



jamk

Materiaalitietojen ja laatuvirheiden todentaminen konenäön avulla

Juho Kauppinen

Opinnäytetyö, ylempi AMK
Huhtikuu 2024
Tekniikan ala
Insinööri (ylempi AMK), Robotiikka

Kauppinen, Juho

Materiaalitietojen ja laatuvirheiden todentaminen konenäön avulla

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Huhtikuu 2024, 158 sivua.

Robottiikan ylempi AMK tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö, ylempi AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, voidaanko nykyisillä konenäköön liittyvillä teknologioilla saada luotettavaa tietoa tai dataa ruostumattoman teräslevyn pinnasta. Lisäksi tutkittiin, minkälaista laitteistoa konenäköjärjestelmän käyttöönotto vaatisi, sekä minkälaiset kustannukset tästä aiheutuisi. Tutkimuksessa otettiin kantaa myös laadunparantamisen hyötyihin. Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Outokumpu PSC Finland Oy, joka toimii Outokumpu-konsernin tytäryhtiönä Jyväskylässä Keski-Suomessa. Konserni panostaa laajasti teknologiaan ja digitalisaatioon.

Tutkimuksessa käytettiin tutkimuksellista kehittämistyön menetelmää, jonka tutkimusote oli kvantitatiivinen sekä osittain myös kvalitatiivinen. Neljä tutkimuskysymystä antoivat opinnäytetyölle suunnan, joihin pyrittiin hakemaan vastauksia konenäön kirjallisuudesta ja tutkimuksista sekä toteuttamalla laboratorio- ja kenttätestejä. Testit suoritettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun laboratoriossa sekä toimeksiantajan tiloissa. Testeistä konenäköohjelmistolla kerätty data siirrettiin Excel-taulukoihin, jonka jälkeen ne analysoitiin ja visualisoitiin graafisia menetelmiä käyttäen sekä ilmoitettiin keskiarvoina ja onnistumisprosentteina.

Tutkimuksen tuloksista voitiin päätellä, että konenäössä käytettävien laitteistojen ja ohjelmistojen tarkkuus on riittävän korkea tunnistamaan luotettavasti dataa suoraan teräslevyjen pinnasta. Kvantantamisen onnistumisen lopputulos riippui kuitenkin huomattavasti kuvausalueen ympäröivistä olosuhteista, kuten valaistuksesta. Myös ruostumattomien teräslevyjen pinnanlaatu ja puhtaus vaikuttivat kuvantamisen luotettavuuteen. Tuloksista saatiin myös vastaukset aiemmin määriteltyihin tutkimuskysymyksiin, joita voitaisiin hyödyntää jatkossa, mikäli konenäköjärjestelmä päätettäisiin ottaa käyttöön.

Johtopäätöksenä opinnäytetyöstä voidaan todeta, että konenäköjärjestelmien käyttöönotto voi olla haasteellista, mutta laadullisessa mielessä se voi olla myös kannattavaa. Konenäköjärjestelmiä voidaan käyttää materiaalitietojen tunnistamiseen toimeksiantajan tiloissa, mutta pintavirheiden tunnistamisen vaihetta olisi syytä pohtia suoritettavaksi materiaalin tuotannon aiemmissa vaiheissa. Konenäköjärjestelmän lopullinen käyttöönotto vaatii vielä lisätutkimuksia sen integroinnissa nykyiseen tuotannonohjausjärjestelmään.

Avainsanat (asiasanat)

Konenäkö, laatu, konenäköjärjestelmät, konenäköohjelmistot, kuvankäsittely

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Salassapidettäviä liitteitä ovat 1 ja 2. Liitteet sisältävät yksityiskohtaista teknistä dataa liittyen konenäköohjelman suorittamiseen ja näitä ei julkaista avoimeen verkkoon.

Kauppinen, Juho

Verification of material data and quality defects using machine vision

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, April 2024, 158 pages.

Master's Degree in Robotics. Master's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The aim of the thesis was to investigate whether reliable information or data about the surface of stainless steel sheet could be obtained using current machine vision-related technologies. Additionally, the study examined the type of hardware required for the implementation of a machine vision system and the associated costs. The benefits of quality improvement were also addressed in the research. The thesis was commissioned by Outokumpu PSC Finland Oy, a subsidiary of the Outokumpu Group located in Jyväskylä, Central Finland. The corporation invests extensively in technology and digitalization.

The research employed a research and development methodology, with a quantitative approach complemented by elements of qualitative research. Four research questions guided the thesis, seeking answers from existing literature and studies on machine vision, as well as through laboratory and field tests. The tests were conducted both at the laboratory of Jyväskylä University of Applied Sciences and at the facilities of the commissioning company. Data collected from the tests using machine vision software were transferred to Excel spreadsheets, then analyzed and visualized using graphical methods, and reported as averages and success percentages.

The results of the study indicated that the accuracy of the hardware and software used in machine vision is sufficiently high to reliably identify data directly from the surface of stainless steel sheets. However, the success of imaging depended significantly on the surrounding conditions of the imaging area, such as lighting. Additionally, the surface quality and cleanliness of stainless steel sheets also influenced the reliability of imaging. The findings also provided answers to the research questions previously defined, which could be utilized in the future if the decision to implement a machine vision system is made.

In conclusion, it can be stated that the implementation of machine vision systems may pose challenges, but qualitatively, it can also be beneficial. Machine vision systems can be utilized for identifying material data within the facilities of the commissioning company. However, it is advisable to consider conducting the phase of identifying surface defects at earlier stages of material production. The final implementation of a machine vision system requires further research into its integration into the current production control system.

Keywords/tags (subjects)

Machine vision, quality, machine vision systems, machine vision software, image processing

Miscellaneous (Confidential information)

Confidential attachments are 1 and 2. These attachments contain detailed technical data related to the execution of the machine vision program, and they will not be published openly on the internet.

Sisältö

Johdanto	7
1.1 Robotiikan käyttöönotto yleisty	7
1.2 Toimeksiantajasta	8
1.3 Opinnäytetyön tavoite ja oletettavat lopputulokset	8
1.4 Opinnäytetyön tietoperusta	9
2 Laatu.....	10
2.1 Laadun määritelmä	10
2.2 Laatukustannukset.....	10
2.3 Laadun tarkastus.....	12
3 Konenäkö.....	15
3.1 Konenäön määritelmä.....	15
3.2 Konenäköjärjestelmä	16
3.3 Konenäön historia teollisuudessa ja kehitys nykyaikaan	17
3.4 Konenäkösovellus projektina.....	18
4 Konenäköjärjestelmän osat	21
4.1 Kuvausgeometria	21
4.2 Valaistus	25
4.3 Kuvan prosessointi.....	31
4.4 Konenäkökamerat ja niiden valintaan vaikuttavat asiat.....	34
4.4.1 CMOS vs. CCD	35
4.4.2 Matriisi- ja viivakamerat sekä niiden ominaisuudet	39
4.4.3 Kameran liityntärajapinnat	42
4.5 Optiikka ja mitoitusperiaatteet konenäköjärjestelmissä	43
4.6 Konenäköohjelmistot ja kuvankäsittely.....	54
5 Tutkimusasetelma	64
5.1 Tutkimusongelma	64
5.2 Tutkimuskysymykset	65
5.3 Tutkimuksen rajaus.....	66
5.4 Tutkimusmenetelmät.....	67
5.4.1 Tutkimuksellinen kehitystyö	67
5.4.2 Tutkimusote.....	68
5.4.3 Aineiston keruu.....	69
5.4.4 Analyysimenetelmät	69

6	Tutkimuksen toteutus	70
6.1	Lähtötiedot sovelluskohteen näkökulmasta	70
6.2	Konenäköjärjestelmän vaatimukset sovelluskohteelle.....	77
6.3	Laboratoriotestit.....	82
6.3.1	Laboratoriotestien valmistelu.....	82
6.3.2	Testikuvien kuvankäsittely ja ohjelman luominen	92
6.4	Kenttätestit.....	107
6.4.1	Kenttätestien valmistelu.....	108
6.4.2	Kenttätestien kuvien kuvankäsittely ja ohjelman luominen	114
7	Tutkimuksen tulokset	128
7.1	Laboratoriotestien tulokset.....	128
7.2	Kenttätestien tulokset.....	134
7.3	Laboratorio- ja kenttätestien yhteenveto	139
7.4	Vastaukset tutkimuskysymyksiin	140
8	Pohdinta	144
8.1	Tutkimuksen yhteenveto.....	144
8.2	Tutkimuksen luotettavuus.....	146
8.3	Tutkimuksen eettisyys.....	147
8.4	Jatkotoimenpiteet konenäköjärjestelmän toteutuksen näkökulmasta	148
8.4.1	Konenäkösovelluksen integrointi ulkopuoliseen järjestelmään	148
8.4.2	Vaihtoehtoisia tapoja konenäkösovellukselle.....	151
	Lähteet	153
	Liitteet	158
	Liite 1. Laboratoriotestien data (salassa pidettävät).....	158
	Liite 2. Kenttätestien data (salassa pidettävät)	158
	Liite 3. Sopimukset	158
	Kuviot	
	Kuvio 1. Laatuksennustusten hierarkia (Naidu ym. 2006, muokattu).	11
	Kuvio 2. Konenäköjärjestelmän pääkomponentit (Introduction to machine vision 2016, 12). .	16
	Kuvio 3. Kirkas- ja pimeäkentän toimintaperiaate (Exploring bright field... 2022).	22
	Kuvio 4. Vasemmalla kirkaskenttä ja oikealla pimeäkenttä (Exploring bright field... 2022).	23
	Kuvio 5. Taustavalomenetelmän periaate (Vision Doctor n.d.).....	23
	Kuvio 6. Erilaisia valaisintyyppjä (Machine vision lighting, n.d.).....	25
	Kuvio 7. Erilaisten valolähteiden valintakriteerejä kohteen mukaan (A practical guide...2023).26	

Kuvio 8. Polarisaatiosuodattimen toimintaa (A practical guide...2023).	28
Kuvio 9. Valaistustekniikoita sovelluskohteen mukaan (A practical guide...2023).	28
Kuvio 10. Väripyörä (Advanced illumination, 2019).	29
Kuvio 11. Valonlähteiden värien vaikutuksia (Advanced illumination, 2019).....	30
Kuvio 12. Erisävyyisiä valonlähteitä laakerinpyörässä (Illumination wavelength guide, 2020). ..	31
Kuvio 13. CCD-kennon ja CMOS-kennon erot (Von Fintel 2015).	36
Kuvio 14. Yllä CCD-kenno ja alempana CMOS-kenno (Von Fintel 2015).	37
Kuvio 15. CCD- ja CMOS-kennojen eroja kohinan suhteen (Chouinard 2018).....	38
Kuvio 16. Matriisikamera (Basler ace 2 n.d.).....	40
Kuvio 17. Viivakamera (Basler racer...n.d.).	41
Kuvio 18. Harmaasävytasoja (Imaging electronics 101 n.d.).....	42
Kuvio 19. Kuvantamisen perusteet (Hollows & James n.d.a.).	44
Kuvio 20. Lyhyt ja pitkä polttoväli (Hollows & James n.d.b.).....	46
Kuvio 21. Kontrasti (Hollows & James n.d.c.).....	47
Kuvio 22. Kaksi pistettä kuvattuna samalla linssillä (Hollows & James n.d.c.).....	48
Kuvio 23. Viivapari kuvausalueella (Hollows & James n.d.e.).....	49
Kuvio 24. Perinteisen konenäkölinssin anatomia (Firestone ym. n.d.).	52
Kuvio 25. Optiikan aukko (Lens aperture n.d.).....	53
Kuvio 26. Optiikasta johtuvia vääristymiä (Optic distortion n.d.).....	54
Kuvio 27. Kuvakäsittelyn vaiheet (West 2023).	56
Kuvio 28. Mediaanisuuodatus (Boels 2019).....	57
Kuvio 29. Histogrammin vaikutukset. Yllä ennen käsittelyä ja alla jälkeen (Sudhakar 2017). ...	58
Kuvio 30. Segmentointitekniikoita. Yllä kynnystys ja alla klusterointi (What is image...n.d.). ...	59
Kuvio 31. Kuvan tulkinnan (interpretation) vaiheet (West 2023).	60
Kuvio 32. Hahmon tunnistus Vision assistant- ohjelmistolla (Kwon & Ready 2015, 89).	61
Kuvio 33. Merkkien tunnistus (OCR) (Kwon & Ready 2015, 178).	62
Kuvio 34. Virheiden tunnistus käyttäen Countour analysis- toimintoa (Kwon & Ready 2015, 211).	62
Kuvio 35. Reunan tunnistus, eli edge detection (Kwon & Ready 2015, 77).	63
Kuvio 36. Kuva-alueen kalibraatio ennen ja jälkeen (Kwon & Ready 2015, 236).....	64
Kuvio 37. Tutkimuksen sovelluskohde.....	71
Kuvio 38. Ympäristön valaistusolosuhteiden haasteita kohteessa.	71
Kuvio 39. Kohteen pienin havaittava piirre. Punaisella nuolella osoitettu levynumero.....	72
Kuvio 40. Havaittavaa piirrettä eri fontilla. Levynumero kuvan oikeassa ylänurkassa.....	73
Kuvio 41. Viivakoodi levyn pinnassa.....	73

Kuvio 42. Tehdashiontoja.	74
Kuvio 43. Tehtaan leimauksien sijainti levyn reunoista lähtien.....	75
Kuvio 44. Pinnanlaatujen eroja.	76
Kuvio 45. Levyjä vastaanottovaunulla. Teräsakselit törmäytykseen punaisilla nuolilla.	77
Kuvio 46. Levyn poiminta vastaanottovaunusta varastoon.	78
Kuvio 47. Kuva-alat konenäköjärjestelmälle.	79
Kuvio 48. FOV2 optisen järjestelmän vaatimukset.	80
Kuvio 49. FOV1 optisen järjestelmän vaatimukset.....	81
Kuvio 50. Valaistus ilman diffuusoria.....	84
Kuvio 51. Testipaloja. Vasemmalla ilman valaistusta ja oikealla pimeäkenttävalaistuksen kanssa.	85
Kuvio 52. Pimeä- ja kirkaskentän yhdistelmä.....	85
Kuvio 53. Pimeä- ja kirkaskentän yhdistelmä polarisaatiosuodattimen kanssa.	86
Kuvio 54. Kohde eristetty ympäristön hajavalolta.....	87
Kuvio 55. Testipala kirkaskenttävalaistuksessa.	88
Kuvio 56. Kirkas- ja pimeäkentän yhdistelmä.	88
Kuvio 57. Kirkas- ja pimeäkentän vaikutus kohteessa.	89
Kuvio 58. Täysi kirkaskenttä kohteessa.	90
Kuvio 59. Hiottu Q-pinnanlaatu.	91
Kuvio 60. 253MA-pinnanlaatu kirkaskenttävalaistuksessa.	91
Kuvio 61. 253MA-pinnanlaatu voimakkaassa pimeäkenttävalaistuksessa.....	92
Kuvio 62. Esimerkki skriptistä Vision Assistant -ohjelmistossa.....	93
Kuvio 63. Kuvan kalibrointia Vision Assistant -ohjelmassa.	93
Kuvio 64. Kuvan korjaus.	94
Kuvio 65. Levyn vaaka- ja pystysuuntaisten reunojen etsintää.	94
Kuvio 66. ”Caliber” -toiminnolla määritelty levyn reunojen leikkauspiste.....	95
Kuvio 67. Sidottu koordinaatisto.....	95
Kuvio 68. Testipalan mittaus pystysuunnassa 1- ja 2 pisteen välillä.....	96
Kuvio 69. Kuvan kirkkauden ja kontrastin säätöä mittausluotettavuuden parantamiseen.	97
Kuvio 70. Päällekkäisten palojen mittaustoimintoa.	98
Kuvio 71. Vaaleiden blobien kynnystäminen Q-pinnanlaadun testipalasta.	99
Kuvio 72. Tummiin blobien kynnystäminen Q-pinnanlaadun testipalasta.....	100
Kuvio 73. Partikkelianalyysi erotelluista blobeista.	101
Kuvio 74. Outokummun teksti ja logo hahmontunnistuksen määrittämiseen.....	102
Kuvio 75. OCR- toiminto levyn hahmon tunnistuksessa.	102

Kuvio 76. Koordinaatisto sidottu hahmoon.	103
Kuvio 77. OCR-merkkien tunnistusta CPP/1D-pinnanlaadussa.	104
Kuvio 78. Hiotun pinnanlaadun levynumeron tunnistus.....	105
Kuvio 79. Harmaasävykuvien morfologinen toiminto piirteiden korostamiseen.	106
Kuvio 80. 253MA-pinnanlaadun hahmon ja levynumeron tunnistus.	106
Kuvio 81. Viivakoodin luentaa ”barcode reader” -toiminnolla.....	107
Kuvio 82. Valaistus kenttätestien kuvausalueella.....	109
Kuvio 83. Kamera kiinnitettynä telineeseen imukuppinostimessa.	110
Kuvio 84. FOV2 kuvat pimeässä ja hallin valot päällä.	111
Kuvio 85. Konenäkökameran ja älypuhelin kameran eroja.	112
Kuvio 86. Konenäkökameran ja älypuhelin kameran kuvien kynnistyksessä havaittuja eroja.	113
Kuvio 87. FOV2 kuva-alan kalibrointi. Ylempänä ”Tynnyri” ja alempana ”neulatyyny” -vääristymä.	115
Kuvio 88. FOV2 kalibrointi. Kuvan vääristymän korjaus.....	116
Kuvio 89. Koordinaatiston nollapiste FOV2.....	117
Kuvio 90. Haasteita pinnanlaadun erottamisessa FOV2.	118
Kuvio 91. Levyn mittausta vaakasuunnassa.	119
Kuvio 92. Levyn mittauksen haasteita valaistuksen johtuen.....	119
Kuvio 93. Levyn mittauksen epäluotettavuustekijöitä.....	120
Kuvio 94. Vaaleiden ja tummien blobien kynnystäminen samanaikaisesti.	121
Kuvio 95. Blobien partikkelianalyysi.	121
Kuvio 96. Eri pinnalaatujen laatuvirheitä.....	123
Kuvio 97. Pystysuuntaista valssausjälkeä ja voimakasta hiontajälkeä Q-pinnanlaadun levyissä.	123
Kuvio 98. Levynumeron tunnistusta Q-hiottu levystä.	124
Kuvio 99. Mattapintaisen Q-pinnanlaadun merkkien tunnistusta.....	124
Kuvio 100. Baslerin ja älypuhelimien materiaalitietojen tunnistusta.	125
Kuvio 101. CPP/1D-pinnanlaadun merkkijonon pituuden vaihtelua.	126
Kuvio 102. CPP/1D-pinnanlaadun hahmon ja merkkien tunnistusta älypuhelimien kuvassa. .	127
Kuvio 103. CPP/1D-pinnanlaadun hahmon ja merkkien tunnistusta Baslerin kuvassa.	127
Kuvio 104. Kohde 1 luokittelupisteytys merkkien mukaan.	128
Kuvio 105. Kohteiden 1 ja 3 kaikkien merkkien luokittelupisteytyksien keskiarvo.	129
Kuvio 106. Kohteiden 1 ja 3 kaikkien hahmojen luokittelupisteytyksien keskiarvo.	130
Kuvio 107. 253MA-pinnanlaadun luokittelupisteytyksien keskiarvo.	131
Kuvio 108. CPP/1D-pinnanlaatuisten merkkientunnistuksen luokittelupisteytys keskiarvo.	131
Kuvio 109. Poikkeama eräässä CPP/1D-pinnanlaadun testipalan merkkientunnistuksessa....	132

Kuvio 110. CPP/1D-pinnanlaatujen hahmontunnistuksen luokittelupisteytyksiä.....	133
Kuvio 111. Q-pinnanlaatujen merkkientunnistuksen luokittelupisteytys Baslerin kuvista.....	134
Kuvio 112. Q-pinnanlaatujen merkkientunnistuksen luokittelupisteytys älypuhelimien kuvista.	135
Kuvio 113. Levyn mittauskohta vaakasuunnassa	137
Kuvio 114. LabVIEW'n käyttöliittymä.	148
Kuvio 115. Blobien kuvitteellinen sijainti Nestixin sijoitteluohjelmassa.	149
Kuvio 116. LabVIEW'n lohkokaaaviopuolta.	150

Taulukot

Taulukko 1. Digitaalisia kameran liityntärajapintoja (Digital camera interfaces n.d.).....	43
Taulukko 2. Linssin rajoittava resoluutio laskettuna valitun kennon mukaan (Hollows & James n.d.f, muokattu).....	51
Taulukko 3. Kvantitatiivinen ja kvalitatiivinen tutkimus (Heikkilä 2014, muokattu)	69
Taulukko 4. Laboratoriotestien hahmojen ja merkkientunnistuksen onnistumisprosentit.....	133
Taulukko 5. Kenttätestien onnistumisprosentit.	138
Taulukko 6. Konenäköjärjestelmän kustannusarvio.	143

Johdanto

1.1 Robotiikan käyttöönotto yleistyy

Robotiikan käyttöönotto yrityksissä on yleistynyt viime vuosina. Vuonna 2018 tehdyssä tutkimuksessa selvisi, että robotiikkaa jo hyödyntävissä yrityksissä 81 % liiketoimintajohdosta tukee sen käyttöönottoa. Luku oli noussut hieman vuodesta 2017, jolloin se oli 72 %. Pääliikötasolla robotiikan käyttöönottoon suhtauduttiin myös myönteisemmin. Tällöin useammat organisaatiot tunnustivat robotiikan tuomat hyödyt työn tuottavuudessa. Vaikka kuitenkin robotiikan käyttö on yleistynyt, organisaatioiden robotiikkaratkaisut eivät ole skaalautuneet riittävästi. Tutkimuksessa 4 % vastanneista yrityksistä hyödynsi useampaa kuin 50 robottia. 27 % vastanneista yrityksistä kertoivat käynnistäneensä robottikokeiluja alle kymmenen laitteen kanssa tai ottaneensa käyttöön 10–50 laitetta. Kyseiseen tutkimukseen vastasi 530 asiakasta eri toimialoilta ympäri maailmaa. (Kaiho-niemi & Kärkkäinen, 2018.)

Teollisuuden aloilla nähdään robotiikan suhteen suurempaa kasvua. Esimerkiksi teollisuusrobotiikka on ollut 2020-luvulla valmistavassa teollisuudessa jopa megatrendi. Robotiikan kasvu globaalisti on noin 15–20 % vuodessa ja robotiikkalaitteiden menekki on noin 500 000 kappaletta. Valmistava teollisuus on murroksen kynnyksellä ja teollisuusrobotiikassa eletään jo läpimurtovuosia. Läpimurtoon ovat vaikuttaneet maailmantalouden trendit, koska esimerkiksi asiakkaat ovat entistä laatumietoisempia. Koska teollisuudessa on pitkään tehty manuaalista tai käsin tehtävää työtä, joita koetaan myös raskaina ja epämiellyttävinä, pyritään robotiikalla vastaamaan näihin haasteisiin. (Leinonen 2023, 6–7.)

Yksi robotiikkaan liittyvistä teknologioista on konenäköjärjestelmät. Nykyään tuotannon joustavuutta ja monipuolisuutta voidaan parantaa esimerkiksi konenäöllä ja siihen liittyvillä anturitekno-logioilla, sekä parantuneella laskentakapasiteetilla (Leinonen 2023, 7). Lanz (2023) on samaa mieltä ja toteaa, että erityisesti anturiteknologioiden kehittyminen on ollut yksi nopeimmin kasvavista teknologioista liittyen robotiikkaan. Samaan kategoriaan kuuluu siis myös konenäkö ja erilaiset kamerateknologiat. Näitä havainnointiratkaisuja on myyty viimeisen 10 vuoden aikana enemmän kuin koskaan ennen. Suomalaisessa teollisuudessa nojataan vahvasti korkean jalostusarvon tuotteiden vientiin, ja työn jäljitettävyyden ja laatuvaatimukset puoltavat robotiikan käyttöönottoa. (Lanz 2023, 9.)

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, miten konenäköä voisi hyödyntää laadunvarmistuksessa kohdeyrityksessä. Yritys johon tutkimus teetettiin, oli Outokumpu PSC Finland Oy. Tässä opinnäytetyössä pääpainona oli tutustua konenäköön ja sen tuomien teknologisten mahdollisuuksien hyödyntämiseen. Tämä on tärkeää tulevaisuudessa, koska palvelujen ja tuotannon automatisoituessa ei haluta jäädä kehityksessä jälkeen. Laatuvaatimusten kasvaessa on kriittistä, jotta näihin vaatimuksiin pystytään luotettavasti vastaamaan.

1.2 Toimeksiantajasta

Outokumpu PSC Finland Oy on Outokumpu konsernin tytäryhtiö ja toimii omana yksikkönään Jyväskylässä Keski-Suomessa. Yksikön toiminta keskittyy Outokummun omalta tehtaalta tulevien ruostumattomien teräslevyjen leikkuuseen ja aihoiden valmistamiseen suoraan asiakkaille. Teräslevyjen leikkauksessa hyödynnetään vesi-, plasma- ja laserleikkausta. Tuotteita valmistetaan asiakkaiden tarpeiden mukaan muun muassa sellu- ja paperiteollisuuden koneisiin ja laitteisiin, säiliöiden päätyihin, sekä prosessiteollisuuteen. Yksikölle ja koko konsernille laatu ja sen varmistaminen on yksi tärkeimpiä avainkohtia tuotteiden valmistuksessa. Yksikössä työskentelee noin 30 henkilöä mukaan lukien tuotannontyöntekijät, vuokratyövoima, huolto, - ja kunnossapito, sekä toimihenkilöt.

Konserni panostaa laajasti teknologian kehitykseen ja digitalisaation suomiin mahdollisuuksiin. Outokummulla on ruvettu esimerkiksi tutkimaan 3D-tulostuksen, tai toiselta nimeltä lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia ruostumattoman teräksen valmistuksessa. Jyväskylän yksikössä automaation aste on ollut yli 20 vuoden toiminnan ajan suhteellisen suurta, mutta viimeisintä teknologiaa yrityksessä ei ole vielä hyödynnetty. Digitalisaation ja teknologian kehittyminen on vauhdikasta, niin kuin aiemmassa luvussa jo todettiin robotiikan osalta. Yksikön ja koko konsernin olisi pysyttävä mukana tässä kilpajuoksussa, joka on yksi elinehdoista liiketoiminnan edellytyksien jatkumiseen tulevaisuudessa.

1.3 Opinnäytetyön tavoite ja oletettavat lopputulokset

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, voidaanko nykyisillä konenäön teknologioilla saada luotettavaa tietoa tai dataa suoraan materiaalin pinnasta. Mikäli järjestelmä olisi luotettava, voitaisiin ratkaisu ottaa tulevaisuudessa yrityksen käyttöön. Yritys hyötyisi näin laadunvarmistuksessa

ja ratkaisua voitaisiin mahdollisesti soveltaa johonkin muuhun työvaiheeseen tai toimintoon. Näin mahdolliset reklamaatiot ja niiden käsittelyistä aiheutuvat kustannukset saataisiin tältä osin eliminoitua. Myös yleisesti toimialalla ja organisaation sisällä ratkaisua voitaisiin soveltaa mahdollisesti muihin vastaaviin kohteisiin.

Opinnäytetyön oletettavana lopputuloksena saataisiin tutkittu konenäköön perustuva järjestelmä, jolla voitaisiin todentaa materiaalitietoja suoraan tehtaan levyjen pinnassa olevista musteleimauksista tai toisin sanoen stanssauksista, sekä kuvantaa materiaalin eli teräslevyn pinta virheiden varalta. Tutkimuksen lopputulosta voitaisiin hyödyntää konenäköjärjestelmän mahdollisessa käytössä tulevaisuudessa.

Valmis konenäköjärjestelmä voisikin hoitaa tulevaisuudessa viimeisen tarkastuksen automaattisesti levyjen vastaanottovaiheessa ja näin varmistaisi, että inhimillisten virheiden seuraukset vältetään. Tämä helpottaisi materiaalin jatkojalostusta eli levyn leikkausta, kun materiaalin pintavirheet olisivat tiedossa ja visuaalisesti näkyvissä sijoitteluvaiheessa, eli ohjelmanteossa ennen levyjen leikkausta. Näin yrityksen laadunvarmistusprosessia voitaisiin parantaa opinnäytetyön seurauksena.

1.4 Opinnäytetyön tietoperusta

Ojasalo, Moilanen ja Ritalahti (2015) tietävät kertoa, että esimerkiksi tutkimuksellisessa kehittämistyössä on oleellista tuntee tutkimuksen aihealue ja näin ollen löytää näkökulma, kuinka kehittämistyössä edetään. Tietoon, johon kehittämistyön suunnittelu ja toteuttaminen perustuu, kutsutaankin **tietoperustaksi**. Tietoperustaa voidaan kutsua myös käsitteillä kirjallisuuskatsaus, teoreettinen viitekehys tai teoriatausta. Tämä käsite muodostaakin koko tutkimuksen perustan, joka sisältää oleellisen tiedon tutkittavasta aihealueesta. Tietoperustassa käsitellään aihealueen keskeisimmät teoriat, kuvaavat mallit, sekä perehdytään viimeisimpiin tutkimuksiin. (Ojasalo, Moilanen & Ritalahti 2015, 34.)

Tämän opinnäytetyön tietoperustan lähteenä pyrittiin käyttämään alan asiantuntijoiden ja suurien toimijoiden kirjallisuutta, artikkeleita, tutkimuksia sekä teknisiä dokumentaatioita ja laskureita.

Lähteinä toimivat sekä kotimaiset, että ulkomaiset toimijat. Seuraavissa luvuissa perehdytään tämän opinnäytetyön aihealueeseen liittyvään teoriaan.

2 Laatu

2.1 Laadun määritelmä

Laatu aiheena on vanha ja arkinen, tai jopa filosofinen. Kun kohteen luontaiset ominaisuudet täyttävät vaatimukset, voidaan sitä ISO 9000 -standardin mukaan kutsua ”laaduksi”. Laatu kuvaa, mikä on jollekin kohteelle ominaista ja mikä koetaan hyvänä. Se tuo esille kohteen myönteisiä piirteitä ja edustaa hyvän ja onnistumisen käsitettä. Tämän takia laatuun suhtaudutaan yleisesti myönteisesti. (Anttila & Jussila, 2016.)

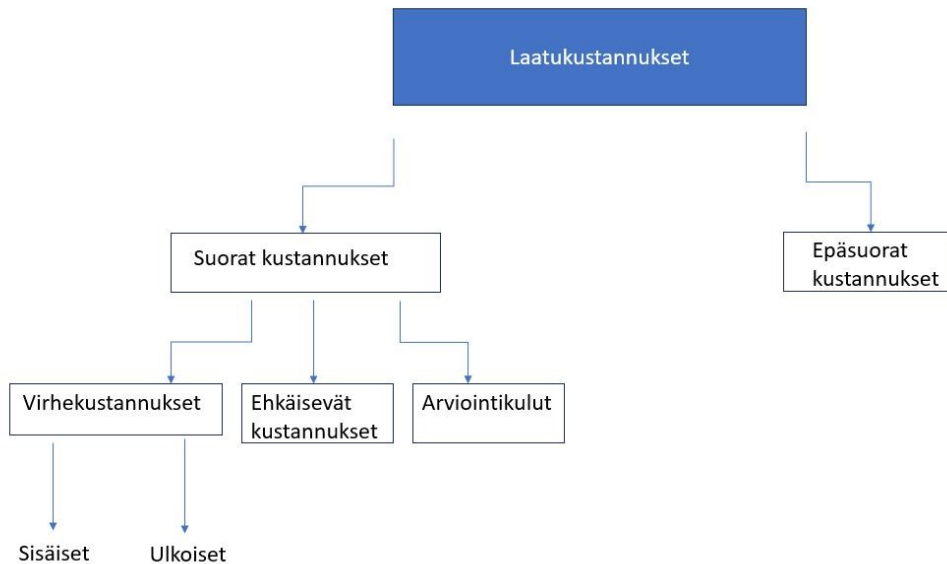
Anttila ja Jussila (2016) mainitsevat artikkelissaan myös, että tuotannossa laatu on vaatimusten täyttämistä ja täyttymistä. Perinteisessä laatutekniikassa näiden määritelmien juuret ovat materiaalien tuotteiden valmistuksessa spesifikaatioiden ja sopimusten mukaisesti, sekä valmistusvirheiden estämisessä. Artikkelissa korostetaan myös, että tuotannon toimintaohjeeksi pitäisi saada hyvä (hyväksyttävissä oleva) laatutaso tai virheettömyys (0-virhetaso). Jotta korkeat tuotantokustannukset voidaan välttää, pitäisi kaikki työt tehdä kerralla aina oikein. (Anttila & Jussila, 2016.)

Naidu, Babu ja Rajendra (2006) kuvaavat laatua myös kokonaisvaltaisen laatujohtamisen teoksessaan. Sana ”laatu” ei tarkoita ainoastaan tuotettua tuotetta tai hyödykettä. Se voi viitata laatuprosessiin (ihmiset, materiaalit, koneet tai laitteet), tai johtamisen laatuun. Laatu on myös yleensä määritelty jonkun tietyn piirteen mukaan kuten esimerkiksi koko, materiaali, kemikaalinen yhdistelmä, mekaaninen toiminta, viimeistely ja muut ominaisuudet. Huomioitavaa on myös, että viimeisen analyysin laatustandardeille ja tuotteille määrittelee kuitenkin asiakas. (Naidu, Babu & Rajendra 2006, 4.)

2.2 Laatukustannukset

Laatukustannukset syntyvät, kun esimerkiksi määritellään jollekin tuotteelle laatu tai muu hyöty. Laadun käyttöönotto taas aiheuttaa aina kustannuksia. Nämä kustannukset voidaan tunnistaa ja

määritellä kustannusluokissa, jotka liittyvät virheiden tai vikojen löytämiseen, korjaamiseen tai välttämiseen. (Naidu ym. 2006, 7.) Kuviossa 1 alla on kuvattu laatukustannusten hierarkiaa.



Kuvio 1. Laatukustannusten hierarkia (Naidu ym. 2006, muokattu).

Laatukustannuksiin liittyvät suorat kustannukset sisältävät muun muassa virhekustannukset, jotka voidaan jakaa sisäisiin ja ulkoisiin virhekustannuksiin. Seuraavaksi käydään läpi, mistä nämä muodostuvat.

Sisäiset kustannukset ovat kustannuksia, jotka katoavat, mikäli virheitä ei esiinny esimerkiksi tuotteissa, kun ne lähetetään asiakkaalle. Ne sisältävät muun muassa:

- *Romu*: Nettohäviö työvoiman ja materiaalien käytöstä, joita ei voida uudelleen käyttää joutuessa sen vioista
- *Uudelleen tekeminen*: Virheellisten tuotteiden korjauksesta johtuvat kustannukset.
- *Uudelleen testaus*: Tuotteiden testauksesta ja tarkastuksista aiheutuvat kustannukset, jos tuotteet joudutaan valmistamaan uudelleen
- *Seisokkiaika*: Virheiden seurauksena aiheutuneet tehtaiden tai toiminnan pysähdykset

- *Tuoton menetykset*: Toimitetaan esimerkiksi enemmän tuotetta asiakkaalle, mitä olisi todellisuudessa tarvinnut toimittaa. Esimerkkinä voidaan mainita säiliöiden ylitäyttö, johtuen mittauslaitteiden vaihteluista. (Mts. 7.)

Ulkoiset kustannukset katoavat myös sisäisten kustannuksien tapaan, jos esimerkiksi tuotteissa tai hyödykkeissä ei ole virheitä. Ulkoiset kustannukset muodostuvat siitä, jos esimerkiksi virheellinen tuote pääsee jostain syystä asiakkaalle asti. Näitä kustannuksia ovat:

- *Virheen oikaisu*: Kaikki viallisesta tuotteesta johtuvien kustannusten hyvitys. Näitä voivat olla jopa suuren laitteiston purkamisesta ja korjauksesta aiheutuvat kustannukset
- *Palautettu materiaali*: Kaikki kustannukset liittyen virheellisten tuotteiden palautukseen, esimerkiksi rahtikustannukset
- *Takuukulut*: Takuusopimuksien alla olevat palvelut asiakkaalle
- *Korvaukset*: Ovat kuluja esimerkiksi siitä, kun loppuasiakkaalle on tehty myönnytyksiä huonolaatuisen tuotteen takia. (Mts. 8.)

Tämän opinnäytetyön kannalta oleellisimpia käsitteitä ovat sisäiset ja ulkoiset kustannukset, koska virheellisen tai viallisen tuotteen pääseminen asiakkaalle asti pitäisi saada eliminoidua. Kustannusten kannalta aihetta rajataan myös näihin käsitteisiin, eikä tässä työssä oteta kantaa muihin laatu-kustannuksiin. Jotta virheellisen tuotteen pääseminen asiakkaalle voitaisiin estää, pitää tuote (tässä tapauksessa levymateriaali) tarkastaa huolellisesti pintavirheiden osalta ennen sen jatkojalostusta. Seuraavassa luvussa käsitellään tarkastelua tai tarkistamista.

2.3 Laadun tarkastus

Tarkastus, tai tämän opinnäytetyön näkökulmasta laadun tarkastus, on yleisin tapa saavuttaa joku standardi, yhtenäisyys ja työn laatu. Voidaankin sanoa, että se on eräänlaista ”kustannustaidetta” valvoa jonkin tuotteen tai hyödykkeen laatua, sekä verrata sitä ennalta määrättyihin standardeihin ja spesifikaatioihin. Tarkastus on välttämätön työkalu modernissa tuotantoprosessissa. Se auttaa laadunvarmistuksessa, vähentää tuotantokustannuksia ja romua sekä muita syitä, jotka johtuvat puutteellisesta työstä. (Naidu ym. 2006, 1.)

Tarkastuksen tavoitteet ovat muun muassa seuraavia:

- Kerätä tietoa tuotteen tilasta standardien mukaan ja hyödyntää sitä tuotannon, ostotoiminnan, sekä laadunvalvonnan rinnalla ja niin edelleen
- Huonolaatuisen tuotteen syyn selvittäminen ja näin ylläpitää standardeja
- Suojella asiakkaita saamasta huonolaatuisia tuotteita ja näin säilyttää, sekä kasvattaa mainetta
- Havaita valmistetun tuotteen vikojen ja epäkohtien lähde ja siten tarkastaa tuotteen suunnittelu. (mts. 1.)

Tarkastuksen tarkoituksia taas ovat:

- Erottaa huonot erät hyvistä
- Erottaa huonot kappaleet hyvistä
- Määrittää muuttuuko prosessissa jokin
- Määrittää saavuttaako prosessi määrittelyrajat
- Arvioida tuotteen laatu
- Arvioida tarkastelijoiden tai tarkastajan tarkkuus
- Mitata mittausvälineiden tarkkuus
- Varmistaa tuotteet ja niiden suunnittelutiedot
- Mitata prosessin kyvykkyys. (mts. 1.)

Tarkastuksen vaiheet taas ovat:

- Saapuvien materiaalien tarkastus
- Tuotantoprosessin tarkastus
- Valmiiden tuotteiden tarkastus. (mts. 1.)

Tämän opinnäytetyön tavoitteisiin kuuluu kehittää saapuvan levymateriaalin tarkastusta ja näin ollen estää huonolaatuisen materiaalin pääsemistä asiakkaalle asti. Siksi tarkastuksen vaiheet raja-

taan käsittelemään saapuvien materiaalien tarkastusta. Naidu ja muut (2006) määrittelevät kirjassaan saapuvan materiaalin tarkastukselle myös toisen nimen, eli **vastaanottotarkastuksen**. Vastaanottotarkastus sisältää kaikki raaka-aineet ja osat, jotka on toimitettu. Tämä tarkastus on tehtävä ennen kuin ne voidaan laittaa varastoon tai vapauttaa tuotantoon. Itse tarkastus voi tapahtua tuotteiden toimittajan päässä tai loppuvalmistajan portilla. (Naidu ym. 2006, 2.)

Outokummulla vastaanottotarkastuksessa tarkastetaan siis tehtaalta tulevia ruostumattomia teräslevyjä. Aiemmin käsiteltiin yleisesti tuotteiden ja materiaalien tarkastukseen liittyviä asioita. Campbell (2013) mainitsee metallien tarkastukseen perehtyneessä teoksessaan, että metallien tarkastuksen tarkoitus on varmistaa osan tai tuotteen laatu ja että se täyttää laadun minimivaatimukset sekä turvallisuusvaatimukset. Metallien valmistuksen prosesseissa on satoja menetelmiä tuotteiden tarkastamiseen. (Campbell 2013, 1.)

On ensiarvoisen tärkeää, että asiakkaan vaatimuksiin ja standardeihin vastataan. Metallisten tuotteiden tarkastus on organisoitua tarkastelua tai muodollista arviointitoimintaa. Konetekniikassa tarkastukseen sisältyvät mittaukset, testit ja mittauslaitteet, joita sovelletaan tiettyihin esineen tai toiminnan ominaisuuksiin. Tuloksia verrataan yleensä tiettyihin vaatimuksiin tai standardeihin, jotta voidaan varmistaa, että tuote tai toiminta täyttää nämä vaatimukset. Visuaalinen tarkastus on yleisin tapa havaita vikoja ja epäkohtia tuotteissa. Se tarjoaa tapoja havaita materiaalin pintavirheitä, kuten korroosiota, epäpuhtauksia, pinnanlaatua sekä pinnan epäjatkuvuuksia liitoksissa ja niin edelleen. (Campbell 2013, 1.)

Visuaalinen tarkastus ei kuitenkaan palvele tämän opinnäytetyön tarkoituspäätä, koska levyn vastaanottotarkastus halutaan automatisoida laadunvarmistamisen kannalta ja tehdä tästä prosessista myös luotettavampi välttämällä ihmisen tekemiä havainnointivirheitä. Visuaalinen tarkastus toimii kuitenkin hyvin muiden menetelmien rinnalla.

Campbell (2013) mainitsee, että **konenäkö** tarjoaa oikein sovellettuna tarkkaa ja edullista tarkastusta työkappaleille tai tuotteille, mikä lisää dramaattisesti niiden laatua. Esimerkiksi auto- ja elektroniikkateollisuus hyödyntävät konenäköä erittäin paljon automaattisissa korkean volyymin, työvoimavaltaisissa ja toistuvissa tarkastustehtävissä. Konenäön kyky tuottaa kuvaa, analysoida

sitä ja tehdä sen pohjalta päätöksiä on erittäin hyödyllinen tarkastus- ja laadunvarmistussovelluksissa. Konenäön sovellukset antavat paljon mahdollisuuksia hyödyntää sitä monissa erilaisissa tehtävissä, mukaan lukien muotojen määrittely, etäisyyksien mittaaminen, kokojen ja mittojen mittaaminen, osien orientaatio, liikkeen määrä sekä pintojen varjostusten havaitseminen. (Mts. 3–4.)

Tässä luvussa käytyjä laatuaspekteja pyritään ratkaisemaan tässä opinnäytetyössä. Jotta voidaan välttyä sisäisiltä ja ulkoisilta kustannuksilta, asiakkaiden reklamaatioilta, maineen menetykseltä ja muilta yritystä liiketoiminnallisessa mielessä haittaavilta laatuvirheiltä, täytyy materiaalin vastaanotto saada luotettavaksi ja asiakkaiden laatustandardeja vastaaviksi. Näiden tavoitteiden saavuttaminen teknologian avulla on mahdollista, ja konenäön sovellukset tarjoavat kaikki tarvittavat työkalut. Konenäkö ja sen järjestelmät ovat laajoja ja sen toimivuuden ymmärtäminen vaatii perehtymistä aiheeseen, joten käydään seuraavaksi läpi konenäön teoriaa.

3 Konenäkö

3.1 Konenäön määritelmä

Jo vuosituhannen alkupuolella Davies (2005) antoi konenäön määritelmäksi, että konenäkö on niiden menetelmien ja tekniikoiden tutkimista, joiden avulla keinotekoisia näköä voidaan hyödyntää käytännön tehtävissä ja sovelluksissa. Voidaan siis sanoa, että se kattaa sellaisenaan tieteen ja insinööritaidon liittyen näkemiseen. (Davies 2005, 13.) Gupta, Arora ja Westcott (2017) kuvaavat konenäköä hieman tarkemmin käytännön kannalta, että se on valmistavassa teollisuudessa paljon käytetty sovellus tai tekniikka. Kyseisessä tekniikassa käytetään kuvantamisjärjestelmää ja tietokonetta kuvien analysoimiseen ja tehdään sen perusteella päätöksiä. (Gupta, Arora & Westcott 2017, 429–430.)

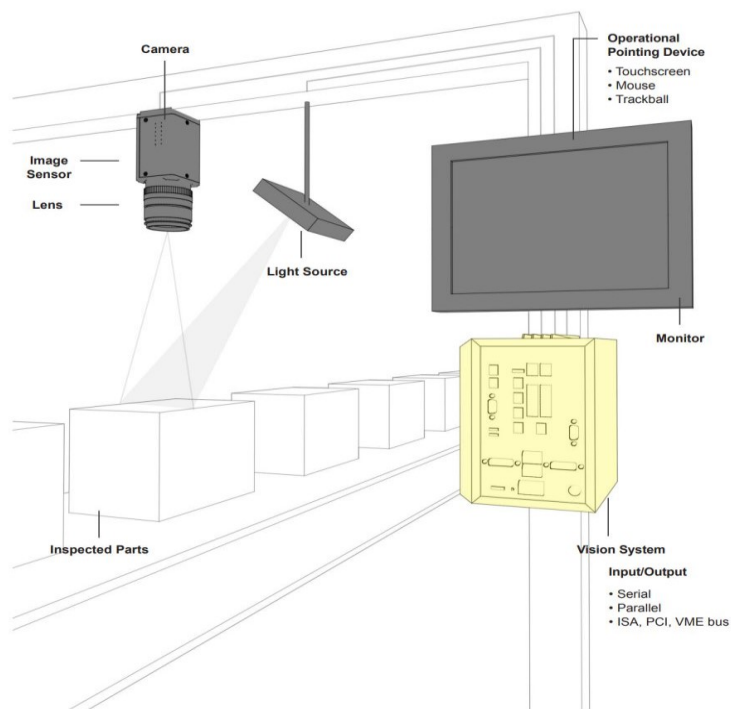
Konenäkölaitteiden valmistaja Gognexin (2016) esitteessä mainitaan, että konenäkö kattaa teollisuuden sovellusten lisäksi myös ei-teolliset sovellukset (Introduction to machine vision 2016, 3). Gognexin esitteessä (mts. 3) yhdytään myös konenäön kuvaukseen Guptan ja muiden (2017, 429–430) kanssa siitä, että toimilaitteet voivat konenäköjärjestelmien laitteiston ja ohjelmiston avulla saada toimintaohjeita, miten suorittaa seuraava toiminto perustuen konenäöllä saatuun kuvaan. Campbell (2013) kertoo, että konenäköä sanotaan myös tietokonenäöksi tai viisaaksi näöksi, koska

tarkoitus on simuloida ihmissilmän/aivojen kuvantunnistusta ja sen analysointia käyttäen elektronisia ja elektromekaanisia tekniikoita (Campbell 2013, 63).

Yhteenvedona voidaan todeta, että konenäköä käytetään pääasiassa teollisuudessa, mutta sitä hyödynnetään myös muilla aloilla. Esimerkiksi teollisuuden robotit voivat käyttää konenäköä päätöksenteossa. Vaikka tässä luvussa käsiteltiin konenäköä yleisellä tasolla ja sen perusteita, se ei vielä tarjonnut tarkempaa kuvaa siitä, mitä komponentteja konenäköjärjestelmä sisältää ja miten ne toimivat. Seuraavassa luvussa käsitellään tarkemmin näitä komponentteja ja niiden toimintaperiaatteita.

3.2 Konenäköjärjestelmä

Konenäköjärjestelmien osia ovat valaistus, prosessointiyksikkö, kamera ja optiikat (Siltala & Gautam 2023, 174). Näiden lisäksi tärkeitä järjestelmän osia ovat kuvakenno ja yhteydet (Introduction to machine vision 2016, 11). Jotta näistä komponenteista saadaan havainnollisempi käsitys, esitellään niiden kokonaisuus esimerkillä kuviossa 2 alla.



Kuvio 2. Konenäköjärjestelmän pääkomponentit (Introduction to machine vision 2016, 12).

Yllä olevassa esimerkkikuviossa valolähteellä valaistaan kappaletta, jotta sen ominaisuudet tulevat esiin ja näin ollen kamera pystyy havaitsemaan ne tarkasti. Tämän jälkeen kameralla otetaan kuva, jonka jälkeen se esitellään linssin läpi valomuodossa kuvakennolle. Kennon tehtävä taas on muuttaa valo digitaaliseksi kuvaksi ja lähettää tämä edelleen prosessorille analysointia varten. Kuvankäsittely- tai prosessointiyksikkö analysoi kuvan käyttäen siinä olevia algoritmeja. Yksikkö siis kerää kuvasta tarvittavan informaation, tekee tarvittavat tarkastukset ja viimeisenä päätöksen mitä kuvalle tehdään. Lopuksi tulo- ja lähtösignaalia, eli I/O-signaalia (engl. input/output) tai muita kommunikointiväyliä käyttäen, välitetään tieto toimilaitteelle, joka toimii järjestelmän päätösten pohjalta. (Introduction to machine vision 2016, 11.)

3.3 Konenäön historia teollisuudessa ja kehitys nykyaikaan

Siltala ja Gautam (2023, 172), sekä konenäköjärjestelmätoimittaja AFRY (Konenäkö automaation väsymättömänä...2021) tietävät kertoa, että konenäön mahdollisuudet ja hyödyt ovat olleet tunnettuja teollisuudessa sekä robotiikassa melko pitkään, ja sen juuret ulottuvat aina yli 30 vuoden taakse.

Robotiikassa yksinkertaisia näköjärjestelmiä oli käytössä jo 80-luvulla. Koska tuolloin tietokoneiden laskentakapasiteetti oli rajoittunut, konenäkösovellukset liittyivät pääasiassa kappaleiden asentojen tunnistamiseen. Konenäön vaatima suuri laskentakapasiteetti vaati suoriutuakseen erikoiskomponentteja, jolloin järjestelmä nousi kustannuksiltaan kohtuuttoman suureksi. (Siltala & Gautam 2023, 172). 80-luvun puolivälistä alkaen konenäköjärjestelmien pioneerit kehittivät myös integroituja konenäköratkaisuja prosessiteollisuuden automaation osaksi (Konenäkö automaation väsymättömänä...2021).

90-luvulla keksittiin CMOS-kuvakennot (engl. Complementary Metal Oxide Semiconductor), mitkä mahdollistivat kamerateknologian. CMOS-kennojen kehitys johti lopulta älykameroiden kehittämiseen, jotka olivat omia itsenäisiä automaatioyksiköitä. Myöhemmin tänä päivänä yleistynyt 3D-kuvantaminen mahdollistaa tarkan topografian ja luotettavan mittaustiedon saamisen kolmiulotteisista kappaleista ja esimerkiksi niiden pinnanpiirteiden muodoista. Kaikista uusinta konenäköteknologiaa edustavat hyperspektrikamerat, jotka voivat havaita aallonpituusalueita, joita ihmisilmä ei voi erottaa tai havaita. Näitä uusia teknologioita käytetään sekä teollisuudessa, että

terveydenhuollon apuna. (Konenäkö automaation väsymättömänä...2021). CMOS-kuvatekniikkaa kuvataan tässä opinnäytetyössä tarkemmin myöhemmissä luvuissa.

Pohjois-Amerikan suurimman automaatioyhdistyksen A3 blogikirjoituksessa (2023) kerrotaan, että nykypäivänä konenäköjärjestelmien apuna voidaan käyttää myös tekoälyä, mikä avaa paljon mahdollisuuksia entistä tarkempaan työskentelyyn. Tekoäly käyttää sovelluksissa syväoppimisen ja koneoppimisen tekniikoita. Esimerkiksi robotti voi tehdä erittäin nopeita liikkeitä erilaisten kappaleiden poiminnassa perustuen tekoälylle opetettuihin algoritmeihin. Kappaleet voivat olla mitä vain perinteisten kuluttajien tuotteista aina kananrintafileisiin asti, jotka liikkuvat esimerkiksi kuljettimilla hurjia nopeuksia. Perinteiset konenäköalgoritmit eivät tähän tehokkaasti kykene. (How Machine Vision...2023.)

Tässä luvussa käsiteltiin konenäön historiaa pääasiassa teollisuuden tarpeiden näkökulmasta. Teknologian kehitys tarjoaa nykypäivänä entistä suurempia mahdollisuuksia hyödyntää konenäköä teollisuudessa ja muilla aloilla. Kuitenkin on tärkeää huomioida, että onnistunut konenäköprojekti kehittyneillä laitteistoilla ei ole aivan yksinkertainen asia, sillä teknologia itsessään ei ratkaise luonnossa esiintyviä ilmiöitä ja asioita. Seuraavassa luvussa 3.4 tarkastellaan tarkemmin konenäköprojektin toteuttamista ja sitä, mitkä tekijät vaikuttavat projektin onnistumiseen.

3.4 Konenäkösovellus projektina

Jotta konenäkösovellus voisi toimia käytännössä ja välttyttäisiin turhalta työltä, on tärkeää **lähtötiedot** projektille ovat hyvin määriteltynä. Yleisesti ottaen kohde, eli kuvattava kappale tai tuotanto asettavat konenäkösovellukselle sen vaatimukset ja tarpeet (Siltala & Gautam 2023, 173). Vaikka West (2022) ei mainitse artikkelissaan kuvattavan kappaleen merkitystä, hän korostaa, että asiakkaan on tiedettävä, mitä konenäköjärjestelmältä halutaan. Saman näkökannan esittää myös Uusitalo (n.d.), joka lisää, että näköjärjestelmän perusteellinen analyysi ja projektin tarkentaminen ovat tärkeitä ennen kuin asiakas tapaa toimittajan. Westin (2022) mukaan asiakkaan on toimitettava järjestelmätoimittajalle tarkat tekniset dokumentit. Vaikka nämä dokumentin vaatimukset eivät yleensä muutu, käytännössä ne voivat kuitenkin muuttua. (West 2022.)

Siltalan ja Gautamin (2023) mukaan asiakkaan ja toimittajan tulisi määritellä lähtötiedot yleensä yhdessä. He perustelevat tätä sillä, että jos järjestelmätoimittaja ei tiedä tarkalleen, mitä näköjärjestelmältä odotetaan, koko projekti saatetaan joutua aloittamaan kokonaan alusta. On siis ensiarvoisen tärkeää, että molemmat osapuolet uhraavat tähän riittävästi aikaa. (Siltala ja Gautam 2023, 174.) Näin ollen voisi päätellä, että molempien osapuolten aktiivisuus projektin alkuvaiheissa voi olla avain projektin vaatimusten ja onnistumisen kannalta.

Siltalan ja Gautamin (2023, 173) mukaan esimerkiksi konenäköjärjestelmän integrointi robottisoluun voisi tapahtua seuraavissa vaiheissa:

- Lähtötietojen määrittely asiakkaan kanssa
- Alustavien testien tekeminen, jotta saadaan varmuus, että ongelma on ratkaistavissa
- Järjestelmän suunnittelu: Kuvankäsittelymenetelmien valinta, valaistuksen suunnittelu, kameralaitteiston valinta, tiedonsiirtotavan valinta, robottiohjelman periaate poimintatapahtumassa, sekä kalibrointi
- Järjestelmän toteutus, käyttöönotto ja testaus
- Järjestelmän luovutus ja operaattoreiden koulutus
- Dokumentointi.

Edellä mainituissa vaiheissa tärkeää on siis lähtötietojen määrittely. Mainitaan seuraavaksi Siltalan ja Gautamin (2023, 174) mukaan, mitä lähtötietojen kuuluu sisältää:

- Sovelluskohteen ympäristö ja sen mahdolliset erityispiirteet, kuten mekaaniset rajoitteet, valaistusolosuhteet, värinä, pöly ja lika jne.
- Tarkkuusvaatimus, eli paikoitustarkkuus ja pienin havaittava piirre
- Kappaleen tyyppi tunnettu ja mitä vaihtelua siinä mahdollisesti on
- Kohteen maksimikoko
- Kappaleen asentoon ja paikkaan liittyvät rajoitteet, eli voiko esimerkiksi kiertyä vapaasti, rajattu paikka tai onko kappaleita esimerkiksi koko kuljettimen leveydeltä
- Maksimi tahti aika.

Konenäköprojekti voi siis olla kokonaisuudessaan melko laaja ja siinä voi olla paljon muuttujia. Toki tämä riippuu sovelluskohteesta, niin kuin tässä luvussa on jo todettu. Lähtökohtien määrittäminen helpottaa kuitenkin projektin etenemistä.

Kun konenäköprojektin lähtötiedot tiedetään ja on määritelty, voidaan niiden perusteella tehdä alustavat testit liittyen valaistukseen ja kuvausgeometriaan (Siltala & Gautam 2023, 174). Tämä vaihe sisältää tyypillisesti useita eri vaihtoehtoja, joita joudutaan selvittämään. Alustavien testien yhteydessä testataan kameroita ja optisia komponentteja, sekä kuvankäsittelymenetelmien soveltuvuutta ongelman ratkaisemiseksi. (mts. 174.) Uusitalo (n.d.) kertoo testausvaiheesta, että vaikka se onnistuisikin esimerkiksi laboratoriossa, ollaan kuitenkin vielä kaukana todellisesta tuotantokäytöstä. Teollisuudessa voi olla paljon ulkoisia häiriötekijöitä, kuten esimerkiksi yleisvalaistus, hitsauslaitteet ja pölyävä ympäristö. Lisäksi näköjärjestelmän kalibrointi laboratoriossa voi olla yksinkertainenkin operaatio, jossa otetaan kohteesta esimerkiksi kymmenen kuvaa eri kulmista. Todellisessa ympäristössä kuvaaminen ei välttämättä enää onnistukaan johtuen tilan ahtaudesta tai muista tekijöistä. (Uusitalo n.d.) Jotta testit voisivat ylipäättään onnistua, tarvitaan niiden suorittamiseen tietenkin testiosia tai koepaljoja. Koepalojen tai testiosien pitäisi olla variaatioiltaan ja määrältään riittäviä, jotta voidaan saada luotettavia tuloksia. (West 2022.)

Lopullisen konenäköjärjestelmäkokonaisuuden toimivuuden kannalta, pitää Siltalan ja Gautamin (2023, 174) mukaan vielä seuraavat asiat huomioida:

- Tiedonsiirtotavan valinta laitteen ja konenäköjärjestelmän välillä
- Valaistuksen lopullinen suunnittelu ja toteutus
- Valaistuksen ja kameran kiinnityksen suunnittelu tuotantoympäristöön sopivaksi
- Kameran ja linssin suojaaminen ympäristön liialta ja räsitukselta.

Yhteenvedonä tältä luvusta voidaan todeta, että konenäköjärjestelmän projekti ja sen käyttöönotto vaativat monia eri vaiheita ja paljon selvitystyötä. Tämän opinnäytetyön onnistumisen kannalta lähtötietojen määrittäminen ja sitä seuraavat testit täytyy tehdä huolellisesti. Jotta ymmärrettäisiin, miten konenäköjärjestelmä ja sen komponenttien vuorovaikutus toimii ja mitä ne

pitävät sisällään, täytyy niihin perehtyä syvällisemmin. Seuraavassa luvussa 5 käsitellään konenäköjärjestelmän osia.

4 Konenäköjärjestelmän osat

4.1 Kuvausgeometria

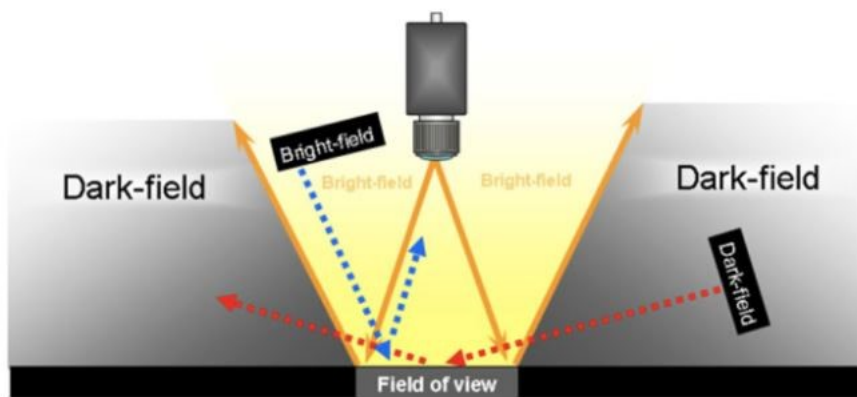
Konenäköjärjestelmää suunniteltaessa täytyy ottaa ensimmäisenä huomioon kuvausgeometria. Kuvausgeometrialla tarkoitetaan sitä, kuinka kohde, kamera ja valaisin sijaitsevat suhteessa toisiinsa. (Siltala & Gautam 2023, 175.) Kuvausprosessin lopputuloksen onnistumiselle tyypillisintä ja voisi sanoa turvallisinta on sijoittaa kamera kohtisuoraan kuvattavan kappaleen yläpuolelle. Tällä vältetään perspektiivi- ja linssivirheet, mikä taas vähentää kuvan kalibrointiprosessia jälkeenpäin. (mts. 175.) Tässä opinnäytetyössä on tarkoitus mitata ja paikoittaa materiaalin pintavirheitä teräslävyssä. Siltala ja Gautam (2023) mainitsevat, että juuri mittaus- ja paikoitussovelluksissa kyseisellä kameran sijoittamisella on etua siinä mielessä, että millimetri-pikselisuhde on suurin piirtein sama koko kuva-alan. Mikäli kamera olisi kulmassa kuvattavaan kohteeseen verrattuna, syntyisi perspektiivivirhettä ja kohdekappaleen kauimmainen nurkka näyttäisi pienemmältä kuin lähempänä oleva (mts. 175). Tämän opinnäytetyön kannalta kuvaus olisikin järkevää tehdä suoraan kuvattavan kohteen yläpuolelta.

Kuvausgeometriaan liittyen oleellisinta on itse valaistuksen sijoittaminen. Valaistuksen sijoittamisen menetelmiä on kolmea erilaista: **kirkaskenttävalaistus** (engl. brightfield), **pimeäkenttävalaistus** (engl. darkfield), sekä taustavalo. (Mts. 174.)

Siltalan ja Gautamin (2023) mukaan **kirkaskenttävalaistuksessa** valaistaan kohde ja valonsäteet heijastuvat suoraan takaisin kameraan. Tällä valaistuksen menetelmällä ei kuitenkaan havaita helposti pieniä vikoja tai reunoja, kuten esimerkiksi kaiverruksia, naarmuja tai painaumuksia, koska tällaiset muodot hajauttavat valoa ja vaikeuttavat kuvanmäärittystä. Heijastavat pinnat aiheuttavat tälle menetelmälle myös omat haasteensa, koska enemmän valoa heijastuu takaisin kameralle. Tämä voi näkyä kirkkaina täplinä kuvassa. Parhaimman lopputuloksen tällä menetelmällä saa, jos valonlähde asetetaan 45- tai 90 asteen väliseen kulmaan kuvauskohteeseen nähden. (Siltala & Gautam 2023, 174.) Adimecin verkkosivuilla olevassa artikkelissa (2022) todetaan, että lisäksi valonlähde olisi hyvä sijoittaa mahdollisimman lähelle kohdetta, koska näin voidaan kattaa suurempi pinta-ala

ja se voi helpottaa heijastavien pintojen sekä reunojen kuvantamisessa aiheutuvia ongelmia. (Exploring bright field... 2022.)

Pimeäkenttävalaistusta käytetään esimerkiksi silloin, kun halutaan korostaa kuvattavan kohteen pinnanmuotoja tai muita piirteitä, joita kirkaskenttävalaisulla ei voida havaita. Tässä valaistusmenetelmässä valonlähde sijoitetaan matalassa kulmassa kuvattavan kohteen sivulle, jolloin valonsäteet eivät osu suoraan kameraan, mutta kohteen pinnan korkeuserot ja muut virheet taittavat valoa kohti kameraa. (Siltala & Gautam 2023, 175.) Jotta ymmärrettäisiin paremmin kirkas- ja pimeäkentän toimintaperiaatetta, havainnollistetaan sitä Adimecin (Exploring bright field... 2022) mukaan alla kuviossa 3. "Field of view" tarkoittaa kuviossa siis "kuva-aluetta".



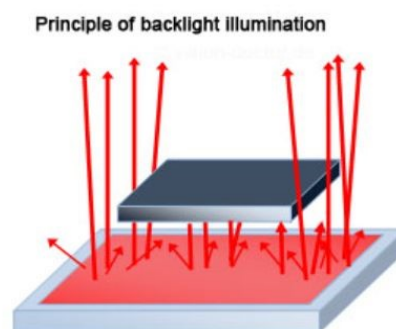
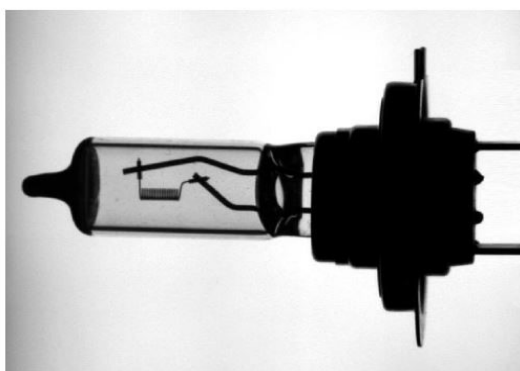
Kuvio 3. Kirkas- ja pimeäkentän toimintaperiaate (Exploring bright field... 2022).

Hahmotetaan seuraavaksi vielä kirkas- ja pimeäkentän eroja Adimecin (2022) mukaan alla olevassa kuviossa 4. Kuvassa on kaksi kolikkoa vierekkäin, ja siinä näkyy, kuinka pinnanmuodot erottuvat pimeäkentässä paremmin. Kirkaskentässä taas ihmisen kuva on selkeämpi, mutta teksti erottuu huonosti.



Kuvio 4. Vasemmalla kirkaskenttä ja oikealla pimeäkenttä (Exploring bright field... 2022).

Mainitaan vielä kolmannelta menetelmästä, eli taustavalosta. Tätä menetelmää käytetään, jos halutaan mitata kappaleita niin tarkasti kuin mahdollista. Käytännössä tällöin valolähde asetetaan kuvattavan kappaleen vastapuolelle. Näin ikään kuin itse kappale muodostaa heijastavan valon kameralle. (Vision Doctor n.d.) Siltala ja Gautam (2023, 174) tarkentavat, että tätä menetelmää käytetään kohteen korkeakontrastisen silhuettikuvion muodostamiseen. Tästä voidaan päätellä, että itse kappaleen pinnamuodoista ja muista piirteistä ei saada selkeää kuvaa. Näin ollen tämä menetelmä on tämän opinnäytetyön kannalta epärelevantti. Kuviossa 5 alla on havainnollistettu taustavalomenetelmän periaate.



Kuvio 5. Taustavalomenetelmän periaate (Vision Doctor n.d.)

Tang, Chen, Sun ja Lin (2022) käsittelevät artikkelissaan erilaisia menetelmiä liittyen terästuotteiden pintavirheiden tunnistukseen konenäön avulla. Teoksessa tiivistetään useamman vuoden ajalta erilaisia kansainvälisiä tutkimuksia aiheeseen liittyen. Artikkelin kirjoittajat ovat IET:een (The Institute of Engineering and Technology) tiedeyhteisön jäseniä. Instituutiossa on 154 000 jäsentä

ja ammattilaista 148 maasta. Tiedetään, että jo 1980-luvulla tutkijat aloittivat käyttämään konenäkömenetelmiä metallipintojen virheiden tunnistamiseen. 1990-luvulla suuret toimijat kuten Cognex, Parsytec, EES ja ABB aloittivat vastaavien menetelmien käytön. Nykyään ASIS (engl. Vision-based Automatic Surface Inspection System), eli suomeksi ”konenäköön perustuva automaattinen pintojen tunnistus järjestelmä” on laajalti tutkittu ja sovellettu. (Tang, Chen, Sun & Lin 2022, 303.) Tähän lukuun liittyen artikkelissa mainitaan, että kahta yleisesti käytettyä menetelmää ASIS-järjestelmässä ovat ”intensity imaging” (suomeksi intensiteettikuvaus) ja ”range imaging” (suomeksi etäisyyskuvaus) (Mts. 305–306).

Intensiteettikuvausella tarkoitetaan siis molempia, eli kirkaskenttä- ja pimeäkenttäkuvausta (mts. 305–306). Huomionarvoista on, että teräspintojen virheiden tunnistuksessa käytetään yleensä molempia valaistusmenetelmiä yhtä aikaa. Tutkimuksissa käytettiin myös vuoron perään sekä kirkas- että pimeäkenttävalaistuksia. Kuitenkin tutkimuksista voitiin päätellä, että kirkas- ja pimeäkenttämenetelmien yhdistelmällä saatiin tarkempia tuloksia pintavirheiden tunnistuksessa. Muun muassa tätä yhdistelmää käyttäen saatiin mikroepämuodostumia tunnistettua, sekä eräässä tutkimuksessa suositeltiin käytettäväksi tätä menetelmää metallisten nauhalevyjen virheiden tunnistuksessa. Eräässä tutkimuksessa käytettiin strobo- ja hajavaloa ruostumattomien terästen tuotantolinjalla. (Mts. 306.) Voisi siis päätellä, että näitä kahta valaisumenetelmää yhdistämällä saataisiin parempia tuloksia virheiden tunnistuksessa, kun kyseessä on terästen pintojen kuvaaminen.

Etäisyyskuvausta käytetään, kun halutaan selvittää kohteen korkeuseroja tai luoda kolmiulotteisia, eli 3D-hahmoja. Tällä menetelmällä pintojen heijastuminen ei vaikuta näiden ominaisuuksien mittaamiseen. Yleisesti tätä menetelmää käytetään sovelluksissa, joissa tuotantonopeus ei ole suuri ja 3D-hahmot tai ominaisuudet ovat selkeästi havaittavissa. Tämä johtuu siitä, että kuvan saama syvyys- tai korkeustieto voi heikentää havaitsemistehokkuutta ja kuvan resoluutio ei ole kovin korkea. (Mts. 305.)

Yhteenvedona tästä kappaleesta voidaan todeta, että kuvausgeometrialla on suuri merkitys kuvattavan kappaleen tai alueen piirteiden erottamisessa. Tässä opinnäytetyössä on tarkoitus kuvata ruostumattomia teräslevyjä ja sen pintoja, sekä erottaa niistä tekstiä, viivakoodia ja pintavirheitä. Teräspintojen virheiden kuvaamista on siis jo tutkittu ja tätä tietoa voidaan mahdollisesti myös

hyödyntää tässä työssä. Kuvausgeometriaan olennaisesti liittyvä osa on valaistus ja sen merkitys on suuri. Seuraavassa luvussa tutustutaan konenäköjärjestelmän valaistukseen tarkemmin.

4.2 Valaistus

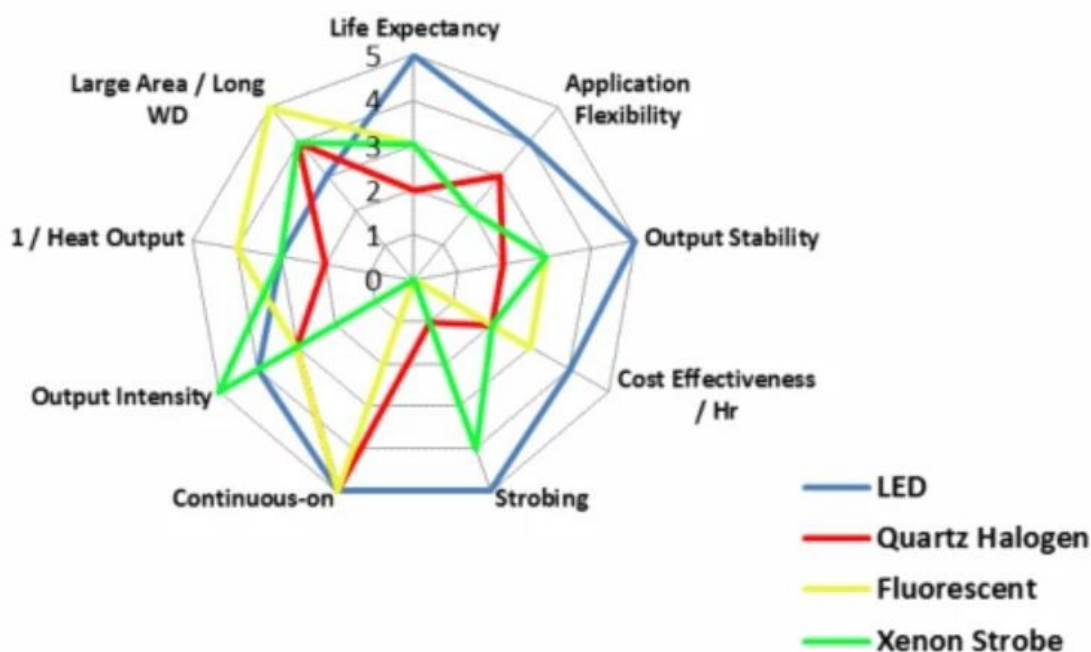
Valaistuksella on erittäin suuri merkitys konenäköjärjestelmissä ja haluttujen piirteiden esiintuomisessa kuvaamisessa. Siltalan ja Gautamin (2023, 175–176) mukaan valaistuksen merkitys näköjärjestelmässä on 50 % tai jopa enemmän ja he huomauttavat myös, että *”Hyvällä valaistusratkaisulla voi ratkaista koko konenäkösovelluksen, mutta huonolla sen voi pilata täysin”*. National Instrumentsin oppaassa (A practical guide...2023) korostetaan myös samaa asiaa, että mikään muu näköjärjestelmän suunnittelun ja toteutuksen osa ei ole aiheuttanut enemmän viiveitä, kustannuksia ja yleistä hämmennystä kuin valaistus.

Aiemmin valaistukseen panostettiin vasta konenäköprojektin loppuvaiheessa, jos ollenkaan. Tähän vaikutti osaltaan se, että nykyistä valoteknologiaa ei ollut silloin saatavilla ja valonlähteinä käytettiin yleisesti tavallisia hehku- tai fluoresoivia valaisimia (A practical guide...2023.) Nykyään markkinoilla on kuitenkin saatavilla laaja valikoima erilaisia valaisimia eri käyttötarkoituksiin. Tyypillinen valaistusratkaisu on LED-valaisin (engl. Light Emitting Diode) tai loisteputkivalaisin. (Siltala & Gautam 2023, 176.) Tang ja muut (2022, 305) toteavatkin, että teräspintojen pintavirheiden tunnistuksessa käytetään laajasti LED-valaisimia niiden etujen vuoksi, kuten esimerkiksi pitkäikäisyys, pieni tilantarve, luotettavuus, tasainen ja vakaa valo, sekä helppo integrointi. Erilaisia valaisintyyppiä on esitetty alempana kuviossa 6.



Kuvio 6. Erilaisia valaisintyyppiä (Machine vision lighting, n.d.)

LED-valaisimen lisäksi suosittuja valonlähteitä konenäköratkaisuissa ovat fluoresoivat valaisimet, kvartsihalogeenit, metallihalogeenivalot (kuten elohopea) ja ksenonvalot. Pienempien ja keski-suurten alueiden tarkastelussa tyypillisimpiä valonlähteitä ovat fluoresoivat valaisimet, kvartsihalogeenit ja LEDit, kun taas metallihalogeenit, ksenonit ja suurpainenatrium-valot ovat yleisempiä suurempien alueiden valaistuksessa ja suuritehoisten valonlähteiden tarpeissa. Esimerkiksi ksenonvalot soveltuvat hyvin kohteisiin, joissa tarvitaan kirkasta strobo-valoa (A practical guide...2023.) Kuviossa 7 alla on esitetty National Instrumentsin oppaan (2023) mukaan eri valonlähteiden hyödyt, haitat ja valintakriteerit. Esimerkiksi LED-valoilla on pidempi käyttöikä, kun taas kvartsihalogeenivaloilla on suurempi intensiteetti (A practical guide...2023).



Kuvio 7. Erialaisten valonlähteiden valintakriteerejä kohteen mukaan (A practical guide...2023).

Siltala ja Gautam (2023) huomauttavat, että aina ei ole tarpeen käyttää pelkästään näkyvän valon aallonpituutta, vaan voidaan hyödyntää myös ultraviolettivaloa tai infrapunavaloa. Infrapunavalo on erityisen hyödyllinen, kun tarvitaan korkean intensiteetin valaistusta tai lyhyitä valopulsseja. Näitä valonlähteitä olisi harkittava, kun alueella työskentelee esimerkiksi ihmisiä, sillä näkyvä valo voi olla häiritsevää ja vaikuttaa siten työturvallisuuteen (Siltala & Gautam 2023, 177.)

Valaistuksen tarkoituksena on korostaa kuvattavan kohteen tai kiinnostavan piirteen kontrastia mahdollisimman suureksi ja samalla häivyttää taustaa tai muita ei-olennaisia asioita. Valaistuksen on katettava koko kuvausalue, ja sen intensiteetin on oltava riittävä ja tasainen. Erityisen tärkeää on estää varjojen ja päivänvalon pääsy kuvattavaan kohteeseen (Siltala & Gautam 2023, 176.)

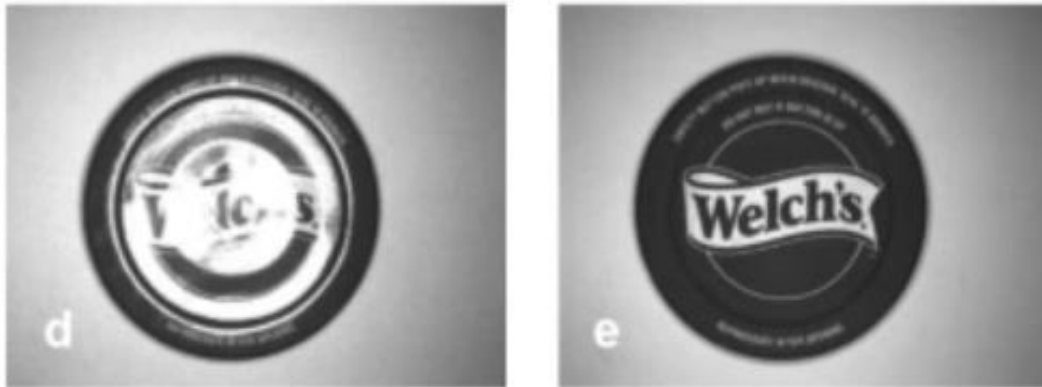
Valaistuksen ominaispiirteitä Valaistuksen ominaispiirteitä ovat valaisimen tyyppi, muoto ja aallonpituus eli väri. On tärkeää harkita, onko käytössä laaja valonspektri, kapea aallonpituusalue tai jopa yksittäinen aallonpituus. Lisäksi on pohdittava, suunnataanko valoa kohteeseen samansuuntaisina säteinä vai hajotetaanko säteitä useaan eri suuntaan, mikä tunnetaan myös **diffuusiona** (Siltala & Gautam 2023, 176.) Erilaisia valaisintyyppejä käsiteltiin siis aiemmin jo tässä luvussa.

Valaisimen muodolla voidaan vaikuttaa valaistusratkaisuihin. Kirkaskentässä tyypillisesti käytetään rengasvaloa tai koaksiaalista valoa. Pimeäkentässä, tai kun halutaan valaista kohde kulmassa, palkki- tai spottivalot ovat yleisiä valaisinratkaisuja. Dome-valaisimen avulla puolestaan saadaan kohdetta valaistua monesta eri suunnasta. Erityisesti peilikiiltävien kohteiden valaisemisessa on tärkeää tuoda valoa useasta eri suunnasta, jolloin valaisin toimii diffuuserina (Siltala & Gautam 2023, 176–177.)

Erilaisia valon aallonpituuksia voidaan estää pääsemästä kuvauskohteeseen. Varsinkin ympäröivän valon (engl. ambient light) aallonpituuksilla voi olla epätoivottuja vaikutuksia kuvausprosessiin, kuten heijastukset. Yleisimpiä ympäröiviä valonlähteitä ovat esimerkiksi tehdasvalot ja aurin-
gonvalo, mutta myös muista työpisteistä tai työvaiheista tulevat valot voivat häiritä prosessia. Ympäröivän valon pääsyä kohteeseen voidaan estää muun muassa käyttämällä suuritehoisia strobo-valoja, fyysistä suojakotelointia tai aallonpituuden suodattimia. Strobo-valon voimakkuudella voidaan käytännössä 'pyyhkiä' kaikki muut valonlähteet kohteesta. Tämä ratkaisu voi kuitenkin olla kallis toteuttaa ja vaatii enemmän suunnittelutyötä. Lisäksi kaikkia valonlähteitä ei ole mahdollista strobo-säteilyttää. (A practical guide...2023.)

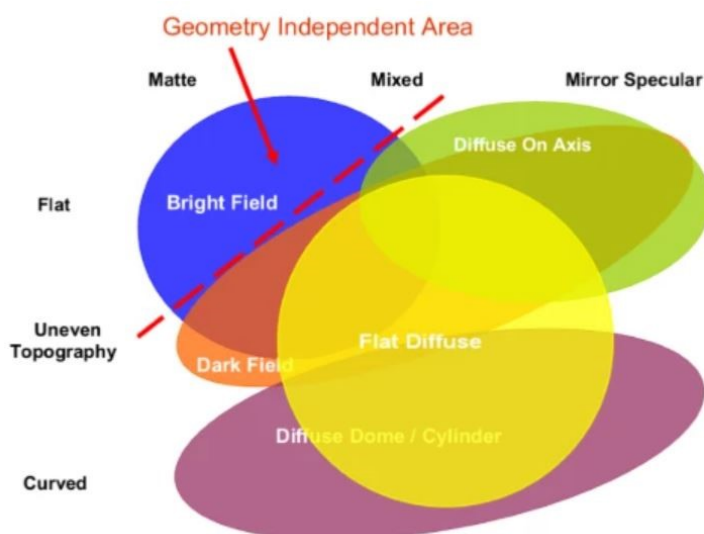
Aallonpituuden suodattimia taas käytetään, kun halutaan estää näkyvän valon heijastukset ja varjot esimerkiksi valaistuksesta tai ikkunoista. Suodattimen voi asettaa joko valaisimen tai kameran eteen. Polarisatiosuodattimet asetetaan tyypillisimmin juuri molempien laitteiden eteen. Näillä suodattimilla saadaan valon värähtelyn suuntaa rajoitettua ja näin saadaan esimerkiksi muoviin

jääneet jännitykset näkyviksi. (Siltala & Gautam 2023, 177.) Esimerkki polarisaatio-suodattimen käytöstä on esitetty alla olevassa kuviossa 8. Tässä kuviossa nähdään vasemmalla säilykepurkin kansi valaistuna ja oikealla sama kansi valaistuna polarisaatio-suodattimen kanssa.



Kuvio 8. Polarisaatio-suodattimen toimintaa (A practical guide...2023).

Eri valaistustyyppien sovelluskohteet määräytyvät kuvattavien pintojen perusteella ja erityisesti niiden heijastavuuden mukaan. Pinnan heijastavuus voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan: matta, peili, tai niiden sekoitus. Heijastavuuteen vaikuttaa myös pinnan tasaisuus, tekstuuri tai topografia. (A practical guide...2023.) Kuviossa 9 alla havainnollistetaan erilaisia valaistuksia pinnan muotojen ja heijastusominaisuuksien mukaan.



Kuvio 9. Valaistustekniikoita sovelluskohteen mukaan (A practical guide...2023).

Kuviosta voidaan päätellä, että tasaiset, matta- tai sekapintaiset geometriat vaativat valaistustekniikaksi yleensä kirkaskentän, mutta myös pimeäkenttää voidaan käyttää, jos pinnasta halutaan erottaa epätasaista topografiaa. National Instrumentsin oppaassa (2023) selvennetään, että kuvi-
ossa geometriasta riippumaton alue tarkoittaa sitä, että suhteellisen tasaiset ja hajapinnat eivät vaadi erityistä valaistusta, vaan mikä tahansa valaistustekniikka voi toimia. Tämä kuitenkin vaatii sen, että esimerkiksi kuvausetäisyys ja valaisimen kirkkaus ovat oikeat kohteeseen. (A practical guide...2023.) Kuten jo tämän opinnäytetyön edellisessä luvussa mainittiin Tangin ja muiden (2022, 306) mukaan, niin teräslevyjen valaistuksessa käytetään usein kirkas- että pimeäkenttää pintavirheiden etsimisessä, joten voidaan päätellä, että näitä kahta valaistustekniikkaa suositaan käytettäväksi nimenomaan teräslevyjen pintojen kuvantamisessa.

Valonlähteen värin määrää yleensä kuvattavan kohteen väri. Yksinkertaisin tapa valonlähteen värin valintaan on käyttää apuna väripyörää, joka on havainnollistettu kuviossa 10 alempana. Väripyörä auttaa ymmärtämään värien välisen suhteen. Tästä esimerkkinä voidaan mainita, että mikäli halutaan vahvistaa kuvattavan kohteen kontrastia, tulisi valonlähteen väri olla kuvattavan kohteen vastaväri. (Advanced illumination, 2019.)



Kuvio 10. Väripyörä (Advanced illumination, 2019).

Esimerkki kontrastin vahvistamisesta on esitetty alempana kuviossa 11. Tässä punaisilla merkinnöillä oleva postimerkki valaistaan neljällä eri värillä. Kaikista parhaan kontrastin merkeistä saa siis

väripyörän mukaan juuri vihreällä valonlähteellä, kuten kuviosta voidaan nähdä. Tämä olisi siis paras vaihtoehto valonlähteen väriksi.

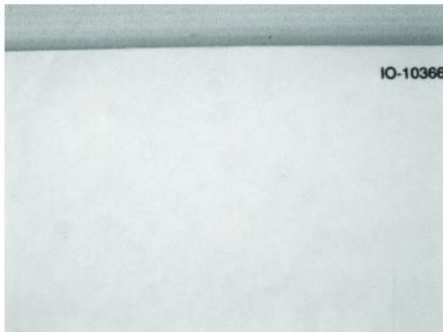


Figure 2A

Postal Stamp with Red (660nm) Light



Figure 2B

Postal Stamp with Blue (470nm) Light



Figure 2C

Postal Stamp with Green (530nm) Light

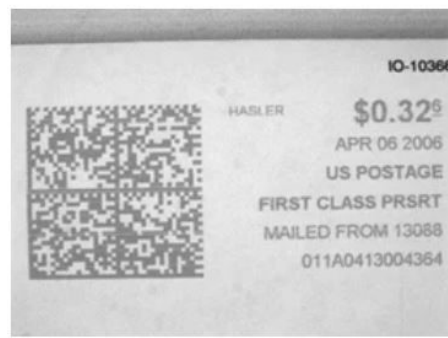
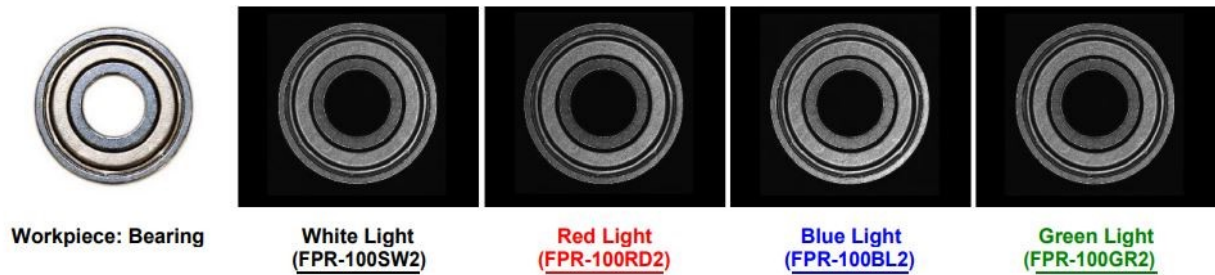


Figure 2D

Postal Stamp with White Light

Kuvio 11. Valonlähteiden värien vaikutuksia (Advanced illumination, 2019).

Tässä opinnäytetyössä kuvattavan kohteen värin tausta ovat vaalean- ja tumman harmaa. Taustasta erotettava kohde on taas yleensä tummempi, ellei jopa mustan sävyinen. Nämä värit ovat siis harmaasävyjä tai toisin sanoen yksivärisiä. Näille sävyille ei väripyörästä vastavärejä löydä, joten valonlähteen väri olisi helpoin olla valkoinen. Havainnollistetaan tätä vielä kuviossa 12 alla, kuinka metallinen harmaa laakerinpyörä erottuu näillä jo esitetyillä värisävyillä. Kuviosta nähdään, että kyseisillä värisävyillä ei ole suurta vaikutusta kappaleen piirteiden kontrasteihin.



Kuvio 12. Erisävyyisiä valonlähteitä laakerinpyörässä (Illumination wavelength guide, 2020).

Tässä luvussa käsiteltiin valaistuksen merkitystä konenäkösovelluksissa, joka on ilmeisen suuri. Voidaan todeta, että metallisten kappaleiden valaistuksessa suurin vaikutus on itse kuvausgeometrialla, eli kameran ja valonlähteen välisellä kulmalla. Voisi myös päätellä, että varmin ja tehokkain valonlähde metallisten kappaleiden piirteiden ja pintojen tunnistamiseen olisi LED-valaisin. Onnistuminen konenäköprojektissa vaatii kuitenkin vielä perehtymistä moneen eri asiaan. Oleellista on etenkin, missä ja miten konenäkökameran tuottamat kuvat käsitellään. Käsitellään seuraavassa luvussa kuvan prosessointia.

4.3 Kuvan prosessointi

Siltalan ja Gautam (2023) kertovat, että kun konenäköjärjestelmän kuvausgeometria ja valaistus on valittu, pitää seuraavaksi päättää, missä ja miten kuvan prosessointi tapahtuu. Valitaan siis **laittearkkitehtuuri**. Vaihtoehtoisiksi mainitaan tähän tehtävään tietokonepohjainen järjestelmä, kompaktinäköjärjestelmä (engl. compact vision system), älykamera (engl. smart camera), tai sulautettu järjestelmä. (Siltala & Gautam 2023, 177.)

Näiden lisäksi Vision Doctorin (n.d.) verkkosivustolla mainitaan erikseen yksinkertaiset näkökennot (engl. vision sensors) ja koodinlukijat (engl. code readers). Näiden laitteiden käyttöönottamisen ja integroinnin kustannukset ovat matalia ja laitteiston hinta vaihtelee muutamista sadoista aina noin 1500 dollariin asti. (System selection n.d.) Konenäkölaitevalmistaja Cognexin verkkosivuilla julkaistun artikkelin (n.d.) mukaan esimerkiksi näkökennolla ei ole kuitenkaan samoja ominaisuuksia kuin perinteisellä 2D-näköjärjestelmällä. Näkökenno pystyy vain todentamaan, onko esimerkiksi jokin osa/kappale olemassa vai ei, tai suorittamaan yksinkertaisen hyväksyty/hylätty -toiminnon. (Vision sensors vs...n.d.)

Tietokonepohjaisessa järjestelmässä kameralla otetaan kuva ja se välitetään prosessointiyksikköön. Perinteisesti kuvan prosessointi siis tapahtuu tietokoneympäristössä. (Siltala & Gautam 2023, 177.) Kyseisessä järjestelmässä voidaan vapaasti valita kuvaa käsittelevä tietokone ja konenäköjärjestelmän ohjelmisto ja laitteisto, kuten prosessorit, kuvankaappaajat, kamerat, liitäntäkortit, kovalevyt, sekä keskusmuisti. Nämä komponentit voidaan sulauttaa yhteen erittäin hyvällä hinta-laatusuhteella (System selection n.d.). Kuvan prosessoinnin jälkeen voidaan käsittelyn tulos lähettää eteenpäin joko tietoverkon, kenttäväylän tai I/O:n välityksellä (Siltala & Gautam 2023, 177). Kyseisen järjestelmän investointi voi kuitenkin olla useita tuhansia euroja, mutta jos halutaan käyttää nopeita tai useampia korkearesoluutioisia kameroita yhtäaikaan, järjestelmä on halvempi. Lisäksi jos halutaan, että data ja kuvat pitää dokumentoida ja arkistoida, tai yksilöllinen käyttöjärjestelmä vaaditaan, niin tietokonepohjainen järjestelmä on ainoa ja oikea valinta. (System selection n.d.)

Kompaktinäköjärjestelmä on myös tietokonepohjainen järjestelmä, mutta tässä tapauksessa käytetään valmistajan valitsemaa laitteistoa ja ohjelmistoa (Siltala & Gautam 2023, 177). Näiden lisäksi kokonaisuuteen kuuluu saman toimittajan kamerat. Näin on helppo varmistaa, että kokonaisuus toimii yhtenäisesti ja on myös testattu. Testaaminen on tärkeää, jotta voidaan esimerkiksi estää järjestelmän rikkoontuminen automaattisen käyttöjärjestelmäpäivityksen yhteydessä. Siksi päivitykset jaetaan vasta jälkeenkäin, jotta niiden vaikutukset voidaan havaita. (Mts. 177.) Tämä järjestelmä voisi olla asiakkaan kannalta erittäin turvallinen vaihtoehto, jos mietitään kokonaisuutta järjestelmän käyttöönoton kannalta.

Älykamera on laite, jonka asetuksien laittoon ei tarvita tietokonetta kuin väliaikaisesti (System selection n.d.). Tässä laitteessa siis kamera, kuvan prosessointi ja useasti valaistus on integroituna yhteen kokonaisuuteen, joka täyttää myös teollisten standardien koteloinnin (Siltala & Gautam 2023, 178). Vision Doctorin verkkosivusto (n.d.) sekä Siltala ja Gautam (2023) ovat yhtä mieltä siitä, että älykameroiden prosessointikapasiteetti ja konenäköalgoritmit ovat rajoitetumpia verrattuna tietokonepohjaiseen järjestelmään. Vision Doctorin verkkosivustoilla mainitaan myös, että mikäli laitteen optiikka ja valaistus ovat kiinteä osa, jolloin niitä ei voida korvata muilla komponenteilla, on odotettavissa muita toiminnallisia rajoitteita. Siltala ja Gautam (2023) lisäävät vielä pro-

sessointikapasiteettiin liittyen, että monesti laitteen algoritmit joudutaan valitsemaan jo etukäteen tilausvaiheessa. Tämän takia se pystyy käsittelemään vain tiettyjä tehtäviä. (Layout of a smart...n.d.; Siltala & Gautam 2023, 178.)

Vision Doctorin verkkosivuilla (n.d.) luetaan taas järjestelmän eduiksi itse laitteen ja sen komponenttien pienet koot, sekä lisäksi laite on suunniteltu yksinkertaisuutensa puolesta erittäin käyttäjäystävälliseksi. Siltala & Gautam (2023) lisäävät vielä, että älykamera on hyvä vaihtoehto, mikäli tarvitaan vain yksi kamera, tai jos esimerkiksi konenäkösovellus on yksinkertainen. (Layout of a smart...n.d.; Siltala & Gautam 2023, 178.) Tämän opinnäytetyön lopputulosten kannalta älykame-
raa vaihtoehtona pitäisi pohtia sen rajoittuneisuuden takia, eli voisiko kaikkia tarvittavia toiminnallisuuksia edes mahdollistaa sen algoritmeihin, tai olisiko niitä ylipäättänsä mahdollista edes saada. Lisäksi rajoitteita asettaisi laitteen komponenttien muokattavuus.

Sulautettu järjestelmä on Siltalan ja Gautamin (2023, 178) mukaan tiettyä tehtävää varten optimoitu ja kustomoitu järjestelmä. Vision Doctorin verkkosivujen (n.d.) mukaan näitä järjestelmiä käyttävätkin usein vain kokeneemmat käyttäjät tai järjestelmän toimittajat. Näissä järjestelmissä on normaalia tietokonetta korkeampi prosessointikapasiteetti. Tämän takia niitä voidaan käyttää esimerkiksi useamman kameran konenäkösovelluksissa tehokkaasti. (System selection n.d.) Konenäkölaitetoimittaja Teledyne Flirin verkkosivustoilla (n.d.) kerrotaan myös, että tyypillisimpiä sulautettuja järjestelmiä ovatkin esimerkiksi autoihin rakennetut tietokoneet, lääketieteelliset instrumentit ja kuluttajalaitteet, kuten älyteleviisit (Embedded systems for...n.d.). Kyseisen järjestelmän valinta tämän opinnäytetyön kannalta olisi jokseenkin ylimitoitettu, ellei vaatimuksena olisi useampi kamera ja sen takia kasvanut laskentakapasiteetin tarve.

Tässä luvussa käsiteltiin laitearkkitehtuurin valintaa konenäköjärjestelmään. Valintaan vaikuttaa suuresti mitä itse konenäkösovellukselta vaaditaan. Tässä opinnäytetyössä konenäköjärjestelmän pitää taipua useampaan eri tehtävään. Tietokonepohjainen järjestelmä sopisi tässä tapauksessa parhaiten sen monipuolisuuden ja muokattavuuden vuoksi. Jokainen laitearkkitehtuuri tarvitsee kuitenkin itse kameran, jolla kuva otetaan. Tutustutaan seuraavassa luvussa konenäköjärjestelmien kameroihin ja kriteereitä niiden valintaan.

4.4 Konenäkökamerat ja niiden valintaan vaikuttavat asiat

Konenäkösovelluksissa kamerat toimivat anturi- eli havainnointijärjestelmänä. Kameran kennossa olevien pikseleiden tehtävänä on valottaa ja digitoida siepattu kuva digitaaliseksi kuvainformaatioksi, joka välitetään edelleen käsiteltäväksi. (Siltala & Gautam 2023, 178.) Nykyään yleisesti käytetty kennoteknologia on CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), kun taas vanhempi tekniikka oli CCD (Charge Coupled Device). Tätä vanhempaa kennoteknologiaa ei kuitenkaan nykyään enää esiinny uusimmissa kameroissa. (Mts. 178.) Konenäkökameroiden valmistaja Baslerin verkkosivuilla (n.d.) mainitaan, että maailman johtava CCD-kennojen valmistaja, Sony, lopettaa kyseisten kennojen valmistamisen kokonaan vuoteen 2025 mennessä ja keskittyy tästä eteenpäin ainoastaan CMOS-kennoihin (CMOS Cameras n.d.) Näiden kahden kennotyyppin eroja käsitellään luvussa 4.4.1.

Itse kameran valintaan vaikuttaa se, millaista kuvanlaatua halutaan. Resoluution eli tarkkuuden kannalta harmaasävykamera on parempi kuin värikamera, sillä värikamera on epätarkempi rakenteensa ja toimintaperiaatteensa takia. (Siltala & Gautam 2023, 179.) Kameraa valittaessa on myös otettava huomioon sopivan suljinmallin valinta. On olemassa kahta erilaista suljinta: koko kuva-alan suljin (engl. global shutter) ja rullaava suljin (engl. rolling shutter). Koko kuva-alan suljin tarvitaan, kun kamera ja kohde ovat liikkeessä toisiinsa nähden, kun taas rullaavaa suljinta käytetään, jos kamera ja kuvattava kohde pysyvät paikallaan. Rullaava suljin on myös edullisempi vaihtoehto. Toisin kuin koko kuva-alan sulkimessa, rullaavan sulkimen ongelmat tulevat esiin, kun kuvataan liikkuvaa kohdetta, koska pikseleiden varaustieto luetaan pikselirivi kerrallaan. (Mts. 179). Erilaisia kameroita ja niiden ominaisuuksia käsitellään tarkemmin luvussa 4.4.2."

Muita kameran valintaan liittyviä kriteereitä ovat muun muassa **pienimmän havaittavan piirteen** määrittäminen ja haluttujen kohteiden tunnistaminen. Tähän vaikuttaa myös kuva-alan tarkkuus ja koko eli se, minkä alueen halutaan olevan näkyvässä. Pienimmän havaittavan piirteen määrittelyssä käytetään usein varmuuskertoimia välillä 4–10, joiden avulla saadaan avaruudellinen tarkkuus (engl. spatial resolution). Jotta kameran tarvittava minimiresoluutio (kameran anturikennon tai kennon koko) voidaan laskea, on otettava huomioon myös se, kuinka paljon kuvattava kohde voi liikkua tai pyörähtää. (Mts. 179.) Kuva-alaan, tarkkuuteen ja tämän laskentaan perehdytään myöhemmin luvussa 5.5, koska tähän vaikuttaa muun muassa myös konenäköjärjestelmään valittava optiikka.

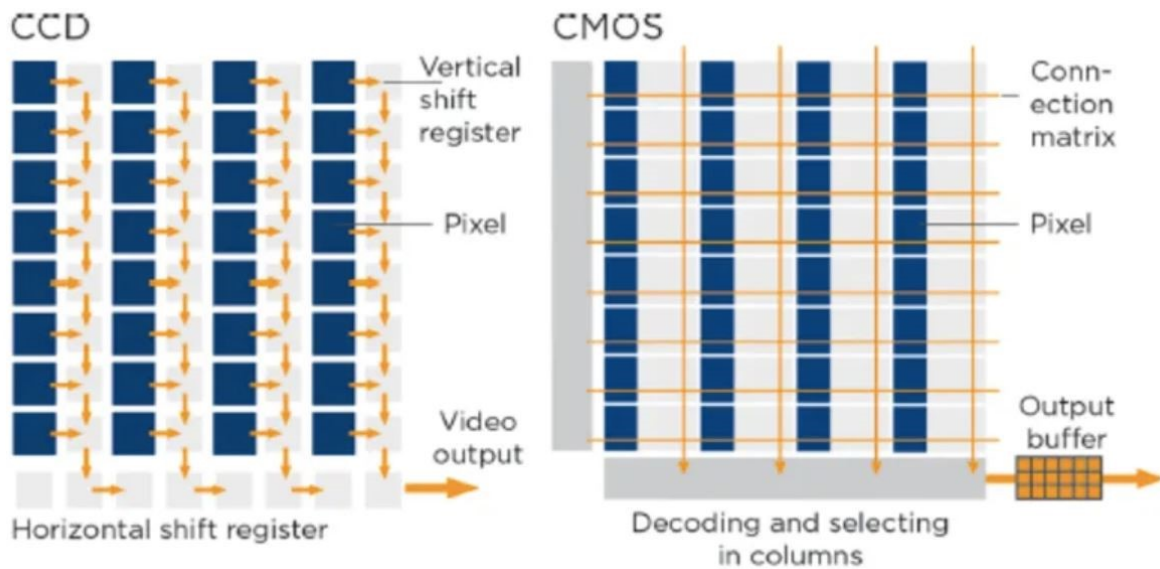
Lisäksi kameran liityntäraja pinta prosessointiyksikköön on relevantti. Liityntäraja pinnassa on Silta-
lan ja Gautamin (2023, 179) mukaan muutamia kriittisiä parametreja, jotka vaikuttavat konenäkö-
järjestelmän suorituskykyyn. Näitä parametreja tarkastellaan tarkemmin luvussa 4.4.3.

4.4.1 CMOS vs. CCD

Von Fintel konenäkökameravalmistaja Baslerilta (2015) kertoo, että kamerakennojen tehtävänä on
siis muuttaa valo (fotonit) sähköisiksi signaaleiksi (Von Fintel 2015).

CCD-kennoissa valoherkkien pikseleiden varaukset siirretään ja muunnetaan signaaleiksi. Pikselien
varaukset taas syntyvät puolijohteen (engl. semiconductor) vaikutuksesta ja nämä varaukset siirre-
tään A/D- muuntimeen (analogia-digitaalimuunnin) pienten siirto-operaatioiden avulla. Nämä
siirto-operaatiot ovat pysty- ja vaakasuuntaisia. Kennoissa olevilla elektrodeilla synnytetään sähkö-
kenttä ja näin varausten siirto pakotetaan. (Von Fintel 2015.)

CMOS-kennoissa taas jokaisen yksittäisen pikselin rinnalla on kondensaattori varastoimaan sähkö-
varausta. Kondensaattorin lataus tapahtuu jokaiselle pikselille tulevalta valonsäteeltä ja tästä syn-
tyvästä virrasta. Kondensaattoriin muodostuva jännite on siis verrannollinen kirkkauteen ja valo-
tusaikaan. Toisin kuin CCD-kennoissa, CMOS-kennoissa varaus muunnetaan jännitteeksi erikseen
jokaisessa pikselissä ja niiden sisältämien elektroniikkapiirien avulla. (Von Fintel 2015.) Näiden
kennojen erot on havainnollistettu kuviossa 13 alla.



Kuvio 13. CCD-kennon ja CMOS-kennon erot (Von Fintel 2015).

Kun käytetään CMOS-kensojen ylimääräisiä elektroniikkapiirejä pikseleitä kohden, voidaan jokainen pikseli siirtää ilman, että itse varausta tarvitsee siirtää kuten CCD-kennoissa. Tämän seurauksena kuvatiedot voidaan lukea nopeammin kuin CCD-kennoissa. Myös ylivalotuksesta johtuvia ongelmia voidaan välttää. Toisaalta CMOS-kensojen pikselin elektroniikkapiirille ei ole mahdollista saada lisätilaa valoherkkyydelle. Tämä valoherkkäalue kennon pinnassa on pienempi kuin CCD-kennoissa. (Von Fintel 2015.)

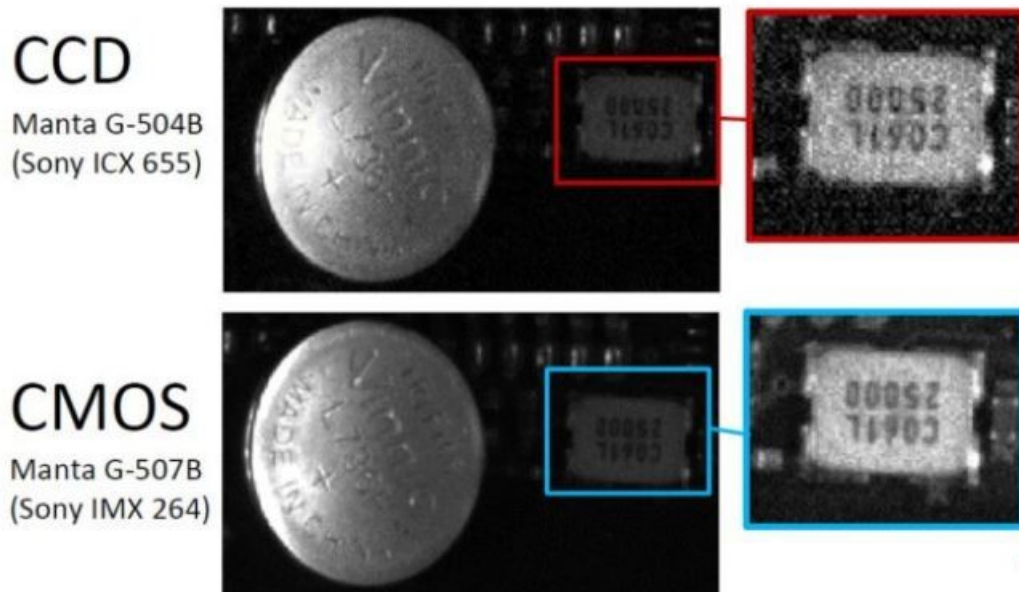
Kennojen kehitys on tähän päivään mennessä ollut kiihtyvää. Von Fintel (2015) kertoi jo vuosia sitten, kuinka CMOS-kennotekniikan kuvanlaatu oli jo tuolloin parempaa verrattuna CCD-kennoihin. CMOS-kensojen suljintekniikka perustui aiemmin rullaavaan sulkimeen (engl. rolling shutter), kun nykyään tarjolla on jo korkean resoluution kuva-alan sulkimia (engl. global shutter). (Von Fintel 2015.) Kuviossa 14 alla on havainnollistettu näiden kennojen eroja kuvanlaadun suhteen.



Kuvio 14. Yllä CCD-kenno ja alempana CMOS-kenno (Von Fintel 2015).

Kuviosta siis nähdään, kuinka huomattava ero näillä kennoilla on. Alempi kuva oli otettu uudella CMOS-kennolla, ja siinä on selvästi suurempi dynaaminen alue (engl. HDR, High Dynamic Range), jonka seurauksena voidaan erottaa esimerkiksi kuski ja rekisterikilpi samasta kuvasta.

Chouinard (2018) 1stvisionilta kertoi blogissaan, kuinka tuolloisilla CMOS-kennoilla voitiin myös merkittävästi vähentää kuvissa esiintyvää kohinaa (engl. noise), eli eräänlaista rakeisuutta kuvissa. Alla kuviossa 15 on havainnollistettu CCD- ja CMOS-kennojen eroja kohinan osalta.



Kuvio 15. CCD- ja CMOS-kennojen eroja kohinan suhteen (Chouinard 2018).

Yllä kuviossa 15 on otettu kuvia kahdesta eri elektroniikkaosasta, käyttäen Sonyn valmistamia kennoja. Korkea kohina CCD-kennon ottamassa kuvassa aiheuttaa alempaa kontrastia, kun taas CMOS-kenno tarjoaa suuremman kontrastin. CMOS-kennon korkeampi dynaaminen alue auttaa erottamaan enemmän yksityiskohtia kuvista, kuten tummat ja kirkkaat alueet. (Chouinard, 2018).

CMOS-kennojen tutkimukseen erikoistuneen yrityksen CMOS Sensor Inc. tutkija Wang (n.d.) kertoo, että historiallisesti CCD-kennot ovat olleet parempia, mitä tulee kohinaan ja terävimpiin kuviin. Nykyään kuitenkin molemmat kennot ovat verrattavissa toisiinsa tässä suhteessa. Syy siihen, miksi valmistajat nykyään kallistuvat enemmän CMOS-kennojen puoleen, on se, että näiden kennojen virrankulutus voi olla jopa 100 kertaa pienempi kuin CCD-kennojen. Lisäksi CMOS-kennot ovat huomattavasti halvempia valmistaa, ja niitä voidaan käyttää entistä monipuolisemmin erilaisissa sovelluksissa. Wang lisää, että dynaaminen alue ja valon intensiteetit, joita kenno pystyy kaappaamaan, on kasvanut tasaisesti näissä kennoissa. Tämä mahdollistaa suurempi kontrastisen ja yksityiskohtaisen kuvan ottamisen. (Wang n.d.)

Tang ja muut (2022) kertovat myös, että CCD- ja CMOS-kennojen käyttö teräspintojen kuvaamisessa ero on kaventunut vähitellen. He mainitsevat muun muassa, että CCD-kennoa käyttävillä ka-

meroilla voi saada hyvin kaksiulotteista (engl. 2D, Two dimensional) kuvaa, mutta niillä on vaikeuksia täyttää suurten näkökenttien ja resoluutioiden vaatimukset. Teräslevyjen tuotantolinjoilla onkin käytetty esimerkiksi useita CCD-kameroita yhtä aikaa ja molemmin puolin levyä, jotta saadaan koko kuvattava alue katettua ja riittävän tarkaksi. (Tang ym. 2022, 305.)

Tästä luvusta voidaan päätellä, että suurin osa kennojen valmistajista ja käyttäjistä ovat siirtymässä enemmän CMOS-kennoteknologian valintaan sen kustannustehokkuuden puolesta. Joidenkin valmistajien teknologia, kuten Sonyn CMOS-kennot ovat jo täysin verrattavissa CCD-kennoihin, elleivät ole jo parempia kuvatarkkuuden ja erottelukyvyn suhteen.

4.4.2 Matriisi- ja viivakamerat sekä niiden ominaisuudet

Perinteisesti konenäössä käytetään matriisi- tai viivakameroita. Siltala ja Gautam (2023) kertovat, että jos kuvaan halutaan kolmas ulottuvuus, kuten etäisyys, tarvitaan 3D- tai 2,5D-kamera. Tätä tekniikkaa käytetään kuitenkin enemmän esimerkiksi robottijärjestelmissä, joissa suoritetaan usein lastaus- ja purkutoimintoja. (Siltala & Gautam 2023, 184.) Tässä opinnäytetyössä konenäkötoiminto on yksinkertaisempi, joten etäisyysmittausta ei tarvita, eikä siihen perehdytä tarkemmin.

Matriisikameran (engl. Area scan camera), tai aluekameran, tehtävänä on ottaa kaksiulotteinen (2D) eli suorakulmion muotoinen kuva, kuten SAMKin verkkosivut (n.d.) kertovat. Kuvassa on tietty määrä pikseleitä sekä leveys- että korkeussuunnassa. Matriisikameraa käytetään laajalti konenäkösovelluksissa, ja sen etuihin kuuluu muun muassa kyky kuvata irrallisia kappaleita. (Matriisikenno- vai viivakamerakuvaus n.d.)

Konenäkökameravalmistaja Baslerin verkkosivustolla on tarjolla laaja valikoima erilaisia matriisikameroita. Otetaan tarkasteluun esimerkiksi Basler ace 2 R pro -kameramalli. Kyseisen kameran kennotyyppi on CMOS ja kamera pystyy toistamaan kuvia 7 kertaa sekunnissa (engl. fps, frames per second) 16,1 megapikselin tarkkuudella. Resoluutio on kamerassa 5320 x 3032 pikseliä. Kameraa on saatavilla sekä värillisenä että harmaasävyisenä, ja se käyttää koko kuva-alan suljinta. (Basler ace 2... n.d.) Kyseinen kameramalli kuvattuna kuviossa 16 alla.



Kuvio 16. Matriisikamera (Basler ace 2 n.d.).

Viivakameran (engl. Line scan camera) tehtävä on SAMKin verkkosivujen (n.d.) mukaan ottaa yksi-
ulotteinen, eli viivanmuotoinen kuva. Kuvassa on pystysuunnassa yksi pikseli aina jopa kolmeen
pikseliin asti. Vaakasuunnassa voi olla pikseleitä 1024 aina 16000 pikseliin asti. Viivakameraa käy-
tetään usein liikkuvien kohteiden kuvaamiseen, kuten esimerkiksi paperin valmistuksessa tai kan-
kaan painatuksessa. (Matriisikenno- vai viivakamerakuvaus n.d.)

Otetaan esimerkiksi Baslerin viivakamera Basler racer- malli. Kyseisen kameran resoluutio on 4K,
mikä tarkoittaa 4096 x 1 pikseliä. Kamerassa käytetään CMOS-kennoteknologiaa ja siinä on koko
kuva-alan suljin. Kameraa on saatavilla ainoastaan harmaasävyisenä. (Basler racer...n.d.) Kyseinen
kameramalli kuvattuna alla kuviossa 17.



Kuvio 17. Viivakamera (Basler racer...n.d.).

Kuten aiemmin tässä opinnäytetyössä mainittiin, harmaasävykamerat ovat tarkempia kuin värikamerat. SAMKin verkkosivuilla (n.d.) selitetään, että tämä johtuu siitä, että perinteisissä värikameroissa jokaisella kennon valonilmaisimella havaitaan vain punaista, vihreää tai sinistä valoa. Kunkin pikselin väri arvioidaan siis valonilmaisimen ja sen naapureiden vastaanottaman valon perusteella. (harmaasävy- vai värikuvaus n.d.). SAMKin verkkosivuilla ei kuitenkaan täsmennetä, miksi tämä ilmiö aiheuttaa värikameran epätarkkuuden verrattuna harmaasävykameraan. Optisten ratkaisujen tarjoaja Edmund Opticsin verkkosivuilla (n.d.) kuitenkin kerrotaan, että värien tunnistamiseen tarvitaan enemmän pikseleitä, mikä puolestaan johtaa kuvan pienempään resoluutioon (Cameras n.d.).

Harmaa- ja värisävyt kameroissa ilmaistaan bitteinä. Harmaasävyjen määrä ilmoitetaan esimerkiksi 8, 10 tai 12 bitillä, mikä vastaa harmaasävytasojen lukumäärää 256, 1024 tai 4096 tasoa (harmaasävy- vai värikuvaus n.d.). Edmund opticsin verkkosivujen (n.d.) mukaan havainnollistetaan tätä sävytasomäärää alempana kuviossa 18.



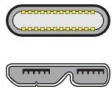
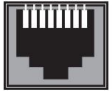
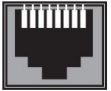
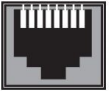

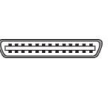
Kuvio 18. Harmaasävytasoja (Imaging electronics 101 n.d.).

Kuviossa 18 ylimpänä on 2-bittinen taso, keskellä 4-bittinen ja alimpana 8-bittinen. Alimpana 8-bittisessä tasokuvauksessa on siis 256 erilaista harmaatasosävyä. Edmund opticsin verkkosivuilla (n.d.) täsmennetään, että mitä enemmän bittejä kamerassa siis on, sitä sujuvammin digitointiprosessi onnistuu. Lisäksi suurempi bittimäärä tarkoittaa korkeampaa tarkkuutta ja enemmän informaatiota. (Imaging electronics 101 n.d.)

4.4.3 Kameran liityntärajoitukset

Perinteinen konenäkökamera tarvitsee liityntärajoituksen kuvan prosessointiyksikköön. Poikkeuksia on, kuten älykamera, jossa kuvan prosessointi tapahtuu kamerassa itsessään. Kameran liityntärajoitusten parametrejä ovat tiedonsiirtokapasiteetti, kaapelin pituus ja kytkettävien kameroiden lukumäärä. (Siltala & Gautam 2023, 179.) Edmund opticsin verkkosivuilta (n.d.) löytyvästä taulukosta voidaan hahmotella erilaisia digitaalisia liityntärajoitustoja alla olevassa taulukossa 2.

Taulukko 1. Digitaalisia kameran liityntärajäpintoja (Digital camera interfaces n.d.).

Digital Interface Comparison						
DIGITAL SIGNAL OPTIONS NOTE: images not drawn to scale						
	USB 3.1	GigE (PoE)	5 GigE (PoE)	10 GigE (PoE)	CoaxPress	Camera Link®
Data Transfer Rate:	5Gb/s	1000 Mb/s	5Gb/s	10Gb/s	up to 12.5Gb/s	up to 6.8Gb/s
Max Cable Length:	3m (recommended)	100m	100m	100m	>100m at 3.125Gb/s	10m
# Devices:	up to 127	Unlimited	Unlimited	Unlimited	Unlimited	1
Connector:	USB 3.1 Micro B/USB-C	RJ45 / Cat5e or 6	RJ45 / Cat5e or 6	Cat7 or Optical Cabling	RG59 / RG6 / RG11	26pin
Capture Board:	Optional	Not Required	Not Required	Not Required	Optional	Required

Näistä yleisimpiä ovat Siltalan ja Gautamin (2023) mukaan teollisuus- ja robotiikka käytössä GigE-rajapinta, vaikka se onkin nopeutensa puolesta hitaampi kuin muut. Merkille pantavaa kuitenkin on, että tyypillisissä käyttötapauksissa kuvia otetaan vain satunnaisesti, joten tiedonsiirtonopeus ei ole rajoittava tekijä. USB3- rajapinnan käyttöä teollisuudessa rajoittaa taas enemmän kaapelin pituus. (Siltala & Gautam 2023, 179.)

Liitävaihtoehtoja on siis useita, ja konenäköjärjestelmän vaatimukset määrittävät liityntärajäpinnan. Esimerkiksi USB-versiot, kuten 2 ja 3, yksinkertaistavat huomattavasti asennusprosessia, koska video- ja virtasignaali ovat yhdessä liitännässä. Toiset vaihtoehdot vaativat monesti ulkoisen virtalähteen. (Digital camera interfaces n.d.) Taulukosta 2 voi kuitenkin todeta, että esimerkiksi GigE- sarjan liitännät voivat toimia virtalähteenä PoE-ominaisuuden kautta (engl. Power over Ethernet).

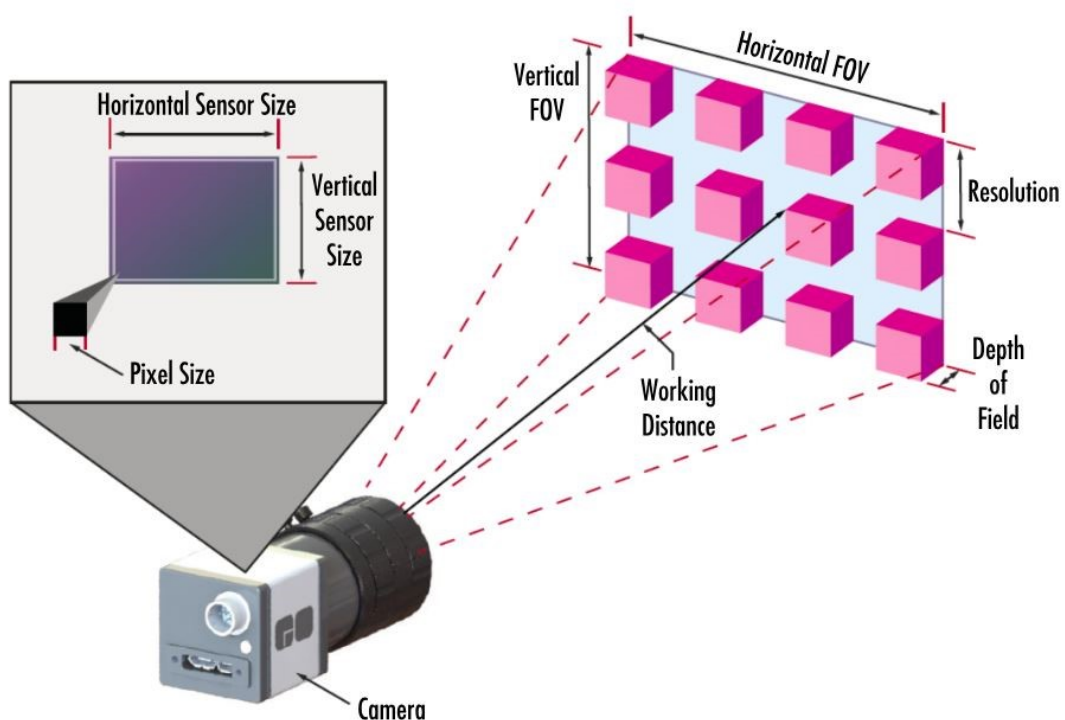
4.5 Optiikka ja mitoitusperiaatteet konenäköjärjestelmissä

Siltalan ja Gautamin (2023) mukaan optiikan tehtävänä on tuottaa valovoimainen ja tarkka kuva kameran kennolle. Konenäössä optiikat ovat yleisesti kiinteän polttovälin optiikoita, eikä esimerkiksi järjestelmäkameroissa käytettäviä zoom-linssejä käytetä, koska ne voivat olla epätarkkoja ja epästabiileja. (Siltala & Gautam 2023, 180.) Edmund Opticsin verkkosivujen (n.d.) julkaisussa ollaan samaa mieltä siitä, että kiinteän polttovälin optiikat ovat yleisimpiä juuri niiden joustavuuden

ja suorituskyvyn kannalta. Nämä optiikat tarjoavat parhaat ominaisuudet muun muassa kappaleiden tai osien tarkasteluun, viivakoodien lukemiseen, hahmojen tunnistamiseen (engl. OCR, Optical Character Recognition) tai hahmojen varmistamiseen (engl. OCV, Optical Character Verification). (Types of machine...n.d.)

Konenäkösovelluksen käyttöönotossa linssin aukko ja tarkennus lukitaan, jonka jälkeen sovellus kalibroidaan esimerkiksi mittaustarkoituksia varten. On olemassa myös "liquid lens" -optiikoita, jotka voidaan ohjata tarkentamaan eri etäisyyksille. (Siltala & Gautam 2023, 180.) Edmund Optic-sin verkkosivujen (n.d.) julkaisussa lisätään, että tämä ratkaisu on loistava sovelluksissa, joissa kohteen korkeus tai kuvausetäisyydet ovat muuttuvia (Liquid lens basics n.d.).

Optiikan tehtävä konenäköjärjestelmässä on siis merkittävä. Jotta voitaisiin ymmärtää mihin kuvaaminen konenäköjärjestelmässä perustuu, niin katsotaan seuraavaksi hieman kuvaamisen parametrien perusteita alla olevassa kuviossa 19 Hollowsin ja Jamesin (n.d.a.) mukaan.



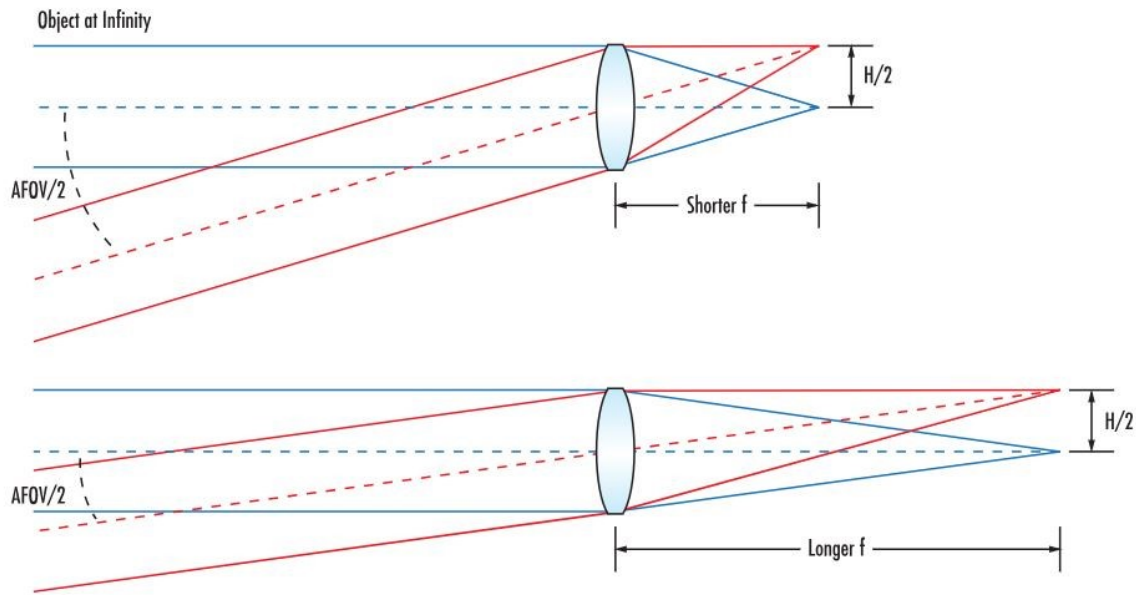
Kuvio 19. Kuvantamisen perusteet (Hollows & James n.d.a.).

Luetellaan seuraavaksi kuviossa 19 olevia ja muita yleisiä kuvantamisen termejä ja mitä ne tarkoittavat:

- **Field of view (FOV)**, eli kohteen katseltavissa oleva alue, eli suomeksi kuva-alue. Tämä alue täyttää myös kameran kennon alueen. Pystysuora (Vertical FOV) ja vaakasuora (Horizontal FOV)
- **Working distance (WD)**, eli suomeksi kohteen etäisyys kameran linssiin, tai työskentely etäisyys
- **Resolution**, eli suomeksi resoluutio. Kohteen pienin koko, joka voidaan erottaa avaruudellisenä tarkkuutena viivapareina millimetriä kohden (lp/mm)
- **Depth of field (DOF)**, suomeksi kohteen syvyysterävyys, eli kuvantarkkuus kun kohteen etäisyys muuttuu
- **Sensor size (H)**, suomeksi kennon koko, eli kameran kennon aktiivinen alue, määritellään vaaka- ja pystysuuntaisten mittojen mukaan. Tämä parametri on tärkeä, kun määritellään linssin ominaisuudet vaaditun FOV:n mukaan
- **Pixel size (s)**, suomeksi pikselin koko, joka on normaalisti neliönmuotoinen. pikselit muodostavat kennon verkon ja niiden koko ilmoitetaan mikrometreinä (μm)
- **Magnification (m) tai PMAG (Primary magnification)**, eli suomeksi linssin suurennuskyky, joka määritellään kennon koon ja kuva-alueen (FOV) suhteena. Lasketaan kaavalla $m = H/FOV$, jossa m = linssin suurennuskyky, H = kennon koko ja FOV = Kuva-alueen koko (Hollows & James n.d.a.).

Lisäksi olennainen mitoitukseen liittyvä parametri on **polttoväli (f)**. Hollows ja James (n.d.b.) kuvailevat tätä parametria sillä, kuinka voimakkaasti se tarkentaa tai hajottaa valoa. Käytännössä se tarkoittaa sitä, että suurempi polttoväli taivuttaa valoa vähemmän, kun taas pienempi enemmän.

(Hollows & James n.d.b.) Havainnollistetaan tätä ilmiötä alla kuviossa 20.



Kuvio 20. Lyhyt ja pitkä polttoväli (Hollows & James n.d.b.).

Optiikan polttovälin (f) selvittämiseksi tarvitaan kameran kennon koko (H), tarvittavan kuva-alan (FOV) koko ja työskentelyetäisyys (WD). Työskentelyetäisyyden (WD) voi valita vapaasti, mutta nyrkkisääntönä voidaan pitää 3-4 kertaa kuva-alan (FOV) sivu tai pidempi etäisyys. Tällä vältetään linssin polttovälistä aiheutumat virheet ja vääristymät. (Siltala & Gautam 2023, 180.) National Instrumentsin verkkosivustolla kerrotaan laskentakaava tälle, joka on seuraava $f \times FOV = H \times WD$ (Calculating camera sensor 2020). Tätä samaa kaavaa voidaan käyttää myös muiden parametrien laskentaan, kuten esimerkiksi kennon koon selvittämiseen.

Kuitenkin ennen kuin voidaan valita konenäköjärjestelmän optiikkaa, pitää tietää, mikä on **pienin yksittäinen piirre**, mikä kuvasta halutaan erottaa. Toisin sanoen valitaan kameran resoluutio. National Instrumentsin verkkosivustolla (Calculating camera sensor 2020) esitetään kaava resoluution laskentaan, joka on seuraava: $Kennon\ resoluutio = kuvan\ resoluutio = 2 \left(\frac{FOV}{\text{pienin havaittava piirre}} \right)$.

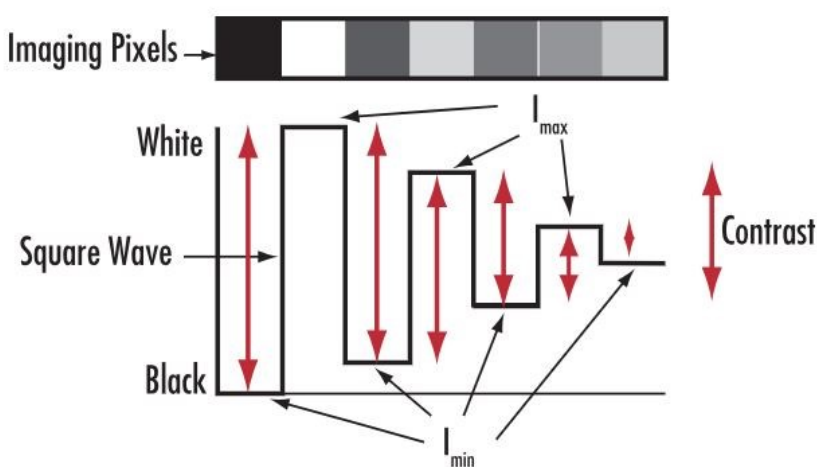
Tässä numero 2 tarkoittaa varmuuskerrointa ja FOV kuva-alan kokoa. Aiemmin luvussa 4.4 Siltala

& Gautam (2023, 179) kertoi tämän varmuuskertoimen olevan luokkaa 4–10, josta saadaan avaruudellinen tarkkuus (engl. spatial resolution). Voisikin päätellä, että mitä enemmän varmuuskerointa, sitä luotettavampi on myös konenäkösovelluksen mittaustulos.

Otetaan edellisestä esimerkki, jossa kameran resoluutio on esimerkiksi 5400x3200 pikseliä. Valitaan FOV= 6000 mm ja pienin havaittava piirre 5 mm. Tästä saadaan yhtälö: $2 \left(\frac{6000 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} \right) = 2400 \text{ pikseliä}$. Tässä tapauksessa kameran resoluutio riittää, koska 2400 on pienempi, kuin 5400 tai 3200 pikseliä.

Konenäkölaitevalmistajien ja toimijoiden verkkosivuilla on paljon laskureita konenäkösovellusten mitoituksiin. Näitä tarjoavat muun muassa Cognex, Basler ja Vision Doctor. Konenäkölaitevalmistajien ja toimijoiden tarjoamaa apua kannattaakin siis käyttää, kun suunnitellaan konenäkösovellusta, koska aihe on erittäin laaja ja moni asia vaikuttaa lopputulokseen muun muassa optiikan valinnan suhteen.

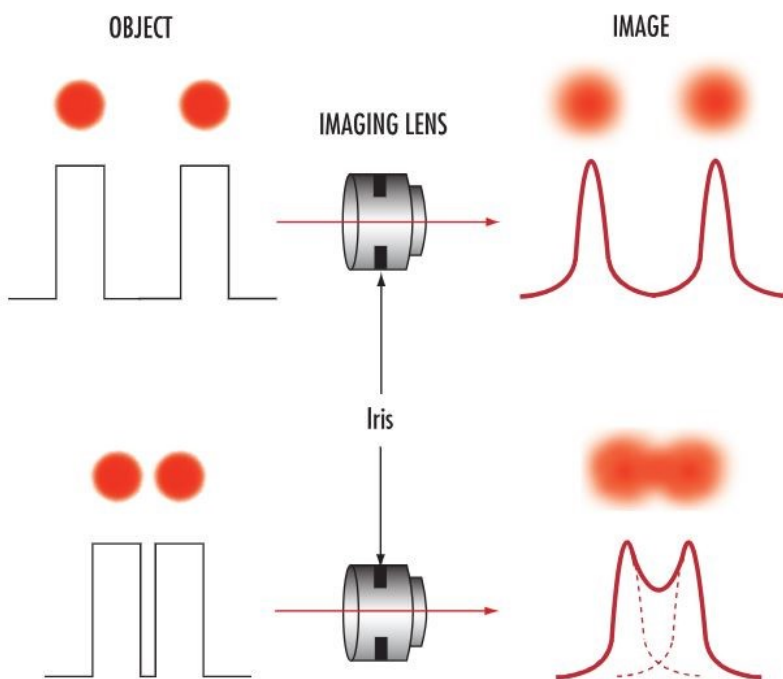
Vaikka moni asia vaikuttaakin kuvauksen laadun lopputulokseen, on tavoitteena saada mahdollisimman suuri **kontrastinen kuva**, jotta piirteet voidaan erottaa toisistaan. Hollows ja James (n.d.c.) kuvaavat kontrastia sillä, kuinka hyvin mustat ja valkoiset sävyt voidaan erottaa tietyllä resoluutiolla. Jotta kuva olisi hyvin määritelty, mustien yksityiskohtien pitää näkyä mustana ja valkoisten valkoisena. (Hollows & James n.d.c.) Hahmotetaan tätä alla kuviossa 21.



Kuvio 21. Kontrasti (Hollows & James n.d.c.).

Kuviosta voidaan päätellä, että mitä lähempänä värisävyt ovat toisiaan, sitä vähemmän kontrastia kuvassa on. Kääntäen taas musta ja valkoinen taas erottuvat toisistaan hyvin. Tässä opinnäytetyössä kuvattavat värisävyt ovat lähellä toisiaan, joten kontrastin suurentamiseen täytyy kiinnittää paljon huomiota. Hollows ja James (n.d.c.) korostavat, että linssillä, kennolla ja valaistuksella on todella suuri merkitys kontrastin suhteen. Mikäli joku näistä valitaan väärin, niin se vaikuttaa koko järjestelmän kontrastiin ja resoluutioon. (Hollows & James n.d.c.)

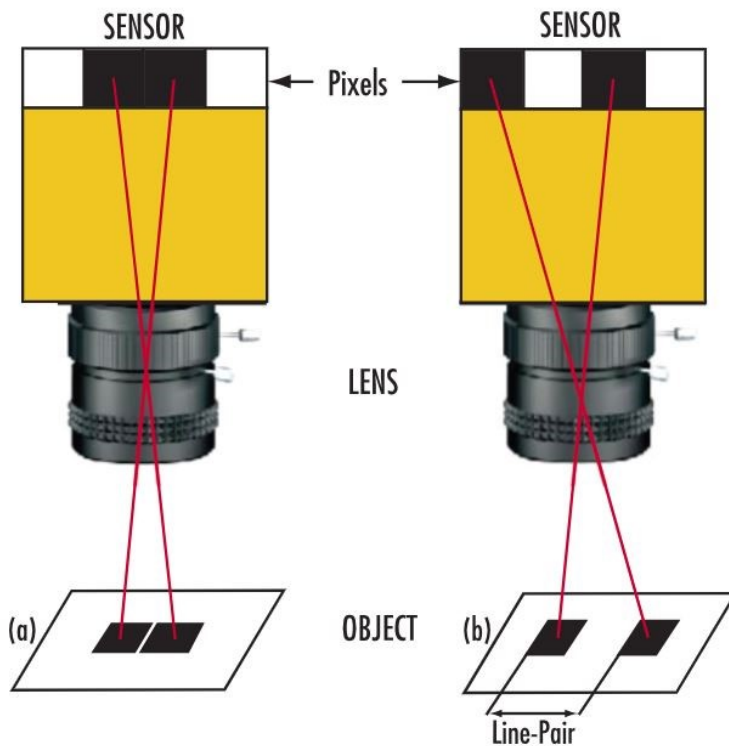
Kun valo kulkee minkä tahansa kokoisen aukon läpi, tapahtuu siinä diffraktiota eli valon aallonpituus muuttuu. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kun valon aallonpituus ja linssin aukon koko muuttuvat, niin sitä enemmän tai vähemmän häiriöitä ilmenee kuvatarkkuudessa. (Hollows & James n.d.d.) Hahmotetaan tätä alla kuviossa 22, jossa on käytetty samaa linssiä mutta ylempi on matalammalla taajuudella ja alempi korkeammalla. Taajuus tässä tarkoittaa pisteiden välistä etäisyyttä toisistaan.



Kuvio 22. Kaksi pistettä kuvattuna samalla linssillä (Hollows & James n.d.c.).

Kuviosta voidaan päätellä, että korkeamman taajuuden kuvat, eli mitä lähempänä tunnistettavat kohteet ovat toisiaan, eivät erotu toisistaan, jos kontrasti on huono.

Vastaava ilmiö tapahtuu, kun valitaan kameran kennoa. Tässä tapauksessa puhutaan resoluutiosta. Niin kuin jo aiemmin tässä luvussa mainittiin, resoluutio tarkoittaa taajuutta, eli viivaparia millimetriä kohden, eli lp/mm. Hollows ja James (n.d.e.) korostavat, että on tärkeää ymmärtää järjestelmän rajoitukset, mitä tulee resoluutioon. Viivaparia millimetriä kohden voidaan myös kuvata mustana ja valkoisena neliönä kuvausalueella. (Hollows & James n.d.e.) Havainnollistetaan tätä alla kuviossa 23.



Kuvio 23. Viivapari kuvausalueella (Hollows & James n.d.e.).

Hollows ja James (n.d.e.) kertovat, että neliöiden välissä pitää olla vähintään yksi pikseli, jotta neliöt voidaan erottaa toisistaan. Tämä minimietäisyys, eli pikselin koko on rajoitettu resoluutio järjestelmässä. Absoluuttisen rajoituksen tälle määrittää pikselin koko kennossa ja pikseleiden määrä kennossa. (Hollows & James n.d.e.)

Linssin resoluutio ei valitettavasti ole absoluuttinen. Tämä tarkoittaa sitä, että valitulla resoluutiolla sen kyky erottaa kaksi neliötä toisistaan riippuu harmaasävyntasosta. Konekäsittelyjärjestelmässä neliöpari erottuu paremmin, jos niiden harmaasävyt ja toistensa välinen etäisyys on suurempi.

Harmaasävyjen ero ilmaistaan kontrastina (Hollows & James n.d.e.). Kontrasti on asetettu yleisesti hyväksytyksi standardiksi linssien ja kameroiden valmistajille, ja se on yleensä asetettu linseille 20 %:iin. Tämä tarkoittaa käytännössä mustien ja vaaleiden sävyjen suhdetta, joka ilmaistaan I_{\max} ja I_{\min} välillä, kuten aiemmin kuviossa 21 nähtiin (Hollows & James n.d.e.).

Hollows ja James (n.d.f.) huomauttavat, että kun kuvataan kohdetta, jossa esimerkiksi viivojen tai pisteiden välinen etäisyys on pieni, on tarpeen määrittää absoluuttinen pienin erotettava piste näkökentästä. Tämä ilmaistaan näkökentän (FOV) suhteen anturin (H) kokoon. Tämä yhtälö, joka on jo mainittu aiemmin tässä luvussa, tunnetaan nimellä PMAG (Primary magnification). (Hollows & James n.d.f.) Yhtälö on siis: $PMAG = \frac{H}{FOV}$.

Tästä suhteesta voidaan selvittää kuvatilän resoluutio (engl. Image space resolution), joka kertoo linssin resoluution (engl. Object space resolution). Kaava menee seuraavasti:

$$\text{Object space resolution} \left(\frac{lp}{mm} \right) = \text{image resolution} \left(\frac{lp}{mm} \right) \times PMAG.$$

Kun kehitetään konenäkösovellusta, järjestelmän resoluutiovaatimusta ei anneta muodossa lp/mm, vaan ennemminkin mikroneina (μm). Tämän muunnoksen voi tehdä kahdella tapaa:

$$\text{Object space resolution} (\mu\text{m}) = \left(\frac{1000 \frac{\mu\text{m}}{\text{mm}}}{2 \times \text{object space resolution} \left(\frac{lp}{mm} \right)} \right)$$

tai,

$$\text{Object space resolution} (\mu\text{m}) = \frac{\text{pikselin koko} (\mu\text{m})}{PMAG}$$

Hollows ja James (n.d.f) kertovat että linssin rajoittavaan resoluutioon, eli pienemmän absoluuttiseen pisteen selvittämiseen voidaan helposti siirtyä käyttämällä juuri mainittua kaavaa. On kuitenkin tärkeää määrittää kuvatilän resoluutio ja PMAG linssin valinnan yksinkertaistamiseksi. He myös korostavat, että usein linssin valintaan liittyy paljon muitakin tekijöitä, joten yhtälöt ovat suuntaa antavia. (Hollows & James n.d.f.) Kuvataan alla kuitenkin esimerkki yhtälöstä taulukossa 3.

Taulukko 2. Linssin rajoittava resoluutio laskettuna valitun kennon mukaan (Hollows & James n.d.f, muokattu).

Sony ICX625 sensor

Tunnettuja parametreja:

Pikselin koko = 3.45 μm x 3.45 μm

Aktiivisten pikseleiden määrä (H x V) = 2448 x 2050

Haluttu FOV (vaakasuora) = 100 mm

Rajoittava resoluutio (limiting resolution):

$$\text{Image space resolution (lp/mm)} = \frac{1000 \mu\text{m /mm}}{2 \times \text{pikselin koko } (\mu\text{m})}$$

$$\text{Image space resolution (lp/mm)} = \frac{1000 \text{ lp/mm}}{2 \times 3.45 (\mu\text{m})} = 145 \mu$$

Aktiivisen sensorin mitat:

$$\text{Vaakasuorainen sensorin mitta (mm)} = \frac{(3.45\mu\text{m}) (2448)}{1000 \mu\text{m /mm}} = 8,45 \text{ mm}$$

$$\text{Pystysuorainen sensorin mitta (mm)} = \frac{(3.45\mu\text{m}) (2050)}{1000 \mu\text{m /mm}} = 7,07 \text{ mm}$$

PMAG:

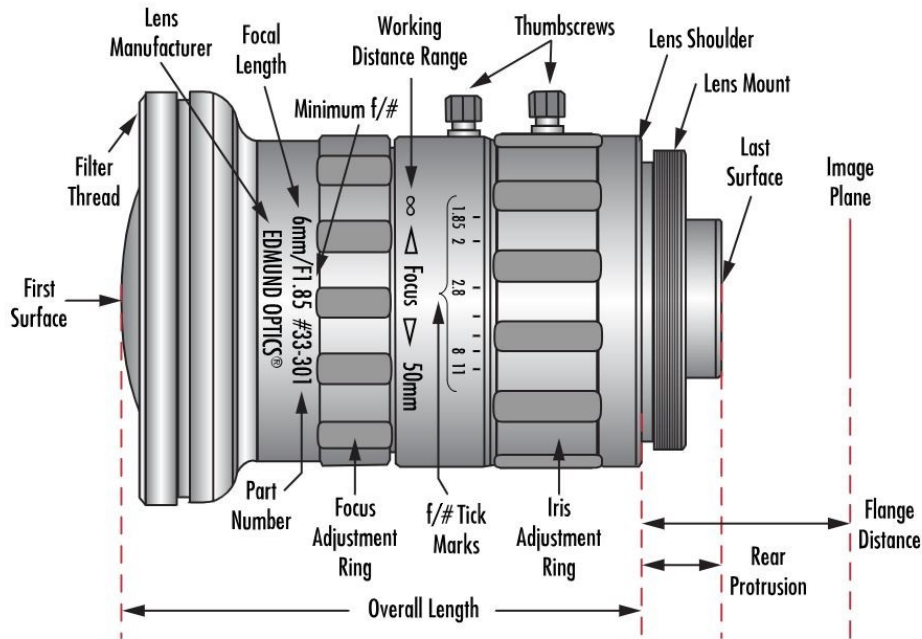
$$\text{PMAG} = \frac{8,45\text{mm}}{100\text{mm}} = 0,0845\text{X}$$

Resoluutio:

$$\text{Linssin resoluutio (Object space resolution)} = 145 \text{ lp/mm} \times 0,0845 = 12,12 \text{ lp/mm} = \mathbf{41 \mu\text{m}}$$

Teoreettisesti voimme siis laskea koko järjestelmän rajoitukset resoluution suhteen. Kuitenkin, kuten jo tässä opinnäytetyössä on käynyt ilmi, moni tekijä vaikuttaa lopputulokseen kuvauksessa.

Käydään seuraavaksi lyhyesti läpi, mitä osia itse linssiin tai toisin sanoen objektiivin kuuluu. Alla kuviossa 24 on perinteisen konenäkölinssin anatomiaa Firestonen, Sischkan ja Tsangin (n.d.) mukaan.



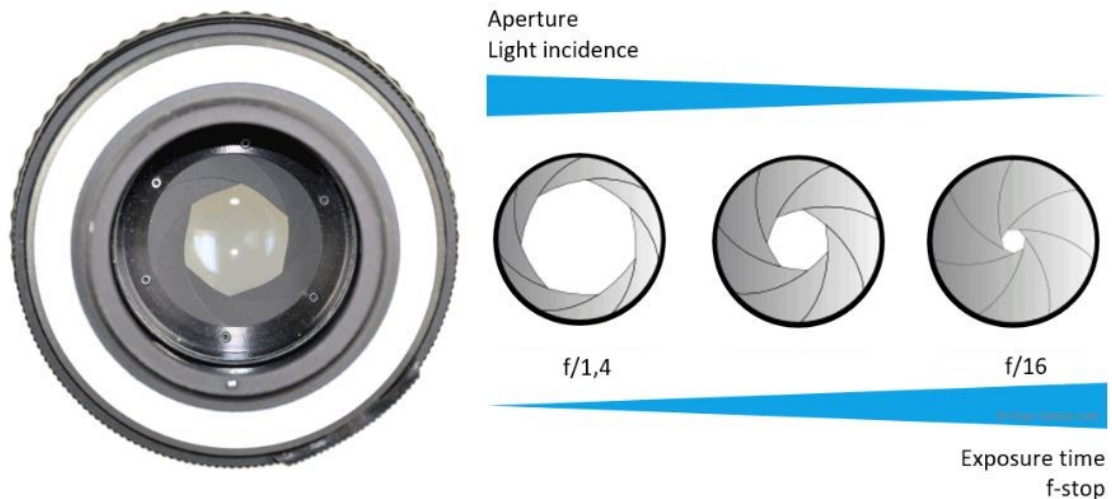
Kuvio 24. Perinteisen konenäkölinssin anatomia (Firestone ym. n.d.).

Mainitaan yllä olevasta kuvista muutamia oleellisia asioita objektiivin liittyen:

- **Focus adjustment ring**, eli suomeksi fokuksen säätörengas. Tätä kääntämällä muutetaan fokuksen sijaintia tarkennuksen suhteen. Etäisyys ensimmäisestä pinnasta kohteeseen, eli työskentelyetäisyys
- **Iris/Aperture adjustment ring**, suomeksi aukon säätörengas. Tällä säädetään objektiivin aukon kokoa ja samalla F-lukua ($f/\#$)
- **Lens information**, eli suomeksi objektiivin tiedot. Kerrottu tyypillisesti polttovälin pituus, minimi F-luku ($f/\#$), osanumero ja valmistaja
- **Working distance range**, on suomeksi työskentelyetäisyysalue, johon linssi voidaan tarkasti fuksoitua, eli tarkentua
- **$f/\#$ tick marks**, eli suomeksi aukon koon säätöön liittyvät merkinnät, osoittavat, mihin suuntaan rengasta tulee kääntää, jotta saavutetaan haluttu $f/\#$ -luku. (Firestone ym. n.d.)

Siltala ja Gautam (2023) kertovat, että kun konenäkösovellusta otetaan käyttöön, optiikan aukko ($f/\#$) ja tarkennus eli fokus (f) asetetaan haluttuihin asentoihin. On tärkeää muistaa, että aukon

asetus vaikuttaa myös syvyysterävyysalueeseen (DOF). Kun aukko on täysin auki, syvyysterävyysalue on pienimmillään, ja päinvastoin. (Siltala & Gautam 2023, 180.) Vision Doctorin verkkosivustolla havainnollistetaan aukon koon vaikutusta alla kuviossa 25.



Kuvio 25. Optiikan aukko (Lens aperture n.d.).

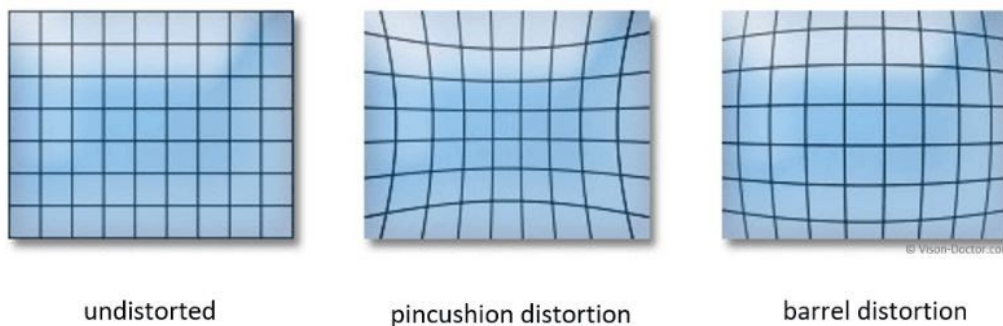
Kuviosta voidaan havaita myös, miten aukon koon muuttaminen vaikuttaa tulevan valon määrään optiikalle.

Siltala & Gautam (2023) kertovat optiikan asetusten tarkemman säädön merkityksestä konenäkösovelluksissa. He suosittelevat ensin säätämään linssin aukon täysin auki ja sitten tarkentamaan kohteeseen. Tämän jälkeen aukkoa voidaan säätää haluttuun asentoon, ottaen huomioon sovelluksen kohteen luonne, kuten sen liikkuvuus tai pysyvyys. Liikkuvissa kohteissa on suositeltavaa pitää aukko mahdollisimman avoinna, kun taas haluttaessa laajempaa syvyysterävyysaluetta (DOF) voidaan aukkoa pienentää. Tämä varmistaa, että kuva pysyy terävänä myös eri tarkennusetäisyyksillä. Kontrastin ja tummuuden optimoimiseksi kameran suljinaikaa tulee säätää aukon lisäksi. Suljinajan säätö voidaan suorittaa ohjelmallisesti, mikä mahdollistaa kuvan laadun hienosäädön eri valaistusolosuhteissa. (Siltala & Gautam 2023, 181.)

Useimmiten optiikka voi aiheuttaa kuvaan häiriöitä, kuten **vääristymiä ja perspektiivivirheitä**. Siltala ja Gautam (2023) huomauttavat, että jos konenäkösovelluksella suoritetaan mittausta tai laa-

dunvarmistusta, on tärkeää kalibroida kuva ja kamerajärjestelmä. Tämä kalibrointi tapahtuu kuvaamalla tietyllä kuvaustasolla olevaa kalibroitikohdetta, kuten tasokuvio, pallomatriisi tai shakkilauta. Kuvien avulla saadaan selville kameran kuvan korjaava parametrijoukko, eli **kalibraatio**. (Siltala & Gautam 2023, 181.)

Vääristymiä ja perspektiivivirheitä voi esiintyä monenlaisia, kuten "neulatyyny" -vääristymä ja "tynnyri" -vääristymä. Nämä vääristymät johtuvat usein yleisistä linseistä, mutta erityisesti laajakulma- ja teleobjektiivit altistuvat näille enemmän. (Optic distortion n.d.) Havainnollistetaan tätä kuviossa 26 alla.



Kuvio 26. Optiikasta johtuvia vääristymiä (Optic distortion n.d.).

Yhteenvedona tästä luvusta voidaan todeta, että optiikalla ja sen mitoituksella on merkittävä rooli konenäkösovellusten suunnittelussa. Monet tekijät vaikuttavat tarkan ja korkealaatuisen kuvan saamiseen, ja usein sovelluksen toimivuuden varmistaminen edellyttää monia testejä erilaisten optiikoiden välillä, koska laskelmat ovat vain suuntaa antavia. Kun kuva on muodostettu, sitä on vielä käsiteltävä ohjelmallisesti hienosäätöä varten. Seuraavassa luvussa käsitellään konenäköohjelmistoja ja niiden roolia **kuvankäsittelyssä**.

4.6 Konenäköohjelmistot ja kuvankäsittely

Konenäössä kuvankäsittely on keskeisessä roolissa, ja sitä suoritetaan konenäköohjelmistoilla. Siltala ja Gautam (2023) kertovat, että kun kamera on tallentanut digitaalisen kuvan, sitä käsitellään konenäköohjelmiston avulla. Nämä ohjelmistot tarjoavat erilaisia työkalukirjastoja, joissa on toimintoja kuvan ottamiseen, siirtämiseen, sekä kuvankäsittelyyn ja suodatukseen. Perustoimintojen

jälkeen ohjelmistoa voidaan käyttää tekemällä sääntöpohjainen analyysi ja lopputulos voidaan välittää toiseen järjestelmään tiedonsiirtokanavia käyttäen. (Siltala & Gautam 2023, 182.)

Siltalan ja Gautamin (2023) mukaan tyypillisiä kuvankäsittelyn toimintoja ovat:

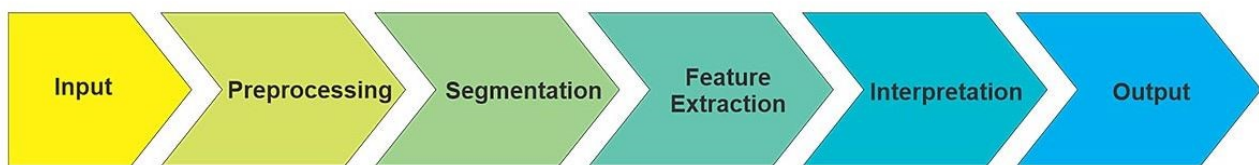
- Suodatukset kuvan kohinan vähentämiseksi, piirteiden erottelun ja kontrastin kasvattamiseksi
- Kuvan binärisointi esimerkiksi kynnystämistä apuna käyttäen
- Blob-analyysi, eli esimerkiksi yhtenäisen alueen etsintä binäärisestä kuvasta, lukumäärä jne.
- Mallin tai hahmon etsintä kuvasta, joka tapahtuu opettamalla hahmoa tai mallia muodon, sävyn tai geometrian avulla
- Reunan etsintä
- Mittaustoiminnot, kuten pituus, halkaisija, pinta-ala, väri tai kirkkaus
- Funktioiden ja eri ehtojen tulosten käsittely ja niistä päättelyiden tekeminen
- Tulosten esittäminen ja välittäminen eteenpäin. (Siltala & Gautam 2023, 182.)

Konenäkölaitevalmistajat ja toimittajat, eli integraattorit toimittavat kuvankäsittelyyn tarkoitetut kirjastot omaan sovellukseen liitettynä. Vaihtoehtoisesti käytettävissä on myös valmiita kehitysympäristöjä, jolloin ei tarvita omaa sovelluskehittäjä. Tunnettuja kirjastoja ovat muun muassa MVTecin Halcon, Teledyne Dalsan Sherlock, Cognexin vision library, National Instrumentsin Vision Builder for Automated Inspection ja OpenCV. Monesti integraattorit kehittävät käyttäjäystävällisen tai graafisen sovelluksen konenäköongelmien ratkaisemiseen. (Siltala & Gautam 2023, 182.)

Markkinoille on viime aikoina ilmestynyt myös tekoälyyn (engl. AI, Artificial Intelligence) ja koneoppimiseen (engl. ML, Machine learning), sekä syväoppimiseen (engl. DL, Deep learning) perustuvia konenäköjärjestelmiä. Näitä hyödyntämällä järjestelmä oppii mallikuvista tiedon, minkä ansiosta ihmisten tekemää ohjelmointia ei tarvita yhtä paljon. Laitetoimittajat tarjoavat muun muassa älykkäitä kameroita, joilla voidaan opettaa tekoälymalleja parhaimmillaan vain muutamalla opetuskurolla. Nämä järjestelmät perustuvat usein neuroverkkokerroksiin. (Mts. 183–184.)

Mikäli kuvattavassa kohteessa on paljon vaihtelevuutta, ennakoimattomuutta tai kuvan tausta ja kuviointi muuttuvat jatkuvasti, tekoäly on hyvä valinta. Lisäksi tekoäly suoriutuu tehtävästä hyvin, vaikka valaistus ja heijastukset vaihtelisivat. Tekoälyratkaisut ovat myös hyviä, jos kuvasta pitää etsiä hahmoja tai siitä pitää luokitella ja analysoida jotain. Ratkaisu on loistava myös tekstin ja merkkien tunnistamiseen. Laaduntarkastuksessa poikkeamien etsintä on tekoälyn avulla vaivastonta. Poikkeamien etsinnässä muutokset havaitaan opetetuista ja opituista. Voidaan siis opettaa kuvia esimerkiksi vain hyvistä tuotteista, jolloin tekoäly tunnistaa huonot tuotteet hyvistä. (Mts. 184.)

Aiemmin käytiin läpi, minkälaisia kuvankäsittelyn toimintoja on olemassa. Itse **kuvankäsittelyn** vaiheet ovat kuvattuna alla kuviossa 27 Westin (2023) mukaan.



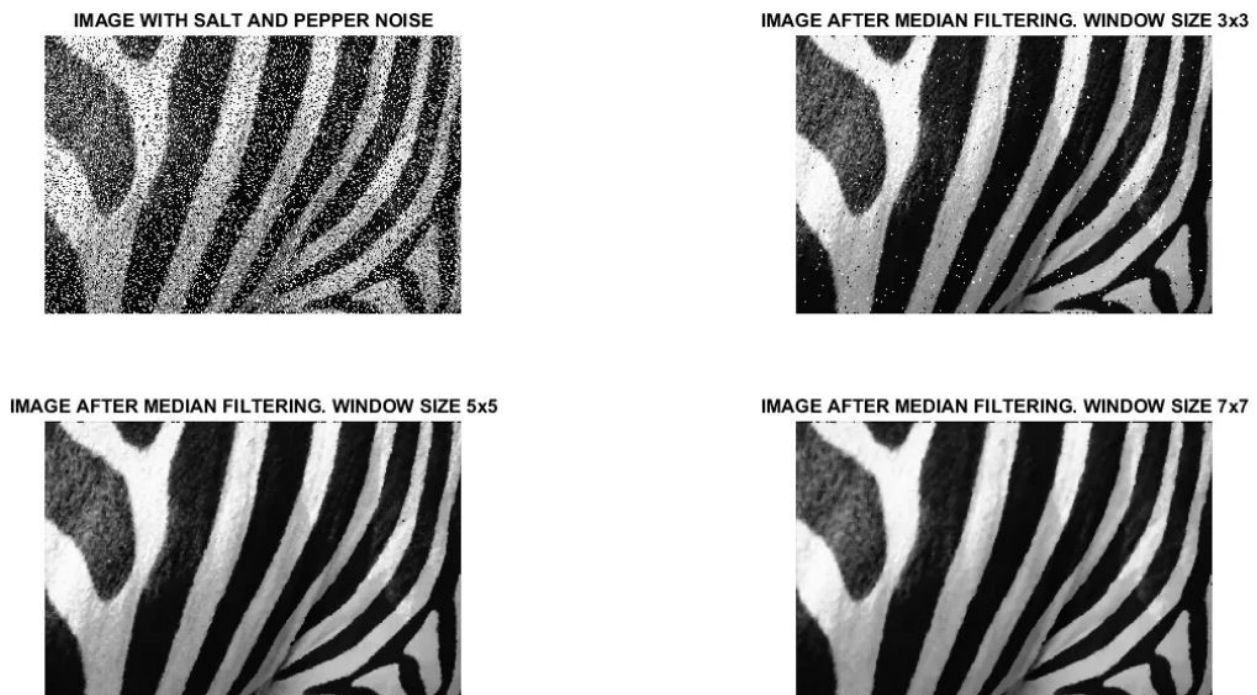
Kuvio 27. Kuvankäsittelyn vaiheet (West 2023).

West (2023) kertoo, että kuvankäsittely alkaa tyypillisesti kuvan esikäsittelyllä (engl. preprocessing) ja sen jälkeen segmentoinilla (engl. segmentation), piirteiden irrotuksella (engl. feature extraction) ja tulkinalla (engl. interpretation).

Kuvan **esikäsittelyssä** käytetään algoritmeja, jotka muokkaavat kuvan tiettyyn muotoon, kuten ali-päästösuodatusta kohinan poistamiseksi ja reunan tunnistusta kohteen reunojen löytämiseksi (West 2023).

Metallisten pintojen virheiden etsinnässä kuvien esikäsittelyssä käytetään usein Tangin ja muiden (2022) mukaan lineaarista suodatusta (engl. linear filtering), joka sisältää keskiarvosuodatuksen (engl. mean filtering) sekä Gaussin suodatuksen (engl. Gaussian filtering). Keskiarvosuodatus on nopea ja helppo, mutta se voi aiheuttaa kuvan epätarkkuutta. Gaussin suodatus poistaa kuvasta tehokkaasti gaussin kohinaa, joka näkyy kuvassa rakeisuutena (Tang ym. 2022, 306–307).

Metallisten pintojen kuvan suodattamisessa käytetään myös epälineaarisia (engl. non-linear) suodatustekniikoita, jotka sisältävät mediaanisuodatuksen (engl. median filtering), matemaattisen morfologian (engl. mathematical morphology filtering) suodatuksen ja bilateraalisuodatuksen (engl. bilateral filtering). Mediaanisuodatuksella on hyvä vaimennusvaikutus pulssikohinaan (engl. pulse noise) ja suola- ja pippurikohinaan (engl. salt and pepper noise), joten tätä menetelmää käytetään usein pintavirheiden tunnistamisen suodatuksessa (Mts. 307). Esimerkki mediaanisuodattuksesta on kuvattu kuviossa 28 Boelsin (2019) mukaan.

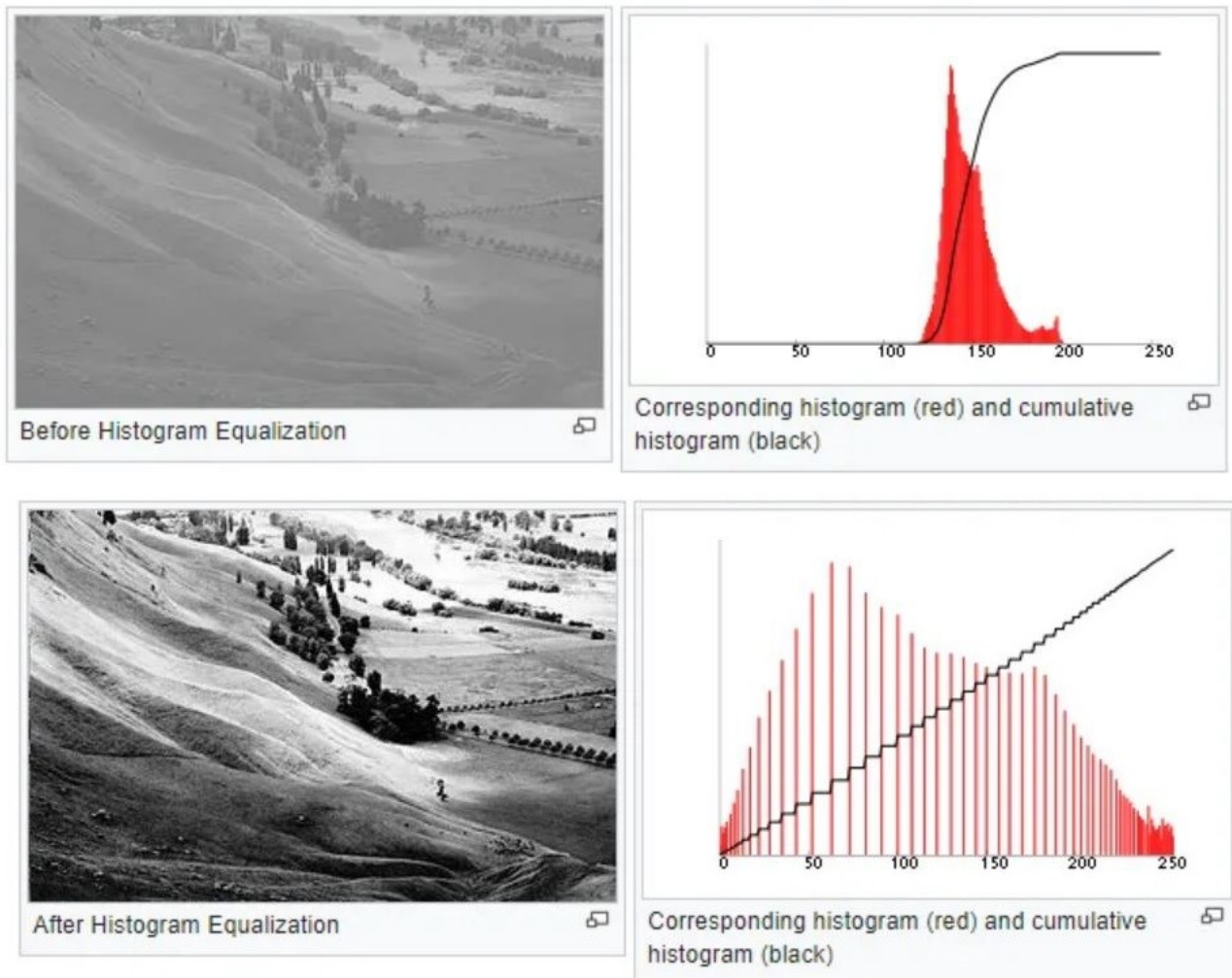


Kuvio 28. Mediaanisuodatus (Boels 2019).

Joskus epätasainen valaistus tai muut ulkoiset tekijät voivat aiheuttaa kuvan epätarkkuuksia teräspintoja kuvatessa. Siksi on tärkeää korjata näitä eri tekijöiden aiheuttamia häiriöitä, kuten pääasiassa epätasaisen valon häiriöitä. Tähän ratkaisuna on muun muassa histogrammin tasaaminen (engl. HE, Histogram equalization). Tämä menetelmä on periaatteessa yksinkertainen ja helppo toteuttaa, mutta se on altis kuvan ylikorostumiselle (engl. over enhancement) ja estovaikutuksille (engl. block effect). (Tang ym. 2022, 308).

Sudhakar (2017) kuvaa artikkelissaan histogrammin tasaamista siten, että se on graafinen esitys kuvan intensiteettijakaumasta. Toisin sanoen se kuvaa pikselien määrää kullekin tarkasteltavalle

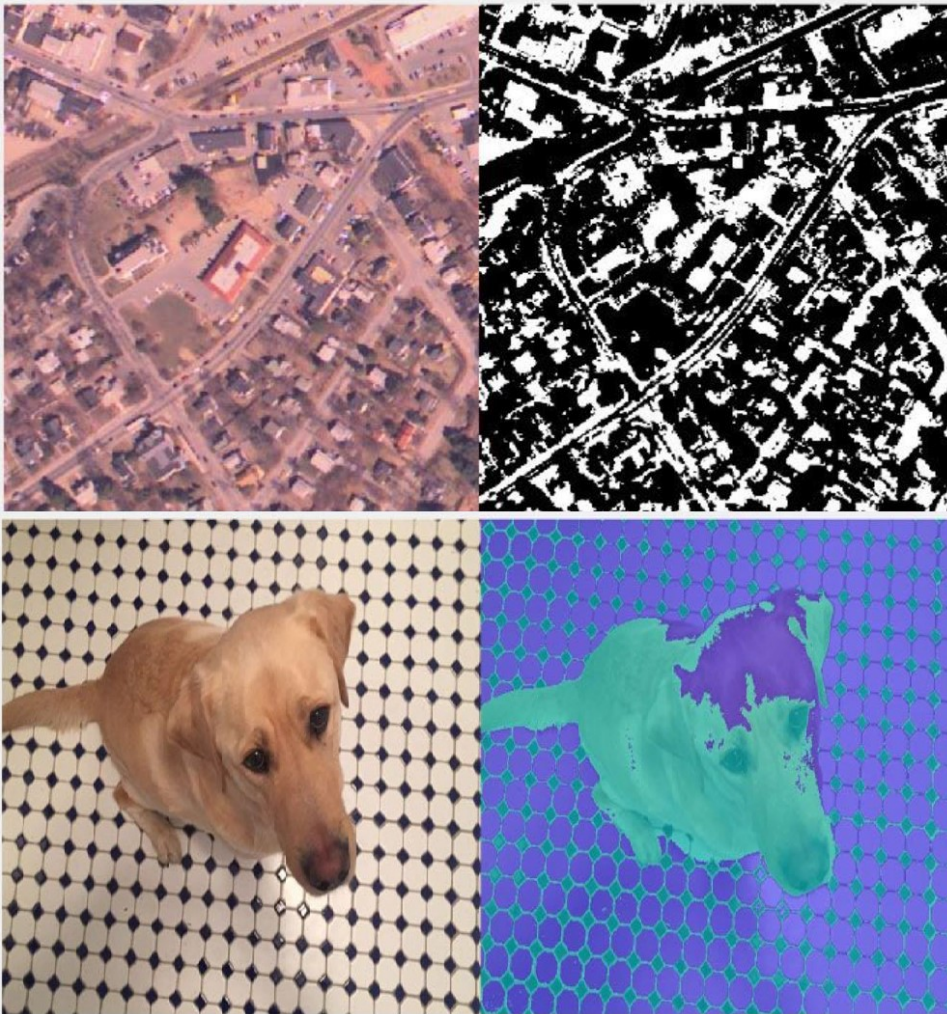
intensiteettiä. Hän korostaa, että tämän tekniikan tarkoitus on parantaa kuvan kontrastia. Tätä tekniikkaa ei voi erikseen käyttää värikuvissa eli RGB-kuvissa, koska se vaikuttaa dramaattisesti kuvan väritasapainoon. Värikuvan voi kuitenkin muuntaa harmaasävyiseen HSL/HSV-kuvavaruuteen, jossa sillä ei ole niin suurta vaikutusta kuvan sävyyn tai kylläisyyteen (Sudhakar 2017). Kuvataan histogrammin tasaamisen vaikutusta alla kuviossa 29.



Kuvio 29. Histogrammin vaikutukset. Yllä ennen käsittelyä ja alla jälkeen (Sudhakar 2017).

Myös harmaasävyjen muunnosta (engl. grey transformation) voidaan käyttää kuvan epätasaisuuksien säätämiseen. Tämä tekniikka saattaa parantaa kuva-alueen laatua ja lisätä kuvan dynaamista aluetta (Tang ym. 2022, 308). Kuvan esikäsittelytekniikoita on myös muita, mutta niitä ei käsitellä tässä opinnäytetyössä enempää.

Kuvan **segmentointi** on tekniikka, jota Tang ja muut (2022) kuvaavat kohteen irrottamisena taustasta, esimerkiksi pintavirheen erottamisena teräslevyn pinnasta. Segmentoinnin algoritmeja ovat muun muassa **kynnystys** (engl. thresholding), reunan tunnistus (engl. edge detection), alueen segmentointi (engl. region segmentation), klusterointimenetelmä (engl. clustering method) ja tiettyyn teoriaan perustuva menetelmä. (Tang ym. 2022, 308.) Esimerkkeinä kynnystys- ja klusterointitekniikoista on kuvattu alla kuviossa 30.



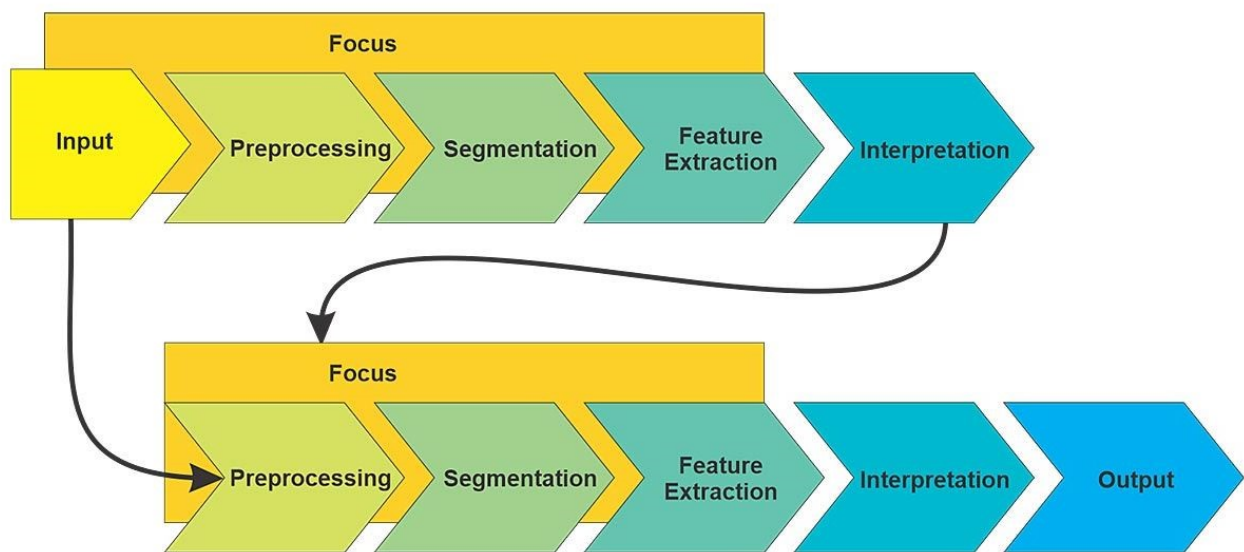
Kuvio 30. Segmentointitekniikoita. Yllä kynnystys ja alla klusterointi (What is image...n.d.).

Kun kuvan segmentointi (kohdehahmo) on suoritettu onnistuneesti, voidaan kuvasta **irrottaa piirteitä**. Tällä toiminnolla poimitaan kuvasta tärkeitä tai kiinnostavia ominaisuuksia (Feature extraction, 2023). National Instrumentsin (2023) verkkosivuilla mainitaan, mitä NI Vision -ohjelmistolla voidaan tehdä piirteiden irrotuksen suhteen. Näitä ovat muun muassa **luokittelu** (classification) ja **rakenneanalyysi** (texture analysis). Luokittelussa tunnistetaan tuntematon näyte vertaamalla sitä

sen ominaisuuksien joukkoon, jotka käsitteellisesti edustavat jo ennestään tunnettuja joukkoja. Rakenneanalyysillä taas voidaan luokitella rakenteet tai tekstuurit ja tunnistaa niiden viat. NI Vision -ohjelmistolla on kaksi piirteiden irroitusalgoritmia, jotka ovat englanninkieliseltä nimeltään histogram of oriented gradients (HOG) ja local binary patterns (LBP). (Feature extraction 2023).

West (2023) kertoo, että kun kuvasta on irrotettu kaikki ne kohteet, jotka eivät ole kiinnostavia, jäljelle jää vain kiinnostavat kohteet, jotka tunnetaan englanniksi nimellä ROI (Region Of Interest). Näitä voi olla useita samalla kuva-alueella. Kohteet voivat olla eri kokoisia, värisiä ja eri asennoissa. Siksi kohteiden luokittelu on tärkeää, kuten aiemmin jo mainittiin. Kun luokittelu on suoritettu, ohjelmiston algoritmi voi tehdä kohteista **tulkinnan** (engl. interpretation). Näin ohjelmisto voi tulkita esimerkiksi kääntyneet osat kuva-alueella ja tulkinta voidaan lähettää eteenpäin. (West 2023).

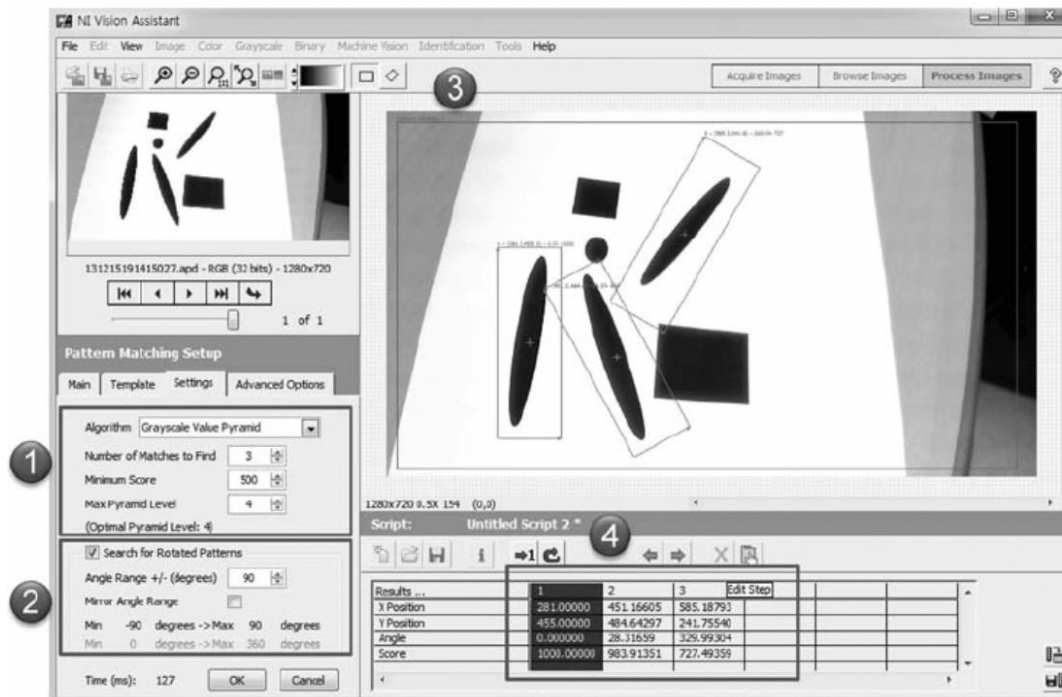
Tästä on esimerkki alla kuviossa 31.



Kuvio 31. Kuvan tulkinnan (interpretation) vaiheet (West 2023).

Tämän opinnäytetyön lopputuloksen kannalta tarvitaan kuvankäsittelyohjelmistolta vielä muutamia ominaisuuksia. Näitä ovat muun muassa hahmon tunnistus, viivakoodin tunnistus, merkkien tunnistus, vikojen tai virheiden tunnistus, kuva-alueen kalibraatio, sekä reunan tunnistus. Kerrotaan seuraavaksi tarkemmin näistä.

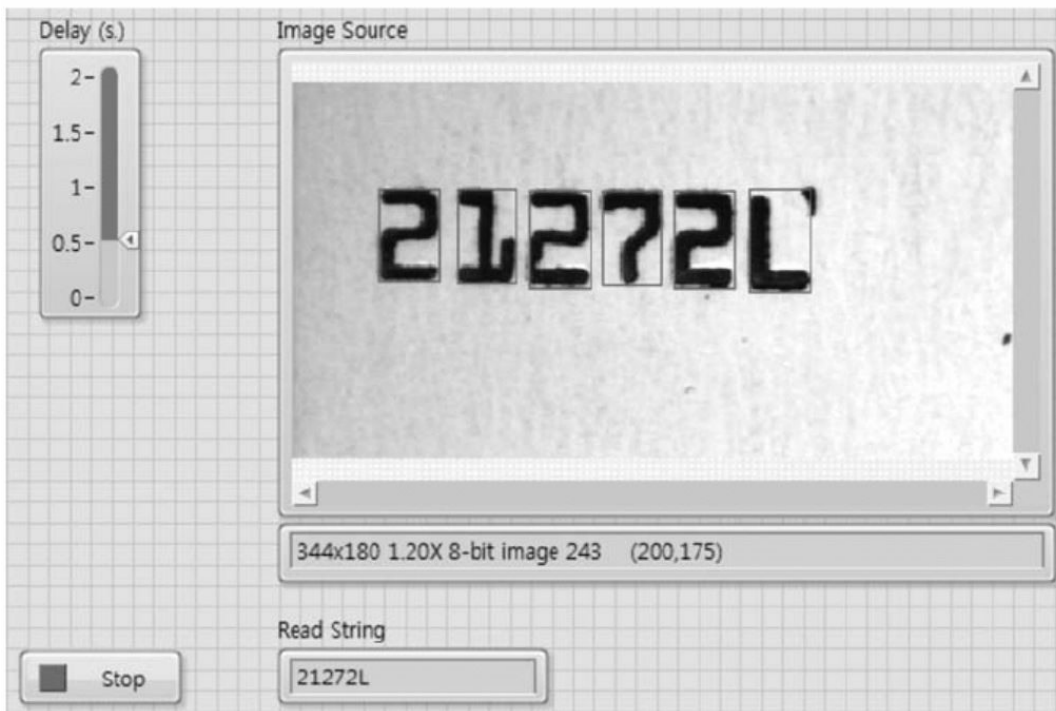
Hahmon tunnistus (engl. pattern matching) on menetelmä, jolla etsitään kuvasta alueita, jotka vastaavat viitekuvan kuviota. Toisin sanoen opetetaan yksi hahmo kuvasta, joka voidaan myöhemmin kuvasta löytää riippumatta sen sijainnista, pyörähdyskulmasta tai kuvan skaalauksesta. (Kwon & Ready 2015, 89.) Alla esimerkki hahmon tunnistuksesta National Instrumentsin Vision Assistant -ohjelmistolla kuviossa 32.



Kuvio 32. Hahmon tunnistus Vision assistant- ohjelmistolla (Kwon & Ready 2015, 89).

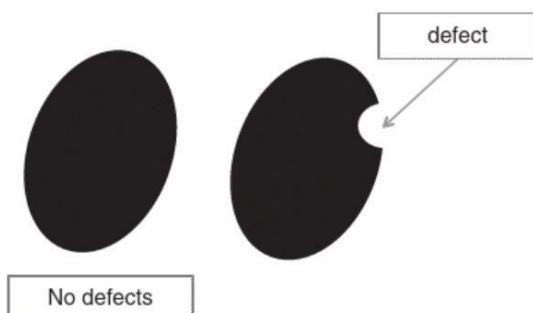
Viivakoodin tunnistus on toiminto, jonka avulla voidaan lukea yksiulotteisia viivakoodeja. Viivakoodityyppejä on useita erilaisia, mukaan lukien EAN-13, EAN-8, Code 128, MSI, Code 39 ja Code 93. Toiminnoiksi voidaan valita viivakoodin automaattinen tunnistus tai manuaalinen tunnistus, jos viivakoodin tyyppi on tiedossa (Barcode reader 2023).

Merkkien tunnistus (engl. OCR, Optical Character Recognition) on konenäkösovellustoiminto, joka muuntaa kuvassa esiintyvät hahmot tekstiksi. Esimerkiksi National Instrumentsin LabVIEW-ohjelmistoa on opetettava tunnistamaan hahmot ja muuntamaan ne tekstiksi. Tätä varten tarvitaan useita opetettuja hahmoja, ja näitä hahmoja verrataan kuvassa esiintyvien hahmojen piirteisiin tunnistusta varten (Kwon & Ready 2015, 177). Esimerkki merkkien tunnistuksesta esitetään alla kuviossa 33.



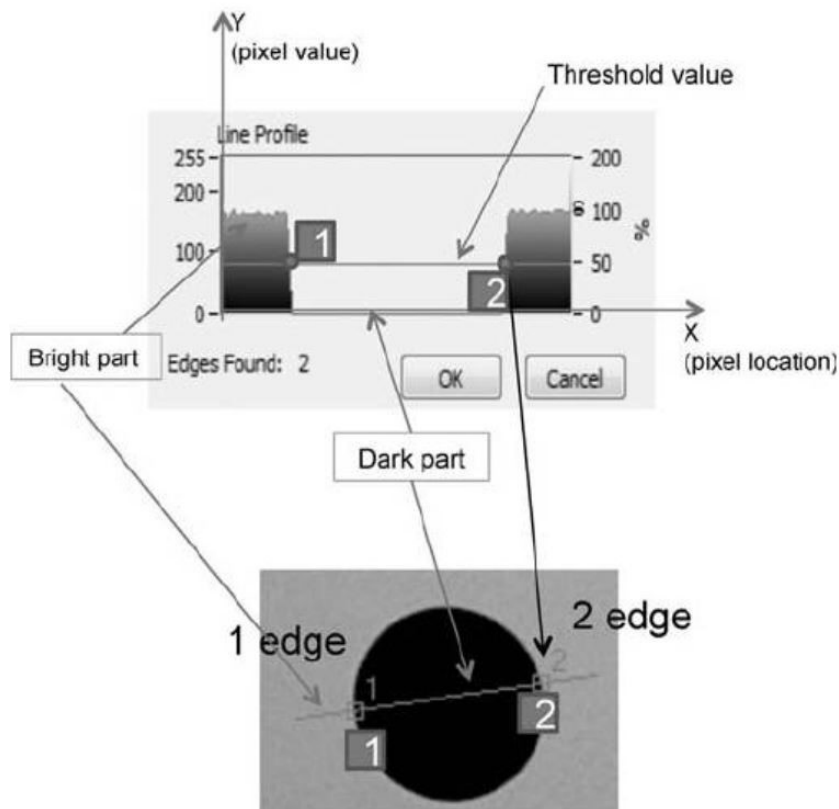
Kuvio 33. Merkkien tunnistus (OCR) (Kwon & Ready 2015, 178).

Vikojen tai virheiden tunnistus kappaleesta tai kohteesta voidaan suorittaa esimerkiksi muodon analyysi (engl. contour analysis) -toiminnolla. Tämän toiminnon avulla voidaan analysoida kohteen muotoja. Selkeiden reunaehtojen vuoksi kuvan kohteilla on oltava tarkasti määritetyt reunat, jotta niiden sijainti voidaan tunnistaa tarkasti. Kohteiden ääriviivojen analysointiin käytetään usein kaarevuusprofiilia. Kaarevuusprofiilin tunnistus on tehokas erityisesti silloin, kun muoto muuttuu merkittävästi. Otetuille kuville voidaan myös käyttää referenssikuvaa, jonka avulla voidaan verrata kohteiden ominaisuuksia (Mts. 209). Alla esimerkki virheiden tunnistuksessa kuviossa 34.



Kuvio 34. Virheiden tunnistus käyttäen Countour analysis- toimintoa (Kwon & Ready 2015, 211).

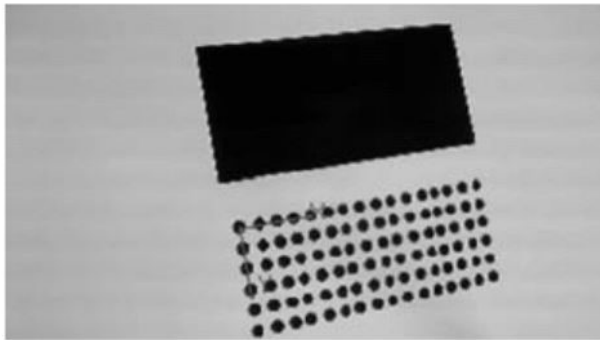
Reunan tunnistus (engl. edge detection) on toiminto, jolla etsitään digitaalisesta kuvasta kirkkauden muutoksia pikselien mukaan. Nämä muutokset kirkkaudessa määrittävät kohteen reunan. Tällä toiminnolla voidaan siis määrittää kappaleen tai kohteen reunat tai rajat. Kun reunat on löydetty, voidaan määrittää kohteen koko ja muut ominaisuudet (Mts. 75). Alla kuviossa 25 on esimerkki reunan tunnistus -työkalusta, joka on toteutettu National Instrumentsin Vision Assistant -ohjelmistolla.



Kuvio 35. Reunan tunnistus, eli edge detection (Kwon & Ready 2015, 77).

Kuva-alueen kalibraatio ja kuvankorjaus, (engl. image calibration and correction) on tarpeen, jos kamera ei ole kohtisuorassa itse kohteeseen nähden, koska tämä aiheuttaa perspektiivivirheitä kuvaan. Näitten virheitteen takia kuvassa voi esiintyä vääristymiä, jotka taas voivat aiheuttaa mittavirheitä. Jotta voidaan vähentää perspektiivivirheitä, kameran akselin kohdistus kohteen suhteen on tärkeää. Lisäksi objektiivin vääristymät voivat aiheuttaa näitä virheitä (Mts. 227). Alla kuviossa 35 on esimerkki vääristyneestä kuvasta, johon on tehty kuva-alueen kalibraatio.

Before correction (1280 × 720)



There is image distortion according to camera alignment and position.

After correction (1564 × 846)



The image corrected for distortion.

Kuvio 36. Kuva-alueen kalibraatio ennen ja jälkeen (Kwon & Ready 2015, 236).

5 Tutkimusasetelma

5.1 Tutkimusongelma

Heikkilä (2014) toteaa tilastollisen tutkimuksen teoksessaan, että tutkimuksen onnistuminen edellyttää järkevän kohderyhmän ja oikean tutkimusmenetelmän valintaa. Jotta tutkimusmenetelmä voidaan valita, täytyy ensin tietää mikä tutkimusongelma ja itse tutkimuksen tavoite. Tutkimusongelma muotoillaan kysymykseksi, johon tutkimuksella pyritään saamaan ratkaisu. Teoksessa korostetaan kuitenkin, että mikään menetelmällinen ratkaisu ei välttämättä ole ainoa ja oikea vaihtoehto ja kelpollisia vaihtoehtoja voi olla useita. Tämän takia jokin menetelmällisen ratkaisun valinta voi olla haastavaa. Valinnassa korostuu olemassa olevien resurssien ja tavoitteiden rajoitukset. (Heikkilä 2014, 12.)

Käydään seuraavaksi läpi kohdeyrityksen nykytila opinnäytetyön aiheen mukaisesti ja mistä nykyinen ongelma muodostuu. Yrityksellä on siis ollut tarve parantaa laadunvarmistusta liittyen materiaalin, eli tässä tapauksessa tehtaalta tulevien levyjen pintavirheiden tunnistamiseen, sekä materiaalitietojen todentamiseen.

Materiaalitiedot todennetaan ihmisen toimesta ja merkataan käsin pöytäkirjaan. Tämän jälkeen levykoordinaattori käsittelee pöytäkirjan ja näiden tietojen perusteella tekee vastaanoton toiminnanohjausjärjestelmään. Tämä toimintatapa aiheuttaa harvemmin virheitä levyjen vastaanotossa, mutta riski on silti olemassa ja näin on joskus ennenkin käynyt. Kyse on siis inhimillisestä virheestä, eli ”näppäilyvirheestä” tietokoneella tai väärin tulkitusta käsin kirjoitetusta vastaanottopöytäkirjasta.

Levyjen pintavirheiden tunnistaminen, kuten tehdashiontojen ja naarmujen tunnistaminen, on myös ollut tähän asti ihmisen havainnointikyvyn varassa. Vastaanottopöytäkirjaan on siis vastaanottovaiheessa ilmoitettu, että levyssä on tehdashiontoja tai muita virheitä, mutta näiden kokoa tai sijaintia on vaikea ilmoittaa ja tarkka määrittäminen veisi ihmiseltä paljon aikaa. Vaikka pintavirheet saikin käsin määriteltä paperille, saattaisi tämä edelleen aiheuttaa tulkintavirheitä viimeisessä levynvastaanottovaiheessa.

Näistä haasteista voidaan suoraan juontaa tutkimusongelmia:

- Voidaanko levyjen vastaanotto prosessi tehdä jollakin muulla menetelmällä?
- Voiko kummatkin vaiheet automatisoida?
- Kuinka prosessi voidaan todentaa luotettavasti?

5.2 Tutkimuskysymykset

Ennen opinnäytetyön aloittamista oli tarpeen määritellä olennaiset tutkimuskysymykset, jotka ohjaisivat koko projektin etenemistä. Tutkimuskysymykset johdatettiin suoraan edellisessä luvussa käydyissä tutkimusongelmista. Nämä kysymykset antaisivat suunnan, mihin koko tietoperusta perustuu ja lopulta johtaisi luotettaviin tuloksiin tutkimuksen toteuttamisessa. Tutkimusongelmien ratkaisuun haettiin vastausta automaation maailmasta. Yrityksellä oli halu automatisoida kyseinen prosessi ja ongelman ratkaisemiseksi päädyttäisiin hankkimaan konenäköjärjestelmä. Tutkimuskysymykset nojautuivat voimakkaasti konenäön teknisten ja ympäristöön liittyvien haasteiden ratkaisemiseen.

Ensimmäinen kysymys oli, minkälaisia konenäköjärjestelmiä on olemassa ja mikä näistä sopisi kyseiseen prosessiin parhaiten.

Toinen kysymys oli, kuinka luotettavaksi järjestelmä voidaan rakentaa, koska levyt eivät kuvauskohdassa ole välttämättä aina samassa kohdassa, vaan levyn koko ja materiaalitietojen sijainti saattavat vaihdella. Lisäksi suunnitelmana oli, että järjestelmä liitettäisiin nosturiin, joka liikkuu vaijereiden varassa. Siksi kuvausprosessi ei ole ikinä täysin staattinen, vaan pientä heiluntaa nosturilla on aina.

Kolmantena kysymyksenä nousi esiin ympäristön vaikutukset kuvauskohteen alueella. Kuvauksen laatuun ja luotettavuuteen vaikuttaisi suuresti valaistus, pölyisyys ja niin edelleen.

Neljäntenä kysymyksenä nousi esiin liiketoiminnallisessa mielessä järjestelmän kustannukset ja siitä saatava hyöty.

Opinnäytetyön oleelliset tutkimuskysymykset tiivistettynä ovat:

- Kuinka nykyisillä konenäköjärjestelmillä voidaan todentaa materiaalitietoja ja virheitä levyn pinnasta?
- Kuinka luotettava tämä todennus on, kun kuvauskohteen paikka muuttuu?
- Kuinka ympäristö vaikuttaa todentamiseen, kuten esimerkiksi valaistus?
- Mitä ovat järjestelmän hyödyt ja kustannukset?

Nämä kysymykset siis ohjaisivat opinnäytetyön etenemistä kohti kelpollisia ja luotettavia lopputuloksia. Mikäli tutkimuskysymysten ratkaisussa onnistuttaisiin, ei esteitä konenäköjärjestelmän käyttöönotolle tulevaisuudessa olisi.

5.3 Tutkimuksen rajaus

Konenäköjärjestelmät ovat kokonaisuudessaan melko laajoja kokonaisuuksia, ja niissä on yleensä paljon muuttujia, jotka vaikuttavat toisiinsa. Lähtökohtaisesti suurten kokonaisuuksien suunnittelussa suositellaan käytettäväksi konenäkötoimittajien tarjoamaa tukea ja asiantuntemusta. Tässä tutkimuksessa ei siis pyritty rakentamaan valmista konenäköjärjestelmää, vaan tutkimus rajattiin

koskemaan materiaalivirheiden tunnistusta ja itse materiaalin pinnassa olevien tehdasmerkintöjen tunnistamista. Tutkimuksessa otettiin kuitenkin kantaa myös siihen, mitä konenäköjärjestelmän käyttöönotto tulevaisuudessa vaatisi toimiakseen levyjen vastaanotto-prosessin tukena. Lisäksi pohdittiin myös ratkaisun vaikutusta yrityksen laadunvarmistukseen sekä konenäköjärjestelmän kustannuksia.

Tekemällä suurin osa tutkimustyöstä itse, voitaisiin tarvittava konenäköjärjestelmä sovelluskehityksineen viimeistellä asiantuntijoiden avulla. Näin vältettäisiin suuret kustannukset, jotka aiheutuvat ulkopuolisen toimijan tekemästä tutkimustyöstä.

5.4 Tutkimusmenetelmät

5.4.1 Tutkimuksellinen kehitystyö

Tämä opinnäytetyö oli suunniteltu ratkaistavaksi tutkimuksellisena kehitystyönä, koska yrityksellä on halu saada aikaan muutoksia, sekä kehittää toimintaa. Koska tässä työssä pyritäisiin ratkaisemaan käytännön ongelmaa ja halutaan kehittää teknistä suorituskkyä, sopii tämä tutkimuksellisen kehitystyön luonteeseen. Ojasalo, Moilainen ja Ritalahti (2015) toteavat teoksessaan, että tutkimuksellisen kehitystyön tarkoituksena on myös kehittää ja ottaa käyttöön erilaisia ratkaisuja. Kehittämistyössä ei ole tapana vain kuvailla ja selitellä asioita, vaan konkreettisia tuloksia pyritään saamaan projektin lopputuloksena. Toisaalta tässä työssä on myös mahdollisesti vivahteita tutkimuksellisesta kehittämisestä, jossa on mahdollisuuksia luoda aivan uudenlaista ammatillista tietoa. Tieteellisellä tutkimuksella ja tutkimuksellisella kehittämisellä onkin eroja sen suhteen, mitä halutaan saavuttaa: Tuotetaanko jostain ilmiöstä uutta teoriaa vai halutaanko panostaa enemmän käytännön parannuksiin tai uusiin ratkaisuihin. (Ojasalo, Moilainen & Ritalahti 2015, 19–20.)

Tästä voidaan päätellä, että työn painopiste tutkimuksellisessa mielessä on enemmän tutkimuksellista kehittämisestä, koska konenäköjärjestelmiä on tutkittu maailmalla jo pitkään, ja tähän tarkoitukseen löytyy varmasti jo olemassa olevia järjestelmiä. Toisaalta ennakkoluulot tämän suhteen on syytä syrjäyttää ja antaa mahdollisuuksia myös uusien innovaatioiden syntymiseen.

Ojasalo ja muut (2015) korostavat, että tutkimuksellisessa kehittämistyössä tarvitaan projekti-, ja kehittämistyön osaamista. Sen olennaisia piirteitä ovat suunnitelmallisuus ja tämän mukaan eteneminen. Kehittämistyö onkin siis projektityö, jossa on lähtökohtia, tavoitteita, työmuotoja, sekä lopputuloksia. Täytyy myös ottaa huomioon, että kyseinen tutkimusmenetelmä voi olla prosessi- maista ja ennakoimatonta. Tutkimuksellinen kehittämistyön tarkoituksena on saavuttaa käytännöllisiä lopputuloksia, joihin on saatu tukea teoriasta. Voidaan myös korostaa, että tulosten hyödyllisyys on vahvasti kytkeytynyt kehitettyjen ideoiden toteutukseen, eli implementointiin. Lisäksi tutkimuksen tekijällä täytyy olla aloitteellisuutta ja innovointikykyä. Tutkimuksellinen kehitystyö edellyttää myös tekijältään sosiaalisia taitoja, kuten ihmisten välistä vuorovaikutusta, kysymysten muotoilua, tiedon tuottamista ja uusien kontaktien rakentamista, kuten tässä tapauksessa järjestelmätoimittajat jne. Myös epämiellyttäviä asioita on, kuten liikkumista tuntemattomalla alueella ja epävarmuus tutkittavasta aiheesta. (Mts. 20.)

5.4.2 Tutkimusote

Tutkimusote on joko kvantitatiivinen tai kvalitatiivinen. Kvantitatiivinen tutkimus kuvaa määrällistä tutkimusta, kun taas kvalitatiivinen tutkimus keskittyy laadulliseen näkökulmaan. Näiden kahden lähestymistavan välillä valitaan se, kumpi sopii paremmin tutkimusongelmaan tai tutkimuksen tarkoitukseen. Toisinaan näitä kahta voidaan myös yhdistellä, ja ne täydentävät toisiaan. (Heikkilä 2014, 14–15.)

Kvantitatiivisen tutkimuksen toinen nimi voi olla myös tilastollinen tutkimus. Tilastollisessa tutkimuksessa keskitytään lukumääriin ja prosenttiosuuksiin liittyviin kysymyksiin. Tärkeä edellytys tilastolliselle tutkimukselle on riittävän suuren ja edustavan otoksen käyttö. Tällaisessa tutkimuksessa voidaan kerätä esimerkiksi numeerisia suureita ja havainnollistaa niitä taulukoina tai kuvioina. (Mts. 15.)

Kvalitatiivinen tutkimus auttaa ymmärtämään tutkimuskohdetta ja sen käyttäytymistä sekä selittämään päätösten syitä. Tämä tutkimus rajautuu yleensä pienempään määrään tapauksia, mutta niiden tarkka analysointi on tärkeää. Kvalitatiivinen tutkimus sopii paremmin esimerkiksi ihmisryhmien ja käyttäytymisen tutkimiseen. (Mts. 15.) Taulukossa 3 alla on havainnollistettu kvantitatiivisen ja kvalitatiivisen tutkimuksen eroja.

Taulukko 3. Kvantitatiivinen ja kvalitatiivinen tutkimus (Heikkilä 2014, muokattu)

Kvantitatiivinen (määrällinen)	Kvalitatiivinen (laadullinen)
Vastaa kysymyksiin Mikä? Missä? Paljonko? Kuinka usein?	Vastaa kysymyksiin Miksi? Miten? Millainen?
Numeerisesti suuri, edustava otos	Suppea, harkinnanvaraisesti koottu näyte
Ilmiön kuvaus numeerisen tiedon pohjalta	Ilmiön ymmärtäminen ns. pehmeän tiedon pohjalta

Tässä opinnäytetyössä käytettiin tuloksien saamiseen konenäköjärjestelmiä ja näiden tuottama data piti saada tallennettua numeerisena tietona esimerkiksi taulukkoon. Datan määrä pitäisi siis saada riittävän isoksi, jotta tulokset olisivat luotettavia. Tutkimusote siis kääntyisi enemmän kvantitatiivisen tutkimuksen puolelle, koska ilmiötä kuvataan numeerisen tiedon pohjalta ja datan määrä voisi olla suurta. Toisaalta työssä tutkittiin myös laboratoriossa ja kenttätesteissä saatuja tuloksia, joita tulkittiin havainnoinnin perusteella suppeamman näytekoonnin avulla ja yritettiin ymmärtää ilmiötä, joten tutkimusote on myös kvalitatiivinen.

5.4.3 Aineiston keruu

Tämän opinnäytetyön **aineisto** pohjautuu laboratoriotestien ja toimeksiantajan tiloissa suoritettujen kenttätestien numeeriseen eli kvantitatiiviseen materiaaliin. Aineisto kerättiin konenäköohjelmistolla, josta tallennettiin suorituskykyarvot Excel-taulukkoihin. Näistä arvoista voitiin määrittää keskiarvoja ja onnistumisprosentteja. Näiden suureiden hahmottamiseen ja analysointiin valittiin graafinen esitys.

5.4.4 Analyysimenetelmät

Graafinen esitys, tai toisin sanoen kuviot, ovat visuaalinen tapa havainnollistaa ilmiötä. Graafisella esityksellä helpotetaan oleellisen informaation hahmottamista. Graafisen esityksen taustalla voi olla jokin tietty näkökulma tai muuttuja, joiden jakaumia kuvaillaan. Näiden jakaumien luonne voi olla erilainen. On olemassa useita erilaisia graafisia esitystapoja tai kuvioita, joista yleisimpiä ovat pylväsdiagrammi ja viivadiagrammi. Esitystavan valinta riippuu siitä, kuinka informatiivista esitystä

halutaan. Muuttujien välisiä yhteyksiä tutkitaan analysointivaiheessa monilla eri tavoilla, mutta on tärkeää valita käytettäväksi selkeä ja tehtävään sopiva graafinen esitystapa. (Graafinen esitys n.d.)

Tämän opinnäytetyön tutkimusten tuloksien hahmottamiseen ja analysointiin valittiin pylväsdiagrammi sen selkeyden ja visuaalisen luonteen vuoksi. Kyseiset menetelmät koettiin myös hyvin hallittaviksi.

6 Tutkimuksen toteutus

6.1 Lähtötiedot sovelluskohteen näkökulmasta

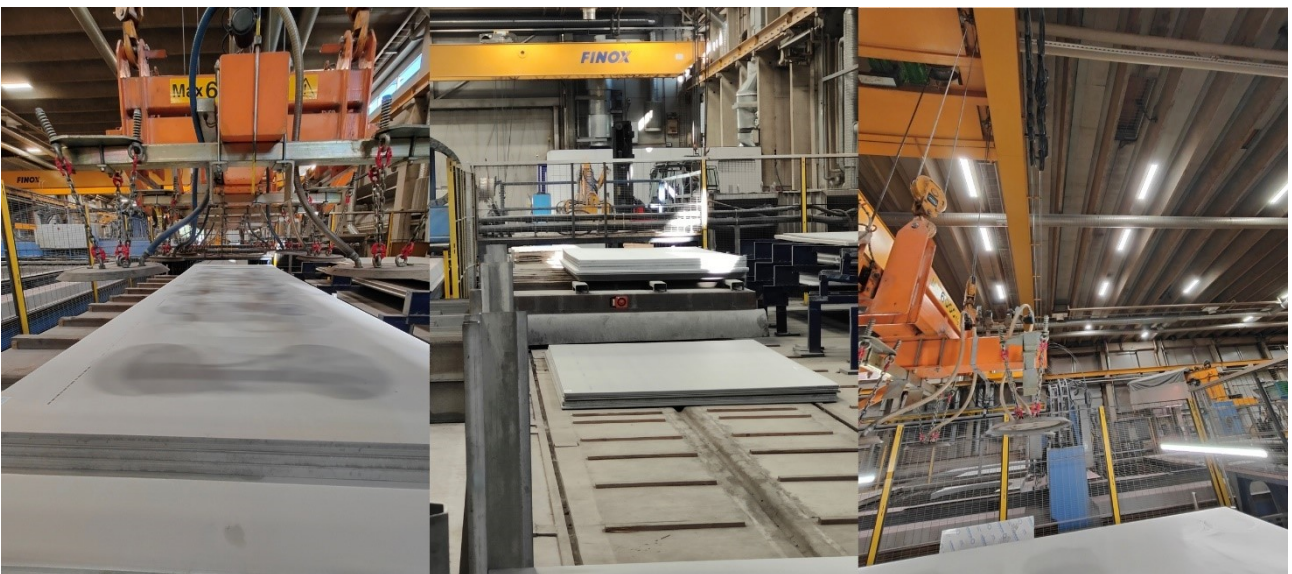
Tämän tutkimuksen pääasiallisena sovelluskohteena olivat toimeksiantajan tehtaalta tulevat ruostumattomat teräslevyt, joiden pinnasta oli tarkoitus kuvantaa ja todentaa teräslevyn pintavirheet ja materiaalitiedot sekä mitata levyjen ääriimitat.

Kerrotaan seuraavaksi **sovelluskohteen ympäristöstä**, sekä minkälaisia erityispiirteitä se sisältää. Kuviossa 37 alla on havainnollistettu alue, missä itse kuvantamisen kuuluisi tapahtua. Alue sijaitsee vesileikkauskoneen vieressä, jossa kohde voi altistua prosessista syntyvälle pölylle ja kosteudelle. Tässä kuviossa on tilanne, jossa oranssi imukuppinostin on juuri hakemassa teräslevyä vastaanottovaunulta varastoidakseen sen automaattivaraston hyllyihin. Nostin roikkuu teräsvaijereiden varassa kattonosturista, joka aiheuttaa nostimeen aina pientä huojuntaa, joten se ei ole ikinä täysin staattinen, kun levyjen purkaminen vastaanottovaunusta tapahtuu. Alue vaunun ympärillä on ahdas, eikä tilaa suuremmille rakenteille ole.



Kuvio 37. Tutkimuksen sovelluskohde.

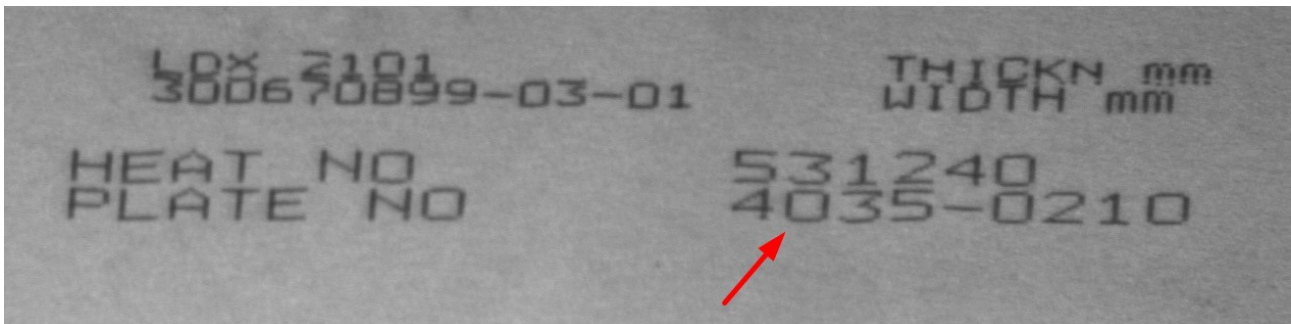
Ympäristön **valaistusolosuhteet** ovat myös jokseenkin muuttuvia. Teräslevyjä hakeva imukuppi-nosturi aiheuttaa itsessään varjostusta kohteen päälle. Tämän lisäksi ympäröivää valoa tulee tehtaasta katossa olevista LED-valoista, sekä vuodenajasta riippuen auringonvalo pääsee seinien yläosissa olevista sivuikkunoista. Alla kuviossa 38 on havainnollistettu ympäröivän valon aiheuttamia haasteita.



Kuvio 38. Ympäristön valaistusolosuhteiden haasteita kohteessa.

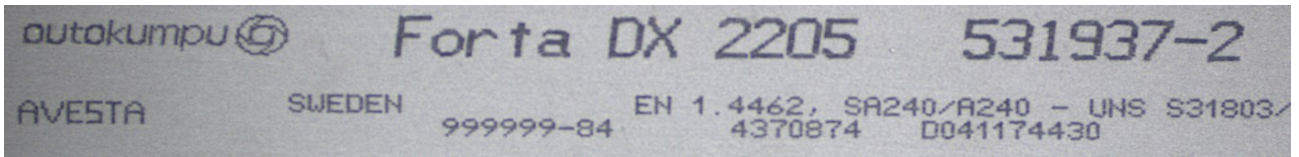
Varsinkin keskimmäisestä kuvasta voidaan todeta, minkälaisia haasteita auringonvalo voi aiheuttaa sovelluskohteeseen. Voimakas auringonvalo voi valaista kohteen osittain tai jopa kokonaan ja aiheuttaa kuvantamisen epäonnistumisen ilman asianmukaisia eristämistoimenpiteitä tälle valon aallonpituudelle.

Kohteen **tarkkuusvaatimuksen** suhteen puhutaan noin **0,5 millimetrin pienimmästä havaittavasta piirteestä**. Tämä vaatimus tulee teräslevyn musteleimauksen tai toisin sanoen stanssausuksen numerosarjasta. Tarkoitus olisi todentaa "Plate No" -musteleimauksen jälkeen tuleva levynumero. Alla kuviossa 39 tämä levynumero on "4035-0210". Yhden merkin piirteen leveys on siis kapeammasta kohdasta noin 0,5 mm. Yksittäisen numeron korkeus on noin 3,8 mm ja leveys 4 mm. Kuviossa 39 on havainnollistettu kohteen pienin havaittava piirre.



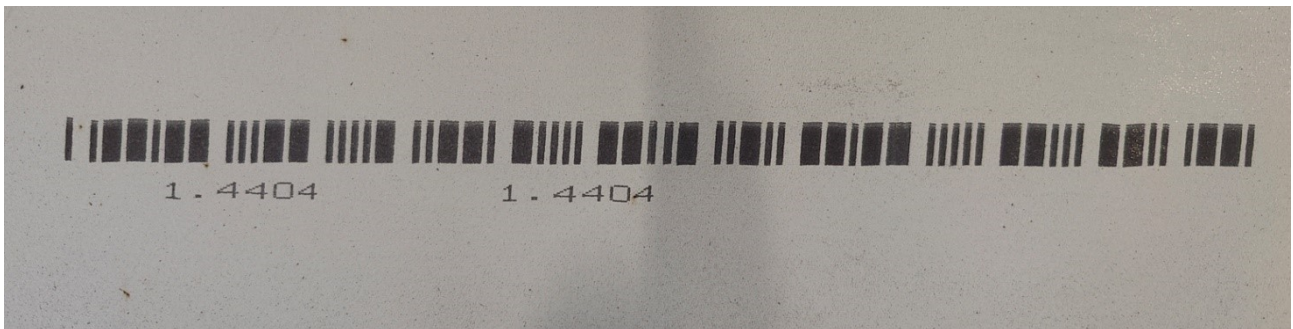
Kuvio 39. Kohteen pienin havaittava piirre. Punaisella nuolella osoitettu levynumero.

Musteleimauksen fonttia on kahta erilaista. On siis ylempänä olevaa pienempää fonttia ja alempana kuviossa 40 havainnollistettua suurempaa fonttia. Fontin tyyli ja koko riippuu siitä, mistä tehtaalta teräslevy ja sen pinnanlaatu on peräisin. Kuviossa 40 alla on havainnollistettu fontin koko ja tyyli on suurempi, mutta merkkien välinen etäisyys suhteellisen pieni, jopa 0,5 mm kokoluokkaa. Tässä esimerkissä todennettava levynumero on "531937-2". Fontin korkeus on noin 7,8 mm ja leveys 6,3 mm.



Kuvio 40. Havaittavaa piirrettä eri fontilla. Levynumero kuvan oikeassa ylänurkassa.

Muita havaittavia piirteitä on toisessa levyn pinnanlaadussa oleva viivakoodi. Viivakoodi on mallia code 39 ja on tunnistettavissa ja luettavissa useimmilla laitteilla, kuten esimerkiksi älypuhelimien kameralla. Koodin merkit ovat helpommin havaittavissa ja luettavissa kuin ylempänä olevat numerosarjat, koska koko on paljon suurempi. Yhden viivan korkeus on noin 9,8 mm ja viiva leveys kaapeimmillaan 1,7 mm. Alla kuviossa 41 esimerkki viivakoodista levynpinnassa.



Kuvio 41. Viivakoodi levyn pinnassa.

Lisäksi halutaan tunnistaa teräslevyn pintavirheitä, joista erityisesti mainitaan tehdashionnat. Näitä hiontoja tehdään tehtaan toimesta, mikäli levyn valssausvaiheessa pinnassa ilmenee epäkohtia, jotka on poistettava tai jos levy ei täytä paksuustoleransseja. Pienimmän havaittavan piirteen vaatimus tehdashiontojen koon suhteen on 5 mm. Alla kuviossa 42 on esimerkki tehdashionnasta.



Kuvio 42. Tehdashiontoja.

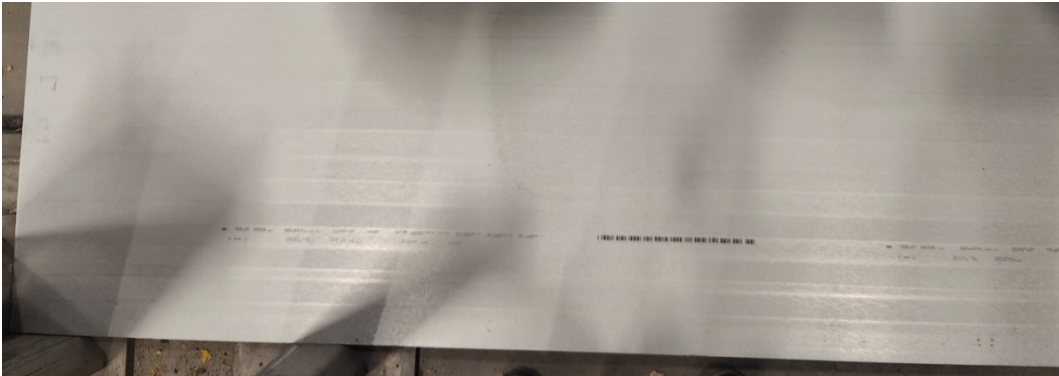
Syy siihen, miksi nämä pintavirheet halutaan todentaa, on se, että jotkut tuotteet on oltava pinnaltaan virheettömiä. Esimerkiksi osa tuotteista käytetään paperikoneen tai muun laitteen julkisivuksi, ja nämä hionnat olisivat selvästi nähtävissä ulospäin.

Kohteen tai kappaleen tyypiksi voidaan siis määritellä ruostumaton teräslevy. Näitä teräslevyjä on pinnanlaadultaan, kooltaan ja musteleimauksien tyyliltään erilaisia.

Kohteen maksimikoon suhteen automaattivarastoon tuotavien levyjen maksimipituusmitat ovat teoriassa jopa 7000 mm pitkiä, mutta tämän pituiset levyt aiheuttavat muita ongelmia varastossa. Käytännössä varastoon tuodaan maksimissaan 6650 mm pitkiä levyjä. Minimipituus levyille on taas 4500 mm. Minimileveys levyille on 1900 mm ja maksimi 3200 mm.

Vaihteluita teräslevyssä ovat mittojen lisäksi siis tehdashionnat ja musteleimauksien sijainnit. Tehdashionnat voivat siis olla missä kohtaa levyä tahansa eri kokoisina ja muotoisina. Musteleimauksien sijainnit ovat levyn alareunasta ylöspäin katsoen vakioita, eli noin 200 mm. Pituussuunnassa leimauksien sijainti voi muuttua hieman suuntaan tai toiseen, mutta pääsääntöisesti ne ovat melko vakioituja. Tehtaasta riippumatta leimauksen alkamisen kohta on aina vakio levyn vasem-

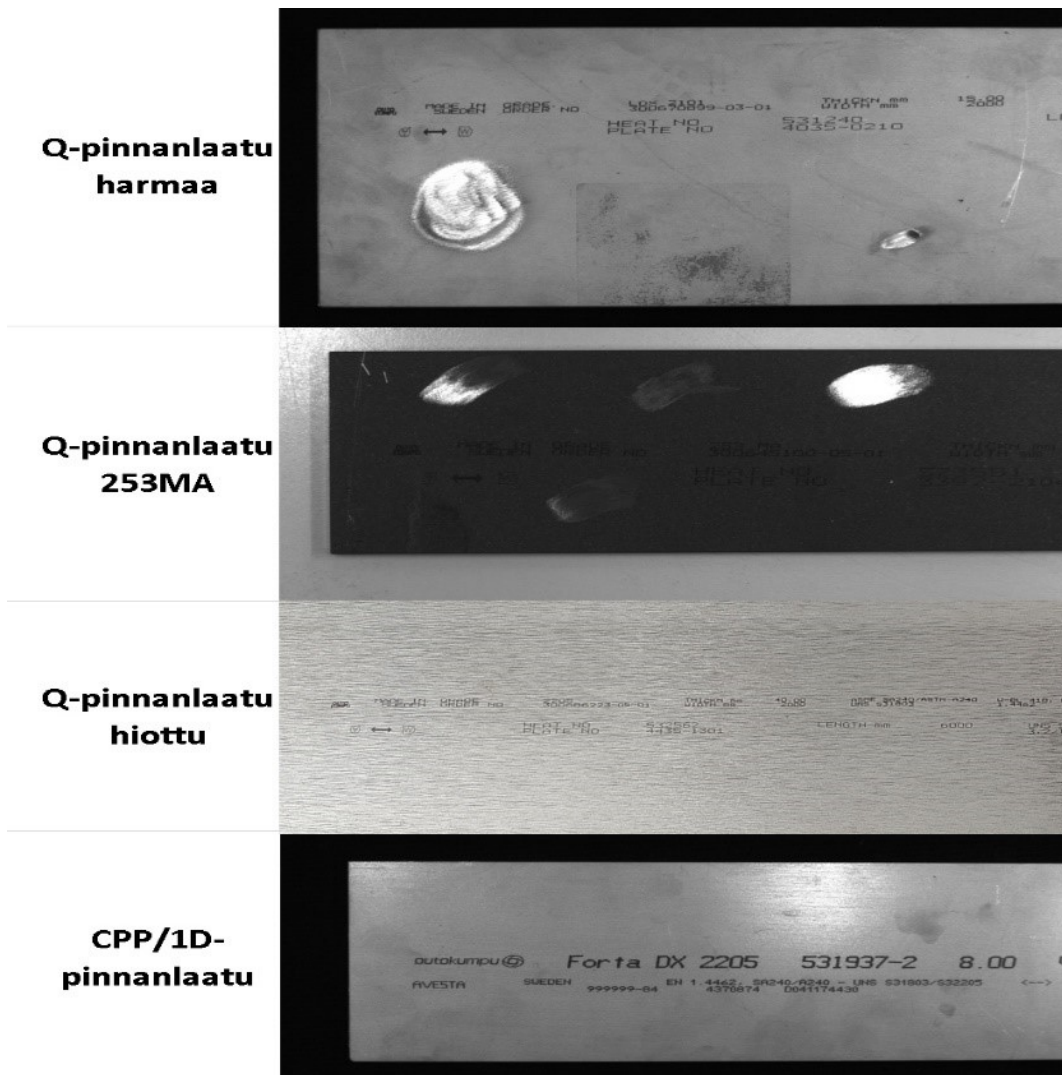
masta alareunasta katsoen. Toiselta tehtaalta tulevien kvarttolevyjien (Q-pinnanlaatu) leimaussarjoja on koko levyn pituudelta 4–5 kappaletta pituuden mukaan ja taas toiselta tehtaalta tulevien nauhalevyjen (1D/PPP-pinnanlaatu) yksi leimaus levyn vasemmassa reunassa ja yksi oikeassa. Alla kuviossa 42 on esimerkki leimauksien sijainnista levyllä Q-pinnanlaadun levystä.



Kuvio 43. Tehtaan leimauksien sijainti levyn reunoista lähtien.

Leimaukset tai merkkisarjat ovat etäisyyksien suhteen hyvin pitkälti samoja toisiinsa verrattuna, mutta esimerkiksi nauhalevyjen laatumerkintä saattaa olla eri mittainen. Tämä aiheuttaa haasteita, kun hahmontunnistuksen perusteella paikannetaan levynumeroa levystä. Tätä ilmiötä havainnollistetaan myöhemmin tässä tutkimuksessa.

Näiden lisäksi kohteilla on vaihteluiden suhteen erilaisia **pinnanlaatuja heijastavuuden mukaan**. Automaattialueelle varastoitavien levyn pinnanlaatu on mattapintainen (Q-pinnanlaatu) tai hieman kiiltävä (1D/PPP-pinnanlaatu). Varastoon tuodaan myös ajoittain 2E- pinnanlaatua, joka on hieman heijastavampi kuin 1D/PPP-pinnanlaatu, mutta merkittävää eroa tämän tutkimuksen kannalta tällä ei ole. Pinnan tasaisuus on kaikilla levyillä tasainen normaalitilanteessa, eli epätasaisuuksia ei ole. Ainoa poikkeus on, mikäli levyissä on hiontajälkiä. Tällöin hiontajälki aiheuttaa levyn pintaan pientä epätasaisuutta. Muita merkittäviä kuvantamiseen vaikuttavia asioita on, että Q-pinnanlaaduissa voi olla täysin hiottuja levyjä, joissa pinta on rosainen ja erittäin epätasaisesti heijastava. Lisäksi eräessä 1.4835 (253MA) teräslaadussa levyn väri voi olla erittäin tumman harmaa, jolloin leimauksen ja levyn värin harmaasävyarvoja voi olla vaikeaa erottaa toistaan. Normaalisti kaikki levyt ovat kuitenkin **värisävyiltään** vaaleanharmaita. Pinnanlaatueroja ovat havainnollistettu alla kuviossa 44.



Kuvio 44. Pinnanlaatueroja.

Pieniä eroja voi olla myös pinnanlaatuerojen normaaleissa harmaasävyissä ja hiontojen vahvuudessa.

Kohteen asentoon ja paikkaan liittyviä rajoitteita ei juurikaan ole. Kohde eli teräslevy on vastaanottovaunulla lähes aina samassa kulmassa ja samassa kohdassa. Tämän varmistaa se, että levyt törmäytetään aina vaunun sivuilla oleviin teräsakseleihin, joiden paikka on vakio. Levyjä tulee kuitenkin vastaanottovaunulla useita kappaleita yhtä aikaa, joten kohteen sijainti muuttuu aina korkeussuunnassa, kun yksi levy otetaan pinosta pois. Levyt ovat usein kuitenkin eri pituisia ja levyisiä. Kohteen asento ja paikka havainnollistettu kuviossa 45 alla.



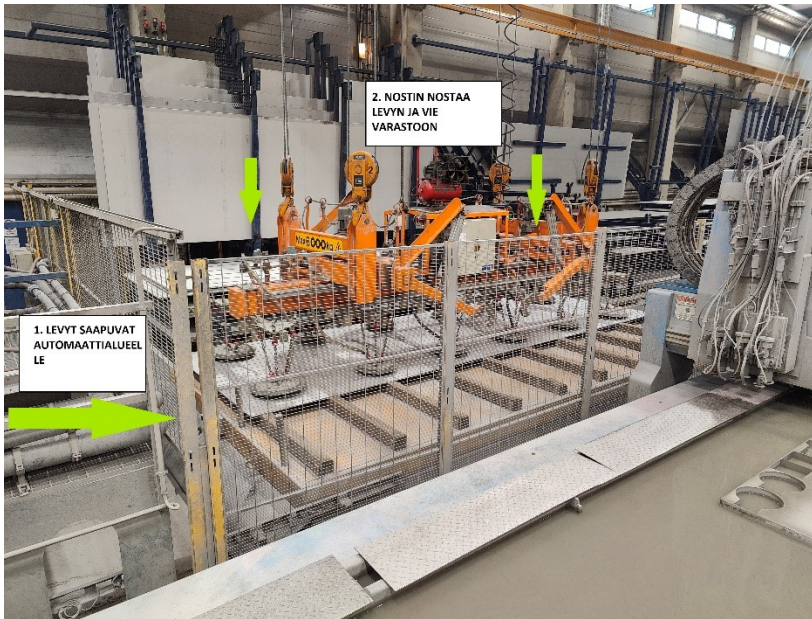
Kuvio 45. Levyjä vastaanottovaunulla. Teräsakselit törmäytykseen punaisilla nuolilla.

Tahti aika, eli se aika, kuinka usein nostin tulee hakemaan uuden levyn varastoitavaksi nipusta, on useimmiten useampi minuutti, riippuen siitä, mihin levy varastoidaan. Varastointipaikan määrittelyä automaattivarastoalueen logiikka.

6.2 Konenäköjärjestelmän vaatimukset sovelluskohteelle

Kuvattavat kohteet eli teräslevyt saapuvat vastaanottovaunulla automaattialueelle. Kun vastaanottovaunu on asemoitunut pääpisteeseen, tulee imukuppinostin hakemaan nipun päällimmäistä levyä varastoitavaksi, mikä on havainnollistettu alla olevassa kuviossa 46. Automaattivaraston logiikalla on tässä vaiheessa tiedot siitä, missä järjestyksessä levyt ovat ja mitkä ovat niiden paksuudet, mitat jne. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että nostin asemoituu aina keskipisteeseen ja korkeuteen levyjen mittojen sekä paksuuden mukaan. Nämä tiedot on annettu järjestelmälle jo aiemmin levyjen manuaalisessa vastaanottovaiheessa. Kyseinen vaihe sisältää muun muassa levyn äärimittojen mittaamisen, silmämääräisen tarkastamisen pintavirheiden varalta ja materiaalitietojen kirjaamisen vastaanottopöytäkirjaan. Pöytäkirjassa on myös ohjeistus siitä, kuinka levy kuuluu

vaunuun asettaa. Yhtenä ohjeena on muun muassa, että levyn tunnistetiedot ovat tarkastajaa päin eli levyn alareunassa.



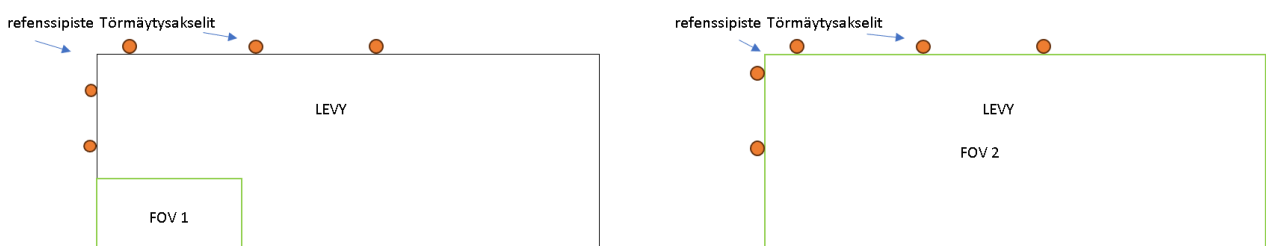
Kuvio 46. Levyn poiminta vastaanottovaunusta varastoon.

Itse konenäköjärjestelmältä vaaditaan samat toiminnot kuin manuaalisen tarkastuksen vaiheessa, jotta inhimillisten virheiden seuraukset voidaan välttää levyn jatkoprosessoinnissa. Vaikka tässä tutkimuksessa ei olekaan tarkoitus ratkaista koko konenäkösovellusta, on tarkoitus kuitenkin pohdita tutkimuksen onnistumista koko toimintakuvauksen kannalta. Tiivistettynä konenäköjärjestelmän vaatimukset ja alustava toimintakuvaus ovat seuraavat:

1. Kuvantaa levyn pinta koko pinta-alaltaan pintavirheiden varalta ja paikantaa näiden sijainnit levyllä
2. Mitata levyn äärimitat (X- ja Y-suunnassa) ja verrata mittoja käsin syötettyihin tietoihin (toleranssi esimerkiksi 10 mm molempiin suuntiin)
3. Lukea levyn pinnasta materiaalin tunnistetiedot, eli levynumero ja viivakoodi
4. Todennetut tiedot tulee olla luettavissa tai lähetettävissä ulkopuoliseen järjestelmään, eli tässä tapauksessa toimeksiantajan toiminnanohjausjärjestelmään, jossa tietoja verrataan käsin syötettyihin tietoihin.

Kun ihannetilanteessa ihmisten tekemää turhaa työtä ja liikettä tuotantoympäristöissä pitäisi välttää, niin sama koskee myös koneita ja laitteita. Tässä tutkimuksessa konenäkösovelluksen toteutusta lähdettiin toteuttamaan samalla periaatteella, eli minimoidaan turha liike ja työ. Siksi luonnollisin tapa olisi kiinnittää konenäkökamera automaattialueen imukuppinostimeen. Haasteita tässä kuitenkin aiheuttaisi rajallinen tila vastaanottovaunun alueella. Mikäli käytetään yhtä kameraa, joutuisi nostin siirtymään kahteen paikkaan, koska koko levyn pinta-alan kuvantaminen ja tehtaan leimojen sijainti ovat toisiinsa nähden erilaisissa paikoissa. Koko levyn pinta-alan kuvantaminen tapahtuu siis korkealla, joka asettaa kameralle, kennolle ja optiikalle erilaiset vaatimukset, kuin tehtaan leimoja luettaessa. Leimojen lukeminen taas joudutaan tekemään paljon lähempänä levyä, jotta merkit voidaan erottaa. Tämän takia järkevintä olisikin asettaa nostimeen kaksi erillistä kameraa, joista toinen kuvantaa levyn pinta-alan mittoineen, sekä pintavirheineen ja toinen taas materiaalitiedot.

Edellä mainituista voidaankin johtaa suoraan kuva-alan (FOV, Field Of View) vaatimukset, jotka ovat havainnollistettu alla kuviossa 47. Kuva-aloja olisikin siis kaksi, eli FOV1 levyn materiaalitietojen todentamiseen ja FOV2 levyn mittojen, sekä pintavirheiden todentamiseen. Ensin siis kuvannettisiin kuva-ala FOV2 ja sen jälkeen FOV1. Kuviossa on määritelty myös referenssipiste konenäkösovellukselle, jonka suhteen kaikki mitoitukset sovelluksen sisällä tehdään.



Kuvio 47. Kuva-alat konenäköjärjestelmälle.

Kummankin kuva-alan kameras ja optiikan teoreettiset vaatimukset selvitettiin kuva-aloilla olevan pienimmän havaittavan piirteen, horisontaalisen maksimipituuden ja kuvauskorkeuden mukaan. Pienimmän havaittavan piirteen varmuuskertoimena käytettiin tässä tapauksessa 2. Vaatimusten selvittämiseen käytettiin Edmund Opticsin verkkosivuilla olevaa laskuria. Kuva-alan 2 (FOV2) osalta laskuri antoi seuraavat tiedot, kuten alla kuviossa 48 on esitetty.

Camera

4/3"

Horizontal (mm): 17.3

Vertical (mm): 13

Diagonal (mm): 21.6

Pixel Size (µm):

Desired Image


Working Distance (mm):

Horizontal Field of View (mm):

Vertical Field of View (mm):

Diagonal Field of View (mm):

CALCULATE



$$F = \frac{\text{Horizontal Sensor Dimension}}{2 \tan\left(\frac{\text{AFOV}}{2}\right)}$$

$$\text{AFOV} = 2 \tan^{-1}\left(\frac{\text{FOV}}{2 \text{WD}}\right)$$

$$\text{PMAG} = \frac{\text{Horizontal Sensor Size}}{\text{FOV}}$$

$$\text{Resolution} = \frac{\text{Pixel Size}}{\text{PMAG}}$$

AFOV	Angular Field of View in degrees	WD	Working Distance in mm
FOV	Field of View	PMAG	Primary Magnification
F	Focal Length Required		

Focal Length Required (mm): 7.8	Diagonal Angular FOV(°): 119.7
Horizontal Angular FOV(°): 95.9	Object Space Resolution (µm)*: 1153.2
Vertical Angular FOV(°): 72.1	Primary Magnification: 0.003

Kuvio 48. FOV2 optisen järjestelmän vaatimukset.

Tässä tapauksessa käytettiin laskelmissa kameraa, jossa on 4/3 tuuman kenno ja yhden pikselin koko on 3 mikrometriä. Lisäksi haluttiin kuvauskorkeudeksi 3000 millimetriä, koska nosturin nostokorkeus rajoittuu noin 4000 millimetriin maksimilevynipun korkeudesta (noin 300 mm). Tärkein laskelmassa huomioitava tekijä on kuitenkin optiikan rajoittava resoluutio (engl. object space resolution), joka määrittää käytännössä pienimmän piirteen, jonka optiikalla voidaan erottaa. Tässä laskelmassa optiikan rajoittava resoluutio oli noin 1153 mikrometriä eli noin 1,15 mm. Tämä resoluutio siis riittää kuva-alassa pienimmän piirteen erottamiseen, joka on 2,5 mm varmuuskerroin 2 huomioiden. Tarvittava polttoväli optiikalle olisi 8 mm.

Kameran resoluution vaatimus laskettiin seuraavasti:

Kameran resoluution vaatimus = $2 \left(\frac{6650 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} \right) = 2660 \text{ pikseliä}$, missä 2 on varmuuskerroin, 6650 mm levynpituus X-suunnassa ja 5 mm pienin havaittava piirre. Tämän perusteella tarvittaisiin 12 megapikselin kamera, jossa on 4000 vaakasuuntaista ja 3000 pystysuuntaista pikseliä.

FOV1:n kuvannettava alue olisi vastaanottovaunun vasemmassa alanurkassa, missä tehtaan leimat ovat aina tarkemmin määritellyssä paikassa, koska levyt asetetaan vaunuun aina samoin päin. Tälle kuva-alalle olisi kuitenkin syytä määrittää hieman suurempi kuva-ala, jos leimausten paikat muuttuvat pituussuunnassa. Horisontaaliseksi, eli pituussuuntaiseksi kuva-alueeksi määriteltiin 1500 mm ja pystysuuntaiseksi taas 1100 mm. Kuvauskorkeudeksi määriteltiin 900 mm.

Pienin erotettava piirre FOV1:ssä onkin siis 0,5 mm, koska siellä on todennettava pienimmät numerot, eli levynumerot. Pienin erotettava piirre varmuuskertoimella 2 on siis 0,25 mm. Laskurilla saatiin alla olevan kuvion 49 mukaiset tulokset.

Camera

4/3"

Horizontal (mm): 17.3

Vertical (mm): 13

Diagonal (mm): 21.6

Pixel Size (µm): 3,2

Desired Image

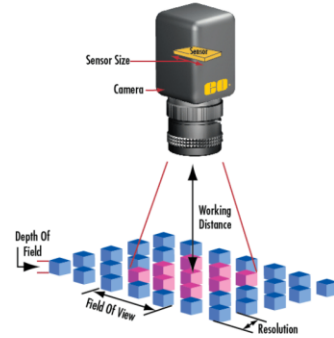
Working Distance (mm): 900

Horizontal Field of View (mm): 1500

Vertical Field of View (mm): 1127

Diagonal Field of View (mm): 1873

CALCULATE



$F = \frac{\text{Horizontal Sensor Dimension}}{2 \tan\left(\frac{\text{AFOV}}{2}\right)}$

$\text{AFOV} = 2 \tan^{-1}\left(\frac{\text{FOV}}{2 \text{WD}}\right)$

$\text{PMAG} = \frac{\text{Horizontal Sensor Size}}{\text{FOV}}$

$\text{Resolution} = \frac{\text{Pixel Size}}{\text{PMAG}}$

AFOV	Angular Field of View in degrees	WD	Working Distance in mm
FOV	Field of View	PMAG	Primary Magnification
F	Focal Length Required		

Focal Length Required (mm): 10.4	Diagonal Angular FOV(°): 99.4
Horizontal Angular FOV(°): 79.6	Object Space Resolution (µm)*: 260.1
Vertical Angular FOV(°): 59.8	Primary Magnification: 0.012

Kuvio 49. FOV1 optisen järjestelmän vaatimukset

FOV1 laskentaan käytettiin myös 4/3 tuuman kennon omaavaa kameraa, jossa yhden kennon pikselin koko on 3,2 mikrometriä. Kuvauskorkeus määriteltiin siis 900 mm korkeuteen, jotta vältetään optiikan vääristymiä ja kuva-ala pysyy suhteellisen laajana. Optiikan rajoittavaksi resoluutioksi saatiin 0,26 mm. Merkille pantavaa tässä tapauksessa on, että rajoittava resoluutio onkin rajatapaus.

Vaadittava kameran resoluutio laskettiin seuraavasti:

$2 \left(\frac{1150 \text{ mm}}{0,5 \text{ mm}} \right) = 6000 \text{ pikseliä}$, missä 2 on varmuuskerroin, 1150 mm kuva-ala pituussuunnassa ja 0,5 mm pienin havaittava piirre. Teoreettisesti kameralta ja sen kennolta vaaditaan siis vähintään 32 megapikselin resoluutiota, jossa vaakasuuntaiset pikselit ovat esimerkiksi 6500 pikseliä ja pystysuuntaiset 4900 pikseliä. Optiikan polttoväliksi määräytyisi 10 mm.

Tässä luvussa tarkasteltiin, mitä konenäköjärjestelmän kameralta ja optiikalta vaaditaan teoriassa sovelluskohteen näkökulmasta. Luvussa ei otettu vielä kantaa esimerkiksi valaistukseen ja sen vaikutuksiin kuvantamisen lopputulokseen. Luvussa 6.1 käytiin taas läpi sovelluskohteen lähtötietoja. Näiden kahden luvun tietojen perusteella lähdettiin tekemään laboratoriotestejä ja sen jälkeen kenttätestejä. Seuraavassa luvussa käydään läpi laboratoriotestien tuloksia.

6.3 Laboratoriotestit

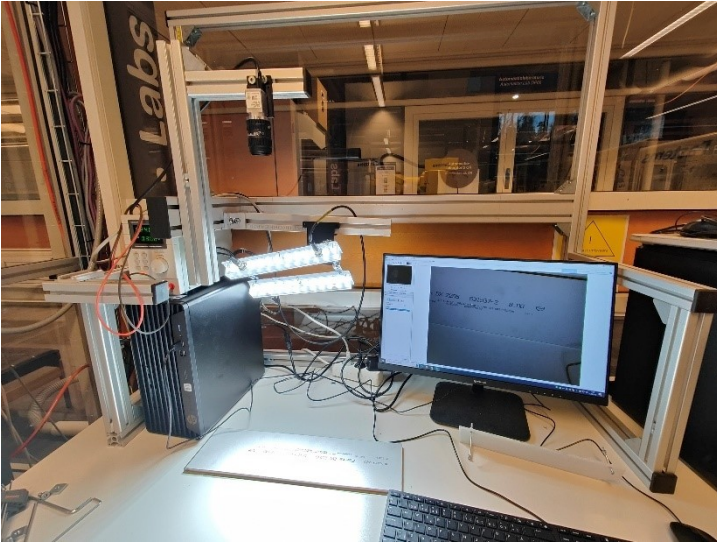
Laboratoriotestit aloitettiin lokakuussa 2023 Jyväskylän ammattikorkeakoulun laboratoriossa. Testit aloitettiin selvittämällä, minkälaisia kameroita, optiikoita ja konenäköohjelmistoja tiloissa oli saatavilla. Testeihin tarvittiin myös **koepaloja**, jotka valmistettiin toimeksiantajan levymateriaalista. Koepaloja pyrittiin tekemään mahdollisimman monenlaisia sovelluskohteen lähtötietojen perusteella.

6.3.1 Laboratoriotestien valmistelu

Ennen kuin itse koekuvantamiset aloitettiin, piti valita **konenäköohjelmisto**, jolla kuvantamiset, kuvankäsittely ja kuvien tulkinta suoritettaisiin. Ohjelmistoksi valittiin National Instrumentsin Vision Assistant -ohjelmisto. Valinta perustui sen helppokäyttöiseen ja visuaaliseen käyttöliittymään. Kuvan prosessointitavaksi valittiin siis **tietokonepohjainen järjestelmä**, eli kuvan prosessointi tehtiin tietokoneella ja konenäköohjelmistolla. Lisäksi varmistettiin, että ohjelmistossa oli tarvittavat toiminnallisuudet testien suorittamiseen. Vision Assistantin puolelta voidaan myös generoida eli kääntää tehty ohjelma LabVIEW (engl. Laboratory Virtual Engineering Workbench) -ohjelmistoon, jossa voidaan tehdä mittaus- ja testaussovelluksia, ja se soveltuu myös yleisohjelmointikieleksi (LabVIEW 2022).

Kameraksi testeihin valittiin ensin konenäkölaitteiden toimittaja Baslerin 8-bittinen 12 megapikselin värikamera, mutta tämä hylättiin, koska kuvassa havaittiin pientä kohinaa ja epätarkkuutta, mikä voi olla värikameroille tyypillistä. Lopulta päädyttiin valitsemaan Baslerin 5 megapikselin harmaasävykamera, jossa kennon pikselin koko oli 4,8 x 4,8 mikrometriä. Etuina on muun muassa se, että kameralla tuotettu kuva on jo valmiiksi harmaasävyinen, joten tätä ei tarvitse muuttaa ohjelmallisesti harmaasävyiseksi. Kameraan valittiin Baslerin 12 mm polttovälin objektiivi (1:1.8, 25,5 mm halkaisija), jotta saatiin hieman leveämpi kuva-ala ja testipalat mahtuivat kuvaan. Kameraan koitettiin myös 24 mm objektiivia, mutta tässä oli liian kapea kuva-ala, jolloin kameran ja kohteen välistä etäisyyttä olisi laboratorio-olosuhteisiin jouduttu nostamaan liikaa. Kameran etäisyys kohteesta asetettiin niin, että testipalat näkyivät kuvassa lähes kokonaan, eli 890 mm. Kuva-alan leveys ja korkeus olivat noin 400 mm leveyssuunnassa ja pystysuunnassa 300 mm. Kameran rajoittavaksi resoluutioksi laskettiin näillä tiedoilla 1600 pikseliä, joten 5 megapikselin tarkkuus (3000 x 2000 pikseliä) 2 varmuuskertoimella riitti tähän hyvin. Optiikan rajoittavaksi resoluutioksi saatiin 0,16 mm, joten tämäkin oli hyväksyttävä.

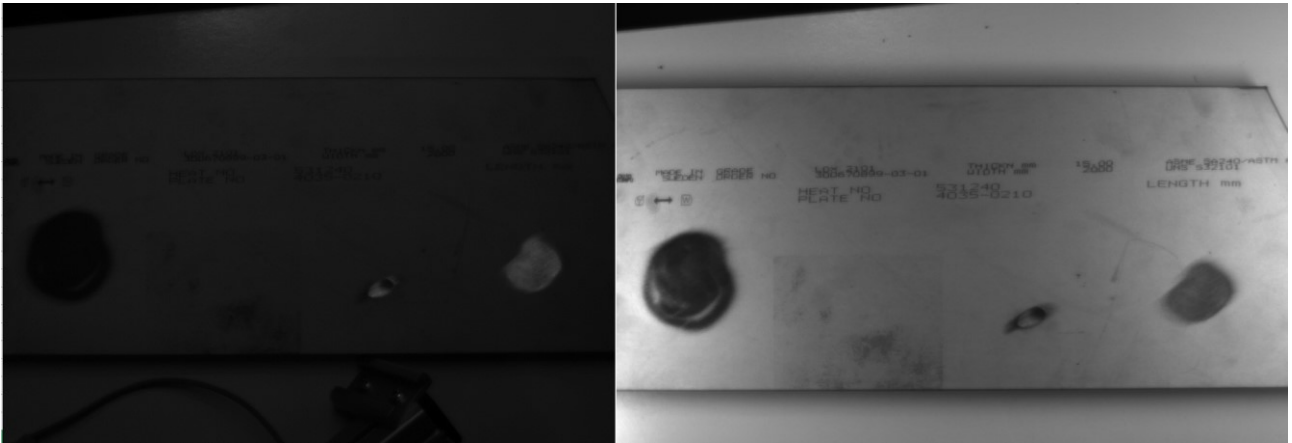
Valaistuksena käytettiin tiloista löytyviä vaalean valon LED-valopaneeleja, joissa oli hyvä valon intensiteetti. Vaalea LED-valo sopii myös testeihin oletettavasti parhaiten, koska kohteiden värit ovat vaalean- ja tummanharmaita eli harmaasävyjä tai yksivärisiä. Lisäksi kohteiden pinnat ovat tasaisia. Valinta perustui luvussa 4.2 opittuihin valaistustyyppien sovelluskohteisiin ja valonlähteen värin valintaan väripyörää avuksi käyttäen. Testien aikana kuitenkin havaittiin, että LED-paneelien valon intensiteetti kohdistui liikaa pienelle alueelle, aiheuttaen kohteen ylivalottumista, joten valoa olisi hajautettava eli diffusoitava. Laboratoriosta löytyikin tähän tarkoitukseen tarvittavaa muovista levyä, joka diffusoi valon laajemmin ja tasaisemmin. Alla kuviossa 50 on esimerkki, jossa diffuusoreita ei ole käytössä.



Kuvio 50. Valaistus ilman diffuusoria.

Kuvausgeometria valittiin niin, että kamera on kohtisuoraan kuvattavan kappaleen yläpuolella, koska tämä aiheuttaa vähiten perspektiivi- ja linsisivirheitä ja näin ollen helpottaa kalibrointiprosessia myöhemmin, sekä millimetri-pikselisuhde on suurin piirtein sama koko kuva-alkan. Kuvausgeometrian valaistusta testattiin sekä kirkaskentän, että pimeäkenttävalaistuksen alueilla ja näiden yhdistelmillä.

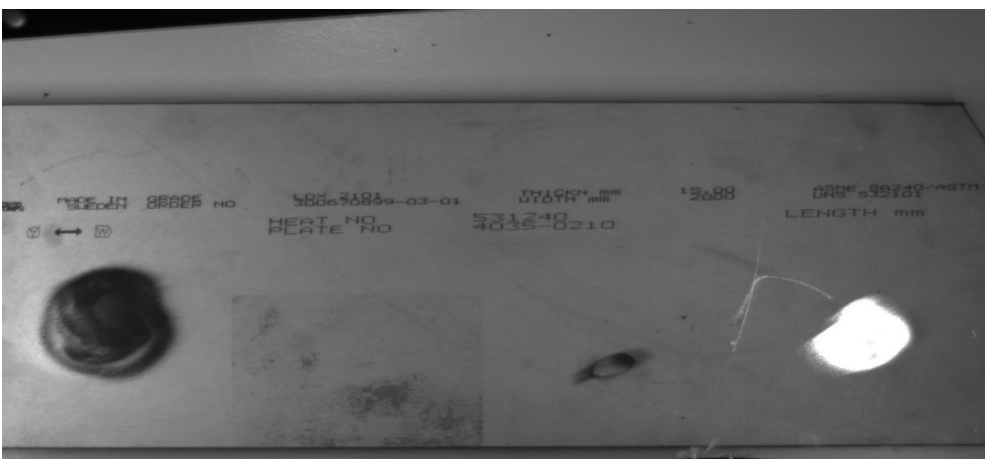
Niin kuin jo aiemmin tässä opinnäytetyössä on todettu, niin valaistuksella on siis suuri merkitys kuvantamisen onnistumiseen. Valaistuksen onnistumista testeissä mitattiin harmaasävyeroilla, eli kontrastilla kohteen taustan ja merkkien välillä. Harmaasävyarvot ovat ohjelmassa välillä 0–250, joissa on 0 tarkoittaa täysin tummaa ja 250 täysin kirkasta. Kun diffuusorit oli asennettu LED-valoihin, otettiin kuva yhdestä testikappaleesta ilman valoa ja pimeäkenttävalaistuksen kanssa. Valaistuksessa käytettiin yhtä valopaneelia kohteen molemmilla sivuilla. Valotusaika molemmissa kuvissa oli 2500 mikrosekuntia. Objektiivin aukko oli säädetty täysin auki ja polttopiste säädetty tarpeeksi kuvan saamiseksi. Alempana kuviossa 51 esimerkki tästä.



Kuvio 51. Testipaloja. Vasemmalla ilman valaistusta ja oikealla pimeäkenttävalaistuksen kanssa.

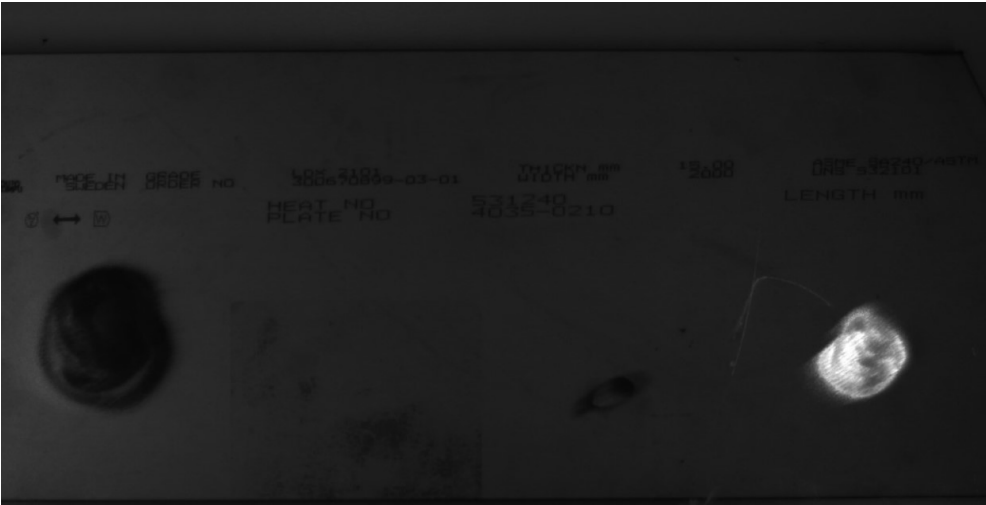
Kuviossa näkyy siis Q-pinnanlaatuinen testipala kuvattuna ilman valoa ja pimeäkenttävalaistuksessa. Vasemmalla kuvassa näkyy, kuinka ympäristön valaistus aiheuttaa hiontajälkiin heijastusta. Oikealla tämä ilmiö on saatu poistettua pimeäkenttävalaistuksella, eli valojen ollessa alle 45 asteen kulmassa kameraan nähden. Tässä kontrasti on myös hyvä. Huomionarvoista on, että valaistus ei kuitenkaan ole täysin tasainen koko kuvausalueella, vaan reunat ovat kirkkaampia kuin keskiosa.

Seuraavaksi kokeiltiin lisätä samaan kohteeseen kolmas valo kirkaskenttävalaistuksella. Tässä kirkaskenttävalaistus aiheuttaa hiontajälkeen voimakkaan heijastuksen. Tätä on havainnollistettu kuviossa 52 alla.



Kuvio 52. Pimeä- ja kirkaskentän yhdistelmä.

Heijastusta pyrittiin poistamaan käyttämällä objektiiviin kiinnitettävää **polarisaatio-suodatinta**. Suodattimen toimintaa havainnollistettu alla kuviossa 53.



Kuvio 53. Pimeä- ja kirkaskentän yhdistelmä polarisaatio-suodattimen kanssa.

Suodatin tummentaa kuvaa erittäin paljon ja tämän ilmiön korjaus vaatisi siis lisää valotusaikaa. Suodatin ei myöskään poista heijastumista täysin, joten sen käyttö tässä sovelluskohteessa ei ole siis perusteltua.

Seuraavaksi kokeiltiin asettaa valaistusta ylemmäksi kirkaskenttävalaistuksen alueelle. Valot sijaitsivat siis hieman korkeammalla kohteen ja kameran puoliväliä. Tässä tapauksessa poistettiin myös ympäristön hajavalot eristämällä kohde pahviarkkien avulla. Tämä havainnollistettu alla kuviossa 54.



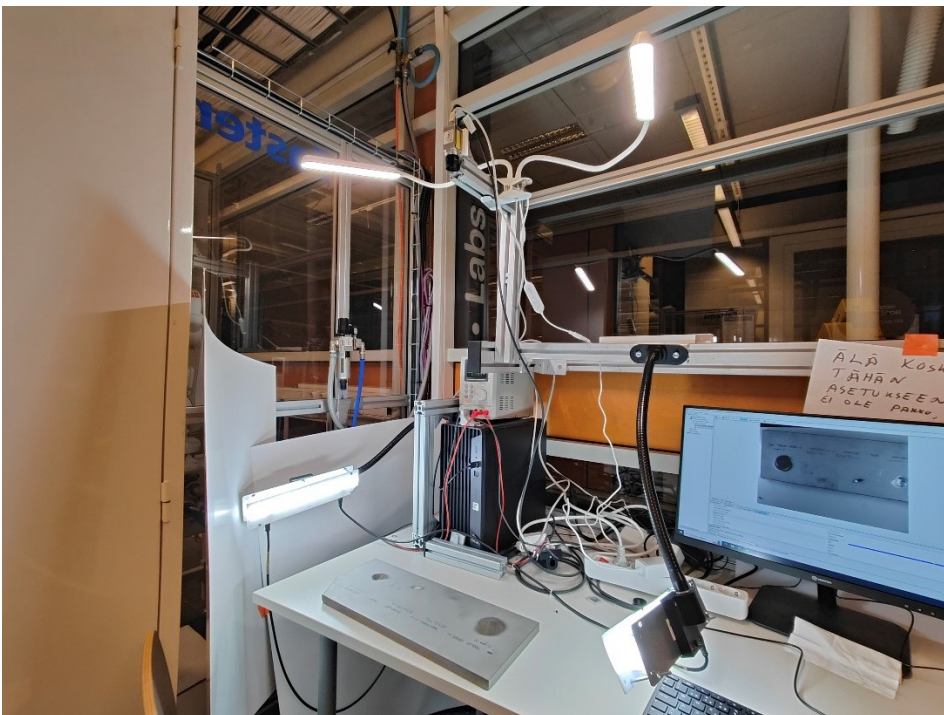
Kuvio 54. Kohde eristetty ympäristön hajavalolta.

Objektiivin aukkoa säädettiin tässä tapauksessa hieman pienemmälle ja valotusaikaa lisättiin ohjelmallisesti 18 000 mikrosekuntiin. Alla kuviossa 55 havainnollistetaan näiden asetusten lopputulos. Vision Assistant -ohjelmistosta tarkastettiin kuvasta harmaasävyarvot, jotka olivat merkkien osalta noin 40–50 ja taustan osalta noin 100–130, mittauskohdasta riippuen. Harmaasävyero merkkien ja taustan välillä oli siis noin 60. Näin ollen voitiin todeta, että kontrasti oli tässä vaiheessa vähintäänkin tyydyttävä.



Kuvio 55. Testipala kirkaskenttävalaistuksessa.

Seuraavaksi yhdistettiin kirkaskenttä- ja pimeäkenttävalaistus. Tätä varten käytettiin yhteensä neljää LED-paneelia, joista kaksi oli kasvivaloja, joissa on hyvä valon diffusointi ja säädettävä valon voimakkuus. Alla kuviossa 56 havainnollistetaan tätä yhdistelmää.



Kuvio 56. Kirkas- ja pimeäkentän yhdistelmä.

Tämä yhdistelmä ei muuttanut merkittävästi kontrastia kohteessa, mutta esimerkiksi levyn reunat olivat helpommin havaittavissa. Lisäksi hiontajäljistä voitiin havaita epäsymmetristä heijastusta. Alla kuviossa 57 havainnollistettu tämä ilmiö.



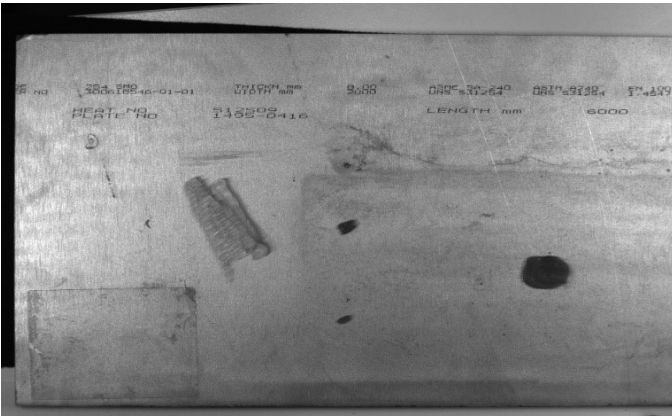
Kuvio 57. Kirkas- ja pimeäkentän vaikutus kohteessa.

Viimeisenä valaistuksen yhdistelmänä asetettiin kasvivalot kameran korkeudelle ja suunnattiin valokeila suoraan kohti kohdetta. Kaksi muuta LED-paneelia asetettiin noin puoliväliin kohdetta ja kameraa. Nämä valot käännettiin hieman sivulle kohteesta, jolloin saatiin tasaisempi valo. Valaistusmenetelmä oli tässä tapauksessa siis täysi kirkaskenttä. Havaittiin myös, että kokonaisvalo oli huomattavasti tasaisempi itse kohteessa. Merkittävää oli myös, että harmaasävyerot paranivat. Harmaasävyarvot merkeillä olivat 60 ja kohteen taustalla 150, joten ero oli noin 90. Hiontajäljet näkyivät kuitenkin edelleen epätasaisina. Alla kuviossa 58 on havainnollistettu kirkaskentän vaikutus.



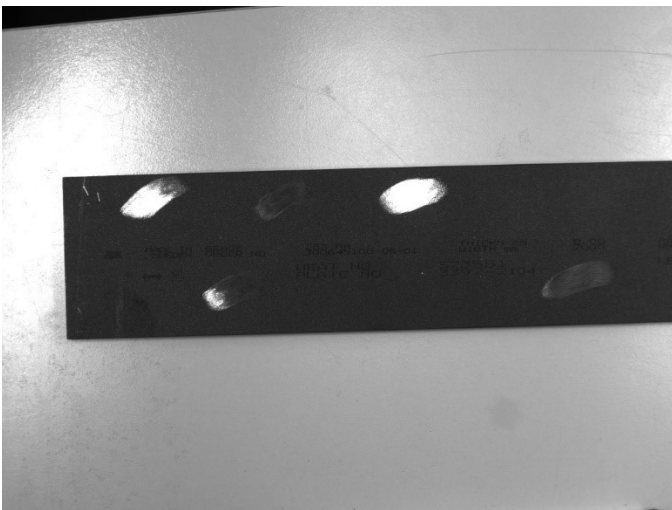
Kuvio 58. Täysi kirkaskenttä kohteessa.

Kirkaskentän vaikutus näkyi positiivisesti harmaasävyarvoissa, erityisesti hiotun Q-pinnan laadussa. Myös hiontajälkien erottuvuus vaihteli merkittävästi. Kun kasvivalot asetettiin keskivoimakkuudelle, hiotun levyn harmaasävyerot merkkien ja taustan välillä olivat 100. Kun kasvivalot säädettiin voimakkaimmalle asetukselle, erot olivat 120. Parhaaksi asetukseksi kasvivalojen voimakkuudelle kuitenkin osoittautui keskivoimakkuus, koska näin hiotun levyn heijastukset olivat parhaiten hallittavissa ja harmaasävyerot olivat riittävät. Alla kuviossa 59 on hiottu Q-pinnanlaadun testipala näillä asetuksilla.



Kuvio 59. Hiottu Q-pinnanlaatu.

Suurimman haasteen aiheutti 253MA-pinnanlaatu, jossa kohteen tausta oli erittäin tumma. Harmaasävyerot olivat merkkien ja taustan välillä ainoastaan noin 15 näillä asetuksilla. Hiontajälkiäkään ei erotettu muuten kuin, jos valokeila osuu sopivassa kulmassa hiontajälkeen. Tämä ilmiö havainnollistettu kuviossa 60 alla.



Kuvio 60. 253MA-pinnanlaatu kirkaskenttävalaistuksessa.

Tapa millä merkit voitiin paremmin erottaa taustasta, oli tuoda voimakas pimeäkenttävalaistus aivan kohteen viereen. Tällöin saatiin harmaasävyeroiksi noin 30–40. Tämä havainnollistettu kuviossa 61 alla.



Kuvio 61. 253MA-pinnanlaatu voimakkaassa pimeäkenttävalaistuksessa.

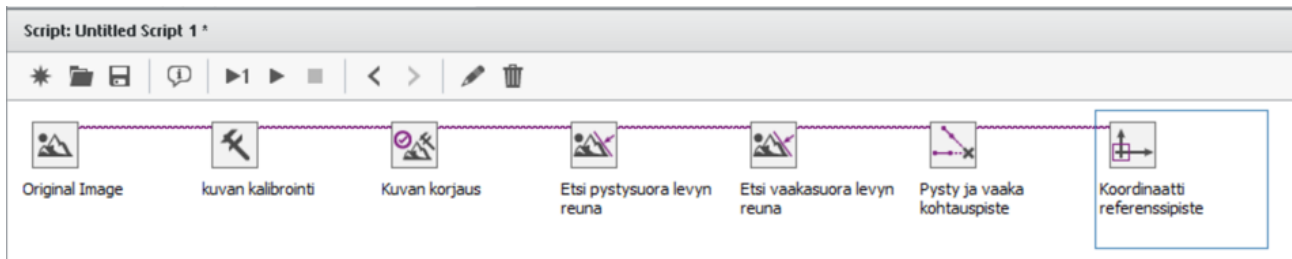
Kuvankäsittelyä ja konenäköohjelman kehittämistä aloitettiin kuitenkin käyttämällä kirkaskenttävalaistusta, jossa kontrasti todettiin parhaaksi. Lisäksi kyseinen valaistus vastaisi enemmän todellisia valaistusolosuhteita myös kenttätesteissä. Harmaasävyerot olivat keskimäärin noin 80 suurimmalla osalla testikappaleista, mukaan lukien 1D/PPP-pinnanlaadut, mutta pois lukien 253MA-pinnanlaadut. Testikuvia otettiin aluksi jokaisesta testikappaleesta 10 kappaletta hieman eri kulmiin kääntyneinä. Lisäksi otettiin päällekkäisiä ja vierekkäisiä kuvia reunantunnistusta ja viivakoodin vertailua varten. Yhdestä testikappaleesta otettiin myös mittakuva, jotta voitaisiin todentaa kalibroinnin onnistuminen.

Kuvauspöydän heijastukset poistettiin asettamalla tumma mattapintainen alusta testipalojen alle kuvantamisen ajaksi. Tämä mahdollisti kuvien segmentoinnin ja levyn reunojen erottamisen helpommin. Kameran etäisyys ja objektiivin asetukset pidettiin samana koko kuvantamisen ajan, samoin kuin valaistus ja ympäristön aiheuttama valoeristys.

6.3.2 Testikuvien kuvankäsittely ja ohjelman luominen

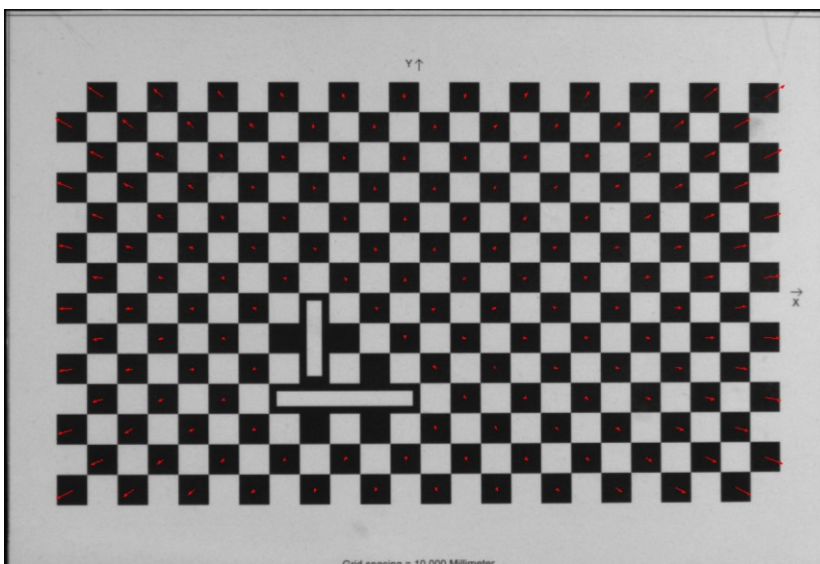
Kun valmistelut oli tehty, suoritettiin koekappaleista otettujen kuvien kuvankäsittely ja ohjelman luominen Vision Assistant -konenäköohjelmistolla. Ohjelmistolla luodaan kuvista **skripti**, joka on käytännössä tietokoneohjelma. Jokainen ohjelmistolla tehty kuvankäsittelytoiminto on osa tätä

skriptiä. Ohjelma toimii siinä järjestyksessä, kun se on skriptiin kirjoitettu, eli vasemmalta oikealle. Esimerkki skriptistä on kuvattu alla olevassa kuviossa 62.



Kuvio 62. Esimerkki skriptistä Vision Assistant -ohjelmistossa.

Kuten aiemmin tässä opinnäytetyössä on todettu, ohjelman tekeminen on aloitettava **kuvan kalibroinnilla**, jotta optiikan aiheuttamat vääristymät voidaan eliminoida ja ohjelmassa voidaan käyttää esimerkiksi reaali maailman mittoja, kuten millimetrejä. Laboratoriotesteissä kuvan kalibrointiin käytettiin A4-paperille tulostettua mustavalkoista ruudukkoa, jossa mustavalkoisten ruudukkojen välinen etäisyys oli 10 mm. Laboratoriotestien kalibrointi onnistui hyvin, ja kalibroinnin lopputulos tarkastettiin valmiiksi mitatulla koepalalla. Alla olevassa kuviossa 63 on havainnollistettu Vision Assistantin kalibrointitoimintoa. Punaiset nuolet kuvassa osoittavat kuvankorjauksen suunnan.



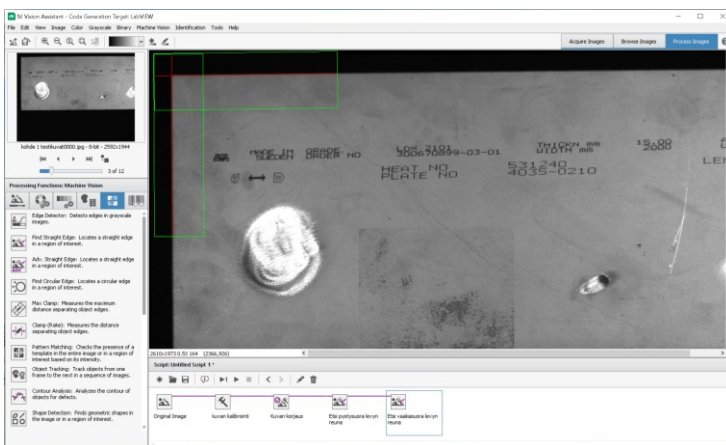
Kuvio 63. Kuvan kalibrointia Vision Assistant -ohjelmassa.

Kun kuvan kalibrointi oli suoritettu, seuraava vaihe oli kuvan korjaaminen. **Kuvan korjaus** toteutetaan ”image correction” -toiminnolla. Laboratoriotesteissä kuvan vääristymä ei ollut merkittävä, mikä johtui kuva-alan leveyden ja korkeuden suhteesta. Alla olevassa kuviossa 64 on havainnollistettu kuvan vääristymää. Vasemmalla puolella on korjaamaton kuva ja oikealla puolella on korjattu kuva. Vääristymän korjaus on havainnollistettu punaisella viivalla testipalojen yläreunassa.



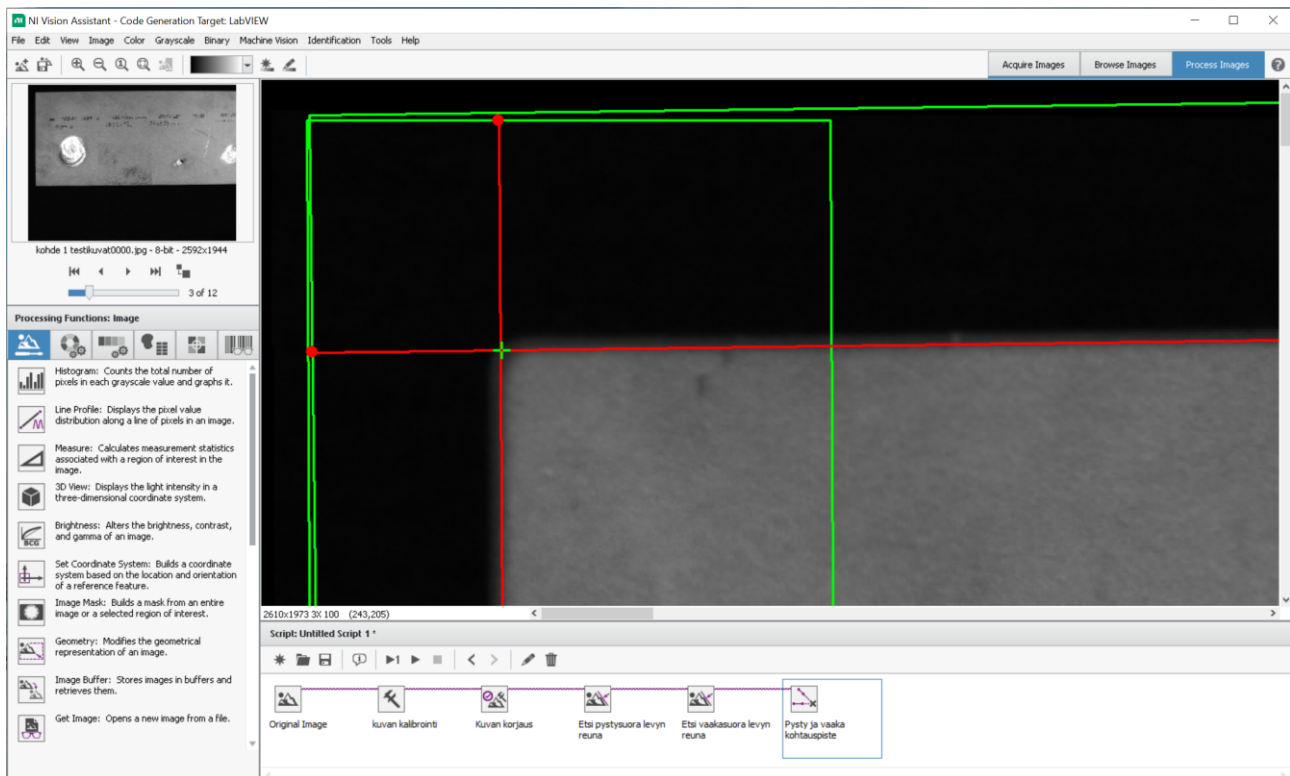
Kuvio 64. Kuvan korjaus.

Jotta testipaloista voitaisiin mitata esimerkiksi hiontajälkien sijainti levyllä, oli tarpeen luoda referenssipiste koordinaatistoon. Referenssipiste haluttiin tässä tapauksessa sijoittaa levyn vasempaan yläkulmaan, koska tämä piste olisi loogisin myös lopullisessa konenäkösovelluksessa. Tämä piste on määritelty aiemmin kuviossa 47. Jotta tämä piste voitaisiin määrittää, ensimmäinen askel oli löytää levyn vaaka- ja pystysuuntaiset reunat. Levyn reunojen etsintään käytettiin ”find straight edge” -toimintoa, joka on suunniteltu tähän tarkoitukseen. Alla olevassa kuviossa 65 on havainnollistettu tämä toiminto ja kuinka levyn reunat löydettiin.



Kuvio 65. Levyn vaaka- ja pystysuuntaisten reunojen etsintää.

Seuraavaksi oli tarpeen määrittää näiden kahden viivan leikkauspiste, joka vastaa levyn vasenta yläkulmaa eli haluttua referenssipistettä. Näiden viivojen leikkauspiste voidaan liittää toisiinsa "caliber" -toiminnolla. Tällä toiminnolla voidaan määrittää, mitä viivoja ja leikkauspisteitä halutaan liittää toisiinsa. Alla olevassa kuviossa 66 on esitetty levyn reunojen viivoista saatu leikkauspiste.

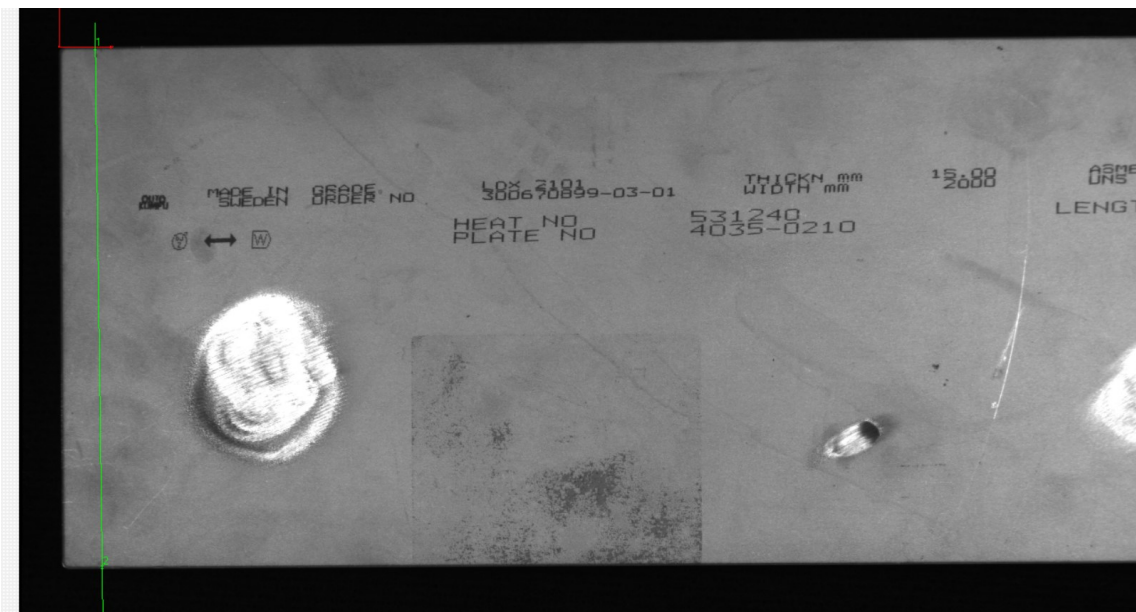


Kuvio 66. "Caliber" -toiminnolla määritelty levyn reunojen leikkauspiste.

Kun näiden reunojen leikkauspiste oli määritelty, voitiin siihen pisteeseen liittää kuvan **koordinaatisto** "set coordinate system" -toiminnolla. Koordinaatisto toimii siis vertailukohtana kuvassa tehtäville mitoituksille. Koordinaatiston akselit kääntyvät aina kuvattavan kappaleen mukaisesti, joten ne ovat oikein suhteessa kohteen asentoon, vaikka kohde olisi kuvattu eri kulmissa. Alla olevassa kuviossa 67 on havainnollistettu sidottu koordinaatisto testipalassa.

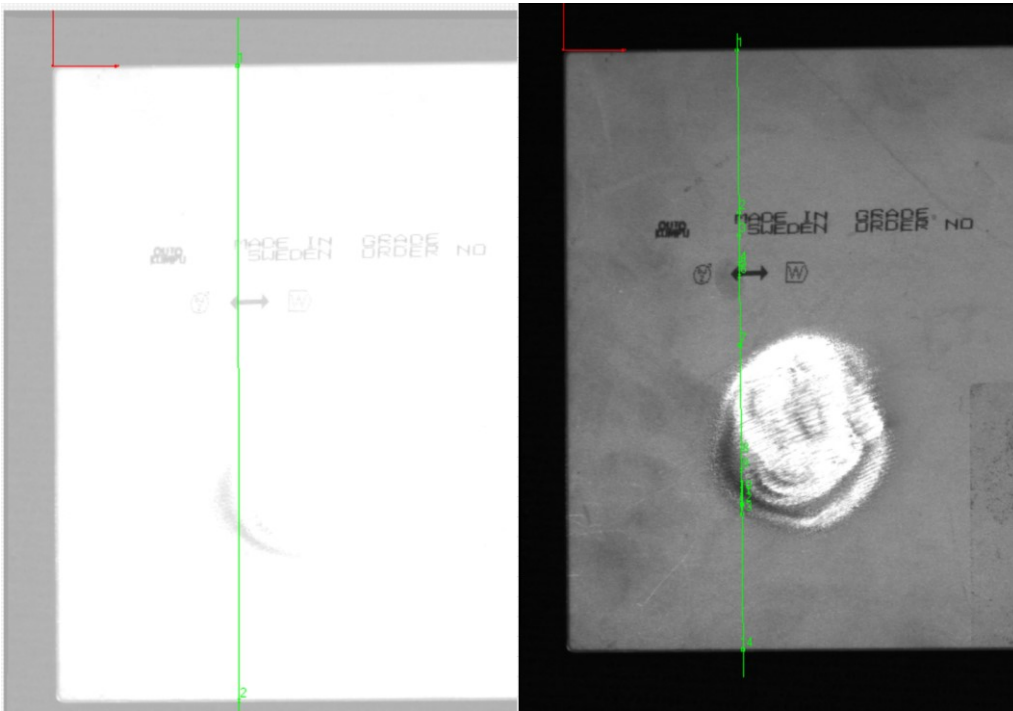
Kuvio 67. Sidottu koordinaatisto.

Tässä vaiheessa voitiin määrittää ensimmäiset mittaustoiminnot. Tämän opinnäytetyön kannalta oli olennaista pystyä mittaamaan koko levyn vaaka- ja pystysuuntien mitat (X- ja Y-suunta). **Levyn mittaukseen** käytettiin yksinkertaista toimintoa, joka on saatavilla Vision Assistantissa, nimittäin "edge detector" -toiminto. Tällä toiminnolla havaitaan objektin tai hahmon reunat. Reunoja voi havaita useita, ja halutut reunat määritellään ohjelman sisällä. Laboratoriotesteissä reunoiksi määriteltiin levyn ensimmäinen ja viimeinen reuna, joiden avulla voitiin mitata levyn vaaka- ja pystysuuntaiset mitat. Toiminnossa mittaus perustuu kappaleen harmaasävyeroihin. Alla olevassa kuviossa 68 on havainnollistettu "edge detector" -toimintoa testipalassa.



Kuvio 68. Testipalan mittaus pystysuunnassa 1- ja 2 pisteen välillä.

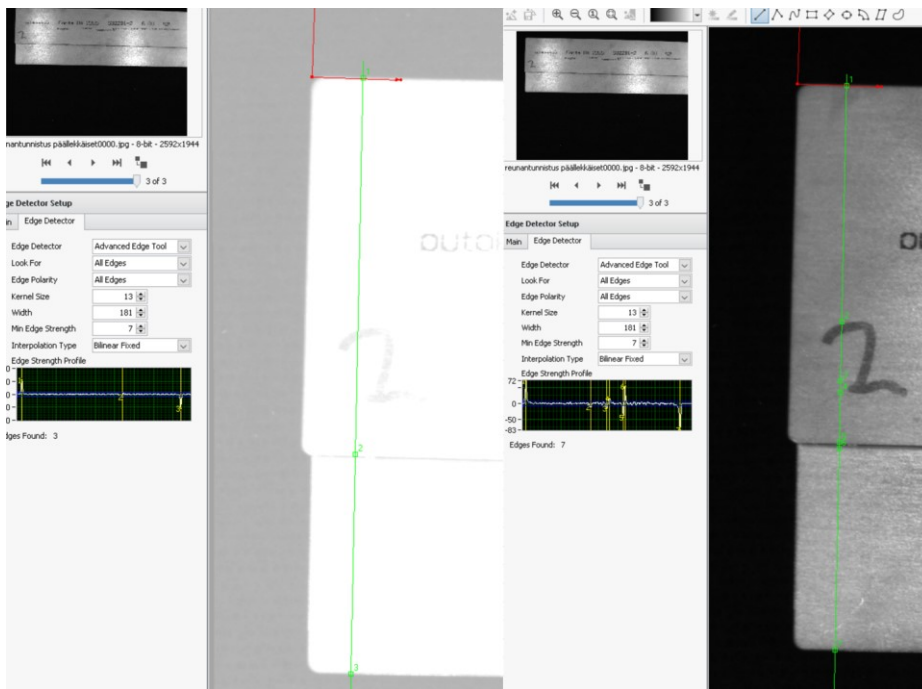
Kuviossa näkyy, kuinka levyn reunat erottuvat taustasta hyvin ja mittaus onnistuu vaivattomasti. Haastavana kuitenkin koettiin tilanne, jossa palan sisäpuolella olevat tehtaan leimaukset tai muut pintavirheet osuivat mittausviivan kohdalle. Tässä tapauksessa ohjelma saattoi tunnistaa leimaukset ja pintavirheet reunoina, mikä olisi voinut tehdä mittauksesta epäluotettavan. Näissä tilanteissa tarvittiin jonkinlaista kuvankäsittelyä, kuten kirkkauden ja kontrastin säätöä. Alla olevassa kuviossa 69 on tehty tätä säätöä, jotta levyn leimaukset tai pintavirheet eivät aiheuttaisi mittauksen epäluotettavuutta. Kuvasta voidaan nähdä, että leimauksia ja muita pintavirheitä ei tunnisteta levyn sisällä, kun kuvan kirkkautta ja kontrastia säädetään oikein. Vasemmalla puolella kuvassa on säädetty kuvan kirkkautta ja kontrastia.



Kuvio 69. Kuvan kirkkauden ja kontrastin säätöä mittausluotettavuuden parantamiseen.

Testeissä kokeiltiin myös, kuinka päällekkäisten palojen mittaus onnistui. Tarkoituksena oli siis selvittää päällimmäisen palan mitat. Tässä tapauksessa korostui erityisesti valaistuksen merkitys. Päällekkäisten levyjen erottuminen toisistaan havaittiin riippuvan siitä, mistä suunnasta valo tuli. Valo tuli tässä tapauksessa kirkaskentän mukaisesti lähes suoraan ylhäältä, mutta kuitenkin sen verran sivuilta, että päällimmäisen testipalan reunaan syntyi pientä varjostusta, jolloin tunnistettava reuna muodostui ja oli havaittavissa.

Kirkkauden ja kontrastin säätöä tarvittiin myös tässä testissä. Tämän säädön vaikutuksesta havaittavan reunan kontrasti vaihteli suuresti mittausalueella. Tämä johti siihen, että reuna ei aina tunnistettu ja kynnystysarvoja oli haastavaa saada optimaaliseksi. Mikäli reuna kuitenkin tunnistettiin, niin samalla ohjelma tunnisti myös palan sisällä olevia epäkohtia, kuten leimaukset. Alla olevassa kuviossa 70 on havainnollistettu onnistunut mittaus päällimmäisestä palasta pystysuunnassa. Säädetyssä kuvassa vasemmalla mittaus toiminto tunnistaa hyvin ensimmäisen ja toisen pisteen, eikä huomioi tällä mittausvälillä olevaa tussimerkintää. Oikeanpuoleisessa kuvassa ei kuvaa ole käsitelty, ja näin ollen mittaus toiminto tunnistaa myös palan sisällä olevat tussimerkinnät.



Kuvio 70. Päällekkäisten palojen mittaustoimintoa.

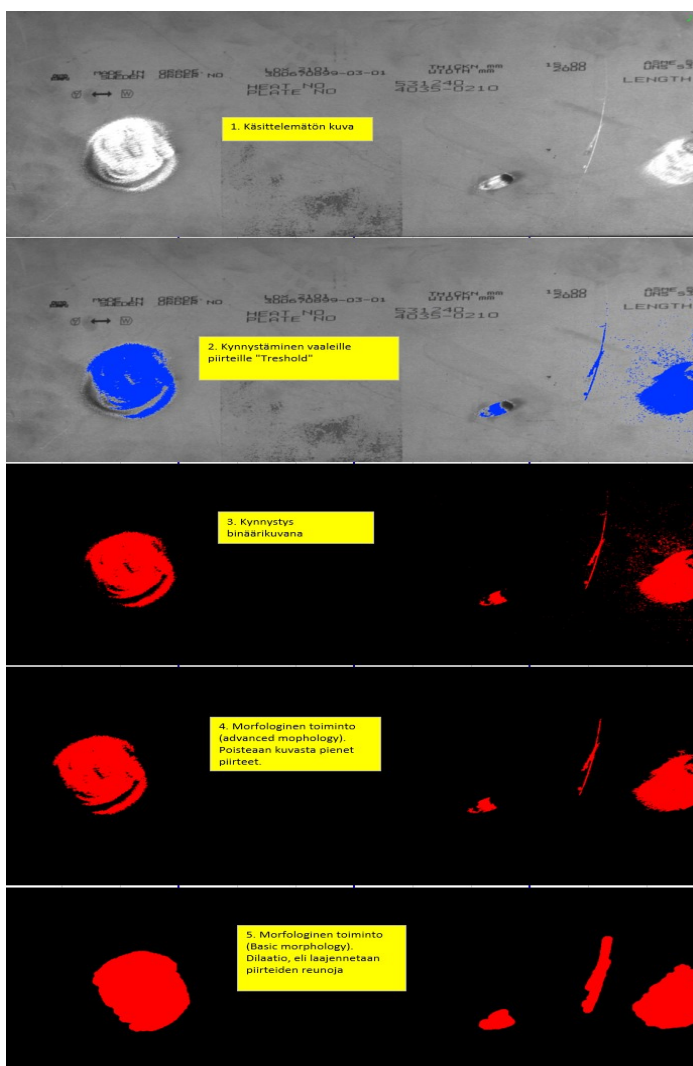
Mittaustoiminnon onnistumista voitiin helpottaa siirtämällä mittausviivaa aivan palan reunaa pitkkin, jotta voitiin välttää esimerkiksi leimauksien osuminen mittausalueelle. Todellisuudessa levyn reunassa mittaaminen olisi paras vaihtoehto, koska leimaukset eivät tehtaalla levyissä ikinä ole täysin reunassa. Tämä ei kuitenkaan poistaisi sitä ongelmaa, mikäli palan reunassa olisi hiontajälkiä tai muita epäpuhtauksia.

Palan mittauksissa vaaka- ja pystysuunnassa havaittiin myös muita haasteita, mikäli päällimmäinen, keskimäinen tai alimmainen pala oli 253MA-pinnanlaatuinen, koska tässä harmaasävyerot olivat huomattavasti erilaiset verrattuna CPP/1D- ja Q-pinnanlaatuisiin. Tämä vaikeuttaa mittaustoiminnon parametrien eli kynnystysarvojen säätöä.

Olenaisinta testeissä oli myös selvittää, kuinka hiontajälkien koko ja sijainti palalla voitaisiin määrittää. Näiden määreiden selvittämiseen tarvittiin kuvan **segmentointia**, eli kynnystämistä. Näillä toiminnoilla erotettaisiin siis kiinnostavat kohteet tai piirteet taustasta. Kynnystämistekniikkana käytettiin kuvan **binärisointia**, eli kuvan pikseliarvot muutettiin arvoiksi 0 tai 1. Käytännössä se tarkoittaa sitä, että kuvassa olevat pikselit jaetaan kahteen luokkaan, joita olivat tässä tapauksessa

tummat ja vaaleat alueet kuva-alueella. Tummat ja vaaleat piirteet olivat siis hiontajälkiä. Valais-
tuksesta johtuen hiontajäljet näkyvät kuvassa tummina tai vaaleina. Tämän jälkeen piirteitä vahvis-
tettiin **morfologisilla** toiminnoilla, joilla voidaan manipuloida piirteiden muotoa ja rakennetta, ku-
ten pienentämällä alueita kuvassa tai laajentamalla niitä. Lopuksi erotetuista piirteistä tehtiin vielä
Blob-analyysi tai toisin sanoen partikkelianalyysi. Analyysin tarkoituksena on siis määrittellä erotet-
tujen piirteiden sijainti ja koko kuva-alueella. Kutsumme piirteitä tässä tutkimuksessa tästä alkaen
”blobeiksi”.

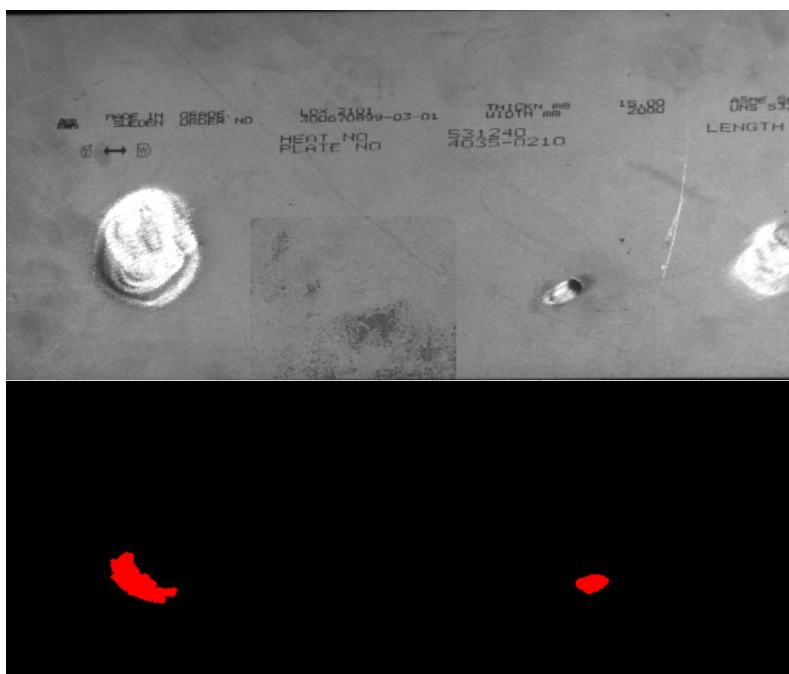
Kuvataan seuraavaksi kuviossa 71 alla eräästä Q-pinnanlaadun testipalasta vaaleiden, eli ”bright
objects” blobien kynnystämisen vaiheittain.



Kuvio 71. Vaaleiden blobien kynnystäminen Q-pinnanlaadun testipalasta.

Kuvion perusteella voimme päätellä, että vaaleat blobit saatiin hyvin erotettua taustasta, ja ne ovat myös yhtenäisiä, mikä helpottaa niiden partikkelianalyysia. Lisäksi palan pinnassa oleva naarmu erottui selvästi.

Kuvasta piti kuitenkin erottaa vielä myös blobien tummat alueet. Tämä toteutettiin samoilla toiminnoilla, mutta tällä kertaa tunnistettiin "dark objects", eli tummat hahmot. Tämä vaihe vaati useita kynnystämistoimintoja, jotta esimerkiksi tehtaan leimaukset ja muut pinnan epäkohdat saatiin poistettua kuvasta. Kirkkautta ja kontrastia jouduttiin säätämään, mutta lopputuloksena saatiin tummien blobien erottelu, kuten havainnollistetaan alla kuviossa 72.

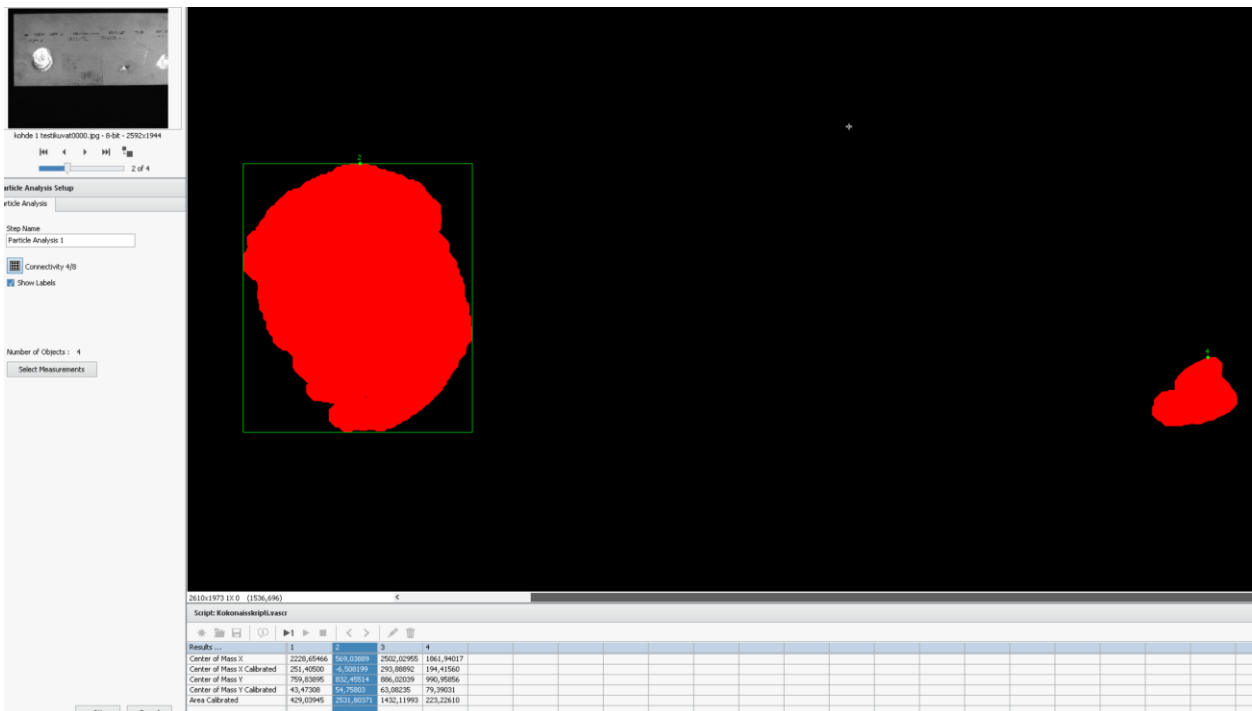


Kuvio 72. Tummien blobien kynnistäminen Q-pinnanlaadun testipalasta.

Valaistuksesta johtuen vaaleiden, eli kirkkaiden blobien erottaminen oli huomattavasti helpompaa, koska kuvassa oli enemmän tummia yksityiskohtia kuin vaaleita.

Seuraavaksi suoritettiin partikkelianalyysi erotetuille blobeille. Analyysissä käytettiin ohjelman "particle analysis" -toimintoa, jolla voitiin määrittää useita erilaisia mittauksia tunnistetuille blobeille. Tässä tapauksessa määriteltiin blobien massan keskipiste (engl. center of mass calibrated) ja niiden pinta-ala (engl. area calibrated). On kuitenkin huomionarvoista, että massan keskipiste ei

kerro blobin muodosta mitään, vaan muodon ääri viivoja olisi mitattava lisää. Mikäli blobit ovat suhteellisen symmetrisiä, ne voidaan kuvata esimerkiksi pyöreinä tai suorakaiteen muotoisina aloina lopullisessa sovelluksessa. Kuviossa 73 on esitetty suurimman vaalean blobin mitat yllä olevasta testipalasta, ja blobien mitat näkyvät kuvan alareunassa "results" -taulukossa.

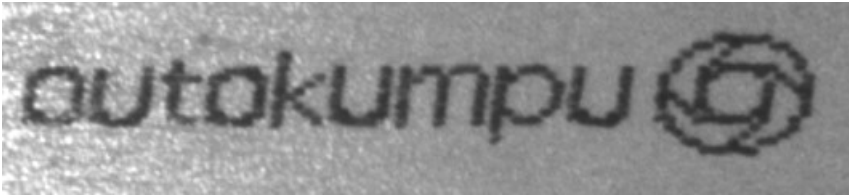


Kuvio 73. Partikkelianalyysi erotelluista blobeista.

Tämän tutkimuksen keskeisiin tavoitteisiin kuului myös tunnistaa materiaalin pinnasta levyn materiaalityiedot, joihin kuuluivat levynumero ja viivakoodin tunnistus. Nämä tiedot ovat oleellisia, jotta niitä voitaisiin verrata alkuperäisiin järjestelmässä oleviin tietoihin, ja että kuvannettu levy mitoitettiin sekä pintavirheineen voitaisiin yhdistää näihin tietoihin.

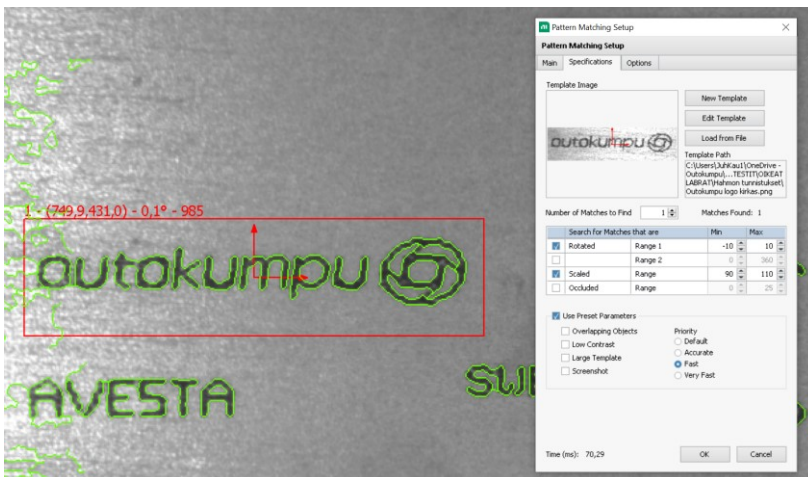
Vision Assistant -ohjelmalla nämä tiedot voidaan varmentaa **hahmontunnistuksen** avulla, käyttämällä "pattern matching" -toimintoa stanssauksen tunnistamiseen, ja sen jälkeen **tunnistaa kirjaimet tai numerot** "OCR" (Optical Character Recognition) -toiminnolla. Lisäksi Q, Q-hiotussa ja 253MA-pinnanlaaduissa levyissä on viivakoodi, jonka voi tulkita ohjelman "barcode reader" -toiminnolla. Viivakoodi levyssä on tyypiltään Code 39, ja kun se on luettu, olisi sen vastattava levynumeroa.

Kuvataan seuraavaksi, kuinka materiaalitiedot todennettiin CPP/1D- pinnanlaaduista. Stanssauksesta piti ensin määrittää joku hahmo tai muoto, joka on aina vakio eli samankokoinen ja muutoinkin muuttumaton. Hahmoksi valittiin ”outokumpu”-teksti, jossa on myös Outokummun logo. Alla kuviossa 74 esimerkki tästä hahmosta.



Kuvio 74. Outokummun teksti ja logo hahmontunnistuksen määrittämiseen.

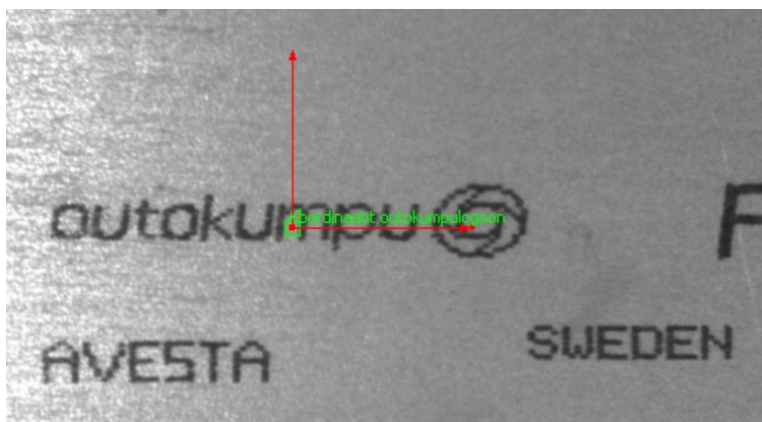
Seuraavaksi luotiin OCR-toiminnolla hahmo kyseisestä merkkijonosta ja tämä tallennettiin. Hahmon etsintäalueeksi määriteltiin koko kuva-ala. Toiminnolla voidaan myös määrittää hahmon kääntymiskulmia ja skaalauksia, mikäli levy on kääntyneenä johonkin kulmaan. Kyseinen toiminto perustuu myös vahvasti harmaasävyeroihin eli siihen, kuinka hahmo voidaan taustasta erottaa. Alla kuviossa 75 havainnollistettu OCR- toiminto.



Kuvio 75. OCR- toiminto levyn hahmon tunnistuksessa.

Kun hahmo oli tunnistettu, piti tälle luoda vielä koordinaatisto, jonka perusteella itse merkkijono, eli materiaalitiedot levyltä haetaan. Koordinaatiston kulma ja sijainti sidotaan myös hahmoon.

Koordinaatisto sitominen hahmoon tapahtuu ”set coordinate system” -toiminnolla. Alla kuviossa 76 havainnollistettu tämä toiminto hahmossa.



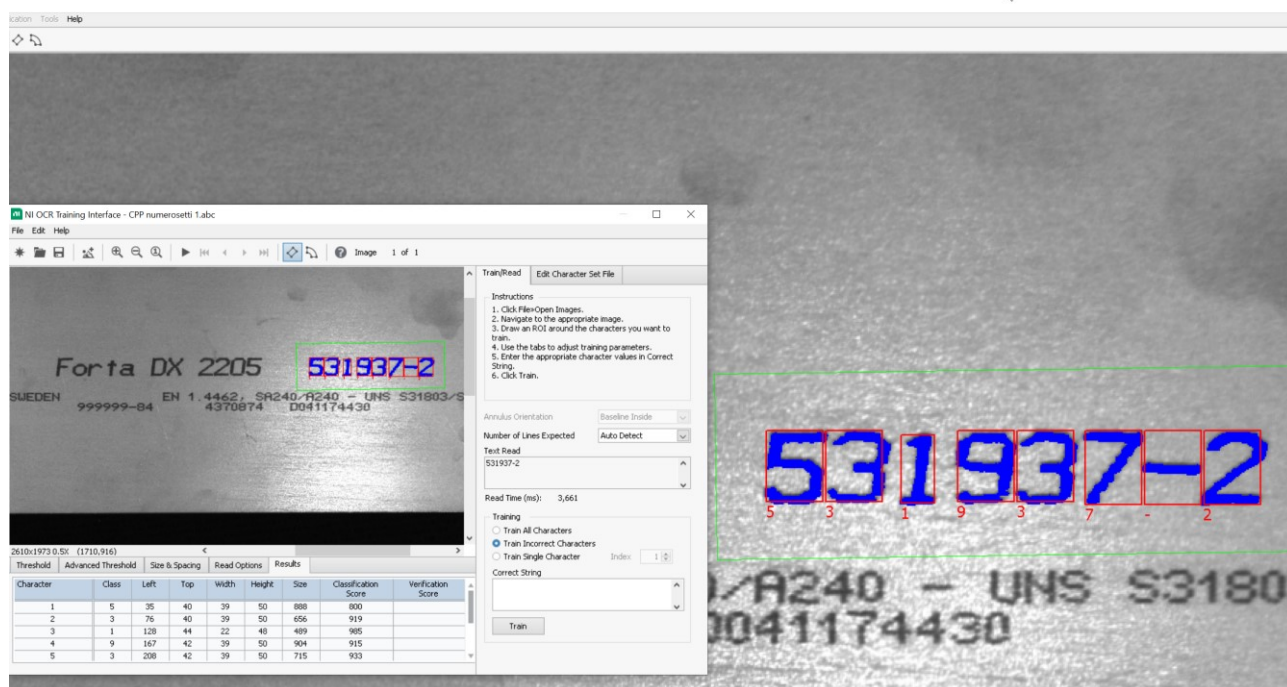
Kuvio 76. Koordinaatisto sidottu hahmoon.

Kun hahmo ja koordinaatisto oli määritelty, voitiin seuraavaksi lukea halutut materiaalitiedot stanssauksesta. CPP/1D levyissä merkkien fontti ja koko ovat siis erilaisia kuin muissa pinnanlaaduissa. OCR-toiminto aloitetaan määrittelemällä hakualue, mistä merkkejä halutaan lukea. Tämä hakualue sidotaan hahmon tunnistukseen, eli merkkejä haetaan aina samasta kohdasta suhteessa hahmoon. Toiminnolla voidaan määrittää merkkien koot ja muut muuttujat riippuen merkeistä. Kun kaikki parametrit oli määritelty toiminnon sisällä, jokainen merkki tai tässä tapauksessa numero opetettiin ohjelmalle. Numeroita opetetaan yleensä useita, jotta tunnistaminen olisi luotettavampaa. Tässäkin toiminnossa merkkien lukemisen onnistuminen riippuu merkittävästi harmaasävyeroista, ja testeissä havaittiin myös, että valaistuksella on suuri rooli. Tämä korostuu varsinkin hieman kiiltäväpintaissa pinnanlaadussa.

Testeissä kyseisiä pinnanlaadun testipaloja oli kahta erilaista, eli materiaalitiedot olivat erilaisia. Näitä testipaloja aseteltiin kuva-alueelle eri kulmiin kääntyneinä ja eri kohtiin. Testeissä havaittiin, että vaikka valaistus aiheutti pintaan heijastuksia, voitiin kaikki hahmot ja merkit tunnistaa suhteellisen helposti. Joissain tapauksissa valaistuksesta johtuen jouduttiin joitain numeroita opettamaan useita.

Alla kuviossa 77 on esitetty erään testipalan numerosarja eli levynumero opetettuna. Voidaan havaita, että numerot ovat selkeästi näkyvissä ja ohjelma tunnistaa merkit vaivattomasti. Taulukossa

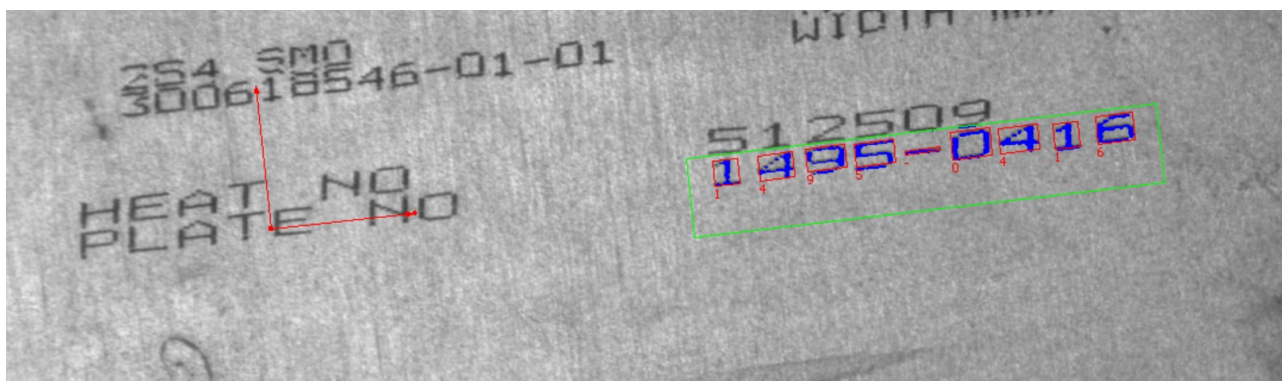
"results" nähdään "**classification score**" -sarake, joka kertoo sen, kuinka hyvin jokainen hahmo on tunnistettu eli luokittelu pisteytetään. Tämä pisteytys on asteikolla 0–1000, jossa 0 tarkoittaa huonointa mahdollista luokittelua ja 1000 parasta mahdollista. Kuvasta nähdään, että hahmot 1–5 ovat saaneet pisteytyksen 800–985 välillä, joten näiden hahmojen tunnistus on melko luotettava.



Kuvio 77. OCR-merkkien tunnistusta CPP/1D-pinnanlaadussa.

Seuraavaksi tehtiin vastaava toiminto toisille pinnanlaaduille. Testeissä havaittiin, että numeroiden opetuksella ja niiden välisillä etäisyysasetuksilla oli huomattava vaikutus lopputulokseen, koska näissä pinnanlaaduissa fonttien koko oli pienempi kuin CPP/1D-pinnanlaadussa. Oli siis havaittavissa, että näissä merkeissä kuvataajuus oli korkea, eli tunnistettavien numeroiden välinen etäisyys on huomattavasti pienempi, joten linssin erottelukyky vaati suuremman kontrastin. Myös kameran kennolla eli resoluutiolla on vaikutusta ilmiöön. Testeissä kontrasti saatiin kuitenkin niin hyväksi, että merkkien väliin jäi useita pikseleitä, jotta tunnistaminen onnistui. Yksittäisiä numeroita jouduttiin kuitenkin opettamaan useita kertoja, jotta tunnistaminen olisi luotettavampaa.

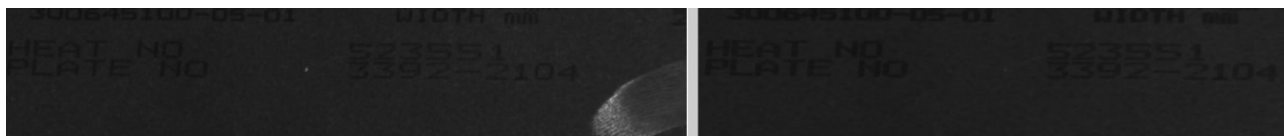
Alla kuviossa 78 on esimerkki eräästä hiotun pinnanlaadun testipalasta, josta luettiin levynumero. Toiminto tehtiin siis samalla periaatteella kuin aiemmassa esimerkissä, mutta hahmon tunnistuksessa käytettiin "Plate No" -merkkijonoa.



Kuvio 78. Hiotun pinnanlaadun levynumeron tunnistus.

Kuviosta on havaittavissa, että valaistus ja merkkien koko aiheuttaa jo haasteita ohjelmalle tunnistaa merkkejä, koska kontrasti on hieman huonompi taustan ja merkkien välillä. Lisäksi hakualueen rajaus aiheutti haasteita, ettei ylempänä oleva numerosarja sekoitu samaan hakuun. Hakualueen kohdistaminen riippui siis paljon siitä, kuinka hyvin hahmon tunnistus onnistuu ja kuinka sen koordinaatisto pysyi samassa linjassa hahmon kanssa. Mikäli hahmon tunnistus ei onnistu optimaalisesti, kääntyy koordinaatisto myös vinoon ja näin ollen merkkien hakualue sen mukana. Tämä tarkoittaa sitä, että merkkejä, eli levynumeroa ei voida tunnistaa. Testeissä koko tunnistusprosessi onnistui kuitenkin suhteellisen hyvin optimoimalla hahmon ja merkkien tunnistusta sekä opettamalla numeroita runsaasti.

Haasteita aiheutti enimmäkseen 253MA-pinnanlaadun testipala, jossa materiaalin tausta oli erittäin tumma, mikä vaikeutti levynumeron tunnistamista. Tämä ongelma saatiin kuitenkin ratkaistua "gray morphology" -toiminnolla, joka on morfologinen toiminto kuvan piirteiden ominaisuuksien korostamiseen tai poistamiseen harmaasävykuvilla. Toiminto perustuu harmaasävyerojen pikseliarvoihin. Toiminnosta voitiin valita "erode" -komento, jolla voitiin korostaa hahmon tai merkin reunuksia. Alla kuviossa 79 on esimerkki siitä, kuinka tämä toiminto vaikutti 253MA-pinnanlaadun merkkien tunnistettavuuteen. Vasemmalla ennen ja oikealla jälkeen. Tämä toiminto suoritettiin ohjelmassa kaksi kertaa, jotta tunnistettavuus olisi luotettavampi.



Kuvio 79. Harmaasävykuvien morfologinen toiminto piirteiden korostamiseen.

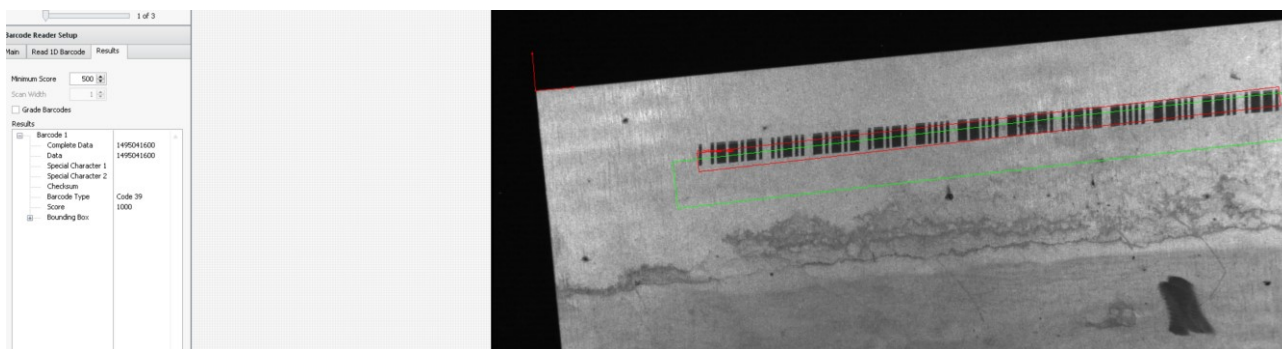
Kun toiminto oli suoritettu, voitiin hahmo ja levynumero tunnistaa huomattavasti luotettavammin. Alla kuviossa 80 kuvattu lopputulos.



Kuvio 80. 253MA-pinnanlaadun hahmon ja levynumeron tunnistus.

Seuraavaksi lähdettiin tunnistamaan ja lukemaan viivakoodia Q- ja Q-hiotun pinnanlaadun testipaloista. 253MA-materiaaliin ei ollut saatavilla viivakoodin sisältävää testipalaa. Koska viivakoodin hakualue sidotaan myös jonkin hahmon koordinaatteihin, voitiin testeissä käyttää vain kahdeksaa testikuvaa, koska muissa kuvissa koordinaatteihin perustuvaa pistettä ei voitu määrittellä. Koordinaatit sidottiin testipalojen vaaka- ja pystysuuntaisten levynreunojen kohtaamispisteeseen. Tässäkin testissä koepalat aseteltiin eri kohtiin ja kulmiin kääntyneinä. Jokaisesta tunnistettavasta testikuvasta pystyttiin lukemaan vaivattomasti viivakoodi ja sen sisältämä levynumero.

Luokittelupisteitys jokaisella viivakoodilla oli täysi 1000. Alla esimerkki viivakoodin lukemisesta kuviossa 81 "barcode reader" -toiminnolla. "results" -välilehdeltä nähtiin luettu viivakoodin merkkijono, joka oli tässä tapauksessa "1495041600", mikä vastaa levynumeroa 1495-0416. Jokaisesta testikuvasta tunnistettiin oikea levynumero. Yhteenvetona viivakoodin lukemisesta voidaan todeta, että toiminto on luotettava, mikäli viivakoodin hakualue onnistutaan määrittämään optimaalisesti.



Kuvio 81. Viivakoodin luenta ”barcode reader” -toiminnolla.

Laboratoriotestien tuloksia ja luotettavuutta arvioidaan myöhemmin tulokset -luvussa. Kun laboratoriotestit oli saatu suoritettua, suoritettiin näiden jälkeen vielä kenttätestit toimeksiantajan tiloissa.

6.4 Kenttätestit

Kenttätestit aloitettiin toimeksiantajan tiloissa helmikuussa 2024. Testit suoritettiin yhden viikonlopun aikana, jotta yrityksen tuotanto ei häiriintyisi. Käytännössä testit sisälsivät optimaalisen valaistuksen hakemisen ja levyjen kuvantamisen. Kuvien käsittely ja skriptien tekeminen suoritettiin myöhemmin. Testeihin lainattiin saatavilla olevia kameroita ja optiikoita Jyväskylän ammattikorkeakoululta. Lainattu laitteisto ei ollut täysin optimaalinen tehtävään, mutta niillä pystyttiin toteuttamaan testit riittävän hyvin, jotta voitiin määritellä muuttujia ja haasteita lopullisen kokenäkösovelluksen näkökulmasta. Testeihin käytettiin täysimittaisia teräslevyjä, joiden koko ja paksuus vaihtelivat. Lisäksi kaikkia pinnanlaatuja oli käytettävissä. Kuva-aloja (FOV) oli kenttätesteissä siis kaksi kappaletta: FOV1 ja FOV2. FOV1 oli alue, josta luettiin materiaalitiedot, ja FOV2, jossa mitattiin levyn mitat sekä kuvattiin materiaalin pintavirheet, eli tehdashionnat. Kuvat otettiin kamera kiinnitettynä imukuppinostimeen, ja nostinta ohjattiin käsin radiokaukosäätimellä. On huomionarvoista, että jokainen otettu kuva ei ollut täysin staattinen, vaan nostimessa oli aina pientä huojuntaa kuvienottohetkellä.

6.4.1 Kenttätestien valmistelu

Konenäköohjelmistona käytettiin samaa Vision Assistant -ohjelmistoa. Pohjana skripteille käytettiin laboratoriotesteissä käytettyjä skriptejä sekä niiden parametreja ja asetuksia, lukuun ottamatta valotusaikoja.

Kameraksi Kenttätesteihin valittiin Baslerin 32-bittinen 12 megapikselin (4096 x 3000 pikseliä) värikamera, jossa oli koko kuva-alan sulkimella (global shutter) varustettu CMOS-kenno kooltaan 1/1.1 tuumaa ja pikselien koko kennossa oli 2,74 x 2,74 mikrometriä. Kameravalinta tehtiin sen saatavuuden perusteella testien aikaan, ja laboratoriossa käytetty 5 megapikselin harmaasävykamera oli liian matalaresoluutioinen tehtävään. Lisäksi kamerassa oli USB-liitäntä, mikä mahdollisti helpon liittämisen kannettavaan tietokoneeseen ilman ylimääräisiä virtalähteitä. USB-johto oli myös riittävän pitkä, jotta kameran toimintaa voitiin hallita lattiatasolta. Samaa kameraa käytettiin sekä FOV1- että FOV2-kuvaamisessa.

Kameran resoluutio riitti alustavien laskelmien mukaan FOV2-toimintojen suorittamiseen, mutta ei riittänyt laskennallisesti FOV1-toimintoihin, koska kameran rajoittavaksi resoluutioksi FOV1:ssä laskettiin 0,5 mm ilman varmuuskerrointa. FOV1:lle otettiin vertailun vuoksi toiset kuvasarjat älypuhelimien kameralla, jonka resoluutio oli 48 megapikseliä. On kuitenkin huomionarvoista, että valotusaikaa ja muita tärkeitä tietoja ei ollut saatavilla älypuhelimien kamerasta, koska kuvat otettiin puhelimen automaattitoiminnolla.

Kuva-alat huomioiden **objektiivin** polttovälin tulisi laskennallisesti olla vähintään 8 mm FOV2:lle ja 10 mm FOV1:lle. Jyväskylän ammattikorkeakoululta löytyi testien ajaksi lainaan 8 mm ja 9 mm objektiiveja. 8 mm objektiivia käytettiin FOV2:ssa ja 9 mm objektiivia FOV1:ssä. Testeissä havaittiin, että 9 mm objektiivi kattoi riittävän hyvin koko tarvittavan kuva-alan FOV1:ssä, kun kuvauskorkeus oli 900 mm, joten materiaalitiedot voitiin lukea. FOV2:ssa 8 mm objektiivilla laskennallinen kuvauskorkeus 3000 mm ei riittänyt kattamaan koko kuva-alaa. Kamera oli nostettava 4000 mm korkeuteen kuvauspinnasta, jotta koko kuva-ala saatiin katettua. Tämän arveltiin johtuvan objektiivin laadusta sekä kameran kennon koosta. Alustavissa laskelmissa kennon koko olisi tullut olla 4/3 tuumaa, sekä FOV1:ssä että FOV2:ssa. Koska kuvauskorkeutta, eli työskentelykorkeutta jouduttiin nostamaan 1000 mm suunnitellusta ylöspäin, olisi sillä vaikutusta myös resoluutioon ja kuvan tarkkuuteen.

Valaistukseksi kenttätesteihin hankittiin 4 kappaletta kattovaloina käytettäviä 46 watin LED- paneeleita mitoiltaan 1500 x 82 x 68 mm. Valoteho oli näillä 6400 Lumenia ja väriämpö 4000 Kelvinia vaaleaa valoa. Valoissa oli valmiina myös hyvin valoa hajauttavat, eli diffusoivat muovikuvut, joilla saatiin tasaista valaistusta ympäri kuvausaluetta. Valojen virtalähteet muokattiin niin, että niihin saatiin virtaa normaalista pistorasiasta. Valoille piti rakentaa myös telineet, joissa oli kulma- ja korkeussäätö. Näin valaistusgeometriaa voitaisiin helposti muuttaa testien aikana. Testien ajaksi valaistus asetettiin kuitenkin niin, että se valaisi mahdollisimman tasaisesti koko kuva-alueen sopivalla korkeudella ja kulmassa. Kuvausgeometrian kannalta valaistus oli siis pimeäkentän ja kirkaskentän rajavyöhykkeellä. Valaistusta oli myös hankalaa toteuttaa täysin kirkaskentän mukaan, niin kuin laboratoriotesteissä, koska imukuppinostimen rakenne ja itse imukupit estivät tämän. Valaistus olisi siis jouduttu rakentamaan kiinni nostimeen, koska kuvantaminen tapahtuu kamera kiinnitettynä nostimeen. Alla kuviossa 82 esitetty valaistuksen testauksen eri vaiheita. Vasemmalla kuviossa lähtötilanne ja oikealla valaistus säädetty mahdollisimman optimaalisesti kuvausalueelle. Valaistusta testattiin hallin valot päällä ja pois. Hämärässä voitiin hahmottaa paremmin valaistuksen tasaisuus (kuviossa oikealla).



Kuvio 82. Valaistus kenttätestien kuvausalueella.

Kuvausgeometria oli samanlainen kuin laboratoriotesteissä, eli kamera oli asetettu kohtisuoraan kohteen yläpuolelle. Valaistuksen ja kameran suhteen käytettiin kirkas- ja pimeäkentän yhdistelmää, kuten aiemmin todettu. Kenttätesteissä oli kuitenkin huomioitava, että laaja kuvausalue voisi aiheuttaa enemmän perspektiivi- ja linssivirheitä verrattuna laboratoriotesteihin. Kaikki kuvat

FOV1 ja FOV2 -alueilta pyrittiin ottamaan aina samasta kohtaa, jotta kuvankäsittely ja ohjelman kehittäminen olisivat helpompia.

Kameran asettamiseksi imukuppinostimeen valmistettiin telineitä, joihin kamera voitiin kiinnittää. Alun perin nostimeen kiinnitettiin kaksi telinettä, joista toinen oli keskellä nostinta ja toinen sivussa. Käytännössä kuitenkin käytettiin vain yhtä telineistä testien aikana. Tämä johtui siitä, että lopulta oli käytössä vain yksi kamera, joten kameraa olisi joutunut siirtämään vuorotellen telineiden välillä. Alla kuviossa 83 on havainnollistettu teline, johon kamera kiinnitettiin. Kamera kiinnitettiin telineeseen, joka oli helposti saavutettavissa ja sijaiti optimaalisessa paikassa suhteessa FOV1:een.



Kuvio 83. Kamera kiinnitettynä telineeseen imukuppinostimessa.

Objektiivin aukko pidettiin samana koko testien ajan molemmilla objektiiveilla, eli täysin avoimena, ja valotusaikaa säädettiin ohjelmallisesti. Optimaaliseksi valotusajaksi havaittiin 8000 mikrosekuntia pinnanlaaduille CPP/1D, sekä Q-hiottu ja Q. 253MA-pinnanlaaduille jouduttiin säätämään valotusta jopa 20000 mikrosekuntiin asti pinnan tummuuden takia. Polttoväli pysyi molemmissa objektiiveissa optimaalisena koko testien ajan, ja tämä voitiin varmistaa optiikan säätörenkaista.

Kun kaikki valmisteluvaiheet oli suoritettu, otettiin kuvia kaikista testilevyistä sekä FOV2-alueelta ja FOV1-alueelta siten, että hallin oma valaistus oli päällä. Lisäksi otettiin testiksi yksi kuva FOV2-alueelta, jolloin hallin valot olivat sammutettuina. Tämä vastasi lähes täysin pimeitä olosuhteita hallissa. Tämä on havainnollistettu kuviossa 84 alla, jossa vasemmalla on pimeässä otettu kuva ja oikealla kuva hallin valot päällä.

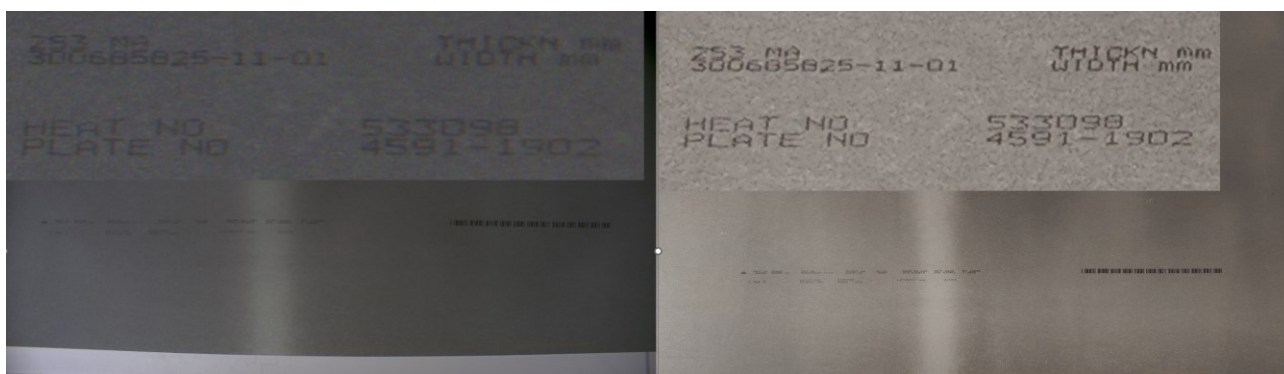


Kuvio 84. FOV2 kuvat pimeässä ja hallin valot päällä.

Kuviosta voidaan päätellä, että käytetty valaistus testeissä ei ollut aivan tasainen, ja olisi tarvittu vähintään kaksi valaisinta lisää kuvausalueen keskelle. Tämän jälkeen valoja olisi voitu suunnata tasaisemmin ympäri kuvausaluetta. Kun hallin valot olivat päällä, valaistus näytti tasaisemmalta, mutta todellisuudessa katosta tulevat voimakkaat valot aiheuttivat kuvaan varjoja ja muita häiriöitä, kuten oikeanpuoleisessa kuviossa näkyy (tikapuiden varjot jne.). Todellisuudessa tarvittaisiin vielä enemmän valotehoa lopullisessa konenäkösovelluksessa, jotta ympäröivän valon aiheuttamia häiriöitä voitaisiin välttää. Valaistuksen parantamista yritettiin myös kuvankäsittelyn avulla histogrammin tasaamisella, mutta valokeilat siirtyivät ikään kuin keskemälle kuvausaluetta ja kuva ylikorostui. Lisäksi blobien erottuvuus oli tällöin huonompi. Kuvausalueen eristäminen ympäristön valolta olisi myös haastavaa. Lisäksi oikeanpuoleisessa kuviossa tapahtui sama ilmiö kuin laboratoriotesteissä, eli hiontaspottien heijastukset näkyivät epätasaisesti ja aiheuttivat blobien tunnistettavuuden monimutkaisuutta, jolloin ne olisi jouduttu kynnystämään vaaleina ja tummina

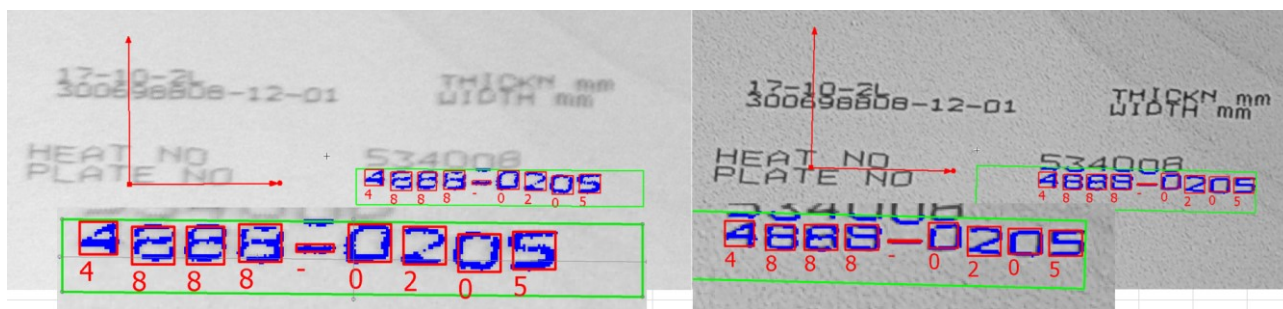
Aiemmin mainittiin myös, että FOV1-alueelta otettiin kuvat Baslerin 12 megapikselin kameralla ja älypuhelimien 48 megapikselin kameralla. Vertailun vuoksi havainnollistetaan näiden kuvien eroja

alla olevassa kuviossa 85. Kuviossa on suurennettu kuva 253MA-pinnanlaadun levynumerosta. Vasemmalla on kuva, joka on otettu Baslerin kameralla, ja oikealla älypuhelimella. Valotusaika on kummallakin kuvalla erilainen, mutta voidaan havaita, että älypuhelimella otettu kuva on selvästi rakeisempi ja aiheuttaa kuvaan kohinahäiriöitä. Samaa on myös havaittavissa Baslerin ottamassa kuvassa, mutta kuviot ovat yhtenäisempiä, joskin sumeampia. Tarkemmin katsottuna älypuhelimella otetun kuvan kohina on jopa niin voimakasta, että joitakin yksityiskohtia jää numeroista pois. Yleiset suodatustekniikat, kuten mediaanisuodatus, aiheuttivat tässä tapauksessa kuvan sumenemista ja lisäsivät epätarkkuutta. Voidaan päätellä, että konenäkökamera on luotettavampi, vaikka pikselimäärä on huomattavasti pienempi. Toisaalta älypuhelimella otettu kuva käyttää todennäköisesti itsessään jo kuvankäsittelyä, joten vertailu on tässä mielessä vaikeaa.



Kuvio 85. Konenäkökameran ja älypuhelin kameran eroja.

Alla kuviossa 86 voidaan nähdä eroja myös merkkien tunnistuksen kynnyksessä. Baslerin kameralla otettu kuva (kuviossa vasemmalla) on sumeampi ja muutoinkin hieman epätarkempi kuin älypuhelimella otetussa kuvassa (kuviossa oikealla). Tämä johtui osittain myös nosturin pienestä heilunnasta. Älypuhelimella otetut kuvat olivat käsin otettuja. Kummastakin merkit voidaan tunnistaa, mutta älypuhelimella otetun kuvan valaistus ja tarkkuus on tässä parempi ja näin tunnistus onnistuu paremmin, joten on näin myös luotettavampi.



Kuvio 86. Konenäkökameran ja älypuhelin kameran kuvien kynnyksessä havaittuja eroja.

Kuvioista voidaan kuitenkin päätellä, että valaistuksella, resoluutiolla sekä kuvan tarkennuksella on suuri merkitys varsinkin OCR-toiminnon onnistumisen kannalta.

Ennen kuin **kuvankäsittelyä ja konenäköohjelmaa** lähdettiin tekemään, selvitettiin vielä kuvista tässä valaistuksessa havaittuja harmaasävyjen eroja.

Baslerin kameralla otettujen Q-pinnanlaatujen merkkien (FOV1) ja levyn pinnan väliset harmaasävyerot olivat 30–50 luokkaa, mutta viivakoodin tunnistuksessa jopa 100. CPP/1D-pinnanlaaduissa merkkien ja pinnan väliset erot olivat hieman paremmat, eli noin 50–70. 253MA-pinnanlaadulla harmaasävyerot olivat laboratoriotestien tapaan heikot, eli noin 10–20, mutta tätä saatiin parannettua kuvankäsittelyn avulla 30–40 tasolle. Harmaasävyeroihin vaikutti suuresti, kuinka tarkka kuva oli, ja tähän vaikutti taas nosturin pieni heilunta.

Älypuhelimien kameralla otettujen kuvien (FOV1) harmaasävyerot olivat huomattavasti parempia. Q-pinnanlaatujen ja CPP/1D-merkkien erot olivat jopa 100 ja joissain tapauksissa jopa 160 luokkaa. 253MA-pinnanlaaduissakin erot olivat ilman kuvankäsittelyä jopa 50 luokkaa.

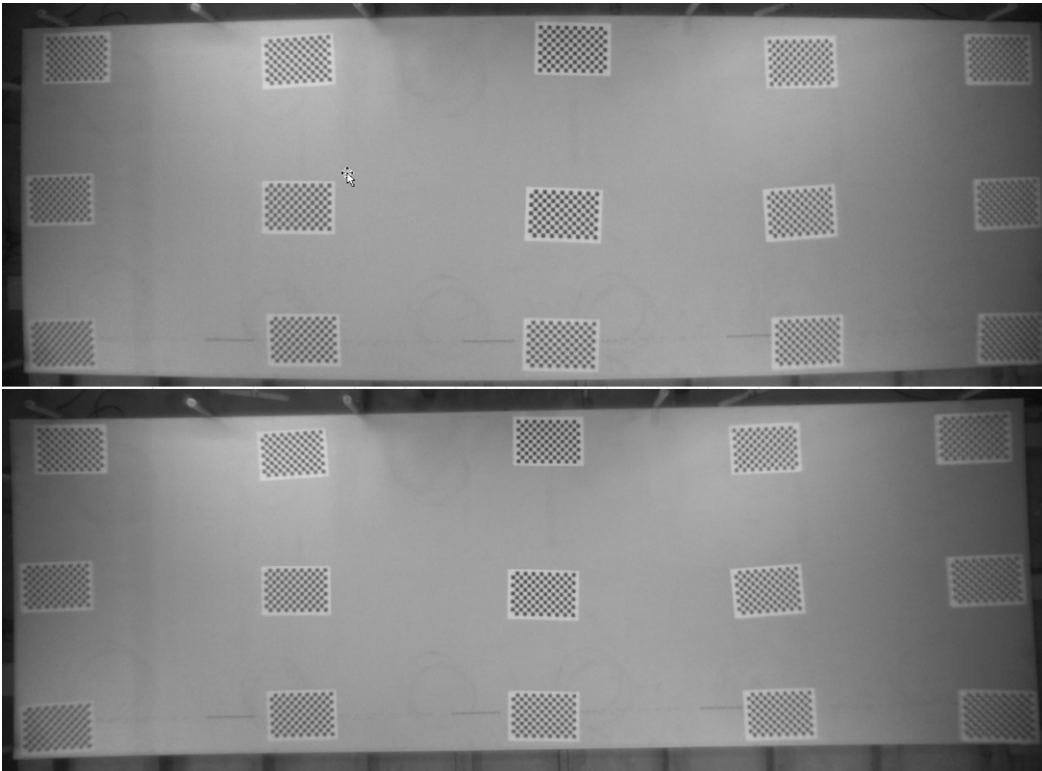
FOV2:n suhteen harmaasävyeroja mitattiin levyn reunoista ja päällekkäisten levyjen risteämiskohdista. Tällä oli merkitystä, jotta voitaisiin erottaa päällekkäiset levyt toisistaan esimerkiksi levyjen äärimittojen mittausta varten. Levyjen risteämiskohdissa erot olivat huomattavan pieniä, jopa alle 10 luokkaa. Vaihtelua oli kuitenkin paljon, riippuen valaistuksen intensiteetistä. Lisäksi hiontajälkien erottuvuus levyn taustasta mitattiin. Näissä erot olivat myös valaistuksesta riippuen noin 30–50 luokkaa. FOV2-alueen kuvantaminen tapahtui pelkästään Baslerin konenäkökameralla.

6.4.2 Kenttätestien kuvien kuvankäsittely ja ohjelman luominen

Kenttätestien valaistus, kuvausgeometria ja valotusaika erosi laboratoriotesteistä, joten kuvia jouduttiin käsittelemään hieman eri tavalla. Näin ollen samoja skriptejä ei voitu käyttää täysin, vaan jouduttiin säätämään esimerkiksi hieman kirkkautta ja kontrastia ohjelmallisesti.

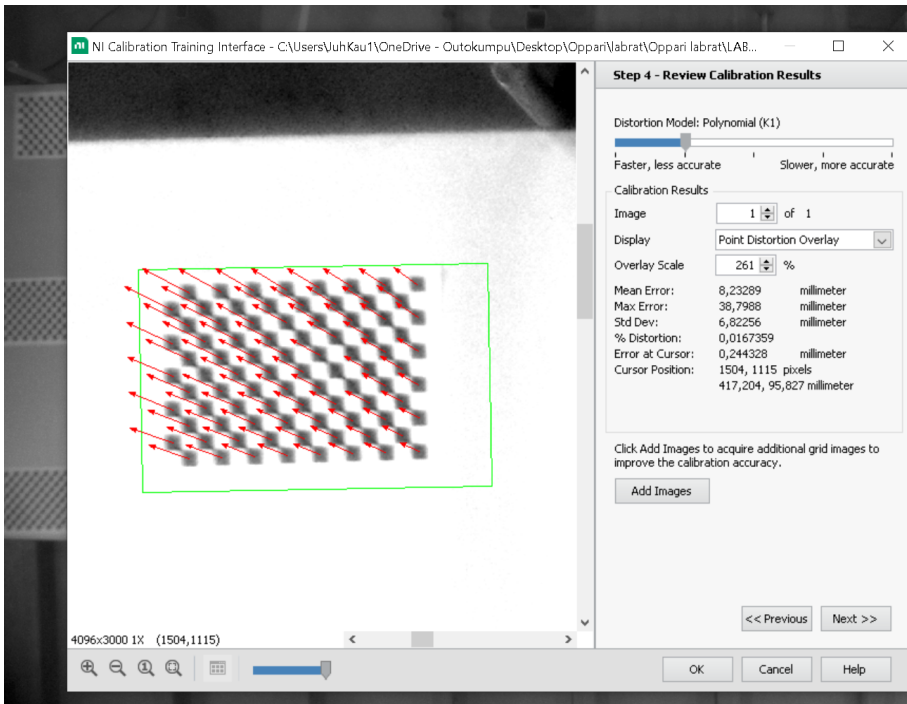
Kuvan kalibroinnissa (FOV2) havaittiin haasteita kalibroinnin onnistumisessa. Kalibrointiin käytettiin A3-paperille tulostettua mustavalkoista ruudukkoa, joiden ruudukkojen välinen etäisyys oli 25 mm, jotta nämä voitaisiin erottaa kunnolla korkealta kuvattaessa. Johtuen kuvauskorkeuden (4000 mm) muutoksesta alkuperäiseen ja laskettuun korkeuteen (3000 mm), ei kuva ollut enää niin tarkka, kuin sen olisi pitänyt olla optimaalisesti mitoitettuna. Lisäksi optiikasta aiheutuvia vääristymiä ja epätarkkuutta oli havaittavissa varsinkin kuva-alueen reunoilla. Tämä vastaa hyvin jo tämän tutkimuksen teoriaosuudessa todettuja ongelmia, joita optiikka ja kuvausgeometria voivat aiheuttaa.

Kalibrointiin tarkoitetut ruudukot eivät myöskään olleet sopivia näin suurelle kuva-alalle, vaan toimivampi ratkaisu olisi todennäköisesti ollut tasainen, yhtenäinen ja koko kuva-alan kattava ruudukko. Mainittua ratkaisua ei kuitenkaan ollut saatavilla testien aikaan. Kuva saatiin kuitenkin kalibroitua niin, että alkutilanteessa kuva oli ”tynnyri”-vääristynyt ja kalibroinnin jälkeen hieman tasaisempi, mutta silti lievästi ”neulatyyny”-vääristynyt. Nämä vääristymät on havainnollistettu alempana kuviossa 87. Kalibroinnin jälkeen saatiin käyttöön myös reaali maailman mitat, mutta nämä eivät vastanneet todellisia mittoja. Esimerkiksi 6000 mm pitkän levyn mitat olivat ohjelmassa noin 4000 mm. Tämä ei kuitenkaan estänyt konenäkösovelluksen periaatteellista toteutusta.



Kuvio 87. FOV2 kuva-alan kalibrointi. Ylempänä ”Tynnyri” ja alempana ”neulatyyny” -vääristymä.

Alla kuviossa 88 nähdään, kuinka ohjelma pyrki korjaamaan vääristymiä ruudukon avulla. Tässä mustan ja vaalean taustan erottuvuutta toisistaan koitettiin korjata kirkkauden ja kontrastin säädöllä ohjelmallisesti. Havaittavissa on epätarkkuutta mustissa ruudukoissa ja näin ollen ohjelman on haastavaa tehdä luotettavaa kalibrointia.



Kuvio 88. FOV2 kalibrointi. Kuvan vääristymän korjaus.

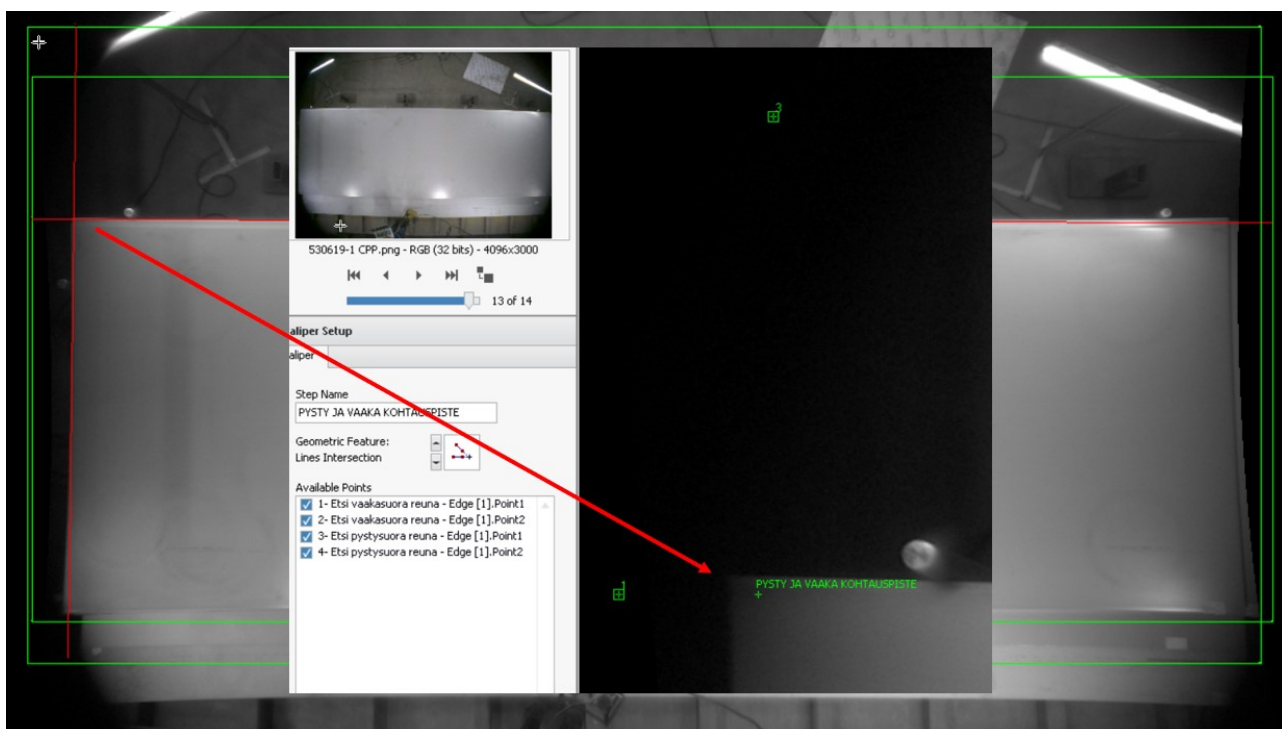
Kuva-alue FOV1 saatiin kalibrointi tehtyä luotettavammin, koska ruudukot olivat paremmin tunnistettavissa. Tällä kuva-alueella ei tehdä kuitenkaan mitoituksia, joten mittatarkkuudella ei ole niin suuria vaatimuksia, kuin FOV2 kuva-alueella.

Kenttätestien ohjelmallinen toteutus lähdettiin suorittamaan samalla periaatteella, kuin laboratoriotesteissä. **Referenssipiste** FOV2- alueen mitoituksia varten haluttiin levyn vasempaan ylänurkkaan. Toteutustapa oli siis:

1. Etsitään levyn pysty- ja vaakasuuntaiset reunat "find straight edge" -toiminnolla
2. Määritetään näiden kahden reunan kohtaamispiste "caliber" -toiminnolla
3. Määritetään tähän pisteeseen koordinaatiston nollapiste "sen coordinate system" -toiminnolla.

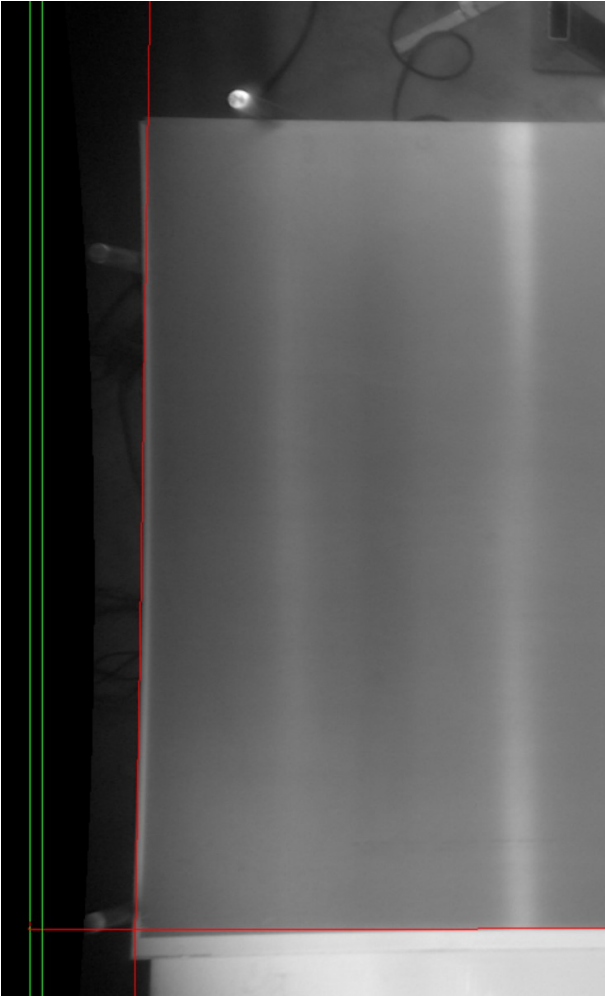
Alla kuviossa 89 nähdään lopputulos, jossa kahden reunan kohtaamispiste on määritelty. Tähän sidottiin myös koordinaatiston nollapiste. Kuten kuvioista havaitaan, ei nollapiste ole täysin levyn

nurkassa. Tämä johtuu siitä, että kalibrointi on hieman epäonnistunut ja levyn reunat eivät ole täysin suoria, vaan hieman vääristyneitä.



Kuvio 89. Koordinaatiston nollapiste FOV2.

Lisäksi näiden toimintojen onnistuminen riippui siitä, oliko päällimmäinen levy täysin kiinni stoppareissa vai ei. Jos esimerkiksi päällimmäinen levy oli 253MA-pinnanlaatua, eikä täysin kiinni stoppareissa, ilmeni haasteita erottaa mikä levy oli päällimmäisenä. Tämä ilmiö havainnollistettu alla kuviossa 90. Kuvioista voidaan havaita, että pystysuuntaisen reunan etsintä -toiminto pyrkii havaitsemaan ensimmäisen suoran reunan kuvasta. Toisen, eli vaakasuuntaisen reunan etsintä onnistui hyvin, koska se oli ensimmäinen havaittava reuna kuva-alueella. Tähän vaikuttaa toiminnolle syötettävät parametrit. Parametrejä jouduttiinkin muuttamaan harmaasävyerojen perusteella. Tummmille 235MA-pinnanlaaduille jouduttiinkin tekemään oma skripti luotettavuuden parantamiseksi. Mikäli levy olisi ollut täysin törmäytetty stoppareihin, olisi samaa skriptiä voinut käyttää kaikille pinnanlaaduille.



Kuvio 90. Haasteita pinnanlaadun erottamisessa FOV2.

Seuraavat toiminnot suoritettiin myös, kuten laboratoriotesteissä, eli:

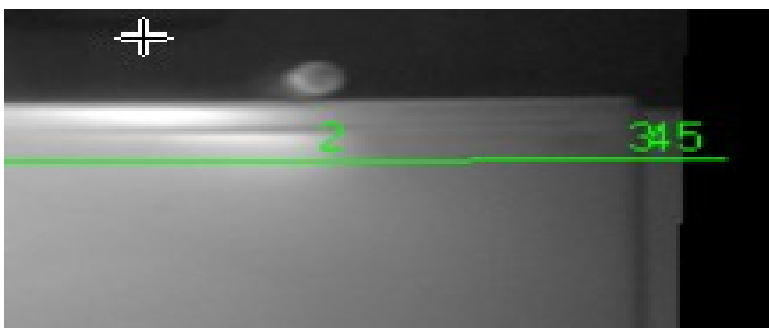
4. Levyn mittaus "edge detector" -toiminnolla
5. Hiontajälkien tai toisin sanoen blobien erottaminen segmentointitekniikoilla
6. Blobien sijaintien ja kokojen määrittäminen partikkelianalyysin avulla.

Levyn mittauksessa oli myös haasteita sekä pysty- että vaakasuunnassa. Alla kuviossa 91 on esimerkki eräästä Q-pinnanlaadun levystä, jossa mittaus on onnistunut. Kuvioista nähdään, että ensimmäinen (1) mittauspiste vasemmalla tunnistetaan hyvin voimakkaan harmaasävyeron ansiosta. Lisäksi pisteet 2, 3 ja 4 levyn oikeassa reunassa tunnistetaan hyvin valaistuksen aiheuttaman varjostuksen vuoksi. Näin ollen 1- ja 2-pisteen reaali maailman mitat voidaan hyvin todentaa.



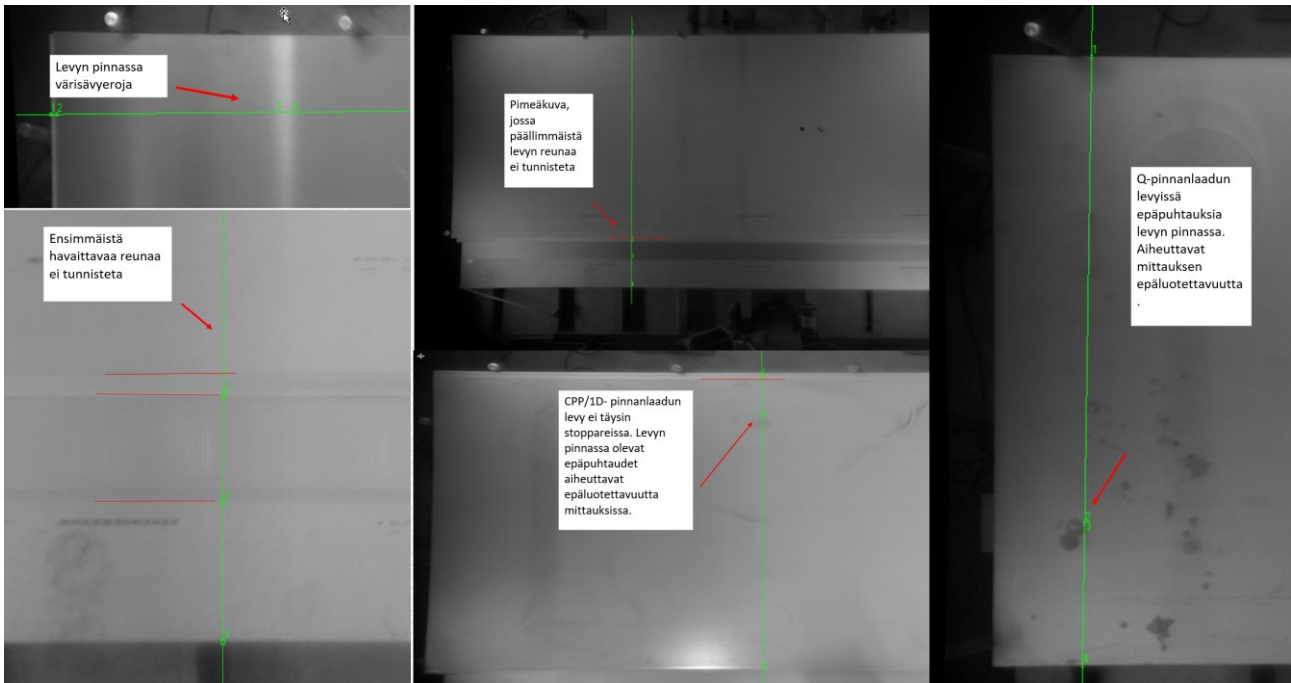
Kuvio 91. Levyn mittausta vaakasuunnassa.

Eräessä CPP/1D-pinnanlaadussa havaittiin kuitenkin vastaavassa mittauksessa poikkeama levyn oikeassa reunassa. Mittaustoiminto tunnistaakin valaistuksen heijastuksen ja määrittä tähän kohtaan 2-pisteen. Tämä ilmiö on havainnollistettu kuviossa 92 alla.



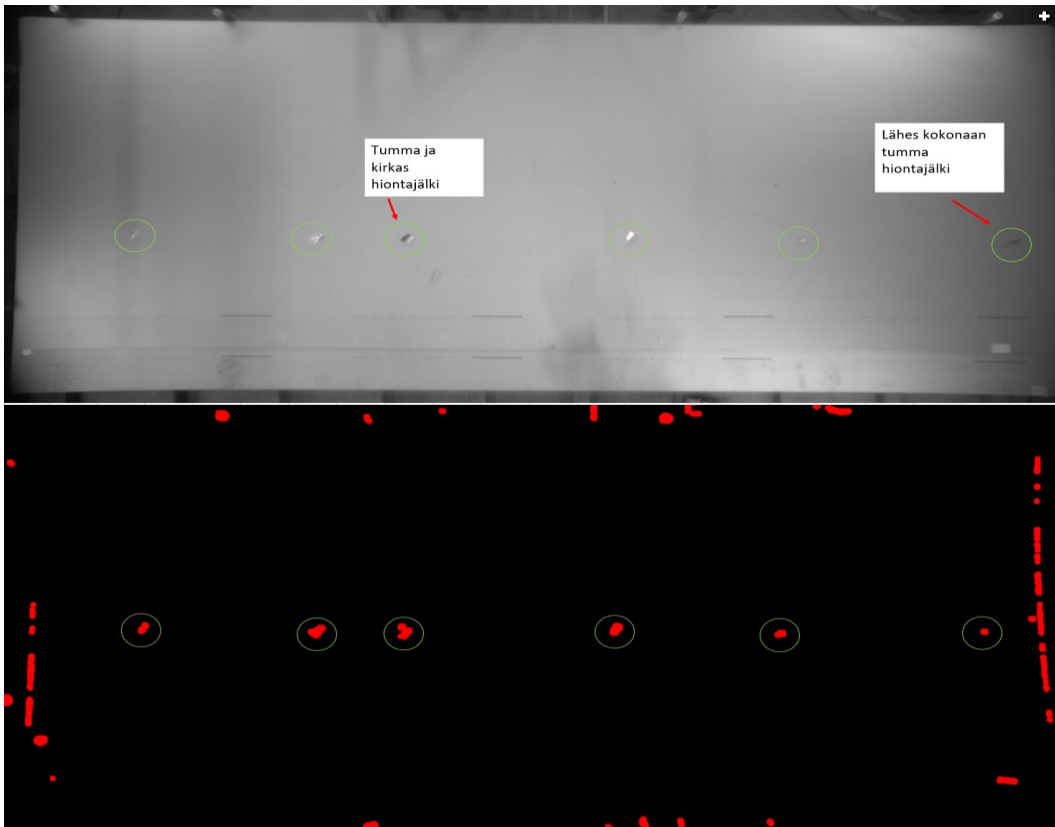
Kuvio 92. Levyn mittauksen haasteita valaistuksen johtuen.

Lisäksi mittauksen epäluotettavuutta aiheutti muun muassa levyn pinnan värisävyerot, valaistuksen epätasaisuus, levyjen huolimaton törmäytys stoppareihin, sekä levyn pinnassa olevat epäpuhtaudet ja hiontajäljet. Näitä epäluotettavuustekijöitä kuvattu alla kuviossa 93. Joitakin näitä epäluotettavuustekijöitä voitiin eliminoida kuvankäsittelyllä, kuten laboratoriotesteissä tehdyt häivytykset kirkkauden ja kontrastin avulla, mutta kenttätesteissä tämä aiheutti muita ongelmia esimerkiksi levyn reunan tunnistamisessa. Paras lopputulos saatiin kuitenkin asettamalla mittausviivat aivan levyn reunoja myöten, jolloin epäpuhtauksia ja muita pintavirheitä oli vähemmän.



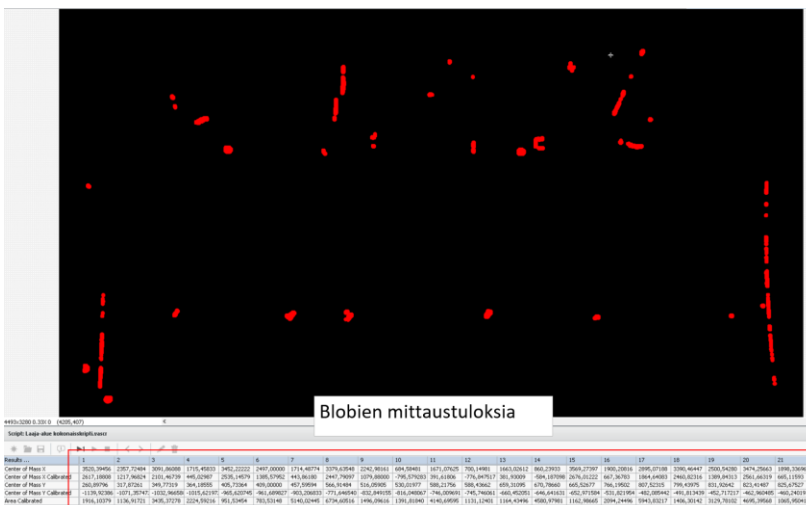
Kuvio 93. Levyn mittauksen epäluotettavuustekijöitä.

Kuvan **segmentointi** suoritettiin myös samoilla toiminnoilla kuin laboratoriotesteissä. Kuvat, joissa oli hiontaspotteja eli blobveja, kynnystettiin binärisointia käyttäen. Merkille pantavaa oli, että kuvat, joissa blobit näkyivät sekä kirkkaina että tummina valaistuksesta johtuen, voitiin kuitenkin kynnystää näkyväksi samalla tavalla, eli vaaleiden blobien kynnystystekniikkaa käyttäen. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että blobit voitiin morfologisilla toiminnoilla kasvattaa vastaamaan suurin piirtein ja riittävällä tarkkuudella kokonaan tummien ja kirkkaiden blobien pinta-alaa, eikä tummien blobien kynnystystä tarvittu, niin kuin laboratoriotesteissä. Tästä esimerkki alla olevassa kuviossa 94.



Kuvio 94. Vaaleiden ja tummien blobien kynnystäminen samanaikaisesti.

Kuviosta havaitaan, että kuvaan jäi edelleen ylimääräisiä blobbeja, jotka jouduttaisiin myöhemmin erottelamaan levyn äärimittoja hyväksi käyttäen lopullisessa konenäkösovelluksessa. **Partikkelianalysissa** näkyy siis mitattuja blobbeja huomattava määrä. Tästä esimerkki alla kuviossa 95.



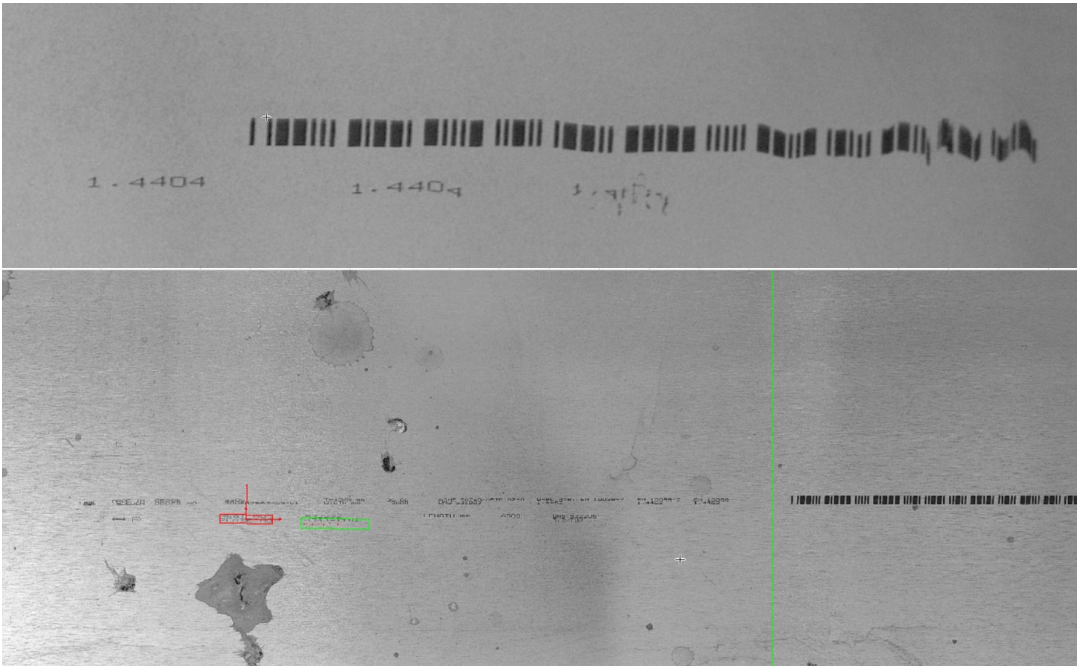
Kuvio 95. Blobien partikkelianalyysi.

Lisäksi joissain tapauksissa kynnistyksen jälkeen jäi sinne kuulumattomia yksityiskohtia, kuten levyn pinnassa olevaa kosteutta ja muita epäpuhtauksia. Näitä oli erikseen haastavaa erotella pois. Tässäkin tapauksessa kuvankäsittely ennen kynnystämistä kirkkauden ja kontrastin avulla toi epätoivottavia lopputuloksia, kuten hiontajälkien häviämistä kuvasta, mikäli epäpuhtauksia koitettiin erotella erikseen.

Viimeisinä toimintoina olivat FOV1-alueella tehtävät **hahmontunnistukset, merkkientunnistukset, sekä viivakoodintunnistukset.**

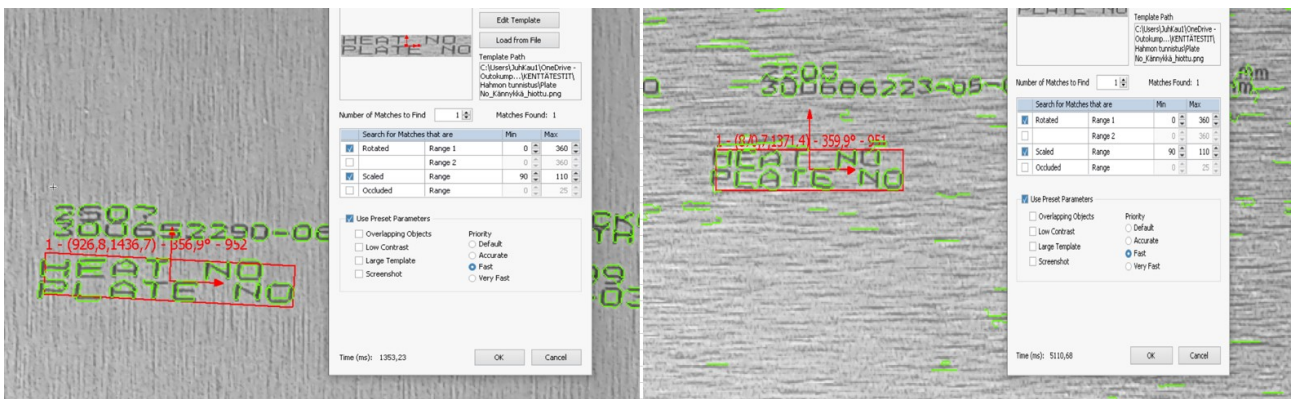
Kenttätesteissä lähtötilannetta muutti se, että kohteen eli levyn ja kameran välinen kulma on lähtökohtaisesti aina kohtisuorassa, eikä kulma muutu. Tämä helpottaisi osaltaan tunnistuksien tekemistä. Kuvausgeometria, kuten Baslerin kameran ominaisuudet eivät olleet siis optimaalisia kuvauskorkeuteen ja kuva-alaan nähden, ja se näkyi tuloksissa. Tämän takia kuvia otettiin myös älypuhelimien 48 megapikselin kameralla vertailun vuoksi. Älypuhelimien kuvia pyrittiin ottamaan samasta kuvauskorkeudesta ja kohdasta, kuin Baslerin kameralla.

Tunnistukset aloitettiin Q-pinnanlaadun levyistä, joihin kuuluivat siis Q-hiottu, Q-, sekä 253MA-pinnanlaadun levyt. Alustavissa testeissä selvisi, että kaikille pinnanlaaduille jouduttiin tekemään oma skriptinsä merkkien OCR-tunnistuksen osalta. Hahmojentunnistus (pattern matching) onnistuisi samalla skriptillä. Lisäksi muita epäkohtia havaittiin levyjen merkkien ja pinnan puhtauksissa. Näitä havainnollistetaan alla kuviossa 96. Pinnan epäpuhtaudet aiheuttavat osaltaan sen, että merkkejä on mahdotonta tunnistaa, mikäli epäpuhtaudet osuvat samaan kohtaan merkkien kanssa. Viivakoodien osalta kaksi testikohdetta jouduttiin hylkäämään lopullisista tuloksista tehtaan viivakoodin leimauksen epäonnistumisen johdosta.



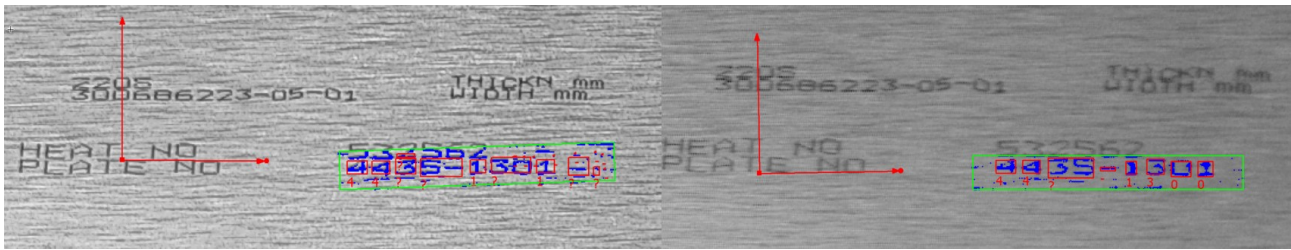
Kuvio 96. Eri pinnalaatujen laatuvirheitä.

Q-hiotuissa levyissä havaittiin myös, että voimakas pinnan hionta aiheutti ongelmia hahmojen tunnistuksessa. Lisäksi pinnoissa oli myös pystysuuntaista valssausjälkeä eräissä levyissä. Tämä vaikeutti siis merkkien kynnystämistä ja näin hahmon tunnistus oli kokonaisuudessaan jokseenkin epäluotettava. Tämä havainnollistettu alla kuviossa 97. Kuvat otettu älypuhelimien kameralla.



Kuvio 97. Pystysuuntaista valssausjälkeä ja voimakasta hiontajälkeä Q-pinnanlaadun levyissä.

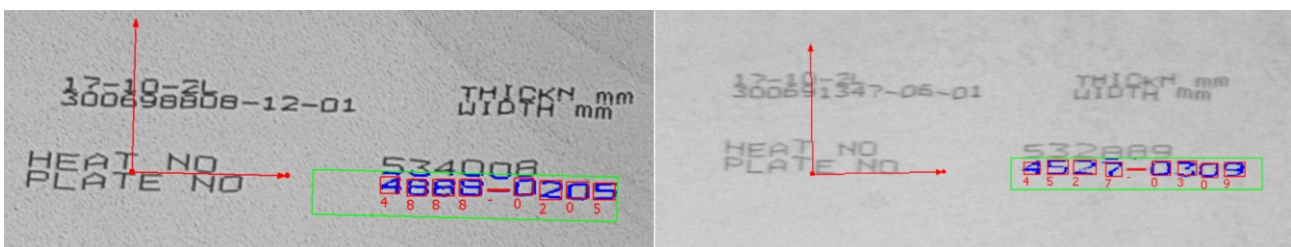
Seuraavaksi hahmotetaan kuviossa 98, mitä hiontajäljet aiheuttavat itse levynumeron tunnistamisessa. Vasemmalla kuviossa älypuhelimella otettu kuva ja oikealla Baslerilla.



Kuvio 98. Levynumeron tunnistusta Q-hiottu levystä.

Kuviosta voidaan päätellä, että hiontajäljet aiheuttavat oman haasteensa merkkien kynnyttämisen kannalta. Hiontajäljet näkyvät niin selvästi, että OCR-toiminto tulkitsee ne merkeiksi. Baslerilla otetussa kuvassa hiontajäljet eivät näy niin selvästi, mutta kuva on muuten epätarkempi kuin älypuhelimien, joten merkkien tunnistus on epäluotettavampaa. Lisäksi "Plate no" -hahmontunnistus ei myöskään ole onnistunut täydellisesti varsinkaan älypuhelimien kuvassa, jolloin OCR-merkkien hakualue asettuu virheellisesti. Virheellistä hiontajälkien tunnistusta pystyttiin hieman hallitsemaan säätämällä esimerkiksi etsittävien merkkien minimi- ja maksimikokoa. Haasteelliseksi tässä muodostui kuitenkin joidenkin merkkien eri koko verrattuna muihin, esimerkiksi numero 1 ja viiva numeroiden välissä. Varsinkin "-"-merkin tunnistus ei onnistunut, jos merkkien kokoa rajoitettiin liikaa pystysuunnassa.

Mattapintaisten Q-pinnanlaatuojen merkit tunnistettiin jokseenkin hyvin molemmilla kameroilla. Luotettavammaksi havaittiin tässäkin tapauksessa älypuhelimella otetut kuvat. Tätä havainnollistettu alla kuviossa 99. Vasemmalla älypuhelimien levynumeron tunnistus ja oikealla Baslerin.



Kuvio 99. Mattapintaisten Q-pinnanlaadun merkkien tunnistusta.

253MA-pinnanlaadussa koettiin haasteita jälleen sen pienten harmaasävyerojen takia. Hahmot ja merkit saatiin kuitenkin tunnistettua ainoassa levyssä, joka testeissä oli saatavilla. Lisäksi samalla

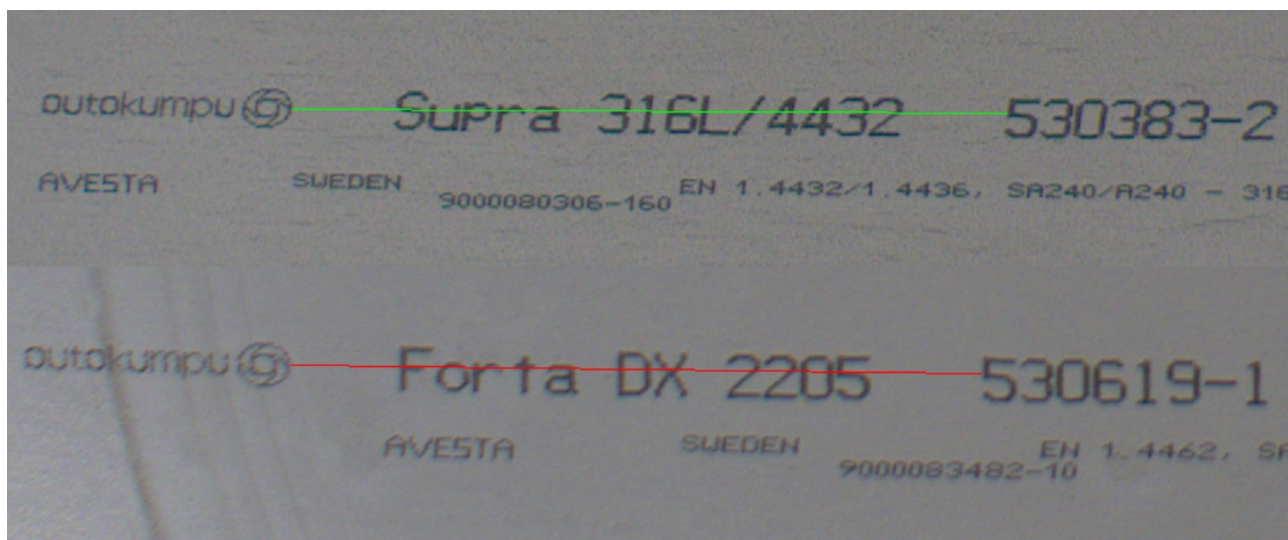
tunnistettiin myös viivakoodi. Tunnistukset tehtiin sekä Baslerin kameralla, että älypuhelimien kameralla. Kummassakin tapauksessa jouduttiin säätämään ohjelmallisesti kuvan kirkkautta ja kontrastia, jotta piirteet saatiin paremmin esille. Alla kuviossa 100 on esitetty hahmontunnistus, merkientunnistus sekä viivakoodin tunnistus samassa kuvassa. Ylempänä on Baslerin kuva ja alempana älypuhelimien kuva.



Kuvio 100. Baslerin ja älypuhelimien materiaalitietojen tunnistusta.

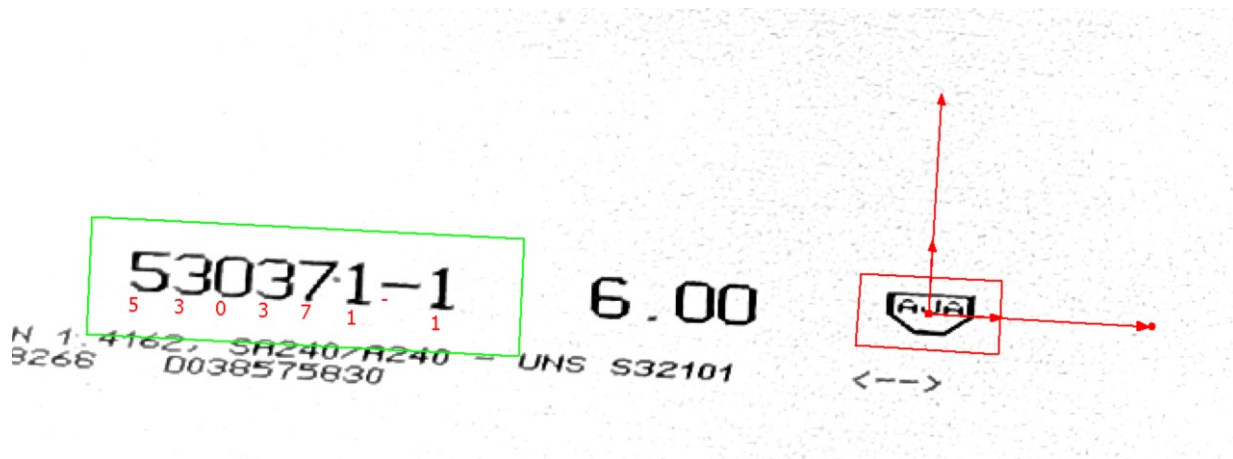
Viivakoodien tunnistus onnistui kaikilla pinnanlaaduilla luotettavasti johtuen niiden koosta ja harmaasävyeroista taustaan nähden. Merkillepantavaa on kuitenkin se, että jos hahmontunnistus epäonnistui, niin myös viivakoodintunnistuksessa havaittiin ongelmia, johtuen hahmontunnistuksen koordinaatteihin sidotusta hakualueesta.

Viimeiseksi tehtiin hahmon- ja merkkientunnistus CPP/1D-pinnanlaadun levyille. Toisin kuin laboratoriotesteissä, havaittiin kenttätesteissä yksi kriittinen ero tunnistustoimintojen kannalta. Tämä ero ilmenee materiaalin tunnistetietojen kentässä, jossa mainitaan materiaalin laatu. Tämän merkkijonon pituus riippuu materiaalin laadusta. Käytännössä tämä aiheuttaa sen, että jos "outokumpu"-logosta otetaan hahmontunnistus ja sidotaan merkkientunnistuksen hakualue siihen, hakualue voi mennä ohi merkkijonon pituudesta riippuen. Hakualuetta voidaan säätää laajemmaksi, mutta muiden merkkien osuminen alueelle on riski. Alla on esimerkki merkkijonon pituudesta kuviossa 101. Tässä tapauksessa merkkijonon pituuden ero oli noin 15 mm.



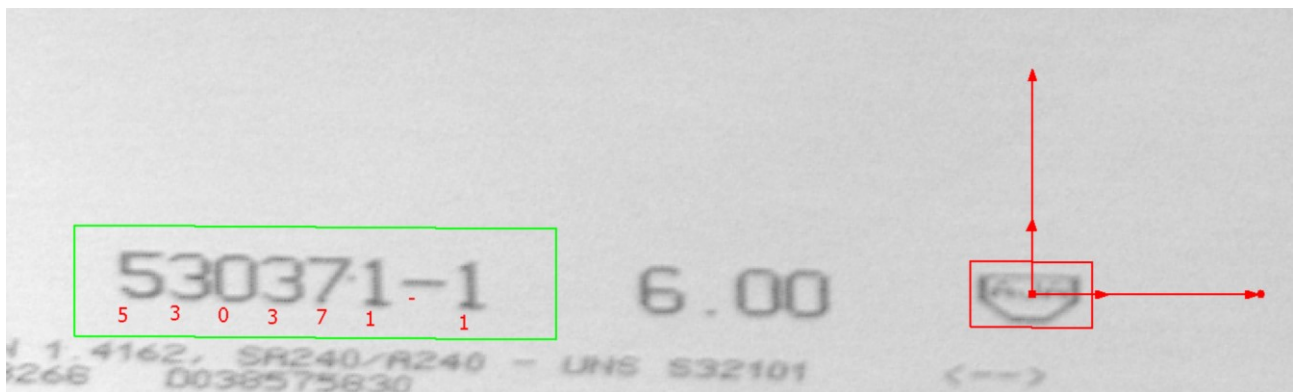
Kuvio 101. CPP/1D-pinnanlaadun merkkijonon pituuden vaihtelua.

Kenttätesteissä hahmontunnistus päädyttiin sitomaan oikealla puolella olevaan "AJA"-logoon. Tässä etäisyys ei muutu, muuten kuin välissä olevan levyn paksuuden ilmaisevan numeron mukaan, joten ei niinkään merkittävästi. Tässä logossa haasteeksi muodostui tunnistaa hahmo niin, että sidottu koordinaatisto asettuisi samaan linjaan hahmon kanssa. Hahmon piirteiden kynnystys ja kulman asetukset "pattern matching"-toiminnon sisällä vaativat enemmän aikaa. Logo todettiin kuitenkin luotettavammaksi hahmontunnistuksen kannalta kuin "Outokumpu"-logo. Alla kuviossa 102 havainnollistetaan merkkien tunnistusta älypuhelimien kuvissa. Kenttätesteissä havaittiin, että CPP/1D-pinnanlaatujen kuvien kontrastin ja kirkkauden säätö auttoi parantamaan hahmon ja merkkien tunnistettavuutta. Varsinkin älypuhelimien kuvissa tämä säätö paransi harmaasävyeroja noin 90 pykälällä. Tämän arvellaan johtuvan siitä, että älypuhelimien kuva on paljon tarkempi ja jo valmiiksi käsitelty. Baslerin kuvissa liiallinen kirkkauden ja kontrastin säätö aiheutti hahmojen ja merkkien katoamista taustaan.



Kuvio 102. CPP/1D-pinnanlaadun hahmon ja merkkien tunnistusta älypuhelimien kuvassa.

Havainnollistetaan hahmon ja merkkien tunnistusta vielä Baslerin kuvissa alla kuviossa 103.



Kuvio 103. CPP/1D-pinnanlaadun hahmon ja merkkien tunnistusta Baslerin kuvassa.

Seuraavassa luvussa käsitellään testeistä johdettuja laboratorio- ja kenttätestien tuloksia.

7 Tutkimuksen tulokset

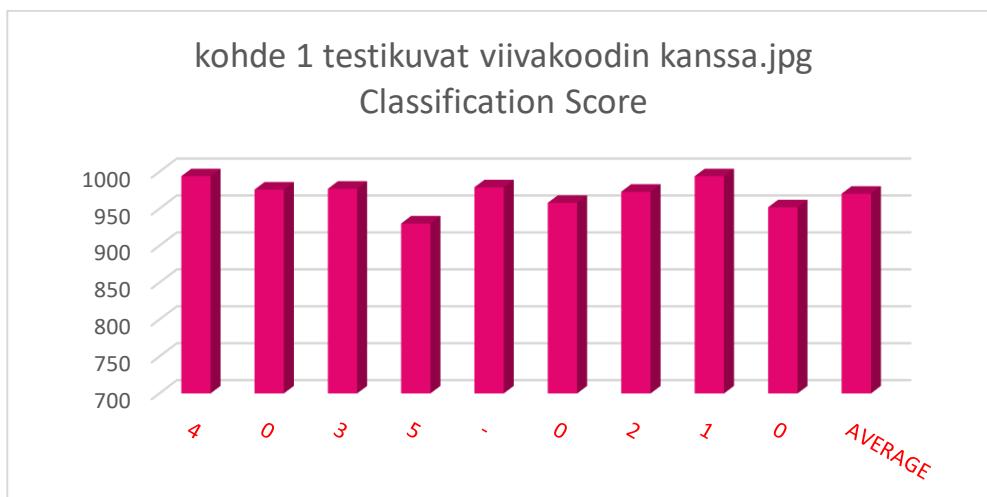
7.1 Laboratoriotestien tulokset

Laboratoriossa testikuvia **Q-pinnanlaadun** levyistä oli mattapintainen Q-pinnanlaatu (kohde 1), Q-hiottu (kohde 3) sekä 253MA-pinnanlaatu (kohde 4). Yhteensä näitä kuvia oli 34 kappaletta hahmo- ja merkkientunnistuksen osalta sekä luettavia viivakoodeja 8 kappaletta (kohteista 1 ja 3). Jokainen testipala oli eri kohdassa kuva-aluetta ja eri kulmissa kääntyneinä.

Yksittäisiä muuttujia ja näiden keskiarvoja kuvataan graafisesti pylväsdiagrammeina, sekä taulukoissa onnistumisprosentteina. Muuttujia olivat seuraavat:

1. Yksittäisten merkkien luokittelupisteitys (eng. classification score)
2. Hahmontunnistuksen luokittelupisteitys
3. Viivakoodintunnistuksen luokittelupisteitys.

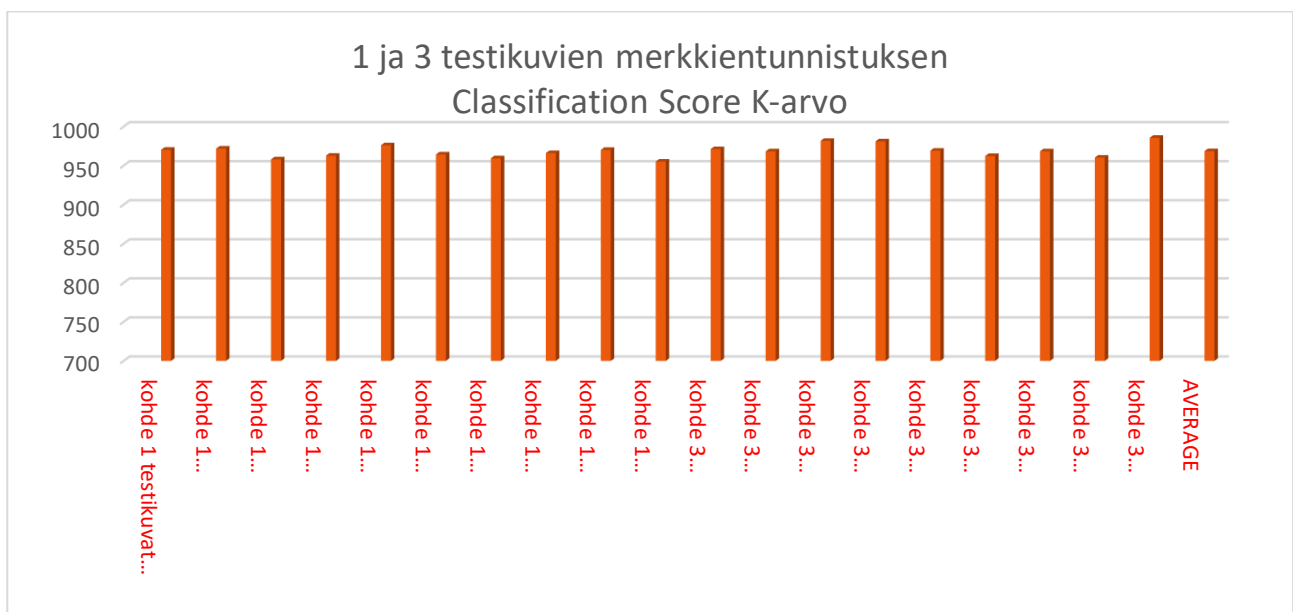
Hahmotetaan seuraavana kohteen 1 pylväsdiagrammi merkkien luokittelupisteityksen mukaan kuviossa 104. Tässä testipalan levynumero on siis ollut 4035-0210.



Kuvio 104. Kohde 1 luokittelupisteitys merkkien mukaan.

Kuviosta nähdään, kuinka hyvin kohde 1 merkkien eli levynumeron tunnistus on onnistunut. Jokaisen yksittäisen numeron pisteytys on yli 900, joten jokainen numero luokiteltiin siten, kuin se oli ohjelman algoritmille opetettu. Alaraja luokittelupisteityksissä oli asetettu 700, jolloin luokittelu muuttuu epäluotettavammaksi.

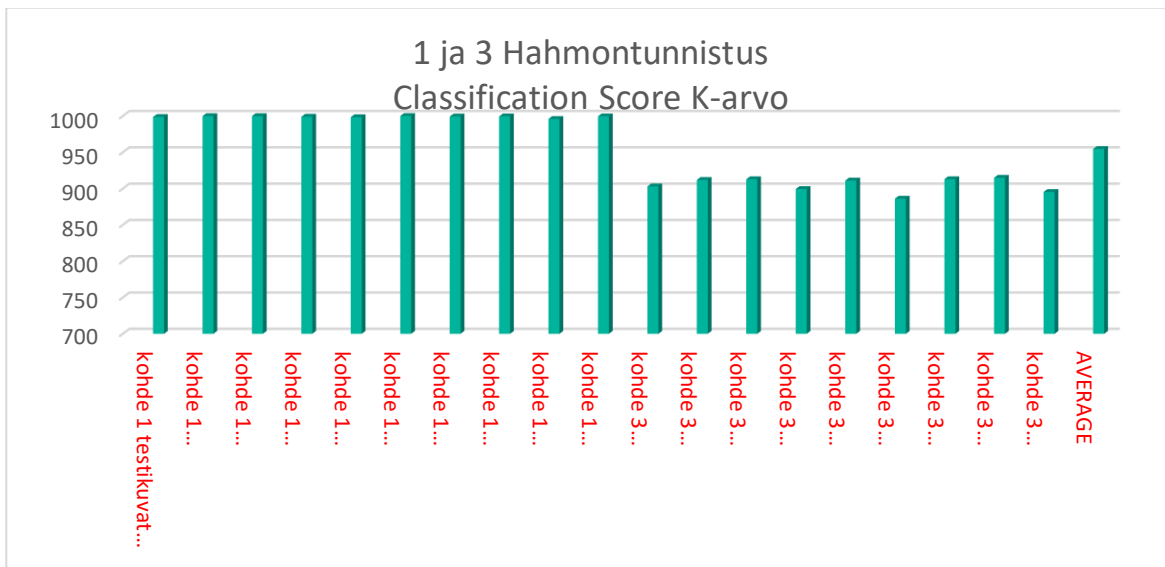
Kuvataan seuraavaksi kohteiden 1 ja 3 kaikkien merkkien pisteytyksien keskiarvo (engl. average) graafisena pylväsdiagrammina alla kuviossa 105.



Kuvio 105. Kohteiden 1 ja 3 kaikkien merkkien luokittelupisteityksien keskiarvo.

Kyseisten kohteiden levynumeroiden tunnistuksen luokittelupisteitys oli siis keskiarvoltaan 968,6. Voidaankin päätellä, että tässä tapauksessa merkkientunnistus on ollut luotettava.

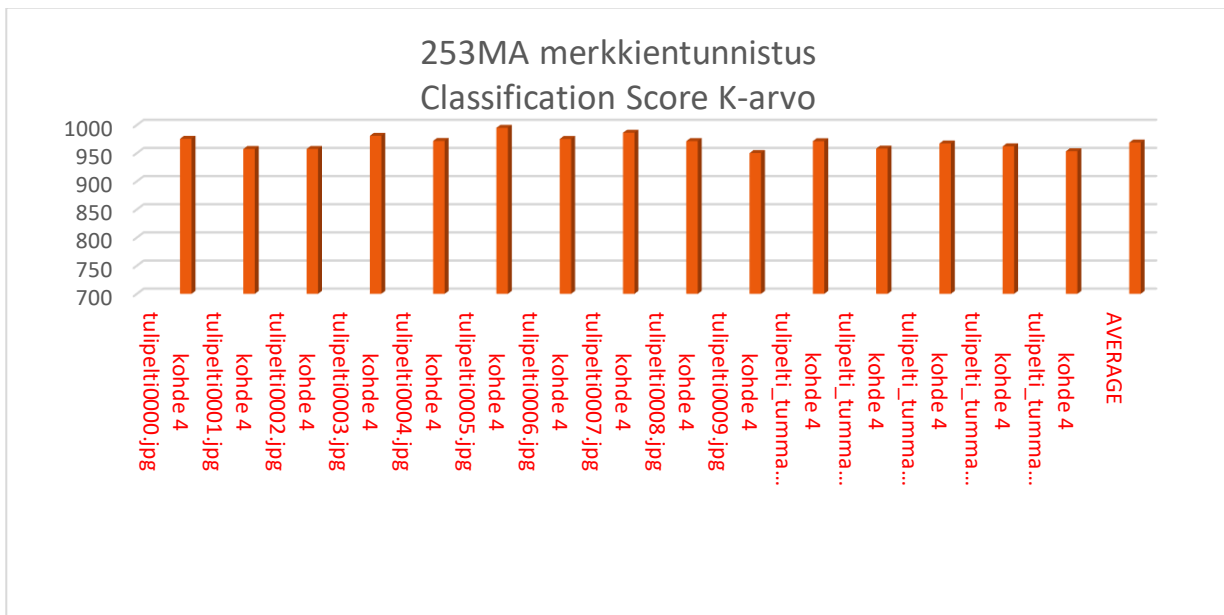
Samoista kohteista otettiin myös hahmontunnistuksen eli "plate no" -merkkijonon vastaava pisteytys. Tämä on esitetty alla kuviossa 106. Pylväsdiagrammista voidaan havaita, että kohteen 3 hahmoa ei ollut niin luotettavasti pystytty tunnistamaan. Tämä johtuu siitä, että kohteen 3 pinnanlaatu oli hiottu, ja hahmo oli opetettu mattapintaisen Q-pinnanlaadun mukaan. Hahmot pystyttiin kuitenkin hyvin tunnistamaan molemmista pinnanlaaduista, ja keskiarvo oli kaikille kohteille 954,6.



Kuvio 106. Kohteiden 1 ja 3 kaikkien hahmojen luokittelupisteysten keskiarvo.

Tunnistettavia viivakoodeja oli näillä kohteilla 8 kappaletta. Tunnistettavia viivakoodeja oli huomattavasti vähemmän, koska testikuvissa osa viivakoodeista oli kuvausalueen ulkopuolella. Viivakoodien luokittelupisteystä ei kuvata tässä pylväsdiagrammina. Kaikkien näiden viivakoodien luokittelupisteet olivat kuitenkin 1000, joten luotettavasti tunnistettavissa.

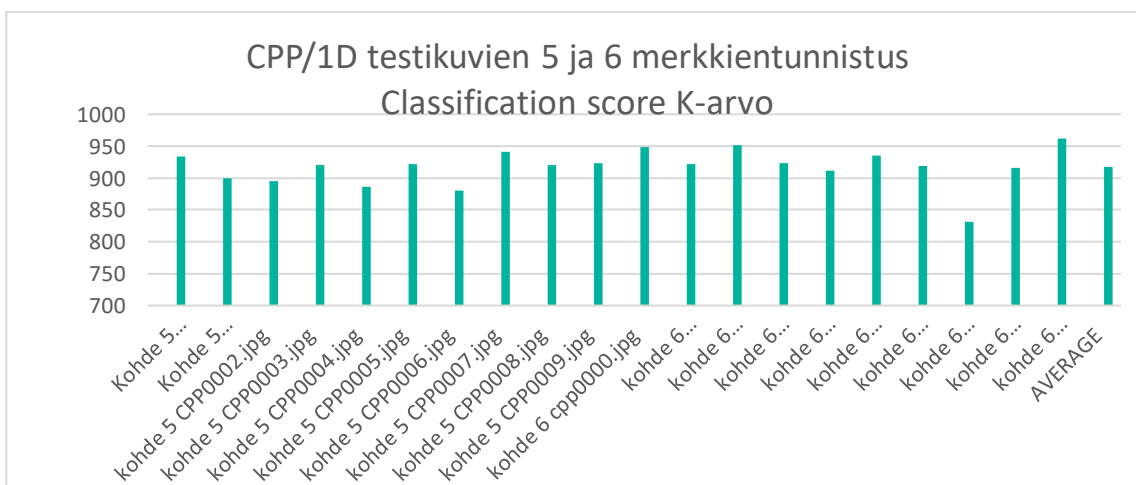
253MA-pinnanlaadulle tehtiin siis oma skriptinsä sen harmaasävyarvojen takia. Hahmotetaan kaikkien tämän pinnanlaadun testikuvien merkkien luokittelupisteysten keskiarvo alla kuviossa 107.



Kuvio 107. 253MA-pinnanlaadun luokittelupisteytyksien keskiarvo.

Kyseisten kohteiden merkkientunnistuksen luokittelupisteytyys oli siis keskiarvoltaan 968,6, mikä oli täysin sama kuin kohteilla 1 ja 3. Hahmontunnistukselle saatiin keskiarvoksi 872,5, mikä oli myös luotettavalla tasolla, eikä yksittäisiä suurempia poikkeamia havaittu.

CPP/1D-pinnanlaatujen testipalojen kuvia saatiin laboratorionasta 20 kappaletta. Kuvissa oli kaksi erilaista kohdetta (kohde 5 ja 6), ja nämäkin olivat aseteltuina kuva-alueelle eri kohtiin ja kulmiin kääntyneinä. Tarkastellaan alla kuviossa 108 merkkientunnistuksen keskiarvoa.

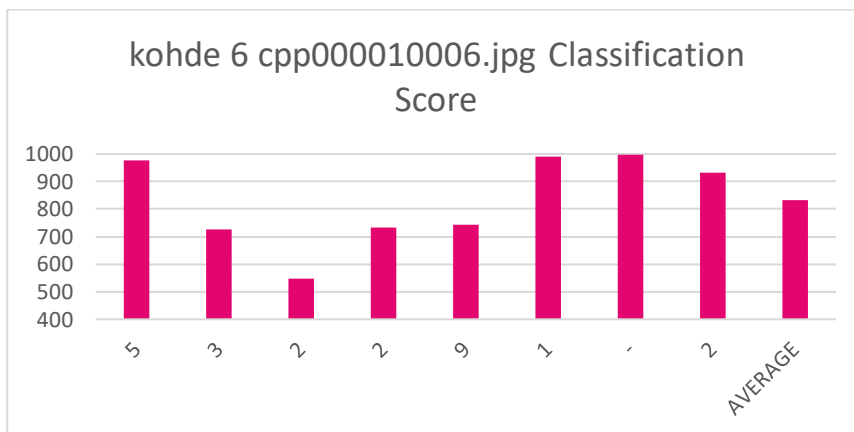


Kuvio 108. CPP/1D-pinnanlaatu

jen merkkientunnistuksen luokittelupisteytyksien keskiarvo.

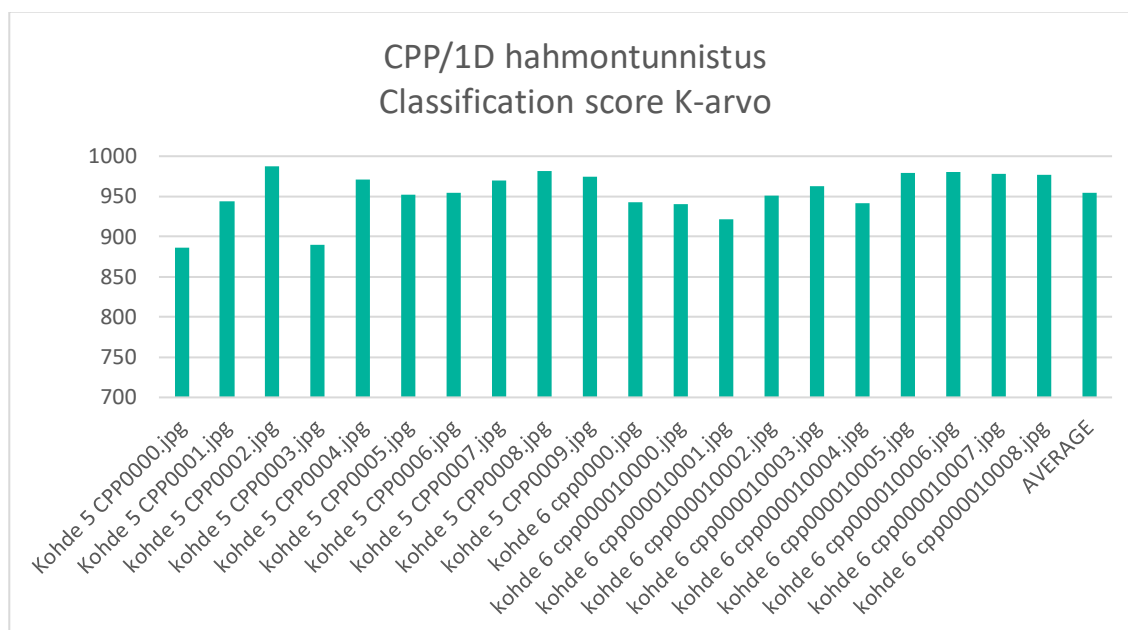
Kuviosta havaitaan, että luokittelupisteytyksen keskiarvo, 917,2, on hieman matalampi kuin Q-pinnalaadun levyissä. Diagrammista nähdään myös, että yhden kohde 6:n keskiarvo on matalampi kuin muiden.

Tarkasteltaessa tämän kohteen numeroidentunnistuksen diagrammia havaitaan, että numero 3 on saanut selkeästi alle 700 luokituksen, mutta on kuitenkin vielä tunnistettu. Avaamalla kuvan ja skriptin uudestaan Vision Assistant -ohjelmaan, kyseinen merkki tunnistettiin kuitenkin pisteytysarvolla 940. Tästä voidaan tehdä johtopäätös siitä, kuinka **toistettava** tutkimus on ja kuinka **luotettava** ohjelman luokittelualgoritmi on. Merkki oli kyseisessä kohdassa hyvin tunnistettavissa, ja muun muassa valaistus oli tässä kohtaa tasainen. Opettamalla kyseistä numeroa useamman kerran voitaisiin mahdollisesti päästä parempaan luokittelupisteytykseen. Alla kuvattuna kuviossa 109 kyseinen kohde pylväsdiagrammissa.



Kuvio 109. Poikkeama eräessä CPP/1D-pinnanlaadun testipalan merkkientunnistuksessa.

Hahmontunnistuksen pisteytyksien keskiarvoissa ei taas havaittu niin suuria vaihteluita. Alla kuviossa 110 hahmotettuina näiden pisteytyksien keskiarvo.



Kuvio 110. CPP/1D-pinnanlaatujen hahmontunnistuksen luokittelupisteystyksiä.

Kuvataan seuraavaksi vielä kaikkien laborioritestien onnistumisprosentti alla olevassa taulukossa 4. Testeissä mitattiin vain hahmojen ja merkkientunnistusten onnistumisia. Kenttätesteissä huomioidaan myös muut tämän tutkimuksen kannalta oleelliset muuttujat, kuten esimerkiksi le-vyn mitat.

Taulukko 4. Laborioritestien hahmojen ja merkkientunnistuksen onnistumisprosentit.

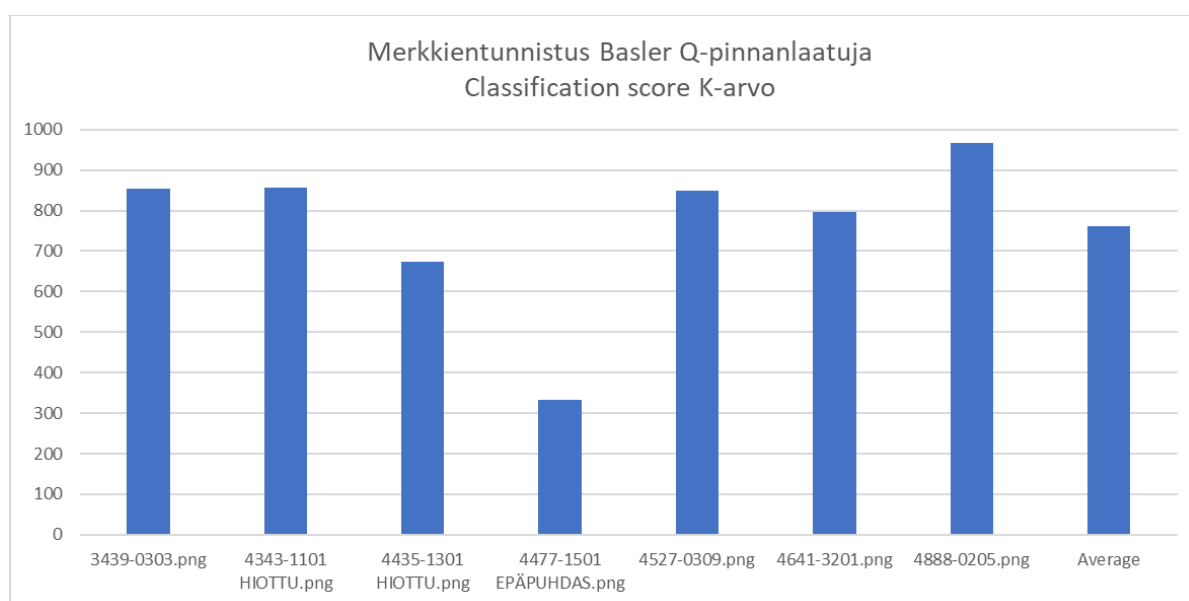
Laborioritestien hahmojen ja merkkientunnistuksen onnistumisprosentti						
Q-pinnanlaatu	Tunnistettavat			Tunnistettu	% tunnistetuista	
Mattapinta ja hiottu	171	merkkiä		171		100
253MA	135	merkkiä		135		100
Hahmontunnistukset yhteensä	34	hahmoa		34		100
Viivakoodit	8	viivakoodia		8		100
					AVERAGE	100
Laborioritestien hahmojen ja merkkientunnistuksen onnistumisprosentti						
CPP/1D- pinnanlaatu	Tunnistettavat			Tunnistettu	% tunnistetuista	
CPP/1D	160	merkkiä		160		100
Hahmontunnistukset yhteensä	20	hahmoa		20		100
					AVERAGE	100

Kaikki laborioritestien data, mukaan lukien asetusarvot Vision assistantille, ovat tämän opinnäytetyön liitteessä 1 olevissa Excel-tiedostoissa.

7.2 Kenttätestien tulokset

Laboratoriotestien tapaan kenttätesteissäkin tehtiin vastaavat mittaukset testikuville. Kenttätesteissä arvioitiin myös levyn äärimittojen mittauksen luotettavuutta ja blobien tunnistettavuutta, toisin kuin laboratoriotesteissä. Lisäksi vertailtiin myös Baslerin ja älypuhelimien kameran eroja merkkien ja hahmojen tunnistettavuuden suhteen.

Tarkastellaan ensimmäisenä Baslerin kameralla tehtyjä testejä **hiotuista- ja mattapintaisten Q-pinnanlaatu**jen merkkientunnistuksesta alla kuviossa 111.

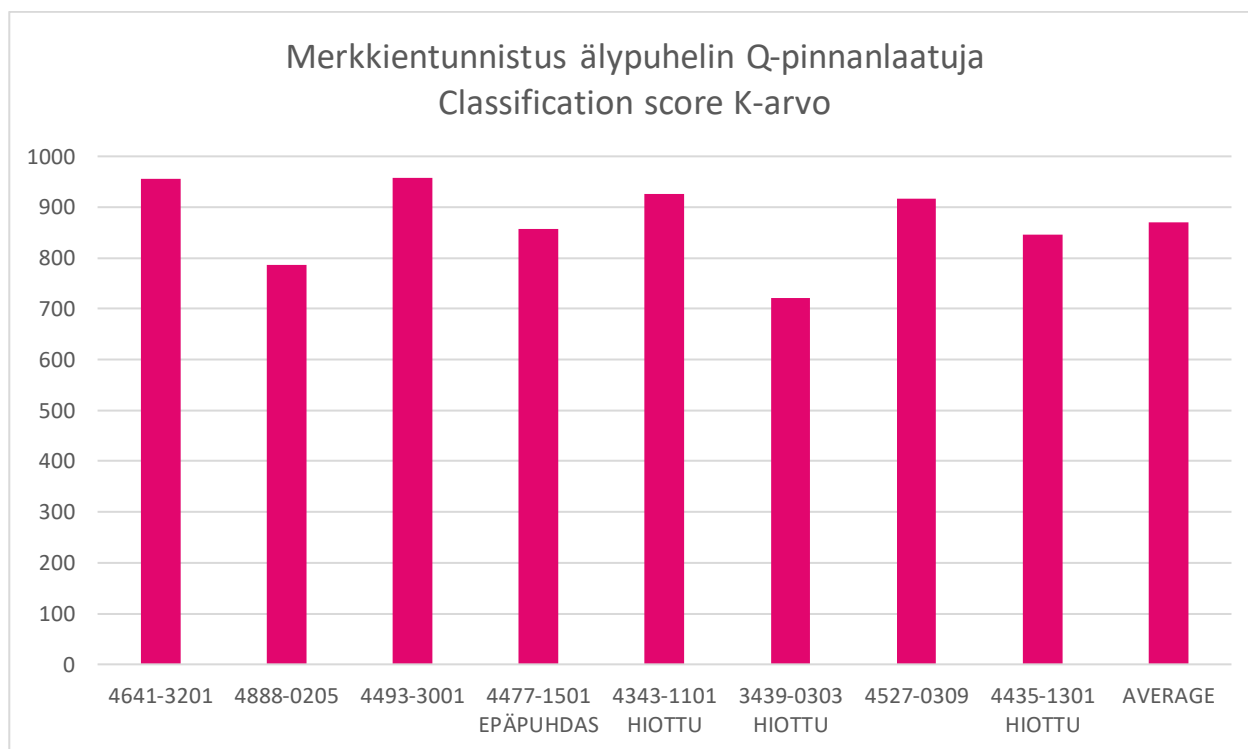


Kuvio 111. Q-pinnanlaatu

Kuviossa voidaan havaita, että kahdella levyllä merkkientunnistuksen luokittelu on ollut huonompi kuin muilla. Levyllä 4435-1301 HIOTTU jäi tunnistamatta kaksi merkkiä (numerot 3 ja 1), koska levyn pinta oli voimakkaasti hiottu ja näin ollen merkit erottuivat huonosti. 4477-1501 levyssä oli taas paljon epäpuhtauksia merkkien päällä, joten numeroita 7, 7, 1 ja 5 ei tunnistettu. Muista levyistä tunnistettiin kaikki merkit. Näiden levyjen lisäksi Baslerilla kuvannettiin myös yksi 253MA-pinnanlaadun levy, jossa kaikki merkit tunnistettiin luotettavasti.

Hahmojentunnistuksen keskiarvo luokittelupisteityksien osalta kyseisille levyille oli 935, ja kaikki hahmot tunnistettiin hyvin. Näissäkin havaittiin kuitenkin ongelmia koordinaatiston akselin kääntymisessä itse hahmon, eli "plate no" -merkkijonon suhteen.

Vastaavat testit tehtiin myös älypuhelimien kameralla otetuille kuville, joista **merkkientunnistuksen** osalta pylväsdiagrammi alempana kuviossa 112. Kuvioista voidaan havaita parannusta Baslerin tuloksiin verrattuna. Kameralla otetuista kuvista voitiin tunnistaa jopa voimakkaasti hiotun ja epäpuhtaan levyn merkit. Joissain tunnistetuissa merkeissä oli heikko luokittelupisteitys, mutta algoritmi tunnistoi ne kuitenkin oikein. On kuitenkin huomattavaa, että kameran hyvän tarkkuuden takia algoritmi **tunnisti myös paljon ylimääräisiä merkkejä**, kuten hiontajälkiä ja pinnan epäpuhtauksia. Kaikista testilevyistä saatiin kuitenkin tunnistettua kaikki levynumerot.



Kuvio 112. Q-pinnanlaatuja merkkientunnistuksen luokittelupisteitys älypuhelimien kuvista.

Hahmojentunnistuksen osalta luokittelupisteityksien keskiarvo oli 968,4, ja jokainen hahmo tunnistettiin, mutta tässäkin tapauksessa hahmon koordinaatiston suhteen oli pientä epäluotettavuutta.

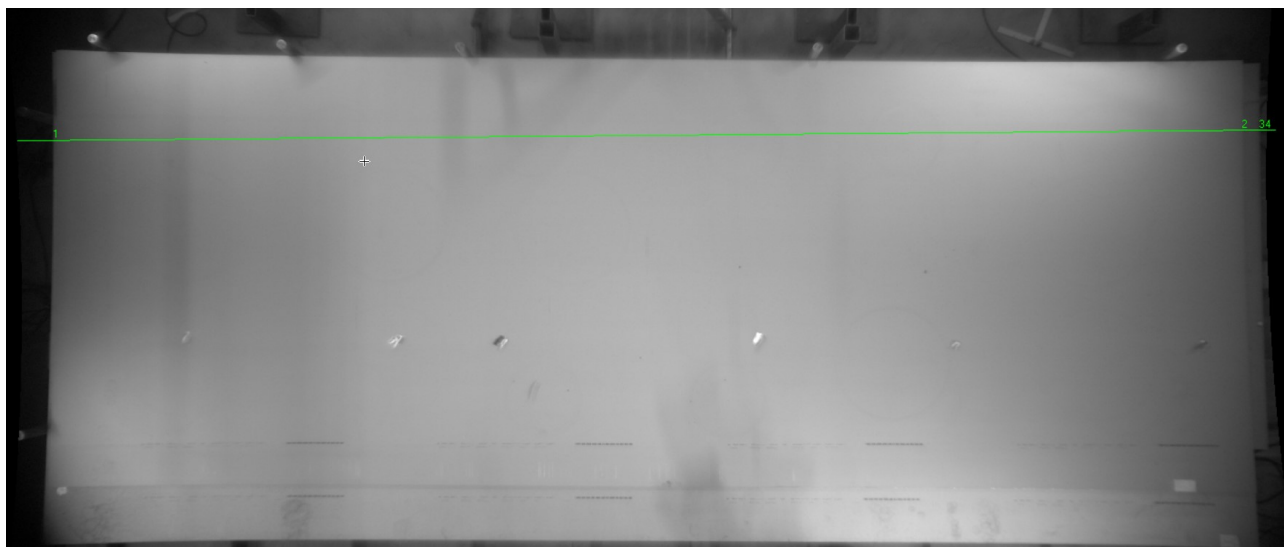
Sekä Baslerin että älypuhelimien kuvista tunnistettiin **viivakoodit** luotettavasti, mikäli hahmontunnistukseen sidottu hakualue osui optimaalisesti viivakoodin ympärille. Testeissä havaittiin, että isomman hakualueen määrittäminen ei enää löytänyt viivakoodia. Kaikki viivakoodit siis tunnistettiin testilevyistä, pois lukien levy 4527-0309, jossa viivakoodi oli loppuosasta vioittunut tehtaan stanssausvirheen johdosta, ja se jouduttiin hylkäämään tuloksista.

CPP/1D-pinnanlaaduista otettiin myös testikuvat Baslerilla ja älypuhelimien kameralla. Testeissä oli käytössä 5 levyä, joista tunnistettiin hahmot ja merkit.

Baslerilla näiden viiden levyn **merkkientunnistuksen** keskiarvo oli 942,6 ja **hahmojentunnistuksen** osalta 975,4. Älypuhelimien vastaavat olivat merkkientunnistuksella 856,25 ja hahmojentunnistuksella 989. Huomionarvoista tässä oli, että älypuhelimien kuvien merkkientunnistukset tehtiin samoilla merkeillä kuin Baslerin kuville opetetuissa. Tämä selittää osaltaan älypuhelimien kuvien alemman keskiarvon merkkientunnistuksen osalta. Älypuhelimien kuvissa hahmontunnistus opetettiin omalla "AJA"-logollaan, mikä selittää taas hieman parempaa pisteytyskeskiarvoa kuin Baslerin vastaavissa.

Jokainen merkki ja hahmo saatiin tunnistettua kummankin kameran kuvista. Joissain merkeissä havaittiin kuitenkin pienempää luokittelupisteystystä, mikä osaltaan laski kokonaiskeskiarvoa varsinkin älypuhelimien kuvissa.

Yksi tärkeimmistä kenttätestien tarkastelun kohteista oli **levyjen äärimittojen mittauksen** luotettavuus. Kohteet eli levyt mitattiin sekä pysty- että vaakasuunnassa. Mittauskohdat olivat aina samassa kohtaa jokaisella levyllä, jotta se vastaisi mahdollisimman paljon todellista tilannetta, jossa mittauskohtaa ei voida vaihtaa. Tulokset arvioitiin mittauspisteen 1 ja 2 välillä, jotka vastaavat levyn alku- ja päätäreunaa eli levyn kokonaismittaa pysty- ja vaakasuunnassa. Alla kuviossa 113 on havainnollistettu levyn mittauskohta vaakasuunnassa. Mittaukset sisältävät kaikki Q- ja CPP/1D-pinnanlaadut, pois lukien 253MA-pinnanlaatu, joka vaatii oman mittausalgoritminsa.



Kuvio 113. Levyn mittauskohta vaakasuunnassa

Testeissä 11/12 **vaakasuunnan** mittauksista onnistui, ja näin ollen onnistumisprosentti oli 91,67 %. Yhden epäonnistumisen aiheutti yksi CPP/1D-pinnanlaadun levyistä, jossa algoritmi tunnisti levyn kirkkaan pinnan heijastuman reunaksi. Valaistus oli vaakasuunnassa myös optimaalinen, koska se aiheutti päällimmäisenä olevan levyn oikeaan reunaan pienen varjostuksen, jonka seurauksena reuna oli helpommin tunnistettavissa. Tämä näkyy myös yllä olevassa kuviossa 113.

Pystysuunnassa vain 6/13 levyn mittauksesta onnistui, joten onnistumisprosentti jäi 46,15 %. Pystysuunnassa mittausalueella oli enemmän levyn epäpuhtauksia ja hiontajälkiä, jotka ohjelma tulkitsi reunaksi. Mittausalueen alareunassa valaistus ei myöskään ollut optimaalinen, eikä synnyttänyt samanlaista varjostusta kuin vaakasuunnan mittausalueella. Tämän seurauksena päällimmäisenä olevan levyn reuna ei voitu erottaa kunnolla alla olevasta levystä, johtuen samantyyppisistä harmaasävyarvoista.

Blobien eli tehtaan hiontajälkien tunnistettavuus, sekä niiden sijaintien ja kokojen mittaus onnistui testilevyissä suhteellisen luotettavasti. Joitain epäpuhtauksia ja kosteusjälkiä levyjen pinnassa oli haastavaa kynnystä pois, ilman että itse tärkeimmät eli hiontajäljet jäisivät näkyviin.

Kenttätestien onnistumisprosentit ovat kuvattuna alempana taulukossa 5. Mukana ovat Baslerin, että älypuhelimien kameran tulokset, sekä FOV2-kuva-alueella suoritettujen levyn äärimittojen mittausten prosentit.

Kenttätestien data, mukaan lukien asetusrivot Vision Assistantille, ovat tämän opinnäytetyön liitteessä 2 olevissa Excel-tiedostoissa.

Taulukko 5. Kenttätestien onnistumisprosentit.

Kenttätestien hahmojen ja merkkientunnistuksien onnistumisprosentti BASLER						
Q-pinnanlaatu	Tunnistettavat		Tunnistettu	% tunnistetuista		
Mattapinta ja hiottu	63	merkkiä	58	92,06349		
253MA	9	merkkiä	9	100		
Hahmontunnistukset yhteensä	8	hahmoa	8	100		
Viivakoodit	8	viivakoodia	7	87,5		
				AVERAGE	94,891	
Kenttätestien hahmojen ja merkkientunnistuksien onnistumisprosentti BASLER						
CPP/1D- pinnanlaatu	Tunnistettavat		Tunnistettu	% tunnistetuista		
CPP/1D	40	merkkiä	40	100		
Hahmontunnistukset yhteensä	5	hahmoa	5	100		
				AVERAGE	100	
Kenttätestien hahmojen ja merkkientunnistuksien onnistumisprosentti ÄLYPUHELIN						
Q-pinnanlaatu	Tunnistettavat		Tunnistettu	% tunnistetuista		
Mattapinta ja hiottu	72	merkkiä	72	100		
253MA	9	merkkiä	9	100		
Hahmontunnistukset yhteensä	9	hahmoa	9	100		
Viivakoodit	8	viivakoodia	8	100		
				AVERAGE	100	
Kenttätestien hahmojen ja merkkientunnistuksien onnistumisprosentti ÄLYPUHELIN						
CPP/1D- pinnanlaatu	Tunnistettavat		Tunnistettu	% tunnistetuista		
CPP/1D	40	merkkiä	40	100		
Hahmontunnistukset yhteensä	5	hahmoa	5	100		
				AVERAGE	100	
Lyvyjen äärimittojen mittausten onnistumisprosentit						
Q- ja CPP/1D- pinnanlaadut	Tunnistettavat		Tunnistettu	% tunnistetuista		
Vaakasuunta	12	mittausta	11	91,67		
Pystysuunta	13	mittausta	6	46,2		
				AVERAGE	68,91	

7.3 Laboratorio- ja kenttätestien yhteenveto

Laboratorio- ja kenttätestejä erotti toisistaan pääasiassa käytetty laitteisto, ympäristön olosuhteet sekä testiosat, eli kohteet. Tämä näkyi laboratoriotestien mittauksien tuloksissa keskimäärin parempana keskiarvona, ja lisäksi pystyttiin vaivattomimmin tunnistamaan kaikki merkit ja hahmot. Toisaalta erilaisia hahmoja ja merkkejä oli kenttätesteissä enemmän kuin laboratoriossa, jossa oli vain muutama erilainen levynumero, mutta ne olivat aseteltuina eri kulmiin ja kohtiin.

Laboratoriossa käytetyt kamera, kenno, objektiivi ja valaistus olivat mitoitettu optimaalisemmin kuin kenttätesteissä käytetyt. Tämä johtui kenttätesteissä käytetystä laajemmasta kuva-alueesta, erityisesti FOV2:sta, jossa olisi tarvittu tehokkaampaa ja tasaisempaa valaistusta sekä suurempaa kennoa ja laadukkaampaa objektiivia. FOV1:ssä olisi laskennallisesti tarvittu myös suuremman resoluution omaavaa kameraa ja kennoa, mutta merkkien, hahmojen ja viivakoodien tunnistus pystyttiin silti suorittamaan suhteellisen onnistuneesti, vaikka kameran resoluutio ei riittänyt 2x varmuuskertoimelle. Älypuhelimien kuvista voitiin kuitenkin erottaa joissain tapauksissa paremmin merkkien ja hahmojen piirteitä, mikä viittaa siihen, että korkeamman resoluution omaava kamera olisi sopivampi tehtävään.

Kenttätesteissä koettiin useita haasteita, kuten ympäröivän valon epäsuora pääsy kuvauskohteeseen, mikä aiheutti varjostumia kuvattavalle alueelle. Lisäksi joillain testilevyillä oli pinnalla epäpuhtauksia, vikoja (kuten epätarkkoja viivakoodeja) tai voimakasta hiontaa, mikä vaikeutti merkkien, hahmojen, viivakoodien ja levyn äärimittojen mittaamista ja johti joidenkin testilevyjen hylkäämiseen mittaustuloksista. Lisäksi kenttätesteissä kamera ei ollut täysin staattinen, vaan nosturissa oli jatkuvaa pientä heiluntaa, mikä aiheutti pientä epätarkkuutta kuviin. Tämä korostaa tarvetta säätää kameran valotusaikaa siten, että heilunnan aiheuttama epätarkkuus voidaan minimoida.

Yhteenvetona testeistä voidaan todeta, että ne vastaavat tämän tutkimuksen tietoperustassa luvussa 3.4 käsiteltyä testausvaihetta, jossa korostetaan, että laboratoriossa tehtyjen testien onnistuminen ei välttämättä kuvaa täysin todellista tuotantokäyttöä. Esimerkkinä tästä on kuva-alueen kalibrointi, joka onnistui laboratoriossa suhteellisen vaivattomasti, mutta kenttäolosuhteissa siihen liittyi suuria haasteita. Tämä johti muun muassa referenssipisteen virheelliseen sijoittumiseen FOV2-alueella, koska levyn reunat olivat vääristyneet ja siten tunnistettu virheellisesti.

7.4 Vastaukset tutkimuskysymyksiin

Tämän tutkimuksen perusteella pohdittiin vastauksia määriteltyihin tutkimuskysymyksiin. Kysymykset ja niiden vastauksia selvennetään seuraavaksi.

Kuinka nykyisillä konenäköjärjestelmillä voidaan todentaa materiaalitietoja ja virheitä levyn pinnasta?

Tutkimuksessa kävi ilmi, että nykyisillä konenäköjärjestelmillä voidaan luotettavasti tunnistaa materiaalitietoja ja havaita virheitä levyn pinnassa. Erityisesti kameroiden ja niiden tekniikan, erityisesti CMOS-kennojen, kehittyminen on auttanut tarkkuusvaatimusten saavuttamisessa. Vaikka tässä tutkimuksessa ei käytetty CCD-kennoja, CMOS-kennoilla saavutettiin vähintäänkin tyydyttäviä tuloksia. On kuitenkin tärkeää huomata, että vanhat säännöt kuvantamisessa ovat edelleen voimassa, ja kuvausgeometria, kuten optiikan valinta ja siihen liittyvät yksityiskohdat, on suunniteltava ja valittava huolellisesti.

Kuinka luotettava tämä todennus on, kun kuvauskohteen paikka muuttuu?

Kuvauskohteen, eli tehtaan musteleimauksen tai stanssauksen, sijainti voi hieman vaihdella FOV1-alueella pituussuunnassa. Tämän vuoksi kuvausalueen pituudeksi on määriteltävä suurempi alue (1500 mm), jotta voidaan varmistaa stanssauksen osuvan kuva-alueelle. Tämä ei kuitenkaan aiheuta haasteita kuvantamisen onnistumiselle, kunhan käytetään oikeanlaista kameraa ja optiikkaa tehtävään.

FOV2-alueen kuvauskohde riippuu täysin nosturin sijoittumisesta kohteen yläpuolelle. Tässä tutkimuksessa havaittiin kuitenkin, että nosturi asemoituu aina keskelle levyä riippuen sen pituudesta ja leveydestä. Tämä tarkoittaa, että FOV2-alueen kuvantaminen tapahtuu aina samasta paikasta, ja levyn mitoitus voidaan tehdä vakioidusta paikasta.

Kuinka ympäristö vaikuttaa todentamiseen, esimerkiksi valaistus?

Tutkimuksessa havaittiin, että valaistuksen toteutus ja sen onnistuminen ovat keskeisiä tekijöitä kuvantamisen ja kuvankäsittelyn onnistumisessa. Valaistuksen voimakkuuden ja intensiteetin lisääminen voi auttaa vähentämään hallin valaistuksesta aiheutuvia häiriöitä, mutta on vaikeampaa estää esimerkiksi auringonvalon pääsyä kohteeseen. Tasainen valaistus on erityisen tärkeää, erityisesti silloin kun kuvantaminen tapahtuu ilman hallin valoja, kuten yöllä.

Lisäksi ympäristön haasteisiin kuuluvat lika, pöly ja materiaalin pinnanlaatu. Kaikki tunnistettavat kohteet on oltava pinnaltaan virheettömiä ja laadultaan hyviä, jotta koko prosessi voidaan suorittaa luotettavasti.

Mitkä ovat järjestelmän hyödyt ja kustannukset?

Tämän tutkimukset tulokset osoittavat, että materiaalitietojen ja virheiden todentamisesta voitaisiin hyötyä tulevaisuudessa **laadullisesta näkökulmasta** katsoen. Mikäli asiakas pystyy määrittelemään tarkat vaatimukset pinnanlaadun laatustandardien tai tuotteiden suhteen, voitaisiin toimivalla konenäköjärjestelmällä täyttää nämä vaatimukset. Laadulla voidaan viitata siis esimerkiksi koko laatuprosessiin, eli kuinka esimerkiksi materiaalinhallinta on toteutettu. Koska nykyään Outokummulla materiaalin vastaanottotarkastus tapahtuu ihmisten toimesta, voitaisiin automaatiolla parantaa laatuprosessia sekä laadunvarmistamista ja näin ollen kasvattaa asiakkaiden luottamusta.

Luvussa 2.3. käsitellään **laaduntarkastusta**, jossa mainitaan, että se auttaa laadunvarmistuksessa, vähentää tuotantokustannuksia, romua, sekä muita syitä johtuen puutteellisesta työstä. Laaduntarkastuksen tärkeimpiä tavoitteita on muun muassa estää huonolaatuisten tuotteiden pääseminen asiakkaalle asti ja näin ollen suojella mainetta. Lisäksi mainitaan tarkastuksen tarkoituksista muun muassa, että tavoitteena on erottaa huonot erät ja kappaleet hyvistä. Tässä tutkimuksessa selvisi, että konenäkö on ylivoimainen toimiessaan verrattuna ihmisen tekemiin havaintoihin. Pitää kuitenkin muistaa, että konenäkö on vain kone ja se tekee ja toimii, niin kuin sille on opetettu tai ohjelmoitu.

Laadun määrittelystä ja sen parantamisesta syntyy kuitenkin aina kustannuksia. Tässä tapauksessa konenäköjärjestelmä on samalla myös laadunparannusprosessi, josta aiheutuu kustannuksia sen suunnittelusta, hankinnasta, toteutuksesta ja ylläpidosta. Toisaalta asiaa voidaan pohtia myös siltä kannalta, että mitä tapahtuu, jos nykyinen laadunvarmistusprosessi pettää ja asiakkaalle lähetetään viallisia tuotteita: Syntyy ulkoisia ja sisäisiä virhekustannuksia reklamaatioiden takia, joita käsiteltiin tämän tutkimuksen luvussa 2.2. Nämä virhekustannukset voivat aiheuttaa suurimmillaan ruostumattomien terästen tuotteiden uudelleen tekemisessä monien **tuhansien eurojen kustannukset**, koska materiaali on hinnaltaan moninkertainen verrattaessa esimerkiksi perinteisiin hiiliteräksiin. Lisäksi ei pidä unohtaa maineen menetyksestä johtuvia haittoja, joilla voi olla epäsuorasti huomattavasti suurempiakin kustannuksia.

Konenäköjärjestelmän kustannukset tämän tutkimuksen näkökulmasta syntyvät laitteiston hankinnasta, toteutuksesta ja ylläpidosta. Tämän tutkimuksen johdosta suunnittelu on siis jo osittain tehty. Tässä tutkimuksessa konenäköjärjestelmä sisältää kamerat, optiikat, valaistukset, sekä ohjelmiston. Lisäksi projekti toteutettiin tietokonepohjaisena järjestelmänä, joten tarvittaisiin myös tietokone, jossa ohjelman ohjaus, kuvien prosessointi ja jatkokäsittely tapahtuisi. Lisäksi kustannuksia saattaa aiheutua lisää jatkotoimenpiteistä, joita käsitellään tämän tutkimuksen luvussa 8.

Listataan tämän tutkimuksen perusteella vaadittavia konenäköjärjestelmän hintaesimerkkejä alla taulukossa 6. Kokonaiskustannukseksi järjestelmän hankintahetkellä syntyisi siis noin 11000 euroa.

Taulukko 6. Konenäköjärjestelmän kustannusarvio.

Kuva-alue		KAMERAT	kpl	Hinta yhteensä/euroa	
FOV2	BFS-U3-244S8M-C, USB 3.1 Blackfly® S, Monochrome Camera https://www.edmundoptics.com/p/bfs-u3-244s8m-c-usb-31-blackflyr-s-monochrome-camera/49877/		1	2414	
FOV1	Sama kuin FOV2		1	2414	
		OPTIIKAT			
FOV2	Basler Lens C11-0824-12M-P f8.5mm https://www.baslerweb.com/en/shop/basler-lens-c11-0824-12m-p-f8-5mm/?lens_lensmount=C-mount&min_focallength=8+mm&lens_sensor_format=1.1%22&sort=position		1	259	
FOV1	Fujinon Lens CF8ZA-1S F1.8 f8mm 1.2" https://www.baslerweb.com/en/shop/fujinon-lens-cf8za-1s-f1-8-f8mm-1-2/?lens_lensmount=C-mount&min_focallength=8+mm&pixel_pitch=2.74+%C2%B5m&sort=position		1	789	
		VALAISTUS			
FOV2/FOV1	LED-teollisuusvalaisin NEXFORCE 80W 150cm 4000K https://valotehdas.fi/kauppa/led-teollisuusvalaisin-nexforce-80w-150cm-4000k-12000lm-ip65/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAuYuvBhApEiwAzq_YiasmFKFN5gQaO_8oopUOo1BdYVOCMSGeRnMSUSupFio3i1xq3cO7PxoCyL0QAvD_BwE		6	810	
		KONENÄKÖOHJELMISTO			
	Vision development module developmpnt license https://www.ni.com/fi-fi/shop/product/vision-development-module.html?partNumber=788427-35		1	2200	Lisenssi/vuosi
		MUUT		2000	Arvio
	Kameran ja optiikan suojaus, kaapelointitarvikkeet, valaisimien kiinnikkeet, integrointi, Tietokone ohjelmistolle				
			Yhteensä	10886	

Kameroiden ja optiikoiden suhteen löydettiin lähimpänä olevat laitteet laitetoimittajien verkkosivuilta, mitä tässä tutkimuksessa mitoitettu konenäköjärjestelmä vaatisi. Esimerkiksi valitulla kameramallilla resoluutio on 24,50 megapikseliä, mikä riittää hyvin FOV2:lle, mutta FOV1:n suhteen 0,28 mm erottelukyky ei olisi aivan optimaalinen, mutta vastaisi kuitenkin lähes vaadittua 0,25 mm tarkkuutta. Optiikoista taas FOV1:lle valittu Fujinonin linssi on tarkoitettu korkearesoluutioiselle kuvantamiselle, mutta optiikan tuumakoko 1.2" ei vastaa vaadittua 4/3"-kokoa. Konenäköjärjestelmän kameran ja optiikan valintaa ja saatavuutta täytyisi siis selvittää vielä tarkemmin esimerkiksi konenäköjärjestelmien toimittajien kanssa.

Valaistuksen esimerkiksi valittiin hieman enemmän valotehoa ja intensiteettiä tuottava valaisin, joita lisättäisiin kaksi kappaletta enemmän sovelluskohteeseen. Näin saataisiin katettua kuvannettava alue tasaisemmin.

Konenäköohjelmiston esimerkiksi valittiin tässäkin tutkimuksessa käytetty National instrumentsin Vision Development Module vuosilisenssillä. Tämä lisenssi sisältää sovelluskehityksen ja esimerkiksi LabVIEW-ohjelmiston, jossa varsinainen kommunikointi ulkoisen järjestelmän kanssa tapahtuu. Tästä vaihtoehdosta koituu siis vuosittaisia kustannuksia 2200 euroa.

Lisäksi arvioitiin myös muut kustannukset, mitä järjestelmän asennuksesta ja käyttöönotosta syntyisi.

Lopullisia hyötyjä järjestelmän käyttöönotosta voidaankin mitata monesta näkökulmasta ja hyödyt riippuvat siitä, kuinka korkealle laatu arvostetaan. Mikäli järjestelmä saataisiin toimimaan niin, että se hoitaisi tarkastuksen automaattisesti alusta loppuun, välttäisi tällä mahdollisesti suurilta sisäisiltä ja ulkoisilta kustannuksilta. Järjestelmän kustannukset voisivat maksaa itsensä takaisin jo 1-2 suuremmasta reklamaation käsittelystä ja tuotteiden uudelleen tekemisestä liittyen materiaalin pintavirheisiin.

8 Pohdinta

8.1 Tutkimuksen yhteenveto

Tutkimuksen valmistelu ja tavoitteiden määrittely aloitettiin kesäkuussa 2023. Alun perin oli pyrkimyksenä saada toimiva konenäköjärjestelmä toimeksiantajan käyttöön keväällä 2024. Kuitenkin tutkimuksen edetessä havaittiin, että konenäköjärjestelmien integrointi tuotantoon vaati odotettua enemmän huolellista suunnittelua ja yksityiskohtiin perehtymistä. Integrointi on vahvasti sidoksissa sovelluskohteeseen ja tarvittaviin toimintoihin, ja selvisi, että pelkästään kuvantaminen ja kuvien prosessointi ovat valtava työ, joka vaatii runsaasti testausta suurilla määrillä testiosia.

Konenäköjärjestelmän toteutus ei ole yksinkertaista ilman tarkkaa tavoitteiden määrittelyä. Toteutus edellyttää syvällistä perehtyneisyyttä, kokemusta ja ammattitaitoa kameratekniikassa, optiikassa, kuvausgeometriassa ja valaistuksessa. Lisäksi tarvitaan vahvaa ohjelmointitaitoa ja erilaisten kuvankäsittelyalgoritmien tuntemusta. Tämän tutkimuksen myötä ymmärrettiin näiden osa-alueiden keskinäisen riippuvuuden merkitys lopputuloksen kannalta.

Tutkimuksen tuotoksena saatiin haasteista huolimatta varsin hyviä tuloksia, kun tutkimus rajattiin koskemaan ainoastaan materiaalitietojen ja laatuvirheiden todentamista. Tietoperustassa käsiteltiin aiheita, kuinka aiemmissa tutkimuksissa oli teräslevyjen pintavirheitä todennettu, sekä minkälaisia menetelmiä niissä oli käytetty. Tässä tutkimuksessa pyrittiin käyttämään samantyyppisiä kuvankäsittelymenetelmiä, mutta näistä ei havaittu olevan suurempaa hyötyä toteutuksen kannalta,

koska suurin osa menetelmistä oli esimerkiksi soveltuvia teräslevyjen valmistusprosessin valvontaan, jossa levykelat liikkuvat linjalla suurella nopeudella. Tietoperustassa käsiteltiin myös muita perusvaatimuksia mitä onnistuneen konenäköjärjestelmän toteutuksessa vaaditaan. Todettiin että kaikki käsitelty heijastui myös tutkimuksen käytännön toteutukseen, eikä ristiriitoja teorian ja käytännön välillä juurikaan ollut. Merkille pantavaa oli kuitenkin esimerkiksi pienimmän havaittavan piirteen varmuuskertoimen määrittäminen. Merkkejä ja hahmoja pystyttiin todentamaan suhteellisen luotettavasti ilman vaadittavaa varmuuskerrointa. Toisaalta varmuuskertoimella saadaan tuloksiin parempaa luotettavuutta.

Tutkimuksessa onnistuttiin tuottamaan dataa mahdollisesti tulevaisuudessa hankittavaan konenäköjärjestelmään. Tämä data antaa vastauksia siihen, minkälaisia haasteita prosessissa voi olla. Data olisi kuitenkin ollut tuloksiltaan luotettavampaa, mikäli kuvausgeometrian kokonaisuus olisi ollut optimaalisempi tehtävään. Tällä viitataan valaistuksen onnistumiseen muun muassa FOV2-alueella, sekä varjostuksen synnyttämiseen kuva-alueen vasemmassa alanurkassa. Kamerateat, niiden kennot, sekä optiikat eivät myöskään olleet vaadittavien mitoitusmuotojen mukaisia. Tietoperustassa pohdittiin näiden komponenttien mitoitusmuotoja ja niiden määrittämisessä tärkeys heijastui myös käytännön testien onnistumiseen.

Tässä opinnäytetyössä käytettiin tutkimuksellisen kehitystyön menetelmää. Tavoitteena oli saada aikaan konkreettisia tuloksia käytännön kautta, jota tuettiin teoreettisella tiedolla. Tutkimuksen aikana jouduttiin kulkemaan myös paljon uudella ja tuntemattomalla alueella, mikä osaltaan lisäsi epävarmuutta tutkittavaan aiheeseen liittyen. Tämän vuoksi tutkimuksen toteuttajalta vaadittiin aloitteellisuutta ja kykyä innovoida muuttuvissa tilanteissa.

Tämän tutkimuksen luotettavuutta rajoitti kenttätestien testiosien, eli teräslevyjen saatavuus testien toteutushetkellä. Toimeksiantajan varaston koko oli testien aikaan suhteellisen pieni, ja erilaisia variaatioita pinnanlaadusta oli niukasti saatavilla. Tämä rajoitti suuren otosmäärän saatavuutta ja näin ollen luotettavuutta. Lisäksi koekappaleina käytettiin jo valmiiksi varastoituja levyjä, jotka olivat pinnaltaan pölyisiä ja likaisia, mikä myös vaikutti luotettavuuteen. Normaalityössä levyt lähetettäisiin varastoon suoraan paketista, jolloin niiden pinta on yleensä täysin vapaa epäpuhtauksista ja näin ollen luotettavammin todennettavissa konenäköjärjestelmän avulla. Voidaankin päätellä, että

tulevaisuudessa näistä epäluotettavuustekijöistä päästään eroon, kun levyt lähetetään varastoalueelle virheettöminä.

Tämän tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää teollisuuden eri aloilla tai vastaavissa toiminnoissa. Tutkimuksen tulokset antavat kuvan siitä, millaisia haasteita ruostumattoman teräslevyn musteleimauksien ja hiontavirheiden todentamisessa esiintyy ja miten todentaminen voidaan käytännössä toteuttaa. Tulosten merkitys auttaa teollisuutta siirtymään askeleen lähemmäksi automatisoituja prosesseja ja innovaatioita sekä parantamaan laadunvalvontaa.

8.2 Tutkimuksen luotettavuus

Tutkimuksen luotettavuuden arvioinnissa keskeistä on, että se tuottaa luotettavia vastauksia tutkimuskysymyksiin. Tämä edellyttää, että tutkimuksessa mitataan oikeita asioita ja että sille on asetettu selkeät ja täsmälliset tavoitteet, mikä estää harhapoluille eksymisen ja väärään suuntaan kohdistuvan tutkimuksen. (Heikkilä 2014, 27.)

Tutkimuksen **validiteetilla eli pätevyydellä** kvantitatiivisessa tutkimuksessa tarkoitetaan systemaattisen virheen puuttumista, eli toisin sanoen systemaattista virhettä ei ole. Mikäli käytetään validia mittaria, voidaan saada keskimääräisesti oikeita tuloksia. Siksi onkin tärkeää määrittää käsitteet ja mittarit huolellisesti, jotta tulokset voivat olla valideja. Lisäksi mitattavan perusjoukon on oltava määrältään riittävä, jotta tutkimus olisi validi. (Mts. 27.)

Reliabiliteetilla eli luotettavuudella tarkoitetaan taas tulosten tarkkuutta. Luotettavuuden kannalta onkin olennaista, että tulokset eivät ole sattumanvaraisia. Luotettavuutta voidaan mitata sen toistettavuuden suhteen. Tämä tarkoittaa sitä, että tutkimus on **toistettavissa** samanlaisin tuloksin. Kvantitatiivisessa tutkimuksessa tutkijan on oltava tarkka ja kriittinen, jolloin voidaan välttää virheiden syntyminen tietoja kerätessä, syötettäessä, käsiteltäessä ja tuloksia tulkitessa. On myös huomattavaa, että tutkijan on käytettävä sellaisia analysointimenetelmiä, jotka hän hallitsee hyvin. (Mts. 28.)

Tämän tutkimuksen **validiteetti** pääosin määriteltiin testiosien perusteella, joka toimi mitattavana perusjoukkona. Vaikka perusjoukko oli osittain vajavainen, se antoi silti kokonaiskuvan siitä, kuinka

hyvin järjestelmä suoriutui annetusta tehtävästä. Tutkimuksessa mitattiin oikeita asioita, kuten levynumeroiden ja hahmojen pisteytysluokkia, blobien määrää sekä levyjen äärimittojen mittaamista, jotka olivat olennaisia mittareiden luomisessa. Tämä vahvistaa tutkimuksen validiteettia, koska se kohdistui olennaisiin ilmiöihin ja käsitteisiin.

Tutkimuksen **reliabiliteetti** perustui testien toistettavuuteen konenäköohjelmaa käytettäessä. Tämä oli riippuvaista siitä, kuinka monta yksittäistä merkkiä eli levynumeroa konenäköohjelmiston algoritmi oli opetettu tunnistamaan. Mikäli opetus oli puutteellista, ilmeni toistettavuudessa ongelmia, erityisesti ohjelman uudelleenkäynnistyksen ja skriptin lataamisen yhteydessä. Sama ilmiö havaittiin myös hahmojen tunnistuksen osalta. Tutkimuksessa käytetyt analysointimenetelmät hallittiin hyvin, ja tiedon käsittely toteutettiin huolellisesti ja järjestelmällisesti. Kaikki parametrit, toteutusarvot, kuvat ja skriptit on myös tallennettu tämän opinnäytetyön liitteisiin, mikä mahdollistaa vastaavien testien toistettavuuden.

8.3 Tutkimuksen eettisyys

Tutkimuksen eettisyyden kannalta tässä opinnäytetyössä noudatettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun käyttämää yleistä ammattikorkeakoulujen ohjetta. Ohjeet perustuvat muun muassa voimassa olevaan lainsäädäntöön sekä tiedeyhteisön kansainvälisiin ja kansallisiin tutkimuseettisiin periaatteisiin, linjauksiin ja suosituksiin (Opinnäytetöiden eettiset suositukset 2020). Opinnäytetyössä pyrittiin suojaamaan kaikki toimeksiantajan luottamuksellinen tieto sekä ammatilliseen toimintaan liittyvät arkaluontoiset yksityiskohdat. Toimeksiantajan työntekijöiden henkilötietoja ei tuotu esille, eikä heitä voitu tunnistaa toimenkuvan perusteella.

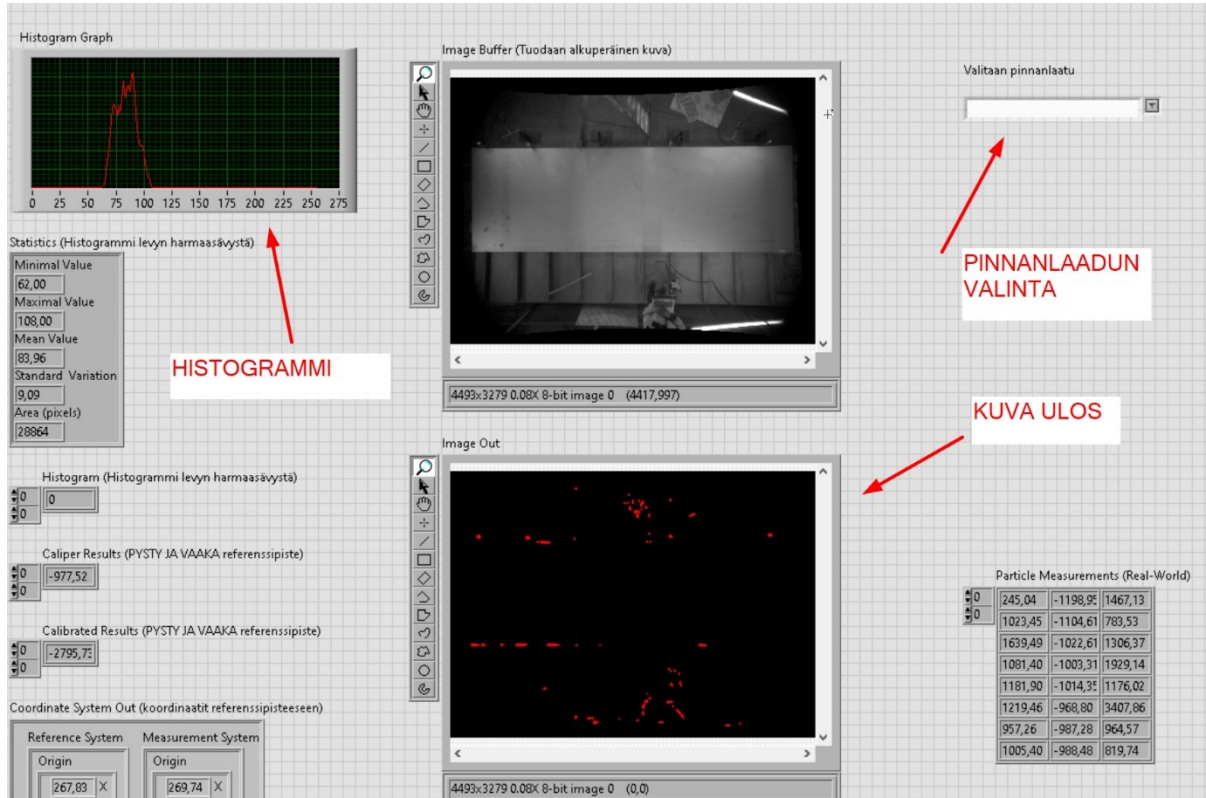
Lisäksi opinnäytetyön tekijän ja toimeksiantajan välillä solmittiin salassapitosopimus tutkimuksen lopputuloksista saadun yksityiskohtaisen teknisen datan kannalta. Tämä data liitettiin tämän opinnäytetyön liitteisiin. Lisäksi aineistonhallinnan kannalta tehtiin aineistonhallintasuunnitelma, jotta aineisto ei pääse ulkopuolisten saataville. Aineistonhallintasuunnitelma ja salassapitosopimus ovat myös tämän opinnäytetyön liitteessä 3.

8.4 Jatkotoimenpiteet konenäköjärjestelmän toteutuksen näkökulmasta

8.4.1 Konenäkösovelluksen integrointi ulkopuoliseen järjestelmään

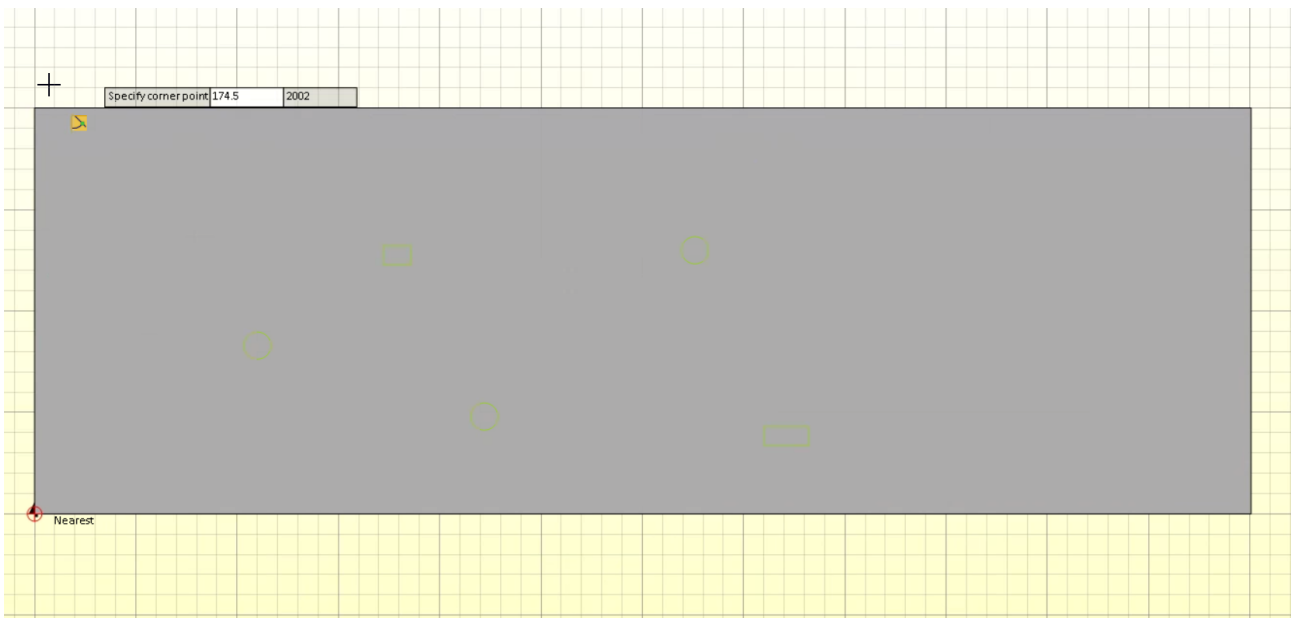
Tässä tutkimuksessa suoritettiin ainoastaan testejä Vision Assistant -ohjelmalla ja tulkittiin niiden tulokset sekä niiden luotettavuus. Lopullisen konenäkösovelluksen toteuttaminen vaatii kuitenkin enemmän ohjelmointityötä, erityisesti siksi, että sovelluksen on pystyttävä kommunikoimaan ulkoisen järjestelmän kanssa. Tässä tapauksessa ulkoinen järjestelmä on automaattialueen logiikka ja tuotannonohjausjärjestelmä Nestix. Tämä integrointi voi olla kuitenkin suuri ja haasteellinen projekti, minkä vuoksi se on rajattu tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.

Kommunikointi pystytään kuitenkin toteuttamaan tässä tutkimuksessa mainitun LabVIEW-ohjelman avulla, joka tulisi hankittavan Vision Development Modulen mukana. Ohjelma on siis myös graafinen käyttöliittymä, jossa on käyttöliittymäpuoli (engl. front panel) ja lohko-kaaviopuoli (engl. block diagram). Tässä tutkimuksessa perehdyttiin myös hieman tähän ohjelmaan, joten hahmotetaan alla kuviossa 114 esimerkki käyttöliittymäpuolesta.



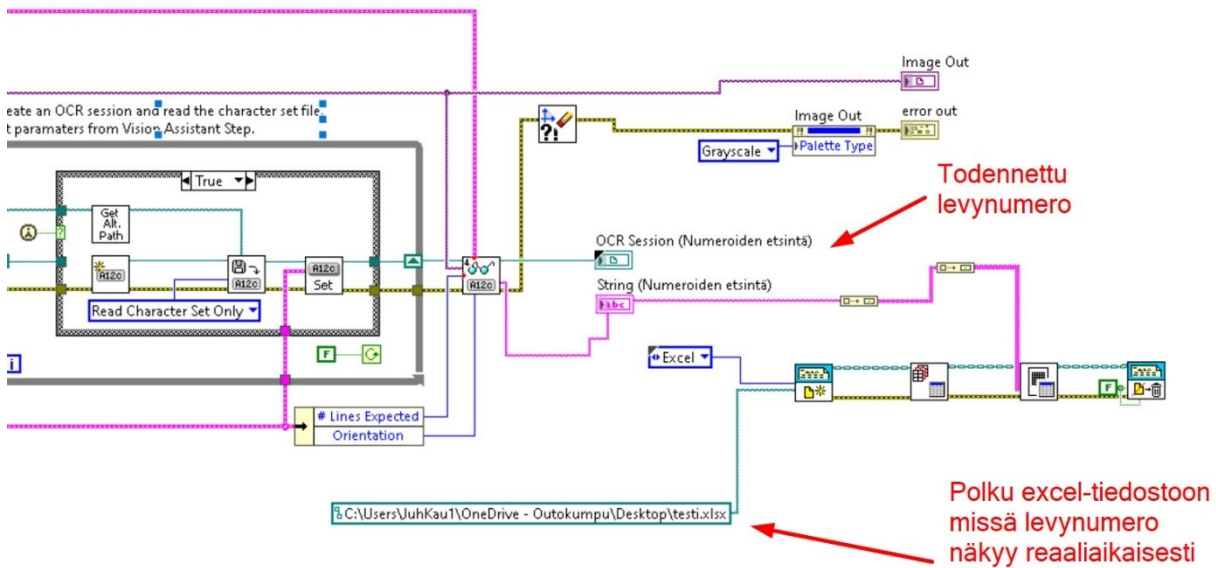
Kuvio 114. LabVIEW'n käyttöliittymä.

Tässä kuviossa on esimerkkinä, kuinka skripti jollekin pinnanlaadulle voitaisiin valita. Valinta tapahtuisi pinnanlaadun harmaasävyarvojen perusteella (histogrammi). Kuviossa nähdään myös ”image out” -kohdassa blobien sijainti kuvassa, sekä sen oikealla puolella ”particle measurements” -taulukko, jossa näkyy blobien reaali maailman mitat ja sijainnit levyllä. Nämä mitat ja sijainnit olisi siis tarkoitus saada näkyviin tuotannonohjausjärjestelmä Nestixin graafisessa sijoitteluohjelmassa, jossa blobit näkyisivät sijoittelijalle, eli leikkausohjelman tekijöille visuaalisesti levyllä. Alla kuviossa 115 on esimerkkinäkymä Nestixin sijoitteluohjelmasta, johon on hahmotettu, kuinka blobien sijainnit ja koot näkyisivät levyllä. Näin asiakkaiden osien sijoittelija voisi ”väistellä” nämä blobit ohjelman teossa ja vialliset osat eivät koskaan päätyisi asiakkaalle asti. Blobit kuvattuna vihreinä alueina.



Kuvio 115. Blobien kuvitteellinen sijainti Nestixin sijoitteluohjelmassa.

Ohjelmalla voidaan myös siirtää tietoa ulkopuoliseen järjestelmään esimerkiksi Excel-taulukkoon lohkokaaaviopuolelta. Tämä on hyödyllistä, kun halutaan verrata esimerkiksi todennettua levynumeroa Nestixin tietokantaan. Sama voidaan tehdä esimerkiksi viivakoodeille ja kaikille merkeille, jotka voidaan muuttaa numeeriseen muotoon. Alla kuviossa 116 havainnollistettu lohkokaaaviopuolta, jossa todennetaan levynumero ja viedään se ulkopuoliseen ohjelmaan.



Kuvio 116. LabVIEW'n lohkokaaaviopuolta.

LabVIEW-ohjelma on kokonaisuudessaan laaja, ja siinä on lukematon määrä erilaisia toimintoja. Ohjelman hallitseminen vaatii ohjelmointitaitoja sekä ymmärrystä sen toiminnasta. Lopullisessa sovelluksessa Vision Assistantilla generoidut skriptit LabVIEW'n puolelle täytyy ohjelmoida niin, että lopputulos vastaa manuaalista levyjen vastaanottotarkastusta. Tämä on hyvin monimutkainen prosessi, ja esimerkiksi pelkästään pinnanlaadun valinta tai tunnistus voi olla haastavaa riippuen siitä, miten se on toteutettu.

Ohjelmoinnin lisäksi on tärkeää harkita fyysisen kommunikoinnin toteuttamista, kuten kaapelointia. Esimerkiksi kamerasignaalien on saatava signaali siitä, milloin kuva otetaan. Kamera voidaan laukaista myös ohjelmallisesti, esimerkiksi erillisellä tietokoneella, jossa sovellusta käytetään. Tämä tietokone voitaisiin sijoittaa imukuppinostimen rungossa olevaan sähkökaappiin, josta luotaisiin langaton etäyhteys toiseen käyttöjärjestelmään. Tämä ratkaisu olisi helpoin, koska esimerkiksi USB-C-yhteyden omaava kamera saisi virransyötön ja signaalit tätä kautta. Lisäksi kaapelin pituus jäisi noin 3-5 metriin.

Jos kamera käyttäisi GigE-yhteyttä, verkkokaapelin pitäisi olla useita kymmeniä metrejä pitkä, mikä voisi olla haastavaa käytännössä toteuttaa. Logiikka on kuitenkin suhteellisen vanhaa, joten näiden

kahden järjestelmän kommunikoinnin toteuttaminen saattaisi vaatia muutoksia logiikkaan erilaisilla logiikkakorteilla sekä uudelleenohjelmointia. Tässä tapauksessa toimivuudesta ei ole takeita.

Valaistuksen ohjaamiseksi tarvitaan myös signaali siitä, milloin valot laitetaan päälle ja pois päältä. Koska valaistuksen kaapelointia ei voida yhdistää imukuppinostimeen, se olisi ohjattava erikseen. Yksi vaihtoehto olisi saada signaali imukuppinostimen sijaintitiedoista, esimerkiksi kun nostin saapuu vastaanottovaunun yläpuolelle siirtämään levyjä varastoon. Tämä voisi toimia signaalina valaistuksen päälle kytkemiseksi.

8.4.2 Vaihtoehtoisia tapoja konenäkösovellukselle

Vaihtoehtoisia tapoja toteuttaa konenäköjärjestelmiä ja niiden erilaisia sovelluksia on hyvin usein olemassa, ja ne voivat vaihdella kohteen mukaan. Tässä tutkimuksessa toteutus tehtiin vain yhdellä tavalla monista mahdollisuuksista. Voidaankin todeta, että on tärkeää pohtia erilaisia vaihtoehtoja ja valita sopivin ratkaisu kuhunkin tilanteeseen.

Tämän tutkimuksen kohteen tapauksessa kuvantaminen voitaisiin tehdä esimerkiksi FOV2-alueen suhteen useammalla kuvauskerralla. Käytännössä alue pilkottaisiin esimerkiksi kolmeen osaan, jotka myöhemmin konenäköohjelmistolla yhdistettäisiin yhdeksi kokonaiseksi kuvaksi. Tämä tosin lisäisi prosessin monimutkaisuutta ohjelmoinnissa, sekä aiheuttaisi ylimääräistä liikettä tuotannossa, koska nosturi joutuisi siirtymään useampaan kohtaan. Tällä ratkaisulla voitaisiin välttyä esimerkiksi optiikan aiheuttamien vääristymien syntyemiseltä kuvauskorkeuden ja kuva-alan pienentyessä, sekä kustannuksien nousulta korkearesoluutioisen laitteiston takia.

Toinen vaihtoehto on käyttää matriisikameran sijaan **viivakameraa**. Kamera voisi olla asennettuna joko nosturiin tai kiinteästi vastaanottovaunun reitille, jossa vaunu liikkuisi edestakaisin levyt kyydissään. Nosturin tapauksessa kameran tulisi liikkua koko kohteen yli skannatakseen sen, kun taas vastaanottovaunun reitille sijoitettuna kamera voisi pysyä paikallaan ja skannata levyt niiden kulkiessa ohitse. Kumpikin vaihtoehto kuitenkin lisäisi liikettä ja räsitusta nosturille tai vastaanottovaunulle, ja vaatisi muutoksia automaattivaraston logiikkaan ohjelmallisesti.

Perinteisen laitearkkitehtuurisen tietokonepohjaisen järjestelmän sijaan voitaisiin harkita älykameran käyttöä, joka perustuu tekoälyyn. Tekoälypohjaisilla kameroilla voitaisiin ratkaista tämän tutkimuksen konenäkösovellus eri tavalla. Esimerkiksi Sick Oy:ltä saatiin tämän tutkimuksen aikana esittelyyn tekoälykamera, joka pystyi oppimaan mallikuvista tarvittavan tiedon ja luokitteli itsenäisesti, onko esimerkiksi jokin kappale hyvä vai huono. Tämä lähestymistapa kuitenkin vaati vielä kehitystä, koska kamerasta puuttui esimerkiksi OCR-merkkien tunnistustoiminto, joten se ei ollut täysin sopiva tämän tutkimuksen sovellukseen. Lisäksi tekoälypohjaiset kamerat voivat maksaa riippuen niiden mitoituksesta ja toiminnoista yli 20000 euroa.

Tässä tutkimuksessa merkkien- ja hahmontunnistus koettiin jokseenkin haastavana ja 100 % luotettavuutta tunnistamisesta ei saatu. Voisikin pohtia merkkien muuttamista toisenlaiseen muotoon, esimerkiksi QR-koodiksi. Tämä koodi olisi vaivatonta lukea esimerkiksi tässä tutkimuksessa käytetyllä Vision Assistant -ohjelmistolla. Suurena kysymyksenä tässä on kuitenkin, että kuka tai mikä tämän koodin generoi? Mikäli sen tekee ihminen levyn materiaalitiedoista, niin miten tämä muuttaa alkutilannetta, jossa materiaalitiedot kirjataan vastaanottotarkastuspöytäkirjaan? Onko QR-koodin sisältämä tieto ja luotettavuus silloin enää sama?

Tämä opinnäytetyö ja sen tulokset ovat saaneet toimeksiantajan pohtimaan, voisiko tässä tutkimuksessa käytettyä tekniikkaa hyödyntää jo tehtaalla ennen levyjen pakkausvaihetta ja niiden toimittamista asiakkaille. Tämä olisi loogisin vaihtoehto, koska materiaalin tunnistetiedot ja levyn pintavirheiden juurisyöt muodostuvat siellä. Lisäksi heräsi kysymys, voisiko kaikkien levyjä toimittavien tehtaiden materiaalitietojen fontti ja koko standardoida yhtenäiseksi. Tällainen standardointi helpottaisi konenäkösovellukselle asetettavia vaatimuksia, kun fontti ja koko olisivat aina samat.

Konenäköjärjestelmien toimittajilla voi olla muitakin vaihtoehtoisia tapoja toteuttaa tämän tutkimuksen vaatima sovellus. Markkinoilla on siis monia erilaisia tapoja ja menetelmiä. Joskus oikean ratkaisun löytäminen vaatii kuitenkin kärsivällisyyttä ja perehtyneisyyttä.

Lähteet

Anttila, J. & Jussila, K. 2016. Mitä laatu on? Suomen standardisoimisliitto SFS RY. 8.2.2016. Viitattu 26.8.2023. <https://sfs.fi/mita-laatu-on/>.

A Practical Guide to Machine Vision Lighting. 2023. Käytännön opas konenäkövalaistuksen suunnitteluun National Instrumentsin sivustolla. Viitattu 15.10.2023. <https://www.ni.com/en/shop/choosing-the-right-hardware-for-your-vision-applications/a-practical-guide-to-machine-vision-lighting.html>.

Barcode reader. 2023. Tietoa viivakoodinluku-ohjelmasta National Instrumentsin verkkosivustolla. Viitattu 10.12.2023. https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-vision-assistant-help/page/1dbar_controls.html.

Basler ace 2 a2A5320 (IMX542). N.d. Tietoa Baslerin matriisikameraa Baslerin sivustolla. Viitattu 12.11.2023. https://www.baslerweb.com/en/shop/a2a5320-imx542/?camera_product_line=ace+2+R+Pro&sort=name.

Basler racer raL4096-24gm. N.d. Tietoa Baslerin viivakamerasta Baslerin sivustolla. Viitattu 12.11.2023. <https://www.baslerweb.com/en/shop/ral4096-24gm/?sort=name>.

Boels, M. 2019. Image Processing: Filters for Noise Reduction and Edge Detection. Artikkelin kuvan esikäsittelyn tekniikoista Mediumin sivustolla. Viitattu 9.12.2023. <https://medium.com/@boelsmaxence/introduction-to-image-processing-filters-179607f9824a>.

Calculating Camera Sensor Resolution and Lens Focal Length. 2020. Laskukaavoja konenäköoptiikan ja sensoreiden valintaan National Instrumentsin sivustolla. Viitattu 19.11.2023. <https://www.ni.com/en/support/documentation/supplemental/18/calculating-camera-sensor-resolution-and-lens-focal-length.html>.

Cameras. Spectral properties. N.d. Tietoa harmaa- ja värisävykamoista Edmund Opticsin sivustolla. Viitattu 13.11.2023. <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/camera-types-and-interfaces-for-machine-vision-applications/#spectralproperties>.

Campbell, F. C. 2013. Inspection of metals: Understanding the basics. Ensimmäinen painos. Materials park, Ohio: ASM International. Viitattu 9.9.2023. <https://janet.finna.fi/>, ProQuest Ebook Central.

Chouinard, J. 2018. CCD vs CMOS industrial cameras – Learn how CMOS image sensors excel over CCD! Blogikirjoitus CMOS-sensoreiden tehokkuudesta verrattuna CCD-sensoreihin 1stvisionin sivustoilla. Viitattu 12.11.2023. <https://www.1stvision.com/machine-vision-solutions/2018/06/ccd-vs-cmos-industrial-cameras-excel-in-allied-vision-industrial-camera.html>.

CMOS Cameras. N.d. Konenäkökameravalmistaja Baslerin sivustolla CMOS- kameroihin liittyvää opetusmateriaalia. Viitattu 11.11.2023. <https://www.baslerweb.com/en-us/learning/cmos-cameras/>.

Color Application in Machine Vision. 2019. Värien soveltamisohjeet konenäkösovelluksissa Advanced Illuminationin sivustolla. Viitattu 1.11.2023.
<https://www.advancedillumination.com/application-notes/color-application-in-machine-vision/>.

Davies, E. R. 2005. Machine vision. Theory, algorithms, practicalities. 3.p. Amsterdam; Oxford: Morgan Kaufmann. Viitattu 24.9.2023. <https://janet.finna.fi/>, ProQuest Ebook Central.

Digital Camera Interfaces. N.d. Konenäkökameroiden erilaisia liityntärajapintoja Edmund opticsin sivustolla. Viitattu 15.11.2023. <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/camera-types-and-interfaces-for-machine-vision-applications/>.

Embedded Systems for Machine Vision. N.d. Tietoa sulautetuista järjestelmistä Teledyne Flirin sivustolla. Viitattu 9.11.2023. <https://www.flir.com/discover/iis/machine-vision/embedded-systems-for-machine-vision/>.

Exploring bright field versus dark field lighting for your inspection application. 2022. Blogikirjoitus Adimecin sivustolla. Viitattu 14.20.2023. <https://www.adimec.com/exploring-bright-field-versus-dark-field-lighting-for-your-inspection-application/>.

Feature Extraction. 2023. Tietoa piirteiden irrotuksesta National instrumentsin sivustolla. Viitattu 9.12.2023. https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-vision-concepts-help/page/feature_extraction.html.

Graafinen esitys. N.d. Tietoa graafisesta esityksestä Tietoarkiston verkkosivuilla. Viitattu 13.2.2024. <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvanti/kuviot/kuviot/>.

Gupta, A. K., Arora, S. K. & Westcott J. R. 2017. Industrial automation and robotics. Ensimmäinen painos. Dulles, Virginia; Boston, Massachusetts; New Delhi: Mercury Learning and Information. Viitattu 24.9.2023. <https://janet.finna.fi/>, Knovel Industrial Engineering & Operations Management Academic.

Harmaasävy- vai värikuvaus. N.d. Tietoa harmaa- ja värikuvauksesta Satakunnan ammattikorkeakoulun automaation tutkimusryhmän sivustolla. Viitattu 12.11.2023. <https://automaatio.samk.fi/testi-sivu/perinteiset-konenakojarjestelmat/harmaasavykuvaus/>.

Heikkilä, T. 2014. Tilastollinen tutkimus. 9.p. Helsinki: Edita. Viitattu 20.8.2023. <https://janet.finna.fi>, Ellibs Library.

How machine vision continues to increase industrial automation efficiency. 2023. A3 markkinointitiimin blogikirjoitus Association for Advancing Automation (A3) sivustolla. Viitattu 26.9.2023. <https://www.automate.org/blogs/how-machine-vision-continues-to-increase-industrial-automation-efficiency>.

Hollows, G. & James, N. N.d.a. Imaging Fundamentals. Konenäkökuvantamiseen liittyviä perustermejä Edmund opticsin sivustolla. Viitattu 18.11.2023. <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/6-fundamental-parameters-of-an-imaging-system/>.

Hollows, G. & James, N. N.d.b. Understanding Focal Length. Tietoa polttovälistä Edmund opticsin sivustolla. Viitattu 18.11.2023. <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/understanding-focal-length-and-field-of-view/>.

Hollows, G. & James, N. N.d.c. Contrast. Tietoa kontrastin merkityksestä konenäkösovelluksissa Edmund opticsin sivustolla. Viitattu 2.12.2023. <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/contrast/>.

Hollows, G. & James, N. N.d.d. The Airy Disk and Diffraction Limit. Tietoa diffraktion vaikutuksista konenäkösovelluksissa Edmund opticsin sivustolla. Viitattu 2.12.2023. <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/limitations-on-resolution-and-contrast-the-airy-disk/>.

Hollows, G. & James, N. N.d.e. Resolution. Tietoa resoluutiosta ja sen merkitys konenäkösovellusta suunniteltaessa. Viitattu 2.12.2023. <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/resolution/>.

Hollows, G. & James, N. N.d.f. Object space resolution. Linssin rajoittavan resoluution laskentakaavoja Edmund opticsin sivustolla. Viitattu 3.12.2023. <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/object-space-resolution/>.

Illumination wavelength guide. 2022. Opas valaistuksen aallonpituuksien valintaan konenäkösovelluksissa 1stvisionin sivustolla. Ladattava PDF-tiedosto. Viitattu 1.11.2023. <https://www.1stvision.com/machine-vision-lighting>.

Imaging Electronics 101: Camera Resolution for Improved Imaging System Performance. N.d. Tietoa konenäkökameroiden resoluutiosta ja pikselisyvyydestä Edmund opticsin sivustolla. Viitattu 13.11.2023. <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/camera-resolution-for-improved-imaging-system-performance/>.

Inspecting with backlight illumination. N.d. Tietoa taustavalon periaatteista Vision Doctorin sivustolla. Viitattu 14.10.2023. <https://www.vision-doctor.com/en/illumination-techniques/backlight-illumination.html>.

Introduction to machine vision. 2016. Introduction to machine vision. A guide to automating process & quality improvements. Konenäkölaitevalmistaja Gognexin ladattava esite konenäöstä. Julkaistu 30.3.2016. Viitattu 24.9.2023. <https://www.cognex.com/resources/white-papers/articles/whitepaperandarticlemain?event=f6c6ef16-20ec-4564-bc74-7c42a9a4900a>.

Kaihoniemi, M. & Kärkkäinen, M. 2018. Tutkimus: Robotiikka tehostaa prosesseja merkittävästi – käyttöönotolla organisaatioissa yhä vahvempi tuki. Artikkel Deloitteen sivustolla. Viitattu 10.10.2023. <https://news.cision.com/fi/deloitte/r/tutkimus--robotiikka-tehostaa-prosesseja-merkittavasti--kayttoonotolla-organisaatioissa-yha-vahvemp,c2644617>.

Konenäkö automaation väsymättömänä silmänä. 2021. Artikkel AFY:n sivustolla. Viitattu 26.9.2023. <https://afry.com/fi-fi/artikkeli/konenako-automaaion-vasymattomana-silmana>.

Kwon, K-S. & Ready, S. 2015. Practical guide to machine vision software : an introduction with LabVIEW. Ensimmäinen painos. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. Viitattu 11.12.2023. <https://janet.finna.fi/>, ProQuest Ebook Cental.

Labview. 2022. Yleistä tietoa LabVIEW-ohjelmistosta Wikipedian verkkosivuilla. Viitattu 11.2.2024. <https://fi.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>.

Lanz, M. 2023. Matkalla huomiseen. Julkaisussa Teollisuuden robotiikka. Toim. K. Välimäki & M. Niemelä. 8–9. Helsinki: Suomen Robotiikkayhdistys ry.

Layout of a smart camera system. N.d. Tietoa älykamoista Vision Doctorin sivustolla. Viitattu 9.11.2023. <https://www.vision-doctor.com/en/layout-smart-camera-system.html>.

Leinonen, J. 2023. Esipuhe. Julkaisussa Teollisuuden robotiikka. Toim. K. Välimäki & M. Niemelä. 6–7. Helsinki: Suomen Robotiikkayhdistys ry.

Lens aperture. N.d. Tietoa optiikan aukosta Vision Doctorin sivustolla. Viitattu 6.12.2023. <https://www.vision-doctor.com/en/optical-basics/lens-aperture.html>.

Liquid Lenses Basics. N.d. Tietoa ”Liquid lens”- tarkennuksella varustetuista optiikoista Edmund opticsin sivustolla. Viitattu 18.11.2023. <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/introduction-to-liquid-lenses/>.

Machine vision lighting. N.d. Kuva erilaisista konenäköjärjestelmien valaisimista Barnumin sivustolla. Viitattu 15.10.2023. <https://www.hhbarnum.com/products/vision-and-rfid/machine-vision-lighting/>.

Matriisikenno- vai viivakamerakuvaus. N.d. Tietoa matriisi- ja viivakameroista Satakunnan ammattikorkeakoulun automaation tutkimusryhmän sivustolla. Viitattu 12.11.2023. <https://automaatio.samk.fi/testi-sivu/perinteiset-konenakojarjestelmat/viivakamerakuvaus/>.

Naidu, N. V. R., Babu, K. M. & Rajendra, G. 2006. Total quality management. Ensimmäinen painos. New Delhi: New Age International (P) Ltd. Viitattu 26.8.2023. <https://janet.finna.fi>, ProQuest Ebook Cental.

Ojasalo, K., Moilanen, T. & Ritalahti, J. 2015. Kehittämistyön menetelmät: uudenlaista osaamista liiketoimintaan. 3.–4.p. Helsinki: Sanoma Pro Oy. Viitattu 19.8.2023. <https://janet.finna.fi>, Ellibs Library.

Opinnäytetöiden eettiset suositukset. 2020. Tietoa ammattikorkeakoulujen opinnäytetöiden eettisistä suosituksista Arene Ry:n sivustolla. Viitattu 23.1.2024. <https://arene.fi/julkaisut/raportit/opinnaytetoiden-eettiset-suositukset/>.

Optic distortion. N.d. Tietoa optiikan aiheuttamista vääristymistä Vision Doctorin sivustolla. Viitattu 6.12.2023. <https://www.vision-doctor.com/en/optical-errors/distortion.html>.

Siltala, N. & Gautam, M. 2023. Konenäkö. Julkaisussa Teollisuuden robotiikka. Toim. K. Välimäki & M. Niemelä. 172–184. Helsinki: Suomen Robotiikkayhdistys ry.

Sudhakar, S. 2017. Histogram Equalization. Artikkelin historioinnista Mediumin verkkosivustolla. Viitattu 9.12.2023. <https://towardsdatascience.com/histogram-equalization-5d1013626e64>.

System selection. N.d. Tietoa konenäköjärjestelmän kuvanprosessoinnin järjestelmän valinnasta Vision Doctorin sivustolla. Viitattu 6.11.2023. <https://www.vision-doctor.com/en/system-selection.html>.

Tang, B., Chen, L., Sun, W. & Lin, Z. K. 2022. Review of surface defect detection of steel products based on machine vision. IET image processing, 17, 2, 303–322. Viitattu 15.10.2023. Ladattava PDF-tiedosto. <https://doi.org/10.1049/ipr2.12647>.

Types of Machine Vision Lenses. N.d. Tietoa konenäkökameroiden optiikoiden linseistä Edmund optiikan sivustolla. Viitattu 2.12.2023. <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/imaging-lens-selection-guide/>.

Uusitalo, J. N.d. Näköjärjestelmät osana automaatiota ja tuotantolaitteita. Artikkelin Sermatech Oy:n sivustolla. Viitattu 1.1.2023. <https://www.sermatech.fi/nakojarjestelmat-osana-automatiota-ja-tuotantolaitteita/>.

Vision sensors vs. Vision systems. N.d. Tietoa näkösensoreista konenäkölaitevalmistaja Cognexin sivustolla. Viitattu 6.11.2023. <https://www.cognex.com/what-is/vision-sensors/vision-sensors-vs-vision-systems>.

Von Fintel, R. 2015. Modern CMOS Cameras as replacements for CCD Cameras. Baslerin tuotetieteen päällikön artikkeli konenäkökamerakomponenttien eroavaisuuksista. Viitattu 11.11.2023. <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/pub/features/articles/23094>.

Wang, B. N.d. CCD vs CMOS: A Review of Sensor Technology. Artikkelin CCD- ja CMOS- kameran vertailusta CMOS Sensor Inc. sivustolla. Viitattu 12.11.2023. <https://www.csensor.com/ccd-vs-cmos>.

West, P. C. 2023. Vision & Sensors 101: Image Processing for Machine Vision – How Did We Get Here? Artikkelin Kuvankäsittelystä Quality magazinin sivustolla. Viitattu 9.12.2023. <https://www.qualitymag.com/articles/97373-image-processing-for-machine-vision-how-did-we-get-here>.

West, P. C. 2022. Vision & Sensors 101: Machine Vision System Integration. Success with vision system integration requires starting right. Artikkelin konenäköjärjestelmän integraatiosta Quality magazinin sivustolla. Viitattu 1.10.2023. <https://www.qualitymag.com/articles/96810-vision-and-sensors-101-machine-vision-system-integration>.

What Is Image Segmentation? N.d. Artikkelin kuvan kynnystämisestä MathWorksin sivustolla. Viitattu 9.12.2023. <https://www.mathworks.com/discovery/image-segmentation.html>.

Liitteet

Liite 1. Laboratoriotestien data (salassa pidettävät)

CPP hahmon ja merkkien tunnistus data.xlsx, Q-tulenkestävän hahmon merkkien viivakoodin tunnistus.xlsx, Quartto hahmon_merkkien_viivakoodin tunnistus data.xlsx.

Liite 2. Kenttätestien data (salassa pidettävät)

CPP hahmon ja merkkien tunnistus Basler data.xlsx, CPP hahmon ja merkkien tunnistus Kännykkä data.xlsx, KENTTÄ_Quartto hahmon_merkkien_viivakoodin tunnistus data.xlsx, Laajakuva-alueen tunnistus data.xlsx.

Liite 3. Sopimukset

Aineistonhallintasuunnitelma ja salassapitosopimus.