



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU  
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Valtteri Peltola

---

# 3D-kameran hyödyntäminen kappaleiden tunnistamisessa ja poiminnassa

Opinnäytetyö

Kevät 2023

Insinööri (AMK), Automaatiotekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Automaatiotekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Koneautomaatio

Tekijä: Valtteri Peltola

Työn nimi: 3D-kameran hyödyntäminen kappaleiden tunnistamisessa ja poiminnassa

Ohjaaja: Toni Luomanmäki

Vuosi: 2023

Sivumäärä: 44

Liitteiden lukumäärä:0

---

Tämä opinnäytetyön toimeksiantajana toimi metallituotteita valmistava yritys. Tavoitteena oli tutkia, pystytäänkö 3D-kameralla määrittämään osien paikka ja orientaatio ja poimimaan ne robotin avulla. Tämä poistaisi mekaaniset syöttölaitteet sekä niiden täytön käsin. Samaa järjestelmää voitaisiin käyttää monissa yrityksen robottisoluissa.

Työssä testattiin kappaleiden tunnistettavuutta ja orientaation muodostumista eri valaisuasetuksilla sekä erilaisilla tunnistusmalleilla, kuten opetetuilla kuvilla tai CAD-malleilla. Tulosten perusteella todettiin, minkälaisia kappaleita pystyttiin poimimaan ja onnistuiko kappaleiden orientaation sekä puolten määrittäminen.

Lopputuloksena yritys sai käsityksen kappaleiden tunnistettavuudesta 3D-kameralla sekä niiden poimittavuudesta robotilla. Yritys sai myös tietoa kappaleiden tunnistuksen haasteista ja ongelmakohdista.

<sup>1</sup> Asiasanat: 3D-kamera, Konenäkö, Robotti, Bin-picking

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## **Thesis abstract**

Degree programme: Automation Engineering

Specialisation: Machine Automation

Author/s: Valtteri Peltola

Title of thesis: Using a 3D-camera for recognizing and picking metal parts

Supervisor(s): Toni Luomanmäki

Year:2023

Number of pages:44

Number of appendices:0

---

The thesis was done for a company in metal industry. The goal of the thesis was to investigate whether a robot utilizing a 3D-camera could pick certain parts from random orientations. This would make it faster to change parts and start the robot again. It would also eliminate the need for mechanical feeders that have to be filled manually. The same system could be used in many of the company's robotic cells.

The thesis was started by testing the detectability of parts and the formation of their orientation under different lighting settings and different detection models, such as trained images or CAD-models. When the camera stand was completed, the camera was integrated into the robot and calibrated to work with it. The robot used in the tests was UR10, equipped with a 3D-printed tool that had an electromagnet at its end.

The detectability of parts and their pickability by a robot succeeded partially. The pickability of all objects was successful, but unlike with large metal plates, the side determination of a small metal plate did not succeed. The knowledge about the challenges and problems related to the recognition of parts was useful to the company and it can be used in further studies.

<sup>1</sup> Keywords: machine vision, bin-picking, structured light, 3D-camera, robot

## SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä .....	1
Thesis abstract .....	2
SISÄLTÖ .....	3
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo .....	5
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	7
1 JOHDANTO .....	8
1.1 Työn tausta .....	8
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus .....	8
1.3 Työn rakenne .....	8
2 TEOLLISUUSROBOTIIKKA .....	9
2.1 Teollisuusrobotit .....	9
2.2 Bin-picking.....	10
3 KONENÄKÖ.....	12
3.1 3D-konenäköteknologiat.....	12
3.2 Triangulaatio.....	13
3.3 Stereonäkö.....	15
3.4 Rakenteellisen valon teknologia .....	17
3.4.1 Binäärikoodatun ja graykoodatun valon projektiot.....	18
3.4.2 Valon projektio intensiteetin vaihemuutoksella.....	19
3.4.3 Valotustekniikoiden yhdistelmä .....	20
3.5 Time-of-flight .....	20
3.5.1 Pulssipohjainen mittaus .....	21
3.5.2 Vaihemittaus .....	22
3.6 Pickit 3D -kamera .....	23
3.6.1 Tunnistusperiaate .....	23
3.6.2 Kalibrointi .....	24
3.6.3 ROI .....	26
3.7 Mahdolliset ongelmat liittyen kameraan .....	27

4	KAPPALEIDEN TUNNISTUS JA POIMINTA.....	28
4.1	3D-kameran valaisuasetukset.....	28
4.2	Kappaleiden tunnistus.....	29
4.2.1	Pienen levyn tunnistus.....	29
4.2.2	Ison levyn tunnistus.....	32
4.2.3	Holkin tunnistus.....	35
4.2.4	Tapin tunnistus.....	37
5	TESTIAJOT JA TULOSTEN TARKASTELU.....	39
6	YHTEENVETO.....	41
	LÄHTEET.....	42

## Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. ABB:n teollisuusrobotteja.....	9
Kuva 2. Kameran ja robotin kalibrointi. ....	25
Kuva 3. Tunnistusalueen määrittäminen.....	26
Kuva 4. Valaisusasetuksien määrittäminen kappaleen pinnan mukaan. ....	28
Kuva 5. 3D-kuva pienistä levyistä. ....	29
Kuva 6. Tunnistettujen kappaleiden poimittavuus. ....	30
Kuva 7. Tunnistettujen kappaleiden pistepilvi. ....	31
Kuva 8. Levyjen reunat. ....	31
Kuva 9. Isojen levyjen reunan tunnistus.....	32
Kuva 10. Ison levyn puolen määrittäminen. ....	32
Kuva 11. Ison levyn toisen puolen määrittäminen.....	33
Kuva 12. Ison levyn reunan tunnistus. ....	33
Kuva 13. Ison levyn paikoitus. ....	34
Kuva 14. Ison levyn tunnistuksessa käytettävä CAD-malli.....	35
Kuva 15. Holkin CAD-malli.....	36
Kuva 16. Holkin tunnistus. ....	36
Kuva 17. Tapin CAD-malli.....	37
Kuva 18. Tapin tunnistus kahdella eri mallilla. ....	37
Kuva 19. Tappien poiminta laatikosta. ....	38
Kuva 20. Kappaleiden poimintaa robotilla.....	39

Kuvio 1. Lasertriangulaatio. ....	12
Kuvio 2. Kohteen etäisyyden mittaus kahdella kameralla .....	15
Kuvio 3. Erivaiheisia kohteeseen heijastettavia kuvioita kaavan 4 mukaisesti.....	19
Taulukko 1. Numeroiden binääri- ja gray-muunnokset .....	18

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>Epipolaariviiva</b>	Kun kaksi kameraa tarkastelee samaa 3D-kohtaa eri sijainneista, ne näkevät kohteen hieman eri näkökulmasta. Kun tämä näkymä projisoidaan tasolle, syntyy kaksi kuvaa, joissa sama 3D-piste voidaan havaita eri paikoissa. Epipolaariviiva on linja, joka yhdistää kahden kameran projektiopisteet kuvatasolla.
<b>HD</b>	High-definition
<b>Manipulaattori</b>	Manipulaattori tarkoittaa robottikäsivartta, joka koostuu useista nivelistä ja liikuttajista.
<b>Robotin aktuaattorit</b>	Robottiaktuaattori tarkoittaa robotin liikkeen aikaansaavaa komponenttia, joka muuntaa sähkö- tai hydraulivoiman mekaaniseksi liikkeeksi.
<b>SD</b>	Standard-definition
<b>Spatiaalinen resoluutio</b>	Spatiaalinen resoluutio eli erotuskyky on mittayksikkö, joka kuvaa tarkkuutta, jolla kaksi lähellä toisiaan olevaa kohtaa voi erottua kuvassa tai havaita signaalissa. Se määrittelee pienimmän etäisyyden, jolla kaksi erillistä pistettä voivat olla toisistaan, jotta ne voidaan erottaa toisistaan.
<b>TOF</b>	Time-of-light on valon ajan mittaamista ja kertoo ajan, joka valolla menee kulkiessa kohteeseen ja takaisin.
<b>Triangulaatio</b>	Etäisyyksien mittaamistapa, joka perustuu kohteen suunnan havaitsemiseen kahdesta eri pisteestä, joiden välimatka tunnetaan.
<b>Valon intensiteetti</b>	Teho pinta-alayksikköä kohti.



# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Tämän työn toimeksiantajayrityksen robotit hyödyntävät mekaanisia syöttölaitteita kappaleiden poiminnassa. Tiettyjä kokoonpanon osia, kuten esimerkiksi metallilevyjä, joudutaan kuitenkin lastaamaan käsin syöttölaitteeseen, jotta robotti saa poimittua ne oikeinpäin. 3D-kameran hyödyntäminen poistaisi mekaaniset syöttölaitteet sekä niiden täytön.

## 1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Tavoitteena oli testata Seinäjoen ammattikorkeakoulun robotiikan laboratoriossa, saadaanko robotti poimimaan tutkittavia kappaleita 3D-kameran avulla. Työ rajattiin rakenteeltaan kolmeen tunnistettavaan kappaleeseen, jotka olivat levy, holkki ja tappi. Levyjä oli kahta kokoa, koska niiden puoltien määrittämisessä tutkittavat reunat olivat erilaisia. Kappaleita tutkittiin kameran ollessa kiinni erillisessä telineessä, ja robotti poimi niitä sähkömagneetilla.

## 1.3 Työn rakenne

Johdannossa käydään läpi työn taustaa ja tavoitteita. Teoriassa käsitellään työhön liittyvää tekniikkaa, kuten erilaisia 3D-tunnistusmenetelmiä sekä niihin liittyviä laskennallisia kaavoja. Teorian alussa käsitellään lyhyesti teollisuusrobotteja, mutta tarkemmin teoria painotuu rakenteellisen valon tunnistusperiaatteeseen. Tähän osioon kuuluu myös käytetyn 3D-kameran perustietojen käsittely. Seuraavassa vaiheessa käydään läpi tutkittavien kappaleiden tunnistettavuutta ja sen jälkeen robotin toimintaa kameran kanssa. Viimeisenä on tulosten tarkastelu ja yhteenveto.

## 2 TEOLLISUUSROBOTIIKKA

### 2.1 Teollisuusrobotit

ISO 8373 -standardin määritelmän mukaan teollisuusrobotti on automaattisesti ohjattava, uudelleenohjelmoitava monikäyttöinen manipulaattori, jonka kolme tai useampi akseli on ohjelmoitavissa (International Organization for Standardization (ISO), 2021, luku 3.6). Automaatiosovelluksissa se voi olla kiinteällä tai liikkuvalla alustalla.



Kuva 1. ABB:n teollisuusrobotteja (Wikimedia commons, 2022).

Teollisuusrobotit on suunniteltu tarkkuutta, nopeutta ja voimaa vaativiin tehtäviin (Probot, 2022). Teollisuusrobotti on suunniteltu ja ohjelmoitu suorittamaan yhtä tiettyä tehtävää, eikä sitä yleensä siirretä toiseen tehtävään. Sen sijoituspaikka valitaan tarkkaan asennuksen yhteydessä, eikä sitä yleensä siirretä sen jälkeen. On olemassa erilaisia teollisuusrobottimalleja, joita voidaan kiinnittää kattoon, seinään tai rataan. Turvallisuus on tärkeää, joten robotin liikkumisalue on rajattava esimerkiksi suoja-aitojen (kuva 1) tai lasereiden avulla.

Teollisuusrobotin asennus ja ohjelmointi vaativat erityisosaamista, ja ne tehdään yleensä ammattilaisen toimesta (Probot, 2022). Robotti voidaan integroida muihin tuotannon laitteisiin ja koneisiin. Usein sarjavalmistteisissa roboteissa ei ole valmiina tarvittavia työkaluja, vaan ne valitaan käyttökohteen mukaan. Tuotannon automatisointi on nykypäivänä entistä tärkeämpää, sillä aika on arvokasta ja tuotannon on oltava tehokasta. Työntekijöiden hyvinvointiin ja ergonomiaan kiinnitetään nykyään yhä enemmän huomiota. Ei ole enää hyväksyttävää, että työntekijät joutuvat tekemään raskaita, vaarallisia, likaisia ja toistuvia työtehtäviä päivästä toiseen. Työolosuhteiden on oltava ajanmukaiset, jotta työpaikan vaihtaminen ei olisi houkutteleva vaihtoehto uusille työntekijöille. Robotille ulkoistetut tehtävät vapauttavat ihmiset tekemään inhimillisempiä ja luovuutta vaativia töitä.

## 2.2 Bin-picking

Satunnainen poiminta on yksi haastavimmista teollisuusrobotiikan sovelluksista (Kang ym., 2016). Se muodostaa monimutkaisen vuorovaikutuksen konenäköjärjestelmän, robotin ja ohjausjärjestelmän välillä. Käytettävän robotin on kyettävä tunnistamaan kohde-esineet satunnaisesti sijoitettujen esineiden joukosta.

Zivid-verkkosivun (Zivid, i.a) mukaan satunnainen tai automatisoitu kappaleiden poiminta tapahtuu yleensä valmistusprosessin alkuvaiheessa. Sitä käytetään laajalti teollisuuden ratkaisuuissa. Perinteisten staattisten kiinnittimien tai valmiiksi täytettyjen pinotusten sijaan robotti tyhjentää osilla täytetyn astian suoraan koneeseen, syöttölaitteeseen, kuljettimelle tai lajittelijalle jatkoprosessointia varten.

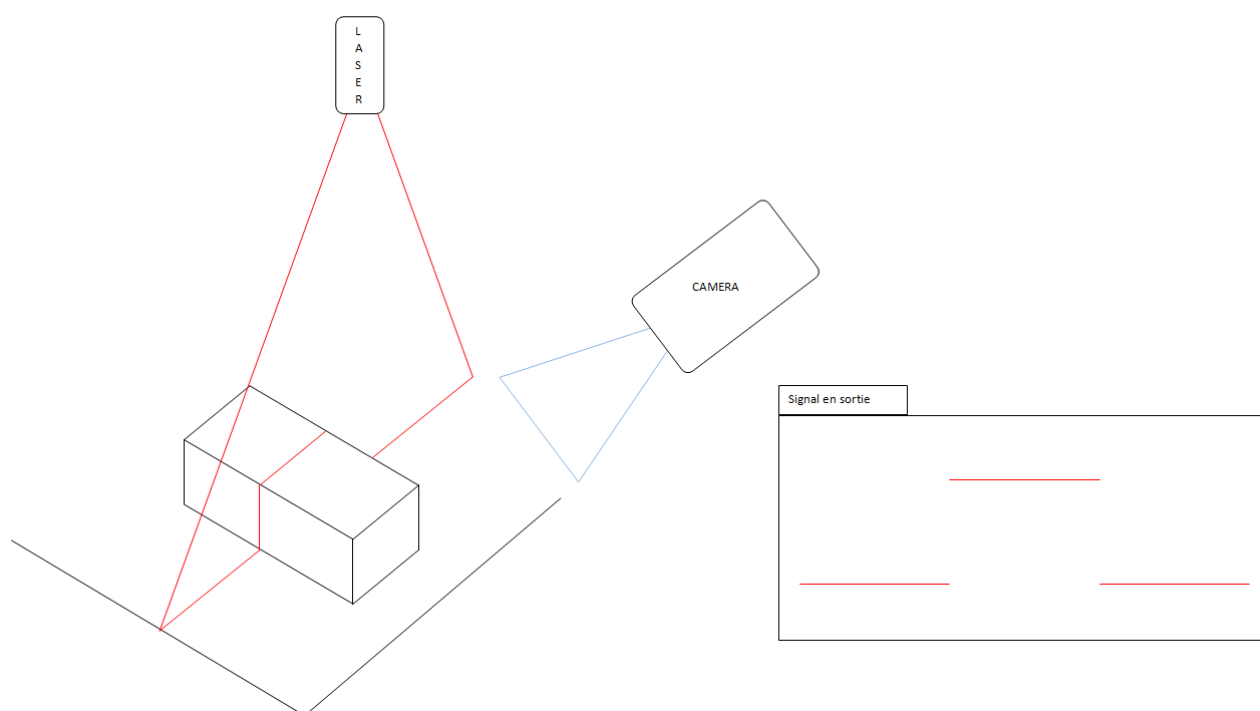
Bin-picking sisältää yleensä vain yhden tyyppisten osien poimintaa (Zivid, i.a). Poimittavat kohteet vaihtelevat kooltaan ja materiaaliltaan. Bin-picking-ratkaisun kehittäminen edellyttää esineiden tarkkaa sijoittamista mittaukseen, leimaamiseen tai muihin esineen manipulointiin liittyviin toimenpiteisiin. Kyky käsitellä esineitä oikein voi määrittää, suoritetaanko seuraava tehtävä oikein.

## 3 KONENÄKÖ

### 3.1 3D-konenäköteknologiat

Skannausteknologian kehitys on mahdollistanut nopean tuotekehityksen ja vähentänyt virheiden riskiä (Pre-scient, 2019). 3D-skannausteknologioilla voidaan tallentaa fyysisen kohteen tarkka koko ja muoto. 3D-skannerit muodostavat "pistepilven" eli tiedon kohteen pinnasta.

Kolmiulotteisen muodon päättelemisen varjon perusteella perustuu siihen, että on tiedettävä, miten näkymä on valaistu (Davies, 2012, s. 391). Yksinkertaisessa tilanteessa näkymä on valaistu yksittäisellä pistevalonlähteellä tunnetusta sijainnista. Tässä tapauksessa valonlähde valaisee yhden osan esinettä ja toinen osa jää varjoon. Osat, jotka ovat eri tavoin suhteessa valonlähteeseen ja havainnoijaan, näkyvät eri kirkkausarvoilla, joten orientaatio voidaan päätellä.



Kuvio 1. Lasertriangulaatio (Wikimedia commons, 2020).

3D-skannaustekniikat voidaan jakaa seuraaviin alueisiin (Pre-scient, 2019). Lasertriangulaatio on 3D-skannausteknologia (kuvio 1), jossa laserskanneri projisoi lasersäteen pinnalle ja kameran kuvan perusteella mittaa lasersäteen vääristymän. Rakenteellisen valon 3D-skannausteknologiassa valon rakenteellinen kuviointi projisoidaan kohteeseen ja mitaus tehdään kuvion muodonmuutoksen perusteella. Laserpulssi-3D-skannausteknologia, joka tunnetaan myös nimellä Time-of-Flight (TOF). Tämä prosessi kerää geometrista tietoa arvioimalla ajan, joka laserpulssilla menee matkallaan kohteeseen ja takaisin. Fotogrammetrinen teknologia, jota kutsutaan myös 3D-skannaukseksi valokuvista, rekonstruoi kohteen 2D:stä 3D:hen ja käyttää siihen erityisiä laskennallisia geometrisia algoritmeja. Fotogrammetria on edullinen ja tarkka, ja sitä käytetään suurten kohteiden, kuten rakennusten ja stadionien skannaamiseen. Tietokonetomografia (CT-skannaus) on laajalti käytetty tekniikka lääketieteellisellä sektorilla. CT-skannausta on yleensä käytetty skannaamaan kuvia ihmisen sisäelimestä. CT-skannauksessa kohdetta skannataan ja otetaan sarja 2D-kuvia eri tasoilta röntgenillä. 2D-kuvat asetetaan myöhemmin päällekkäin, jotta saadaan luotua 3D-malli.

### 3.2 Triangulaatio

Triangulaatioskanneri koostuu valoprojektorista ja digitaalisesta kamerasta (Laga ym., 2019, s. 45). Projektori projisoi valon (yleensä laserpisteen) kohteen pinnalle. Heijastunut valo tallentuu kameraan. Näin ollen projektorin keskus, valopiste kohteessa ja kameran keskus muodostavat kolmion.

Kameran ja projektorin etäisyys tunnetaan nimellä baseline eli perusviiva, projektorin kulma tunnetaan ennakkoon ja kameran kulma voidaan saada tarkastelemalla valopistettä kohteen pinnalla kameran näkökentässä (Laga ym., 2019, s. 45). Näiden kahden kulman ja perusviivan pituuden perusteella kolmion muoto ja koko voidaan määrittää täysin. Tämän seurauksena projektorin ja valopisteen välinen etäisyys voidaan laskea.

Jos tarkkaillaan projektorin muodostamaa kuviota, voivat projisoidut muodot Hornbergin (2017, s.147) mukaan muodostaa kolme eri ulottuvuutta. Nämä ulottuvuudet ovat nollan, yhden ja kahden ulottuvuuden projisoituja muotoja. Nollaulottuvuus muodostaa pisteen,

ensimmäisen ulottuvuuden projisoitu muoto on viiva ja toisen ulottuvuuden projisoitu muoto on useampi viiva vierekkäin.

Lagan ym. (2019, s. 46) esimerkin mukaan etäisyys  $d$  voidaan laskea triangulaatiolla seuraavan kaavan mukaisesti:

$$d = \frac{b \sin(\beta)}{\sin(\theta)} = \frac{b \sin(\beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (1)$$

jossa,

$$\theta = 180 - \alpha - \beta$$

$\alpha$  ja  $\beta$  ovat tunnettuja kulmia, jotka muodostuvat projektoriin ja kameraan.

$b$  = baseline on kameran ja projektorin välinen etäisyys.

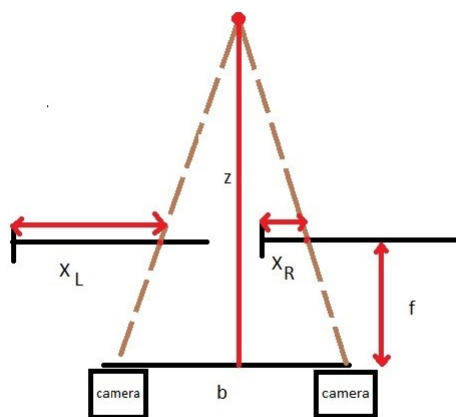
$d$  = kohteen pinnan etäisyys perusviivasta.

Korkean resoluution lasereita käytetään yleensä monitorointisovelluksissa, joissa tarvitaan suurta tarkkuutta, vakautta ja vähäistä lämpötilan heilahtelua kohteiden sijainnin ja siirtymän tutkimiseen (Vijayalakshmi & Muruganand, 2019, s. 146). Tämä tekniikka rajoittuu vain skannaussovelluksiin, koska se pystyy kattamaan vain lyhyen etäisyyden ja on herkkä ympäröivälle valolle sekä strukturoiduille ja/tai monimutkaisille rakenteille. Tämän tekniikan käyttö vaatii myös monimutkaisia algoritmeja ja kalibrointia.

Laserpohjaiset 3D-skannerit käyttävät trigonometrista triangulaatioprosessia tallentaakseen tarkasti kohteen 3D-muodon pisteinä (Ems-usa, i.a). Skannerit toimivat heijastamalla laserlinjaa kohteeseen ja keräämällä heijastuksen antureilla, jotka ovat tietyn etäisyyden päässä laservalon lähteestä. Näiden mittauksien avulla saadaan tarkkoja pisteitä, jotka voidaan käyttää kohteen 3D-mallin luomiseen.

### 3.3 Stereonäkö

Stereonäköjärjestelmät perustuvat ihmisen binokulaariseen näkemiseen (Laga ym., 2019, s. 47–48). Nämä järjestelmät käyttävät kahta kameraa, jotka on sijoitettu hieman erilleen toisistaan, tallentaakseen kaksi kuvaa ja arvioidakseen kunkin kuvapisteen syvyysinformaation. Prosessi alkaa etsimällä kullekin vasemman kuvan pikselille vastaavaa pikseliä oikeasta kuvasta. Tätä kutsutaan termillä Stereo matching. Kun vastaavuuspisteet on laskeutu, syvyyttä voidaan arvioida triangulaation avulla.



Kuvio 2. Kohteen etäisyyden mittaus kahdella kameralla (mukaillen Laga ym., 2019, s. 46)

Käytännössä vastaavuudet eivät ole tiedossa etukäteen, ja niiden laskeminen automaattisesti ilman rajoituksia ei ole helppo tehtävä (Laga ym., 2019, s. 47). Sen sijaan, että etsittäisiin jokaiselle vasemman kuvan pikselille vastaavaa pikseliä oikeassa kuvassa koko 2D-kuvatilasta, voidaan käyttää epipolaarisia rajoituksia, jotka rajoittavat haun vain epipolaari- viivoille. Lisäksi sen sijaan, että työskenneltäisiin suoraan alkuperäisissä kuvissa, voidaan työskennellä suoristetuissa kuvissa, jotka on suoristettu siten, että epipolaariviivat ovat vaakatasossa. Tällöin kullekin vasemman kuvan pikselille  $x$  vastaa pistettä oikeassa kuvassa samalla rivillä kuin  $x$ . Epipolaariset rajoitukset vähentävät merkittävästi hakutilaa ja yksinkertaistavat näin stereo matching -prosessia.



Lagan ym. (2019, s. 48) esimerkin mukaisesti, jos molempien kameroiden polttoväli on sama (kuvio 2) ja ne sijaitsevat samassa tasossa, voidaan etäisyys laskea seuraavan kaavan mukaisesti:

$$\frac{b}{z} = \frac{(b+x_R)-x_L}{z-f} \quad (2)$$

josta ratkaistaan etäisyys  $z$ .

$$z = \frac{b \cdot f}{d} \quad (3)$$

jossa,

$b$ : (baseline) etäisyys kahden kameran välillä stereonäköjärjestelmässä.

$x_L$  ja  $x_R$ : vaakasuuntainen siirtymä saman pisteen vasemman ja oikean kuvan välillä kohteessa.

$z$ : etäisyys kohteen pintaan.

$f$ : kameroiden polttoväli.

$d = x_L - x_R$  on kahden vastaavan pisteen  $x$ -koordinaattien ero. Tätä kutsutaan erannoksi (disparity) ja se on kääntäen verrannollinen syvyyteen  $z$ .

Käytännön tilanteessa kameroiden parametrit eivät aina ole tiedossa, joten kamerat on kalibroitava. Kalibroinnissa arvioidaan kahden kameran sisäiset parametrit, kuten polttovälit, kuvakeskukset ja linssin vääristymät sekä kierto ja siirtymä, jotka ovat ulkoisia parametrejä (Laga ym., 2019, s. 47–48). Tämä tehdään yleensä käsittelemällä sarja stereokuvapareja, joissa on niin sanottu shakkilautakuviot. Suoristusvaihe poistaa perspektiivin ja linssin vääristymät sekä muuntaa stereojärjestelmän perusmuotoon, jossa kahdella kameralla on rinnakkaiset optiset akselit. Tämä tekee kahden kameran epipolaarisista viivoista vaakasuoria.

Stereo vision -tekniikka voidaan verkkosivun (Clearview, i.a) mukaan jakaa passiiviseen ja aktiiviseen teknologiaan. Passiivinen teknologia ei tarvitse mitään keinotekoisista valaistusta toimiakseen. Stereokamera voidaan yksinkertaisesti kytkeä, kalibroida ja käyttöönottaa. Joissain stereonäön sovelluksissa voidaan kuitenkin hyödyntää keinotekoisista valaistusta tai rakenteellista valonlähdettä näkyvyyden parantamiseksi. Tämä tunnetaan aktiivisena stereona, ja sillä on omat etunsa ja haittansa kuten passiivisella stereolla.

### **3.4 Rakenteellisen valon teknologia**

Useimmat nykypäivän rakenteellisen valon 3D-skannerit käyttävät sinistä tai valkoista LED-projektorilla (Ems-usa, i.a). Nämä 3D-skannerit projisoivat valomalleja, jotka koostuvat palkeista, lohkoista tai muista muodoista. 3D-skannerilla on yksi tai useampi anturi, jotka tarkastelevat näiden mallien tai rakenteiden reunoja määrittääkseen kohteen 3D-muodon. Rakenteellisen valon skannereita voidaan asentaa jalustalle tai käyttää käsikäyttöisesti.

Projektori projisoi sarjan kuvioita kohteeseen ja kamera tallentaa kuvat (Vijayalakshmi & Muruganand, 2019, s. 34). Tämä menetelmä hyödyntää samankaltaisia tekniikoita kuin stereoskooppinen näkeminen. Se hyödyntää tunnettua kamera–projektori-etäisyyttä tietyn pisteen paikantamiseksi, ja syvyys lasketaan triangulaatiolaskennalla. Näin ollen kuvankäsittely- ja triangulaatioalgoritmit muuntavat projisoitujen kuvioiden vääristymät 3D-tiedoksi. Vääristymät muodostuvat pinnan muotojen mukaan.

Tämä kuvantamistekniikka estää liike-epäterävyyden esiintymisen, koska kuvanopeuden rajoituksia ei ole. Tämä antaa kyseiselle tekniikalle suojaa heijastavien rajapintojen vaikutuksilta, joissa valo heijastuu moneen suuntaan (Vijayalakshmi & Muruganand, 2019, s. 450). On huomattava, että aktiivinen valaistus edellyttää monimutkaista kameraa, jossa vaaditaan tarkka ja vakaa mekaaninen suuntaus linssin ja kuvion projektorin välillä, mutta tällaisissa tilanteissa on kalibroinnin riski. Lisäksi heijastunut kuvio on herkkä ympäristön optisille häiriöille.

### 3.4.1 Binäärikoodatun ja graykoodatun valon projektiot

Projektorilla voidaan heijastaa kohteelle koodattuja kuvioita, kuten binäärikuvioita tai vaihesiirtoon perustuvaa siniaallon mukaista voimakkuudeltaan muuttuvaa valoa (Hermay, i.a.). Binäärikuvioita käyttäen voidaan laskea jokaiselle kameran paikalle syvyys suhteessa käytettyjen kuvien määrään. Tämä tarkoittaa sitä, että jokaisella kameran paikalla on oma binäärinen koodinsa, joka vastaa yhtä ainutlaatuista paikkaa kolmiulotteisessa tilassa. Siniaaltojen avulla voidaan mitata tarkemmin jokaisen kameran paikan syvyyttä suhteessa siniaaltojen taajuuteen. Näiden kahden mittauksen yhdistelmä mahdollistaa tarkemman syvyyden mittaamisen kohteessa.

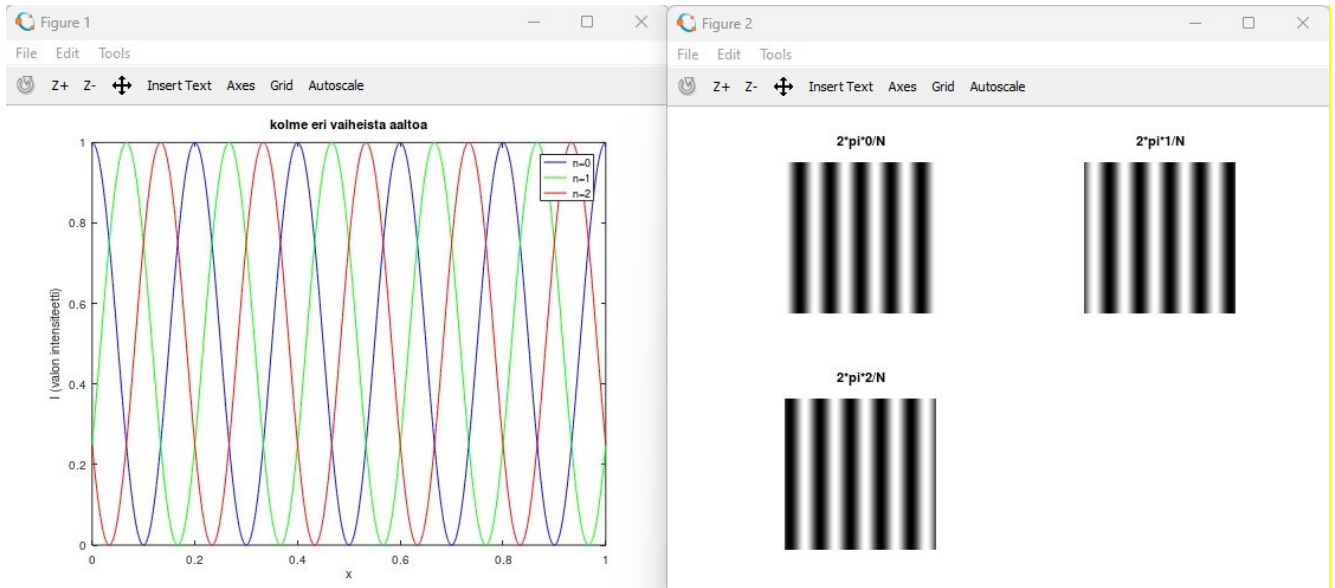
numero	binääri	gray
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111

Taulukko 1. Numeroiden binääri- ja gray-muunnokset

Gray-koodi on erittäin kevyt koodi, koska se ei riipu asemassa määritetyn numeron arvosta (Javatpoint, i.a.). Gray-koodia kutsutaan myös syklistesti muuttuvaksi koodiksi, koska yhdestä arvosta siirtyminen sen seuraavaan arvoon aiheuttaa vain yhden bitin muutoksen (taulukko 1).

Projektion taajuus kasvaa ajan myötä, kunnes se saavuttaa korkeimman taajuuden, joka edustaa binäärikuvion vähiten merkitsevää bittiä (Gu ym., 2016, s. 4). Tämän seurauksena syntyy binäärikoodattujen kuvien sarja, jossa jokainen kuvio edustaa yhtä bittiä binäärikoodissa. Tämä tuottaa kuvia, jotka sisältävät pystyraitoja sarakkeiden tapauksessa ja vaakaraitoja rivien tapauksessa.

### 3.4.2 Valon projektiio intensiteetin vaihemuutoksella



Kuvio 3. Erivaiheisia kohteeseen heijastettavia kuvioita kaavan 4 mukaisesti.

Phase Shifting Profilometry (PSP) on yksi laajimmin käytetyistä menetelmistä sen tarkkuuden ja nopeuden vuoksi (Zuo ym., 2018). Kolmivaiheinen vaiheensiirtomenetelmä vaatii vähiten kuvioita monista eri PSP-algoritmeista, minkä vuoksi se on hyvä nopeissa mittauksissa.

Projektorin heijastaa siniaaltoisia viivakuvioita (kuvio 3) mitatun kohteen pinnalle (Xing, 2018, s. 9–10.) Oletetaan, että luodut projektioviivat on suunnattu v-akselin suuntaisesti, jossa  $(u, v)$  on pikselien koordinaatit projektorin tasolla,  $k$ :  $n$  ( $k = 0, 1, \dots, K-1$ ) viivakuvio on esitetty seuraavasti:

$$g_k(u, v) = \alpha + \beta \cos(2\pi fu + 2\pi k/K) \quad (4)$$

jossa

$\alpha$  ilmaisee kuvioiden keskimääräistä intensiteettiä.  $0 \leq \alpha \pm \beta \leq 1$

$\beta$  ilmaisee kontrastia eli viittaa kuvioiden amplitudiin.

$f$  ilmaisee taajuutta u-akselin suunnassa.

$2\pi k/K$  on kuvioiden vaihesiirtymä, jossa  $K$  on kuvioiden kokonaismäärä ja  $k$  edustaa tiettyä vaihetta.

Kaavan 4 mukaisesti voidaan Servin ym. (2014, s. 79) mukaan muodostaa haluttu määrä vaihe siirtoon perustuvaa ja voimakkuudeltaan muuttuvia viivakuvioita (kuvio 3) seuraavan mukaisesti:

$$I_0(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [\varphi(x, y)],$$

$$I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \omega_0], \quad (5)$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [\varphi(x, y) + 2\omega_0],$$

### 3.4.3 Valotustekniikoiden yhdistelmä

Binääri- ja harmaakuvioiden perustuvat anturit voivat saavuttaa korkean 3D-skannauksen tarkkuuden, mutta niiden spatiaalinen resoluutio on rajoitettu juovien leveydellä ja optisella laadulla (Laga ym., 2019, s. 47–48). Vaiheen muuttamiseen perustuvat anturit puolestaan voivat saavuttaa korkean spatiaalisen resoluution, mutta niillä on haasteena vaiheen epäselvyyden ongelma. Siksi on ehdotettu yhdistelmää binääri-/harmaakuviosta ja vaiheenmuutoskuviosta. Hybridikuvio voi koostua neljästä binäärikuviosta ja neljästä vaiheenmuutoskuviosta. Binäärikuvioita käytetään absoluuttisen vaiheen etäisyyden mittaamiseen ilman epäselvyyttä, kun taas vaiheenmuutoskuviota käytetään saavuttamaan alipikselin resoluutio (parempi kuin binäärikuvioilla). Hybridikuvio parantaa 3D-skannauksen tarkkuutta, mutta vaatii lisää kuvioita.

## 3.5 Time-of-flight

Time-of-Flight (TOF) on 3D-kvantamisen menetelmä, joka käyttää edullista CMOS-pikselimatriisia yhdessä aktiivisesti moduloidun valonlähteen kanssa (Vijayalakshmi & Muruganand, 2019, s. 451–452). Kompakti rakenne, helppokäyttöisyys, korkea tarkkuus ja kuvanopeus tekevät TOF-kameroista hyvän ratkaisun laajalle valikoimalle sovelluksia. Time-of-Flight on verrattain uusi menetelmä, jolla voidaan kerätä yksityiskohtaista 3D-tietoa.

Valaisemalla kohdetta infrapunataajuudella tai muulla valon taajuudella, TOF-kamera voi mitata kohteen etäisyyden. Muihin 3D-tietojen keräämistekniikoihin, kuten skannaukseen tai stereoskooppiseen näköön verrattuna TOF-tekniikalla on kyky saavuttaa suurempi tarkkuus. Se on myös nopea ja edullinen. Time-of-Flight on termi, jota käytetään kuvaamaan jokaista menetelmää, joka mittaa kahden fotonin välisen lentoajan kohteeseen ja takaisin suoraan (Direct-TOF) tai epäsuorasti (Indirect-TOF). Kun D-TOF edellyttää monimutkaista ja rajoittavaa aikaresoluutiolaitteistoa, I-TOF on yksinkertaisempi, sillä sen valonlähde on synkronoitu kuvasensorin kanssa.

### 3.5.1 Pulssipohjainen mittaus

Järjestelmä lähettää valopulsseja kameran sulkimen synkronoinnin kanssa, jolloin valopulsseja käytetään laskemaan etäisyys pisteen ja kohteen välillä fotonien lentoajan mukaan (Vijayalakshmi & Muruganand, 2019, s. 452). Tämän menettelyn aikana syvyys- ja amplitudiarvo jokaisesta pikselistä mitataan suoraan, ja ne yhdistetään syvyyskartaksi. TOF-järjestelmällä on pieni näkökenttä ja monokulaarinen lähestymistapa, mikä vaatii vain yhden kalibroinnin koko laitteen elinkaaren aikana. TOF-järjestelmä soveltuu siksi hyvin erilaisiin sovelluksiin ja eri valaistusolosuhteisiin. Toisaalta aktiivinen valon synkronointi TOF-järjestelmässä voi aiheuttaa syvyyskarttaan virheellisiä tai epäselviä etäisyysarvoja ja heijastuksista johtuvia virheitä.

Pulssipohjaisessa TOF-sensorissa laserpulssi lähetetään kohteen pinnalle (Laga ym., 2019, s. 44). Lasersäde heijastuu takaisin, kun se osuu kohteen pintaan. Palautunut lasersäde tallennetaan vastaanottimella. Jos  $c$  on valon nopeus ilmassa ja  $\Delta t$  on laserpulssin kulkuaika, niin skannerin ja kohteen pinnan välinen etäisyys  $d$  voidaan laskea seuraavasti:

$$d = \frac{1}{2} c \Delta t \quad (6)$$

Pulssipohjaisen TOF-skannerin tarkkuus riippuu siitä, kuinka tarkasti aikaa mitataan. Erityisesti 1 mm:n etäisyysmittaustarkkuus vastaa 3,3 ps:n aikasäätöjen tarkkuutta.

### 3.5.2 Vaihemittaus

Vaihemittaukseen perustuva tekniikka lähettää jatkuvaa lasersädettä, jonka amplitudi muuttuu sinusoidaalisesti ajan myötä (Laga ym., 2019, s. 45). Laser, joka heijastuu pinnalta, säilyttää edelleen sinusoidaalisena aaltomuodon ajan myötä, mutta vaihe eroaa lähetetystä laserista. Laserlähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys voidaan siten laskea mittaamalla vastaanotetun ja lähetetyn lasersignaalin vaihtelun eroa. Vaihemittaus on yleensä tarkempi kuin pulssipohjaisen TOF-anturin käyttämä aikamittaus. Vaihemittauksen tunnistusetäisyys on yleensä lyhyempi kuin pulssipohjaisen TOF-anturin. Ensimmäinen toimii noin sadan metrin etäisyydellä, kun taas jälkimmäisen tunnistusetäisyys voi olla jopa muutamia kilometrejä. On huomattava, että yksittäisellä pikselin TOF-anturilla voidaan saada vain yksi piste jokaisella skannauksella. Koko kohtauksen rekonstruoinniseksi on suoritettava jonkinlainen lasersäteiden skannaus, esimerkiksi pyörivien peilien avulla. Hyvä vaihtoehto on lähettää tasainen valosuora kohteeseen ja kerätä heijastunut valo vastaanottimella. Tässä tapauksessa anturi voi kerätä koko kohteen 3D-tiedot yhdellä skannauksella.

TOF-anturien suuri etu on niiden pitkä käyttöetäisyys (Laga ym., 2019, s. 45). Ne voivat kerätä noin miljoona pistettä sekunnissa jopa muutaman kilometrin etäisyydeltä. Sekä pulssipohjaiset että vaiheensiirtoon perustuvat TOF-anturit ovat sopivia suurten kohteiden, kuten teiden, rakennusten, puiden, maantieteellisten piirteiden ja lentokoneiden, skannaamiseen. Vaiheensiirtoon perustuvat TOF-anturit soveltuvat myös keskipitkän tai lyhyen etäisyyden sovelluksiin, kuten ajoneuvojen, huoneiden ja teollisuusosien skannaamiseen. TOF-anturien mittatarkkuus on suhteellisen alhainen (yleensä muutaman millimetrin tasolla). Tämä johtuu siitä, että ajan kulun mittaaminen on hyvin haastavaa, koska valon nopeus on liian suuri. Tarkkuus voi olla huomattavan alhainen, kun laser osuu pinnan reunaan. Tämä johtuu siitä, että kun laser säde osuu pinnan reunaan, vastaanotetun laserin heijastus tulee kahdesta eri paikasta kappaleen pinnalla. Mahdollinen ratkaisu tähän ongelmaan on vähentää laserin säteen leveyttä.

## 3.6 Pickit 3D -kamera

### 3.6.1 Tunnistusperiaate

Pickit 3D -kamerat käyttävät rakenteellisen eli strukturoidun valon teknologiaa luodakseen 3D-pistepilven, joka perustuu tunnettuun kuvioon (Pickit 3D, i.a.-e). Kun kamera havaitsee projisoidun kuvion, sen vääristymät pinnalla määrittävät, kuinka kaukana pinnat ovat kamerasta. Päällekkäisyys projisoitujen kuvioiden ja anturin havaitsemien kuvioitten välillä luo 3D-tietoa pistepilven muodossa. Kamera ei kuitenkaan pysty saamaan 3D-dataa koko kappaleesta. Kappaleen asento ja paikka kameraan nähden määrittävät, mitä kamera näkee. Kohteiden sijainnilla suhteessa kameraan on ratkaiseva merkitys 3D-tietojen määrittämisessä. Vain ne pinnat voidaan havaita, joilla on suora näköyhteys sekä rakenteellisen valon projektoriin että sensoriin. Tapauksessa, jossa neliön muotoinen kappale on suoraan kamerasuoraan alapuolella, vain kappaleen yläpinta on havaittavissa. Kappaleen reunoista ei tässä tapauksessa ole dataa.

Pickit M-HD2 -kameraa suositellaan käytettäväksi pienten ja keskisuurien kappaleiden poiminnassa ja vastaavissa sovelluksissa (Pickit 3D, i.a.-g). M-HD2 on edeltäjänsä M-HD-kameraan verrattuna kaksi kertaa tarkempi ja sillä on laajempi näkökenttä.

Pickit HD -kamerat ovat korkean tason kameroita, joissa on monia erilaisia vaihtoehtoja kohteen pistepilven tallentamiseksi (Pickit 3D, i.a.-d). Esimerkiksi kamera voidaan optimoida, jotta se havaitsee paremmin kirkkaita tai tummia osia. Kun kamera on asetettu havaitsemaan kirkkaita osia, tallennettu pistepilvi muodostuu vain pinnoista, jotka ovat kirkkaita. Toisaalta, kun kamera on asetettu havaitsemaan tummia osia, pistepilvi muodostuu vain tummista alueista. Pickit HD -kameroilla on mahdollisuus ottaa useita peräkkäisiä kuvia. Jokainen kuva voi käyttää erilaista asetusta, ja useiden kuvien yhdistetty kuva johtaa pistepilveen, joka voi olla parempi yhteen kuvaan verrattuna. Useiden kuvien ottaminen johtaa yleensä parempaan pistepilveen, mutta myös pistepilven tallennusaika kasvaa. Parhaan asetuksen löytämiseksi kannattaa kokeilla erilaisia asetuksia ja valita se, joka antaa parhaat tulokset. Asetuksen tulos voidaan nähdä pistenäkökuvassa (kuva 7).



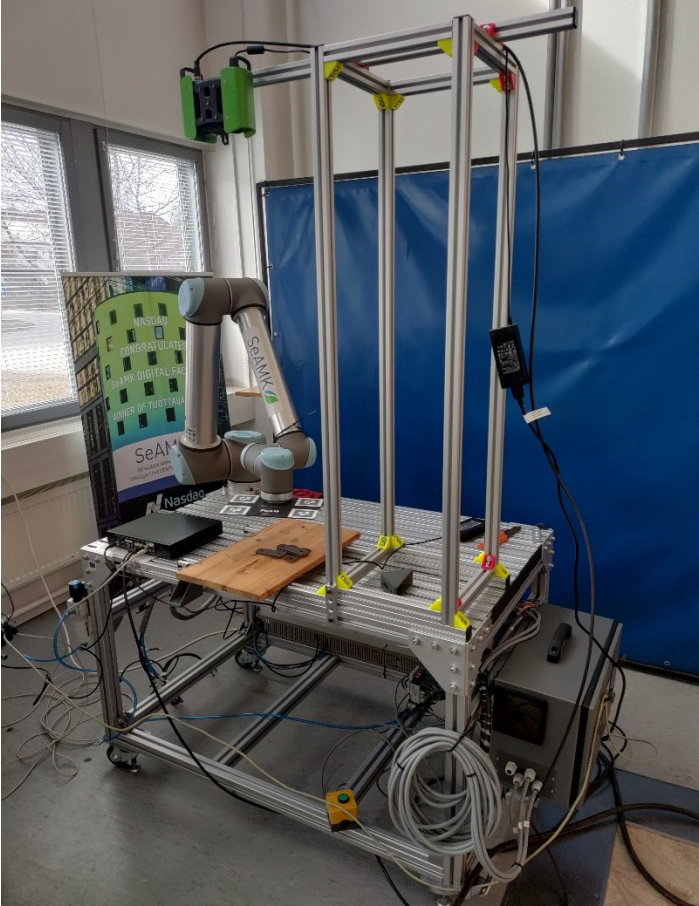
### 3.6.2 Kalibrointi

Kalibrointi on prosessi, jossa kamera ja robotti oppivat suhteellisen sijaintinsa toisiinsa nähden (Pickit 3D, i.a.-b). Tämä mahdollistaa kappaleiden poiminnan robotilla kameran määrittämistä paikoita.

Jos kamera on kiinnitetty kiinteään rakenteeseen, kalibrointilevy on kiinnitettävä robotin kärkeen (Pickit 3D, i.a.-f). Levyn kiinnitystapa ei ole merkityksellinen, kunhan se on hyvin kiinnitetty. Se voidaan esimerkiksi kiinnittää suoraan robotin kärkeen (kuva 2) tai sen tarttujaan. Levyn kiinnittäminen esimerkiksi imukuppiin joustavalla kellukkeella ei ole suositeltavaa, koska levy heiluisi.

Tarkimmat tulokset saavutetaan, kun kalibrointilevy havaitaan useasta näkökulmasta käyttäen moniasentoista kalibrointia (Pickit 3D, i.a.-b). Joissakin sovelluksissa työtila saattaa olla liian rajoitettu kalibrointilevyn havaitsemiseksi useasta näkökulmasta.

Pickit tukee yksiasentoista kalibrointimenetelmää (Pickit 3D, i.a.-b). Ottaen huomioon, että se voi tuottaa vähemmän tarkkoja tuloksia, sitä tulisi käyttää vain silloin, kun moniasentoisen kalibrointi ei ole vaihtoehtona. Huonosti tehty tai vanhentunut kalibrointi voi johtaa odottamattomiin robottiliikkeisiin. Väärä kalibrointi voi johtua siitä, että kalibrointimenettelyä ei noudatettu oikein. Kalibrointi voi vanhentua, jos kamera on liikkunut suhteessa robottiin viime onnistuneen kalibroinnin jälkeen.



Kuva 2. Kameran ja robotin kalibrointi.

Kalibrointilevyn havaitseminen tapahtuu värillisen kuvan avulla (Pickit 3D, i.a.-h). Ulkoisen valon vaikutus kannattaa ottaa huomioon, koska SD-kamera tarvitsee yhtenäisen ja hajautetun ulkoisen valonlähteen. HD-kameran kalibroinnissa ei tarvita lisävalonlähteitä, ja on jopa suositeltavaa vähentää ulkoista valaistusta, ainakin jos kameran ja kalibrointilevyn etäisyys on suurempi kuin 1,5 metriä.

### 3.6.3 ROI



Kuva 3. Tunnistusalueen määrittäminen.

Tunnistusalue määritellään kolmen merkin (kuva 3) perusteella, jotka on asetettu kameras näkökenttään (Pickit 3D, i.a.-a). Kaikkien merkkien "Pickit"-tekstin tulisi olla suunnattuna samalla tavalla, ja samanväristen nuolten tulisi osoittaa toisiaan kohti. Merkkejä ei voi vaihtaa keskenään.

Kun Region of Interest (ROI) eli haluttu tunnistusalue on määritelty, sen sijaintia ja kokoa voi säätää manuaalisesti (Pickit 3D, i.a.-c). Säädöt voidaan tehdä joko napsauttamalla ja vetämällä interaktiivisia nuolia käyttöliittymässä tai asettamalla tarkat numeeriset arvot. ROI-laatikon sijaintia ja kokoa voidaan säätää, mutta ei sen suuntaa. Jos halutaan muuttaa suuntaa, ROI-laatikko on määriteltävä uudelleen. Kun hienosäätö on käyttöliittymässä avoinna, säätönuolet näkyvät kaikissa näkymissä paitsi 2D-näkymässä. Maatasojen ja seinien poistaminen tunnistusalueelta on yksi tapa nopeuttaa havaitsemisaikoja. ROI-laatikon opetuksessa suositellaan käyttämään merkkejä, jotka on linjattu säiliön tai laatikon nurkkiin. Sitten säädetään tunnistusaluetta siten, että säiliön tai laatikon reunat eivät ole tunnustusalueella.

### 3.7 Mahdolliset ongelmat liittyen kameraan

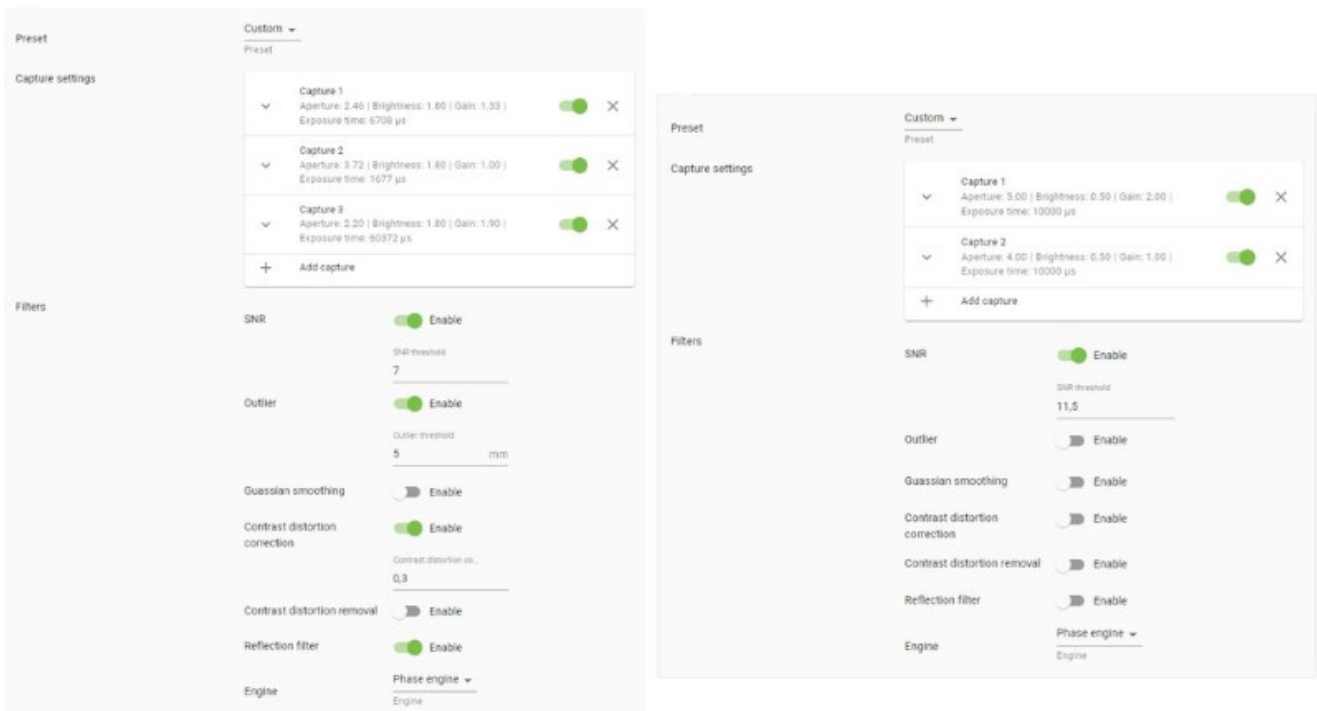
Pickit-verkkosivun esimerkkien mukaan 3D-datan saaminen kaikista kappaleista ei aina onnistu (Pickit 3D, i.a.-e). Ensimmäinen erikoistapaus on pystyssä oleva ohut levy, joka on suoraan kameran alapuolella. Ohuen levyn yläosa on liian pieni, jotta siitä saataisiin dataa. Reunoja ei myöskään voida tunnistaa, koska toinen puoli on näkyvissä vain valonlähteelle ja toinen puoli vain anturille. Toinen esimerkki käsittelee läpinäkyviä kappaleita. Sekä valonlähde että anturi molemmat näkevät kappaleen läpi, joten tutkittavan kappaleen pintaa ei havaita. 3D-dataa ei voida muodostaa läpinäkyvistä kappaleista. Kolmannessa esimerkissä kappaleella on heijastava pinta. Kappaleeseen ohjattu valonlähde heijastuu muualle kuin takaisin kameraan. 3D-datan muodostaminen on tämän takia mahdotonta. Usein osat ovat vain osittain heijastavia tai puoliläpinäkyviä. Osia kannattaa testata asettamalla ne kameran alle, käynnistämällä havaitseminen ja tarkastelemalla pistepilveä pistenäkössä. Jos 3D-tietoa ei ole riittävästi, sitä voidaan vielä optimoida.

SD-kameroissa kuvien fuusio johtaa vakaampaan pistepilveen, kun taas HD-kameroissa voidaan käyttää erilaisia asetuksia (Pickit 3D, i.a.-e). Jos 3D-tietoa ei saada riittävästi, se voi johtua osan liiallisesta heijastavuudesta tai läpinäkyvyydestä. Tavallisin SD-kameroiden käyttämä tekniikka on rakenteellinen infrapunavallo. HD-kamerat toimivat rakenteellisen näkyvän valon avulla. Vaihtelevien valaistusolosuhteiden vaikutusta vähentääkseen nämä kamerat käyttävät voimakasta projektoria. Tämän ansiosta tyypilliset toimisto- tai tehdasolosuhteissa tapahtuvat valonmuutokset eivät vaikuta kameraan juurikaan. Kuitenkin suora auringonvalo tai kirkkaat valaisimet voivat aiheuttaa häiriöitä.

## 4 KAPPALEIDEN TUNNISTUS JA POIMINTA

Tunnistukset toteutettiin Seinäjoen ammattikorkeakoulun tiloissa kuvan 2 mukaisella kokonaisuudella. Testattavina oli kahden kokoisia levyjä sekä muita pienempiä osia, kuten holkki (kuva 16) ja tappi (kuva 18). Kappaleiden poimittavuus toteutettiin muutamalla testikappaleella. Työkaluna käytettiin 10 N:n, 25 N:n ja 100 N:n sähkömagneetteja.

### 4.1 3D-kameran valaisusasetukset

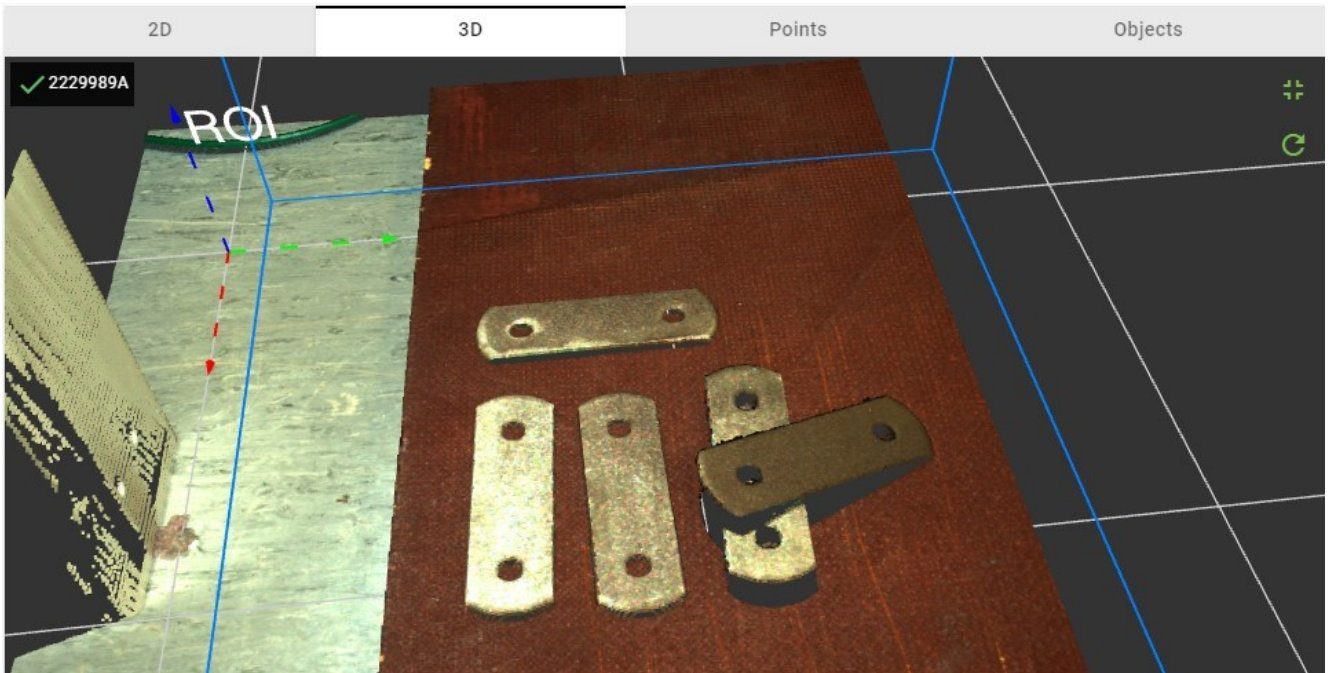


Kuva 4. Valaisusasetuksien määrittäminen kappaleen pinnan mukaan.

Valaisusasetuksia säädettiin tarpeen mukaan. Esimerkiksi ison levyn reunan valaisusasetuksena käytettiin kuvan 4 oikeanpuoleisen mallin mukaista valaistusta. Vähemmän heijastavissa kappaleissa käytettiin kuvan 4 vasemmanpuoleista valaisusasetusta. Toisaalta nopeassa käyttönotossa voidaan käyttää kameran itse määrittämiä asetuksia, jotka voidaan asettaa laittamalla tunnistettava kappale tunnistusalueelle ja sen jälkeen kameralla otetaan muutama kuva, joiden perusteella valaisusasetukset määräytyvät.

## 4.2 Kappaleiden tunnistus

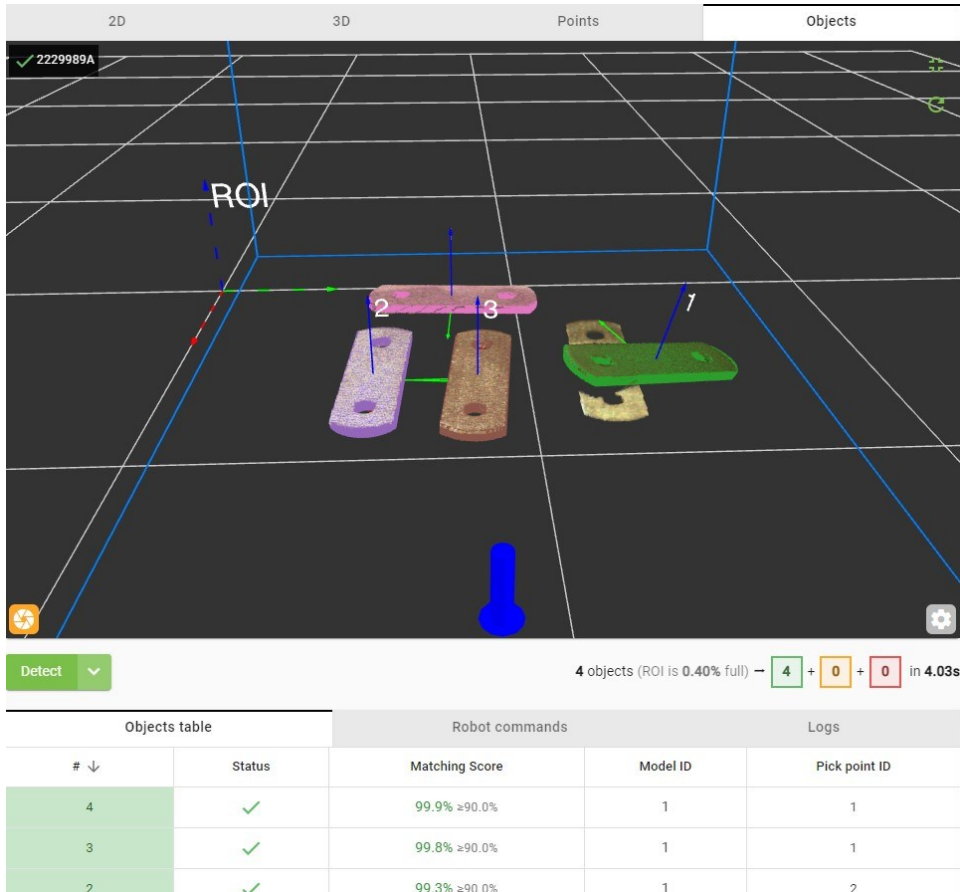
### 4.2.1 Pienen levyn tunnistus



Kuva 5. 3D-kuva pienistä levyistä.

Ulkoisen valaistus ei huomattavasti vaikuttanut pieniin levyihin (kuva 5), koska niiden pinta oli lähes matta. Holkkien (kuva 16) ja tappien (kuva 18) tunnistuskuvista on nähtävissä, että heijastava pinta vaikeuttaa kappaleen tunnistusta. Kuvissa 16 ja 18 tummemmalla värillä näkyvä alue tunnistetussa kappaleessa on kameran näkemä muoto, ja siihen soviteaan kirkkaammalla värillä näkyvä CAD-malli.

Kappaleen muodolla on iso merkitys sen tunnistettavuuteen. Levymäisistä kappaleista on huomattavasti helpompi muodostaa pistepilvi kuin lieriömäisestä kappaleesta.



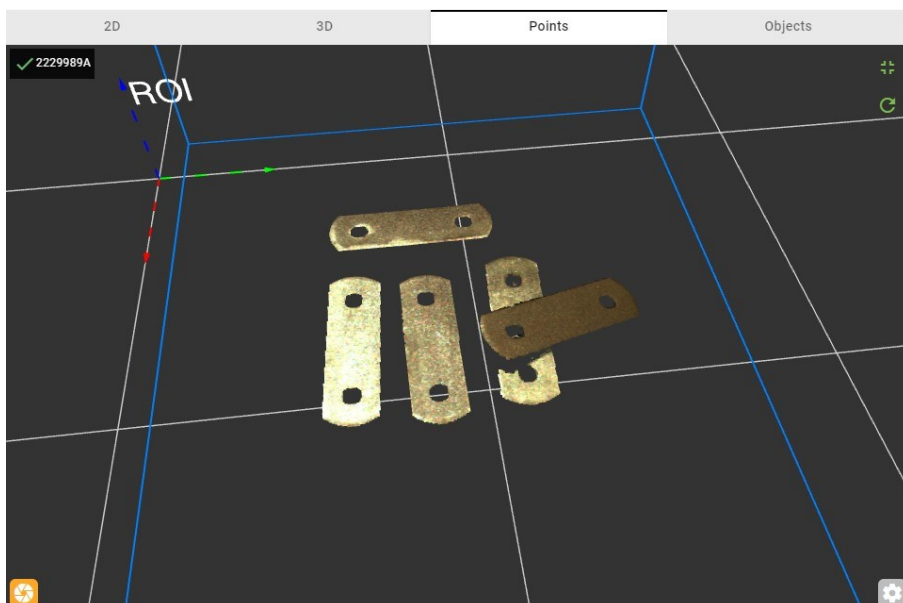
Kuva 6. Tunnistettujen kappaleiden poimittavuus.

Poimintajärjestyksen pystyi määrittämään itse. Järjestys voidaan yksinkertaistettuna määrittää akseleiden mukaan. Esimerkiksi ensimmäisenä voitiin poimia kappale sen nostokorkeuden eli z-akselin mukaan, lähimpänä origoa x-akselin suunnassa tai kauimpana origoa x-akselin suunnassa. Samalla tavalla myös y-akselin mukaan pystyttiin määrittämään poimintastrategia.

Tässä työssä käytettiin asetusta, jonka mukaan kappale, joka oli ylimpänä (kuva 6), poimitiin ensin. Asetus oli sama kaikilla poimittavilla kappaleilla.

Levyjen tunnistuksen testauksessa huomattiin, että pienten levyjen puolten määrittäminen levyn päissä olevilla leikkausviisteillä (kuva 8) ei onnistunut 3D-kameralla. Puolten määrittäminen vaatii erillisen tunnistusmekanismin. Pienten levyjen paikoitus kuitenkin onnistui hyvin.





Kuva 7. Tunnistettujen kappaleiden pistepilvi.

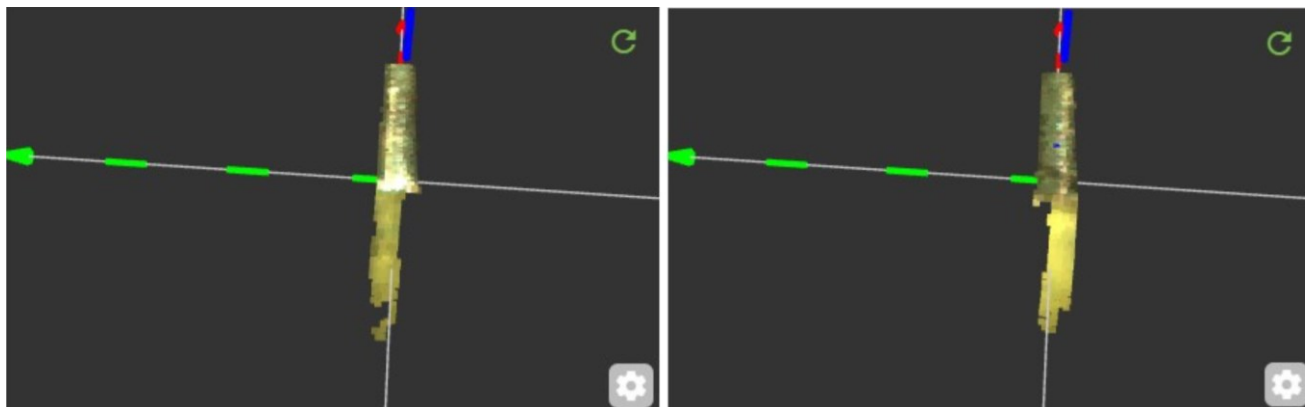


Kuva 8. Levyjen reunat.

Isoissa levyissä oli huomattavasti selkeämpi leikkausviiste, joka oli iskusuunnasta lyhyen matkan heijastava ja muuten matta, joten kappaleen puolet oli mahdollista määrittää sen perusteella.



## 4.2.2 Ison levyn tunnistus



Kuva 9. Isojen levyjen reunan tunnistus.

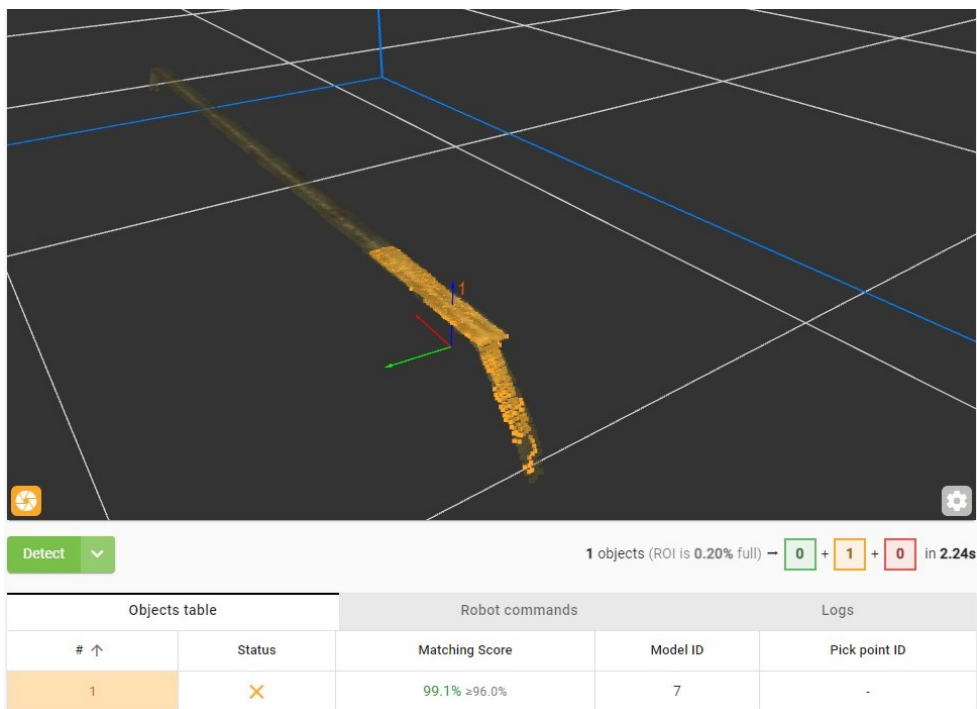
2229989A

1 objects (ROI is 0.22% full) → 0 + 1 + 0 in 2.21s

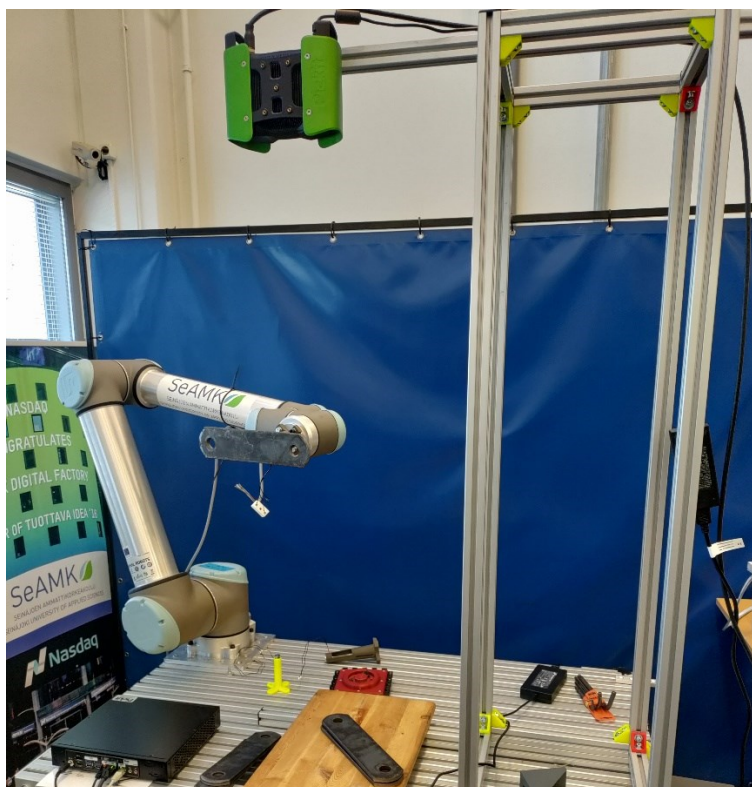
Objects table		Robot commands		Logs
# ↑	Status	Matching Score	Model ID	Pick point ID
1	✘	97.4% ≥96.0%	8	-

Kuva 10. Ison levyn puolen määrittäminen.

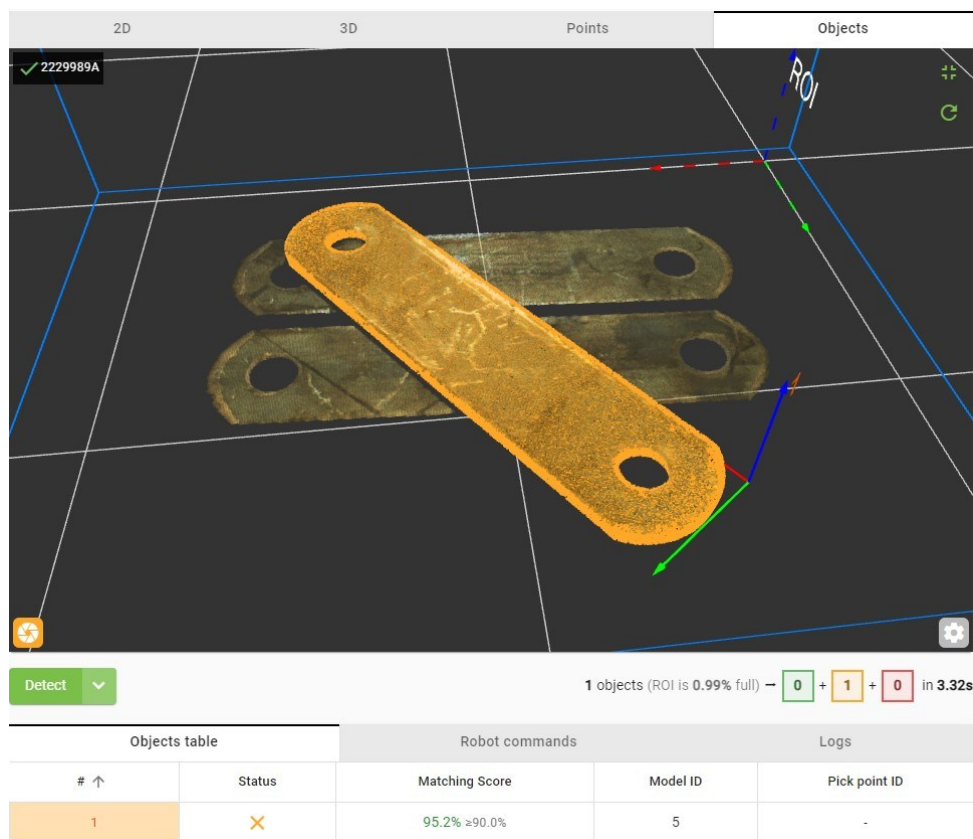
Ison levyn reunoista luotiin kaksi mallia (kuva 9), joiden mukaan sen puolet pystyttiin määrittämään. Kun kappale oli poimittu, se nostettiin lähemmäksi kameraa ja käännettiin siten, että sen reuna pystyttiin kuvaamaan (kuva 12). Puoli määrytyi sen mukaan, kumman mallin (kuva 10 ja kuva 11) kamera näki.



Kuva 11. Ison levyn toisen puolen määrittys.



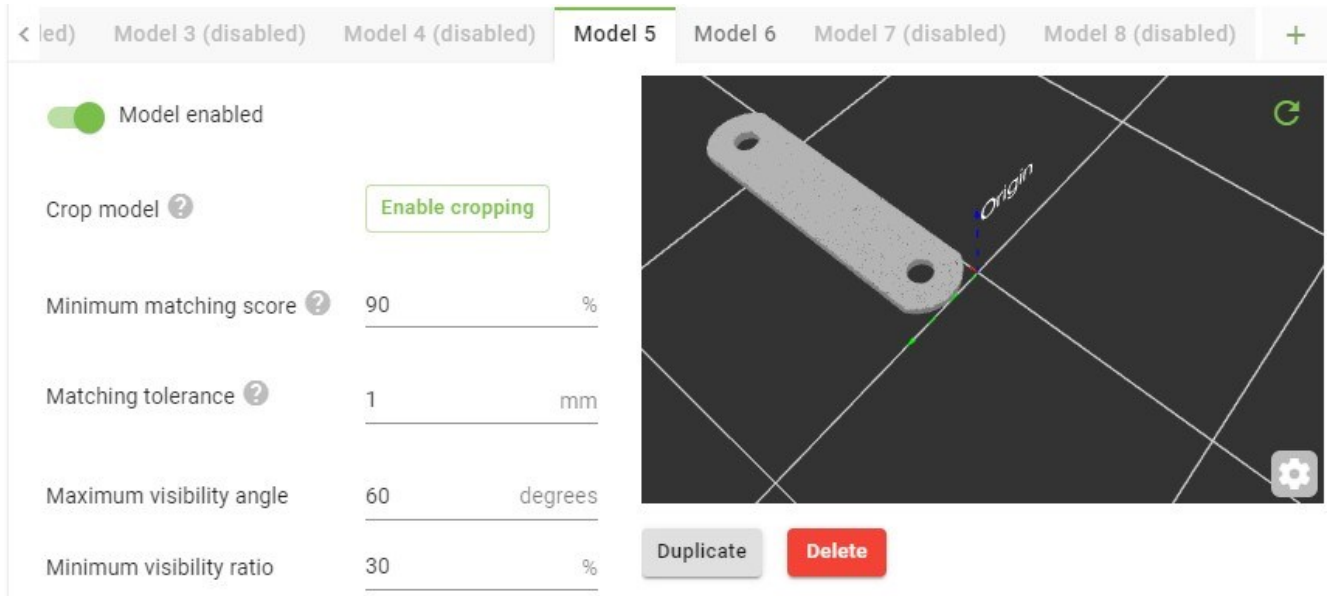
Kuva 12. Ison levyn reunan tunnistus.



Kuva 13. Ison levyn paikoitus.

Ison levyn paikoitus (kuva 13) ei tuottanut ongelmia. Kappaleen pinta ei ollut erityisen heijastava, joten valaisuasetuksia (kuva 4) ei tarvinnut säätää, vaan tunnistustulokset olivat selkeät pelkän automaattisten asetusten määrittämisen jälkeen.

Isot levyt poimittiin 100 N:n sähkömagneetilla. Vaikka kappale oli painoltaan yhden kilon, sitä ei kannattanut nostaa 10 N:n tai 25 N:n sähkömagneeteilla, koska käännettäessä sivuttain kappale saattoi liukua alas ja pudota. Suoraan ylös nostettaessa 25 N:n sähkömagneetti olisi riittänyt.



Kuva 14. Ison levyn tunnistuksessa käytettävä CAD-malli.

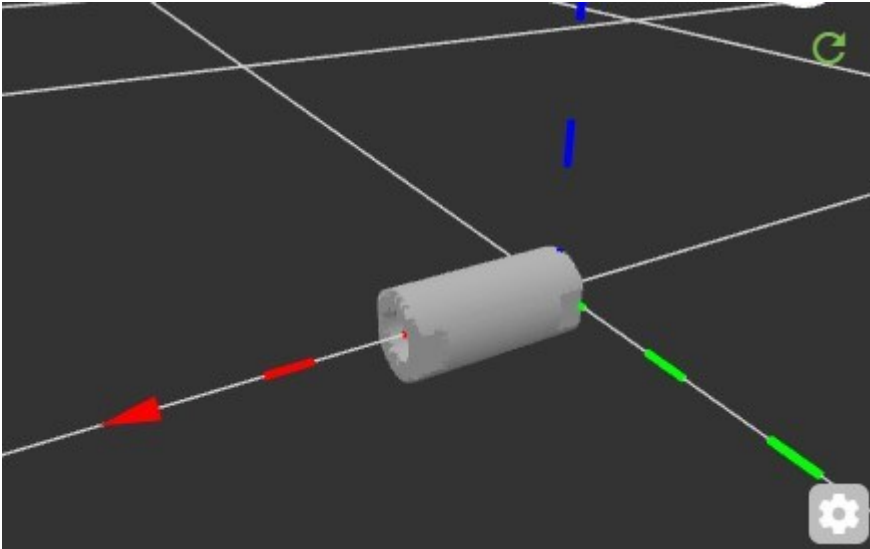
Levyistä tehtiin CAD-mallit, joiden perusteella kamera tunnistaa kappaleet. CAD-mallin hyötynä on se, että kappaleen paksuus on tiedossa ja poiminta voitaisiin toteuttaa myös kappaleen sivusta. Kaikissa CAD-tunnistusmalleissa käytettiin korkeaa tunnistusprosenttia.

#### 4.2.3 Holkin tunnistus

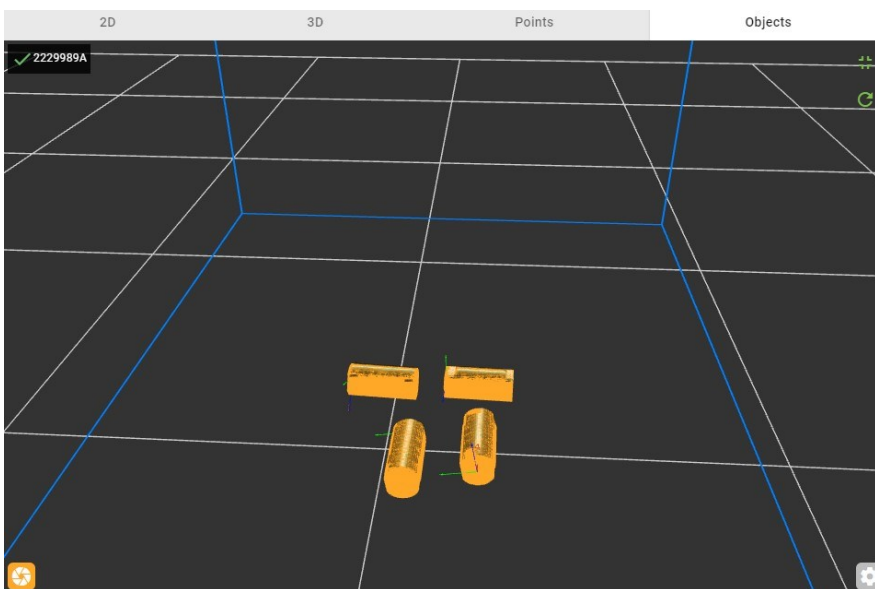
Pienten kappaleiden kuten holkin (kuva 16) orientaation määrittäminen oli haastavaa, eikä se toiminut luotettavasti jokaisella tunnistuskerralla. Kappaleen paikoitus poimittavaksi onnistui, vaikka kappaleella oli heijastava pinta.

Holkissa on pienet lovet kappaleen molemmissa päissä, ja niiden mukaan orientaatio olisi mahdollista määrittää. Tulokset olivat kuitenkin vaihtelevia, joten kappaletta tutkittaessa toteutettiin vain poimittavuuden testaus. Holkista luotiin CAD-malli (kuva 14), jota käytettiin kappaleita tunnistettaessa.

Pistepilvi heijastavista kappaleista muodostui eri tavalla (kuva 15) niiden ollessa projisoitujen viivojen suuntaisesti verrattuna kappaleisiin, jotka olivat vaakatasossa eli 90 asteen kulmassa projisoituihin viivoihin.



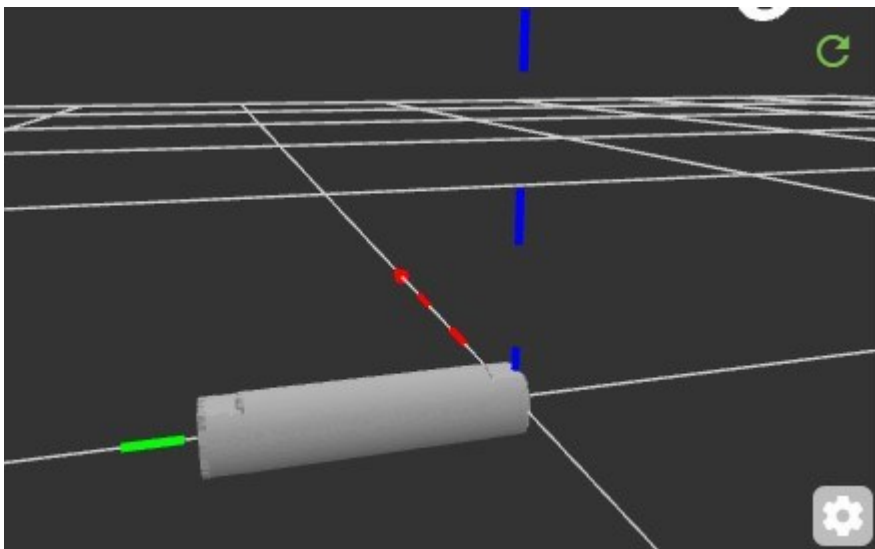
Kuva 15. Holkin CAD-malli.



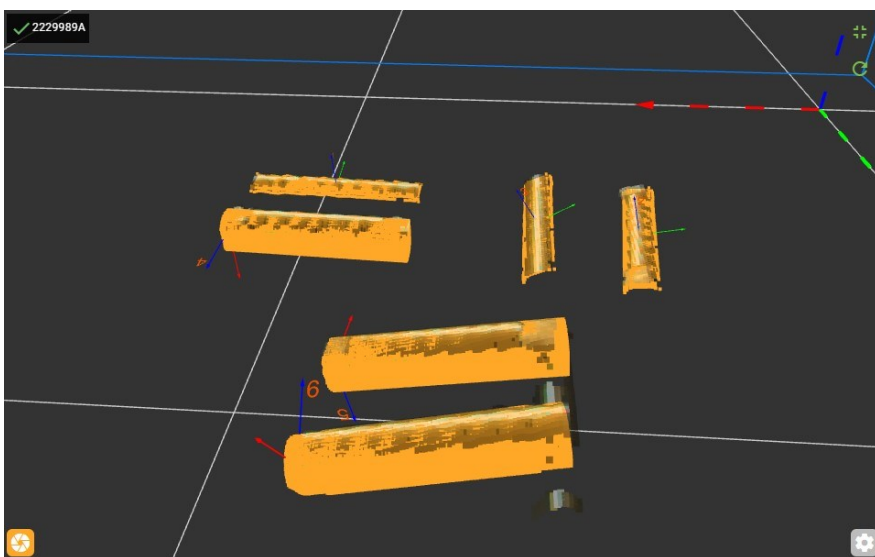
Kuva 16. Holkin tunnistus.

Tunnistusmallina kokeiltiin käyttää myös mallikuvaa, joka otettiin kameralla. Mallikuvassa viiste laitettiin kohtisuorasti kameraa päin, koska kuva muodostuu vain kappaleen pinnasta. Siinä viisteet näkyivät tummalla, koska se ei ollut yhtä heijastava kuin kappaleen runko. Ongelmana oli kuitenkin se, että tunnistus muodostui helposti kahden eri kappaleen välille, kun kappaleita oli useampi.

#### 4.2.4 Tapin tunnistus



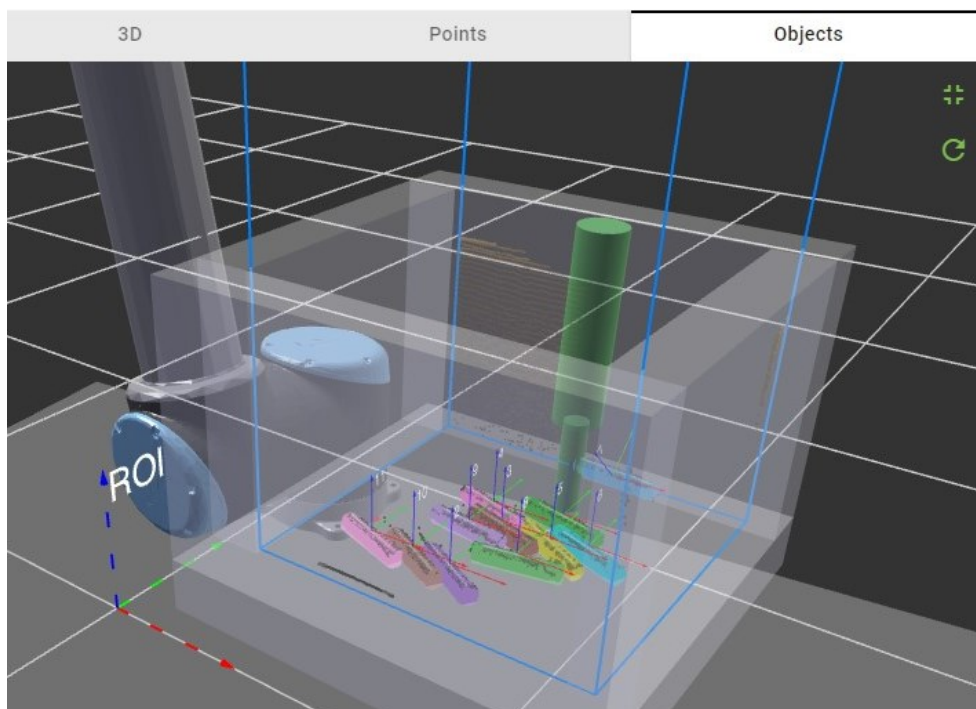
Kuva 17. Tapin CAD-malli.



Kuva 18. Tapin tunnistus kahdella eri mallilla.

Tapin lieriömäinen rakenne sekä sen heijastava pinta vaikuttivat kappaleen tunnistettavuuteen huomattavasti. Samalla tavalla kuin holkissa myös tapissa on lovet molemmissa päissä (kuva 17).

Lieriömäisen kappaleen ollessa tunnistusviivojen suuntaisesti pistepilvi näytti muodostuvan selkeämmin.



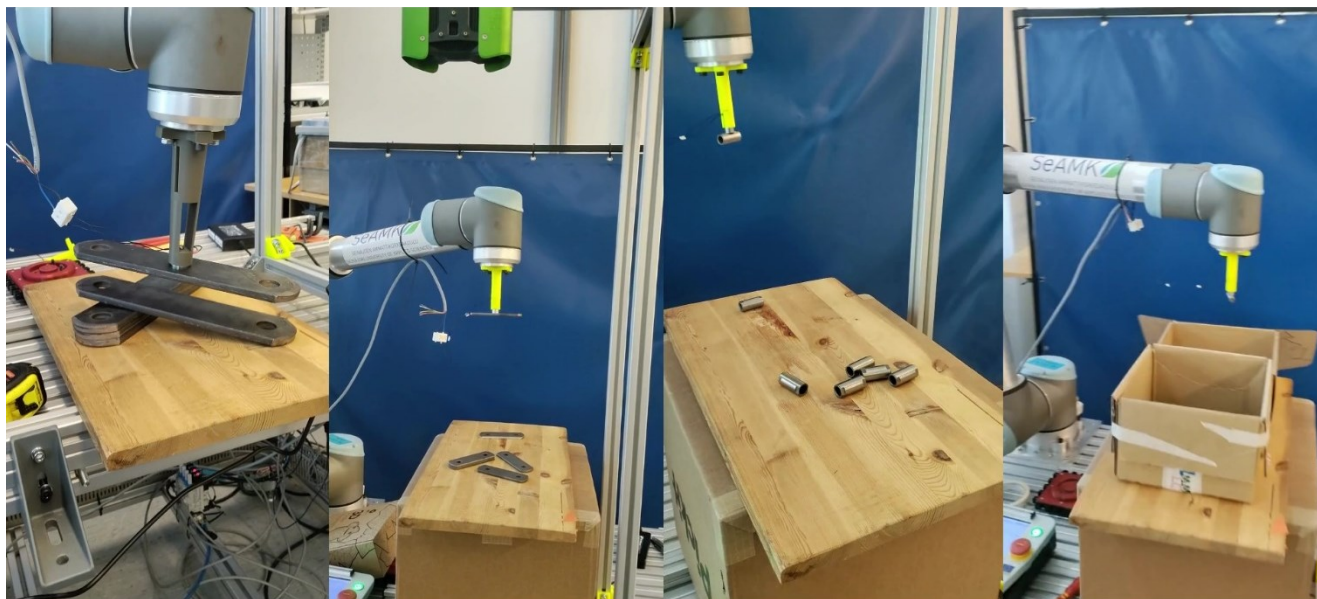
Kuva 19. Tappien poiminta laatikosta.

Tappeja kokeiltiin myös poimia laatikosta. Pickit käyttöliittymässä oli mahdollista luoda va-roalue, jotta robotti ei törmää laatikkoon. Kuten kuvasta 19 saattaa nähdä, yksi kappale oli laatikon reunassa, joten sitä ei pystyisi poimimaan suoraan ylhäältä törmäämättä laatikon reunaan vaan sitä olisi lähestyttävä hieman viistosti.

Tappien poiminta toteutettiin siten, että määriteltiin poiminta symmetriseksi kappaleen keskeltä ympäri sen pyöreiden mukaisesti. Tässä oli nähtävissä CAD-mallin käytön hyöty, sillä poimintaa määritettäessä pystyttiin asettamaan kappaleeseen symmetrinen poiminta.



## 5 TESTIAJOT JA TULOSTEN TARKASTELU



Kuva 20. Kappaleiden poimintaa robotilla.

Kaikkien kappaleiden poiminta (kuva 20) onnistui halutusta paikasta. Poimintaetäisyys kuitenkin vaihteli hieman ja se saattoi välillä vaikeuttaa poimintaa, sillä magneetin piti olla lähes kiinni kappaleessa, jotta se tarttui kiinni. Tämän ongelman pystyisi ohittamaan muokkaamalla työkalua siten, että se joustaisi hieman, jolloin pieni törmäys ei aiheuttaisi robotin pysähtymistä.

Holkkien ja tappien heijastavuus vaikeutti pistepilven muodostamista. Kappaleiden orientaation määrittäminen ei onnistunut aina luotettavasti. Mahdollisesti suuremman määrän tunnistaminen samaan aikaan saattaisi määrittää joidenkin kappaleiden orientaation oikein. Lisätutkimuksia vaadittaisiin sen varmistamiseksi, ettei robotti poimisi kappaleita, joiden orientaatio on väärä. Pickit-kameroissa olisi toinenkin tapa tunnistaa kappaleita, mutta se huomattiin ehkä liian myöhään. Normaalisti kamera käyttää phase engine -tunnistusmenetelmää, mutta siinä olisi myös stripe engine -tunnistusmenetelmä, joka soveltuisi paremmin heijastaviin kappaleisiin. Testejä ei kuitenkaan ehditty tehdä kyseisellä tunnistusmenetelmällä.

Pienen levyn reunaa ei pystytty tunnistamaan siten, että siitä olisi voinut määrittää kappaleen puolta. Yhteen pieneen levyyn tehtiin teipillä selkeä kuvan 9 mukainen muoto, jolla



sitten testattiin reunan tunnistusta. Näin pystyttiin demonstroimaan tilannetta, jossa kappaleessa olisi selkeä ero leikkauskohdassa ja loppurepeämässä kappaleen päässä. Puolen määrittäminen saatiin kyseisellä testillä onnistumaan, mutta sitä ei käsitellä sen tarkemmin tässä opinnäytetyössä.

Isojen levyjen poiminta sekä puolten määrittäminen onnistuivat toistuvasti. Puolten määrittämisen onnistuminen perustui kuvan 12 mukaisesti siihen, että kamera pystyi määrittämään kumman mallin kuvista 10 ja 11 se pystyi muodostamaan kappaleen reunaan. Tämä tieto pystyttiin lähettämään robotille, ja sen liikkeitä oli mahdollista määrittää sen mukaan. Tarkoituksena oli testata suurempaa määrää ainakin yhtä kappaletta, mutta sitä ei ehditty tehdä.

## 6 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia, pystytäänkö tiettyjä osia poimimaan robotilla luotettavasti sekä määrittämään niiden orientaatio. Tämä helpottaisi työaseman käyttöönottoa tietyille kappaleelle sekä poistaisi mekaaniset syöttölaitteet ja niiden täyttämisen käsin.

Työ alkoi 3D-kameraan tutustumalla ja jatkui tunnistusten testaukseen pelkällä kameralla sekä myöhemmin myös robotin kanssa. Robotti kalibroitiin kameras kanssa ja tunnistusta testattiin eri korkeuksilta kappaleen koon mukaan. Työkalupäät eri kokoisille sähkömagneeteille tehtiin 3D-tulostimella. Työssä haastavinta oli aiheeseen liittyvän teorian kirjoittaminen. Teorian kirjoittaminen ei suoraan vaikuttanut tehtävään työhön, mutta auttoi ymmärtämään 3D-tunnistuksen periaatteita.

Työ eteni tunnistusvaiheessa hyvin, mutta testaus robotin kanssa hieman viivästyi kameratelineen valmistuttua vasta loppuvaiheessa. Työstä jäi puuttumaan järjestelmän kustannustehokkuuden tutkiminen samasta syystä.

Tutkimustulosten perusteella toimeksiantaja sai tietoa konenäön hyödyntämisestä tuotannossa. Samaa toimintaperiaatetta voitaisiin käyttää monilla yrityksen robottiasemilla. Tutkimus kuitenkin keskittyi pääosin vain rakenteellisen valon 3D-kameraan, joka käytti näkyvää valoa. Vaikka tulosten perusteella kappaleiden poimittavuuteen kyseinen kamera on riittävä, ei voida olla varmoja siitä, onko se kuitenkaan paras vaihtoehto.

Heijastavissa kappaleissa olisi mahdollisesti parempi käyttää infrapunavaloa, koska eri aallonpituuden valo heijastuu eri tavalla kappaleen pinnoista. Esimerkiksi ultravioletti heijastuu voimakkaasti kappaleiden pinnoista, kun taas infrapuna heijastuu huomattavasti heikommin.

Tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista selvittää järjestelmän toimivuutta siten, että kamera on kiinni robotissa. Lisäksi muihin konenäköjärjestelmiin perehtyminen lisäisi ymmärrystä siitä, millaisissa sovelluksissa tiettyä järjestelmää kannattaisi käyttää.

## LÄHTEET

- Clearview. (5.5.2021). *Stereo vision for 3D machine vision applications*. Haettu 2.4.2023, <https://www.clearview-imaging.com/en/blog/stereo-vision-for-3d-machine-vision-applications>
- Davies, E. R. (2012). *Computer and machine vision: Theory, algorithms, practicalities*. Elsevier Science & Technology.
- Ems-usa. (i.a.). *3D scanning technologies overview*. Haettu 4.4.2023, <https://www.ems-usa.com/tech-papers/3D%20Scanning%20Technologies%20.pdf>
- Hermery. (i.a.). *Coded structured light*. Haettu 4.4.2023, <https://hermary.com/glossary/coded-structured-light/>
- Hornberg, A. (2017). *Handbook of machine and computer vision: The guide for developers and users* (2. uud. p.). Wiley-VCH.
- International Organization for Standardization (ISO). (2021). *Robotics: Vocabulary* (ISO Standard No. 8373:2021), <https://www.iso.org/standard/75539.html>
- Javatpoint. (i.a.). *Gray code*. Haettu 13.5.2023, <https://www.javatpoint.com/gray-code-in-digital-electronics>
- Kang, S., Kim, K., Lee, J., & Kim, J. (2016). *Robotic vision system for random bin picking with dual-arm robots*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167507003>
- Laga, H., Guo, Y., Tabia, H., Fisher, R. B., & Bennamoun, M. (2019). *3d shape analysis: Fundamentals, theory, and applications*. John Wiley & Sons.
- Pre-scient. (19.2.2019). *Types and benefits of 3D scanners and 3D scanning technologies*. Haettu 1.4.2023, [https://www.pre-scient.com/knowledge-center/product-development-by-reverse-engineering/scanners-scanning.html#redirect2\\_1](https://www.pre-scient.com/knowledge-center/product-development-by-reverse-engineering/scanners-scanning.html#redirect2_1)
- Probot. (14.6.2022). *Yhteistyörobotti vai teollisuusrobotti*. Haettu 31.3.2023, <https://probot.fi/yhteistyorobotti-vai-teollisuusrobotti>
- Pickit 3D. (i.a.-a). *Build ROI box*. Haettu 1.5.2023, <https://docs.pickit3d.com/en/latest/documentation/setup/build-roi-box.html#use-markers>
- Pickit 3D. (i.a.-b). *Calibration*. Haettu 13.3.2023, <https://docs.pickit3d.com/en/latest/documentation/calibration/index.html>

- Pickit 3D. (i.a.-c). *Fine-tune ROI box*. Haettu 1.5.2023, <https://docs.pickit3d.com/en/latest/documentation/setup/fine-tune-roi-box.html#fine-tune-roi-box>
- Pickit 3D. (i.a.-d). *HD camera presets*. Haettu 8.4.2023, [https://docs.pickit3d.com/en/latest/hardware/cameras/hd\\_camera\\_presets.html](https://docs.pickit3d.com/en/latest/hardware/cameras/hd_camera_presets.html)
- Pickit 3D. (i.a.-e). *How does the Pickit 3D camera work?* Haettu 13.3.2023, <https://docs.pickit3d.com/en/latest/faq/hardware/how-does-the-camera-work.html#how-does-the-pickit-3d-camera-work>
- Pickit 3D. (i.a.-f). *Multi poses calibration*. Haettu 1.5.2023, <https://docs.pickit3d.com/en/latest/documentation/calibration/multi-poses-calibration.html>
- Pickit 3D. (i.a.-g). *Pickit cameras*. Haettu 8.4.2023, <https://docs.pickit3d.com/en/latest/hardware/cameras/index.html#sd-cameras>
- Pickit 3D. (i.a.-h). *What is the effect of external illumination on camera images?* Haettu 14.4.2023, <https://docs.pickit3d.com/en/latest/faq/hardware/effect-of-external-illumination-on-camera-images.html#lighting-during-calibration>
- Gu, Q., Herakleous, K., & Poullis, C. (2016). *3DUNDERWORLD-SLS: An open-source structured-light scanning system for rapid geometry acquisition*. (2. uud. p.). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.6595>
- Servin, M., Quiroga, J. A., & Padilla, M. (2014). *Fringe pattern analysis for optical metrology: Theory, algorithms, and applications*. John Wiley & Sons.
- Vijayalakshmi, S. R., & Muruganand, S. (2019). *Embedded Vision: An Introduction, Mercury Learning & Information*.
- Wikimedia Commons. (12.7.2022). *ABB:n teollisuus robotteja* [valokuva]. Haettu 6.5.2023, [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Float\\_Glass\\_Unloading.jpg&oldid=673641455](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Float_Glass_Unloading.jpg&oldid=673641455).
- Wikimedia Commons. (28.10.2020). *Lasertriangulaatio* [valokuva]. Haettu 6.5.2023, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:TriangulationLaser.png&oldid=505429747>.
- Zivid. (i.a.). *What is bin-picking?* Haettu 31.3.2023, <https://www.zivid.com/applications/bin-picking>
- Zuo Chao, Feng Shijie, Huang Lei, Tao Tianyang, Yin Wei, & Chen Qian. (2018). *Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review*. *Optics and Lasers in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.04.019>

Xing, S., & Guo, H. (2018). Correction of projector nonlinearity in multi-frequency phase-shifting fringe projection profilometry. *Optics Express*, 26(13), 16277–16291.  
<https://doi.org/10.1364/OE.26.0162>