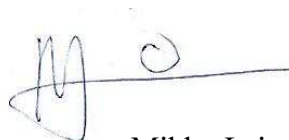

**KAPPALETARKASTUSAUTOMAATIO
TARKKUUSVALIMOSSA**

HAMK
HÄMEEN AMMATTIKORKEAKOULU

Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Kone- ja tuotantotekniikan ko.

Riihimäki, kevät 2015



Mikko Laine

RIIHIMÄKI

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Kone- ja tuotantotekniikka

Tekijä	Mikko Laine	Vuosi 2015
Työn nimi	Kappaletarkastusautomaatio tarkkuusvalimossa	

TIIVISTELMÄ

Työn toimeksiantajana oli Suomen ainoa teollisessa mittakaavassa toimiva tarkkuusvalimo Sacotec Components Oy Riihimäeltä. Yrityksessä haluttiin selvittää nykyaikaisten konenäköratkaisujen soveltuvuus tarkkuusvalukappaleen tarkastamiseen.

Työn tavoitteena oli joko löytää valmis laitteisto tai luoda suunnitelma sellaisen valmistamiseksi. Valmista ratkaisua ei löytynyt markkinoiden kartoittamisen jälkeen, joten työssä toteutetaan tarkkuusvalukappaleen tarkastusautomaation esisuunnittelu niin, että työn tulosten perusteella voidaan pyytää tarjouksia laitteen varsinaiseksi suunnittelemiseksi ja toteuttamiseksi.

Työssä käydään läpi tarkkuusvaluprosessi toimeksiantajan tuotannossa, osa menetelmälle tyypillisistä virheistä sekä tarkkuusvalukappaleen tarkastusprosessia ja -kriteereitä. Tarkastusautomaatiolaitteen suunnittelun tueksi työssä käydään läpi konenäön yleistä teoriaa sekä erotuskykyyn ja tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi työssä luodaan katsaus konenäössä käytettyihin komponentteihin ja niiden ominaisuuksiin.

Työn tuloksena saatiin vastaus asetettuihin kysymyksiin, luotiin tarkastusautomaatiolaitteelle vaatimusmäärittely ja keskeisten toimintojen kuvaus. Työtä on jo hyödynnetty keskusteluissa ja tarjouspyynnöissä mahdollisten toimittajien kanssa.

Avainsanat tarkkuusvalu, valuvirhe, konenäkö, automaatio

Sivut 63 s. + liitteet 14 s.

RIIHIMÄKI

Degree program in Mechanical Engineering and Production Technology
Mechanical Engineering and Production Technology

Author	Mikko Laine	Year 2015
Subject of Bachelor's thesis	Automation of part inspection at an investment casting foundry	

ABSTRACT

This thesis was commissioned by Sacotec Components Oy which is the only foundry in Finland producing investment castings on an industrial scale. In the company there was a desire to come up with a suitability study regarding the capabilities of the modern machine vision equipment and its solutions in the inspection process of precision cast parts.


The objective of this thesis was either to find a readymade inspection cell suitable for inspecting precision castings or to come up with plans for such a machine. After an extensive search for potential suppliers no pre-existing solution could be found. Therefore in this thesis a preliminary design for the automated the inspection cell for the inspection of precision cast parts was to be created. The preliminary design was to be constructed so that it would form a basis for requests for quotation for the actual design and manufacturing of the said inspection cell.

In this work there is an overview to the investment casting process with the commissioner and to some of the typical casting defects. There is also an examination of the inspection process and criteria regarding investment cast parts. To support the design process the paper also includes a review of the general theory behind machine vision applications and issues affecting the accuracy and resolution of machine vision solutions. In addition there is also an overview to the different components and their features in machine vision applications.

As a result of this thesis project answers were provided to the questions which were set. The thesis project involved creation of requirement specifications for the inspection cell and a description of its main functions. These results of this project has already been utilised in discussions between potential solution suppliers and in requests for quotation for design and manufacture of such an apparatus.

Keywords investment casting, automation, inspection, machine vision

Pages 64 p. + appendices 14 p.



SISÄLLYS

1	JOHDANTO JA TAVOITTEET	1
1.1	Aiheen rajaus.....	1
1.2	Sacotec Components Oy	1
2	TARKKUUSVALUMENETELMÄT	2
2.1	Tarkkuusvalu.....	3
2.1.1	Valutekninen suunnittelu.....	4
2.1.2	Vahamallin valmistus	5
2.1.3	Vahapuun kokoaminen.....	5
2.1.4	Esikasto.....	6
2.1.5	Keraamisen kuoren valmistus.....	6
2.1.6	Vahanpoisto	7
2.1.7	Sintraus	7
2.1.8	Valu	8
2.1.9	Kuorenpoisto ja irrotus	9
2.1.10	Tarkastus- ja jälkikäsittelytoimenpiteet.....	9
2.1.11	Laadunvalvonta	10
3	TARKKUUSVALUKAPPALEEN TARKASTUS	11
4	TARKKUUSVALUKAPPALEEN VIRHEET JA TOLERANSSIT.....	12
4.1	Valukappaleen toleranssit	14
4.2	Tarkkuusvalulle ominaisia virheitä	15
4.2.1	Hiilenkato	16
4.2.2	Vajaavalu.....	16
4.2.3	Kolhiintumat.....	16
4.2.4	Purseet ja pullistumat	17
4.2.5	Vahan pintavirheet.....	18
5	KAPPALETARKASTUAUTOMAATIOLAITTEEN SUUNNITTELU.....	18
5.1	Tarkastuksen virheettömyys.....	20
5.2	Vaatimusmäärittely	21
6	LAITTEEN RAKENNE.....	23
6.1	Kappaleiden käsittelyjärjestelmä.....	24
6.2	Teollisuusrobotit.....	28
6.3	Konenäkö	32
6.3.1	Kuvadatan kerääminen ja digitointi.....	33
6.3.2	Kuvankäsittely ja analysointi	36
6.3.3	Tulkinta.....	40
6.4	Konenäköjärjestelmän komponentit.....	40
6.4.1	Kamerat	40
6.4.2	Objektiivit.....	42
6.4.3	Valaistus	46
6.4.4	Älykamerat	49
6.4.5	Kolmiulotteinen konenäkö	50
6.5	Kuvausjärjestelmän erotuskyky ja tarkkuus.....	51

7	YHTEENVETO JA TULOSTEN TARKASTELU	56
8	POHDINTA JA JATKOKEHITYSTOIMENPITEET.....	57
	LÄHTEET	58

Liite 1	Virheprosentteja
Liite 2	Paino- ja tilavuuslaskelmia
Liite 3	Vaatimusmäärittely
Liite 4	Toiminnan kuvaus
Liite 5	Kameran ja objektiivin valinta

1 JOHDANTO JA TAVOITTEET

Opinnäytetyön toimeksiannon sain työnantajaltani, Sacotec Components Oy:ltä. Toimeksiannon ensisijaisena tavoitteena oli etsiä markkinoilta valmis, yritykselle soveltuva, tarkkuusvalettujen teräskappaleiden automaatioituun tarkastamiseen soveltuva laitteisto. Toissijaisena tavoitteena oli selvittää saatavilla olevien ratkaisujen soveltuvuus tarkkuusvalukappaleen tarkastamiseen ja laatia suunnitelma tällaisen laitteiston valmistamista varten.

Jos markkinoilta löytyisi jokin valmis ratkaisu, tulisi sen soveltuvuus toimeksiantajan tuotantoon selvittää. Jos valmista ratkaisua ei löydy, niin laadittavan suunnitelman sisältö rajattiin niin, että sen tulisi sisältää laitteiston vaatimusmäärittely, toimintojen määrittely ja kuvaus, tärkeimpien osakokonaisuuksien ratkaisuvaihtoehtojen kartoittaminen ja soveltuvuuden arviointi sekä karkea layout-suunnittelu. Laadittava suunnitelma tulisi toimimaan dokumentaationa järjestelmän toteuttajaa kilpailutettaessa. Markkinoiden kartoittamisen jälkeen voitiin todeta, että valmista, yritykselle soveltuvaa laitteistoa ei ole saatavilla, joten opinnäytetyössä tullaan keskittymään tarkastusautomaation suunnitteluun edellä kuvatun mukaisesti aiheajauksessa pysyen.

Suunnitelmien laatimisen tueksi työssä käydään läpi toimeksiantajan tuotannossa ilmeneviä yleisimpiä tarkkuusvaluvirheitä. Ratkaisuvaihtoehtojen etsimisen tueksi käydään läpi tarkemmin eräitä tarkastuslaitteen komponenttien, etenkin konenäköjärjestelmän osien teoriaperustaa ja valintakriteerejä.

Opinnäytetyön tavoitteiden kannalta keskeisimmät kysymykset ovat:

- Voidaanko tarkkuusvalukappaleen tarkastus automatisoida ja voidaan-ko konenäön avulla tarkastaa tarkkuusvalukappaleita?
- Mitä tulee ottaa huomioon tarkastusautomaatiolaitetta suunnitellessa?

1.1 Aiheen rajaus

Työ on rajattu koskemaan vain yhtä samankaltaisten tuotteiden perhettä, mutta suunniteltavan laitteen on sovellettava tulevaisuudessa myös muiden yrityksen valmistamien kappaleiden tarkastamiseen. Työssä ei tuoteta yksityiskohtaisia valmistuspiirustuksia tai muuta laitteen valmistusdokumentaatiota, vaan laitteen toteuttaa valittava yhteistyökumppani, jos valmista laitteistoa ei löydy.

1.2 Sacotec Components Oy

Sacotec Components Oy on ainoa Suomessa teollisessa mittakaavassa toimiva tarkkuusvalimo. Yritys valmistaa tarkkuusvalettuja kappaleita teräseoksista, koboltti- ja nikkelpohjaisista seoksista sekä vakio-ohjelman lisäksi myös asiakaskohtaisesti räätälöidyistä seoksista. Yrityksen liikevaihto on noin 6 miljoonaa euroa, josta viennin osuus on noin 50 %. Henkilökuntaa on noin 40. (Sacotec Components Oy n.d.)

Yrityksen juuret juontavat vuoteen 1919, jolloin SAKO eli ”Suojeluskuntain Ase ja Konepaja Oy” perustettiin Helsinkiin ja vuonna 1927 yritys muutti Riihimäelle. Vuonna 1956 alkoi Riihimäellä Sakon tarkkuusvalimon toiminta Jungersen-menetelmää käyttäen. Vuonna 1967 siirryttiin käyttämään Hitchineriltä lisensoitua vahamallimenetelmää, joka on käytössä edelleen. Vuonna 1986 tarkkuusvalimo siirtyi Nokia Oyj:n omistukseen ja vuonna 1990 management buyout -kaupalla (MBO-kauppa) syntyi Sacotec. (Sacotec Components Oy n.d.)

Opinnäytetyön toimeksiantajalla on pitkä kokemus automaation hyödyntämisestä tuotannossa. Yrityksen ensimmäinen kastorobotti keraamisten kuorien valmistukseen otettiin käyttöön 1978. Varsinkin 2010-luvulla panostus automaatioon ja robotiikkaan on ollut erittäin voimakasta. 2012 otettiin käyttöön uusi robottisolua keraamisten kuorien valmistukseen ja vuosina 2013–2014 otettiin käyttöön kolme robottisolua vahanpuristukseen. (Sacotec Components Oy n.d.)

2 TARKKUUSVALUMENETELMÄT

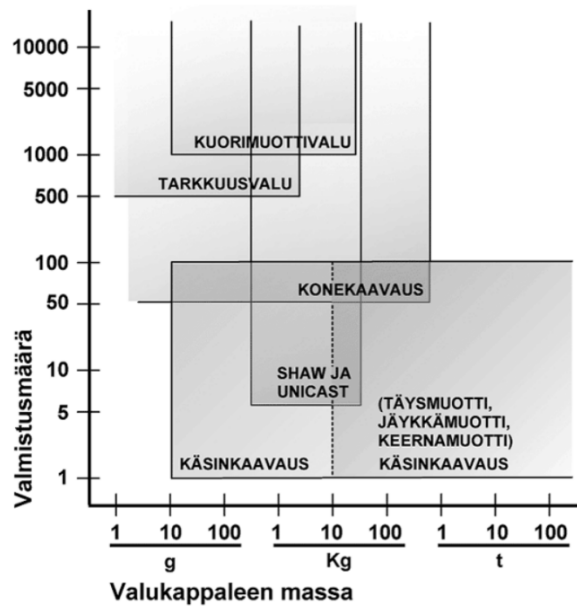
Beeley (2001) määrittelee valukappaleen valimossa yhdellä kertaa sulasta metallista valmistettavaksi valmiiksi tuotteeksi.

Cleggin (1991) mukaan valaminen on vanhin valmistusmenetelmä, jolla on tuotettu monimutkaisia metalli- ja taide-esineitä. Valetuilla tuotteilla oli tärkeä rooli teollisessa vallankumouksessa 1800-luvun lopussa ja valutuotteet luovat edelleen perustan nykyiselle teolliselle valmistukselle.

Metallia valettaessa metalli, yleisimmin metalliseos, kuumennetaan sulamispisteeseensä, minkä jälkeen sula metalli kaadetaan muottiin, johon on valmistettu valettavan tuotteen muotoinen ontelo. Erilaisia valumenetelmiä on monia ja yleinen jaotteluperuste on jako muotin käyttökertojen perusteella kerta- ja kestopuottimenetelmiin. Nimensä mukaisesti kertamuotit hajotetaan, jotta valukappale saadaan irrotettua, kun taas kestopuotteja voidaan käyttää useita kertoja uudestaan. (Clegg 1991.)

Kertamuottimenetelmiä ovat mm. hiekkavalumenetelmät (mm. käsin-, kone- ja kuorimuottikaavaus) ja osa tarkkuusvalumenetelmistä. Kestomuottimenetelmiä ovat mm. kokillivalu, osa tarkkuusvalumenetelmistä ja painevalu. Kuvasta 1 voidaan nähdä eri kertamuottimenetelmien tavanomaiset käyttöalueet. Opinnäytetyön toimeksiantajan tuotannossa yksittäisen kappaleen paino vaihtelee grammasta useisiin kymmeneen kiloihin ja tuotantomäärät muutamasta kappaleesta yli sataantuhanteen kappaleeseen vuodessa. (Autere et al. 1986; Sacotec Components Oy n.d.)

Tarkkuusvalumenetelmiin kuuluvat mm. vahamalli-, Replicast- Shaw- ja Unicast-menetelmät. Näistä kaksi ensimmäistä kuuluvat kertamuottimenetelmiin ja toiset kaksi kestopuottimenetelmiin. (Autere et al. 1986.)



Kuva 1. Eri valumenetelmien sovellusalueet kappaleiden massan ja tuotantomäärien perusteella (Meskanen & Höök 2013, 1).

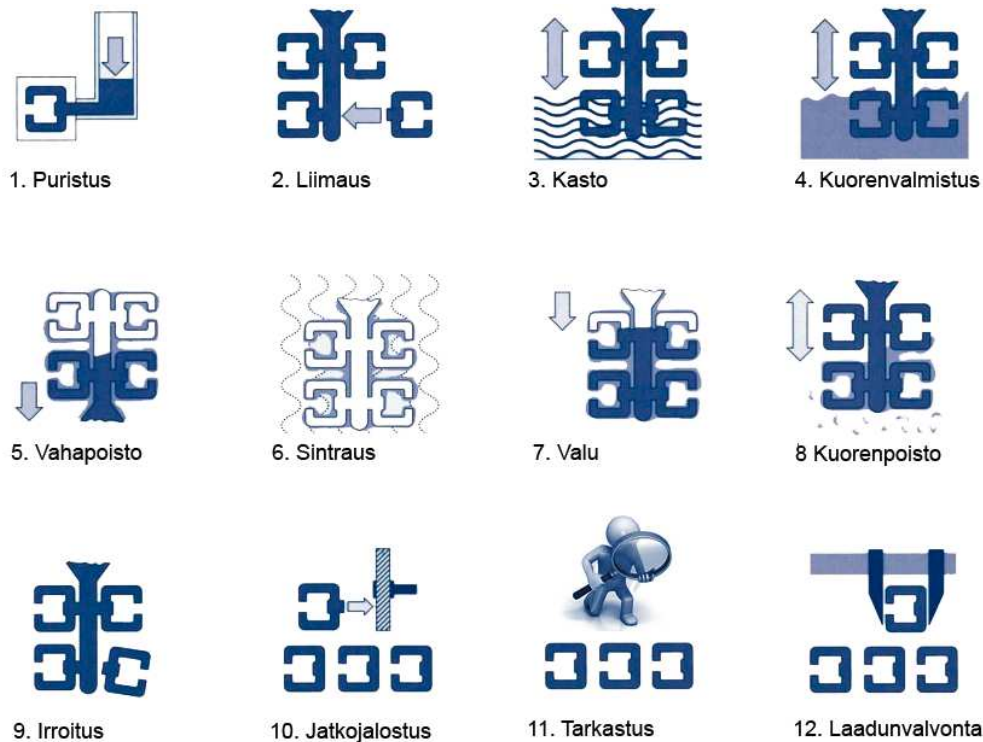
Tietyillä toimenpiteillä myös perinteisten hiekkavalujen tarkkuutta voidaan parantaa, mutta näilläkään toimenpiteillä ei päästä varsinaisten tarkkuusvalumenetelmien lopputuloksiin. Tarkkuusvalumenetelmien suurin ero perinteiseen hiekkavaluun ovatkin tarkkuusvaletuilla kappaleilla saavutettavat mittatoleranssit ja pinnanlaatu. Erikoisvalumenetelmiä (mm. alipaine- ja rotaatiovalu) lukuun ottamatta itse valutapahtuma on hyvin samanlainen kaikissa valukappaleen valmistusmenetelmissä. (Clegg 1991; Beeley 2001.)

Termillä tarkkuusvalu tarkoitetaan Meskasen ja Höökin (2010) mukaan nimenomaan vahamallimenetelmällä valmistettuja kappaleita ja niiden valmistusprosessia. Vahamallimenetelmä on käytössä myös Sacotec Components Oy:ssä. Tässä työssä käytetään jatkossa Meskasen ja Höökin tarkkuusvalumääritelmää.

2.1 Tarkkuusvalu

Tarkkuusvalu on niin sanottu keraamimuottimenetelmä ja sen historia ulottuu aina pronssikaudelle asti. Nykyiset tarkkuusvalumenetelmät mahdollistavat kaikkien metallimateriaalien valamisen ja antavat tuotteisiin suuren muotoiluvapauden. Tarkkuusvalulla on mahdollista valmistaa sellaisia kappalegeometrioita, jotka olisivat muilla menetelmillä erittäin vaikeita tai jopa mahdottomia valmistaa. Menetelmästä on etua myös vaikeasti koneistettavista materiaaleista, kuten erilaisista superseoksista, valmistettävien tuotteiden valmistuksessa. (Meskanen & Höök 2010.)

Tarkkuusvalun valmistusprosessi on kuvattu pääpiirteissään kuvassa 2 ja eri vaiheiden yksityiskohdat käydään läpi samalla, kun seuraavassa kuvataan tarkkuusvalukappaleen valmistusprosessi Sacotec Components Oy:ssä.



Kuva 2. Tarkkuusvalukappaleen valmistusprosessin päävaiheet (mukailten Zollern 2005).

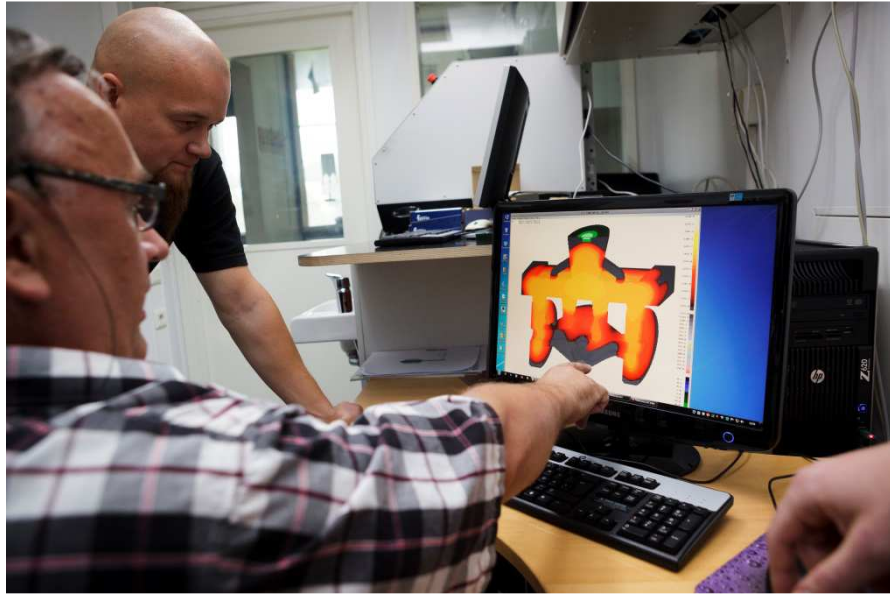
2.1.1 Valutekninen suunnittelu

Valukappaleen valmistus alkaa valuteknisellä suunnittelulla. Valuteknisen suunnittelun aikana tuotteen valmistettavuus arvioidaan ja määritellään tarvittavat työvarat, kutistumat ja muut tekniset yksityiskohdat. Samalla suunnitellaan myös kappaleen ja koko kuorimuotin syöttö- ja tukijärjestelmänä toimivan, niin sanotun valupuun rakenne. Kuvassa 3 suoritetaan syöttöjärjestelmän toimivuuden ja valun jähmettymisen analysointia yrityksen käytössä olevalla CastCAE-valusimulaatio-ohjelmalla. (Lintukorpi 2014.)

Tarkkuusvalumenetelmän lähtökohtana oleva vahamalli, joka on valmistettavan tuotteen näköinen ja hyvin lähellä sen lopullista kokoa, valmistetaan ruiskupuristusmuottia muistuttavalla vahatyökalulla. Rajoituksia kappaleen geometrialle asettaa lähinnä vahatyökalu, mutta vaikeampia muotoja voidaan kuitenkin valmistaa kasaamalla tuotteelle lopullisen muodon antava vahamalli osista. (Meskanen & Höök 2010.)

Vahatyökalun työkalusuunnittelu aloitetaan asiakkaan toimittaman 3D-mallin muokkaamisella niin, että siinä otetaan huomioon valuteknisessä suunnittelussa määritellyt kutistumat ja malliin tehdään myös muut tarvittavat muutokset, kuten esim. työvarat ja pyöritykset. Seuraava suunnittelun vaihe on itse työkalusuunnittelu, jolloin vahamallia varten suunnitellaan sen valmistamiseen käytetty vahanpuristustyökalu. Pieniä eriä varten,

kuten koe- ja prototyypisarjoihin, voidaan vahamallit valmistaa myös pikamallina 3D-tulostamalla tai jyrsimällä vahasta. (Lintukorpi 2014.)



Kuva 3. Valusimulaation tarkastelua (Sacotec 2014).

2.1.2 Vahamallin valmistus

Pääsääntöisesti työkalualumiinista valmistetulla vahatyökalulla, joka on asennettu vahan ruiskupuristuskoneeseen, valmistetaan vahamallit. Ruiskupuristuskone kuumentaa vahan noin 70 °C:n lämpöön, jolloin siitä tulee nestemäistä. Paineen avulla kone ruiskuttaa sulan vahan muotissa olevaan, kappaleen muovaavaan tilaan (Kuva 2). Kappaleen annetaan koosta riippuen jäähtyä muutamasta sekunnista muutamiin kymmeniin sekunteihin muotin sisällä. Tänä aikana vahamalli viilenee, saavuttaa uudelleen kiinteän olomuodon ja on valmis poistettavaksi muotista. Yrityksellä on vahamallien valmistamiseen käytössään perinteisten vahanruiskupuristuskooneiden lisäksi kolme, vuosina 2013–2014 käyttöön otettua, robotisolia. (Lintukorpi 2014.)

2.1.3 Vahapuun kokoaminen

Vahapuun kokoamista kutsutaan liimaamiseksi, vaikka käytännössä kyse on lämmön avulla tapahtuvasta lisääineettomasta yhteen liittämisestä eli hitsauksesta (Kuva 2). Liimauksessa mallivahaan kastetun, niin sanottuun vahapuun jalan pintaan kiinnitetään joko vahakappaleet suoraan tai kuten kuvassa 4 useammasta vahakappaleesta koostuvat oksat, niin sanotut elementit. Käytännössä liimaus tehdään niin, että erikoiskärjellä varustettua juotoskolvia apuna käyttäen sekä elementin päätä tai kappaleen valunapaa että jalan vahakerrosta lämmitetään yhtä aikaa kunnes vaha on sulaa. Elementtiä tai kappaletta painetaan vasten jalkaa muutamia sekunteja kunnes vaha on jähmettynyt uudestaan ja liimattu kappale pysyy kiinni. Vahapuuhun rakennetaan tätä tarkoitusta varten erikseen valmistetuista vaha-

kappaleista myös valussa tarvittavat syöttökanavat ja tukirakenteet. (Lintukorpi 2014.)



Kuva 4. Vahapuun liimaus (Sacotec 2014).

Kun vahapuu on valmis, siitä pestään pois vahamallien puristuksessa apuna käytetty silikoni ja muut epäpuhtaudet, jotka estävät esikastokerrosta tarttumasta vahan pintaan. Lisäksi pesun yhteydessä käytettäessä tiettyjä pesu- ja huuhteluaineita, saadaan vahan pinta etsaantumaan, mikä parantaa esikastokerroksen tarttumista. (Lintukorpi 2014.)

2.1.4 Esikasto

Pesty ja kuivattu vahapuu upotetaan ensin niin sanottuun esikastoliemeen, joka koostuu tulenkestävästä keraamisesta jauheesta, kolloidisesta piistä ja lisäaineista. Ylimääräinen liemi valutetaan pois ja päälle sirotellaan erittäin hienorakeista zirkonihiekkaa. Tarvittaessa tämä esikasto tehdään käsin muutaman kerran (Kuva 2). (Valjakka 2014.)

2.1.5 Keraamisen kuoren valmistus

Esikaston jälkeen muotit siirtyvät robotisoidulle ja täysin automatisoidulle kuorenvalmistuslinjalle. Valmiita vahapuita, riippuen vahapuun koosta, kiinnitetään 1-7 kappaletta kerrallaan niin sanottuihin henkareihin ja täytetyt henkarit lastataan kuorenvalmistussolun kuljetusradalle. Tältä radalta kuvassa 5 näkyvä robotti poimii henkarin kerrallaan ohjelmoidun ohjelman mukaiseen kastoon. Ensinnäkin robotti kastaa koko henkarin keraamiseen liemeen ja valuttaa ylimääräisen liemen pois. Tämän jälkeen henkari muotteineen viedään hiekoituslaitteeseen, jossa märän kastoliemen päälle sirotellaan karkeampaa zirkonihiekkaa. Kun muotti on hiekoitettu, se nostetaan takaisin kuljetusradalle kuivumaan ja odottamaan seuraavan kerroksen kastausta. Prosessi toistetaan tarpeeksi monta kertaa, jotta kuoren paksuus on riittävä kestämään vahanpoistosta ja valusta aiheutuvat paineet

halkeamatta. Kun viimeinen kerros on valmis, annetaan muottien kuivua valvotuissa olosuhteissa useita tunteja, jotta se on riittävän kuiva seuraavaan vaiheeseen. Kun vahapuun päälle on kasvatettu keraaminen kuori, kutsutaan kokonaisuutta kuorimuotiksi, toimeksiantajalla tästä käytetään pelkästään nimitystä muotti. (Valjakka 2014.)



Kuva 5. Vahapuuhenkarin robottikasto (Sacotec 2014).

2.1.6 Vahanpoisto

Kun vahamallien valmistamiseen käytettyä vahaa lämmitetään, sillä on pyrkimys laajentua. Jos keraamista kuorta pelkästään kuumennettaisiin ja vahan annettaisiin vapaasti laajeta keraamisen kuoren sisällä, olisi lopputuloksena varmasti rikkoutunut kuori. Tämän ehkäisemiseksi vahanpoisto tehdään erikoisrakenteisessa autoklaavissa. Muotit sijoitetaan laitteen etuosassa olevaan, avattavaan painekammioon, jonne sulkemisen jälkeen johdetaan nopeasti muutamien sekuntien aikana noin kuuteen baariin paineistettua, liki 150 °C:n vesihöyryä, joka sulattaa hallitusti vahan muotin sisältä. (Valjakka 2014.)

2.1.7 Sintraus

Kuorimuotit, joiden sisältä on poistettu vaha, sintrataan ennen valua. Sintraus tapahtuu kuvan 6 esittämässä kaasulämmitteisessä läpityöntöuunissa, jonka lämpötila on noin 1000 °C. Sintrauksessa kastoliemien ja hiekan se-

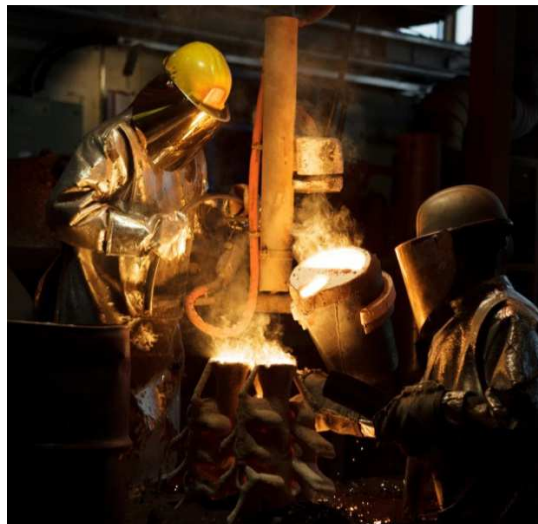
koitus muuttuu keraamisen kovaksi ja korkeita lämpötiloja kestäväksi. Tämä on tarpeen, jotta kuorimuotti kestää valutapahtuman lämpötiloja, jotka voivat nousta yli 1600 °C:n. Kun valu suoritetaan heti kuoren sintrauksen jälkeen, voidaan samalla suorittaa myös kuorimuotin esilämmitys valua varten. (Valjakka 2014.)



Kuva 6. Kuorien sintraus ja esilämmitys tunneliuunissa (Sacotec 2014).

2.1.8 Valu

Itse valu ei eroa perinteisestä teräksen valamisesta. Induktiokuumeenteiseen sulatusuuniin panostetaan oikean koostumuksen omaava sulatuspanos, jonka koostumus varmistetaan kaasuspektrometrianalyysillä ja tarvittaessa säädetään seostusta lisäaineilla. Sulalle tehdään lisäksi tarvittavat kuonan- ja kaasunpoistotoimenpiteet, minkä jälkeen uunista kaadetaan kuvassa 7 näkyvään, esilämmitettyyn valusenkkään sulaa terästä ja valusenkkästä teräs kaadetaan esilämmitettyihin kuorimuotteihin. (Valjakka 2014; Keskinen & Niemi 2011.)



Kuva 7. Tarkkuusvalumuotin valaminen (Sacotec 2014).

2.1.9 Kuorenpoisto ja irrotus

Valun jälkeen valettujen muottien annetaan rauhassa jäähtyä. Tuotteesta riippuen kuorenpoistoa voidaan tehdä usealla eri tavalla. Käytössä olevia keinoja ovat esimerkiksi ns. jytääminen, teräskuulariippusingossa puhaltaminen, kemiallinen kuorenpoisto, käsihiekkapuhallus tai jokin näiden yhdistelmä. (Järvinen 2014.)

Yleensä ensimmäinen vaihe on isoimpien kuorenkappaleiden poistaminen valupuun päältä joko käsin, teräskuulapuhalluksella tai ns. jytäämällä. Jytälaitteessa valupuuhun synnytetään paineilmoituksen iskuvasaran avulla resonanssitila, joka saa keraamisen kuoren kevyempänä ja hauraampana irtomaan valettujen kappaleiden päältä. Jos tuotteisiin tai valupuuhun jää vielä jytäämisen jälkeen kuoriainetta, puhalletaan valupuut kappaleineen useampaan kertaan kuvassa 8 näkyvässä teräskuulariippusingossa niitä välillä kääntäen. (Järvinen 2014.)

Kappaleet voidaan irrottaa valupuusta esim. katkaisulaikalla sahaamalla, käsin vääntämällä tai nuijimalla. Jos kappaleen geometria on sellainen, että sen reikiin tai nurkkiin voi jäädä kuoriainetta, ovat irrotetut kappaleet vielä joko teräskuula- tai hiekkapuhallettava irrottamisen jälkeen. (Järvinen 2014.)



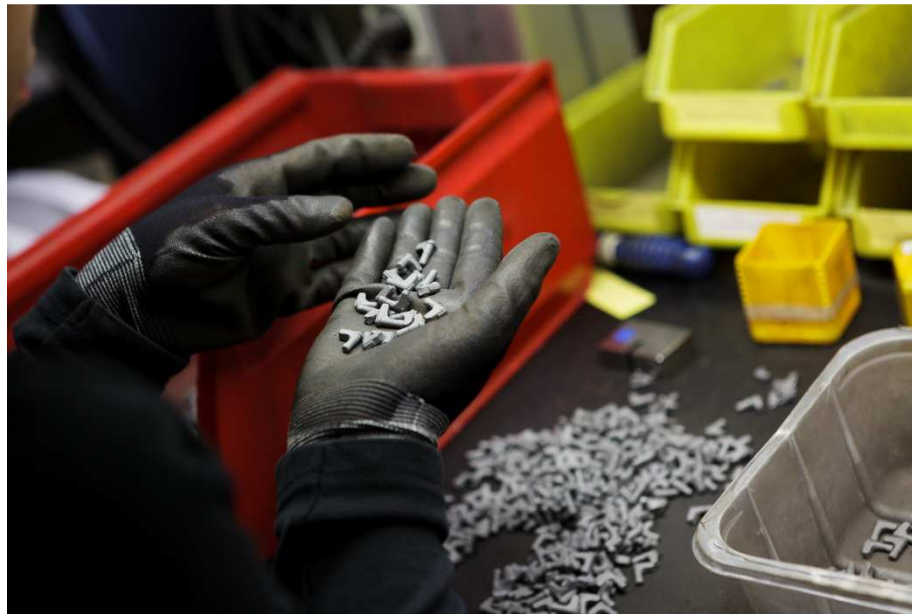
Kuva 8. Valettuja muotteja menossa riippusinkoon.

2.1.10 Tarkastus- ja jälkikäsittelytoimenpiteet

Irrotetuille kappaleille tehdään monenlaisia jälkikäsittelytoimenpiteitä, joiden määrä ja kesto vaihtelevat kappaleesta toiseen. Yleensä kappale irrotetaan, lämpökäsitellään, tarkastetaan visuaalisesti ja pakataan lähtemään asiakkaalle. (Järvinen 2014.)

Pisimmillään jälkikäsittelyvaiheita voi olla toistakymmentä. Useimmista kappaleista joudutaan poistamaan niissä oleva valunapa. Lämpökäsittelyssä voidaan joutua tekemään eri käsittelyjä kuten normalisointi, nuorutus ja karkaisu. Riittävien toleranssien saavuttamiseksi voidaan kappaleet joutua täsmäämään tai koneistamaan. Kappaleeseen voi olla tarve tehdä reikiä joita ei voida järkevin kustannuksin tuottaa vahamalliin tai ne ovat niin pieniä, ettei niiden sisään voida valmistaa keraamista kuorta. Lopuksi kappaleisiin voidaan tehdä pintakäsittelyjä kuten passivointi, kemiallinen kiillotus, kemiallinen nikkelöinti tai lipeämusta. (Järvinen 2014.)

Kuvassa 9 esitettyä, käsin tapahtuvaa tarkkuusvalukappaleen tarkastusta käsitellään tarkemmin luvussa 3. Tietyille kappaleille täytyy asiakkaan vaatimuksesta tehdä lisäksi vielä muita rikkomattoman aineenkoetuksen tarkastuksia, kuten tunkeumaneste-, magneettijauhe tai röntgentarkastuksia, ja rikkovan aineenkoetuksen testejä, kuten veto-, taivutus- ja iskutestejä. Suurimman osan rikkovan aineenkoetuksen testeistä tekee toimeksiantaja itse ja rikkomattomat tarkastukset ulkopuolinen taho. Isommilla hiekkavaluilla yleisintä testausmenetelmää eli ultraäänitestausta ei tarkkuusvalukappaleille juurikaan käytetä. (Valjakka 2014; Järvinen 2014.)



Kuva 9. Tarkkuusvalukappaleen tarkastusta.

2.1.11 Laadunvalvonta

Toimeksiantajalla on käytössä tärkeimpänä laadunvalvonnan työkaluna tilastollinen prosessinohjaus eli SPC (Statistical Process Control). Se perustuu prosessin mittaamiseen näytteiden avulla ja näytteistä saadun datan analysoimiseen tilastotieteellisin keinoin. Tilastollisuus tarkoittaa sitä, että prosessin ohjaukseen ei käytetä yksittäisiä mittaustuloksia tai tapahtumia, vaan näiden keskiarvoja. Kappaleiden mittojen lisäksi tärkeitä seurattavia kriteerejä ovat kappaleissa ilmenevät eri virhetyypit, sillä näiden seurannan avulla voidaan korjaavat toimenpiteet kohdistaa oikein. (Groover 2008; Valjakka 2014.)

3 TARKKUUSVALUKAPPALEEN TARKASTUS

Kappaleelta vaadittava laatutaso ja soveltuva tarkastusmenetelmä pitää valita aina kappalekohtaisesti. Näitä valittaessa tulee ottaa huomioon kappaleen vaatimukset ja käyttötarkoitus. Useimmiten nämä vaatimukset ovat erilaisia eri kappaleiden kohdissa ja tarkastuksen tavoitteena on pyrkiä varmistamaan riittävällä varmuudella se, että kappale soveltuu suunniteltuun käyttöön. (Orkas 2012.)

Ainetta rikkomattomien testausmenetelmien (Non Destructive Testing, NDT) yhteydessä visuaalisella tarkastuksella tarkoitetaan kappaleen tarkastamista silmämääräisesti. Visuaalinen tarkastus on yleisin, halvin ja tärkein NDT-menetelmistä. Kuten muutkin NDT-menetelmät, on myös visuaalinen tarkastaminen standardisoitu. Visuaalinen tarkastus on myös mahdollista automatisoida konenäköä käyttämällä. (Niemi 2010; Lempinen et al. 2012.)

Visuaalista tarkastamista koskevassa standardissa SFS-EN 13018/A määritellään yleiset periaatteet ja olosuhteet, kuten vähimmäisvalaistus, katse-
lukulmat ja -etäisyydet sekä tarkastajien pätevyitys. Tässä standardissa visuaalinen tarkastus jaetaan suoraan ja epäsuoraan visuaaliseen tarkastukseen. Standardissa SFS-EN 13927 määritellään käytettävissä olevat laitteet ja niitä koskevat yleis- ja suorituskykyvaatimukset. (SFS-EN 13927:2003; SFS-EN 13018/A1:2004.)

Suorassa tarkastuksessa tarkastettavan kohteen ja tarkastajan silmän välillä on suora optinen reitti. Suorassa tarkastuksessa on mahdollista käyttää apuvälineitä, esim. optisia välineitä kuten peilejä, suurennuslaseja, tähtyslaitteita sekä erilaisia tulkkeja, mittoja ym. Epäsuoralla testauksella tarkoitetaan valokuvasta, videokuvasta tai muusta vastaavasta tapahtuvaa tarkastusta. (SFS-EN 13018/A1:2004.)

Toisin kuin muissa NDT-menetelmissä, pelkkää suoraa visuaalista tarkastusta suorittavia henkilöitä ei tarvitse pätevoittää ja sertifioida standardin SFS-EN ISO 9712 mukaan. Silmämääräisen tarkastuksen standardin SFS-EN 13018 mukaan tarkastusta suorittavan henkilön tulee tuntea mm. liittyvät standardit, säännöt, määritelmät ja menetelmät sekä tuntea valmistusmenetelmä ja/tai testattavan kohteen käyttöolosuhteet. Testaajan näkökyvyn tulisi vastata pätevointi- ja sertifiointistandardin vaatimuksia ja lisäksi testaajan kaukonäön näöntarkkuuden laseilla korjaamattomana tai korjattuna visus-arvon tulee olla vähintään toisessa silmässä 0,63 EN ISO 8596:n mukaisella näkötestitaululla. Standardissa SFS-EN ISO 9712 lähinäkö-tarkkuuden tulee olla sellainen että henkilö voi lukea 20 cm etäisyydeltä tekstiä, jonka kirjainkorkeus on 1,6 mm ja värinäkökyvyn on oltava riittävä tutkittavien kappaleiden kannalta. Lähinäkö-tarkkuuden testinä voidaan käyttää esim. Jaeger-testiä ja värinäköille esim. Ishihara- tai harmaasävytestiä. (SFS-EN 13018/A1:2004; SFS-EN ISO 9712:2012.)

Toimeksiantajalla suoritettava visuaalinen tarkistus ei ole NDT-tarkastuksien alle luokiteltavaa silmämääräistä testausta (visual testing, VT), sillä tarkastajia ei ole sertifioitu eikä tarkastusolosuhteiden standar-

dinmukaisuutta ole tarkistettu eikä valukappaleiden silmämääräisen tarkastuksen standardi tätä edes vaadi. (Järvinen 2014.)

Toimeksiantajan tuotannossa kaikki valetut kappaleet käyvät yleensä läpi koko erän ja kaikki piirteet kattavan visuaalisen tarkastuksen. Joitain helpoja tuotteita tarkastetaan ns. massatarkastuksena, jolloin käydään läpi vain kappaleen tärkeimmät piirteet. Tarkastuksen yhteydessä tehdään myös erilaisten muotojen ja piirteiden tulkkausta, yleensä 1-10 % otoksena koko erän kappalemäärästä. Joitain tulkkauksia tehdään myös sen takia, että kappaleet soveltuisivat suunniteltuihin jatkojalostustoimenpiteisiin, kuten esim. kiinnittimiin koneistuksessa. (Järvinen 2014; Niemi 2010; Lempinen et al. 2012.)

4 TARKKUUSVALUKAPPALEEN VIRHEET JA TOLERANSSIT

Kun puhutaan valukappaleista ja niiden sisältämistä virheistä, on tärkeä tuoda esiin se seikka, että virheetöntä valukappaletta ei ole olemassakaan. On olemassa joukko virhetyyppejä, kuten esimerkiksi keskilinjahuokoisuus ja mikroimut, joita on erittäin vaikea tai jopa mahdoton saada kokonaan poistetuksi ja näin ollen tulee valukappaleessa aina olemaan jonkin verran virheitä. (Meskanen & Höök 2010; Orkas 2012.)

Meskanen ja Höök (2010) määrittelevät valuvian valukappaleen suunnittelun, muotin tai mallin suunnittelun, sulattamisen, sulan kuljettamisen ja käsittelyn, keernanvalmistuksen, muotin kokoamisen tai valamisen aikana sattuneesta virheestä johtuvaksi puutteeksi valukappaleen rakenteessa. Valuvikoja ovat mm. mittaviat, muotoviat, imu- eli kutistumaviat, ainepuutokset, pintaviat ja sulkeumat.

Kuten muissakin valukappaleissa, voidaan myös tarkkuusvalukappaleissa ilmenevät virheet luokitella niiden ilmenemispaikan mukaan pintavirheiksi tai sisäisiksi virheiksi. Valukappaleiden valmistuksessa virheiden esiintymisen mahdollisuus on suuri johtuen sekä prosessissa vaikuttavien tekijöiden suuresta määrästä että osaltaan myös niiden hankalasta kontrolloitavuudesta. Ensisijaisesti virheitä tulisi pyrkiä ehkäisemään, sillä virheellisen kappaleen hylkääminen tai korjaaminen aiheuttaa aina lisäkustannuksia. Virheiden ehkäisemisessä hyvällä laadunvarmistuksella, työntekijöiden ammattitaidolla ja ohjeistuksen oikeellisuudella on tärkeä asema. (Dulay 2008; Autere et al. 1986, 487-490.)

Vaikka mm. sekä Meskanen ja Höök (2010), Autere ym. (1982, 1982) että Metalliteollisuuden keskusliitto ry. (1985) ovat kaikki julkaisseet suomenkielistä kirjallisuutta valuvirheistä, käsittelevät nämä kuitenkin lähestulkoon ainoastaan hiekka-, kokilli- ja painevalua, eivätkä näin olleen täysin sovellu tarkkuusvaluvirheille. Osa valutapahtumaan liittyvistä virheistä, kuten esimerkiksi imut ja reiät, ovat analogisia sekä hiekka- että tarkkuusvaluissa, mutta niiden ratkaisumallit eroavat. Toisaalta taas esimerkiksi kaikki mallivirheet eroavat käytännössä täysin hiekka- ja tarkkuusvalumetelmissä.

Tarkkuusvaluvirheistä on englanniksikin rajoitettu määrä sisältöä ja tarkemmin niitä käsitellään lähinnä alan yhdysvaltalaisen toimialayhdistyksen Investment Casting Institutin (ICI) julkaisemissa ohjeissa ”Atlas of Casting Defects” (2009), ”Atlas of Shell Defects” (2009) ja ”Atlas of Wax Pattern Defects” (2009) sekä The British Investment Casting Trade Association:n (BICTA) julkaisussa ”Investment Casting: Recognition and Definition of Flaws” (1988). Nykyään BICTA kuuluu vuonna 2011 perustettuun Cast Metals Federation-ammattiliittoon. Lisäksi tarkkuusvaluja käsittelevässä kirjallisuudessa on näihin pohjautuvia muutaman sivun kokonaisuuksia. Hyvin suuressa roolissa on valimon henkilökunta ja kokemuksen tuoma osaaminen. (BICTA 1998; ICI 2009.)

Yleisesti valukappaleiden pintavirheiden luokitteluun ja hyväksymisrajoihin on olemassa myös mm. Manufacturers Standardization Society:n laatima vakiokäytäntö MSS SP-55-2006 sekä standardi SFS-EN 1370, joita toimeksiantajan tuotannossa myös joudutaan eräiden asiakkaiden vaatimuksesta käyttämään. (MSS SP-55:2006; SFS-EN 1370:2012.)

Tarkkuusvalukappaleiden pintavirheiden hyväksymisrajoja käsitellään standardissa ISO 19959:2005. Tässä standardissa määritellään hyväksymistasot I-IV ja niissä sallittujen pintavirheiden enimmäiskoot ja –määrät taulukon 1. mukaisesti. (ISO 19959:2005.)

Taulukko 1. Visuaalisen tarkastuksen hyväksymisperusteet (mukailten ISO 19959:2005, 3).

Taulukko 1 – Visuaalisen tarkastuksen hyväksymisperusteet				
Virhetyyppi	Taso I	Taso II	Taso III	Taso IV
Negatiivinen virhe ^{b,c,d} - enimmäiskoot ja määrät 625mm ² :n alueella	Yksi virhe, jonka halkaisija 0,75 mm ja syvyys 0,4 mm	Yksi virhe, jonka halkaisija 0,75 mm ja syvyys 0,4 mm	Yksi virhe, jonka halkaisija 1,5 mm ja syvyys 0,75 mm	Neljä virhettä, joiden halkaisija 1,5 mm ja syvyys 0,75 mm
Lineaarinen epäjatkuvuus	Ei sallittu	Ei sallittu	Ei sallittu	Ei sallittu
Positiivinen virhe ^{c,d} - enimmäiskoot ja määrät 625mm ² :n alueella	Yksi virhe, jonka halkaisija 1,0 mm ja syvyys 0,25 mm	Yksi virhe, jonka halkaisija 1,5 mm ja syvyys 0,4 mm	Yksi virhe, jonka halkaisija 3,0 mm ja syvyys 0,75 mm	Neljä virhettä, joiden halkaisija 3,0 mm ja syvyys 0,75 mm
Jakosauman ja ulostyöntötappien jäljet ^e	0,10 mm	0,25 mm	0,50 mm	1,00 mm
Valunavan korkeus	0,25 mm	0,40 mm	0,75 mm	1,15 mm
Näennäinen pinnankarheus ^d	1,6 µm	2,5 µm	3,2 µm	6,4 µm
a	Pintavirheiden koot ja määrät, jotka ylittävät tason rajat, eivät ole hyväksyttäviä.			
b	Negatiivisen virheen syvyys ei saa rikkoo pienintä vaadittua seinämänpaksuutta.			
c	Negatiivisiä ja positiivisiä virheitä sekä lineaarisia epäjatkuvuuksia, joiden koko on pienempi kuin 0,25 mm tulee pitää merkityksettöminä.			
d	Määritellään visuaalisella tarkastuksella käyttäen apuna vertailusarjaa, esim. BINF 359-1:n Levy 3/OS1 = Ra 1,6/3,2 ja Levy 2/OS1 = Ra 6,3.			
e	Pätee positiivisille virheille, muut tilat käsitellään kuten negatiiviset virheet.			

Vaikka standardit tarjoavat hyvän lähtökohdan kappaleen vaatimusten määrittelyä varten, käytetään näitä melko vähän. Toimeksiantajalla kappaleiden lopullinen tarkastustaso on yleensä määritelty kokemukserusteisesti ja asiakkaan kanssa sopimalla. Helpointa tämä on sellaisten asiakkaiden kanssa, joihin on muodostunut pitkä ja toimiva yhteistyösuhde sekä niissä tilanteissa, joissa valmistettujen kappaleiden loppukäyttökohde on tiedossa. (Lintukorpi 2014.)

4.1 Valukappaleen toleranssit

Tarkkuusvalukappaleen mittatoleranssien hallinta valimossa vaatii pitkän kokemuksen ja ymmärryksen prosessin eri vaiheiden vaikutuksesta lopputulokseen. Kutistumia on useassa eri vaiheessa kuten vahamallin valmistuksessa ja valutapahtumassa, jossa esim. hiili- ja matalaseosteisten terästen valukutistuma jähmettymislämpötilasta on 1,8 - 2,2 %. (Arola 2010; Lintukorpi 2014.)

Vaikka sekä asiakkaalle että toimittajalle valutoleranssien käyttö olisi yleensä helpoin tapa kommunikoida tuotteeseen liittyviä mitta- ja geometriavaatimuksia, niin käytännössä kappaleen lopullinen mittavaatimus on kooste eri lähteistä tulevista vaatimuksista. (Lintukorpi 2014.)

Kappaleiden mittavaatimusten ja toleranssien ilmaisemiseen voidaan käyttää mm. pituusmittojen toleranssien ISO-merkintäjärjestelmän standardia ISO 286-2, yleistoleranssien järjestelmää standardissa ISO 2768-1, muotilla valmistettujen kappaleiden mitta- ja geometristen toleranssien toleranssijärjestelmää standardissa SFS-EN ISO 8062-3 ja näitä vastaavia American National Standards Instituten julkaisemia ANSI-standardia sekä asiakas- että toimittajakohtaisia toleransseja. Näiden lisäksi mm. ICI ja SFSA (Steel Founders Society of America) ovat julkaisseet omat standardinsa koskien valu- ja tarkkuusvalukappaleen toleransseja. (Silva 2009.)

Valukappaleiden mittatoleransseja käsittelevässä standardissa SFS-EN ISO 8062-2 on valukappaleiden toleranssit jaettu mittatoleransseihin DCT (Dimensional Casting Tolerance) ja geometrisiin toleransseihin GCT (Geometrical Casting Tolerance). Molemmissa on joukko sekä dimensio-naalisia toleranssiasteita DCTG (Dimensional Casting Tolerance Grade) että geometrisiä toleranssiasteita GCTG (Geometrical Casting Tolerance Grade), joista valitaan sopiva kappaleen käyttötarkoituksen, käytettävän valumenetelmän ja -materiaalin mukaan. Standardissa ISO 8062-1 on näihin toleransseihin liittyvä sanasto ja CEN:n teknisessä määrittelyssä ISO/TS 8062-2 on annettu säännöt näiden toleranssien ja standardien käyttöön. (SFS-EN ISO 8062-1:2007; CEN ISO/TS 8062-2:2013; SFS-EN ISO 8062-1:2007.)

Talukoista 2. ja 3. voidaan nähdä, että teräksestä valetulla, konekaavatulla hiekkamuotilla päästään annettujen toleranssiasteiden rajoissa nimellismitaltaan 16 mm kappaleella 1,1 – 4,4 mm toleranssialueeseen, kun vastaavat arvot tarkkuusvalulla ovat 0,28 – 1,6 mm. Erityistoimenpitein toimeksiantajalla tarkkuusvaletuissa sarjatuotteissa on tarvittaessa pienissä kappaleissa, joiden suurin mitta on alle 16 mm, mahdollista päästä rajatuissa yksityiskohdissa jopa DCTG1:n mukaisiin toleransseihin ilman jälkikäsitelytoimenpiteitä. Näiden lisäksi on käytössä myös omia, valimokohtaisia kokemuksen perustuvia, toleransseja. (Lintukorpi 2014; SFS-EN ISO 8062-3 + AC:2007.)

Taulukko 2. Valukappaleiden mittatoleranssiaste (DCTG) valumetallin mukaan (SFS-EN ISO 8062-3 + AC:2007).

Menetelmä	Valukappaleiden mittatoleranssiaste (DCTG) valumetallien mukaan								
	Teräs	Suomugrafiitti-valurauta	Pallografiitti-valurauta	Adusoitu valurauta	Kupari-seokset	Sinkki-seokset	Kevytmetalli-seokset	Nikkeli-pohjaiset seokset	Koboltti-pohjaiset seokset
Hiekkavalu, käsinkaavaus	11...14	11...14	11...14	11...14	10...13	10...13	9...12	11...14	11...14
Hiekkavalu, kone- ja kuorimuottikaavaus	8...12	8...12	8...12	8...12	8...10	8...10	7...9	8...12	8...12
Metallinen kestomuotti (paitsi painevalu)	–	7...9	7...9	7...9	7...9	7...9	6...8	–	–
Painevalu	–	–	–	–	6...8	3...6	6...9 ²	–	–
Tarkkuusvalu ¹	4...9	4...9	4...9	–	4...9	–	4...9	4...9	4...9

Taulukko 3. Valukappaleiden pituusmittojen toleranssit mittatoleranssiasteiden (DCTG) mukaan (SFS-EN ISO 8062-3 + AC:2007).

Muotilla valmistetun kappaleen nimellismita	Valukappaleiden pituusmittojen toleranssit mittatoleranssiasteiden (DCTG) mukaan															
	DCTG1	DCTG2	DCTG3	DCTG4	DCTG5	DCTG6	DCTG7	DCTG8	DCTG9	DCTG10	DCTG11	DCTG12	DCTG13	DCTG14	DCTG15	DCTG16
–	≤10	0,09	0,13	0,18	0,26	0,36	0,52	0,74	1	1,5	2	2,8	4,2	–	–	–
>10	≤16	0,1	0,14	0,2	0,28	0,38	0,54	0,78	1,1	1,6	2,2	3	4,4	–	–	–
>16	≤25	0,11	0,15	0,22	0,3	0,42	0,58	0,82	1,2	1,7	2,4	3,2	4,6	6	8	10
>25	≤40	0,12	0,17	0,24	0,32	0,46	0,64	0,9	1,3	1,8	2,6	3,6	5	7	9	11
>40	≤63	0,13	0,18	0,26	0,36	0,5	0,7	1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	10	12
>63	≤100	0,14	0,2	0,28	0,4	0,56	0,78	1,1	1,6	2,2	3,2	4,4	6	9	11	14
>100	≤160	0,15	0,22	0,3	0,44	0,62	0,88	1,2	1,8	2,5	3,6	5	7	10	12	16
>160	≤250	–	0,24	0,34	0,5	0,7	1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	14	18
>250	≤400	–	–	0,4	0,56	0,78	1,1	1,6	2,2	3,2	4,4	6,2	9	12	16	20
>400	≤630	–	–	0,64	0,9	1,2	1,8	2,6	3,6	5	7	10	14	18	22	28
>630	≤1000	–	–	–	1	1,4	2	2,8	4	6	8	11	16	20	25	32
>1000	≤1600	–	–	–	–	1,6	2,2	3,2	4,6	7	9	13	18	23	29	37
>1600	≤2500	–	–	–	–	–	2,6	3,8	5,4	8	10	15	21	26	33	42
>2500	≤4000	–	–	–	–	–	–	4,4	6,2	9	12	17	24	30	38	49
>4000	≤6300	–	–	–	–	–	–	–	7	10	14	20	28	35	44	56
>6300	≤10000	–	–	–	–	–	–	–	–	11	16	23	32	40	50	64

4.2 Tarkkuusvalulle ominaisia virheitä

On olemassa virheitä, jotka ovat tarkkuusvaluprosessille ja -kappaleille ominaisia. Seuraavassa käydään läpi neljä toimeksiantajan tuotannossa eniten ilmenevää virhetyyppiä, näiden syntymekanismia ja ehkäisykeinoja. Käsittelyn ulkopuolelle on rajattu kokonaan kaikki kappaleiden sisäiset virheet, sillä niitä ei ole mahdollista tarkistaa visuaalisesti. (Dulay 2008; Clegg 1991.)

Joidenkin virhetyyppien kohdalla yksiselitteinen luokittelu visuaalisen tarkistuksen yhteydessä on haastavaa, sillä virheiden koko saattaa olla näkökyvyn erotusrajoilla ja eri tyypit voivat sekaantua herkästi muiden samankaltaisten virheiden kanssa. Esimerkiksi virheryhmä, jota kutsutaan Saco-tecillä kolhuksi saattaa tarkastetuissa kappaleissa vaihdella todellisuudessa oikeasta kolhiintumisesta keraamimuottiin jääneeseen ilmaan ja liimausvirheeseen. Oikean luokittelun aikaansaamisessa on tärkeässä asemassa tarkastajien kouluttaminen, ammattitaito ja kokemus. (Järvinen 2014.)

Virhetyyppien oikea luokittelu on tärkeää prosessin jatkuvan seuraamisen ja parantamisen kannalta. Jos tietyn tyyppisiä virheitä luokitellaan jatkuvasti väärin, kohdistetaan korjaavat toimenpiteetkin väärin. (Valjakka 2014.)

4.2.1 Hiilenkato

Hiilenkato ja perinteisten hiekkavalujen ongelmana oleva pinnan hiilettyminen ovat kummatkin valuvirheitä. Ilma-atmosfääriin tapahtuvassa tarkkuusvalussa syntyy kappaleen pintaan hiilenkato, joka johtuu reagoimatomaan muottiin jääneestä, ilmasta peräisin olevan hapesta ja muotin läpäisevyydestä ympäristöön. (Campbell 2011.)

Hiilenkatoa tarkkuusvalussa voidaan vähentää mm. sijoittamalla muotti heti valun jälkeen hiilellä täytettyyn astiaan tai suorittamalla valu inertissä atmosfäärissä, ns. alipainevaluna. Etenkin karkaistavien terästen kohdalla nämä toimenpiteet eivät ole riittäviä, vaan joudutaan tekemään erillinen hiiletyskäsittely, jossa kappaleen pintaan ajetaan hiiltä kompensoimaan valussa pinnasta kadonnutta hiiltä hiilipitoisen atmosfääriin ja kohotetun lämpötilan alulla. (Campbell 2011.)

4.2.2 Vajaavalu

Kappaleiden vajaus johtuu pääsääntöisesti ongelmista muotin kaasunpoistossa ja valutapahtumassa tehdyistä virheistä. Tarkkuusvalumuotissa koko muottiseinä toimii muotin ilmauksena, kun taas esim. kokillivaluissa on erilliset ilmauskanavat. Muottiseinän paksuuden, ja sitä myötä myös läpäisevyyden, tarkka hallinta on haastavaa. (Beeley 2001; Lintukorpi 2014.)

Vajaavalu on toimeksiantajan tuotannossa selkeästi yleisin virhetyyppi. Vajaiden kappaleiden painotettu keskiarvo kaikista vuonna 2013 valmistetuista kappaleista oli noin 4%. (Valjakka 2014.)

Muottien täyttymistä voidaan parantaa mm. muuttamalla käytetyn tulenkestävän materiaalin raekokoa suuremmaksi kuoren läpäisevyyden parantamiseksi. Juoksevuuden parantamiseksi voidaan sekä nostaa terässulan etä muotin lämpötilaa ja säätää teräksen seostusta. Helppointa on säätää valulämpöä eli lämpötilaa, joka on noin 100-200°C seoksen sularajan yläpuolella. Metalliseoksen ylikuumennus tuo kuitenkin mukanaan ongelmia, sillä mitä kuumempaa terässeos on, sitä herkemmin se imee itseensä kaasuja, kuten hapetta, typpeä ja vetyä ilmasta. (Autere et al. 1982; Lintukorpi 2014.)

Juoksevuuden parantamiseen seostamalla on valuteräksissä käytössä fosfori, litium sekä pii, joka aina 0,3 %:n tilavuuteen asti parantaa juoksevuutta. Fosforin ongelmana on se, että se heikentää teräksen kestävyyttä ja on näin ollen epätoivottu seosaine. Seostamalla saadut juoksevuuden lisäykset ovat kaiken lisäksi hyvin marginaalisia ja niistä on olemassa ristiriitaista tietoa. (Autere et al. 1982; Lintukorpi 2014.)

4.2.3 Kolhiintumat

Kolhiintumia syntyy prosessissa lähinnä irrotuksen ja kuorenpoiston yhteydessä. Niitä pyritään estämään valupuiden ja irrotettujen kappaleiden

varovaisemmalla käsittelyllä, mutta se ei välttämättä ole aina mahdollista, esimerkiksi valussa vajaaksi jääneestä valupuusta joudutaan irrottamaan kappaleet manuaalisesti, eikä sitä voi kovin varovaisesti tehdä. Ei ole myöskään taloudellisesti mielekäästä tyhjentää käsiteltyjä kappaleita esimerkiksi rumpuhiekkasingosta pienissä erissä ja varovaisesti. Lisäksi on olemassa mahdollisuus, että kolhiintumiksi luokitellaan muita virheitä, kuten esim. vajaavaluja, ilmavirheisiä kappaleita tai vahavirheitä. (Järvinen 2014.)

4.2.4 Purseet ja pullistumat

Tarkkuusvaluprosessissa kappaleeseen voi purseita syntyä vahamallin valmistuksessa, kuorenvalmistuksessa, valussa ja jatkojalostuksessa. Vahamallista peräisin oleva purse voi syntyä työkalun huonon sulkeutumisen johdosta tai virheellisestä mallin osien kasaamisesta. Vahamallin puristuksesta peräisin olevia purseita voidaan ehkäistä sekä huolellisella työkaluasetuksella, riittävällä vahamallien tarkistuksella puristuksen yhteydessä, huolellisella ja oikein tehdyllä vahamallin osien kokoonpanolla että vahamallien tarkastamisella vahapuun liimaamisen yhteydessä. (Lintukorpi 2014.)

Kuorenvalmistuksessa itsessään ei kappaleisiin voida saada aikaan purseita tai pullistumia. Kuorenvalmistuksesta lähtöisin olevien purseiden ja pullistumien aiheuttajana on joko kuoren jääminen liian ohueksi, märäksi tai väärin suunniteltu valupuun rakenne. Liian ohut tai vajavaisesti tuettu kuori ei kestä metallisulan tuottamaa mekaanista räsitystä ja pullistuu ulospäin. Kuoren pullistuessa voi muodostua myös purseita jos kappaleessa on esim. reikiä, jolloin reiän sisällä oleva kuori menee rikki. Kuorenvalmistuksen yhteydessä näitä virhetyyppejä voidaan ehkäistä pitämällä huoli, että kastohallin olosuhteet ovat oikeat ja noudatetaan annettuja kasto-ohjeita ja -ohjelmia. Kasto-ohjeissa on kerrottu mm. käytettyjen keraamiliementen ja hiekkojen oikea koostumus ja kastettavien kerrosten tyyppi ja määrä. (Valjakka 2014.)

Vahanpoiston yhteydessä liian hidaskuoren paineen kohottaminen ja liian nopea paineen lasku voivat aiheuttaa muotin rikkoontumisen, joka näkyy mm. irronneena esikastokerroksena, muotin kerrosten irtaantumisena toisistaan ja muotin fyysisenä rikkoontumisena. Vahanpoiston yhteydessä voidaan muotin rikkoutumisesta johtuvia vikoja ehkäistä käyttämällä oikeita prosessiparametreja. (Valjakka 2014; BICTA 1998; ICI 2009.)

Ehjä kuori voi pettää ja antaa periksi valussa, jos valupuun rakenne on suunniteltu väärin eikä isoilla, laakeilla pinnoilla ole tarpeeksi tukea. Myös väärin suoritettu sintraus sekä liian märkänä vahanpoistoon ja sint-raukseen otettu kuori voivat aiheuttaa kuoren rikkoontumisen valutilanteissa. (Valjakka 2014; BICTA 1998; ICI 2009.)

Jatkojalostuksessa kappaleeseen ei käytännössä voi pullistumia muodostua, mutta purseita aiheuttaa erityisesti kappaleiden liian pitkä pitoaika teräskuula- ja hiekkapuhalluksessa. Myös koneistuksissa, kuten porauksessa, kiertetyksessä ja valunavan poistossa, voi muodostua purseita, mutta

nämä eivät näy tarkastustuloksessa sillä kappaleet koneistetaan yleensä vasta visuaalisen tarkastuksen jälkeen. Jatkojalostuksessa syntyviä purseita voidaan ehkäistä käyttämällä riittävän lyhyitä puhalluksen jaksoaikoja ja käsittelemällä kappaleita huolellisesti. Koneistuksen onnistumista ja mm. mahdollisia purseita valvotaan valmistuseräkohtaisin otostarkastuksin. (Valjakka 2014; BICTA 1998; ICI 2009.)

4.2.5 Vahan pintavirheet

Tähän ryhmään luokitellaan toimeksiantajalla sekä vahamalleihin puristuksen yhteydessä syntyneet ilmankuplat että osa pienikokoisista liimauksen yhteydessä roiskuneista vahatipoista, sillä näitä on haasteellista erottaa selkeästi toisistaan. Vian tunnistaminen vahan pintavirheeksi tai liimausvirheeksi vaatii tarkastajalta tuntemusta vahapuun kokoonpanosta. Vahan pintavirheitä voidaan ehkäistä vahatyökalujen oikealla suunnittelulla sekä käyttämällä oikeita prosessiarvoja vahanpuristuskoneilla. (Valjakka 2014; BICTA 1998; ICI 2009.)

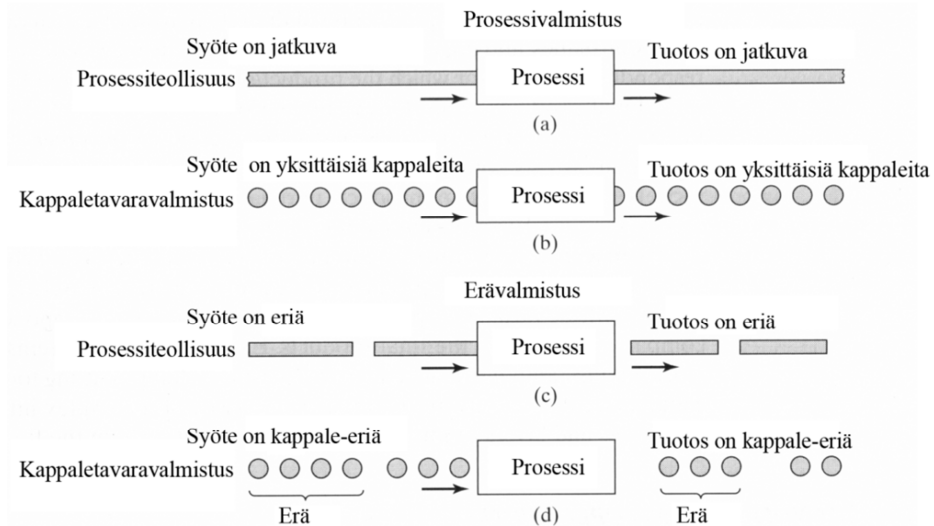
5 KAPPALETARKASTUAUTOMAATIOLAITTEEN SUUNNITTELU

Grooverin (2011, 877) mukaan ”automaatio voidaan määritellä tekniikaksi, jonka avulla prosessi tai käsittely suoritetaan ilman ihmisen apua”. Tällaisen automaation kolme peruskomponenttia ovat voimanlähde, ohjausohjelma ja ohjausjärjestelmä. Yleisin voimanlähde on sähkö ja se voidaan muuntaa helposti myös muuhun muotoon, kuten pneumaattiseksi, hydrauliseksi tai termiseksi voimaksi. Ohjausohjelma määrittelee järjestelmän suorittamat toimenpiteet jotka ohjausjärjestelmä toteuttaa. (Groover 2011.)

Teollisuusautomaation sovelluksia voidaan luokitella ja jakaa monella eri tavalla, mutta helpoin on lähteä liikkeelle käsiteltävän tuotteen laadusta. Automaatiolla käsiteltävä tuote voi olla joko prosessi, kuten esim. neste, kaasu ja jauhe, joista ei voida helposti erottaa yhtä selvää yksikköä tai siten kappaletavara, joka on selkeästi oma tuotteensa kuten esim. auto tai matkapuhelin. (Kippo & Tikka 2008, 7-12; Groover 2008, 29.)

Prosessiautomaatiossa automatisoinnin kohteena on koko ajan jatkuvan tuotantolinjan tai -tehtaan tai yksittäisen tuotantoerän valmistusprosessi. Sitä sovelletaan virtaavien aineiden, kuten nesteiden, kaasujen ja jauheiden käsittelyyn sekä jatkuvana virtana tulevien samanlaisten kappaleiden prosessoimiseen. (Kippo & Tikka 2008, 7-12; Groover 2008, 29.)

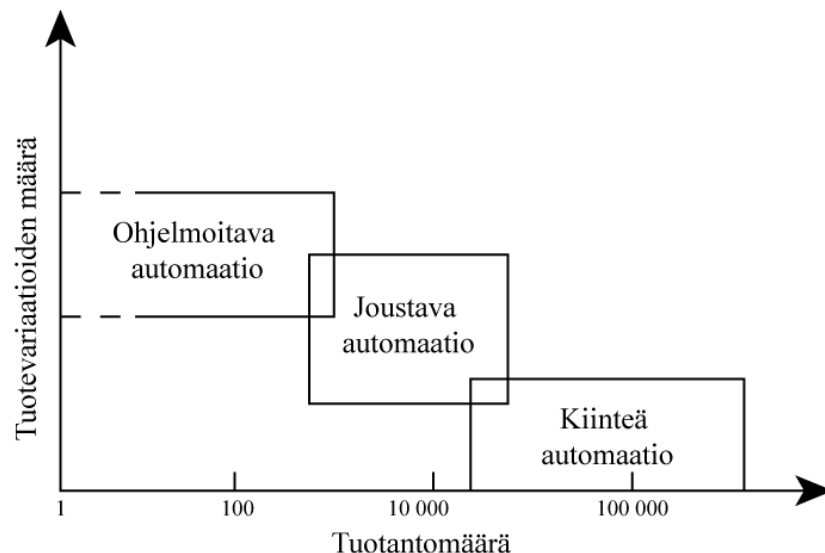
Kuvassa 10 on havainnollistettu jakoa näiden eri tuotantotapojen välillä, joita ovat a) prosessiautomaatio, b) jatkuva kappaletavara-automaatio, c) eräluotoinen prosessiautomaatio ja d) eräluotoinen kappaletavara-automaatio. (Groover 2008, 29.)



Kuva 10. Jatkuva ja erätuotanto prosessiteollisuudessa ja kappaletavaravalmistuksessa. (Groover 2008).

Automaatiojärjestelmän tai laitteen toiminta perustuu aina mitta-anturien avulla kerättävään mittausdataan. Näiden mittausten avulla laitteisto säätelee omaa toimintaansa tiettyjen ohjausohjelmaan ohjelmoitujen parametrien puitteissa. (Kippo & Tikka 2008, 7-9.)

Tässä työssä käsiteltävä automaatiolaitteisto kuuluu kappaletavara-automaation sovellutuksiin. Tuotannossa käytettävät automaatiojärjestelmät voidaan jakaa kiinteisiin, ohjelmoitaviin ja joustaviin automaatiojärjestelmiin. Eri automaatiolaitteistotyyppien sijoittuminen toisiinsa suhteessa tuotevariaatioiden määrään ja tuotantomääriin voidaan nähdä kuvasta 11. (Groover 2008, 10.)



Kuva 11. Eri automaatiojärjestelmätyyppien soveltaminen (Groover 2008, 10).

Kiinteille järjestelmille on ominaista suuri tuotantokapasiteetti, kalliit alkuperäiset investoinnit mutta kuitenkin pieni yksikkökustannus ja hyvin minimaalinen, jopa olematon, joustavuus ja sopeutuvuus. Esimerkiksi miltei kaikki prosessiautomaatiojärjestelmät ovat kiinteitä järjestelmiä, sillä ne soveltu-

vat vain yhdenlaisen tuotteen tietynlaiseen käsittelyyn. (Kippo & Tikka 2008; Groover 2008, 10.)

Ohjelmoitavien järjestelmien ominaispiirteitä ovat yleiskäyttöisen, ohjelmoitavan laitteiston korkeat alkuinvestoinnit, pienempi ja hitaampi tuotantokapasiteetti kuin kiinteillä järjestelmillä ja kyky mukautua erilaisiin tuotteisiin uudelleenohjelmoinnin avulla. Ohjelmoitavat järjestelmät sopivat eräluonteisesti valmistettaville tuotteille, mutta vaativat kuitenkin ohjelmoinnin vaihdon ja asetusten säädön eri tuote-erien välillä. Tutuimmat esimerkit ohjelmoitavista automaatiojärjestelmistä ovat esim. CNC-työkoneet ja robotit. (Groover 2008, 10.)

Joustavat järjestelmät ovat nimensä mukaisesti ohjelmoitavissa kappalekohtaisesti. Niillä on korkeat alkuinvestoinnit, keskinertainen tuotantokapasiteetti ja kyky tuottaa jatkuvasti erilaisia tuotteita. Tunnetuimmat joustavat järjestelmät ovat yleensä useista CNC-työstökeskuksista, kappalevarastointi- ja kuljetusjärjestelmästä sekä apulaitteista muodostuva FM-järjestelmä (FMS, Flexible Manufacturing System) ja pienempi, vain muutamasta edellä mainitusta koostuva FM-solu, (FMC, Flexible Manufacturing Cell). (Groover 2008, 11; Groover 2011, 877-880, 925-926.)

Vaikka tuotantomäärien perusteella työssä suunniteltava tarkastusautomaatiolaitteisto sijoittuisi kuvan 11 mukaan kiinteän automaation piiriin, niin käytännössä tuotevariaatioiden määrä sulkee pois kaikki muut kuin ohjelmoitavan automaation.

5.1 Tarkastuksen virheettömyys

Tarkastusprosessissa on aina olemassa mahdollisuus virheen syntyyn. Virheellisesti tarkastetut kappaleet voidaan jakaa virheelliseksi hyviin ja virheelliseksi huonoihin. Virheellisesti hyvät kappaleet ovat sellaisia, jotka ovat viallisia, mutta ne ovat päätyneet kelvollisten kappaleiden joukkoon. Virheellisesti huonot kappaleet taas ovat puolestaan hyviä kappaleita, jotka on luokiteltu viallisiksi. Taulukko 4 havainnollistaa näiden päätösten ja virhetyyppien suhteita. (Groover 2008.)

Taulukko 4. Virhetyypit (Groover 2008, 632).

Päätös	Kelvollinen kappale	Viallinen kappale
Hyväksy	Hyvä päätös	Tyyppin 2 virhe ”Huti”
Hylkää	Tyyppin 1 virhe ”Väärä hälyytys”	Hyvä päätös

Yleisiä lähteitä virheiden syntyyn manuaalisessa tarkastuksessa ovat mm. uupuminen ja harkinnanvaraisuus. Koneellisessa tarkastuksessa näitä syitä ovat mm. mittalaitteiden tarkkuus ja ohjelmistovirheet. Tarkastuksen vaikeus ja monimutkaisuus on molemmille tarkastustavoille yhteinen virhelähde. (Groover 2008.)

Termi tarkastustarkkuus viittaa tarkastusprosessin kykyyn välttää näitä virheitä. Tarkastustarkkuus on korkea kun virheitä tulee vähän tai ei ollenkaan. Kun kappaleet jaetaan kahteen ryhmään, kelvollisiin ja viallisiin, voidaan näitä tuloksia kuvata termeillä p_1 , joka tarkoittaa suhteellista osuutta kerroista (tai todennäköisyyttä) kun kelvollinen kappale luokitellaan kelvolliseksi, ja p_2 , joka puolestaan suhteellista osuutta kerroista (tai todennäköisyyttä) kun viallinen kappale luokitellaan vialliseksi. Tyypin 1 virheet ilmaistuna p_1 :n suhteen on $1-p_1$ ja tyypin 2 virheet p_2 :n suhteen $1-p_2$. Lisäksi kun määritetään, että q on virheellisten määrä prosentuaalisena murtolukuna, voidaan taulukon 5 mukaan laskea mahdolliset tarkastusprosessin tulokset. (Groover 2008.)

Taulukko 5. Tarkastusprosessin tulokset (Groover 2008, 633).

Päätös	Kappaleen todellinen tila		
	Kelvollinen	Viallinen	Kokonaismäärä
Hyväksy kappale	$p_1(1-q)$	$(1-p_2)q$	$p_1 + q(1-p_1-p_2)$
Hylkää kappale	$(1-p_1)(1-q)$	p_2q	$1-p_1-q(1-p_1-p_2)$
Kokonaismäärä	$(1-q)$	q	1

Toimeksiantajalla kaikille valmistetuille tarkkuusvalukappaleille tehdään 100 %:n visuaalinen tarkastus. Nykytilanteessa tämä tarkoittaa sitä, että tarkastaja ottaa käteensä jokaisen valmistetun kappaleen ja tarkastaa sen silmämääräisesti. Riippuen kappaleen vaatimuksista ja rakenteesta tämä tarkastustoimenpide kestää parista sekunnista useisiin kymmeneen sekunteihin. Vaikeimpia ovat kappaleet, joissa on paljon tarkastettavia piirteitä useilla eri puolilla sekä mahdollisesti tulkattavia reikiä tai äärimittoja. (Järvinen 2014.)

5.2 Vaatimusmäärittely

Ohjelmisto- ja tietojärjestelmäkehityksessä vaatimusmäärittely on Pohjosen (2002) mukaan dokumentti, johon on kerätty kehitettävälle järjestelmälle asetetut vaatimukset. Se vastaa kysymykseen, mitä ja miten järjestelmän tulee tehdä. Automaatiolaitteiston suunnitteluun ei ole suoraan olemassa tällaista vakiintunutta kaavaa, mutta ohjelmistokehityksen malleja voidaan hyvin soveltaa myös automaatiojärjestelmän suunnitteluun, sillä molemmissa on olemassa jokin syöte, jolle järjestelmän pitää tehdä erilaisia toimenpiteitä ja tuottaa lopuksi haluttu tuotos.

Vaatimusmäärittelyjen laatimiseen kannattaa panostaa, sillä Forsberg ja Mooz (1997) ovat tutkiessaan NASA:n projekteja osoittaneet, että kun kehitysbudjetista käytetään 7-15 % vaatimusmäärittelyyn, olivat budjettiylitykset keskimäärin alle 30 %. Jos vaatimusmäärittelyyn käytettiin vain 5 % kehitysbudjetista, olivat budjettiylitykset 40 %:sta jopa yli 160 %:iin.

Tarkastusautomaatiolaitteen vaatimusmäärittelyssä määritellään mm. sekä tilavuudeltaan että painoltaan suurin käsiteltävä kappale, kappaleidenkäsitelykapasiteetti, jaksoaika, pienimmät tarkastettavat yksityiskohdat sekä koko järjestelmän tarkkuusvaatimukset. Vaatimusmäärittely sisältää myös muiden, järjestelmän toiminnan kannalta tärkeiden toimintojen määrittely-

jä. Tällaisia ovat mm. mahdolliset käyttöliittymät, raportointi, toimintaolosuhteet ja toimeksiantajan turvallisuusvaatimukset. Näiden lisäksi vaatimusmäärittelyyn kirjataan myös vaatimuksia dokumentaation laajuudesta ja käytettävistä osista.

Toimeksiantajan alkuperäisenä ideana tarkastusautomaatiolaitteelle on ollut esim. selvästi vajaiden kappaleiden erottaminen kappalemassan joukosta. Loput kappaleet pitäisi tarkastaa käsin tai ottaa riski virheellisten tuotteiden päätyemisestä asiakkaalle. Opinnäytetyöhön valittujen kappaleiden virheprofiilien selvittämiseksi yrityksen tuotannonseurantajärjestelmästä poimittiin valituista kappaleista kolmen viimeisimmän tuotantoerän kappale- ja virhemäärät. Taulukko 6 pitää sisällään supistetun yhteenvedon virhemääristä ja liitteessä 1 on tarkempi virheiden erittely.

Taulukko 6. Yhteenvedo valittujen kappaleiden virhemääristä.

Pienempi kappale			
Virhetyyppi:	<u>Vajaa, kolhiintuma</u>	<u>Reikä, kuorenkolo</u>	<u>Vahan pintavirheet</u>
Tarkastetut			
55800 kpl	308 kpl	125 kpl	423 kpl
Prosentuaalinen osuus:	0,6 %	0,2 %	0,8 %
Isompi kappale			
Virhetyyppi:	<u>Vajaa, kolhiintuma</u>	<u>Reikä, kuorenkolo</u>	<u>Vahan pintavirheet</u>
Tarkastetut			
43400 kpl	176 kpl	638 kpl	1583 kpl
Prosentuaalinen osuus:	0,4 %	1,5 %	3,6 %

Taulukon 6 tietojen valossa on selvää, että jos esimerkkikappaleiden tarkastuksessa edettäisiin toimeksiantajan alkuperäisen idean mukaan, jäisi järjestelmän hyöty alhaiseksi. Lisäksi jos konenäköjärjestelmä suunniteltaisiin kattamaan vain vajaat kappaleet, niin kummankaan kappaleen kohdalla ei saataisi edes suurinta virheellisten kappaleiden ryhmää eroteltua hyvien kappaleiden joukosta.

Saatujen tulosten pohjalta päätettiin, että lähdetään tavoittelemaan mahdollisimman suurta määrää erilaisia virhetyyppejä ja että tarkastuksentarkkuuden p_1 tulisi olla parempi kuin 95 % ja p_2 :n mielellään tasolla 70–80 %. Jotta virheiden määrittelystä tulisi helpompaa ja yksiselitteisempää, päätettiin, että käytetään apuna taulukossa 1 esiteltyä tarkkuusvalukappaleiden pintavirheiden visuaalisen tarkastamisen standardia ISO 19959 ja määriteltiin järjestelmän virheiden vaadituksi erottelutarkkuudeksi kyseisen standardin laatuluokan I mukaiset virheet.

Laitteen käsittelykapasiteetin määrittämiseksi selvitettiin käsiteltäväksi aiottujen kappaleiden muodostaman kappalemassan keskimääräinen tiheys. Tätä varten mitattiin kappalemassan tiheys kuudella eri tuotteella käyttäen 300 ml astiaa ja vaakaa. Taulukko 7 sisältää mittaustulokset kuudella erikokoisella ja -tyyppisellä kappaleella, jotka muiden ominaisuuksiensa puolesta soveltuvat automaatiolaitteella tarkastettaviksi.

Taulukko 7. Toimeksiantajan valmistamien kappaleiden kappalemassan tiheyksiä.

Tuote	Paino (kg)	Tilavuus (dm ³)	Tiheys (kg/dm ³)
1	1	0,3	3,33
2	1,135	0,3	3,78
3	0,76	0,3	2,53
4	0,9	0,3	3,00
5	1	0,3	3,33
6	0,63	0,3	2,10

Järjestelmän haluttu, järkevä sykli aika tulee sijoittumaan välille 5-15 sekuntia kappaletta kohden. Näiden tietojen pohjalta on laadittu liitteen 2 taulukko, josta voidaan nähdä tarvittavat kokonaiskappalemassat- ja tilavuudet eri tiheyksille kappalemassoille ja halutuille toimintajaksoille. Toimeksiantajan tehdas toimii pääsääntöisesti kahdessa vuorossa klo 06-22 välisenä aikana, joten vähimmäisvaatimuksena voidaan pitää 8 tunnin itsenäistä toimintaa, mutta käytännössä olisi hyvä, jos tuo aika olisi luokkaa 12-16 h.

Taulukosta 7 voidaan nähdä, että kappalemassan tiheys vaihtelee välillä 2-4 kg/dm³. Kappaleenkäsittelykapasiteetin määrää suurimpien valmistuserien koko. Tuotannonohjauksjärjestelmästä selvitetiin suurimmat sarjakoot ja kappalepainon perusteella laskettiin tuotantoerän massa, joka oli suurimmillaan 278 kg. Tämän perusteella laitteeseen kerralla lastattavaksi maksimikapasiteetiksi päätettiin 300 kg. Harvemman kappalemassatiheyden avulla voidaan todeta, että tällainen massa mahtuu 150 dm³:n tilavuuteen. Liitteen 2 taulukkoa tutkimalla nähdään, että sykliajalla 15 sekuntia 300 kg:n massasta riittää laitteelle käsiteltäviä, vaatimusmäärittelyn puitteissa olevia kappaleita yli 24h:n tarpeeksi ja 5s sykliajallakin kappaleen painosta riippuen vähintään 10h tarpeeksi. Yksittäinen tarkastettava kappale mahtuu tilavuuteen, jonka mitat ovat 60 x 80 x 30 mm ja se painaa enintään 50 grammaa.

Lopullinen tarkastusautomaatiolaitteen vaatimusmäärittelydokumentti on liitteessä 3.

6 LAITTEEN RAKENNE

Vaatimusmäärittelyn pohjalta alettiin kartoittaa laitteistoja ja ratkaisuja, joilla nämä määritellyt vaatimukset voitaisiin täyttää mahdollisimman hyvin. Laite voidaan jakaa muutamaan toiminnalliseen osajärjestelmään, jotka ovat syöttö- ja kappaleenkäsittelyjärjestelmä, konenäköjärjestelmä tarkastamista varten, kappaleiden lajittelujärjestelmä sekä muut toiminnot.

Löydettyjen ratkaisuvaihtoehtojen avulla alettiin kasata laitteen alustavaa rakennetta. Valituista komponenteista etsittiin mahdollisuuksien mukaan valmiita 3D-malleja, joista luotiin Solidworks-ohjelmaa apuna käyttäen kokoonpano laitteesta, joka on liitteessä 4. Tämä kokoonpano toimii luonnoksena laitteiston eri osien keskinäisistä sijainneista ja tärkeimmistä toiminnoista kun laitteiston toteuttajaa etsitään ja kilpailutetaan. Liitteessä 4.

on lisäksi kirjoitettuna auki laitteelta ja sen osilta halutut toiminnot ja niiden järjestys laitteen käsitellessä kappaleita.

6.1 Kappaleiden käsittelyjärjestelmä

Kappaleiden käsittelyjärjestelmä pitää sisällään kappaleiden säilytykseen, syöttämiseen, erotteluun, asemointiin, siirtoon ja poistoon liittyvät laitteistot. Myös mahdollisesti tarkastuksen aikana tapahtuvan kappaleen uudelleen orientoimisen ja jälkikäsitteilytoimenpiteiden vaatimat käsittelyt otetaan huomioon.

Vaikka tämä työ on rajattu koskemaan vain kahta samankaltaista tuotetta, on ratkaisuja etsittäessä, määriteltäessä ja valittaessa otettava huomioon laitteiston laajentaminen myös muiden vaatimusmäärittelyn puitteissa olevien kappaleiden käsittelyyn. Tämä vaatimus monipuolisuudesta rajoittaa suuresti valittavaa kappaleensyöttöratkaisua.

Käsiteltävät määrät ovat verrattain pieniä, eikä toimeksiantajalla jo käytössä olevien kappalelaatikoiden nostamiseen ja koneeseen lataamiseen tarvitse suunnitella automaatiota. Toimeksiantajan tuotannossa kappalelaatikoita käsitellään paljon manuaalisesti ja laatikoiden painorajoista on olemassa ohjeistus, joka tulee ottaa huomioon kappaleiden laitteesta poiston yhteydessä.

Kappaleiden käsittely automaatiolaitteessa etenee niin, että suuremmasta massasta ja suurpiirteisemmästä erottelusta siirrytään aina pienempiin massoihin ja tarkempaan erotteluun - aina yksittäisen kappaleen käsittelyyn asti. Suurimmat vaatimukset kappaleen erottelulle ja asemoimiselle on viimeisessä vaiheessa ennen tarkastukseen siirtämistä. Tällöin käsitellään vain yhtä kappaletta, jonka tulee olla oikeassa asennossa tarkastusta varten. Luonnollinen etenemistapa on ensin selvittää se laitteisto, jolla vaatimusmäärittelyn piiriin kuuluvien, erilaisten kappaleiden erottelu ja asemointi voidaan toteuttaa. Yksinkertaisin laite kappaleen siirtoon on kuvassa 12 esitellyn kaltainen hihnakuuljetin, jota käytetään paljon erinäköisissä teollisuus- ja automaatiosovelluksissa.



Kuva 12. RNA FK-120 hihnakuuljetin jalustalla (Rhein-Nadel Automation 2014).

Hihnakuljettimien hyviä puolia ovat edullisuus, varmatoimisuus ja yleisyys. Huonoina puolina voidaan nähdä se, ettei pelkkä yksittäinen rullahihna pysty erottelemaan päällekkäin olevia kappaleita tai vaikuttamaan kappaleen orientaatioon mitenkään. Näitä epäkohtia voitaisiin kiertää tipttamalla väärin päin ja päällekkäin olevat kappaleet hihnan päästä toiselle hihnalle ja toivoa, että kappaleet kääntyisivät oikein päin. Tämän jälkeen hihna kuljettaisi kappaleet ensimmäisen hihnan alkuun tai vaihtoehtoisesti väärinpäin olevat kappaleet voitaisiin kuljettaa takaisin kappalevarastona toimivaan esisyöttimeen. Kappaleiden määrän ja käyttäytymisen hallinta hihnalla voi erikokoisten kappaleiden kanssa olla haastavaa. Lisäksi kappalemäärän vähentyessä laite joutuisi todennäköisesti odottelemaan pitkiäkin aikoja viimeisiä kappaleita. Hihnakuljettimet soveltuvatkin parhaiten juuri kappaleiden siirtoon silloin, kun niiden lähtö- ja loppupaikka ovat tiedossa ja hallittavissa.

Kuvassa 13 on puolestaan tyypillinen tärymalja, jollaisia käytetään paljon erilaisissa automaatiosovelluksissa erottelemaan, asemoimaan ja syöttämään suuria määriä pienehköjä ja kevyitä kappaleita. Tärymalja koostuu nimensä mukaisesti värinäliikkeen aikaansaavasta, epäkeskopainolla varustetusta moottorista ja siihen liitetystä, erityismuotoillusta maljasta.

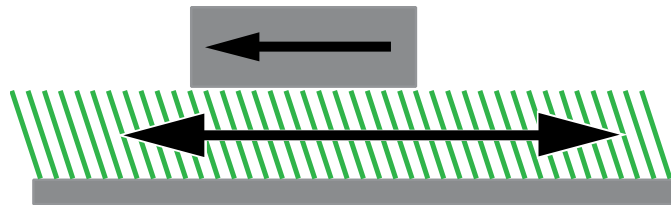


Kuva 13. RNA Maljatärytin (Rhein-Nadel Automation 2014).

Tärymaljojen suurin hyöty on yksiselitteinen kappaleen asemointi eikä käsittelyyn tarvittaisi välttämättä mitään muuta käsittely- tai poiminta-automaatiota, kuten esim. robottia. Tärymaljan huonoin puoli on sen rajoittuneisuus, sillä samalla asemointilaitteistolla ei pystytä käsittelemään kuin yhdenlaista kappaletta ja ne ovat kohtuullisen isokokoisia ja työläitä vaihtaa. Tärymaljoilla käsiteltävissä olevien kappaleiden maksimipainot ovat yleensä 100-120g ja pisimmät mitat kymmenes – viidestoistaosa maljan halkaisijasta, maksimissaan noin 80-100mm. Maljojen näennäisestä tilavuudesta pystytään yleensä hyödyntämään kappaleiden varastoimiseen noin neljännesosa. Samaa maljaa ja tärykoneistoa pystyttäisiin todennäköisesti käyttämään muutamilla samankokoisilla ja -tyyppisillä kappaleilla, mutta koska laitteiston halutaan pystyvän käsittelemään useita erilaisia

kappaleita, ei tärymaljoja voida käyttää ainakaan ainoana syöttölaitteistona. (Spectrum Automation 2010; Rhein-Nadel Automation 2005.)

Muita värinään perustuvia syöttölaitteistoja ovat esim. lineaari-, tärykouru- tai mattosyöttimet. Näistä suunniteltavaa järjestelmää ajatellen mielenkiintoisimpia ovat mattosyöttimet. Niiden toiminta perustuu tasoon kiinnitettyyn, nailon- tai polypropyleeniharjamattoon, joita myydään mm. 3M Brushlon-tuotemerkillä. Matossa olevat harjakset on kallistettu 20 asteen kulmaan kuvan 14 mukaan ja ne asetetaan kaatumaan suuntaan jonne kappaletta halutaan liikuttaa. Kun koko tasoa väräytetään, yleensä sähkökelan aikaansaamalla noin 10-120Hz:n taajuudella, saa harjasten taipuminen aikaan kappaleen liikkumisen. Harjakset ovat oikealla tavalla asetettuina, sopivalla värähtelytaajuudella saadaan kappaleet tarvittaessa vaikka kiertämään ympyrää neliönmuotoisella tasolla. (Roboshop 2012; Rhein-Nadel Automation 2005.)



Kuva 14. Tärymattosyöttimen toimintaperiaate.

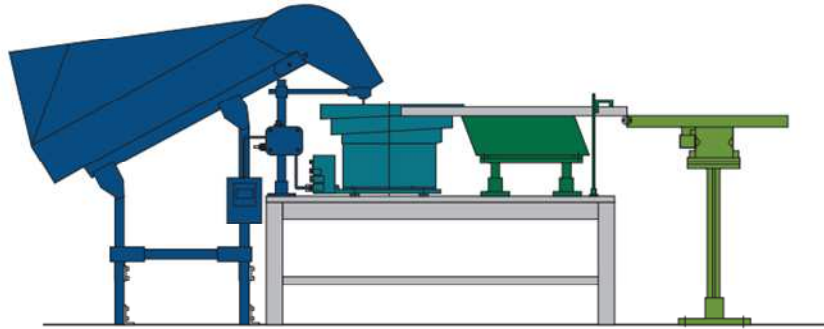
Kuvassa 15 on esitelty eräs mattosyöttimen sovellus RNA:n valmistamalla Carpet Feederillä. Mattosyöttimien etuja ovat monipuolinen soveltuvuus eri kokoisille ja muotoisille kappaleille värähtelytaajuuden säädöllä. Myös Tärymatolla tapahtuva kappaleenkäsittely on myös erittäin hellävarainen.



Kuva 15. Tärymattosyöttin (Rhein-Nadel Automation 2005).

Joustavin vaihtoehto kappaleen siirtämiseen erottelulaitteelta tarkastukseen on toteuttaa se robotin ja konenäkökameran avulla. Hyvin suunnitellulla robottitarttujalla voidaan käsitellä useita samantyyppisiä kappaleita. Tarvittaessa vaihdettavaksi suunnitellut tarttujan ”sormet” ovat pienikokoisia ja edullisia valmistaa, jos niitä vertaa vaikkapa tärymaljan asemointikoneistoon. Teollisuusrobotteja tarkastellaan tarkemmin luvussa 6.2.

Tutkittaessa edellä esiteltyjä, tarkempaan erotteluun pystyviä syöttö- ja erottelulaitteistoja, kävi ilmi, että tarkastusautomaatiolaitteelle vaatimusmäärittelyssä määritelty kokonaiskapasiteetti on huomattavan suuri verrattuna minkä tahansa tällaisen syöttölaitteen kapasiteettiin, jotka ovat yleensä maksimissaan muutamia kymmeniä kiloja. Järjestelmään tarvitaan useampivaiheinen syöttölaitteisto, joka koostuu poiminta-alustalle kappaleita syöttävästä syöttimestä ja tätä syöttävästä esisyöttimestä. Tällainen monivaiheinen syöttöjärjestelmä on hyvin yleinen automaatiolaitteistoissa, kuvassa 16 on esitelty eräs kokonaisuus.



Kuva 16. Monivaiheinen syöttöjärjestelmä (Rhein-Nadel Automation 2005).

Jotta laitteen kokonaiskapasiteetti saadaan riittäväksi ja kappaleiden lastaamisesta laitteeseen ergonomista, tulee esisyöttimen kyetä pitämään sisällään koko maksimikapasiteetin suuruinen erä ja lastauskorkeuden olla enintään 700 - 800 mm lattiatasosta. Tällöin esisyöttinvaihtoehtona tulevat kysymykseen lähinnä erilaiset säiliöllä varustetut nostokuljettimet, joista yksi esimerkki on esitelty kuvassa 17.



Kuva 17. CP P-nostokuljetin säiliöllä (MB Conveyors srl 2014).

Markkinoilta löytyy lisäksi muutamia laitteistoja, joissa on yhdistettynä sekä poiminta-alusta että sitä syöttävä laitteisto. Tällaisia valmiita, helposti muokattavia syöttöratkaisuja voisivat olla esim. kuvassa 18 esitelty flexfactory AG:n anyfeed™ SX340 tai kuvassa 19 oleva Graco:n G-Flex 1500.



Kuva 18. flexfactory AG anyfeed™ 340 (Flexfactory AG 2014).

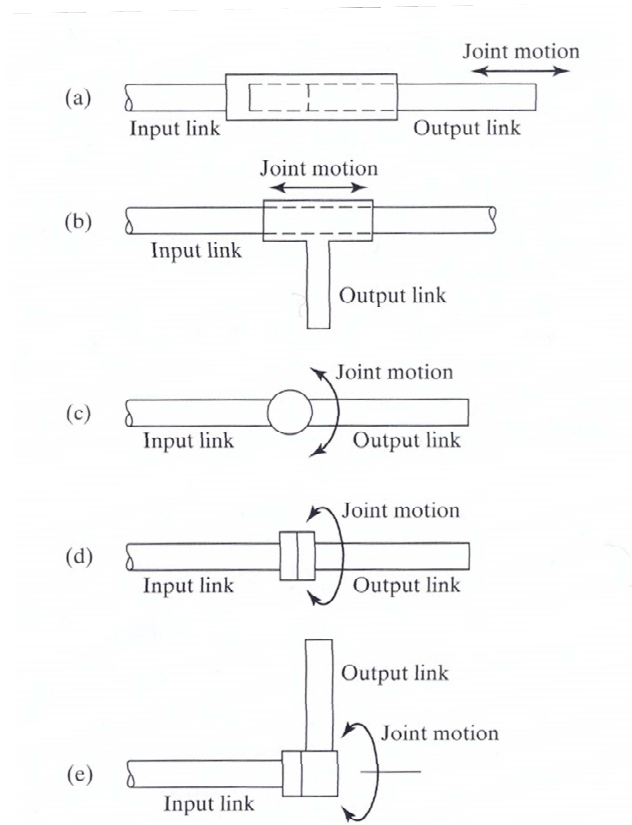


Kuva 19. Graco G-Flex 1500 (Graco Inc. 2014).

Näistä varsinkin jälkimmäinen olisi suoraan sopiva ja täyttäisi kaikki vaatimukset, mutta siitä ei ole vielä olemassa eurooppalaisiin sähköjärjestelmiin sopivaa ja CE-hyväksyttyä versiota. (Knutson 2014.)

6.2 Teollisuusrobotit

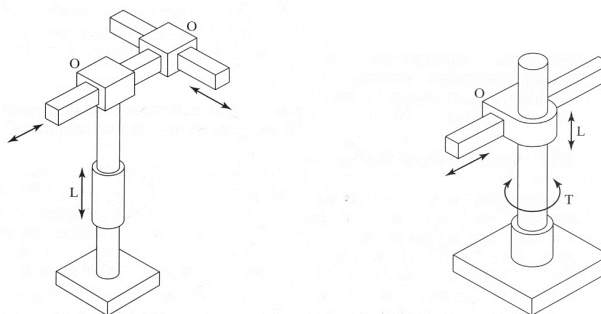
International Federation of Roboticsin hyväksymän määritelmän mukaan teollisuusrobotti on automaattisesti ohjattu, uudelleenohjelmoitava ja monikäyttöinen käsittelylaite, joka voi olla joko kiinteästi paikoilleen sijoitettu tai liikkuva. Teollisuusrobotissa on vähintään kolme niveltä (joint) tai akselia (axis), joista jokainen antaa robotille yhden vapausasteen, englanniksi Degree Of Freedom (DOF) ja käytännössä yksittäinen nivel antaa vain yhden vapausasteen. Niveliä yhdistävät toisiinsa jäykät linkit (link). Kuvassa 20 on esiteltyä erilaiset, yleisesti käytössä olevat nivelyypit. Nämä ovat kuvan 20 kohtien a-e mukaan lineaari- (L-nivel), kohtisuora- (O-nivel), kääntö- (R-nivel), kierto- (T-nivel) ja vääntönivel (V-nivel). (International Federation of Robotics 2014; Groover 2008.)



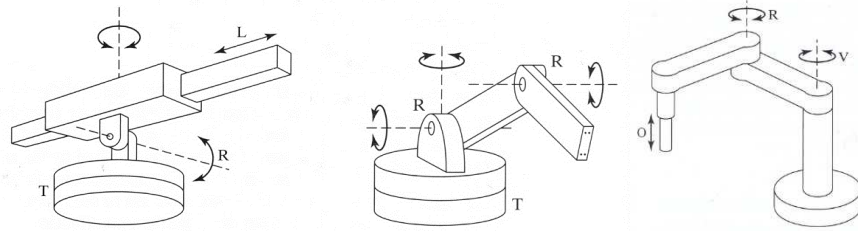
Kuva 20. Robottien nivelrakenteet (Groover 2008, 216).

Yllä kuvattuja niveliä käyttämällä voidaan teoriassa esimerkiksi kolmen vapausasteen robotille saada 125 erilaista nivel-linkki-yhdistelmää, mutta käytännössä on olemassa kuitenkin vain hyvin rajallinen määrä teollisuusrobottien päätyyppejä. Näistä tyypeistä kuusi yleisintä ovat seuraavissa kuvissa olevat:

- karteesinen, (kuva 21)
- sylinteri- (kuva 21),
- napakoordinaatisto- (kuva 22),
- kiertyvänivelinen (kuva 22),
- SCARA- (Selective Compliance Assembly Robot Arm) (kuva 22) ja
- rinnakkaisrakenteinen robotti (kuva 23).



Kuva 21. Vasemmalla karteesinen ja oikealla sylinterirobotti (Groover 2008, 218).

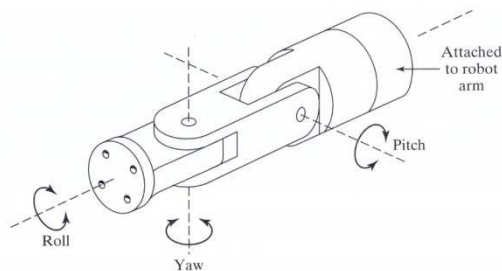


Kuva 22. Vasemmalla napakoordinaatisto-, keskellä kiertyvänivelinen ja oikealla SCARA-robotti (Groover 2008, 218).



Kuva 23. ABB:n rinnakkaisrakenteinen IRB 360 FlexPicker robotti (ABB 2015).

Robotin viimeisen linkin päähän on usein, kiinnitettynä kuvassa 24 esitellyn kaltainen ranne, jossa on kahdesta neljään vapausastetta. (Groover 2008, 215-220)



Kuva 24. Robotin ranne (Groover 2008, 219).

Tarkasteltaessa sekä automaatiolaitteella tarkastettaviksi ajateltuja kappaleita, järjestelmän muita vaatimuksia että robottien ominaisuuksia voidaan nähdä, että robotin joustavuudella ja näppäryydellä on erittäin tärkeä rooli. Vaatimukset kasvavat varsinkin silloin, jos kappaleita joudutaan kääntämään käsittelyn yhteydessä ja sille halutaan tehdä jälkikäsittelytoimenpiteitä. Esimerkiksi kiertyvänivelisessä robotissa voi siis olla viidestä seitsemään vapausastetta. Tarkastelusta voidaankin sulkea pois käytännössä kaikki muut, paitsi kiertyväniveliset robotit, joiden liikeratojen monipuolisuus ja näppäryys vetää vertoja jopa ihmiskädelle. Kuvassa 25 on eräs tarkastusautomaatiolaitteeseen soveltuva, Denson valmistama, kuusiakseli-

nen, 700 mm:n ulottumalla ja 7 kg:n hyötykuormalla varustettu, VS-068 tyyppinen teollisuusrobotti. (Denso Europe 2015; Groover 2008.)



Kuva 25. Denso VS-068 teollisuusrobotti (Denso Europe 2015).

Ranteeseen on kiinnitettyä joko tarttija taikka työkalu. Tarttujen käyttövoimana on yleensä joko sähkömekaniikka, pneumatiikka, hydraulikka tai alipaine. Kuvassa 26 on esitelty erilaisia tarttujia. Työkalun, joka voi olla esim. ruuviväännin, pora, jyrsin tai hitsauspoltin, käyttövoimana on yleensä sähkö tai pneumatiikka. Tarttujan tai työkalun ja robotin ranteen väliin voidaan asentaa lisäksi sekä törmäyssuoja että pikavaihtokiinnike. Mekaanisissa tarttujissa kappaleen kiinnitysminen on toteutettu joko muoto- tai kitkasulkeisesti. Muotosulkeisen tarttujan kynnet joudutaan suunnittelemaan jokaiselle tuotteelle tai tuotepiheelle erikseen, kun taas kitkasulkeista tarttujaa voidaan käyttää hyvin laajalla sovellusalueella. (Groover 2008.)



Vacuum Gripper



Pneumatic Gripper



Hydraulic Gripper



Servo-Electric Gripper

Kuva 26. Erilaisia tarttujia (Bouchard 2015).

6.3 Konenäkö

Ihmiselle näkökyky on aisteistamme tärkein. Silmien aivoille tuottama informaatiomäärä on erittäin suuri - todennäköisesti datavirta ylittää 10 megabittiä sekunnissa - ja ihmisaivot osaavat prosessoida tätä informaatiota hyvin tehokkaasti. Aivojen näkökuorikerrokset ovat kehittyneet pakkaamaan ja suodattamaan tätä dataa niin, että aivojen korkeammat kerrokset joutuvat tulkitsemaan vain murto-osan tästä datamäärästä. (Davies 2012.)

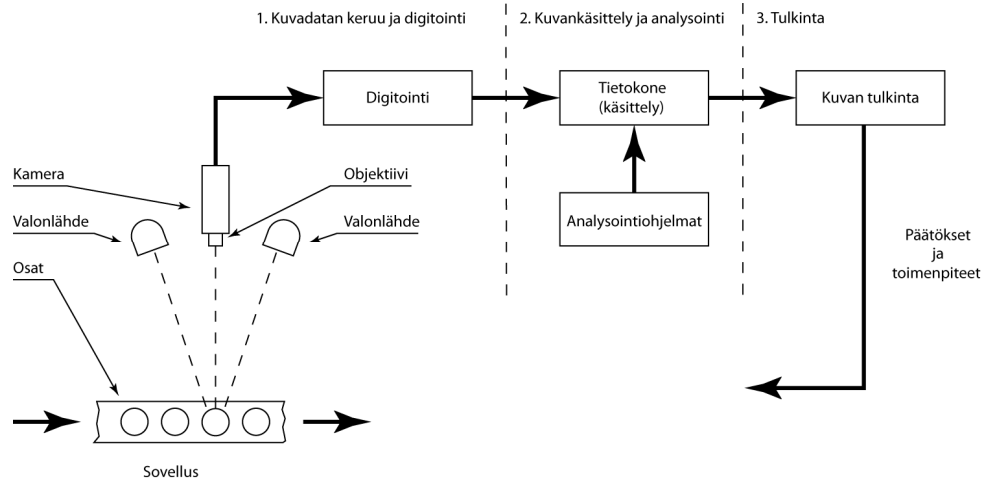
Näkökykymme huomionarvoinen piirre on se helppous, jolla tulkitsemme silmien välittämää dataa. Vaikka konenäön algoritmit ja sovellukset ovat kehittyneet huomasti, niin silti tietokoneelle on lähes saavuttamattomissa samantasoinen tunnistuskyky kuin esimerkiksi muutaman vuoden ikäisellä lapsella, joka mm. pystyy helposti tunnistamaan kuvasta kaikki eläimet. (Davies 2012; Szeliski 2010.)

Yleisen määritelmän mukaan konenäöllä tarkoitetaan koneen kykyä hankkia informaatiota ympäristöstä analyttistä lisäkäsittelyä varten. Nämä analyysit perustuvat mittausdataan, jota on prosessoitu tietokoneella matemaattisin menetelmin. Suomenkielessä konenäkö termin alle luetaan sekä varsinaisen konenäkö ja sen sovellukset että konenäön vaatimien tietokonealgoritmien tutkimus- ja kehitystoiminta. Englanniksi varsinainen konenäkö on ”machine vision” kun taas teoriapuolta käsittelee ”computer vision”. (Lopez et al. 2008; Szeliski 2010; Davies 2012.)

Konenäössä kaikki tehdään näkökykymme verraten kääntäen, kamera välittää koko datamäärän prosessoitavaksi ja yritämme kuvailla, mitä kuvassa näkyy ja jälleenrakentaa siinä näkyviä ominaisuuksia kuten muotoja, valo- ja värijakaumia. Kun näitä kuvailtuja muotoja ja väri- sekä valo- ja värijakaumia käsitellään kuvankäsittelytoimenpiteillä ja analysoidaan algoritmeilla tuottaa kone tuloksena tiedon, vastaako käsitelty alue ohjelmoituja parametrejä tai löytyykö niille riittävällä varmuudella vastine tietokannasta. (Szeliski 2010.)

Konenäön käytännön sovelluksia ovat mm. optinen merkinluku, tarkastussovellukset, autojen turvallisuusjärjestelmät ja elokuvissa käytetty liikkeen mallinnus. (Szeliski 2010.)

Konenäköjärjestelmän toiminta voidaan jakaa kolmeen osaan. Nämä osat ovat kuvadatan keruu ja digitointi, kuvankäsittely ja analysointi sekä tulkinna. Järjestelmän perusosat ja niiden toiminta on esitetty kuvassa 27. (Groover 2011.)



Kuva 27. Konenäköjärjestelmän perustoiminnot (mukaiillen Groover 2011, 10).

6.3.1 Kuvadatan kerääminen ja digitointi

Konenäköjärjestelmän ensimmäisenä toimintona on kuvadatan kerääminen valaistuista kappaleesta (video)kameralla, johon on liitetty objektiivi. Objektiivi, joka voi olla joko automaattitarkenteinen tai kiinteällä tarkennuksella varustettu, on tarkennettu kuvattavan kohteen tarkasteltavaan piirteeseen. Kuvadatan keräämiseen käytetään sekä harmaasävy että värikameroita, harmaasävykameroiden ollessa huomattavasti yleisempiä. (Groover 2008.)

Kamerassa kuva muodostetaan kuvakennossa. Kuvakennon pinnalla on valodiodeja, jotka muuttavat fotonien varauksen sähkövirraksi. Kun ennalta määrätty fotonien keräysaika eli valotusaika on loppunut, luetaan fotonien diodeihin tänä aikana muodostunut virta. Saatu sähköinen arvo muutetaan lähestulkoon aina siirtoa ja käsittelyä varten digitaaliseksi kuvainformaatioksi suoraan kamerassa olevalla analogidigitaalimuuntimella (Analog-to-Digital Converter, ADC), aikaisemmin on käytetty myös analogista siirtotietä ja erillistä ADC:tä. ADC muuntaa saadun sähköisen arvon ennalta määritettyjen portaiden eli bittisyvyyden mukaisiin intensiteettitasoihin. Jokaiselle pikselille annetaan arvo tietyltä väliltä, jossa jokainen arvo vastaa alueen intensiteettiä eli valoisuusarvoa. Tätä annettua arvoa kutsutaan myös kuvan syvyydeksi. Yleisimmin käytössä on 8-, 10- tai 12-bittinen syvyys. Kahdeksan bitin syvyys tarkoittaa, että diodista kerätylle informaatiolle voidaan antaa 2^8 eli 256 eri arvoa. Kahdeksanbittisessä harmaasävykuvassa arvo 0 vastaa valkoista ja 255 mustaa. (Groover 2008; Fisher et al. 2004; McHugh 2014; MacDonald 2006.)

Kameroiden kennoissa käytettäviä valmistustapoja ovat CCD (Charge-Coupled Device) ja CMOS (complementary metal-oxide semiconductor). CMOS-kennot ovat halvempia valmistaa, mutta niiden herkkyys on huonompi ja ne ovat herkempiä kohinalle. CCD-kennot puolestaan tuottavat korkealuokkaisia, kohinattomia kuvia, mutta niiden sähkönkulutus on jopa 100-kertainen verrattuna CMOS-kennoihin. Aikaisemmin konenäkökamerat olivat käytännössä pelkästään CCD-kennoilla varustettuja, mutta digitaalisen kuvaamisen kuluttajamarkkinoiden kasvun ja CMOS-kennojen

valmistuksen kehityksen myötä on yhä useampi konenäkökamera nykyisin varustettu CMOS-kennolla. (Fermum 2014.)

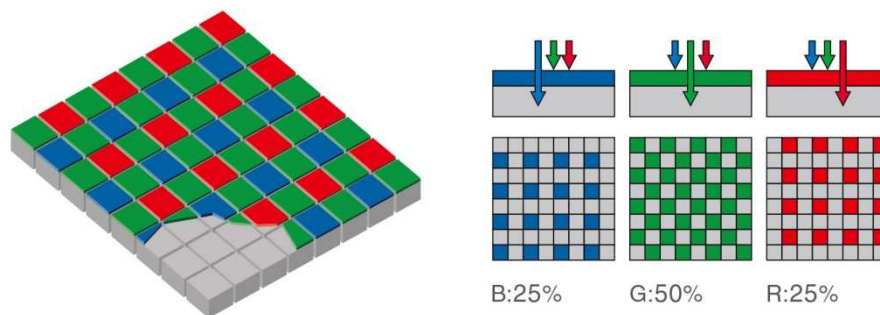
Kuvakennon yksittäistä diodia kutsutaan pikseliksi (pixel, px) ja ne voidaan järjestää joko yhteen riviin, jolloin puhutaan viivakamerasta (line scan), tai useisiin riveihin ja sarakkeisiin, jolloin puhutaan alue- tai matriisikamerasta (area scan). Teollisuuskameroissa käytettyjen kuvakennon pikselien koko vaihtelee yleensä välillä 3,5-14 μm , viivakameroissa käytetään jopa 20 μm :n kokoisia pikseleitä. Konenäössä käytettyjen kennojen pikselimäärät ilmoitetaan yleensä käyttäen joko matriisikameroilla yksikköä megapikseli (1 MP = 10^6 pikseliä) tai viivakameroilla yksikköä kilopikseli. Viivakameroiden kohdalla käytetään useimmiten pelkkää ilmaisua 4k tai 8k. (Groover 2008; Fisher et al. 2004; MacDonald 2006; Fermum 2014.)

Kun fotoneja iskeytyy kennon pintaan, osa niistä muuttuu kvanttihyötysuhteen QE (Quantum Efficiency) mukaisesti elektroneiksi. Syntyneet elektronit varastoituvat potentiaalikuoppaan, jolla on tietty kapasiteetti, ns. Full Well Capacity (FWC), pitää tietty määrä elektroneja sisällään. FWC on suoraan verrannollinen pikselin kokoon, esim. 1,7 μm pikselisesä kennossa se voi olla vain 1 ke^- (kiloelektronia), kun taas esim. digitaalisessa high-end järjestelmäkamerassa tämä voi olla 60 ke^- ja tieteellisiin tarkoituksiin tarkoitettussa 26 μm pikseleillä varustetussa FWC voi olla jopa 650 ke^- . (Fermum 2014; McHugh 2014; Horiba 2012; Libraw 2012)

Elektronien muodostama varaus muutetaan kondensaattorin avulla jännitteeksi. Kennotyypistä riippuen on joko jokaisella pikselillä (CMOS-kennot) tai pikselisarakeella (CCD-kennot) oma kondensaattorinsa. Koska yhden näkyvän valon aallonpituusalueella liikkuvan fotonin energia on hyvin pieni, noin $4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, on myös muunnoksessa syntyvä jännitetaso hyvin pieni, tyypillisesti n. 1,4 mV. Sekä fotonien ja elektronien luonteesta johtuen että käsiteltävien jännitteiden pienuudesta johtuen kennot herkkiä häiriöille, joita ovat mm. fotonikohina (photon noise), pimeä kohina (dark noise) ja lukukohina (read noise). Signaalikohinasuhde (Signal to Noise Ratio, SNR) määrittää pienimmän erotettavan signaalin tason, tässä tapauksessa mustan tason. Kennon dynaaminen alue, eli pienimmän ja suurimman erotettavan signaalin välinen ero, on FWC:n mukaisen suurimman signaalin ja SNR:n muodostaman pohjataso välinen erotus, joka voidaan ilmaista suhteena, esim. 4096:1, tai desibeleinä, vastaavasti 72 db. (Fermum 2014.)

Jotta saatua kuvainformaatiota voidaan käsitellä tietokoneella, se tulee tallentaa ohjelmallisesti muokattavissa olevaan muotoon. Käytännöllisin tapa on jakaa kuva yksittäisiin soluihin, joita myös kutsutaan pikseleiksi. Yleisimmin pikselien tallentamiseen käytetään suorakulmiomaista matriisimuotoa, jossa yksittäinen pikseli on nelikulmainen. Väri-informaation esittämistä varten tarvitsee määritellä värien esitystapa eli väriavaruus, esim. punaisesta, vihreästä ja sinisestä muodostuva RGB-avaruus. Väriavaruudessa jokaisen pikselin kolmelle osavärille määritellään bittisyyden mukainen arvo. (Fermum 2014; Fisher et al. 2004.)

Mustavalkokamerassa ja -kuvassa yksi valodiodi vastaa yhtä pikseliä. Yksittäinen pikseli ei kuitenkaan osaa tulkita saapuvien fotonien väriä, joten värikameroiden kennoissa jokaisen valodiodin päälle onkin asetettu suodatin, joka päästää lävitseen vain tietyn väristä valoa. Hyvin usein nämä suodattimet on aseteltuna kuvassa 28 näkyvään muotoon, jota kutsutaan Bayerin värisuodatinmatriisiksi. Tässä matriisissa neljän ryhmiin järjestellyistä pikseleistä kaksi diodia mittaa vihreää, yksi sinistä ja yksi punaista väriä. Kennon tarkkuus puolittuisi sekä pysty- että vaakasuuntaan jos yksittäisen pikselin arvo laskettaisiin jokaisen tällaisen neljän diodin ryhmän keskiarvona. Yleensä käytetäänkin Bayerin kääntematriisimuokkausalgoritmia (demosaiicing), jonka avulla voidaan laskea jokaiselle pikselille väriarvo. (McHugh 2014; Fisher et al. 2004.)



Kuva 28. Värikuvakenno ja Bayerin värisuodatinmatriisi (mukaillen (diglloyd 2014)).

Sovelluksissa, joissa kappaletta seurataan suoraan liikkeessä ja tarkastettavien kappaleiden esitys kameralle on rajoitettu suuresta tuotantonopeudesta johtuen, voi sekä kameroiden, ADC:n että tietokoneiden suorituskyky edelleen asettaa rajat tarkastusmahdollisuuksille. Esimerkiksi konenäkökamera, jonka kuvakennossa on 1920×1080 pikselin resoluutio, 8 bitin syvyys (bpp, bits per pixel) ja ottaa 30 kuvaa sekunnissa (fps, frames per second), tuottaa pakkaamatonta dataa $(1920 \cdot 1080) \text{ px} \cdot 8 \text{ bpp} \cdot 30 \text{ fps} \cong 4,977 \cdot 10^8 \text{ bit/s} = 497,7 \text{ Mb/s}$. Se on enemmän kuin USB 2.0-väylän teoreettinen maksimitiedonsiirtokyky 480 Mb/s. Kuvattaessa liikkuvia kohteita esimerkiksi liukuhihnalla, tulee suureen rooliin myös kameras kuvausnopeus ja kuvienkäsittelyn vaatima aika. (Groover 2008.)

Vaikka USB 2.0-väylää käytetään jonkin verran myös teollisuuskameroissa, niin useimmiten nykyaikaisessa teollisuuskamerassa on käytössä siirtoväylänä joko GigE Vision®, CameraLink® tai IEEE 1394a/b ("FireWire"). Uusimpana sovelluksena on USB 3.0-väylän käyttäminen siirtoväylänä. (Brown 2008.)

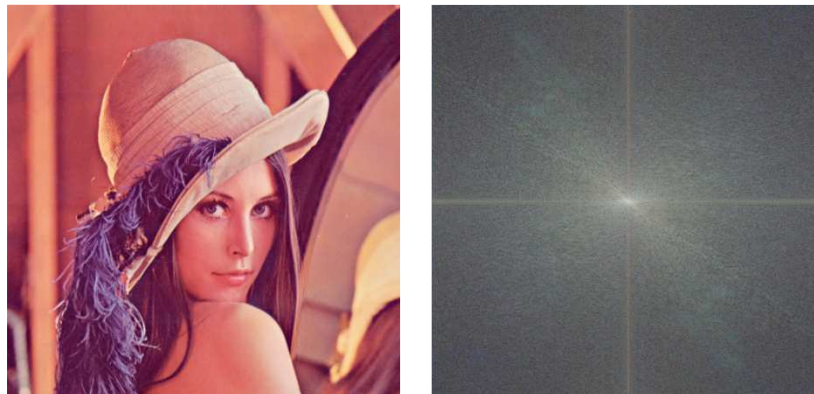
Koska opinnäytetyön kohteena olevan järjestelmän kappaleet eivät ole tarkastuksen aikana jatkuvassa liikkeessä eikä jaksoaika ole ehdottoman tiukka, voidaan liikkuvan kappaleen käsittelyyn liittyvät laskennat ja problematiikka ohittaa kokonaan.

6.3.2 Kuvankäsittely ja analysointi

Jos ihmissilmä pystyy erottamaan harmaasävyisestä kuvasta jonkin esineen tai piirteen, on teoriassa mahdollista kehittää samaan kykenevä tietokonealgoritmi. Kuvankäsittelyllä tarkoitetaan operaatiota tai operaatioiden sarjaa joilla kameran muodostamasta kuvainformaatiosta erotetaan, parannetaan ja etsitään valitun algoritmin kannalta oleellinen informaatio sekä suodatetaan pois häiriöt ja muu ei-toivottu informaatio. (Davies 2012; Fisher et al. 2004.)

Szeliski (2010), Davies (2012) ja Fisher et al. (2004) käyttävä kaikki hieman toisistaan poikkeavaa lähestymistapaa kuvankäsittelyoperaatioihin. Yhteenvetona voidaan kuitenkin sanoa että peruskuvankäsittelyoperaatiot ovat luokiteltavissa piste- ja naapurioperaatioihin, geometrisiin muunnoksiin sekä kuvan kokonaisoptimointeihin. Näitä operaatioita eli kuvien suodattamista voidaan toteuttaa kahdella eri tasolla: taajuustasolla tai spatiaalitasolla.

Taajuustasolla kuvien informaatio muutetaan yksinkertaiseksi taajuusfunktiksi, jossa funktion arvolla kuvataan muutoksia pikselien arvoissa. Muunnettaessa kuvainformaatiota taajuustasolle ja taajuustasolta voidaan käyttää apuna esim. Fourier- tai Hough-muunnosta. Erityisesti diskreetin Fourier-muunnoksen (Discrete Fourier Transform, DFT) nopea Fourier-muunnosalgoritmi (Fast Fourier Transform, FFT) on erittäin tehokas tapa laskea sekä Fourier-muunnoksia että näiden käänteismuunnoksia. Jos taajuustason muunnokselle on löydettävissä spatiaalitason esitysmuoto, on kuvankäsittelyoperaatio yleensä helpompi tehdä spatiaalitasolla. Kuitenkin joissain monimutkaisimmissa suodattimissa on kokonaislaskenta-aika lyhyempi taajuustasolla, johtuen tehokkaammasta laskennasta taajuustasolla. Kuvassa 29 on Lena-kuva muunnettuna taajuustasolle FFT-muunnoksella. Lena-kuva (tai Lenna) on ehkä yleisin kuvankäsittely- ja pakkausalgoritmien yhteydessä käytetty testikuva. Tämä ja muut tässä kappaleessa esitetyt kuvat, joissa ei ole mainittu lähdeä, on laadittu käyttäen CVIPtools for Windows-ohjelmistoa. (Davies 2012; Fisher et al. 2004; CVIPtools 2014; Rosenberg 2001.)

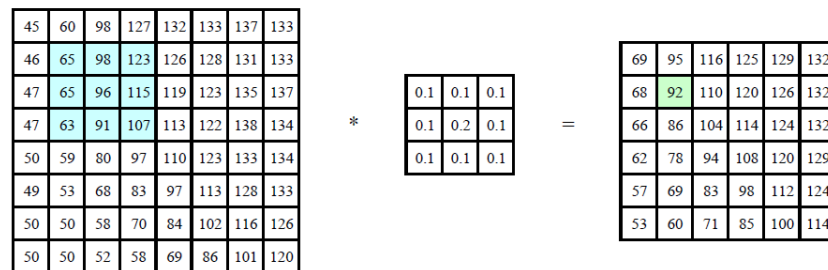


Kuva 29. Lena-kuva (University Of California 1979) ja sen FFT-muunnos.

Pikselimuunnokset käsittelevät nimensä mukaisesti vain yksittäistä pikseliä, riippumatta viereisten pikselien arvoista ja kuvan kaikkia pikseleitä käsitellään samalla tavalla. Pikselin arvoon voidaan vaikuttaa jollain kuvasta lasketulla arvolla tai globaalilla arvolla, kuten esim. kuvan kirkkautta, kontrastia tai väri- ja intesiteettitasapainoa säädetäessä. (Szeliski 2010.)

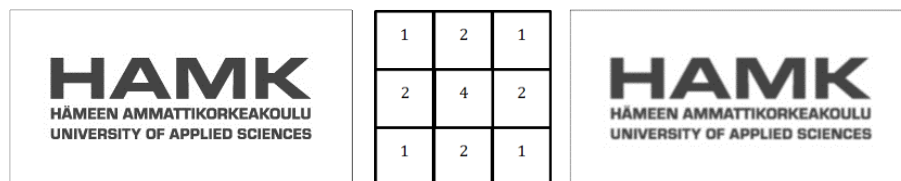
Naapurimuunnos käyttää käsiteltävää pikseliä ympäröivien pikselien arvoja lopullisen tuloksen laskemiseen. Naapurimuunnokset jaetaan lineaariin ja epälineaarisiin naapurimuunnoksiin. Lineaarit muunnokset käsittelevät koko kuvainformaatiota samalla tavalla, kun taas epälineaarille muunnoksille voidaan määrittellä kynnyksarvoja joiden ylittävät tai alittavat arvot jätetään huomioimatta. Naapurimuunnoksia voidaan myös porrastaa kuvapyramideiksi tai -aallokkeiksi, joita käytetään apuna mm. kuvien analysoimiseen eri resoluutioilla sekä tarkkuusmuutoksiin. (Szeliski 2010; Fisher et al. 2004.)

Kuvassa 30 on esitetty konvoluution toiminta, joka on yksi spatiaalitason naapurimuunnosten matemaattisista perusmenetelmistä. Vasemmanpuoleisen kuvan pikselien arvot on konvoluutioitu keskellä esitetyn 3x3-matriisin, niin sanotun kernelin, arvoilla. Tuloksena saadusta kuvasta on leikattu reunoilta yksi pikselirivi pois, sillä reuna-arvojen laskennassa on ongelmia ja niiden laskenta ei onnistu suoraan pikseli pikseliltä konvoluutiolla. Oikealla olevassa, konvoluution tuloksena saadussa, kuvassa vihreällä esitetyn pikselin lähtöarvot ovat vaaleansinisellä merkityt pikselit vasemmanpuoleisessa kuvassa. (Szeliski 2010; Fisher et al. 2004.)



Kuva 30. Konvoluution toimintaperiaate (Szeliski 2010).

Yleisesti naapurimuunnoksissa käytettyjä kerneleitä ovat mm. keskiarvo- (mean), keskiluku- (median), Gaussin ja Laplace-kerneli. Näistä keskiarvo- ja Gaussin kerneli ovat kuvien pehmennyksessä käytettäviä kerneleitä. Keskilukukerneliä käytetään kohinanpoistoon. Kuvassa 31 on esitelty Gaussin kernelin arvot ja sen tuottama tulos HAMK:n musta-valkoisessa logossa (Davies 2012; Fisher et al. 2004.)



Kuva 31. HAMK-logo, gaussilainen kerneli ja konvoluutioitu lopputulos.

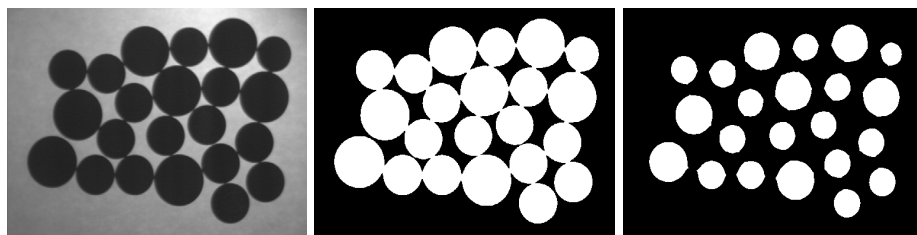
Pisteoperaatioista eniten käytetty ja tärkein on kynnystys, Siinä määritellään tietyn kynnysarvon alittavat pikselit mustiksi ja sen ylittävät valkoisiksi. Usein konenäössä kuvien tulkinta perustuu kuvankäsittely-yhdistelmään, jossa kuvasta on ensin etsitty reunat ja saatu kuva on kynnystetty sopivalla kynnystysarvolla. Kynnistyksen toiminta on esitelty kuvassa 32. (Fermum 2014; Szeliski 2010.)



Kuva 32. Mustavalkoinen Lena-kuva ja siitä arvolla 128 kynnystetty kuva.

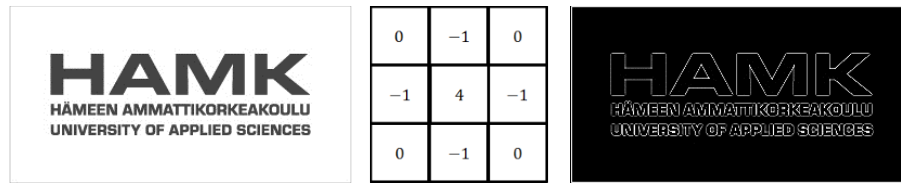
Konenäkösovelluksien kannalta muita tärkeitä naapurimuunnoksen sovelluksia ovat mm. binäärikuvien morfologiset operaatiot tekstintunnistuksessa sekä osakuvaoperaatiot, jotka laskevat etäisyysmuunnoksia ja etsivät komponenttiliitoksia. (Szeliski 2010; Davies 2012.)

Erosion toiminta, joka on dilaation ohella toinen morfologisista perusoperaatioista, on esitelty kuvan 33 kuvasarjassa. Vasemmanpuoleisin kuva on alkuperäinen kuva, joka on keskimmaisessä kuvassa porrastettu arvolla 90. Oikeanpuolimmaisessa kuvassa porrastetulle kuvalle on tehty eroosio käyttäen 11 pikseliä halkaisijaltaan olevaa, pallomaista kerneliä. (Fisher et al. 2004.)



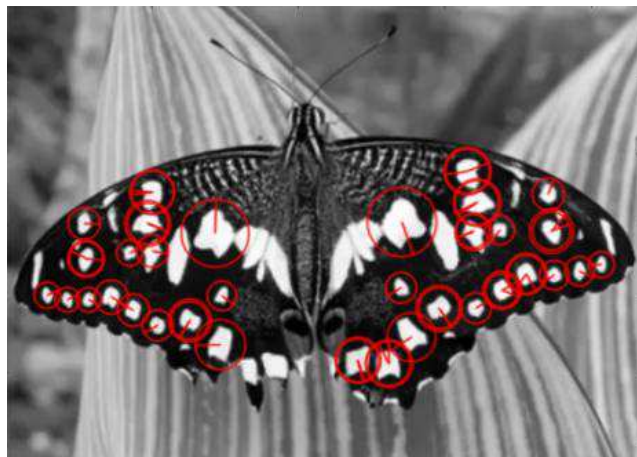
Kuva 33. Eroosion toiminta (Fisher et al. 2004).

Piirteiden, kuten viivojen, nurkkien ja läiskien (blob), erottamiseen ja tunnistamiseen on käytössä useita eri menetelmiä. Tietyillä kernelin arvoilla on mahdollista kuvasta erottaa alueet, joissa tapahtuu nopeita intensiteetin muutoksia. Tällaista kerneliä tai useamman kernelin yhdistelmää sanotaan reunanetsintäalgoritmiksi. Laplace-kerneli on matemaattisesti helpoin reunanetsintäalgoritmi. Laplace-kernelin toiminta on esitelty kuvassa 34. HAMK:n musta-valkoisessa logossa. Muita reunanetsintäalgoritmeja ovat mm. useampivaiheiset Canny-, Sobel- ja Prewitt-algoritmit. (OpenCV 2014; Fisher et al. 2004; Davies 2012.)



Kuva 34. HAMK:n logo, Laplace-kerneli ja sillä konvoluutioitu lopputulos.

Nurkkien tunnistukseen voidaan käyttää esim. Harris- tai SUSAN-algoritmeja (Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus). Kehittyneemmällä algoritmeilla voidaan tunnistaa kokonaisia piirteitä, esim. kuvassa 35 on SURF -algoritmillä (Speeded-Up Robust Features) tunnistettu perhosen siivistä helposti erotettavissa olevat piirteet. Piirteiden tunnistusta käytetään hyväksi piirteiden sovituksessa mallinekuvan ja tarkastuskuvan välillä. Kun käytetään hyväksi piirreperhajaista tarkastusta, ei kohteen tarvitse olla samassa asennossa tarkastettavassa kuvassa. Tästä esimerkkinä kuva 36, jossa vasemmalla näkyvästä mallinekuvan piirteet on tunnistettu oikealla olevasta kuvasta käyttäen FLANN-kirjastoa (Fast Approximate Nearest Neighbor Search Library). (OpenCV 2014; Szeliski 2010.)



Kuva 35. SURF-algoritmillä tunnistetut läiskät (OpenCV 2014).



Kuva 36. FLANN-kirjastolla toteutettu piirteiden tunnistus (OpenCV 2014).

6.3.3 Tulkinta

Tulkinta on kuvasta erotettujen alueiden vertaamista annettuihin mallineisiin tai alueiden matemaattista tulkintaa. Tulkintakriteerit voidaan jakaa neljään pääpiirteiden mukaan luokiteltuun ryhmään, jotka ovat mitta-, rakenne-, pinta- ja toiminnalliset piirteet. Mittapiirteiden alle kuuluvat mm. mitat, muodot, asennot, geometria ja kulmat. Rakennepiirteitä ovat mm. kokoonpanon osat, kuten ruuvit, niitit ja reiät, ja vieraat esineet, kuten pursheet ja roskat. Pintapiirteisiin kuuluvat kuopat, naarmut, halkeamat, tekstuuri ja jatkuvuus. Toiminnallisia piirteitä voivat olla esim. LCD-näytön toiminnan tarkastaminen tai hitsausseaman automaattinen ohjaukseen käytetty railonseuranta. (Szeliski 2010.)

Tulkintakriteerit määritellään erikseen jokaisella tarkastettavalle tuotteelle. Kuvassa 33. esitetyn kuvasarjan oikeanpuolimmaisesta kuvasta voitaisiin esimerkiksi laskea kaikkien aihoiden määrä tai isojen ja pienien aihoiden suhde. Kuvaa voitaisiin käyttää myös kappaleiden keskipisteiden koordinaattien laskemiseen konenäköavusteista poimintaa varten.

6.4 Konenäköjärjestelmän komponentit

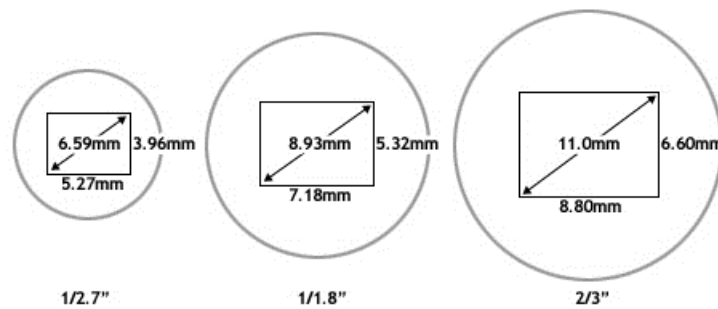
Konenäköjärjestelmän komponenteista käsitellään tarkemmin kameroiden ja objektiivien ominaisuuksia sekä näiden valintaa. Valaistuksesta käsitellään vain yleistä teoriaa ja muutamia esimerkkitapauksia, sillä komponenttien tarkempi määrittely vaatisi sekä valoja että konenäkökameraa kattavaa testausta varten.

Perinteinen konenäkökamerajärjestelmä on kokonaisuus, johon kuuluvat kamera objektiivineen, datansiirtokaapelit, erillinen konenäköohjain tai teollisuus-PC varustettuna kuvankaappauskortilla, ns. frame grapperilla. Vaihtoehtona perinteiselle järjestelmälle voidaan käyttää uudempaa älykameraa johon kaikki perinteisen järjestelmän ominaisuuden on rakennettu yksien kuorien sisään. Ratkaisevia kriteerejä valinnassa perinteisen ja älykamasovelluksen välillä ovat sovelluksen kameramäärä sekä etäisyydet. Jos tarvitaan vain muutama kamera, on järjestelmä todennäköisesti edullisempaa rakentaa vain parilla älykameralla. Jos kameroita tarvitaan useita, on ne yleensä halvempaa toteuttaa erillisillä kameroilla ja yhtenäisellä konenäköohjaimella. (Fermum 2014.)

6.4.1 Kamerateat

Kennojen tarkkuuden ja valmistustekniikan lisäksi niistä ilmoitetaan yleensä myös niin sanottu optinen formaatti, joka juontaa juurensa ensimmäisissä tv-kameroissa käytettyjen katodisädeputkien standardihalkaisijoihin. Tätä samaa optista formaattia käyttävät myös useat objektiivivalmistajat ilmaisemaan, minkä kokoiselle kennolle kyseinen objektiivivalmistaja enintään sopii. Kaikkien tuumamittaisten optisten formaattien kuvasuhde on 4:3, mutta myös näistä formaateista poikkeavan kokoisia ja kuvasuhteisia kennoja valmistetaan. Muutamia yleisimmistä optisista formaateista on

esiteltynä kuvassa 37. (Digital Photography Preview 2002; Edmund Optics 2014.)



Kuva 37. Joidenkin optisten formaattien mittoja (Digital Photography Preview 2002).

Kennon valotusaikaa säätelee suljin. Sulkimena käytetään joko erillistä mekaanista suljinta tai kuvakennoon rakennettua sähköistä suljinta. Kokenäkökameroissa pääsääntöisesti käytetään sähköisiä sulkimia, joiden tärkeimmät päätyypit ovat ”global shutter”, joka valottaa koko kuvasensorin alan kerralla ja ”rolling shutter”, jolla valotus tapahtuu rivi kerrallaan. Näistä jälkimmäinen on yleensä halvempi toteuttaa, mutta se soveltuu vain hitaasti liikkuvien kohteiden kuvaamiseen, sillä se aiheuttaa kuvaan liike-epäterävöintiä. Esimerkki liike-epäterävöinnistä kuvissa 38 ja 39. Näistä kuva 38 on otettu ”rolling shutter”-suljinta ja kuva 39 puolestaan ”global shutter”-suljinta käyttäneellä kennolla. (Point Grey 2014.)



Kuva 38. Rullasulkimella otettu kuva. (Point Grey 2014).



Kuva 39. Kokonaissulkimella otettu kuva. (Point Grey 2014).

Fyysisesti konenäkösovelluksissa käytetyt kamerat ovat verrattain pienikokoisia. Kuvassa 40 näkyvän, JAI:n valmistaman, SP-20000-PMCL-mallisen, 20 MP CMOS-kennolla varustetun konenäkökameran mitat ovat

62 mm x 62 mm x 84,5 mm ja se painaa 320g. Kyseisen kameran kennossa on $5120 \cdot 3840 \approx 19,7 \cdot 10^6$ pikseliä, joiden koko $6,4 \times 6,4 \mu\text{m}$. Se on varustettu F-kiinnityksellä ja Mini Camera Link -liitynnällä. (JAI 2014.)

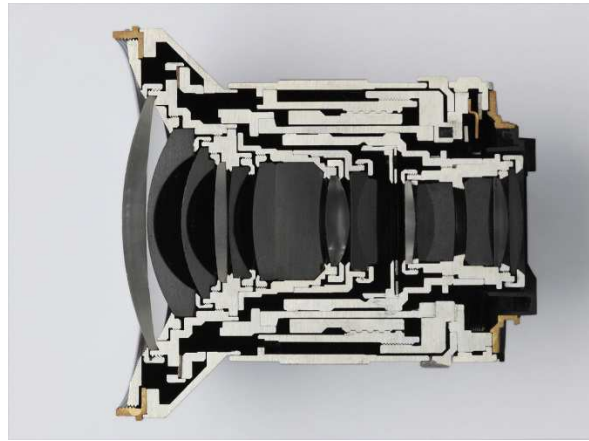


Kuva 40. JAI Spark Series SP-20000-PMCL konenäkökamera (JAI 2014).

Konenäköjärjestelmässä kameran valintaan vaikuttavia kriteerejä ovat mm. vaadittu erotuskyky, kuvausnopeus, sekä se onko sovellus sopivin väri- vai mustavalkokameralle. Muita valintaan vaikuttavia kriteerejä ovat mm. käytettävä tiedonsiirtoprotokolla, suljin- ja kennotyyppi. Yleensä kameran ja objektiivin valinta suoritetaan yhdessä suunniteltuun sovellukseen, jotta voidaan varmistaa kummankin optimaalinen suorituskyky.

6.4.2 Objektiivit

Objektiivin tarkoituksena on keskittää valon kulku niin, että se voidaan projisoida kuvatasolle, konenäkökameran tapauksessa kuvakennon pinnalle. Objektiivi itsessään on linseistä koostuva, erittäin monimutkainen optinen laite. Monimutkaisuudesta esimerkkinä erään objektiivin poikkileikkaus kuvassa 41. Objektiivin ominaisuuksista kerrotaan yleensä ainakin polttoväli, kuvakulma ja aukko. Monimutkaisuudesta huolimatta voidaan kuvasuurennoksen, kuvan paikan ja suunnan laskemiseksi koko järjestelmä yksinkertaistaa muotoon, jossa on merkitystä vain koko objektiivin polttovälillä ja näin laskemiseen voidaan käyttää myöhemmin esiteltävää linssikaavaa 2. (Inkinen et al. 2002, 416-423; Young & Freedman 2008, 1131-1133.)

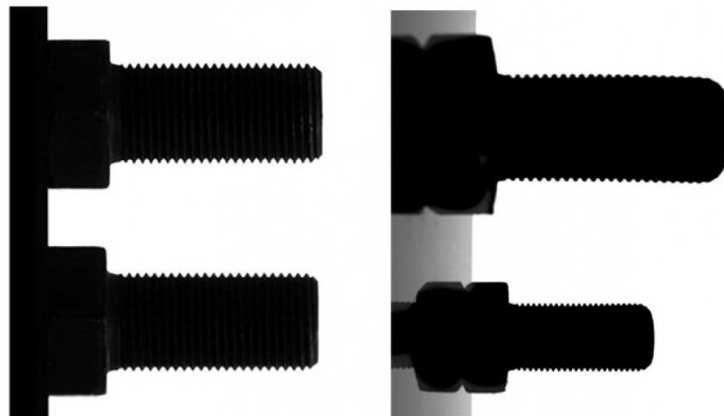


Kuva 41. Zeiss Distagon T* 2,8/21 objektiivin poikkileikkaus (Carl Zeiss 2012).

Vaikka polttoväliltään säädettäviä, niin sanottuja zoom-objektiiveja on olemassa, on niiden käyttö tarkastussovelluksissa vähäistä, sillä optiikan valmistaminen niin, että saavutetaan riittävä kuvanlaatu, on erittäin haastavaa ja kallista. Yleensä käytetäänkin kiinteällä polttovälillä varustettuja objektiiveja, joita konenäkökäyttöön löytyy useammalta valmistajalta polttoväleillä 8, 12,5, 16, 25, 35, 50 ja 75 mm. Konenäköobjektiivien yhteydessä mainitaan usein myös suurin kennon optinen formaatti jolla kyseistä objektiivia voi käyttää. (Edmund Optics 2014; Israel 2007.)

Objektiivi kiinnitetään kameraan käyttäen jotain standardisoitua kiinnitystä. Teollisuuskamerassa käytetään yleisesti C-kiinnitystä, joka on 1" x 32 tpi UN 2A -kierre ja etäisyys kiinnityspinnasta kuvatasoon on 17,526 mm:ä. Isommalla ja tarkemmalla kennolla varustetuissa teollisuuskameroissa käytetään yleensä joko M42-kierrekiinnitystä tai valokuvakameroista tuttua Nikonin F- banjonettikiinnitystä. (Edmund Optics 2014.)

Perinteisten kiinteäpolttovalisten entosentristen objektiivien lisäksi tarkkaa mittaamista vaativissa konenäkösovelluksissa voidaan käyttää erikoisrakenteista telesentristä linssiä. Kuvassa 42 näkyy vasemmalla samat kappaleet kuvattuna telesentrisellä ja oikealla perinteisellä linssillä. (Opto Engineering 2014.)

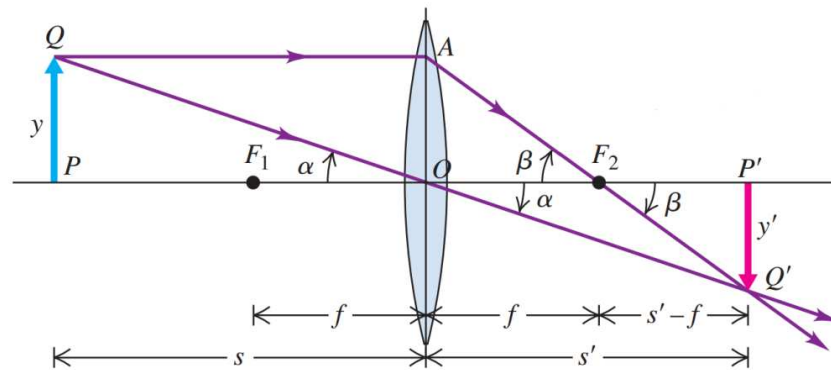


Kuva 42. Ero telesentrisen ja entosentrisen linssien muodostamien kuvien välillä (Opto Engineering 2014).

Ihmissilmällä näkyvä valo on se sähkömagneettisen spektrin osa, jonka aallonpituus on noin 380–750 nm. Joissain konenäön sovelluksissa, kuten esim. pintakäsitellyiden tai näkyvää valoa heijastavien kappaleiden tarkastamisessa, voidaan käyttää hyväksi lähi-infrapuna-alueen (aallonpituus noin 780–3000 nm) ja ultraviolettialueen säteilyä (aallonpituus noin 10–380 nm). (Inkinen et al. 2002; Hollows 2004; Fermum 2014.)

Valon kulkua objektiiveissa ja muissa optisissa järjestelmissä on helpointa kuvata yksittäisen valonsäteen kulkua mallintavalla geometrisellä eli sädeoptiikalla. Fysikaalinen eli aalto-optiikka puolestaan tutkii valon aaltoluonteesta johtuvia ilmiöitä kuten diffraktiota ja interferenssiä. (Inkinen et al. 2002, 416-423; Hecht 2002, 36.)

Kuvassa 43 on esitettyä säteiden kulku ja kuvan muodostuminen järjestelmässä, jossa on yksi ohut linssi. Kuvassa on nähtävissä tarvittavien etäisyyksien ja niitä vastaavien muuttujien sijoittuminen ohuen linssin muodostamaan optiseen järjestelmään. Sädeoptiikan laskuissa merkisäännöllä on tärkeä rooli, sillä ne kertovat missä ja miten päin kuva tai esine on. Karteesinen merkisäännöstö on yleisesti käytetty ja sen mukaan mm. valo kulkee aina vasemmalta oikealle, kaikki pääakselin suuntaiset etäisyydet mitataan optisesta keskiöstä O ja pääakselin yläpuolelle osoittavat mitat ovat positiivisia. Lisäksi on määrätty, että s on positiivinen O :sta vasemmalle ja s' on positiivinen O :sta oikealle. Muuttujilla on kaikilla omat nimensä, mutta tämän työn kannalta tärkein on f eli polttoväli. (Inkinen et al. 2002, 416-423; Young & Freedman 2008, 1131-1133; Hecht 2002, 149-175.)



Kuva 43. Ohuen linssin optinen järjestelmä (Young & Freedman 2008, 1131)

Perusyhtälö sädeoptiikan laskentaan on ohuen linssin yhtälö 1. ja siitä johdettu Gaussin linssikaava 2. Linssikaavassa oletetaan, että linssi on niin ohut, ettei sen paksuutta tarvitse ottaa huomioon. (Inkinen et al. 2002, 416-423; Young & Freedman 2008, 1131-1133; Hecht 2002, 149-175.)

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n_l - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1.)$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (2.)$$

Suurennos m , joka on s :n ja s' :n suhde, lasketaan kaavalla 3. Suurennos voidaan laskea myös y :n ja y' :n suhteena.

$$m = -\frac{s'}{s} = \frac{y'}{y} \quad (3.)$$

Yhtälöiden perusteella objektiivin polttovälin laskentaan tarvitaan seuraavia lähtötietoja:

- Kuvattavan kohteen tai kuva-alueen koko ja haluttu suurennos tai kuvattavan kohteen ja muodostettavan kuvan koko.
- Jokin kuvatason Q' ja kuvattavan kappaleen tason Q välisistä etäisyyksistä.

Suunniteltavassa järjestelmässä objektiivin ja kuvattavan kohteen välille halutaan vähintään n. 300–350 mm:n etäisyys. Perusteet valitulle vähimmäisetäisyydelle ovat robottitarttujan ja valaistusjärjestelmän vaatima tila sekä konenäkökameroihin soveltuvien objektiivien lyhin tarkennusetäisyys, joka on yleensä luokkaa 200–300 mm. (Edmund Optics 2014.)

Vaativuusmäärittelystä tiedetään, että kuvattavan alueen maksimitat ovat 80x60mm. Jotta koko alue saataisiin katettua objektiivilla, tulee muuttujan y arvona käyttää tarkastusalueen muodostavan suorakaiteen lävistäjää 100 mm. Jos kameran kennon fyysisiä mittoja ei tiedetä, ne lasketaan kaavalla 4, jossa L_{px} on yksittäisen pikselin leveys [μm] ja N_{px} on pikselin määrä tarkasteltavassa suunnassa. Samaa kaavaa voidaan käyttää myös, jos kennon mitat ja tarkkuus tiedetään, mutta yksittäisen pikselin mittaa ei tiedetä.

$$L_{kenno} = L_{px} \cdot N_{px} \quad (4.)$$

Kennoissa käytettävät pikselit ovat tasasivuisia neliöitä, joten kennon lävistäjä voidaan laskea kaavalla 5, jossa N_x ja N_y ovat pikselien lukumäärät kumpaankin suuntaan.

$$q_{kenno} = L_{px} \cdot \sqrt{N_x^2 + N_y^2} \quad (5.)$$

Koska linssikaavassa 2 esiintyvää termiä s' ei tiedetä, täytyy se määrittellä uudelleen. Kuvasta 43 löytyvien suorien $QP - PO$ ja $OP' - P'Q'$ muodostamien suorakulmien yhdenmuotoisuudesta voidaan johtaa yhtälö 6. Tämä yhtälö ratkaistaan muuttujan s' suhteen, jolloin saadaan yhtälö 7. Yhtälö 7 sijoitetaan ohuen linssin yhtälöön 2 ja saadaan yhtälö 8, joka sievenee yhtälön 9 muotoon. Yhtälöä 9 käyttämällä voidaan laskea polttoväli f tiedossa olevilla lähtötiedoilla $s = 350\text{mm}$, $y = 80\text{mm}$ ja $y' = q_{kenno}$.

$$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \quad (6.)$$

$$s' = \frac{sy'}{y} \quad (7.)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{\left(\frac{s \cdot y'}{y}\right)} \quad (8.)$$

$$f = \frac{s \cdot y'}{y + y'} \quad (9.)$$

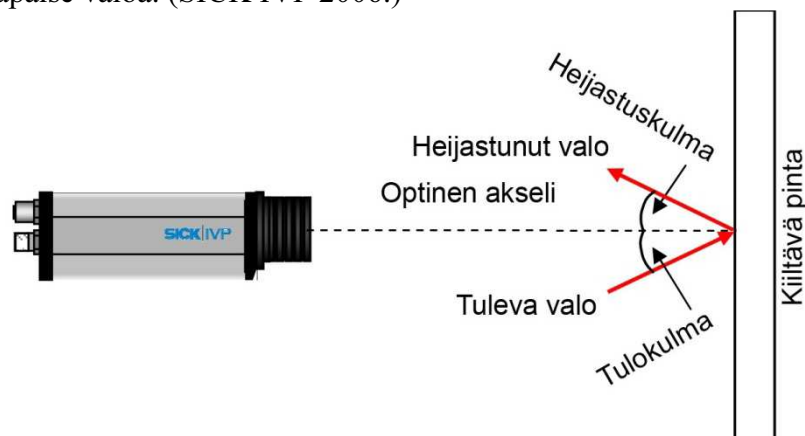
Polttovälin laskenta kolmelle eri tarkkuudella varustetulle esimerkkikameralle löytyy liitteestä 5.

6.4.3 Valaistus

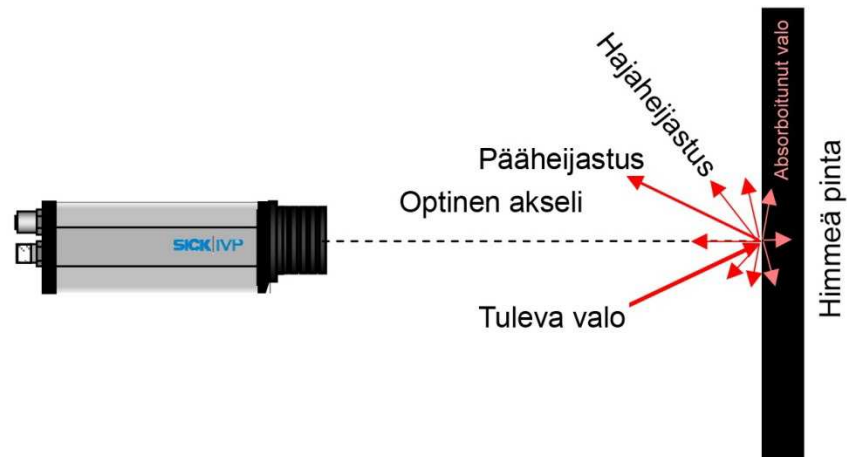
Konenäkö on riippuvainen tuotetusta kuvadatasta ja kuvadatan tuottamisessa puolestaan kaikki on kiinni valaistuksesta, sillä kamera voi nähdä ainoastaan sen valon, joka siihen kappaleen pinnasta heijastuu. Mitä parempaa kuvadata on, sitä yksinkertaisempia ja varmempia algoritmeja voidaan käyttää. Näin ollen valaistuksella on todella tärkeä rooli konenäössä. (Davies 2012, 718.)

Yleisimmin konenäön sovelluksissa käytettyjä valotyyppisiä ovat rengas- (ring), kohde- (spot), tausta- (back), tummatausta- (darkfield), kupu- (dome) ja aksiaalivalot (axial). Valaistustekniikkana on nykyisin yhä useammin LED-valot. (SICK IVP 2006.)

Kohteeseen osuva valo voi pinnan ominaisuuksista riippuen heijastua siitä joko kuvan 44 mukaan peiliheijastuksena tai kuvan 45 mukaan hajaheijastuksena. Mitä himmeämpi pinta on, sitä enemmän siitä lähtee hajaheijastuksia, kun taas kiiltävällä pinnalla peiliheijastukset ovat hallitsevia. Näiden lisäksi on olemassa vielä valoa osittain tai kokonaan läpäisevät pinnat ja niillä vaikuttavat heijastukset sekä valon läpäisy ja taittuminen, mutta näiden käsittely voidaan ohittaa koska työn aihepiiriin kuuluvat kappaleet eivät läpäise valoa. (SICK IVP 2006.)

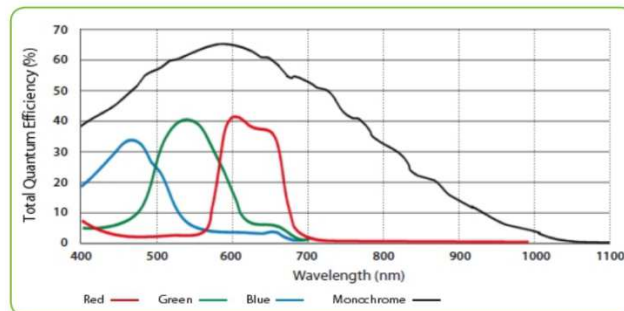


Kuva 44. Peiliheijastus (SICK IVP 2006).



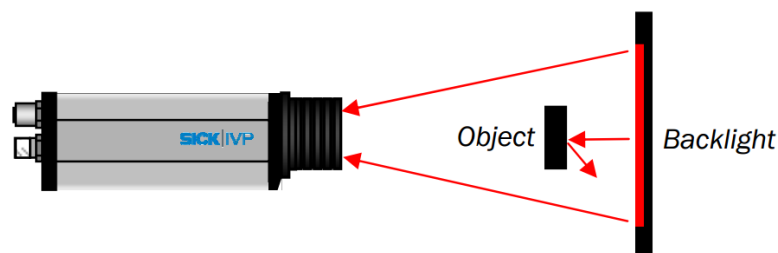
Kuva 45. Hajaheijastus (SICK IVP 2006).

Valon suunnan ja voimakkuuden lisäksi myös värillä on merkitystä ja mustavalkokameroita käytettäessä valo onkin usein väriltään punaista. Syy tähän selviää, kun tutkitaan esim. kuvassa 46 esitettyä konenäkökameran spektrivastetta. Siitä voidaan nähdä että kyseisen kennon kvanttihyötysuhde ja näin ollen myös herkkyys on korkeimmillaan juuri punaisen aaltopituuden fotonien kohdalla. Käytössä on myös valkoisia, vihreitä ja sinisiä valoja, joskin mustavalkosovelluksissa valkoista valoa käytetään vähemmän. (Fermum 2014; JAI 2014; SICK IVP 2006.)



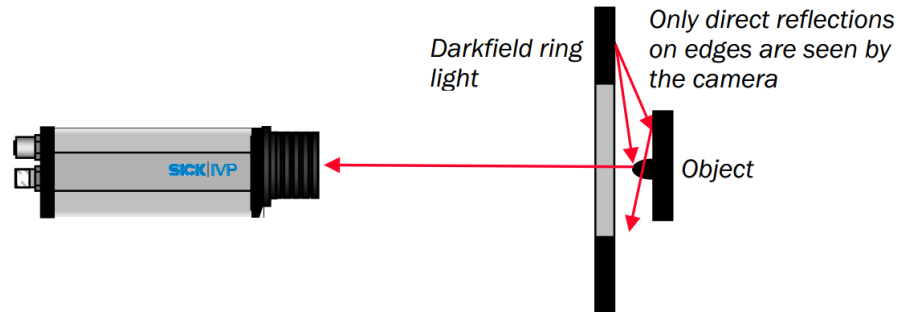
Kuva 46. JAI SP-20000-PMCL konenäkökameran spektrivaste (JAI 2014).

Taustavalaistuksella, jonka periaate on esitelty kuvassa 47, saadaan aikaiseksi erittäin korkeakontrastisia kuvia ja se on erittäin tehokas ääri viivojen erottamisessa. Se sietää myös hyvin värin, tekstuurin ja ympäröivän valon vaihteluita. (SICK IVP 2006.)



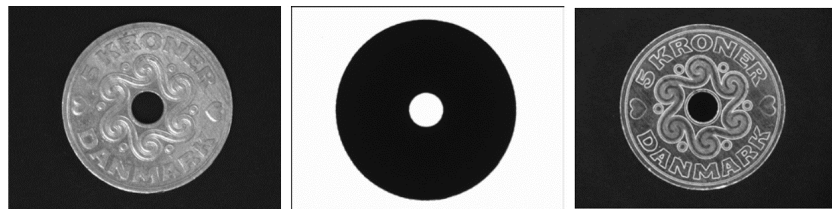
Kuva 47. Taustavalaistuksen periaate (SICK IVP 2006).

Kuvassa 48 esitelty epäsuora- / tummataustavalaistus (dark field illumination) on erittäin käyttökelpoinen tapa valaista kappaleita kun pinnat ovat tasaisia ja erotettavat kohteet pienehköjä. Sillä saadaan aikaan hyvä erotuskyky naarmuille, pienille ulkoneville yksityiskohdille ja pintalialle. (SICK IVP 2006.)



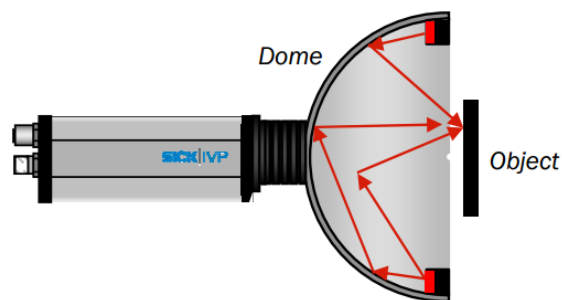
Kuva 48. Tummataustavalaistuksen (dark field illumination) periaate (SICK IVP 2006).

Kuvan 49 vasemman puoleinen kolikko on kuvattu normaalissa huoneenvalossa, keskimmäinen kuvan 47 mukaisella taustavalolla ja oikeanpuolimmaisoin käyttäen kuvassa 48 esiteltyä tummatausta-valaistusta.



Kuva 49. Sama kohde valaistuna kolmella eri tavalla (SICK IVP 2006).

Kiiltävien ja kolmiulotteisesti muotoiltujen materiaalien valaisemisessa tarvitaan usein kuvan 50 kaltaista kupuvaloa. Sen ominaispiirteenä on erittäin hajonnut heijastus, jolla taataan kohteelle hyvin tasainen valaistus ilman ylivalottuneita valaistushuippuja. Riittävän valotehon tuottamiseen tarvitaan muita valaistustapoja enemmän tehoa ja yleensä kupuvalojen kanssa joudutaankin käyttämään pidempiä valotusaikoja. (SICK IVP 2006.)



Kuva 50. Kupuvalaistuksen periaate (SICK IVP 2006).

Kuvassa 51 on vasemmassa huoneenvalossa otettu kuva puhelimen näppäimistöä, jonka materiaali on kiiltävää muovia ja päälipinnat kaarevia. Oikealla on sama kuva valaistuna kupuvalaisimella.



Kuva 51. Sama kohde valaistuna kahdella eri tavalla (SICK IVP 2006).

6.4.4 Älykamerat

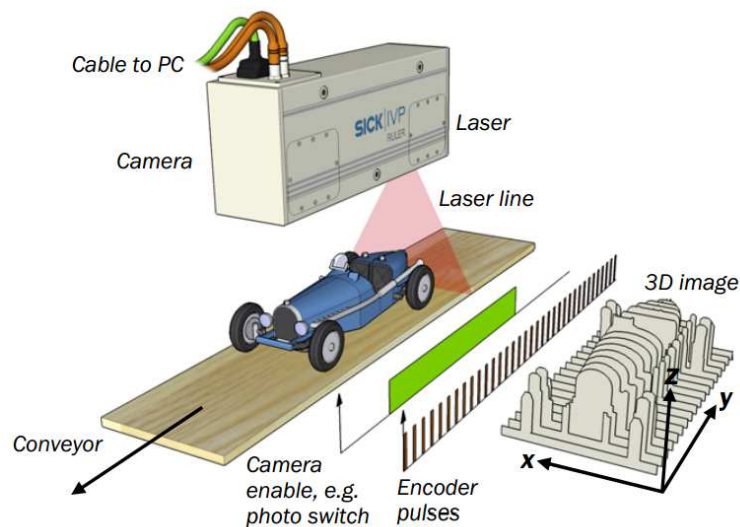
Nykyään valmistetaan myös ns. älykairoita, joilla voidaan toteuttaa kaikki konenäköjärjestelmän toiminnot yhdellä laitteella. Älykairoaan on yhden kuoren sisään integroitu kuvasensori, kuvasadan digitointi, kuvankäsittely ja analysointi sekä tulkinta. Laitteessa saattaa olla myös kiinteä valaistus, optiikka on yleensä vaihdettava. Syötteenä automaatiojärjestelmään päin tällainen älykamera antaa vain yksinkertaisen IO-signaalin, jonka arvo riippuu siitä miten kappale täyttää määritellyt tarkastuskriteerit. Kuvassa 52 on esiteltyä Cognexin valmistaman ”In-Sight 7000 Series”-älykameran ominaisuuksia ja liittäntöjä. (Cognex Corporation, 2014.)



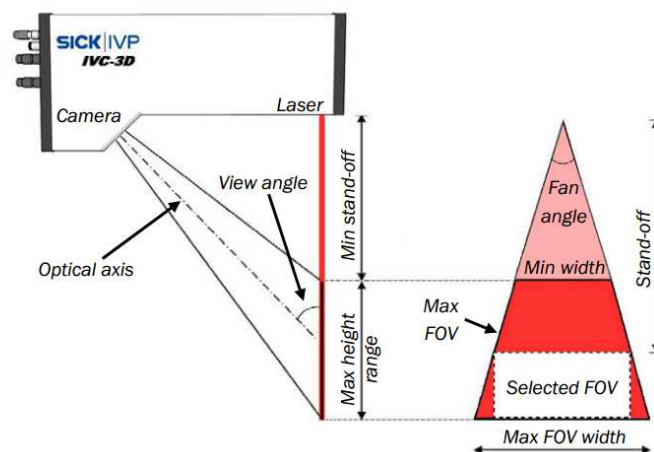
Kuva 52. Älykamera ja sen ominaisuuksia (Cognex Corporation, 2014).

6.4.5 Kolmiulotteinen konenäkö

Perinteisen konenäön lisäksi on olemassa muutamia erilaisia tapoja toteuttaa kolmiulotteista konenäköä. Näillä menetelmillä muodostetaan kaksiulotteisesta kuvadatasta kolmiulotteinen malli tietokoneelle. Samalla tavoin kuin perinteisen konenäön algoritmeilla, voidaan myös kolmiulotteisen mallin pinnalta erottaa korkeuseroja ym. epäjatkuvuuksia. Yleisimmät menetelmät ovat kahden tai useamman kameran muodostama stereonäkö, strukturoituun valoon perustuva konenäkö ja optiseen kolmiomittaukseen perustuvat ratkaisut. Kuvissa 53 ja 54 on esiteltyä optisen kolmiomittauksen periaatetta kun käytetään konenäkökameraa ja laservaloa. (Szeliski 2010; SICK IVP 2006.)



Kuva 53. Konenäkö laserkolmiomittauksen komponentit (SICK IVP 2006).



Kuva 54. 3D-konenäkökameran työalue (SICK IVP 2006).

Tarkkuusvalukappaleen tarkastamiseen kolmiulotteisista menetelmistä soveltuvim on juurikin laservaloa avukseen käyttävä kolmiomittaus. Tällaisia ratkaisuja löytyy markkinoilta valmiina mm. Cognexilta ja Sickiltä, kuvassa 55 on SICK:n valmistama IVC-3D 30-mallinen kolmiomittaukseen perustuva 3D-konenäkökameran. Kyseisen kameran kuvauskentän leveys

on 53 - 59 mm ja korkeus 31 mm. Leveysuunnassa 3D-profiilin tarkkuus on 2048 pistettä ja korkeussuunnassa n. 0,015 mm. Laitteen skannausnopeus on 5000 3D-profiilia sekunnissa, jolloin koko 80 mm tarkastusalue saataisiin skannattua leveysuuntaa vastaavalla tarkkuudella noin 0,6 sekunnissa. Kuten aikaisemmin kuvassa 52 esitellyssä perinteisen konenäön älykamerassa, myös IVC-3D-älykamerassa on tiedonkäsittely sisäänrakennettuna. (SICK 2014.)

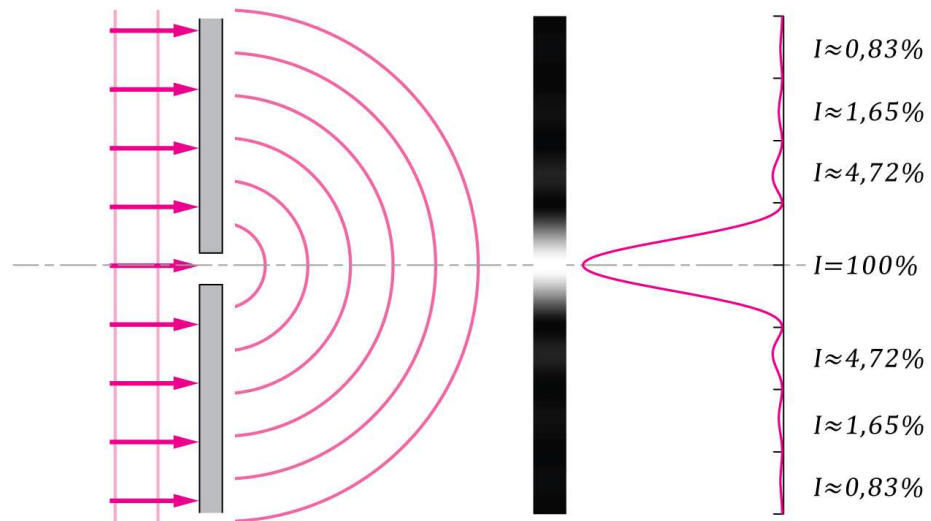


Kuva 55. SICK IVC-3D 30 3D-konenäkökamera (SICK 2014).

6.5 Kuvausjärjestelmän erotuskyky ja tarkkuus

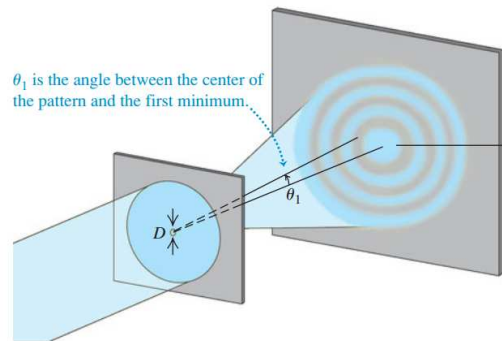
Valoon perustuvien kuvantamisjärjestelmien erotuskykyä rajoittaa valon taipuminen eli diffraktio. Kun valoalto kulkee kapean, suorakaiteen muotoisen aukon läpi, se taipuu samalla tavoin kuin muutkin aallot. Riippuen aukon koosta, valon aallonpituudesta ja aukon etäisyydestä kuvapintaan voidaan puhua joko lähi- tai kaukokentän diffraktiosta. Näitä käsittelee vastaavasti Fresnelin ja Fraunhoferin diffraktiot. Koska Fraunhoferin diffraktio on matemaattisesti huomattavasti helpompi käsitellä ja se pätee useissa käytännön tapauksissa, sivuutetaankin Fresnelin diffraktio useissa lähteissä pelkällä maininnalla. Tärkein yksinkertaistus Fraunhoferin diffraktiossa on diffraktoituneiden aaltojen käsitteleminen suorina, kun taas Fresnelin diffraktio ottaa huomioon pintaan osuvien diffraktioaaltojen kaarevuudet. (Inkinen et al. 2002, 367-400; Young & Freedman 2008, 1080-1214.)

Kuvassa 56 on esitettyä valon taipuminen sen kulkiessa kapean raon läpi ja tästä muodostuva diffraktiokuvio intensiteettitasoinen. Raosta lähtee rajaton määrä aaltoja Huygensin periaatteen mukaisesti ja intensiteettikuvioon syntyvät tummemmat ja vaaleammat alueet johtuvat superpositioperiaatteen mukaan vahvistavasta tai heikentävästä interferenssistä. Käyrän ja kuvaajan pysty akselin väliin jäävän alue kuvaa kyseiselle alueelle osuvan intensiteetin suhdetta koko intensiteetistä. Kuvassa näkyvää aluetta, jonka pinta-ala muodostaa intensiteettitason $I = 100\%$, käytetään nimitystä päämaksimi ja loput ovat sivumaksimeja. Kohtia, joissa intensiteettiä ei ole ja käyrä leikkaa pysty akselin, kutsutaan minimeiksi. (Inkinen et al. 2002, 367-400; Young & Freedman 2008, 1080-1214.)



Kuva 56. Diffraaktion periaate (mukaillen (Inkinen et al. 2002; Young & Freedman 2008)).

Valoaallon kulku pyöreän reiän läpi saa aikaan kuvassa 57 näkyvän diffraktiokuvion. (Young & Freedman 2008, 1208).

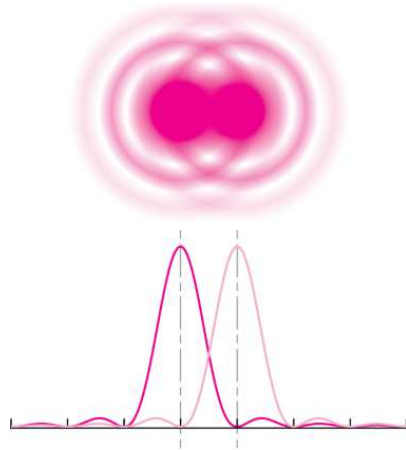


Kuva 57. Diffraktiokuvion muodostuminen pyöreästä reiästä (Young & Freedman 2008, 1208).

Pyöreän reiän muodostaman diffraktiokuvion keskellä olevaa päämaksimia kutsutaan nimellä Airyn kiekko. Muodostuvan kiekon keskipisteen ja ensimmäisen minimin välinen kulma θ voidaan laskea kaavalla 10, jossa λ on valon aallonpituus ja D on aukon halkaisija. (Hecht 2002, 470-472.)

$$\sin\theta = 1,22 \frac{\lambda}{D} \left(\text{pienillä kulmilla } \theta \approx 1,22 \frac{\lambda}{D} \right) \quad (10.)$$

Rayleigh'n kriteerin mukaan kaksi tällaista Airyn kiekkoa on juuri erotettavissa toisistaan, jos toisen päämaksimi on kuvan 58 mukaisesti toisen ensimmäisen minimin kohdalla. (Hecht 2002, 470-472; Young & Freedman 2008; Inkinen et al. 2002.)



Kuva 58. Pyöreän reiän muodostamat diffraktiokuviot Rayleigh'n kriteerin mukaisella etäisyydellä (mukaiillen (Inkinen et al. 2002; Young & Freedman 2008))

Kun oletetaan kulman θ olevan pieni, voidaan tämä korvata termillä $\frac{x}{f}$, jossa x on kahden pisteen välinen etäisyys kuvatasolla ja f on polttoväli. Tällöin yhtälö 10. voidaan muuttaa yhtälön 11. muotoon, jossa $\frac{f}{D}$ on objektiivin f-luku, puhekielessä aukko. Airyn kiekon säteen kaavaa ja Rayleigh'n kriteeriä käyttämällä voidaan näin määrittellä optiikan erotuskyky. (Inkinen et al. 2002, 367-400; Young & Freedman 2008, 1080-1214.)

$$x = 1,22 \frac{f\lambda}{D} \quad (11.)$$

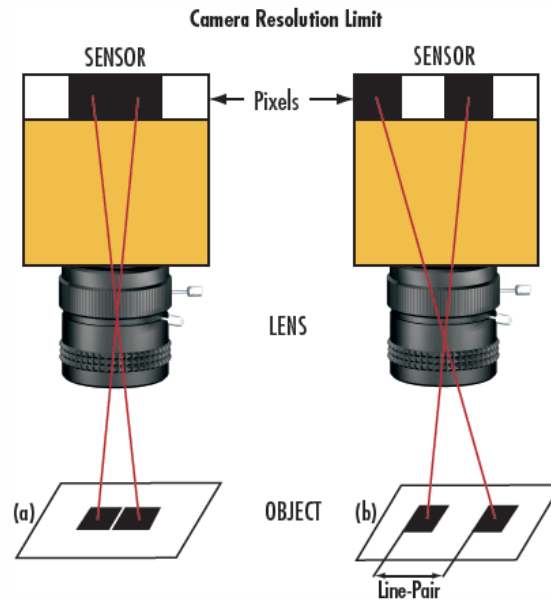
Airyn kiekon yhtälöstä on tärkeää huomata, että sen säde ei riipu muista kuin aukon koosta ja valon aallonpituudesta. Näkyvän valon alueella aukolla $f/2$ Airyn kiekon halkaisija on noin $1,7 - 3,4 \mu m$. (Inkinen et al. 2002, 367-400; Young & Freedman 2008, 1080-1214.)

Kameran kennolla saavutettavaa tarkkuutta eli erotuskykyä voidaan arvioida monella eri menetelmällä. Yksinkertaisin menetelmä on jakaa tarkasteltavan kohteen mitta vastaavalla kameran sensorin yhden rivin pikselimäärällä. Tämä voidaan laskea yhtälön 12. mukaan, jossa L_o on tarkasteltava mitta [mm] ja N_{px} on pikselien määrä yhdessä rivissä.

$$\frac{L_o}{N_{px}} = \frac{mm}{px} \quad (12.)$$

Tämän menetelmän ongelma on se, että se ei kerro onko pikselin sisältämä tieto erotettavissa muiden pikselin sisältämästä tiedosta. Tapoja mitata todellista erotuskykyä ovat mm. RP-arvo (resolution power RP, erotuskyky) ja MTF-käyrä (Mean Transfer Function MTF, modulaation siirtofunktio). Näillä voidaan mitata niin yksittäisen osan kuin koko järjestelmänkin erotuskykyä. RP-arvo kuvaa optisen järjestelmän viivataajuutta eli Rayleigh'n kriteeriin perustuvaa kykyä erottaa kaksi samansuuntaista viivaa toisistaan ja taustastaan. Yksikkönä erotuskyvyllä käytetään viivaparia (line pair, lp) millimetrille, lp/mm. Jos kohteen piirteet sijaitsevat kuvan 59 kohdan a mukaisesti liian lähekkäin toisiaan, tulkitsee kamera ne yh-

deksi mustaksi palkiksi. Jotta yksittäisten pikselin sisältämä tieto voidaan erotella toisistaan, tarvitaan väliin yksi tyhjä pikseli (kuva 59, kohta b). Erotuskyvyn ongelmana on se, että se ei ota huomioon kontrastieroja. (Edmund Optics 2014; Fermum 2014.)



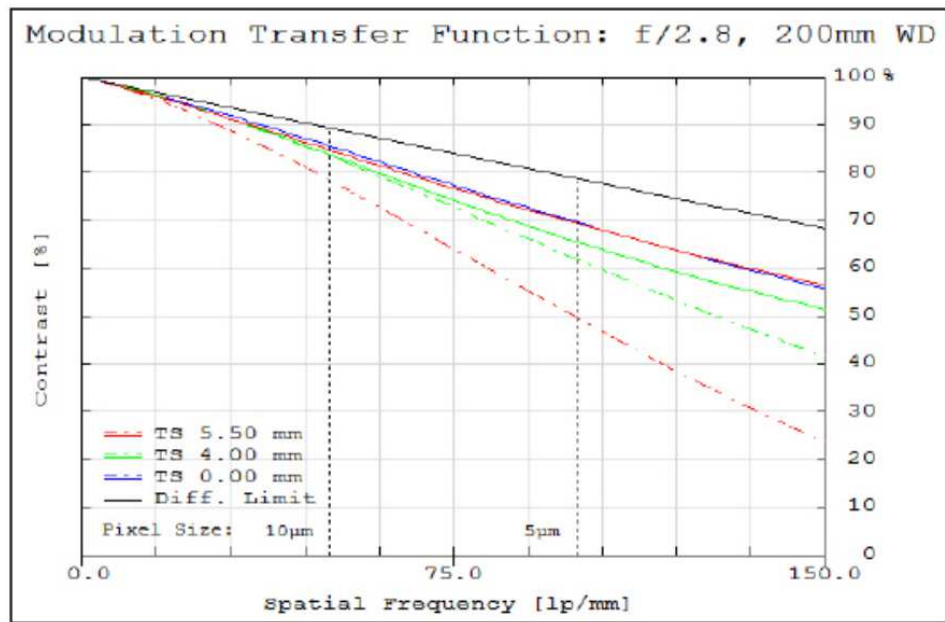
Kuva 59. Viivaparin erotuskyky (Edmund Optics 2014).

Nyquist-Shannon-teoreeman, joka on eräs signaalinkäsittelyn perusperiaatteista, mukaan alkuperäisestä signaalista on otettava näytteitä taajuudella, joka on suurempi kuin kaksinkertainen alkuperäiseen signaaliin nähden. Sama pätee myös kääntäen eli korkein toistettava taajuus on puolet näytteenottotaajuudesta. Lopullinen viivaparien erotuskyky $RP_N [lp/mm]$ riippuu niin kennon pikselimäärästä, yksittäisen pikselin koosta kuin kuvan kontrastistakin. Kennon erotuskyky voidaan laskea kaavalla 13. (Edmund Optics 2014; Lüke 1999.)

$$RP_{kenno} = \frac{10^3 \mu m}{2 \cdot L_{px}} \quad (13.)$$

Kun yhtälöstä 13 saatu arvo kerrotaan järjestelmän suurennoksella, joka laskentaan on kaava 3, saadaan tietoon järjestelmän erotuskyky. Yhtälöä 13 tarkastelemalla voidaan lisäksi todeta samansuuntainen johtopäätös kuin objektiivien tarkkuuden riippuvuudesta aukon kokoon eli kennon erotuskyky ei ole riippuvainen pikselien määrästä vaan ainoastaan yksittäisen pikselin koosta.

MTF-käyrä (modulation transfer function, modulaation siirtofunktio) puolestaan kuvaa järjestelmän kykyä erottaa kontrastia eri viivapariresoluutioilla. MTF:n määrittämisen ongelmana on, että se riippuu mm. etäisyydestä kuvan keskipisteestä, aukon suuruudesta ja valon aallonpituudesta, jolloin mittauksia joudutaan suorittamaan suuria määriä. Kuvassa 60 on esitelty Edmund Opticsin valmistaman, 12 mm C-kiinnitteisen konenäkökameran MTF-käyrät 200 mm työetäisyydellä ja aukolla $f/2,8$. (Fermum 2014; Edmund Optics 2014.)



Kuva 60. Edmund Optics TECHSPEC® 12mm f/1,8 konenäköobjektiivin MTF-käyrä, kun $\lambda = 486\text{nm} - 656\text{nm}$ (Edmund Optics 2014).

Sen lisäksi, että diffraktio asettaa rajan valoon perustuvan järjestelmän erotuskyvylle, objektiiveissa vaikuttaa myös suuri joukko muita erotuskykyä rajoittavia virhelähteitä. Linssissä ja objektiivin kokoonpanossa ilmenee monenlaisia virheitä johtuen mm. valmistustoleransseista sekä valon käyttäytymisestä sen heijastuessa, taittuessa tai siroonassa. (Fermum 2014; Hecht 2002.)

Linssien tuottamia virheitä voidaan korjata suunnittelemalla entistä monimutkaisempia linssejä. Esimerkiksi asfääristä linssiä käytetään korjaamaan linssin keskiosan ja reunojen välillä ilmenevän valon taittumiseron tuottamaa pallopoikkeamaa. Hechtin (2002, 153) mukaan laadukkaana asfäärisen linssin valmistustarkkuuden tulisi olla vähintään $\lambda/4$. Esim. violetin värin alueella, noin $420\mu\text{m}$, neljäsosa aallonpituudesta tarkoittaisi, että linssin pinnat olisi kyettävä työstämään $1,05 \cdot 10^{-4}\text{mm}$:n (0,0001 mm) tarkkuudella. Linssi taittaa eri aallonpituuksista valoa eri tavalla, tästä johtuvaa virhettä kutsutaan kromaattiseksi aberraatioksi. Kromaattista aberraatiota voidaan korjata käyttämällä akromaattilinssiä, joka koostuu kahdesta tai useammasta peräkkäin asetellusta eri taitekertoimen omaavasta linssistä. (Fermum 2014.)

Erittäin laadukasta objektiivia, jonka optinen järjestelmä on sellainen, että se pystyy keskittämään kaikki sen läpi kulkevat valonsäteet Airyn kiekon suuruiselle alueelle, kutsutaan diffraktiorajoitteiseksi objektiiviksi, ts. sen erotuskykyä rajoittaa ainoastaan diffraktion asettamat rajat. Tällaiset objektiivit ovat erittäin harvinaisia ja kalliita. Yleensä objektiivin muodostaman kuvan laatu paranee, kun sen aukon halkaisijaa pienennetään eli f-arvo kasvaa, jolloin myös Airyn kiekon halkaisija kasvaa. Aukolla f/5,6 - f/8 Airyn kiekko on jo yleensä suurempi kuin kennon yksittäinen pikseli. (Fermum 2014.)

Konenäkökameroita käytettäessä yleensä pienemmät kuin $5\text{--}7\ \mu\text{m}$ yksityiskohdat eivät ole tunnistettavissa edellä esitellyistä rajoituksista johtuen. On kuitenkin kehitetty menetelmiä, niin sanottuja osapikselien näytteistykseen perustuvia harmaasävyjen interpolointeja, joilla tietyissä olosuhteissa päästään vielä tarkempiin tuloksiin, Laadukkaalla interpolointialgoritmillä ja hyvin kontrolloidussa ympäristössä näillä voidaan saavuttaa jopa 3-4 kertaa suurempia tarkkuuksia. Vaikka edellä on osoitettu, että pienemmät pikselit ovat erotuskyvyn kannalta parempia, niin erotuskyvyn vaikuttaa suuresti myös kennon signaalikohinasuhde. Mitä pienempi pikseli on, sitä pienempi on myös sen fotoneita keräävä alue.

Näin ollen kuvasensori, jossa on kooltaan suuremmat pikselit ja siten huonompi viivaparien erotuskyky, voikin kyetä tuottamaan tarkemman lopputuloksen koska yksittäinen pikseli voi kerätä enemmän fotoneita ja kenno tuottaa vähemmän kohinaa. (Fermum 2014.)

Kameran ja linssin valintaan liittyvät esimerkkilaskelmat suunniteltua sovellusta varten ovat liitteessä 5.

7 YHTEENVETO JA TULOSTEN TARKASTELU

Työtä aloittaessa toimeksiantajan tärkeimmät kysymykset liittyivät markkinoilta löytyviin valmiisiin laitteistoihin, ja siihen soveltuuko konenäkö tarkkuusvalukappaleiden tarkastamiseen. Kuten jo johdannossa mainitsin, ei toimeksiantajan käyttöön soveltuvaa valmista laitteistoa löytynyt. Pohdin yhdessä toimeksiantajan edustajan kanssa niitä kriteereitä, joita tarkkuusvalukappaleet aiheuttavat hankittavalle tarkastussolulle. Näiden pohjalta laadittiin laitteen vaatimusmäärittely.

Konenäön teoriaa ja sovelluksia tutkimalla pystyttiin muodostamaan kuvan sen mahdollisuuksista ja tältä pohjalta lähestyttiin muutamaa konenäön asiantuntijaa. Asiantuntijoiden kanssa käytyjen keskustelujen ja alustavien sovelluskokeiden pohjalta voidaan todeta, että kappaleet ovat tarkastettavissa sekä perinteisen konenäön että 3D-konenäön avulla. Haasteita tarkastukseen tuovat kappaleiden monimuotoisuus, esittäminen kameralle tarpeeksi monessa asennossa sekä niiden käsitteleminen laitteiston sisällä. Haasteelliseksi koettiin ennen kaikkea kappaleiden käsittely.

Vaikka aluksi lähdettiin liikkeelle pelkästään tarkastuslaitteesta, niin jo alkuvaiheessa tuli toimeksiantajalla käytyjen laitteen toimintoihin ja ominaisuuksiin liittyvien keskustelujen yhteydessä esiin idea yhdistää laitteeseen myös muita toimintoja, kuten valunavan hiontaa ja kierteiden tekoa. Nämä nähtiin järkevinä pitää mukana, sillä yksi robotti tarttujineen ja nauhausasema tai kierrotuspää, ovat kokonaisuuteen nähden vain n. 10-12% lisäkustannus koko laitteiston arvioidusta hinnasta. Työn tuloksia on jo käytetty pohjana tarjouspyyntöihin tarkastusautomaatiolaitteen suunnitteliseksi ja valmistamiseksi.

8 POHDINTA JA JATKOKEHITYSTOIMENPITEET

Työn aihealue oli käytännössä kokonaan täysin uutta asiaa, jota ei opintojeni aikaisilla kursseilla ole käsitelty. Ainoastaan tarkkuusvalukappaleen valmistusprosessista ja sen virheiden synnystä olen saanut tiedot työskennellessäni toimeksiantajalla tämän kirjoitushetkellä noin 2,5 vuotta. On ollut sekä omalta että toimeksiantajan kannalta hyvä, että tätä prosessia on saanut kypsyttellä pitkään juuri tuon vaaditun uuden tiedon laajuuden takia. Tarvittavan tiedon määrää kuvanee laaja lähdeluettelo ja kaikkiaan yli 5000 sivua painettua lähdeaineistoa.

Opinnäytetyöhön liittyvien, täysin uusien asioiden määrä oli näin jälkikäteen ajateltuna ehkä turhankin suuri ja aihealuetta olisi voinut rajata tarkemmin, esimerkiksi koskemaan vain kappaleenkäsittelyä tai konenäköä. Tämä olisi kuitenkin muodostanut ongelman toimeksiantajan kannalta, sillä he halusivat saada kattavan kokonaiskuvan tarkastusautomaatiolaitteen suunnittelussa eteen tulevien ongelmien laajuudesta. Osaltaan myös oma mielenkiintoni aiheeseen kasvatti työhön käytetyn perehtymisen ja ajan määrää.

Mielestäni suuresta työmäärästä huolimatta työn tavoitteissa onnistuttiin ja toimeksiantajalla on nyt käytössään erittäin kattavat tiedot siitä, mihin konenäköllä tarkkuusvalukappaleiden tarkastamisessa pystytään ja mitä laitteen suunnittelussa tulee ottaa huomioon.

Jatkokehitystoimenpiteinä tullaan toimeksiantajan tuotannosta selvittämään laitteelle tarkastettavaksi sopivat kappaleet ja kappaleperheet sekä laatimaan näiden pohjalta kannattavuuslaskelmat. Laitteen vaatimusmäärittely ja muut siihen liittyvät dokumentit on lähetetty jo vuoden 2014 lopulla muutamille toimittajaehdokkaille tutustumista, kommentointia ja alustavan kustannusarvion laatimista varten. Ensimmäisen tiedot eri komponenttien kustannuksista sekä laitteen suunnittelussa tarvittavien työtuntien määrästä antavat osviittaa siitä, että tarkastusautomaatiolaitteesta on mahdollista saada kannattava, kaikesta monimutkaisuudestaan huolimatta.

Konenäön ratkaisuja tutkiessa heräsi kysymys ultravioletti- ja infrapunavalojen soveltuvuudesta tarkkuusvalukappaleisiin toisinaan jäävien kuoriainejäämien havainnoimiseen ja tätä kannattaisi tutkia konenäköjärjestelmää suunniteltaessa.

LÄHTEET

- ABB. 2015. Industrial Robots - Robotics | ABB. n.d. Viitattu: 17.1.2015. Saatavissa: <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots>
- Arola, R. 2010. Metallien valuominaisuudet. Viitattu: 28.10.2014. Saatavissa: https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/kon-80.4160/luennot/Kon-80_4160_terasten_metallurgiasta.pdf
- Autere, E., Ingman, Y. & Tennilä, P. 1982. Valimotekniikka 1. Helsinki: Insinööritieto.
- Autere, E., Ingman, Y. & Tennilä, P. 1986. Valimotekniikka 2. Helsinki: Insinööritieto.
- Beeley, P. 2001. Foundry Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- BICTA. 1998. Investment Casting: Recognition and Definition of Flaws. Sheffield: The British Investment Casters' Technical Association.
- Bouchard, S. 2015. How To Choose The Right Robotic Gripper For Your Application. n.d. Viitattu: 1.25.2015. Saatavissa: <http://blog.robotiq.com/bid/33127/how-to-choose-the-right-robotic-gripper-for-your-application>
- Brown, B. 2008 Camera Connections. Vision Systems Design, Volume 13, Issue 4.
- Campbell, J. 2011. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design. Oxford: Elsevier.
- Carl Zeiss. 2012. Large Image Format Lenses. n.d. Viitattu: 15.12.2014. Saatavissa: http://www.zeiss.com/camera-lenses/en_de/industrial_lenses/large_image_format_lenses.html
- Clegg, A. J. 1991. Precision Casting Processes. Oxford: Pergamon.
- Cognex Corporation. 2014. In-Sight Vision System Product Guide. Viitattu: 21.10.2014. Saatavissa: http://www.cognex.com/downloads/literaturemain.aspx?id=9956&locale=&cm_campid=273CA1B9-68D4-E311-A12C-5EF3FCDAF1B7
- CVIPtools. 2014. CVIPtools for Windows. Version 5.5d. Viitattu: 12.8.2014. Saatavissa: <http://cviptools.ece.siue.edu/>
- Davies, E. R. 2012. Computer and Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities. Amsterdam: Elsevier.
- Denso Europe. 2015. New VS-068. n.d. Viitattu: 2014.1.25. Saatavissa: <http://www.densorobotics-europe.com/en/product/new-vs-068>
- Dewhurst, B. A. 2008 Castability Control in Metal Casting via Fluidity Measures: Application of Error Analysis to Variations in Fluidity Testing. Worcester Polytechnic Institute. Materials Science and Engineering. Väitöskirja.

Digital Photography Preview. 2002. Making (some) sense out of sensor sizes. n.d. Viitattu: 17.12.2014. Saatavissa:

<http://www.dpreview.com/articles/8095816568/sensorsizes>

diglloyd. 2014. Sigma dp Quattro Sensor Spectral Sensitivity for True-Color Images with Full Spatial Resolution. n.d. Viitattu: 16.12.2014. Saatavissa:

http://diglloyd.com/blog/2014/20140521_0908-Sigma-sensor-spectral.html

Dulay, D. S. 2008. Defects and Non-Destructive Testing. Teoksessa: Beeley & Smart (toim.). Investment Casting, Leeds: Maney Publishing, 240-292.

Edmund Optics. 2014. Technical Resources Center. n.d. Viitattu: 15.12.2014.

Saatavissa: <http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/>

Fermum, L. 2014. UV illumination - Why use ultraviolet radiation for machine vision inspection? n.d. Viitattu: 17.12.2014. Saatavissa: <http://www.vision-doctor.co.uk/uv-illumination.html>

Fermum, L. 2014. Vision-Doctor.co.uk --- Industrial Machine Vision. n.d. Viitattu: 16.12.2014. Saatavissa: <http://www.vision-doctor.co.uk/>

Fisher, R., Perkins, S., Walker, A. & Wolfart, E. 2004. The Hypermedia Image Processing Reference. Viitattu: 10.11.2014. Saatavissa:

<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2>

Flexfactory AG. 2014. SX340 - Allgemeines. Viitattu: 10.10.2014. Saatavissa:

<http://www.flexfactory.com/produkte/anyfeed-sx340/allgemeines/>

Forsberg, K. & Mooz, H. 1997. System engineering overview. Teoksessa: Thayer, Dorfman, & Davis (toim.). Software Requirements Engineering, Los Alamitos: IEEE, 44-72.

Graco Inc. 2014. G-Flex 1500. Viitattu: 20.11.2014. Saatavissa:

http://www.graco.com/content/dam/graco/ced/images/outline/22958_horiz.tif

Groover, M. P. 2008. Automation, Production systems and Computer-Integrated Manufacturing. Upper Saddle River, NJ.: Pearson Education.

Groover, M. P. 2011. Principles of Modern Manufacturing. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Hecht, E. 2002. Optics. San Francisco, CA: Pearson Education.

Hollows, G. 2004 Infrared cameras enhance machine-vision systems. Vision Systems Design, Volume 9, Issue 9.

Horiba. 2012. Synapse 1024x128 Front-Illuminated UV-Sensitive CCD Detector. n.d. Viitattu: 18.12.2014. Saatavissa:

<http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Documents/OSD/OSD0064128FI UV.pdf>

ICI. 2009. Atlas Of Shell Defects. Dallas, TX: Investment Casting Institute.

Inkinen, P., Manninen, R. & Tuohi, J. 2002. Momentti 2 - Insinöörifysiikka. Helsinki: Otava.

International Federation of Robotics. 2014. Industrial robots. Viitattu: 2015.1.13. Saatavissa: <http://www.ifr.org/industrial-robots/>

Israel, S. 2007. How To Choose A Lens. Viitattu: 16.12.2014. Saatavissa: <https://1stvision.com/elearning/How-to-choose-a-lens.pdf>

JAI. 2014. SP-20000-PMCL. Viitattu: 17.12.2014. Saatavissa: http://www.jai.com/ProtectedDocuments/datasheets/Datasheet_SP-20000-PMCL.pdf

Järvinen, R. 2014 Riihimäki.

Keskinen, R. & Niemi, P. 2011. ValuAtlas – Valumetallien sulatus – Valuteräksen sulatus ja käsittely. Viitattu: 22.11.2014. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_sulatustekniikka_11.pdf

Kippo, A. K. & Tikka, A. 2008. Automaatiotekniikan perusteet. Helsinki: Edita.

Knutson, J. 2014 Sähköposti.

Lempinen, V., Jönkkäri, I. & Pentti, J.2012. Selvitys NDT-menetelmistä.

Libraw. 2012. Determining pixel charge capacity and amplification gains for a digital camera. n.d. Viitattu: 18.12.2014. Saatavissa: <http://www.rawdigger.com/howtouse/pixel-capacity-and-amplifier-gain>

Lintukorpi, J. 2014 Riihimäki.

Lopez, M. R., Sergiyenko, O. & Tyrsa, V.2008. Machine Vision: Approaches and Limitations.

Lüke, H. D. 1999 The Origins of the Sampling Theorem. IEEE Communications Magazine, April 1999, 106-108.

MacDonald, K. 2006. Introduction to Video 101. Viitattu: 17.12.2014. Saatavissa: http://www.jai.com/SiteCollectionDocuments/Camera_Solutions_Application_Tech_Note/TechNote-Video101v2.pdf

MB Conveyors srl. 2014. CP conveyor with heavy-duty metal belt. Viitattu: 20.11.2014. Saatavissa: http://www.mbconveyors.com/images/imgProd/mlb_cp_p.jpg

McHugh, S. 2014. Cambridge in Colour - Photography Tutorials & Learning Community. n.d. Viitattu: 16.12.2014. Saatavissa: <http://www.cambridgeincolour.com/>

McHugh, S. 2014. Cambridge in Colour - Photography Tutorials & Learning Community. n.d. Viitattu: 16.12.2014. Saatavissa: <http://www.cambridgeincolour.com/>

McHugh, S. 2014. Cambridge in Colour - Photography Tutorials & Learning Community. Viitattu: 12.12.2014. Saatavissa: <http://www.cambridgeincolour.com/>

Meskanen, S. & Höök, T. 2010. ValuAtlas – Suunnittelijan perusopas – Rauta-, teräs- ja metallivalujen valuviat. Viitattu: 10.8.2014. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/perusopas_04.pdf

Meskanen, S. & Höök, T. 2010. ValuAtlas – Valimotekniikan perusteet – Keraamimuotit. Viitattu: 14.9.2014. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/vtp_menet_keraamimuotit.pdf

Meskanen, S. & Höök, T. 2013. ValuAtlas – Valimotekniikan perusteet - Kertamuottimenetelmät. Viitattu: 12.8.2014. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/vtp_menet_kertamuotti.pdf

MSS SP-55. 2006. Quality Standard for Steel Castings for Valves, Flanges, Fittings and Other Piping Components - Visual Method for Evaluation of Surface Irregularities. Manufacturers Standardization Society.

Niemi, P. 2010. ValuAtlas - Jälkikäsittelytekniikka - Valukappaleen tarkastusmenetelmät. Viitattu: 20.11.2014. Saatavissa: www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_jalkikasittely_E.pdf

SFS-EN 13018/A1. 2004. Non-destructive testing. Visual testing. General principles. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

OpenCV. 2014. OpenCV-Python Tutorials. n.d. Viitattu: 25.1.2015. Saatavissa: http://docs.opencv.org/trunk/doc/py_tutorials/py_tutorials.html

Opto Engineering. 2014. Telecentric lenses tutorial. n.d. Viitattu: 16.12.2014. Saatavissa: <http://www.opto-engineering.com/resources/telecentric-lenses-tutorial>

Orkas, J. 2012. Perusteet valukomponentin laatutason määrittelylle ja laatustandardit. Viitattu: 9.10.2012. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/koosteet/seminaarit/semin2/valun_laatu_vapriikki_orka_s.pdf

Pohjonen, R. 2002. Tietojärjestelmien kehittäminen. Jyväskylä: Docendo.

Point Grey. 2014. Key differences between rolling shutter and frame (global) shutter. Viitattu: 10.12.2014. Saatavissa: <http://www.ptgrey.com/KB/10028>

Rhein-Nadel Automation. 2005. Standard Equipment. Viitattu: 11.12.2014. Saatavissa: <http://www.rnaautomation.com/wp-content/uploads/2013/01/RNA-Bowl-Feeder.pdf.pdf>

Rhein-Nadel Automation. 2014. What is a bowl feeder? How does it work? Viitattu: 11.12.2014. Saatavissa: <http://www.rnaautomation.com/blog/bowl-feeder-work/>

Roboshop. 2012. RoboShop Inc. In-Motion Vibratory Conveyors. Viitattu: 16.12.2014. Saatavissa: http://www.roboshopinc.com/conveyors_how_it_works.php

Rosenberg, C. 2001. The Rest of the Lenna Story. Viitattu: 14.10.2014. Saatavissa: <http://www.cs.cmu.edu/~chuck/lennapg/lenna.shtml>

Sacotec. 2014. Yrityksen kuvapankki.

Sacotec Components Oy. n.d. Yritys >> Sacotec Components Oy. Viitattu: 9.9.2014.
Saatavissa: www.sacotec.fi/yritys/

SFS-EN 1370. 2012. Valut. Pinnan tilan tarkastus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 13927. 2003. Non-destructive testing. Visual testing. Equipment. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 9712. 2012. Rikkomaton aineenkoetus. NDT-henkilöiden pätevänti ja sertifiointi. Yleisperiaatteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SICK. 2014. Datasheet IVC-3D31111. Viitattu: 25.1.2015. Saatavissa: <https://www.mysick.com/partnerPortal/ProductCatalog/DataSheet.aspx?ProductID=91054>

SICK IVP. 2006. Machine Vision Introduction. Viitattu: 25.1.2015. Saatavissa: http://www.sick.com/uk/en-uk/home/products/product_portfolio/Documents/Machine%20Vision%20Introduction2_2_web.pdf

Silva, K. A. 2009. Standard Specifications for Casting Tolerances - Linear Dimensions. Viitattu: 12.10.2014. Saatavissa: <http://www.rapidprotocasting.com/lib/RPC%20WP200809.pdf>

Spectrum Automation. 2010. Spectrum Automation Company - Since 1969. Viitattu: 18.12.2014. Saatavissa: <http://www.spectrumautomation.com/>

SFS-EN ISO 8062-3 + AC. 2007. Geometrinen tuotemäärittely (GPS). Muotilla valmistettujen kappaleiden mittatoleranssit ja geometriset toleranssit. Osa 3: Valukappaleiden mittojen yleistoleranssit, geometriset yleistoleranssit ja työstövarat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 8062-1. 2007. Geometrinen tuotemäärittely (GPS). Muotilla valmistettujen kappaleiden mittatoleranssit ja geometriset toleranssit. Osa 1: Sanasto. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

CEN ISO/TS 8062-2. 2013. Geometrinen tuotemäärittely (GPS). Muotilla valmistettujen kappaleiden mittatoleranssit ja geometriset toleranssit. Osa 2: Säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Szeliski, R. 2010. Computer Vision: Algorithms and Applications. Viitattu: 10.9.2014. Saatavissa: http://szeliski.org/Book/drafts/SzeliskiBook_20100903_draft.pdf

University Of California. 1979. SIPI Image Database. Viitattu: 8.11.2014. Saatavissa: <http://sipi.usc.edu/database/download.php?vol=misc&img=4.2.04>

Valjakka, P. 2014 Riihimäki.

Young, H. D. & Freedman, R. A. 2008. Sears and Zemansky's university physics. San Francisco, CA: Pearson.

Zollern. 2005. Zollern - Foundry Technology - Investment Casting. Viitattu: 1.11.2014.
Saatavissa:
http://www.zollern.de/fileadmin/Upload_Konzernseite/Downloads/Brochueren/Casting_and_Forging/Feinguss_us.pdf

Liite 1.

Tuote	Erä	Tarkastetut _Kpl	Vajaa, kolhiintuma		Reikä, kuorenkolo		Liimausvirhe, vahan pintavirhe		Susi %
			Kpl	Koko erästä	Virheellisistä	kpl	Koko erästä	Virheellisistä	
Isompi kappale	1342	14802	22	0,1 %	6,3 %	198	1,3 %	56,6 %	350
	1315	15955	103	0,6 %	35,8 %	107	0,7 %	37,2 %	288
	1244	12662	51	0,4 %	8,3 %	333	2,6 %	54,1 %	615
		43419		KA:	16,8 %		KA:	49,3 %	1253
Isompi kappale		Tarkastetut		Vajaa, kolhiintuma		Reikä, kuorenkolo		Liimausvirhe, vahan pintavirhe	
		43400 kpl		176 kpl		638 kpl		1583 kpl	
				0,4 %		1,5 %		3,6 %	
Pienempi kappale	1403	17769	80	0,5 %	64,0 %	27	0,2 %	21,6 %	125
	1344	21152	96	0,5 %	32,8 %	75	0,4 %	25,6 %	293
	1320	16848	132	0,8 %	65,3 %	23	0,1 %	11,4 %	202
		55769		KA:	54,0 %		KA:	19,5 %	620
Pienempi kappale		Tarkastetut		Vajaa, kolhiintuma		Reikä, kuorenkolo		Liimausvirhe, vahan pintavirhe	
		55800 kpl		308 kpl		125 kpl		423 kpl	
				0,6 %		0,2 %		0,8 %	

VirhetyyppiSijainti

Vajaa, kolhiintuma

NEG

Riippuen sijainnista, mahdollista erottaa yhdestä suunnasta otetulla kuvalla.
Yhdeltä sivulta tarkistettaessa on kuitenkin mahdollista, että jää piiloon!

Reikä, kuorenkolo

NEG

Voivat käytännössä sijaita missä pinnalla vaan.

Liimausvirhe, vahan pintavirhe
(eli ilmakuplat, nostonastajäljet)

POS

Voivat käytännössä sijaita missä pinnalla vaan.

Läpäisymäärä tietyssä ajanajakossossa						
	minuutissa	tunnissa	8h	12h	16h	24h
Kpl/per aikayksikkö, jos jaksoaika 15 s	4	240	1920	2880	3840	5760
Kpl/per aikayksikkö, jos jaksoaika 10 s	6	360	2880	4320	5760	8640
Kpl/per aikayksikkö, jos jaksoaika 5 s	12	720	5760	8640	11520	17280

Kappalemassatarve (kg), jaksoaika 15s						
	minuutissa	tunnissa	8h	12h	16h	24h
Jos paino on 5 g	0,02	1,2	9,6	14,4	19,2	28,8
10 g	0,04	2,4	19,2	28,8	38,4	57,6
15 g	0,06	3,6	28,8	43,2	57,6	86,4
20 g	0,08	4,8	38,4	57,6	76,8	115,2
30 g	0,12	7,2	57,6	86,4	115,2	172,8
40 g	0,16	9,6	76,8	115,2	153,6	230,4
50 g	0,2	12	96	144	192	288

Kappalemassatarve (kg), jaksoaika 5s						
	minuutissa	tunnissa	8h	12h	16h	24h
	0,06	3,6	28,8	43,2	57,6	86,4
	0,12	7,2	57,6	86,4	115,2	172,8
	0,18	10,8	86,4	129,6	172,8	259,2
	0,24	14,4	115,2	172,8	230,4	345,6
	0,36	21,6	172,8	259,2	345,6	518,4
	0,48	28,8	230,4	345,6	460,8	691,2
	0,6	36	288	432	576	864

Tilavuus eri kokoisella kappaleella, jaksoaika 15s						
	5 g	10 g	15 g	20 g	30 g	40 g
Tilavuus, kun jaksoaika 15s	2,00 kg/l	4,8	7,2	9,6	14,4	14,4
		9,6	14,4	19,2	28,8	28,8
		14,4	21,6	28,8	43,2	43,2
		19,2	28,8	38,4	57,6	57,6
		28,8	43,2	57,6	86,4	86,4
		38,4	57,6	76,8	115,2	115,2
		48	72	96	144	144

Tilavuus eri kokoisella kappaleella, jaksoaika 5s						
	5 g	10 g	15 g	20 g	30 g	40 g
Tilavuus, kun jaksoaika 5s	4,00 kg/l	7,2	10,8	14,4	21,6	21,6
		14,4	21,6	28,8	43,2	43,2
		21,6	32,4	43,2	64,8	64,8
		28,8	43,2	57,6	86,4	86,4
		43,2	64,8	86,4	129,6	129,6
		57,6	86,4	115,2	172,8	172,8
		72	108	144	216	216

Tarkastusautomaatiolaitteen vaatimusmäärittely

Tässä dokumentissa kuvataan Sacotec Components Oy:lle suunniteltavan tarkkuusvalukappaleiden tarkastusautomaatiolaitteen vaaditut ominaisuudet. Kyseessä on alustava dokumentti, johon muutokset ja täsmennykset ovat mahdollisia.

1. Tarkastettavan kappaleen ominaisuudet

1.1. Tarkastettavan kappaleen koko

Yksittäinen tarkastettava kappale mahtuu tilavuuteen, jonka ääritat ovat maksimissaan:

- leveys 60mm,
- pituus 80mm ja
- paksuus 30mm.

1.2. Kappaleen paino

Tarkastettavan kappaleen maksimipaino on 50g.

1.3. Materiaali

Kappaleiden materiaali pääsääntöisesti on tarkkuusvalettua terästä, joka on magneettista, mutta myös ei-magneettisesta, ruostumattomasta teräksestä valmistettuja kappaleita on pystyttävä käsittelemään.

1.4. Pinnanlaatu ja struktuuri

Kappaleet ovat pinnaltaan joko hiekka- (mattapintainen) taikka teräskuulapuhallettuja (puolikiiltävä).

1.5. Kappaleen geometria

Kappaleet ovat geometrialtaan sellaisia, että ne pysyvät pystyssä tasopinnalla.

1.6. Kappalemassan tiheys

Kappalemassan tiheys vaihtelee kappaleen koosta riippuen noin välillä 2,0 – 4,0kg/dm³.

1.7. Kappalemassan muut ominaisuudet

Kappaleiden joukossa saattaa olla myös muita tuotteita, valupuun tukiosia, muottien kuoriainesta sekä muita epäpuhtauksia.

2. Yleiset toiminnalliset vaatimukset

2.1. Toimintaympäristö

Laitteiston on pystyttävä toimimaan tehdasolosuhteissa, kappaleissa saattaa esiintyä mm. teräs- ja hiekkapölyä eikä epäkeskoprässien aiheuttama tärinä tai yleiset tehdasolojen lämpötilavaihtelut saa vaikuttaa haitallisesti koneen suorituskykyyn. Jos kappaleiden joukossa olevista epäpuhtauksista on haittaa laitteiston toiminnalle, tulee laitteeseen rakentaa erillinen ilmapuhallus kappaleiden puhdistusta varten, likaisen ilman poisto voidaan liittää tehtaassa olemassa olevaan ilmapuhallusjärjestelmään.

2.2. Ulkoinen turvallisuus

Lopullinen laitteisto on voitava sijoittaa eristämättömälle alueelle yleiseen tehdasympäristöön ja koneen käydessä sen liikkuviin osiin pääsy on estettävä sähköisin ja/tai mekaanisin rajoituksin. Asiaankuulumattomien pääsy koekäytössä olevan laitteiston luo voidaan estää.

2.3. Laitteen sisäinen turvallisuus

Laitteen on kyettävä pysäyttämään automaattinen toimintansa kappaleiden mahdollisen jumiutumisen tapahtuessa.

2.4. Tarkastettavien nimikkeiden määrä

Laitteisto tulee varustaa sellaisella ohjausjärjestelmällä, että sinne voidaan ohjelmoida ja tallentaa vähintään viidenkymmenen eri tuotteen tarkastusohjelmat. Tallennettujen ohjelmien on oltava helposti kutsuttavissa takaisin ja niitä on pystyttävä muokkaamaan. Jos tuotevaihdon yhteydessä laitteeseen tarvitsee vaihtaa fyysisiä osia, tulee ohjausjärjestelmän pystyä opastamaan tarvittavissa asetuksissa joko kirjallisesti tai kuvien avulla.

2.5. Laitteen ohjaus

Laitteeseen tulee voida syöttää tuotenimike ja tuotantoeräkoodi (yhteensä yhdeksän numeroa, tuotenimike viisi ja tuotantoeräkoodi neljä numeroa) joko viivakoodilla, viivakoodin tyyppi on Code 39 ilman laajennuksia, tai käsin numeronäppäimistöllä. Näistä viivakoodisyöttö on ensisijainen vaihtoehto.

3. Tarkkuusvaatimukset

3.1. Virheiden sijainti kappaleissa

Virhe voi sijaita millä vaan kappaleen sisäänsä sulkevan kuvitteellisen kuution kuudesta sivusta. Kappaleet on tarvittaessa pystyttävä tarkistamaan kaikista näistä suunnista.

3.2. Erotuskyky

Laitteiston on pystyttävä luotettavasti erottamaan ja käsittelemään koko tarkastusalueen kokoiset kappaleet, joissa on positiivinen ja/tai negatiivinen virhe, joka on isompi kuin 0.5mm tai 10% kappaleen pinta-alasta ja/tai tilavuudesta, riippuen piirteiden tarkastussuunnasta.

Laitteiston on kyettävä erottamaan/poistamaan joukosta selvästi sinne kuulumattomat esineet, kuten valujärjestelmän osat ja mukaan eksyneet muut tuotteet.

Laitteen pystyttävä erottamaan ISO 19959:2005-standardin luokan I mukaiset virheet kappaleista.

Standardin mukaan 625mm² alueella sallitaan yksi seuraavista:

- Negatiivinen virhe, kuoppa
Halkaisija 0,75mm, syvyys 0,4mm
- Positiivinen virhe, patti
Halkaisija 1,0mm, korkeus 0,25mm
- Sisäänsyötön portti
Korkeus 0,25mm
- Halkeama/lineaarinen epäjatkuvuus
Ei minimittaa leveydelle, pituus suurempi kuin 4x leveys.

3.3. Muut tarkkuusvaatimukset

3.3.1. Pienten (alle 0.1mm) negatiivisten ja positiivisten poikkeamien erottaminen rajatuilta pinnoilta ja alueilta.

3.3.2. Pienten positiivisten poikkeamien erottaminen rajatuilta pinnoilta.

3.3.3. Tarvittaessa tiettyjen piirteiden GO/NOGO- tulkkaus. Vaatimukset määritellään erikseen.

4. Laitteen muut suorituskykyvaatimukset ja ominaisuudet

4.1. Jaksoaika

Laitteen tulee saavuttaa kahdelta puolelta tarkastettavan kappaleen kohdalla enintään 15 sekunnin jaksoaika, joka määritellään kappaleen poiminnasta siihen, että kappale on tarkastettu ja irrotettu hyvien kappaleiden erottelun kohdalla.

4.2. Kappaleiden syöttö

Laitteiston on pystyttävä käsittelemään ja syöttämään kohtien 1.1 ja 1.2 mukaisia kappaleita, joiden massatilavuus on 2 kg/dm^3 , vähintään 16h tarve 15s jaksoajalla ilman, että käyttäjän tarvitsee välillä lisätä tarkastettavia kappaleita, poistaa valmiita tai romutettuja kappaleita. Syöttöjärjestelmän pitää pystyä kokonaisuudessaan pitämään sisällään 300kg ja 150l suuruinen kappalemassa. Laitteisto voidaan varustaa useampivaiheisella syöttöllä, joista isompi olisi lattiatasolta helposti lastattavissa oleva (nostokorkeus maks. 700-800mm) hinnakuljetin ja pienempi, noin 25-50l vetoisella tärysytösputkilla.

Kappaleiden syöttö on järjestettävä niin, että erilaisten kappaleiden syöttö laitteistoon on mahdollista, kappaleenvaihdosta ei saa aiheutua huomattavia kustannuksia ja sen on tapahduttava nopeasti ja yksiselitteisesti. Tarvittaessa vaihdettavat osat, on pystyttävä säilyttämään yhdessä tai useammassa normaalikokoisessa säilytyskaapissa, jonka ulkomitat ovat n.
 $L=800*S=400*K=1800\text{mm}$.

4.3. Kappaleiden erottelu

Riippuen tarkastusvaatimuksista kappaleet on voitava erotella 3-6 eri laatikkoon/säililöön.

4.4. Valmiiden kappaleiden laatikointi

Laitte on rakennettava niin, että se pystyy lajittelemaan tarkastetut ja hyväksi todetut kappaleet valmiiksi yrityksessä jo käytössä oleviin puulaatikoihin, joiden ulkomitat ovat noin 46x31x26cm. Yksittäisen laatikon maksimipaino ei saa ylittää 37.5kg:a.

4.5. Demagnetointi

Jos kappalekäsittelyssä käytetään hyväksi kappaleen magneettisuutta, on kappaleet demagnetoitava automaattisesti enne koneesta poistoa.

4.6. Tilastointi

Laitteesta on saatava, mieluiten konemuotoisesti etäluettavassa muodossa, tiedot tarkastettujen kappaleiden kokonaismäärästä, tähän kuluneesta ajasta sekä eri erottelukriteerien mukaisista kappalemäärästä. Optiona integrointi olemassa olevaan tuotannonseurantajärjestelmään. Jatkotoimenpiteitä vaativien ja romutettujen kappaleiden määrät on pystyttävä tulostamaan järjestelmästä erikseen.

4.7. Järjestelmän muut toiminnot

Järjestelmä on rakennettava niin, että siihen pystytään liittämään, ohjaamaan ja suorittamaan muita jälkikäsitteilytoimenpiteitä seuraavilla laitteilla: nauhahiomakone valunavan nauhausta varten, kaksi paineilma- tai sähkötoimista kierteityspäätä sekä kaksi muuta, myöhemmin määriteltävää jälkikäsitteilylaitetta. Näitä laitteita varten järjestelmää ohjaavassa logiikassa tulee olla jokaiselle toiminnolle vähintään kaksi I/O-varausta. Näiden toimenpiteiden viemää aikaa ei lasketa mukaan kohdan 4.1 jaksoaikaan.

5. Laitteiston komponentit

5.1. Konenäkö

Konenäköjärjestelmän komponentteina on käytettävä tunnettujen valmistajien valmistamia tuotteita ja helposti eri tuotteille muunneltavaa kokonaisuutta. Konenäköjärjestelmän ohjelmoimiseen on oltava tietokonepohjainen, graafinen työkalu. Jos varsinaiseen tarkastukseen käytettävien kameroiden sijaintia/tarkennusta on muutettava, se on pystyttävä toteuttamaan toistettavasti joko fyysisesti tai ohjelmallisesti paikoittamalla.

5.2. Muut komponentit

5.2.1. Osaluettelot

Kaikki järjestelmän komponentit on määriteltävä ja luetteloitava osaluetteloon. Epätavanomaisten komponenttien kohdalla osaluettelosta on myös löydettävä joko suomalainen tai eurooppalainen toimittaja valituille komponenteille.

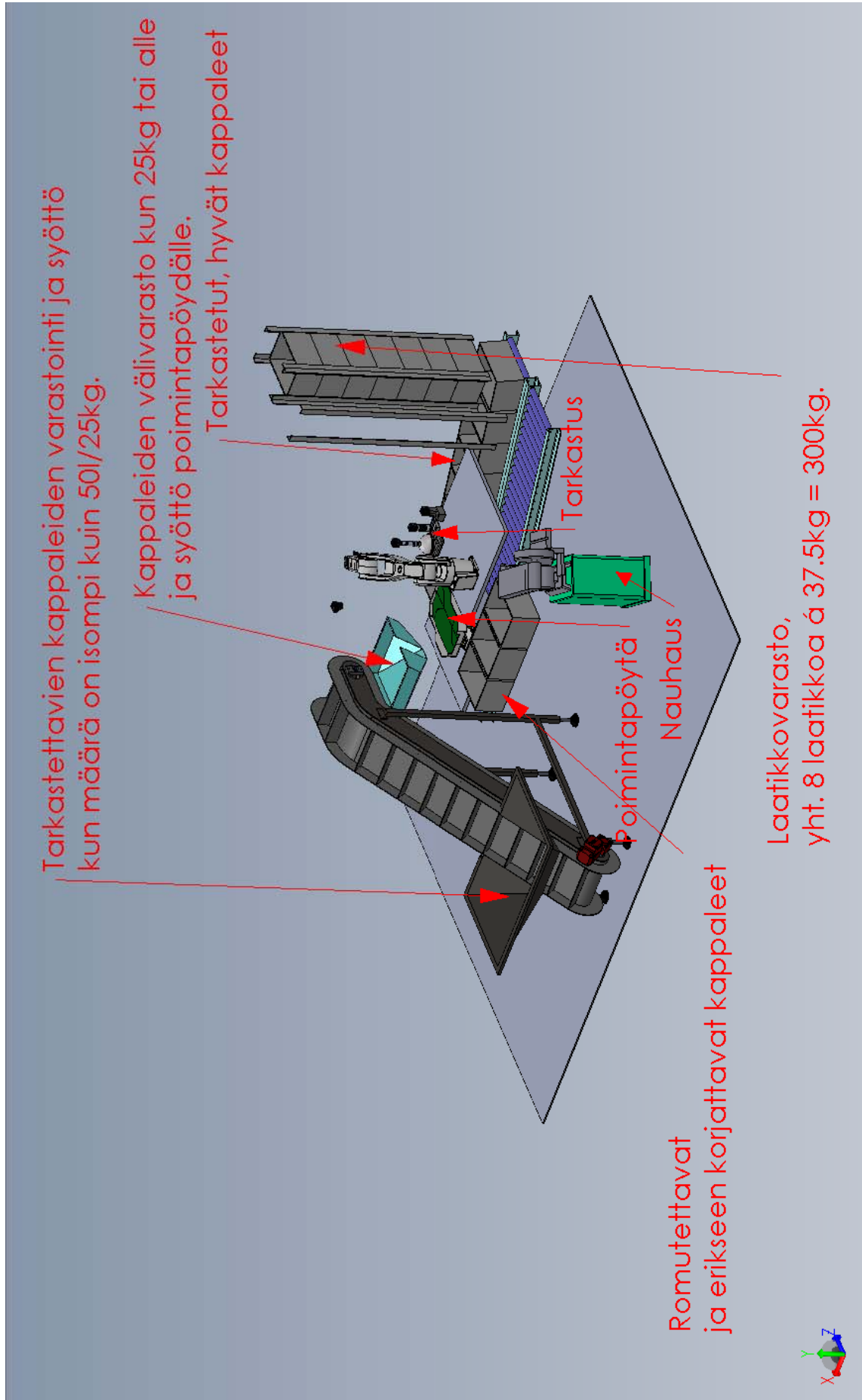
5.2.2. Sähköiset komponentit

Käytettyjen sähköisten komponenttien tulee olla sellaisia, että niitä on yleisesti saatavilla varaosina.

5.2.3. Mekaaniset rakenteet

Kaikista koneeseen liittyvistä ja sitä varten valmistetuista rakenteista tulee toimittaa tilaajalle vähintään sähköisessä muodossa kokoonpanopiirustukset ja yksittäisten osien varaosakuvat. Jos näissä osissa on toimittajan tai päämiehen liikesalaisuuksien piiriin kuuluvaa informaatiota, sitoutuu Sacotec Components kunnioittamaan tarvittavia salassapitokäytäntöjä. Osto-osina hankitut mekaaniset osat ja kokoonpanot on luetteloitava osaluetteloon.

Tarkastusautomaattilaitteen toiminnan kuvailu
 Mikko Laine
 20.10.2014



Laitteen osien selitykset

Käyetyt termit:

- o Syöttölaite = hihnanostokuljetin tmv. kappalevarastoon liitetty annostelija
 - o Erottelulaite = tärysyöttösuppilo + tärypöytä, anyfeeder tmv.
1. Kun järjestelmä käynnistetään, ensimmäisenä käynnistyy syöttölaite, joka syöttää erottelulaitteelle kappaleita kunnes tämän ylärajahälytin antaa lopetussignaalin. Syöttölaite käynnistyy myös kun erottelulaitteen alarajahälytin antaa signaalin. Tarvittaessa, jos erä on niin pieni, että se mahtuu suoraan erottelulaitteeseen (esim. alle 50kg / 25l), tulee syöttölaite voida ohittaa.
 2. Kappaleet syötetään erottelulaitteelle erottelulaitteen ja syöttökuljettimen välissä olevan ”puhdistustunnelin” läpi, jossa puhalletaan paineilmaverhoilla tmv. kappaleiden seassa olevat kevyet epäpuhtaudet, kuten hiekanmurut ja teräskuulapuhalle, pois. Poistoilma liitetään tehtaassa olemassa olevaan pölynpoistojärjestelmään. Puhalluspaineen tulee olla helposti säädettävissä.
 3. Jos poimintakamera ei havaitse yhtään poimintakelpoista kappaletta annostelee erottelulaite poiminta-alueelle lisää kappaleita.
 4. Konenäkökamera kuvaa kappaleiden sijainnin poiminta-alustalta. Jos alustalla havaitaan kappaleita, mutta yhdenkään orientaatio ei ole oikea tai esteettömästi poimittavissa, annetaan poiminta-alustalle käsky täryttää ja muuttaa kappaleiden asentoa. Jos alustalla on jotain kappaleita, mutta mikään näistä ei täytä tarkastettavan kappaleen kriteerejä, niin alusta puhdistetaan ja puhdistetut ”romut” ajetaan joko takaisin kappalemassan joukkoon tai erilliseen romulaatikkoon.
 5. Robotti poimii alustalta poimintakameralta saamiensa ohjeiden mukaan kappaleet tarkistettavaksi.
 6. Jos kappaleen geometria sen sallii, tarkastetaan tarkastuskonenäkökameralla ensin ns. pohjakuvanto eli se puoli kappaleesta, joka oli poiminta-alustaa vasten . Jos nämä piirteet ovat hylkäykseen johtavista virheistä vapaita, tehdään tarvittaessa pohjasta saavutettavissa olevien reikien ym. piirteiden tulkkaus. Viimeisenä kappale asetetaan tarkastusalustalle ja sille tehdään loput konenäkö tarkastukset kappaleita tarvittaessa kääntäen.

Tarkastusautomaatiolaitteen toiminnan kuvailu
Mikko Laine
20.10.2014

7. Jos kappale on selvästi hyvä tai siinä on vain korjattavissa olevia poikkeamia, voidaan sille tehdä mahdolliset jälkikäsitteilytoimenpiteet kuten valunavan nauhaus sekä reikien kierteyitys.
8. Jos kappale todetaan missä tahansa vaiheessa korjauskelvottomaksi, se lajitellaan ”romutetut kappaleet” laatikkoon ja ohjausjärjestelmään kirjataan romutukseen johtanut tarkastuskriteeri.
9. Jos kappale todetaan hyväksi, lajitellaan se ”hyvät kappaleet” laatikkoon.
10. Jos kappaleessa on virhe, mutta se on luokiteltu korjattavaksi, niin sille ajetaan joko ns. korjausohjelma, jossa pinnasta nauhtaan/viilataan positiivinen virhe tai sitten kappale lajitellaan ”korjattavat” laatikkoon.
11. Kone pitää kirjata kokonaiskappalemääristä sekä korjattavat että hyvät kappaleet kategorioista ja määritellyn kappalemäärän jälkeen laatikko vaihdetaan koneen toimesta automaattisesti. Laatikon paino ei saa ylittää 37,5 kg.
12. Mahdollisten ongelmatilanteiden sattuessa koneen päällä oleva valomajakkaan syttyy punainen valo ja järjestelmä lähettää tekstiviestin määritelyihin numeroihin. Samoin järjestelmä ilmoittaa majakan valon vaihdoksella ja tekstiviestillä kun sarja on valmis.

Kameran linssin ja kuvattavan kohteen välinen etäisyys 350mm, kuvattava ala 80 x 60mm.

Kameroina käytetään JAI:n SP-20000-PMCL (20MP), AM-800GE (8MP) ja GO-5000M-PMCL (5 MP) -tyyppisiä konenäkökameroita.

$$20 \text{ MP} = 5120 \times 3840$$

$$8 \text{ MP} = 3296 \times 2472$$

$$5 \text{ MP} = 2560 \times 2048$$

$$L_{px.20MP} := 6.4 \text{ } \mu\text{m}$$

$$N_{px.x.20MP} := 5120$$

$$N_{px.y.20MP} := 3840$$

$$L_{px.8MP} := 5.5 \text{ } \mu\text{m}$$

$$N_{px.x.8MP} := 3296$$

$$N_{px.y.8MP} := 2472$$

$$L_{px.5MP} := 5 \text{ } \mu\text{m}$$

$$N_{px.x.5MP} := 2560$$

$$N_{px.y.5MP} := 2048$$

Kameroihin vaadittavan objektiivin polttovälin laskenta (kaava 9)

$$f = \frac{s \cdot y'}{y + y'}$$

$$s := 350 \text{ mm}$$

$$y := 100 \text{ mm}$$

$$q_{kenno.20MP} := L_{px.20MP} \cdot \sqrt{N_{px.x.20MP}^2 + N_{px.y.20MP}^2} = 40.96 \text{ mm}$$

$$q_{kenno.8MP} := L_{px.8MP} \cdot \sqrt{N_{px.x.8MP}^2 + N_{px.y.8MP}^2} = 22.66 \text{ mm}$$

$$q_{kenno.5MP} := L_{px.8MP} \cdot \sqrt{N_{px.x.5MP}^2 + N_{px.y.5MP}^2} = 18.031 \text{ mm}$$

$$y'_{20MP} := q_{kenno.20MP}$$

$$y'_{8MP} := q_{kenno.8MP}$$

$$y'_{5MP} := q_{kenno.5MP}$$

$$f_{20MP} := \frac{s \cdot y'_{20MP}}{y + y'_{20MP}} = 101.703 \text{ mm}$$

$$f_{8MP} := \frac{s \cdot y'_{8MP}}{y + y'_{8MP}} = 64.658 \text{ mm}$$

$$f_{5MP} := \frac{s \cdot y'_{5MP}}{y + y'_{5MP}} = 53.468 \text{ mm}$$

Kennojen erotuskyky kaavalla 12:

$$\frac{80 \text{ mm}}{5120} = 0.016 \text{ mm}$$

$$\frac{80 \text{ mm}}{3296} = 0.024 \text{ mm}$$

$$\frac{80 \text{ mm}}{2560} = 0.031 \text{ mm}$$

Kennojen erotuskyky kaavalla 13 (lp/mm):

$$RP_{N.20MP} := \frac{10^3 \text{ } \mu\text{m}}{2 \cdot L_{px.20MP}} = 78.125$$

$$RP_{N.8MP} := \frac{10^3 \text{ } \mu\text{m}}{2 \cdot L_{px.8MP}} = 90.909$$

$$RP_{N.5MP} := \frac{10^3 \text{ } \mu\text{m}}{2 \cdot L_{px.5MP}} = 100$$

Vastaavasti edellisistä saadaan yhden viivaparin etäisyys kennolla:

$$L_{RP.20MP} := \frac{1 \text{ mm}}{RP_{N.20MP}} = 0.013 \text{ mm}$$

$$L_{RP.8MP} := \frac{1 \text{ mm}}{RP_{N.8MP}} = 0.011 \text{ mm}$$

$$L_{RP.5MP} := \frac{1 \text{ mm}}{RP_{N.5MP}} = 0.01 \text{ mm}$$

Suurennos (kaavalla 3):

$$m_{20MP} := \frac{N_{px.x.20MP} \cdot L_{px.20MP}}{80 \text{ mm}} = 0.41$$

$$m_{8MP} := \frac{N_{px.x.8MP} \cdot L_{px.8MP}}{80 \text{ mm}} = 0.227$$

$$m_{5MP} := \frac{N_{px.x.5MP} \cdot L_{px.5MP}}{80 \text{ mm}} = 0.16$$

Kennolla olevaa viivaparua vastaava etäisyys kuvattavassa kohteessa:

$$RP_{kappale.20MP} := \frac{L_{RP.20MP}}{m_{20MP}} = 0.031 \text{ mm}$$

$$RP_{kappale.8MP} := \frac{L_{RP.8MP}}{m_{8MP}} = 0.049 \text{ mm}$$

$$RP_{kappale.5MP} := \frac{L_{RP.5MP}}{m_{5MP}} = 0.063 \text{ mm}$$

Edellisestä voidaan todeta, että kaikkien esimerkkilaskuissa käytettyjen kameroiden tarkkuus ja erotuskyky ovat riittäviä suunniteltuun sovellukseen.

Laaditulla Mathcad-tiedostolla on helppo laskea tarvittaessa myös muiden kameroiden erotuskyvyn riittävyys ja objektiivin polttoväli.

Objektiivin valinta voitaisiin suorittaa myös ohjelmallisesti, kuten käyttäen Qioptiq:n MachVis ohjelmistoa, jonka avulla on laskettu seuraavat 2 esimerkkiä 20MP ja 5MP kameroille.

MachVis 4.0.1

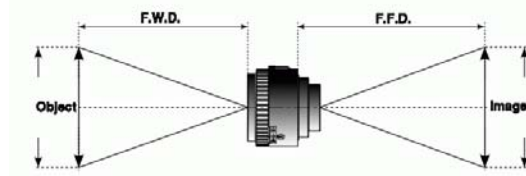
torstai, tammikuu 29, 2015 08:56 PM

Designer: Mikko Laine



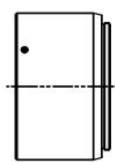
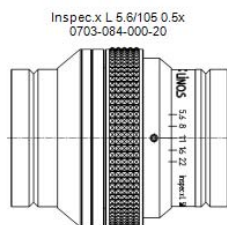
Specifications

Free Working Distance - F.W.D	350,0mm
Object Width	100,0mm
LineSensor	41,0mm
Adapter	F-Mount/Nikon
CBD	46,5mm

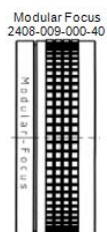


Proposed System [object/image width matched to specs]

Qioptiq Lens	Inspec.x L 5.6/105 0.5x	1x	0703-084-000-20
Lens Adapter	V-Groove	1x	2408-009-147-00
Focuser	Modular Focus	1x	2408-009-000-40
Camera Adapter	F-Mount/Nikon	1x	2408-009-142-00



Lens Adapter
2408-009-147-00



Camera Adapter
2408-009-142-00

EFL [actual]	105,10mm
Free Working Distance [actual]	322,29mm
Flange Focal Distance - F.F.D. [actual]	107,65mm
Lens Front to Camera Front Distance	133,65mm

Project Notes

Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG, Hans-Riedl-Straße 9, 85622 Feldkirchen [Munich], Germany
Phone +49 (0)89/255 458-0 E-mail: vision@qioptiq.com

Qioptiq offers lenses and accessories for all kinds of machine vision applications. We are happy to provide customized solutions even for small production runs.

Find out more at www.qioptiq-shop.com/Præzisionsoptik/Machine-Vision-Solutions

MachVis 4.0.1

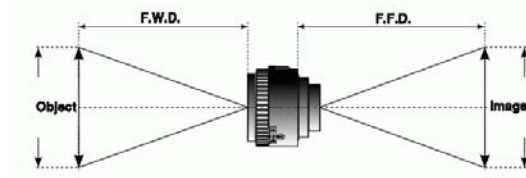
torstai, tammikuu 29, 2015 09:07 PM

Designer: Mikko Laine



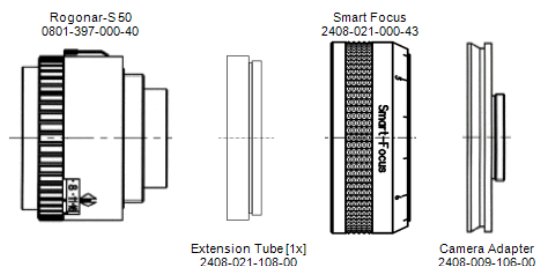
Specifications

Free Working Distance - F.W.D	350,0mm
Object Width	100,0mm
LineSensor	18,0mm
Adapter	C-Mount
CBD	17,5mm



Proposed System [object/image width matched to specs]

Qioptiq Lens	Rogonar-S 50	1x	0801-397-000-40
Extension Tube	12,0mm	1x	2408-021-108-00
Focuser	Smart Focus	1x	2408-021-000-43
Camera Adapter	C-Mount	1x	2408-009-106-00



EFL [actual]	51,10mm
Free Working Distance [actual]	308,70mm
Flange Focal Distance - F.F.D. [actual]	56,58mm
Lens Front to Camera Front Distance	69,81mm

Project Notes

Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG, Hans-Riedl-Straße 9, 85622 Feldkirchen [Munich], Germany
Phone +49 (0)89/255 458-0 E-mail: vision@qioptiq.com

Qioptiq offers lenses and accessories for all kinds of machine vision applications. We are happy to provide customized solutions even for small production runs.

Find out more at www.qioptiq-shop.com/Präzisionsoptik/Machine-Vision-Solutions