

# **Teollisuusrobotin työkalusuunnittelu**

**Sunrob Robotics Oy**

LAB-ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

2023

Juho Tikka

## Tiivistelmä

Tekijä(t) Juho Tikka	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2023
	Sivumäärä 31	
Työn nimi <b>Teollisuusrobotin työkalusuunnittelu</b> Sunrob Robotics Oy		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK), konetekniikan koulutus		
Toimeksiantajaorganisaatio Sunrob Robotics Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Luotettavasti toimiva robotin työkalu on keskeinen osa toimivaa robottilaitteistoa. Opinnäytetyössä suunniteltiin teollisuusrobotin työkalun prototyyppi pick &amp; place -sovellukseen osana robottisolun tuotekehitysprojektia. Työ tehtiin Sunrob Robotics Oy:n toimeksiannosta. Robottisolun työvaiheiden vähenemisen seurauksena avautui mahdollisuuksia pienentää läpimenoaikaa ja parantaa solun tehokkuutta.</p> <p>Suunnittelussa sovellettiin alan kirjallisuudessa esitettyjä systemaattisia suunnittelu-prosessimalleja. Työssä mitoitettiin työkalun toimilaitteet ja suunniteltiin mekaaninen rakenne. Automaatiosuunnittelussa keskityttiin ennaltaehkäisemään robotin törmääminen.</p> <p>Työn tuloksena oli toimiva prototyyppi, joka voitiin toimittaa tuotantokäyttöön. Työtä voidaan jatkossa hyödyntää robottien työkalujen suunnittelussa soveltamalla työn aikana toimiviksi havaittuja ratkaisuja.</p>		
Asiasanat teollisuusrobotti, tarttuja, suunnittelu		

## Abstract

Author(s) Juho Tikka	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2023
	Number of Pages 31	
Title of Publication <b>Industrial robot end-effector design</b> Sunrob Robotics Inc.		
Degree, Field of Study Engineer (UAS), Mechanical Engineering		
Organisation of the client Sunrob Robotics Inc.		
<p>Abstract</p> <p>A robust and reliable end-effector is an essential part of a well-functioning industrial robot system. The objective of this thesis was to design an industrial robot gripper prototype for pick &amp; place application as a part of a robot cell development project. The work was commissioned by Sunrob Robotics Inc. As some functionalities of the robot cell had become obsolete, new opportunities arose to reduce the cycle time and increase the overall effectiveness of the system.</p> <p>Systematic approach and design practices described in the literature were implemented in the design process. The work included selection of the tool's actuators as well as mechanical design. Furthermore, ways to prevent robot collisions were studied and developed.</p> <p>The result was a functioning prototype that met the requirements and was delivered for production use. The results of the work can be used in the future by applying different solutions and methods that were found practical during the design and testing.</p>		
Keywords industrial robot, gripper, design		

## Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	Teollisuusrobotit.....	2
2.1	Määritelmä.....	2
2.2	Luokittelu .....	3
2.3	Tarttumat .....	8
3	Tarttumisen suunnittelu .....	12
3.1	Määrittelyvaihe .....	12
3.2	Esisuunnittelu- ja konseptivaihe.....	13
3.3	Suunnittelu .....	13
4	Robotin ylikuormitussuojaus .....	15
4.1	Törmäykset.....	15
4.2	Törmäystunnistimet .....	15
4.3	KUKA-robottien törmäystunnistus ja momentinrajoitin .....	16
5	Automaatiokomponentit .....	18
5.1	Lähestymiskytkimet .....	18
5.2	Optiset anturit .....	18
6	Implementaatio .....	21
6.1	Määrittelyvaihe ja esisuunnittelu .....	21
6.2	Konseptin valinta ja kehittäminen .....	22
6.3	Komponenttien mitoitus .....	23
6.4	Detaljisuunnittelu ja viimeistely .....	24
6.5	Automaatiosuunnittelu .....	25
6.6	Törmäystunnistus .....	26
7	Yhteenveto ja pohdinta .....	28
	Lähteet .....	30

## Lyhenteet ja termit

N	Newton	voiman yksikkö
kg	kilogramma	massan yksikkö
mm	millimetri	pituuden yksikkö
MPa	Megapascal	paineen yksikkö

aktuaattori Robotin kinemaattisen ketjun viimeinen osa, johon useimmiten on kiinnitetty robotin työkalu

effektori Robotin työkalu

EOAT End-of-arm-tool, robotin työkalu

end-effector Robotin työkalu

FEM Finite element method, elementtimenetelmä

ISO International Organisation for Standardization, standardisointijärjestö

KRL KUKA Robot Language, ohjelmointikieli

Pick & Place Robottisovellus, jossa robotti vie työkappaleita paikasta toiseen

PLA Polylactic acid, polymaitohappo. Polymeeri, jota käytetään muun muassa 3D-tulostuksen raaka-aineena

PLC Programmable logic controller, automaatioprosessin ohjaukseen käytetty tietokone

KR C4 Robottiohjaimen malli

SCARA Selective Compliance Assembly Robot Arm, robottityyppi

## 1 Johdanto

Sunrob Robotics Oy on vuonna 2006 perustettu robotiikkayritys, jonka pääkonttori sijaitsee Lappeenrannassa. Sunrob tuottaa robotiikkaratkaisuja useille eri teollisuudenaloille. Sunrob on kehittänyt robottisoluja ja laitteistoja muun muassa kokoonpanoon, robottijärsintään, pakkaukseen ja lavaukseen.

Opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella robotin työkalu pick & place -sovellukseen osana tuotekehitysprojektia. Robottisolun nykyisessä työkalussa osa komponenteista alkaa olla elinkaarensa päässä, ja tarttujalla olisi edessään suurempi huolto. Tarttujassa on myös toimintoja, joita ei enää käytetä. Muuttuneiden vaatimusten takia robotin työkalun uusiminen on perusteltua. Uudella työkalulla pyritään samalla parantamaan prosessin nopeutta ja laatua.

Robottisolun toiminnan kannalta on tärkeää, että robotti ja sen työkalu toimivat tehokkaasti ja luotettavasti. Tässä opinnäytetyössä esitellään yleisimmät teollisuusrobotit ja työkalujen toimintaperiaatteet. Lisäksi avataan alan kirjallisuudessa esitettyä robottien työkalujen suunnitteluprosessia ja työkalusuunnittelua ohjaavia periaatteita.

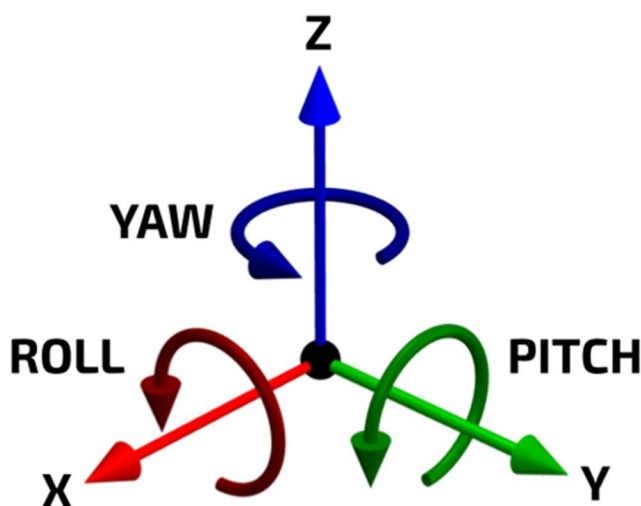
## 2 Teollisuusrobotit

### 2.1 Määritelmä

Teollisuusrobotteja käytetään yleensä tehtävissä, joita pidetään ihmisille liian raskaina, vaarallisina, paljon toistoa vaativina tai muuten epämiellyttävinä teollisen tuotannon tehtävinä. Lisäksi teollisuusrobottien käyttämisellä voidaan tavoitella tuotannon tehostumista ja laadun paranemista. Tuotannon tehostuminen perustuu siihen, että robotti kykenee suoriutumaan tehtävästä nopeammin kuin samaa työtä tekevä ihminen, sekä tekemään yhden työvuoron sijaan useamman työvuoron päivittäin. Usein kuitenkin tarvitaan ihmistä valvomaan robotin työskentelyä. (Hänninen 2022, 99—101.)

ISO 8373 -standardi määrittelee teollisuusrobotin seuraavasti: *Teollisuusrobotti on automaattisesti ohjattava, uudelleenohjelmoitava ja monikäyttöinen manipulaattori, joka on ohjelmoitavissa vähintään kolmelle akselille.*

Standardin määritelmässä akselilla tarkoitetaan robotin aktuaattorin vapausasteita (kuvio 1), jotka voivat olla lineaarisia tai pyöriviä (Hänninen 2022, 37). Teollisuusrobotti on siis erilaisiin teollisen tuotannon tehtäviin sovellettava kone, joka siirtää työkalun kiinnityslaippaa ohjelmoitua liikerataa pitkin (Kuivanen 1999, 13).



Kuvio 1. Kuusi vapausastetta (Energid 2019)

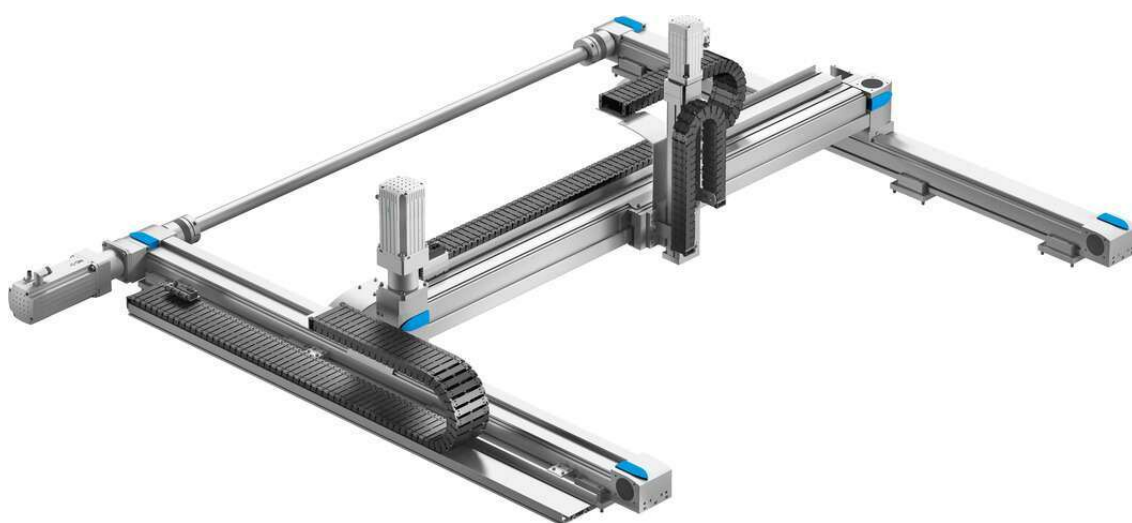
Vapausasteilla tarkoitetaan mahdollisia liikesuuntia, joissa robotin aktuaattori eli työkalulaippa voi liikkua. Kuviossa 1 on merkitty translaatiosuunnat, eli X-, Y- ja Z-akselit järjestyksessä punaisella, vihreällä ja sinisellä. Eräs yksinkertaistettu menetelmä työkalulaipan asennon esitykseen on *roll*-, *pitch*- ja *yaw*-kulmat, jotka useimmiten esitetään käyttäjärajapinnassa asteina (Kuivanen 1999, 26). KUKA KR C4 -robottiohjaimen käyttöliittymässä tätä esitysmuotoa käytetään käänteisessä järjestyksessä, missä rotaatiosuunnat on nimetty kirjaimilla A, B ja C. Toisin sanoen A kiertää Z-akselin ympäri, B kiertää Y-akselin ympäri ja C kiertää X-akselin ympäri.

## 2.2 Luokittelu

ISO 8373 jaottelee teollisuusrobotit rakenteenmukaisiin kategorioihin. Standardi sisältää omana lukunaan myös erilaiset liikkuvat ja kävelevät robotit, sekä cobotit (eng. *collaboration robot*). Seuraavassa on lyhyesti esitelty perinteiset teollisuudessa käytetyt robotit ISO 8373 määritelmän mukaan:

**Suorakulmaiset robotit, lineaarirobotit, portaalirobotit (eng. rectangular robot, cartesian robot, gantry robot, linear robot)**

Manipulaattori, jossa on kolme lineaarisen vapausasteen sallivaa niveltä (eng. prismatic joint) (kuva 1), ja jonka akselit ovat karteesisen koordinaatiston suuntaisia (X, Y ja Z) (ISO 8373). Koska liikkeet ovat lineaarisia, portaalirobotit pystyvät useimmiten toistamaan liikkeitä tarkasti. Portaalirobotit voidaan suhteellisen nopeasti uudelleenohjelmoida, mikäli käsiteltävä tuote vaihtuu. Portaalirobotit ovat usein myös hankintahinnaltaan edullisempia kuin käsivarsirobotit. (Macron Dynamics, 2003.)

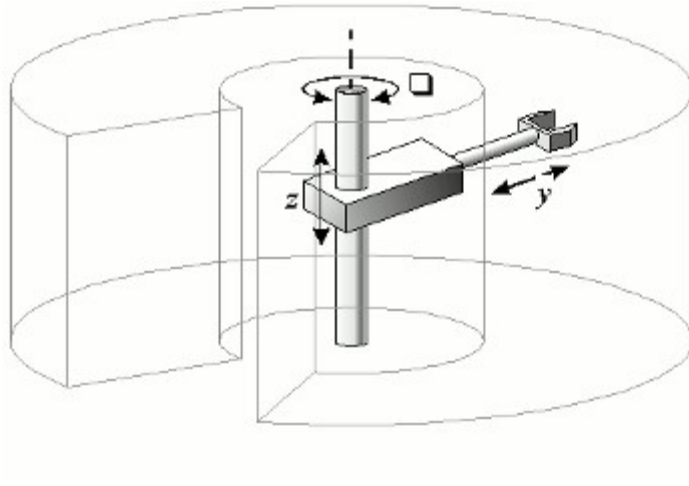


Kuva 1. Festo YXCR -portaalirobotti (Festo)



### Sylinterirobotti (eng. cylindrical robot)

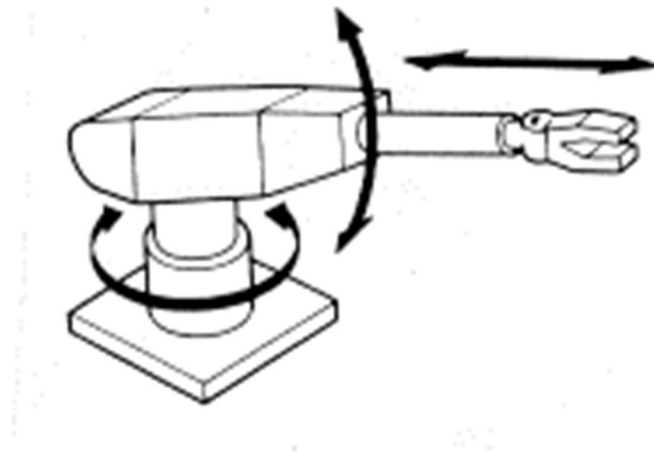
Manipulaattori, jossa on vähintään yksi pyörivän liikkeen salliva nivel (eng. rotary joint) ja yksi lineaariliikkeen salliva nivel (eng. prismatic joint), ja jonka akselit toimivat sylinterikoordinaatistossa (kuva 2). (ISO 8373)



Kuva 2. Sylinterirobotin periaatekuva (All On Robots)

### Napakoordinaatistorobotti (eng. polar robot)

Sisältää vähintään kaksi pyörivän liikkeen sallivaa ja yhden lineaariliikkeen sallivan nivelen (kuva 3). Robotin akselit toimivat polaarisisessä koordinaatistossa. (ISO 8373)



Kuva 3. Napakoordinaatistorobotin periaatekuva (Thnet)

## SCARA-robotti

SCARA-robotilla (Selective Compliance Assembly Robot Arm (KUKA 2023b, Kuivanen 1999, 16.)) on vähintään neljä vapausastetta ja se on suunniteltu pystysuoraan asennus- ja kokoamistyöhön (Hänninen 2022, 121), laadunvalvontaan ja pakkaussovelluksiin (Fanuc 2023). SCARA-robottien (kuva 4) tilantarve on pieni ja ne ovat nopeita ja tarkkoja (Fanuc 2023, KUKA 2023b).



Kuva 4. Fanuc SR-3iA -SCARA-robotti (FANUC 2023)

## Rinnakkaisrakenteiset robotit (eng. parallel link robot)

Rinnakkaisrakenteiset eli delta-robotit (kuva 5) muodostuvat kolmesta liikeakselista, jotka ovat liittyneet nivelakselilla alustaan. Ne kykenevät nopeisiin liikkeisiin, mutta niissä on usein suhteellisen rajoittunut ulottuvuus. (Hänninen 2022, 125.)



Kuva 5. Igus DLE -delta-robotti (igus® GmbH 2022)

**Kiertyvänivelinen robotti (eng. articulated robot)**

Kiertyvänivelinen robotti (kuva 6) muistuttaa rakenteeltaan ihmisen käsivartta. Sillä on yleensä kuusi vapausastetta, ja sen kaikki nivelet ovat kiertyviä. Tästä johtuen se on monipuolinen, mukautuva ja ulottuva työalueensa sisällä. Useimmat teollisuusrobotit perustuvat kiertyvänivelisen robotin rakenteeseen. (Hänninen 2022, 123.)

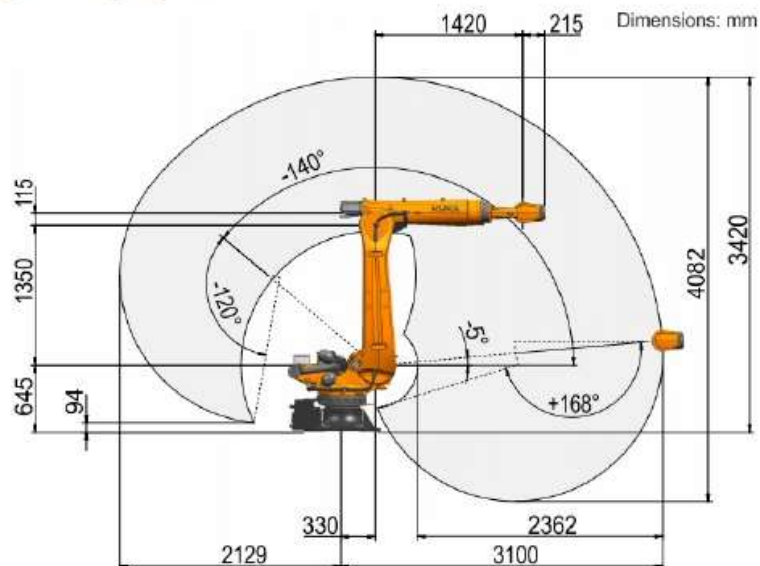


Kuva 6. KUKA KR 150 R3100 -kuusiakselinen robotti (KUKA 2023a)

Tässä työssä käytettävä robotti on KUKA KR 150 R3100-2. Robotissa on kuusi akselia (A1—A6), joita kaikkia käyttää servo-ohjattu sähkömoottori. Yhdessä akseleista (A2) on sähkömoottorin lisäksi hydraulinen sylinteri.

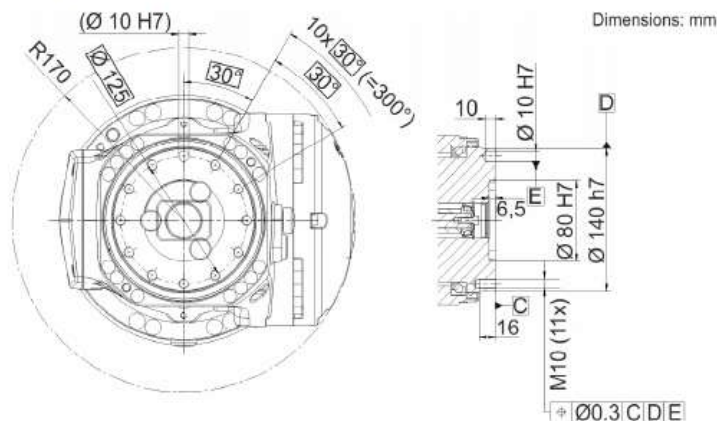
Robotin nimellinen hyötykuorma on 150 kg ja nimellinen toimintasäde 3100 mm (kuva 7). Robotin käsivarren päässä on aktuaattorina laippa (kuva 8), jolla on kuusi vapausastetta.

### Workspace graphic



Kuva 7. KUKA KR 150 R3100-2 -robotin työalue (eng. envelope) (KUKA 2023a)

### Mounting flange



Kuva 8. Robotin työkalulaippa (KUKA 2023a)

Työkalulaipassa on 12 kpl reikiä, joista 11:ta on M10 sisäkierre. Näin laippaan voidaan kiinnittää robotin työkalu M10 ruuveilla.

## 2.3 Tarttijat

Robotin työkalu on käsivarren laippaan kiinnitetty osa tai laite, jota robotti siirtää paikasta toiseen. Tavallisin robotin työkalu on työkappaleita poimiva tarrain. Työkalu voi myös olla johonkin prosessiin osallistuva laite, esimerkiksi hitsauspistooli, maaliruisku tai liimasuutin. Työkalu voi myös olla näiden kahden kombinaatio. (Kuivanen 1999, 60.)

### **Pneumaattiset tarttijat**

Paineilma on yleisin robottien työkalujen voimanlähde. Paineilmakäyttöiset toimilaitteet ovat luotettavia ja helposti säädettäviä. Paineilmaa on myös usein helposti saatavilla teollisuusympäristössä. (Kurfess 2005, 11-8.)

Paineilmatoimilaitteita käytetään useimmiten solenoidiohjatulla sähköisillä venttiileillä. Venttiilityypin valinta ja pneumaattisen järjestelmän suunnittelu on tehtävä siten, että sähköjen katkeamisen tai turvapiirin aktivoitumisen seurauksena työkappale ei pääse putoamaan tarttujasta. Tähän tarkoitukseen voidaan valita tarpeen mukaan jousipalautteinen venttiili, kolmiasentoinen venttiili suljetulla keskiasennolla tai neliasentoinen venttiili. Kolmiasentoisella venttiilillä, jossa on avoin keskiasento, keskiasennon tulisi sulkea tarttujan leuat. (Kurfess 2005, 11-8.)

### **Alipainetarraimet**

Alipainetta voidaan käyttää, kun työkappaleen pinta on suhteellisen tasainen. Alipaine voidaan luoda alipainepumpulla tai paineilmakäyttöisen Venturi-ilmiötä hyödyntävän ejektorin avulla. (Kurfess 2005, 11-8.)

### **Hydrauliset tarttijat**

Hydraulisia toimilaitteita käytetään, kun tarvitaan suuria voimia. Hydraulisessa järjestelmässä paine on paljon suurempi kuin pneumaattisessa, ja toimilaitteille saavutetaan parempi teho-paino-suhde. Hydraulinen järjestelmä on kuitenkin teknisesti monimutkaisempi, kalliimpi sekä vaatii enemmän huoltoa kuin pneumaattinen tai sähköinen järjestelmä. Hydraulisten järjestelmien viat liittyvät yleensä öljyvuotoihin. (Kurfess 2005, 11-8; Kuivanen 1999, 94; Hänninen 2022, 46.)

### **Sähköiset tarraimet**

Sähköiset komponentit, kuten moottorit, sähkömagneetit ja solenoidit, ovat suhteellisen painavia, mikä rajoittaa niiden käyttöä pienemmissä roboteissa. Sähkökäyttöisillä toimilaitteilla on lisäksi huomioitava kaapelien aiheuttama lisäkuorma. Useimmiten sähkötoimisissa tarttujissa käytetään toimilaitteena servo-ohjattua sähkömoottoria. (Kurfess 2005, 11-9.)

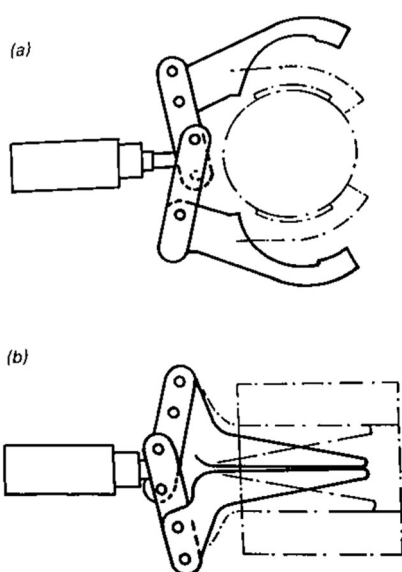
## Magneettiset tarraimet

Magneettisia tarraimia voidaan käyttää ferromagneettisten työkappaleiden käsittelyyn. Haittapuolena on suuri paino, mikäli käytetään sähkömagneetteja. Magneettien käyttö asettaa myös rajoituksia kappaleiden paikoituksessa. (Kurfess 2005, 11-9.)

## Mekaanisen liikkeen mukainen ryhmittely

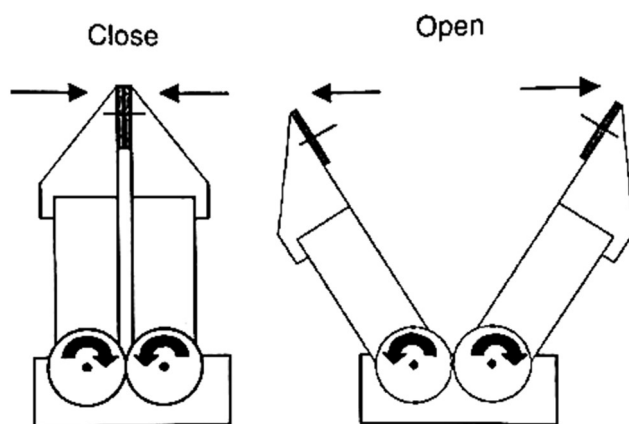
Tarttumat voidaan ryhmitellä tarttuvan liikkeen mukaan (Kuivanen 1999, 60):

- avautuvat ja sulkeutuvat tarttumat, joilla tartutaan eri kappaleisiin ulko- tai sisäpuolisella otteella (kuva 9)



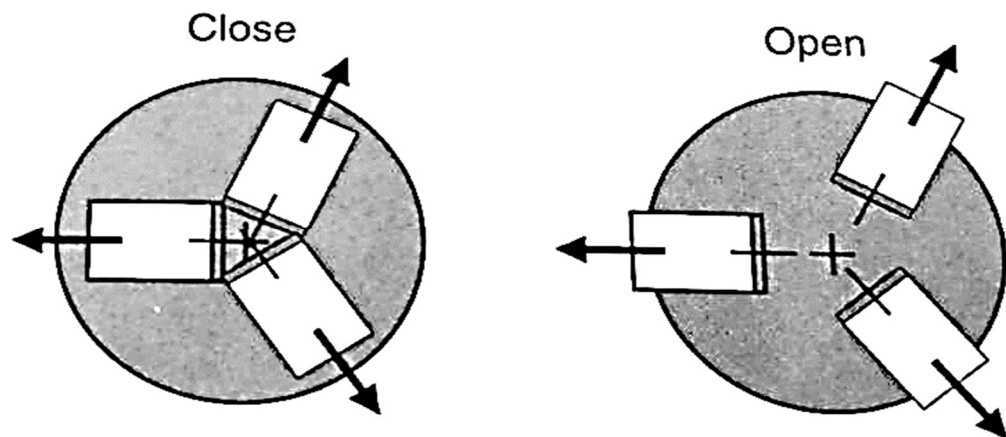
Kuva 9. Sulkeutuva tarrain (a) ja avautuva tarrain (b) (Pham & Heginbotham 1986, 5)

- kiertyväsormiset ja rinnakkaisilla liikkuvilla sormilla varustetut tarttumat (kuva 10)



Kuva 10. Kiertyväsorminen tarttuja (Kurfess 2005, 11-10)

- liikkuvien sormien lukumäärän mukaan, kaksi-, kolmi- ja useampisormiset tarttijat (kuva 11)



Kuva 11. Kolmisormisen tarttujan periaatekuva (Kurfess 2005, 11-9)

- jäykät ja joustavat tarraimet (kuva 12)



Kuva 12. Joustava tarraim (Universal Robots 2019)

- kappalekohtaiset tai yleistarraimet, joilla voidaan tarttua useammanlaisiin kappaleisiin
- keskittävät tarraimet, jotka siirtävät kappaletta otetta muodostaessaan vakioasemaan
- anturoidut tarraimet, esimerkiksi servo-ohjatuilla tarraimilla sormet saadaan ohjattua haluttuun sormien väliseen etäisyyteen; yksittäisellä sormella voi olla oma toimilaite (kuva 13).



Kuva 13. Robotiq 2F-85 -servo-ohjattu tarraim (Universal Robots 2023)

Kuvan 13 tarraimessa on kaksi rinnakkaista servo-ohjattua sormea. Sillä voidaan tarttua kappaleisiin tarpeen mukaan sisä- tai ulkopuolelta. Se toimii myös keskittävänä, eli paikoittaa työkappaleen.



### 3 Tarttujan suunnittelu

#### 3.1 Määrittelyvaihe

Robotin ohella myös robotin effectori eli työkalu on tärkeä ja kriittinen osa toimivaa robottisolua. Työkalun määrittelyssä tärkeitä huomioonotettavia asioita ovat muun muassa robotin hyötykuorma, tartuntamenetelmä ja kunnossapidon näkökohdat. Työkalun suunnittelussa on otettava huomioon automaatioprosessi kokonaisuutena, jonka osa työkalu on. Yleisesti työkalun tulee olla rakenteeltaan yksinkertainen ja ulkoisilta mitoiltaan sekä massaltaan mahdollisimman pieni – painava työkalu pienentää robotin hyötykuormaa. (Kurfess 2005, 11-1—11-5; Kuivanen 1999; 65, 93.)

Työkalun määrittelyn apuna voidaan käyttää esimerkiksi seuraavanlaisia kysymyksiä (Kurfess 2005, 11-3):

1. Mikä on työkappaleiden muoto ja paino?
2. Kuinka samankaltaisia työkappaleet ovat ja mitkä ovat mittatoleranssit?
3. Millainen on työkappaleiden pinnanlaatu? Mikä on kitkakerroin?
4. Missä asennossa työkappaleet noudetaan ja paikoitetaan?
5. Mikä on noudettavien ja paikoitettavien työkappaleiden välinen etäisyys?
6. Mihin työkappaleiden noutoon ja paikoitukseen liittyviin etäisyyksiin voidaan vaikuttaa?
7. Mitkä ovat vaatimukset työkappaleiden paikoitukselle ja mitkä ovat toleranssit?
8. Kuinka suuri on tarvittava tartuntavoima ja mikä on suurin sallittu voima?
9. Tarvitaanko lisälaitteita?
10. Tarvitseeko työkalun rakenteen olla joustava?
11. Asettaako ympäristö lisävaatimuksia: onko ympäristö pölyinen tai onko tilassa korroosiota aiheuttavia aineita? Vaaditaanko puhtautta ja helposti puhdistettavia pintoja (esimerkiksi elintarvikkeiden ja puolijohteiden valmistus)?
12. Voidaanko prosessiin tai käsiteltävään tuotteeseen (työkappale) vaikuttaa? Voidaanko tuote suunnitella uudelleen vastaamaan paremmin automaattisen käsittelyn vaatimuksia? (Kuivanen 1999, 66.)

Reunaehdot ja työkalun suunnittelulle aiheuttavat erilaiset työkappaleiden koon, muodon ja massan muutokset, samoin kappaleiden mahdollisesti epämääräinen asema. Prosessiin liittyvät suunnitteluongelmat voidaan jakaa ympäristön aiheuttamiin sekä robotin tehtävään liittyviin, mitkä asettavat työkalulle toiminnallisia ja rakenteellisia vaatimuksia. Myös taloudelliset näkökohdat on otettava huomioon. (Kuivanen 1999, 66.)

### 3.2 Esisuunnittelu- ja konseptivaihe

Työkalun konseptisuunnittelussa automaatioprosessia analysoidaan työkalun kannalta ja etsitään erilaisia periaateratkaisuja, joiden pohjalta luonnostellaan eri mahdollisuuksia. Kappaleen koko, muoto ja materiaali on otettava huomioon, kun määritellään tartunta-pisteet, voimanvälitys, liikealue ja anturien liittämismahdollisuudet. (Kuivanen 1999, 67.)

Tässä vaiheessa on myös huomioitava robotin hyötykuorma. Teollisuusrobottien valmistajat ilmoittavat suurimmat sallitut hyötykuormat eri roboteille. Työkalun ja työkappaleen massan lisäksi on tärkeä huomioida erilaiset momenttikuormat, mukaan lukien kiihtyvyydestä ja inertiasta aiheutuvat voimat. Työkalun ja työkappaleen inertian huomioiminen on erityisen tärkeää SCARA-roboteilla ja portaaliroboteilla. Kuormitukset asettavat myös vaatimuksia robotin laipan ja työkalun väliselle liitokselle. (Kurfess 2005, 11-5—11-6.)

### 3.3 Suunnittelu

#### **Kehittelyvaihe ja detaljisuunnittelu**

Suunnittelu voidaan jakaa kahteen vaiheeseen: kehittelyyn ja viimeistelyyn. Kehittelyvaiheessa jalostetaan edelleen esisuunnitteluvaiheessa syntyneitä konsepteja. Paras konsepti valitaan ja sille suunnitellaan tekniset yksityiskohdat (detaljisuunnittelu) sekä mitoitetaan tarvittavat komponentit. (Kuivanen 1999, 70; Jokinen 2010, 89.)

Suunnittelun tavoitteena on turvallisen ja luotettavan tuotteen kehittäminen taloudellisesti. Suunnittelun tulosta arvioidaan teknisten ja taloudellisten kriteerien mukaan. Teknisten kriteerien pohjana on turvallisuustekijöiden lisäksi määrittelyvaiheessa asetetut vaatimukset. Suunnitteluratkaisujen arvioinnin apuna voidaan käyttää simulointi-ohjelmistoja. Ratkaisun toimivuus voidaan lisäksi varmistaa kokeellisesti. Esimerkiksi anturien tarkkuutta ja toimintaa voidaan testata käyttöolosuhteita vastaavassa ympäristössä. (Kuivanen 1999, 71—72; Jokinen 2010, 90.)

Mahdollisten heikkojen kohtien poistaminen tapahtuu ideoimalla uusia ratkaisuja ja suunnittelemalla kyseiset osat uudestaan. Tarvittaessa kehitettävä konsepti hylätään kokonaan ja suunnittelu aloitetaan uudelleen toisella konseptillä. Koska heikkojen kohtien poistamiskierroksia voidaan joutua tekemään useita, suunnittelu on tässä vaiheessa vielä karkeaa. Suunnittelussa keskitytään yksityiskohtiin vain sen verran, kuin on teknisen ja taloudellisen arvioinnin kannalta välttämätöntä. (Jokinen 2010, 90—91.)

Kun heikot kohdat on saatu poistettua, työ jatkuu detaljisuunnittelulla, jossa tuotteelle suunnitellaan tekniset yksityiskohdat ja mitoitetaan rakenteet ja komponentit tarkemmin. Detaljisuunnitteluvaiheessa etsitään kohteita, joiden optimointi vielä oleellisesti parantaa laitteen arvoa. Konstruktiolle tehdään luotettavuus- ja turvallisuusanalyysi, jonka jälkeen siirrytään viimeistelyvaiheeseen. (Kuivanen 1999, 70; Jokinen 2010, 91.)

### **Viimeistelyvaihe**

Viimeistelyvaiheessa päätetään lopullisesti käytettävistä raaka-aineista, valmistusmenetelmistä ja toleransseista, minkä jälkeen laaditaan työpiirustukset. Myös viimeistelyssä on tärkeää huomioida määrittelyvaiheessa esitetyt reunaehdot. (Kuivanen 1999, 71; Jokinen 2010, 96.)

Työkalun tulee useimmiten olla kevyt, joten mahdollisuuksien mukaan rakenteita voidaan valmistaa muovista tai alumiinista teräksen sijaan. Rakenteita voidaan myös keventää reiättämällä. Rakenteen tulee kuitenkin olla riittävän jäykkä sekä kestää kulutusta. Huoltoa ja kunnossapitoa voidaan helpottaa modulaarisella tuoterakenteella. (Kuivanen 1999, 71.)

Viimeistelyssä on huomioitava anturien ja johtojen suojaaminen. Signaaleja joudutaan usein siirtämään nivelten yli ja liikkuvien osien välillä, jolloin johdot tulee suojata mekaaniselta kulumiselta ja sähköisiltä häiriöiltä. Johtojen tulee olla helposti vaihdettavissa ja taivutussäteiden tulee olla riittävän suuria. (Kuivanen 1999, 71.)

Osa- ja kokoonpanopiirustusten lisäksi viimeistelyssä laaditaan asennus-, kuljetus- ja käyttöohjeet. Asennukseen ja kuljetukseen liittyviin seikkoihin vaikuttaa muun muassa se, viedäänkö laite käyttöpaikalle osina, osakokoonpanoina vai täysin kokoonpantuna. Suunnitelman viimeistelyn jälkeen työkalu valmistetaan, testataan ja otetaan käyttöön. (Jokinen 2010, 96; Kuivanen 1999, 71—72.)

## 4 Robotin ylikuormitussuojaus

### 4.1 Törmäykset

Robottilaitteistojen ohjelmoinnin, testaamisen ja käyttöönoton aikana robotti saattaa joutua useampaankin törmäykseen (Robotics World 2003; Monkman ym. 2007, 396). Robotti saattaa ohjelmoinnin aikana poiketa oletetulta polultaan, ja osua oman työalueensa ulkopuoliseen esteeseen tai toiseen koneeseen (DeGaspari 2003). Törmäys voi myös johtua odottamattomasta muutoksesta robotin työalueella, ohjelmavirheestä tai jonkin laitteiston osan vikaantumisesta (Monkman ym. 2007, 397). Käyttöönoton jälkeen, tuotannon ollessa käynnissä, törmäys saattaa tapahtua esimerkiksi huonosti paikoitetun työkappaleen kanssa (DeGaspari 2003).

Törmäystilanteessa robotin servo-ohjaimet lisäävät moottoreille syötettävää virtaa, lisäten moottorien vääntömomenttia. Robotti pyrkii näin pääsemään ohi esteestä ja jatkamaan liikettä ohjelmoidulla radallaan. Lisääntynyt vääntö saattaa edelleen vaurioittaa robottia, työkalua tai laitetta tai rakennetta, johon robotti törmäsi. (KUKA 2022.)

Vaikka useimmat törmäykset ovat pieniä, törmäyksissä on aina olemassa riski robotin tai jonkin muun laitteiston osan rikkoutumiseen. Työkalun osat voivat olla kalliita ja tämän lisäksi aikaa kuluu varaosien tilaamiseen ja vaihtoon. Tuotannon aikana tapahtuvat törmäykset aiheuttavat useimmiten myös prosessin keskeytymisen. (DeGaspari 2003; Robotics World 2003; Monkman ym. 2007, 396.)

### 4.2 Törmäystunnistimet

Robotin työkalua ja työkappaletta voidaan suojata törmäystilanteissa erilaisilla suojausmenetelmillä (Robotics World 2003). Suojalaitteen tarkoitus on joko ennaltaehkäistä törmäykset kokonaan tai törmäyksen tapahtuessa estää työkalun tai työkappaleen rikkoutuminen (Monkman ym. 2007, 396; Kurfess 2005, 11-17).

Törmäyksen tunnistava suojalaite voidaan asettaa tunnistamaan normaalin työkierron aikana esiintyvät kuormat (Robotics World 2003). Törmäystunnistin voidaan sijoittaa esimerkiksi robotin laipan ja työkalun väliin (Kurfess 2005, 11-17). Kun törmäystunnistimelle välittyvä kuorma ylittää asetetun, törmäystunnistin absorboi törmäysenergian ja lähettää signaalin robotin ohjaimelle, jolloin robotti joko pysäytetään tai automaattisesti ohjataan pois törmäyksestä ennen kuin vaurioita ehtii tapahtua (Kurfess 2005, 11-17; Robotics World 2003). Operaattori voi esteen poistettuaan käynnistää robotin ohjelman, jolloin robotti palaa jatkamaan työkiertoaan. (Robotics World 2003.)

Törmäysenergian absorboivissa tunnistimissa on otettava huomioon, että robotti ei välttämättä pysähdy välittömästi. Robotin reagointinopeus riippuu robotin ja työkalun liikkuvan massan inertiasta, robotin ohjaimen vasteajasta sekä robotin moottoreiden mekaniikasta. (Monkman ym. 2007, 397.)

Erilaisia lähestymiskytkimiä voidaan hyödyntää törmäysten välttämiseksi, kun otetaan huomioon niiden komponenttikohtaiset rajoitteet. Lähestymiskytkimet tyypillisesti havaitsevat kappaleita vain yhdessä suunnassa. (Kurfess 2005, 11-17.)

Törmäystunnistin voi olla myös passiivinen laite, joka hyödyntää paineilmaa tai mekaanisia jousia. Törmäystunnistimen osuessa esteeseen, laite avaa kytkimen, joka välittää digitaalisen signaalin robotin ohjaimelle. Vaihtoehtoisesti kytkin on osa järjestelmän turvapiiriä. (Kurfess 2005, 11-17.)

#### 4.3 KUKA-robottien törmäystunnistus ja momentinrajoitin

Useissa teollisuusroboteissa on sisäänrakennettuja ominaisuuksia, joilla vahinkoja törmäystilanteissa voidaan välttää tai ainakin minimoida. Näissä menetelmissä on huomioitava, että järjestelmä reagoi vasta, kun kontakti on tapahtunut. Robotin nopeus törmäyshetkellä yhdessä robotin liikkuvien osien ja työkalun yhteenlasketun inertian kanssa vaikuttavat siihen, kuinka nopeasti robotti kontaktitilanteessa pystyy pysähtymään (Monkman ym. 2007, 397). Paikoissa, joissa törmäyksen riski on suuri, on siksi pienennettävä robotin nopeutta, jotta liike-energia törmäyksessä olisi mahdollisimman pieni.

Saksalaisen KUKAn KR C4 -ohjaimissa on Torque Mode -momentinrajoitustoiminto ja Collision Detection -törmäystunnistus. Momentinrajoitusta (Torque Mode) käytettäessä, robotti esteen kohdatessaan pyrkii pääsemään esteen ohi lisäämällä moottorien vääntömomenttia. Vääntömomenttia kuitenkin lisätään vain määriteltyyn rajaan asti, eikä momentti tai moottorille syötetty virta pääse kasvamaan servo-ohjaimeen asetettuun maksimiarvoon saakka (KUKA 2022). Tämä mahdollistaa esimerkiksi robotin käsivarren liikuttamisen käyttäen ulkoista konetta tai toista robottia. Toinen kone voi poimia robotin tarttujassa olevan työkappaleen, ilman että työkappaleessa esiintyvät toleranssit pääsevät aiheuttamaan pakotettuja siirtymiä.

Momentinrajoitus ei kuitenkaan ole sama asia kuin törmäystunnistus. Kun asetettu momentti on saavutettu, robotti pysähtyy estettä vasten tai liikkuu esteen mukana, mutta pyrkii kuitenkin koko ajan jatkamaan polullaan kohti seuraavaa ohjelmoitua pistettä. Momentinrajoitustoiminnolla voidaan kuitenkin pienentää törmäyksen seurauksia ja kontakteista aiheutuvia riskejä joissain tilanteissa.

Collision Detection on toiminto, jossa robotin ohjain reagoi epätavallisen suuriksi kasvaneisiin momentteihin. Jos moottorien momentti poikkeaa asetetulta toleranssialueelta, robotti pysäytetään. Collision Detection -toiminnolla on mahdollista jatkaa työkiertoa ohjelmallisesti kolarin jälkeen. Tällöin robotti voidaan esimerkiksi viedä automaattisesti kotiasemaan, eikä operaattorin tarvitse ohjata käsiä jolla robottia pois kolaritilanteesta. (KUKA 2022.)

## 5 Automaatiokomponentit

### 5.1 Lähestymiskytkimet

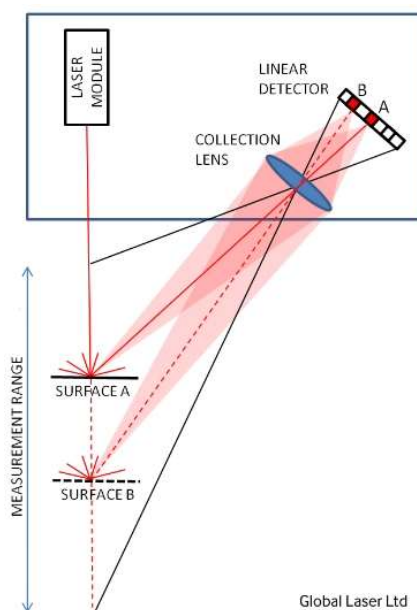
Lähestymiskytkimet ovat yleisesti käytetty anturityyppi erilaisten kappaleiden tunnistuksessa. Työkaluun liitettäessä tulee ottaa huomioon anturin paino, ja tarpeen mukaan on valittava mahdollisimman kevyt anturi. Tavallinen käyttökohde antureille robottien työkaluissa on paineilmasylintereihin kiinnitettävät Hall- tai Reed-anturit, jotka havaitsevat mäntään sijoitetun kestopagneetin. (Kurfess 2005, 11-17.)

Induktiivisia antureita voidaan käyttää ferromagneettisten materiaalien tunnistamiseen, kuten hiiliteräs, koboltti ja nikkeli. Induktiiviset anturit pystyvät usein tunnistamaan myös ruostumattoman teräksen, alumiinin, messingin ja kuparin, mutta tunnistusetaisyys on ferromagneettisia materiaaleja pienempi. Kapasitiiviset anturit tunnistavat myös ei-metalliset materiaalit. (Kurfess 2005, 11-17.)

### 5.2 Optiset anturit

#### Kolmiomittaus (eng. optical triangulation)

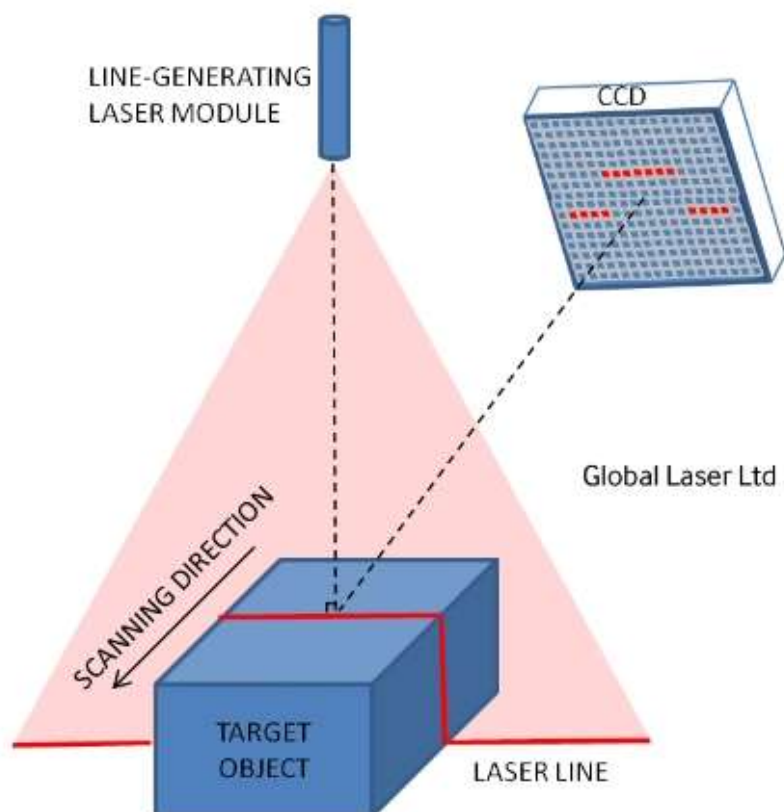
Kolmiomittaukseen perustuvat optiset anturit sisältävät valonlähteen, esimerkiksi laserin, valoa keräävän linssin sekä vastaanottimen. Kun lasersäde kohdistetaan mitattavaan pintaan, osa valosta heijastuu takaisin. Takaisin heijastuva valo ohjataan vastaanottimelle linssin läpi (kuva 14), jolloin valonsäteen tarkka sijainti vastaanottimessa riippuu sille heijastuneen valonsäteen kulmasta.



Kuva 14. Kolmiomittaukseen perustuvan anturin toimintaperiaate (Global Lasertech 2018)

Valonsäteen sijainti vastaanottimessa prosessoidaan, ja muunnetaan analogisignaali, josta etäisyys mitattavaan pintaan voidaan laskea. Menetelmällä pystytään tekemään melko tarkkoja mittauksia. Suurin mahdollinen mittausetäisyys on tyypillisesti noin 500 mm, mutta anturin kantama voi myös olla pidempi. (Kurfess 2005, 12-6.)

Kolmiomittaukseen perustuvalla anturilla voidaan lähettää viivamaista valoa (kuva 15). Tällöin anturilla voidaan kerätä useita mittaustuloksia samanaikaisesti.



Kuva 15. Viivamaista valoa lähettävä optinen anturi (Global Lasertech 2018)

Signaalia edelleen prosessoimalla on mahdollista muodostaa digitaalinen malli mitattavan pinnan geometriasta. Tällä menetelmällä voidaan skannata kokonaisia kappaleita ja mittaustuloksista on mahdollista rekonstruoida digitaalinen 3D-malli. (Global Lasertech 2018.)



## **Valokennoanturit**

Valokennoanturi sisältää valonlähteen ja vastaanottimen. Valo on useimmiten näkyvä punainen laser tai infrapunalaser. Vastaanotin on valokenno, jossa valo muodostaa sähköisen pulssin. (Kurfess 2005, 12-7.)

Time-of-flight-tyyppinen anturi lähettää valoa lyhyinä pulsseina, ja valokenno havaitsee kohteesta takaisin heijastuvan valon. Mitattavan kohteen etäisyys voidaan määrittää valonnopeuden avulla lähetetyn pulssin ja valokennon muodostaman pulssin välisen ajan funktiona. (Kurfess 2005, 12-7.)

Toinen valokennoantureissa käytetty menetelmä kohteen etäisyyden määrittämiseen on takaisin heijastuvan valon intensiteetin mittaaminen (eng. photoelectric sensor). Tämän tyyppiset anturit ovat pääsääntöisesti digitaalisia, jolloin niitä käytetään lähestymiskytkiminä. Heijastuvan valon intensiteetistä on joillakin antureilla mahdollista muodostaa analogisignaali, jolloin niitä voidaan käyttää etäisyyden mittaamiseen. (Kurfess 2005, 12-7.)

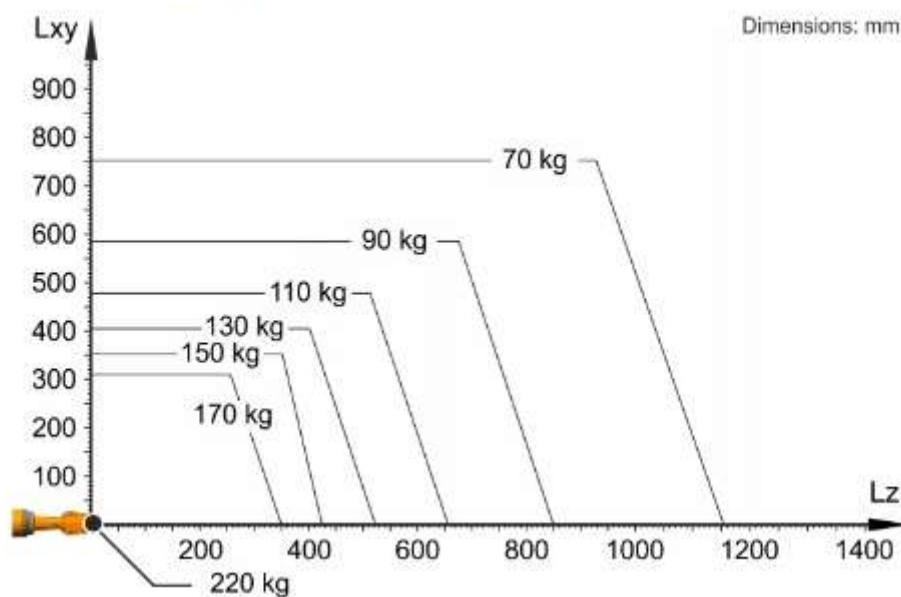
## 6 Implementaatio

### 6.1 Määrittelyvaihe ja esisuunnittelu

Robottisolu on osa pakkauslinjastoa, jossa robotti vie työkappaleita paikasta toiseen. Robotti vie työkappaleen linjaston alkuun, jossa se päällystetään muovilla. Kolakuljetin toimittaa päällystetyn tuotteen kuljettimen pätyyn, josta robotti poimii ja vie valmiin tuotteen lavaukseen.

Työkalun suunnittelu aloitettiin reunaehtojen määrittelyllä. Työkappaleiden koko vaihtelee välillä 400—1600 mm, ja paino on enimmillään 30 kg. Kun robotin nimellinen kantokyky on 150 kg, työkalun rakenteet saavat painaa enimmillään n. 110 kg. Myös painopisteen on oltava mahdollisimman lähellä robotin laippaa. Kuviossa 2 on esitetty nimelliset maksimikuormitukset sovelluksessa käytettävälle KUKA-robotille. Mitä kauempana aktuaattorin keskipisteestä effektorin painopiste sijaitsee, sitä pienempi on robotin nimellinen kantokyky.

**Payload diagram**



Kuvio 2. KUKA KR 150 R3100-2 -robotin kantokykydiagrammi (KUKA 2023a)

Työkappaleen keskipisteen sijainti määriteltiin ulottuvuustarkastelussa  $L_{xy}$ -suunnassa noin 290 mm ja  $L_z$ -suunnassa noin 280 mm:n etäisyydellä robotin laipan keskipisteestä. Työkalun ja työkappaleen yhteisen massakeskipisteen on kuitenkin hyvä olla tätä lähempänä, jotta robotin kantokyky ei ylitä esimerkiksi suurilla nopeuksilla. Tarkempi

analyysi suurimmasta sallitusta nopeudesta tietyllä massalla ja inertialla on mahdollista määrittää simulaatio-ohjelmistojen ja KUKA Load -ohjelmiston avulla.

Tartuntatavaksi määriteltiin mekaaninen puristaminen työkappaleen reunoilta. Tarvittava puristusvoima määriteltiin kokemusperäisesti. Puristusvoimaa tarvittaisiin enimmillään 2 kN. Puristus tapahtuisi joko servo-ohjatun ruuvin avulla tai kahdella paineilmasyylinterillä.

Työkalun ulkoisten mittojen määrittely oli myös tärkeää. Ulkoiset mitat määriteltiin 3D-mallin avulla Solidworksissa ja KUKA SIM -ohjelmistossa, joilla tarkistettiin, että työkalu mahtuu liikkumaan solun sisällä.

## 6.2 Konseptin valinta ja kehittelyvaihe

Eri konsepteista parhaaksi arvioitiin keskittävä ruuvitoiminen tarrain. Ruuvitoimisella tarttujalla on mahdollista toteuttaa tartunta servomootorilla momenttia tarkkailemalla. Tämä kuitenkin asettaa vaatimuksia servolle ja vaihteistolle, joiden olisi hyvä olla ulkoisilta mitoiltaan mahdollisimman kompakteja. Näin ollen päädyttiin ratkaisuun, jossa tartunta tehdään kahdella paineilmasyylinterillä, ja servokäyttöinen ruuvi toimii ainoastaan säätöyksikkönä. Paineilmasyylinterit toimisivat myös vastapainona työkappaleelle, minkä ansiosta painopiste olisi hieman lähempänä robotin laippaa.

Koska ruuvia käytetään pelkästään säätöön, ruuvia voidaan pyörittää hitaammalla nopeudella. Mikäli tartunta tehtäisiin ruuvilla, ruuvin nopeudella olisi suora vaikutus prosessin läpimenoaikaan. Hitaampi nopeus mahdollisti ulkoisilta mitoiltaan ja painoltaan pienemmän moottorin ja vaihdelaatikon valinnan.

Ruuvin lisäksi säätöyksikössä tulisi olla lineaarijohteet, jotta ruuvi ei joudu kantamaan työkappaleen ja toimilaitteiden painosta aiheutuvaa kuormaa sekä tartunnasta seuraavaa taivutusmomenttia. Markkinoilta löytyi valmis yksikkö, johon oli sisällytetty lineaarijohteet ja kuulalaakeroitu trapetsiruuvi. Valmista tuotetta päätettiin käyttää, koska se lyhentäisi mekaaniseen suunnitteluun ja kokoonpanoon kuluva aikaa.

Säätöyksikkö ottaisi vastaan myös tartunnasta seuraavat taivutusmomentit. Näin ollen rungon tarvitsee ainoastaan kannatella säätöyksikköä ja suojata liikkuvia osia pölyltä.

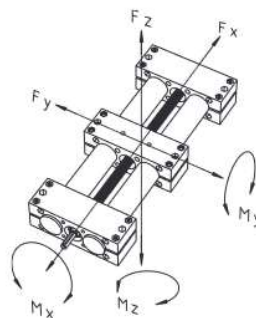
### 6.3 Komponenttien mitoitus

Säätöyksikön mitoituksessa kriittisin oli suurin sallittu aksiaalivoima. Suurimmaksi tarvittavaksi voimaksi luotettavaan kappaleiden poimintaan oli määriteltä 2000 N, joten säätöyksiköksi valittiin EP 60 (kuva 16).

#### Load data\*

F Force [N]  
M Moment [Nm]  
I Geometric moment of inertia [cm<sup>4</sup>]

\* with reference to carriage (deflection of guide element  $f = 0.5$  mm, static, end elements supported)



Type	Fx		Fy*		Fz*		Mx		My		Mz	
Total length [mm]	500	1000	1500	500	1000	1500	20	30	60	130	200	35
EP 18	400	200	100	–	100	70	–	20	30	60	130	35
EP 30	800	1000	800	500	550	300	100	60	60	130	200	75
EP 40	1000	3500	2600	1300	2000	580	120	120	130	200	260	150
EP 50	1700	3800	2300	2050	3000	670	170	160	200	340	480	260
EP 60	2500	6600	5400	4900	6000	2600	330	300	340	530	620	480
EP 80	4500	11000	9000	7500	8000	3700	700	400	530	620	620	620

Kuva 16. Säätöyksikön sallitut kuormitukset (RK)

Myöhemmässä suunnittelussa on huomioitava valmistajan suosittelema suurin sallittu taivutusmomentti ( $M_y$ ), joka on 340 Nm. Tämä asettaa rajoituksen tartuntakohdan etäisyydelle ruuvin keskilinjasta. Maksimietäisyys voidaan laskea staattisen voiman momentin kaavalla (kaava 1).

$$M_y = F_x \cdot dz \quad (1)$$

$$dz = \frac{M_y}{F_x} = \frac{340 \text{ Nm}}{2000 \text{ N}} = 170 \text{ mm}$$

Tartuntakohdan tulee siis sijaita alle 170 mm etäisyydellä ruuvin keskilinjasta. Mikäli tarvittaisiin suurempaa etäisyyttä työkappaleen ja ruuvin välillä, tulisi valita suurempi koko tai jokin muu suurempia momentteja kestävä komponentti.

Säätöyksikön massa on moottorin ja vaihdelaatikon kanssa yhteensä noin 45 kg. Vaikka säätöyksikkö vie suuren osan määritellystä kokonaismassasta, työkalun kokonaismassa on vielä reunaehtojen sisällä.

Puristusta varten mitoitettiin paineilmasylinterit. Mitoitus tehtiin oletuksella, että järjestelmän ilmanpaine on aina vähintään 0,6 MPa. Paine (p) on teoreettisen voiman (F) kohdistumista pinta-alalle (A), josta voidaan ratkaista tarvittava pinta-ala (kaava 2).

$$A = \frac{F}{p} \quad (2)$$

Pinta-ala riippuu paineilmasylinterin halkaisijasta. Kun sylintereitä on kaksi, voidaan laskea yhden sylinterin männän pinta-ala seuraavasti (kaava 3):

$$A = 2 \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (3)$$

Kaava 3 voidaan sijoittaa kaavaan 2, ja ratkaista halkaisija d (kaava 4).

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{2 \cdot \pi \cdot p}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2000 \text{ N}}{\pi \cdot 0,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}} \approx 46,1 \text{ mm} \quad (4)$$

Paineilmasynterien männän halkaisijan tulee siis olla enemmän kuin 46,1 mm. Valinta on tästä seuraava saatavilla oleva koko, eli 50 mm. Teoreettinen tarvittava sylinterivoima on jo valmiiksi määritetty varmuuskertoimella, joten 63 mm sylinterin valinta ei ollut tässä tapauksessa välttämätöntä. Mikäli voimaa tarvittaisiin vähintään 2000 N, suuremman sylinterin valinta olisi perusteltua.

Sylintereiksi valittiin johdesylinterit, jotta työkappaleen geometriset poikkeamat eivät aiheuta männän varrelle liian suuria taivutusmomentteja. Sylinterien valinnassa tarkistettiin sivuttaiskuormituksen kesto. Sivuttaiskuormia syntyy, kun työkappaletta kuljetetaan. Myös työkappaleen geometria saattaa aiheuttaa puristuksen aikana taivutuskuormitusta. Lisäksi on määritettävä työ- ja paluuliikkeiden nopeudet ja tarvittaessa valittava sopiva päätyvaimennus. Paineilmasynterien valmistajat määrittelevät sylintereille suurimman sallitun törmäysenergian ja on varmistettava tapauskohtaisesti, ettei liike-energia pääse kasvamaan liian suureksi männän liikkeen aikana.

#### 6.4 Detaljisuunnittelu ja viimeistely

Detaljisuunnitteluvaiheessa suunniteltiin runko, joka kannattelee säätöyksikköä. Runko suunniteltiin alumiini- ja teräsosista. Materiaalit ja profiilit valittiin lujuusvaatimusten mukaisesti. Ensisijainen kriteeri materiaalinvalinnalle oli lujuusvaatimukset ja sallitut taipumat. Lisäksi kohteisiin, joissa suurempi paino ei haitannut, voitiin valita teräs. Mitoituksia tehtiin Euler-Bernoullin palkkiteoriasta johdettujen kaavojen lisäksi FEM-laskennalla, koska tutkittavia kuormitustapauksia oli useita.

Detaljisuunnitteluvaiheessa oli varmistuttava, että painopiste pysyy mahdollisimman lähellä robotin laippaa. Painopisteen paikkaan vaikuttaa materiaalivalintojen ja osien mitoituksen lisäksi työkalun säätö ja työkappaleen koko. Eri variaatioita Solidworksissa kokeilemalla voitiin selvittää, että painopiste ei missään tilanteessa ole liian kaukana työkalulaipasta. Samalla käytiin läpi ruuviliitoksia. Ruuviliitoksissa on mitoituksen lisäksi huomioitava luokse päästävyys kokoonpanon ja huollon näkökohdista. Lisäksi oli varmistuttava, että liikkuvat osat eivät osu ruuvien kantoihin.

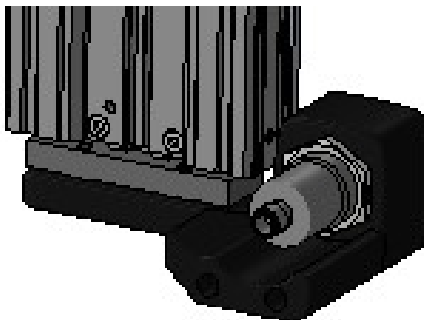
Painopiste tuli niin lähelle robotin työkalulaippaa, että kantokykydiagrammin (kuvio 1, sivu 21) mukaan kuormaa olisi voinut olla jopa 170 kg. Robotin kantokyky kuitenkin tarkistettiin KUKA Load -ohjelmistolla. Tehdyn laskelman mukaan robotin moottoreihin kohdistuvat dynaamiset kuormitukset olisivat lähellä enimmäiskuormituksia, mutta sallittujen raja-arvojen sisällä. Mikäli enimmäiskuormitukset olisivat ylittyneet, olisi tullut miettiä keinoja pienentää työkalun painoa tai inertiaa. Jos työkalun keventäminen ei ole mahdollista, ylikuormitus voidaan välttää käyttämällä hitaampia nopeuksia liikkeissä, joissa kuormitukset olisivat liian suuria. Simulaation tulos on kuitenkin suuntaa antava. Lopullinen maksiminopeuksien ja liikeratojen optimointi suoritettiin käyttöönottovaiheessa robotin diagnostiikkatyökaluilla, joilla seurataan robotin kuormituksia reaaliajassa.

Viimeisten FEM-analyysien jälkeen mekaaninen suunnittelu oli valmis ja laadittiin osa- ja kokoonpanopiirustukset. Osien valmistuksen ja kokoonpanon jälkeen työkalu voitiin kiinnittää robottiin ja alkoi testivaihe, jossa varmistettiin mekaanisen rakenteen toimivuus. Testivaiheessa robottia käytettiin vielä kokonaan käsiajolla. Vaikka toimilaitteiden ohjaus oli automaattista, ohjelmallisesti ei ollut mahdollista selvittää, onko työkappaleen poiminta onnistunut, tai missä tilassa työkalun toimilaitteet todellisuudessa ovat.

## 6.5 Automaatiosuunnittelu

Jotta työkalun tilasta voidaan olla selvillä, tarvitaan antureita. Paineilmasynterien induktiivisten anturien signaaleista voidaan päätellä, onko toimilaite auki. Kun paineilmasynterit ovat paluuliikkeen päässä, saadaan antureilta signaali – tämän signaalin tulee olla päällä ennen työkappaleen noutoa, muuten paineilmasynteri voi joutua törmäykseen työkappaleen kanssa. Toisaalta, jos synterit pääsevät tekemään täyden työliikkeen, voidaan päätellä, että työkappale ei ole kyydissä. Sen jälkeen, kun synterit on ajettu kiinni työkappaleeseen, eivätkä kummankaan päädyn antureilta tule signaalia, voidaan olettaa, että työkappale on kyydissä.

Säätöyksikköä ajetaan servo-ohjatulla moottorilla, jossa on absoluuttianturi. Tästä tiedetään tarttujan leukojen sijainti. Lisäksi etummaisen leuan sijaintia tarkkaillaan optisella time-of-flight-tyyppisellä mitta-anturilla, joka on kiinnitetty johdesylinteriin (kuva 17). Johdesylinterissä on myös induktiiviset anturit.



Kuva 17. Mitta-anturi johdesylinteriin kiinnitettynä

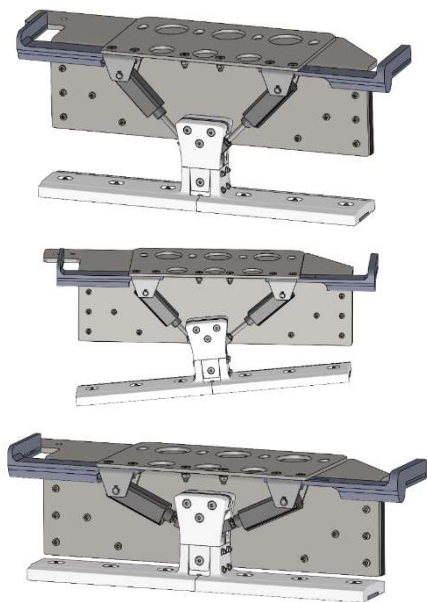
Anturin ollessa ylhäällä, voidaan mitata etäisyys tarttujan etummaiseen leukaan, ja tarkistaa että mitattu etäisyys vastaa servon absoluuttianturin paikkatietoa. Työkappaleen mitat tulevat robotille ulkoiselta ohjelmoitavalta logiikalta (PLC). Mitta-anturilta tulevaa mittatietoa verrataan PLC:ltä tulevaan tietoon työkappaleen mitoista. Näin voidaan varmistaa, että työkalu on oikein säädynyt.

Koska toimilaitteita ja antureita sijaitsee liikkuvissa osissa, kaapelit ja paineilmaletkut kulkevat energiansiirtoketjuissa, joiden alustava sijainti oli suunniteltu viimeistelyvaiheessa. Energiansiirtoketjuilla suojataan kaapeleita ja varmistetaan, että taivutussäde pysyy riittävän suurena. Kaapelien ja anturien paino lisättiin 3D-malliin. Lisäksi kaikki ruuvit ja muut kiinnityskomponentit sisällytettiin lopulliseen 3D-malliin. Tämä mahdollisti Solidworksilla lasketun painopisteen ja hitausmomenttien käyttämisen, kun työkalu myöhemmässä vaiheessa määriteltiin robotin käyttöliittymään.

## 6.6 Törmäystunnistus

Suurimmat törmäysriskit ovat silloin, kun työkappaleita noudetaan ja pinotaan. Työkappaleet noudetaan avoimelta kolakuljettimelta, jolloin on olemassa riski siihen, että työkappale ei ole oikeassa paikassa kuljettimen keskilinjassa. Työkappaleiden paikoitus voitaisiin tehdä myös lisälaitteella. Työkappaleiden siirtyminen pois keskilinjasta on kuitenkin sen verran harvinainen tilanne, että keskittävä lisälaitte ei ole välttämätön – riittää, jos robotti pystyy tunnistamaan työkappaleen virhepaikoitustilanteen, jolloin ohjelma pysähtyy ennen kuin robotti törmää.

Törmäystunnistusta varten suunniteltiin paineilmatoiminen puskuri (kuva 18), joka törmäystilanteessa osuisi työkappaleeseen ensimmäisenä. Kun työkappaletta lähestytään, paineilmasyylinterit tehdään paineettomiksi, jotta puskuri pääsee vapaasti painumaan sisään. Paineilmasyylinterien induktiiviset anturit havaitsevat, jos puskuri on liikkunut paikoiltaan, eli todennäköisesti törmännyt työkappaleeseen.



Kuva 18. Törmäystunnistin

Paineilmasyylinterien kiinnitys on molemmista päistä nivelletty. Näin puskurin kiertoliike on sallittu ilman, että sylintereihin kohdistuisi liian suuria taivutusmomentteja. Puskuri koostuu alumiinirungosta ja 3D-tulostetuista PLA-muoviosista. Kokoonpanon osat on kiinnitetty toisiinsa ruuviliitoksilla.

Koska mekanismi koostuu kokonaan nivelistä, se toimii mekaanisesti ketjun tavalla. Kun sylinterit on vedetty sisään, puskuri on kontaktissa päälle tulevan kotelon kanssa, mikä estää ylimääräisen liikkeen, kun tunnistin ei ole käytössä.

Toinen menetelmä on tarttujan leukaan asennettavat alaspäin osoittavat anturit. Anturien avulla voidaan etsiä kuljettimen pinta paikoissa, johon tarttujan leuat lasketaan, ja varmistua että näissä paikoissa ei sijaitse esteitä.

Kolmas menetelmä työkappaleen paikoituksen varmistukseen on kuvan 17 mitta-anturi. Johdesylinterillä anturi lasketaan alas ennen työkappaleeseen tarttumista, jolloin etäisyys työkappaleeseen mitataan. Mikäli mittaustulos on tietyn toleranssin sisällä, voidaan olettaa, että työkappale on oikein paikoittunut.



## 7 Yhteenveto ja pohdinta

Teollisuusrobotin työkalun suunnittelu on pääpiirteissään samankaltainen prosessi kuin minkä tahansa koneen suunnittelu. Robotin työkalujen suunnittelussa on määrittelyvaiheesta alkaen otettava huomioon erilaiset tekniset vaatimukset, joita robotti, robotin liikkeet ja robottisovellus työkalulle asettavat. Yleisesti työkalun on oltava mahdollisimman kevyt ja rakenteeltaan yksinkertainen. Painopisteen tulee olla mahdollisimman lähellä robotin työkalulaippaa. Robotin malli saattaa asettaa lisävaatimuksia työkalun muotoilulle tai ulkoisille mitoille, esimerkiksi SCARA-roboteilla on huomioitava työkalun hitausmomentit. Työkalun on samaan aikaan kestävä erilaiset sykliset kuormitukset, joita työkierron aikana rakenteisiin kohdistuu.

Törmäysriskit on huomioitava robotin työkalun suunnittelussa. Mikäli törmäysriskejä ei voida kokonaan poissulkea, törmäyksiin voidaan varautua työkaluun tai robottisoluun lisättävillä teknisillä ratkaisuilla, esimerkiksi antureilla, joilla törmäysriski voidaan tunnistaa ja välttää. Törmäystilanteeseen voidaan varautua robotin ohjelmoinnissa rajoittamalla robotin moottorien nopeutta ja vääntömomenttia sellaisissa kohdissa liikerataa, joissa törmäysriski on olemassa. Työkalu tai työkaluun lisätty törmäystunnistin voi olla joustava ja absorboida törmäysenergian. Törmäystilanne voidaan myös sisällyttää työkalun lujuuslaskentaan, ja ennakoida rasituksia törmäystilanteessa. Jos rakenteita ei ole mahdollista mitoitaa kestävästi törmäystä, vaurioituvat osat voidaan suunnitella helposti vaihdettaviksi, ja siten lyhentää törmäyksestä johtuvaa käyttökeskeytystä.

Opinnäytetyön toteutuksessa työkalun määrittelyvaiheeseen sekä konsepti- ja detaljisuunnitteluun käytettiin paljon aikaa. Osittain tämä johtui tiettyjen komponenttien saatavuusongelmista vuoden 2022 lopulla. Etenkin määrittelyyn ja konseptisuunnitteluun käytetty aika näkyi positiivisesti valmiissa tuotoksessa. Erilaiset suunnittelua rajaavat reunaehdot saatiin huomioitua tarkasti, ja työkalu toimi tarkoituksessaan hyvin. Kehittelyssä ja detaljisuunnittelussa käytetty aika, sekä työryhmän kanssa käydyt keskustelut ja palaverit mahdollistivat erilaisten heikkojen kohtien poistamisen ja yksityiskohtien kehittämisen niin pitkälle, että revisiointiin oli hyvin vähän tarvetta. Näin ollen prototyyppi voitiin toimittaa sellaisenaan tuotantokäyttöön. Suurimmat haasteet olivat odotetusti törmäystunnistukseen liittyviä. Työkappaleen tunnistuksessa optiset anturit osoittautuivat toimivaksi ratkaisuksi.

Robotin ohjelmointi suoritettiin kokonaan testaus- ja käyttöönottovaiheessa. Käyttöönottoa olisi nopeuttanut uusimmalla KUKA SIM 4.1 -ohjelmistolla tehty simulaatio, jolla työkalulle olisi tehty digitaalinen käyttöönotto. Aiemmista versioista poiketen uusimmassa KUKA SIM -ohjelmistoversiossa käytetään KRL-ohjelmointikieltä (KUKA Robot Language), mikä mahdollistaa simulaatiossa tehdyn ohjelman käyttämisen sellaisenaan. Uusimman version lisenssi saapui yritykseen, kun testaus oli jo käynnissä, joten tässä työssä sitä ei ehditty hyödyntämään.

Pienillä muutoksilla työkalua voidaan hyödyntää erilaisissa lavaussovelluksissa. Suurin määrittelevä tekijä työkalussa oli työkappaleiden suuri kokovaihtelu. Pienemmällä vaihteluvälillä työkalusta olisi mahdollista tehdä pienikokoisempi ja kevyempi, jolloin käsiteltävät työkappaleet voivat olla painavampia tai vaihtoehtoisesti robotti voi olla pienempi. Tarttujan leukojen muutoksilla työkalua on mahdollista käyttää muunkinlaisten työkappaleiden, esimerkiksi tynnyrien käsittelyyn.

Opinnäytetyön toimeksianto oli laaja, ja kaikkia yksityiskohtia ei ollut opinnäytetyön rajauksen puitteissa mahdollista käsitellä tässä raportissa. Työn aikana kertyi paljon tietoa muun muassa moottorien servo-ohjauksen konfiguroinnista, eri järjestelmien välisestä kommunikoinnista sekä optisten anturien toimintaan liittyvistä rajoitteista ja mahdollisuuksista. Työkalun suunnittelussa käytetyistä toimintatavoista ja teknisistä ratkaisuista tehtiin dokumentaatio Sunrobille, mitä voidaan tulevaisuudessa hyödyntää koneensuunnittelussa ja tuotekehityksessä.

## Lähteet

All On Robots. Cylindrical robot type. Viitattu 7.5.2023. Saatavissa:

<https://www.allonrobots.com/cylindrical-robot/>

DeGaspari, J. 2003. Robot crash protection (Technology Focus). Mechanical engineering (New York, N.Y. 1919), 2003, Vol.125 (11), 22-24.

Energid. 2019. The Robotics Glossary: 9 (more!) Robotics Terms You Need to Know.

Viitattu 7.5.2023. Saatavissa: <https://www.energid.com/blog/the-robotics-glossary-9-more-robotics-terms-you-need-to-know>

FANUC. 2023. SCARA Robot SR-3iA. Viitattu 7.5.2023. Saatavissa:

<https://www.fanuc.eu/rs/en/robots/robot-filter-page/scara-series/scara-sr-3ia>

Festo. Three-dimensional gantry YXCR. Viitattu 7.5.2023. Saatavissa:

[https://www.festo.com/fi/en/p/three-dimensional-gantry-id\\_YXCR](https://www.festo.com/fi/en/p/three-dimensional-gantry-id_YXCR)

Global Lasertech. 2018. Machine Vision with Laser Triangulation – Application Guide.

Viitattu 7.5.2023. Saatavissa: <https://www.global-lasertech.co.uk/applications/machine-vision-with-laser-triangulation/>

Hänninen, P. 2022. Robotiikka ja tekoäly. Tammertekniikka / AMK-Kustannus Oy

igus® GmbH. 2022. Delta robot: build or buy. Viitattu 7.5.2023. Saatavissa:

<https://www.igus.ie/info/robotics-delta-robot>

ISO 8373. 2021. Robotics — Vocabulary. Geneve, Sveitsi: International Organization for Standardization.

Jokinen, T. 2010. Tuotekehitys. Espoo: Aalto-yliopisto.

Kuivanen, R.1999. Robotiikka. Suomen Robotiikkayhdistys Ry. Vantaa: Talentum Oyj/MetalliTekniikka.

KUKA. 2022. Operating and Programming Instructions for System Integrators. Augsburg, Saksa: KUKA Deutschland GmbH

KUKA. 2023a. Data sheet KR 150 R3100-2. Augsburg, Saksa: KUKA Deutschland GmbH.

Viitattu 7.5.2023. Saatavissa: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/kr-quantec>

KUKA. 2023b. KR SCARA. Viitattu 21.5.2023 Saatavissa: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/kr-scara-robot>

Kurfess, T. 2005. Robotics and automation handbook. Boca Raton, FL, Yhdysvallat: CRC Press.

Macron Dynamics. 2023. What Is Linear Robotics? Viitattu 7.5.2023. Saatavissa:

<https://www.macrondynamics.com/job-stories/what-are-linear-robotics>

Monkman, G., Hesse, S., Steinmann, R. & Schunk, H. 2007. Robot Grippers. Weinheim, Saksa: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Pham, D & Heginbotham, W. 1986. Robot Grippers. Bedford, Iso-Britannia: IFS Publications Ltd.

RK Rose Krieger. 2023. Twin tube actuator. Viitattu 21.5.2023. Saatavissa: <https://www.rk-rose-krieger.com/>

Robotics World. 2003. Crash protection (Robotics Case Studies). Robotics World, 2003, Vol.21 (2), 16-18. Atlanta: Briefings Media Group, LLC.

Thnet. Polar or Spherical Configuration. Viitattu 7.5.2023. Saatavissa:

<https://thnet.co.uk/thnet/robots/5a.htm>

Universal Robots. 2019. Robot Grippers Explained. Viitattu 21.5.2023. Saatavissa:

<https://www.universal-robots.com/blog/robot-grippers-explained/>

Universal Robots. 2023. Robotiq 2F-85 Adaptive Gripper. Viitattu 21.5.2023. Saatavissa:

<https://www.universal-robots.com/plus/products/robotiq/robotiq-2f-85/>