

Pauli Valo

JOUSTAVAN 3D-KUVAUKSEEN PERUSTUVAN
YHTEISTYÖROBOTTISOVELLUKSEN KEHITTÄMINEN

Automaatioteknologian koulutusohjelma
2019

JOUSTAVAN 3D-KUVAUKSEEN PERUSTUVAN YHTEISTYÖROBOTTISOVELLUKSEN KEHITTÄMINEN

Valo, Pauli
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Automaatioteknologian YAMK-koulutusohjelma
Joulukuu 2019
Sivumäärä: 41

Asiasanat: Konenäkö, robotiikka, 3D-skannerit

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää 3D-kuvaukseen perustuva laatikosta poimiva (Bin picking) järjestelmä yhteistyörobotilla. Tällaisten järjestelmien kysyntä on tällä hetkellä suurta erilaisissa teollisuusyrityksissä. Työ toteutettiin tutkimuksellisenä kehittämisprosessina, joka soveltuu erittäin hyvin tällaisen teknologiakehittämisen prosessin menetelmäksi, koska työllä vastataan suoraan työelämän kehittämistarpeisiin yhdistämällä tutkimusta ja kehittämistä.

Työn tavoitteiden saavuttamiseksi työ aloitettiin tutkimalla eri 3D-konenäköjärjestelmiä ja niiden eroja sekä valittiin järjestelmään mahdollisimman hyvin soveltuva 3D-kamera. 3D-kuvaukseen perustuviin poimintasovelluksiin tarkoitetut kamerat ovat nykyään voimakkaassa kehitysvaiheessa, joten puolueettomien mielipiteiden hankkiminen oli haastavaa, koska uusimmat kamerat olivat olleet vasta vähän aikaa markkinoilla. Tästä johtuen jouduttiin mainosmateriaaleihin tutustumisen lisäksi selvittämään laitteiden toisiaan vastaavat ominaisuudet käytännössä niiden kameroiden kanssa, joihin päästiin fyysisesti tutustumaan. Tämän lisäksi selvitettiin, miten valittu kamera saatiin kommunikoidaan olemassa olevan yhteistyörobotin kanssa, ja miten kyseinen robotti saatiin toimimaan odotetulla tavalla kameran antamien tietojen mukaan.

Työn valmistuttua oli tuloksena toimiva testiympäristö, jossa yhteistyörobotti haki 3D-kuvauksen ohjaamana laatikosta käytettäviä kappaleita ja pinosi ne pöydälle pinoihin. Tuotannossa kappaleet olisi viety esimerkiksi kuljetushihnalle tai suoraan työstökoneeseen, mutta tämän muutoksen tekeminen ei olisi vaikeaa tehdyille sovellukselle. Tutkittu 3D-konenäön ja yhteistyörobotin kombinaatio tuotteiden noukkimisesta kuljetuslaatikoista onnistui kuten suunniteltiin.

DEVELOPING OF A 3D IMAGING BASED FLEXIBLE COLLABORATIVE ROBOT APPLICATION

Valo, Pauli

Satakunta University of Applied Sciences

Master's Degree Programme in Automation Technology

December 2019

Number of pages: 41

Keywords: Machine vision, robotics, 3D scanners

The purpose of this thesis was to develop a 3D Bin picking system with a collaborative robot. Demand for such systems is currently high in different kind of industrial companies. The thesis was carried out as a research and development process, which is a very good method for such a technology development process, because the work responds directly to the development needs of the working life by combining research and development.

In order to achieve the goals of the thesis, the work was started by examining different 3D machine vision systems and their differences, and choosing the most suitable 3D camera for the system. 3D cameras designed for Bin picking applications are in a critical stage of development, so acquiring neutral reviews was a challenge as the latest cameras were only recently available on the market. As a result, in addition to familiarizing with the promotional materials, the equivalent features of the devices had to be determined in practice with the cameras that could be accessed. In addition, it had to be found out how the selected camera communicates with an existing collaborative robot and how the robot could work according to the information provided by the camera.

When the work was completed, the result was a test environment where a 3D imaging controlled collaborative robot picked the selected pieces from the box, and stacked them on the table. In production, the pieces would have been taken, for example, to a conveyor belt or directly to a machine tool. Making this change for this application would not be difficult to do. The studied combination of 3D machine vision and collaboration robot for picking up products from transport boxes succeeded as planned.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	KEHITTÄMISTYÖ	6
2.1	Mielekkään kohteen valinta	7
2.2	Tiedon hankinta ja arviointi	8
2.3	Tehtävän määrittely	9
2.4	Tietoperustan muodostus	11
2.5	Toteutustavan/metodien valinta ja käyttö	11
2.6	Tukevien metodien käyttö.....	12
2.7	Tulosten jakaminen.....	13
2.8	Prosessin arviointi.....	13
3	TEKNOLOGIAT.....	15
3.1	3D-kuvaustekniikat.....	15
3.1.1	Stereokuvaus	16
3.1.2	Time of Flight	18
3.1.3	Rakenteellinen valaisu.....	20
3.2	Yhteistyörobotit	22
3.3	3D-kuvauksen ja yhteistyörobottien yhdistäminen.....	25
4	KEHITTÄMISTYÖN TEKEMINEN	29
5	LOPPUTULOS	36
6	JOHTOPÄÄTELMÄT	38
	LÄHTEET.....	40

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä on tarkoitus selvittää, miten teollisuudessa voidaan lisätä automatisoinnin määrää tuotteiden noukkimisessa esimerkiksi laatikoista tai lavoilta konenäköä ja robotiikkaa hyödyntäen. Tyypillisesti tähän käytetään ihmistyövoimaa tai kohdespesifistä mekaanista laitetta. Ihmistyövoiman käyttäminen tällaiseen tarkoitukseen on paitsi monotonista ja ergonomisestikin rasittavaa myös kustannustehotonta. Ihmistyövoiman määrä tulee joka tapauksessa vähenemään tulevina vuosina, joten ihmisten työpanos kannattaa hyödyntää sellaisiin työtehtäviin, joissa ihmisestä on eniten hyötyä.

3D-kuvausteknologiat ovat kehittyneet viime aikoina voimakkaasti. Erilaisia uusia 3D-kuvausteknologioita on tullut markkinoille lähes vuosittain. 3D-kuvaus mahdollistaa esimerkiksi kappaleiden muotojen, sijaintien, kokojen ja orientaatioiden tunnistamisen. Tämä antaa perinteisiä konenäköteknologioita paremman mahdollisuuden havaita sekaisin kasassa olevat kappaleet. Robotin ohjauksessa 3D-kuvausta ei ole teollisuudessa käytetty kovinkaan paljon, mutta se on selvästi lisääntymässä 3D-kuvauksen tuomien lisämahdollisuuksien vuoksi perinteiseen konenäköön verrattuna. Kuten yleensäkin teollisuusautomaatiossa, tällä tavoitellaan ihmisen korvaamista toistuvan ja rasittavan työn osalta robotiikalla, jotta arvokas ihmistyö voidaan käyttää mielekkäämmän työn tekemiseen. Näin lisätään myös tuotantotehoa ja sitä kautta kustannustehokkuutta.

2 KEHITTÄMISTYÖ

Tämä opinnäytetyö on kirjoitettu kehittämistyön muotoon. Työ etenee tutkimuksellisen kehittämisprosessin mukaisesti. Tutkimuksellinen kehittämisprosessi soveltuu erittäin hyvin tällaisen teknologiakehittämisen prosessin menetelmäksi, koska työllä vastataan suoraan työelämän kehittämistarpeisiin (Toikko & Rantanen 2009).

Tutkimuksellisessa kehittämistyössä tavoitellaan todellisissa ympäristöissä tunnistettujen ongelmien ratkaisemista sekä uusien tuotteiden, toimintatapojen tai sovellusten tuottamista. Tarkoitus ei ole vain selittää asioita, vaan selvittää, miten asiat voisi tehdä paremmin tai tehokkaammin. Usein tutkimuksellisessa kehittämistyössä keskitytään pitkälti konkreettisten tehtävien parantamiseen tai haasteiden selättämiseen. Jos verrataan tutkimuksellista kehittämisprosessia tieteelliseen tutkimukseen, huomataan, että erityisesti toiminnan tavoitteissa on eroja. Kun tutkimuksellisessa kehittämisprosessissa tavoitellaan käytännön kehittämistä ja ongelmien ratkaisuja, tähtää tieteellinen tutkimus pääasiassa ilmiöiden selittämiseen ja sitä kautta uuden teorian luomiseen. (Ojasalo, Moilanen & Ritalahti 2014)

Tutkimuksellisen kehittämistyön vaiheet ovat (Ojasalo, Moilanen & Ritalahti 2009):

1. Mielekkään kohteen valinta
2. Tiedon hankinta ja arviointi
3. Tehtävän määrittely
4. Tietoperustan muodostus
5. Toteutustavan/metodien valinta ja käyttö
6. Tukevien menetelmien käyttö
7. Tulosten jakaminen
8. Prosessin arviointi

Tutkimuksellisen kehittämisprosessin mukaisesti edettäessä hyödynnetään samalla myös konstruktiiivista tutkimusmenetelmää, koska työn tavoitteena on saada aikaiseksi konkreettinen lopputulos. Konstruktiiivinen tutkimusote on hyvin luonteenomainen tapa edetä tällaisessa kehittämistyössä, jossa tarkoituksena on ratkaista jokin oikea,

olemassa oleva ongelma ja tuottaa ratkaisun mukainen uusi toimintatapa johonkin kohteeseen. (Lukka 2001.)

Seuraavissa kappaleissa on esitelty, miten tässä työssä edettiin tutkimuksellisen kehittämistyön vaiheelta toiselle ja mitä eri vaiheissa tehtiin.

2.1 Mielekkään kohteen valinta

Työn etenemisen ja opettavaisuuden kannalta oli tosi tärkeä valita työlle mielekäs kohde. Ennen työn aloittamista haastateltiin useita satakuntalaisten yritysten edustajia. Heiltä kysyttiin näkemystä esimerkiksi siitä, mihin heidän tuotannossaan pitäisi lisätä automaatiota. Näiden haastattelujen pohjalta kaksi osa-aluetta nousi yhtenevänä asiana ylitse muiden; valmiiden tuotteiden pakkaus kuljetusta varten sekä raaka-aineiden purkaminen tuotantolinjalle.

Koska tuotteiden pakkaamiseen vaikutti olevan enemmän valmiita sovelluksia, valikoitui tämän opinnäytetyön aiheeksi tuotannon alkupäässä oleva raaka-aineiden purku kuljetuksesta tuotantolinjalle. Tämä tapahtuu erittäin usein ihmistyövoimalla, koska monet tuotteet tulevat laatikoissa tai muissa kuljetusastioissa, missä ne pääsevät liikkumaan toisiinsa nähden kuljetuksen aikana. Ihmistyövoiman hyödyntämisen vaihtoehtona on tehdä mekaaninen laitteisto, johon kuljetuksesta tulevat tuotteet kaadetaan ja esimerkiksi tärymaljaa tai muuta yksilöivää laitetta käyttäen tuotteet erotellaan toisistaan ja paikoitetaan tämän jälkeen mekaanisesti esimerkiksi robotille tai muulle tuotantolinjan laitteelle.

Ihmistyövoimalla tämän tehtävän tuottaminen on pitemmällä aikavälillä kallista, mutta saattaa olla myös ergonomisesti haitallista kyseiselle työvoimalle. Mikäli tuotteita tarvitaan suuri määrä, on tämä pelkästään toistuvaa kappaleiden noukkimista tuotantolinjalle. Tällainen mekaaninen ja monotoninen työ ei ole selvästi hyväksi ihmisille.

Mekaanisella ratkaisulla tästä ongelmasta päästään eroon, mutta sillä on taas omat rajoitteensa ja haasteensa. Mikäli tehdään tietylle tuotteelle mekaaninen laitteisto, joka erottelee tuotteet toisistaan ja asettelee ne tuotantolinjalle, ei tuote saa vaihtua

radikaalisti. Pieniä muutoksia laitteisto voi sietää, mutta mikäli mittasuhteisiin tulee suurempia muutoksia, pitää myös mekaaniseen laitteistoon tehdä muutoksia. Tällaisten muutosten tekeminen on yleensä varsin arvokasta, riippuen hieman kuinka suuri muutos tuotteeseen tehdään. Toinen ongelma mekaanisessa ratkaisussa on se, että jokaiselle tuotteelle tarvitaan yleensä oma laitteistonsa.

Kolmantena ongelmana voidaan pitää osien siirtämistä kuljetuslaatikosta mekaaniselle laitteelle. Mikäli kyseessä on esimerkiksi pieniä muoviosia, tätä ongelmaa ei ole, koska voidaan yksinkertaisesti kaataa tuotteet kuljetuslaatikosta lajittelijalle. Jos kyseessä kuitenkin on painavia tai herkkiä kappaleita, ei niitä välttämättä voida vain kaataa kuljetuslaatikosta ilman vahinkoja kyseisiin kappaleisiin. Näissä tapauksissa tuotteet pitää noukkia kuljetuslaatikosta yksitellen, ja tähän ei aikaisemmin oikein ollut muuta vaihtoehtoa kuin ihmistyövoima.

Haastattelujen ja niiden perusteella tunnistettujen haasteiden perusteella voitiin selvästi todeta, että tämän opinnäytetyön mielekäs kohde on raaka-aineiden purkaminen tuotantolinjalle. Tavoitteeksi asetettiin toimivan 3D-kuvausmenetelmän ja robotiikan yhdistäminen tähän tarpeeseen soveltuvalla tavalla.

2.2 Tiedon hankinta ja arviointi

Mielekkään kohteen valinnan jälkeen päästiin etenemään sovelluskehitykseen. Ensimmäinen ja erittäin tärkeä vaihe sovelluskehitystyössä on tarvittavan tiedon hankinta ja sen soveltuvuuden arviointi työn tavoitteiden näkökulmasta. Tässä kappaleessa käydään läpi työn etenemisen kannalta merkittävimmät tiedot ja analysoidaan niiden merkitystä.

Laatikosta poimimiseen (Bin picking) kykenevän kamerajärjestelmän teko on ollut jo pitkään kameravalmistajien kehityksen kohteena. On jopa sanottu, että sekaisin laatikossa olevien tavaroiden poiminta on ollut "The Holy Grail in Sight" (Konenäön graalin malja) (Anandan 2016). Laatikosta poimimiseen tarkoitettuja kameroita valmistavia yrityksiä ovat esimerkiksi Zivid, Ensenso, Pickit ja Solomon. Näistä perinteistä rakenteellista projektorivalaisukuvaustekniikkaa käyttävät Zivid ja Pickit.

Solomon taas käyttää rakenteellista valaisua, mutta projektoreita on kameran molemmin puolin. Tällöin vältetään suurin osa tilanteista, joissa vain linssin toisella puolella oleva projektorin valaisukuvio varjostuu kohteen korkeampaan kohtaan, eikä nähdä niin sanotusti kuopan pohjalle. Ensenson FlexView 2 -tekniikka taas perustuu yhteen projektoriin ja kahteen kameraan. Tällöin kohde voidaan kuvata rakenteelliseen valaisuun perustuen, ja sen lisäksi voidaan käyttää myös stereokuvausta tuomassa lisäinformaatiota.

Tietoa eri kameroista ja niiden valmistajista haettiin verkosta sekä erinäisiltä messuilta. Tämän tyyppisiä kameroita ei ollut opinnäytetyön aloituksen aikoihin varsinkaan Suomessa käytössä kovinkaan yleisesti, joten käyttäjäkokemusten saaminen oli todella haastavaa. Maahantuojilla oli laitteita, mutta niitä ei saatu pyynnöistä huolimatta koekäyttöön. Tästä johtuen jouduttiin luottamaan mainosmateriaaleihin sekä messuilla tapahtuneisiin lyhyisiin demonstraatioihin.

Tiedonhaun tuloksena saatiin siis paljon eritasoista tietoa kameroiden toimintaperiaatteista, jonkin verran kameroiden hinnoista ja vähän käyttökokemuksista. Näiden tietojen perusteella tehtiin kameravalinta. Kameravalintaa ei tehty pelkästään tätä kehittämistyötä varten vaan laajemmin 3D-kuvaussovellusten kehittämiseksi robottien ohjauksessa Satakunnan ammattikorkeakoulun teknologialaboratoriossa. Robottina tässä kehittämistyössä käytettiin Universal Robotsin UR5 -yhteistyörobotia, jonka kanssa valitun 3D-kameran todettiin toimivan yhteen. Tämä yhteistyörobotti löytyi jo teknologialaboratoriosta ja sen toimintaa tällaisessa tehtävässä haluttiin testata.

2.3 Tehtävän määrittely

Tähän kehittämistyöhön valittiin 3D-kameraksi Pick-it -valmistajan tekemä M-HD -kamera. Valintaan vaikuttivat tämän työn lisäksi myös sen varmistettu yhteensopivuus jo olemassa olevan Universal Robots UR5 -yhteistyörobotin kanssa sekä käyttäjien aikaisempi tuttavuus kyseisen kameran ominaisuuksiin. Tärkeää oli myös se, että kyseisellä kameralla oli suomalainen toimittaja, jolta voisi kysyä apua ongelmatilanteissa. Tähän työhön Pick-it M-HD -kamera on selvästi tarkkuudeltaan

turhan hyvä. Pick-it M tai Pick-it L olisivat olleet huomattavasti kustannustehokkaampi vaihtoehto. Kameran lopullinen sijoituspaikka on kuitenkin Satakunnan Ammattikorkeakoulun teknologialaboratorio, jossa tutkitaan ja testataan monia eri kokoisia ja tyyppisiä tuotteita esimerkiksi lähiseudun yritysten kanssa. Tästä johtuen oli järkevämpi hankkia laboratoriokäyttöön Pick-it:n malliston tarkin kamera, jotta tulevaisuudessa voitaisiin myös pienempiä kappaleita poimia laatikosta.

Pick-it L pystyy noukkimaan minimissään 150x150x50 mm kappaleita maksimissaan 1500x1900 mm kokoisesta laatikosta. Pick-it M taas havaitsee minimissään 50x50x10 mm kappaleita maksimissaan 700x900 mm kokoisesta laatikosta. Tässä työssä käytetty Pick-it M-HD pystyy havaitsemaan minimissään 10x10x5 mm kokoisia kappaleita maksimissaan 500x780 mm kokoisesta laatikosta. Pick-it M-HD -kamerassa pystytään tarkkuutta heikentämään keinotekoisesti, jotta voidaan simuloida Pick-it M ja Pick-it L -kameroiden tarkkuutta. Kuva-alaa ei kuitenkaan voida suurentaa, joten siltä osin Pick-it M-HD ei pysty simuloimaan esimerkiksi Pick-it L -kameraa.

Laatikosta poimimista on sanottu konenäön graalin maljaksi siksi, että se on erittäin haastavaa kameroiden ohjelmistoille. Useat eri valmistajat ovat tuoneet markkinoille kameroita ja väittäneet onnistuneensa tässä vaativassa tehtävässä. Käytännön kokeilujen perusteella on kuitenkin havaittu, että kaikki mainokset eivät ole täysin paikkaansa pitäviä. Tämän vuoksi oli erittäin tärkeää, että ennen hankintapäätöstä todetaan käytännössä kameroiden toimivuus eri kappaleilla. Nopeimmin tämä tapahtui menemällä messuille, jossa oli esillä useita eri tämän alan kameravalmistajia. Yksi tällainen messutapahtuma on Münchenissa joka toinen vuosi järjestettävä Automatica, jossa varsinkin vuosina 2016 ja 2018 kameran hankintaa evaluoineet henkilöt kävivät kaikkien potentiaalisten valmistajien esittelystündeillä tutkimassa, miten kamerat käytännössä toimivat. Tällä tutustumiskierroksella Pick-it todettiin helpoimmaksi käyttää kilpailijoiden joukosta, ja se tuntui myös toimivan luotettavimmin eri kappaleiden kanssa. Samalla myös havaittiin, että Pick-it tuntui olevan myös monen robottivalmistajan käytössä, kun he mainostivat omia robottejaan laatikosta poimimiseen. Myös tämä vahvisti käsitystä siitä, että Pick-it toimii myös muutenkin kuin vain heidän omilla mainoksillaan.

2.4 Tietoperustan muodostus

Tietoperustan muodostuksella tarkoitetaan sellaisen osaamisen kartuttamista, jolla kehittämistyön toteuttaminen on mahdollista. Tämän opinnäytetyön sovelluksen kehittämisessä oli merkittävästi hyötyä siitä, että työn tekijällä oli jo aikaisempaa kokemusta niin 3D-kuvauksesta kuin yhteistyöroboteistakin. Kymmenen vuoden konenäkökokemuksen aikana on käytetty valmiita 3D-kameroita, jotka toimivat rakenteellisen valaisun sekä stereokuvauksen periaatteella. Tämän lisäksi on rakennettu myös omia 3D-ratkaisuja sekä rakenteellisen valaisun, stereokuvauksen kuin siluettikuvaukseenkin pohjautuen. Näiden kokemusten ansiosta tätä työtä tehdessä ei tarvinnut opiskella erikseen 3D-kuvauksen perusteita, koska tämä osaaminen oli jo varsin vankalla pohjalla.

Myös yhteistyörobotit olivat varsin tuttuja tätä työtä tehdessä. Universal Robots UR5 sekä ABB YuMi -yhteistyöroboteista oli varsin kattava tuntemus jo ennen työn aloittamista. Työn tekemisen aikaan laboratorioon tuli vielä Omron TM12 -yhteistyörobotti, joten eri valmistajien yhteistyörobotit ja niiden erot ovat tulleet tutuiksi. Näillä alkutiedoilla tämän työn aloittaminen onnistui varsin helposti, eikä uutena asiana tullut kuin Pick-it -kameran käyttöliittymän opiskelu sekä sen liittäminen Universal Robots UR5 -yhteistyörobottiin. Lähinnä tässä työssä tietoperustan muodostaminen keskittyi näiden kahden teknologian, 3D-kuvauksen ja yhteistyörobotiikan, yhteen liittämiseen ja siihen tarvittavan osaamisen hankkimiseen sekä sen perusteella tapahtuneeseen tietoperustan jalostumiseen ja uudelleenorganisointumiseen. (Seitamaa-Hakkarainen & Hakkarainen n.d.)

2.5 Toteutustavan/menetelmän valinta ja käyttö

Kun tämän kehittämistyön tekemisen kannalta olennainen tietoperusta oli olemassa, lähdettiin valitsemaan toteutustapaa sekä määrittelemään tarkempia tavoitteita suunniteltavalle ja toteutettavalle järjestelmälle. Tietoperustan avulla on kohtalaisen helppo tuottaa suunnitelma, jossa valitaan kohteeseen soveltuva 3D-kamera, opetellaan sen käyttö robotin ohjauksessa sekä yhdistetään 3D-kamera ja robotti omaksi itsenäiseksi yksikökseen, joka huolehtii poimittavien kappaleiden

tunnistamisesta ja sen perusteella niiden poimimisesta. Sovelluksessa käytettävä yhteistyörobotti oli jo olemassa, joten 3D-kameroiden evaluoinnissa tuli ottaa huomioon kameran toimintamahdollisuus käytettävän robotin kanssa.

2.6 Tukevien menetelmien käyttö

Varmasti lähes kaikissa tutkimuksellisen kehittämistyön mukaan toteutetuissa kehittämistöissä tulee vastaan tilanteita, joissa pitää hyödyntää ns. tukevia menetelmiä eli menetelmiä, joilla ei ole pääroolia prosessin eteenpäin viemisessä, mutta joita ilman työ ei kuitenkaan etene. Tässä kehittämistyössä merkittävimmät tukevat menetelmät liittyivät erilaisten teknologisten menetelmien hyödyntämiseen lopullisen sovelluksen eri osien toteuttamisessa. Merkittävimmät tukevat menetelmät olivat ehdottomasti 3D-mallinnus, laitteiden väliset kommunikointiväylät sekä robotin tarttujan suunnittelumenetelmät.

3D-mallinnusta hyödynnetään sovelluksen suunnittelussa lähinnä osien käsittelyn suunnitteluun. Koska 3D-kamera ja robotti kommunikoivat verkon kautta, oli kommunikoinnin määrittely ja eteen tulleiden ongelmien ratkominen helpompaa, kun tässä vaadittavaa verkko-osaamista oli ennestään käytössä.

Käsiteltävät osat olivat sen verran poikkeuksellisia, että niitä varten piti suunnitella erityinen tarttuja. Tarttujan suunnittelussa täytyi miettiä tarttuja fyysisiä ominaisuuksia kuten ulottuvuutta sekä orientaatiomahdollisuuksia, koska kappaleet voivat olla korkeareunaisessa laatikossa periaatteessa missä asennossa tahansa. Vastaavasti tarttujan suunnittelussa tuli miettiä sen liittämistä robottiin sekä työkaluvaihdon mahdollisimman nopeaa sujumista.

Työssä hyödynnetyt tukevat menetelmät olivat automaatioteknologioiden opiskelun ja osaamisen näkökulmasta merkittäviä. Sekä kappaleiden käsittelyn suunnittelussa hyödynnetty 3D-mallinnus että tarttujan suunnitteluun liittyvät moniulotteiset osaamiset täydentävät sopivasti automaatioteknologiaosaamista.

2.7 Tulosten jakaminen

Tämän kehittämistyön tulosten jakamisessa on huomioitu kaksi erilaista kohderyhmää. Ensimmäinen ryhmä on tietysti sovellusta hyödyntävän yrityksen edustajat. Heidän on tärkeä ymmärtää, mistä osista sovellus koostuu ja mitä kaikkea sovelluksen hyödyntäminen lopullisessa kohteessaan vaatii heiltä. Toinen kohderyhmä on sitten ammattiyleisö, jolle asiaa esitellään 3D-kuvauksen ja yhteistyörobotiikan yhdistämisen luomien mahdollisuuksien näkökulmasta. Tulosten jakamisessa tähdätään siihen, että kohderyhmä ymmärtäisi mahdollisimman tarkasti ja laajasti kehittämistyön tulosten merkitystä.

Tämän työn aikana tehty sovellus, jossa käytetään 3D-kuvausta yhteistyörobotin ohjaamiseen laatikosta tavaroiden poimimisessa, on kuvattu demonstraatiovideoksi. Videota hyödynnetään erilaisten kirjallisten esitysten tukena, kun sovellusta hyödyntävälle yritykselle esitellään kokonaisuutta, sen toimintaperiaatetta sekä siihen vaadittavaa osaamista. Tätä videota voidaan myös käyttää, ja on käytetty, demonstroimaan laajemmin satakuntalaisille yrityksille, miten nykyaikainen yhteistyörobotti saa poimittua tyypillisestä kuljetuslaatikosta tuotteita, joita ei ole järjestetty erikseen robotille valmiiksi.

Demonstraatiovideo on tarkoitus julkaista myös RoboAI:n Internet-sivustolla yhtenä teknologiaesimerkinä. Internetistä löytyy kyllä ulkomaalaisia videoita, joissa esitellään laitteistoa, joka noukkii sekaisin olevia tavaroita laatikosta. Myös kyseisiä kameroita valmistavilla yrityksillä on mainostyyppisiä videoita tällaisista laitteistokokonaisuuksista. Tässä kehittämistyössä ajatuksena kuitenkin on, että myös suomalaiset yritykset uskaltaisivat ottaa tämän tyyppisiä laitteistoja käyttöönsä helpommin, kun he näkevät jonkun riippumattoman tahon tehneen esimerkin tällaisen laitteiston onnistuneesta käyttöönotosta.

2.8 Prosessin arviointi

Tämän kehittämistyön tutkimuksellista kehittämisprosessia on arvioitu läpi koko prosessin eri vaiheissa. Arviointi on tapahtunut yrityksen kommenttien perusteella

mutta myös tutkijayhteisön jäsenten ja opinnäytetyön ohjaajan toimesta. Läpi prosessin tapahtuneella arvioinnilla ollaan voitu varmistaa, että alkuperäinen tavoite on pysynyt kirkkaana mielessä, mutta toisaalta ollaan tunnistettu haasteita ja tulevaisuuden kehittämiskohteita. Arvioinnissa on myös huomioitu sovelluskehityksen mahdollisuuksia ja sitä, millaisiin kohteisiin ja millaisten kappaleiden kanssa vastaavaa sovellusta voitaisiin käyttää.

3 TEKNOLOGIAT

Tässä työssä käytettiin erityisesti kahta teknologiaa, joihin teollisuuden automaatiojärjestelmiä kehittävät yritykset panostavat tällä hetkellä voimakkaasti, yhteistyörobotiikkaa ja 3D-kuvausteknologiaa. Molemmat teknologiat ovat suhteellisen nuoria ja ne on otettu käytännössä käyttöön vasta vuosituhannen vaihteen jälkeen. Opinnäytetyön tekijä on työnsä puolesta ollut käyttämässä ja kehittämässä konenäköjärjestelmiä viimeisen kymmenen vuoden ajan, ja yhteistyöroboteista on käyttökokemusta yli kolmen vuoden ajalta.

3.1 3D-kuvaustekniikat

Konenäön käyttö teollisuudessa on viime vuosina lisääntynyt voimakkaasti. Kymmenen vuotta sitten konenäkösovellukset olivat suhteellisen harvinaisia, mutta nykyään konenäön käyttö tuotantolinjalla ei ole enää mikään poikkeus. Suurin osa käytettävistä konenäköratkaisuista on kuitenkin perinteisiä 2D-kuvia ottavien kameroiden ja niiden tuotosten tulkkaamista konenäköohjelmistolla. Näillä voidaan toteuttaa esimerkiksi laaduntarkkailua tai robottiin liitettynä kuljettimella tai muulla alustalla yksitellen kulkevien kappaleiden poimintaa ilman kappaleen keskittämistä robotille mekaanisesti.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään kuljetuslaatikossa saapuvien sokin sokin olevien tuotteiden poimintaan, ja tähän perinteiset 2D-kamerat eivät yleensä tuota tarpeeksi informaatiota, jotta voitaisiin toteuttaa nopea ja luotettava poiminta robotilla. Tietyin rajoituksin tosin myös 2D-kameralla voidaan toteuttaa yksinkertainen tuotteiden poiminta laatikosta.

Jos esimerkiksi poimittavat tuotteet voidaan poimia missä asennossa tahansa samalla tavalla, tai ne ovat poikkeuksetta samassa asennossa kuljetuslaatikossa, voidaan 2D-kameran ja robotin anturoinnin yhteistyöllä saada poimittua kappaleet. Silloin kamera voi kuvata kuljetuslaatikkoa yläpuolelta, ja tunnistaa laatikossa olevat tuotteet sekä ilmoittaa niiden X- ja Y-sijainnit. Kun robotilla on nämä kaksi tietoa, voi se siirtyä näihin koordinaatteihin laatikon yläpuolelle ja lähteä laskeutumaan hitaasti kohti

laatikon pohjaa. Mikäli käytössä on esimerkiksi imukuppitarttuja vakuunitunnistimella, voidaan robotilla laskea hitaasti, kunnes se huomaa vakuunitunnistimella tarttuneensa kappaleeseen. Tämän jälkeen tuote voidaan nostaa laatikosta. Tämä tapa on kuitenkin hidas, koska robotti ei kameran kuvan tuottamalla datalla pysty päättelemään kuinka korkealla kyseinen kohde on, joten sen pitää laskeutua varovasti kohdetta kohti.

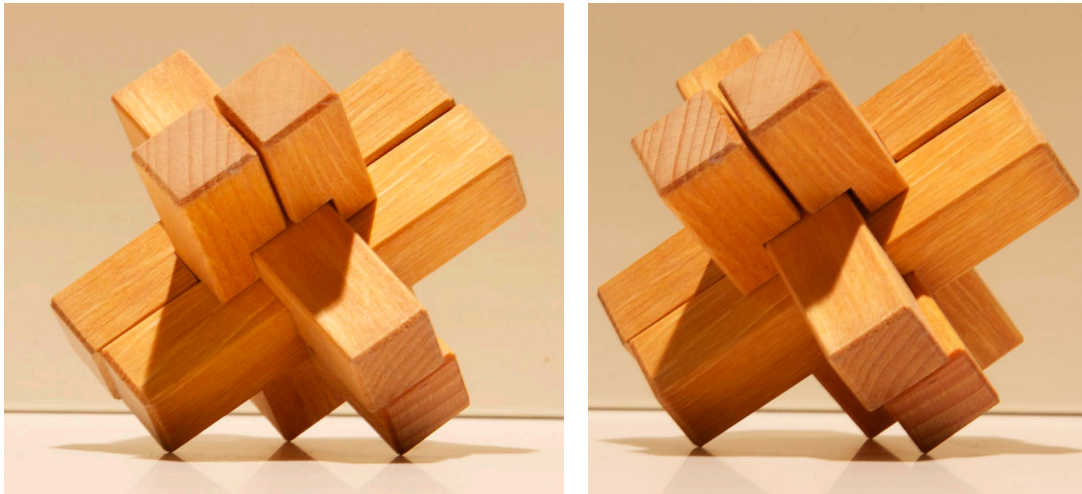
2D-kuvauksella toteutetussa sovelluksessa myös tarttujan pitää olla sen tyyppinen, että se tarttuu kappaleeseen heti kun siihen osutaan. Teoriassa tässä voitaisiin käyttää myös esimerkiksi sormitarttujaa ja robotin voimantunnistusta. Sormitarttujalla siis laskeuduttaisiin kuten aikaisemminkin, mutta vakuunitunnistuksen sijaan kohteen korkeus määriteltäisiin, kun voimantunnistin huomaa robotin osuneen johonkin. Kun kohteeseen on osuttu, tiedettäisiin sen korkeus ja siihen voitaisiin tarttua. Tässä tilanteessa kuitenkin tarvitaan kappale, joka ei liikahta herkästi pois alta, kun siihen osutaan. Muuten kappaleen tartuntapiste voi liikkua, eikä robotti enää saakaan kappaleesta kiinni. Näiden rajoitusten vuoksi 2D-konenäkösovelluksen käyttö tuotteiden noukintaan kuljetuslaatikosta on useimmiten huono ratkaisu.

Jotta tuotteen poimiminen onnistuisi kuten ihmiseltä, tarvittaisiin konenäköratkaisulta tieto kohteen sijainnista kolmessa ulottuvuudessa, sekä missä asennossa kyseinen tuote voidaan poimia. Jotta nämä kaikki tiedot saataisiin järjestelmältä, tarvitaan 3D-kuvaukseen pystyvä konenäköratkaisu. 3D-kuvaukseen on olemassa useita eri tekniikoita, mutta seuraavassa keskitytään niihin 3D-kuvaustekniikoihin, jotka soveltuvat tällaiseen bin picking -kohteeseen. Näitä ovat stereokuvaus, Time of Flight sekä erilaiset rakenteelliseen valaisuun perustuvat kuvaustekniikat. Näiden kolmen vaihtoehdon lisäksi on olemassa laatikosta poimimiseen 3D-kuvaussovelluksia, jotka käyttävät rakenteellisen valaisun ja stereokuvauksen yhdistelmää.

3.1.1 Stereokuvaus

Stereokuvaus on ihmiselle varsin tuttu 3D-kuvaustapa. Tämä on tekniikka, jolla ihminen tunnistaa etäisyyttä kohteeseen kahden silmän avulla. Silmät ovat hieman eri paikoissa, joten ne näkevät kohteen hieman eri kulmasta toisiinsa nähden. Aivot

osaavat vertailla näiden kahden eri kuvan perspektiivieroja, ja osaavat tästä havainnoida kohteen etäisyyden (Kuva 1). Ihmisen kykyä erottaa kohteiden etäisyyttä parantaa aivojen erittäin suuri laskentateho ja eri asioiden hahmottaminen verrattuna tietokoneiden suorittamaan stereokuvaukseen.



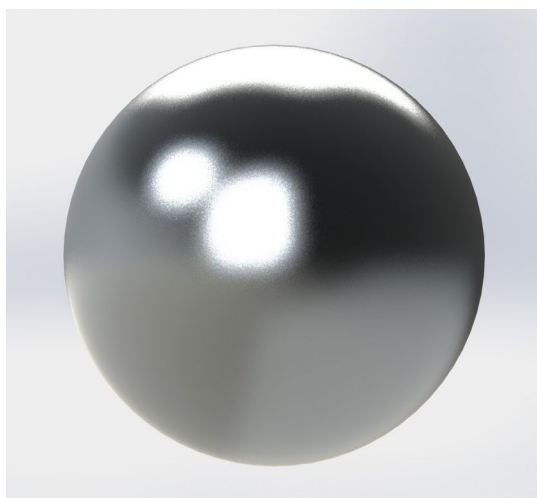
Kuva 1. Pirunnyrkki stereokuvattuna kahdesta eri suunnasta

Aivoilla on vuosien kokemus siitä, minkä kokoisia eri asiat ovat ja miten ne sijoittuvat maailmaan loogisesti. Mikäli me katsomme sohvia, joka jää osittain pöydän taakse, osaamme ilman 3D-kuvaustakin (eli yhdellä silmällä) sanoa pöydän olevan sohvia lähempänä. Osaamme myös arvioida kohteiden etäisyyttä sen perusteella, minkä kokoisina ne näyttävät ja mitä niiden ympärillä on. (Marshall 1994; Kortelainen et al 2013.)

Konenäköjärjestelmä ei yleisesti ottaen vielä pysty helposti hahmottamaan kappaleiden etäisyyttä, vaan sen pitää havaita etäisyydet laskemalla, missä kohtaa eri kuvia kyseinen kohde on. Tämä vaatii niin sanottujen vastinpisteiden löytämistä. Eli molemmista kuvista pitää löytää pisteitä, jotka esittävät samaa kohtaa kappaleessa. Mikäli kohde on esimerkiksi täysin tasaisen värinen, eikä siinä ole teräviä kulmia, ei stereokuvaus välttämättä pysty antamaan siitä oikeaa 3D-dataa. Aina, kun molemmista kuvista löydetään samaa kohtaa esittävä piste, voidaan laskea kappaleen etäisyys, mikäli kameroiden optiset ominaisuudet ovat tiedossa. Nämä optiset ominaisuudet eri kohdissa kuvaa saadaan yleensä kalibroimalla kamerat tiedetyllä kohteella, kuten kalibrointilevyllä. Kalibrointilevyssä on tunnettu kuvio tietyn kokoisena, jonka

perusteella voidaan laskea kameroiden etäisyydet ja optiset ominaisuudet. (Marshall 1994; Kortelainen et al 2013.)

Koska stereokuvauksessa pitää löytää paljon vastinpisteitä, aiheuttaa tämä rajoituksia kappaleisiin, joita voidaan havainnoida luotettavasti. Kappaleessa pitäisi mielellään olla tekstuuria, jonka perusteella kuvasta voidaan päätellä nämä vastinpisteet. Kohde ei myöskään saa heijastaa esimerkiksi ympäröivää valaistusta, koska tämä heijastus sekoittaa vastinpisteiden löytämistä (Kuva 2). Heijastunut valaistus kun ei näytä tulevan samasta kohdasta eri kulmista kuvattaessa. Esimerkkinä hankalasta kappaleesta tässä mielessä voidaan antaa vaikkapa kromatut kappaleet. Sama ongelma tulee läpikuultavien kappaleiden kanssa, mutta päinvastaisesta syystä. Läpikuultavien kappaleiden kanssa kamera näkee kohteen takana olevia asioita, mikä sekoittaa luotettavien ja paikkansa pitävien vastinpisteiden löytämistä. Esimerkiksi lasiset kohteet ovat erittäin hankalia stereokuvaukselle. (Marshall 1994; Kortelainen et al 2013.)



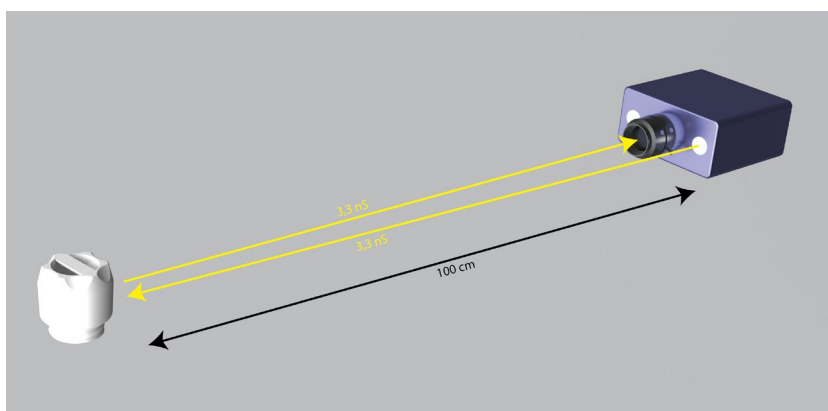
Kuva 2. Esimerkki stereokuvaukselle hyvin haastavasta kappaleesta

3.1.2 Time of Flight

Time of Flight -kamerat (ToF) ovat tätä opinnäytetyötä kirjoittaessa vielä varsin harvinaisia. Tämä pitää paikkansa varsinkin, mikäli kuvallinen resoluutio pitäisi olla muiden 3D-kameroiden tasolla. Lyhyesti selitettynä ToF-kamera lähettää valopulssin kennon läheltä kohti kohdetta, joka heijastaa kyseisen valopulssin takaisin kameralle.

Kamera laskee, kuinka kauan valopulssilla kesti kulkea kohteeseen ja heijastua takaisin. Tästä saadaan valon nopeuden vakiota käyttäen matemaattisesti yksinkertaisesti laskettua, kuinka kaukana kohde on. Matemaattisesti etäisyyden laskeminen voi olla yksinkertaista, mutta koska valo kulkee noin 300 000 000 metriä sekunnissa, on valon kulkeman ajan mittaaminen käytännössä varsin haasteellista. Esimerkiksi jos kohde on metrin päässä, kestää edestakainen matka valolta noin 6,6 nanosekuntia. (Kortelainen et al 2013.)

ToF-kamerat voivat toimia kahdella eri tavalla. Joko ne todella mittaavat tuon valonsäteen kulkeman ajan, tai kamera havainnoi vaihe-eroa, minkä valonsäteen kulkema aika on aiheuttanut ja laskee tästä kohteen etäisyyden. Kummassakin tavassa on omat haasteensa, eikä ToF-kameroilla tästä johtuen ole kovin montaa eri pikseliä, jotka mittaavat etäisyyden. Näin ollen kuvallinen resoluutio jää yleensä alle 640x480, ja etäisyystieto saadaan vain noin sentin tarkkuudella valonsäteen suuresta nopeudesta johtuen. Toisaalta maksimikuvausetäisyys on omaa luokkaansa 3D-kameroiden keskuudessa. ToF-kamerat sopivat periaatteessa laatikosta noukittavan tavaran havaitsemiseen, mutta kalliin tekniikan ja vaatimattoman etäisyysresoluution vuoksi niitä ei yleisesti ole tässä käytössä. Toki sekä kuvallinen resoluutio että etäisyysresoluutio kasvavat tekniikan kehittyessä. (Kuva 3)

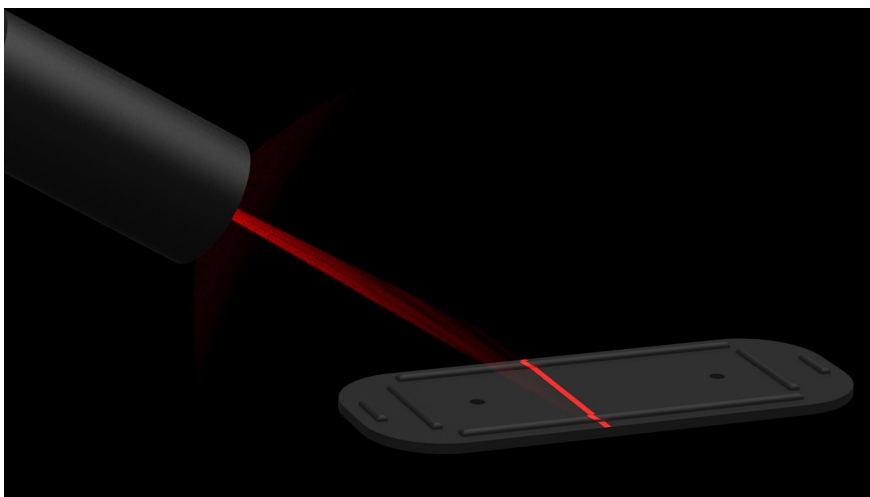


Kuva 3. Havaintoesitys Time of Flight -kameran toiminnasta. LED-valaisimen valonsäteiltä mene noin 6,6 ns aikaa edestakaiseen matkaan metrin päähän ja takaisin.

3.1.3 Rakenteellinen valaisu

Rakenteelliseen valaisuun perustuva 3D-kuvaus tarkoittaa konenäkösovellusta, missä kohdetta valaistaan reunan muodostavalla valaisimella hieman eri kulmasta, kuin mitä kamera kuvaa sitä. Kun tiedetään, kuinka kaukana tämä valaisin on kamerasta, sekä missä kulmassa se kameraan nähden on, pystytään kuvaan muodostuvan valaisukuvion perusteella laskemaan, kuinka kaukana kohde on.

Perinteisin rakenteelliseen valaisuun perustuva 3D-kamera on laserviivan ja kameran muodostama järjestelmä, jossa kameran kuvassa laserviivan sijainti määräytyy kohteen etäisyyden mukaan (Kuva 4). Tällaista kuvaustekniikkaa kutsutaan yleisesti laserskannaukseksi. Koska kyseisessä järjestelmässä havaitaan vain laserviivan valaiseman kohdan etäisyys, on kyseessä käytännössä viivakamera, joka mittaa etäisyyttä. Tästä johtuen kameran ja kohteen pitää liikkua toisiinsa nähden, jotta saadaan ns. skannattua kohde kokonaisuudessaan. Tämä tapahtuu käytännössä joko kuljettamalla kappale kameran alitse esimerkiksi liukuhihnalla, tai liikuttamalla kamera kappaleen ylitse esimerkiksi robottiin tai lineaarijohteeseen kiinnitettynä.



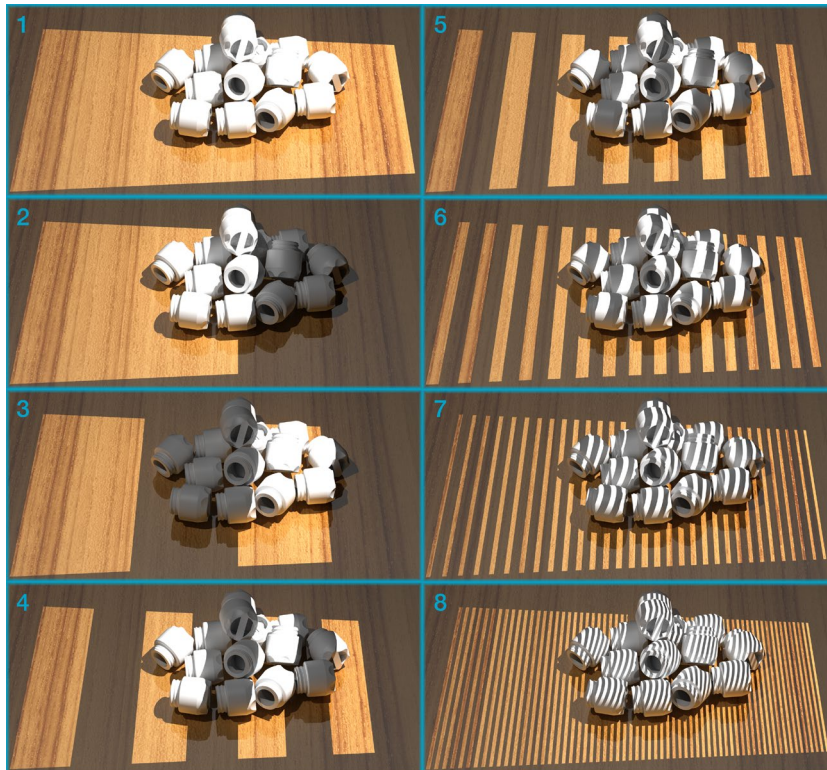
Kuva 4. Laserviivaan perustuva rakenteellinen valaisu

Laserviivaan perustuvia laatikosta poimimiseen tarkoitettuja kamerajärjestelmiä käytetään, mutta nämä ovat mekaanisen toteutuksen osalta staattisia kameroita monimutkaisempia. Tähän tarkoitukseen on laserviivaa monipuolisempi ratkaisu, joka on kuitenkin myös rakenteelliseen valaisuun perustuva kuten laserviivakin. Tässä

ratkaisussa korvataan laserviiva projektorilla, jolla saadaan kohteen pintaan kameran kuva-alan kokoinen haluttu valaisukuvio. (Batchelor 2012.)

Projektoria käytettäessä on tyypillistä, että kuvia otetaan useita erilaisia valaisukuvioita käyttäen. Yksinkertaisin projektorityyppinen 3D-kuvaustapa on ensin valaista puolet kuva-alasta kirkkaaksi ja toinen puoli tummaksi. Tällöin kamera tietää jokaisen kuvattavan pikselin kohdalla onko se valaisimen kirkkaaksi valaisevalla puolella vai ei. Tämän jälkeen otetaan kuva, missä projektori valaisee kahdella kirkkaalla alueella, kun taas kaksi aluetta jäävät tummiksi. Nyt tiedetään jokaisen kuvattavan pikselin tapauksessa, mihin neljästä eri valaisualueesta ne kuuluvat. Näin jatketaan, kunnes päästään haluttuun resoluutioon (Kuva 5). Nämä tiedot yhdistämällä saadaan tietää, mihin projektorin valaisualueeseen mikäkin kameran näkemä pikseli kuuluu, ja pystytään trigonometrisesti laskemaan näiden pikseleiden etäisyydet kamerasta. Nykyiset kamerat käyttävät monimutkaisempia valaisukuvioita, jotta ne pääsisivät samana lopputulokseen vähemmillä kuvilla, mutta periaate on sama.

Monta kuvaa yhdistävästä kuvaustavasta johtuen projektorityyppinen rakenteellinen 3D-kuvaustapa vie enemmän aikaa kuin vain yhden kuvan ottaminen veisi. Laserviivaa käyttäen kohdetta pitää liikuttaa kameraan nähden, mutta päinvastaisesti taas projektorilla käyttäessä kohde ei saa liikkua kameraan nähden kuvauksen ajan. Toisin kuin liukuhihnalla, tämä ei ole laatikosta poimimisen tapauksessa useinkaan ongelma. Kuvaustapahtuman ajallinen pituus riippuu kameran prosessointikyvystä, sekä ympäristön valaistuksesta riippuvasta valotusajasta kuvia ottaessa. Projektorityyppisellä rakenteellisen valaisun 3D-kameralla saatetaan siis puhua kymmenistä millisekunneista aina useaan sekuntiin asti puhuttaessa kuvaustapahtuman kestosta. Tyypillisesti, kun käytetään rakenteellista valaisua 3D-kuvauksessa, saadaan paras lopputulos, kun ympäristön valaisu ei häiritse kameran valaisinta. Stereo- ja ToF-kuvauksen kohdalla saadaan 3D-kuva yhdellä hetkellä, joten niiden kohdalla ei ole samanlaista rajoitetta kuvattavan kappaleen liikkumisessa kameran suhteen kuin rakenteellisen valaisun kuvauksissa. (Kortelainen et al 2013.)



Kuva 5. Projektorityyppisen rakenteellisen valaisun käyttämiä valokuvioita

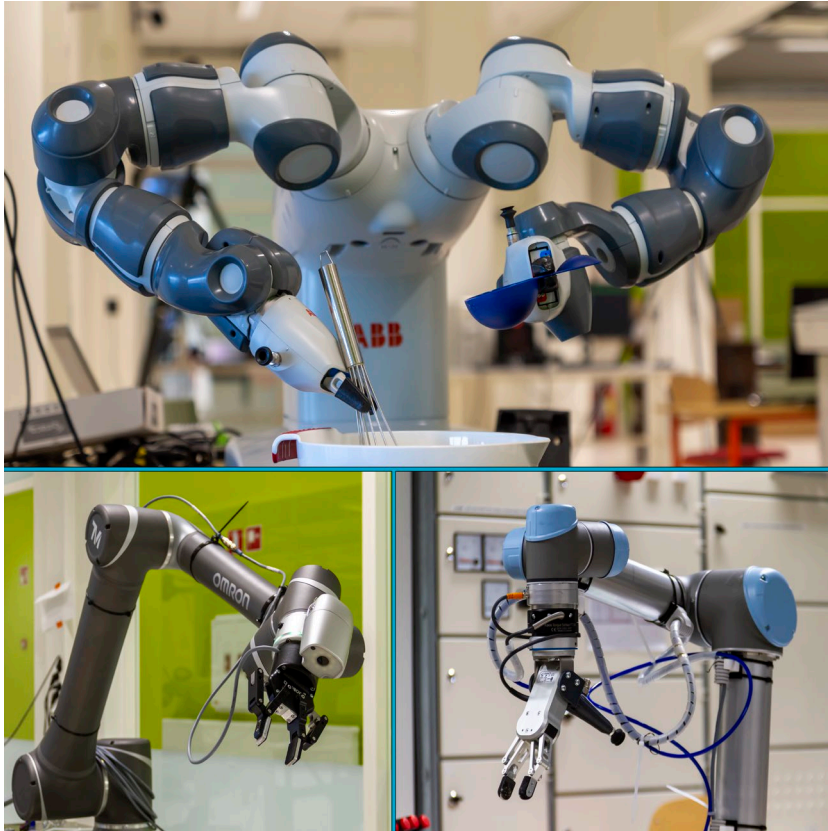
3.2 Yhteistyörobotit

Perinteisesti teollisuudessa käytetyt robotit ovat turva-aidan taakse suljettuja itsenäisesti toimivia kokonaisuuksia, joiden kanssa ihmisen on ollut hyvin hankala tehdä yhteistyötä turvallisesti. Perinteinen tapa onkin pysäyttää robotin toiminta kokonaan, mikäli käyttäjän pitää päästä turva-alueen sisäpuolelle. Alueelta poistuttuaan käyttäjä voi taas manuaalisesti laittaa robotin uudelleen toimintaan. Mikäli ihminen on vahingossa joutunut turva-alueen sisälle, on perinteisesti pitänyt tehdä hätäpysäytys robotille. Tästä tilasta selviämiseen on yleensä vaadittu sitten jo suurempia toimenpiteitä, ja työskentelyyn on tullut seisaus. (Robotiq n.d.a; Roel 2017.)

Jotta työnteko ihmisen kanssa olisi sulavampaa, pitää robotin pystyä olemaan vahingoittamatta ihmistä, vaikka tulisikin yllättävä tilanne eteen. Parhailaan yhteistyörobotti tekee työtä samaa nopeutta kuin tavallinen teollisuusrobotti, mutta ihmisen lähestyessä voidaan vaihtaa liikenopeudeksi yhteistyöturvallisuuden takaama hitaampi nopeus. Tämä kuitenkin vaatii robotin käyttöön ulkoista anturointia riippuen

hieman robotin asennuspaikasta. Tyypillisimmin nämä anturit ovat laserskannereita, ihmisen havaitsevia turvakameroita tai esimerkiksi turvamattoja. Mikäli näitä antureita tai turva-aluetta ei käytetä, pitää robotin pysyä jatkuvasti yhteistyötilassa. Työtehtävästä riippuen valitaan, kumpaa tapaa käytetään asennusta ja ohjelmointia tehtäessä. Yhteistyörobotti voi olla järkevä vaihtoehto, vaikkei robotti yleensä teekään työtä yhteistyössä ihmisen kanssa. Oikein toteutettu yhteistyörobottisolun ei tarvitse turva-aitoja ympärilleen, mikä säästää tehdashallin pinta-alaa. Näiden asioiden takia yhteistyörobotit ovat ruvenneet valtaamaan varsinkin pienempien, perinteisten teollisuusrobottien markkinoita. (Bélanger-Barrette 2015b; Lazarte 2016; Westmoreland 2018.)

Yhteistyörobotin idea on yli 20 vuotta vanha. 1990-luvulla haettiin useita patenteja ja tutkittiin eri tekniikoita (US Patent 5,952,796 1997). Vuonna 2004 KUKA julkaisi ensimmäisen yhteistyörobotin (DLR Light-Weight Robot III n.d.). Tämän jälkeen useilta valmistajilta on tullut yhteistyörobotteja markkinoille, varsinkin viimeisen kymmenen vuoden aikana. KUKAn lisäksi ainakin Universal Robots, FANUC, ABB ja Omron ovat julkaisseet yhteistyörobotteja markkinoille (Kuva 6).

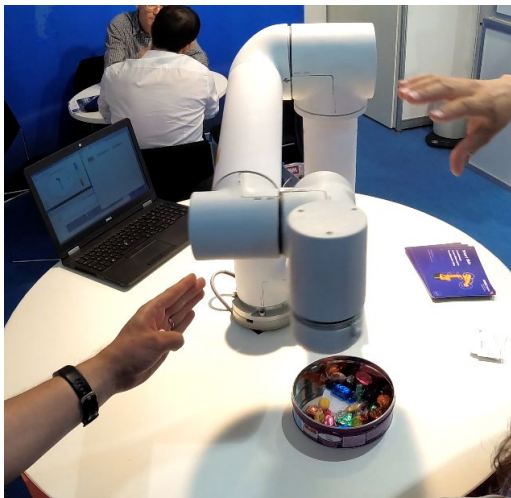


Kuva 6. Eri valmistajien yhteistyörobotteja

Yhteistyörobotit ovat tyypillisesti teollisuusrobottien pienempää kokoluokkaa, ja FANUC CR-35iA on tätä työtä kirjoitettaessa 35 kg:n kantokyvyllään yhteistyörobottien raskaimmasta päästä (FANUC CR-35iA n.d.). Tyypillisesti yhteistyörobotit havaitsevat törmäyksen ihmiseen, minkä jälkeen ne pysähtyvät. Tällä tekniikalla on hankala tehdä paljon painoa nostava yhteistyörobotti, koska robotin käsivarren päässä oleva raskas massa hankaloittaa herkkää törmäystunnistusta. Lisäksi suuri massa käsivarren päässä itsessään aiheuttaa robotin käsivarren massan kanssa niin suuren liike-energian, että vaikka robotti pysähtyisi välittömästi törmäyksen jälkeen, saattaa vahinko olla jo liian suuri ihmiselle. Tätä ongelmaa ratkaisemaan on olemassa jo joitain kolmannen osapuolen eri tyyppisiä ratkaisuja, sekä myös itse robottivalmistajat ovat tutkimassa eri tekniikoita, joilla törmäys pystyttäisiin estämään kokonaan. (Bélanger-Barrette 2015c; Busch 2018; Greene 2018.)

Törmäyksen estäviä ratkaisuja ovat esimerkiksi eri konenäkötekniikkaan perustuvat anturit, jotka tarkkailevat robotin käsivarren läheisyydessä olevaa aluetta ja välttävät näin törmäykset. Toinen kokonaan törmäykset välttävä tapa on peittää robotin käsivarsi kapasitiivisilla antureilla, jotka havaitsevat ihmisen ja muut esteet jo ennen

törmäystä. Näin robotti voi joko pysähtyä etukäteen, tai jopa väistää estettä ja jatkaa työtään (Kuva 7) (Focale-robotics 2019). Kolmas kolmansien osapuolien myymä tekniikka on sukittaa robotin käsivarsi ilmatyynyillä, joissa on painenaturit sisässä. Mikäli robotti törmää johonkin, ilmatyynyn sisällä paine kasvaa ja robotti pysähtyy. Tämä tekniikka ei pysäytä robottia ennen törmäystä, mutta se on huomattavasti herkempi kuin perinteinen servojen voimantunnistuksella tapahtuva törmäyksen tunnistus.



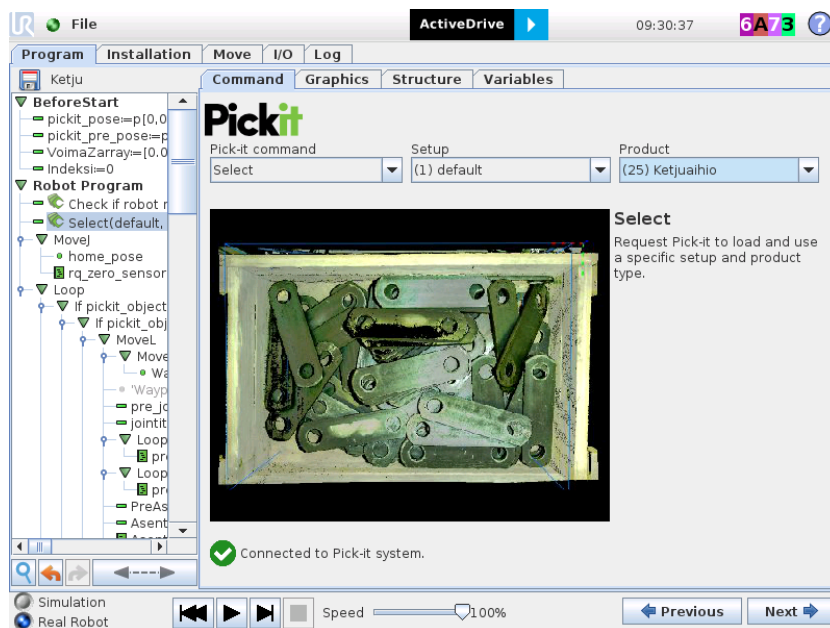
Kuva 7. Yhteistyörobotin kapasitiivinen iho testissä

3.3 3D-kuvauksen ja yhteistyörobottien yhdistäminen

Tässä työssä yhteistyörobotin ja 3D-kamerajärjestelmän yhteen liittäminen oli huomattavasti helpompaa kuin yleensä tällaisten järjestelmien yhteen liittäminen, koska käytössä oli Pick-it M-HD -kamera ja Universal Robots UR5 -yhteistyörobotti. Pick-it on tehnyt Universal Robotsin robotteja varten ohjelmiston, joka integroi heidän konenäköjärjestelmänsä robotin järjestelmiin. Käytännössä robottiin piti vain asentaa Pick-it:n tekemä URcaps-ohjelma, jonka jälkeen kameran keskusyksikkö piti vain kytkeä samaan verkkoon missä UR5 oli. Tämän jälkeen molemmille laitteille kerrottiin toistensa IP-osoitteet, ja ne kommunikoivat automaattisesti toistensa kanssa. (Pick-it:n Internet-sivusto n.d.)

Universal Robotsin opetuspendantista (Kuva 8) näkee Pick-it -kameran kuvan ja joitain asetuksia pystyy suoraan muuttamaan robotin käyttöliittymästä. Esimerkiksi

robotti voi vaihtaa, mitä opetettua kappaletta haetaan, ja komentaa kameraa ottamaan kuvan, kun robotti ei ole enää kuvausalueella. Mikäli Pick-it ei olisi tehnyt valmista sovellusta käytetylle robotille, olisi tarvittavan tiedon saanut siirrettyä robotille TCP/IP tiedonsiirrolla (The low-level communication... n.d.). Teoriassa 3D-kameran pitää vain lähettää robotille tieto siitä, missä tuote sijaitsee koordinaatistossa. Lisäksi tarvitaan vielä tieto siitä, missä asennossa robotin tarttujan pitää olla, että kyseinen tuote saadaan noukittua.



Kuva 8. Pick-it M-HD -kameran käyttöliittymä Universal Robotsin pendantilla

Käytännössä edellä mainittujen perustietojen lisäksi tietoa siirretään huomattavasti enemmän. Kamera kertoo muun muassa noukittavan kappaleen mitatun koon, mikä opetetuista kappaleista on kyseessä, lähestymispisteen, kuinka vanha tieto on kyseessä, kuinka varmasti kappale on tunnistettu ja niin edelleen. Käytännössä tämän kommunikoinnin tekeminen varmatoimisesti käsin on yllättävän suuri työ. Onneksi Pick-it tukee useita robottivalmistajia, joille he ovat tehneet kommunikointiohjelmiston valmiiksi. Valmiit ohjelmistot Pick-iltä löytyvät Universal Robotsille, ABBlle, KUKAlle, Yaskawalle, FANUCille, Stäublille, Frankalle ja Hanwhalle. Mikäli kameraa halutaan käyttää muiden robottivalmistajien roboteilla, tai muilla laitteilla, pitää kommunikointi tehdä itse. (Pick-it:n Internet-sivusto n.d.)

Datayhteyden muodostamisen lisäksi yleinen ongelma kameroiden ja robottien yhdistämisessä on niiden koordinaatistojen kalibroiminen yhteensopivaksi. Yleisesti ottaen kamerat näkevät kohteiden sijainnit pikseleinä kameran kuvan jostain kulmasta lähtien eli kameran koordinaatiston yksikkönä on pikseli. Robotit taas käyttävät koordinaatistossaan yksikkönä yleensä millimetrejä. Normaalissa tapauksessa on kaksi tapaa, miten koordinaatistot saadaan kalibroitua keskenään. Kameralle kerrotaan ensin, kuinka monta pikseliä vastaa yhtä millimetriä, jotta etäisyydet kameran kuvassa voidaan kertoa millimetreinä. Tämän jälkeen joko kameralle kerrotaan, missä robotin koordinaateissa kuvan mikäkin kohta on (eli kamera kertoo robotille suoraan sen ymmärtämiä mittoja) tai ehkä hieman helpompi on tehdä kameran kuva-alalle robotin ohjelmistoon uusi taso, jonka origoksi merkataan se kuvan kulma, joka kameralla on origona. Tällöin kamera kertoo, kuinka monta millimetriä kuvan reunasta se havaitsee kohteen, ja robotti laskee omassa ohjelmistossaan, miten se tuohon kohteeseen pääsee.

Molemmat edellä esitetyt koordinaatistojen yhdistämistavat toimivat kyllä, mutta jälkimmäiseen on helpompi tehdä muutoksia, mikäli kamera liikkuu robottiin nähden. Mikäli robotin ja kameran koordinaatistot eivät ole saman suuntaisia, on jälkimmäinen tapa ehdottomasti paljon helpompi. Tällöin taso voidaan vain opettaa kameran kuva-alan suuntaiseksi, eikä tarvitse laskea erikseen kulmia robottia varten.

Universal Robotsin ja Pick-it -kameran koordinaatistojen yhteen liittäminen oli kuitenkin vielä edellä esitettyäkin helpompaa. Pick-it toimittaa kameran mukana kalibroitilevyn (Kuva 9), mikä kiinnitetään robotin laippaan kiinni. Tämän jälkeen robotti ajetaan kameran kuva-alueelle, ja robottia liikutetaan kuuteen eri asentoon tällä kuva-alalla. Koska kamera on yhdistetty robottiin, pystyy se lukemaan, missä pisteessä robotti milläkin kerralla omasta mielestään on. Vertaamalla näitä pisteitä siihen, miten se milloinkin tämän tuntemansa kalibroitilevyn omalla kuva-alallaan näkee, pystyy kamera laskemaan kameran ja robotin välisen sijainnin. Kun nämä kuusi asentoa on opetettu, pystyy kamera suoraan antamaan robotille koordinaatit, jotka korreloivat molemmilla laitteilla samaan pisteeseen. Pick-it osaa myös kertoa, mihin UR5-yhteistyörobotti yltää. Eli se ei yritä lähettää robotille koordinaatteja, joihin se ei yllä joko paikan tai asennon vuoksi. (Pick-it:n ohjesivusto n.d.)

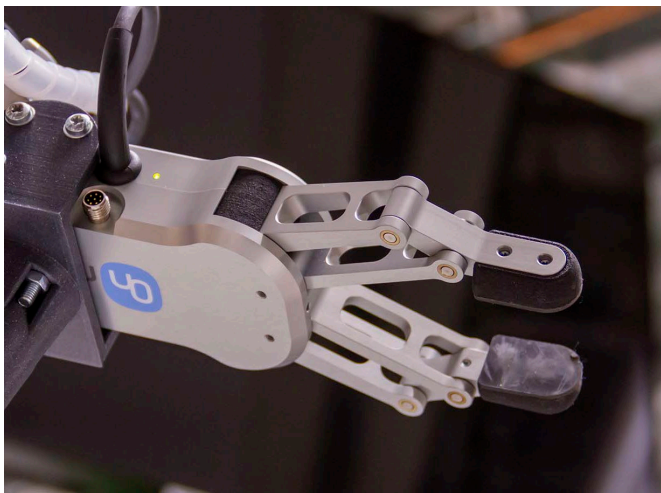


Kuva 9. Pick-it -kameroiden mukana tuleva kalibrointilevy

4 KEHITTÄMISTYÖN TEKEMINEN

Kehittämistyön robottikäsitteilyn kohteena oli metalliset levyt, joista on tarkoitus tehdä suuria ketjuja. Nämä levyt toimitetaan laatikossa ketjuvalmistajalle, joka joutuu ne siis purkamaan tästä kuljetuslaatikosta. Ketjulevyt eivät ole mitenkään järjestyksessä, vaan ne ovat sikin sokin puisissa laatikoissa. Ensimmäisessä kehittämistyön vaiheessa täytyi suunnitella, miten robotti saisi näistä metallisista kappaleista kiinni.

Sovelluksen demonstraatioversion tekoon robotilla oli käytössä kaksisormitarttuja sekä imukuppitarttuja. Kaksisormitarttuja olisi kyllä saanut kappaleiden reunoilta kiinni, mutta tämä olisi rajoittanut sitä, missä kohdassa laatikkoa olevia kappaleita olisi pystytty nostamaan. Jos ainoa tapa saada metallilevystä kiinni olisi ollut tarttua sen ympäriltä kaksisormitarttujalla, olisi laatikon reunassa kiinni olevaan kappaleeseen ollut lähes mahdotonta saada otetta. Metallilevyissä oli aina kaksi reikää ketjun rullaa varten, joten näistä reijistä olisi mahdollisesti voinut ottaa kiinni sisätartunnalla. Valitettavasti robotissa ollut OnRobot RG2 -kaksisormitarttuja (Kuva 10) on tarkoitettu pienempien tuotteiden tartuntaan, joten sen maksimissaan 40 N tartuntavoimaa epäiltiin liian heikoksi näille kappaleille.



Kuva 10. OnRobot RG2 -kaksisormitarttuja

Toisena vaihtoehtona ollut imukuppitarttuja olisi toiminut luultavasti ainakin hetken aikaa, mutta ajatuksesta luovuttiin, koska metallikappaleet olivat hieman likaisia. Imukuppitarttuja toimii hyvin, jos kappale on kiinteä, tasainen ja puhdas. Nämä

metallikappaleet olivat kiinteitä ja tasaisia, mutta eivät puhtaita. Mikäli imukuppitarttujaa olisi käytetty, olisi se likaantunut kappaleita nostettaessa. Tämä taas olisi aiheuttanut ilmavuotoja imukupin ja kappaleen välissä, ja tarttuja olisi menettänyt tehoaan käytön aikana. Tämä on yleinen ongelma imukuppien kanssa, kun tuotantotila ei ole puhdas. Ongelmaa voidaan lieventää esimerkiksi robottiin ohjelmoidulla niin sanotulla pesuohjelmalla, jossa se pyyhkäisee imukuppitarttujaa puhdistusliinassa tai -sienessä aika ajoin, mutta tämä olisi lisännyt järjestelmän monimutkaisuutta sekä ylläpidon määrää.

Koska kyseessä oli rautaiset kappaleet, kääntyi ajatus pian magneettisiin tarttajiin. Magneettitarttuvia tehdään sekä kestmagneetilla että sähkömagneetilla. Yleensä sähkömagneetit ovat huomattavasti monipuolisempia käyttää, koska magnetismin saa kytkettyä pois käytöstä, kun tarttujan halutaan päästävän irti kappaleesta. Valitettavasti sopivia sähkömagneetteja ei ollut saatavilla tätä testiä tehdessä, joten päädyttiin kokeilemaan kestmagneettitarttujaa. Robottiin tehtiin kestmagneettitarttuja käyttäen kahta 3D-tulostettua kappaletta sekä 20 cm pätkää nelikulmaista alumiiniputkea. Putki yhdistettiin tulostettuihin kappaleisiin liimalla, ja toiseen tulostetuista kappaleista liimattiin 10 kpl pieniä kestmagneetteja (Kuva 11). Tarttujan toiseen päähän tulostettiin robotin laippaan sopiva kiinnitysosa. Tarttujaa testatessa havaittiin, että se ottaa voimakkaasti kiinni metallikappaleisiin. Kappaleet saatiin kuitenkin hyvin irti tarttujasta, kun ne ensin laskettiin pöydälle ja tämän jälkeen käännettiin tarttuja irti niistä siten, että tarttujan muovinen kulma piti kappaleita pöydän pinnassa magneettien noustessa irti kappaleesta.



Kuva 11. Robotille tehty kestmagneettitarttuja

Kestomagneettitarttuja toimi paremmin kuin osattiin odottaa. Ainoa ongelma oli, että kappaleet nousivat ilmaan ennen kuin tarttuja oli täysin kerennyt ottaa niihin kiinni. Metallikappaleet siis lensivät magnetismin vetovoimasta noin reilun millin verran kohti tarttujaa, kun se läheni niitä. Tämä tuli ongelmaksi silloin, jos kappale ei ollut täysin horisontaalasti, vaan oli kulmassa. Kun se lähti ilmaan, kerkesi vetovoima vetämään sitä hieman sivulle ennen kuin se otti tarttujaan kiinni. Tämän vuoksi kappale ei ollut täysin keskellä tarttujaa, vaikka robotti olisikin saanut kameralta täysin oikean koordinaatin.

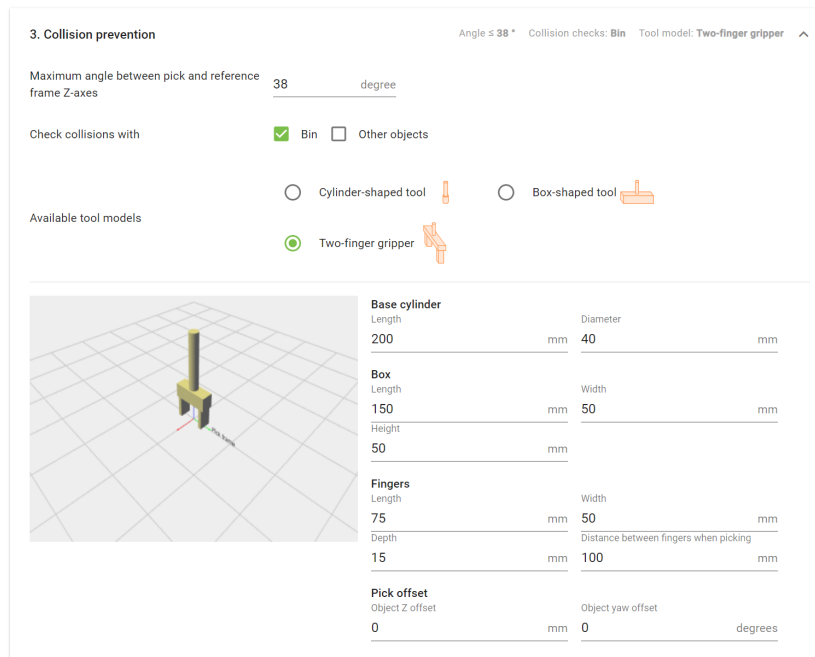
Mahdollinen edellä mainituista syistä johtuva vino tartunta korjattiin käyttämällä puulaatikon reunaa eräänlaisena keskittimenä. Robotti nosti kappaleen ilmaan puulaatikon reunan suuntaisesti, ja kävi tarttujalla puolen rautalevyn leveyden päässä molemmin puolin puulaatikon reunaa (Kuva 12). Tämä keskitti kappaleet tarttujaan, mikäli ne olivat päässeet liikahtamaan tartuntavaiheessa.



Kuva 12. Puulaatikon reunan käyttäminen levyn keskittämiseen

Kun oli ensin selvitetty, miten robotti saa kiinni kappaleista, piti seuraavaksi saada kamera ymmärtämään kappaleet. Kameran konfiguroinnin (Kuva 13) yhteydessä kameralle pitää kertoa kolme asiaa:

1. Mistä kappale poimitaan?
2. Mikä kappale poimitaan?
3. Millä kappaleeseen tartutaan?



Kuva 13. Käytettävän työkalun tietojen opettaminen Pick-it -kameran ohjelmistoon

Ensimmäinen kohta, eli mistä kappale poimitaan, tarkoittaa lähinnä sitä, että kamera ottaa 3D-kuvan, ja sen perusteella kerrotaan, missä on sen laatikon reunat ja pohja, josta kappale pitää ottaa. Näitä tietoja käyttäen kamera pystyy kertomaan, milloin laatikko on tyhjä, sekä välttämään kertomasta robotille tartuntapisteitä mihin robotti ei pystyisi menemään laatikon reunojen vuoksi.

Kun kysymykseen mistä on vastattu, on seuraavaksi vuorossa kysymys mikä. Kameralle opetetaan kappale siten, että se laitetaan yksinään kameran kuva-alalle. Kamera ottaa kuvan, josta se tunnistaa yksinäisen kappaleen ja tekee siitä mallin. Mallia voi myös käsin parannella, jos näyttää, ettei automatiikka täysin osannut eristää haluttua mallia taustasta. Tämän kehittämistyön kohteena olleet ketjujen levyt olivat siitä helppoja, että ne ovat samanlaisia molemmilta puolilta. Tässä tapauksessa siis riitti yksi opetettu kuva, ja kaikki kappaleet saadaan poimittua laatikosta. Mikäli tartuttava kappale olisi monimutkaisempi, voidaan Pick-it -kameraan opettaa 8 eri mallia samasta kappaleesta eri asennoissa. Kaikille näille malleille voidaan kertoa eri tartuntapisteet, jotka robotille välitetään, joten olipa kappale miten päin hyvänsä laatikossa, saataisiin se poimittua. Ketjulevyjen kapeaa reunaa ei opetettu kameralle, koska sen tunnistamisesta ei olisi ollut mitään hyötyä. Robotissa ollut magneettitarttuja pystyy ottamaan kiinni vain levyjen tasaisiin kohtiin. Levy oli myös niin ohut, ettei ollut kovin suurta todennäköisyyttä, että ne pysyisivät pystyssä itsekseen. Eli kun

laatikosta saatiin otettua levyjä pois, kaatuivat mahdolliset pystyssä olevat levyt itsekseen, kun ne eivät pysyneet enää ilman tukea pystyssä. Näin kaikki levyt saadaan poimittua vain yhdellä opetuskuvalle.

Kameran pitää tämän jälkeen vielä tietää, millä kappaleita poimitaan. Tämä tarkoittaa sitä, että kameralle pitää kertoa, millainen ja kuinka suuri tarttuja robotin laipassa on. Kameran pitää tietää tämä kahdesta syystä. Ensimmäinen syy on mahdollisuus esteiden väistelyyn. Kun kameralle on kerrottu, minkä kokoinen tarttuja robotilla on, pystyy kamera skannatusta kuvasta päättämään, mihin kappaleeseen robotti pystyy tarttumaan kiinni. Esimerkiksi, jos kappale on voimakkaasti kallellaan laatikon seinää kohden, pystyy kamera laskemaan, ettei robotti pysty poimimaan kappaletta, koska tarttuja tai robotti törmäisi laatikon seinään. Toisaalta, joskus voi olla tilanne, jossa tarttuja ei mahdu tarttumaan kappaleeseen, koska se törmäisi vieressä olevaan kappaleeseen. Tämä ominaisuus on erittäin hyvä, koska muuten robotti melko varmasti törmäisi toisiin kappaleisiin tai laatikon seiniin, mikä aiheuttaisi keskeytystä tuotannossa.

Toinen syy, jonka vuoksi kameralle tulee kertoa tarttujan muoto, tai tässä tapauksessa ennen kaikkea tarttujan pituus, on se, että kamera tietäisi, mihin tartuntapisteisiin robotti yltää kyseisellä tarttujalla. Kun kamera tietää tarttujan pituuden, se pystyy laskemaan robotin paikan ja asennon tartuntapisteessä. Tällöin kamera tunnistaa jo etukäteen asennot ja etäisyydet, joihin robotti ei pääse kyseisellä tarttujalla. Tarttujan pituus vaikuttaa siihen, missä asennoissa robotin nivelet olisivat kyseisessä pisteessä. Mikäli esimerkiksi kappaleet ovat kallellaan pois päin robotista, vaatisi se robotilta pidempää käsivartta, jos tarttuja olisi pitempi. Näin siis tarttujan pituus selvästi vaikuttaa siihen, mitä kappaleita voidaan noukkia.

Nyt kun robottiin on tehty tarttuja, kamera on asennettu paikoilleen, robotin ja kameran välinen sijainti on määritetty kalibrointilevyllä ja kameralle on kerrottu mistä, mikä ja millä -tiedot, voidaan kokeilla laitteiston toimintaa. Kokeilujen perusteella Pick-it M-HD ja Universal Robots UR5 toimivat tässä käytössä erittäin hyvin yhteen.

Sovelluksen käytössä havaittiin muutama ongelmakohta. Yksi oli UR5-yhteistyörobotin ulottuvuuden loppuminen tässä kohteessa. Mikäli sovellus otettaisiin

käyttöön yrityksessä, suositeltaisiin valitsemaan suuremmalla ulottuvuudella oleva robotti, esimerkiksi UR10e -yhteistyörobotti. Toinen ongelma oli metallien 3D-kuvaamisen hankaluus, mikä nousi tässäkin sovelluksessa esille. Pääsääntöisesti Pick-it M-HD antoi täysin oikeita koordinaatteja, mutta joissain tapauksissa varsinkin korkeustieto saattoi heittää muutamia millimetrejä. Tämä luultavasti johtui siitä, että metalli heijasti projektorin valoa epäsäännöllisesti eri kohdista kappaletta. Koska magneettitarttujassa ei ollut yhtään joustovaraa, kuten esimerkiksi imukupitarttujassa tai mitä sormitarttuja sietäisi, piti tämä ratkaista jotenkin. Ongelmasta päästiin eroon, kun robotti käskettiin 10 mm päähän kohteesta suoraan kameran tietojen perusteella, ja tämän jälkeen ajettiin loppumatka voima-anturi aktiivisena. Käytössä olleessa Universal Robots UR5 CB3 -yhteistyörobotissa oli onneksi lisävarusteena hankittu Robotiq FT 300 -voima-anturi. Vanhemmissa CB3-sarjan roboteissa tämä voima-anturi pitää hankkia lisävarusteena, mutta Universal Robotsin uudemmissa e-sarjan yhteistyöroboteissa voima-anturi on integroitu robotin laippaan valmiiksi. Voima-anturia käyttäen ei enää ollut ongelmia tarttua kappaleista, vaikka korkeustieto heittikin muutaman millin.

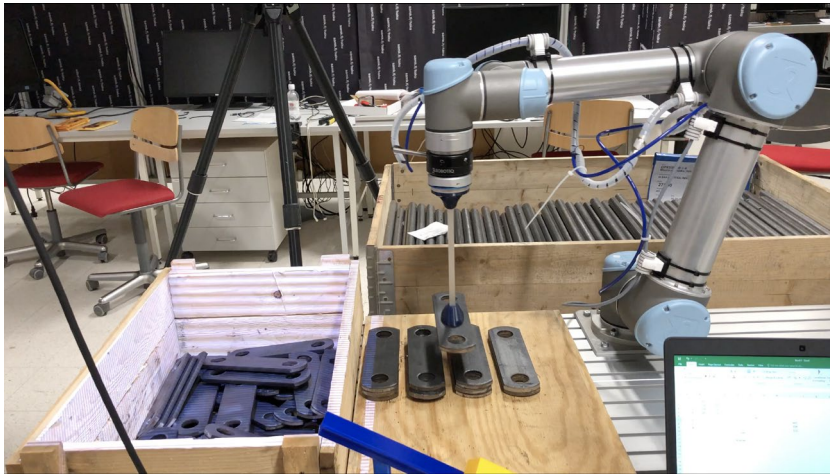
5 LOPPUTULOS

Lopullisessa sovelluksessa robotille voidaan tuoda täysi kuljetuslaatikollinen opetettuja ketjujen valmistuksessa tarvittavia rautalevyjä. Kun laatikko on tuotu kameran alle, voidaan painaa robottiin kytkettyä painiketta. Painikkeen painamisen jälkeen robotti pyytää Pick-it M-HD -kameraa tutkimaan, mistä se voisi hakea levyjä. Tämän pyynnön jälkeen kamera ottaa kuvan, josta se hakee opetetulta alueelta opetettuja kappaleita. Kun se on löytänyt kaikki näkyvät kappaleet, se tutkii, mitkä niistä robotti pystyy tarttujallaan poimimaan. Listasta hylätään kaikki ne, joihin robotti ei pääse. Hylkääminen voi johtua kappaleen asennosta, tai jos esimerkiksi toiset kappaleet jotenkin estävät tartuntapisteeseen pääsemistä.

Kun poimittavat kappaleet on löydetty, kamera lähettää ylimpänä olevan ehdot täyttävän kappaleen koordinaatit robotille. X- Y- ja Z-sijaintien lisäksi kamera lähettää tiedon myös siitä, missä asennossa kappale on. Näitä tietoja hyväksi käyttäen robotti osaa mennä kappaleen lähelle, ja tarttuja on valmiiksi levyn suuntaisesti. Voima-anturia hyväksi käyttäen robotti lähestyy tartuntapistettä, ja vastuksen tuntiessaan toteaa kappaleen olevan kyydissä.

Koska metallikappaleita kuvattaessa havaittiin kameran tuottavan muutamia millimetrejä heittäviä tuloksia tartuntapisteessä, on robotille annettu lupa mennä 10 mm ohi kameralta tulleen tartuntapisteen. Mikäli tähän pisteeseen päästään ilman voima-anturilta tulevaa kosketustietoa, todetaan tapahtuneen virheen. Mikäli virhe tapahtuu, robotti siirtyy pois laatikon ja kameran välistä, ja pyytää kameraa ottamaan uuden kuvan. Näin pystytään toipumaan mahdollisesta virhetilanteesta ilman, että ihmisen tarvitsee käydä kuittaamassa tai tehdä muuta toimenpidettä työn jatkumiseksi. Mikäli voima-anturilta tulee ilmoitus kosketuksesta kappaleeseen, nostetaan tarttuja ylös. Koska tarttujaan kiinnittyneet rautalevyt tuovat selvän lisäpainon, huomaa robotin voima-anturi, mikäli kappale oikeasti on tarttujassa kiinni. Mikäli näin ei ole, huomataan taas virhe. Näin robotti osaa taas aloittaa kierron alusta. Mikäli mitään virhettä ei ole, käy robotti keskittämässä rautalevyt tarttujaan pakkauslaatikon reunaa hyväksi käyttäen. Tämän jälkeen levyt pinotaan nätisti pöydälle. Tuotannossa

purkupaikka voisi olla esimerkiksi liukuhihna tai työstökone, jossa levyjä tarvitaan.
(Kuva 14)



Kuva 14. Työhön tehty sovellus. Kuljetuslaatikossa näkyy kameran valaisukuvio.

Lopputuloksena voidaan sanoa, että sovelluksen teko onnistui suunnitellusti. Universal Robots UR5 -yhteistyörobotin ja Pick-it M-HD -kameran yhteen liittäminen onnistui, kuten oli mainostettu, eikä suuria ongelmia ilmennyt. Siitä, miten helppoa tämän sovelluksen teko oli, osaa nyt saadun kokemuksen perusteella veikata tämän tyyppisten ratkaisujen lisääntyvän rajusti teollisuudessa. Satakuntalaisia yrityksiä haastatellessa on huomattu, että juuri tämän tyyppisiä sovelluksia on kaivattu lähes kaikkialla.

6 JOHTOPÄÄTELMÄT

3D-kuvaus robotin ohjauksessa on pitkään odotettu ja nyt toimivaksi osoitettu teknologiayhdistelmä. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli löytää yhteistyörobotin ohjaukseen soveltuva 3D-kuvausmenetelmä sekä osoittaa sen toiminta todellisessa kohteessa. Tavoitteet saavutettiin hyvin ja tuloksena on toimiva järjestelmä, jossa yhteistyörobotti poimii laatikossa sekaisin olevia metallikappaleita 3D-kameran ohjaamana. Tämä tutkimuksellinen kehittämistyö eteni suunnitelman mukaisesti seuraavasti:

1. Mielekkään kohteen valinta: yrityshaastattelujen perusteella tunnistettiin selkeä tarve uudelle sovellukselle, jolla voidaan korvata ihmisten tekemää hyvin monotonista ja kuormittavaa työtä.
2. Tiedon hankinta ja arviointi: löydettiin menetelmät uudenlaisten kameroiden vertailuun ja sitä kautta käytetyn kameran valintaan sekä arvioitiin hyödynnettävää tietoa sovelluskehittämisen näkökulmasta.
3. Tehtävän määrittely: päätettiin sovelluksen kokonaisuudesta sekä käytettävistä laitteista ja sen perusteella suunniteltavista osista.
4. Tietoperustan muodostus: tutkittiin soveltuvan 3D-kuvausteknologian, yhteistyörobotiikan ja niiden yhdistämisen luomia mahdollisuuksia sekä hankittiin kokonaisuuden suunnittelussa tarvittavaa osaamista.
5. Toteutustavan/menetelmän valinta ja käyttö: suunniteltiin, miten valituilla laitteilla käytännössä toteutetaan tavoitteiden mukainen sovellus.
6. Tukevien menetelmien käyttö: hyödynnettiin 3D-mallinnusta sovelluksen osien suunnittelussa sekä suunniteltiin ja toteutettiin laitteiden välinen kommunikointi ja robotille uusi käsiteltäville kappaleille tarkoitettu tarttuja.
7. Tulosten jakaminen: tehtiin valmiista sovelluksesta video sovelluksen toiminnan ja hyötyjen esittelemiseksi sekä yrityksen edustajille että ammattiyhteisölle.
8. Prosessin arviointi: arvioitiin prosessia sen eri vaiheissa ja lopuksi voitiin todeta, että tavoitteet oli saavutettu suunnitellusti.

Kun mietitään tällaisen sovelluksen jatkokehitysmahdollisuuksia, tulee mieleen ainakin suuremmalla ulottuvuudella varustetun robotin käyttö. Tässä sovelluksessa ei

tarvita suurempaa nostovoimaa, mutta ulottuvuutta saisi olla hieman lisää, jottei kappaleita tästä syystä jäisi poimimatta.

Toinen tulevaisuuden kehityskohde on tarttuja. Sähkömagneettinen tarttuja toisi hieman enemmän vapauksia siihen, miten kappale saadaan irti kyseisestä tarttujasta. Samalla päästäisiin eroon ongelmasta, jossa kappale lähtee magneetin voiman vuoksi tarttujaa kohden ennaikaisesti. Vaihtoehto sähkömagneettiselle tarttujalle voisi olla voimakas kaksisormitarttuja, johon tehtäisiin leuat, jotka tarttuisivat levyssä olevista rullien rei'istä kiinni. Tämä vaatisi kuitenkin voimakkaamman tarttujan kuin tässä työssä käytössä ollut OnRobot RG2. Paineilmakäyttöinen tarttuja, jossa olisi metallista tehdyt tartuntapinnat juuri reikää varten, olisi optimaalisin. Tällöin levyyn voitaisiin tarttua, vaikka siitä näkyisi vain osa. Näin riittäisi, että toinen päissä olevista rei'istä olisi näkyvissä.

Kaiken kaikkiaan tämä työ on osoittanut, että 3D-kuvaus on kehittynyt sille tasolle, että sitä voidaan käyttää hyvin monenlaisissa teollisuuden tarkastus- ja robotinohjaustehtävissä. Kameran ovat vielä kalliita, mutta ne maksavat robotinkin kanssa jo nykyisellään itsensä takaisin 1-2 vuodessa. Jos samalla voidaan ehkäistä työntekijöiden ergonomiaongelmista johtuvia kuluja ja tarjota työntekijöille mielekkäämpää työtä, on näiden sovellusten hyödyntämiselle vaikea löytää mitään vastalauseita.

LÄHTEET

- Anandan, T. 2016 Robotic Bin Picking – The Holy Grail in Sight. Viitattu 7.12.2019 https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Robotic-Bin-Picking-The-Holy-Grail-in-Sight/content_id/6002
- Batchelor B.G. 2012. Illumination Sources. Teoksessa Batchelor B.G. (toim.) Machine Vision Handbook New York: Springer, 284-316
- Bélanger-Barrette, M. 2015. What Does Collaborative Robot Mean? Viitattu 17.11.2019 <https://blog.robotiq.com/what-does-collaborative-robot-mean>
- Busch, N. 2018. Collaborative Robots Part 2: Benefits and Expanding Capabilities. Viitattu 17.11.2019 <https://www.bastiansolutions.com/blog/index.php/2017/11/16/part-two-collaborative-robot-benefits-and-capabilities/>
- DLR Light-Weight Robot III. Viitattu 7.12.2019 https://web.archive.org/web/20161114224427/http://www.dlr.de/rmc/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-3803/6175_read-8963
- FANUC CR-35iA. Viitattu 7.12.2019 https://www.fanucamerica.com/cmsmedia/datasheets/CR-35iA%20Collaborative%20Robot_209.pdf
- Focale-robotics:n Internet-sivusto. Viitattu 30.11.2019 <http://www.fogale-robotics.com>
- Greene, M. 2018. Collaborative Robots Part 1: Pros, Cons, and Applications. Viitattu 17.11.2019 <https://www.bastiansolutions.com/blog/index.php/2017/11/14/collaborative-robots-part-1-pros-cons-applications/>
- Kortelainen J., Leino M., Valo P. 2013. 3D-kuvauksen kehittyneet tekniikat. Automaatioväylä, Vol 29, No 6, pp. 12-14. Suomen Automaatioseura ry, Suomen Mittaus- ja Sääteknillinen Yhdistys ry, Automaatioväylä Oy. Helsinki.
- Lazarte, Maria. 2016. Robots and humans can work together with new ISO guidance. Viitattu 17.11.2019 <https://www.iso.org/news/2016/03/Ref2057.html>
- Lukka K. 2001. Konstruktiivinen tutkimusote. Metodix-sivusto. Viitattu 28.11.2019 <https://metodix.fi/2014/05/19/lukka-konstruktiivinen-tutkimusote/>
- Marshall D. 1994. Introduction to Stereo Imaging – Theory. Cardiff School of Computer Science & Informatics www-sivut. Viitattu 1.11.2019 http://www.cs.cf.ac.uk/Dave/Vision_lecture/node11.html
- Ojasalo, K., Moilanen, T, & Ritalahti, J. 2009. Kehittämistyön menetelmät, Uudenlaista osaamista liiketoimintaan. Sanoma Pro Oy.

Ojasalo, K., Moilanen, T. & Ritalahti, J. 2014. Kehittämistyön menetelmät: uudenlaista osaamista liiketoimintaan. Sanoma Pro, Helsinki.

Pat US 5952796A. 1997. Cobots. Northwestern University, Evanston, Illinois, Usa. Colgate, J. E. & Peshkin, M. A. Appl. 08/959357. Oct. 28, 1997. Viitattu 7.12.2019 <https://patents.google.com/patent/US5952796>

Pick-it brochure. Viitattu 30.11.2019 https://drive.google.com/file/d/1SdaU-HbAbCV40ssKX6yZUDR_btH4YCD7H/view

Pick-it:n Internet-sivusto. Viitattu 24.11.2019 <https://www.pickit3d.com/>

Pick-it:n ohjesivusto. Viitattu 25.11.2019 <https://docs.pickit3d.com/docs/pickit/en/latest/>

Robotiq. Cobots ebook. Viitattu 18.11.2019 <https://blog.robotiq.com/hubfs/COBOT%20EBOOK%20FINAL.pdf>

Roel, C. 2017. Know your machine: Industrial robots vs. cobots. Viitattu 18.11.2019 <https://blog.universal-robots.com/know-your-machine-industrial-robots-vs.-cobots>

Seitamaa-Hakkarainen, P. & Hakkarainen, K. Tutkiva oppiminen. Aalto-yliopiston Internet-sivusto. Viitattu 17.11.2019 http://www.mlab.uiah.fi/polut/Yhteisollinen/teoria_tutkiva_oppiminen.html

The low-level communication structures between a robot and Pickit on the TCP/IP socket level. Viitattu 30.11.2019 <http://docs.pickit3d.com/docs/pickit/en/latest/robot-integrations/socket/>

Westmoreland, J. 2018. Reasons for collaborative robots in non-traditional industries. Viitattu 18.11.2019 <https://blog.universal-robots.com/reasons-for-collaborative-robots-in-non-traditional-industries>