Robotin ohjelmointi tapahtuu siirtämällä työkalu haluttuun asemaan ja tallentamalla tämä asema muistiin. Tällaista ohjelmointitapaa kutsutaan opettamiseksi [2, s. 79]. Robottia voidaan liikuttaa nivel kerrallaan tai koordinoitusti useampi nivel kerrallaan kolmiulotteisessa koordinaatistossa.

Ohjelmat koostuvat liikekäskyistä, jotka sisältävät tiedon liikkeen nopeudesta ja suoritustavasta. Käytössä on kolme liiketapaa: nivelen liike, lineaarinen liike ja ympyrämäinen liike. Liikekäskyn rakenne näkyy kuvassa 2.



Kuva 2: Liikekäsken rakenne [4, s. 190].

Nivelen liikettä käytetään oletusliiketapana kahden tallennetun aseman välillä. Tässä liiketavassa robotti siirtää työkalun keskipisteen asetetulla nopeudella määrättyyn asemaan epälineaarista liikerataa pitkin. Haluttu nopeus asetetaan valitsemalla, kuinka suuri prosentuaalinen osuus robotin maksiminopeudesta on käytössä. Työkalun asentoa ei valvota.

Linearisessa liikkeessä työkalun keskipiste siirretään määrättyyn asemaan lineaarista liikerataa pitkin. Työkalun asento muutetaan liikkeen aikana vastaamaan ohjelmaan tallennetun pisteen asentoa. Liikenopeuden yksikkönä voidaan käyttää mm/s, cm/min tai tuumaa/min. Linearisella liikekäskeyllä voidaan myös pyörittää työkalua sen akselin ympäri. Liikenopeuden yksikkönä on tällöin °/s.

Ympyrämäinen liike siirtää työkalun keskipisteen määrättyyn asemaan kauttakulkuaseman kautta. Kauttakulku- ja loppuasema määritellään samassa liikekäskeyssä. Käytettävissä olevat liikenopeuden yksiköt ovat samat kuin lineaarisessa liikkeessä.

Edellä esitettyjen liikemahdollisuuksien lisäksi voidaan vielä valita paikoitustarkkuus eli se kuinka tarkasti robotin työkalu seuraa opetettujen asemien välistä liikerataa. Toisin sanoen voidaan valita, pysähtyykö robotti määrättyssä pisteessä, ennen kuin se siirtyy seuraavaan (FINE), vai siirtyykö se seuraavaan suoraan, kun se on päässyt

tarpeeksi lähelle tallennettua pistettä (CNT). Se, kuinka lähelle robotti menee määrättyä pistettä, määritellään liikekäskeyssä (0-100 %).

Liikekäskeyn perään voidaan myös asettaa jokin lisämääre, jolloin robotti suorittaa jonkin tietyn erikoistoiminnon. Tällaisia toimintoja ovat mm. luvussa 6 esitellyt inkrementaalinen liike ja offset-liike. Robotin käskeykantaan kuuluu myös joukko erilaisia hyppykäskeyjä ja aliohjelmien kutsuja, joilla voidaan luoda ohjelmaan jokin looginen rakenne.

Lisäksi käytettävissä on yleiskäyttöinen rekisteri ja asemarekisteri. Yleiskäyttöiseen rekisteriin voidaan tallentaa kokonais- ja desimaalilukuja, joita voidaan käyttää esimerkiksi muuttujina ohjelmassa. Asemarekisteriin taas voidaan tallentaa asemien koordinaatteja, joita voidaan sitten käyttää esimerkiksi suoraan asematietoina. Molemmilla rekistereillä voidaan myös tehdä erilaisia lasku- ja vertailutoimenpiteitä.

Robotti suorittaa ohjelman rivi kerrallaan tehden rivillä käskeytyt toiminnot ja siirtymällä sitten seuraavalle riville. Ohjelmat päätetään aina lopetuskäskeyyn. Ohjelmat voidaan myös suorittaa erillisessä askel-tilassa, jossa robotti pysähtyy ennen jokaista riviä odottamaan käyttäjältä erillistä sallintakäskeyä käsiohjaimelta. Ohjelmien toiminta kannattaa aluksi kokeilla alhaisella liikenopeudella. Vasta, kun on varmistuttu ohjelman oikeasta toiminnasta alhaisella nopeudella, voidaan se suorittaa täydellä nopeudella.

2.4 Robotin koordinaatistot

Perinteisesti robotin työkalun asento ja asema peruskoordinaatistossa lasketaan nivelkulmista ja tukivarsien pituuksista. Tätä kutsutaan epäsuoraksi aseman mittaamiseksi [2, s. 21]. Työkalun asema kuvataan kolmiulotteisissa koordinaatistoissa x-, y- ja z-akselin koordinaateilla ja asento kiertymiskulmaa akselien ympäri kuvaavilla w-, p- ja r-koordinaateilla. Robotilla on käytettävissä viisi koordinaatistojärjestelmää.

Oletuksena käytetään robotin työkalun kiinnityslaippaan (kuudes nivel) sidottua koordinaatistoa. Se voidaan korvata työkaluun sidotulla koordinaatistolla, joka

määrittelee työkalun keskipisteen ja työkalun asennon. Jos työkalun koordinaatistoa ei ole erikseen määritelty, työkalun kiinnityslaippaan sidottu koordinaatisto korvaa sen.

Maailmakoordinaatisto on robotin toimintaympäristöön, esimerkiksi itse robottiin tai sen oheislaitteisiin, sidottu koordinaatisto. Tavallisesti origo sijaitsee robotin ja sen alustan kiinnityskohdassa niin, että robotin ensimmäisen nivelen akseli liittyy koordinaatiston z-akseliin ja x-akseli osoittaa ensimmäisen nivelen toiminta-alueen keskikohtaan. Maailmakoordinaatistoa käytetään robotin peruskoordinaatistona aseman määrittelyssä ja sen avulla asetetaan User- ja Jog Frame-koordinaatisto.

User-koordinaatisto on käyttäjän erikseen määrittelemä koordinaatisto, jota käytetään asemarekisterin ja siihen liittyvien käskyjen yhteydessä. Jog Frame-koordinaatistoa taas käytetään robotin liikutteluun käsiohjaimella. Jos edellä mainittuja koordinaatistoja ei ole erikseen määritelty, ne korvataan maailmakoordinaatistolla.

2.5 Imukuppitarttuja

Robotin työkalun kiinnityslaippaan on asennettu imukuppitarttuja. Tällaisia alipaineeseen perustuvia tarttuja käytetään tyypillisesti silloin, kun mekaanisen tarttujan käyttö on hankalaa. Kumiset tai muoviset imukupit eivät naarmuta tai vahingoita työkappaleen pintaa.

Imukuppitarttuja tarttuu työkappaleeseen vain yhdestä suunnasta. Imukuppi vaatii riittävän tasaisen, mahdollisimman sileän, puhtaan ja tiiviin tartuntapinnan. Imun voima on paine-eron ja imukupin pinta-alan tulo. Tarttujaan ei saa kohdistua suuria tarttujaa vastaan kohtisuoria sivuttaisvoimia, koska sivuttaisliikettä vastustava tartuntavoima riippuu tarttujan ja kappaleen välisestä kitkakertoimesta. Tartuntakohta kannattaa asettaa mahdollisimman lähelle kappaleen keskipistettä, sen painopisteen kohdalle. Imukuppi ei keskitä kappaletta. [2, s. 63.]

Imukuppitarttujan rakenne on melko yksinkertainen ja sisältää vähän liikkuvia osia. Tarttujan toimintaa ohjataan magneettiventtiilillä ja alipaine muodostetaan ejektorilla.

Siinä paineilma syötetään erikoissuuttimen (Venturin putki) läpi, jolloin sen virtausnopeus kasvaa. Nopeuden lisäys alentaa painetta. Ilma johdetaan ulos ejektorista äänenvaimentimen läpi. Ejektorissa on lisäksi alipainekytin, jolla saadaan tieto riittävän suuren alipaineen saavuttamisesta. Haittana on kappaleen putoaminen tarttujasta paineen kadotessa. Lika ja pöly voivat tukkia järjestelmän. [2, s. 63-64; 5, s. 54.]

Imukuppitarttujassa on passiivinen jousielementti. Se suojaa tarttujaa törmäyksiltä ja iskuilta, jotka voivat pahimmassa tapauksessa vahingoittaa tarttujan tai robotin mekaanista rakennetta. Tarttuja joustaa, kun sen imukupin tartuntapinta osuu kohtisuorasti kappaleeseen. Sivusuuntaisilta törmäyksiltä se ei suojaa. Jousielementti mahdollistaa myös imukupin kunnollisen kontaktin työkaluun. Jouston määrä on kuitenkin rajallinen, joten kappaleiden käsittelytoimintoja opetettaessa on oltava erittäin varovainen ja käytettävä alhaista liikenopeutta.

3. Turvallisuusriskit ja vaaratekijät

Tässä luvussa on esitetty turvallisuustarkastelussa havaitut robotin käyttöön liittyvät riskit ja niiden toteutumiseen vaikuttavat tekijät. Kaikkien tässä esitettyjen riskien pahin mahdollinen seuraus on kuolema, ja ne muodostavat siksi merkittävän turvallisuusriskin. Näin ollen ne on poistettava tai niiden toteutuminen on estettävä suojalaitteilla, ennen kuin robottia voidaan käyttää.

3.1 Robotin voimakkuus

Robotin iskut, puristuminen, leikkautuminen ja takertuminen ovat tavallisia robotteihin liittyviä turvallisuusriskejä. Roboteille on yleensä ilmoitettu niiden maksimikäsittelykyky, jonka rajoissa ne kykenevät tarkkoihin liikkeisiin. Käsittelykyky ei kuitenkaan kuvaa robotin todellista voimaa juuri ollenkaan. Esimerkiksi robotti, jonka maksimikäsittelykyky on 10 kilogrammaa, kykenee helposti nostamaan yli 100 kilogramman painoisen taakan. Vaaratilanteessa robottia ei siis pystytä pysäyttämään ihmisvoimin. Lisäksi, jos robotilla on käytössään terävä työkalu tai robotin ja sen

työskentelyalueella olevien esineiden välissä on teräviä leikkaus- ja puristuskohtia, voimien ei tarvitse olla kovinkaan suuria vakavien vahinkojen aiheutumiseksi. [1, s. 13-14.]

Robottien liikkeet voivat aiheuttaa myös välillisiä vaaratekijöitä. Robotin käsittelemän kappaleen irtoaminen tarttujasta nopean liikkeen aikana saattaa aiheuttaa kappaleen sinkoutumisen pitkälle ulos robotin varsinaiselta toiminta-alueelta. Myös robotin käsittelemän kappaleen putoaminen tarttujasta saattaa joissakin tapauksissa aiheuttaa vaaratilanteen. [1, s. 14.]

3.2 Robotin liikealue

Ihmisen on käytännössä mahdotonta arvioida robotin liikkeiden laajuutta, sillä robotti valitsee yleensä lyhimmän mahdollisen reitin kahden tallennetun aseman välillä. Robotin liikerata saattaa myös vaihdella huomattavasti eri liikenopeuksilla, vaikka käytössä olisikin muuten sama ohjelma. Myös häiriöt robotin asentoa mittaavissa antureissa saattavat aiheuttaa arvaamattomia liikkeitä. Lisäksi, vaikka robotti näyttäisi olevan pysähtyneessä tilassa, ei tila välttämättä ole pysyvä, vaan robotti saattaa odottaa esimerkiksi liikkeen sallinta-signaalia joltakin ulkoiselta oheislaitteelta (esim. käsiohjaimelta). [1, s. 15-16.]

3.3 Robotin pysähtyminen

Robottien pysähtymismatkaan vaikuttaa moni asia. Pysähtymismatka riippuu pääasiassa robotin liikenopeudesta, käsiteltävän kappaleen massasta ja robotin asennosta. Robotin nopea pysäyttäminen rasittaa robotin teknistä rakennetta, minkä takia sitä tulee käyttää vain vaara- ja hätätilanteissa. Seuraavassa on esitelty robotteihin liittyviä pysäytystyypppejä. [1, s. 17-18.]

3.3.1 Tuotantopysäytys

Tuotantopysäytys pysäyttää robotin, kun se on suorittanut työkierron loppuun. Tuotanto voidaan käynnistää välittömästi uudelleen koneen pysähtyttyä robotin ohjausjärjestelmän käyttöpaneelin painikkeesta. Tämän tyyppinen pysäytys toteutetaan ohjelmallisesti, mistä johtuen se ei pysäytä robotin liikkeitä välittömästi, eikä sitä siksi käytetä vaaratilanteissa. [1, s. 22.]

3.3.2 Turvapysäytys

Turvapysäytyksellä varmistetaan vaara-alueelle menemisen turvallisuus. Robotti pysähtyy välittömästi, kun turvalaitteeseen vaikutetaan. Turvapysäytys katkaisee energiansyötön ja estää kaikki liikkeet. Robotin käsivarren tulee pysähtymisen jälkeen lukittua paikoilleen ja tarttujan tulee pitää mahdollinen käsiteltävä työkappale otteessaan. Turvapysäytys on kuitattava erikseen robotin työalueen ulkopuolelta, ennen kuin robotti voi jatkaa ohjelman suorittamista. Kuittaus ei kuitenkaan saa toimia, jos johonkin turvalaitteeseen vaikutetaan edelleen. [1, s. 23.]

3.3.3 Hätäpysäytys

Nimensä mukaisesti hätäpysäytystä käytetään vain hätätilanteissa. Hätäpysäytys katkaisee turvapysäytyksen tavoin energiansyötön koko laitteesta. Tämä ei kuitenkaan koske sellaisia toimintoja, joiden keskeyttäminen saattaa aiheuttaa uuden vaaratilanteen. Sähköisissä roboteissa turvapysäytys ja hätäpysäytys kytketään yleensä samoihin piireihin. [1, s. 24.]

4. Yleistä robotin turvallisuussuunnittelusta

Robottijärjestelmän turvallisuussuunnittelussa on kaksi pääperiaatetta [2, s. 166]:

- Poistetaan tai minimoidaan ihmisen läsnäoloa robotin vaara-alueella vaativat tehtävät.

- Poistetaan tai vähennetään vaara-alueella työskentelyn vaaroja erilaisten turvalaitteiden avulla.

On tärkeää, että suojauskeinojen suunnittelussa otetaan huomioon monia erilaisia näkökohtia. Näin turvajärjestelmästä saadaan mahdollisimman joustava, eikä se hankaloita tarpeettomasti minkään käyttäjäryhmän työntekoa.

Yleinen turvallisuussuunnittelun lähtökohta on rajata ja eristää robotin toiminta-alue ja valvoa sinne kulkemista. Alueen rajaamisessa täytyy hahmottaa robotin maksimitoiminta-alue, rajattu toiminta-alue ja turvalaitteiden valvoma alue. On myös huomattava, että alueiden rajat saattavat muuttua käytettäessä robotissa eri työkaluja ja käsiteltäessä erilaisia kappaleita. Jos robotin automaattinen toiminta edellyttää ihmisen läsnäoloa vaara-alueella, on varauduttava myös muihin turvajärjestelyihin. Myöskään turvalaitteiden käyttö yksinään ei yleensä riitä, vaan on noudatettava myös muita yleiseen työturvallisuuteen liittyviä ohjeita ja määräyksiä. [2, s. 166.]

Seuraavassa on esitelty joitakin yleisesti käytössä olevia automaattisten koneiden suojaamiseen tarkoitettuja turvalaitteita ja keinoja.

4.1 Aitaratkaisut

Perinteinen suojauskeino on erottaa robotin toiminta-alue aidalla. Yleensä aidoissa käytetään verkkorakennetta, jotta yli kiipeäminen ja poikkipuolien välistä kulkeminen olisi mahdollisimman vaikeaa. Verkkorakenteen tulee olla riittävän tiheäsilmäinen, ettei sen läpi kurkottelu ole mahdollista. Aukoissa suositellaan yleensä käytettäväksi alle 40 millimetrin silmäkoko. Aitauksen rakentamisessa voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi suurikokoisia oheislaitteita ja seiniä, jotka muodostavat ns. luonnollisia kulkuesteitä. Aidan on oltava riittävän tukeva ja korkea. Vaara-alueelle kuljetaan aidassa olevasta kulkuaukosta. [1, s. 25.]

Aidan korkeuden määrää pääasiassa robotin maksimiulottuvuus. Robotti ei saa missään tilanteissa ulottua suojarakenteen yläpuolelle. Aidan korkeuden on oltava vähintään 1

metri, jotta sillä olisi ihmisen liikettä rajoittava vaikutus. Suosituskorkeus on yli 1,4 metriä. [2, s. 167.]

Standardin SFS-EN 775 mukaan suojarakenteen sisäpuolelle on jätettävä vähintään 500 millimetrin turvaetäisyys puristumisvaaran välttämiseksi. Turvaetäisyyttä määritettäessä on myös otettava huomioon, että suojarakenteen yli kurkottaminen vaara-alueelle ei saa olla mahdollista. Mitä korkeampi suojarakenne, sitä lyhyempi turvaetäisyys. Alla olevassa taulukossa 1 on standardissa SFS-EN 294 esitettyjä esimerkkejä turvaetäisyyksistä suojarakenteen yli kurkotettaessa. Suojarakenteen korkeutta määritettäessä oletetaan, ettei raajojen luonnollisen pituuden lisäämiseksi käytetä mitään apuvälineitä, kuten tuolia tai tikkaita. Vertailutasona käytetään lattiaa. [2, s. 166-167.]

Taulukko 1: Turvaetäisyyksiä suojarakenteen yli kurkotettaessa [2, s. 167].

Suojarakenteen korkeus (mm)	Vaakasuora etäisyys turva-alueeseen (mm)
1400	1100
1600	900
1800	800
2000	600
2200	400

Robotin turva-alueita on mahdollista pienentää rajoittamalla robotin liikkeitä. Liikkeiden rajoittaminen pienentää myös robotin tavallisesti vaatimaa tilaa. Vaarallisia liikkeitä voidaan estää esimerkiksi asettamalla turvalaitteiden valvoman alueen sisäpuolelle antureita valvomaan liikkeiden laajuutta. [2, s. 167.]

Pelkkä aita yksinään ei riitä, sillä kulkuaukon läpi päästään vaara-alueelle ilman, että siitä saadaan minkäänlaista havaintoa. Joissakin tapauksissa aita ei ole kovin käytännöllinen ratkaisu. Näin voi olla, jos esimerkiksi vaara-alueella joudutaan käymään usein. Ongelman ratkaisemiseksi jopa koko aita tai osia siitä voidaan korvata erilaisilla antureilla, joilla valvotaan vaara-alueelle kulkua. [1, s. 29.]

4.2 Turva-anturit

Anturit eivät pysty estämään ihmisen kulkua vaara-alueelle, joten niiden on estettävä robotin vaaralliset toiminnot sinä aikana, kun ihminen on vaara-alueella. Anturit on sijoitettava niin, että niiden ohittaminen on mahdotonta ja niiltä saadaan havainto varmasti, kun vaara-alueelle kuljetaan. On myös huomattava, että anturit eivät estä liikkeen jatkumista vaara-alueelle, minkä takia ne on sijoitettava riittävän etäälle valvottavasta kohteesta. Suojaetäisyyden (s) laskemiseen voidaan käyttää seuraavaa kaavaa. Sopiva etäisyys riippuu koneen pysähtymisajasta (t_p). [1, s. 29-31.]

$$s = 0,6 + 1,6 \cdot t_p \quad (1)$$

Pysähtymisaika syötetään sekunteina ja kaava antaa suojaetäisyyden metreinä.

Antureilla voidaan myös valvoa ihmisen liikkeitä vaara-alueen sisällä. Voidaan käyttää esimerkiksi useita antureita valvomaan vaara-alueen eri osia. Usein päädytäänkin ratkaisuun, joka on edellä esiteltyjen vaihtoehtojen yhdistelmä. Näin koneen käytöstä saadaan mahdollisimman turvallista ja joustavaa. [1, s. 29.]

Turvalaitteina käytettävät anturit on valittava juuri turvalaitekäyttöön suunnitelluista malleista. On selvää, että antureiden toiminnan ja havaintojen luotettavuudelle asetetaan suuret vaatimukset turvallisuuteen liittyvissä asioissa. Jos anturi havaitsee vian omassa toiminnassaan, siitä on annettava hälytys tai estettävä koneen toiminta. [1, s. 25.]

Pysäytysvirtapiiri liitetään yleensä avautuviin koskettimiin, jolloin huonot liitännät ja johtokatkokset yms. paljastuvat. Turvalaitteiden kytkemiseen voidaan myös käyttää turvakäyttöön suunniteltuja releitä, jotka kykenevät valvomaan omaa toimintakuntoaan ja estämään valvottavan laitteen toiminnan vian huomattaessaan. [1, s. 25-26.]

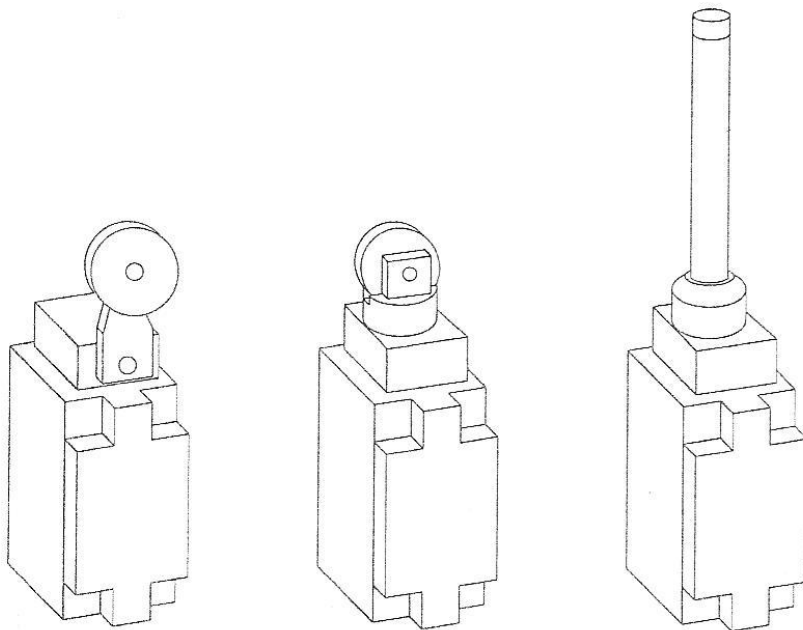
4.2.1 Tuntomatot

Tuntomattoja on saatavilla eri kokoisina. Niistä kuitenkin kaikki eivät sovellu turvalaitteiksi. Maton täytyy kattaa valvottavan alueen lattiapinta kokonaan niin, ettei

siihen jää katvealueita. Tuntomaton vieressä tai yläpuolella ei saa olla rakenteita, joiden avulla matto voidaan ylittää. Tuntomattojen käyttöä rajoittaa myös niiden varsin korkea hinta, mikä tekee etenkin laajojen alueiden valvonnasta kallista. [1, s. 30-31.]

4.2.2 Mekaaniset rajakytkimet

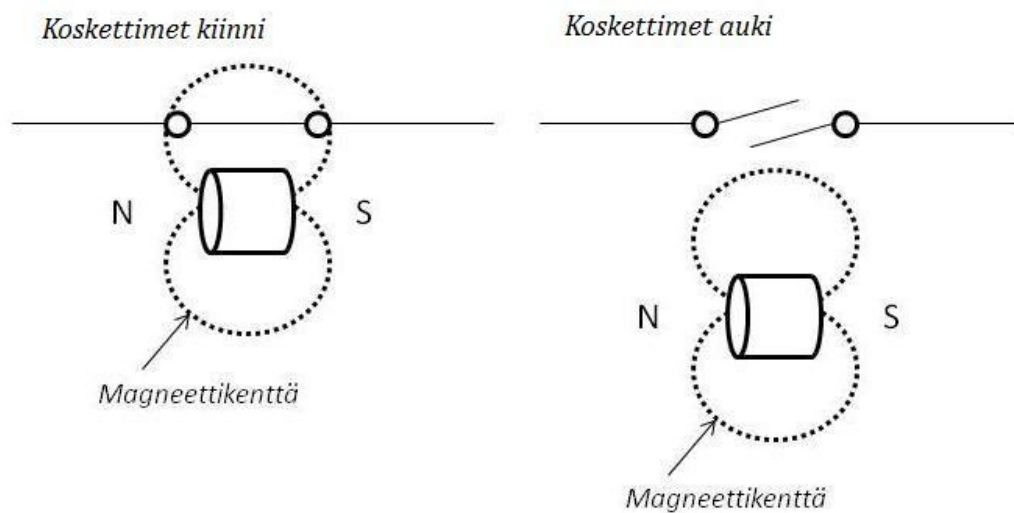
Mekaanisissa rajakytkimissä mekaanisen havaintoelimen liikkeellä saadaan aikaan haluttu kosketintoiminta. Saatavilla on monia erilaisia kytkinmalleja, joissa käytetään erilaisia havaintoelimiä. Kuvassa 3 näkyy joitakin mekaanisia rajakytkinmalleja. Kytkin on sijoitettava sellaiseen paikkaan, jossa se on suojassa tärinältä ja iskuilta, jotka voivat aiheuttaa hetkellisen katkoksen tai ei-toivotun havainnon. Rajakytkin täytyy myös asentaa oikein, jotta vältetään mekaanisen havaintoelimen turhalta rasittamiselta ja kulumiselta. Suurin ongelma mekaanisissa rajakytkimissä onkin juuri niiden kuluminen. Ne kestävät yleensä joitakin miljoonia kytkentäkertoja, mikä täytyy ottaa huomioon arvioitaessa kytkimen vaihtoväliä. [1, s. 30; 6, s. 30-32.]



Kuva 3: Mekaanisia rajakytkimiä [6, s. 31].

4.2.3 Magneettiset rajakytkimet

Magneettinen rajakytkin koostuu kestopagneetista ja Reed-kytkimestä. Reed-kytkin koostuu ferromagneettisesta kosketinparista, joka magnetoituu, kun lähelle tuodaan magneetti. Koskettimet sulkeutuvat, kun ne joutuvat tarpeeksi lähelle magneettia. Kosketinpari avautuu uudelleen, kun magneetti viedään tarpeeksi kauas. Kytkenäetäisyys on yleensä 5-10 millimetriä. Magneettisen rajakytkimen toimintaperiaate näkyy kuvassa 4. Magneetti voi olla koodattu, jolloin kytkimen koskettimiin ei voida vaikuttaa muilla magneeteilla, eikä sitä näin ollen voida ohittaa helposti. [6, s. 38.]



Kuva 4: Magneettisen rajakytkimen toimintaperiaate [6, s. 38].

4.2.4 Optiset anturit

Vaara-alueelle kulkemista voidaan myös valvoa erilaisilla valokennoilla eli optisilla antureilla. Antureiden toiminta perustuu yhden tai useamman valonsäteen tuottamiseen lähettimessä ja säteen tunnistamiseen vastaanottimessa. Useaa valonsädettä käytettäessä puhutaan usein valoverhosta. Lähetin ja vastaanotin voivat olla erillisiä laitteita, tai sitten ne voivat olla yhdistettynä samaan laitteeseen, jolloin valonsäde heijastetaan takaisin vastaanottimeen peilistä. Havainnon saaminen perustuu lähettimen ja

vastaanottimen välisen valonsäteen katkeamiseen. Aivan valokennojen lähiympäristössä olevat samansuuntaiset, tasaiset ja heijastavat pinnat saattavat aiheuttaa ongelmia valon heijastumisen vuoksi. [1, s. 31; 6, s. 39-41.]

Optisten antureiden lisäksi on saatavilla erilaisia optisia lähestymiskytkimiä, joiden lähettämä valonsäde heijastuu takaisin kohteesta anturissa olevaan vastaanottimeen. Kohteen etäisyys on suoraan verrannollinen takaisin heijastuneen valonsäteen palautumisaikaan. Optiset lähestymiskytkimet eivät kuitenkaan sovellu turvalaitteiksi, sillä kohteen havaitseminen riippuu suuresti sen heijastusominaisuuksista, jotka etenkin ihmisten kohdalla ovat yleisesti huonoja. [1, s. 32.]

4.2.5 Ultraäänianturit

Ultraäänianturien toiminta perustuu ultraäänen tuottamiseen ja kohteesta takaisin heijastuneen äänen havaitsemiseen. Kohteen etäisyys anturiin on täten suoraan verrannollinen äänen palautumisaikaan. [1, s. 33.]

Ultraäänianturi ei kuitenkaan tunnista luotettavasti kohteita, jotka absorboivat ultraääniaaltoja, kuten esimerkiksi huokoinen puuvilla tai vaahtomuovi. Myöskään tasaisista pinnoista ei välttämättä saada kunnollista havaintoa, jos ne sijaitsevat sopivassa kulmassa anturiin nähden. Ultraäänianturi on lisäksi häiriöaltis muiden ultraäänilähteiden lähettämälle äänelle. [1, s. 33-34.]

4.2.6 Mikroaaltoanturit

Liikkeen tunnistavien mikroaaltoanturien toiminta perustuu ns. doppler-ilmiöön. Valvottavalle alueelle lähetetään vakiotaajuista mikroaaltosäteilyä, joka liikkuvaan kohteeseen osuessaan heijastuu takaisin eritaajuisena. Takaisin heijastuneen signaalin teho on suoraan verrannollinen kohteen pinta-alaan. Jos kohteen pinta-ala ja taajuusmuutos ylittävät asetetut raja-arvot, kohteesta saadaan havainto. [1, s. 34.]

Mikroaaltoanturit on suunnattava siten, että valvottavan kohteen liikkeet eivät häiritse anturin toimintaa. Valvottavan alueen rajaaminen on kuitenkin vaikeaa, sillä mikroaallot tunkeutuvat ohuiden seinämien, lasin ja muovien läpi. Myös heijastumiset valvottavalla alueella olevista metallisista esineistä ja muista lähellä olevista koneista saattavat aiheuttaa ei-toivottuja havaintoja. [1, s. 34.]

4.2.7 Infrapuna-anturit

Infrapuna-anturin toiminta perustuu kohteen tuottaman lämpösäteilyn havaitsemiseen. Kun lämmin kohde liikkuu anturin lähettämän infrapunavalokeilan poikki, saadaan havainto. Ongelmana infrapuna-antureiden käytössä on se, että vaatetus vähentää huomattavasti ihmisestä lähtevän lämpösäteilyn määrää. Tämän vuoksi havainnot pyritään yleensä saamaan ihmisen paljaista ruumiinosista kuten käsistä tai päästä. Muut kirkkaanväriset tai lämpimät kohteet saattavat aiheuttaa ei-toivottuja havaintoja. [1, s. 34.]

4.2.8 Laserskannerit

Laserskanneri edustaa uudenlaista turvalaitesuunnittelua. Sen sijaan, että valvotaan pelkästään vaara-alueelle kulkemista, havainto saadaan myös vaara-alueen sisällä tapahtuvista liikkeistä. Laserskannerin toiminta perustuu lähetetyn laservalopulssin aikaviiheen mittaukseen. Havaitun kohteen sijainti määritetään mittaamalla pulssin lähteykseen ja takaisinpaluuseen kulunut aika. Tätä samaa tekniikkaa käytetään myös erilaisissa laseretäisyysmittareissa. Skanneri laskee ihmisten ja muiden kohteiden tarkat paikkakoordinaatit ennalta määrättyllä alueella, mikä mahdollistaa ihmisen turvallisen työskentelyn lähellä robottia. [7.]

Laserskannerille voidaan yleensä määrittää erikseen varoitusalue ja varsinainen vaara-alue. Henkilön lähestyessä valvottavaa aluetta ja saapuessa varoitusalueelle skanneri antaa varoitusilmoituksen esimerkiksi merkkivalolla. Jos henkilö tulee varoituksesta huolimatta ennalta määritellylle vaara-alueelle, skanneri pysäyttää koneen välittömästi.

Skannerin mukana toimitettavalla tietokoneohjelmalla määritellään valvottava alue ja laitteiden yksityiskohtainen sijainti.

4.2.9 Turvakamerajärjestelmät

Turvakamerajärjestelmät mahdollistavat laserskannereiden tavoin ihmisen ja robotin työskentelyn samassa tilassa. Kohde havaitaan optisesti kameralla. Kamerajärjestelmä koostuu tavallisesti useasta rinnakkaisesta kamerasta, joilla valvottavasta tilasta otetaan useita kuvia sekunnissa eri perspektiivistä. Valvottava alue on yleensä kolmiulotteisen kartion muotoinen. Kuvat siirretään kamerasta valokuitukaapelilla erilliseen laskentayksikköön, joka laskee havaittujen kohteiden sijainnin valvottavalla alueella. Jos valvottavalta alueelta löydetään kohde, suoritetaan määritellyt suojaustoimenpiteet. Laserskannereiden tapaan myös kamerajärjestelmälle voi määrittää useita sisäkkäisiä suoja-alueita, joihin vaikuttaessa suoritetaan eri turvatoimintoja. Määrittelyt tehdään kameran mukana toimitettavalla tietokoneohjelmalla. [8, s. 10-19.]

4.3 Hätäpysäytyslaitteet

Hätäpysäytyspainike tulee olla ainakin robotin ohjauspaneelissa, käsiohjaimessa ja lähellä aidatun robotin kulkuaukkoa. Painikkeiden lisäksi on saatavilla muun tyyppisiä hätäpysäytyslaitteita, joissa käytetään hallintaelimenä painikkeen sijasta jotakin muuta. [1, s. 28.]

Hätäpysäytyslaitteen on katkaistava robotilta käyttöenergia välittömästi tai heti robotin pysähtymisen jälkeen. Hätäpysäytykset täytyy toteuttaa niin, että robotin käyttöturvallisuus ei vaarannu hätäpysäytyslaitteen vian vuoksi. Toisin sanoen robotti ei liiku, jos jokin hätäpysäytyslaitteista vikaantuu. Hätäpysäytyskäsky on aina ensisijainen kaikkiin muihin käskyihin nähden, ja hätäpysäytyslaitteiden tulee olla aina käytettävissä robotin tilasta riippumatta. Hätäpysäytyslaitteen vapauttaminen ei saa käynnistää mitään robotin osaa uudestaan, vaan hätäpysäytyskäsky on aina erikseen kuitattava vaara-alueen ulkopuolelta. Kaikkien hätäpysäytyslaitteiden hallintaelimen on oltava väriltään punaisia ja niiden taustan tulee olla keltainen, jos se vain on mahdollista. [1, s. 29.]

4.4 Sallintakytkin

Sallintakytkimen avulla voidaan lisätä turvallisuutta jouduttaessa työskentelemään robotin toiminta-alueella. Kun sallintakytkin otetaan käyttöön, ihmisen on jatkuvasti pidettävä kytkin painettuna, jotta robotti liikkuisi. Vaaratilanteessa kytkimen vapauttaminen pysäyttää robotin. Koska robottien liikkeitä on vaikea ennakoida ja liikenopeudet ovat yleensä suuria, on suositeltavaa, että robotissa käytetään alennettua liikenopeutta, kun joudutaan työskentelemään robotin toiminta-alueella. [1, s. 34-35.]

4.5 Alennettu liikenopeus

Robotin alennettua liikenopeutta (turvanopeus) voidaan käyttää parantamaan turvallisuutta, etenkin jos joudutaan työskentelemään lähellä robottia. Nopeus on harkittava tapauskohtaisesti, mutta se ei kuitenkaan saa ylittää 250 mm/s.

Robottijärjestelmän ennustettavissa oleva vikaantuminen ei saa aiheuttaa liikenopeuden kasvua yli määrätyn turvanopeuden. Alennetun liikenopeuden käyttö turvallisuustarkoituksessa on teknisesti huomattavasti vaikeampi toteuttaa ja jossain määrin myös kalliimpi vaihtoehto kuin perinteiset robotin suojauskeinot. Tämän vuoksi siihen ei ole kiinnitetty paljon huomiota. [2, s. 171-172.]

5. Suojaustoimenpiteet

Tässä luvussa on kuvattu havaittujen riskien poistamiseen ja vakavuuden alentamiseen suunnitellut suojaustoimenpiteet. Robotin työtilassa on operointipöytä ja erillinen kuljetinjärjestelmä. Kuljetin on täysin itsenäinen järjestelmä, eikä sen toiminta ole millään tavalla riippuvainen robotin toiminnoista. Kuljettimella on myös omat turvallisuusjärjestelynsä, jotka eivät ole yhteydessä robotin turvalaitteisiin, eikä niihin ole sen vuoksi tarpeellista paneutua tässä työssä tarkemmin. Robottijärjestelmän layout näkyy tarkemmin liitteessä 2.

5.1 Robotin kiinnitys

Robotin kiinnityksen on oltava mahdollisimman tukeva, että robotti pysyy paikoillaan nopeissakin liikkeissä. Alustan on myös oltava rakenteeltaan sellainen, että se pystyy kantamaan robotin painon. Alustan suunnittelussa on käytetty robotin valmistajan antamia suosituksia. Robotti kiinnitetään erilliselle alustalle neljällä kuusioruuvilla. Alustan paikoillaan pysyminen varmistetaan kiinnittämällä se lattiaan. Alusta on suunniteltu niin, että robotti voidaan siirtää helposti irrottamatta sitä alustasta pumppukärryllä tai muulla tarkoitukseen soveltuvalla nostolaitteella. Alusta nostaa robottia hieman ylemmäs niin, että robotilla on enemmän tilaa liikkua eivätkä sen tukivarret törmää toiminta-alueella oleviin esineisiin. Alusta näkyy tarkemmin liitteen 1 kuvista.

5.2 Robotin toiminta-alueen erottaminen

Kuten jo edellä todettiin, robotti ja sen toiminta-alue on erotettava muusta ympäristöstä. Tässä tapauksessa toiminta-aluetta reunustaa kahdelta sivulta seinä, joten ainoastaan kaksi sivua vaatii erillisen suojarakenteen pystyttämisen. Verkkorakenteinen aita on selvästi paras ja varmin suojarakenne. Aita voidaan maalata mustaksi, jolloin saadaan paras näkyvyys sen läpi. Aidan on oltava riittävän tiheäsilmainen, ettei sen läpi kurkottelu vaara-alueelle ole mahdollista. Myöskään aidan alta kurkottelu ei saa olla mahdollista, joten sen tulee ulottua lattiaan asti.

Robotin pystysuora vaara-alue ilman työkalua ulottuu noin 2 metrin korkeuteen. Suojarakenteen sopiva korkeus olisi näin ollen myös 2 metriä. Robotin vaakasuora vaara-alue ulottuu noin 1,5 metrin päähän. Kun tähän lisätään vielä vähintään 0,5 metrin vaakasuora turvaetäisyys, on suojarakenteen yli kurkotettaessa vaakasuora etäisyys vaara-alueeseen riittävä. Yli 2 metrin korkuisesta aidasta ei ole turvallisuutta ajatellen juuri mitään hyötyä.

5.3 Vaara-alueelle kulkeminen

Vaara-alueelle kuljetaan suojarakenteessa olevasta portista tai kulkuaukosta. Porttia tai kulkuaukkoa valvotaan sopivalla anturilla. Anturi pysäyttää robotin toiminnan välittömästi, kun siihen vaikutetaan.

Suojarakenteessa olevaa porttia voidaan valvoa erilaisilla mekaanisilla rajakytkimillä, jonka koskettimet avautuvat pakkotoimisesti porttia avattaessa pysäyttäen samalla robotin. Mekaaniset rajakytkimet kuitenkin kuluvat käytössä. Niiden sijasta voidaankin käyttää magneettisia rajakytkimiä, jotka eivät sisällä liikkuvia osia eivätkä näin ollen kulu samalla tavalla. Portti asennetaan niin, että se aukeaa poispäin vaara-alueesta. Näin estetään vaara-alueelle ryntääminen ja varmistetaan, että robotti on varmasti pysähtynyt vaara-alueelle mentäessä.

Portin sijasta voidaan käyttää valokennoja. Valokennojen käyttöön sisältyy kuitenkin joitakin riskejä. Useampisäteinenkään valokenno ei välttämättä havaitse ihmiskehon osien tunkeutumista vaara-alueelle, jos se on sijoitettu väärään paikkaan. Valokennot onkin sijoitettava riittävän tiheästi, jotta ihminen ei pääse kulkemaan tai pysty työntämään raajojaan vaara-alueelle kennojen välistä tai niiden ohi. On myös huomattava, että ne eivät myöskään suoja robotin toiminta-alueen ulkopuolista lähiympäristöä mitenkään robotin toiminta-alueelta mahdollisesti poispäin sinkoutuvilta kappaleilta. Valokennojen yhteydessä onkin mietittävä niiden oikeaa sijoittelua ja suuntausta sekä mahdollisesti muita lisäturvatoimia.

Luvussa 4.2 esitellyjä muita antureita voitaisiin myös käyttää kulkuaukon valvontaan. Niiden käyttöön ja toimintavarmuuteen liittyy kuitenkin joitakin epävarmuustekijöitä, eikä niitä näin ollen voi käyttää ainoana vaara-alueelle menemistä valvovana laitteena. Nämä anturit soveltuvatkin parhaiten lisäturvavälineiksi tai käytettäväksi muiden antureiden kanssa.

5.5 Häätäpysäytyslaitteet

Standardin SFS-EN 60204-1 mukaan koneen jokaisella ohjauspaikalla on oltava häätäpysäytyslaite [2, s. 171]. Kyseisessä robottijärjestelmässä häätäpysäytysnappi on ohjausjärjestelmän käyttöpaneelissa ja käsiohjaimessa. Häätäpysäytyksen kuittaus tapahtuu ohjausjärjestelmän käyttöpaneelista vaara-alueen ulkopuolelta.

Häätäpysäytyspainikkeiden määrä on nykyisellään riittävä, eikä häätäpysäytyslaitteiden lisääminen tuo suurta hyötyä robotin käyttöturvallisuuteen.

5.6 Muut suojaustoimenpiteet

Koko robotin toiminta-alueita valvotaan laserskannerilla, jolloin saadaan havainto myös ihmisen liikkeistä vaara-alueen sisäpuolella. Laserskanneri asennetaan robotin yläpuolelle ja sille määritellään valvottavaksi alueeksi suojarakenteen sisäpuolinen alue. Jos skanneri löytää valvottavalta alueelta sinne kuulumattoman kohteen, robotin toiminta pysäytetään välittömästi. Näin saadaan estettyä turvapysäytyksen kuittaaminen ja ohjelman suorittaminen silloin, kun muut turvalaitteet ovat ei-aktiivisessa tilassa mutta vaara-alueen sisäpuolella on edelleen joku.

6. Robotin ohjelmointiharjoitukset

Tässä luvussa on esitelty robotille suunnitellut laboratoriotyöt. Laboratoriotöitä suunniteltiin kaksi, joissa perehdytään robotin ohjelmointiin ja käyttöliittymän saloihin sekä muihin robotin käyttöön liittyviin asioihin käytännön robottisovelluksia simuloivilla harjoituksilla. Molempien tässä esiteltyjen laboratoriotöiden esimerkkiohjelmat löytyvät liitteestä 3.

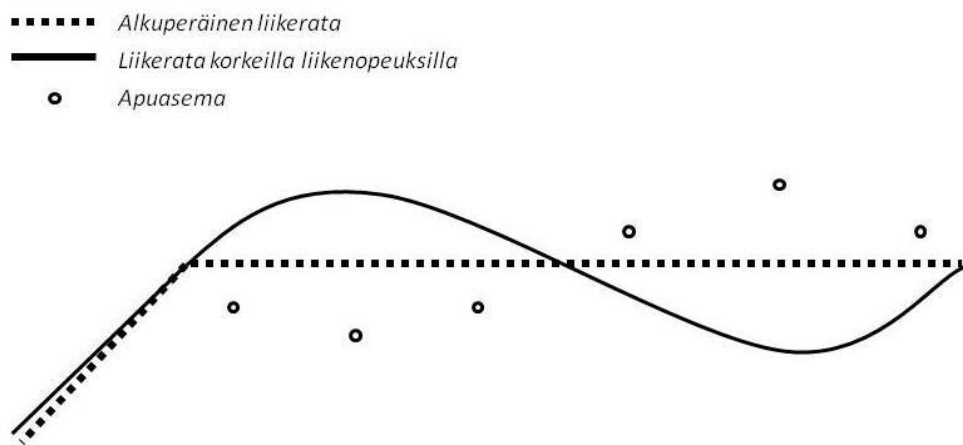
6.1 Robotin tarkkuus

Ohjelmoitaessa pieniä ja tarkkoja liikkeitä huomataan robottien dynamiikan perusongelma. Alhaisella liikenopeudella kokeillut liikeradat eivät pysy samoina

suurilla nopeuksilla. Liikeradan muuttumista voidaan ehkäistä jonkin verran ohjelmoimalla robotille apuasemia.

Robotin liikerataa eri nopeuksilla voidaan tutkia robotin työkalulaippaan kiinnitetyllä kynällä, jolla piirretään paperille robottia liikuttamalla jokin symmetrinen kuvio, esimerkiksi neliö. Robotin liikkeet tallennetaan ohjelmaksi, joka voidaan ajaa eri nopeuksilla. Paperille piirryneistä kuvioista nähdään miten robotin nopeus vaikuttaa liikeratoihin. Paperi kiinnitetään pahvilaatikkoon, joka puolestaan kiinnitetään operointipöytään. Näin estetään robotin törmääminen operointipöytään.

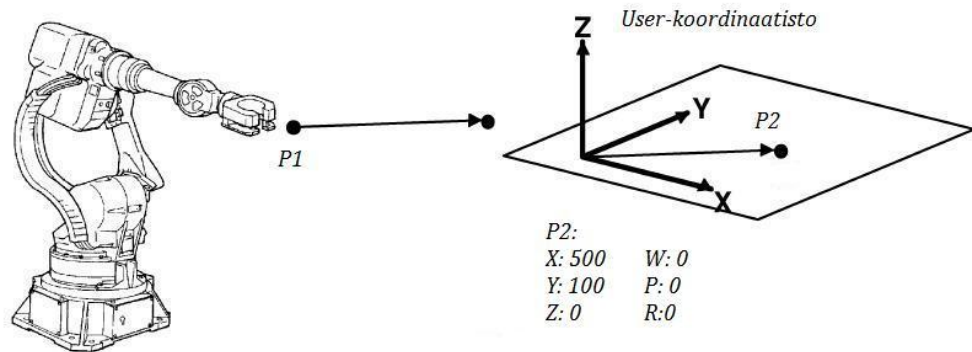
Robotin liikerata voidaan vielä yrittää korjata oikeanlaiseksi opettamalla robotille apuasemia. Asemat valitaan niin, että niissä otetaan huomioon robotin liikenopeudesta aiheutuva epätarkkuus. Ne sijoitetaan ikään kuin halutun liikeradan peilikuvaksi, kompensoimaan suurilla liikenopeuksilla syntyviä virheitä. Kuvassa 5 havainnollistetaan liikeradan korjaamista.



Kuva 5: Ohjelmoidun ja todellisen liikeradan ero [2, s. 81].

Harjoituksessa voidaan myös havainnollistaa paikoitustarkkuusvaihtoehtojen (FINE ja CNT) vaikutusta liikerataan ja kokeilla erilaisia liiketapoja. Voidaan esimerkiksi kokeilla ympyrän piirtämistä paperille käyttämällä ympyrämäistä liiketapaa.

Esimerkkihjelmassa on käytetty inkrementaalista liikekäskyä. Sen avulla saadaan aikaan erittäin tarkkoja ja täsmällisiä liikkeitä. Kuvan 6 esimerkissä robotti siirtää työkalun inkrementaalisella liikekäskyllä asemaan P2. Asematietoon P2 syötetyt koordinaatit lisätään edellisen aseman P1 koordinaatteihin. Näin aseman P2 lopulliseksi koordinaateiksi saadaan siis asemien P1 ja P2 vastaavien koordinaattien yhteenlasketut arvot. Inkrementaalisessa liikekäskyssä käytetään User-koordinaatistoa, mikä on syytä huomata, jos aseman P1 opettamisessa on käytetty jotain muuta koordinaatistoa. Tällöin koordinaatistojen akselien suunnat saattavat poiketa toisistaan huomattavasti.



Kuva 6: Inkrementaalinen liikekäsky [4, s. 215].

6.2 Robotin käyttö pinoamisessa

Yksi teollisuusrobottien tavallisimmista sovelluksista on erilaiset kokoonpano- ja kappaleenkäsittelytehtävät. Yksinkertainen tapa simuloida kappaleenkäsittelyä on työstökappaleiden pinoaminen. Kappaleet laitetaan ensin käsin pinoon operointipöydälle, josta robotti käy hakemassa imukuppitarttujalla yhden kappaleen kerrallaan ja vie sen uuteen pinoon. Tätä jatketaan, kunnes alkuperäisessä pinossa ei ole enää työstökappaleita jäljellä.

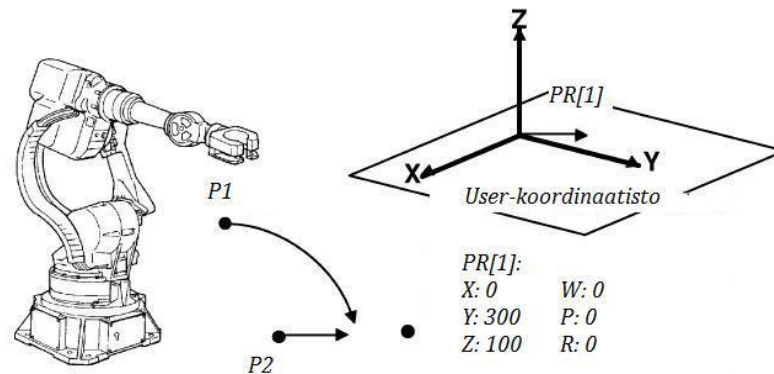
Pinoamisohjelmaan määritellään kaksi työkalun lähestymispistettä, joita käytetään pinojen sijainnin opettamiseen. Ohjelmassa käytetään yleiskäyttöistä rekisteriä ja asemarekisteriä. Ensimmäistä käytetään pitämään kirjaa alkuperäisessä pinossa jäljellä olevista kappaleista ja toisella pidetään kirjaa pinojen korkeuksista. Asemarekisterin paikkojen arvoja kasvatetaan ja vähennetään aina, kun alkuperäisestä pinosta haettu

kappale on viety uuteen pinoon. Myös alkuperäisen pinon kappaleiden määrää vähennetään aina, kun työkierto on suoritettu.

Ohjelmoinnin helpottamiseksi esimerkkiohjelmassa on käytetty ehdollisia hyppykäskyjä, joilla siirrytään ohjelman osasta toiseen, kun jokin ehto täyttyy. Tässä ohjelmassa ehtona käytetään yleiskäyttöiseen rekisteriin kohdistuvaa vertailukäskyä. Ehdossa tarkistetaan, onko alkuperäisessä pinossa enää jäljellä kappaleita. Se, mihin kohtaan ohjelmaa hyppykäskyllä siirrytään, määritetään nimiöillä (*label*). Hyppykäskyä käyttämällä saadaan luotua ohjelmaan silmukkarakenne, joka vähentää samankaltaisten liikekäskyjen määrää jonkin verran ja helpottaa näin ollen ohjelmointiurakkaa.

Hyppykäskyjen sijasta voidaan käyttää aliohjelmien kutsuja. Tämä tosin edellyttää, että kaikki nimiöillä merkityt kohdat ohjelmassa ohjelmoidaan erillisiksi ohjelmiksi. Aliohjelmat ovat käteviä etenkin silloin, jos halutaan käyttää jotain jo olemassa olevaa ohjelmaa tai sen osaa suoraan jossain toisessa ohjelmassa. Näin säästetään aikaa ja vaivaa, kun käytetään jo olemassa olevaa ohjelmakoodia.

Esimerkkiohjelmassa on käytetty offset-liikekäskyjä. Offset-liikekäsky siirtää robotin työkalun uuteen asemaan User-koordinaatistossa. Uusi asema määritetään suhteessa liikekäskyssä opetettuun asemaan asemarekisterin kautta. Uuden aseman lopulliset x-, y-, ja z-akselin koordinaatit siis lasketaan lisäämällä asemarekisterin sisältämät arvot liikekäskyssä opetetun aseman vastaaviin koordinaatteihin. Kuvan 7 esimerkissä robotti vie työkalun ensin opetettuun asemaan P1, josta liike jatkuu edelleen aseman P2 suuntaan. Liikkeen varsinainen päätepiste poikkeaa kuitenkin asemasta P2. Päätepiste sijaitsee 300 millimetriä käytössä olevan User-koordinaatiston y-akselin suuntaan ja 100 millimetriä z-akselin suuntaan asemasta P2. Päätepuoleen poikkeama on siis sama kuin asemarekisterin paikkaan 1 syötetty asematieto.



Kuva 7: Offset-liikekäsky [4, s. 211].

Harjoituksessa käytettävää robotin imukuppitarttujaa ohjaava magneettiventtiili (V1) on kytketty robotin sisäisen I/O:n osoitteeseen RO1. Osoitteeseen RI1 on kytketty imukuppitarttujan ejektorin painekeytkin, jota on käytetty esimerkkiohjelmassa varmistamaan, että tarttuja on saanut kunnollisen kontaktin työkappaleeseen.

Ohjelmassa tehdään robotilla liikkeitä, joissa robotin työkalu viedään lähelle muita esineitä. On selvää, että tällaisia liikkeitä opetettaessa on noudatettava erittäin suurta varovaisuutta ja käytettävä hidasta liikenopeutta. Näin vältetään mahdollisilta törmäyksiltä ja robotin mekaanisen rakenteen ja muiden esineiden vaurioittamiselta. Imukuppitarttuja joustaa kyllä jonkin verran z-akselin suuntaisesti, mutta silti liikeradat on testattava erityisen huolellisesti ennen niiden suorittamista suurella liikenopeudella.

7. Yhteenveto

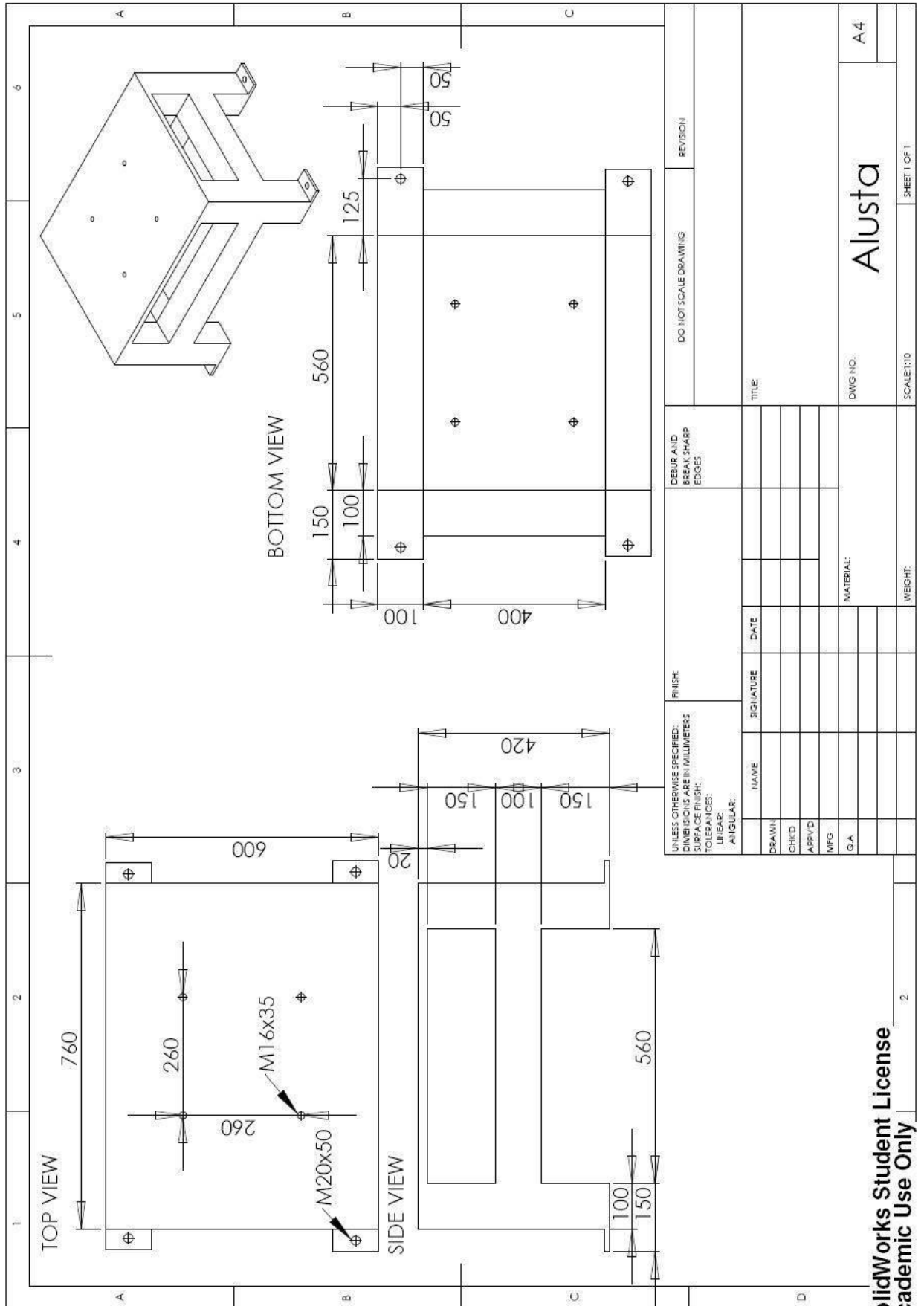
Edellä kuvatuilla suojaustoimenpiteillä saadaan parannettua robottijärjestelmän käyttöturvallisuutta huomattavasti. Kaikkien riskien vakavuus saadaan näin minimoitua siedettävälle tasolle. Esitellyt suojaustoimenpiteet vaikuttavat riskien toteutumisen todennäköisyyteen, eivätkä ne suinkaan poista riskejä kokonaan. Riskien toteutuessa niiden pahin mahdollinen seuraus on edelleen kuolema, joten robottia käytettäessä on edelleen oltava varovainen ja noudatettava laitteen turvallisesta käytöstä annettuja ohjeita. Jos suojarakenteena halutaan käyttää aidan sijasta luvussa 4 esiteltyjä antureita, on varauduttava lisäturvatoimiin, sillä yksinään niiden käyttöön sisältyy riskejä.

Robottijärjestelmän tehokas käyttö ja ohjelmointi perustuvat pienten käytännössä havaittujen asioiden kokonaisvaltaiseen hallitsemiseen. Rutiinomainen käyttö saavutetaan käytön ohessa tulevien erilaisten tilanteiden myötä. Vastaa tulevien ongelmien ratkaisut löytyvät usein yrityksen ja erehdyksen kautta.

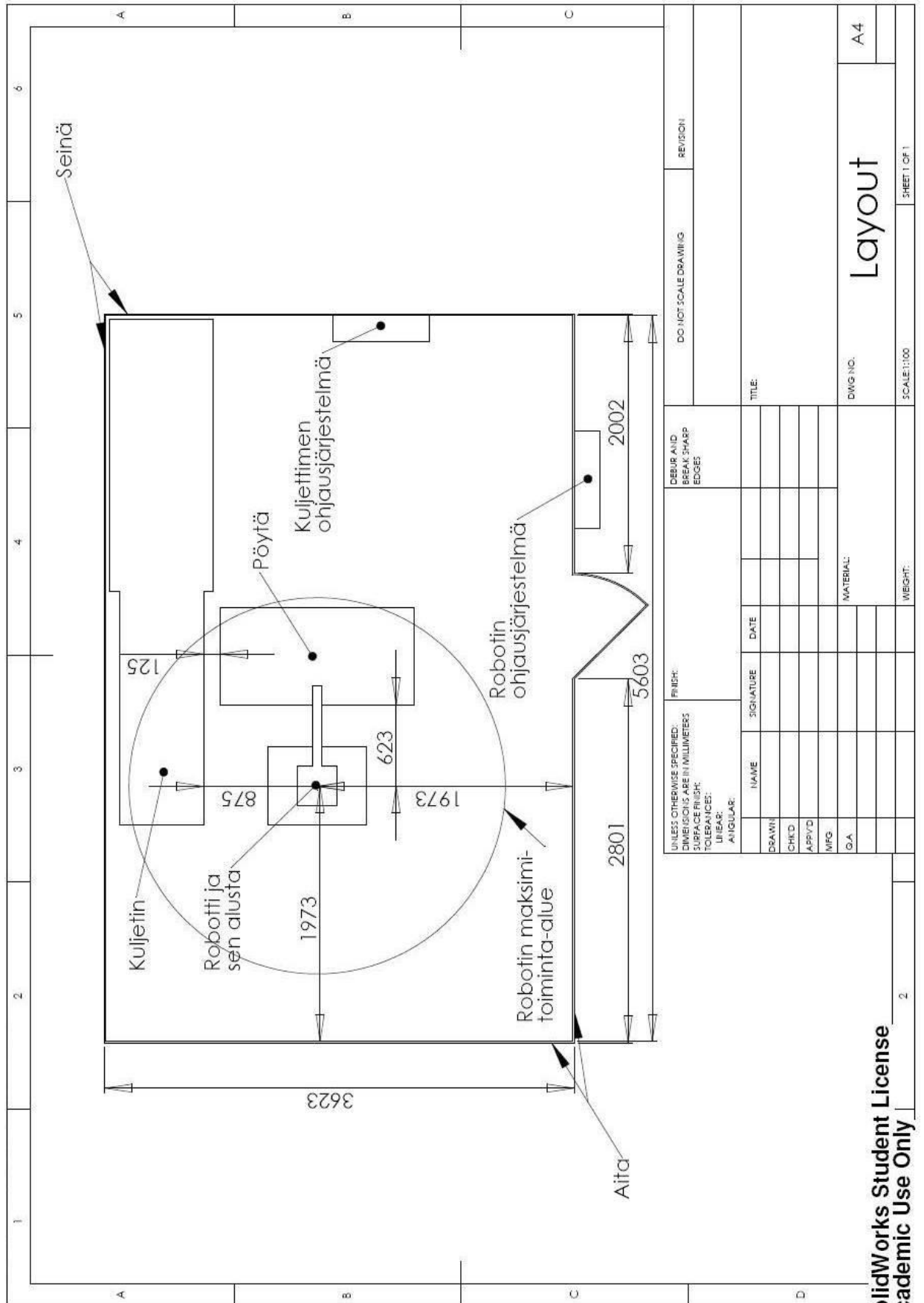
Lähteet

1. Suominen, Jyrki & Kuivanen, Risto. Robottiturvallisuus. Työsuojelurahaston julkaisuja A19. Tampere: Työsuojelurahasto. 1992.
2. Kuivanen, Risto (toim.). Robotiikka. Helsinki: Talentum Oyj. 1999.
3. Fanuc Robot M6iB Mechanical Unit Maintenance Manual. Robotin huolto-ohjekirja.
4. Fanuc Robot Series R-30iA Handling Tool Operator's Manual. Robotin käyttöohjekirja.
5. Keinänen, Toimi & Kärkkäinen, Pentti. Automaatiojärjestelmien hydraulikka ja pneumatiikka. Helsinki: WSOY. 2005.
6. Fonselius, Jaakko - Pekkola, Kari - Selosmaa, Seppo - Ström, Markku - Välimaa, Taisto. Automaatiolaitteet. Helsinki: Oy Edita Ab. 1996.
7. Laseretäisyysmittari. (WWW-dokumentti.) Wikipedia.
<<http://fi.wikipedia.org/wiki/Laseret%C3%A4isyysmittari>>. Luettu 28.3.2010.
8. Pilz SafetyEYE turvakamerat. (WWW-dokumentti.)
<http://www.murri.fi/pdf/P4luettelo_murriturvakamerat_murriturvatuotteet_2008Lop.pdf>. Luettu 20.6.2010.

Liite 1: Alustan malli



Liite 2: Robottijärjestelmän layout



Liite 3: Esimerkkiohjelmat

Robotin tarkkuus:

```
1: J P[1] 30% FINE
2: L P[2] 100mm/sec FINE
3: L P[3] 200mm/sec FINE INC
4: L P[4] 200mm/sec FINE INC
5: L P[5] 200mm/sec FINE INC
6: L P[6] 200mm/sec FINE INC
7: L P[1] 100mm/sec FINE
[END]
```

Robotin käyttö pinoamisessa (pinossa olevia kappaleita on kaksi ja niiden korkeus on 30 millimetriä):

```
1: PR[1] = PR[3]
2: PR[2] = PR[4]
3: R[8] = 2
4: L P[1] 200mm/sec FINE
5: LBL[1]
6: L P[2] 200mm/sec FINE
7: L P[3] 100mm/sec FINE Offset,PR[1]
8: RO[1:V1] = ON
9: WAIT RI[1] = ON
10: L P[2] 100mm/sec FINE
11: L P[4] 200mm/sec FINE
12: L P[5] 100mm/sec FINE Offset,PR[2]
13: RO[1:V1] = OFF
14: L P[4] 100mm/sec FINE
15: PR[1,3] = PR[1,3] - 30
16: PR[2,3] = PR[2,3] + 30
17: R[8] = R[8] - 1
18: IF R[8] > 0, JMP LBL[1]
19: L P[1] 200mm/sec FINE
[END]
```