

## **3D-REFERENSSISOVELLUS**

Kappaleen tunnistus ja paikoitus Matrox Design Assistant X -kehitysympäristössä



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Visamäki, tietojenkäsittelyn koulutusohjelma

kevät, 2019

Kimmo Jansson

Tietojenkäsittelyn koulutusohjelma  
Visamäki

---

<b>Tekijä</b>	Kimmo Jansson	<b>Vuosi</b> 2019
<b>Työn nimi</b>	3D-Referenssisovellus	
<b>Työn ohjaaja/t</b>	Lasse Seppänen	

---

## TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on luoda toimiva referenssitoteutus kappaleen tunnistamiseen ja paikoittamiseen 3D-kuvantamislaitetta hyödyntäen. Sovelluksen ominaisuuksiin kuuluu kappaleiden tunnistaminen opetetusta mallista, korkeimman kappaleen tunnistaminen useiden kappaleiden joukosta, sekä korkeimman kappaleen sijaintitiedon ja kallistuskulman selvittäminen. Sovellus toteutetaan Matrox Design Assistant X -kehitysympäristössä Photoneo PhoXi 3D-kameraa käyttäen.

Opinnäytetyön tilaaja on OEM Finland Oy. Tilaajayrityksen Konenäkötuotealue toimii työssä käytettyjen laitteiden ja ohjelmistojen kaupallisenä edustajana Suomessa sekä Baltian maissa. Opinnäytetyön tuloksia ja luotua ohjelmistoa tullaan käyttämään tilaajayrityksen liiketoiminnan apuna, ja tarjoamaan asiakkaille tutustuttavaksi ja muokattavaksi omiin tarpeisiin sopivaksi.

Työn teoriaosuudessa käydään läpi kuvantamistekniikkaa niin 2D- kuin 3D-kuvantamisen osalta, sekä perehdytään kuvantamisjärjestelmien suunnittelun keskeisiin periaatteisiin.

Työn käytännön osuudessa perehdytään laitteiden käyttöön, sekä sovelluksen ominaisuuksien ja toiminnallisuuden rakentamiseen. Valmiin sovelluksen toimivuutta testataan sekä kuvasarjalla simuloimalla, että fyysisellä kameralla kappaleita kuvaten.

**Avainsanat** 3D, konenäkö, kuvantaminen, robotiikka, teollisuusautomaatio

**Sivut** 46 sivua

Business information technology

Visamäki

---

<b>Author</b>	Kimmo Jansson	<b>Year</b> 2019
<b>Subject</b>	3D Reference application	
<b>Supervisors</b>	Lasse Seppänen	

---

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to create a functional reference application for object recognition and positioning using a 3D imaging device. Functions of this application include object recognition from a model, detecting the topmost object among several objects, and determining the position and angle of the topmost object. The application will be developed using Matrox Design Assistant X integrated development environment and Photoneo PhoXi 3D-camera.

This thesis was commissioned by OEM Finland Oy. Machine Vision product area of OEM acts as a commercial distributor in the Finnish and Baltic region for the equipment and software used in this project. The results of this thesis and the application itself will be used in future commercial efforts of OEM and will also be given to customers to help them in their own projects.

The theoretical part of this thesis will consist of information regarding both 2D and 3D imaging technology. It also aims to familiarize the reader with basic concepts of designing an imaging system.

The practical part of this thesis focuses on using the devices and designing the features and functionalities of the application. Functionality of the finished application is tested with both a simulated image set as well as using a physical camera for live capture.

**Keywords** 3D, machine vision, imaging, robotics, industrial automation

**Pages** 46 pages

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	KONENÄKÖ TEOLLISUUDESSA.....	2
3	2D-KUVANTAMINEN.....	3
3.1	Harmaasävykuvaus.....	3
3.2	Värikuvaus.....	4
3.3	Valaistus.....	6
4	3D-KUVANTAMINEN.....	7
4.1	Käyttökohteet teollisuudessa.....	10
4.1.1	Laadunvarmistus ja tarkastussovellukset.....	10
4.1.2	Paikoitus ja robottiohjaus.....	10
4.1.3	Kartoitus.....	11
4.2	Yleisimpiä tekniikoita.....	11
4.2.1	Lasertriangulaatio.....	12
4.2.2	Stereokuvaus.....	13
4.2.3	Strukturoitu valo.....	14
4.2.4	Time-of-Flight, ToF.....	15
5	RAJAPINNAT.....	16
5.1	Standardisointijärjestöt.....	16
5.2	Liitäntärajapinnat.....	17
5.2.1	Camera Link.....	17
5.2.2	Camera Link HS.....	17
5.2.3	CoaXPress.....	18
5.2.4	GigE Vision.....	18
5.2.5	USB3 Vision.....	18
5.3	Ohjelmistorajapinnat.....	19
5.3.1	IIDC2.....	19
5.3.2	GenICam.....	19
5.4	Valmistajakohtaiset rajapinnat.....	20
5.5	Teollisuuslaitteiden rajapinnat.....	20
6	JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU.....	22
6.1	Kuvattavan kohteen ominaisuudet.....	22
6.2	Käytettävän tekniikan valinta.....	24
6.3	Järjestelmän tekninen määrittely.....	25
6.4	Kuvan analysointi.....	26
6.5	Tulosten välittäminen.....	27
7	JÄRJESTELMÄN RAKENTAMINEN.....	28
7.1	Kuvattava kohde.....	28
7.2	Kuvantamislaitte ja sen kytkentä.....	28

7.3	Ohjelmiston luominen Design Assistantilla.....	29
7.3.1	Uuden projektin aloittaminen .....	29
7.3.2	Ohjelman logiikan rakentaminen vuokaavioon .....	30
7.3.3	Kuvan asetusten säätäminen .....	33
7.3.4	Kappaleen tunnistus ModelFinder-toiminnolla .....	33
7.3.5	Korkeus- ja kulmatieto.....	35
7.3.6	Operaattorinäkyvä .....	37
7.3.7	Tulosten tallennus .....	38
8	JÄRJESTELMÄN KÄYTÄNNÖN TESTAUS .....	39
9	TULOSTEN ANALYSOINTI .....	41
9.1	Testaus kuvasarjalla .....	41
9.2	Testaus fyysisellä kameralla .....	41
9.3	Tulosten toistettavuus ja luotettavuus .....	42
10	YHTEENVETO .....	43
	LÄHTEET .....	44

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on selventää lukijalle prosessia, jonka 3D-kuvantamisjärjestelmän liittäminen osaksi teollisuusautomaatiota vaatii. Työssä tutustutaan kuvantamisen peruselementteihin ja komponentteihin sekä perinteisen 2D-kuvantamisen että 3D-kuvantamisen osalta. Työssä käydään läpi kuvantamisohjelmiston suunnittelun, kappaleen piirteen tunnistuksen sekä kuvan analysoinnin peruseriaatteet. Työssä perehdytään lisäksi eri 3D-kuvantamistekniikoihin, sekä rajapintoihin, joita hyödyntäen ohjelmisto voi kommunikoida tulokset automaatiolaitteille, kuten robotille tai pienoislogiikalle. Työn käytännön osuus koostuu tunnistus- ja paikoitustoiminnoilla varustetun 3D-kuvantamisohjelmiston luomisesta Matrox Design Assistant X -kehitysympäristöllä.

Selkeyden vuoksi kaikkia 3D-kuvantamislaitteita tekniikasta riippumatta kutsutaan tässä työssä 3D-kameroiksi.

Opinnäytetyössä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin.

- Minkälainen 3D-kuvantamistekniikka soveltuu mihinkin kohteisiin?
- Miten 3D-kameraa käytetään Design Assistant sovelluksella?
- Miten etsittävä piirre kannattaa määritellä?
- Millaisessa muodossa tulokset kannattaa esittää, jotta ne ovat helposti hyödynnettävissä?
- Millaisella rajapinnalla tulos voidaan välittää automaatiolle/robotille?

## 2 KONENÄKÖ TEOLLISUUDESSA

Konenäöllä tarkoitetaan sovellusta, jossa ohjelmistosta ja laitteistosta koostuva kokonaisuus ohjaa toimilaitteita perustuen kuvaamiseen ja kuvan analysoimiseen (AIA, n.d.). Tyypillisesti konenäkösovellus koostuu yhdestä tai useammasta kamerasta kytkettynä tietokoneeseen, jossa ohjelmisto analysoi kameroiden tuottaman kuvan ja välittää analyysin tuloksen rajapinnan yli toimilaitteille.

Tyypillisimmät konenäön sovellukset voidaan jakaa seuraaviin kolmeen pääluokkaan: Tarkastus ja laadunvarmistus, ohjaus ja paikoitus sekä mitaus ja metrologia. Tarkastus ja laadunvarmistus sisältää sovellukset, joiden pääasiallisena tehtävänä on varmistaa kohteen oikeanlaisuus yleensä tuotantoprosessin aikana. Tyypillisessä tarkastussovelluksessa kuvataan linjastolla kulkevat tuotteet ja analysoidaan piirteet mahdollisten virheiden löytämiseksi. Mikäli tuotteesta löytyy virhe, lähetetään tästä heräte eteenpäin tuotantolinjalle ja viallinen tuote poistetaan linjastolta. Sovellusesimerkinä pullotuslinjasto, jossa kuvataan jokainen linjastolla kulkeva pullo ja varmistetaan että etiketti on paikallaan sekä korkki kierretty suoraan ja loppuun saakka.

Ohjaus ja paikoitus sisältää sovellukset, joiden pääasiallisena tehtävänä on kohteen löytäminen ja sijaintitiedon välittäminen. Tyypillisessä ohjaussovelluksessa etsitään kappale ja kerrotaan kappaleen koordinaatit ja rotaatio robotille poimintaa tai osan liittämistä varten. Sovellusesimerkinä autotehdas, jossa yksi robotti asettaa hitsattavan kappaleen oikeaan kohtaan auton runkoa ja toinen robotti hitsaa sen paikalleen.

Mittaus ja metrologia sisältää sovellukset, joiden pääasiallinen tarkoitus on kohteen koon varmistaminen tai mittaaminen. Tyypillisessä mittaussovelluksessa selvitetään mittaamalla kappaleen kokoa, muotoa, tai vaihtoehtoisesti mitataan mistä kohtaa kappaletta tulee työstää, jotta siitä tulisi oikean kokoinen. Sovellusesimerkinä teollinen sahalaitos, jossa mitataan linjastolle saapuvan puun pituus ja paksuus, minkä perusteella määritellään kuinka monta 3000 x 100 x 22 mm lautaa puusta voidaan leikata.

## 3 2D-KUVANTAMINEN

2D-kuvantamisessa tuloksena muodostetaan XY-koordinaatistoon kuva, joka sisältää vain korkeus- ja leveystiedon. 2D-kuvantaminen suoritetaan kohteesta riippuen joko matriisikameralla tai viivakameralla.

Matriisikamera on ns. perinteinen kamera, jonka kennolla on tietty määrä valolle herkkiä pikseleitä leveys- ja korkeussuunnassa. Matriisikameralla saadaan kuvattua kokonainen alue yhdellä kerralla, mistä juontuukin matriisikameroista käytettävä englanninkielinen nimitys area scan camera, eli aluekamera. Matriisikamerat soveltuvat sekä paikallaan pysyvien, että liikkuvien kohteiden kuvaamiseen.

Viivakamera, englanniksi line scan camera taas on kamera, jonka kuvakenno on viivamainen, ja lopullinen kuva muodostetaan yhdistämällä kameran ottamat viivat valmiiksi kuvaksi. Viivakamera soveltuu erittäin hyvin nopeatahtiseen liikkuvan kohteen kuvaamiseen, ja sen kanssa voidaan ottaa erittäin suurikokoisia ja tarkkoja kuvia liikkuvista pitkistä tai jatkuvista kohteista. Huonona puolena on kamerajärjestelmän monimutkaisempi rakenne ja viivojen yhdistämisen vaatima tarkka tahdistus.

### 3.1 Harmaasävykuvaus

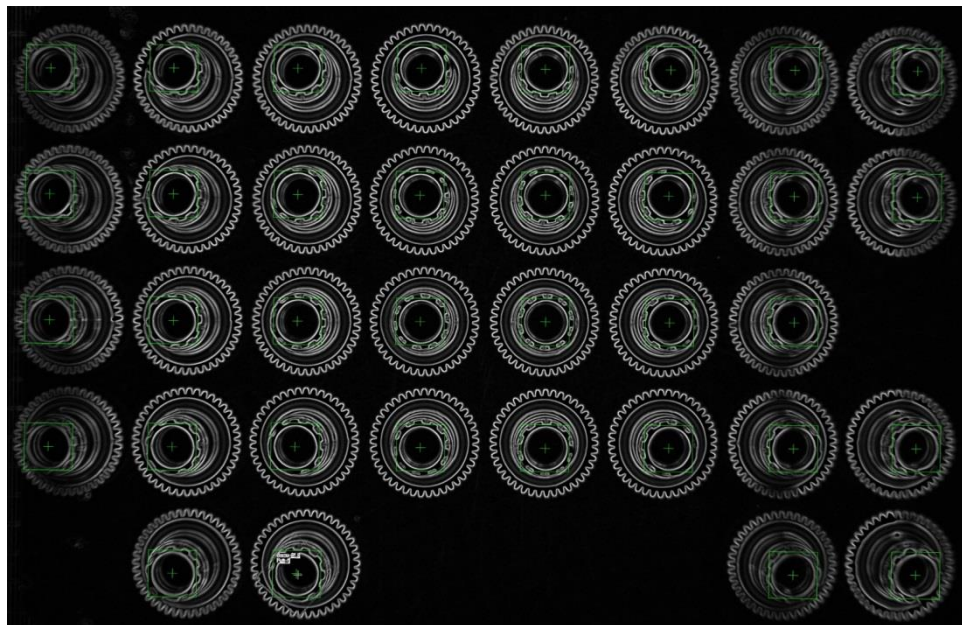
2D-kuvantamisessa piirteitä pyritään tyypillisesti tunnistamaan kontrastin avulla. Kontrasti tarkoittaa kirkkauseroa tumman ja vaalean välillä, ja sen avulla voidaan esimerkiksi tunnistaa kappale sen taustasta, tai tietty piiri kappaleesta. Suurin osa teollisuuden sovelluksista toteutetaan harmaasävykameroilla, jotka pystyvät hyödyntämään käytettävissä olevan valon tehokkaammin kuin värikamerat. Harmaasävykameran kuvassa jokainen yksittäinen pikseli saa kirkkautensa perusteella numeerisen arvon, joka kuvassa vastaa tiettyä harmaan sävyä valkoisen ja mustan välillä. Esimerkiksi 8-bittisessä kuvassa mahdollisia arvoja on 256, 12-bittisessä kuvassa 4095 ja 16-bittisessä kuvassa 65536. Mahdollisten sävyjen määrä voidaan laskea kaavalla  $2^x$ , jossa  $x$ =kuvan bittisyvyys.

Tunnistuksessa kannattaa pyrkiä käyttämään kaikkein helpoiten tunnistettavissa olevaa piirrettä, joka on kappaleelle uniikki, eli sitä ei esiinny muualla kuva-alalla. Kappaleesta tai kuvasta voidaan etsiä esimerkiksi tiettyä muotoa (shape finding), kuviota (pattern recognition) tai geometristä mallia (geometric model finding). Kuvan analysointia voidaan myös helpottaa käsittelemällä kuvia soveltuvalla tavalla kuvantamisohjelmistossa. Hyvin yleinen kuvanmuokkaustekniikka on segmentointi (image segmentation), eli kuvan jakaminen eri osiin analysoinnin helpottamiseksi. Segmentointia käytetään tyypillisesti kohteen erottamiseksi taustasta, jonka suorittamiseksi kaikkein yksinkertaisin metodi on kynnystäminen (thresholding). Kynnystämällä kuva muutetaan harmaasävyisestä binäärisiksi kuvaksi, jossa jokainen pikseli on joko musta tai valkoinen. Kynnys-



tysarvo voidaan asettaa sopivalle kirkkaustasolle, jonka jälkeen ohjelmisto muokkaa kuvan jokaisen pikselin kynnyksärajan perusteella mustaksi tai valkoiseksi. Koska jokainen pikseli on joko musta tai valkoinen, saadaan analysoitavien kappaleiden rajoista terävät ja selkeät, jolloin niitä on helppo hyödyntää esimerkiksi blob-analyysissä, jolla voidaan tehdä tunnistusta ja laskentaa. (Khandare & Isalkar, 2014, s. 441–446)

Alla olevassa esimerkkikuvassa tehdään kappaleentunnistusta kynnyksellä segmentoidusta harmaasävykuvasta Matrox Design Assistant -kehitysympäristössä. Työstetyn metallikappaleen kameraa kohti olevat pinnat ovat heijastavia, jolloin ne saadaan helposti korostettua valon avulla ja kuvaan erinomainen kontrasti. Järjestelmä tunnistaa ja paikoittaa kappaleet keskikohtaa reunustavan hammastuksen perusteella, joka pystytään löytämään muodon etsinnän avulla.



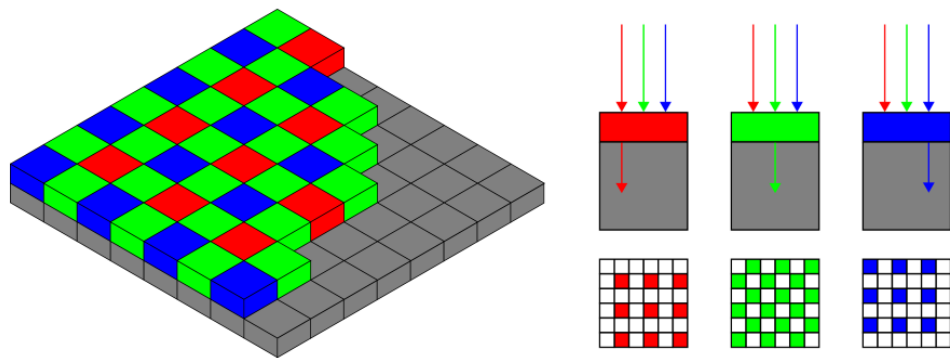
Kuva 1. Kappaleentunnistusta Design Assistant -kehitysympäristössä

### 3.2 Värikuvaus

Värikameroita käytetään yleensä vain rajatuissa tapauksissa silloin, kun eri värien tunnistaminen kuvasta on välttämätöntä, esimerkiksi jos tuotteita pitää lajitella usean värin perusteella. Värikameroiden kuvakennot ovat pohjimmiltaan täysin samalla tekniikalla toteutettu kuin harmaasävykameroidenkin, mutta niissä kennon päälle on asetettu optinen suodin. Yleisin käytössä oleva suodintyyppi on Bayer-suodin, eli päävärisuodin, jonka avulla punaisen, vihreän ja sinisen valon aallonpituudet erotellaan toisistaan. Bayer-suodin aikaansaa sen, että tietty pikseli kennolla on herkkä vain tietylle aallonpituudelle, ja tämän tiedon perusteella pikseleille voidaan laskea tiettyä väriä vastaava arvo. Koska ihmissilmä on herkempi vihreän aallonpituudelle kuin punaisen ja sinisen, on Bayer-

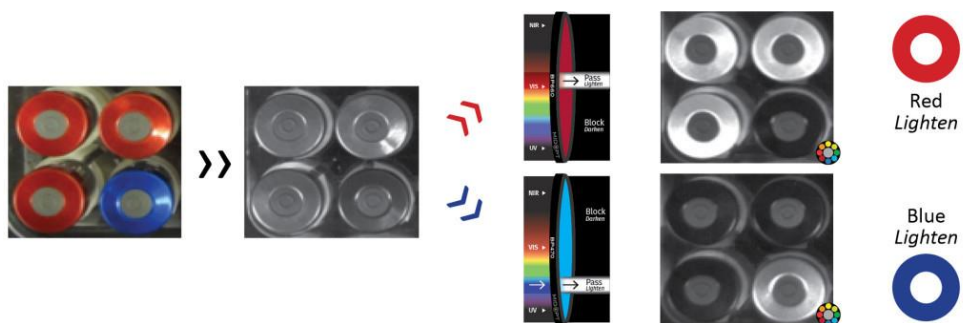
suotimen pikseleistä 50% vihreälle, 25% punaiselle ja 25% siniselle herkkiä. (Basler AG, n.d.)

Toinen yleisesti käytössä oleva suodintyyppi on komplementti-, eli vastavärisuodin, joka on rakenteeltaan samanlainen kuin Bayer-suodin, mutta päävärien sijaan päästökaistat ovat vastaväreille syaani, magenta ja keltainen. Komplementtisuotimen hyvänä puolena on parempi valonläpäisy, Bayer-suodin estää 2/3 näkyvän valon aallonpituuksista jokaiselle pikselille, mutta komplementtisuodin vain 1/3. Huonona puolena taas voidaan pitää komplementtivärien vaatimia päävärien laskemista monimutkaisempia laskutoimituksia väri-informaation laskemiseksi. (Basler AG, n.d.)



Kuva 2. Bayer-suodin ja sen toiminta (Burnett, 2006)

Monissa tapauksissa värin tunnistamiseksi ei tarvita välttämättä värikameraa, vaan tunnistusta voidaan tehdä harmaasävykamerallakin hyödyntämällä kameran optiikkaan asennettavia optisia suotimia tai tietyn aallonpituuden valolähdettä. Käyttämällä sopivaa suodinta, joka läpäisee haluttua aallonpituutta ja estää ei-haluttuja aallonpituuksia voidaan kuvista tehdä tehokkaasti värien erottelua harmaasävykameralla (Midwest Optical Systems, n.d.). Samankaltainen vaikutus voidaan saavuttaa myös käyttämällä tietyn aallonpituuden valoa, joka valaisee tehokkaimmin valon väriset kohteet.

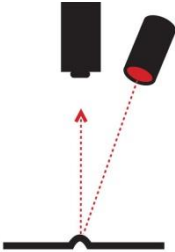
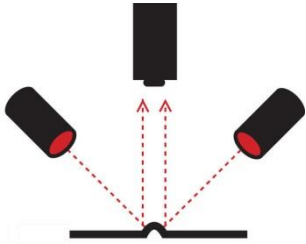
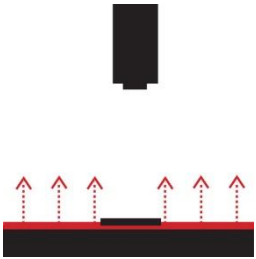


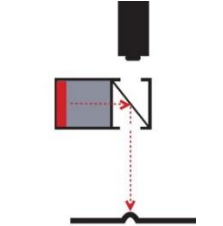
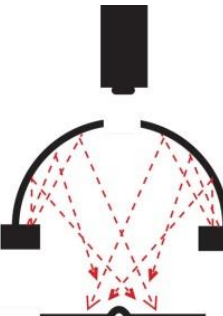
Kuva 3. Värien erottaminen kaistanpäästösuotimella (Midwest Optical Systems, n.d.)

### 3.3 Valaistus

Valaistuksella on 2D-kuvauksessa tärkeä rooli, koska kameran kuvakenno tallentaa kuvan kohteesta kameraan heijastuvan valon perusteella. Kamera tarvitsee selkeän kontrastieron voidakseen tuottaa luotettavia ja toistettavia tuloksia, lähtökohtana riittävälle kontrastille voidaan pitää noin 20 % kirkkauseroa kohteen tumman ja vaalean alueen välillä (OEM Automatic, n.d.). Suunniteltavan valaistuksen tarkoitus on saada kohteeseen mahdollisimman tasaiset valaistusolosuhteet, jolloin kuvantamisen lopputulos ei riipu ympäristön valoisuuden vaihteluista. Valaisua voidaan suorittaa eri tekniikoilla kuvattavasta kohteesta ja etsittävän piirteen tyyppiä riippuen. Yleisiä käytössä olevia valaisutekniikoita ovat suora valo (bright field, direct light), epäsuora valo (dark field, indirect light), taustavalo (back light), aksiaalivalo (axial, co-axial light) ja diffusoitu valo (diffuse light).

Taulukko 1. Valaisutekniikat (OEM Automatic, n.d.)

Valaisutekniikka	Toimintatapa	Kuva
Bright field Suora valo	Valaisu suunnattuna suoraan kuvattavaan kohteeseen. Luo voimakkaan varjon, mutta ei sovellu kiiltäville kohteille voimakkaan heijastuksen takia.	
Dark field Epäsuora valo	Valaisu loivassa kulmassa kuvattavaan kohteeseen. Tuo pinnan virheet ja epäpuhtaudet näkyviin muuttamalla valon heijastuskulmaa.	
Back light Taustavalo	Valaisu kohteen takaa. Yleensä käytetään suuripinta-alaista valaisinta, jonka avulla saadaan kohteesta selkeä siluetti-kuva. Soveltuu erityisen hyvin mittaus- ja paikannussovelluksiin.	

Axial light Aksiaalivalo	Valaisu suoraan kameran kuvaussuunnasta. Kameraan nähden suorassa kulmassa olevan valaisimen valo ohjataan puoliläpäisevän peilin avulla kuvattavaan kohteeseen.	
Diffuse light Diffusoitu valo	Valaisu diffusaattorin avulla/läpi. Valo heijastetaan ja siroutetaan epäsuorasti kohteeseen. Luo kohteeseen tasaisen valon ilman heijastuksia. Soveltuu erityisen hyvin voimakkaasti heijastavien kohteiden kuvaamiseen.	

#### 4 3D-KUVANTAMINEN

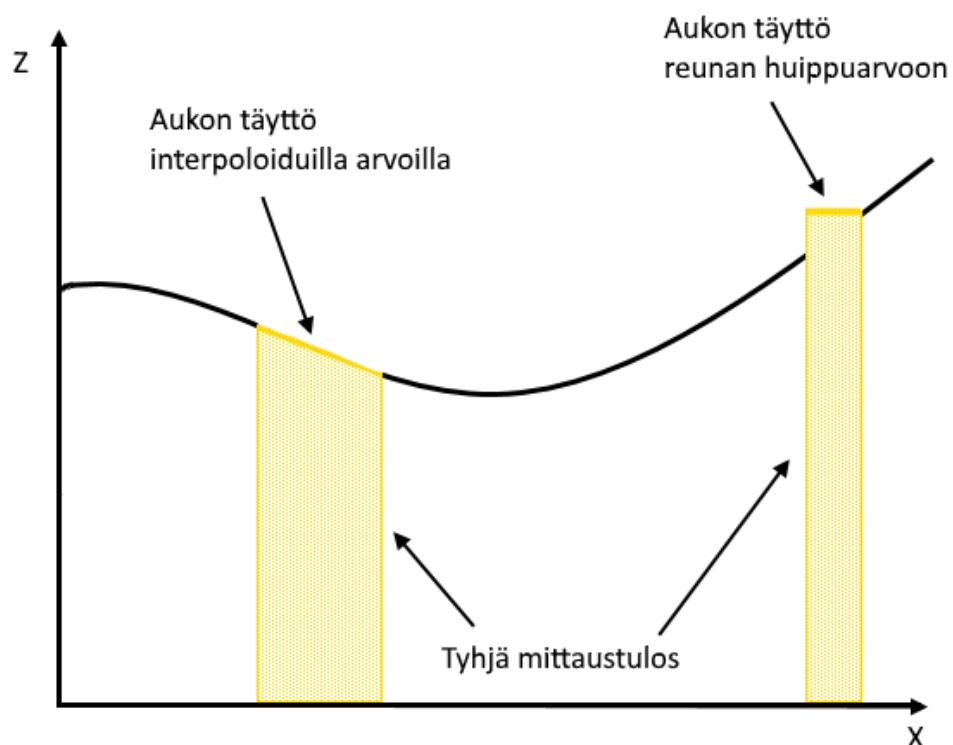
3D-kuvantamisessa kuva tuodaan XY-koordinaatistosta XYZ-koordinaatistoon. Koska kuvassa on leveys- ja korkeustiedon lisäksi mukana myös syvyystieto, voidaan kuvasta tuottaa 3D-malli tai tutkia kohteen ominaisuuksia kolmiulotteisessa avaruudessa. 3D-kuvadataa voidaan välittää ja analysoida useassa eri muodossa. Tyypillisesti käytettäviä 3D- dataformaatteja ovat syvyyskuva (Depth map), josta kalibroituina käytetään myös nimitystä etäisyyskuva (Range map), sekä pistepilvi (Point cloud). Depth map ja Range map ovat 2D-kuvatiedostoja, jotka sisältävät myös syvyystiedon ja 3D-geometrian. Kuvat voidaan säilöä ja käsitellä samoin kuin 2D-kuva, mutta 3D-tieto voidaan tarvittaessa saada kuvasta käytettäväksi. Point cloud taas ei ole varsinainen kuvatiedosto, vaan tietokantatiedosto.

Taulukko 2. 3D-dataformaatteja ja niiden ominaisuuksia (Basler AG, 2018, s. 52–53)

Dataformaatti	Muu nimitys	Tiedoston sisältö	Tiedostomuoto
Depth map	Syvyyskuva, Z-map, kalibroituina käytetään myös nimeä Range Map, etäisyyskuva	16/32-bittinen kuva, joka sisältää etäisyystiedon tarkastelupisteestä mitattavaan pisteeseen pikseliarvona (kalibroimaton) tai reaaliaikailman yksiköissä (kalibroitu)	Kuvatiedosto, esim. BMP, PNG tai TIFF
Confidence map	Konfidenssi-kuva, consistency map	Harmaasävykuva, joka kuvastaa mitattujen z-akselin arvojen arvioitua luotettavuutta mittaamalla lähetetyn ja takaisin heijastuneen valon eroavaisuuksia, mitä kirkkaampi pikseli, sitä luotettavampi mittaustulos	Kuvatiedosto, esim. BMP, PNG tai TIFF
Intensity image	Intensiteetti-kuva	Harmaasävykuva, joka kuvastaa mitatun kohteen takaisin heijastaman valon kirkkautta	Kuvatiedosto, esim. BMP, PNG tai TIFF
Point cloud	Pistepilvi	Tietokanta pisteiden koordinaateista kolmiulotteisessa avaruudessa joko pikseliarvoina (kalibroimaton) tai reaaliaikailman yksiköissä (kalibroitu)	Taulukkotiedosto, esim. ASCII, CSV tai data array

Kuvia ja niiden parametreja voidaan muokata haluttuun suuntaan kuvausvaiheessa rajaamalla kuvattavaa aluetta (region of interest, ROI), jotta halutut piirteet saadaan paremmin esiin. Jos tarkoitus on mitata millimetrin osien luokkaa olevia eroavaisuuksia kohteen pinnasta, ei tarkastelun kohteeksi tulevassa kuvassa välttämättä ole tarvetta saada koko kappaleen syvyystietaoa, saati kappaletta kuljettavaa linjaston pintaa esiin. Samoin kuin 2D-kuvantamisessa, myös 3D-kuvantamisessa kuvantamisohjelmistot sisältävät ominaisuuksia kuvien muokkaamiseen analysoinnin helpottamiseksi. Kuvasta on ohjelmallisesti mahdollista poistaa tyhjiä tai virheellisiä arvoja, kuten heijastumien ja esteiden aiheuttamia virhemittauksia.

Virheelliset arvot on mahdollista korvata joko määrättyyn tasoon asetetuilla arvoilla esimerkiksi täyttämällä koko aukko korkeimman tai matalimman reunan arvolla, tai interpoloida aukon kohtaan arvot viereisten pikselien arvojen perusteella. ROI-rajauksen x, y ja z-akseleille voi suorittaa myös jälkikäteen ohjelmistossa, tai kuvia voidaan käsittelyvaiheessa värittää korkeuserojen helpompaa visuaalista erottamista varten (faux coloring). 3D-kuvatiedostoja on myös mahdollista segmentoida z-akselilla analysointia varten samoin periaattein kuin 2D-kuvia. 3D-kuvan z-suuntaisen kynnyksen raja-arvo määritetään tiettyyn syvyyteen, jonka kohdalla kynnyksen ylittävät arvot säädetään tiettyyn arvoon ja alittavat arvot nollataan. (Matrox Imaging, 2019, s. 13)



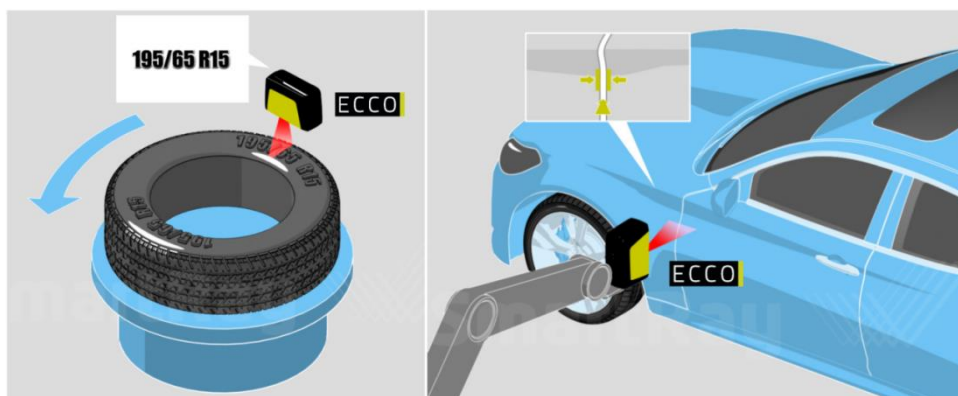
Kuva 4. Virheellisten mittaustulosten täytön toimintaperiaatteen kuvaus

## 4.1 Käyttökohteet teollisuudessa

3D-kuvantamiselle on helppo keksiä useitakin potentiaalisia käyttökohteita teollisuuslaitteiden automatisoinnissa. Niillä voidaan suorittaa hyvin pitkälle samoja toimia kuin perinteisillä kameroillakin, mutta kolmas ulottuvuus tuo sovelluksiin uusia mahdollisuuksia.

### 4.1.1 Laadunvarmistus ja tarkastussovellukset

3D-kamera antaa uusia mahdollisuuksia laadunvarmistussovelluksiin. Useat 3D-kamerat pystyvät tuottamaan samalla kertaa sekä 2D-kuvan että 3D-mallin kohteesta. Tämä mahdollistaa sen, että kuvaa voidaan analysoida sopivilta osin perinteisillä ja tutummilla 2D-kuvan analysointitekniikoilla, ja lisäksi tarkastukseen voidaan ottaa mukaan esimerkiksi kohteen pinnan muotojen tarkastus. 3D-tekniikka on käyttökelpoinen myös moniin kohteisiin, joissa perinteisellä kameratekniikalla tarkastaminen on ollut haasteellista. 3D-kameralla voidaan esimerkiksi tarkistaa auton renkaan painettujen kylkimerkintöjen oikeellisuus tai auton paneelien sovitus koriin tuotantoprosessin aikana (SmartRay GmbH, 2015).



Kuva 5. Renkaan kylkimerkintöjen ja paneelien sovituksen tarkastus, konseptikuva (SmartRay GmbH, 2015)

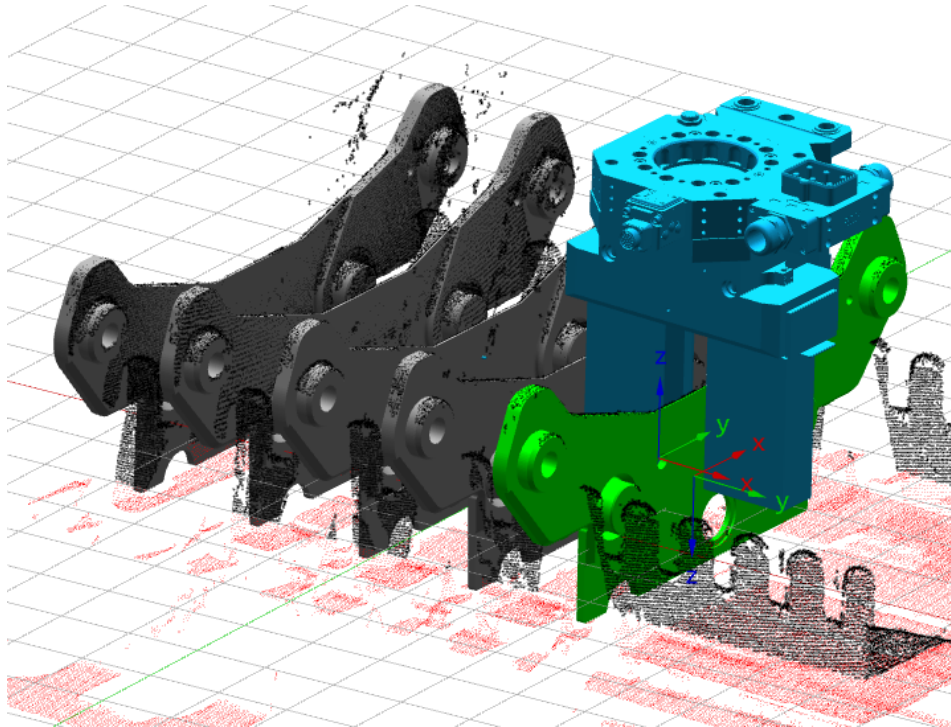
### 4.1.2 Paikoitus ja robottiohjaus

Poiminta- tai kokoonpanorobottien ohjausta on tehty ja pystyy edelleenkin tekemään myös 2D-kameralla, mutta 3D-kameran käyttäminen tuo tähän aivan uusia mahdollisuuksia. 3D-anturi pystyy tunnistamaan kappaleen ja sen asennon kolmiulotteisesti, jolloin se pystyy kehittyneimmissä random bin picking -sovelluksissa tunnistamaan poimittavat kappaleet korista 3D-mallin perusteella, ja kertomaan robotille minkä kappaleen se poimii mistäkin kohdasta ja millä lähestymisvektorilla. (Kratky, 2018)

3D-kameralla voidaan myös esimerkiksi ohjata robottia siirtämään kappaleita lavalta pakkaukseen. Kun lava on tuotu purkupaikalle kuvaa 3D-kamera alueen, paikantaa kappaleet ja toimittaa robotille koordinaatit



mistä se löytää lähimpänä sijaitsevan kappaleen kiinniottokohdan poimintaa varten (Lateral Engine Oy, 2018).



Kuva 6. Kappaleen paikoitus robotin tarttujalle R3DVi-ohjelmistossa (Lateral Engine Oy, 2018)

#### 4.1.3 Kartoitus

3D-kameralla on mahdollista suorittaa niin kappaleiden kuin tilojen kolmiulotteista kartoitusta (eng. mapping). Kartoituksen avulla voidaan esimerkiksi suunnitella laitteistojen asennusta tiloihin, tai luoda alueesta, kuten sairaalan sisätiloista, kolmiulotteinen kartta autonomisesti liikkuvaa robottia varten (Photoneo, n.d.). Tarkalla 3D-kameralla voidaan myös tehdä kappaleiden takaisinmallinnusta (eng. reverse engineerig), tai luoda 3D CAD-malleja kappaleista suunnittelutyössä hyödynnettäväksi (SmartRay GmbH, n.d.).

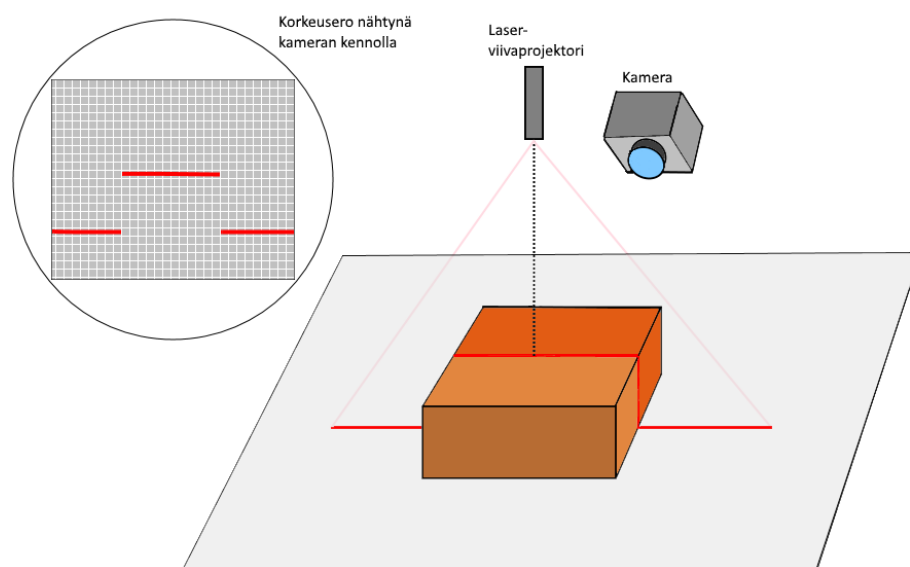
#### 4.2 Yleisimpiä tekniikoita

3D-kuvantamisessa käytetään useita eri tekniikoita syvyyssiedon lukemiseksi kuvattavasta kohteesta. Yhteistä yleisimmille käytössä oleville tekniikoille on niiden perustuminen erityisesti tarkoitukseen soveltuvan valonlähteen käyttöön yhdessä erillisen kameran tai laitteeseen integroidun kuvakennon kanssa muotojen kuvaamiseksi.



#### 4.2.1 Lasertriangulaatio

Lasertriangulaatio on 3D-kuvantamistekniikka, joka hyödyntää kameraa tai kamerakennoa ja siihen nähden eri kulmasta tulevaa lasersädettä pinnanmuotojen havainnoimiseksi. Vanhin ja yleisin tapa suorittaa lasertriangulaatiomittauksia on heijastaa yksittäinen viiva kappaleen päälle. Kameran kuvakenno rekisteröi lasersäteen, joka sijoittuu eri kohtaan kennoa kuvattavan kohdan syvyyden mukaan. Kuvattavan kohteen z-akselin suuntainen syvyytieto saadaan kalibroidussa järjestelmässä laskettua tästä erotuksesta. Lasertriangulaatiossa joko kohteen tai lasersäteen on liikuttava, jotta kohde saadaan kokonaan skannattua. Tästä syystä tekniikka soveltuukin erittäin hyvin mm. tuotantolinjalla tapahtuvaan tarkastamiseen. Jotta kuvattavan kohteen mittasuhteet säilyvät oikeina, tulee kuvantaminen tahdistaa kappaleen liikkeen kanssa. (Latimer, W. 2015)

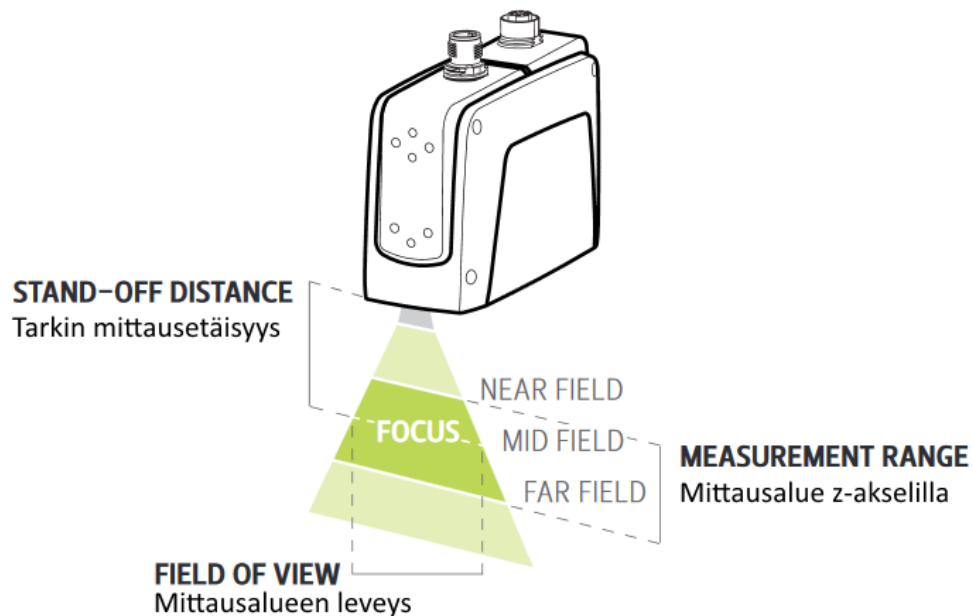


Kuva 7. Lasertriangulaation toimintaperiaate

Lasertriangulaatio on erittäin luotettava ja tarkka mittaustekniikka lyhyillä etäisyyksillä, tarjoten jopa alle mikrometriin yltävää mittatarkkuutta z-akselilla. Mittatarkkuus riippuu mittausalueen koosta, pienempi mittausalue antaa suuremman tarkkuuden ja suuremmalla alueella tarkkuus heikkenee. Mittalaitte kalibroidaan aina tietyn kokoiselle mittausalueelle, ja mittauks tulokset ovat tarkkoja tällä alueella. Tarkin mittausetäisyys merkitään laitteiden datalehtiin yleensä stand-off distance -termillä. Käytettävää mittalaitetta valitessa tulee kiinnittää huomiota mitattavan kappaleen paksuuteen sekä tavoiteltavaan mittatarkkuuteen.

Mittausaluetta z-akselin suunnassa määrittäviä rajoja kutsutaan yleensä englannin kielisillä termeillä near field, mid field ja far field, jotka tarkoittavat järjestyksessä etäisyyttä mittalaitteesta mittausalueen alkupisteeseen, sen keskikohtaan ja päättymispisteeseen. Mittausalueen leveys-

suuntaista kokoa kutsutaan termillä field of view (FOV). On hyvä huomata, että mittausalueen leveys voi muuttua sen eri korkeuksilla, etenkin integroituja skannereita käytettäessä. Mittaustarkkuus vaihtelee myös mittausalueen sisällä, mitä lähempänä mid fieldin keskikohtaa ollaan, sitä tarkempia tulokset ovat, ja mittausalueen reunoja lähestyttäessä tulosten tarkkuus alkaa heikkenemään. (SmartRay GmbH, n.d.)

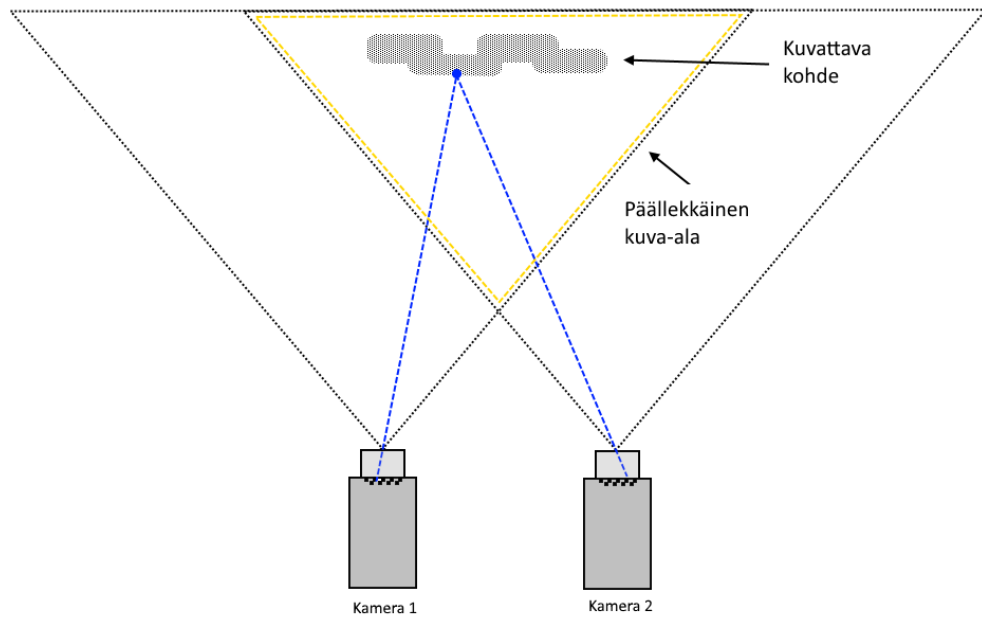


Kuva 8. SmartRay ECCO 3D-kameran mittausalue (SmartRay GmbH, 2018)

#### 4.2.2 Stereokuvaus

Stereokuvauslaite koostuu kahdesta kamerasta, jotka on sijoitettu rinnakkain kuvaamaan samansuuntaisesti. Kameroiden kuva-alan päällekkäin menevällä alueella olevat kohteet näkyvät molemmissa kameroissa, mutta eri kohdalla kennoa. Koska kameroiden välinen etäisyys on tunnettu, pystytään mitattavan pisteen syvyys laskemaan pisteen sijainnin poikkeamasta kameroiden kennoilla. Stereokuvaustekniikan rajoitteena voidaan pitää sen etäisyyden mukaan heikkenevää tarkkuutta, sekä stereovastaavuuden ongelmaa, eli kykenemättömyyttä tunnistaa etsittävää pistettä molempien kameroiden kuvista. (Marshall, D. 1994)

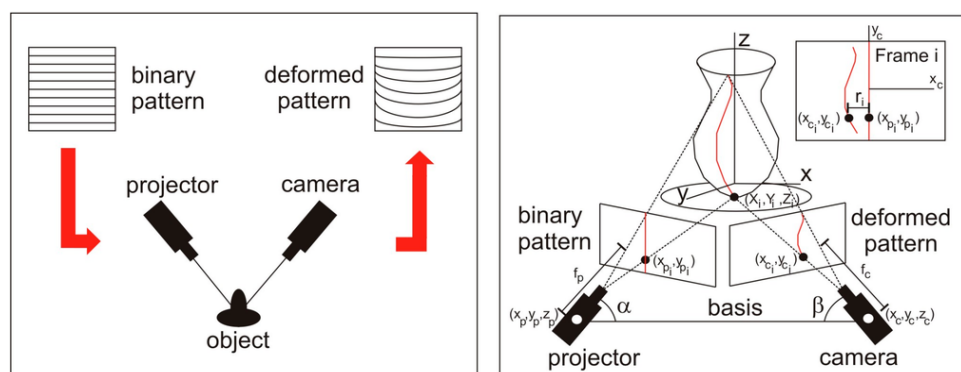
Koska stereokuvauksessa hyödynnetään kuviontunnistusta vastaavuuk-sien löytämiseksi, sekä trigonometristä laskentaa syvyytiedon laske-miseksi, vaatii se suhteellisen raskasta laskentaa eikä sen takia sovellu kovin hyvin reaaliaikaisiin sovelluksiin. Stereokuvauksen vaatima kuvion-tunnistus ei myöskään toimi homogeenisten pintojen kanssa, mikä rajoit-taa tekniikan käyttökohteita. (Bartels, 2016a, s.3)



Kuva 9. Stereokuvauksen toimintaperiaate

#### 4.2.3 Strukturoitu valo

Strukturoidun valon kuvantamistekniikka hyödyntää kohteen pintaan projisoitavaa valokuvioita pinnanmuotojen tunnistamiseen. Pinnalle heijastettavan valokuvion muoto vääristyy pinnanmuotojen vaihtelun mukaan, kuvio kuvataan kameralla ja saadusta kuvasta voidaan rakentaa pinnan 3D-malli. Heijastettavana kuviona voidaan käyttää monia erityyppisiä valokuvioita, yleisimmistä mainittakoon pistematriisi, ruudukko sekä viivoitus. (Buchón-Moragues ym., 2016, s. 3)

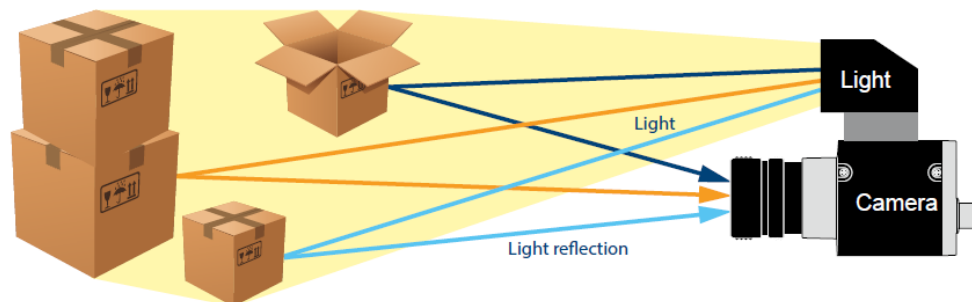


Kuva 10. Strukturoidun valon kuvantamistekniikan toimintaperiaate (Buchón-Moragues ym., 2016, s. 3)

#### 4.2.4 Time-of-Flight, ToF

ToF-kuvantamisen toimintaperiaatteena on lähettää infrapunavalopulsseja kameran kanssa samansuuntaisesta valolähteestä, ja mitata aika, joka infrapunasäteen lähettämisestä kuluu sen heijastumiseen takaisin kuvakennolle. ToF-kameratekniikan hyvinä puolina on tekniikan yksinkertaisuus verrattuna muihin 3D-kuvantamistekniikoihin, sekä mahdollisuus integroida infrapunavalolähde ja kuvakenno kompaktiin koteloon. ToF-kameralla voidaan saada kohteesta samanaikaisesti harmaasävyinen 2D-kuva sekä 3D-informaatio yhdellä kuvauksella.

Koska ToF-tekniikka perustuu ihmissilmälle näkymättömään infrapunavaaloon, ei sen käyttäminen häiritse kuvantamisalueella oleskelevia ihmisiä. Tekniikan huonona puolena on bright field -tyyppisen valolähteen aiheuttama herkkyys heijastuksille kirkkaista pinoista, sekä muiden mahdollisten infrapunasäteilylähteiden, kuten auringonvalon, aiheuttamat häiriöt. ToF-tekniikka ei sovellu erittäin suurta syvyysuuntaista mittatarkkuutta vaativiin sovelluksiin, vaan sen mittatarkkuus z-akselilla on noin 1 cm luokkaa. Vastaavasti ToF-tekniikka on käyttökelpoista noin 1-10 m etäisyydellä kamerasta, minkä ansiosta se soveltuu hyvin esimerkiksi automaattisten tai autonomisten ajoneuvojen ohjaukseen. (Bartels, 2016b, s. 4)



Kuva 11. ToF-kuvantamistekniikan toimintaperiaate (Bartels, 2016b, s. 2)

## 5 RAJAPINNAT

Kuvantamisjärjestelmän on toimiakseen onnistuttava neljässä perustehävässä; kameran löytämisessä, kameran konfiguroinnissa, kuvadatan välittämisessä sekä kameran ja isäntälaitteen välisten signaalien välittämisessä (AIA, EMVA, JIIA, CMVU & VDMA. 2018, s. 4).

Teollisen kuvantamisen laitteita valmistavat yritykset ovat tehneet jo pidemmän aikaa yhteistyötä luodakseen teolliset standardit kameroiden rajapinnoille ja käyttämiselle. Tärkeimmät järjestöt alalla ovat amerikkalaislähtöinen AIA, eurooppalainen EMVA ja japanilainen JIIA, jotka ovat yhdessä laitevalmistajien kanssa luoneet teollisuuskameroille yhteiset liittämistärajapintojen (Camera Interface Standard) ja ohjelmistorajapintojen standardit (Software Interface Standard). Yhtenäiset rajapinnat ovat sekä käyttäjien että valmistajien etu, sillä ne mahdollistavat joustavat valinnat kuvantamislaitteita hankkiessa. Kameroiden liittämisen määrittävät standardit varmistavat, että kaikki standardia noudattavat komponentit toimivat saumattomasti yhteen (AIA ym. 2018, s. 4).

### 5.1 Standardisointijärjestöt

AIA, jonka nimi tulee aiemman Automated Imaging Association nimen lyhenteestä, on vuonna 1984 perustettu järjestö, jonka toiminnan tarkoitus on edesauttaa kuvantamistekniikoiden ymmärrystä ja hyödyntämistä. AIA:lla on nykyään 360 jäsentä 32 maasta, joiden joukossa on niin kuvantamislaitteiden valmistajia ja käyttäjiä kuin tutkimuslaitoksia ja korkeakoulujakin. AIA:n ydintoimintoja ovat kuvantamisen teollisten standardien kehittäminen, alan markkinatutkimus sekä erilaisten tapahtumien ja koulutusten järjestäminen. Tärkeimmät AIA:n hallinnoimat standardit ovat rajapintastandardit USB3 Vision, GigE Vision, Camera Link sekä Camera Link HS. (AIA, n.d.)

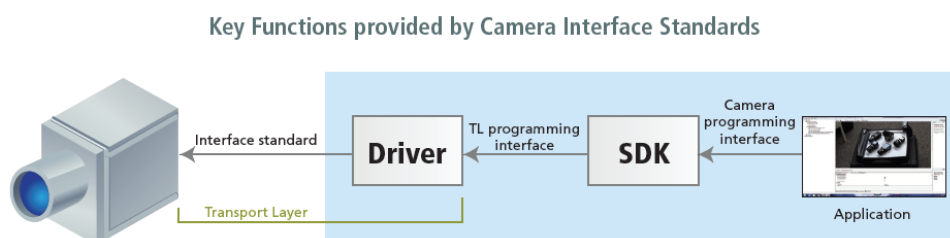
EMVA (European Machine Vision Association), on eurooppalaisten kuvantamislaittevalmistajien vuonna 2003 perustama yhdistys. Yhdistyksen päämäärät ovat yhteneväiset AIA:n kanssa, edistää teollisen kuvantamisen teknologioiden kehitystä koko Euroopan laajuisesti, järjestää koulutuksia, kehittää alan standardeja ja tuottaa markkinadataa jäsenorganisaatioille. EMVA:n jäseneksi voi liittyä mikä tahansa organisaatio, joka on tekemisissä kuvantamisteknologian kanssa. Tärkeimmät EMVA:n hallinnoimat standardit ovat kuvanlaadun mittaamisen standardi EMVA 1288 sekä GenICam ohjelmointirajapinta. (EMVA, n.d.)

JIIA (Japan Industrial Imaging Association) perustettiin vuonna 2006 japanilaisten kamera- ja komponenttivalmistajien toimesta täyttämään samanlaista tarvetta Japanissa kuin AIA ja EMVA täyttävät omilla alueillaan (JIIA, n.d.). Teollisen kuvantamisen standardeista JIIA hallinnoi CoaXpress-

rajapintastandardia, IIDC2 ohjelmointirajapintaa sekä joitain optisten kiinnikkeiden standardeja. (JIA, n.d.)

## 5.2 Liitäntärajapinnat

Kameroiden liitäntärajapintojen standardit koostuvat kahdesta ohjelmistotasosta ja fyysisen liitännän standardista. Ohjelmistotasosta ensimmäinen on kuljetustaso (Transport Layer, TL), joka huolehtii kameran löytämisestä ja rekistereihin pääsystä sekä kuvadatan ja signaalien kuljettamisesta. Toinen ohjelmistotaso on kuvantamiskirjasto (Image Acquisition Library), joka kuuluu osaksi ohjelmistokehitysalustaa (Software Development Kit, SDK) joka tarjoaa sovellusohjelmistorajapinnat (sovellusliittymä, Application Programming Interface, API) sovellusten kehittämiseen. Sovellusliittymä mahdollistaa useiden sovellusten kommunikoida toistensa kanssa ja siirtää tietoa välillään. Ohjelmistokehitysalusta käyttää hyväkseen kuljetustasoa kuvadatan siirtämisessä laitteelta tietokoneelle käsiteltäväksi. Fyysisen liitännän standardi puolestaan määrittää kuvantamislaitteen ja isäntäkoneen välisen tiedonsiirtoväylän ja liitännät. (AIA ym. 2018, s.5)



Kuva 12. Rajapintastandardien toimintaperiaate (AIA ym. 2018, s.5)

### 5.2.1 Camera Link

Camera Link -standardin ensimmäinen versio julkaistiin jo vuonna 2000. Standardi määrittää koko rajapinnan ja tiedonsiirtoväylän kaapeleita ja liittimiä myöten kameran ja erillisen kuvankaappauskortin (Frame Grabber) välillä. Camera Link mahdollistaa täydessä konfiguraatiossa 850 MB/s tiedonsiirtonopeuden kameran ja kuvankaappauskortin välillä, ja se onkin ollut aiemmin erittäin suosittu rajapinta suurta nopeutta vaativassa kuvauksessa. (AIA ym. 2018, s. 5)

### 5.2.2 Camera Link HS

Camera Link HS on vuonna 2012 julkaistu kehitysversio alkuperäisestä Camera Link -standardista. Se suoraviivaistaa järjestelmän rakennetta mahdollistamalla edullisten, yleisesti saatavilla olevien optisten kaapeleiden käyttämisen järjestelmässä, tarjoten samalla mahdollisuuden aiem-

paa suurempiin kaapelipituuksiin. Camera Link HS mahdollistaa parhaimmillaan jopa 8400 MB/s tiedonsiirtonopeuden kameran ja kuvankaappauskortin välillä. (AIA ym. 2018, s. 6)

### 5.2.3 CoaXPress

CoaXpress (lyh. CXP) on vuonna 2010 julkaistu, erityisesti huippunopeille kameroille suunnattu standardi. CXP käyttää yhtä tai useampaa koaksiaalikaapelia tiedonsiirrossa kameran ja kuvankaappauskortin (Frame Grabber) välillä, ja pystyy samalla toimittamaan 13 W tehonsyötön sekä reaaliaikaisen liipaisusignaalin kameralle. CoaXPressin maksimi kaapelipituus riippuu tavoiteltavasta tiedonsiirtonopeudesta, ja se vaihtelee 85 metristä (CXP-3 / 300MB/s) 25 metriin (CXP-12 / 1200 MB/s). CXP tukee linkkiagregaatia, mikä mahdollistaa maksimissaan kuuden kaapelin käyttämisen kuvadatansiirtoon. Tällainen 6x CXP-12 kokoonpano pystyy saavuttamaan maksimissaan 7200 MB/s tiedonsiirtonopeuden. (AIA ym. 2018, s. 7)

### 5.2.4 GigE Vision

GigE Vision on erittäin laajasti käytetty, jo vuonna 2006 julkaistu standardi, joka käyttää siirtoväylänä Ethernet-standardin (IEEE 802.3) mukaisia tiedonsiirtoväyliä. Määrittäminen sisältää 1 Gbps Ethernetin (1 GigE) lisäksi myös 2,5 GigE, 5 GigE, 10 GigE sekä WiFi-standardien yli tapahtuvan kuvansiirron. Fyysisenä liitännänä voi olla CAT5e/CAT6/CAT7 Ethernet-kaapeli RJ45-, M12- tai IX-liittimellä, optinen Multimode/Singlemode -kuitukaapeli SFP-liittimellä tai lyhyt Twinax-kaapeli (Direct Attach SFP+). Kaapelipituus ylittää kuparikaapeleilla 100 metriin ja kuitukaapeleilla jopa viiteen kilometriin.

GigE Visionin tarjoama tehollinen tiedonsiirtonopeus vaihtelee käytetyn tekniikan mukaan 1 GigE:n 115 MB/s:n ja 10 GigE:n 1100 MB/s:n välillä. Standardi sisältää myös määrittäykset verkon yli tapahtuvalle liipaisulle (Action Commands), PoE-virransyötölle (Power-over-Ethernet) sekä laitteiden aikasykronoinnille PTP-protokollaa käyttäen (IEEE 1588, Precision Time Protocol). (AIA ym. 2018, s. 8)

### 5.2.5 USB3 Vision

USB3 Vision standardi määrittää tavanomaisten USB 3.0 sekä USB 3.1 Gen. 2 liitännöiden käyttämistä teollisuuskameran rajapintana. Standardin mukainen fyysinen liitäntä kameran päässä on ruuvilukitteinen USB3 micro-B-liitin ja tietokoneen päässä normaalikokoinen USB3 Standard-A-liitin. Standardi sisältää myös mahdollisuuden käyttää ruuvilukitteisiä Type-C-liittimiä molemmissa päissä. Virransyöttö kameralle tapahtuu USB-portin kautta samalla kaapelilla kuin datansiirto.

Tehollinen tiedonsiirtonopeus vaihtelee käytetyn tekniikan mukaan USB 3.0:n 400 MB/s:n ja USB 3.1 Gen.2:n 20 GB/s välillä. Kaapelipituus yltää tavallista USB3-passiivikaapelia käyttäessä noin 5 metriin, aktiivikaapeilla käyttökelpoista pituutta voidaan lisätä yli 8 metriin. Tiedonsiirtoväylänä voidaan käyttää myös Multimode-valokuitua, jolloin kaapelipituus voi olla jopa 100 metriä. (AIA ym. 2018, s. 9)

### 5.3 Ohjelmistorajapinnat

Siinä missä liitäntärajapintastandardien tehtävä on taata laitetason yhteensopivuus, on ohjelmistorajapintastandardien tehtävä varmistavaa, että kuvantamislaitteita voidaan käyttää ongelmitta eri kehitystyökalujen ja ohjelmistojen kanssa. Standardit varmistavat yhteensopivuuden ja osaltaan helpottavat kehittäjien työtä, sallien eri laitteiden käyttämisen kehitetyn sovelluksen kanssa vain vähäisillä muutoksilla sovellukseen. (AIA ym. 2018, s.4)

#### 5.3.1 IIDC2

IIDC2-ohjelmistorajapintastandardi perustuu kameroiden rekisteriavainten yhtenäistämiseen. Standardi määrittelee rekisterinkäsittelytavan jokaisen kamerasiirtonopeuden säätämiseksi, mahdollistaen täten kamerasiirtonopeuden hallinnan kirjoittamalla ja lukemalla rekistereitä suoraan kamerasiirtonopeuden sisästä. IIDC2 pyrkii tarjoamaan helposti implementoitavan ohjelmistorajapinnan nykyisille ja tuleville liitäntärajapinnoille. Rajapinta on myös sovitettavissa yhteen GenICam ohjelmistorajapinnan kanssa jopa sellaisia laitteita käyttäessä, jotka eivät sisällä GenICam-standardin itsekuvailevia XML-tiedostoja. (AIA ym. 2018, s. 12; JIIA, 2019, s. 27)

#### 5.3.2 GenICam

GenICam (Generic Interface for Cameras) -ohjelmistorajapintastandardi soveltuu käytettäväksi minkälaisien kuvantamislaitteiden kanssa tahansa. Standardi sisältää useita moduuleita, jotka mahdollistavat sovellusohjelmistorajapinnan pysyvän identtisenä riippumatta siitä millaista liitäntärajapintaa laite käyttää tai mitä ominaisuuksia siinä on käytettävissä. (AIA ym. 2018, s. 13)

GenICam-standardi koostuu seuraavista osista, joita standardissa kutsutaan moduuleiksi

- SFNC (Standard Features Naming Convention) sisältää määrittelyn sille, millä nimillä laitteen tarjoamia ominaisuuksia kutsutaan, ja miten niiden toiminnallisuutta säädellään. Tämä varmistaa sen, että sama asetusta näkyy samanlaisena ja toimii samalla tavalla jokaisessa standardia tukevassa laitteessa. Alastandardi PFCN (Pixel Format Naming Convention) sisältää vastaavat määrittelyt kuvan pikseliformaatin määrittelyille.



- GenAPI (Generic Application Programming Interface) määrittää kamerasta ladattavien itsekuvailevien XML-tiedostojen käyttötavan. GenICam-kameroiden toimintatapaan kuuluu, että ensimmäistä kertaa kameran kytkiessä isäntälaitte lataa kamerasta XML-muotoisen tiedoston, joka sisältää kameran itsensä antaman listauksen käytävissä olevista ominaisuuksista.
- GentL (Generic Transport Layer) on alemman tason rajapinta, joka määrittää kuljetustason ohjelmointirajapinnan liitántärajapinnasta riippumatta. GenTL toimii sekä kuvankaappauskorttia vaativien, että suoraan tietokoneeseen kytkettävien liitántärajapintojen kanssa.
- GenCP (Generic Control Protocol) on alemman tason standardi, joka määrittää laitteen ohjausprotokollien kuljetusformaatin, minkä ansiosta eri liitántärajapinnoille ei tarvitse kehittää omia ohjausprotokollia.
- GenDC (Generic Data Container) on alemman tason standardi, joka määrittää datansiirron formaatin, ja mahdollistaa laitteiden lähettää minkä tahansa muotoista dataa isäntälaitteelle minkä tahansa liitántärajapinnan yli.

#### 5.4 Valmistajakohtaiset rajapinnat

Useat, etenkin 3D-kameroita valmistavat yritykset käyttävät omia rajapintojaan laitteidensa kanssa, eivätkä laitteet ole yhteensopivia kuvantamislaitteiden olemassa olevien teollisten standardien kanssa. Hyvin usein fyysisenä liitántärajapintana on gigabitin Ethernet-verkkoliitäntä, jota pitkin kommunikointi isäntälaitteen ja kuvantamislaitteen välillä tapahtuu IP-pohjaisena TCP- tai UDP-liikenteenä valmistajan tarjoamaa ajuria hyödyntäen. Laittevalmistaja tarjoaa joko kokonaisen ohjelmistokehitysympäristön (SDK) tai vähintään sovellusohjelmointirajapinnan (API) jonka avulla asiakkaan oma sovellus pystyy hyödyntämään kuvantamislaitetta.

Valmistajakohtaisten rajapintojen negatiivinen puoli verrattuna teollisiin rajapintastandardeihin on niiden rajoitettu yhteensopivuus. Laittevalmistajan on mahdollista tarjota ajurituki myös kolmannen osapuolen ohjelmistoille, kuten Matrox Design Assistantin tyyppiselle kehitysympäristölle. Yhteensopivuuden rakentaminen on kuitenkin työlästä, sillä se vaatii työtä sekä laitevalmistajalta että ohjelmistotoimittajalta, koska rajapintayhteensopivuus on rakennettava erikseen jokaiselle kolmannen osapuolen ohjelmistolle.

#### 5.5 Teollisuuslaitteiden rajapinnat

Teollisuuden automaatio- ja robottilaitteille on olemassa sekä teollisia rajapintastandardeja että valmistajakohtaisia rajapintoja. Rajapintoja käsitellessä tulee huomata eriyttää fyysinen rajapinta ja kommunikaatioprotokolla toisistaan. Kommunikaatio voi tapahtua jonkun yleiskäyttöisen ra-

japinnan, kuten Ethernetin tai sarjaliitännän yli, mutta yhteyden protokolla ja muoto voi olla joku useista vaihtoehdoista. (Miclot, 2012 s. 4)

Nykyään erittäin laajasti käytetty fyysinen rajapinta teollisuuslaitteiden ohjauksessa on Ethernet. Ethernet-verkon yli on mahdollista kommunikoida useiden eri protokollien avulla, kuten EtherNet/IP, EtherCat, Modbus TCP ja Profinet. Kommunikointi verkossa tapahtuu IP-pohjaisena TCP/UDP-liikenteenä, jonka ansiosta siihen voidaan hyödyntää olemassa olevaa lähiverkkoa. Ethernet-liitäntää käyttävät myös monet modernit robottikontrollerit, joskin varsinainen kommunikointi tapahtuu usein robottitoimittajan omaa protokollaa käyttäen. Tällaisessa tapauksessa käytettävästä ohjelmistosta tulee löytyä tuki kaivatulle ohjausprotokollalle. Ethernet-verkon hyötyjä ovat erityisesti sen yleiskäyttöisyys ja tuttuus, pitkät kaapelipituudet ja edulliset laitekustannukset. (Bouchard, 2014; Miclot, 2012, s. 2)

Ohjausta ja kommunikointia voidaan suorittaa myös muiden liitäntärajoitusten yli. Teollisuuden automaatiolaitteissa käytössä on usein RS-232 sarjaliitettä tai muita soveltuvia sarjaliitännöitä, kuten edelleenkin erittäin suosittu RS-485. Kommunikointi voi tapahtua esimerkiksi CAN, CC-Link, Profibus tai Modbus RTU -protokollalla (Robotiq inc, 2016). Jotkut robotit, tai robottikontrollerit, sallivat ohjauksen perinteisen sarjaliitännän kautta, jolloin esimerkiksi paikoitussovelluksen koordinaattitieto voidaan toimittaa robotille yksinkertaisimmillaan ASCII-muotoisena viestinä kuvantamista suorittavalta isäntäkoneelta (Pipan, Adrovic & Herakovic, 2013).

Matrox Design Assistant X kehitysympäristöstä löytyy sisäänrakennettu TCP/IP Ethernet, EtherNet/IP, Modbus TCP sekä Profinet -tuki, ja se voi kommunikoida automaatiolaitteiden kanssa isäntäkoneen sarjaliitännää pitkin. Ohjelmistosta löytyy myös valmiit rajapinnat valikoiduille robottikontrollereille, joita ovat tällä hetkellä ABB IRC5, DENSO RC8, Epson RC420+/RC520+, Fanuc LRMate200iC/LRMate200iD, KUKA KR C2 sekä Stäubli CS8/CS8C HP/CS9. (Matrox Imaging, 2019, s. 16, 18)

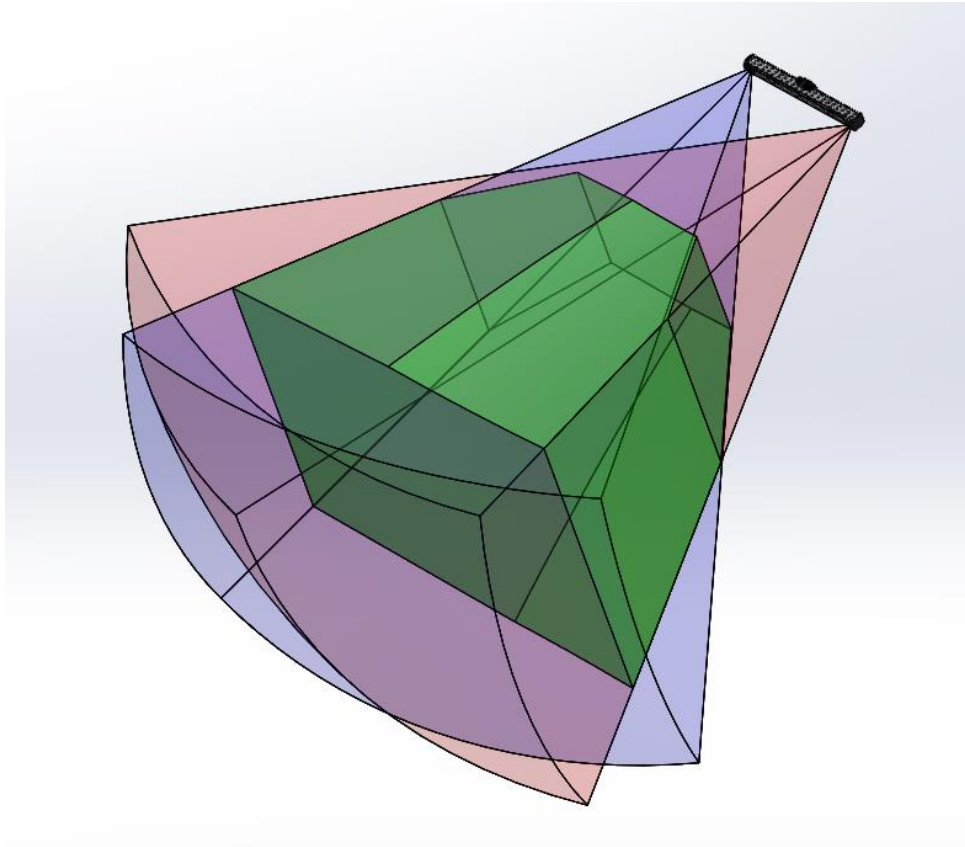
## 6 JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

Kun kuvantamisjärjestelmää lähdetään suunnittelemaan, tulee suunnittelussa ottaa huomioon useita asioita, jotka rajaavat käytettävissä olevia mahdollisuuksia. Jokainen projekti on aina omanlaisensa, ja projektikohtaiset rajoitteet ja vaatimukset rajaavat ja ohjaavat valintoja. Seuraavissa kohdissa pyritään antamaan yleiskatsaus tyyppillisesti järjestelmän rakenteeseen ja toimintaan vaikuttaviin asioihin, joita voi käyttää lähtökohtana suunnitteluprosessissa.

### 6.1 Kuvattavan kohteen ominaisuudet

Kuvattava kohde itsessään vaikuttaa hyvin vahvasti siihen, mitä tekniikoita sen kuvaamiseen voidaan käyttää. Kohteen koko määrittää vaadittavan kuva-alan, joka kuvantamislaitteella pitää saavuttaa. Kohteen pitää mahduttaa kuvantamislaitteen aktiiviselle kuvantamisalueelle pysty-, leveys- ja korkeussuunnassa. Integroiduissa 3D-kameroissa, kuten Photoneon PhoXi-skannerissa aktiivisen kuvantamisen alue muodostuu laitteen eteen alueelle, jonka sisältä toisessa reunassa sijaitseva kamerakomponentti pystyy saamaan luotettavan kuvaustuloksen kuvattavaan kohteeseen heijastetusta lasersäteestä.

Kuvantamisessa tämän kaltaisilla laitteilla on syytä ottaa myös huomioon kohteen korkeuserojen aiheuttamat varjot. Koska kuvio projisoidaan kohteeseen vinosta kulmasta, voivat kohteen pinnanmuodot aiheuttaa varjostumia. Varjoja ja muita tyhjiä mittaustuloksia voidaan kompensoida ainakin jossain määrin ohjelmallisesti kappaleessa 4 mainitulla tyhjien arvojen täytöllä.



Kuva 13. PhoXi-skannerin aktiivisen kuvantamisen alue merkattuna vihreällä, laserin valaisusalue merkattuna punaisella ja kameran kuva-ala merkattuna violetilla (Photoneo s.r.o., 2018)

Kohteen materiaalin ominaisuudet kuten läpikuultavuus ja pinnan heijastavuus ovat asioita, jotka tulee ottaa huomioon järjestelmää rakennettaessa. Läpikuultavasta tai läpinäkyvästä kohteesta ei välttämättä saa luotettavia mittaustuloksia kuin tietyn kulmassa tai tietyn aallonpituuden valolähteellä. Vahvasti heijastavat pinnat aiheuttavat herkästi virheellisiä tuloksia mittauksiin valonsäteiden kimmoessa kohteesta hallitsemattomasti. Esimerkiksi kirkas työstetty reuna muuten tummassa metallikappaleessa tuottaa helposti ylivalottuneen mittaustuloksen kyseisestä kohdasta muun kuvan ollessa edelleen liian tumma.

Hankalien kohteiden kuvausta voidaan helpottaa käyttämällä esimerkiksi HDR-kuvaustekniikkaa (High Dynamic Range), joka voidaan toteuttaa ottamalla kohteesta useita kuvia eri pituisilla valotusajoilla, jotta niin kirkkaat tai heijastavat kuin tummat alueet saadaan kuvattua selkeästi. Kuvantamisen jälkeen kuvadatasta yhdistetään ohjelmallisesti yksi kuva, jossa eri valotusajoilla taltioituista kuvista käytetään parhaan kontrastin tarjoavat alueet HDR-kuvan luomiseksi.

3D-tekniikka tuo uusia mahdollisuuksia kappaleen piirteiden etsintään, kun piirteitä voidaan tunnistaa helposti myös korkeuserojen ja pinnanmuotojen perusteella. 2D-kuvantamisessa pinnanmuotojen tarkka erot-

taminen on vaatinut tyypillisesti erikoistuneiden kuvantamistekniikoiden käyttämistä. Yksi tällainen tekniikka on fotometrinen stereokuvantaminen, jossa kappaletta valaistaan kuvantamisen aikana useista eri suunnista, jotta pinnanmuotojen aiheuttamat varjot saadaan esiin kaikista suunnista ja kappaleen pinnanmuodot niiden perusteella selville (Matrox Imaging, 2019, s. 12). 3D-kameraa käytettäessä tarvetta tällaiselle monimutkaiselle erikoisjärjestelylle ei useinkaan ole, vaan kappaleen pinnanmuodot saadaan helposti selville kuvan syvyystiedon perusteella.

## 6.2 Käytettävän tekniikan valinta

Kun kuvattava kohde ja sen ominaisuudet on selvitetty, voidaan alkaa tekemään päätöksiä järjestelmän kuvantamislaitteesta. Valinnassa on otettava huomioon tekniikan soveltuvuus haluttuun tarkoitukseen niin kuvattavan kohteen koon, kuvauspaikan, materiaalin kuin tavoiteltavan mittatarkkuuden osalta.

Yksi määrittävä tekijä on se, onko kuvattava kohde liikkuva vai paikallaan oleva. Mikäli kohde liikkuu liukuhihnalla, voi kuvaamisen suorittaa kappaleen ollessa liikkeessä esimerkiksi SmartRay ECCOn tyyppisellä 3D-laserskannerilla, joka toimintatapansa puolesta vaatii liikkuvan kohteen. Jatkuvasti liikkeellä oleva kappale ei sovellu kuvattavaksi Photoneo Phoxin tyyppisillä strukturoidun valon tekniikkaa käyttävillä kuvantamislaitteilla, sillä kohde kerkeää liikkumaan kuvauksen aikana ja kuva vääristyy. Vastaavaa tekniikkaa hyödyntäviä 3D-kameroita käyttäessä kohteen tulee olla paikallaan koko sen ajan, kun kuvantaminen tapahtuu, mikä esimerkiksi liukuhihnalla liikkuvan kohteen tapauksessa tarkoittaa hihnan pysäyttämistä kuvantamisen ajaksi.

Kohteen fyysisen koon ohella huomiota tulee kiinnittää myös tavoiteltavaan tai saavutettavissa olevaan mittatarkkuuteen. Kameratekniikkaa hyödyntävät 3D-kamerat on tyypillisesti varustettu tietyn tarkkuuden tarjoavalla kuvakennolla. Mitä pienemmältä alueelta kuva otetaan, sitä enemmän pikseleitä tiettyä fyysistä aluetta on kattamassa. Mikäli kuva-alaa suurennetaan, suurenee myös yhden pikselin kattama alue, mikä vastaavasti tarkoittaa pienempää mittatarkkuutta. On myös syytä huomata, että syvyysuuntainen mittatarkkuus laskee pysty- ja vaakasuuntaisen kuva-alan kasvaessa. Nyrkkisääntönä voidaan todeta, että mitä laajempi kuva-ala on, sitä pienempi on saavutettava mittatarkkuus. Pienikokoisista kohteista voidaan nähdä jopa mikrometriluokan eroja ECCO-skannerilla, ja Phoxi-skanneri pystyy erottamaan millimetriluokan piirteitä jopa metrien kokoisilta alueilta. Laajaan kuva-alaan ja liikkuvaan kuvaan pystyvän ToF-kameran tarkkuus taas ei ole parhaimmillaankaan kuin noin senttimetrin luokkaa.

Taulukko 3. 3D-kameroiden ominaisuuksien vertailua

Malli / Ominaisuus	Ecco 75.200	Ecco 95.010	Phoxi XS	Phoxi XL	Basler ToF
Kuva-ala (FOV)	190 mm	11 mm	118 x 78 mm	1,9 x 1,5 m	(maks.) n. 11,5 x 8,6 m
Syvyysalue (Z-range)	250 mm	5 mm	44mm	2,1 m	n. 12,5 m
Mittatarkkuus X/Y	66 – 138 $\mu$ m	5.8 – 6.8 $\mu$ m	Riippuu kuva-alasta	Riippuu kuva-alasta	Riippuu kuva-alasta
Mittatarkkuus Z	12 – 50 $\mu$ m	0.37 – 0.45 $\mu$ m	0,035 mm	0,5 mm	+/-1 cm
Resoluutio	1920 pistettä	1920 pistettä	3,2M pistettä	3,2M pistettä	640x480 pistettä
Liikkuva kuva	Ei	Ei	Ei	Ei	Kyllä, 20 fps
Liikkuva kohde	Ei	Ei	Ei	Ei	Kyllä
Paikallaan oleva kohde	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Liitántärajapinta	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet, GigE Vision ja GenICam yhteensopiva

### 6.3 Järjestelmän tekninen määrittely

Kun kuvantamislaitte on valittu, tulee vielä määrittellä mitä muita laitteita järjestelmässä mahdollisesti tarvitaan, sekä mitä rajapintoja ja liitántöjä niiden hyödyntämiseksi vaaditaan.

Tyypillisesti järjestelmään tarvitaan kameran ja sen optisten komponenttien lisäksi minimissään neljän tyyppisiä komponentteja. Näistä yksi keskeisimpiä on tietokone, joka toimii koko järjestelmän yhteen sitovana osana. Tietokoneeseen yhdistetään kuvantamislaitteet ja kuvien analysointi suoritetaan sillä. Koneessa pitää olla kuvantamislaitteen vaatima liitántä, sekä riittävästi muita liitántöjä tarvittavia apulaitteita tai muita kytkentöjä varten. Mikäli I/O-toiminnot ulkoisten laitteiden kanssa halutaan ohjata tietokoneen kautta, tulee koneessa olla myös riittävä määrä soveltuvia I/O-linjoja. Mitä raskaampi on ajettava analysointi, sitä tehok-

kaammaksi tietokone täytyy mitoittaa jouhevan toiminnan ja riittävän analysointitehon takaamiseksi.

Lisäksi tarvitaan yleensä liipaisu- ja tahdistuslaitteita, kuten valokennoja ja pulssiantureita, joita käytetään kameran liipaisuun kappaleen saapues- sa kuvausalueelle, sekä hinnan liikkeen ja kuvantamisen tahdistukseen.

Kaikki käytettävät laitteet vaativat käyttösähkön, eli järjestelmässä tulee olla myös sopivat muuntajat ja teholähteet laitteiden virransyöttöä var- ten. Huomiota kannattaa kiinnittää virransyötön suojaukseen ja häi- riöpoistoon käyttämällä esim. UPS-laitteita tai häiriösuotimia osana vir- ransyöttöjärjestelmää.

Kaikki järjestelmän laitteet vaativat lisäksi fyysisen yhteyden, eli kaape- loinnin laitteiden välille. Kaapeleita hankkiessa tulee kiinnittää huomiota niiltä mahdollisesti vaadittaviin ominaisuuksiin, kuten liikkeenkestoon, öl- jyn/kemikaalien kestoon, kohteessa vaadittaviin hyväksyntöihin sekä pa- loturvallisuusominaisuuksiin, kuten halogeenittomuuteen.

#### 6.4 Kuvan analysointi

Kuvan analysoinnin tarkoituksena on löytää halutut piirteet kuvista, jotta analyysin tuloksen perusteella voidaan suorittaa määrätty toiminto. Ana- lysointia suunniteltaessa tulee yrittää rajata tarkkaan se, mihin koko ku- vantamisjärjestelmän rakentamisella pyritään, ja mitä informaatiota ku- vista pyritään löytämään. Suunnittelun lähtökohtana on etsittävän piir- teen lisäksi myös se, miten etsittävä piirre on mahdollista löytää tai tun- nistaa kuvasta.

Mikäli kyseessä on esimerkiksi tyypillinen laaduntarkastussovellus, voi- daan suunnittelua lähteä tekemään sen pohjalta, millaisia virheitä tuot- teissa on aiemmin ilmennyt. Aiemmista löydetyistä virheistä pystytään keräämään käyttökelpoista dataa tyypillisten ongelmien luonteesta ja esiintymistavasta. Viallisia kappaleita voidaan myös käyttää kehitysvai- heessa apuna, kun testataan kehitettyjen tunnistusominaisuuksien toimi- vuutta.

Analysoinnin suorittamisen jälkeen voidaan sovelluksesta saada käyttö- tarkoituksen mukaan tuloksena yksinkertaisimmillaan pelkkä PASS/FAIL - tieto. Paikoitus- ja ohjaussovelluksissa tuloksena saadaan yleensä koordi- naattitietoa, tai vaikkapa kappaleen tyyppimääritys lajittelukonetta var- ten. Analysoinnin tulos voi olla myös monipuolisempi mittaustulos tutkit- tavan kappaleen mitoista, sijainnista tai muista ominaisuuksista.

## 6.5 Tulosten välittäminen

Tulosten välittämisessä sovelluksesta toimilaitteille tulee kiinnittää huomiota erityisesti tulosten käyttökelpoisuuteen. Mikäli välitettävä tieto on esimerkiksi koordinaattitietoa, tulee tietoa välittäessä varmistaa, että koordinaatit lähtevät järjestelmästä toimilaitteiden ymmärtämässä muodossa. Esimerkkinä mainittakoon tilanne, jossa 3D-kamera antaa syvyyskoordinaatit suhteessa kameran sijaintiin, kun robotti odottaa koordinaatteja suhteessa työtason sijaintiin. Ongelmia voi ilmaantua myös perinteisen XY-koordinaatiston tapauksessa, jos analysointiohjelmiston ja toimilaitteen koordinaatistojen nollapistet ovat eri kohdissa, eikä koordinaatteja muunneta oikealle nollapisteelle.

Muita tulosten välittämiseen liittyviä huomioitavia kohtia ovat myös käytettävät rajapinnat. Kommunikaatiopolkua suunnitellessa tulee huolehtia, että kuvantamisjärjestelmästä ja toimilaitteista löytyy yhteensopivat liitännät ja protokollat tiedon välittämiseksi. Fyysiset siirtotiet tulee suunnitella siten, että protokollien ja käytettävien kaapelointien maksimikaapelipituudet eivät ylity.



## 7 JÄRJESTELMÄN RAKENTAMINEN

Tämän opinnäytetyön puitteissa järjestelmällä tarkoitetaan 3D-kameran, sekä tietokoneen ja ohjelmiston muodostamaa kokonaisuutta. Järjestelmä suorittaa kuvantamisen ja kuvan analysoinnin, sekä tallentaa analysoinnin tulokset tekstitiedostoksi tietokoneelle. Täysin toiminnallisen kuvantamisjärjestelmän rakentaminen vaatii lisäksi myös kommunikatiopolun tietokoneen ja analysoinnin tulosta hyödyntävän toimilaitteen välille, mutta tämä osa kokonaisuutta ei enää kuulu referenssisovellukseen eikä sitä sen vuoksi käsitellä tässä työssä kuin yleisellä tasolla.

### 7.1 Kuvattava kohde

Tässä projektissa kuvattavina kohteina käytetään eri kokoisia metallista valmistettuja hammasrattaita aseteltuna lastauslavalle. Kohteet on tarkoituksella valittu saman kaltaisiksi kuin 2D-kuvantamista käsittelevässä kappaleessa kuvassa 1 nähdyt hammasrattaat, jotta työssä voidaan tuoda esiin 3D-kuvantamisella saavutettavia lisäominaisuuksia tavanomaiseen 2D-kuvantamiseen verrattuna.

Kuvantamisen tavoitteena on tunnistaa kappaleet kuvasta muodontunnistuksen avulla ja selvittää Depth Map -kuvan syvyystiedon avulla mikä näistä kappaleista on kaikkein korkein. Tunnistetulle kappaleelle laskeaan myös kallistuskulma ja sen sijainti paikoitetaan koordinaatistosta. Selvitetyt tiedot välitetään analyysin jälkeen tulosteena ohjelmasta ja tallennetaan tiedostoon.

### 7.2 Kuvantamislaitte ja sen kytkentä

Rakennettavassa järjestelmässä käytetään kuvantamislaitteena Photoneo PhoXi M 3D-skanneria. Phoxi-tuoteperheen skannerit ovat Photoneon kehittämään rinnakkaisen strukturoidun valon (Parallel Structured Light) tekniikkaan perustuvia integroituja ja valmiiksi kalibroituja 3D-skannereita. Tekniikka perustuu laitteen toisesta päästä punaisella laser-valolla heijastettavaan kuvioon, joka kuvataan laitteen toisen pään kameralla. Heijastetun kuvion perusteella kameran kuvasta voidaan laskea 3D-malli, joka on mahdollista saada laitteesta ulos valmistajan tarjoamaa rajapintaa myöten pistepilvenä tai Depth Map kuvatiedostona. Koska laite on valmiiksi kalibroitu, on kuvadatan mittatieto mahdollista saada laitteesta reaaliaikaisen mittayksiköissä millimetreinä. PhoXi M on kooltaan 77 x 68 x 416 mm ja tarjoaa keskimäärin 600 x 420 x 450 mm kokoisien mitta-alueen 3,2 miljoonan pisteen tarkkuudella. Tiedonsiirtoväylänä PhoXi käyttää Gigabitin Ethernet-verkkoliitintä ja se voidaan liittää tietokoneen verkkokorttiin CAT5e/CAT6 verkkokaapelilla. Skannerissa itsessään verkkoliitintä on M12, mutta laitteen mukana toimitetaan adapterikaapeli, jonka avulla voidaan käyttää myös normaalia RJ45-liitännällä

varustettua kaapelia. Laitteen asennuksessa on syytä käyttää vesivaakaa, sillä pienikin heitto laitteen kulmassa kuvattavaan kohteeseen nähden aiheuttaa etäisyyksien muuttumisen 3D-kuvassa.

Matrox Design Assistant X sisältää sisäänrakennetun tuen PhoXi-skannereille. Skannerin käyttäminen ohjelmiston kanssa vaatii valmistajan PhoXi Control -ajuriohjelmiston asentamisen koneelle, sillä Design Assistant käyttää Photoneon omaa ajuriohjelmistoa kuvien hakemiseksi laitteesta. Ennen kuin PhoXiä käytävää projektia aletaan rakentamaan, tulee laitteen ajuriohjelmistosta varmistaa joitain asetuksia. Kuvaformaattien asetuksista tulee varmistaa, että skanneri tuottaa Depth Map muotoisen kuvan, sillä se on ainoa Design Assistantin tukema 3D-formaatti. Lisäksi on hyvä ottaa muistiin kameran sarjanumero (ID) ja sen IP-osoite. Näitä tietoja tarvitaan skannerin tunnistamiseksi ja allokoimiseksi Design Assistantin Platform Configuration -asetuksissa, jossa kamera tunnistetaan ID:n tai IP-osoitteen perusteella.

### 7.3 Ohjelmiston luominen Design Assistantilla

Design Assistant käsittelee jokaisen erillisen ohjelmiston projektina. Uutta projektia aloitassa tulee Design Assistantille luoda ensin Actions-paneelista alustayhteys (platform connection) projektin suorittamista varten. Yhteys voi olla joko paikallinen (Connect Local) tai etäyhteys (Connect Remote). Vaihtoehdot tarkoittavat paikallisen koneen käyttämistä Design Assistantin ajon aikaisena alustana (run-time platform), tai toisen samassa verkossa olevan laitteen, kuten tietokoneen tai älykameran käyttämistä alustana. Kolmas vaihtoehto on emulointitila (Start Emulation) joka mahdollistaa projektien avaamisen ja muokkaamisen, mutta ei niiden käynnistämistä ajoa varten.

#### 7.3.1 Uuden projektin aloittaminen

Uuden projektin perusasetuksiin kuuluvat projektin nimi, projektitiedostojen kansio, sekä se, käytetäänkö kuvien lähteenä fyysistä kameraa vai kuvasettiä. Tässä tapauksessa valitaan kuvälähteeksi fyysinen kamera ja valikosta valitaan vaihtoehto Photoneo PhoXi. Kun perusasetukset ovat valmiina, avautuu uusi projekti tilaan, jossa vuokaaviossa (Flowchart) on kaksi askelta (Step) valmiina yhdessä silmukassa (Loop). Tarkemmat kameran asetukset säädetään Platform Configuration -valintaikkunassa, johon pääsee työkalurivin oikean ylälaidan tai Camera-stepin Configuration-paneelin ratas-ikonin painamalla. Platform Configurationin Cameras-valikossa on jo yksi fyysinen kamera (PhysicalCamera1) valmiina perusasetuksien pohjalta.

PhysicalCamera1:n alle määritellään käytettävän kameran tarkemmat asetukset. Kameran tyyppi on jo valmiiksi Photoneo Phoxi, mutta sen lisäksi tulee vielä määritellä Allocation Mode -asetus, joka määrittää minkä

perusteella käytettävä kamera tunnistetaan. Jos kohtaan valitsee Hardware ID, tunnistetaan kamera sen sarjanumeron (ID) perusteella. Viimeinen tarkistettava asetus on API version, joka tulee valita vastaamaan käytettävän PhoXi-skannerin firmware- ja ajuriversiota. Kun asetukset ovat valmiina, voidaan kamera liittää Design Assistantiin painamalla Allocate-nappia.

Platform Configurationin kautta voidaan hallita myös muita projektin asetuksia, mm. yhteyksiä ulkoisiin laitteisiin sekä I/O-linjoja. Platform Configurationissa on myös mahdollista luoda ja konfiguroida kuvasettejä (Image Sets) käytettäväksi kuvien lähteenä fyysisen kameran sijasta. Tämä on hyödyllistä, mikäli ohjelmistokehitystä tehdään paikassa, jossa fyysisen kameralaitteiston ja kohteiden kuvaaminen on hankalaa, tai siitä halutaan muuten olla riippumattomia. Tämänkin projektin lähes koko ohjelmistokehitystyö on tehty käyttäen skannerilla tallennettua kuvasettiä reaaliaikaisen kuvantamisen sijasta. Kuvasetti on koostunut kuudesta kuvasta, joissa on eri määrä eri asennoissa olevia kappaleita.

### 7.3.2 Ohjelman logiikan rakentaminen vuokaavioon

Ohjelmistokehitys Design Assistantilla perustuu vuokaavioihin, joita ajetaan silmukoissa. Sekä vuokaavioita että silmukoita voi olla samassa projektissa useita monipuolisen ohjelmalogiikan luomiseksi. Vuokaaviot luodaan Flowchart-välilehdellä, jossa valitaan alavetovalikosta käsiteltävä vuokaavio. Uusia askeleita voidaan lisätä vuokaavioon avaamalla askelten välissä näkyvän mustan kolmion kohdalta valikko hiiren oikealla näppäimellä ja valitsemalla sieltä Add Step. Tämä aukaisee valintaikkunan, josta askeleen voi valita käytössä olevista vaihtoehdoista, jotka on jaoteltu toimintojensa mukaisesti kategorioihin.

Tämä projekti sisältää kaksi vuokaaviota ja kaksi silmukkaa. Päävuokaaviossa (MainFlowchart) ajetaan varsinainen ohjelma, ja toista vuokaaviota (OnSendTrigger) käytetään kuvien liipaisun hallintaan, kun ohjelmistoa ajetaan liipaisuperusteisesti. Ohjelman pääsilmutkassa (Loop) ajetaan kuvankaappaustoiminnot, mallintunnistus (ModelFinder) sekä tulosten tallennus. Toisessa silmutkassa (Loop2) suoritetaan mittaukset kappaleiden korkeuden ja kulman tunnistamiseksi, sekä hoidetaan tulosten tallentaminen muuttujiin. Vuokaavion askeleen valitseminen aktivoi sen ja tuo kyseisen askeleen asetukset näkyviin näytön alalaidan Configuration-paneeliin.

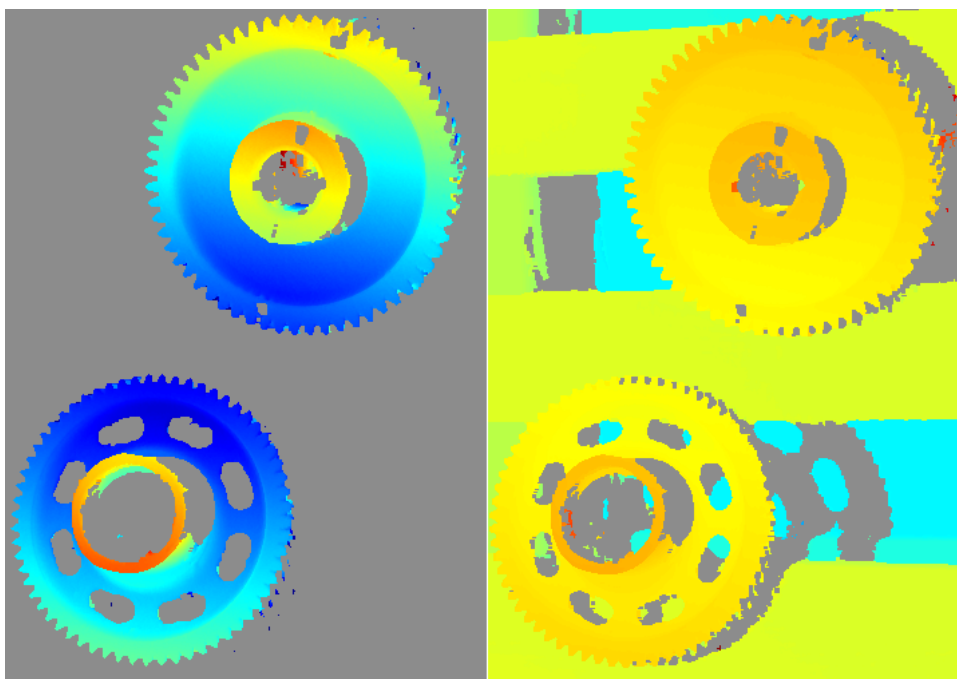
Taulukko 4. Ohjelman rakenne

Askel	Tyyppi	Toiminto	Silmukka
Camera	Camera	Kuvien lähde, joko fyysinen kameralaitte tai levyllä tallennettu kuvasetti	Loop
MallienTunnistus	ModelFinder	Tunnistaa opetetut kappaleen mallit kuvasta	Loop
KorkMax_init	Storage	Alustaa muuttujan KorkMax, johon korkeimman kappaleen korkeus-tieto tallennetaan	Loop
BreakLoop	Condition	Ohjaa suorituksen pois Loop2:sta kun silmukan suoritusten laskuri on suurempi kuin ModelFinderin löytämien kohteiden lukumäärä	Loop2
KorkeudenTunnistus	IntensivtyChecker	Laskee löydetyin kappaleen korkeuden keskiarvon sen keskikohdan ympäriltä kehältä, jonka koko on kohteen koko/1,8	Loop2
INTC_right	IntensivtyChecker	Etsii vertailupisteen korkeuden kappaleen kulman laskemiselle kappaleen oikeasta ulkoreunasta	Loop2
INTC_left	IntensivtyChecker	Etsii vertailupisteen korkeuden kappaleen kulman laskemiselle kappaleen vasemmasta ulkoreunasta	Loop2
INTC_bottom	IntensivtyChecker	Etsii vertailupisteen korkeuden kappaleen kulman laskemiselle kappaleen alapuolisesta ulkoreunasta	Loop2

INTC_top	IntensivtyChecker	Etsii vertailupisteen korkeuden kappaleen kulman laskemiselle kappaleen yläpuolisesta ulkoreunasta	Loop2
KappaleenKulma	Storage	Laskee apumuuttujia hyödyntäen kappaleen X- ja Y-akselin suuntaisen kallistuskulman trigonometrisesti käyttäen lähdetietoina vertailupisteiden välistä korkeuseroa ja kappaleen pituutta	Loop2
JosKorkeampia	Condition	Tekee vertailun edellisen korkeimman kappaleen tunnistuksen ja KorkMax muuttujaan tallennetun arvon välillä	Loop2
KorkMax_update	Storage	Mikäli edellisen korkeimman kappaleen tunnistuksen arvo on ollut suurempi kuin tallennettu arvo, päivitetään muuttujaan KorkMax viimeisimmän tunnistuksen arvo	Loop2
TulostenTallennus	TextWriter	Tallentaa analyysin tuloksesta tekstitiedostoon tiedot korkeimman kappaleen indeksistä, korkeudesta ja kallistuskulmista	Loop
Status	Status	Välittää koko analyysistä PASS/FAIL tiedon perustuen analyysin osien tulokseen ja määriteltyihin ehtoihin	Loop

### 7.3.3 Kuvan asetusten säätäminen

Ennen kuin kuvia analysoidaan, voidaan niiden asetuksia hienosäätää lopputuloksen optimoimiseksi. Design Assistant mahdollistaa Depth Map kuvien syvyysalueen rajauksen (Depth Map Remap) sekä kuvan tyhjien kohtien täyttämisen (Depth Map Fill Gap) interpoloimalla tai reunan arvoon. Asetukset löytyvät Camera-askeleen asetuspaneelistä, jossa voi myös tallentaa kalibrointitiedoston, mikäli käytössä on kalibroimatonta kameralaitte ja halutaan saada mittaustuloksia reaali maailman yksiköissä. Depth Map kuvien syvyysalueen rajausta helpottaa kuvan analysointia, koska sen avulla voidaan rajata kuvista pois tarpeettomat alueet, kuten tämän projektin tapauksessa lattiataso sekä lava, jolla tuotteet sijaitsevat. Rajauksen jälkeen näkyviin jäävät vain analysoitavat kappaleet, ja kappaleiden korkeuseroja merkkäavat täytevärit osoittavat erot paremmin pienemällä skaalalla. Tyhjien kohtien täyttäminen mahdollistaa pikseliarvojen täyttämisen kuvan tyhjiin kohtiin perustuen joko viereisistä pikseleistä interpoloituihin arvoihin tai tyhjää arvoa reunustavaan arvoon. Täyttöä varten on myös mahdollista säätää raja-arvoja, joihin saakka täyttö tehdään interpoloimalla ja raja-arvon jälkeen reunan arvoon.



Kuva 14. Depth Map kuva rajauksen jälkeen vasemmalla ja oikealla lähtötilanne ennen rajausta

### 7.3.4 Kappaleen tunnistus ModelFinder-toiminnolla

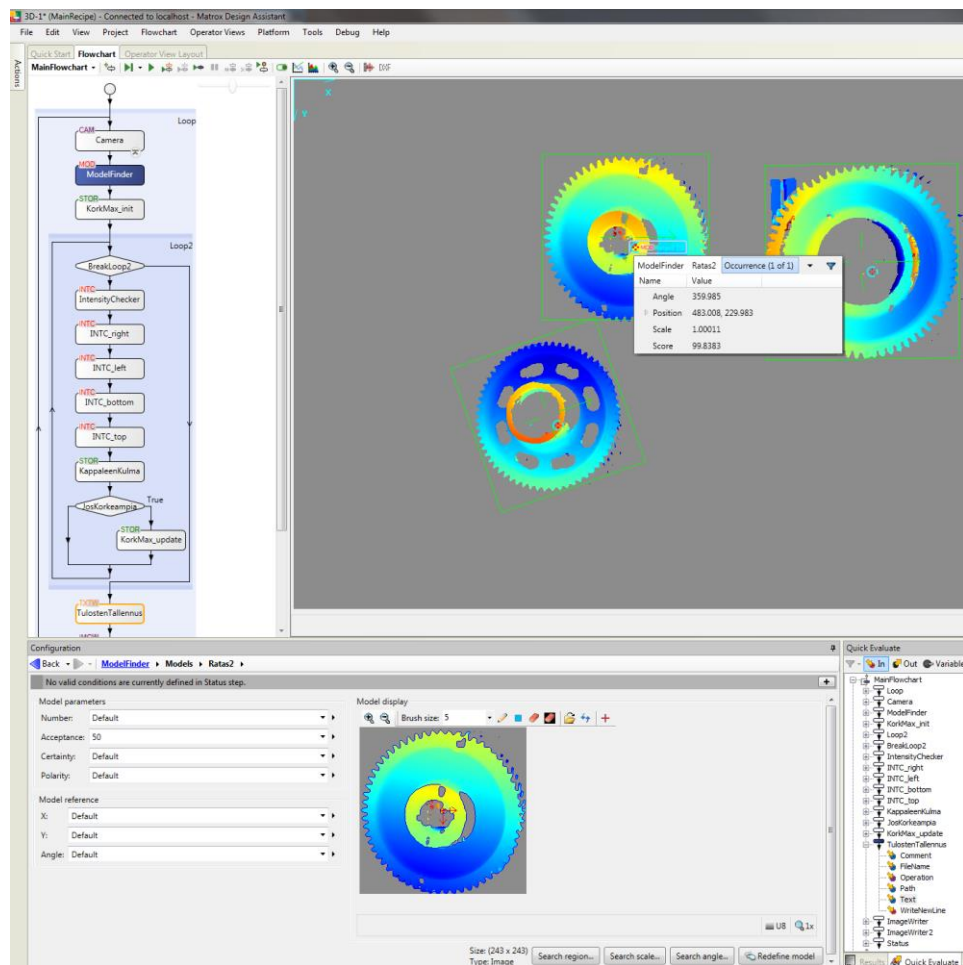
ModelFinder-toiminto mahdollistaa eri mallisten kappaleiden tunnistamisen, etsimisen ja paikoittamisen kuvasta. ModelFinder tunnistaa kappaleet reunaperusteisen geometrisen tunnistuksen avulla, minkä ansiosta

se pystyy tunnistamaan kappaleita niiden asennosta ja koosta riippumatta jopa silloin, kun kappale on osittain peittynyt. (Matrox Imaging, 2019, s. 6)

ModelFinderille voidaan opettaa kappaleen malli joko merkkaamalla etsittävä kappale kuvasta tai käyttämällä ladattavaa DXF-muotoista CAD-mallitiedostoa. Tässä projektissa mallit on opetettu merkkaamalla ne kuvasta. Mallin merkkkaus tapahtuu painamalla työkalurivin Add Image Model -ikonin ja merkkaamalla sitten haluttu malli klikkaamalla sen kahta vastakkaisista kulmaa kuvasta tai vetämällä merkkkausalue kohteen yli pitämällä hiiren painiketta pohjassa.

Tunnistuksen herkkyyttä, tai tarkemmin sitä, kuinka matalalla pistearvolla (Score) kuva hyväksytään vastaavuudeksi, voidaan säätää muuttamalla mallin Acceptance-arvoa. Pistearvon skaala on 0-100 ja hyväksymisen oletusraja on 60. Mikäli kappaleet esiintyvät kuvien välillä jonkin verran eri muotoisina, esimerkiksi ollessaan eri kohdassa kuvaa, pitää Acceptance-arvoa mahdollisesti pienentää, jotta malli tunnistuu. Tämän projektin mallit pystyttiin kaikki tunnistamaan jokaisesta testikuvasta, kun osastalle säädettiin Acceptance arvoon 50. Muita mahdollisia parametreja ovat mallin esiintymien lukumäärä sekä polariteetti, eli haetaanko vain mallin mukaista pikselipolariteettia (esim. tumma kohde vaalealla taustalla) vai kelpaako myös käänteinen polariteetti (vaalea kohde tummalla taustalla).

On hyvä huomata, että oletusarvo mallin esiintymille on 1, ja oletusarvoisesti ModelFinder etsii jokaista mallia oletusmäärän. Näin ollen etsittävien esiintymien määrää on muistettava muuttaa, mikäli samaa mallia saattaa esiintyä kuvassa useampi kappale.



Kuva 15. Design Assistantin suunnittelunäkymä, ModelFinder -askeleen asetukset. Etsittävä malli ja sen asetukset Configuration-paneelin pikkukuvassa

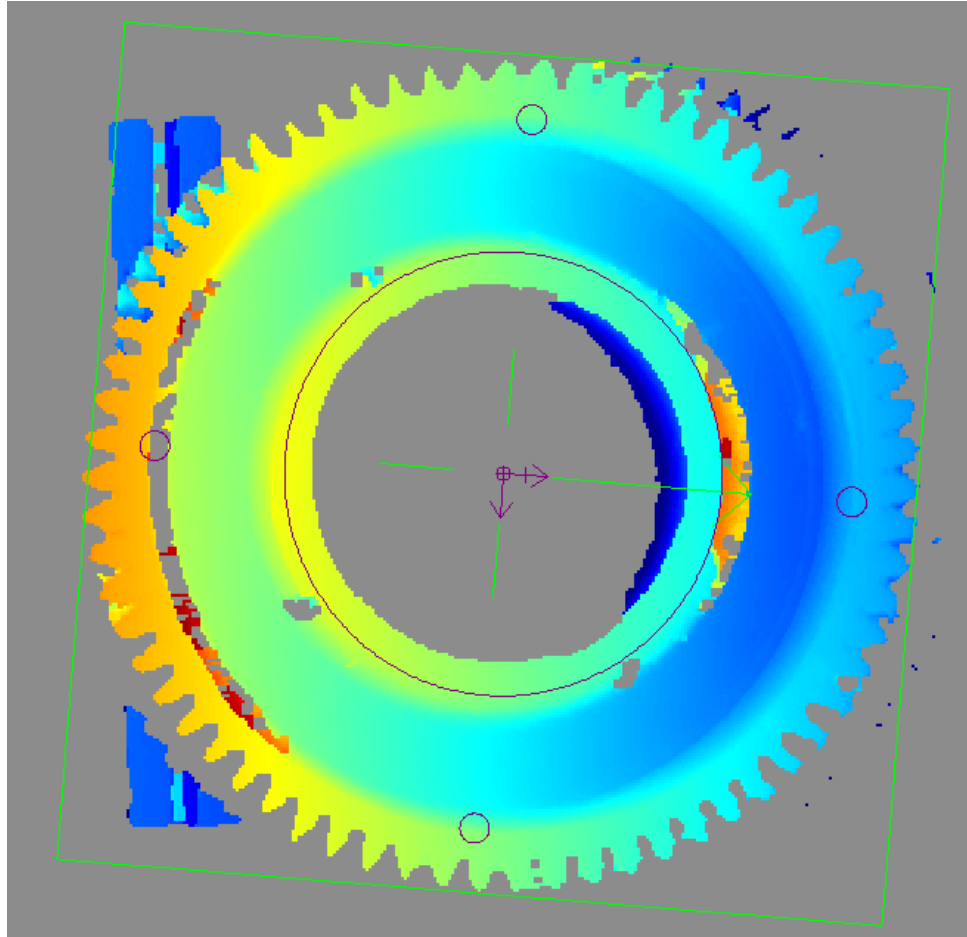
### 7.3.5 Korkeus- ja kulmatieto

Löydettyjen kappaleiden korkeus- ja kulmatiedot selvitetään IntensityChecker-toiminnon avulla. IntensityChecker on alun perin 2D-kuvien tutkimiseen tarkoitettu toiminto, jolla voidaan tutkia kuvan eri alueiden tai pikselien kirkkautta, eli intensiteettiä. 3D Depth Map kuvia käytettäessä IntensityChecker ilmoittaa pikselin kirkkausarvon sijasta sen Z-akselin arvon, eli pikselin syvyyttiedon. Käyttäessä IntensityCheckeriä tai muita 2D-analysointityökaluja, kuten Blob-analyysiä, huolehtii Design Assistant kuvadatan muuntamisesta työkalun vaatimaan muotoon automaattisesti.

IntensityCheckerin tarjoamaa syvyyttietoa hyödyntämällä on mahdollista analysoida kappaleen sijaintia Z-akselilla. KorkeudenTunnistus-askeleessa lasketaan löydetyn kappaleen korkeuden keskiarvo sen keskikohdan ympäriltä elliptiseltä kehältä, jonka koko on laskettu jakamalla ModelFinderin kappaleelle ilmoittama X- ja Y-suuntainen koko luvulla 1,8. Kappaleen



kulman laskemista varten luodaan ensin IntensityCheckerillä neljä vertailupistettä X- ja Y-akselien suuntaisesti kappaleen vastakkaisiin reunoihin. Vertailupisteet ovat halkaisijaltaan 10 mm kokoisia ellipsejä, ja tarkistuksen palauttama korkeustieto on vertailupisteen alalta laskettu korkeuden keskiarvo.



Kuva 16. IntensityChecker-askelten tunnistusalueet kappaleessa

Varsinaiset laskelmat kappaleen kulmatietoa varten suoritetaan KappaleenKulma-askeleessa. Tämä askel sekä IntensityChecker-askeleet sijaitsevat silmukassa Loop2, joka toistaa laskutoimitusta niin kauan, kunnes laskenta on suoritettu kaikille ModelFinderin löytämille kappaleille. Silmukan lopussa saatua korkeustulosta verrataan muuttuun KorkMax tallennettuun arvoon, mikäli tunnistuksen tulos on tallennettua korkeampi kappale, päivitetään kyseisen kappaleen tiedot muuttujiin tallennusaskeleessa KorkMax\_update. Askeleessa tallennettavat tiedot ovat aikaleima, kappaleen korkeus, indeksi, X- ja Y-koordinaatit sekä kallistuskulma X- ja Y-suunnassa.

Laskelmissa on käytettävä apuna useita muuttujia, sillä vaikkakin Design Assistant osaa suorittaa monipuolisia laskutoimituksia analyysin tulokselle, ei laskelmia monestikaan voi suorittaa monimutkaisina lausekkeina vaan niitä on tehtävä askel kerrallaan ja säilöttävä vaiheiden tuloksia

apumuuttujiin. IntensityChecker- ja ModelFinder-askelten tuloksista saadaan tarvittavat lähtötiedot kulmien laskemiseksi suorakulmaisen kolmion trigonometrian avulla.

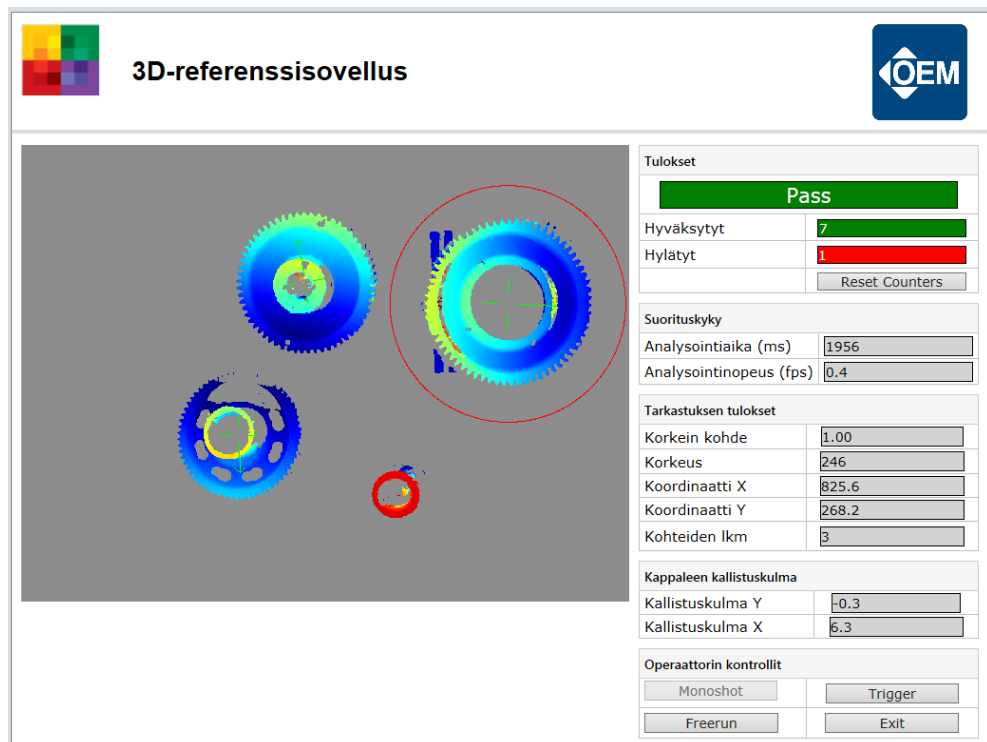
ModelFinder-askeleesta saadaan suoraan tieto kappaleen pituudesta, joka on tässä tapauksessa kolmion hypotenuusa. Laskemalla erotus vastakaisten vertailupisteiden korkeuksien välillä, saadaan tietoon kolmion pystysuuntainen kateetti. Kolmion vaakasuuntainen kateetti voidaan tämän jälkeen laskea Pythagoraan lausetta  $a^2+b^2=c^2$  hyödyntäen. Lauseessa  $a$  ja  $b$  ovat vaaka- ja pystysuuntaiset kateetit ja  $c$  hypotenuusa. Lauseen perusteella voidaan todeta vaakasuuntaisen kateetin pituuden olevan neliöjuuri hypotenuusan ja pystysuuntaisen kateetin toisen potenssin erotuksesta, eli  $a=\sqrt{c^2-b^2}$ . Koska Design Assistant ei pysty laskemaan potenssiin korotuksia neliöjuurilausekkeen sisällä muuttujassa, on potenssiin korotuksille luotava omat apumuuttujat, joihin korotuksen tulos tallennetaan. Näiden apumuuttujien sisällöstä voidaan sitten suorittaa laskutoimitukset ja neliöjuuren laskeminen muuttujan arvoksi vaakasuuntaiselle kateetille.

Kun molempien kateettien pituus on tiedossa, voidaan kappaleen kallistuskulma, joka on tässä tapauksessa suorakulmaisen kolmion kulma  $\alpha$ , laskea pystysuuntaisen ja vaakasuuntaisen kateetin osamäärästä arkustangentilla, eli  $\alpha=\arctan(b/a)$  (Casio Computer Co. Ltd., 2019).

### 7.3.6 Operaattorinäkömää

Design Assistant luo uudelle projektille valmiin pohjan operaattorinäkömääksi. Operaattorinäkömää on sovelluksen graafinen selainpohjainen käyttöliittymää prosessin käyttäjälle tai tarkkailijalle. Operaattorinäkömää voi muokata suunnittelunäkymän Operator View Layout välilehdellä. Näkömää voi lisätä esimerkiksi projektin nimen, yrityksen logon, sekä tietokenttiä, joita näkömäästä halutaan tarkkailla. Tämän sovelluksen operaattorinäkömää on muokattu mahdollistamaan kuvien liipaisu operaattorinäkömäästä, sekä luotu uusia näyttökenttiä löydetyn kappaleen koordinaattien ja kallistuskulmien näyttämiseksi.

Operaattorinäkömään muokkaaminen tapahtuu saman kaltaisesti kuin vuokaavionkin. Klikkaamalla elementti operaattorinäkömäästä aktiiviseksi, tulee kyseisen elementin asetuspaneeli näkyviin suunnittelunäkymän alalaitaan. Erilaisia elementtejä ja sisältöjä voi lisätä näkömäään hiiren oikeanpuoleisen napin painalluksella aukeavasta valikosta. Elementeissä näyttettäviä arvoja voi linkittää muuttujista ja painikkeiden toimintaa muokata konfigurointipaneelissa samoin kuin vuokaavion elementtejä määritelmässä.



Kuva 17. Ohjelman operaattorinäkömää

### 7.3.7 Tulosten tallennus

Tulosten tallentaminen tapahtuu Loop2-silmukan suorittamisen jälkeen. Tallentamiseen käytetään TextWriter-tyyppistä askelta, jonka asetuksiin määritellään tiedoston tallennuskohde, tiedostonimi sekä tallennettava teksti. Tekstin sisällöksi voi myös linkittää muiden askelten tuloksia tai noutaa muuttujiin tallennettuja arvoja kuten tässäkin projektissa on tehty.

Toimivassa kuvantamisjärjestelmässä tulosten tallentamisen sijasta, tai lisäksi, tulokset välitettäisiin kuvantamisalustalta eteenpäin käytettäväksi. Esimerkiksi tämän sovelluksen tuottama koordinaatti- ja kallistustieto voitaisiin välittää eteenpäin robottiohjaimelle Design Assistantin tarjoamaa robottikommunikointirajapintaa hyödyntäen.

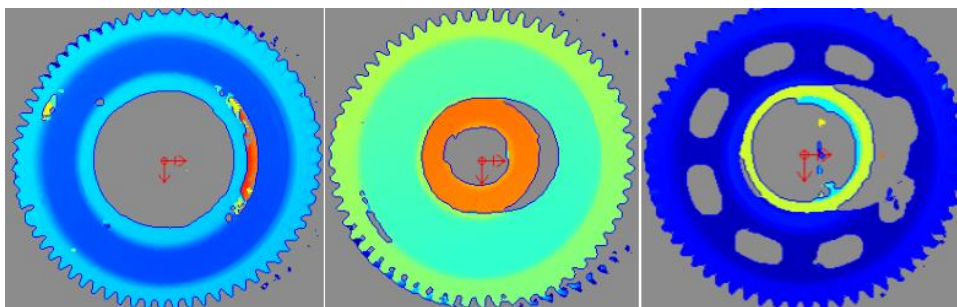
Robottikommunikoinnin implementoiminen sovellukseen vaatii Design Assistantin robottiaskelten lisäämisen ohjelman vuokaavioon, sekä niiden asetusten määrittämisen, jotta kommunikaatio laitteiden välillä kulkee oikeassa muodossa ja oikea-aikaisesti. Lisäksi itse robottiohjaimeen pitää asentaa Design Assistantin komennot robotin liikekäskyiksi tulkkaava apuohjelma.

## 8 JÄRJESTELMÄN KÄYTÄNNÖN TESTAUS

Järjestelmän testaus suoritetaan kahdessa osassa. Ensimmäinen osa testausta on analysointiohjelman suorittaminen aiemmin tallennetun kuvasarjan avulla. Testausta varten järjestelmän asetuksia muutetaan siten, että kuvien lähteeksi asetetaan Camera-askeleessa fyysisen kameran sijasta kuvasarja. Testauksessa käytetään samaa kuvasarjaa, jota hyödyntämällä ohjelmistokehitys on tehty. Kuvasarjaan lisätään myös kuvia, joissa on kappaleita, joita järjestelmälle ei ole opetettu, sekä kuvia, joissa ei ole lainkaan löydettäviä kohteita.

Testauksen toinen osa suoritetaan rakentamalla fyysiseen kameraan, eli PhoXi M -skanneriin perustuva demolaitteisto tilaajayrityksen tiloihin. Demolaitteistolla suoritetaan kuvantamista käyttämällä kohteina sekä opetettuja kappaleita että kappaleita, joita ei ole opetettu. Kappaleita asetellaan kuvattavaksi alustalle joko suorassa tai eri suuntiin kallistettuna ja niiden sijaintia kuva-alalla vaihdellaan eri kohtiin. Näin menetelmällä pyritään selvittämään, onnistuuko kappaleiden tunnistaminen oikeassa tilanteessa yhtä hyvin kuin kuvasarjan kanssa simuloitussa tilanteessa. Testaamalla järjestelmää myös vieraiden kappaleiden kanssa voidaan selvittää järjestelmän alttius väärille tunnistuksille.

Koska käytettävä tunnistus on malliperusteinen, voi esimerkiksi kappaleen suuri kallistuskulma aiheuttaa tunnistuksen epäonnistumisen tai kappaleen tunnistamisen väärin. Tällaisen tilanteen sattuessa kohdalle pyritään asetuksia säätämällä testaamaan, pystytäänkö hankalampi kappale tunnistamaan luotettavasti säätämällä esimerkiksi tunnistusherkkyyttä siten, että siitä ei aiheudu haittaa analyysin muulle toiminnalle. Ohjelmistolle on opetettu kolmen kappaleen mallit, joita kuvista pyritään tunnistamaan.



Kuva 18. Kappaleiden mallit Design Assistant -ohjelmistossa järjestyksessä vasemmalta oikealle Ratas\_1, Ratas\_2, Ratas\_3

Testausta varten ohjelmasta luodaan uusi versio, johon on normaalin toiminnallisuuden lisäksi lisätty ylimääräisiä tallennustoimintoja tarkemman lokitiedoston keräämiseksi. Ohjelma tallentaa tarkastuksen lopputu-

loksen lisäksi tarkastuksen tiedot jokaisesta tarkastetusta kohteesta, jotta normaalisti tallennettavia tuloksia voidaan verrata tietoihin kaikista ajetuista tarkastuksista kaikille kappaleille ja kuville. Ohjelman Status-asteleeseen on lisätty onnistuneen tuloksen ehdoksi, että tunnistettavien mallien määrä kuvassa on oltava  $>0$ , tai tarkastus saa FAIL-statusen. Ohjelma tallentaa tarkastusten tulosten mukana myös tarkastushetken PASS- ja FAIL-laskureiden tulokset, jotta tyhjien kuvien rekisteröityminen FAIL-statuselle voidaan varmentaa.

## 9 TULOSTEN ANALYSOINTI

Tulosten analysointi suoritettiin vertaamalla analyysin lopputulosta kaikkien tarkastusten lokitietoihin tarkastusten aikaleimojen avulla. Fyysisellä kameralla suoritettavassa testissä tallennettiin testauksen lokitietojen lisäksi TIFF-muotoinen kuvatiedosto, jota voitiin verrata tulosten tarkastelun yhteydessä testin tuloksiin.

### 9.1 Testaus kuvasarjalla

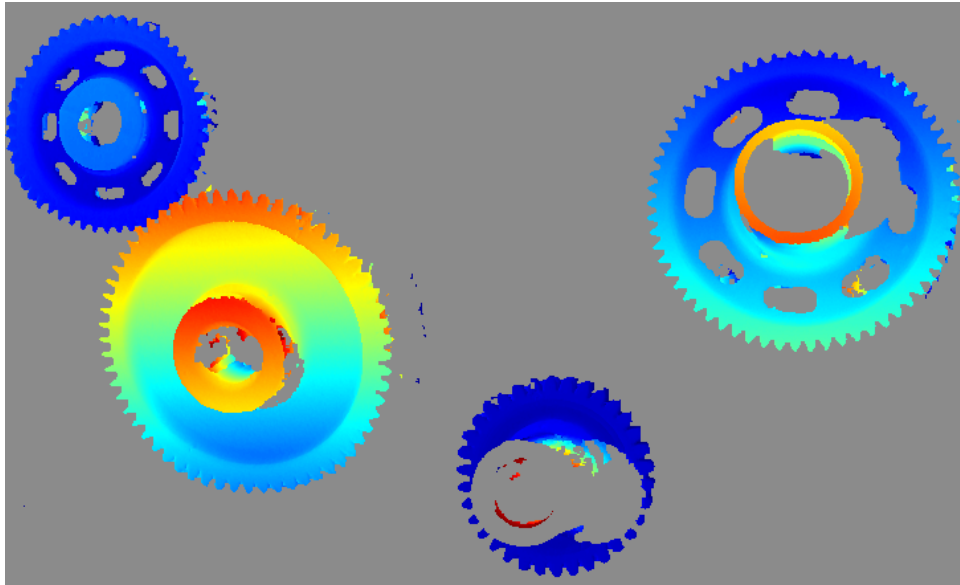
Testatessa ohjelman toimivuutta aiemmin tallennetulla kuvasarjalla päästään ominaisuuksien toimivuudessa erittäin hyvälle tasolle. Tunnistuksen luotettavuus kuvasarjaa käytettäessä on 100%, eikä virheellisiä ”false positive” -tunnistuksia tapahtunut lainkaan. Myös tulosten toistettavuus oli erinomaisella tasolla analyysin tulosten ollessa yhdenmukaisia sadan analyysin testisarjassa.

Ohjelmisto pystyi paikoittamaan löytämänsä kappaleet koordinaatistoon, sekä laskemaan niiden kallistuskulman suunnitellun mukaisesti. Korkeimman kappaleen tunnistamisen logiikka toimi kuten oli tarkoituskin, ja jokaisen kuvan tunnistussyklistä Loop2-silmukassa jäi tulokseksi korkeimman kappaleen koordinaatit ja kulmatiedot.

### 9.2 Testaus fyysisellä kameralla

Myös fyysisellä kameralla suoritettussa testauksessa ohjelmisto suoriutui kohtuullisen hyvin vain vähäisellä asetusten säätämällä. Testauksen aikana tehtiin yhteensä 30 kuvausta, joista ensimmäiset 14 olivat tunnistusasetusten hienosäätämistä varten. Suurin muutos jouduttiin tekemään tunnistusherkkyyteen, joka jouduttiin laskemaan kuvasarjassa käytetystä arvosta 50 arvoon 40. Kun asetukset oli saatu kuntoon, suoritettiin varsinaiset testikuvantamiset, joiden tulokset tallennettiin tiedostoon.

Testauksen aikana kappaleentunnistus ei suoriutunut tehtävästään virheettömästi. Kappaleentunnistus ei kahdessa tapauksessa onnistunut tunnistamaan kappaletta ollenkaan, ja yhdessä tapauksessa teki väärän ”false positive” -tunnistuksen. Kaikissa tapauksissa kyseessä oleva kappale oli Ratas\_2, ja virhetunnistuksessa se tunnistettiin kappaleeksi Ratas\_1. Kyseisessä kuvassa Ratas\_2 oli huomattavan vinossa asennossa, jonka takia tunnistusalgoritmi tulkitse sen virheellisesti eri kappaleeksi. Kahdessa muussa tapauksessa kohteesta saadun kuvan reunat olivat epäselvät, eikä reunan hammastus erottunut kunnolla. Tämä saattoi aiheuttaa tunnistamattomuuden, koska ModelFinder toiminto tunnistaa kappaleet niiden reunojen kontrastin perusteella.



Kuva 19. Virheellisen tunnistuksen aiheuttanut kuva

### 9.3 Tulosten toistettavuus ja luotettavuus

Ohjelmiston testauksen tuloksista on nähtävissä, että esimerkin kaltaisessa sovelluksessa voidaan saavuttaa luotettava tunnistus- ja mittatarkkuus. Testauksen aikana kappaleita aseteltiin tarkoituksella vaativiin asentoihin, jotta järjestelmän tunnistuskyvyn rajat saataisiin tuotua esiin. Kuvantamisjärjestelmissä tulokset ovat sitä luotettavampia ja toistettavampia mitä yhtenäisempiä analyysin kohteesta saatavat kuvat ovat. Havaittavissa oli selkeä yhteys kappaleen kuvan vääristymisen, kuten kallistumisen ja tunnistuksen epäonnistumisen välillä. Lisäksi tietyissä kohdin sijaitsevien kappaleiden reunoista tuli kuvissa epäselviä, mikä todennäköisesti johtui kappaleen työstetyn alueen kirkkaan pinnan aiheuttamasta valon heijastumisesta.

Tämänkin projektin tapauksessa tunnistuksen luotettavuutta voisi todennäköisesti kasvattaa kiinnittämällä enemmän huomiota kappaleesta opettavan mallin muodostamiseen, sekä mallikohtaisten asetusten hienosäätämiseen. Tässä projektissa kaikilla kappalemalleilla on käytetty yksinkertaisuuden vuoksi samaa tunnistusherkkyyttä. Mikäli herkkyys olisi säädetty mallikohtaisesti mahdollisimman tiukaksi, ja käytetty alhaisia arvoja vain hankalien mallien kohdalla, olisi testissä tapahtunut väärä tunnistus mahdollisesti välttävissä.

## 10 YHTEENVETO

Matrox Design Assistant X -kehitysympäristö osoittautui helposti omaksettavaksi ja intuitiiviseksi työkaluksi rakentaa 3D-tekniikkaa hyödyntäviä konenäkösovelluksia. Vaikkakin Design Assistantin tuki 3D-kameroille on, ainakin tällä hetkellä, jokseenkin vajavainen sen tukiessa ainoastaan Depth Map -kuvia ja rajattua määrää laitetoimittajia, tuo jo tämänkin tason 3D-tuki kuitenkin laajan valikoiman uusia työkaluja käyttöön konenäkösovellusten suunnittelijoille. Myös oppimiskynnys siirryttäessä 2D-sovelluksista 3D-sovelluksiin on Design Assistantin kanssa hyvin matala ohjelmiston huolehtiessa datan muuntamisesta halutun työkalun vaatimaan muotoon automaattisesti. Aiemmin Design Assistantia käyttäneille oppimiskynnys on lähestulkoon olematon sovelluksen työkalujen toimiesä käytännössä täysin samoin kuin 2D-sovelluksia rakentaessa, mutta niiden pystyessä kuitenkin käyttämään uusia Depth Map -kuvista saatavia syvyysarvoja.

Opinnäytetyön kokemusten perusteella PhoXi-3D-kameraa on mahdollista käyttää monipuolisesti hyödyksi kappaleentunnistuksessa ja paikoituksessa. Laitteesta on olemassa useita versioita eri mittausalueita ja mitatuseisyyksiä varten tarkkuuden ollessa suuremmillakin kohteilla vielä erittäin hyvä. Laitteen asennus on myös yksinkertaista, ja integroituna ratkaisuna se on helppo asentaa kuvauksen kannalta sopivaan paikkaan. Standardi Gigabit Ethernet -liitäntä mahdollistaa pitkät kaapelipituudet ja laitteen asentamisen jopa olemassa olevaan lähiverkkoon. Yhteensopiavuutta rajaa valmistajan oma rajapinta ja ajuriohjelmiston tarve, mutta tilanne on tänä päivänä sama suuressa osassa markkinoilla olevia 3D-kameroita.

Järjestelmän testauksen tuloksia analysoidessa pystyttiin näkemään suora yhteys kuvien samankaltaisuuden ja tunnistuksen luotettavuuden välillä. Mikäli kappale oli pahasti vinossa, tai kuva muutoin ”huono”, saattoi tunnistus epäonnistua tai johtaa virheelliseen tunnistukseen. Tämän takia on suositeltavaa käyttää aikaa ja olla huolellinen tunnistettavien mallien määrittelyn kanssa. Mitä parempi malli kappaleesta on, sitä luotettavampi tulee tunnistus pitkän ajan kuluessa olemaan. Myös kuvanlaatu tulisi pyrkiä maksimoimaan säätämällä kameran asetukset mahdollisimman tarkasti suurta testiotosmäärää hyödyntäen.

Ohjelmiston mittaustoimintoja toteuttaessa jouduttiin myös turvautumaan jonkin verran epätarkkaan tapaan tunnistaa korkein kohde. Koska tunnistettavat kappaleet olivat hyvin eri kokoisia rakenteeltaan poikkeavia, piti tunnistusalue määrittää suhteessa löydetyn kappaleen kokoon, ja korkeustieto laskettiin tämän alueen keskiarvosta. Mikäli kohteena olisi ollut vain yhden tyyppisiä kappaleita, olisi mittauksia tehtäessäkin voitu käyttää tarkemmin asetettuja mittausalueita ja saada täten tarkempia mittaustuloksia.



## LÄHTEET

- AIA (n.d.). *Glossary of Machine Vision Terms: Machine Vision*. Haettu 1.4.2019 osoitteesta <https://www.visiononline.org/market-data.cfm?id=73>
- AIA (n.d.). *About AIA - Global Vision Systems Trade Association*. Haettu 10.4.2019 osoitteesta <https://www.visiononline.org/mvo-content.cfm/machine-vision/About-AIA/id/81>
- AIA, EMVA, JIA, CMVU, VDMA (2018). *Guide to understanding machine vision standards*. Haettu 10.4.2019 osoitteesta <https://www.emva.org/wp-content/uploads/FSF-VS-Brochure-2018-A4-full.pdf>
- Bartels, J. (2016a). *White Paper: 2D or 3D Camera? Which 3D Camera Technology Fits Your Application?* Haettu 25.2.2019 osoitteesta [https://www.baslerweb.com/media/en/downloads/documents/white\\_papers/BAS1608\\_White\\_Paper\\_3D\\_Technologies.pdf](https://www.baslerweb.com/media/en/downloads/documents/white_papers/BAS1608_White_Paper_3D_Technologies.pdf)
- Bartels, J. (2016b). *White Paper: Applications for Time-of-Flight Cameras in Robotics, Logistics and Medicine*. Haettu 25.2.2019 osoitteesta [https://www.baslerweb.com/media/en/downloads/documents/white\\_papers/BAS1708\\_White\\_Paper\\_ToF-Applications.pdf](https://www.baslerweb.com/media/en/downloads/documents/white_papers/BAS1708_White_Paper_ToF-Applications.pdf)
- Basler AG, (n.d.). *Knowledge Base: What are color filters?* Haettu 1.4.2019 osoitteesta <https://www.baslerweb.com/en/sales-support/knowledge-base/frequently-asked-questions/what-are-color-filters/14989/>
- Basler AG, (n.d.). *Knowledge Base: How does the YUV color coding work?* Haettu 1.4.2019 osoitteesta <https://www.baslerweb.com/en/sales-support/knowledge-base/frequently-asked-questions/how-does-the-yuv-color-coding-work/15182/>
- Basler AG, (2018). *ToF GigE User manual (AW00133810000)*. Haettu 13.4.2019 osoitteesta <https://www.baslerweb.com/en/sales-support/downloads/document-downloads/>
- Bouchard, S. (2014). *What Are The Communication Protocols Used In Industrial Robotics?* Blogijulkaisu 13.5.2014. Haettu 25.4.2019 osoitteesta <https://blog.robotiq.com/bid/32559/What-Are-The-Communication-Protocols-Used-In-Industrial-Robotics>
- Buchón-Moragues, F., Bravo, J., Ferri, M., Redondo, J., & Sánchez-Pérez, J. (2016). Application of Structured Light System Technique for Authentica-

tion of Wooden Panel Paintings. *Sensors* 16(6). Haettu 6.4.2019 osoitteesta <https://doi.org/10.3390/s16060881>

Casio Computer Co. Ltd. (2019). *Right triangle Calculator*. Haettu 13.5.2019 osoitteesta <https://keisan.casio.com/exec/system/1273849674>

EMVA (n.d.). *Standards - GenICam - Introduction*. Haettu 10.4.2019 osoitteesta <https://www.emva.org/standards-technology/genicam/introduction-new/>

EMVA (n.d.). *About EMVA - Who we are*. Haettu 10.4.2019 osoitteesta <https://www.emva.org/about-emva/who-we-are/>

JIIA (n.d.) *About the JIIA*. Haettu 11.4.2019 osoitteesta <http://jiiia.org/en/about/outline/>

JIIA (n.d.) *The history of JIIA*. Haettu 11.4.2019 osoitteesta <http://jiiia.org/en/about/history/>

JIIA (2019) *IIDC2 Digital Camera Control Specification Version 1.2.0*. Haettu 22.5.2019 osoitteesta [http://jiiia.org/wp-content/themes/jiiia/pdf/standard\\_dl/ngcp/CP-001-2019.pdf](http://jiiia.org/wp-content/themes/jiiia/pdf/standard_dl/ngcp/CP-001-2019.pdf)

Khandare, S., Isalkar, A. (2014). A Survey Paper on Image Segmentation with Thresholding. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, Vol. 3, Issue. 1, January 2014, s.441–446. Haettu 17.4.2019 osoitteesta <https://ijcsmc.com/docs/papers/January2014/V3I1201477.pdf>

Kratky, A. (2018). *PhoXi® 3D Scanner in a Bin Picking Application*. Haettu 11.4.2019 osoitteesta <https://www.photoneo.com/technology/>

Lateral Engine Oy (2018). *R3DVi - Robot 3D Vision*. Haettu 3.4.2019 osoitteesta <https://www.lateralengine.com/en/r3dvi/>

Latimer, W. (2015). *3D Machine Vision Using Laser Triangulation*. Haettu 3.4.2019 osoitteesta <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/features/application-briefs/22464>

Matrox Imaging (2019). *Matrox Design Assistant X datasheet*. Haettu 15.4.2019 osoitteesta [https://www.matrox.com/imaging/media/pdf/products/software/da/design\\_assistant.pdf](https://www.matrox.com/imaging/media/pdf/products/software/da/design_assistant.pdf)

Marshall, D. (1994). *Introduction to Stereo Imaging -- Theory*. Haettu 5.4.2019 osoitteesta [https://users.cs.cf.ac.uk/Dave.Marshall/Vision\\_lecture/node11.html](https://users.cs.cf.ac.uk/Dave.Marshall/Vision_lecture/node11.html)

Midwest Optical Systems (n.d.). *Wavelength (Color) Separation*. Haettu 1.4.2019 osoitteesta <https://midopt.com/solutions/monochrome-imaging/wavelength-separation/>

Miclot, M. (2012). *White Paper: Ethernet for Machines and Robots*. Haettu 15.4.2019 osoitteesta <https://info.belden.com/hubfs/resources/knowledge/white-papers/ethernet-for-machines-and-robots.pdf>

Photoneo (2018). *3D Scanning Knowledge Base: PhoXi 3D scanners family*. Haettu 5.5.2019 osoitteesta [http://wiki.photoneo.com/index.php/PhoXi\\_3D\\_scanners\\_family](http://wiki.photoneo.com/index.php/PhoXi_3D_scanners_family)

Pipan, M., Adrovic, E., Herakovic, N. (2013). *Machine Vision Control of Industrial Robot Assembly via Serial Interface*. Haettu 15.4.2019 osoitteesta <https://www.researchgate.net/publication/281776927>

RobotIQ (2013). *Industrial Robot Communication Protocols*. Haettu 15.4.2019 osoitteesta <https://blog.robotiq.com/what-protocols-do-the-different-robots-use>

Schiffer, V. (2016). *The Common Industrial Protocol (CIP™) and the Family of CIP Networks (PUB00123R1)*. Haettu 15.4.2019 osoitteesta <https://www.odva.org/Publication-Download>

SmartRay GmbH (2016). *Automotive inspection: Tire-text reading*. Haettu 3.4.2019 osoitteesta <https://www.smartray.com/wp-content/uploads/2015/04/SmartRay-Automotive-Inspection1.pdf>

SmartRay GmbH (2018). *ECCO 95 Product datasheet*. Haettu 11.4.2019 osoitteesta [https://www.smartray.com/wp-content/uploads/2018/07/Datasheet\\_ECCO\\_95\\_Smartray.pdf](https://www.smartray.com/wp-content/uploads/2018/07/Datasheet_ECCO_95_Smartray.pdf)