

Mikko Nevalainen

# KONENÄKÖSOVELLUKSET VALMISTAVAN TEOLLISUUDEN LAADUNVALVONNASSA

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Niko Siltala  
Joulukuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Mikko Nevalainen: Konenäkösovellukset valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikka  
Joulukuu 2023

---

Konenäkö on teknologia, joka mahdollistaa tietokoneille kyvyn havaita ja analysoida reaali-maailman kappaleita. Kerätyn ja analysoidun tiedon pohjalta konenäkö kykenee tekemään auto-maattisia päätöksiä. Konenäköteknologiaa voidaan käyttää valmistavassa teollisuudessa erilai-sissa laadunvalvontasovelluksissa, joiden avulla voidaan esimerkiksi korvata ihmisen suorittamia visuaalisia laaduntarkastuksia. Tässä työssä tutkitaan valmistavan teollisuuden laadunvalvon-nassa käytössä olevia konenäkösovelluksia. Työn tavoitteena on selvittää, millaisia konenäköso-velluksia on käytetty, sekä millaista hyötyä niillä on saavutettu.

Tutkimus tehdään kirjallisuuskatsauksena. Työn aineistona on käytetty pääosin vertaisarvioi-tuja artikkeleita, aiheeseen liittyviä kirjoja ja konferenssijulkaisuja. Aluksi työssä käsitellään ylei-sesti laadunvalvontaa ja sen merkitystä valmistavan teollisuuden yritykselle. Tämän lisäksi tar-kastellaan laadunvalvonnan ongelmakohtia, joihin voidaan hakea ratkaisua konenäköjärjestel-mien avulla. Tämän jälkeen työssä esitellään konenäköjärjestelmien tyyppejä, komponentteja, rakennetta sekä konenäköjärjestelmän toiminnan perusteita. Edellä mainittujen pohjustavien osi-oiden jälkeen työ keskittyy pääasiassa erilaisiin konenäkösovelluksiin ja niiden avulla saavutet-tuihin hyötyihin. Merkittäviä saavutettuja hyötyjä ovat esimerkiksi mahdollisuus tarkastaa kaikki tuotetut kappaleet satunnaiserien sijaan ja kyky reagoida valmistusvirheisiin jo valmistuksen ai-kana.

Tutkimuksen tuloksena saatiin muodostettua selkeä yhteenveto yleisistä käytössä olevista ko-nenäkösovelluksista valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa. Tutkimusaineistosta kerätty tieto saatiin tiivistettyä selkeämpään muotoon, josta erilaiset konenäkösovellukset ja niiden avulla saavutetut hyödyt ovat helposti tulkittavissa. Konenäkösovelluksia verrattiin perinteisiin ihmisen suorittamiin tarkastuksiin ja saatiin selville niiden olevan parempia monessakin suhteessa kuten tarkastuksien laadun tasaisuudessa. Tutkimus osoittaa, että korvaamalla ihmisen tekemät tarkas-tukset konenäköjärjestelmän avulla automatisoituun versioon voidaan saavuttaa tehokkaampaa ja laadullisesti parempaa tulosta, sekä säästää kustannuksissa.

Avainsanat: valmistava teollisuus, laadunvalvonta, konenäkö, konenäkösovellus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Tutkimustavoite ja -menetelmät .....	1
1.2 Työn rakenne .....	2
2. LAADUNVALVONTA .....	3
2.1 Laadunvalvonnan merkitys ja laadunhallinta .....	4
2.2 Laadunvalvonnan ongelmat .....	5
2.3 Tarkastusprosessi .....	7
3. KONENÄKÖJÄRJESTELMÄ.....	10
3.1 Konenäköjärjestelmän tyypit .....	10
3.2 Konenäköjärjestelmän komponentit .....	11
3.2.1 Valaistus .....	12
3.2.2 Linssi .....	12
3.2.3 Kamera .....	13
3.3 Sovellus ja kokoonpano .....	14
4. KONENÄKÖSOVELLUKSET LAADUNVALVONNASSA .....	15
4.1 Läsnäolon tarkastus ja paikoitus .....	16
4.2 Painatusten ja koodien tarkastus.....	17
4.3 Dimensiomittaukset.....	18
4.4 Vianhavaitseminen ja luokittelu .....	19
5. TULOKSET JA POHDINNAT .....	20
6. YHTEENVETO.....	22
LÄHTEET .....	23

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

QA	engl. Quality Assurance, laadunvarmistus
QC	engl. Quality Control, laadunohjaus
CV	engl. Computer Vision, konenäkö
MV	engl. Machine Vision, konenäkö
CMOS	engl. Complementary Metal-Oxide Semiconductor, Komplementaarinen metallioksidipuolijohde
OCR	engl. Optical Character Recognition, optinen merkintunnistus

# 1. JOHDANTO

Laadunvalvonta on kuulunut aina olennaisesti osaksi valmistavaa teollisuutta ja sen merkitys on kasvanut asiakkaiden asettamien laatuvaatimuksien tarkentuessa (Tricker, 2020, s. 4). Jotkin laadunvalvonnan vaiheet voivat vaatia ihmisen suorittamaa visuaalista tarkastusta. Ihmisen tekemät visuaaliset tarkastukset voivat olla virhealttiita ja tehottomia, eikä niitä aina pystytä tekemään kuin satunnaiselle osalle valmistettavia tuotteita (Anand and Priya, 2020, s. 87). Näihin ongelmiin voidaan hakea ratkaisua käyttämällä konenäköteknologiaan pohjautuvia laadunvalvontasovelluksia (Silva et al., 2018).

Työn aihe on ajankohtainen, sillä konenäkö on yleistynyt valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa ja sovelluskohteita on paljon. Konenäkösovellusten avulla on saatu ratkaistua useita laadunvalvonnan ongelmakohtia valmistavassa teollisuudessa. Näiden sovelluksien avulla on saavutettu merkityksellisiä hyötyjä ihmisen suorittamiin laadunvalvontatarkastuksiin verrattuna, kuten tehokkaampaa tuotantoa, taloudellisia säästöjä ja tuotteiden laadun parantumista (Rosati et al., 2009; Richter, 2017).

## 1.1 Tutkimustavoite ja -menetelmät

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia valmistavan teollisuuden laadunvalvontaa siinä käytettyjen konenäkösovellusten näkökulmasta. Työssä pyritään esittelemään yleisiä konenäkösovelluksia ja koostamaan selkeä yhteenveto niiden avulla saavutetuista hyödyistä. Tavoitteeseen pyritään vastaamalla seuraaviin tutkimuskysymyksiin.

- Millaisia konenäkösovelluksia valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa on käytetty?
- Minkälaisia parannuksia konenäkösovellusten avulla on saavutettu verrattuna ihmisen aistein suoritettuihin laadunvalvontamenetelmiin?

Tässä työssä keskitytään visuaalista tarkastusta vaativiin laadunvalvontamenetelmiin valmistavassa teollisuudessa. Työn tavoitteena ei ole syventyä konenäköteknologiaan vaan esitellä olemassa olevia sovelluskohteita ja niillä saavutettuja hyötyjä valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa. Tämä kandidaatintyö tehdään kirjallisuuskatsauksena ja lähteinä on käytetty pääosin vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleja, kirjoja sekä konferenssijulkaisuja.

## 1.2 Työn rakenne

Työn toisessa luvussa esitellään laadunvalvontaa ja sen osa-alueita sekä merkitystä valmistavan teollisuuden yritykselle. Aluksi luvussa esitellään laadunvalvontaa yleisesti ja pohditaan sen tärkeyttä osana kannattavaa liiketoimintaa. Tämän jälkeen luvussa esitellään laadunhallintaa, laadunvalvonnan ongelmia, sekä tarkastusprosessia. Työn kolmannessa luvussa esitellään konenäköä teknologiana. Luku jakautuu kolmeen alilukuun, joista ensimmäisessä esitellään erityyppisiä konenäköjärjestelmiä ja niiden erityispiirteitä. Kolmannen luvun toisessa aliluvussa esitellään konenäköjärjestelmän tärkeimmät komponentit. Kolmannessa aliluvussa puolestaan keskitytään erilaisiin konenäköjärjestelmien rakenteisiin. Neljännessä luvussa esitellään valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa käytettyjä konenäkösovelluksia ja niiden erityispiirteitä. Neljäs luku on jaoteltu sovelluksien mukaan neljään alilukuun. Viidennessä luvussa esitellään tutkimuksen tuloksia, kuten millaista hyötyä konenäön avulla on saavutettu valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa. Viimeisessä luvussa esitellään yhteenveto työstä.

## 2. LAADUNVALVONTA

Laadunvalvonta on menettely, jonka tarkoituksena on varmistaa, että valmistettu tuote noudattaa määriteltyjä laatukriteereitä ja täyttää asiakkaan vaatimukset (Mukherjee et al., 2016). Laadunvalvonta on laaja käsite, joka kattaa useita eri osa-alueita ja laatutoimenpiteitä yritysorganisaation sisällä. Eräs tällainen toimenpide valmistavan teollisuuden yrityksessä voi olla esimerkiksi valmistettavan tuotteen visuaalinen tarkastus konenäköjärjestelmän avulla.

Laadunvalvonta koostuu menetelmistä, joita yritykset käyttävät saavuttaakseen laatutavoitteet ja parantaakseen jatkuvasti kykyään täyttää ne. Yritys pyrkii varmistamaan laadunvalvonnalla sen, että valmistettavien tuotteiden laatu säilyy tai paranee jatkuvasti. Edellytyksenä toimivalle laadunvalvonnalle on yrityksen johdon luoma ilmapiiri, jossa kaikilla työntekijöillä on sama tavoite. (Mukherjee et al., 2016)

Laatukokonaisuutta hallitsemassa on usein jokin laadunhallintajärjestelmä, joka toimii viitekehyksenä koko laadunvalvonnalle. Laadunhallintajärjestelmän pyrkimys on luoda yritykseen sellainen ilmapiiri, jossa sen kaikki osapuolet pyrkivät edistämään laatua ja parantamaan laatuprosessia jatkuvasti (Anand and Priya, 2020).

Tärkeä osa laadunvalvontaa on jatkuvat laaduntarkastustoimenpiteet valmistuksessa. Laaduntarkastukset kattavat koko valmistusprosessin aina raaka-aineista valmiiseen tuotteeseen (Anand and Priya, 2020, s. 86). Valmistavassa teollisuudessa lähes kaikkia tuotteita tarkastetaan visuaalisesti jossain vaiheessa niiden valmistusprosessia (Beyerer et al., 2016, s. 3). Visuaalisia tarkastuksia voi suorittaa esimerkiksi työntekijän toimesta. Tällaisilla ihmisen suorittamilla tarkastuksilla pystytään harvoin tarkastamaan koko valmistettava erä ja tarkastukset tehdään vain satunnaisille osille (Anand and Priya, 2020, s. 86). Esimerkiksi tämän ongelman ratkaisemiseksi on kehitetty konenäköteknologiaa hyödyntäviä laadunvalvontasovelluksia.

Eräs merkittävä laadunvalvonnan toimi on tuotteiden jäljitettävyyden mahdollistaminen. Jäljitettävyys on laaja käsite, jolla tarkoitetaan käytäntöä tunnistaa valmistettava tuote ja päästä käsiksi sitä koskevaan tietoon, missä tahansa sen elinkaaren vaiheessa. Tämä saavutetaan karkeasti antamalla kohteelle yksilöllisesti tunnistettava tunniste tai merkki sekä tallentamalla tietoja ja liikkeitä sen koko elinkaaren ajalta. (Schuitemaker and Xu, 2020)

## 2.1 Laadunvalvonnan merkitys ja laadunhallinta

Valmistavassa teollisuudessa yksi päätavoitteista on valmistaa ja myydä tuotteita, joiden hinta ja laatu miellyttää asiakkaita (Anand and Priya, 2020, s. 85). Asiakas- ja tuotantonäkökulmien lisäksi voidaan olettaa, että yritykset pyrkivät kannattavaan liiketoimintaan. Tällöin yrityksillä ei ole varaa huonosta laadusta johtuviin lisäkustannuksiin tai kilpailuedun menetykseen.

Laadunvalvonta on tärkeä osa minkä tahansa valmistavan teollisuuden yrityksen toimintaa. Yritys voi laadunvalvontaa parantamalla tehdä toiminnastaan kannattavampaa ja menestyksekkäämpää. Laadunvalvontaprosessia voi parantaa esimerkiksi investoimalla uuteen konenäköä hyödyntävään ratkaisuun, jonka avulla saadaan korvattua yritykselle kallis työntekijä tehokkaammalla koneella. Konenäön avulla voidaan virheitä tuotteista jo niiden valmistusprosessin aikana (Anand and Priya, 2020, s. 86).

Trickerin (2020, s. 5) mukaan laadunvalvonnasta voi seurata useita hyötyjä yritykselle. Esimerkiksi valmistettavien tuotteiden laatu voi parantua ja johtaa korkealaatuisempiin tuotteisiin. Tämän lisäksi valmistuksessa voidaan päästä tilanteeseen, jossa hukkaan meneviä virheellisiä tuotteita syntyy vähemmän. Taloudellisesta näkökulmasta laadunvalvontaan panostaminen voi tuoda esimerkiksi uusia asiakkaita, enemmän myytyjä tuotteita tai vähentää menetettyjä tilauksia. Kaiken kaikkiaan parantamalla yrityksen laadunvalvontaa voidaan saavuttaa parempi asiakastytyvyisyys, joka on avainasemassa valmistavateollisuuden yrityksen toiminnassa.

### Laadunhallinta

Yrityksen laadunhallintajärjestelmä määrittelee laadunhallinnan menettelytavat ja vastuut kyseisessä organisaatiossa. Sen tavoitteena on varmistaa, että kaikki laatuun liittyvät toiminnot ovat sovittujen sääntöjen, määräysten ja ohjeiden mukaisia, ja että valmistettu tuote vastaa asiakkaan vaatimuksia. (Tricker, 2020, s. 16)

Laadunhallinnan voi jakaa kahteen osaan. Laadunvarmistukseen (engl. Quality Assurance, QA) ja laadunohjaukseen (engl. Quality Control, QC). Laadunvarmistus keskittyy luottamuksen luomiseen siitä, että laatuun liittyvät vaatimukset tullaan täyttämään. Laadunohjaus puolestaan keskittyy valmistettavan tuotteen laatuvaatimusten täyttämiseen konkreettisimmilla keinoilla (SFS ISO 9000:2015, 2015). Prosessit ovat erilliset, mutta molemmat tähtäävät siihen, että valmistettavan lopputuotteen laatu on halutunlainen (Tricker, 2020).

Laadunhallintajärjestelmä sisältää kaikki työkalut ja toimet, joiden avulla yritys pyrkii säätämään, ohjaamaan ja parantamaan valmistettavien tuotteiden laatua. Käytännössä



tämä voi tarkoittaa esimerkiksi resurssien, dokumenttien tai henkilöstön hallintaa. Käytännön esimerkkinä yritys voi suosia alihankittavien komponenttien hankkimisessa toimitusvarmaa hyväksi tunnustettua yritystä pienemmän kilpailijan sijaan. Toinen hyvä esimerkki on tuotteen valmistuksen aikana suoritettavat visuaaliset laaduntarkastukset. Laadunhallinnan toimilla pyritään saavuttamaan kaikki laavunvalvonnan ja laadunohjauksen tavoitteet (Tricker, 2020, s. 17).

## 2.2 Laadunvalvonnan ongelmat

Ihmisen suorittamissa laaduntarkastuksissa on useita ongelmia. Näiden ongelmien ratkaisemiseksi valmistavassa teollisuudessa on kehitetty konenäköön pohjautuvia laadunvalvonta sovelluksia. Kaikki ihmisen suorittamia tarkastuksia ei voida korvata konenäön avulla esimerkiksi niiden monimutkaisuuden tai kosketusta vaativien mittausten takia (Anand and Priya, 2020, s. 89). Useisiin ongelma-kohtiin voidaan kuitenkin löytää parempi ratkaisu.

Useissa valmistusprosesseissa valmistettavia tuotteita tarkastetaan useita kertoja, jolloin ihmisen suorittamana laaduntarkastusprosessi voi olla työläs ja aikaa vievä. Konenäkösovelluksien avulla monivaiheinen tarkastus valmistusprosessin erivaiheissa voi olla kevyempi toteuttaa. Tämä auttaa mahdollisten viallisten tuotteiden löytymisen jo aikaisin valmistusprosessin aikana, mikä voi vähentää esimerkiksi hylkäykseen menevien tuotteiden takia muodostuvia kustannuksia (Anand and Priya, 2020, s. 86).

Ihmisen suorittamissa laaduntarkastuksissa on olemassa inhimillisten virheiden riski. Tarkastuksien laatu voi muuttua esimerkiksi tarkastajan kokemuksen, huoneen valoisuuden tai kellonajan mukaan. Ihmisen tekemänä kaikkien valmistettavien tuotteiden tarkastus vaati paljon henkilöstöresursseja ja aikaa. Edellä mainittujen seikkojen, sekä työntehokkuuden parantamiseksi on otettu käyttöön konenäköjärjestelmiä. (G et al., 2021)

Osien ja kokoonpanojen tarkastuksessa esimerkiksi pienet osat, pienet yksityiskohdat, vaaralliset tarkastusolosuhteet tai monimutkaiset valmistusprosessit voivat johtaa siihen ettei ihmisen suorittamalla tarkastuksella saavuteta vaadittua laatua tai jotkin viat jäävät huomaamatta (Silva et al., 2018). Tällaisissa laadunvalvonta sovelluksissa konenäköjärjestelmä voi tarjota parempia laadunvalvonnallisia tuloksia.

**Taulukko 1.** Ihmisen vertailua konenäköjärjestelmään visuaalisessa tarkastuksessa. Mukailtu lähteestä (Beyerer et al., 2016, s. 5)

	<b>Ihminen</b>	<b>Konenäköjärjestelmä</b>
<b>Kuvanhankinta</b>	Matala optinen tarkkuus Intensiteetti tasoja ja dimensiota ei voida mitata absoluuttisen tarkasti Rajoittunut näkyvän valon alueelle	Suuri optinen tarkkuus Intensiteetti tasot ja dimensiot voidaan mitata absoluuttisen tarkasti Kuvan hankinta ei ole rajoittunut näkyvän valon alueelle
<b>Kuvankäsittely ja analysointi</b>	Esimerkeistä oppiminen	Suuri prosessointi kyky Algoritmit pitää olla suunniteltu tarkasti tiettyyn sovellukseen
<b>Erityispiirteet</b>	Kokemuksen vaikutus Mukautuvuus ja oppiminen Tarkastusasetelman mukauttaminen	Tarkat laskelmat Nopea prosessointi Suuri tiedontallennus kyky

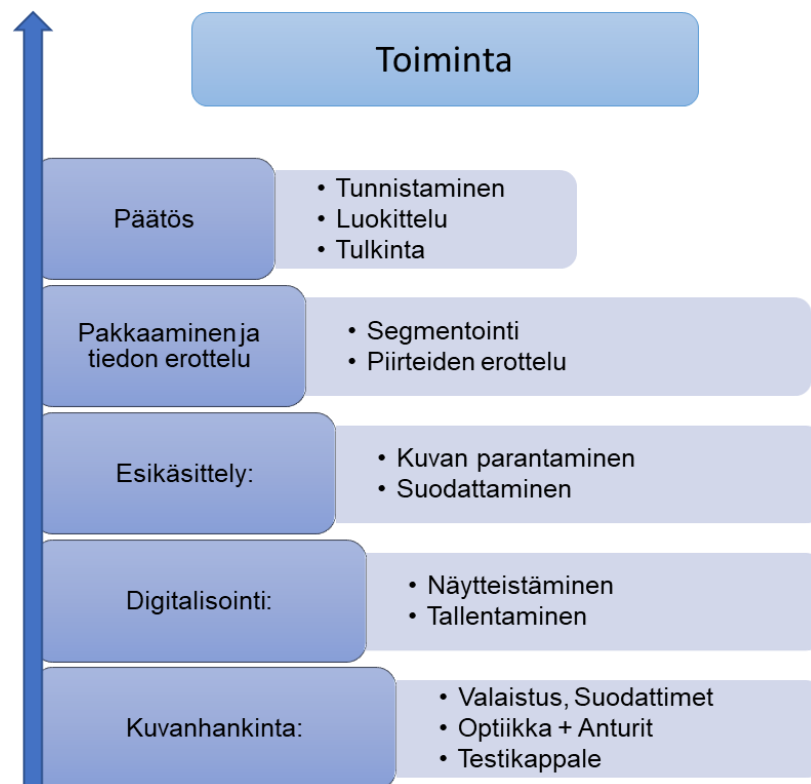
Taulukossa 1 on vertailtu ihmisen ja konenäköjärjestelmän soveltuvuutta visuaalisiin tarkastuksiin tekniseltä näkökulmalta. Taulukosta huomataan, että kummallakin vaihtoehdolla on omat rajoitteensa. Ihminen pystyy mukautumaan erilaisiin pieniin muutoksiin helpommin, mutta toisaalta konenäön avulla voidaan saavuttaa tarkempi kuva ja nopeampi prosessointi kyky. Haasteena ihmisille on luonnollisesti inhimilliset rajoitteet kuvanhankinnassa, mutta konenäköjärjestelmän algoritmien monimutkaisuus esittää omat haasteensa. (Beyerer et al., 2016, s. 5)

Kaiken kaikkiaan laadunvalvonnassa, tarkemmin ihmisen suorittamissa laaduntarkastuksissa, on useita ongelmia, joista osaan voidaan hakea ratkaisua konenäkösovellusten avulla. Kaikkiin sovelluskohteisiin konenäköratkaisut ei kuitenkaan sovi, mutta niiden avulla yrityksillä on kuitenkin mahdollisuus saavuttaa parannuksia omiin laadunvalvontaprosesseihinsa ja saavuttaa esimerkiksi säästöjä henkilöstökustannuksissa.

## 2.3 Tarkastusprosessi

Visuaalinen laaduntarkastus on tärkeä prosessi ja yleistä valmistavassa teollisuudessa, sillä lähes jokaista valmistettavaa tuotetta tarkastetaan visuaalisesti jossain kohtaa niiden valmistusprosessia (Beyerer et al., 2016, s. 3). Visuaalisia tarkastuksia tehdään, jotta voidaan varmistua valmistettavien tuotteiden täyttävän asiakkaiden vaatimat laatuominaisuudet. Sen avulla voidaan myös tunnistaa vialliset osat jo valmistusprosessin aikana. Toisaalta tarkastuksien avulla voidaan myös havaita ja analysoida valmistusprosessin vaihteluita. (Beyerer et al., 2016, s. 3; Silva et al., 2018)

Konenäköjärjestelmällä tehty tarkastusprosessi voidaan jakaa vaiheisiin. Näiden vaiheiden tarkempi sisältö riippuu tarkastussovelluksesta. Monimutkaisemmat sovelluskohteet vaativat järjestelmän, jossa on enemmän yksittäisiä komponentteja kuin yksinkertaisissa kohteissa. Lisäksi erivaiheiden kestot ja esimerkiksi tarvittavat kuvankäsittelytyökalut vaihtelevat sovelluksen mukaan. Kuvassa 1 on esitetty tarkastusprosessin vaiheet loogisessa järjestyksessä alhaalta ylöspäin.



**Kuva 1.** Tarkastusprosessin vaiheet. Mukailtu lähteestä (Beyerer et al., 2016, s. 11)

## **Kuvanhankinta**

Tarkastusprosessi alkaa kuvanhankinnalla. Tavoitteena on hankkia kameran avulla tarkastettavasta kappaleesta paras mahdollinen kuva, josta saadaan kerättyä kaikki tarpeellinen tieto. Tämä prosessin vaihe on korvaamattoman tärkeä ja mikäli hankittu kuva ei ole riittävän laadukas on siitä mahdotonta kerätä tarvittavat tiedot myöhemmissä kuvankäsittelyvaiheissa (Beyerer et al., 2016, s. 11). Tällaisen tarkan kuvan hankkiminen voi vaatia erilaisia suodattimia ja ratkaisuja valaistuksen kanssa. Usein esimerkiksi ympäröivä valo joudutaan poistamaan (Stemmer Imaging, 2018, s. 8)

Ideaalisessa tilanteessa tarkasteltava osa tulee tarkastuspisteelle samassa asennossa jokaisella kerralla. Tämä ei kuitenkaan aina ole mahdollista tuotantolinjaan kytketyissä sovelluksissa, tai tilanteissa joissa mekaaninen järjestelmä ei pysty poistamaan kaikkea liikettä tarkasteltavasta osasta (Stemmer Imaging, 2018, s. 8). Tällöin tarkastettava kappale pitää löytää hankitusta kuvasta erilaisten kuvankäsittelymenetelmien avulla.

## **Kuvankäsittely**

Hankittu kuva digitalisoidaan kamerassa olevassa sensorissa, jolloin siitä syntyy analoginen signaali. Tämä signaali on yleensä sähköinen jännite, joka on diskretoidaan ja rajoitetaan tallennustilan ja amplitudin suhteen. Tässä muodossa kuva voidaan tallentaa ja sitä voidaan käsitellä tietokoneella. (Beyer et al., 2016, s. 11)

Digitalisoinnin jälkeen hankittua kuvaa esikäsitellään esimerkiksi kirkkautta säätelemällä, siten että halutut piirteet korostuvat ja ylimääräinen kohina poistetaan. Tämän lisäksi kuvaa voidaan interpoloida, joka tarkoittaa tuntemattomien pikseliarvojen ennustamista. (Anand and Priya, 2020, s. 42)

Analysointia varten kuvasta täytyy paikallistaa alue tai piirteet, jota halutaan tarkastella. Kuvaa jaetaan osiin analysoinnin helpottamiseksi. Kuvaa voidaan jakaa alueisiin esimerkiksi värin, tekstuurin tai intensiteetin perusteella. Kuvaa voidaan jakaa myös esimerkiksi tunnistamalla eri kohteiden reunoja kuvasta (Anand and Priya, 2020, s. 42). Tätä vaihetta kuvataan segmentoinniksi, eräs segmentointimenetelmä on kynnyksarvon asettaminen (engl. Thresholding), jonka avulla kuvan pikseleistä voidaan erotella esimerkiksi harmaat alueet (Steger et al., 2018, s. 136).

## **Päätös**

Kuvasta eroteltuja osia analysoidaan piirteiden havaitsemista tai tunnistamista varten. Kuvasta voidaan esimerkiksi tarkastaa haluttujen piirteiden, kuten piirilevyn komponenttien, läsnäoloa. Kuvaa voidaan myös verrata esimerkiksi malliin ja sen avulla tarkastaa esimerkiksi pakkauksen etiketin oikeellisuus. (Anand and Priya, 2020, s. 42)

Kuvan analysoinnin jälkeen tehdään päätös valmistettavan osan jatkosta tuotantolinjalla. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi viallisten osien poistamista tuotantolinjalta. Voidaan myös kerätä tietoa osista kuten jäljitettävyystekijöitä tai kerätä tietoa myöhempää analysointia varten (Stemmer Imaging, 2018, s. 7).

### **Toiminta**

Kuvan analysoinnin ja tehdyn päätöksen jälkeen, esimerkiksi virheelliseksi todettu tuote voidaan poistaa tuotantolinjalla. Poistaminen voidaan toteuttaa esimerkiksi ohjelmoitavan logiikan avulla, joka ohjaa virheellisen tuotteen poistavaa toimilaitetta. (Stemmer Imaging, 2018, s.8)

Kaikki tarkastusprosessit eivät ole kytketty suoraan valmistusprosessiin vaan myös yksittäisiä tuotteita voidaan tarkastaa. Tällaisissa tilanteissa tarkastusketju päättyy päätös-vaiheeseen.

## 3. KONENÄKÖJÄRJESTELMÄ

Konenäkö on teknologia tai tieteenala, joka käsittelee sitä kuinka tietokoneet voivat nähdä ja ymmärtää todellisen maailman esineitä (Anand and Priya, 2020). Laadunvalvonnan näkökulmasta, konenäköjärjestelmällä pyritään korvaamaan jokin ihmissilmää ja aivoja vaativa tarkastustoimenpide.

Tietokonenäkö (CV) on laajempi käsite, joka kattaa kuva-analyysin ydinteknologian, mitä voidaan käyttää missä tahansa sovelluksessa. Esimerkki tällaisesta sovelluksesta on katu näkymän tarjoava karttasovellus, jossa otetun kuvan avulla voidaan analysoida kameran ja kuvassa näkyvän rakennuksen välistä etäisyyttä. Konenäkö (MV) terminä puolestaan viittaa yleensä prosessiin, jossa kuva-analyysi yhdistetään johonkin teollisuusautomaatio sovellukseen, kuten automaattiseen muodontarkastukseen. (Anand and Priya, 2020) Tässä työssä keskitytään konenäköön ja sen erilaisiin sovelluksiin valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa.

Konenäköjärjestelmän pääkomponentit ovat kamera ja kuvankäsittelyohjelma, joiden avulla hankitaan kuva, jota analysoidaan. Analysoidun tiedon perusteella järjestelmä voi suorittaa erilaisia tehtäviä, joita varten se on ohjelmoitu. Konenäön avulla on mahdollistettu esimerkiksi hajonneiden Legojen poistaminen linjastolta kameralla hankitun palautteen perusteella (Wang *et al.*, 2017).

### 3.1 Konenäköjärjestelmän tyypit

Konenäköjärjestelmät voidaan jakaa karkeasti kolmeen tyyppiin niiden rakenteen perusteella (Stemmer Imaging, 2018 s. 9). Valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa on käytetty älykamaroita, kompakteja konenäköjärjestelmiä ja tietokonepohjaisia konenäköjärjestelmiä.

Älykamerat ovat konenäköjärjestelmiä, jossa kaikki konenäköjärjestelmän komponentit on kasattu samaan yleensä pienikokoiseen koteloon. Nämä konenäköjärjestelmät ovat kooltaan hieman normaalia teollisuuskameraa suurempia ja sisältävät kameran, suorittimen ja logiikan. Älykamaroita käytetään usein yksinkertaisiin konenäkösovelluksiin, joissa tarkastustulokset voidaan erottaa kameran hankkimasta kuvasta pienellä vaivalla ilman suurta määrää analysointia. (Stemmer Imaging, 2018, s. 10)

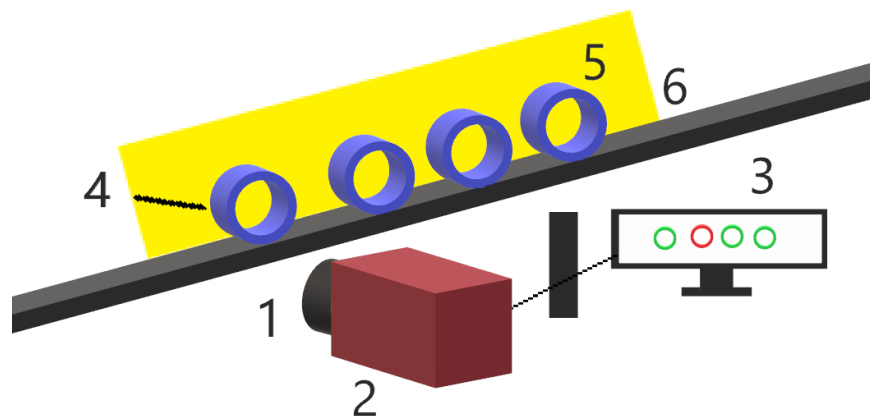
Kompaktit konenäköjärjestelmät perustuvat sulautettuun prosessointitekniikkaan ja yhdistävät prosessorin, teollisuuden tietoliikenne rajapinnat ja tuen useille kameroille vanassa, kompaktissa teollisuuskotelossa. Kompaktit konenäköjärjestelmät sisältävät

usein sisäänrakennetun graafisen käyttöliittymän, jota voidaan käyttää esimerkiksi kosketusnäytön tai hiiren ja näppäimistön kautta.

Sovelluksissa, joissa vaaditaan paljon prosessointitehoa ja tukea useille kameroille käytetään usein tietokonepohjaisia konenäköjärjestelmiä. Tällaiset tietokonepohjaiset järjestelmät ovat helposti mukautettavissa erilaisiin sovelluskohteisiin, ja niihin voidaan liittää useita komponentteja. (Stemmer Imaging, 2018, s. 10) Esimerkki tällaisen järjestelmän kokoonpanosta on esitetty kuvassa 2.

### 3.2 Konenäköjärjestelmän komponentit

Konenäköjärjestelmä koostuu useista erilaisista komponenteista ja jokaisen järjestelmän kokoonpano riippuu siitä sovelluksesta, jota varten ne on suunniteltu. Myös sovelluksen automaatioaste määrittää konenäköjärjestelmään liitettäviä komponentteja. Konenäköjärjestelmän pääkomponentteja ovat valonlähde, linssi, kamera, tietokone ja kuvankäsittelyohjelma. Komponentit ovat kytketty toisiinsa jollain tiedonsiirtoratkaisulla, kuten Ethernet-kaapelilla. (Anand and Priya, 2020)



**Kuva 2.** Tietokonepohjaisen konenäköjärjestelmän komponentit

Kuvassa 2. on esitetty esimerkki tietokonepohjaisesta konenäköjärjestelmästä. Kuva esittää järjestelmää, jolla tutkittavista kappaleista (4) otetaan reaaliajassa valokuvia samalla nopeudella millä liukuhihna (6) kuljettaa kappaleita. Järjestelmä on esimerkki sovelluksesta, jolla tehdään dimensiomittauksia, kuten mitataan reiän halkaisijaa. Sovelluksessa valaistus (5) on toteutettu valaisemalla tutkittavien kappaleiden tausta. Linssi (1) on kytketty kameraan (2), jotka on valittu siten, että saatu kuva on tarkka. Kamera on liitetty tietokoneeseen (3), joka suorittaa mittaukset ja kuvankäsittelyohjelman avulla

päätöksen kunkin kappaleen kohdalla siitä kelpaavatko ne seuraavaan tuotannon vaiheeseen. Myöhemmin linjastolla voisi olla esimerkiksi toimilaite, joka siirtää virheelliset kappaleet pois linjastolta tietokoneen käskystä.

### 3.2.1 Valaistus

Valokuvat syntyvät siten, että kuvattavaan kappaleeseen osoitetaan valoa ja tämä valo heijastuu kameran sensoreihin. Konenäköjärjestelmissä valaistuksella voidaan parantaa hankittavan kuvan laatua ja saada siten informatiivisempia kuvia tarkastettavasta kappaleesta. Oikeanlaisella valaistuksella tarkastettavasta kappaleesta saadaan korostettua niitä piirteitä joita halutaan tutkia ja toisaalta myös sumentaa epätoivottuja piirteitä (Anand and Priya, 2020, s. 46; Steger et al. , 2018, s. 5).

Kun puhutaan konenäköjärjestelmän valaistuksesta, on tarkasteltava sekä valonlähteitä että valaisutapoja. Valonlähde voi valaista joko jatkuvasti tai välkkyen aina kuvanotto hetkellä. Valonlähteenä voidaan käyttää esimerkiksi LED-valoja tai laservaloja. Valonlähteissä on eroja esimerkiksi hinnassa ja käyttöiässä. Näiden erojen lisäksi toiset niistä soveltuvat paremmin tiettyihin sovelluksiin kuin toiset. Esimerkiksi vain osa valoista soveltuu nopeisiin välähdyksiin valaistuksessa (Beyerer, Puente León and Frese, 2016, s.94). LED-valoja käytetään paljon teollisuuden konenäköjärjestelmissä niiden monien hyötyjen takia. Valonlähdettä valitessa on myös tärkeää ottaa huomioon tarkasteltavan kappaleen koko. Mikäli tarkasteltava kappale on pieni, soveltuu siihen usein LED-valo, kun taas suuremmille tarkastusalueille sopivampi voi olla esimerkiksi loistevalaisin. (Anand and Priya, 2020, s.75)

Yleisimpiä valaistustekniikkoja ovat taustavalaistus ja etuvalaistus. Taustavalaistus on tehokas keino silloin, kun halutaan tarkasteltavan kappaleen muoto selkeästi näkyviin. Tätä valaistustekniikkaa hyödynnetään usein, kun tehdään dimensiomittauksia. Muitakin valaistusjärjestelyitäkin on kuten pimeäkenttä valaistus (Bhanu et al., 2014).

### 3.2.2 Linssi

Seuraava komponentti on linssi, joka on asennettu kameraan. Linssin tehtävänä on kerätä tarkastettavasta kohteesta heijastuneet valonsäteet ja välittää ne kameran kuvanturille (Bhanu et al., 2014). Linssi valitaan siten, että se tarjoaa sopivan suurennuksen ja työskentelyetäisyyden.



Linssiä kutsutaan joskus myös objektiiviksi ja se on putki, jonka sisällä on useita linsselementtejä. Nämä elementit ovat kuperia tai koveria laseja, jotka kokoavat sekä parantelevat valonsäteitä niiden matkalla sensorille. Linsseissä on usein säädettävä aukko, jonka kokoa muuttamalla voidaan säätää linssin sisälle menevän valon määrää (Anand and Priya, 2020, s. 53). Esimerkiksi nopeasti liikkuvia tarkastuskohteita kuvatessa on hyötyä isommasta aukosta, jolloin kamera kerää enemmän valoa.

### 3.2.3 Kamera

Kuvien ottamiseen konenäköjärjestelmässä voidaan käyttää yhtä tai useampia kameroita riippuen siitä millainen kuva halutaan hankkia. Kahden kameran avulla saadaan luotua stereonäkö, jonka avulla voidaan tallentaa tietoa kuvattavasta kohteesta myös syvyys suunnassa. Stereonäköä hyödyntävän sovelluksen avulla on esimerkiksi pystytty korvaamaan terästankojen manuaalista tarkastusta vaatinut toimenpide (Kardovsky and Moon, 2021).

Kamerassa olevat anturit muuntavat valon digitaalisiksi kuviksi, joita voi käsitellä tietokoneen kuvankäsittelyohjelmalla. Yksiväriset kamerrat ovat halvempia ja tarjoavat nopean ja helpon käsittelyn verrattuna värikameroihin. Kameran valinta riippuu sovelluksesta, jota varten järjestelmä on suunniteltu. (Anand and Priya, 2020, s.46)

Kamera on oleellinen komponentti konenäköjärjestelmässä. Useista markkinoilla olevista vaihtoehdoista tulee valita kuhunkin tilanteeseen juuri sopiva kamera, joka täyttää sille asetetut vaatimukset olematta kuitenkaan ylimitoitettu. Kuvanhankintaan voidaan käyttää yhtä, kahta tai useampaa kameraa (Anand and Priya, 2020, s.46).

Konenäköjärjestelmissä käytetään erilaisia kameroita, kuten riviskanneria (engl. linescanner) ja alueskanneria (engl. areascanner). Riviskannerit tallentavat kuvan skannaamalla kohteen rivi kerrallaan, mikä mahdollistaa tarkan ja selkeän kuvan liikkuvista kohteista. Alueskannerit tallentavat kuvan samanaikaisesti koko kohteen pinnalta ja ovat hyödyllisiä nopeassa kuvanvasteessa ja monipuolisessa analyysissä. Alueskannerit soveltuvat parhaiten sovelluksiin, jossa kuvattavat kohteet ovat ainakin hetken paikallaan. (Anand and Priya, 2020, s. 50) Tärkeä osa kameraa on sen sisällä oleva kuvasensori, joka muuttaa tarkasteltavasta kohteesta heijastuvan valon digitaalseksi kuvaksi. Yleisesti käytössä on CMOS-sensorit (Steger et al., 2018, s. 47).

### 3.3 Sovellus ja kokoonpano

Konenäköjärjestelmän kokoonpanon vaikuttaa paljon sovelluskohde, josta kuvaa halutaan hankkia. Tarkastettavista tuotteista voidaan hankkia yksi-, kaksi- tai kolmiulotteista kuvaa. Konenäköjärjestelmän rakenne muuttuu täten sovelluksen vaatimuksien mukaan ja se voi koostua useista komponenteista. Konenäköjärjestelmän komponentit on liitetty toisiinsa jollain tiedonsiirto ratkaisulla, joista paljon käytetty on GigE-standardin mukaiset tietoliikenne-rajapinnat (Basler, 2023).

Konenäköjärjestelmä voidaan koodata suorittamaan tiettyä tehtävää, kuten tunnistamaan virheitä valmistetusta tuotteesta tai tarkistamaan onko kokoonpanossa kaikki tarvittavat osat paikallaan. Kameralla tuotettua kuvaa analysoidaan kuvankäsittelyohjelmilla ja oleellinen tieto saadaan selville algoritmien avulla (Steger et al., 2018).

2D-konenäkösovellukset ovat yleisiä teollisuudessa ja niitä voidaan hyödyntää useisiin tarkastuskohteisiin. Kaksiulotteisen konenäköjärjestelmän kuvanhankintamenetelmä vaihtelee sovelluskohteen mukaan. Järjestelmä voi pohjautua normaaliin teollisuuskameraan, laserskanneriin tai valosähköiseen anturiin. (Silva et al., 2018)

2D-sovelluksiin verrattuna 3D-sovellukset tarjoavat joihinkin tilanteisiin tarkempia tarkastustuloksia. Usean kameran avulla saadaan luotua syvyysnäkö, jolloin kolmiulotteisesta kappaleesta saadaan enemmän tietoa. 3D-konenäkösovellukset voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan, passiiviseen- ja aktiiviseen järjestelmään. Passiivinen 3D-konenäköjärjestelmä toimii luonnonvalon kanssa ilman erillistä valonohjausta ja aktiivinen puolestaan toimii ulkoisen ohjatun valon avulla. (Silva et al., 2018)

Konenäköjärjestelmän tyyppi valitaan sovelluskohteen vaatimuksien mukaan. Jokainen konenäköjärjestelmä rakennetaan vastaamaan tietyn sovelluskohteen vaatimuksia. Ensimmäinen askel konenäköjärjestelmän suunnittelussa on määrittää tarkasti mitä siltä vaaditaan (Anand and Priya, 2020). Hinta on isotekijä ja tarkoituksenmukaisuus (Stemmer Imaging, 2018).

## 4. KONENÄKÖSOVELLUKSET LAADUNVALVONNASSA

Konenäkösovelluksella tarkoitetaan jotain tiettyä konenäköjärjestelmää hyödyntävää käytännön ratkaisua, jolla pyritään ratkaisemaan jokin esimerkiksi laadunvalvontaan liittyvä ongelma. Valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa konenäkösovelluksia käytetään useisiin eri tehtäviin laajalti eri tuotannon aloilla. Konenäkösovelluksia käytetään esimerkiksi erilaisiin laaduntarkastuksiin, automaattiseen virheen tunnistukseen ja virheellisten tuotteiden erottamiseen tuotannosta (Anand and Priya, 2020, s. 85).

Jokainen sovellus vaatii käyttötarkoitukseen ominaisista komponenteista koostuvan konenäköjärjestelmän (Silva et al., 2018). Esimerkiksi hammasrattaan dimensiomittauksiin voi riittää yksi mustavalkoista kuvaa hankkiva teollisuuskamera, kun taas monimutkaisemman kappaleen kolmiulotteiseen muototarkastukseen tarvitaan useamman kameran konenäköjärjestelmä. Laitevalmistajat myyvät valmiita konenäköjärjestelmiä, jotka voidaan ottaa käyttöön suorittamaan jotain tiettyä tehtävää (Cognex, 2023).

Merkittävin käyttökohde konenäköjärjestelmille on suoraan valmistusprosessiin kytketyt sovellukset. Tällaiset suoraan kytketyt järjestelmät hankkivat tarkastettavista kohteista kuvia tuotantolinjan nopeudella, joita voidaan analysoida heti saaden välitön vaste (Stemmer Imaging, 2018, s. 6). Tuotantolinjaan kytketyllä konenäköjärjestelmällä voidaan esimerkiksi poistaa viallinen tuote linjastolta ennen kuin se saavuttaisi seuraavan vaiheen. Nopealla reagoimisella virheisiin voidaan välttyä mahdollisilta ylimääräisiltä kustannuksilta, sekä siltä, että asiakas saa itselleen virheellisen lopputuotteen. Suoraan kytkettyjen konenäköjärjestelmien lisäksi on olemassa järjestelmiä, jotka eivät tarjoa välitöntä tulosta vaan ovat pääsääntöisesti suunniteltu keräämään informaatiota tarkastettavista tuotteista myöhempää analyysiä varten (Stemmer Imaging, 2018, s.7).

Tässä luvussa esitellään yleisiä valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa käytettyjä sovelluksia. Sovellukset on jaettu neljään alilukuun perustuen Stemmer Imagesin (2018), Silvan (2018) sekä Anandin ja Priyan (2020) tekemiin luokitteluihin. Jotkin sovellukset sisältävät ominaisuuksia, joiden perusteella ne voitaisiin laittaa useamman luokan alle. Kokoonpanon tarkastusta ei käsitellä erikseen, sillä samoja konenäkösovelluksia voidaan soveltaa sekä yksittäisten osien että kokoonpanojen tarkastukseen.

## 4.1 Läsnaolon tarkastus ja paikoitus

Valmistavassa teollisuudessa konenäköä voidaan soveltaa valmistettavien tuotteiden tai pakkausten täydellisyyden tarkastamiseen. Laaduntarkastuksien tavoitteena on varmistua siitä, että tuote on valmistettu oikein ja siitä löytyvät kaikki sille määritetyt ominaisuudet kuten esimerkiksi, että mikropiirissä on kaikki siihen kuuluvat komponentit. Tätä sovellusta voidaan käyttää myös esimerkiksi tuotantolinjalla liikkuvien tai pakkauksessa olevien osien laskemiseen. (Anand and Priya, 2020, s. 96–97) Konenäköä voidaan käyttää kokoonpanojen täydellisyyden tarkastukseen (Beyerer et al., 2016, s.3). Konenäkösovelluksen avulla voidaan esimerkiksi tarkastaa, onko kaikki kokoonpanon komponentit asennettu, oikealla paikallaan ja oikeassa asennossa.

Valmistettavassa teollisuudessa voidaan valmistaa tuotteita, jotka koostuvat useista pienemmistä osista. Kaikkia kokoonpanoon tulevia osia tai komponentteja pitää tarkastaa, jotta voidaan varmistua niiden mitoista ja sopivuudesta kokoonpanoon (Anand and Priya, 2020, s.90).

Konenäköteknologiaa on käytetty esimerkiksi piirilevyjen automaattiseen visuaaliseen tarkastukseen (Richter et al, 2017). Artikkelissa esitetään järjestelmä, jossa piirilevyjä tarkastetaan valmistusprosessin aikana hyödyntäen teollisuuskameraa ja koaksiaalivaloa (Ohno, 2017). Tässä sovelluksessa konenäköjärjestelmän avulla piirilevyjen virheet, kuten puuttuvat komponentit, löydettiin tehokkaasti ilman ihmisen suorittamaa tarkastusta. Tuloksena saatiin madallettua valmistuksen kuormittavuutta, parannettua tarkastuksen tehokkuutta ja parannettua piirilevyjen laatua. (Richter et al., 2017)

Konenäköä voidaan käyttää myös valmistettavien tuotteiden laskemiseen. Konenäköä on hyödynnetty esimerkiksi Lego-palikoiden automaattiseen laskemiseen (Wang et al., 2017). Konenäkösovellus on kehitetty korvaamaan ihmisen suorittamaa manuaalinen laskenta, joka on työllistävää ja virheille altista. Konenäköjärjestelmällä voitiin laskemisen lisäksi suorittaa myös virheen tunnistusta. Artikkelissa esitellyn konenäköjärjestelmän avulla saavutettiin tehokkaampi valmistusprosessi, parempi tuotteiden laatu ja saatiin laskettua henkilöstön kuormitusta (Wang et al., 2017).

Paikoitus on tärkeä konenäkösovellus. Valmistettavia kappaleita kuvataan kameralla, jotta varmistutaan niiden oikeasta asennosta ja sijainnista valmistuslinjalla (Silva et al., 2018). Laadunvalvonnan näkökulmasta eräs esimerkkisovellus paikoituksesta on piirilevyjen valmistuksessa. Artikkelissa esitellään sovellus, jossa piirilevyn oikea paikoitus varmistetaan konenäön avulla, jotta elektroniikkakomponentit pystytään asettamaan oikeille paikoille kokoonpanovaiheessa (Tsai and Hsieh, 2017).

## 4.2 Painatusten ja koodien tarkastus

Valmistavassa teollisuudessa tuotteisiin lisätään usein erilaista informaatiota sisältäviä merkintöjä, kuten sarjanumeroita, viivakoodeja tai yleistä tuotetietoa. Painettu tieto voi olla esimerkiksi tuotteen nimi, paino tai valmistuspäivämäärä. Erilaisiin koodeihin, kuten viivakoodeihin tai QR-koodeihin (Hayes, 2021), voidaan koodata tietoa tuotteista muotoon, jota voidaan lukea konenäön avulla. Sarjanumerot ja tuotteisiin painetut koodit mahdollistavat esimerkiksi valmistusprosessin aikaisen seurannan ja myöhemmin tuotteiden jäljitettävyyden (Steger et al., 2018, s. 338).

Tällaisten merkintöjen laadunvalvonta on olennainen osa tuotteiden valmistusprosessia ja sitä varten on kehitetty erilaisia konenäkösovelluksia. Tämän tyyppisten merkintöjen laadunvalvontaa varten on kehitetty konenäkösovelluksia, joiden tarkoituksena on esimerkiksi tarkastaa painatusten laatu tai varmistaa tuotteen jäljitettävyys koko valmistusprosessin ajan (Steger et al., 2018, s. 338; Anand and Priya, 2020, s. 98–100).

Yleinen menetelmä tämän kaltaisissa sovelluksissa optinen merkintunnistus engl. (Optical Character Recognition, OCR). Teknologian avulla valmistettaviin tuotteisiin painettu teksti saadaan muutettua sellaiseksi, jota tietokone ymmärtää (Memon et al., 2020). Toisin sanottuna OCR on prosessi, joka lukee tekstiä digitaalisesta kuvasta, joka on hankittu esimerkiksi konenäköjärjestelmän avulla (Steger et al., 2018, s. 339). Menetelmää on hyödynnetty esimerkiksi kuumavalssattujen teräskelojen valmistuksessa (Caldeira et al., 2020). Artikkelissa kuvattu järjestelmä on suunniteltu tunnistamaan painatusvirheitä ja teräskelojen epämuodostumia, jotka voisivat johtaa jäljitettävyysoongelmiin tai jopa virheellisiin asiakastoimituksiin. Tunnukseton kela aiheuttaa tuotannon pysähtymisen puoleksi tunniksi, josta seuraa 180 000 dollarin rahallinen menetys (Caldeira et al., 2020). Järjestelmän avulla kehitetty tarkastusprosessi vähentää henkilöstön kuormitusta ja ehkäisee suunnittelemattomia tuotannon pysähdyksiä, joista voisi syntyä taloudellisia tappioita.

Optinen merkkien tunnistus koostuu kahdesta tärkeästä vaiheesta, jotka ovat yksittäisten merkkien rajaaminen ja merkkien luokittelu (Steger, Ulrich and Wiedemann, 2018, s.339). Sovelluksen ominaisuuksien mukaan järjestelmä pystyy tunnistamaan vain tiettyä fonttia tai jopa useampaa, mutta kuten aiemmin mainittu suuria muutoksia hankitussa kuvassa ei voida sallia ilman järjestelmän uudelleen ohjelmointia.

### 4.3 Dimensiomittaukset

Tärkeä osa laadunvalvontaa on erilaiset dimensiomittaukset tuotteen valmistusprosessin aikana. Dimensiomittauksilla tarkoitetaan fyysisen kappaleen ulkomittojen tarkastelua. Mitattavia piirteitä voivat olla esimerkiksi kappaleen pituus, leveys, halkaisija tai paksuus. Dimensiomittausten tarkoituksena on varmistua siitä, että valmistettava tuote vastaa suunniteltuja mittoja ja on toleranssien sekä laatuvaatimuksien mukainen. (Anand and Priya, 2020, s. 94)

Dimensiomittauksissa tarkka kuvanlaatu ja tarkkaan pikselilaskentaan soveltuva algoritmi tietokoneohjelmassa ovat erittäin tärkeitä. Lisäksi tarvitaan korkea resoluutioinen kamera, sopiva linssi ja oikeanlainen valaistus. Dimensiomittaus järjestelmää suunnittelussa on otettava huomioon myös, ettei tärinä häiritse mittauksia. Nämä seikat huomioiden konenäköjärjestelmällä on mahdollisuus tehdä tarkkoja ja toistettavia dimensiomittauksia (Stemmer Imaging, 2018, s.7).

Konenäköä on hyödynnetty useissa sovelluksissa, joissa on aiemmin jouduttu mahdollisesti tekemään fyysisiä mittauksia erilaisilla mittavälineillä. Katalysaattoreiden geometrisen laaduntarkastus on tehty valmistusprosessin lopussa ihmisen toimesta käyttäen käsityökaluja kuten viivaimia, mikrometrejä ja työntömittoja (Frustaci et al., 2020). Käsityökaluja käytettäessä fyysinen kosketus on välttämätöntä ja tarkastukset ovat aikaa vieviä, virhealttiita ja kohdistuu satunnaisesti näytteisiin koko valmistuserän sijaan. Lisäksi prosessin laadun tietoja ei voida kerätä tehokkaasti, mikä estää tiedon analysointiin perustuvan ennakoivan ylläpidon. (Frustaci et al., 2020) Artikkelissa esitellään yksipiirisestä tietokoneesta ja värikamerasta koostuva konenäkösovellus, jonka avulla katalysaattori-kokoonpanojen dimensiomittaukset saatiin luotettavimmiksi, halvemmiksi ja reaaliaikaisiksi, sekä kosketusta vaativista tarkastuksista päästiin eroon.

Useissa dimensiomittaus sovelluksissa käytetään kaksiulotteista kameraa ja taustaväläisyyttä. Esimerkiksi sytytystulppien kärkiväliä on mitattu tällaisen konenäköjärjestelmän avulla (Steger et al., 2018, s. 409). Konenäkösovelluksella voidaan mitata useaa piirrettä samaan aikaan ja nopeammin verrattuna manuaalisiin menetelmiin (Anand and Priya, 2020, s.94).

Dimensiomittaukset ovat todella tärkeitä erilaisten useista osista koostuvien kokoonpanojen valmistusprosessin aikana. Yksittäisten osien mitat pitää olla toleranssien sisällä, jotta myöhemmin kokoonpanovaiheessa ei tule ongelmia. Esimerkiksi silmälasien valmistuksessa yksittäisten osien laaduntarkastuksiin on käytetty konenäkösovellusta (Rosati et al., 2009). Artikkelissa esitellään konenäkösovellus, jonka avulla ihmisen tekemät

laaduntarkastukset on saatu korvattua konenäköjärjestelmän avulla. Sovelluksen avulla mahdollistettiin jokaisen osan tarkastaminen ja saavutettiin taloudellisia säästöjä.

#### 4.4 Vianhavaitseminen ja luokittelu

Vianhavaitseminen on sovellus, jonka tarkoituksena on löytää valmistettavista tuotteista valmistusvirheitä, kuten naarmuja, murtumia, epämuodostumia tai värjäytymiä. Näihin sovelluksiin lukeutuvat sekä pinnanlaadun tarkastukset että muototarkastukset. Nämä viat ovat usein luonteeltaan satunnaisia ja ilmenevät eripuolella tuotetta ja voivat johtua esimerkiksi pienistä valmistusprosessissa tapahtuneista muutoksista (Stemmer Imaging, 2018, s. 7). Vikojen satunnaisen ilmenemisen vuoksi näissä laadunvalvontasovelluksissa voi olla hyödyllistä tarkastaa jokainen tuote satunnaisten erien sijaan. Kun viat havaitaan ajoissa valmistusprosessin aikana, voidaan säästyä myöhemmän vaiheen ongelmilta esimerkiksi kokoonpanovaiheessa sekä korjata mahdollisesti vikoja aiheuttanut ongelma välttymällä mahdollisilta virheellisiltä valmistuseriltä.

Pinnalaadun tarkastus on eräs merkittävä ja paljon käytetty laadunvalvontasovellus. Kuulalaakereiden tarkasti valmistettavien kuulien pinnanlaadun tarkastusta varten on kehitetty konenäkösovellus (Chen et al. 2016). Tässä sovelluksessa tarkastusjärjestelmä rakennettiin kolmen kameran avulla, valaistusta ohjattiin vaikean kiiltävän pinnan takia. Tulokseksi saatiin rakennettua järjestelmä, joka nopeutti prosessia huomattavasti verrattuna ihmisen suorittamiin tarkastuksiin.

Erilaiset muototarkastukset ovat yleisiä valmistusprosesseissa. Esimerkiksi autoteollisuudessa valmistetaan paljon hammasrattaita ja on tärkeää varmistua niiden oikeanlaisesta muodosta, jotta ne sopivat kokoonpanoihin. Eräs tähän ongelmaan kehitetty konenäkösovellus esiteltä artikkelissa (Bhanu et al, 2014). Tässä artikkelissa esitellään ratkaisu, jossa konenäkösovellus on opetettu tunnistamaan virheellisen muotoinen hammasratas. Sovelluksessa on käytetty mustavalkoista teollisuuskameraa sekä taustavalaistusta ja sen avulla on saatu korvattua ihmisiä työllistävä tarkastus vaihe (Bhanu et al., 2014).

Konenäkösovellusten avulla voidaan myös luokitella ja lajitella tuotteita niiden ominaisuuksien mukaan. Legojen automaattiseen lajitteluun on kehitetty ja käyttöön otettu konenäkösovellus (Wang et al., 2017). Sovellus on toteutettu kytkemällä automaattiseen tarkastukseen soveltuva konenäköjärjestelmä valmistusprosessiin. Tällä saatiin korvattua ihmisen tekemät tarkastukset, jotka olivat työllistäviä, hitaita ja alttiita virheille. Käyttöön otettu sovellus voi parantaa tuotteiden laatua, nostaa tuotannon tehokkuutta, parantaa yrityksen laatustatusta sekä luoda kilpailuetua (Wang et al., 2017)

## 5. TULOKSET JA POHDINNAT

Neljännessä luvussa esiteltiin laajalti erilaisia valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa käytettyjä konenäkösovelluksia. Näistä tutkimuksen kannalta oleellimmat sovellukset ja niiden avulla saavutetut hyödyt ihmisten suorittamiin tarkastuksiin verrattuna on koottu taulukkoon 2.

***Taulukko 2.** Käytettyjä konenäkösovelluksia ja niiden avulla saavutettuja hyötyjä ihmisen aistein suorittamiin tarkastuksiin verrattuna*

<b>Sovelluskohde</b>	<b>Saavutetut hyödyt</b>
<b>Piirilevyjen automaattinen visuaalinen tarkastus (Richter et al., 2017)</b>	Parempi laatu Tehokkaampi prosessi Kuormittavuuden väheneminen
<b>Legojen automaattinen laskenta (Wang et al., 2017)</b>	Tehokkaampi valmistusprosessi Henkilöstön kuormituksen laskeminen Vähemmän virhealtis tarkastus
<b>Teräskelojen sarjanumeroiden tarkastus ja epämuodostumien tunnistus (Caldeira et al., 2020)</b>	Henkilöstön kuormituksen laskeminen Tuotannon pysähdyksien ehkäiseminen Taloudelliset säästöt
<b>Katalysaattorien dimensiomittaukset (Frustaci et al., 2020)</b>	Kontaktiton tarkastus Reaaliaikainen tarkastus Jokaisen tuotteen tarkastus Taloudelliset säästöt Luotettavammat tarkastukset
<b>Silmälasiensien tarkastus (Rosati et al., 2009)</b>	Jokaisen tuotteen tarkastus Taloudelliset säästöt
<b>Laakerikuulien pinnantarkastus (Chen et al., 2016)</b>	Nopeampi tarkastusprosessi



<b>Hammasrattaiden muototarkastus</b>  <b>(Bhanu et al., 2014)</b>	Henkilöstön kuormituksen laskeminen
--	-------------------------------------

Korvaamalla ihmisen suorittamia visuaalisia tarkastuksia on saavutettu merkittäviä hyötyjä. Yksi merkittävimmistä saavutuksista on tuotteiden laadun parantuminen. Konenäkösovellukset mahdollistavat tarkat ja toistettavat laaduntarkastukset, mitkä johtavat virheiden vähentymiseen ja korkeampaan laatuun. Myös tuotantoprosessit ovat tehostuneet konenäkösovellusten avulla, johtuen esimerkiksi prosessien automatisoinnista. Pääsääntöisesti konenäkösovellukset suorittavat laaduntarkastuksia nopeammin kuin työntekijät. Laadunvalvonnan automatisointi on siis vähentänyt henkilöstön kuormitusta. Lisäksi konenäkösovellukset ovat auttaneet suunnittelemattomien tuotannon pysähdyksien ehkäisemisessä. Reaaliaikaiset tarkastukset mahdollistavat ongelmien havaitsemisen varhaisessa vaiheessa, mikä auttaa ennaltaehkäisemään virheellisten tuotteiden etenemistä valmistusprosessissa.

Näiden etujen lisäksi konenäkösovellusten käytöstä on koitunut taloudellisia säästöjä. Virheettömämpi tuotanto ja vähentynyt henkilöstön kuormitus yhdessä luovat kokonaisuuden, joka heijastuu positiivisesti liiketoiminnan kannalta. Tämä tekee konenäkösovelluksiin investoinnista yrityksille kannattavan vaihtoehdon laadunvalvonnan parantamisessa.

Konenäkösovelluksissakin on omat ongelmakohtansa. Konenäkösovelluksien mukautuminen muutoksiin on rajallista. Esimerkiksi merkintunnistus sovelluksessa fontin muuttuminen voi vaatia järjestelmän uudelleen ohjelmointia. Kuitenkin järjestelmien kehittyessä ja esimerkiksi koneoppimista hyödyntämällä järjestelmät voivat kehittyä joustavammaksi tulevaisuudessa. Tämän lisäksi joskus valmistettavista tuotteista halutaan tarkastella niiden fyysisiä ominaisuuksia, kuten massaa, jota ei voida mitata visuaalisesti vaan mittaus vaatii kosketusta. Aina ei ole järkevää automatisoida manuaalista tehtävää kokonaan vain jokin osa siitä, siten että kokonaisuudessa hyödytään sekä ihmisen että konenäköjärjestelmän vahvuuksista.

Kaiken kaikkiaan voidaan todeta konenäkösovelluksien olevan osoitetusti hyödyllisiä valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa. Niitä on sovellettu moneen eri kohteeseen ja ne ovat yleistymässä. Valmistavan teollisuuden yritykset ovat saavuttaneet konkreettisia hyötyjä kehittämällä laadunvalvontaprosessejaan konenäkösovelluksien avulla.

## 6. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin konenäkösovelluksia valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa. Tutkimuksen ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää, millaisia konenäkösovelluksia valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa on käytetty. Toisena tavoitteena oli selvittää, minkälaisia parannuksia konenäkösovellusten avulla on saavutettu verrattuna ihmisen aistein suoritettuihin laadunvalvontamenetelmiin.

Työ tehtiin kirjallisuuskatsauksena ja sen avulla kerätyn tiedon perusteella työ jaettiin neljään käsittelylukuun. Työn toisessa luvussa käsiteltiin laadunvalvontaa yleisesti tuoden esille sen merkitys valmistavan teollisuuden yritykselle, sekä sen ongelmakohtia kuten ihmisen suorittamien laaduntarkastusten heikkoudet. Tämän lisäksi luvussa esiteltiin konenäköjärjestelmällä tehty laaduntarkastusketju ja sen vaiheet.

Kolmas luku on pohjustava luku konenäköjärjestelmistä. Luvussa esiteltiin myöhemmin neljännessä luvussa esiteltävien konenäkösovelluksien kannalta oleellinen pohjustava tekninen tieto konenäköjärjestelmistä, kuten yleisimmät järjestelmätyypit ja komponentit. Tämän lisäksi kolmannen luvun viimeisessä aliluvussa esitellään erilaisia konenäköjärjestelmän piirteitä sovelluksen ja kokoonpanon näkökulmasta. Neljännessä luvussa esiteltiin yleisiä konenäkösovelluksia, joita on käytetty valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa. Tässä luvussa esiteltiin erilaisten sovelluksien ominaispiirteitä ja niiden avulla saavutettuja hyötyjä esimerkkitapauksien kautta. Viidennessä luvussa koottiin yhteen kirjallisuuskatsauksen tulokset, tiivistäen millaisia konenäkösovelluksia on käytetty, ja minkälaisia hyötyjä niiden avulla on saavutettu.

Konenäköteknologiaa on hyödynnetty laajalti valmistavan teollisuuden laadunvalvonnassa eri teollisuuden aloilla. Konenäkösovelluksien avulla voidaan saavuttaa parannuksia olemassa olevaa laadunvalvontaprosessia automatisoimalla. Tämän kirjallisuuskatsauksen pohjalta voidaan todeta, että konenäkösovelluksien avulla on saavutettu esimerkiksi taloudellista ja laadullista hyötyä. Näiden hyötyjen lisäksi eri valmistusprosesseja on saatu tehokkaammiksi sekä työn kuormittavuutta laskettua.

## LÄHTEET

Anand, S. and Priya, L. (2020) *A Guide for Machine Vision in Quality Control*. New York: Chapman and Hall/CRC. DOI: 10.1201/9781003002826.

Basler (2023) *From Gigabit Ethernet and GigE Vision to 5GigE*. Saatavissa: <https://www.baslerweb.com/en/learning/gige/> (Viitattu: 14.12.2023).

Beyerer, J., Puente León, F. and Frese, C. (2016) *Machine Vision: Automated Visual Inspection: Theory, Practice and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-47794-6.

Bhanu Prasad, P., Radhakrishnan, N. and Bharathi, S.S. (2014) 'Machine Vision Solutions in Automotive Industry', in S. Patnaik and B. Zhong (eds) *Soft Computing Techniques in Engineering Applications*. Cham: Springer International Publishing (Studies in Computational Intelligence), s. 1–14. DOI: 10.1007/978-3-319-04693-8\_1.

Caldeira, T., Ciarelli, P.M. and Neto, G.A. (2020) 'Industrial Optical Character Recognition System in Printing Quality Control of Hot-Rolled Coils Identification', *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 31(1), s. 108–118. DOI: 10.1007/s40313-019-00551-1.

Chen, Y.-J., Tsai, J.-C. and Hsu, Y.-C. (2016) 'A real-time surface inspection system for precision steel balls based on machine vision', *Measurement Science and Technology*, 27(7), s. 074010. DOI: 10.1088/0957-0233/27/7/074010.

Cognex (2023) *Cognexin konenäkö tuotteet*. Saatavissa: <https://www.cognex.com/products> (Viitattu: 14.12.2023).

Frustaci, F., Perri, S., Cocorullo, G., Corsonello, P. (2020) 'An embedded machine vision system for an in-line quality check of assembly processes', *Procedia Manufacturing*, 42, s. 211–218. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.072.

G, D., Vaishnav, D.S. and Mohan, R. (2021) 'A Faster R-CNN Implementation of Presence Inspection for Parts on Industrial Produce', in *2021 Emerging Trends in Industry 4.0 (ETI 4.0)*. *2021 Emerging Trends in Industry 4.0 (ETI 4.0)*, s. 1–4. DOI: 10.1109/ETI4.051663.2021.9619228.

Hayes, A. (2021) *Quick Response (QR) Code: Definition and How QR Codes Work*, *Investopedia*. Saatavissa: <https://www.investopedia.com/terms/q/quick-response-qr-code.asp> (Viitattu: 12.12.2023).

*Laadunhallintajärjestelmät. Perusteet ja sanasto - Quality management systems. Fundamentals and vocabulary (ISO 9000:2015)* (2015). Standardi. SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS.

Memon, J., Sami, M., Khan, R., Uddin, M. (2020) 'Handwritten Optical Character Recognition (OCR): A Comprehensive Systematic Literature Review (SLR)', *IEEE Access*, 8, s. 142642–142668. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3012542.

Mukherjee, A., Chakraborty, A. and Garai, S.K. (2016) 'Essence of Quality Control in Small Manufacturing Industry', *IRA-International Journal of Technology & Engineering (ISSN 2455-4480)*, 3(3). DOI: 10.21013/jte.v3.n3.p12.

Ohno, H. (2017) 'Design of a coaxial light guide producing a wide-angle light distribution', *Applied Optics*, 56(14), s. 3977–3983. DOI: 10.1364/AO.56.003977.

Richter, J., Streitferdt, D. and Rozova, E. (2017) 'On the development of intelligent optical inspections', in *2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. *2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, s. 1–6. DOI: 10.1109/CCWC.2017.7868455.

Rosati, G., Boschetti, G., Biondi, A., Rossi, A. (2009) 'On-line dimensional measurement of small components on the eyeglasses assembly line', *Optics and Lasers in Engineering*, 47(3–4), s. 320–328. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2007.11.011.

Schuitemaker, R. and Xu, X. (2020) 'Product traceability in manufacturing: A technical review', *Procedia CIRP*, 93, s. 700–705. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.078.

Silva, R.L., Rudek, M., Szejka, A.L., Canciglieri, O.Jr. (2018) 'Machine Vision Systems for Industrial Quality Control Inspections', in P. Chiabert et al. (eds) *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0*. Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), s. 631–641. DOI: 10.1007/978-3-030-01614-2\_58.

Steger, C., Ulrich, M. and Wiedemann, C. (eds) (2018) *Machine vision algorithms and applications*. 2nd, completely revised and enlarged edition edn. Weinheim: Wiley-VCH.

Stemmer Imaging (2018) *The Imaging & Vision Handbook*.

Tricker, R. (2020) *Quality management systems: a practical guide to standards implementation*. Abingdon, Oxon ; Routledge.

Tsai, D. and Hsieh, Y. (2017) 'Machine Vision-Based Positioning and Inspection Using Expectation–Maximization Technique', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(11), s. 2858–2868. DOI: 10.1109/TIM.2017.2717284.

Wang, K., Bao, N., Wu, Z., Ran, X. (2017) 'Automatic separating, storing and counting system of Lego building block based on machine vision', in *2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. *2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, s. 544–549. DOI: 10.1109/ITNEC.2017.8284792.