

Opinnäytetyö (YAMK)

Ohjelmistotekniikka ja ICT

2020

Renita Johansson

Ville Katevuo

KÄSINLADONNAN OPTINEN TARKASTUS

Renita Johansson, Ville Katevuo

KÄSINLADONNAN OPTINEN TARKASTUS

Tuotannon moduulivalmistuksessa piirilevylle käsin ladottavien komponenttien tarkastus tehdään ihmissilmällä, mistä aiheutuu epävarmuutta ja epätarkkuutta. Viallisen piirilevymoduulin eteenpäin pääseminen puolestaan aiheuttaa turhaa työtä ja kustannuksia. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia ja etsiä moduulituotantoon sopiva edullinen ja monistettava automaattinen optinen tarkastusjärjestelmä, jolla varmistettaisiin käsinladottavien komponenttien paikallaanolo. Alkuoletus oli, että tehtävään sopisi parhaiten älykamera. Käytännön kokeilujen perusteella se ei kuitenkaan ollut paras ratkaisu erilaisten rajoitteidensa vuoksi. Työssä kehitettiin ja rakennettiin kuvattavalle kohteelle sopiva ulkopuolisista valoista häiriintymätön valaistus sekä sen jälkeen testattiin sekä 2D- että 3D-kameroita. Kameroista parhaiten haluttuun käyttötarkoitukseen sopi 2D-kamera, jossa oli tavallinen kameraoptiikka yhdistettynä älykkääseen ja monipuoliseen tietokoneella toimivaan ohjelmistoon. Tällä ratkaisulla saataisiin tutkittua lähes kaikki halutut komponentit ja se voisi olla helposti hyödynnettävissä myös muualla tuotannossa. Lisäksi optisen tarkastuksen tarpeita voisi tulevaisuudessa huomioida yhä enemmän myös piirilevy-suunnittelussa, jolloin ainakin osaan tarkastuskohteista saataisiin vielä lisää luotettavuutta.

Työn toisena osa-alueena kehitettiin juotosvikojen merkintä- ja keräysohjelmaa, jonka avulla uusissa piirilevyissä voitaisiin välttää jo aiemmin vastaan tulleita juotosongelmia. Sen tuloksena saatiin järjestelmä, jossa kosketusnäytöllä tehtävien merkintöjen avulla saadaan vikadataa tallennettua tietokantaan ja sieltä tarvittaessa koottua visuaalisesti havainnolliseen muotoon suunnittelun avuksi.

Monessa asiassa tuli esille tekoälyn kasvava merkitys. Optisessa tarkastuksessa tekoälyä on jo nyt mukana ja tulevaisuudessa se tuo varmasti mukanaan lisää uusia mahdollisuuksia ja toimintoja. Tämän lisäksi eri järjestelmien keräämien datojen hyödyntäminen voisi tuoda erilaisia synergiaetuja, joiden avulla virheitä voitaisiin välttää tai ne olisi ainakin mahdollista huomata aikaisessa vaiheessa.

ASIASANAT:

konenäkö, kuva, tekoäly, valaistus, älykamera, 2D, 3D

Renita Johansson, Ville Katevuo

OPTICAL INSPECTION OF MANUALLY ASSEMBLED COMPONENTS

Manually assembled components are inspected in production with the human eye which can lead to uncertainty and inaccuracy. If a defective printed circuit board module goes further in the production, it can cause additional costs and unnecessary work. The aim of the present study is to search and examine an inexpensive and duplicable automatic optical inspection system for manually assembled components. The initial presumption was that a smart camera would be the best device for this kind of inspection but after testing it turned out to be suitable for quite a limited use only.

In this study, ambient lights excluding photo shooting environment that included a functional illumination for the examined object were designed and built. Both 2D and 3D cameras were tested and investigated. A 2D camera optics combined to intelligent and versatile computer-controlled software turned out to be the best optical inspection system for this case. With this system it is possible to check almost every desired component. To get even more reliable inspection results, it would be reasonable to take optical inspection into account already in the drawing phase of the printed circuit board layout. The same inspection system could be utilized also elsewhere in production.

The other target of the study is to develop an idea for software that could collect information about the short circuits of solder joints or missing solder joints. The outcome was a touch screen -controlled system that collects data to a database. The information can be presented in a visually illustrative form afterwards.

The increasing significance of artificial intelligence came out in many contexts. It is part of optical inspection software already and it will definitely generate additional new features and possibilities in the future. In addition to this, combining data from different systems could create synergy that could enable noticing problems at an early stage.

KEYWORDS:

artificial intelligence, illumination, machine vision, picture, smart camera, 2D, 3D

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	6
1 JOHDANTO	8
2 KUVAN, KAMEROIDEN JA VALAISTUKSEN TEORIAA	11
2.1 Kuva ja kamera	11
2.1.1 Valo ja heijastuminen	11
2.1.2 Pikselit, resoluutiot	14
2.1.3 Sensorit	14
2.1.4 Sensorin ja sen pikselien koko	18
2.1.5 Optiikka	19
2.1.6 Valaistus	20
2.2 Älykamerat	27
2.2.1 Älykameran käyttökohteita	30
2.2.2 Kuvausympäristön optimointi	32
2.2.3 Kuvien analysointi	33
2.2.4 Kommunikointi kameran kanssa	34
2.3 3D-kuvaus	34
2.3.1 Lasertriangulaatio	34
2.3.2 Stereokuvaus	36
2.3.3 Strukturoitu valo	37
2.3.4 Time of Flight, (ToF) eli valon kulkuaikaan perustuva kuvaus	37
3 KEHITTÄMISTYÖN TOTEUTUS	40
3.1 Tarkasteltavan kohteen esittely	40
3.2 Eri kameroiden vertaileminen ja testaaminen	41
3.3 Valaistuksen ja kuvausympäristön suunnittelu sekä optimointi	42
3.4 Kuvien analysointi	44
3.5 Kommunikointi kameran kanssa	44
3.6 Testatut kamerat	44
3.6.1 Sick Inspector PIM60 (2D-kamera)	45
3.6.2 Matrox (2D-kamera)	48
3.6.3 Sick TriSpector1000 (3D-kamera)	54
3.7 Yhteenveto testatuista kameroista	62

3.8 Moduulin pohjapuolen aaltojuotostarkastus	63
4 POHDINTA	68
5 YHTEENVETO	73
LÄHTEET	74

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

AC	Tuoteperheen nimi.
ADC	A/D-muunnin, analogia-digitaalimuunnin (analog to digital converter). Laite, joka muuttaa analogisen signaalin digitaaliseen muotoon.
AOI	Automaattinen optinen tarkastus (automatic/automated optical inspection).
CCD	Digitaalikameroissa käytetty sensorityyppi (charge-coupled device).
CMOS	Digitaalikameroissa käytetty sensorityyppi (complementary metal oxide semiconductor).
CMYK	Värijärjestelmä, jossa värit muodostuvat neljästä väristä eli syaanista, magentasta, keltaisesta ja mustasta (cyan, magenta, yellow, key). Käytössä pääasiassa painoteollisuudessa.
FOV	Kuvausala (field of view) eli näkökenttä, jonka kamera näkee kerralla.
IR	Infrapuna (infrared). Sähkömagneettista säteilyä, joka sijoittuu aallonpituusspektrillä heti näkyvän valon yläpuolelle.
LED	Diodi, joka säteilee valoa, kun sen läpi johdetaan sähkövirtaa (light emitting diode).
PDM	Tuotetiedon hallinta (product data management). PDM-järjestelmä on tietojärjestelmä, jonka avulla tuotetietoa hallitaan.
px	Pikseli (pixel). Kuvapiste eli kuvan pienin yksittäinen osa.
QE	Kvanttihyötysuhde (quantum efficiency). Ilmaisimen herkkyyttä kuvaava suure, joka kertoo, kuinka suuri osuus siihen osuvista fotoneista havaitaan.
RGB	Värijärjestelmä, jossa värit muodostuvat kolmesta väristä eli punaisesta, vihreästä ja sinisestä (red, green, blue). Käytössä esimerkiksi laitteissa, joissa on näyttö.
SNR, S/N	Signaali-kohinasuhde eli hyötysignaalin suhde kohinan tasoon (signal-to-noise ratio).
SMD	Pintaliitoskomponentti, joka ladotaan piirilevyn pintaan (surface-mount device).
THD	Piirilevyn läpi ladottava komponentti (through-hole device).

ToF	Valon kulkuaikaan perustuva kuvausmenetelmä (time of flight).
USB	Sarjaväyläarkkitehtuuri, jonka avulla laitteisiin voidaan liittää oheislaitteita (universal serial bus).
VR	Virtuaalitodellisuus (virtual reality). Tietokoneen avulla luotu keinotekoinen ympäristö.
2D	Kaksiulotteisuus (two dimensional).
3D	Kolmiulotteisuus (three dimensional).

1 JOHDANTO

Tämän työn aiheena on sopivan, edullisen ja monistettavan kameraratkaisun löytäminen moduulituotantoon piirilevylle käsin aseteltavien läpiladottavien komponenttien tarkastukseen. Tavoitteena oli rakentaa kameran, valaistuksen sekä tarvittavat määrytykset, mittaukset ja tarkastukset sisältävä kuvausympäristö, jonka avulla voitaisiin tarkistaa, että kaikki komponentit ovat moduulissa oikeilla paikoillaan ja oikein asennettuina. Vaatimuksena oli tunnistaa kaikki käsin asennettavat piirilevyn läpi ladottavat THD-komponentit (thought-hole device) niiden fyysisestä koosta riippumatta. Lisäksi järjestelmän tuli olla riittävän edullinen, jotta se olisi monistettavissa useaan työpisteeseen, mahdollisesti myös tuotannon lopputuotekokoonpanon puolelle. Järjestelmän tuli olla myös sellainen, että sen avulla voitaisiin tarkastaa useita erilaisia moduuleita. Lähtökohtana työlle oli tutkia nimenomaan älykameroita, koska niiden oletettiin sopivan hyvin tähän hintaluokkaan. Tarkastukseen kuluvalle ajalle ei annettu tiukkaa aikarajaa, koska tarkastettava kohde ei liikkunut hihnalla, vaan oli tarkastuspaikalla jopa muutaman minuutin ajan työpisteen muusta ajankäytöstä johtuen. Uudella menetelmällä oli tarkoitus korvata ihmissilmän aiemmin tekemä työ. Lähtökohtana ei ollut alkaa itse kehittämään tunnistuksen tekevää ohjelmakoodia alusta asti, vaan löytää ja hyödyntää markkinoilla jo olevia ratkaisuja.

Työn aihe on tuotannon sujuvan toiminnan kannalta tärkeä ja kehittämisen arvoinen ja se nousi esille nimenomaan tuotannon kiinnostuksesta. Tuotantoprosesseja ja valmistusta yleensäkin on kehitetty lean-menetelmiä hyödyntäen jo usean vuoden ajan, joten turhien viiveiden aiheuttaminen niissä työvaiheissa, joissa ihminen vielä tekee käsityötä, näkyy tarpeettomina lisäkustannuksina ja hukan kasvamisena koko valmistusprosessissa. Mitä pidemmälle viallinen tuote tuotantoprosessissa pääsee, sitä enemmän se aiheuttaa turhaa työtä ja kustannuksia.

Työ koostuu teoreettisesta viitekehyksestä, jossa esitellään kameroiden toimintaa, valaistusta sekä kuvan perusteita. Varsinaisessa kehittämistyössä kuvaillaan työn etenemistä alkaen valaistuksen rakentamisesta kuvauskohteeseen erilaisten kameroiden ja ohjelmistojen toimivuuden testaamiseen. Työssä oli alun perin tarkoitus tutkia vain 2D-kameroita, mutta tilaisuuden tullen mukaan päätettiin ottaa myös 3D-kamera, jotta nähtäisiin sen mukanaan tuomat mahdollisuudet.

Täysin samankaltaisesta sovelluksesta ei löytynyt aiemmin tehtyjä opinnäytetöitä tai muita vertaisarvioituja tieteellisiä raportteja. Etenkin monet älykamasovelluksista perustuivat liukuhihnalla kulkevien muodoiltaan melko yksinkertaisten kappaleiden tunnistamiseen ja niistä viallisten löytämiseen sekä robotin avulla poimimiseen. Piirilevylle ladottujen komponenttien optiset tarkastukset taas olivat pääasiassa koneladonnan aikana ladontakoneen yhteydessä olevan kalliin AOI:n avulla tehtyjä. Tästä huolimatta tutkimamme aiheen kanssa samantapaista ongelmaa eli edullista, monistettavaa ja pienten yksityiskohtien erotteluun kykenevää kameratarkastusratkaisua oli kuitenkin käsitelty useammassakin löytämässämme julkaisuissa. Esimerkkeinä edullisien AOI-ratkaisuiden tutkimuksista voidaan mainita Ardhy ja Hariadin sekä Parakontanin ja Sawangsrin julkaisut, joissa molemmissa lähtökohtana on ollut rakentaa järjestelmä yhden piirilevyn tietokoneelle eli näissä tapauksissa Raspberry Pi:lle. Ohjelmiston pohjana oli käytetty avoimen lähdekoodin OpenCV-kirjastoa (Open Source Computer Vision Library). Ardhy ja Hariadi tutkivat, mikä olisi paras reunantunnistukseen perustuva algoritmi kuvassa olevien poikkeamien havaitsemiseen. Parhaaksi algoritmiksi osoittautui mukautuva gaussin kynnys (adaptive gaussian threshold), mutta silläkin on vielä omat rajoitteensa ja puuttensa. Parakontan ja Sawangsrin puolestaan kehittivät ratkaisua hyvin pienten kuparivuotojen havaitsemiseen reunantunnistuksen avulla. Tulokset olivat hyviä, mutta järjestelmä ei vielä ole täysin soveltuva tuotantokäyttöön. [1] [2]. Myös objektin tunnistamista kuvasta sen sijaintipaikasta riippumatta ovat tutkineet esimerkiksi Pramudita ja Hariadi. Tämäkin perustui Rasperry Pi:n ja avoimen lähdekoodin OpenCV-kirjaston hyödyntämiseen. Työn tulokset eivät kuitenkaan täysin vastanneet sen teorian mukaista toimintaa. [3]. Kuvantunnistusta oli myös käsitelty useassa tutkimuksessa, esimerkkeinä muun muassa Duanin, Chenin ja Sakekawan sekä Zhaon, Chengin ja Jinin työt. [4] [5]. Tutkimuksissa ei keskitytty niinkään valaistuksen optimointiin, vaan ongelmat keskittyivät kuvan prosessoinnin haasteisiin ja ongelmiin. Haasteiksi muodostuivat erityisesti pienten yksityiskohtien erottaminen luotettavasti. Duanin, Chenin ja Sakekawan työssä tutkittiin piirilevyn porauksessa käytettävän hyvin pienen poranterän mittausta kuvion luokittelun (pattern classification) avulla. Tulokset olivat hyvin luotettavia jo yksinkertaisellakin menetelmällä, mutta tutkittava kohdekin oli toisaalta melko yksinkertainen. Zhaon, Chengin ja Jinin tutkimuksessa puolestaan perehdyttiin National Instrumentsin NI Vision -nimisen konenäköjärjestelmän testaamiseen. Sillä saatiin luotettavia tuloksia, mutta tärkeä osa onnistumisessa oli esimerkiksi luotettavilla merkkipisteillä, joiden avulla tutkittavien komponenttien sijainnit voitiin selvittää tarkasti.

Aihe vaikutti siis kaiken kaikkiaan melko laajalta ja moniulotteiselta etenkin, jos halutun järjestelmän olisi lähtenyt suunnittelemaan itse alusta asti ilman merkittäviä kuvauskohteelle asetettavia rajoitteita. Tarvetta erilaisille optisille tarkastuksille näyttäisi kuitenkin olevan automatisaation, robotiikan ja tekoälyn yhä kehittyessä ja levittäytyessä laajempaan käyttöön. Kaupallisesta pienikokoisesta ja itsenäiseen käyttöön ladontakoneen ulkopuolellekin soveltuvasta AOI:sta esimerkiksi löytyi Marantz Electronicsin markkinoima työpöydälle sopiva 3D AOI. [6].

2 KUVAN, KAMEROIDEN JA VALAISTUKSEN TEORIAA

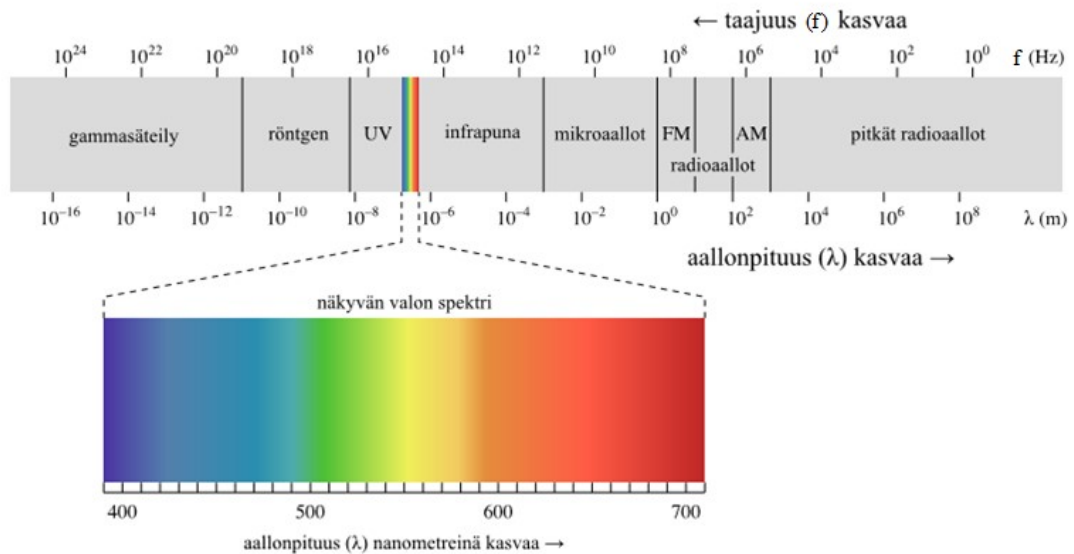
Työn teoreettinen viitekehys koostuu kuvaan, valaistukseen ja erilaisiin kameroihin liittyvistä asioista keskittyen erityisesti niihin osa-alueisiin, jotka työn käytännön toteutusta tehtäessä osoittautuivat tärkeimmiksi ja merkityksellisimmiksi. Yleisemmässä käytössä olevien 2D-kameroiden lisäksi käsitellään lyhyesti myös 3D-kameroiden erilaisia toimintaperiaatteita.

2.1 Kuva ja kamera

Lopulliseen kuvaan vaikuttavat hyvin monet asiat. Kameran optiikka, sensori, sijoittelu sekä asetukset ovat kaikki tärkeitä osa-alueita onnistuneen lopputuloksen saavuttamisessa. Lisäksi valaistuksella on todella suuri merkitys. Kameran valintaan ja valaistuksen suunnitteluun tulee kiinnittää riittävästi huomiota, sillä huonolaatuisen kuvan jatkoanalyysi voi olla mahdotonta, jolloin varsinainen päätehtävä voi jäädä kokonaan tekemättä.

2.1.1 Valo ja heijastuminen

Sähkömagneettinen säteily on valon nopeudella eli $3,0 \times 10^8$ m/s etenevää aaltoliikettä, jolla on aallonpituus, taajuus ja amplitudi. Sen laajaan spektriin eli eri aallonpituuksien muodostamaan kokonaisuuteen sisältyvät eri säteilylajit mukaan lukien ihmissilmälle näkyvä valo. Sähkömagneettisen säteilyn lajit on esitetty kuvassa 1.

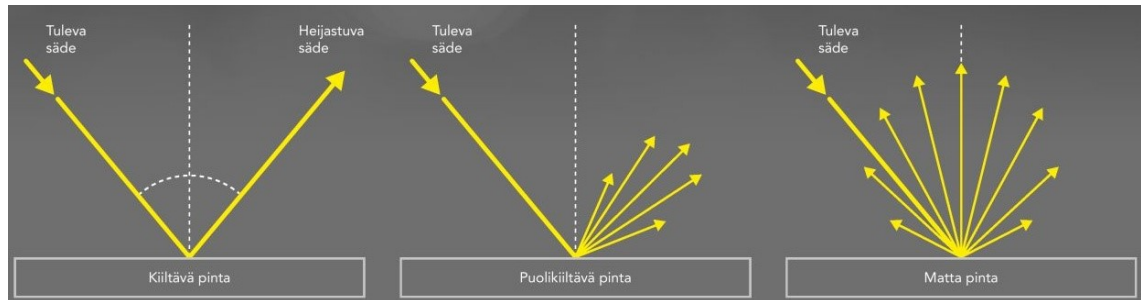


Kuva 1. Sähkömagneettisen säteilyn lajit. [7]

Kuten kuvasta 1 nähdään, näkyvän valon spektrissä eri aallonpituudet näkyvät eri väreinä. Valkoinen valo muodostuu kaikista noista aallonpituuksista. Ne on mahdollista saada eroteltua nähtäväksi hajottamalla valo esimerkiksi prisman avulla.

Jos spektri sisältää kaikki aallonpituuksia puhutaan jatkuvasta spektristä. Viivaspektrillä puolestaan tarkoitetaan spektriä, jossa on mukana vain tiettyjä aallonpituuksia.

Valon osuessa kohteen pintaan se voi joko heijastua takaisin osittain tai kokonaan, kulkeutua pinnan läpi tai absorboitua pintaan muuttuen lämmöksi. Heijastuminen voidaan jakaa vielä kolmeen pääryhmään sen mukaan, miten jakautuneena heijastuminen tapahtuu. Nämä tavat ovat suuntaheijastuminen, sekaheijastuminen ja hajaheijastuminen. Suuntaheijastuminen on puhtain heijastumistapa, jossa yhden-suuntaiset valonsäteet heijastuvat optisen peiliheijastumislain mukaan kuten kiiltävältä peilipinnalta. Hajaheijastuminen puolestaan tapahtuu matalla heijastumispinnalla, jolloin valo heijastuu tasaisesti kaikkiin suuntiin. Heijastuspinnan ollessa niin sanottu puolimatta puhutaan sekaheijastuksesta eli mukana on sekä suunta- että hajaheijastusta. Eri heijastusmuodot on esitetty kuvassa 2. [8] [9]



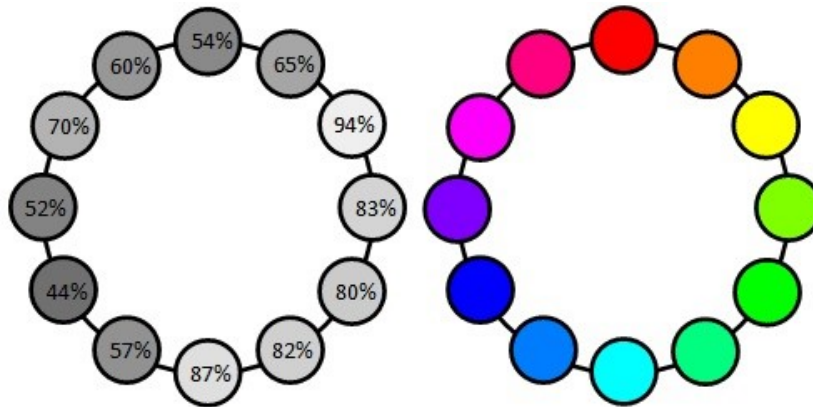
Kuva 2. Heijastusmuodot. [9]

Pinnalle voidaan määrittää heijastussuhde ρ [%], joka kertoo pinnalle osuvasta valosta takaisin heijastuvan osuuden. Se ei ole kuitenkaan tietyllä pinnalla aina vakio, sillä vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa pinnan väri sekä valon spektri ja sen tulosuunta. Taulukossa 1 on kerrottu esimerkkejä erilaisten pintojen heijastussuhteista. Kuten huomataan, heijastussuhde kertoo pinnan vaaleuden tasosta.

Taulukko 1. Erilaisten pintojen heijastussuhteita. [10]

Pinta	Heijastussuhde
Valkoinen	70...85 %
Vaaleat värit	noin 50 %
Tummat värit	noin 10 %
Betoni, uusi	40...50 %
Betoni, vanha	5...15 %
Tiili	10...30 %
Ikkuna	noin 10 %
Puinen pöytäpinta	35...50 %

Luminanssi L [cd/m^2] on pinnan valotiheyden määrittävä suure eli se kertoo pinnan kirkkauden. Koska näkeminen perustuu luminanssi- ja/tai värierojen havaitsemiseen, on sillä suuri vaikutus siihen, miten tarkasti ja kuinka nopeasti tutkittavia kohteita voidaan nähdä. Valaistusta suunniteltaessa on huomioitava koko tilan kaikkien pintojen luminanssit, jotta ympäristö on mahdollisimman optimaalinen haluttujen havaintojen tekemiseen. Oikeanlaista valoa on tultava oikeista suunnista, jotta tutkittava kohde saadaan valaistua mahdollisimman hyvin ilman häiritseviä heijastuksia. Kuten kuvasta 3 nähdään, on myös pinnan värisävyllä vaikutus luminanssiin. Valoisuutta saadaan lisättyä joko pintojen lisäämällä pintojen luminanssia tai vaalentamalla niiden väriä. [9]



Kuva 3. Pinnan värien heijastus prosentteina ja vaikutus luminanssiin. [11]

2.1.2 Pikselit, resoluutiot

Digitaalisen kuvan laadun määräytymisen tärkeimmät tekijät ovat resoluutio ja värisyvyys. Resoluutiolla tarkoitetaan kuvassa olevien neliönmuotoisten kuva-elementtien eli pikselien määrää. Pikselit muodostavat ruudukon, jossa jokaisella pikselillä on oma informaationsa eli värinsä. Mitä enemmän kuvassa on pikseleitä sitä tarkempi ja datamäärältään suurempikokoisempi se on. Kuvan koko ilmoitetaan pikselien kokonaismääränä leveys \times korkeus eli esimerkiksi 1920×1200 px, jolloin resoluutioksi saadaan 2,3 Mpx. [12] [13]

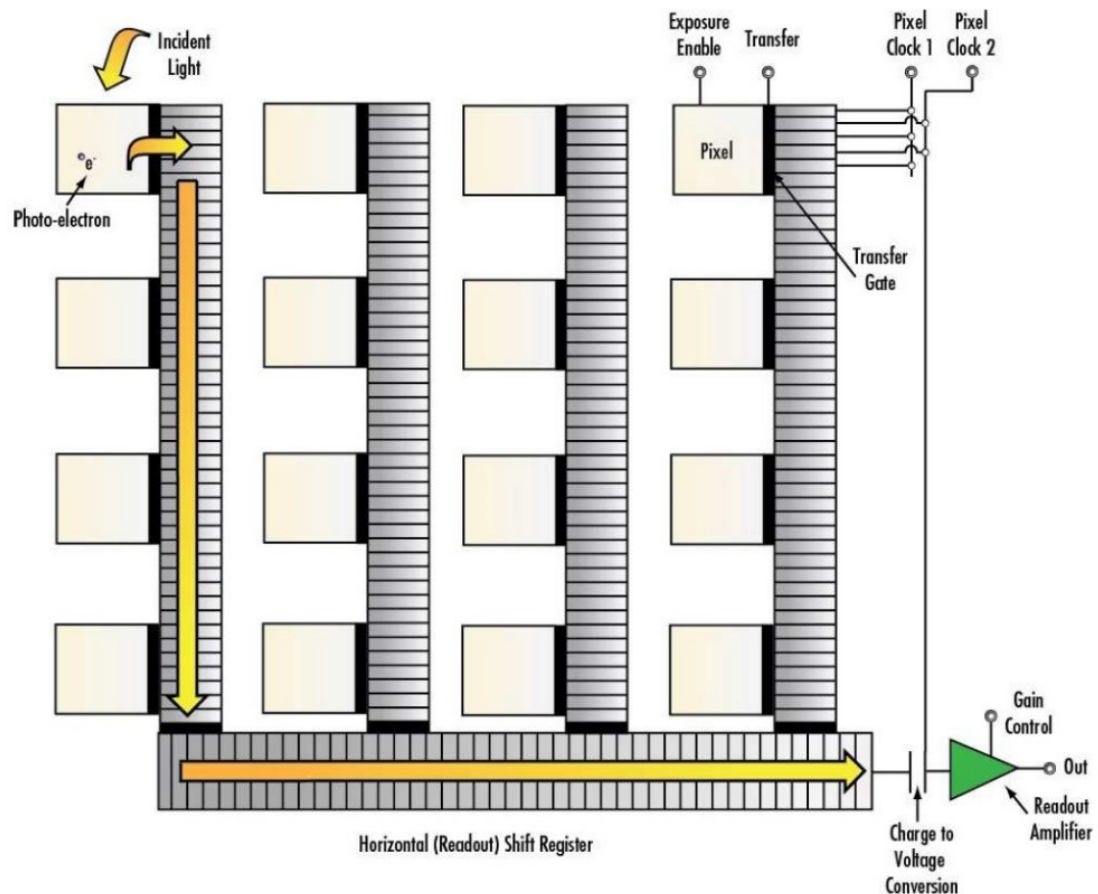
Värisyvyys eli bittisyvyys kertoo kuvan sävymäärän eli kuinka monta eri sävyä yksi pikseli voi saada. Mustavalkoisessa 1-bittisessä kuvassa sävyjä on vain kaksi ($2^1=2$) eli valkoinen (0) ja musta (1), kun taas 8-bittisessä harmaasävykuvassa sävyjä on jo $2^8=256$ kappaletta valkoisesta (0) eri harmaan sävyjen kautta mustaan (255). RGB-värikuvan tapauksessa 8-bittinen kuva koostuu kolmesta 8-bittisestä kanavasta, joilla kullakin värillä (punainen, vihreä, sininen) on $2^8 = 256$ sävyvaihtoehtoa. Tästä saadaan sävyjen kokonaismäärä eli $256 \times 256 \times 256 = 16,8$ miljoonaa sävyä. Toinen yleisesti käytössä oleva värijärjestelmä on CMYK, jossa jokainen väri muodostuu neljän päävärin eli syaanin, magentan, keltaisen ja mustan yhdistelmänä. [13] [14]

2.1.3 Sensorit

Eräs kameran suorituskyvyn kannalta tärkeä komponentti on sensori. Pääosa niiden markkinoista maailmassa on jakautunut vai muutaman valmistajan kesken. Sensori yksinään ei kuitenkaan määritä kameran suorituskyyä, vaan oheiselektronikalla voi olla

siihen suurikin vaikutus. Konenäköön käytettävissä kameroissa yleisimmin käytetyt sensorityypit ovat CCD ja CMOS. [15]

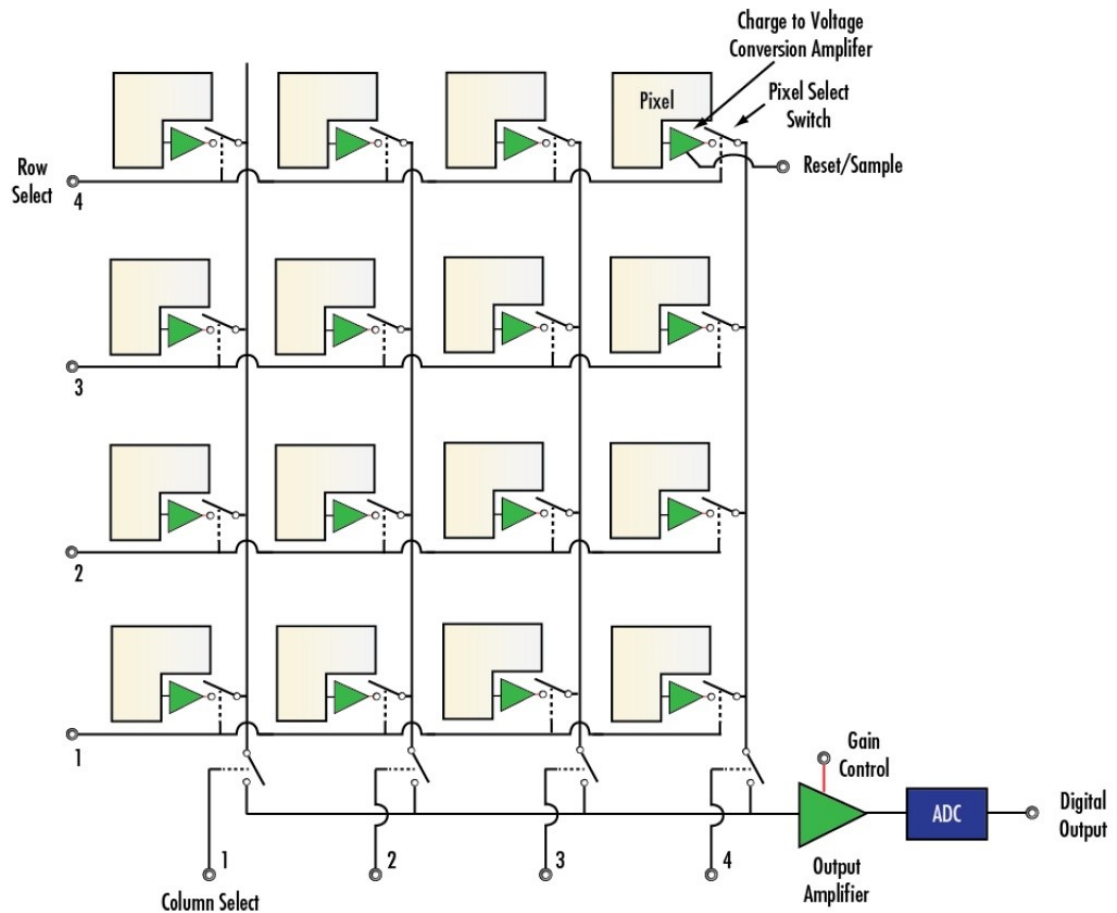
CCD (charge-coupled device) on Bell Labsissa Yhdysvalloissa vuonna 1969 kehitetty sensorityyppi. Se oli aikoinaan hallitseva tähtikuvauksessa ja konenäköön perustuvissa tarkastuksissa. CCD-sensorissa on piisirulle aseteltuna valoherkkiä alueita eli pikseleitä. Valon osuessa pikseleihin se muuttuu varauksiksi, jotka kuljetetaan sarjarekisterien kautta ja muunnetaan jännitteiksi. Lopuksi analoginen signaali syötetään vahvistimen läpi ja muutetaan digitaalseksi A/D-muuntimella. CCD-sensorin toimintaa havainnollistetaan kuvassa 4. Suurin osa signaalin käsittelystä tehdään varsinaisen sensorin ulkopuolella oheiselektronikan avulla. [15] [16]



Kuva 4. CCD-sensorin toimintaperiaate. Sensorilla on yksi yhteinen A/D-muunnin ja vahvistin, jonne kaikki varaukset kuljetetaan sarjarekisterien kautta. [15]

Toisen sensorityypin eli CMOS:n (complementary metal oxide semiconductor) kehitti puolestaan vuonna 1963 amerikkalainen Frank Wanlass. Patentti sille myönnettiin vuonna 1967, mutta yleiseen käyttöön se tuli kuvaussovelluksissa vasta 1990-luvulla.

CCD-sensorista poiketen CMOS-sensorissa varaukset muutetaan jännitteiksi jo heti pikselin yhteydessä, mikä nopeuttaa sensorin toimintaan. Haittapuolena on kuitenkin muun muassa kohinan kasvaminen ja herkkyuden pieneneminen. CMOS-sensorin toimintaa on esitetty kuvassa 5. [15] [16]

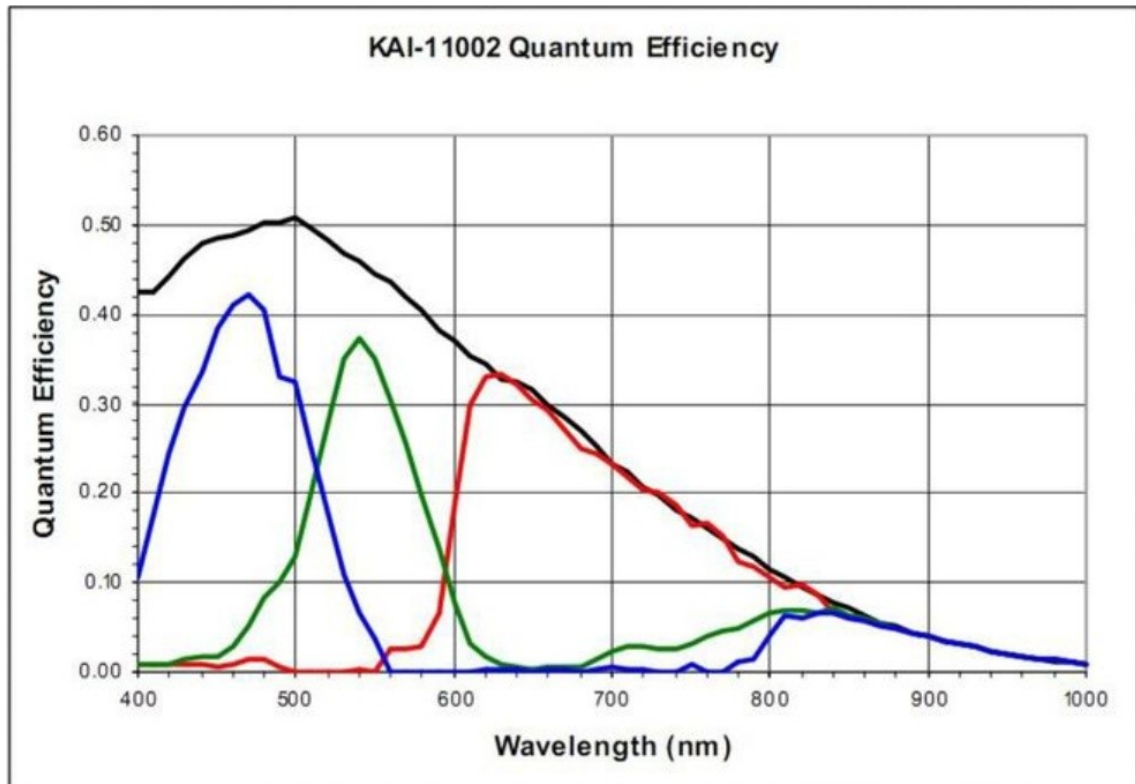


Kuva 5. CMOS-sensorin toimintaperiaate. Varaukset muutetaan jännitteiksi jo jokaisessa pikselissä. [15]

Koska CCD-sensori on tyypiltään analoginen, tarvitsee se ympärilleen toimiakseen tilaa vievää oheiselektroniikkaa huomattavasti enemmän kuin digitaalinen CMOS-sensori. Samoin suurempi tehonkulutus ja siitä aiheutuva lämpeneminen ovat CCD:n heikkouksia.

Sensoreihin liittyy termi kvanttihyötysuhde (quantum efficiency, QE). Sillä tarkoitetaan sensorin eli ilmaisimen herkkyyttä eli osuutta, joka ilmaisimeen osuvista fotoneista havaitaan. Kvanttihyötysuhde riippuu paitsi sensorista niin myös valon aallonpituudesta. [17]

On olemassa sekä monokromaattisia eli eri harmaansävyjä valkoisesta mustaan näkeviä, että kaikkia värejä näkeviä sensoreita. Värisensorissa tarvitaan värisuodinmatriisi, jotta eri värit (RGB tai CMYK) saadaan eroteltua ja näkyviin. Värisuodinmatriisi kuitenkin heikentää aina kameran herkkyyttä ja huonontaa signaali-kohinasuhdetta (SNR). Kuvassa 6 nähdään kvanttihyötysuhde-esimerkki yhden Kodak-sensorin monokromaattisella ja väriverversiolla. [18]



Kuva 6. Saman Kodak-sensorin monokromaattisen ja väriverсион kvanttihyötysuhteet. [19]

Jokaisella pikselillä on maksimikapasiteetti (full well capacity). Se kertoo lukumääränä, kuinka monta elektronia yksi pikseli voi ottaa vastaan. Mitä suurempi pikseli on, sitä suuremman elektronimäärän se voi rekisteröidä. Suurempi kapasiteetti mahdollistaa myös suuremman herkkyyden ja paremman signaali-kohinasuhteen. [16]

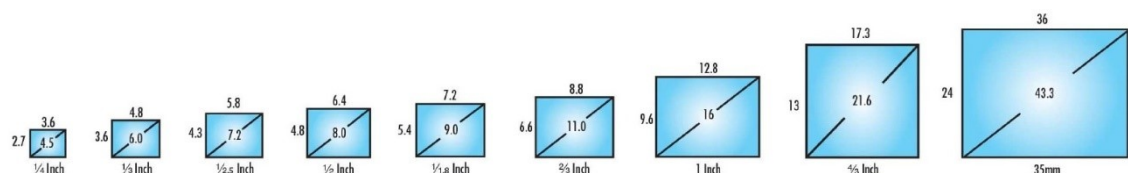
Molemmilla sensortyypeillä on omia heikkouksiaan. CCD-sensoreissa saattaa tapahtua pikselin saturoitumista, jolloin varauksia leviää myös viereisiin pikseleihin. Kuvassa tämä näkyy ylivalottuneita kirkkaina alueina. Toinen CCD-sensorin ongelma on varausten leviäminen pystysuuntaiseen sarjarekisteriin, jolloin kuvaan tulee näkyviin ylivalottunut kirkas pitkä viiva. CMOS-sensorissa voidaan puolestaan nähdä mekaanisen sulkimen

(global shutter) aiheuttamaa vääristymää kuvattaessa nopeasti liikkuvia kohteita lyhyillä suljinajoilla. Se johtuu siitä, että valotus tehdään rivi kerrallaan eli valotusten kokonaismäärä on sama kuin pikselirivien määrä. [20] [21]

Kuvasensorit voivat olla joku edellä esitetyn kaltaisia matriisisensoreita, joissa pikselit on sijoitettu peräkkäin ja vierekkäin, tai viivasensoreita, joissa kaikki pikselit ovat vierekkäin. Sopivan tyyppin valinta riippuu kuvauskohteesta ja sovelluksesta. Viivasensoreita käytetään esimerkiksi paperiteollisuudessa liikkuvan rainan laadun tarkastamisessa. Matriisisensorit puolestaan sopivat hyvin sellaiseen tarkastamiseen, jossa halutaan kuvata kerralla laajempi alue.

2.1.4 Sensorin ja sen pikselien koko

Konenäkösovelluksissa käytettävien kameroiden sensorit ovat perinteisesti olleet suuria, kun taas tavallisissa kameroissa on käytetty pienempiä ja edullisempia sensoreita. Sensorikoolla on merkittävä vaikutus kameran näkökenttään (FOV, field of view), sillä objektiivin pysyessä kiinteänä saadaan suuremmalla sensorilla laajempi FOV kuin pienemmällä sensorilla. Täyden koon sensorista (full frame) puhuttaessa tarkoitetaan kokoa 36 mm × 24 mm. Sitä, kuten muitakaan kokoja, ei ole varsinaisesti standardoitu, vaan ne ovat muodostuneet teollisuuden käyttämiksi vakioksi. Koosta puhuttaessa käytetään yleisesti tuumamittoja jättäenä historian ”putkikameroista”. Kuvassa 7 on esimerkkejä erikokoisista sensoreista. Ne ovat kaikki suorakaiteen muotoisia, ei neliöitä. [15] [22] [23]

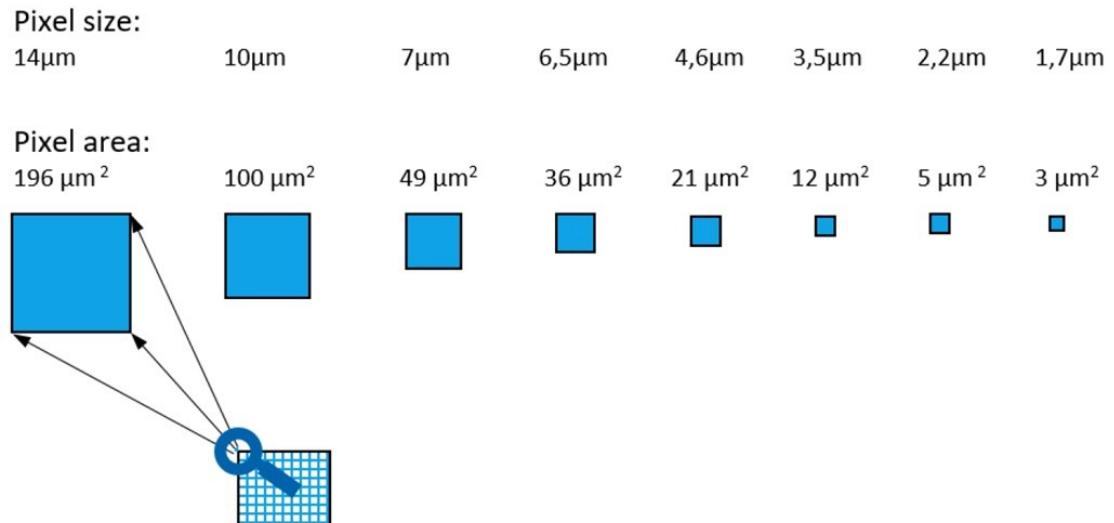


Kuva 7. Kameroiden standardisensorikokoja. [15]

Sensorin koko tulee huomioida myös objektiivia valittaessa, jotta koko sensorin ala saadaan käyttöön.

Sensorin koko ei suoraan kerro siinä olevien pikseleiden määrää, vaan määrä vaihtelee sensorikohtaisesti. Suuri määrä ei aina välttämättä ole paras, koska se voi tuoda mukanaan myös haittoja. Pikseleiden lisääminen parantaa tarkkuutta, mutta sensorin

koon pysyessä samana niiden koko pienenee, jolloin herkkyys ja SNR huononevat. Pienet pikselit voivat tuoda omat haasteensa myös käytettävälle optiikalle. Sopivan pikselimäärän sensori kannattakin valita käyttökohteen mukaan niin, että resoluutio on juuri sopiva tarkoitukseen. Tällöin ei makseta turhaan liian suuresta resoluutiosta. Tyypillisimpiä teollisuudessa käytössä olevien kamerasensorien pikselikokoja on esitetty kuvassa 8. [20]



Kuva 8. Teollisuudessa käytössä olevien kamerasensorien tyypillisimpiä pikselikokoja. [22]

2.1.5 Optiikka

Kameran optiikka muodostuu objektiivista, mahdollisista optisista suodattimista sekä yleensä myös himmenninaukosta ja sulkimesta. Objektiivi on linssi, jonka kautta valo tulee sensorille. Suodattimilla puolestaan voidaan vaikuttaa sensorille pääsevään valoon. Erilaisia suodatintyyppejä ovat esimerkiksi värisuodattimet ja infrapunasuodatin. Objektiivit voidaan jakaa polttovälin perusteella tele-, laajakulma-, kalansilmä- ja zoom-objektiiveihin. Teleobjektiivit ovat polttoväliltään suurimpia ja niiden kuvakulma on kapein. Laajakulmaobjektiiveissa puolestaan on suuri kuvakulma ja pieni polttoväli. Todella laajakulmaisista objektiiveista kutsutaan kalansilmiksi niiden kuvakulman ollessa jopa 180°. Himmenninaukolla säädetään valotusta ja syvyysterävyyttä. Aukon koon eli objektiivin valovoimakkuuden kertoo F-arvo. Mitä pienempi F-arvo on, sitä valovoimaisempi objektiivi on. Suuri aukko aiheuttaa kapean syvyysterävyuden, pieni laajan. Sulkimen avulla aukosta voidaan päästää valoa läpi juuri halutun pituinen aika.





















F-arvon lisäksi valovoimaan vaikuttavat myös optiikan eri elementtien valonläpäisykyvyt eli tapahtuuko niissä heijastuksia tai muuta absorboitumista. [18]

Optiikkaa valittaessa tulee huomioida kuvaussovelluksen vaatimukset ja tarpeet. Sopivalla optiikkavalinnalla kuvattavasta kohteesta saadaan esille juuri haluttuja asioita, jolloin kuvan jatkoanalysointi onnistuu paremmin. Monissa kameroissa optiikka on myös vaihdettavissa, mikä lisää monikäyttöisyyttä.

2.1.6 Valaistus

Valaistuksella on erittäin suuri merkitys onnistuneen kuvauslopputuloksen saavuttamisessa, eikä sen puutteita välttämättä voida korjata enää jälkikäteen kuvankäsittelyllä. Kullekin kuvauskohteelle parhaan valaistuksen valintaan vaikuttavat olennaisesti käytettävä kuvaustekniikka, kuvattava kohde sekä sen sijoittuminen kuvauspaikalla. Riittävän kontrastin aikaansaamiseen voi olla monia vaihtoehtoja, mutta tärkeintä on löytää oikea valaistus ennen kameran suodattimia. Valaistusta suunnitellessa täytyy miettiä, onko kohteeseen suunnattu ja siitä heijastava valo paras vai tarvitaanko läpivalaistusta, jossa valo tuodaan kuvattavan kohteen läpi. Valo voi olla myös tietyn muotoinen tai strukturoitua eli sisältää tunnetun kuvion.

Valaistuksen suunnittelu aloitetaan tutkimalla kuvattavan kohteen väriä ja heijastavuutta. Mustavalkosensoria käytettäessä vastavärit antavat parhaan kontrastin. Eri aallonpituuksien värit ja niiden vastavärit on esitetty kuvassa 9.

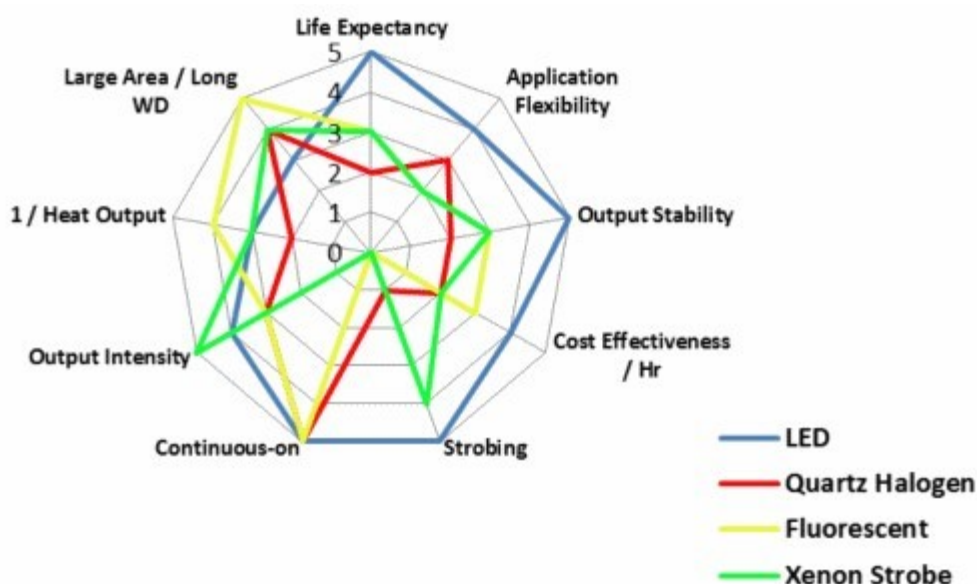
Light Absorbed			Perceived Complementary (Subtraction) Color	
Wavelength (nm)	Color			
400-435	Violet		Green-yellow	
435-480	Blue		Yellow	
480-490	Green-blue		Orange	
490-500	Blue-green (cyan)		Red	
500-560	Green		Purple (magenta)	
560-580	Yellow-green		Violet	
580-595	Yellow		Blue	
595-605	Orange		Green-blue	
605-650	Red orange		Blue-green (cyan)	
650-750	Red		Green	

Kuva 9. Eri aallonpituuksien värit ja niiden vastavärit. [24]

Esimerkiksi punaista valoa käyttämällä saadaan punaiset kohteet näkymään vaaleina ja vihreät kohteet tummina.

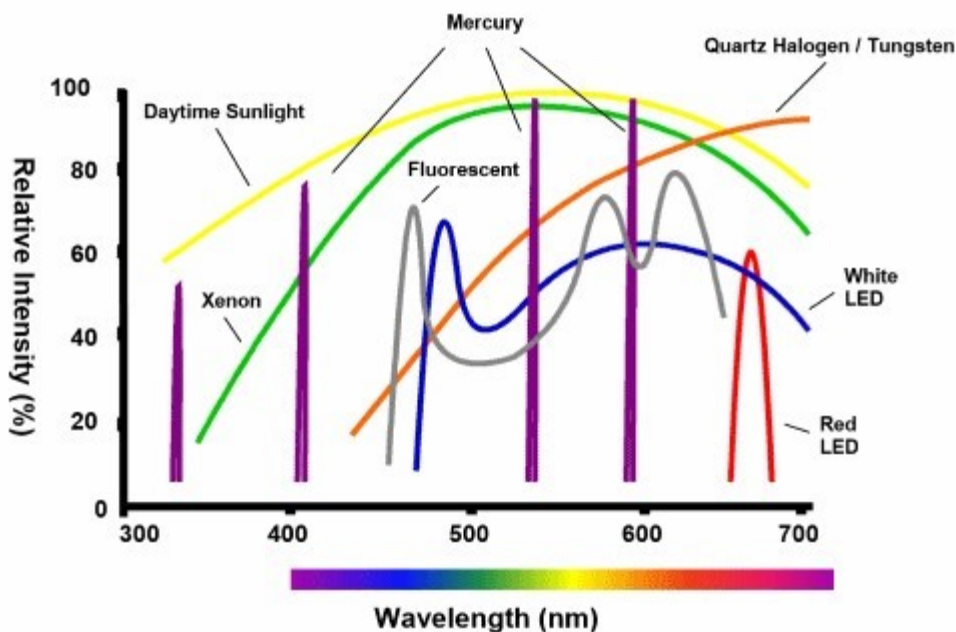
Sopiva valon väri valitaan kuvauskohteen mukaan. On mahdollista käyttää myös eri värisiä suodattimia, jos halutaan estää tai sallia jonkun tietyn värin pääsy sensorille. Lisäksi kuvattavan kohteen aiheuttamilla heijastumilla ja pinnan materiaalilla voi olla hyvinkin suuri vaikutus valaistukseen ja valon väriin. Myös taustan kontrasti vaikuttaa lopputulokseen. Käytetyn valon virkistystaajuuden pitää olla vähintään 5-kertainen kuvaustaajuuteen nähden, jotta kuvissa ei näy välkkymistä. Myös ympäristön valaistukseen täytyy kiinnittää huomiota ja se tulisi saada mahdollisimman vakaaksi ja muuttumattomaksi – muuten esimerkiksi aurinkoisena päivänä kuvat ovat hyvin erilaisia kuin pilvisenä. Toinen vaihtoehto on rakentaa kuvausympäristö niin suljetuksi, että ulkopuolinen valaistus ei siihen pääse vaikuttamaan. Tällöin koko kuvauspaikka voidaan myös tarvittaessa helpommin siirtää muualle. Myös välkkyvän voimakkaan strobo-valon käyttö eliminoi ympäristön valaistuksen vaikutusta, mutta se ei sovellu esimerkiksi useimpiin värikamerasovelluksiin.

Sopivaa valolähdetyyppiä valittaessa kannattaa kiinnittää huomiota niiden ominaisuuksiin sekä vahvuuksiin ja heikkouksiin. Konenäkösovelluksissa yleisimmin käytettävät tyypit ovat LED, halogeeni, loisteputki ja ksenon. Niiden ominaisuuksia on vertailtu kuvassa 10.



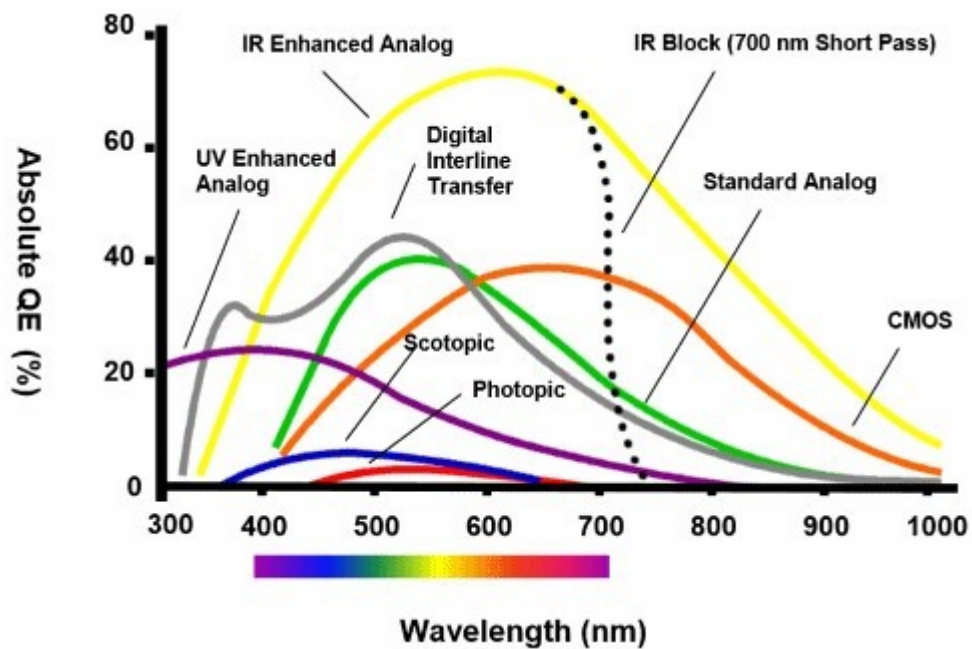
Kuva 10. Valolähdetyyppien vertailua. [25]

LED-tekniologia on kehittynyt viime vuosina paljon, mutta se ei kuitenkaan ainakaan vielä sovellu kaikkiin käyttökohteisiin. Parhaan lopputuloksen saaminen saattaa myös edellyttää usean eri valolähdetyypin käyttöä. Kuvassa 11 nähdään, miten intensiteetti vaihtelee aallonpituuden mukaan eri valolähteillä. Osa lähteistä on tarkoitettu tuottamaan valoa vain tietyllä hyvin kapealla aallonpituudella, kun taas osa kattaa vaihtelevalla intensiteetillä hyvinkin laajan aallonpituusalueen.



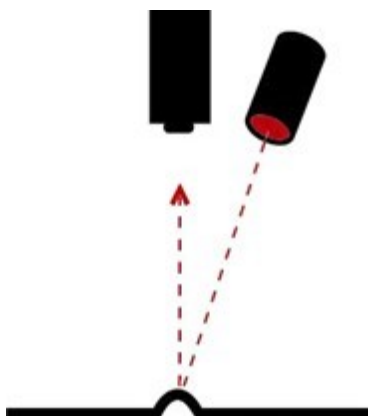
Kuva 11. Valolähdetyyppien intensiteetin vaihtelu eri aallonpituuksilla. [25]

Erityyppisillä kamerasensoreilla on kaikilla omanlainen kvanttihyötysuhde, kuten kuvasta 12 nähdään. Valolähteen ja sensorin valintoja ei siis kannata tehdä erillisinä, vaan on mietittävä kokonaisuutta, jotta järjestelmä saadaan käyttöön mahdollisimman tehokkaasti.



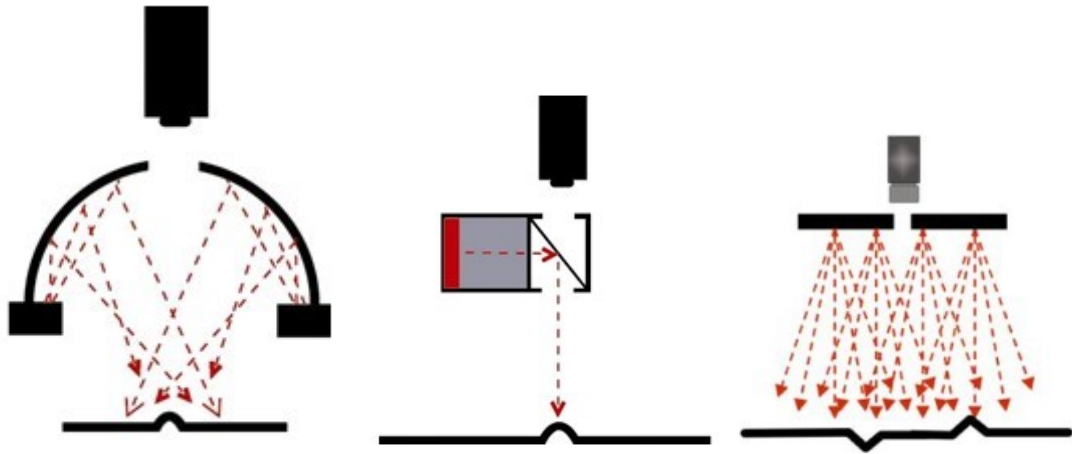
Kuva 12. Kameran sensorien kvanttihyötysuhteita eri aallonpituuksilla. [25]

Valon voi kohdistaa kuvattavaan kohteeseen eri tavoin ja eri suunnista. Seuraavassa on esitelty tarkemmin eri valaistustapoja. Kuvassa 13 on esimerkki yleisimmästä valaistuksesta eli suorasta suunnatusta valosta (partial bright field lightning, directional lightning). Siinä valolähde on yleensä pistemäinen ja yhdestä suunnasta tuleva. Tätä valoa voidaan kutsua myös osittaisen kirkkaan kentän valoksi. Suoran valaistuksen ongelmana saattava olla heijastukset, etenkin, jos kuvattava kohde on pinnaltaan kiiltävä.



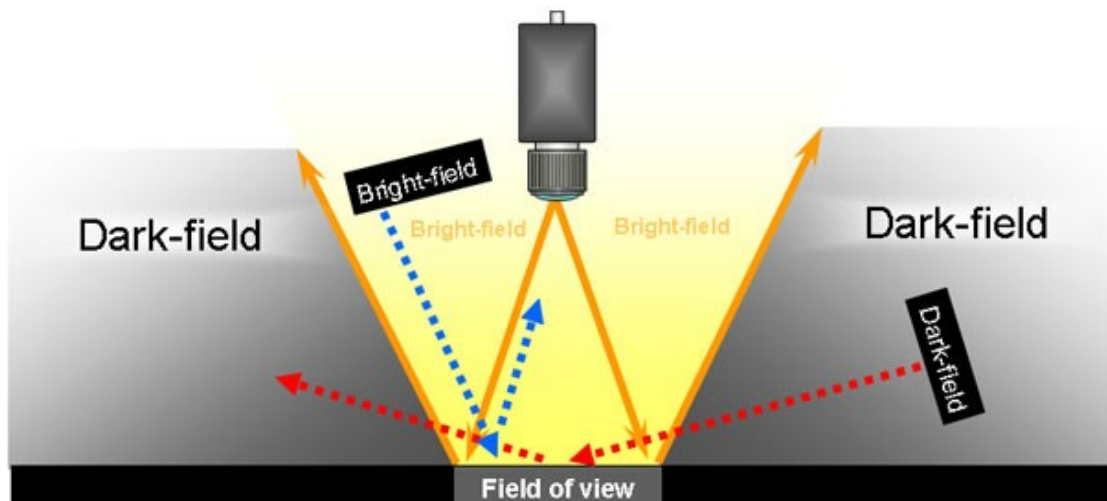
Kuva 13. Suora valaistus. [25]

Diffuusilla eli täyden kirkkaan kentän valolla (diffuse lightning, full bright field lightning) tarkoitetaan puolestaan hajavalaistusta. Siinä valo tulee heijastuen ja useista eri suunnista, jolloin se sopii erityisesti kiiltävien kuvauskohteiden valaisuun, koska suoraan kameraan osuu vähemmän heijastusta. Heijastinpinnat voivat olla joko suoria tai vaikka puolipallon muotoisia. Diffuusin valon esimerkkejä on esitetty kuvassa 14.



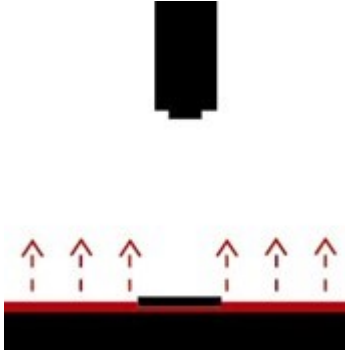
Kuva 14. Diffuusi valaistus. [25]

Tumman kentän valaistuksella (dark field lightning) tarkoitetaan tilannetta, jossa valot tulevat kohteeseen sivusuunnasta niin pienellä kulmalla, että ne eivät heijastu suoraan kameraan. Kuvassa 15 on havainnollistettu tumman ja kirkkaan kentän valaistukset eroa.



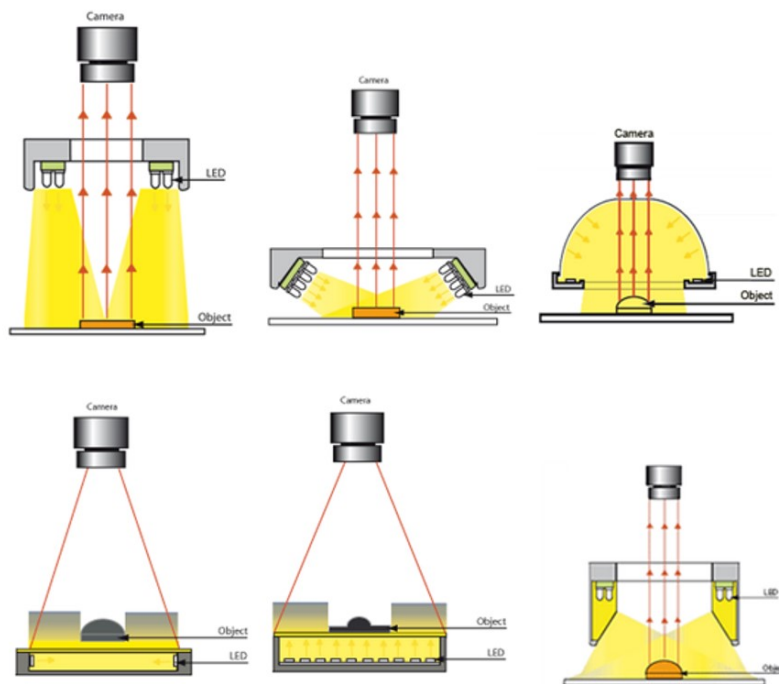
Kuva 15. Tumman ja kirkkaan kentän valaistuksen ero. [26]

Joskus on tarve tarkastella kuvattavan kohteen silhuettia, jolloin paras valaistustapa on taustavalaistus. Siinä valo on kohteen alla, jolloin varsinainen kohde näkyy tummana kirkasta taustaa vasten. Kuvassa 16 on esimerkki taustavalaistuksesta.



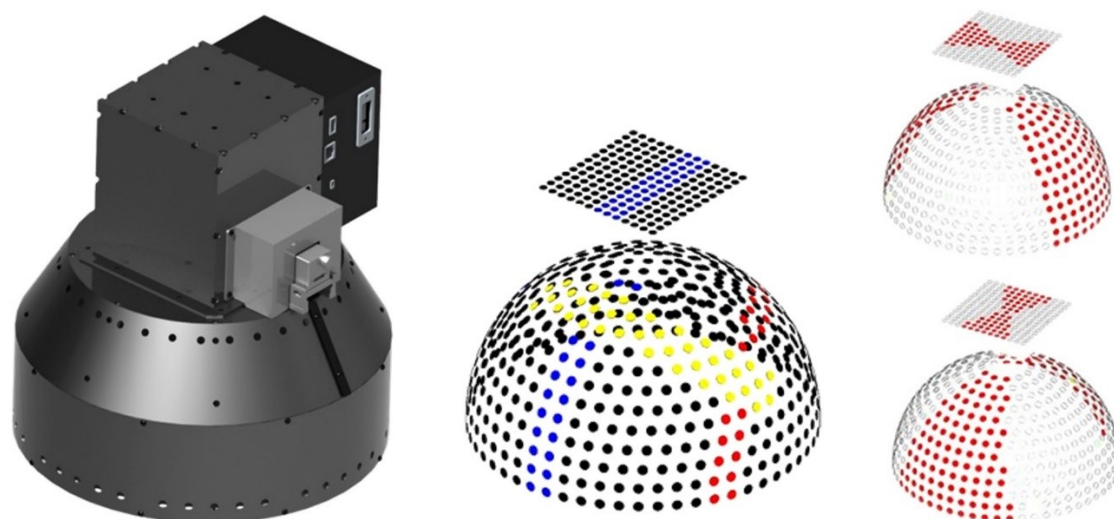
Kuva 16. Taustavalaistus. [25]

Käytetyt valot voivat olla joko yksittäisiä valolähteitä tai useasta valosta koostuvia ryhmiä. Markkinoilta löytyy paljon erilaisia valmiita valaistuskokonaisuuksia eri valaistuskulmilla ja erilaisiin käyttötarkoituksiin. Monet ratkaisut ovat niin sanottuja rengasvaloja, joissa useat valolähteet ovat symmetrisesti renkaan muodossa kameran ympärillä valaistakseen kohdetta joka puolelta. Kuvassa 17 on esimerkkejä erilaisista kaupallisista valoista.



Kuva 17. Erilaisia valmiita valoja. [27]

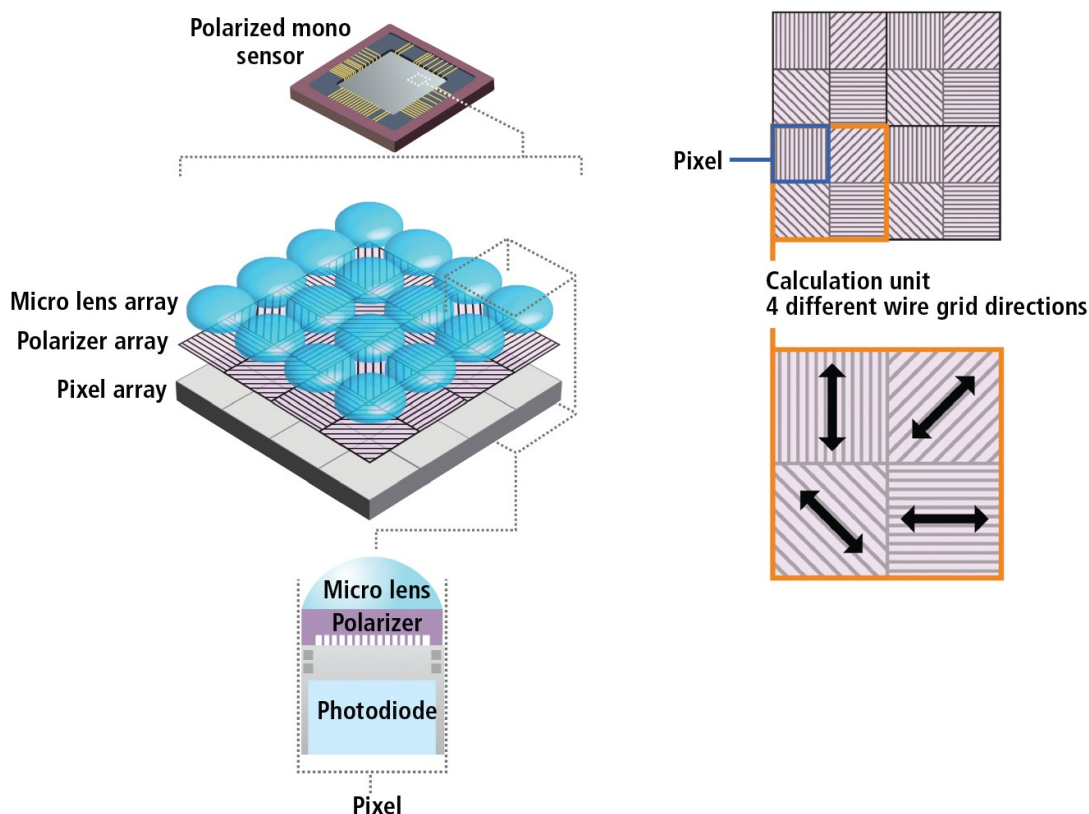
LED-valot mahdollistavat hyvin monenlaisten ja monikäyttöisten innovatiivisten valaistusratkaisujen kehittämisen. Yksi kaupallinen esimerkki tästä on kuvassa 18 esitetty valaisin, jossa on kupolin muotoisella sisäpinnalla lähes 700 LEDiä. Niiden kaikkien kirkkautta ja värisävyä voidaan säätää yksilöllisesti. Lisäksi voidaan valita, mitkä LEDeistä ovat päällä ja mitkä pois, jolloin valolähteen malli voidaan säätää juuri halutunlaiseksi. [28].



Kuva 18. Kaupallinen LED-valaisin, jolla voidaan toteuttaa monia erilaisia valaistusmalleja. [28].

Edellä kuvatut valaistusvaihtoehdot sopivat hyvin kameralle, jossa on matriisisensori. Kuitenkin joissain sovelluksissa, esimerkiksi paperirainaa kuvattaessa, voi viivakamera sopia tarkoitukseen paremmin. Tällöin valaistuksenkin tulee olla sille suunniteltu eli viivamainen ja koko kuvausalan kattava.

Tavallisesti valo sisältää kaiken suuntaisia valoaaltoelementtejä eli sitä kutsutaan polarisoimattomaksi valoksi. Joskus käytettävä valo kannattaa parhaimman kuvauslopputuloksen saavuttamiseksi suodattaa polarisaatiosuodattimen läpi. Tällöin läpi pääsevät vain tietyn suuntaiset valoaallot. Suodattimia voidaan asentaa suoraan valolähteeseen, kameran objektiivin eteen tai jopa suoraan kuvasensorille pikselikohtaisesti. Optisissa tarkastuksissa suodatin on hyvä olla sekä valolähteen että kameran puolella. Sopiva suodatin tai suodatinyhdistelmä kannattaa valita aina käyttökohteen mukaan. Kuvassa 19 on esimerkki kuvasensorista, jossa jokaisella pikselillä on oma suodattimensa.



Kuva 19. Kuvaseensori, jossa halutunlaiset polarisaatiosuodattimet on lisätty jo valmistusvaiheessa suoraan jokaiselle pikselille valodiodin ja linssin väliin. Tällä tavalla pystytään paremmin mukautumaan erilaisiin valoheijastuksiin ja saavuttamaan hyvä kuvanlaatu heijastuksista huolimatta. Neljä pikseliä muodostaa yhden kokonaisuuden, jossa on neljä erilaista polarisaatiosuodatinta. Heijastus saadaan poistettua, jos nelikosta yksi pikseli saa heijastumattoman kuvan. [29]

2.2 Älykamerat

Älykameralla tarkoitetaan laitetta, jossa sekä kuvaaminen että kuvien analysointiin liittyvät toiminnot on yhdistetty samaan laitteeseen. Se pitää sisällään kamerasensorin, mahdollisen kuvausvalon, prosessorin, muistin, ohjelmiston ja liikennöintiin liittyvät kytkennät. Kaikki tämä on paketoitu hyvin suojaan yhden kotelon sisälle. Älykameran yksi heikkous on päivittäminen tai laajentaminen, koska se voi olla vaikeaa tai jopa mahdotonta. Pahimmassa tapauksessa koko laite on vaihdettava uuteen, jos haluttujen ominaisuuksien muokkaaminen ei onnistu. On olemassa myös muokattavampia älykameroita, joihin voi vaihtaa esimerkiksi objektiivin tai valaistuksen, mutta usein modulaarisuus nostaa laitteen hintaa. Sopivien vaihto-osien määrä voi myös olla rajallinen, jos yhteensopivia ovat vain tietyn valmistajan osat. Kameran ohjelmoiminen

tapahtuu joko erillisellä laitteella, esimerkiksi tietokoneella kytketyllä kameraan, tai etäyhteyden kautta suoraan verkon yli. Ohjelmoinnin jälkeen kamera toimii itsenäisesti siihen syötetyn koodin mukaisesti. Kuvassa 20 on nähtävissä älykameran perusrakenne.



Kuva 20. Älykameran osat, Sick PIM60 [30]

Älykameroiden yleisin käyttöympäristö on teollisuudessa ja siksi ne ovat usein hyvin suojakoteloituja ja mekaanisesti suojattuna. Myös laitteeseen kiinnitettävät liittimet ja kaapeloinnit ovat lukittavia sekä suojattuja. Eri käyttöympäristöihin löytyy erilaisia suojausluokkia, kuten roiskevesi, pöly ja säteily. Kuvissa 21 ja 22 on esimerkit pölysuojatussa ja lämpösuojatussa mekaniikassa olevista kameroista.



Kuva 21. Sick Inspector PIM60 eli perusmallin älykamera pölytiivissä IP67 kotelossa. [31]



Kuva 22. Sick Dx1000 eli erikoissuojattu etäisyysanturi lämpösuojatussa kotelossa. Vastaavanlaiseen koteloon voidaan laittaa myös älykamera. Tällaisia tarvitaan esimerkiksi metallin valmistuksessa. [32]

Älykamerat ovat kooltaan melko kompakteja, jolloin myös niiden laskentateho on hyvin rajallinen, eikä niissä siksi voida käyttää hyvin tarkkoja usean megapikselin kameroita. Yleisimmät käytössä olevat resoluutiot ovat 320×240 px, 640×480 px ja 1024×768 px. Lisäksi markkinoille on tullut Full HD -kameroita, joiden resoluutio on 1600×1200 px. Useiden megapikseleiden kamerat ovat jo nykyään halpoja ja yleisessä käytössä esimerkiksi matkapuhelimeissa. Ne eivät silti ole vielä leistyneet älykameroissa, koska

laskentatehoa ei ole riittävästi nopeaan kuvankäsittelyyn ja analysointiin. Tehokkaammat prosessorit nostaisivat kameran hintaa huomattavasti ja siksi tässä vaiheessa, jos tarkkuutta tarvitaan enemmän, on markkinoilla erilaisia PC-pohjaisia järjestelmiä älykameraa edullisemmiksi ja luotettavimmiksi vaihtoehtoiksi. Älykameran tarve kannattaa siis miettiä huolellisesti etenkin, jos kuvausympäristö ei vaadi erityisesti suojattua kameraa ja tietokone on kätevästi saatavilla.

Joskus älykamera pitäisi saada mahtumaan niin ahtaaseen paikkaan, että tilaa ei olisi kuin varsinaiselle kameraosalle. Tätä tarkoitusta varten markkinoilta löytyy ratkaisuja, joissa kamera ja varsinainen älyosuus ovat molemmat omissa mekaniikoissaan. Kahdesta osasta huolimatta myös tällainen kokonaisuus luokitellaan älykameraksi. Pelkkä kamera on helpompi suojata muun muassa tärinältä, kemikaaleilta tai lämmöltä, minkä lisäksi pelkkä kamera on kevyempi ja yksinkertaisempi asentaa esimerkiksi robottikäteen. Kuvassa 23 on esitelty yksi tällainen kahdesta osasta koostuva Cognexin älykameramalli.



Kuva 23. Cognex Remote Head Vision Sensor, jossa älykameran kameraosa on erillisenä omassa mekaniikassaan. [33]

2.2.1 Älykameran käyttökohteita

Älykameralla ei kannata kuvata mitä tahansa, sillä kompaktista koosta ja rajallisesta laskutehosta johtuen se ei sovellu kaikkiin käyttötarkoituksiin. Älykamera soveltuu parhaiten esimerkiksi liukuhihnalla nopeasti liikkuvien yksinkertaisten esineiden tai asioiden tarkistamiseen. Eräs esimerkki tarkastuskohteesta on pitkulaisten muotoiset pillerit, joista voidaan muun muassa laskea lukumäärä ja löytää rikkiöntyneet yksilöt.

Myös tuotteiden puuttuminen on mahdollista havaita, jos tiedetään etukäteen, miten tiheään ja missä paikoissa niiden kuuluisi olla. Älykamera voi olla myös värikamera, jolloin on mahdollista tehdä lajittelua kappaleiden värin perusteella. Kuvassa 24 on kameran esimerkkikuva, jossa yksi pilleri katkennut.



Kuva 24. Älykameralla otettu kuva, josta voidaan laskea pillereiden lukumäärä tai havaita rikkiäinen tuote.

Älykameralla on mahdollista lukea myös viivakoodeja, tekstiä tai numeroita. Tämä vaatii yleensä erillisen lisenssin. Teollisuudessa liukuhihnalla kulkevien tuotteiden seuranta varten on kehitetty QR-koodi (kuva 25), johon saadaan paljon enemmän tietoa pienempään tilaan kuin vanhaan perinteiseen viivakoodiin. QR-koodin lukeminen onnistuu vain riittävän tehokkaalla kameralla.



Kuva 25. QR-koodi.

Etäisyyksien mittaaminen on yksi älykameran perustoiminnoista. Tämän toiminnon avulla voidaan tarkastaa vaikka kuvassa 26 esitetyn sytytystulppa hatun paikallaanolo tai tulpan kärkiväli ennen pakkausta.



Kuva 26. Sytytystulpan kärkiväli ja hattu.

2.2.2 Kuvausympäristön optimointi

Kuvausympäristöstä kannattaa yrittää tehdä mahdollisimman vakaa. Kamera ei voi heilua kuvattavaan kohteeseen nähden, eikä ympäristön valo saisi vaihtua kuvauksen aikana. Auringon ja kuun valo on syytä poistaa kuvauspaikalta mahdollisimman hyvin. Ylimääriset ja liikkuvat varjot haittaavat kuvan tutkimista ja sen vertailua referenssikuviiin. Myös kuvattava kohde on pyrittävä pitämään mahdollisimman vakaana. Älykameraa valittaessa on hyvä tietää tila ja olosuhteet, johon se asennetaan. Tilaa on oltava riittävästi tai niin sanottu äly pitää asentaa muualle. Prosessin olosuhteet kuten lämpötila, kosteus ja höyry on otettava myös huomioon. Lisäksi on selvitettävä, tarvitaanko puhallusta tai lämmitystä vai kenties optiikalle suojausta lämmöltä, pölyltä tai vedeltä.

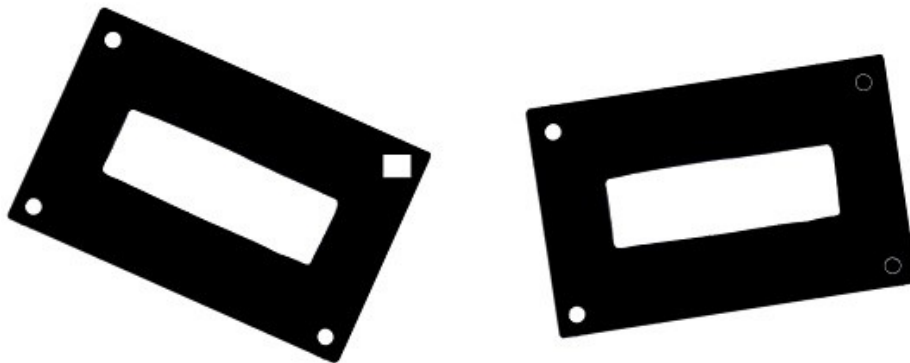
Jos kuvattava kohde on päällystetty esimerkiksi muovikalvolla, voi siitä aiheutua kuvausvalaistuksessa erilaisia heijastuksia, jotka estävät kuvattavan kohteen näkemisen halutulla tavalla. Tällaisessa tilanteessa polarisaatiosuodattimien käyttö voi olla tarpeellista. Kuvassa 27 nähdään esimerkki tapauksesta, jossa kameran tulisi pystyä lukemaan tuotteessa läpinäkyvän muovikalvon alla oleva viivakoodi. Ilman polarisaatiosuodatinta valo heijastaa kalvosta niin, että koodia ei näy, mutta polarisaatiosuodattimen käyttö poistaa heijastuksen ja tuo koodin hyvin näkyviin.



Kuva 27. Esimerkki polarisaatiosuodattimen merkityksestä heijastavan kalvon alla olevan viivakoodin lukemisessa. Suodatinta käyttämällä saadaan muovikalvon aiheuttama heijastus häviämään.

2.2.3 Kuvien analysointi

Älykameran kuvien analysointi perustuu referenssikuvaan ja siitä erityisesti etukäteen tarkasteltaviksi valittuihin kohteisiin. Kameralla otetaan ensin referenssikuva oikeanlaisesta ehjästä tuotteesta. Tähän kuvaan merkitään halutut tarkastuskohdat ja määritetään kaikki tehtävät mittaukset ynnä muut halutut toiminnot. Sen jälkeen kamera vertailee reaaliaikaisesti ottamiaan kuvia referenssikuvaan ja hälyttää virheistä. Kameroissa on saatavilla useita erilaisia mittaus-, tunnistus-, laskenta- ynnä muita toimintoja. Valmistajasta riippuen osa niistä saattaa kuulua peruspakettiin ja osa on ostettavissa erillisillä lisensseillä. Älykamera pystyy ymmärtämään myös eri kulmassa olevan kuvauskohteen ja vertaamaan sitä referenssikuvaan, kuten kuvan 28 esimerkissä näytetään.



Kuva 28. Eri kulmassa kuvatut kohteet.

Kuvan 28 tapauksessa kappaleen asennon tunnistus voidaan tehdä vertaamalla joko kohteen ulkoreunoja tai keskellä olevaa suorakaiteen muotoista reikää. Tällöin varsinaiset tarkastelukohteet voisivat olla kulmissa olevat reiät. Tässä esimerkki-tapauksessa vertailu referenssikuvaan perustuu kuvassa olevaan intensiteettieroon eli tummien ja vaaleiden pikselien määrään. Jos tulos poikkeaa haluttua enemmän referenssikuvan intensiteetistä, antaa järjestelmä virheen.

2.2.4 Kommunikointi kameran kanssa

Älykamerat toimivat järjestelmissä samalla periaatteella kuin älykkäät anturit. Kameralla on mahdollista korvata osittain jopa perinteisiä logiikka-antureita. Älykameralla voidaan mitata ja saada selville hyvin pitkälle jalostettu mittaustulos, joka voidaan sitten kommunikoida ympärillä toimivaan järjestelmään monilla eri tavoilla. Yleisimmät käytössä olevat liitännät ovat digitaalinen I/O, kenttäväylät ja Ethernet, joista viimeksi mainittu on uusin ja yleisimmin nykyään käytössä. Useat liitännämahdollisuudet antavat mahdollisuuden liittyä moniin eri automaatiojärjestelmiin. Informaatiota voidaan käyttää muun muassa roboteissa, tietokonepohjaisissa järjestelmissä, valvonnassa, logiikka-pohjaisissa järjestelmissä ja ylemmän tason toiminnanohjausjärjestelmissä.

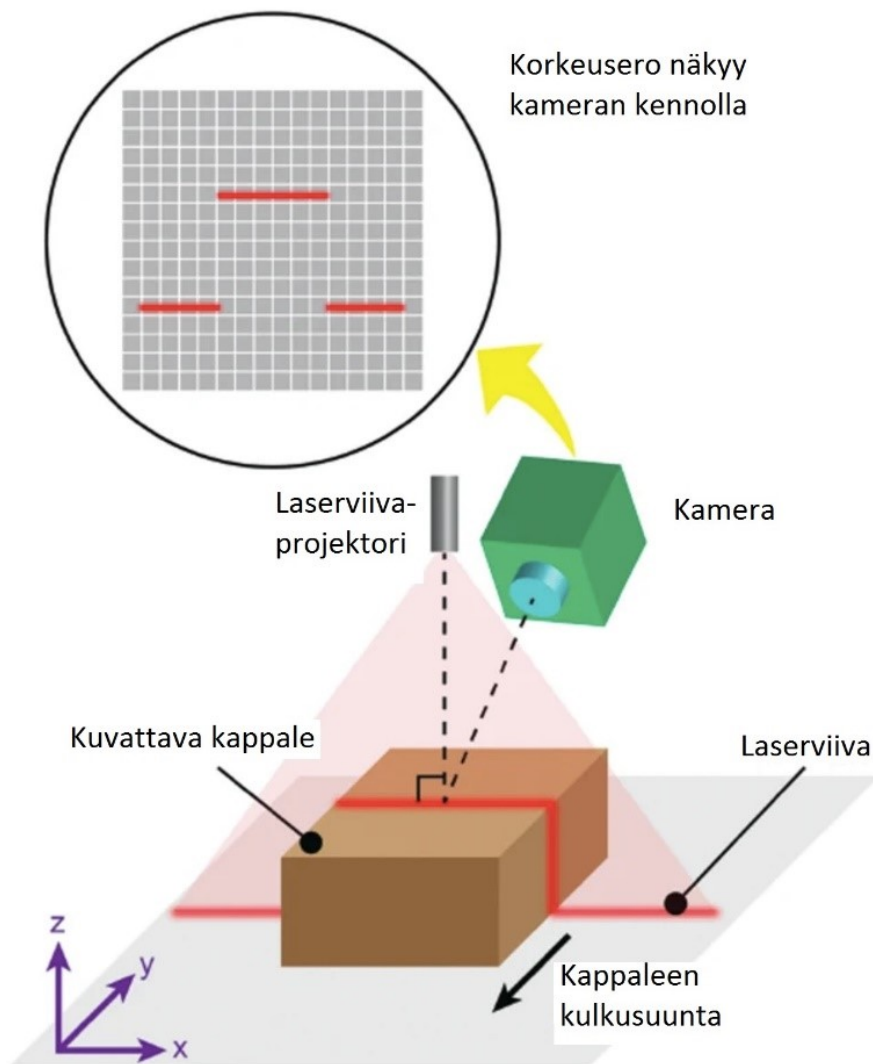
2.3 3D-kuvaus

3D-kuvaus perustuu joko kahteen kameraan tai valolähteeseen ja kameraan. Lisäksi joissain kuvausmenetelmissä tarvitaan kuvan muodostamiseen myös liike. Valolähteenä voidaan käyttää kuvaustekniikasta riippuen projektorin heijastamaa kuviota tai punaista lasersädettä.

2.3.1 Lasertriangulaatio

Lasertriangulaatiossa tutkittava kohde valaistetaan yleensä viivalaserilla, joka luo tarkan valolinjan, jonka läpi kuvattava esine kuljetetaan tarkasti tiedossa olevalla nopeudella. Kuvauskohteen kulkiessa laserviiva alta, viiva taipuu kuvattavan kohteen geometrian mukaan tuoden esiin sen pinnanmuodot. Kamera, joka on asennettu tunnettuun kulmaan lasersäteen lähteeseen nähden, tallentaa kuvia laserlinjalta. Tämän prosessin aikana syntyy suuri määrä kapeita profiileja, joista luodaan kolmiulotteinen 3D-kuva. Käytetystä

kameramallista riippuen saatetaan samalla voida ottaa myös perinteisiä 2D-kuvia, joka 3D-kuvaan yhdistettynä antavat vielä paremman käsityksen kappaleen muodoista. Hyvän ja tarkan kuvan saavuttamisessa on tärkeää, että kuvattavan kohteen liikkumisnopeus on tasainen ja tarkasti tiedossa. Jotta kuvaaminen onnistuu, tulee liikkeen olla vain yhden akselin suuntaista. Liike voidaan tehdä joko kuvauskohdetta tai laseria/kameraa liikuttamalla. [34] Lasertriangulaation toimintaperiaate on esitetty kuvassa 29.



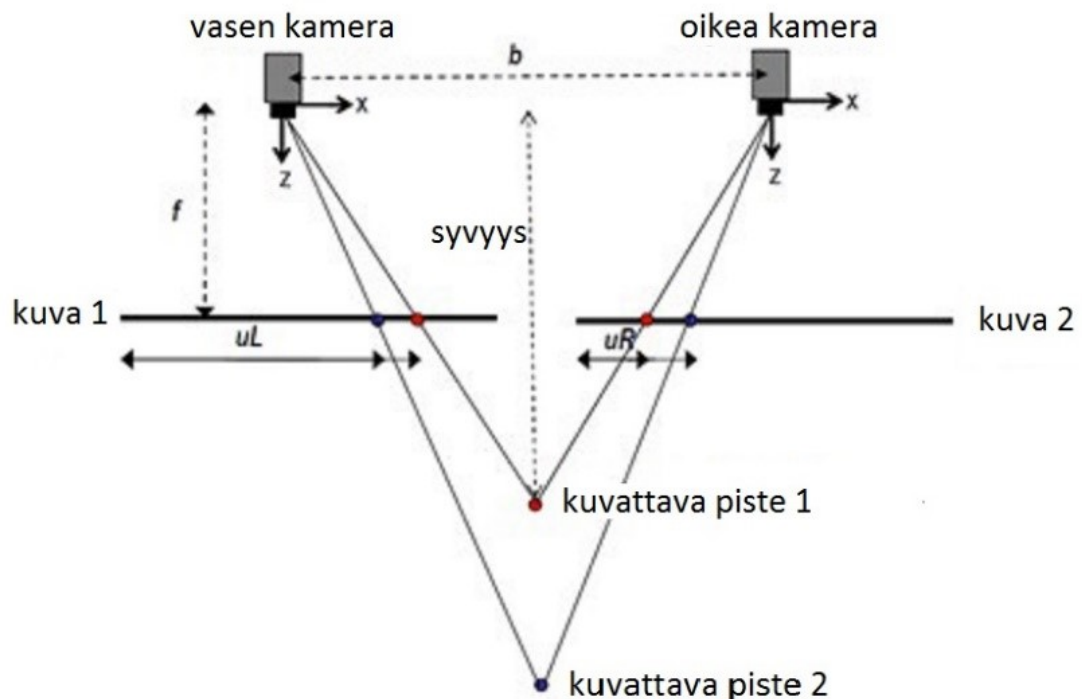
Kuva 29. Lasertriangulaation toimintaperiaate. Kamera kuvaa liikkuvan kappaleen pintaan heijastettua laserviivaa ja muodostaa saadusta datasta kappaleen 3D-kuvan. [35]

Lasertriangulaatiossa voidaan käyttää joko erillistä laserlähdettä ja kameraa tai esimerkiksi älykameraa, jossa ne ovat integroituina samaan laitteeseen. Koska kamera

on asennettu tiettyyn kulmaan, ei se välttämättä pysty näkemään kuvattavaa laserviivaa koko aikaa, jos kuvauskohteessa on hyvin korkeita osia. Tätä tilannetta voidaan yrittää optimoida valitsemalla sellainen kuvaussuunta, jossa varjostusta tulee mahdollisimman vähän.

2.3.2 Stereokuvaus

Stereokuvaus perustuu kahden kameran käyttöön. Niillä tallennetaan 2D-kuvia ihmissilmän tapaan. Kolmiointitekniikkaa käyttämällä kahdesta 2D-kuvasta on sitten mahdollista laskea kolmiulotteinen kuva. Stereokuvaaminen on mahdollista myös liikkuvien kohteiden kanssa. Stereokuvauksen toimintatapa on esitetty kuvassa 30. [34]

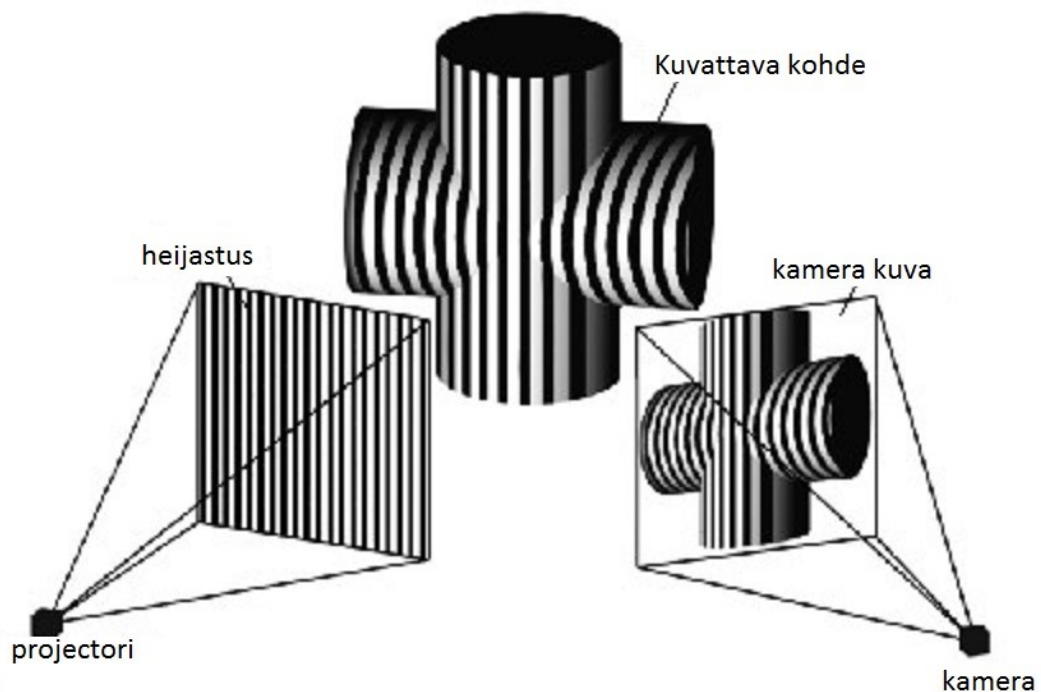


Kuva 30. Esimerkki stereokuvausjärjestelmästä, jossa samasta kohteesta otetaan samalla hetkellä kaksi vähän erisuuntaista kuvaa. [36]

Stereokuvaus soveltuu muun muassa koordinaattien mittaamiseen, 3D-mittauksiin erilaisten robottien työskentelyalueilla sekä tilojen 3D-visualisointiin. Se ei kuitenkaan ole käyttökelpoinen varsinaisessa tuotantoympäristössä, jossa kohdepisteiden tarkka määrittäminen on ehdoton edellytys. [34]

2.3.3 Strukturoitu valo

Strukturoitu valo perustuu triangulaatiomenetelmään ja toimii vain paikallaan olevaan kohteeseen. Siinä tutkittavan kohteen päälle heijastetaan tietty ennalta määriteltä valokuvio, joka taipuu kuvattavan kohteen pinnanmuotojen mukaan. Valokuvio voi olla esimerkiksi raidoitus tai ruudukko. Kohdetta kuvataan tiedetyssä paikassa ja kulmassa olevalla kameralla, jolloin kuvista saadaan valokuvion muutosten perusteella laskettua 3D-kuva. Mittaus on erittäin nopea, eikä kestä välttämättä kuin sekunnin murto-osan. Strukturoidun valon toimintaperiaate on esitetty kuvassa 31. [34]



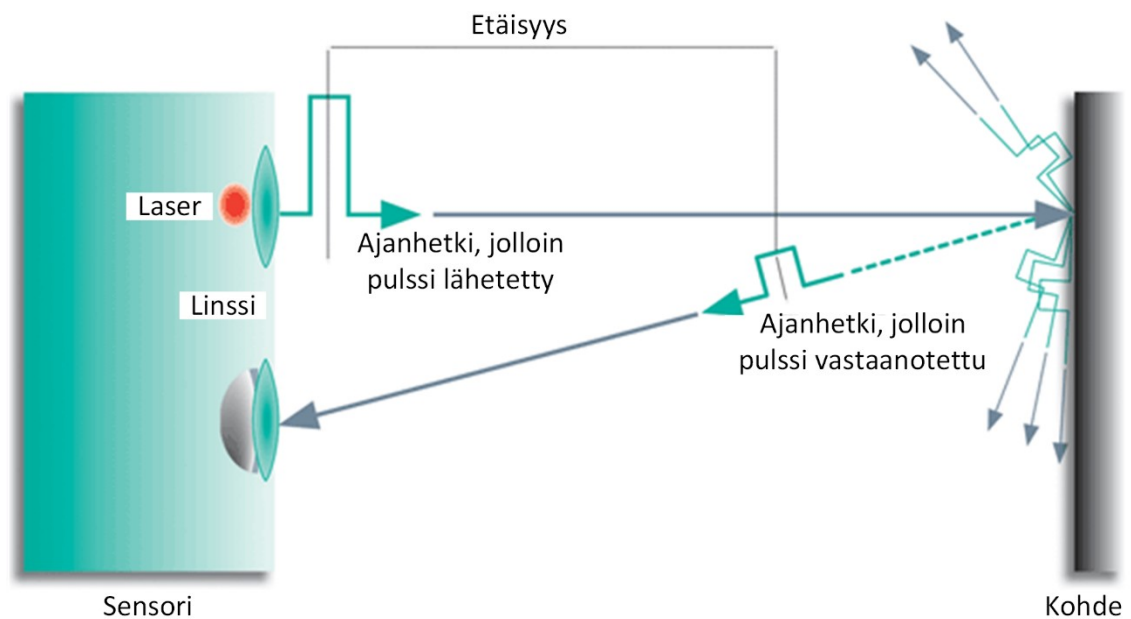
Kuva 31. Strukturoidun valon toimintaperiaate. Valolähteen kuviona on käytetty vuoronperäisiä tummia ja vaaleita pystyraitoja. [37].

Strukturoidun valon mittatarkkuuteen vaikuttavat merkittävästi paitsi kamera niin muun muassa myös heijastettava valokuvio sekä sen resoluutio.

2.3.4 Time of Flight, (ToF) eli valon kulkuaikaan perustuva kuvaus

Time of Flight (ToF) -kuvaus perustuu valopulssin kulkuaikaan. Siinä kuvattavaan kappaleeseen kohdistetaan esimerkiksi pulssimuotoista laservaloa ja valon heijastus

kuvataan sensorilla. Kuluneen ajan perusteella voidaan laskea kuvauskohteen tarkka etäisyys. Kun tiedetään valon lähtökulmat (sekä vaaka- että pystysuunnassa) sekä matka, voidaan laskea jokaiselle mitatulle pisteelle koordinaatit. Kuvausresoluutio on yleensä vähintään 200 x 200 px ja kameroiden kehittyessä se yhä kasvaa. Tämän kaltaisia kameroita on jo tullut esimerkiksi matkapuhelimiin. Koordinaattien lisäksi järjestelmä tallentaa jokaiselle pisteelle myös intensiteetti-arvon paluusignaalin voimakkuuden pohjalta. Laservalon sijaan voidaan käyttää myös infrapunavaloa. ToF-menetelmän periaate on esitetty kuvassa 32. [37]



Kuva 32. Time of Flight -menetelmän toimintaperiaate [38].

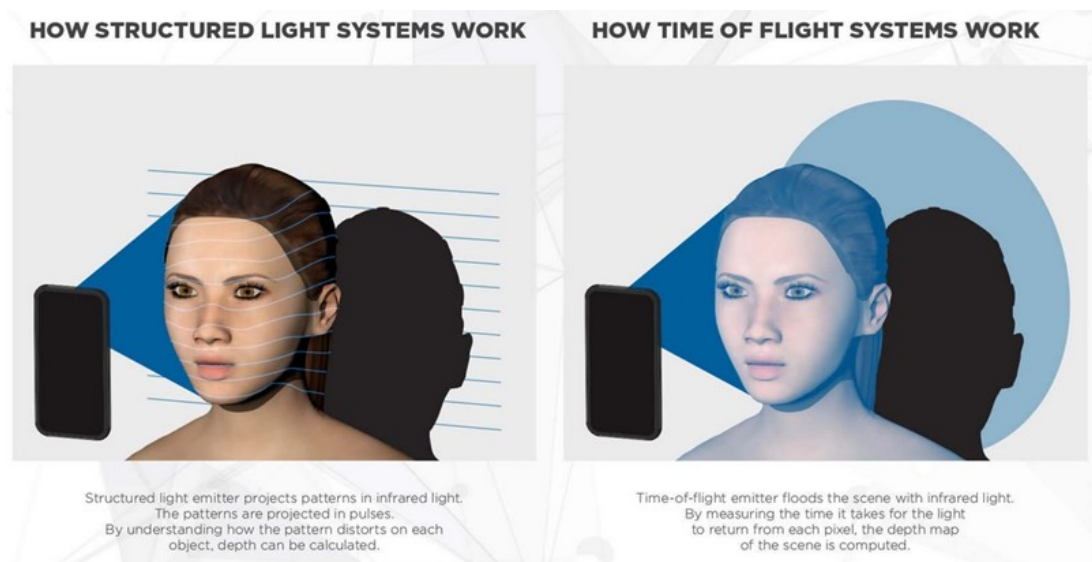
ToF-mittaus soveltuu etäisyyksiin, jotka ovat muutamasta metristä aina noin 40 metriin asti mittaustarkkuuden ollessa tällöin noin 5-10 mm. Melko heikon mittatarkkuuden vuoksi se ei sovellu suurta tarkkuutta vaativiin käyttökohteisiin, mutta toimii kuitenkin esimerkiksi logistiikassa hyllytyksessä. [34].

Kuvassa 33 on esimerkki ToF-kameralla otetusta kuvasta. Siinä näkyy selvästi kolmiulotteisuun, mutta samalla myös epätarkkuus.



Kuva 33. ToF-kameralla otettu kuva. [39].

ToF-kuvauksen ja strukturoidun valon ero nähdään havainnollisesti kuvassa 34. Strukturoidussa valossa valon kuviot taipuvat kuvattavan kohteen pinnanmuotojen mukaan ja syvyystiedot saadaan laskettua sitä kautta. ToF-kuvauksessa puolestaan kuvauskohteen etäisyydet eli muodot saadaan selville, kun kameran jokaisella pikselillä lasketaan aika, joka lähetetyllä valolla kestää kulkea sille.



Kuva 34. ToF-kuvauksen ja strukturoidun valon ero. [40]

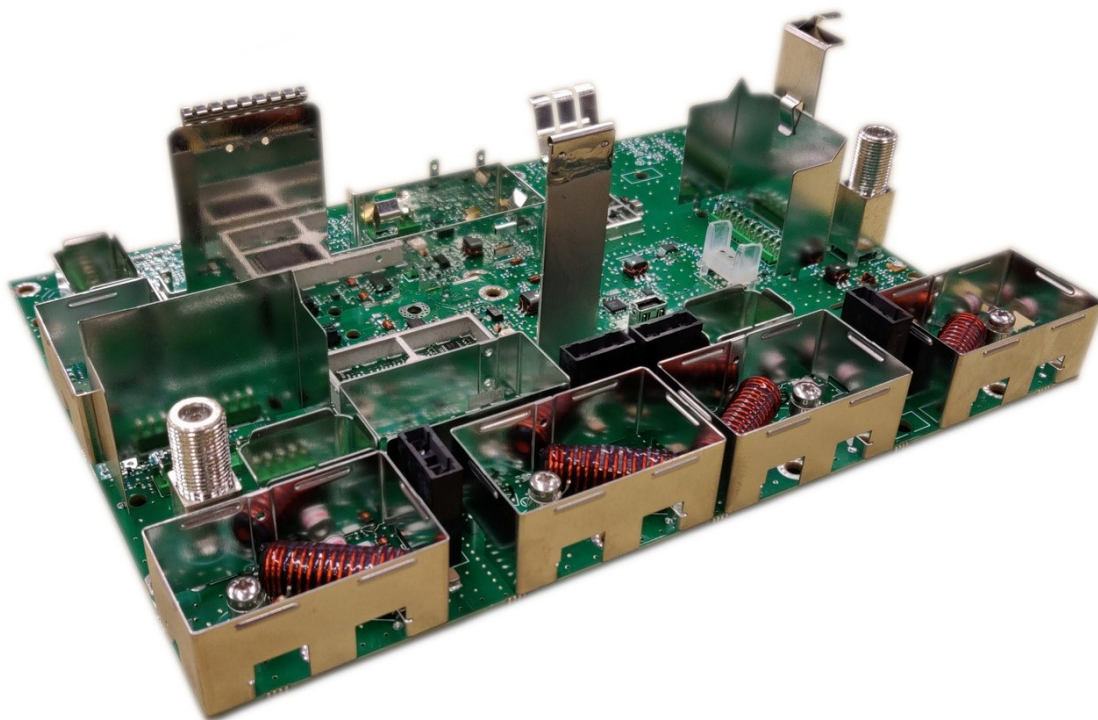
3 KEHITTÄMISTYÖN TOTEUTUS

Kehittämistyön käytännön osuus tehtiin tuotekehitysympäristöön rakennetussa tuotannon oikeaa mittapaikkaa simuloivassa ympäristössä. Kuvausympäristö suunniteltiin sellaiseksi, että se on helposti siirrettävissä tuotantosoluun ja esimerkiksi tilan muu valaistus ei merkittävästi vaikuta sen toimintaan.

3.1 Tarkasteltavan kohteen esittely

Työn tavoitteena oli kehittää tuotantoon moduulivalmistukseen konenäköön perustuva tarkastusjärjestelmä käsin ladotuille (THD) komponenteille. Tutkittavaksi moduuliksi valittiin yksi AC-tuotemoduuli (kuva 35), jossa on useita erilaisia käsin ladottavia komponentteja aina korkeista metalliseinistä pieniin ilmakeloihin. Tuotantosolussa työskentelevä työntekijä lataa komponentit paikoilleen moduuliin ja lähettää sen sitten rataa pitkin aaltojuotokoneeseen. Juotokoneesta tultuaan moduuli palaa tuotantosoluun, jossa työntekijä tarkastaa silmämääräisesti levyn pintapuolelta, että kaikki juotetut komponentit ovat paikoillaan ja oikeaan asentoon juottuneita. Samassa työvaiheessa työntekijä tarkastaa myös, ettei levyn pohjapuolella ole avoimia juotoksia tai oikosulkuja. Tämä silmämääräinen tarkastus haluttaisiin korvattavan kameralla ja konenäkösovelluksella. Tuotantosolussa on pöytätilaa tarkastuspisteelle. Tarkastus tapahtuisi siis moduulin ollessa paikoillaan ja tarkastukseen olisi käytettävissä aikaa kymmeniä sekunteja.

Moduulin piirilevyn mitat ovat 220 mm × 150 mm. Siinä olevat käsin ladotut komponentit ovat kooltaan hyvin eri kokoisia ja tyyppisiä. Pienimmät komponentit ovat muutaman millimetrin korkuisia kapeita ilmakeloja, kun taas suurimmat ovat jopa noin 50 mm korkeita kiiltäviä peltiseiniä. Osa tarkasteltavista komponenteista voi sijaita myös peltikoteloiden sisäpuolella. Tarkasteltavaksi valittu moduuli edustaa hyvin koko AC-tuoteperhettä eli jatkossa tällä moduulilla toimiviksi todetut tarkastusjärjestelmät tulisivat sopimaan myös muiden moduulien tutkimiseen. Jo ennen työn aloittamista tiedostettiin, että moduulin korkeat ja kiiltävät metalliset mekaniikkaosat saattavat aiheuttaa haastetta valaistuksen suunnitteluun ja toteutukseen.



Kuva 35. Tarkasteltava moduuli.

3.2 Eri kameroiden vertaileminen ja testaaminen

Työn lähtökohtana oli sovellukseen sopivan 2D-älykameran löytäminen vertailemalla ja kokeilemalla muutamia sopivaksi arveltuja vaihtoehtoja. Yhteen tarkastuspisteeseen tulevan järjestelmän tulisi kuitenkin olla helposti monistettava ja hinnan tulisi olla melko edullinen, jotta järjestelmän voisi monistaa useaan tuotantosoluun. Nämä lähtökohdat huomioiden etsimme kolme kamerajärjestelmävaihtoehtoa, joiden toimintaa testasimme. Työn edetessä totesimme, että älykamera ei välttämättä olekaan paras vaihtoehto, vaan myös erillinen kamera ja ohjelmisto voisivat olla toimivia, koska tuotantosolussa on jo valmiina tietokone, jota voisi olla mahdollista hyödyntää. Testaamamme kamerat ovat myös mustavalkokameroita, sillä ne soveltuvat tällaiseen tarkoitukseen paremmin kuin värikamerat.

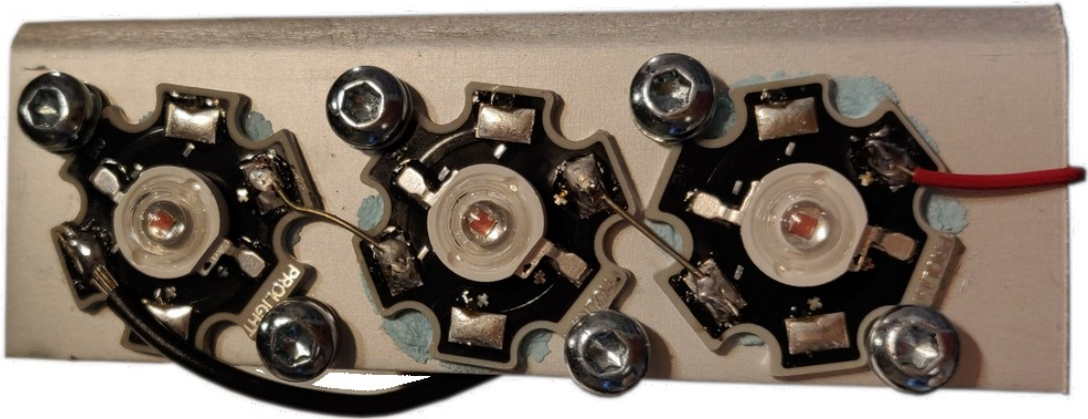
Tuotekehityksen kiinnostuksesta johtuen haluttiin tutkia myös 3D-kameran ominaisuudet ja soveltuvuus työssä tutkitun kohteen tarkasteluun. Ennakoarvioimme oli, että 3D-älykamera olisi huomattavasti kalliimpi ja monimutkaisempi toteuttaa kuin vastaava 2D-ratkaisu. Testaamiseen innosti kuitenkin 3D:n mukanaan tuomat mahdolliset lisämahdollisuudet sekä sen mahdollinen hyödyntäminen muissa projekteissa.

Kameroiden testaaminen suoritettiin tuotekehitykseen rakennetussa tuotantosolua simuloivassa testiympäristöstä. Testatut kamerat löydettiin sekä aiempien opiskelu-projektien pohjalta, että internetistä etsimällä. Kaikilla kameroilla oli Suomessa edustus ja ne sai lainaan testejä varten.

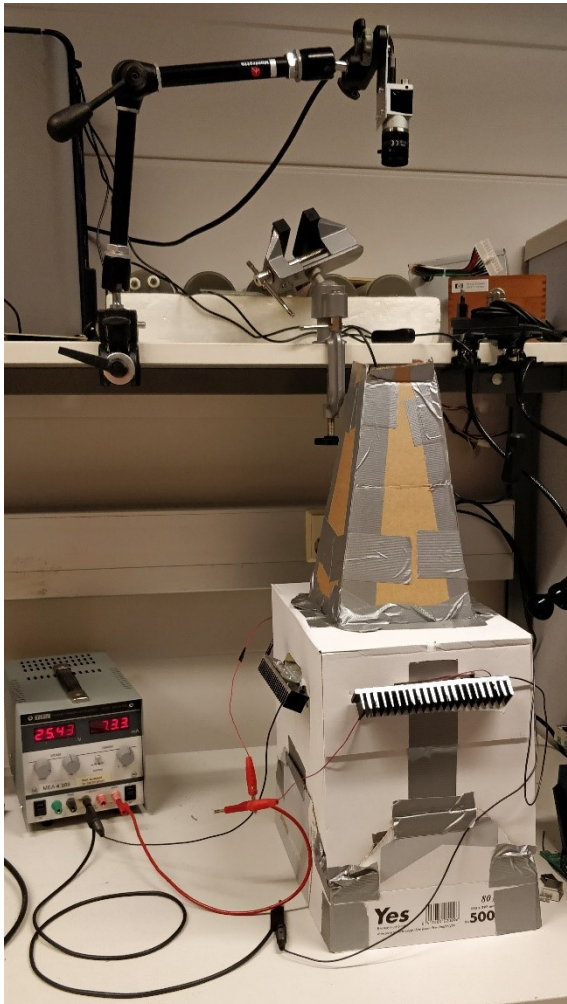
3.3 Valaistuksen ja kuvausympäristön suunnittelu sekä optimointi

Kuvausympäristön valaistuksen suunnittelu alkoi heti, kun ensimmäinen 2D-kamera saatiin testiin. Hyvin toimiva valaistus ei ollut kamerakohtainen, vaan yleisesti mustavalkokameralle ja kuvattavalle kohteelle sopiva. Aluksi totesimme, että valon määrä ei ole riittävä, vaan sitä on lisättävä. Lisäsimme valkoisen valon määrää, mutta kontrasti ei kasvanut toivotusti, vaan tutkittavat tummat komponentit hävisivät pohjalla olleeseen tumman vihreään piirilevyyn. Seuraavaksi päätimme lisätä vihreän vasta-väriksi punaista valoa, minkä seurauksena huomasimme, että valkoisen valon määrää täytyy vähentää. Ensimmäiset punaiset valot tehtiin punaisella tussilla ja kalvoilla. Niiden antama teho ei ollut kuitenkaan riittävä, joten päätimme toteuttaa valaistuksen LEDeillä, jotka olivat suoraan punaisen valon aallonpituudella. Lisäksi valaistusympäristöstä tuli sulkea pois kaikki ylimääräinen ympäristön valo, jotta kuvaustilanteessa valaistus olisi aina samanlainen ja stabiili.

Valaistus toteutettiin punaisilla LEDeillä siten, että kuvattavaa kohdetta valaistiin ylhäältä päin neljästä suunnasta. Kiiltävien pintojen aiheuttamien heijastusten vuoksi valoa ei kohdistettu suoraan tutkittavaan kohteeseen, vaan sopivassa kulmassa. Koska moduulissa oli erilaisia ja erikorkuisia metalliseinä useassa kohdassa ja useaan suuntaan, oli sopivien valaistuskulmien löytäminen haasteellista. Aivan loppuun asti valaistusta ei tässä optimoitu, mutta löydettiin kuitenkin ne asiat, jotka lopullisessa toteutuksessa tulee huomioida. Punaisia 3 W -LEDejä oli käytössä 12 kpl eli 3 kpl/sivu. Niiden tehoa säätämällä haettiin tapaukseen parhaiten sopiva valo määrä. Tehoa nostettaessa oli huomioitava myös sen lämpötilaa nostava vaikutus eli LEDejä oli jäähdytettävä riittävästi lämpöä johtavan tahnan, alumiinipalan ja jäähdytysrivan avulla. Muut ympäristön valot suljettiin pois tekemällä LEDien ja tutkittavan moduulin ympärille pahvinen ylhäältä auki oleva suojakotelo. Kamera sijoitettiin pahvikotelon yläosan aukkoon kuvaamaan kotelon sisälle. Valaistuksen toteutusta on esitetty kuvissa 36 ja 37.



Kuva 36. Kuvausjärjestelmän yhden reunan LED-toteutus. LEDit on ruuvattu kiinni lämpöä johtavaan alumiinipalaan/jäähdytysriipaan ja väliin on laitettu lämpöä johtavaa tahnua.



Kuva 37. Yleiskuva kuvauspaikasta. Ylälaidassa näkyy tukikäden päässä kamera ja sen alapuolella pahvinen suojakotelo, jonka reunoille kiinnitetty LEDit. Tutkittava moduuli on pöydällä suojakotelon sisällä.

LEDien suuresta tehosta johtuen niitä piti jäähdyttää. Jäähdytys toteutettiin kiinnittämällä kunkin reunan kolme LEDiä L-muotoiseksi taivutetun alumiinilevyn toiselle reunalle. Toiselle reunalle puolestaan kiinnitettiin jäähdytysripa johtamaan lämpökuormaa ilmaan. LEDien ja alumiinilevyn väliin laitettiin lisäksi lämpöä johtavaa tahnaa parantamaan lämmön siirtymistä.

3.4 Kuvien analysointi

Testattujen eri kameroiden kuvien analysoitiin ei käytetty samaa ohjelmistoa, vaan tietyn kameratoimittajan tuotteiden kanssa tuli käyttää aina tiettyä ohjelmistoa. Ominaisuuksiltaan ohjelmat olivat melko samankaltaisia ja niistä löytyi tässä työssä tarvittut melko yksinkertaiset toiminnot. Tässä tapauksessa analysoitiin paikallaan olevasta moduulista otettua kuvaa, eikä tuotantosolussa ole tarvetta myöskään kovin nopealle sekunnin murto-osissa tapahtuvalle analyysille. Käytetyissä ohjelmistoissa olisi suorituskykyä myös paljon vaativampiin analyysitoimenpiteisiin.

Ohjelmistojen hintarakenteet olivat myös erilaiset. Yhdessä tapauksessa itse analysointiohjelmisto oli ilmainen, mutta älykamera, joka sitä tarvitsi, oli kalliimpi. Kummallakaan ei tehnyt yksinään mitään, vaan toimivaan kokonaisuuteen vaadittiin molemmat. Toisessa tapauksessa taas kameraksi kelpasi valmistajasta riippumaton tavallinen kamera, mutta äly ja kaikki analysointi oli ohjelmistossa. Tällöin hinta oli ohjelmistossa ja siinäkin vielä jaoteltuna siten, että eri analysointitoiminnot oli jaettu paketteihin, joista asiakas ostaa haluamansa ja siis maksaa vain siitä mitä tarvitsee ja haluaa käyttää.

3.5 Kommunikointi kameran kanssa

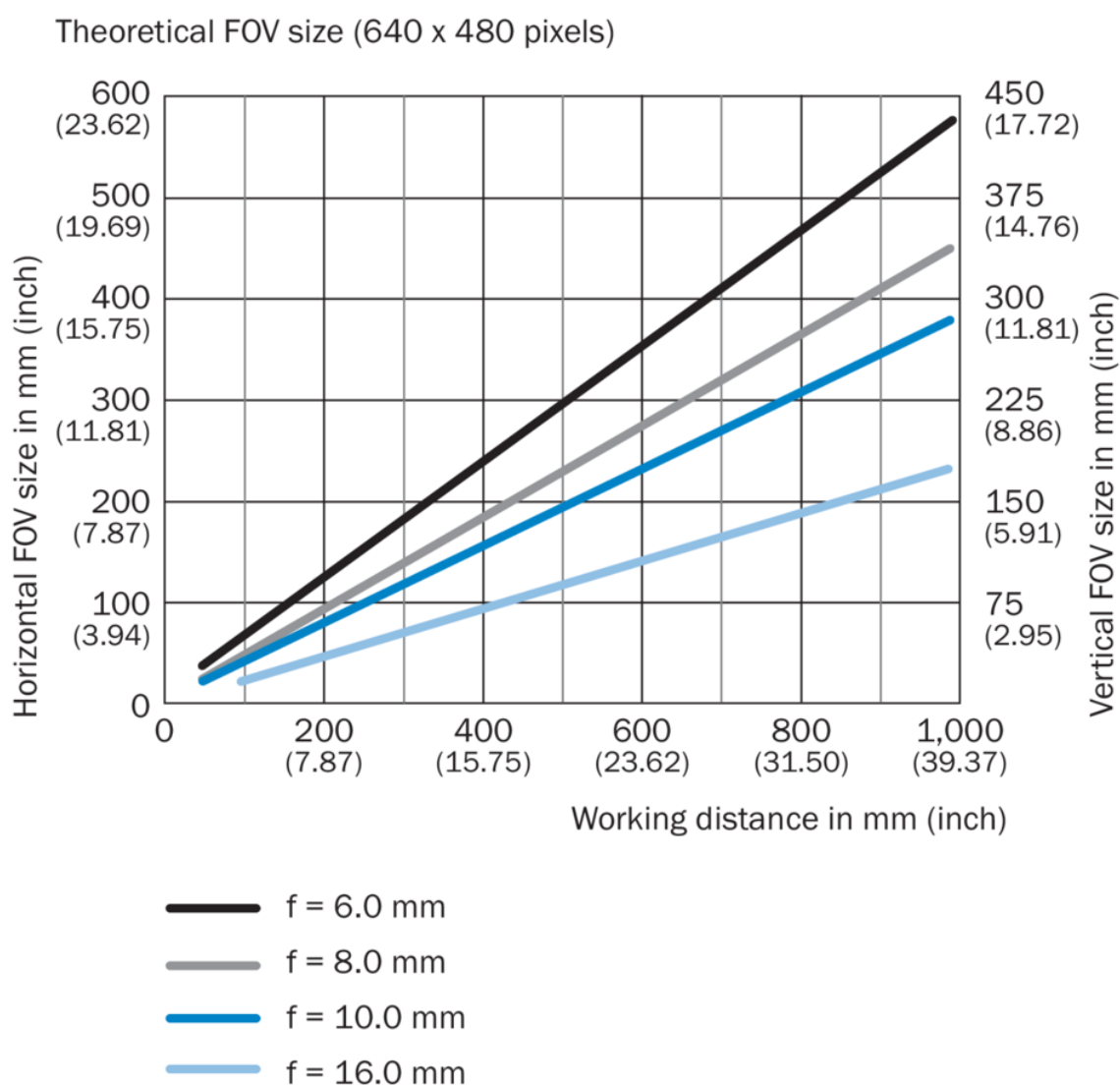
Kommunikointi kameraan tapahtui tietokoneeseen asennettujen valmistajan omien ohjelmistojen kautta. Tässä työssä ei keskitytty eri liikennöintitapojen testaamiseen.

3.6 Testatut kamerat

Seuraavissa kappaleissa on esitelty tarkemmin testaamamme kamerat ja niihin liittyvät sovellukset.

3.6.1 Sick Inspector PIM60 (2D-kamera)

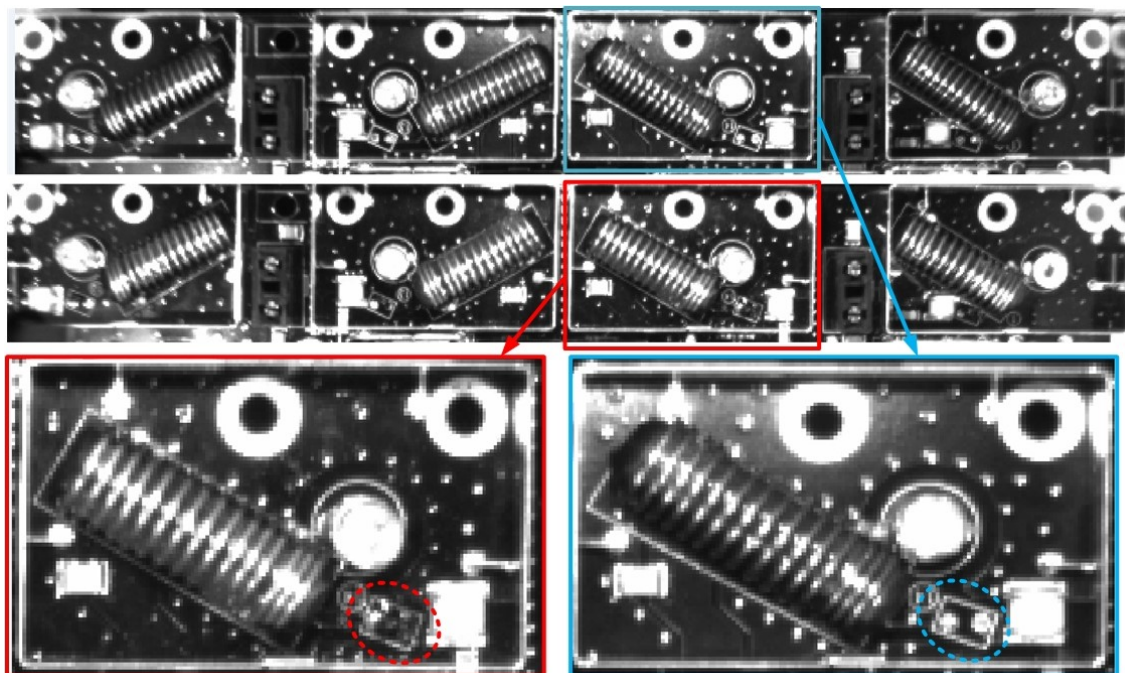
Saksalaisen Sickin valikoimasta testasimme Inspector PIM60 -kameraa. Se on tarkastukseen, paikoitukseen ja mittaukseen soveltuva 2D-älykamera, jolla voidaan ottaa yksittäisiä kuvia ja analysoida niitä. Kamerassa on CMOS-harmaasävy-matriisianturi (erotuskyky on 640×480 pikseliä) ja 10 mm polttovälin manuaali-tarkenteinen objektiivi. Tarvittaessa objektiivi on myös vaihdettavissa. Kameran teoreettinen FOV (field of view) eri toimintaetäisyyksillä ja objektiiveilla on esitetty kuvassa 38.



Kuva 38. Kameran teoreettinen FOV (field of view) eri toimintaetäisyyksillä ja objektiiveilla. [31]

Heti kameran testauksen aluksi, sopivaa valaistusta etsittäessä ja säädettäessä, huomattiin, että kameran resoluutio ei riitä pienimpien tutkittujen komponenttien tarkasteluun halutulta kuvapinta-alalta. Valaistuksen säädöstä ei ollut apua, koska pikseleiden liian vähäinen määrä oli rajoittava tekijä. Kuten kuvasta 38 nähdään, kuvausetaisyyden ollessa 600 mm saadaan 10 mm objektiivilla teoreettiseksi kuva-alueeksi noin 230 mm × 175 mm eli tällöin yhden millimetrin matkalle mahtuu noin kolme pikseliä. Pienimmät tarkastellut komponentit eli ilmakelat ovat kooltaan kuitenkin vain noin 1 mm × 4 mm.

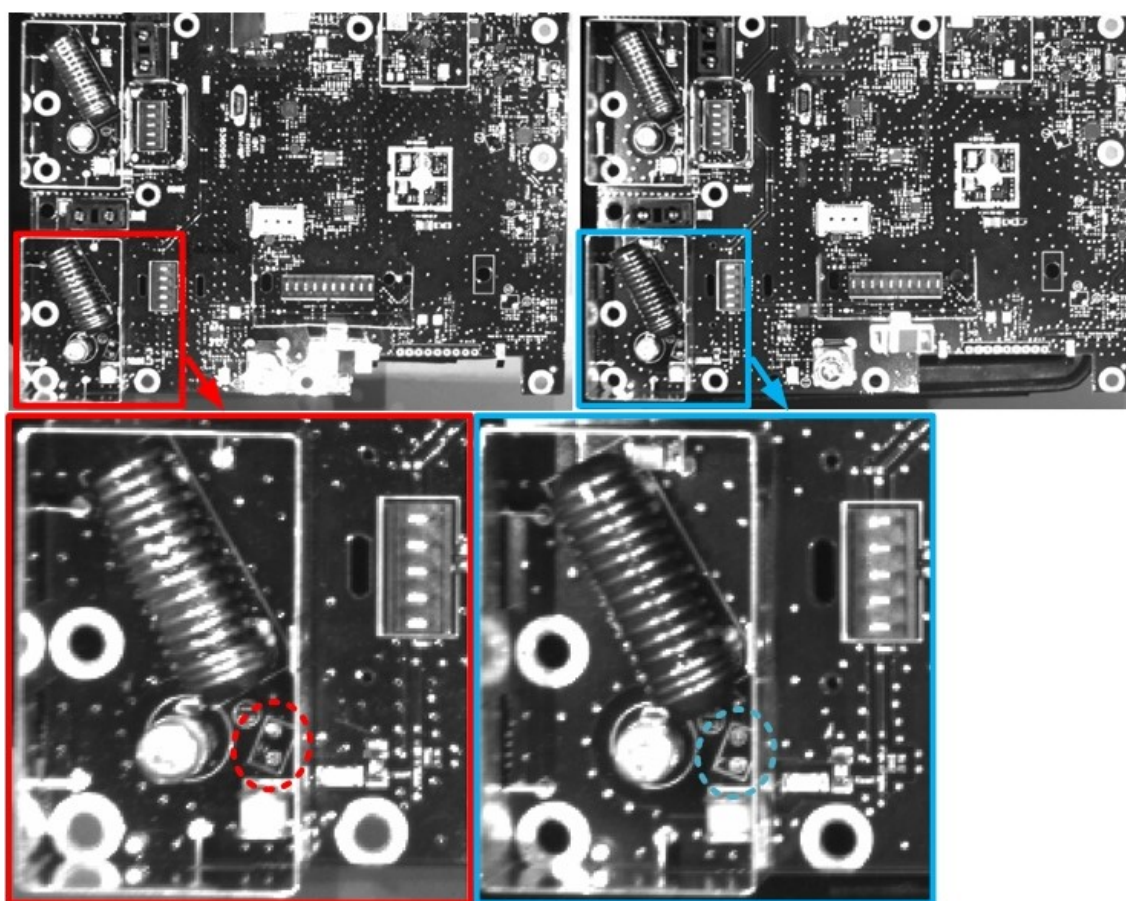
Kuvissa 39 ja 40 esitetään pienten ilmakelojen näkymistä kameran kuvissa, kun kuvattuna on koko moduuli tai vain puolikas moduuli. Kummassakin tapauksessa kameran korkeus on säädetty sellaiseksi, että haluttu kuvattava alue täyttää koko kameran kuva-alan.



Kuva 39. Ilmakelojen erottuminen, kun kuvattuna koko moduuli.

Kuvassa 39 nähdään yksityiskohdat kuvista, joissa kuvattuna on koko moduuli. Kuvan yläalaidassa ovat kuvakaappaukset tapauksista, joissa ilmakela on poissa (sininen merkintä) ja paikalla (punainen merkintä). Kuvan alalaidassa on vielä lisää tarkennettuina värillisillä laatikoilla rajatut alueet ja niissä katkoviivoilla merkittyinä etsityt ilmakelat. Punaisella merkityssä kohdassa ilmakela on paikalla ja sinisellä merkityssä se on poissa. Koska harmaasävykuvasta komponentin paikallaoloa tutkitaan valitun alueen

tummien ja vaaleiden osuuksien määrästä eli kontrastieroista, tulisi tapausten kontrastierojen erottua selkeästi toisistaan. Tässä tapauksessa selkeää eroa ei kuitenkaan ole nähtävissä. Lisähaastetta tulee myös, jos tutkittava komponentti heijastaa valoa epäsuotuisaan suuntaan ja saa siten tuloksen näyttämään väärältä. Moduulin komponenteissa on monia heijastavia pintoja, joten ongelma on todellinen. Valon optimointi yhden tarkastuskohdan mukaan voi puolestaan aiheuttaa ongelmia muissa osissa. Tutkittavaa moduulia verrataan aina kaikki komponentit sisältävään referenssimoduuliin, joka on kuvattu moduulin siinä vaiheessa, kun se tulee massa-valmistukseen. Valaistusolosuhteissa mahdollisesti ilmenevät pienet muutokset eivät siis myöskään saisi vaikuttaa tulosten luotettavuuteen. Tällainen vaara on kuitenkin olemassa, jos luotettava tunnistus on liian pienestä ympäristön muutoksesta kiinni.



Kuva 40. Ilmakelojen erottuminen, kun kuvattuna puolikas moduuli.

Kuvassa 40 nähdään yksityiskohdat kuvista, joissa kuvattuna on puolikas moduuli. Vasemmalla puolella on tapaus, jossa ilmakela on paikalla (punainen merkintä) ja oikealla puolella poissa (sininen merkintä). Näissä tapauksissa kontrastieroista ei voida

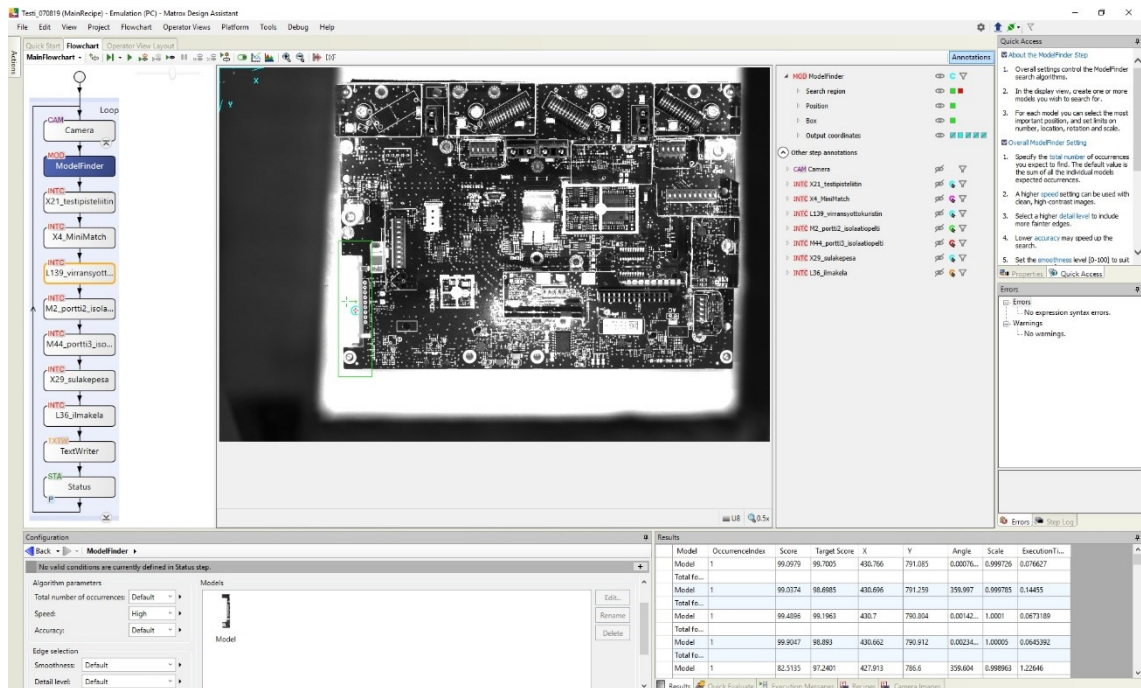
luotettavasti päätellä, onko komponentti paikalla vai poissa. Ihmissilmällä katsomalla kohteen hyvin tunteva voi oikean päätelmän tehdä, mutta valaistuksen hiukan muuttuessa sekin voi olla mahdotonta. Tutkittava kohde on myös aivan korkean ja valoa heijastavan käsin ladottavan peliseinän vieressä, mikä osaltaan lisää tutkimisen haastavuutta: tutkittavaan alueeseen voi vahingossa tulla ylimääräistä vaaleaa aluetta, mikä vaikuttaa alueen kontrastieroihin.

Moduulin tutkittavien komponenttien väreillä on suuri merkitys komponenttien näkymisessä. Moduulissa voi olla usean värisiä ilmakeloja, esimerkiksi punaisia, vihreitä, sinisiä ja kuparin värisiä. Värit voivat myös vaihtua komponenttivalmistajan päätöksestä milloin tahansa. Piirilevyn pinta on puolestaan aina kiiltävä vihreä, mutta senkin sävy vaihtelee aina hiukan valmistajan ja ajankohdan mukaan. Lisäksi ilmakelojen juotosalueet voivat olla joko tinattuja tai kullattuja, mikä näkyy erilaisina sävyinä kuvissa. Punainen valo osoittautui parhaaksi väriksi erottaa komponentit vihreästä piirilevystä. Lisähaasteita kuitenkin tulee, jos tutkittavat komponentit ovat valon kannalta huonon värisiä. Esimerkiksi vihreä ilmakela erottuu huonosti vihreästä pohjasta. Pienten osien erottuvuutta voisi parantaa muun muassa maalaamalla ne luminoivalla maalilla ja valitsemalla oikeanlainen valaistus, mutta komponentteihin tuleva lisähinta olisi todennäköisesti liian suuri. Kontrastiero voisi parantaa myös lisäämällä tummien komponenttien alle vaaleita alueita tekemällä piirilevyn silkkipainomerkintöjä.

PIM60-kameran kanssa käytettiin saman valmistajan Sopas-ohjelmasta. Sen avulla kameraa voitiin hallita helposti tietokoneella ja sen työkalujen avulla määritettiin myös tarkastuskohteet tutkittavalta levyiltä. Ohjelmisto ei ollut maksullinen, mutta sitä pystyi hyödyntämään vain Sickin tietyillä kameroilla.

3.6.2 Matrox (2D-kamera)

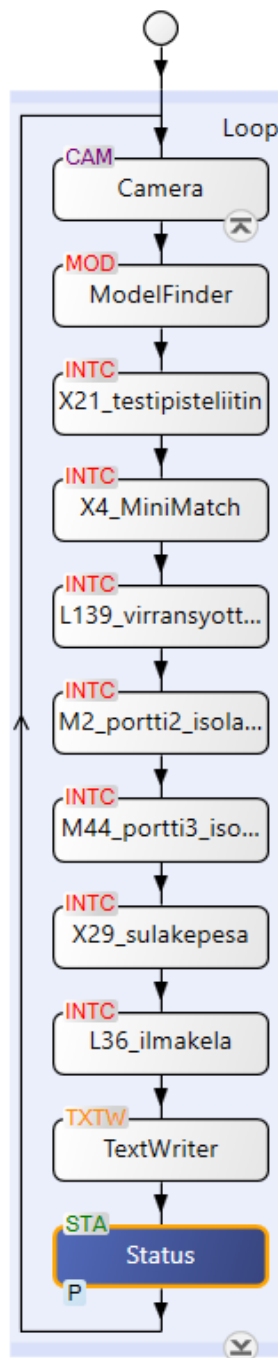
Kanadalaisen Matroxin tuotevalikoimasta emme valinneet testattavaksi varsinaista älykameraa, vaan USB-liitettävän Basler acA1920-150um -kameran Tamronin 25 mm optiikalla. Sitä käytetään tietokoneen kautta Matrox Design Assistant X -ohjelmistolla, joka on vuokaavio-ohjelmointiin perustuva näköohjelmisto. Yleiskuva ohjelmiston ohjelmointinäköymästä on esitetty kuvassa 41.



Kuva 41. Matrox Design Assistant X -ohjelmiston ohjelmointinäytön yleiskuva.

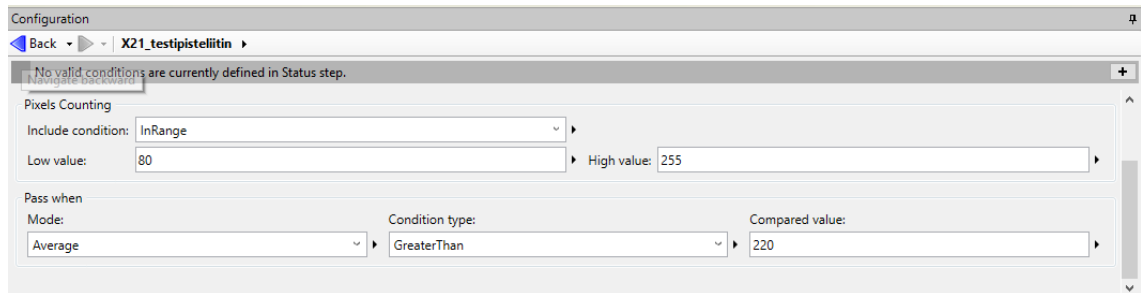
Ohjelmointinäytön keskellä näkyy kameralla otettu kuva tarkastettavasta kohteesta. Ikkunan vasemmassa reunassa on puolestaan ohjelmointivuokaavio, johon lisätään halutut tarkastukset ja muut toiminnot. Käytettäviä työkaluja on olemassa lukuisia. Kuvan vuokaaviossa on aktiivisena ModelFinder-toiminto. Sen avulla saadaan kameran ottama kuva asemoitua aina samaan asentoon referenssikuvaan nähden. Tutkittavien komponenttien koordinaatit voidaan määrittää suhteessa ModelFinderilla määritettyyn tunnistuskohtaan. Tässä tapauksessa tunnistusalueena on käytetty piirilevyn reunassa olevaa leveää kolaa, joka näkyy kuvassa vihreällä reunustettuna. Alalaidan vasemmassa reunassa olevasta ikkunasta saadaan säädettyä kunkin valitun työkalun asetuksia, alalaidan oikeaan reunaan kirjautuvat puolestaan tulokset.

Kuvassa 42 on esitetty tarkastuksen vuokaavio. Se on ohjelmointityökalun pohja ja samalla visuaalisesti havainnollinen esitys ohjelman rakenteesta. Ohjelma alkaa ylälaidan kameran määrittämisestä ja etenee alaspäin tarkastuksesta toiseen aina alareunassa näkyvään tarkastuksen lopputuloksen ilmoittamiseen asti. Jokainen haluttu komponenttitarkastus näkyy vuokaaviossa omana laatikkonaan, jotka voidaan nimetä yksilöllisesti.



Kuva 42. Vuokaavio.

Kullekin tarkastuskohteelle määritetään sopivat asetukset, joiden perusteella tunnistus antaa joko hyväksytyn tai hylätyn lopputuloksen. Kuvassa 43 on esimerkki IntensityCheckerin eli harmaasävytarkastuksen konfiguraatioikkunasta, joka liittyy liittimen tunnistukseen.



Kuva 43. Esimerkki IntensityCheckerin konfiguraatioikkunasta.

Harmaasävytarkastuksessa ohjelmalle määritetään raja-arvo, jonka ylittävä tulos tuottaa hyväksytyn lopputuloksen. Jos tulos ei ylitä rajaa, on lopputulos hylätty. Kuvan 43 esimerkissä raja-arvo on 220 eli sen ylittävät tulokset ovat hyväksytyjä.

Kuvassa 44 on esimerkki tulosikkunasta. Status-sarake kertoo, onko tarkastus hyväksytty vai hylätty. Average-sarakkeessa näkyy saatu tulos eli tässä tapauksessa hyväksytyjä ovat kaikki yli arvon 220 olevat tulokset.

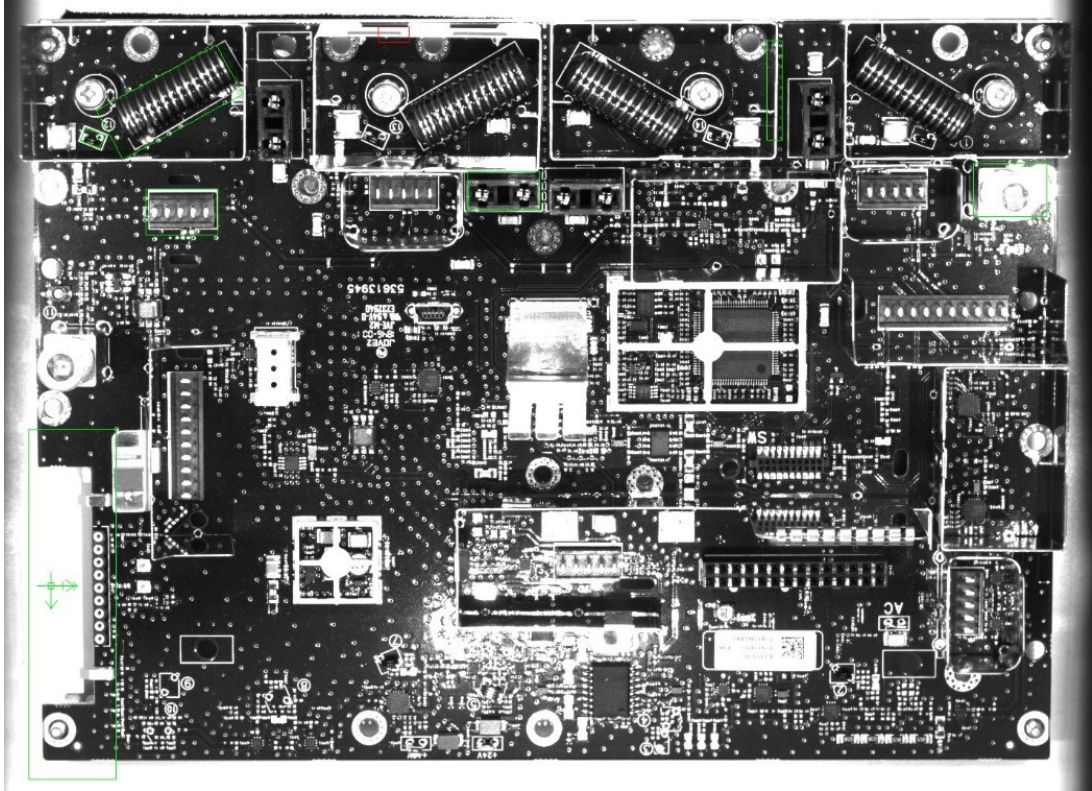
Results							
	Status	Minim...	Maximum	Average	Contrast	Number of pixels	Standard deviation
	Fail	80	255	191.002	175	5154	68.2302
	Pass	80	255	239.559	175	6465	36.0511
	Pass	80	255	229.912	175	6415	50.1436
	Pass	80	255	234.879	175	6527	40.8969
	Pass	80	255	232.486	175	6481	43.8237
	Fail	80	255	191.002	175	5154	68.2302
	Pass	80	255	239.559	175	6465	36.0511
	Pass	80	255	229.912	175	6415	50.1436
	Pass	80	255	234.879	175	6527	40.8969

Kuva 44. Esimerkki tulosikkunasta.

Seuraavissa kuvissa 45–47 on esimerkkejä kuvan 42 vuokaavion komponentti-tunnistuksista. Tarkastuksen kohteena oli seitsemän erilaista komponenttia. Niiden paikat näkyvät kuvissa joko vihreillä tai punaisilla reunoilla merkittyinä. Vihreä tarkoittaa hyväksyttyä tulosta ja punainen hylättyä.

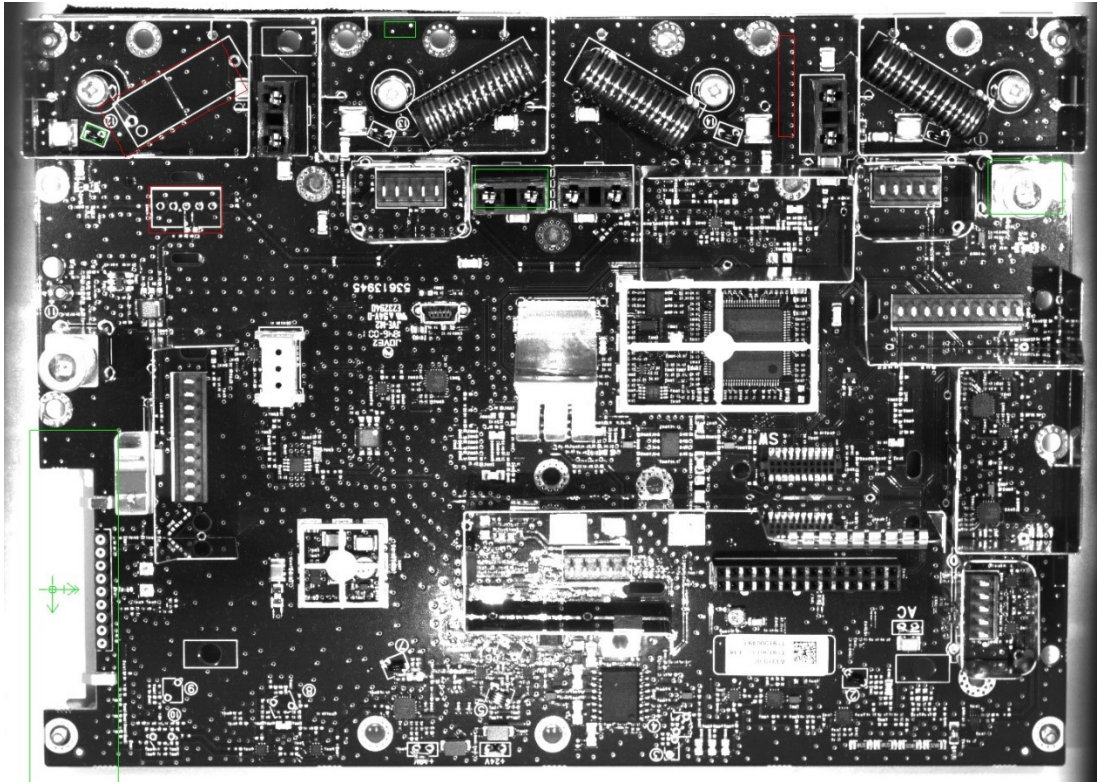
Kuvassa 45 on yksi hylätty komponentti. Se on yläreunassa näkyvä metallikehys, joka ei ole kunnolla paikallaan, vaan vinossa, jolloin kehyksen pystyreuna näkyy vaaleana leveänä alueena. Tunnistettavassa kohdassa pikselit ovat liian vaaleita, joten

harmaasävytunnistus antaa hylätyn tuloksen. Metallikehys on oikein paikoillaan, näkee kamera enemmän tummaa piirilevyn pintaa, jolloin tummien pikseleiden määrä on suurempi. Muut kuvan komponentit ovat paikoillaan ja tunnistettu oikein hyväksytyiksi.



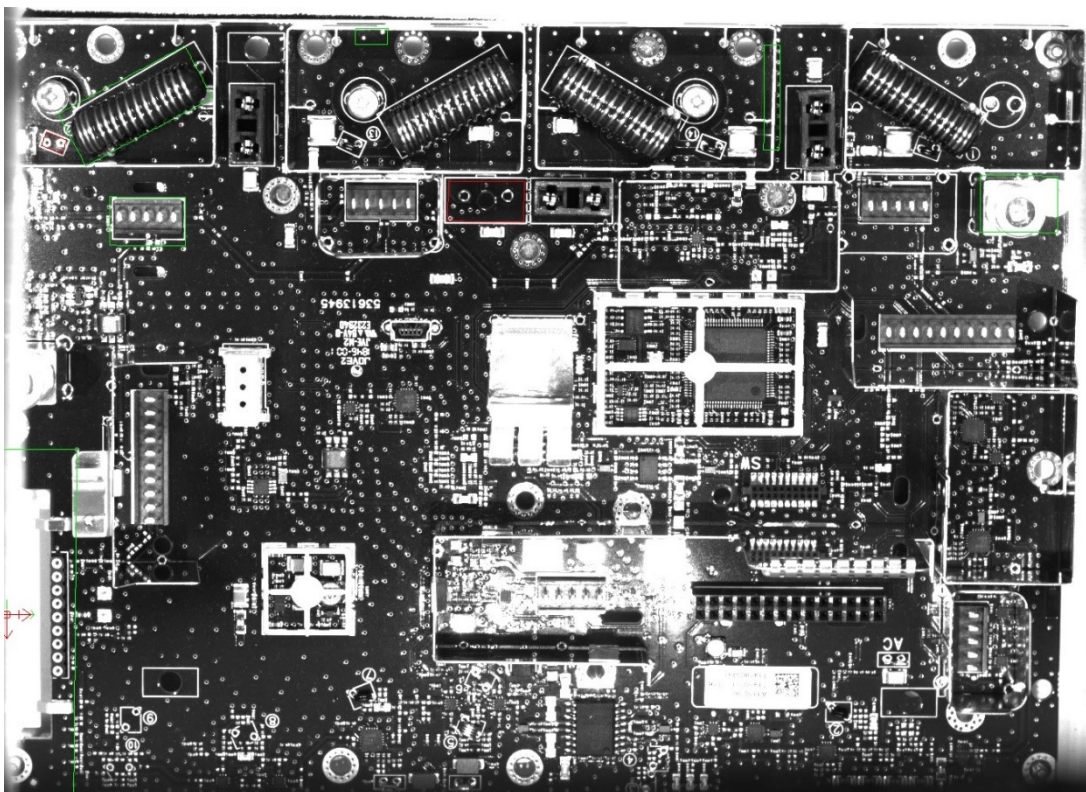
Kuva 45. Testikuva, jossa yläreunan metallikehys huonosti paikallaan.

Kuvassa 46 virheitä tulee kolme: puuttuva virransyöttökuristin vasemmassa yläkulmassa, puuttuva metallikehys oikeassa yläkulmassa ja puuttuva MiniMatch-liitin vasemmassa laidassa. Näissä kaikissa tapauksissa mittausalueilla näkyy liikaa tummaa piirilevyä eli tummia pikseleitä. Lisäksi tässä kuvassa näkyy oikein ja hyväksytysti asennettuna kuvassa 45 vinossa ollut metalliseinä. Komponentin tunnistusalueita määritettäessä ei välttämättä kannata valita juuri komponentin kokoista aluetta, vaan alue, jossa kontrastiero oikein paikallaan olevan ja väärin/poissa olevan komponentin välillä on kaikkein suurin. Komponentista riippuen tunnistusalue voi olla jopa vain pieni osa sitä aluetta, johon komponentti oikein paikalla ollessaan sijoittuu.



Kuva 46. Testikuva, jossa virransyöttökuristin, metallikehys ja MiniMatch-liitin puuttuvat.

Kuvassa 47 tunnistuvat hyväksytysti kaikki muut komponentit paitsi vasemman ylälaidan pieni ilmakela ja ylhäällä keskellä oleva sulakepesä. Nämä kaksi komponenttia ovat ehkä levyn THD-komponenteista haastavimmat tunnistaa, koska tumman komponentin alla oleva piirilevy on myös tumma. Eroa syntyy kuitenkin siitä, että komponentti on esimerkiksi musta tai punainen, jolloin se näkyy punaisella valolla hieman eri sävyisenä kuin vihreä piirilevy.



Kuva 47. Testikuva, jossa ilmakela ja sulakepesä puuttuvat.

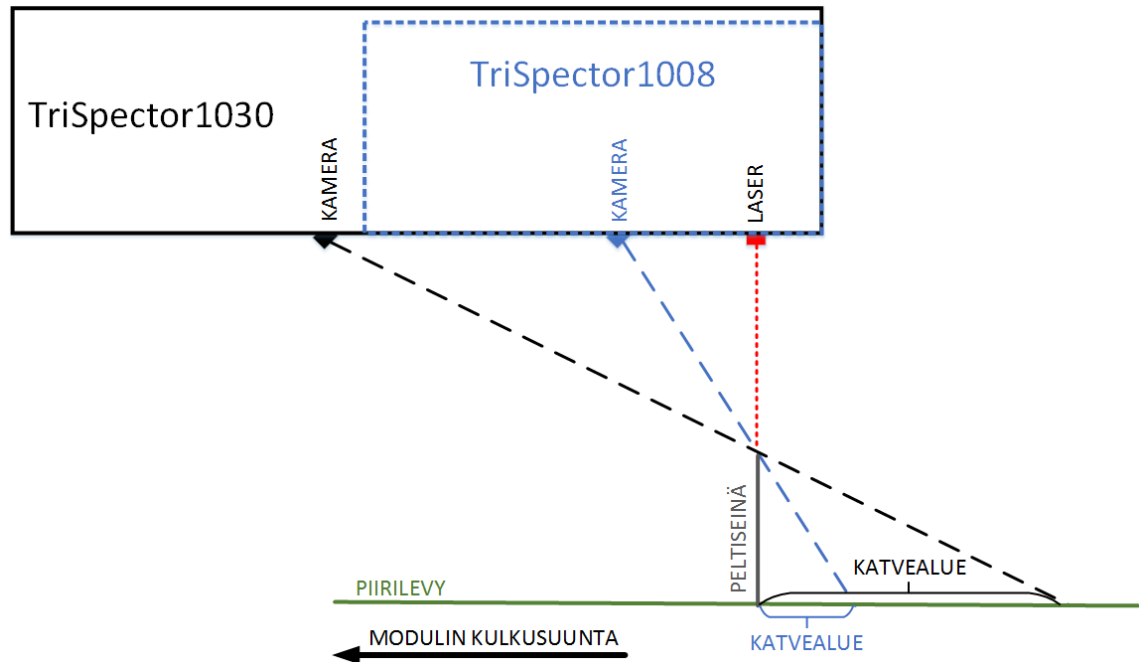
Tuotantosolussa on tietokone jo valmiina, joten tämänkin tyyppinen ratkaisu voisi olla aivan käyttökelpoinen. Valaistuksena käytettiin samoja punaisia LEDejä kuin Sickin PIM60-kameran kanssakin.

Basler acA1920-150um Tamronin 25 mm optiikalla vaikuttaa tarkkuudeltaan riittävältä koko moduulin tarkastamiseen yhdellä kertaa. Kameran CMOS-harmaasävy sensori on erotuskyvyltään 1920 x 1200 px, jolloin resoluutioksi tulee 2,3 Mpx. Tarvittaessa objektiivi on myös vaihdettavissa. Koska kyseessä ei ole älykamera, tapahtuu kaikki datan käsittely erillisessä tietokoneessa. Nykyaikaisten tietokoneiden laskentateholla tämän kokoisten kuvien käsittely ei pitäisi olla ongelma. Baslerilla on valikoimassa vastaava kamera myös 5 Mpx:n resoluutiolla. Sen avulla pystyttäisiin tarkastamaan samalla tarkkuudella myös suurempi toisen tuoteperheen moduuli.

3.6.3 Sick TriSpector1000 (3D-kamera)

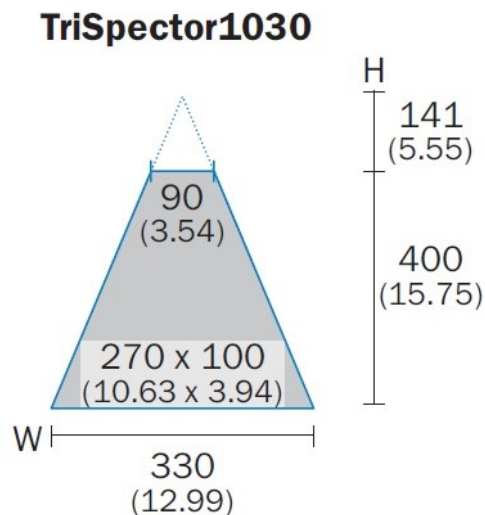
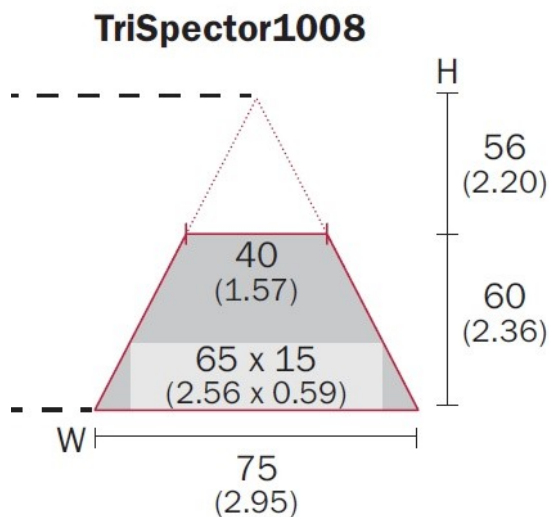
Testiin haluttiin ottaa vertailun vuoksi myös 3D-kamera, jotta nähtäisiin minkälaisia mahdollisuuksia ja rajoituksia sen käyttö toisi mukanaan. Mukaan valikoitui Sick

TriSpector 1000 3D-älykameran mallit 1008 ja 1030. Ne eroavat toisistaan kuva-alueen laajuuden (FOV) osalta, koska niiden laserien leveydet ovat eri. Suuremman kuva-alueen kamerassa myös kameran ja laserin etäisyys on suurempi, jotta koko lasersäde saadaan kuvaan. Tämä puolestaan aiheuttaa korkeampia kohteita tutkittaessa suurempia katvealueita, kuten kuvasta 48 nähdään.



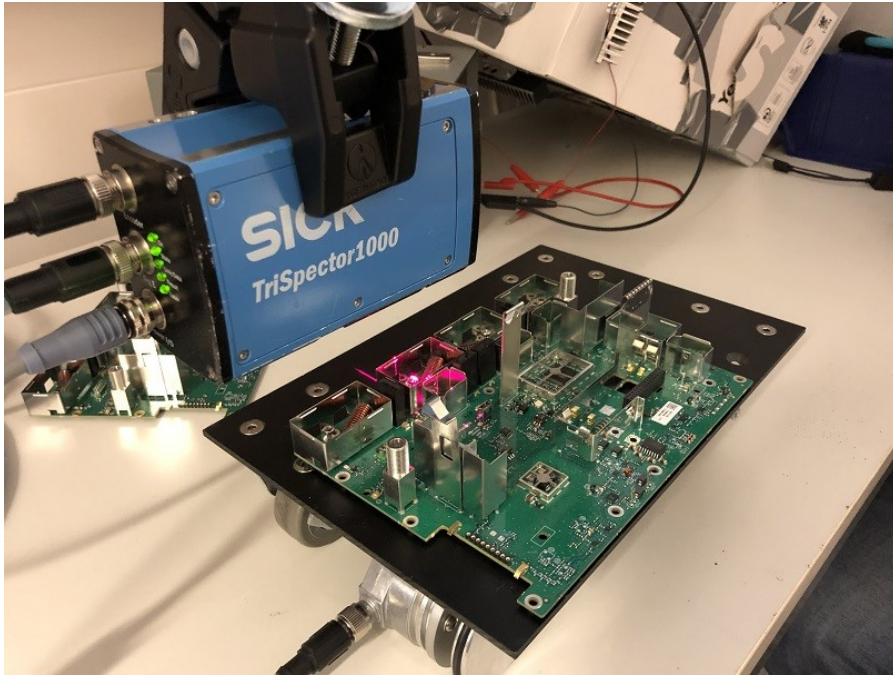
Kuva 48. Havainnekuva katvealueiden eroista eri kameroilla kuvattaessa. Mitat eivät tarkkoja.

Kuvassa 49 näkyy, että TriSpector1008-kameran ollessa 116 mm korkeudella laserviivan leveys tason pinnassa on 75 mm. Jos halutaan mitata 15 mm korkeaa kohdetta on kuva-alan leveys enää 65 mm. Kuvattavan kohteen pituudella ei ole kameran osalta varsinaista rajoitusta, vaan se riippuu pikemminkin mittapaikasta. Kameraa valittaessa on mietittävä tarkasti millä valinnalla ja asetuksilla saataisiin parhaiten tutkittua kaikki halutut tarkastuskohteet.



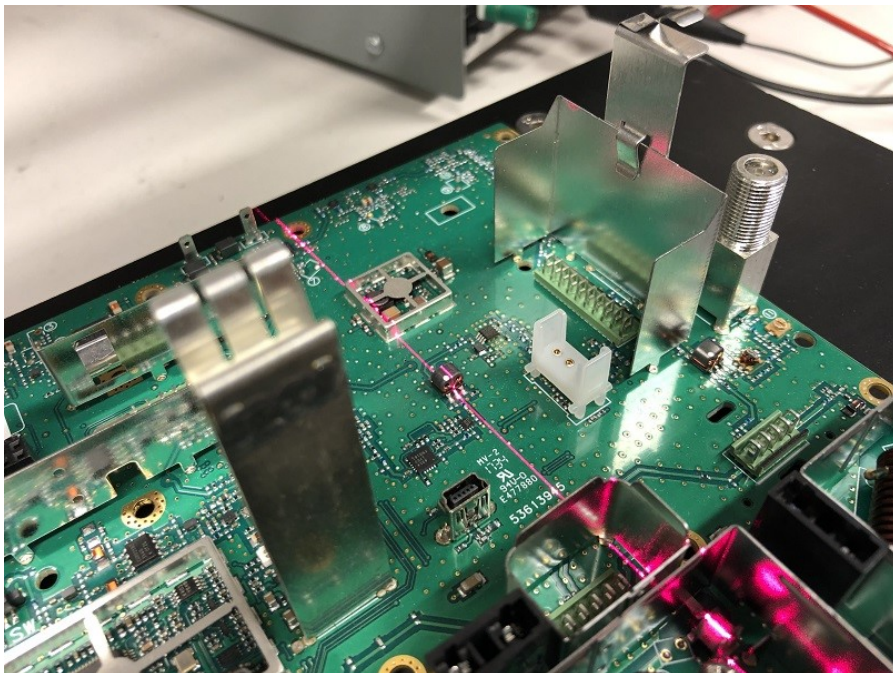
Kuva 49. TriSpector1008- ja TriSpector1030-kameroiden kuva-alat. [41]

Aloitimme testauksen suuremmalla TriSpector1030-kameralla, koska sillä pystyi kuvaamaan kerralla koko moduulin. Lainaksi saamaamme testisetupiin kuului pulssi-anturilla varustettu liikutettava kuvauspöytä, jonka avulla 3D-kuvan muodostamiseen tarvittava liike-tieto saatiin välitettyä kameran käyttämälle Sopas-ohjelmistolle. Tämän suuremman kameran tarkkuus ei kuitenkaan riittänyt moduulin pienien ilmakelojen luotettavaan tunnistamiseen. Lisäksi kameran ja laserin suurempi etäisyys aiheutti turhan suuria katvealueita korkeiden peltiseinien viereen. Kuvassa 50 on käyttämämme testijärjestely eli TriSpector1008-kamera ja liikutettavan kuvauspöydän päällä tutkittava moduuli.

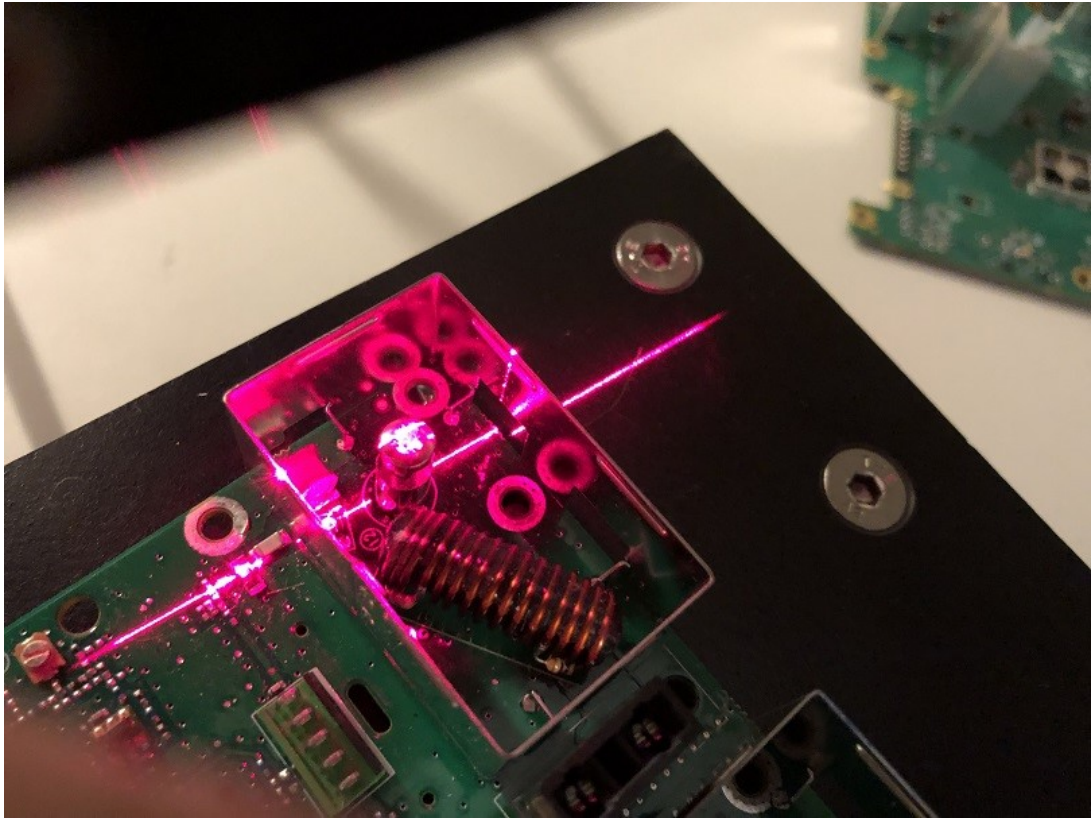


Kuva 50. TriSpector1008 3D-kamera ja sen testijärjestely.

Kuvissa 51 ja 52 nähdään laserin tuottama punainen valo tutkittavan moduulin pinnalla. Moduulin kiiltävät osat heijastavat laservaloa huomattavan paljon, kuten erityisesti kuva 50 osoittaa. Heijastumat saattavat aiheuttaa kuvaukseen häiriöitä ja virheitä.

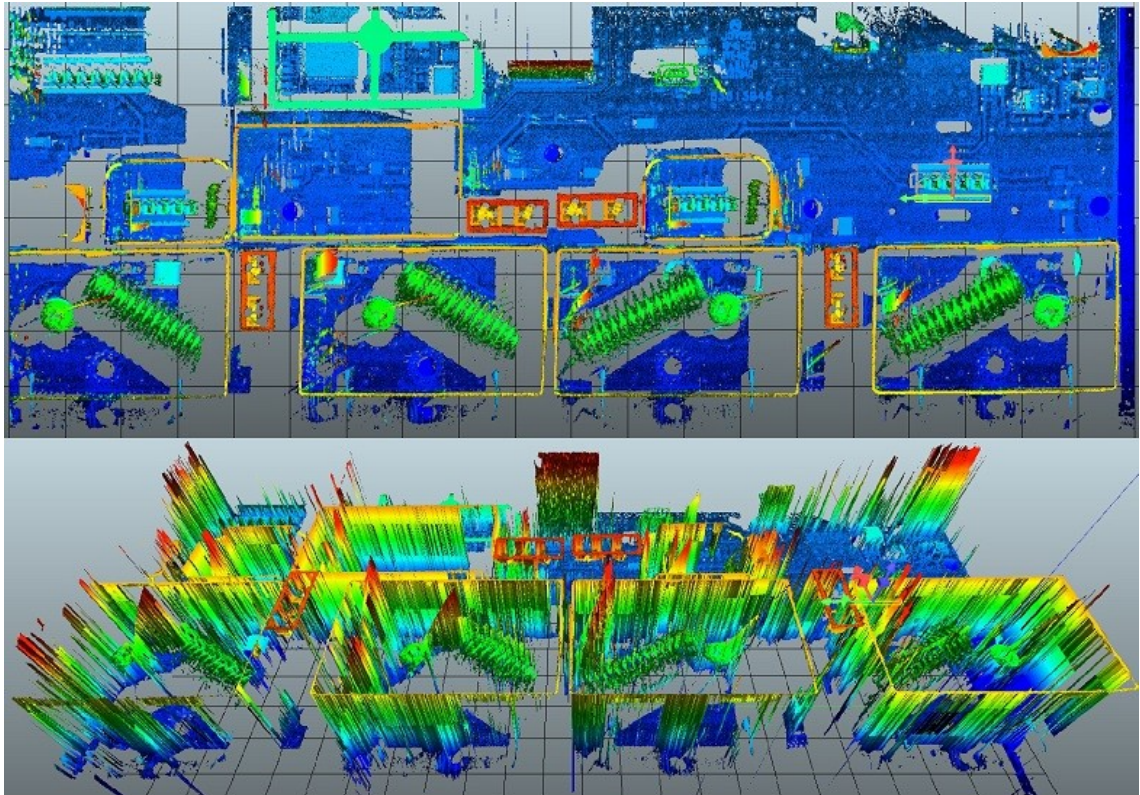


Kuva 51. Punainen laservalo heijastuu levyltä takaisin kameraan.

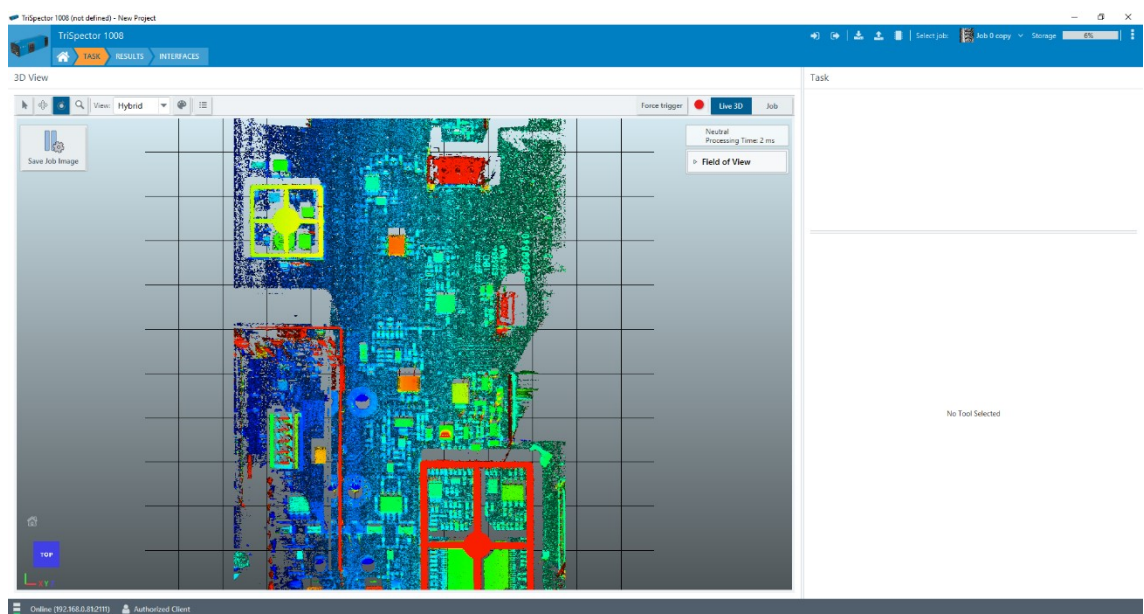


Kuva 52. Ympäristön valo ja heijastumat voivat häiritä kuvausta.

Kamera saa mitattua heijastuneesta laservalosta tutkittavan kohdan korkeustiedot. Korkeusdata näkyy Sopas-ohjelmiston 3D-kuvassa eri väreinä. Käyttäjä voi skaalata värialueen haluamaansa korkeusikkunaan, jotta kuvasta saataisiin mahdollisimman havainnollinen ja erot näkyisivät selvästi. Tällä kameralla oli vielä lisäksi mahdollista tallentaa kuvatusta kohteesta myös 2D-kuvaa, joka oli mahdollista liittää 3D-kuvan joukkoon siten, että lopputulos näytti vielä selkeämmältä ja luonnollisemmalta, Kuvissa 53 ja 54 nähdään moduulin 3D-kuvaa ja väriskaalausta etuviistosta ja ylhäältä päin katsottuina. Pohjataso on säädetty piirilevyyn, jolloin kuvassa ei näy kuljetuskelkan pintaa. Kuvattua kohdetta voidaan kääntää, pyörittää ja zoomata Sopas-ohjelmassa hyvin monipuolisesta. Näin päästään katsomaan hyvinkin pieniä yksityiskohtia ja tarvittaessa asettamaan niiden niihin kohdistuvat erilaiset mittaukset todella tarkasti.

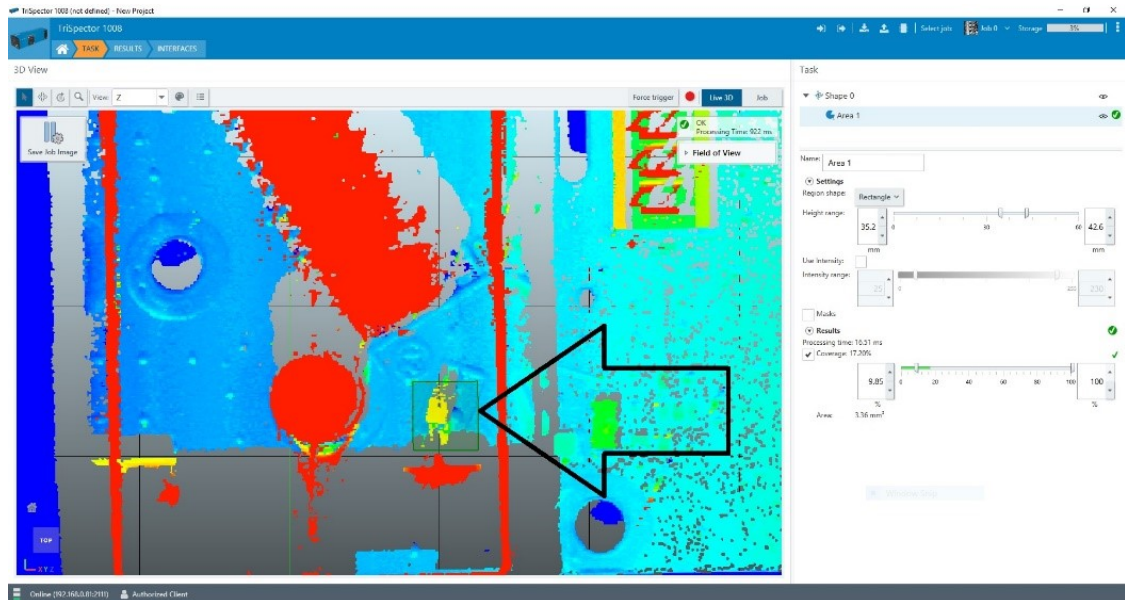


Kuva 53. 3D-kuvaa ylhäältä ja etuviistosta katsottuna. Molemmat ovat samasta kohdasta moduulia.

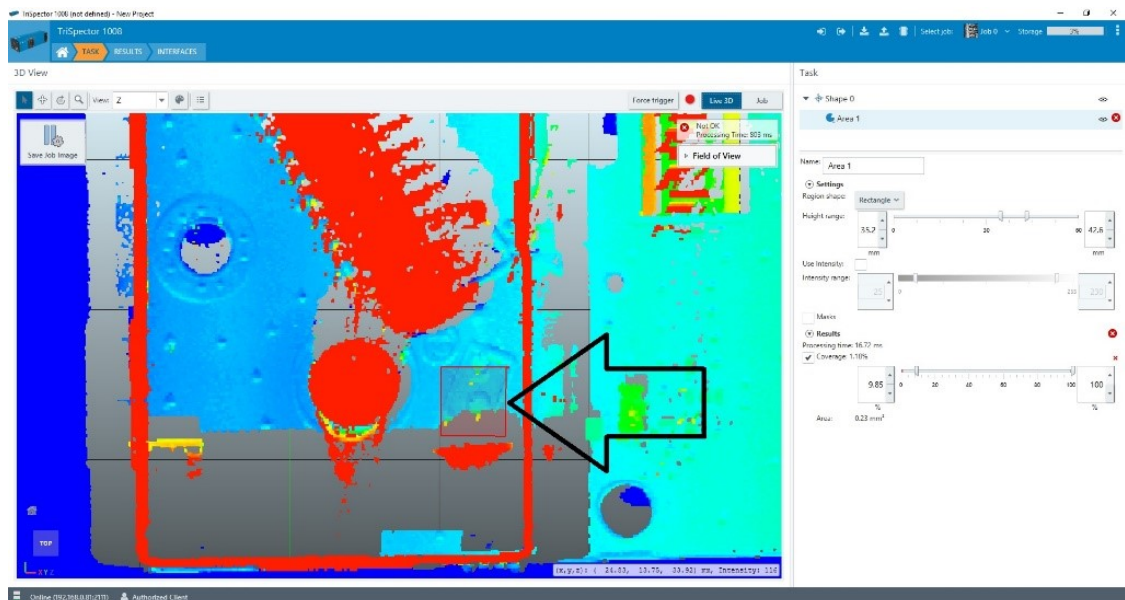


Kuva 54. 3D-kuvaa ylhäältä katsottuna.

Haastavin tutkimamme komponentti oli korkean metallikehyksen sisällä ollut pieni ilmakela. Sen vieressä oli lisäksi korkea metallinen ruuvitorni ja suuri ferriittisydäminen virtakuristin. Kuten kuvista 55 ja 56 nähdään, ilmakelan paikallaolon tunnistaminen onnistui hyvin, koska komponentti ei jäänyt korkeiden osien varjoon ja sen korkeus oli mittatarkkuuteen verrattuna hyvin riittävä.

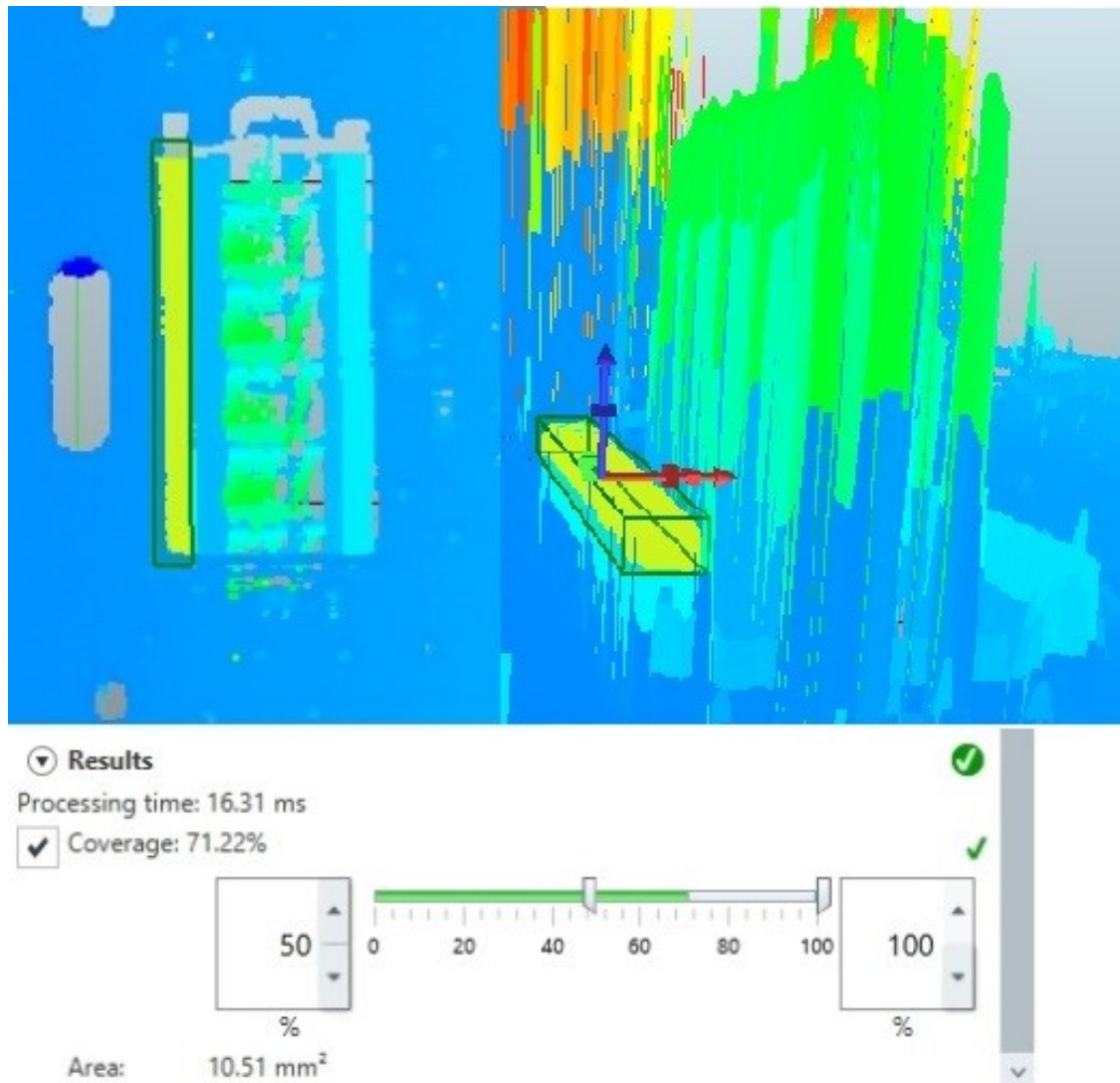


Kuva 55. Pienin ilmakela tunnistettu paikalla olevaksi.

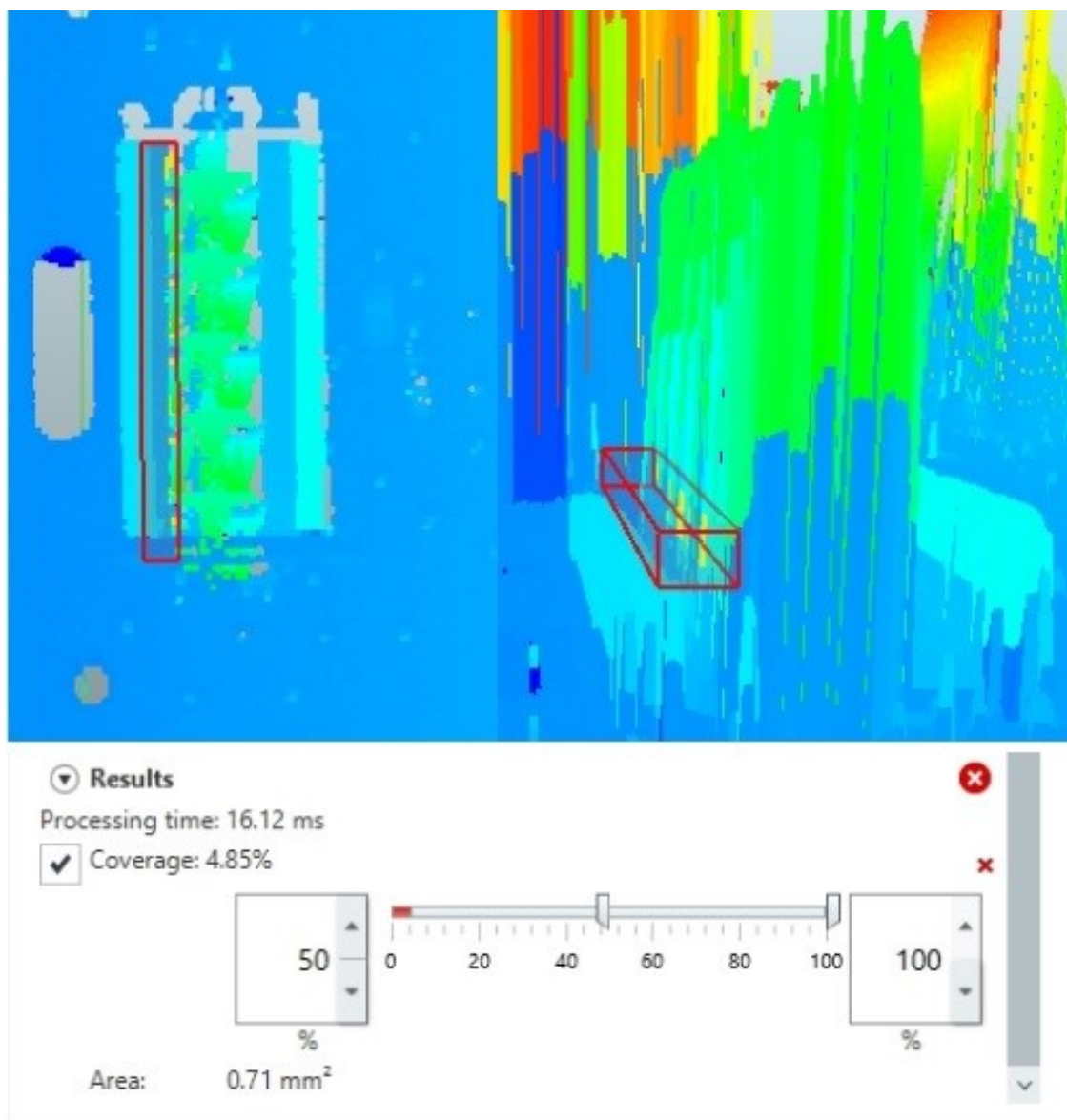


Kuva 56. Pienin ilmakela tunnistettu poissa paikalta olevaksi.

MiniMatch-liittimen paikallaolon tunnistaminen ei ollut ongelma, mutta molemmiin päin asennettavissa olevan liittimen asennussuunnan tuli olla oikea. 2D-kamera ei suuntaa pystynyt nykyisellään erottamaan, mutta 3D-kamera pystyi siihen. Suunnan tunnistus oli mahdollista, koska liittimen muovireunojen korkeudet olivat eri. Kuvista 57 ja 58 nähdään, miten xyz-avaruuteen asetettu laatikko tunnistaa, onko kohdassa massaa eli täyttöö (coverage) vai ei. Kuvassa 57 komponentti on asennettu oikein päin ja kuvassa 58 väärinpäin.



Kuva 57. Oikein päin asennettu MiniMatch-liitin tunnistuu oikein asennetuksi.



Kuva 58. Väärinpäin asennettu MiniMatch-liitin tunnistuu väärin asennetuksi.

3.7 Yhteenveto testatuista kameroista

Työmme lähtökohtana oli tutkia erilaisia edullisia ja kompakteja älykameroita, joilla olisi mahdollista tarkastaa THD-komponenttien paikallaanolo moduulissa. Aloitimme Sick PIM60 -kameralla, jolla havaitsimme heti ongelmaksi kameran liian pienen resoluution. Resoluution kasvattaminen vaatisi enemmän laskentatehoa, josta puolestaan seuraisi kameran hinnan ja koon kasvaminen.

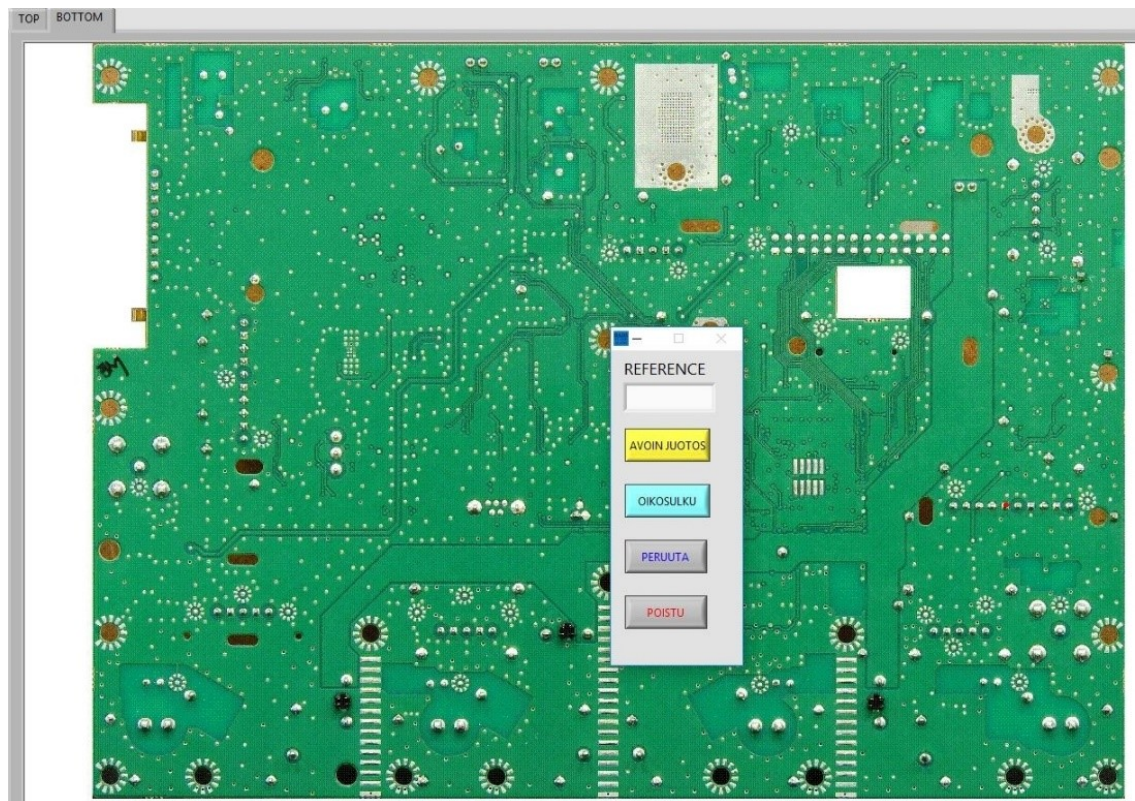
Koska tuotantosolussa, johon kameratarkastus olisi tarkoitus sijoittaa, on jo valmiina tietokone, päätimme ottaa testattavaksi järjestelmän, jossa tavallinen kamera (sensori + objektiivi) on yhdistettynä erilliseen, tietokoneessa ajettavaan älykkääseen ohjelmistoon. Järjestelmän käyttöympäristö on lialta ja kosteudelta suojatussa siistissä sisätilassa, joten käyttöolosuhteiden puolestakaan kameran ei tarvitse olla teollisuuskäyttöön suunnitellussa IP67-suojatussa metallikotelossa. Tässä järjestelmässä kameran sai valita vapaasti, jolloin voidaan valita riittäväresoluutioinen kamera. Laskentateho taas riippuu käytettävästä tietokoneesta. Matrox-ohjelmisto yhdistettynä sopivaan kameraan oli toimiva. Ohjelmistoon sai määritettyä riittävästi erilaisia tunnistettavia kohteita, ja tulokset olivat talletettavissa myöhempää käyttöäkin varten. Lisäksi ohjelmointi ja muu käytettävyyks olivat selkeää ja yksinkertaista.

3D-kameran ominaisuudet ja niiden mukanaan tuomat mahdollisuudet olivat vaikuttavia. Tässä työssä tutkittuun komponenttitarkastukseen se ei kuitenkaan oikein soveltunut. 3D-kuvauksen vaatima liike on tuotantosolussa vaikea ja monimutkainen toteuttaa. Lisäksi tutkimassamme tapauksessa moduuli olisi pitänyt kuvata kahdessa osassa, jotta koko moduuli olisi saatu tutkittua riittävällä tarkkuudella. Moduulin useat korkeat ja kiiltävät metalliseinät aiheuttivat lisäksi useita katvealueita eli kaikki tarkastettaviksi halutut komponentit eivät välttämättä edes näkyisi kuvissa.

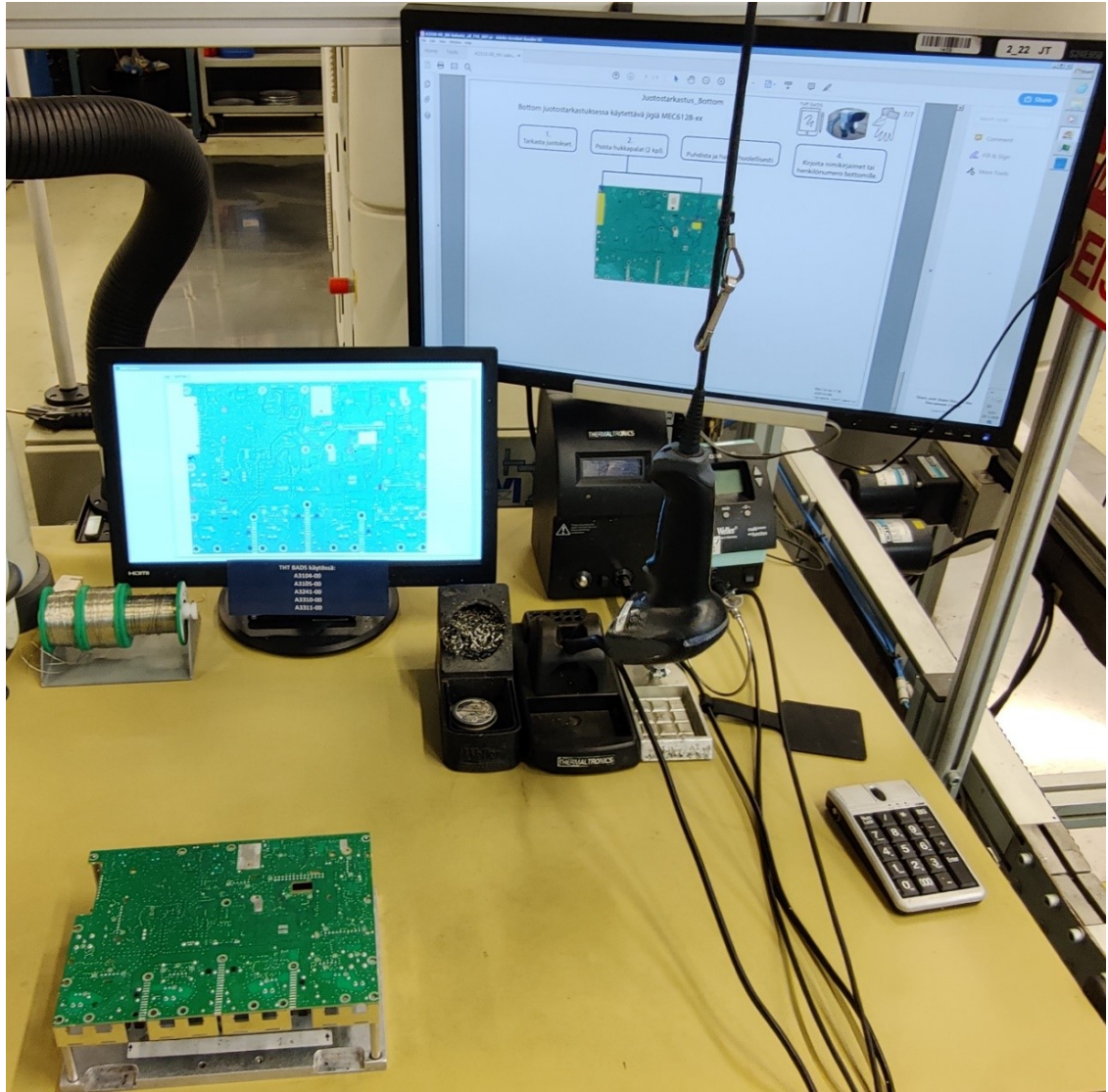
3.8 Moduulin pohjapuolen aaltojuotostarkastus

Moduulin pintapuolen aaltojuotettavien komponenttien tarkastuksen lisäksi haluttiin tutkia myös pohjapuolen juotoksia moduulin mentyä läpi aaltojuotuskoneesta. Esiintyvät viat ovat joko avoin juotos tai oikosulku. Tähän asti silmämääräisen tarkastuksen tuloksia ei ole kirjattu mihinkään ylös, vaan ilmenneet viat on vain korjattu heti. Vikatyypin lisäksi haluttaisiin tietää myös kohdan paikkakoordinaatit levyllä sekä ilmenemisaika. Koordinaatteja tarvitaan, jotta voidaan tarvittaessa tehdä ongelmaa parantavia muutoksia piirilevyyn. Ilmenemisajasta puolestaan voidaan tutkia, onko sillä korrelaatiota aaltojuotuskoneen sulan tinan elinkaaren vaiheisiin tai muuten ajankohtaan. Aihe oli tärkeä, koska ilman vikahavaintojen ylöskirjaamista niiden syitä ei päästä koskaan systemaattisesti selvittämään ja tekemään mahdollisia korjauksia. Monia jo käytössä olevia kytkentäratkaisuja otetaan käyttöön myös uusissa moduuleissa, jolloin samat ongelmakohdat saattavat monistua yhä uudelleen ja uudelleen.

Tuotannossa oli jo käytössä itse tehty viankeruuohjelma, jonka pohjalta ideoitiin aaltojuotostarkastukseen soveltuva versio. Tässä uudessa versiossa käyttäjä merkitsee paikan painamalla kyseistä levyn kohtaa kosketusnäytöltä, jossa on kuva tutkittavan moduulin pohjapuolesta (kuva 59). Paikan merkitsemisen jälkeen käyttäjä valitsee avautuvasta valikosta joko ”Avoin juotos” tai ”Oikosulku”. Sen jälkeen syötetty virhe näkyy kuvassa joko keltaisena tai sinisenä ympyränä. Tietokantaan tallentuu moduuli-kohtaisesti paikkakoordinaatit, vikatyyppi ja aika. Tuotannon aaltojuotospaikka on esitetty kuvassa 60.

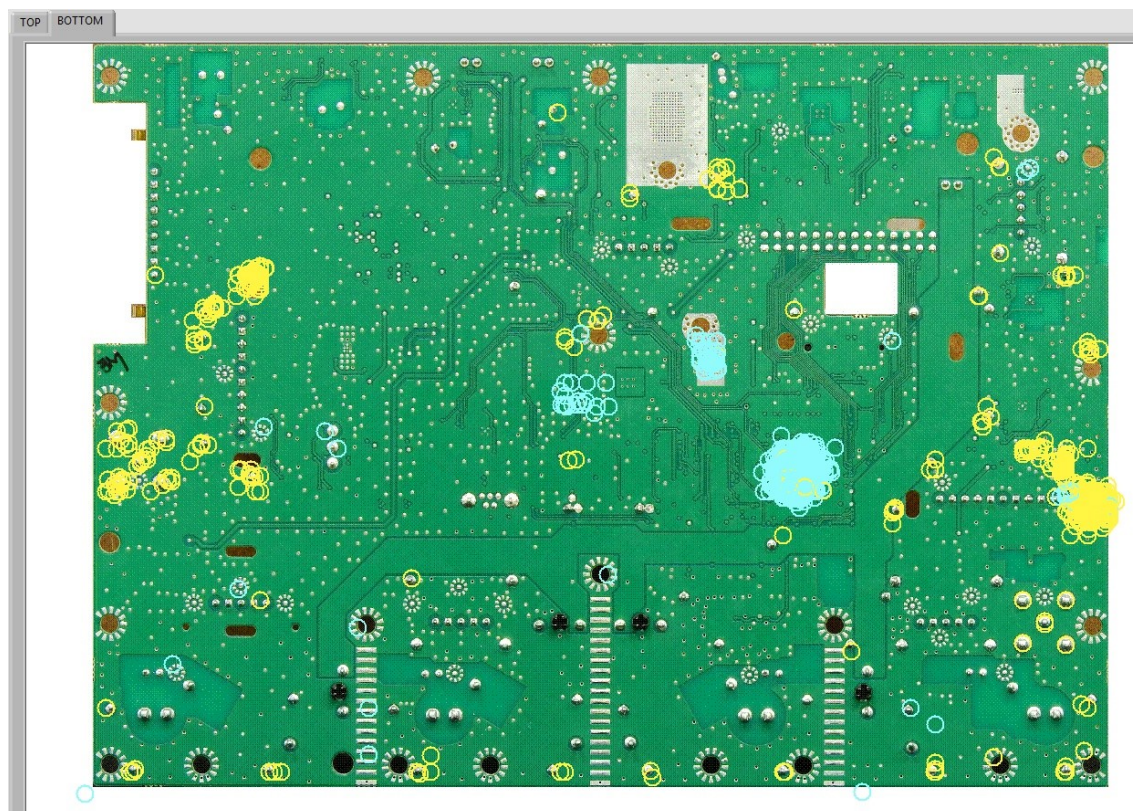


Kuva 59. Viankeruuohjelman käyttöliittymä, joka avautuu tuotantosolussa käyttäjän edessä olevaan kosketusnäyttöön.



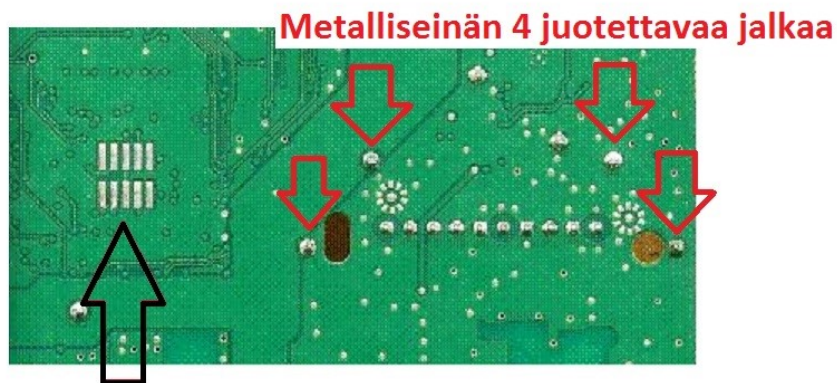
Kuva 60. Aaltojuotostarkastuspaikka. Pöydällä on tutkittava moduuli sekä sen edessä kosketusnäyttö, johon virhekohdat merkitään.

Tietokantaan talletetusta datasta saadaan koostettua kuva, jossa näkyvät kaikki saman moduulin avoimet juotokset ja oikosulut. Joukossa saattaa olla myös virheellisiä merkintöjä, mutta ne jäävät merkityksettömiksi datamäärän ollessa riittävän suuri. Kuten kuvasta 61 nähdään, ongelmat keskittyvät tiettyihin kohtiin levyä ja ne voivat johtua joko THD-komponenteista tai piirilevyn layoutista.



Kuva 61. Kooste tietokantaan tallentuneista moduulin virheistä (keltainen on avoin juotos, sininen on oikosulku).

Kuvassa 61 moduulin keskellä näkyvä suurin sininen virhekeskittymä on latomattoman SMD-liittimen jalkojen juotospaikoilla. Moduulin kulkiessa tina-aallon ylitse on tinaa tarttunut epätoivotusti pastakomponentin juotosalueisiin. Levyn vasemmassa reunassa symmetrisesti näkyvät viisi keltaista virhekeskittymää puolestaan ovat THD-testipisteliittimen jalat ja keskiliitin. Avoimet juotokset johtuvat siitä, että aallon lämpötila ei riitä lämmittämään suurta metallista komponenttia. Samanlainen testipisteliitin näkyy myös levyn toisessa reunassa, mutta siihen avoimia juotoksia on merkitty paljon vähemmän. Ero voisi ehkä johtua siitä, että toinen paikka on jostain syystä aaltojuotoksen tai aaltojuotuskoneen kannalta parempi. Aivan levyn oikeassa reunassa näkyy myös suuri keltaisten merkintöjen keskittymä. Se on suuren nelijalkaisen metalliseinän yhden jalan kohdalla. Muut jalat ovat juottuneet huomattavasti paremmin. Kuten kuvasta 62 nähdään, on juutosongelmanaisen jalan vieressä suuri reikä, joka jostain syystä häiritsee juottumisen onnistumista.



**SMD-liittimen
juotosalue bottom-puolella**

Kuva 62. SMD-liittimen juotosalue ja nelijalkaisen metalliseinän juotettavat jalat.

Tämän datan perusteella on mahdollista löytää virhekeskittymät ja kohdistaa parannusten kehittäminen oikein. Tulevaisuudessa ollaan siirtymässä yhä kasvavassa määrin selektiiviaaltojuotoksen käyttöön, joten vastaavia ongelmia ei pitäisi enää näin laajassa mittakaavassa tulla.

4 POHDINTA

Työn lähtökohtana oli tutkia älykameran soveltumista komponenttitarkastukseen. Hyvin nopeasti kävi kuitenkin ilmi, että se ei sittenkään olisi paras kameravalinta käyttötarkoitukseemme. Kuvattava levy on suuri ja vaatii paljon tarkkuutta, minkä lisäksi kuvauskohde on paikallaan useita minuutteja. Nämä asiat ovat juuri päinvastoin kuin mitä älykameran perusajatuksessa oletetaan.

Heti tutkimusten alkuvaiheessa tuli nopeasti selville, että kuvauskohteemme oli melko haastava. Tutkittavat komponentit olivat hyvin eri kokoisia ja värisiä, minkä lisäksi valo heijastui niiden pinnoilta eri tavoilla. Lisäksi konenäköön perustuvaa tarkastusta ei oltu huomioitu moduulin suunnitteluvaiheessa, koska sellaisen käytöstä ei ollut silloin ollut tietoa. Muutamilla pienillä ja helposti toteutettavilla muutoksilla tarkastuksen toimivuutta ja onnistumista saisi kuitenkin parannettua.

Koska 2D-kameroiden tapauksessa tarkastaminen perustui tummien ja vaaleiden pikselien määrän laskemiseen, voisi kontrastieroja pyrkiä huomioimaan jo piirilevy-suunnittelussa esimerkiksi lisäämällä tutkittavien tumman väristen komponenttien alle valkoinen alue silkkipainomerkinnällä. Levyillä on jo ennestään käytössä silkkipaino, joten lisäkustannuksia ei aiheudu. Kontrastia voisi parantaa myös vihreän piirilevyn juotosmaskin vaihtaminen johonkin toiseen väriin, vaikka valkoiseen. Tosin vihreää juotosmaskia on aina perinteisesti käytetty, ja se on käytännössä standardiväri. Värin vaihto toisi lisäkustannuksia ja pidentäisi toimitusaikaa, sillä valmistuslinja on puhdistettava aina värin vaihdon yhteydessä. Vihreä väri on alun perin valittu juuri ihmisen tekemää tarkastusta varten, koska sen avulla saadaan hyvä kontrasti juotosalueisiin ja silkkipainomerkintöihin nähden. Vihreällä juotosmaskilla on myös varjopuolensa, koska useissa maskimateriaaleissa vihreä väri tulee ympäristölle haitallisesta kloorista. [42]

MiniMatch-liitinten pienten korkeuserojen havaitsemiseen voisi puolestaan auttaa normaalissa valossa näkymättömät maalimerkinnot, jotka kamera näkisi sopivalla valolla. Merkinnot tulisi olla komponenteissa jo valmiina eli ne olisivat komponenttivalmistajan laittamat. Erilaisia maalausmerkintöjä on käytössä joissain komponenteissa jo nyt, joten tämänkin voisi onnistua helposti, mutta toisi varmasti lisäkustannuksia.

Tulevaisuudessa yhä suurempi osa ihmisen käsin tekemistä helpoista manuaalisista töistä siirtyy robotin tehtäväksi. Tässäkin työssä komponentit voisi ladata esimerkiksi yhteistyörobotin avulla. Se tosin vaatisi muutoksia muun muassa työpisteeseen tuotavien irtokomponenttien esillepanossa, mutta mahdollistaisi samalla ihmisen työskentelyn samassa työtilassa ja töiden jakamisen robotin kanssa. Robotti tarvitsee komponenttien poimintaa varten tarttujan, minkä suunnittelu saattaa myös olla pieni haaste poimittavien komponenttien ollessa niin erilaisia. Kädessä voisi tietysti olla vaikka pyörivä tarttuja, jossa olisi muutamia erilaisia päitä eri komponentteja varten. Näin robotti olisi monikäyttöisempi ja siirrettävissä vaikka muuhunkin työtehtävään. Komponenttien päälle asennetaan vielä ennen juotoskoneeseen siirtymistä juotostukia, mutta nykyisten mallien asentaminen robotin avulla olisi todennäköisesti vaikeaa. Kaiken tekemisen siirtäminen robotille ei välttämättä olisi järkevää, sillä se vaatisi tuotantosolun toimintaan suurempaa uudelleensuunnittelua. Robotin avulla voitaisiin tehdä myös komponenttien tarkastus niin, että kamera olisi robotin kädessä ja robotilla kameran ja tutkittavan moduulin paikkatiedot oikeaa kuvausasemointia varten. Tässäkin tapauksessa kuvausympäristö ja valaistus tulisi suunnitella robotti huomioiden.

Molemmat tässä työssä käsitellyt käytännön kehittämiskohteet ovat sellaisia, joissa tekoälyn hyödyntäminen voisi tuoda paljon uusia mahdollisuuksia ja edesauttaisi sekä nopeuttaisi mahdollisimman luotettavan lopputuloksen saavuttamista, vaikka kuvien käsittely onkin ollut tekoälylle perinteisesti haastava osa-alue. Tekoälyn määritelmänä voidaan pitää, että sen on oltava autonomista ja adaptiivista eli pelkkä tietojenkäsittely ei siis vielä riitä määritelmän täyttymiseen. Vielä nykyään käytössä on vain kapean tekoälyn menetelmiä eli ne toimivat vain hyvin rajoitetuissa tehtävissä.

Emme tiedä, oliko käyttämissämme ohjelmistoissa hyödynnetty tekoälyä. Osa komponenttien tunnistamisista perustui selvästi kuvan kontrastieroihin eli niissä laskettiin etukäteen määritetyiltä alueilta joko tummien ja vaaleiden pikseleiden määriä tai 3D-tapauksessa materiaalmassaa. Sen sijaan moduulin asennon tunnistamisessa voisi ajatella olevan mukana tekoälyä, koska ohjelmistolle annettiin referenssiksi vain yksi kuva, mutta tunnistaminen oli mahdollista saada toimimaan moduulin ollessa missä asennossa tahansa. Tämän ominaisuuden lisenssi myös maksoi enemmän, mikä voisi myös viitata kehittyneemmän menetelmän käyttöön.

Tekoäly hyödyntää neuroverkkoja, joiden rakenne ja toiminta muistuttavat biologisia neuroverkkoja. Neuroverkot koostuvat tuoja- ja viejähaarakkeista, solukesuksista sekä synapseista eli yhteyshohdistista. Nykyaikaiset edistyneet neuroverkkomenetelmät

mahdollistavat esimerkiksi kohteen tunnistamisen kuvasta sen sijainnista ja asennosta riippumatta ilman todella suurta opetusdatan määrää. Verkon rakenteesta on tehty kerroksellinen, jolloin yksi kerroksista, tavallisesti alin, on niin sanottu konvoluutiokerros. Eri kerrosten opettamisessa käytetään joko ohjaamatonta tai ohjattua koneoppimista. Kyseessä on datan perusteella tehtävä matemaattisen mallin painojen optimointi.

Valmistetuista moduuleista ja niihin ladotuista komponenteista on eri järjestelmissä saatavilla paljon erilaista dataa. Jos kaikki tiedot olisivat koottuina helposti hyödynnettävästi, voisi automaatiota ja tekoälyä yhdistelemällä saada rakennettua luotettavan ja kattavan tarkastuksen, joka myös oppisi ja hyödyntäisi oppimaansa. Piirilevyn rakenteen tiedot ja komponenttien sijainnit saataisiin piirilevysuunnitteluohjelmistosta ja ladontatiedoista. Jokaisella komponentilla on oma yksilöllinen koodi, jolle komponentin tiedot on talletettu PDM-järjestelmään. Järjestelmässä on jo tiedot komponentin koosta ja muodosta ja lisäksi ladontatieto antaa paikkakoordinaatit, joten näiden yhdistäminen antaa hyvän pohjan 3D-kuvaukselle.

Tietoa juotosongelmista kerätään tällä hetkellä ihmissilmän tarkastuksen avulla, mutta jatkossa, kun dataa on kertynyt tietokantaan riittävästi, voitaisiin sen perusteella jo etukäteen merkata viiankeruuohjelman näyttämään kuvaan ne kohdat, joissa virheitä todennäköisesti on ja jotka tulisi erityisesti tarkastaa. Jos samalle komponenttikoodille kertyy juotosvirheitä vain osassa moduuleita, voitaisiin tutkia, onko piirilevyillä joku sellainen ero, joka vaikuttaa asiaan. Esimerkiksi komponentin vieressä saattaa olla piirilevyllä reikä, jonka olemassaolo vaikuttaa levyn lämpenemiseen ja sitä kautta juotoksen onnistumiseen ja laatuun. Vastaavasti tekoälyn avulla tätä kerättyä dataa voitaisiin hyödyntää myös toiseen suuntaan eli piirilevysuunnitteluohjelmisto voisi varoittaa mahdollisia juotosriskejä sisältävistä kohdista jo etukäteen levyn layoutin piirtovaiheessa. Komponenttien jalkojen juotoskauluksien ja juotosalueiden kokoja optimoidaan usein vielä sen jälkeen, kun komponentti on otettu tuotantokäyttöön. Myös tähän voisi saada apua kerätystä datasta. Lisäksi voitaisiin tunnistaa samantapaiset komponentit, jolloin uusillekin komponenteille voitaisiin arvioida parhaat mitoituskohtat jo heti ensimmäisestä ladonnasta lähtien.

Myös THD-komponenttien ladontaan voitaisiin hyödyntää tekoälyä ja automaatiota. Paras lopputulos saataisiin luultavasti robottia hyödyntäen eli esimerkiksi yhteistoimintarobotti latoisi ensin kaikki komponentit ja sitten niiden paikallaanolo tarkistettaisiin vielä konenäön avulla. Kamera voisi tällöin olla joko kiinteästi asennettuna

kuvauspaikalle tai robotin kädessä. Tieto asennusvirheistä tai puuttuvista komponenteista tallentuisi tietokantaan kuten juotostarkastuksen tapauksessakin. Jos komponenttien latomisen tekee ihminen, voisi työssä hyödyntää myös VR-laseja, jolloin niiden kautta nähtäisiin muun muassa havainnolliset ja työtä nopeuttavat ladontaohjeet sekä erityistä huomiota vaativat komponentit, joissa on aiemmin havaittu paljon asennusvirheitä.

Jatkokehitysideoiden käytännön toteutuksia pohdittaessa on mietittävä, mikä on niiden hinta ja olisivatko sijoitukset kannattavia eli millä aikataululla ne maksaisivat itsensä takaisin. Robotiikan ja tekoälyn yleistyessä hinnatkin varmasti tulevat laskemaan, jolloin nyt kannattamattomalta tuntuva sijoitus voisikin tulevaisuudessa olla toteutuskelpoinen myös näiltä osin. Lisäksi uuden teknologian käyttöönotto jossain sovelluksessa voisi pienentää kynnystä hyödyntää sitä myös jossain muussa sovelluksessa. Näin saataisiin synergiaetuja.

Yhden piirilevyn tietokoneet, kuten Raspberry Pi, ovat nykyään todella suosittuja ja niiden ympärille on mahdollista rakentaa monenlaisia sovelluksia, varmasti myös kameraa hyödyntävä optinen tarkastus. Kokonaan itsetehdyn ympäristön ja sovelluksen rakentaminen vaatisi kuitenkin hyvin monenlaista ja laajaa osaamista sekä veisi varmasti myös paljon aikaa, jos tutkittava kohde on haastava. Konenäköohjelmistot kehittyvät jatkuvasti muun muassa tekoälyn tullessa mukaan yhä erilaisempiin kohteisiin. Tästä esimerkkinä on vaikkapa Sickin julkaisema uusi tekoälyä hyödyntävä älykameran kanssa käytettävä ohjelmisto, jota ei ollut vielä saatavilla, kun testasimme PIM60-kameraa. Se muistuttaa hyvin paljon testaamaamme Matrox-ohjelmistoa, joten kehitystyötä siis tehdään koko ajan ja suunta näyttää selvältä. Tähän pohjautuen edullisen ja monipuolisen kameratarkastuksen rakentaminen täysin itse ilman kovin suurta perehtymistä asiaan ei vaikuta kovin kannattavalta, kun lisäksi tulee muistaa myös tarvittavat päivitys- ja muut kehitystyöt, joita kokonaisuus varmasti tulisi vaatimaan.

Tutkittava kuvauskohde oli melko haastava muun muassa siinä olleiden korkeiden ja kiiltävien metalliosien sekä hyvin pienten komponenttien vuoksi. Tästä huolimatta löysimme yhden kuvausratkaisun (2D Matrox), jolla lähes kaikkien komponenttien tarkastus onnistui luotettavasti. Se on kuitenkin jo huomattavasti luotettavampi ja ajankohdasta riippumatta laadultaan tasaisempi kuin ihmisen silmämääräisesti tekemä tarkastus. Lisäksi tätä samaan tarkastusjärjestelmää voisi varmasti hyödyntää myös muualla tuotannossa, esimerkiksi loppukokoonpanossa valmiiseen tuotteeseen asennettujen erillisten pienten plug-in-komponenttien asennuksen tarkastuksessa niiltä

osin kun niitä ei voida tarkastaa automaattisesti sähköisen tunnistuksen avulla. Matroxin ratkaisu oli tarkoitettuun käyttöympäristöön sopiva sekä kooltaan, muokattavuudeltaan että hinnaltaan. Uusien moduulien lisääminen vaatii tietysti aina työtä ja aikaa, mutta niitä edellyttävät muutkin vaihtoehtoiset ratkaisut. Tuotannon loppukokoonpanossa esillä ollut toinen tarkastuskohde eli liitinten keskilangan kiinnitysruuvin korkeuden tarkastus ja sen perusteella ruuvin pohjaan asti ruuvaamisen tarkistus ei sen sijaan onnistu tällaisella optisella kameratarkastuksella. Valon määrä ruuvin ympäristössä ei ole riittävä, ja ruuvaamiseen liittyvien korkeusasetusten määrittäminen on tällä järjestelmällä vaikeaa ja epämääräistä.

Kamerateistauksesta on kulunut jo jonkin verran, joten voidaan todeta, ettei minkäänlaista kamerajärjestelmää ole hankittu tuotantoon edes testikäyttöön. Toisaalta tämä työn toinen osa-alue eli juotosvikojen merkintäohjelma on sen tuottaman hyödyn vuoksi otettu aktiiviseen käyttöön ja sen tarkastuksen piiriin on tullut jo useita uusia moduuleitakin.

Tässä työssä saamamme tulokset olivat linjassa johdannossa esiteltujen muiden vastaavien tutkimusten tulosten kanssa. Edullinen järjestelmä on mahdollista rakentaa, mutta sillä ei välttämättä saavuteta täydellistä tarkastustulosta. Saavutettu tulos voi kuitenkin olla kaikesta huolimatta riittävä ja merkittävästi parempi kuin aiemmalla tarkastusmenetelmällä saavutettu tulos. Tämän työmme etuna on lisäksi se, että tutkitut järjestelmät eivät vaadi välttämättä laajaa ohjelmointikokemusta, vaan ovat melko helposti käyttöön otettavia.

Työn tekeminen yhteistyössä kahden tekijän voimin on antanut mahdollisuuden paljon syvempään ja kriittisempään pohdintaan kuin mitä yhden tekijän työ olisi todennäköisesti mahdollistanut. Useamman näkökulman esille tuleminen ja niiden huomioiminen on johtanut myös asioiden ja toteutusten tarkempaan miettimiseen, millä on varmasti ollut positiivinen vaikutus työn lopputulokselle.

5 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli etsiä ja tutkia moduulituotantoon käsinladonnan optiseen tarkastukseen sopiva edullinen ja monistettava automaattinen tarkastusjärjestelmä. Sen avulla varmistettaisiin, että kaikki käsin ladottavat komponentit ovat paikoillaan ja oikein asennettuina. Järjestelmän kokonaisuuteen kuului myös kuvauskohteeseen sopivan valaistusympäristön suunnittelu ja toteutus. Tutkimukset aloitettiin älykameralla, mutta pian selvisi, että tarkoitukseen soveltui parhaiten tavallinen 2D-kameraoptiikka, joka oli yhdistetty tietokoneella ohjattavaan älykkääseen ja monipuoliseen ohjelmistoon. Tällä järjestelmällä saatiin luotettavasti tutkittua lähes kaikki halutut komponentit. Tämä saavutettu tulos on kuitenkin jo huomattavasti parempi ja luotettavampi kuin aiemmin ihmissilmällä tehty tarkastus. Lopputuloksen luotettavuutta on mahdollista vielä parantaa melko yksinkertaisestikin piirilevyn pienillä layoutmuutoksilla. 2D-kameroiden lisäksi testattiin myös 3D-kameraa, mutta se ei soveltunut kovin hyvin tämän työn kuvauskohteen tarkasteluun. Muunlaisen kohteen kuvaamisessa 3D-kamera voisi olla hyvä, koska sillä pääsi suureen mittatarkkuuteen. Työn toisena osa-alueena kehitettiin merkintä- ja keräysohjelma juotosvioille. Siinä vikakohdat merkitään kosketusnäytön avulla muistiin ja talletetaan tietokantaan, josta ne on helppo esittää visuaalisessa muodossa ja hyödyntää tietoja uusien piirilevyjen piirroksissa suunnittelun apuna. Juotosvikojen keräysohjelma on otettu käyttöön jo useassa piirilevymoduulissa ja sen kautta kerättyä tietoa on jo päästy myös hyödyntämään. Sen sijaan minkäänlaista kamerajärjestelmää ei ole otettu ainakaan vielä tuotannossa edes testikäyttöön. Kaikesta huolimatta tulevaisuuden suunta näyttäisi olevan yhä enemmän automaation, robotiikan ja tekoälyn hyödyntämiseen päin, minkä tämän työkin osoittaa.

Parhaaksi todetulla tarkastusratkaisulla saataisiin vähennettyä viallisten moduulien eteenpäin pääsyä tuotannon prosessissa, mistä seuraisi samalla myös ajan ja kustannusten säästöä. Käyttöönotto edellyttäisi pienten muutosten tekemistä tuotantoympäristöön, ja uusien moduulien lisääminen tarkastuksen piiriin vaatisi jonkin verran työtä. Tätä vastaavaa kameraratkaisua voisi hyödyntää myös muualla tuotannossa esimerkiksi valmiiseen tuotteeseen asennettavien plug-in-komponenttien asennuksen tarkastuksessa.

LÄHTEET

- [1] F. Ardhy and F. I. Hariadi, "Development of SBC based machine-vision system for PCB board assembly Automatic Optical Inspection," 2016 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD), Bandung, 2016, pp. 386-393, doi: 10.1109/ISESD.2016.7886753.
- [2] T. Parakontan and W. Sawangsri, "Development of the Machine Vision System for Automated Inspection of Printed Circuit Board Assembl," 2019 3rd International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS), Wuhan, China, 2019, pp. 244-248, doi: 10.1109/ICRAS.2019.8808980.
- [3] R. Pramudita and F. I. Hariadi, "Development Of Techniques to Determine Object Shifts for PCB Board Assembly Automatic Optical Inspection (AOI)," 2018 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD), Bandung, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISESD.2018.8605458.
- [4] G. Duan, Y. Chen and T. Sakekawa, "Automatic Optical Inspection of Micro Drill Bit in Printed Circuit Board Manufacturing Based on Pattern Classification," 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Victoria, BC, 2008, pp. 279-283, doi: 10.1109/IMTC.2008.4547046.
- [5] H. Zhao, J. Cheng and J. Jin, "NI vision based automatic optical inspection (AOI) for surface mount devices: Devices and method," 2009 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, Chengdu, 2009, pp. 356-360, doi: 10.1109/ASEMD.2009.5306622.
- [6] Desktop 3D AOI -esite, Marantz Electronics Ltd. [www-dokumentti]
 Saatavilla: <http://marantz-electronics.com/wp-content/uploads/2019/11/PowerSpector-Desktop-AOI.pdf>
 Luettu: 2.7.2020
- [7] Sähkömagneettisen säteilyn lajit. Alkuperäinen kuva Philip Ronan. [www-dokumentti]
 Saatavilla: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum.svg
 Luettu: 26.10.2020
- [8] *Heijastumissuhde*, Ensto Pro. [www-dokumentti]
 Saatavilla:
<http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojaksot/0705016/1228387313247/1228397989485/1228398034451/1228398163914.html>
 Luettu: 5.2.2020
- [9] Varsila Markku, *Luminanssi ja heijastussuhde*. Valo-lehti 1/2018. [www-dokumentti]
 Saatavilla: <https://www.lehtiluukku.fi/lue/valo/1-2018/182322.html> (s.48–49)
 Luettu: 5.2.2020
- [10] *Valaistustekniikan käsikirja: 1*, Suomen sähköurakoitsijaliitto, Suomen valoteknillinen seura 1977.
- [11] *Color luminance*. [www-dokumentti]
 Saatavilla: <http://www.workwithcolor.com/color-luminance-2233.htm>
 Luettu 1.12.2020
- [12] Bedros, Saad J, *Digital Image Representation and Color Fundamentals*. [www-dokumentti]
 Saatavilla: <http://www.me.umn.edu/courses/me5286/vision/Notes/2015/ME5286-Lecture3.pdf>
 Luettu: 4.2.2020

[13] *Digitaalisen kuvan perusteet*. [www-dokumentti]

Saatavilla:

http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/aihiot/fi/ict/kuvankasittely/Digitaalisen_kuvan_perusteet.pdf

Luettu: 6.2.2020

[14] Patterson, Steve, *The Benefits Of Working With 16-Bit Images In Photoshop*. [www-dokumentti]

Saatavilla: <https://www.photoshoppessentials.com/essentials/16-bit/>

Luettu: 6.2.2020

[15] *Understanding Camera Sensors for Machine Vision Applications*, Edmund Optics. [www-dokumentti]

Saatavilla: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/understanding-camera-sensors-for-machine-vision-applications/>

Luettu: 10.2.2020

[16] Axis Communications, *CCD and CMOS sensor technology, Technical white paper*, Axis Communications AB. [www-dokumentti]

Saatavilla: https://www.axis.com/files/whitepaper/wp_ccd_cmos_40722_en_1010_lo.pdf

Luettu: 11.2.2020

[17] Tieteen termipankki, *kvanttihyötysuhde*. [www-dokumentti]

Saatavilla: <http://tieteentermipankki.fi/wiki/T%C3%A4htitiede:kvanttihy%C3%B6tysuhde>

Luettu: 17.2.2020

[18] Nuutinen, Mikko, *Digitaalikameran optiikka ja värinmuodostus*, Aalto-yliopiston luentokalvot. [www-dokumentti]

Saatavilla: <https://docplayer.fi/6112705-Digitaalikameran-optiikka-ja-varinmuodostus.html>

Luettu: 17.2.2020

[19] Gibbs, Emerald, *Technical Intro to Digital Astrophotography Part 1*. [www-dokumentti]

Saatavilla: <https://slideplayer.com/slide/15435876/>

Luettu: 17.2.2020

[20] Chouinard, Jon, *The Fundamentals of Camera and Image Sensor Technology*. [www-dokumentti]

Saatavilla: https://www.visiononline.org/userassets/aiauploads/file/cvp_the-fundamentals-of-camera-and-image-sensor-technology_jon-chouinard.pdf

Luettu: 4.2.2020

[21] Nikon, *Elektronisten ja mekaanisten suljinten eroja*, Nikon. [www-dokumentti]

Saatavilla:

https://www.nikonimsgsupport.com/eu/BV_article?articleNo=000006443&configured=1&lang=fi

Luettu: 18.2.2020

[22] *Sensor and pixel sizes of CCD and CMOS sensors*, Vision Doctor. [www-dokumentti]

Saatavilla: <https://www.vision-doctor.com/en/camera-technology-basics/sensor-and-pixel-sizes.html>

Luettu: 17.2.2020

[23] *Canon's Full-frame CMOS sensors: The finest tools for digital photography, White paper*, Canon. [www-dokumentti]

Saatavilla: https://web.archive.org/web/20121028001406/http://www.robgalbraith.com/public_files/Canon_Full-Frame_CMOS_White_Paper.pdf

Luettu: 18.2.2020

- [24] *The Chemistry of Light & Color*. [www-dokumentti]
 Saatavilla: <https://www.radiantvisionsystems.com/blog/chemistry-light-color>, Värityökalun lähde:
 LibreTexts™ Chemistry
 Luettu: 15.11.2020
- [25] *A Practical Guide to Machine Vision Lighting*, NI. [www-dokumentti]
 Saatavilla: <http://www.ni.com/white-paper/6901/en/>
 Luettu: 17.1.2019
- [26] *Bright Field and Dark Field Lighting*, Omron Microscan Systems Inc. [www-dokumentti]
 Saatavilla: <https://www.microscan.com/en-us/resources/know-your-tech/bright-field-and-dark-field-lighting>
 Luettu: 16.11.2020
- [27] *Machine Vision Lighting and Controller*, Vital Vision Technology Pte Ltd. [www-dokumentti]
 Saatavilla: <https://vitalvisiontechnology.com/machine-vision-lighting/>
 Luettu: 13.11.2020
- [28] DEEDIM Sensorsin Free Illumination -valaisin [www-dokumentti]
 Saatavilla: http://www.deediim.com/en/sub/sub02_02.php
 Luettu: 30.11.2020
- [29] Dechow, David, *Polarization 101: Concepts, techniques, and technologies* [www-dokumentti]
 Saatavilla: https://www.vision-systems.com/cameras-accessories/article/14092924/polarization-definition-of-concepts-techniques-technologies?utm_source=VSD+Special+Topics&utm_medium=email&utm_campaign=CPS200618043&utm_id=354815925623C2X&rdx.ident=%5Bobject+Object%5D&oly_enc_id=354815925623C2X
 Luettu: 21.11.2020
- [30] *Sick Inspector PIM60 ver 2.0 operating instructions* [www-dokumentti]
 Saatavilla:
https://www.sick.com/media/docs/6/36/836/Operating_instructions_Inspector_PIM60_ver_2.0_en_IM0048836.PDF
 Luettu: 15.5.2020
- [31] *Sick Inspector Vision Sensors product information*. [www-dokumentti]
 Saatavilla:
https://cdn.sick.com/media/docs/6/06/206/product_information_inspector_vision_sensors_en_im0026206.pdf
 Luettu: 4.1.2020
- [32] *Sick Dx1000 product information* [www-dokumentti]
 Saatavilla:
https://cdn.sick.com/media/docs/3/93/393/product_information_dx1000_en_im0068393.pdf
 Luettu: 9.11.2020
- [33] *Cognex Remote Head Vision Sensor* [www-dokumentti]
 Saatavilla: <https://www.controldesign.com/vendors/products/2006/060/>
 Luettu: 9.11.2020
- [34] *3D machine vision – technical basics and challenges*, Stemmer Imaging AG. [www-dokumentti]
 Saatavilla: <https://www.stemmer-imaging.com/en/knowledge-base/3d-machine-vision/>
 Luettu: 29.11.2020

[35] Latimer, Wallace, Coherent Inc, *3D Machine Vision Using Laser Triangulation*. [www-dokumentti]

Saatavilla:

<https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/supplements/ptb/features/applications/22464?start=1>

Luettu: 29.11.2020

[36] Tan, Alan, *Is stereoscopic 3D vision what Deep Learning needs to generalize modeling of the reality*. [www-dokumentti]

Saatavilla: <https://medium.com/datadriveninvestor/is-stereoscopic-3d-vision-what-deep-learning-needs-to-generalize-modeling-of-the-reality-1871f579e2ef>

Luettu: 29.11.2020

[37] *3D Scanning With Structured Light*, Bitfab. [www-dokumentti]

Saatavilla: <https://bitfab.io/blog/3d-structured-light-scanning/>

Luettu:

[38] Hogan, Hank, *Sensor Advances Help the Bottom Line*. [www-dokumentti]

Saatavilla:

https://www.photonics.com/Articles/Sensor_Advances_Help_the_Bottom_Line/a56085

Luettu: 4.12.2020

[39] ToF-kameralla otettu kuva. [www-dokumentti]

Saatavilla: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/19/TOF_Kamera_3D_Gesicht.jpg

Luettu: 5.12.2020

[40] *LG G8 3D Sensor Maker Explains Why Time of Flight Is Better than Structured Light*. [www-dokumentti]

Saatavilla: <https://techthelead.com/lg-g8-3d-sensor-time-of-flight-structured-light/>

Luettu: 5.12.2020

[41] *Sick TriSpector1000 3D vision operating instructions*. [www-dokumentti]

Saatavilla:

https://cdn.sick.com/media/docs/0/70/070/operating_instructions_trispector1000_en_im0075070.pdf

Luettu: 30.1.2020

[42] Zheng, Carmen, *Why Are Printed Circuit Boards Usually Green In Color?* [www-dokumentti]

Saatavilla: <https://www.seeedstudio.com/blog/2017/07/23/why-are-printed-circuit-boards-are-usually-green-in-colour/>

Luettu: 5.12.2020