



jamk

Teollisuuden konenäkö

Teoria, sovelluskohteet ja hyödyt

Miika Tuikkala

Opinnäytetyö, AMK

Syyskuu 2023

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma (AMK)

Tuikkala, Miika

Teollisuuden konenäkö. Teoria, sovelluskohteet ja hyödyt

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Heinäkuu 2023, 22 sivua.

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Konenäöllä tarkoitetaan teknologian alaa, jossa kone, useimmiten tietokone, hankkii sekä käsittelee saatua kuvadataa ihmissilmän tavoin. Kuvadatan avulla kone kykenee tekemään päätöksiä ja havaintoja vapauttaen ihmisen tekemästä tätä työtä. Konenäön apuna voidaan käyttää koneoppimista, joka kykenee oppimaan kuvadatasta ja tekemään johtopäätöksiä oppimansa perusteella tehden täten konenäköjärjestelmästä joustavamman.

Opinnäytetyön toimeksiantona oli tutkia sekä selvittää mitä konenäöllä pystytään tekemään ja miten sitä hyödynnetään tai voidaan hyödyntää teollisuudessa. Erityisesti konenäöllä kerättäviä eri datatyyppejä ja niiden hyödyntämistapoja toivottiin analysoitavan. Näkökulma ei ollut yhden teollisuudenalan kannalta vaan esimerkkejä haettiin monialaisesti. Opinnäytetyö toteutettiin kirjallisuuskatsauksena erityisesti aiheesta tehtyjen tutkimusten piiriin.

Konenäön hyödyntämisestä löytyi paljon erilaisia olemassa olevia esimerkkejä eri aloilta ja teoriataustaa konenäön eri järjestelmille. Valtaosa löydetyistä konenäköjärjestelmien esimerkeistä oli 2-ulotteisia järjestelmiä, mutta esimerkkejä myös 1- ja 3-ulotteisista järjestelmistä löytyi. 2-ulotteiset järjestelmät ovat yleisimpiä teollisuudessa niiden monipuolisuuden ja toteuttamisen helppouden takia verrattuna muihin järjestelmiin.

Konenäköjärjestelmät ovat monipuolisia ja koostuvat useista eri komponenteista. Suunnitellessa konenäköjärjestelmää on tärkeä ymmärtää selvästi mitä tehtäviä konenäön halutaan automatisoitavan sekä mitkä ovat vaatimukset kyseisen järjestelmän toteuttamiseen.

Avainsanat (asiasanat)

konenäkö, koneoppiminen, automaatio

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Ei salassa pidettäviä liitteitä

Tuikkala, Miika

Industrial machine vision, Theory, applications and benefits

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, July 2023, 22 pages.

Degree Programme in Electrical and Automation Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Machine vision refers to technology where a machine, usually a computer, acquires and handles image data as a human eye does. Using the acquired image data, the machine can make decisions and observations, thus removing the need for a human to carry out that task. Machine learning can be used alongside machine vision, allowing the machine to learn from acquired data, thus making the system more flexible.

The assignment for the thesis was to study machine vision as a whole and find out how it is or can be used to benefit industrial applications with special focus towards the different kinds of data collected by machine vision and how the collected data can be utilized. The focus of the study was not with a particular industry sector, examples were studied in many fields. The thesis was implemented as a review of literature with a focus on studies done in the field.

A great many examples of implemented machine vision systems were found from a variety of industry sectors as well as theory about different machine vision systems. Majority of the examples found were based on 2-dimensional machine vision systems, but some examples were also found concerning 1- and 3-dimensional systems. 2-dimensional systems are more common in industrial applications thanks to their versatility and ease of implementation as opposed to 1- and 3-dimensional systems.

Machine vision systems are versatile and are a sum of many different components. It is important to understand clearly the tasks desired to automate using machine vision and the requirements of the system when designing a machine vision system.

Keywords/tags (subjects)

computer vision, machine learning, automation

Miscellaneous (Confidential information)

No confidential information.

Sisältö

1	Johdanto	6
2	Aihealueen tietoperusta	7
2.1	Automaatio.....	7
2.2	Konenäkö.....	7
2.2.1	Konenäön määritelmä ja merkitys.....	7
2.2.2	Konenäköjärjestelmän toimintaperiaate.....	9
2.2.3	Konenäköjärjestelmän komponentit.....	9
2.2.4	Esimerkki konenäöllä toteutetusta laadunvalvontajärjestelmästä.....	10
2.3	Koneoppiminen	11
3	Konenäön datatyyppiä	12
3.1	Kuvadata.....	12
3.2	Paikoitusdata.....	13
4	Konenäön soveltaminen	13
4.1	Konenäköjärjestelmät	13
4.1.1	1-Ulotteinen järjestelmä.....	13
4.1.2	2-Ulotteiset järjestelmät.....	15
4.1.3	3-Ulotteiset järjestelmät.....	15
4.1.3.1	Stereonäkö.....	15
4.1.3.2	Laserskannaus.....	16
4.2	Tyypilliset teollisuuden alat sekä tehtävät konenäön soveltamiseen	17
4.2.1	Automaattinen On-site valvonta	19
4.2.2	Laadunvalvonta.....	20
4.2.3	Inventointi.....	21
4.2.4	Itseohjautuvat kuljetusvaunut (AGV)	22
5	Konenäön ohjelmistopuolen lähestymistavat	23
5.1	Rule based eli sääntöpohjainen konenäkö	23
5.2	Machine learning eli koneoppimisen konenäkö	23
6	Pohdinta	24
	Lähteet	26

Kuviot

Kuvio 1. Konenäkö verrattuna ihmisen näköaistiin (What Is Computer Vision? Meaning, Examples, and Applications in 2022 2022)	8
--	---

Kuvio 2. Konenäköä hyödyntävä tarttuja (Vision Guided Robotics Performs Intelligent Automation 2021)	10
Kuvio 3. Havainnollistava kuva laadunvalvonnasta (Introduction to Machine Vision 2018, 4) .	11
Kuvio 4. Alkuperäinen vs. segmentoitu kuva (Acharya 2023)	12
Kuvio 5. Viivakamera (SW-4000M-PMCL n.d.).....	14
Kuvio 6. Laadunvalvontaan käytettävän 1-ulotteisen konenäköjärjestelmän esimerkki (Introduction to Machine Vision 2018, 17)	14
Kuvio 7. Matriisi- vs viivakamera (Kwon & Ready 2015, 7)	15
Kuvio 8. Stereonäön malli (Introduction to Machine Vision 2018, 20)	16
Kuvio 9. Laserskannaustekniikoita, lentoaika vasemmalla ja vaihesiirto oikealla (Héno & Chandelier 2014, 89)	17
Kuvio 10. 7 vuoden CAGR-ennuste (Machine Vision Market Size & Share Analysis Report, 2030 n.d)	18
Kuvio 11. Konenäön globaali markkinakoko vuonna 2022 tehtävätyypeittäin (Machine Vision Market Size & Share Analysis Report, 2030 n.d)	19
Kuvio 12. YOLOv5-algoritmin toimintaperiaate (Hu ym. 2023, 2)	19
Kuvio 13. CCI negatiivinen ja positiivinen (Color measurement in fruits and vegetables n.d., 2)21	
Kuvio 14. Automatisoidun varaston konsepti (Vukićević ym. 301.)	22

1 Johdanto

Automaatio on lähivuosina ollut polttava puheenaihe. Ihmisen tekemän työn korvaaminen koneella on yleistynyt valtavasti ja tämä on huomattavissa jokapäiväisessä elämässä. Erityisesti konenäön ja -oppimisen saralla on tehty tämän vuosituhatosen puolella suuria harppauksia, jotka tekevät konenäkösovelluksista kannattavampia kuin ennen sekä mahdollistavat entistä monimutkaisempien työtehtävien automatisoimisen. Sovelluskohteen mukaan automatisoimisella saavutetaan hyötyjä kuten nopeus, tarkkuus ja turvallisuus.

Työn toimeksiantajalla, Elomatic Oy:llä, heräsi kiinnostus konenäköä ja -oppimista kohtaan, sillä heiltä puuttui tarkempi käsitys näistä teknologian alueista ja niiden yhdessä tuomista hyödyistä. Tavoitteena oli lisätä tietoa Elomaticilla konenäöstä ja -oppimisesta, josta tehtäväksi muodostui kehitettävän prosessin puutteen takia kirjallisuuskatsaus konenäön ja -oppimisen aihepiiriin. Yleisesti opinnäytetyön haluttiin selventävän konenäköön käytettäviä laitteita sekä ohjelmia ja antamaan yleiskuva siitä, mihin ja miten konenäköä voi hyödyntää.

Tutkimuskysymykset pelkistettynä olivat seuraavat:

- Mitä on konenäkö?
 - Mistä koostuu?
 - Mihin käytetään?
 - Miten hyödytään?

Tavoitteena oli tutkia jo olemassa olevia esimerkkejä ja pyrkiä niiden kautta vastaamaan näihin kysymyksiin. Opinnäytetyön aikana ei toteutettu haastatteluja, joiden kautta olisi pystytty vastaamaan tutkimuskysymyksiin tilastojen avulla. Tutkimuskysymyksiin haettiin vastauksia pääasiassa JAMK:n sähköisestä kirjastosta eettisiä periaatteita noudattaen. Väitteet siis perusteltiin omin sanoin käyttäen hyväksi olemassa olevia tutkimuksia ja tilastoja. Laittevalmistajien julkaisemat blogit ja artikkelit toivat vastauksia tutkimuskysymyksiin.

Elomatic Oy on vuonna 1970 perustettu suunnittelutoimisto, joka tarjoaa konsultointi-, suunnittelu-, tuotekehitys- ja projektinhallintapalveluita sekä tuotteita ja kokonaisratkaisuja asiakkailleen. Elomatic toimii muun muassa konevalmistus-, laitevalmistus-, meri-, offshore- ja prosessiteollisuuden alalla. (Tietoa meistä n.d.)

2 Aihealueen tietoperusta

2.1 Automaatio

Sana automaatio, englanniksi automation, tulee kreikan kielestä sanasta automatos, joka tarkoittaa itsenäisesti toimivaa. Tämä termi otettiin käyttöön Yhdysvaltojen autoteollisuudessa 1900-luvun puolivälissä kuvailemaan koneiden suorittamaa osien käsittelyä tuotantolaitteiden välillä ja näiden osien jatkuvaa työstämistä. Yleisesti automaation voi siis määritellä prosessina, joka toistaa ennalta määrättyjä toimintasarjoja käyttäen apunaan erilaisia työkaluja ja apuvälineitä. Prosessin automaation on kyettävä havaitsemaan mitä tehdään ja tekemään ratkaisuja, sekä näiden ratkaisujen avulla kontrolloimaan prosessia olemattoman tai vähäisen ihmisavustuksen avulla. Prosessin täyttäessä tämän määritelmän voidaan sen todeta olevan automatisoitu. (Gupta, Arora & Westcott 2017, 1–2.)

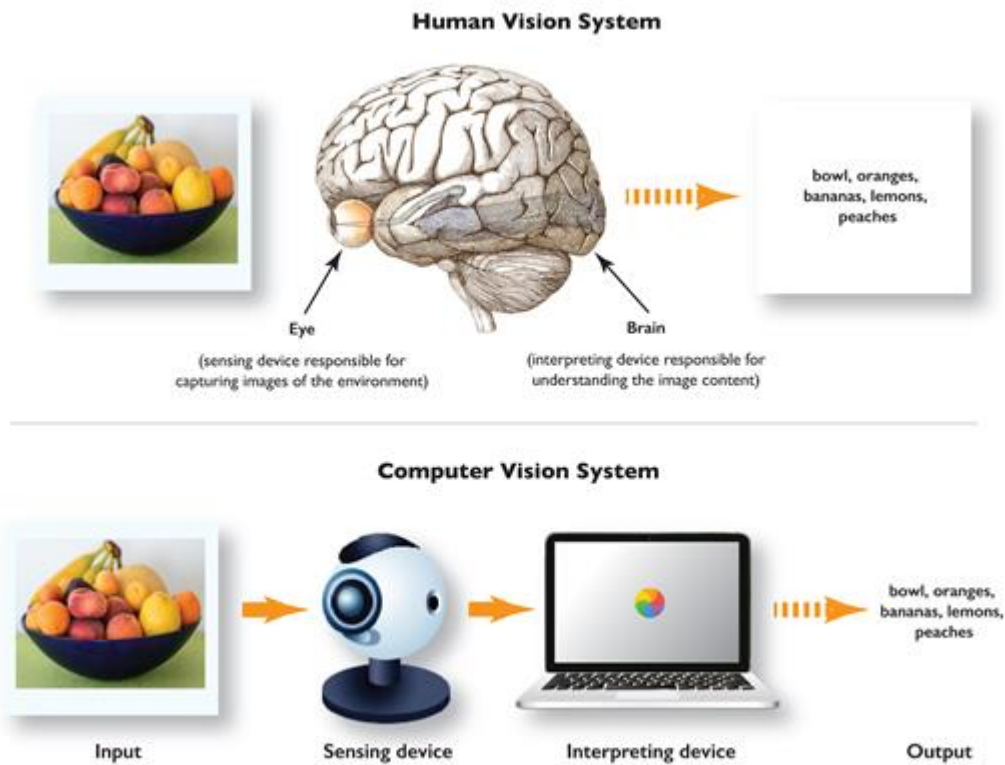
Automaatio usein sekoitetaan mekanisointiin. Mekanisoinnilla tarkoitetaan, teollistumisen aikaan tapahtunutta, ihmisen työskentelyn helpottamista moottorisoiduilla koneilla. Tätä termiä ei kuitenkaan käytetä käsikäyttöisistä koneista, esimerkiksi akkuporakoneesta, vaan teollisuuden koneista kuten höyrykäyttöisestä sorvista. Mekanisointi säästää toimintojen suorittamisessa aikaa näin ollen lisäten tehokkuutta sekä säästää ihmisen fyysiseltä rasitteelta. Automaatio taas säästää ihmisen ajattelemiselta, sillä automatisoitu prosessi pystyy päättämään itse tarvittavat jatko-toimenpiteet. (Gupta ym. 2017, 4.)

2.2 Konenäkö

2.2.1 Konenäön määritelmä ja merkitys

Konenäöllä, englanniksi machine vision, tarkoitetaan kameran tuomista silmiksi automaatiojärjestelmälle (ks. Kuvio 1). Kamera liitetään tietokoneeseen, joka toimii automaatiojärjestelmän aivoina analysoiden kameranlta saatua tietoa ja tehden tämän avulla päätöksiä prosessin ohjaamisesta. Teollisuudessa konenäköä käytetään yleensä joko arvioimaan tai ohjaamaan. Arvioiva konenäkö arvioi esimerkiksi liukuhihnalla liikkuvan tavaran laatua ja tekee päätöksen siitä, onko tavaran laatu vaaditulla tasolla vai onko tuote virheellinen. Ohjaava konenäkö taas käyttää kameranlta saa-

maansa ja analysoimaansa tietoa hyväksi esimerkiksi tavaran kokoamiseen. Konenäöllä on kannattavaa automatisoida työtehtävä, joka on altis inhimilliselle virheelle esimerkiksi sen vaikeuden tai pitkävetteisyyden takia. (Gupta ym. 2017, 429–430.)



Kuvio 1. Konenäkö verrattuna ihmisen näköaistiin (What Is Computer Vision? Meaning, Examples, and Applications in 2022 2022)

85 % tuotantovirheistä, tavaraerien takaisinvedosta ja laitteiden seisokkiajasta ruoka- ja juomateollisuudessa johtuu ihmisen tekemästä virheestä. Tällainen virhe voi olla esimerkiksi tuotantolinjaa valvovalta ihmiseltä huomaamatta jäänyt huonosti suljettu pakkaus, jonka takia elintarvike pilaantuu enneaikaisesti. Tietokoneen keskittyminen ei herpaannu, eikä se väsy. Konenäön avulla tietokone pystyy täydellä tehokkuudella tauotta, mikäli huoltotoimenpiteitä ei oteta huomioon, arvioimaan tuotteiden laatua. (Reducing errors with machine vision. 2022) Konenäön suorittamalla laadunvalvonnalla voidaan siis huomattavasti vähentää tuotannossa tapahtuvia virheitä.

2.2.2 Konenäköjärjestelmän toimintaperiaate

Konenäköjärjestelmälle määritetään tehtäviä ennalta, jotka tämän tulee hoitaa. Tällainen tehtävä voi olla esimerkiksi kappaleiden laskeminen liukuhihnalla ja näiden kappaleiden pinnan laadun tarkastaminen vaurioiden varalta tai kappaleessa olevan viivakoodin lukeminen. Konenäkö pystyy tarkkailemaan laatua sekä käsittelemään kappaleet nopeammin ja joustavammin kuin tavallinen optinen tai mekaaninen sensori. Tehtävän voi myös vaihtaa nopeasti tekemällä pieniä muutoksia ohjelmistopuoleen. Ohjelmistossa suoritettavat toimenpiteet ovat yleisesti seuraavat (Gupta ym. 2017, 430–431.):

- Kuvan hankinta (Image acquisition): Kuvataan haluttu alue ja tallennetaan kuva tietokoneelle.
- Kuvankäsittely (Image processing): Korostetaan kuvassa olevien kappaleiden ominaisuuksia konenäköohjelmalla.
- Ominaisuuksien poimiminen (Feature extraction): Rajataan prosessin näkökulmasta tärkeät osat ja ominaisuudet kappaleesta konenäköohjelmalla ja lähetetään tämä tieto prosessia ohjaavalle ohjelmalle. Näitä ominaisuuksia voivat olla esimerkiksi kappaleen pituus, leveys, muoto tai väri.
- Päätös ja ohjaus (Decision and control): Ohjausjärjestelmä tekee päätöksen siitä täyttääkö objekti määritetyt kriteerit ja sen perusteella suorittaa jatkotoimenpiteet. Yksinkertainen jatkotoimenpide voi olla esimerkiksi epäkelvon kappaleen ohjaaminen pois liukuhihnalta.

2.2.3 Konenäköjärjestelmän komponentit

Konenäköjärjestelmät usein koostuvat monista valmiiksi kootuista komponenteista. Kuvio 2 havainnollistaa valmista konenäkösovellusta, joka ohjaa tarttujarobottia. Kuviossa 2 näkyy suurin osa seuraavista komponenteista, jotka ovat yleisiä sekä lähes pakollisia konenäköjärjestelmää toteuttaessa (Gupta ym. 2017, 431.; What is a Frame Grabber and What's it Used For? 2018; Introduction to machine vision 2018, 16.; Vision Guided Robotics Performs Intelligent Automation 2021):

- Optinen anturi: Optisen anturin tehtävä konenäköjärjestelmässä on välittää tieto eteenpäin, että tarkastettava kohde on oikeassa asemassa kuvattavaksi. Anturilta saadun tiedon pohjalta laukaistaan kamera, jonka ottamaa kuvaa lähdetään tutkimaan.
- Kamera: Kamera saa optiselta anturilta käskyn ottaa kuvan kappaleesta. Kamera käyttää hyväkseen kuvankaappauslaitetta, jonka ottama kuva muunnetaan digitaaliseen muotoon ja tallennetaan tietokoneen muistiin jatkotutkimuksia varten.
- Kuvakaappauslaite (Frame grabber): Elintärkeä osa perinteisen kameran toimintaa. Frame grabber mahdollistaa korkean resoluution kuvien ottamisen halutusta kohteesta. Älykame-

rat eivät tarvitse kuvankaappauslaitetta toimiakseen, mutta niillä ei saada yhtä korkean resoluution kuvia kuin kuvankaappauslaitetta hyödyntämällä. Erilaisia kameramalleja ja kuvanhankintateknologioita tutkitaan myöhemmin opinnäytetyössä.

- Valaistus: Valaistus on tärkeä osa konenäköä ja riippuu hyvin paljon sovelluskohteesta. Valaistuksella pyritään lopputulokseen, jossa tutkittavan kohteen tärkeät ominaisuudet, kuten ääriviivat, ovat korostettuina ja selkeästi erottuvina.
- Ohjelmisto: Konenäköohjelma tuo kaikki muut osat yhteen. Sen sisällä käsitellään kuva ja korostetaan kuvassa olevat tärkeät ominaisuudet. Ohjelmisto manipuloi kuvaa sekä suorittaa ennalta määritetyt jatkotoimenpiteet.
- Digitaalinen laitteisto tai verkkoyhteys tulosten raportointiin: Edellä mainitusti konenäköjärjestelmän komponentit ovat usein valmiiksi koottuja, joten niiden liittäminen nopeasti ja yksinkertaisesti toisiinsa on tärkeää. Tämä voidaan toteuttaa erillisellä I/O signaalilla tai sarjakytkenällä laitteeseen, joka käyttää siltä saatavaa dataa.

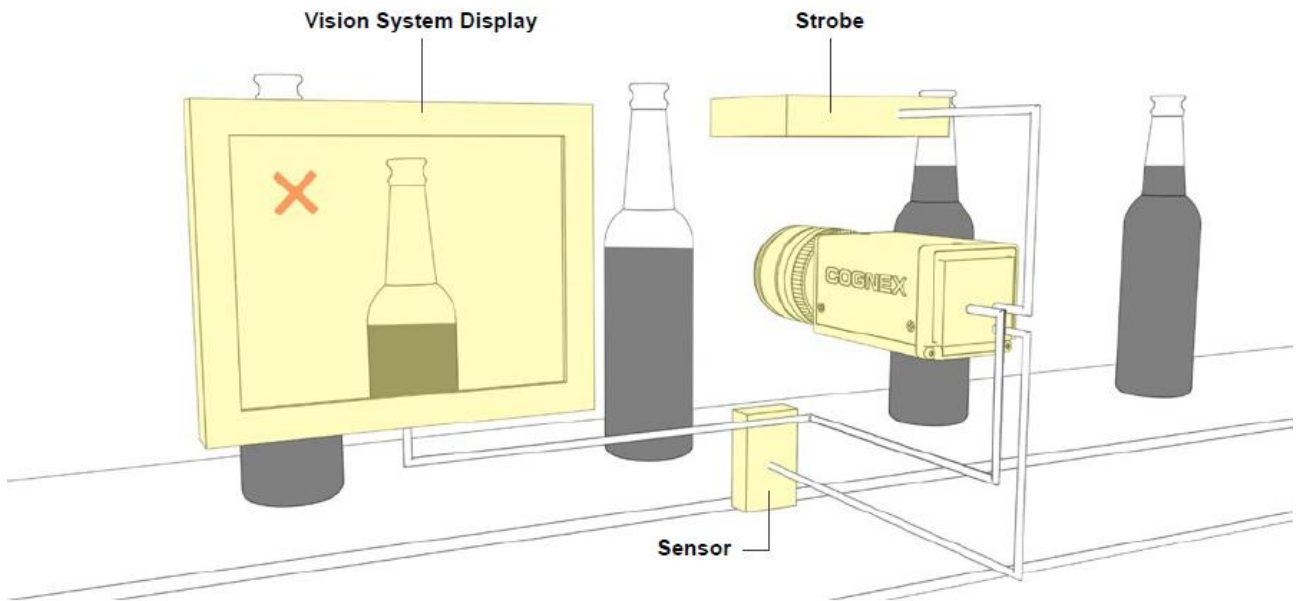


Kuvio 2. Konenäköä hyödyntävä tarttuja (Vision Guided Robotics Performs Intelligent Automation 2021)

2.2.4 Esimerkki konenäöllä toteutetusta laadunvalvontajärjestelmästä

Cognexin artikkelissa (2018, 3–4) käytetään havainnollistavana esimerkkinä kuviossa 3 esitettyä konenäkösovellusta. Kuvassa on esitetty liukuhihnalla liikkuvien pullojen laaduntarkastus, jossa läpäisykriteerinä on pinnankorkeus. Liukuhinnan rinnalle on asennettu optinen sensori, joka aktivoi kamerasen ja valolähteen (Strobe), kun pullo kulkee sensorin edestä. Otettu kuva säilötään tieto-

koneelle ja prosessoidaan konenäköohjelmalla, joka tekee päätöksen siitä, onko pullon pinnankorkeus tyydyttävä vai siirretäänkö vajavainen pullo pois liukuhihnalta. Liukuhihnan vierelle on myös lisätty näyttö, joka näyttää tilastotietoja viallisten ja viattomien tuotteiden määrästä. Tällä sovelluksella säästetään ihminen laaduntarkkailulta, tuotantomäärien kirjanpidolta sekä virheellisten tuotteiden linjalta poistamiselta.



Kuvio 3. Havainnollistava kuva laadunvalvonnasta (Introduction to Machine Vision 2018, 4)

2.3 Koneoppiminen

Ajatus koneoppimisen takana on opettaa tietokone suoriutumaan tehtävästä valmiiksi tehtyjä tietojoukkoja hyödyntäen, jotta tietokone jatkossa osaisi tunnistaa ja käyttää tehtävänratkaisuun sille ennalta tuntematonta tietoa. Tietokoneiden kehittyminen, sekä säilötyn datamäärän räjähdysmäinen kasvu, on lisännyt mahdollisuuksia käyttää koneoppimista ongelmakohtien ratkaisuun yhä useammassa sovelluskohteessa. (Louridas & Ebert 2016, 110–111.; Lakshmi & Shang 2020, Ch 3.)

Koneoppiminen jaetaan kahteen kategoriaan, valvottu- ja valvomaton oppiminen. Valvotussa oppimisessa konetta opetetaan valmiilla tietojoukolla, jonka lisäksi koneelle annetaan myös oikea vastaus ongelmaan. Valvomattoman oppimisen ero valvottuun on se, että valmista vastausta ei

enää anneta vaan kone on oppinut sille annetun tiedon perusteella tunnistamaan tai päättel-
mään oikean vastauksen. (Louridas ym. 2016, 111)

3 Konenäön datatyyppiä

Konenäön avulla voidaan kerätä yhtä lailla tietoa kuin mitä ihminen pystyy, usein myös nopeam-
min ja tarkemmin. Väri-, muoto-, mitta- sekä määrätieto ovat pintaraapaisu siihen, mitä tietoa saa-
daan konenäöllä kerättyä ja tallennettua. Seuraavissa kappaleissa analysoidaan kahta tuotantote-
ollisuudelle yleistä datatyyppiä.

3.1 Kuvadata

Kuvassa esiintyvät objektin sekä taustan ominaisuudet muodostavat kuvadatan. Kuvadataa voivat
olla esimerkiksi väri-, muoto-, mitta- ja lukumäärätieto. Kaikista kuvan objekteista ei välttämättä
ole tarpeellista saada tietoa tallennettua, esimerkiksi kuljetinhihnalla liikkuva tavara voi olla pro-
sessin kannalta tärkeä osa kuvaa, mutta itse hihna ei. Oleellinen osa kuvasta voidaan korostaa esi-
merkiksi segmentoimalla kuva. Segmentoimisella tarkoitetaan objektin tai objektien korostamista
esimerkiksi tuomalla taustan ja tarkasteltavan objektin värieron perusteella ääriiviat esiin (ks. Ku-
vio 4). (Acharya 2023; Hornberg 2017, 701–702.)



Kuvio 4. Alkuperäinen vs. segmentoitu kuva (Acharya 2023)

3.2 Paikoitusdata

Paikoitusdatalla tarkoitetaan konenäöllä saatavaa tietoa tarkasteltavan kappaleen olinpaikasta ja orientaatiosta. Paikkatiedon saamiseksi on määritettävä ennalta koordinaatisto tarkkailtavalle alueelle. Kun kuvadatasta saadaan kappale korostettua, näkyy sen olinpaikka suoraan koordinaatistolla sekä mihin kulmaan se on kääntynyt, mikäli se on oleellista tai mahdollista. (Hornberg 2017, 701–702.)

Paikoitusdatan kerääminen on erityisesti valmistusteollisuudessa tärkeää. Tuotannossa käytettävän konenäön tehtävä voi olla esimerkiksi kappaleen tunnistaminen ja paikoittaminen tarttujarobottia varten, joka saadun paikkatiedon perusteella kykenee poimimaan ja siirtämään kappaleen. Paikoitusdata mahdollistaa erilaisten robottien toimimisen prosessin osana ilman ihmisen avustusta riippumatta esimerkiksi siitä, miten päin tai missä kohtaa tuotantolinjaa tuote on, kunhan robotti vain ulottuu siihen. (Demant, Streicher-Abel & Garnica 2013, Ch 3.4.)

4 Konenäön soveltaminen

4.1 Konenäköjärjestelmät

Konenäköjärjestelmiä on 1-, 2- ja 3-ulotteisia (Introduction to Machine Vision 2018, 17). Seuraavissa kappaleissa analysoidaan näitä järjestelmiä, niiden vahvuuksia sekä kamerateknologiaa, joka on kullekin ulottuvuudelle ominaista.

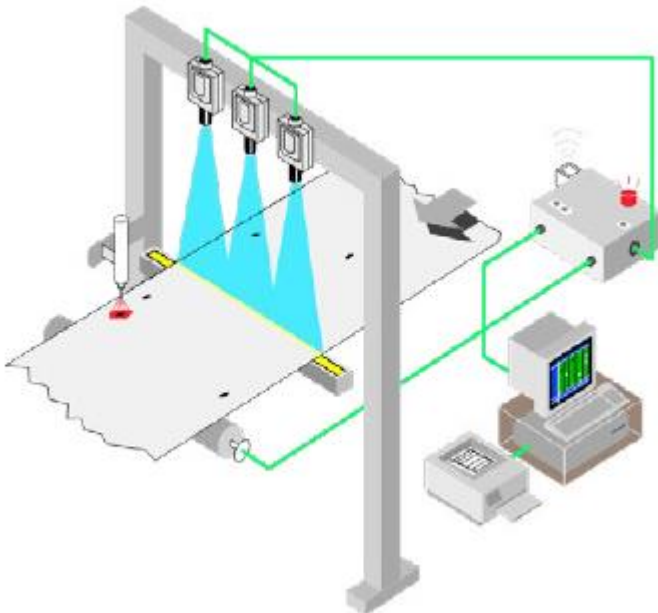
4.1.1 1-Ulotteinen järjestelmä

1-ulotteinen järjestelmä käyttää hyväksi viivakameraa (ks. Kuvio 5), joka koostaa analysoitavaksi 2-ulotteisen kuvan pikselirivi kerrallaan. Kwonin ja Readyn (2015, 6) mukaan 1-ulotteiset kamerat soveltuvat erinomaisesti kohteisiin, jossa kameraa liikutetaan tai tarkkailtava objekti liikkuu. Artikkelissa Introduction to Machine Vision (2018, 1,19) todetaan viivakameran hyödyllisyys liikkuvan objektin tarkkailun lisäksi esimerkiksi sylinterin muotoisten tai pallomaisten objektien tarkkailuun, jossa vaihtoehtoisesti matriisikameroita, joiden toimintaperiaatetta analysoidaan kappaleissa 4.1.2 ja 4.1.3, pitäisi olla useita sekä usealla puolella objektia. (Introduction to Machine Vision 2018, 17; Kwon & Ready 2015, 6.)



Kuvio 5. Viivakamera (SW-4000M-PMCL n.d.)

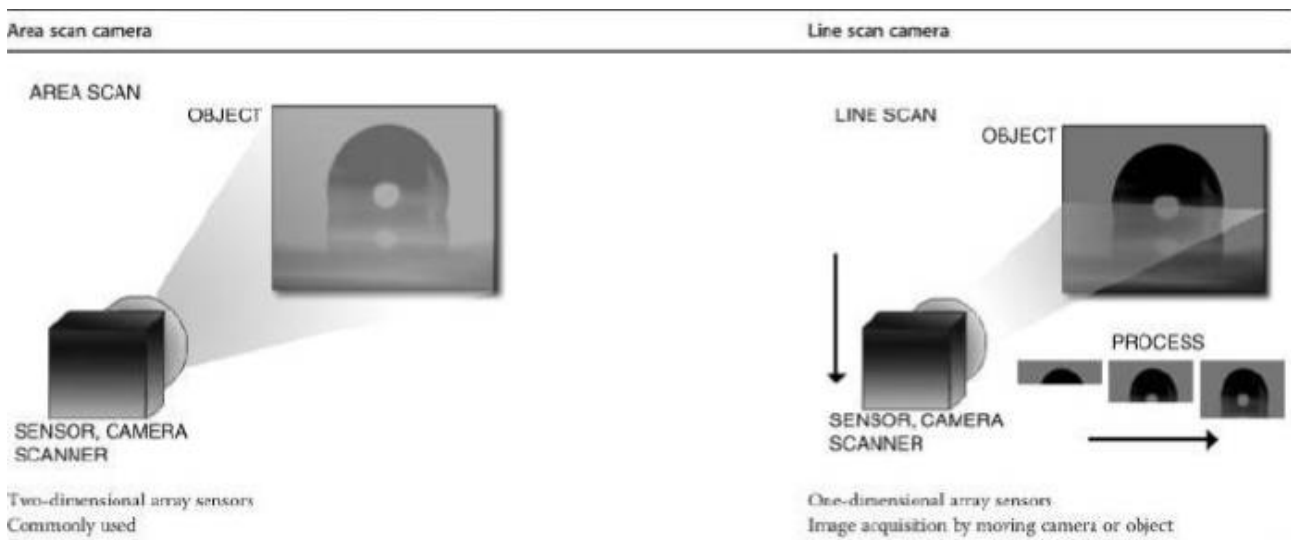
Kuvio 6 havainnollistaa prosessia, jossa tarkkailtavaa pinta-alaa liikkuu jatkuvasti kamerasensorin kattamalta leveysalueelta, josta järjestelmä koostaa rivi riviltä kuvaa. Mikäli levystä muodostetussa kuvassa havaitaan tuotantovirhe, saadaan siitä välitön ja automaattinen palaute.



Kuvio 6. Laadunvalvontaan käytettävän 1-ulotteisen konenäköjärjestelmän esimerkki (Introduction to Machine Vision 2018, 17)

4.1.2 2-Ulotteiset järjestelmät

2-ulotteisen järjestelmän on mahdollista käyttää hyväkseen viiva- tai matriisikameraa. Matriisikamerat ovat konenäkösovelluksissa viivakameroita yleisemmin käytössä ja verrattuna viivakameraan, kykenevät ottamaan kuvan useammasta pikselirivistä kerralla yhden rivin sijaan (ks. Kuvio 7). (Kwon & Ready 2015, 6.)



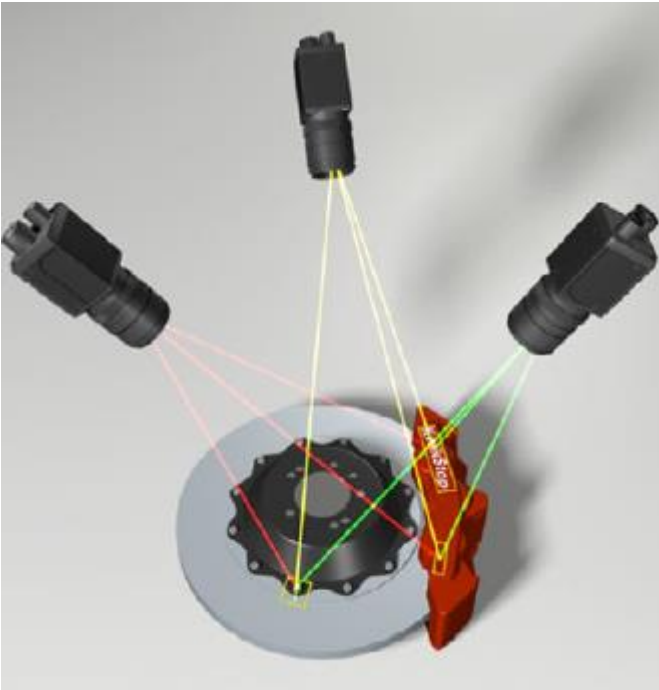
Kuvio 7. Matriisi- vs viivakamera (Kwon & Ready 2015, 7)

Aiemmin todetusti viivakamerat soveltuvat parhaiten tilanteisiin, jossa tarkkailtavalla objektilla on tietty leveys, mutta korkeuden voidaan mieltää olevan ääretön. Tästä tullaan johtopäätökseen, että matriisikamerat soveltuvat tilanteisiin, jossa tarkkailtava objekti, tai sen osa, mahtuu kokonaisuudessaan kameran kattaman alan sisään, eli sillä on tietty leveys sekä korkeus.

4.1.3 3-Ulotteiset järjestelmät

4.1.3.1 Stereonäkö

3-ulotteisten järjestelmien kuvanmuodostusperiaate, perinteistä kamerakuvaamista hyödyntäen, perustuu yleisesti stereonäköön. Stereonäöllä tarkoitetaan konenäkössä kahden tai useamman kameran käyttämistä objektin kuvaamiseen sen eri puolilta (ks. Kuvio 8). Triangulaation, eli kuvakulmien yhdistämisen, avulla saadaan muodostettua objektista 3-ulotteinen malli. (Introduction to Machine Vision 2018, 20.; Zhong & Quan 2018, 1474.)



Kuvio 8. Stereonäön malli (Introduction to Machine Vision 2018, 20)

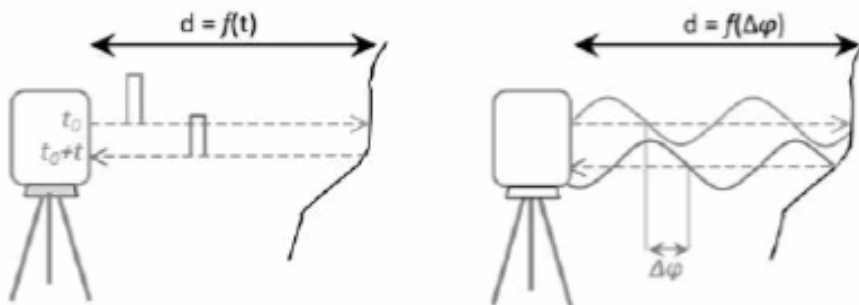
Stereonäköä voidaan hyödyntää navigointityökaluna robotilla (Zhong & Quan 2018, 1474). Kuviossa 8 esitetty objekti sisältää korkeuseroja ja erilaisia muotoja, jotka saadaan kartoitetuksi sen eri puolille asetettujen kameroiden avulla. Muodot voivat tuottaa ongelmia esimerkiksi robotille, jonka tehtävä on tarttua ja siirtää objekti paikasta A paikkaan B. Stereonäöllä saatuja muoto- ja orientaatiotietoja pystyy robotti hyödyntämään objektiin tarttuessaan ja sitä siirtäessään.

4.1.3.2 Laserskannaus

Laserskannaaminen perustuu laserin lähettämiseen ja sen vastaanottamiseen. Laser heijastuu takaisin tarkasteltavasta kohteesta, jolloin heijastuspisteen koordinaatti jää muistiin. Heijastuspisteiden summaa kutsutaan pistepilveksi ja ne muodostavat 3-ulotteisen mallin tarkasteltavan kohteen pinnasta. Pisteitä on mahdollista saada jopa miljoonia sekunnissa sekä värillisenä, mikäli laserin lisäksi käytetään kameraa. (Héno & Chandelier 2014, 86–88.; 3D Laser Scanning Explained n.d.)

Vastaanotetun laserin hyödyntämiseen on erilaisia tekniikoita, joista kahta kuvio 9 havainnollistaa. Kuvion vasen laita havainnollistaa lentoaikaan (Time-of-Flight) perustuvaa tekniikkaa, joka laskee etäisyyden pisteeseen laserin palaamiseen käytetyn ajan perusteella. Oikealla on havainnollistettu

vaihesiirtoon (Phase shift) perustuvaa tekniikkaa, joka laskee pisteen etäisyyden vertaamalla lähtevän- ja palaavan laserin vaiheita toisiinsa. (Héno & Chandelier 2014, 87–89.)

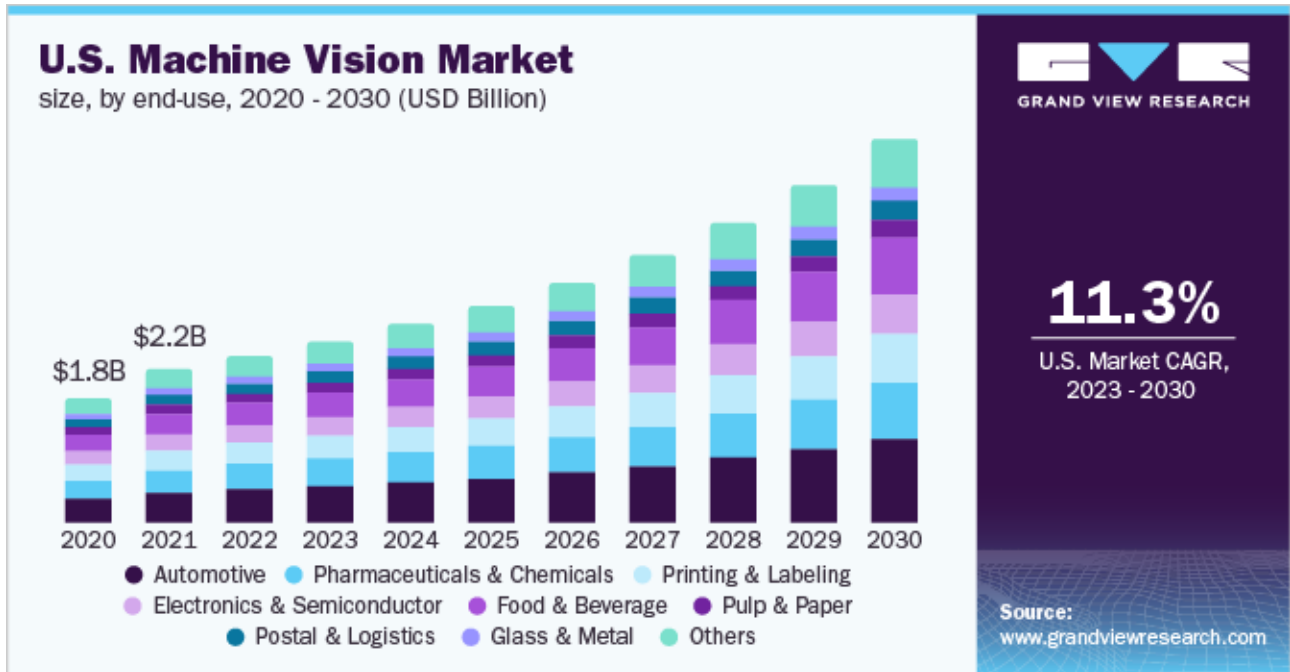


Kuvio 9. Laserskannaustekniikoita, lentoaika vasemmalla ja vaihesiirto oikealla (Héno & Chandelier 2014, 89)

Laserskannaamista hyödynnetään erityisesti rakennusteollisuudessa, jossa rakennuksen mitat ja muodot saadaan tarkasti ja nopeammin kuin perinteisen takymetrin tai kuvamittauksen avulla. Laserskanneri voi olla liikuteltava tai paikalleen asennettava. Liikuteltava laserskanneri mahdollistaa jatkuvan mittauksen liikkeen aikana, jolloin huoneesta huoneeseen siirtyminen on nopeaa ja esimerkiksi kokonaisen toimistokompleksin mallintaminen on moninkertaisesti nopeampaa kuin paikalleen asennettavalla laserskannerilla. Paikalleen asennettavalla laserskannerilla etuna verrattuna liikuteltavaan on korkeampi mittaustarkkuus. Liikuteltavia laserskannereita voidaan asentaa myös lentokoneisiin tai satelliitteihin. (Héno & Chandelier 2014, 85–86.; Higgins 2020.)

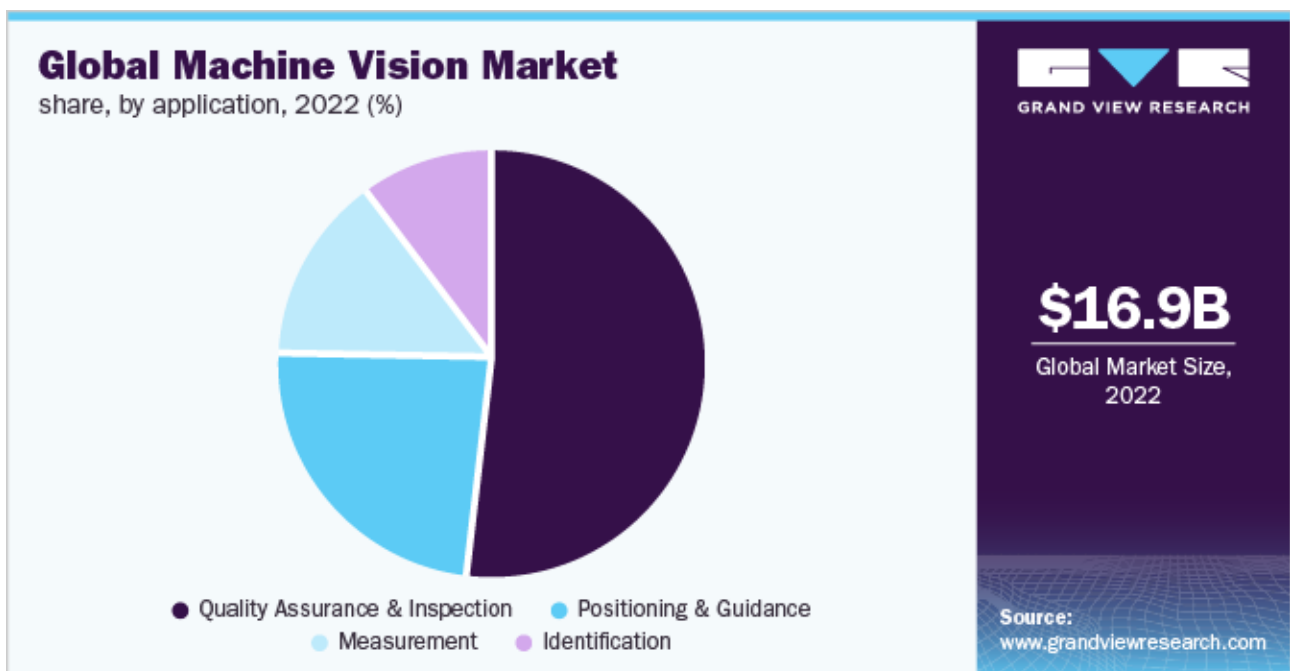
4.2 Tyypilliset teollisuuden alat sekä tehtävät konenäön soveltamiseen

Konenäön sovelluskohteissa on mielikuvitus rajana. Useilla teollisuuden aloilla on parannettu tuotavuutta ja varmuutta konenäköä hyödyntämällä. Konenäön maailmanlaajuinen markkinakoko vuonna 2022 oli 16,89 miljardia Yhdysvaltain dollaria. Grand View Research (n.d), vedoten tutkimuslukuksiinsa, ennustaa konenäön globaalimarkkinakoon kasvavan vuosittain 12,3 % aikavälillä 2023–2030. Kuviossa 10 esitetään aikavälin 2023–2030 alakohtainen vuosittainen kasvuennuste Yhdysvaltojen markkinoilla. (Machine Vision Market Size & Share Analysis Report, 2030 n.d.)



Kuvio 10. 7 vuoden CAGR-ennuste (Machine Vision Market Size & Share Analysis Report, 2030 n.d)

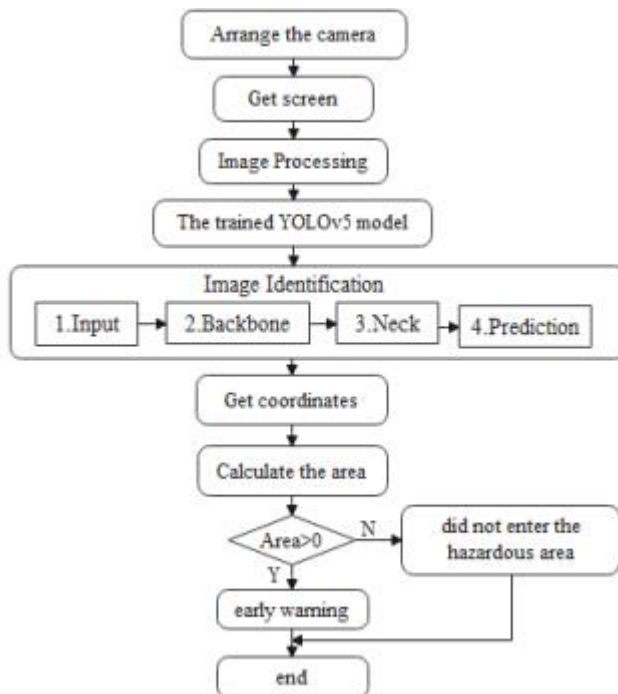
Vuoden 2022 konenäön maailmanlaajuisesta markkinakoosta laadunvalvonnan sovellukset kattoivat yli puolet (ks. Kuvio 11) (Machine Vision Market Size & Share Analysis Report, 2030 n.d). Konenäöllä voidaan kuitenkin automatisoida muitakin tehtäviä, kuin pelkkä laadunvalvonta. Seuraavissa kappaleissa tutkitaan eri teollisuudenaloille tyypillisiä tehtäviä ja miten konenäköä hyödynnetään näiden tehtävien suorittamisessa.



Kuvio 11. Konenäön globaali markkinakoko vuonna 2022 tehtävätyypeittäin (Machine Vision Market Size & Share Analysis Report, 2030 n.d)

4.2.1 Automaattinen On-site valvonta

Hun, Lin, Wangin, Fanin ja Longin (2023, 1–3) mukaan iso osa työpaikkaonnettomuuksista rakentamisteollisuuden alalla johtuu ihmisen huolimattomuudesta työmaalla. Henkilö saattaa huomata olla vaarallisella alueella, josta koitua onnettomuus voidaan välttää tehostamalla näiden alueiden valvontaa konenäön avulla. Tutkimuksessa käytetyn YOLOv5-algoritmin toimintamalli on havainnollistettu kuviossa 12. (Hu, Li, Wang, Fan & Long 2023, 1–3.)



Kuvio 12. YOLOv5-algoritmin toimintaperiaate (Hu ym. 2023, 2)

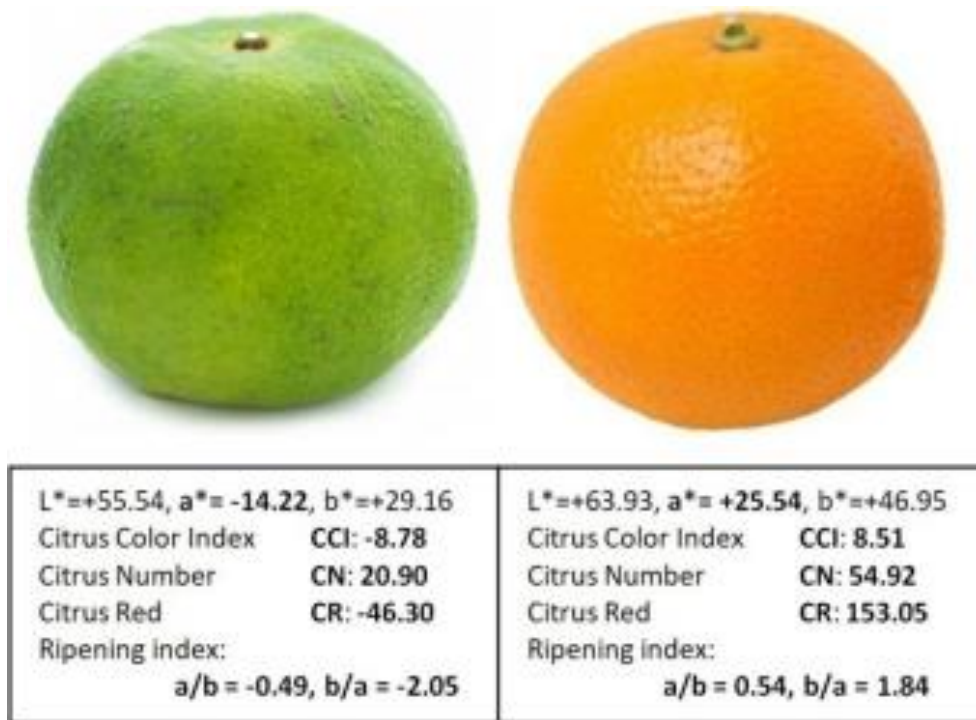
Algoritmin toimintaperiaate on tilan jatkuva kamera-avusteinen valvonta sekä tämän tilan vaarapaikkojen kartoitus ja työskentelevien henkilöiden tunnistus. Lopputulema on varoituksen antaminen, mikäli algoritmi havaitsee henkilön vaarallisella sektorilla. (Hu ym. 2023, 1–3)

4.2.2 Laadunvalvonta

Laadunvalvonta on tärkeä osa tuotantoprosessia, jolla taataan tuotteen laadun olevan markkinkelpoista, sekä ennakoidaan valmistusprosessissa esiintyviä ongelmia. Konenäöllä tehtävä laadunvalvonta on tuotteen ulkoisten ominaisuuksien arvioimista, josta ei koidu vahinkoa tuotteelle. Konenäön tekemä laadunarviointi on myös täysin yhdenmukaista toisin kuin ihmisen tekemä laadunarviointi, joka voi kärsiä henkilön vireystilasta tai yleisestä ymmärryksestä. (Cubero, Lee, Aleixos, Albert & Blasco 2016, 1623–1625.)

Konenäkö on kätevä lähestymistapa esimerkiksi sitrushedelmien laadun arvioinnissa. Laadun arviointia voidaan toteuttaa hedelmän vielä ollessa kypsymisvaiheessa mahdollistaen täten esimerkiksi kypsyymisen arvioinnin hedelmän värin perusteella tai ennakoivat toimenpiteet sadon muussa tapauksessa saastuttavan taudin kitkemiseksi. Kuvio 13 havainnollistaa kuvadatassa esiintyvien hedelmien värien vertailua. Väristä voidaan päätellä hedelmän kypsyys matemaattisen kaavan avulla. Kaava on citrus colour index (CCI), joka määritellään $CCI = \frac{1000 * a}{L * b}$, jossa L, a ja b ovat HunterLab

väriavaruuden koordinaatit. CCI negatiiviset arvot tarkoittavat vihreää eli raakaa hedelmää ja positiiviset oranssia eli kypsää hedelmää. (Cubero ym. 2016, 1623–1625.; Color measurement in fruits and vegetables n.d., 1–2)



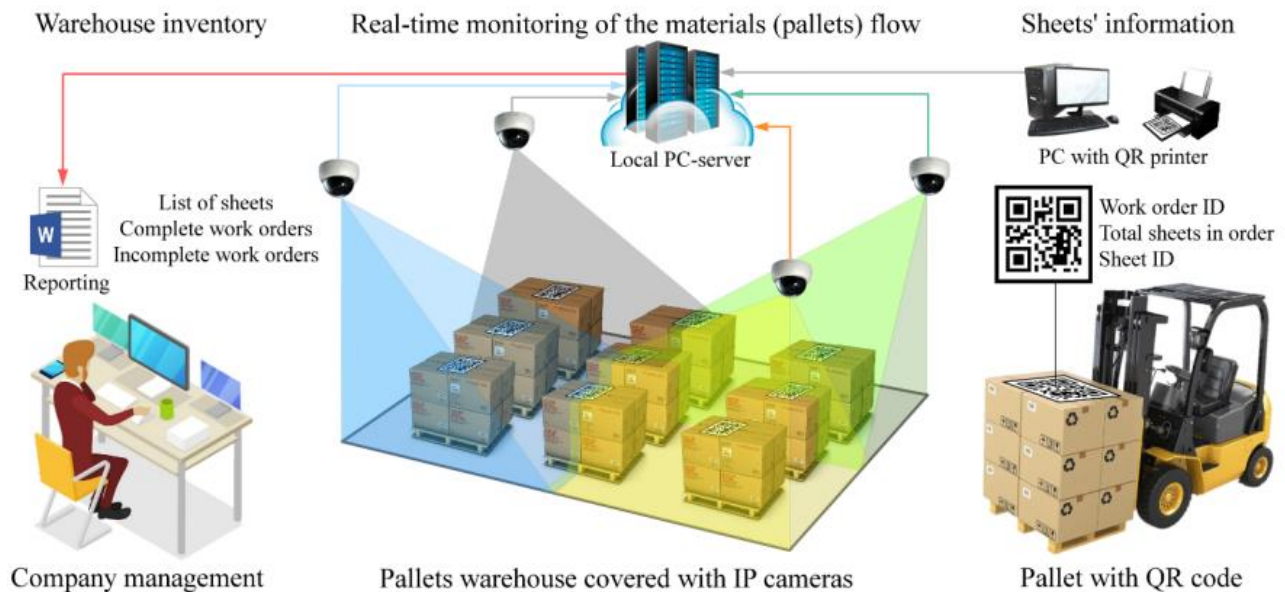
Kuvio 13. CCI negatiivinen ja positiivinen (Color measurement in fruits and vegetables n.d., 2)

4.2.3 Inventointi

Tavaran valmistamiseen sekä jakelemiseen erikoistuneet yritykset joutuvat päivittäin kamppailemaan tavaran käsittelemisestä koituvien ongelmien kanssa. Näiden yritysten menestys on paljon riippuvainen raaka-aineiden sekä tuotteiden sujuvasta ja jatkuvasta liikkumisesta toimitusketjussa. Konenäköä hyödyntämällä voidaan tavaran seuraaminen varastorakennuksessa automatisoida käyttämällä ruutukoodeja (QR-code) tavaraerien seuraamiseen välttyen täten epätoivotuilta inventaariomääriltä, jotka voivat johtua esimerkiksi tuotteen liika valmistamisesta tai tarpeettoman määrän raaka-ainetta tilaamisesta. (Vukićević, Mladineo, Banduka & Mačužić 2021, 297–298.)

Vukićevićin, Mladineon, Bandukan ja Mačužićin (2021, 300–301) case-tutkimuksessa luotiin kuviossa 14 esitetty konenäön ja ruutukoodien avulla automatisoidusta varastosta. Varaston

katossa sijaitsevien verkkokytettä perustuvien kameroiden avulla saataisiin jatkuva tieto varaston sisällöstä. Kameran lukisivat ruutukoodista tiedon kullakin lavalla olevasta tavarasta, kuten sen määrän, tyyppin ja sijainnin varastossa. Tämän avulla johtoporras kykenisi tarkastelemaan raporteista kunkin työtilauksen tilanteen ja näin ollen erottelemaan valmiit tilaukset keskeneräisistä. Väärässä paikassa sijaitsevat tai hukassa olevat tavaralavat voivat aiheuttaa jopa tuntien hidastuksen tuotantoon, jolta voidaan välttyä konenäköpohjaisella valvonnalla. (Vukićević ym. 300–301.)



Kuvio 14. Automatisoidun varaston konsepti (Vukićević ym. 301.)

4.2.4 Itseohjautuvat kuljetusvaunut (AGV)

Itseohjautuvat kuljetusvaunut käyttävät konenäköä ja -oppimista hyväksi reitin ja reitillä olevien esteiden määrittämiseen. Kuljetusvaunuissa on tietokone ja kamera asennettuna, jotka mahdollistavat jatkuvan muutokseen reagoimismahdollisuuden vaunulle. Itseohjautuvia kuljetusvaunuja käytetään muun muassa varastorakennuksissa automaattiseen tavaransiirtoon. (Feng & Jiao 2017, 1.)

5 Konenäön ohjelmistopuolen lähestymistavat

5.1 Rule based eli sääntöpohjainen konenäkö

Sääntöpohjaisella konenäöllä tarkoitetaan sovellusta, jossa määritellään prosessin eteneminen loogisesti. Prosessi pohjautuu karkeasti sääntöihin, jossa tietyn asian tapahtuessa tai säännön täytyessä suoritetaan seuraava askel. Rule-Based vs. AI-Based Machine Vision (2023) sekä Swaminathanin (n.d) artikkeleissa ollaan yhtä mieltä siitä, että sääntöpohjainen konenäkö on helppo ymmärtää ja nopea toteuttaa. Sääntöpohjaiset ratkaisut ovat erinomaisia tilanteisiin, joissa vaaditaan nopeutta ja toistettavat työvaiheet pysyvät samana. (Swaminathan n.d; Rule-Based vs. AI-Based Machine Vision 2023.)

Muuttujien suuri määrä on isoin haaste sääntöpohjaiselle konenäölle, sillä jokainen muuttuja on kyettävä ohjelmaa tehdessä ennakoimaan ja niille on luotava toimenpiteet tai säännöt. Mitä enemmän määriteltäviä toimenpiteitä, sitä vaikeammaksi seuraavan muuttujan määrittely muuttuu. (Swaminathan n.d.)

5.2 Machine learning eli koneoppimisen konenäkö

Koneoppimista hyödyntävälle konenäölle ei tarvitse erikseen määritellä sääntöjä, joiden pohjalta päätökset tehdään. Kone kykenee itse aiempaa tietoa analysoimalla tunnistamaan ja luokittelemaan kuvaamansa tuotteet. Swaminathan (n.d) kokeekin erään koneoppimisen suurimmista hyödyistä olevan sen sopeutumiskyky muuttuvaan ympäristöön. Algoritmien avulla kone oppii jatkuvasti uudesta datasta, kunhan radikaaleja muutoksia tunnistettaviin objektiivisiin ei tule. (Swaminathan n.d; Rule-Based vs. AI-Based Machine Vision. 2023)

Koneoppiminen pystyy oppimaan datasta vain, jos se on sille tuttua. Mikäli opettamiseen käytetyillä datapaketeilla on opetettu konenäkö tunnistamaan ainoastaan henkilöautoja, loogisesti se ei kykene tunnistamaan kaivinkonetta. Kone on myös altis tekemään virheitä, mikäli opettamiseen käytetty datamäärä on liian pieni. (Swaminathan n.d; Rule-Based vs. AI-Based Machine Vision. 2023)

6 Pohdinta

Opinnäytetyössä lähdettiin tutkimaan konenäköä ja -oppimista teollisuudessa. Käsiteltäviä aiheita olivat yleistetysti laitteet, ohjelmat, sovelluskohteet ja konenäön tuoma hyöty. Toimeksiantajan puolelta tuli toive, ettei keskityttäisi vain tiettyyn teollisuudenalaan vaan analysoitaisiin konenäön käytettävyyttä ja hyötyjä monen eri teollisuudenalan kannalta.

Tuloksena oli kattava kirjallisuuskatsaus toivottuihin aihealueisiin. Tutkittavia aiheita oli paljon ja niistä tärkeimpien asioiden ulostuonti loi omat haasteensa. Opinnäytetyöstä selviää yleisellä tasolla automaation, konenäön ja -oppimisen toimintaperiaatteet ja esimerkkejä sovelluskohteista. Konenäköä tutkittiin eniten, sillä toimeksiannon pohjalta konenäkö kokonaisuutena oli tärkein käsiteltävä asia.

Työn toteutuksen aikana tapahtui eräänlainen uudelleenohjaus aiheen osalta. Alun perin koneoppiminen oli yhtä tärkeässä asemassa kuin konenäkö ja opinnäytetyön aihe muistutti enemmän opasta koneoppimista hyödyntävän konenäköjärjestelmän luontiin. Tarvetta tällaiselle ei kuitenkaan ollut ja opinnäytetyön suuntaa korjattiin kohti konenäköä yleisellä tasolla, jossa koneoppiminen oli sivuaiheena.

Koneoppimisen osuus jäi työssä konenäön käsittelemisen varjoon toivottua enemmän. Koneoppiminen on hyvin monimutkainen teknologian alue, jonka syvemmin tutkiminen olisi vaatinut erilaisien algoritmien analysoimista. Tämä olisi ajanut opinnäytetyön väärään suuntaan ja tehnyt siitä tarpeettoman yksityiskohtaisen koneoppimisen osalta. Oleellista oli ymmärtää, missä sovelluskohteissa konenäöstä hyödytään sen sijaan, että olisi tarkkaan keskitytty siihen, mitä algoritmeja hyödyntäen saadaan konenäkö toimimaan sovelluskohteessa. Koneoppiminen on hyödyllistä teknologiaa konenäön kannalta, niinpä sen esitleminen ja pääpiirteittäin tutkiminen oli tärkeä osa työtä, vaikka yleiselle tasolle jäikin.

Luotettavuudelle ja eettisyydelle suurin riskitekijä oli aiheen laajuus. Ennalta mainitusti työn aikana tapahtui uudelleenohjaus, jolle syynä oli väärinymmärrys ja osittain aiheen rajaamisessa epäonnistuminen. Tietoa aiheesta on paljon, joten sen rajaaminen tuotti vaikeutensa, mutta siinä lopulta onnistuttiin.

Tietolähteinä käytettiin pääasiassa vertaisarvioituja tutkimuksia ja kirjallisuutta liittyen aiheeseen, mutta myös blogikirjoituksia. Blogikirjoitusten osalta käytettiin vain kirjoituksia, joille löytyi henkiloitekirjia tai julkaisun takana oli hyvämaineinen ja alalla tunnettu organisaatio tai laitevalmistaja.

Yleisesti ottaen opinnäytetyö onnistui hyvin, mutta laajuudeltaan jäi uupumaan. Tuloksena syntyi toivottu ja luotettaviin lähteisiin perustuva yleiskatsaus, joka vaatii mielenkiintoa aihetta kohtaan ja mielikuvitusta konenäkösovelluksen suunnitteluun ja ideointiin.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, erityisesti kappaleessa 4.2 analysoituun tutkimukseen viitaten, että konenäön markkinat ovat olleet ja tulevat todennäköisesti olemaan kasvussa ainakin kuluvan vuosikymmenen aikana. Erityisesti, mutta rajaamatta kuitenkaan niihin, valmistusteollisuuden laaduntarkkailun tehtävien osalta on kannattavaa vähintäänkin perehtyä konenäön hyötyihin ja niiden automatisoinnin vaativiin askeliin.

Toimeksiantaja voi hyödyntää opinnäytetyön tuloksia ensiaskeleena konenäköön perehtymiseen, toki tämän hyödyllisyyttä on vaikea lähteä analysoimaan. Työn avulla voi saada ohjausta oikeaan suuntaan, kun harkitsee konenäön lisäämistä jonkin prosessin tueksi. Jatkokehitystä opinnäytetyölle voisi olla syventyminen tällaisen lisäyshankkeen suunnitteluun tai toteutukseen.

Lähteet

3D Laser Scanning Explained. N.d. Artikkele. Viitattu 20.9.2023. <https://www.gp-radar.com/article/3d-laser-scanning-explained>.

Acharya, A. 2023. Guide to Image Segmentation in Computer Vision: Best Practices. Viitattu 27.4.2023. <https://encord.com/blog/image-segmentation-for-computer-vision-best-practice-guide/>.

Color measurement in fruits and vegetables: Measure Citrus Color Index (CCI), Ripening Index (RI), Tomato Color Index (TCI) and do more with Sensegood Spectrophotometer. N.d. Artikkele. Viitattu 6.9.2023. <https://www.sensegoodinstruments.com/color-measurement-fruits-vegetables.php>.

Cubero, S. Lee, W.S. Aleixos, N. Albert, F. & Blasco, J. 2016. Automated Systems Based on Machine Vision for Inspecting Citrus Fruits from the Field to Postharvest—a Review. Food Bioprocess Technology 9. 1623–1639.

Demant, C. Streicher-Abel, B. & Garnica, C. 2013. Industrial Image Processing Visual Quality Control in Manufacturing. 2. p. Berlin, Heidelberg: Springer.

Feng, T. & Jiao, B. 2017, The vision guidance and image processing of AGV. Journal of Physics. Conference Series. vol. 887. no. 1.

Gupta, A.K. Arora, S.K. & Westcott, J.R. 2017. Industrial Automation and Robotics. Mercury Learning and Information.

Héno, R. & Chandelier, L. 2014. 3D Modeling of Buildings: Outstanding Sites. John Wiley & Sons, Incorporated

Higgins, S. 2020. 5 reasons why it's time to invest in mobile mapping. Blogi. Viitattu 20.9.2023. <https://www.navvis.com/blog/5-reasons-why-its-time-to-invest-in-mobile-mapping>.

Hornberg, A. 2017. Handbook of Machine and Computer Vision: The Guide for Developers and Users. 2. p. Somerset: John Wiley & Sons.

Hu, R. Li, F. Wang, T. Fan, H. & Long, D. 2023. Research on Intrusion Identification of Hazardous Construction Areas Based on Machine Vision. Journal of Physics. Conference Series. vol. 2435. no. 1.

Introduction to Machine Vision. 2018. Cognex. Artikkele.

Kwon, K. & Ready, S. 2015. Practical Guide to Machine Vision Software: An Introduction with LabVIEW. John Wiley & Sons.

Lakshmi, G. & Shang, M. 2021. Hands-on Supervised Learning with Python: Learn How to Solve Machine Learning Problems with Supervised Learning Algorithms Using Python. BPB Publications.

Louridas, P. & Ebert, C. 2016. Machine Learning. Vol. 33. No. 5. IEEE Software.

Machine Vision Market Size & Share Analysis Report, 2030. N.d. Tutkimustiivistelmä. Viitattu 12.9.2023. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/machine-vision-market>.

Rule-Based vs. AI-Based Machine Vision. 2023. Artikkel. Viitattu 12.4.2023. <https://www.automate.org/editorials/rule-based-vs-ai-based-machine-vision>.

Reducing errors with machine vision. 2022. Blogi. Viitattu 8.3.2023. <https://www.beckhoffblog.co.uk/post/reducing-errors-with-machine-vision>.

Swaminathan, V. N.d. The Conundrum of Using Rule-Based vs. Machine Learning Systems. Artikkel. Viitattu 12.4.2023. <https://www.zucisystems.com/blog/the-conundrum-of-using-rule-based-vs-machine-learning-systems/>

Sweep Series SW-4000M-PMCL 4K monochrome line scan. N.d. Tuote-esite. Viitattu 5.9.2023. <https://www.jai.com/products/sw-4000m-pmcl>

Tietoa meistä, N.d. Artikkel. Viitattu 22.5.2023. <https://www.elomatic.com/fi/tietoa-meista/>

Vision Guided Robotics Performs Intelligent Automation. 2018. Artikkel. Viitattu 24.8.2023. <https://metrology.news/vision-guided-robotics-performs-intelligent-automation/>

Vukićević, A. Mladineo, M. Banduka, N. & Mačužić, I. 2021. A smart Warehouse 4.0 approach for the pallet management using machine vision and Internet of Things (IoT): A real industrial case study. Vol. 16. Iss. 3. Maribor: Advances in Production Engineering & Management.

What is a Frame Grabber and What's it Used For? 2018. Blogi. Viitattu 9.3.2023. <https://www.phase1vision.com/blog/what-is-a-frame-grabber-and-what-s-it-used-for>.

What Is Computer Vision? Meaning, Examples, and Applications in 2022. 2022. Artikkel. Viitattu 13.03.2023. <https://www.spiceworks.com/tech/artificial-intelligence/articles/what-is-computer-vision/>.

Zhong, F. & Quan, C. 2017. A Single Color Camera Stereo Vision System. Vol. 18. Iss. 4. IEE Sensors Journal.