

Jarno Liukku

**OPTISET KOLMIULOTTEISET
KUVANTAMISMENETELMÄT
VALMISTAVASSA TEOLLISUUDESSA**

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Niko Siltala
Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Jarno Liukku: Optiset kolmiulotteiset kuvantamismenetelmät valmistavassa teollisuudessa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Huhtikuu 2023

3D-konenäkö luo uusia mahdollisuuksia, mahdollistaen esimerkiksi ihmisen korvaamisen aikaa vievissä tai vaarallisissa tehtävissä, sekä entistä älykkäämmän automaattisen tuotannon. Tämän tutkielman aiheena ovat valoon perustuvat kolmiulotteiset kuvantamismenetelmät, jotka mahdollistavat 3D-konenäön käyttämisen valmistavassa teollisuudessa. Työn ensimmäinen tavoite on selvittää, mitä kolmiulotteisia kuvantamismenetelmiä 3D-konenäön toteuttamiseksi on olemassa, millaisia ominaisuuksia eri kuvantamismenetelmillä on, sekä mitkä ovat kunkin menetelmän vahvuudet ja heikkoudet. Työn toisena tavoitteena on saada selville, millaisissa valmistavan teollisuuden käyttökohteissa 3D-konenäköä voidaan hyödyntää ja vertailla mihin käyttökohteisiin eri kuvantamismenetelmät soveltuvat. Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena ja lähteinä käytettiin pääasiassa vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita ja kirjallisuuslähteitä.

Kirjallisuuskatsauksen tuloksena selvisi, että tärkeimmät 3D-konenäön toteuttamiseksi olemassa olevat kuvantamismenetelmät ovat kaksikamerainen stereonäkö, valokuviamenetelmät ja laserkolmiomittaus, sekä kulkuaiikamenetelmät. Muita optisia kolmiulotteisia kuvantamismenetelmiä ovat lisäksi holografinen interferometria sekä stereokuvaan perustuva fotogrammetria. Valmistavassa teollisuudessa 3D-konenäköä voidaan hyödyntää esimerkiksi mittaamisessa ja laaduntarkastuksessa, paikallaolon tarkastuksessa ja paikoituksessa, robotinohjauksessa, sekä ihmisen tai muun esteen havaitsemisessa.

Stereonäkö sopii esimerkiksi robotinohjaukseen, mutta sen rajoitteena on kuvankäsittelyn raskaus. Valokuviamenetelmien ja laserkolmiomittauksen etuna on hyvä tarkkuus, mutta menetelmien mittausetäisyys on suhteellisen lyhyt. Lisäksi usean kuvion valokuviamenetelmän heikkous on kuvantamiseen kuluva aika. Valokuviamenetelmät sopivat esimerkiksi robotin asennon tunnistamiseen ja kalibrointiin. Laserkolmiomittausta hyödyntävät laitteet voivat olla haitallisia ihmissilmälle, mikäli niiden valonlähteenä käytetään suuritehoista laserlähetintä, mutta niitä voidaan hyödyntää moniin muihin käyttötarkoituksiin. Kulkuaiikamenetelmien suurin etu on kuvantamisen nopeus, mutta sen käyttöä rajoittaa teoreettisesti alhainen kuvantamistarkkuus. Kulkuaiikamenetelmiä hyödynnetään esimerkiksi ihmisen havaitsemisessa ja ympäristössä navigoinnissa. Holografinen interferometria soveltuu lähinnä pienten epämuodostumien tarkasteluun, fotogrammetria vastavuoroisesti suurten pintojen tai kappaleiden kuvantamiseen. Usein kuvantamisen kannalta parhaaseen lopputulokseen päästään käyttämällä eri menetelmiä yhdessä, mutta tällöin laitteiden keskinäisen kalibroinnin merkitys korostuu.

Avainsanat: 3D-konenäkö, valmistava teollisuus, optinen kolmiulotteinen kuvantaminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimusongelma ja tavoitteet.....	1
1.2 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne.....	2
2. 3D-KONENÄKÖ.....	3
2.1 Kaksikamerainen stereonäkö.....	3
2.2 Valokuvamenetelmät ja laserkolmiomittaus.....	4
2.3 Kulkuaiikamenetelmät.....	7
2.3.1 Pulssikamerat.....	8
2.3.2 Jatkuvan aallon kamerat.....	9
2.4 Muut menetelmät.....	10
3. 3D-KONENÄÖN KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA.....	12
3.1 Mittaaminen ja laadunvalvonta.....	12
3.2 Paikoitus ja paikallaolon tarkistus.....	13
3.3 Robotinohjaus ja esteen havaitseminen.....	13
4. 3D-KUVANTAMISMENETELMIEN VERTAILU.....	15
5. YHTEENVETO.....	25
LÄHTEET.....	27

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3D	engl. Three Dimensional, kolmiulotteinen
CAD	engl. Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CW	engl. Continuous Wave, jatkuva aalto
LIDAR	engl. Light Detection And Ranging, valon havainnointi ja etäisyyden mittaus
RIM	engl. Range Imaging, etäisyyden mittaaminen kuvan avulla

1. JOHDANTO

Valmistavan teollisuuden tuotanto on viime vuosina automatisoitunut ja oletettavasti sama kehitys jatkuu myös tulevaisuudessa. Kolmiulotteinen konenäkö mahdollistaa entistä monipuolisemmat mahdollisuudet käyttää yhä pidemmälle automatisoituja koneita ja laitteita eri tehtävissä. Kolmiulotteinen konenäkö luo uusia mahdollisuuksia tehtäviin, joissa aiemmin on vaadittu ihmisenäköä. Tällaisia tehtäviä ovat esimerkiksi laadunvalvontaan ja mittaamiseen liittyvät tehtävät. Kolmiulotteinen konenäkö mahdollistaa entistä perusteellisemmän laadunvalvonnan myös massatuotannossa ja vähentää hukkaa, kun kappaletta voidaan tarkastella työstämisen aikana ja reagoida epäkohtiin jo kesken valmistuksen. Kolmiulotteinen konenäkö mahdollistaa myös entistä monipuolisemman ja autonomisemman robotinohjauksen, kun robotti kykenee havaitsemaan ympäristöään myös syvyysuunnassa. Samalla esivalmisteluun käytetty aika ja vaiva esimerkiksi bin picking -tehtävissä vähenee, kun robotti voi tarttua kappaleisiin myös ennalta määräämättömissä asennoissa ja paikoissa. Kolmiulotteinen konenäkö on kehittynyt viime vuosina nopeasti, joten sen mukanaan tuomat käyttömahdollisuudet valmistavassa teollisuudessa lisääntyvät.

1.1 Tutkimusongelma ja tavoitteet

Tässä tutkielmassa selvitetään, mitä eri kolmiulotteisia kuvantamismenetelmiä 3D-konenäön toteuttamiseksi on olemassa ja mitä eroja eri menetelmillä on. Työn tavoitteena on selvittää, millaisiin käyttötarkoituksiin eri kuvantamismenetelmät soveltuvat valmistavassa teollisuudessa.

Päätutkimuskysymys: Millaisia kolmiulotteisia kuvantamismenetelmiä 3D-konenäön toteuttamiseen käytetään ja kuinka eri menetelmät eroavat toisistaan?

Apututkimuskysymys: Millaisiin käyttötarkoituksiin eri kuvantamismenetelmät soveltuvat valmistavassa teollisuudessa?

Tutkielmassa keskitytään kolmiulotteisen konenäön toteuttamiseksi olemassa olevien kameralaitteistojen teknologioihin, eikä juurikaan kuvainformaation käsittelyyn ja kolmiulotteisen datan muodostamiseen käytettäviin ohjelmistoihin.

1.2 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne

Tutkimus on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Tutkielman aineistona on käytetty pääasiassa vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita ja konferenssijulkaisuja. Näiden lisäksi tutkielman lähteinä on käytetty kirjallisuus- ja verkkolähteitä. Tutkimukseen valittu aineisto on kerätty eri tietokannoista käyttämällä apuna yliopiston kirjaston työkalua Andoria. Tutkimukseen valittua aineistoa etsiessä on rajattu pois yli 15 vuotta vanhat teokset, sillä 3D-konenäköteknologioiden kehitys on ollut viime vuosina nopeaa, joten tätä vanhempi tieto voi olla jo vanhentunutta. Aineistoa on etsitty lähinnä englanninkielisillä hakusanoilla, sillä aiheesta on saatavilla runsaasti enemmän aineistoa englanniksi, kuin suomeksi. Hakulausekkeina on käytetty muun muassa "3D machine vision", "3D computer vision", "object recognition" ja näiden yhdistelmiä hakusanoihin "manufacturing", "industry" ja "assembly". Aineiston kertyessä on hakulausekkeissa käytetty myös aineistoissa esiintyviä avainsanoja.

Työn toisessa luvussa käsitellään tällä hetkellä olemassa olevia kolmiulotteisia kuvantamismenetelmiä 3D-konenäön toteuttamiseksi. Tarkemmin esitellään kolme yleisimmin käytössä olevaa teknologiaa, jotka ovat kaksikamerainen stereonäkö, valokuviomenetelmä ja kulkuaikamenetelmä. Kolmannessa pääluvussa tarkastellaan valmistavan teollisuuden käyttökohteita, joissa 3D-konenäköä voidaan hyödyntää. Neljännessä luvussa esitellään eri 3D-kuvantamismenetelmien ominaisuuksia, vertaillaan menetelmien vahvuuksia ja heikkouksia, sekä esitetään, millaisiin sovelluksiin olemassa olevat 3D-kuvantamismenetelmät soveltuvat ominaisuuksiensa ansiosta. Viimeisessä luvussa esitetään yhteenveto työstä.

2. 3D-KONENÄKÖ

Virelabsin mukaan konenäkö (engl. machine vision) tarkoittaa automaattisesti tapahtuvaa kuvainformaation havainnointia ja analysointia. Konenäkö vaatii toimiakseen optisen, eli valon avulla kuvainformaatiota keräävän kameran ja kuvainformaatiota käsittelevän ohjelmiston. Konenäkökäsitteeseen verraten 3D-konenäön tärkein eroava tekijä on kyky havaita kaksiulotteisen kuvainformaation lisäksi syvyyttä, mikä mahdollistaa kolmiulotteisten sijaintitietojen käsittelyn ja hyödyntämisen. 3D-konenäön kehitys on ollut viime vuosina nopeaa (Shang et al., 2022). 3D-konenäkösovellusten määrä on kasvanut niin teollisuus- kuin viihdekäytössä ja uusia sovelluksia syntyy lisää teknologioiden yhä kehittyessä.

Yleisimpiä tällä hetkellä saatavilla olevia teknologioita optiseen kolmiulotteiseen kuvantamiseen ovat kaksikamerainen stereonäkö (engl. binocular stereo vision), valokuviomenetelmät (engl. structured light), kulkuaikamenetelmä (engl. time of flight), holografinen interferometria (engl. holographic interferometry), monikameraiset menetelmät (engl. multivision) sekä lähietäisyyden teollinen fotogrammetria (engl. close-range industrial photogrammetry) (Shang et al., 2022). Ominaisuuksiensa puolesta stereonäkö, valokuviomenetelmät ja kulkuaikamenetelmä tarjoavat monipuolisimpia käyttömahdollisuuksia valmistavassa teollisuudessa. Kyseiset menetelmät ovat tällä hetkellä tärkeimmät ja eniten käytetyt (Ye et al., 2020).

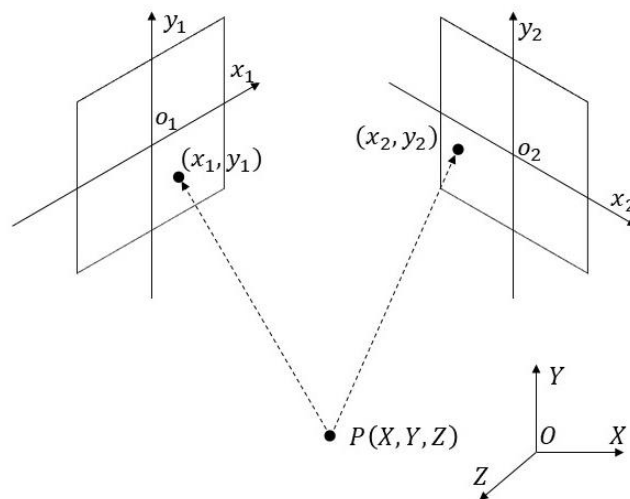
2.1 Kaksikamerainen stereonäkö

Kaksikamerainen stereonäkö jäljittelee ihmisen näkökyvyn toimintaa (Zhang, 2016, s. 2). Menetelmä perustuu kahden paikallaan pysyvän kameran käyttöön, jotka ottavat kuvattavasta kohteesta kuvan eri kulmasta. Kuvien yhteiset pisteet sekä kameroiden sijainnit tunnettaessa voidaan muodostuvasta kolmiosta laskea yhteisten pisteiden etäisyys, jolloin saadaan tieto kuvattavan kohteen kolmiulotteisesta muodosta. (Yang et al., 2018)

Yuechaon et al. (2022) mukaan kaksikameraista stereonäköä käytettäessä voidaan ajatella käsiteltävän samoja pisteitä neljässä eri koordinaatistossa: reaali maailman koordinaatistossa, kameran koordinaatistossa, kuvakoordinaatistossa ja pikselikoordinaatistossa. Reaali maailman koordinaatisto tarkoittaa kuvattavan kohteen ja kameran todellista sijaintia reaali maailman kolmiulotteisessa avaruudessa. Kameran koordinaatisto kuvaa kameraoptiikan geometrisiä suhteita. Kuvakoordinaatisto esittää

muutosta kameran koordinaatistosta pikselikoordinaatistoon. Pikselikoordinaatisto kuvaa saatuja sijaintitietoja, jotka saadaan kertomalla kuvakoordinaatiston sijaintitiedot kameran parametreilla. (Yuechao et al., 2022)

Kaksikameraisen stereonäön toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1. Piste P on kuvattavan kohteen tietty piste reaali maailman koordinaatistossa (X, Y, Z) . Piste P havaitaan molempien kameroiden koordinaatistoissa.



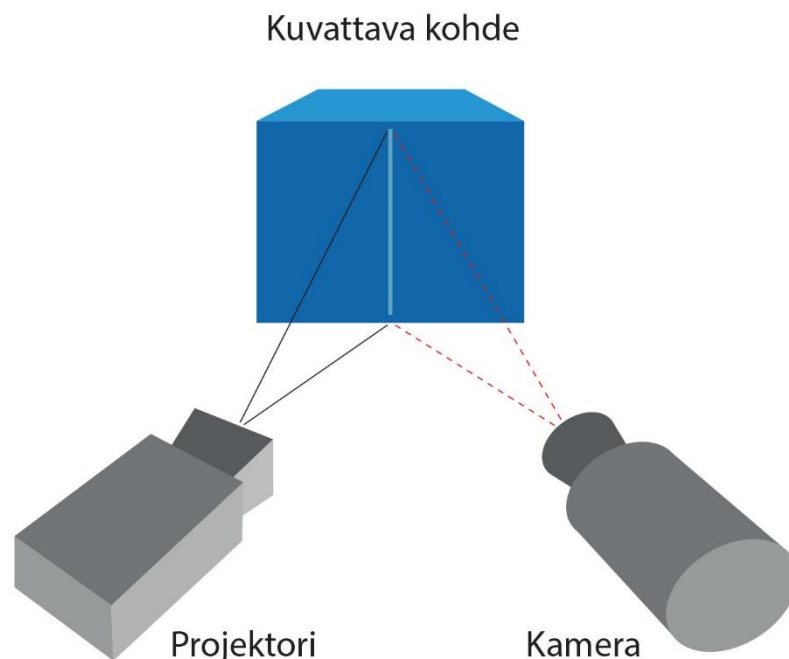
Kuva 1. Kaksikameraisen stereonäön toimintaperiaate. Mukailtu lähteestä (Shang et al., 2022, kuva 5).

Kunkin kameran ottamien kuvien yhteiset pisteet voidaan esittää kahtena vektorina, jotka ovat molemmat määritellyjä omissa kuvakoordinaatistoissaan (Wöhler, 2009, s. 12). Koska yksittäiset pisteet havaitaan kahdessa eri kuvakoordinaatistossa, on kolmiulotteisen sijaintitiedon aikaansaamiseksi eri koordinaatistojen välinen eroavaisuus ja riippuvuus tunnettava. Eroavaisuutta eri koordinaatistojen välillä kutsutaan vastaavuusongelmaksi (engl. correspondence problem). Vastaavuusongelman ratkaisemista eli kuvattujen pisteiden yhdistämistä kolmiulotteiseksi sijaintitiedoksi kutsutaan stereokuvan yhdistämiseksi (engl. stereo matching). (Zhang, 2016, s. 2)

2.2 Valokuvamenetelmät ja laserkolmiomittaus

Valokuvamenetelmä muistuttaa stereonäköä, mutta vastaavuusongelman ratkaisemiseksi kuvattavaan kohteeseen heijastetaan tietty tai satunnainen kuvio valoa, jonka avulla voidaan helpommin erottaa kameran hankkiman kuvainformaation pisteet.

Valokuviomenetelmää käyttävät laitteet koostuvat yleensä valonlähteestä ja yhdestä tai useammasta kamerasta (Pérez et al., 2016; Ye et al., 2020; Luo et al., 2022). Kaksikameraista stereonäköä ja valokuviomenetelmää käytetäänkin usein yhdessä, jolloin voidaan hyödyntää molempien menetelmien ominaisuuksia. Valokuviomenetelmissä valonlähde projisoi kuvattavaan kohteeseen yhden pistemäisen kuvion (engl. point structured), viivamaisen kuvion (engl. line structured) tai tasomaisen kuvion (engl. surface structured) koko kuvattavan kohteen pinnalle (Shang et al., 2022). Kuvassa 2 on esitetty havainnekuva valokuviomenetelmän laitteiston asettelusta. Kuvassa heijastettu valokuvio on viivamainen, mutta asettelu on samankaltainen myös pistemäisiä ja tasomaisia valokuvioita käytettäessä.



Kuva 2. Viivamainen tasokuvio. Mukailtu lähteestä (Shang et al., 2022, kuva 7b).

Piste- ja viivamaisten kuvioiden yhteydessä käytetään nimitystä laserkolmiomittaus (engl. laser triangulation), sillä ne käyttävät tyypillisesti laseria valonlähteenään (Shang et al., 2022). Kuvattavan kohteen etäisyys voidaan laskea stereonäön tavoin kameran, valonlähteen ja kuvattavan kohteen välille muodostuvasta kolmiosta, kun kameran ja valonlähteen välinen etäisyys ja kulma toistensa suhteen tunnetaan. Jotta laserkolmiomittauksella voidaan määrittää kuvattavan kohteen kolmiulotteinen ulkomuoto, on joko kuvattavan kohteen tai käytettävän laserin liikuttava, eli kappale on skannattava. (Pérez et al., 2016) Käytännössä skannaaminen voidaan suorittaa esimerkiksi kääntyvien peilien avulla, joilla laservaloa suunnataan. Pistemäistä valoa käytettäessä valonlähteen tai kappaleen on liikuttava kahden erisuuntaisen akselin

suuntaisesti ja viivamaista valoa käytettäessä riittää, että kappale tai valolähde liikkuu yhden akselin suuntaisesti. (Shang et al., 2022)

Tasomaista valokuvioita käyttävillä menetelmillä kuvattavan kohteen kolmiulotteinen muoto saadaan selville ilman tarvetta liikuttaa kohdetta tai kameraa. Kuvattavan kohteen pinnalle voidaan projisoida yksi tai useampi erilainen tasokuvio (Pérez et al., 2016; Ye et al., 2020). Kuvattavan kohteen kolmiulotteinen muoto saadaan selville kameran ottamasta kuvasta nähtävästä valokuvion vääristymästä ja useita eri valokuvioita käytettäessä lisäksi eri kuvioiden yhteiset pisteet tunnistamalla (Ye et al., 2020). Tasokuvion heijastamiseen käytettävä valonlähde heijastaa yleensä valkoista tai sinistä valoa (Pérez et al., 2016).

Kun kohteen pintaan heijastetaan useita erilaisia valokuvioita, saavutetaan suurempi kuvatarkkuus ja vähemmän kohinaa (Zhang, 2016, s. 112). Kuvassa 3 on esitetty erilaisia tyypillisesti käytettäviä tasokuvioita. Kuvat heijastetaan kuvattavaan kohteeseen peräkkäin ja kamera ottaa kohteesta kuvan jokaisella heijastuskerralla. Kuvan resoluutiota voidaan kasvattaa lisäämällä käytettyjen erilaisten valokuvioiden määrää (Zhang, 2016, s. 112). Haittapuolena on kuitenkin menetelmän hitaus verrattuna yhden kuvan ja kuvion menetelmään, sillä kamera vaatii enemmän aikaa usean kuvan ottamiseen. Lisäksi kuvattavan kohteen ja kameran tulee olla paikoillaan, jotta useita valokuvioita voidaan käyttää. (Pérez et al., 2016; Ye et al., 2020)



Kuva 3. Tyypilliset käytössä olevat tasolle heijastettavat valokuviot. Mukailtu lähteestä (Pérez et al., 2016, kuva 8)

Tasomaista valokuviota käytettäessä kuvainformaation käsittelyyn käytetään pääasiassa kahta eri menetelmää, jotka ovat avaruusjakoinen multipleksointi (engl. spatial multiplexing) ja aikajakoinen multipleksointi (engl. time multiplexing) (Pérez et al., 2016). Avaruusjakoinen multipleksointi, tai yhden kuvan tekniikka (engl. one-shot technique), tarvitsee vain yhden heijastettavan valokuvion kuvattavan kohteen pintaan. Kameran ottaman kuvan tietyn pikselin sijainti päätellään ympäröivien pikselien sijaintitiedon perusteella. (Zhang, 2016, s. 107–108; Ye et al., 2020) Aikajakoinen multipleksointi vaatii useita erilaisia valokuvioita, jotka heijastetaan kuvattavan kohteen pintaan peräkkäin (Ye et al., 2020). Kuviot ovat yleensä binäärisiä tai harmaansävykuvia (Pérez et al., 2016). Jokaisesta valokuvioista otetaan kuva ja kuvan pikselien sijainti päätellään heijastetun kuviosarjan leikkausten perusteella (Pérez et al., 2016; Ye et al., 2020). Ye et al. (2020) esittelevät myös kolmannen vaihtoehdon, jota he kutsuvat termillä suora merkistökoodaus (engl. direct encoding). Suoraa merkistökoodausta käytettäessä kuvan pikselin sijainti saadaan suoraan pikselin intensiteetistä tai väristä, jolloin tarvitaan vähemmän heijastettavia valokuvioita (Ye et al., 2020).

Viime vuosina on laajasti yleistynyt menetelmä, jossa valonlähde on jatkuvasti päällä ja kuvio heijastetaan kuvattavan kohteen pintaan yhtäjaksoisesti koko kuvauksen ajan. Pérez et al. (2016) kutsuvat menetelmää termillä light coding. Menetelmässä valonlähde heijastaa ihmissilmälle näkymätöntä, yleensä infrapunataajuista, valoa suodattimen läpi, joka hajottaa valon epäsäännölliseksi mutta jatkuvaksi pistejoukoksi. Pistejoukko kuvataan infrapunakameralla. Kun pistejoukon muoto ja valonlähettimen etäisyys kameraan tunnetaan, voidaan jokaisen heijastetun pisteen etäisyys määrittää kuvion vääristymästä, jolloin saadaan tieto kuvattavan kohteen kolmiulotteisesta muodosta. (Pérez et al., 2016)

2.3 Kulkuaikamenetelmät

Kulkuaikamenetelmää (engl. Time-of-Flight, ToF) käyttävät laitteet koostuvat valonlähteestä, yleensä laserista tai laserdiodista, ja vastaanottimesta (Höraud et al.,

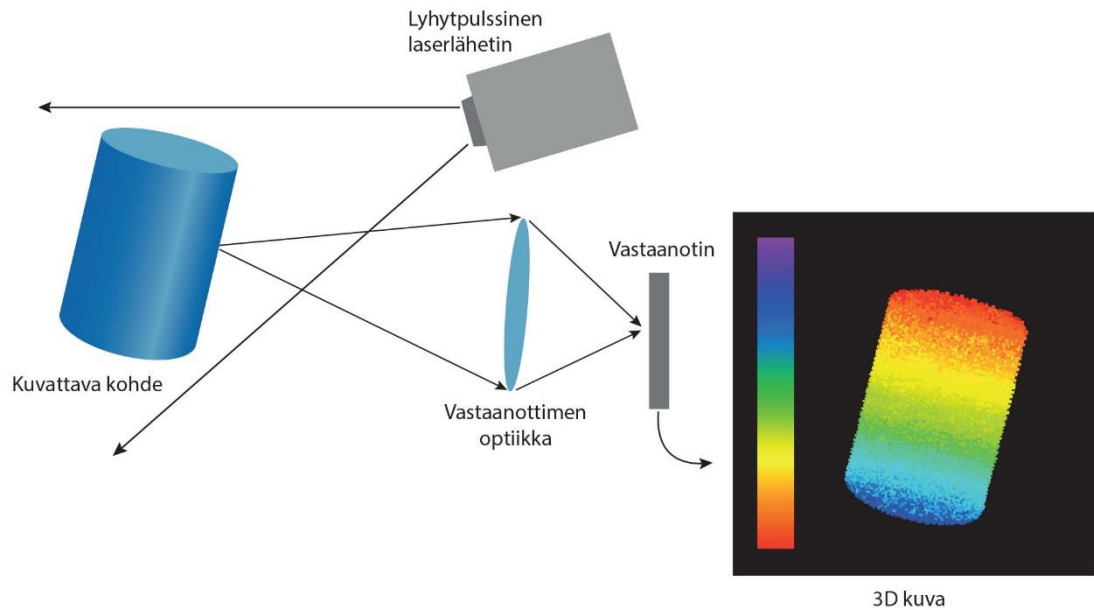
2016). Kulkuaiikamenetelmä perustuu mittaukseen ajasta, joka valonlähteen lähettämällä valolla kestää kulkea valonlähteestä kuvattavaan kohteeseen ja heijastua siitä takaisin kuvantamislaitteen vastaanottimeen. Menetelmään perustuvia laitteita voidaan kutsua myös LIDAR (engl. light detection and ranging) -skannereiksi tai kuvamittauksen yhteydessä RIM (engl. range imaging) -antureiksi. (Kolb et al., 2010)

Kulkuaiikamenetelmän etu valokuviomenetelmiin nähden on, että menetelmillä on mahdollista saavuttaa kohtalaisen suuren resoluution kuvainformaatiota kuvattavasta kohteesta myös suurilla kuvanopeuksilla (Langmann et al., 2013). Houraudin et al. (2016) mukaan kulkuaiikamenetelmää hyödyntävät laitteet sopivat monien eri materiaalien ja erilaisten pintojen tarkasteluun, mutta niitä ei kuitenkaan voida käyttää erityisen heijastavista materiaalista koostuvien kappaleiden tutkimiseen. Kulkuaiikamenetelmiä hyödyntävät laitteet ovat yleensä kooltaan kompakteja, sekä suhteellisen luotettavia, mutta niillä ei voida tallentaa värillistä kuvaa (Houraud et al. 2016; He & Chen, 2019). Mikäli halutaan saada värillistä kuvaa, on kulkuaiikakameran lisäksi käytettävä yhtä tai useampaa erillistä värikuvaa tallentavaa kameraa, jotka on kalibroitava kulkuaiikakameran kanssa samaan koordinaatistoon. (Houraud et al., 2016)

Kulkuaiikamenetelmä voidaan edelleen jakaa kahteen osaan laitteiden valonlähteen lähettämän valon mukaan. Menetelmää käyttävät laitteet voidaan jakaa pulssikameroihin ja jatkuvan aallon kameroihin (Houraud et al., 2016).

2.3.1 Pulssikamerat

Pulssikameroissa (engl. pulsed-light camera) valonlähde lähettää valoa pulssimaisesti tietyllä taajuudella. Kuvattavasta kohteesta takaisin heijastunut valo havaitaan kameran vastaanottimessa. Mittaamalla yhden pulssin edestakaiseen matkaan valonlähteestä kohteeseen ja siitä takaisin tunnistimeen kuluneen ajan, voidaan laskea kuvattavan kohteen etäisyys. (Shang et al., 2022) Kolbin et al. (2010) mukaan pulssikameran valonlähde lähettää niin sanotun valoseinämän kuvattavaan kohteeseen ja kameran vastaanottimen havaitsemasta valoseinämän vääristymästä voidaan määrittää kuvattavan kappaleen pinnanmuodot. Valoseinämän vääristymä havaitaan laitteen vastaanottimen tunnistessa eri suunnista tulevat valonsäteet eri aikaan, eli pinnanmuodon määrittäminen tapahtuu valonsäteiden kulkuajan perusteella. Pulssikameran toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Pulssimaista valoa lähettävän kulkuajakameran toimintaperiaate. Mukailtu lähteestä (Höraud et al., 2016, kuva 4).

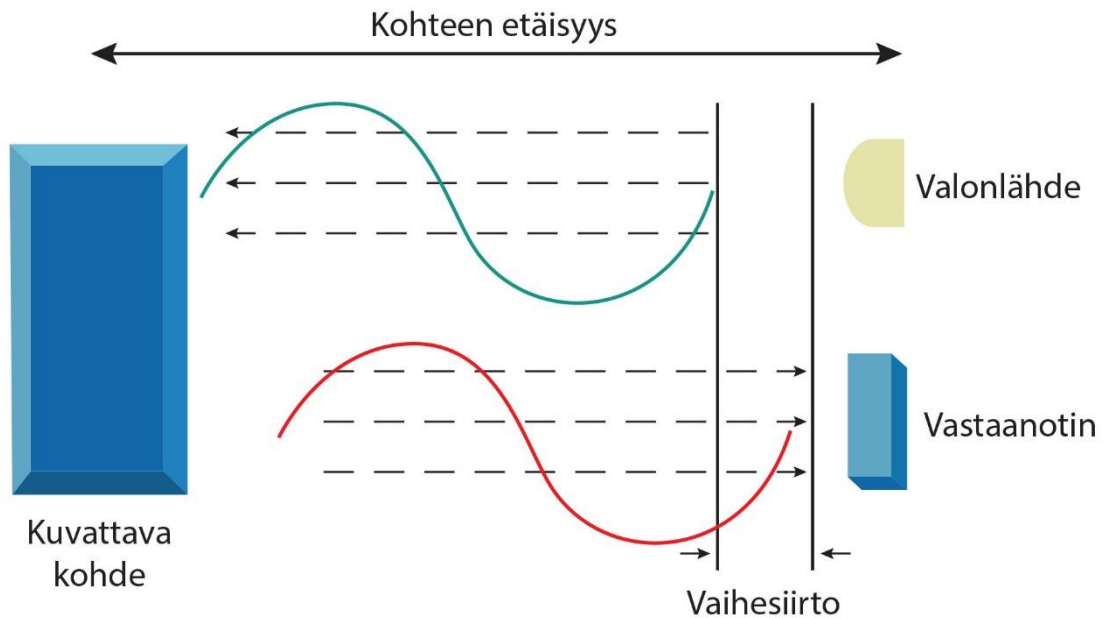
Pulssivaloon perustuvia menetelmiä on pääasiassa kahdenlaisia, joita Höraud et al. (2016) kutsuvat nimillä "range scanner" ja "3D flash LIDAR camera". Etäisyyskanneri (range scanner) koostuu yhdestä laserista, joka on osoitettu yhden akselin varassa kääntyvään peiliin. Kääntyvän peilin avulla saavutetaan laaja kuvakulma peilin kääntöakselin säteen suunnassa, mutta kapea kuvakulma akselin suunnassa. Säteen hajottava menetelmä (3D flash LIDAR camera) käyttää yhtä lasersädettä, joka hajotetaan optisella hajottimella. Näin voidaan valaista koko haluttu kohde käyttämällä yhtä valonsädettä. Vastaanotimessa on yksi rivi tai taso vastaanottimia. (Höraud et al., 2016) Säteen hajottavan menetelmän etuna on, että siinä ei tarvita liikkuvia osia, kuten etäisyyskanneriä käytettäessä. Kääntyvän peilin avulla etäisyyskanneri voi kuitenkin saavuttaa hyvin laajan kuvakulma tiettyyn suuntaan kerrallaan.

Pulssikameroilla voidaan mitata etäisyyksiä vain tietyllä etäisyysalueilla kerrallaan. Mikäli kuvattavan kohteen pinnanmuodoissa on suuria eroja syvyysuunnassa, on kuvattava kohde valaistava ja kuvattava useaan otteeseen eri valotusajoilla tai muilla kuvausparametreilla. (Kolb et al., 2010)

2.3.2 Jatkuvan aallon kamerat

Jatkuvan aallon (engl. continuous-wave, CW) kameroissa laitteen valonlähde lähettää jatkuvaa valoaltoa. Lähetetty valoalto on muunnettu sinimuotoiseksi. (Höraud et al., 2016) Heijastuessaan takaisin kuvattavan kohteen pinnasta lähetetty valoalto kokee vaihesiirron, joka havaitaan, kun verrataan kameras vastaanottimeen palanneen

valoallon ja kameran valonlähteen lähettämän valoallon vaihetta. Havaitun vaihesiirron perusteella voidaan laskea valoallon kulku-aika, josta edelleen voidaan laskea kuvattavan kohteen etäisyys. (He & Chen, 2019) Jatkuvan aallon kulku-aikakameroiden toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Jatkuvan aallon kulku-aikamenetelmän toimintaperiaate. Mukailtu lähteestä (He et al., 2019, kuva 1).

Jatkuvan aallon kameroita käytetään yleensä sisätiloissa, sillä samantaajuinen ulkoinen valo voi häiritä niiden toimintaa. Jatkuvan aallon kamerrat kykenevät suhteellisen lyhyiden etäisyyksien mittaamiseen, usein vain noin kymmenen metrin etäisyyksiin. (Höraud et al., 2016)

2.4 Muut menetelmät

Kaksikameraisen stereonäön sekä valokuvio- ja kulku-aikamenetelmien lisäksi kolmiulotteiseen kuvantamiseen käytetään myös holografista interferometriä, monikameraisia menetelmiä ja fotogrammetriä. Menetelmät vaativat kuitenkin monimutkaisempaa laitteistoa tai kuvattavan kohteen esivalmistelua. Tämän vuoksi muut menetelmät eivät sovellu yhtä laajasti valmistavan teollisuuden käyttökohteisiin.

Holografinen interferometria perustuu samanvaiheisten valoaltojen keskinäiseen interferenssiin, eli vuorovaikutukseen. Valonlähde lähettää monokromaattista säteilyä, joka heijastetaan kuvattavaan kohteeseen kahdesta eri kulmasta. Valoaltojen kohdatessa ne interferoivat keskenään, jolloin muodostunut valoalto kuvastaa kuvattavan kohteen kolmiulotteista muotoa. Kamera kuvaa interferenssiaallon ja mittaa

sen vaihe-eron suhteessa valonlähteen lähettämään valoaaltoon, jonka perusteella kappaleen kolmiulotteinen muoto saadaan selville. Kuvattavan kohteen pinnan on oltava sileää, eikä kohde saa liikkua nopeasti kuvauksen aikana. (Shang et al., 2022) Menetelmää käytetään usein pienten, jopa mikroskooppisten, muodonmuutosten tai vaurioiden havaitsemiseen ja kappaleen mikrorakenteen selvittämiseen (Dekiff et al., 2015; Shang et al., 2022). Holografista interferometriä käytetään myös optiikkakomponenttien tarkastuksessa (Zhang, 2016, s. 221).

Monikameraiset menetelmät perustuvat samaan toimintaperiaatteeseen kuin kaksikamerainen stereonäkö, mutta useita kameroita käyttämällä saavutetaan laajempi kuvakulma yhdellä kuvauskerralla (Shang et al., 2022). Monikameraisten menetelmien heikkoutena ovat usean kameran siirtelyn vaivalloisuus, sekä useasta kamerasta aiheutuva kalliimpi laitteiston hinta.

Fotogrammetria perustuu myös stereokuvaan, mutta kuvattavassa kohteessa on asetettu ennalta kalibroidut mittapisteet, joiden perusteella useista eri kulmista otetuista kuvista voidaan päätellä kuvattavan kohteen tai ohjattavan koneen sijainti (Shang et al., 2022). Kuvainformaation kerääminen voidaan toteuttaa usealla kameralla tai yhdellä liikkuvalla kameralla (Pérez et al., 2016). Fotogrammetriä käytetään usein suurten pintojen tai kappaleiden tutkimiseen, esimerkiksi lentokoneiden siipien tarkasteluun. Menetelmä vaatii suuren kuvatiedostomäärän käsittelyä, joten nykyisin sitä käytetään lähinnä robottien käyttöä edeltävään kalibrointiin (Pérez et al., 2016).

3. 3D-KONENÄÖN KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA

Valmistavassa teollisuudessa on monia käyttökohteita, joissa konenäön avulla voidaan korvata tarve käyttää ihmisnäköä. Kolmiulotteinen konenäkö mahdollistaa entistä monipuolisemmat käyttömahdollisuudet ja sen käyttöä onkin lähivuosina lisätty. Kolmiulotteisen konenäön käyttökohteita valmistavassa teollisuudessa ovat esimerkiksi mittaaminen ja laadunvalvonta, paikoitus ja paikallaolon tarkastus, sekä robotinohjaus ja esteiden havaitseminen.

3.1 Mittaaminen ja laadunvalvonta

Valmistavassa teollisuudessa tarvitaan paljon mittausta ja laadunvalvontaa valmistuksen eri vaiheissa. Kolmiulotteinen konenäkö mahdollistaa tarvittaessa jopa kaikkien valmistettävien tuotteiden tai kappaleiden yksittäisen tarkastelun mittausta ja laadunvalvontaa varten, mikä ei olisi mahdollista pelkän ihmisnäön varassa. Kolmiulotteinen konenäkö voi suoriutua tehtävästä nopeammin ja automaattisesti, minkä ansiosta laajamittainenkin tarkastelu on mahdollista toteuttaa kannattavasti.

Kappaleen ulkomuotojen mittaaminen kolmiulotteista konenäköä käyttäen ei vaadi tarkasteltavan kappaleen koskettamista, mikä on hyödyllistä etenkin kuumia kappaleita mitattaessa (Vandone et al., 2020). Kolmiulotteinen konenäkö mahdollistaa myös työstettävien kappaleiden mittaamisen poistamatta kappaletta työstökoneesta (Lazarević et al., 2019). Tämä tarkoittaa, että muutoksiin tai virheisiin työstettävässä kappaleessa voidaan reagoida jo työstön aikana, minkä ansiosta saadaan parempilaatuisia tuotteita ja vähennetään hukkaa. Lazarević et al. (2019) uskovat kolmiulotteisen konenäön olevan tulevaisuudessa eniten käytetty työkalu teollisuuden komponenttien tarkastuksessa, kun teknologioiden kehittyessä laitteiden tarkkuus ja kuvainformaation käsittelyyn käytetty ohjelmisto kehittyi.

Kuten muissakin 3D-konenäkösovelluksissa, myös mittaamisessa ja laadunvalvonnassa päästään parhaaseen lopputulokseen usein käyttämällä eri teknologioita yhdessä. Vandonen et al. (2020) toteuttamassa tutkimuksessa materiaalia lisäävän viisiakselisen hybridilasertyöstörobotin työn laadun tarkastamiseksi koottiin vision boxiksi kutsuttu kuvantamislaitteisto, joka kiinnitettiin työstökoneeseen. Vision box koostuu yhdestä valokuvamenetelmäkamerasta, kahden kameran stereonäöstä, sekä lämpökamerasta. Tutkittavan työstökoneen laaduntarkastus perustuu vision boxilla työstettävästä kappaleesta saadun pistepilven vertaamiseen valmiiseen CAD-malliin. Lämpökameralla

havaitaan laserhitsauksen aiheuttamia lämpökuormia, jotka voivat aiheuttaa työstettävään kappaleeseen vääristymiä. Vision boxin avulla työstettävä kappale tarkastetaan poistamatta sitä työstökoneesta. Tutkimuksessa käytetyllä laitteistolla saavutettiin yli 0,03 millimetrin tarkkuus, joka on riittävä kyseiseen sovellukseen, sillä jo valmistusmenetelmä itsessään voi aiheuttaa millin kymmenyksen suuruisia poikkeamia.

3.2 Paikallaolon tarkistus ja paikoitus

Paikallaolon tarkistuksessa hankitaan tieto siitä, onko tarkasteltavassa sijainnissa kohde, jota halutaan tarkastella. Käytännössä paikallaolon tarkistus voi olla esimerkiksi tietyn kokoonpanon tarkastamista, jossa varmistetaan, että kaikki kokoonpanon osat ovat oikeilla paikoillaan. Kun paikallaolo on tarkistettu ja tiedetään että tarkasteltavassa sijainnissa on kappale, voidaan kappale paikoittaa tarkemmin sen käsittelyä varten. Paikoitusta tarvitaan valmistavassa teollisuudessa esimerkiksi, kun liukuhihnalta tai muulta alustalta poimitaan tuotteita tai komponentteja. Paikoitusta tarvitaan myös automatisoidussa kokoonpanossa, jotta voidaan tunnistaa eri komponenttien ja kokoonpanojen asennot.

Pérez et al. (2016) esittelevät ilmailuteollisuuteen kehitellyn mobiiliyhteistyörobotin, jonka tarkoituksena on kyetä useisiin erilaisiin tehtäviin eri työpisteillä. Robotti käyttää sinistä valoa lähettävällä valonlähteellä toimivaa valokuviokameraa. Mobiilirobotin saapuessa työpisteelle se tarkistaa onko työpisteellä käsiteltäviä kappaleita, paikoittaa kamerallaan työpisteellä olevan kappaleen ja vertaa saatua pistepilveä CAD-mallien tietopankkiin. Tunnistettuaan kappaleen ja sen asennon, mobiilirobotti suorittaa sille määritetyn tehtävän.

3.3 Robotinohjaus ja esteen havaitseminen

Automatisoidussa valmistavassa teollisuudessa käytetään yhä enemmän robotteja eri tehtävien hoitamiseen. Robotinohjaus voidaan toteuttaa opettamalla robotille tietyt ennalta määrätyt tehtävät, sekä asennot ja paikkatiedot, joissa tehtävät suoritetaan. Kolmiulotteisen konenäön käyttäminen robotinohjauksessa mahdollistaa kuitenkin joustavamman toiminnan, kun robotti voi reagoida ympäristöönsä. Kolmiulotteista konenäköä voidaan käyttää myös robotin kalibrointiin käyttöönoton yhteydessä (Pérez et al., 2016).

Yleinen robotilla tehtävä toiminto on kappaleiden poimiminen (engl. bin-picking). 3D-konenäkö mahdollistaa kappaleiden poimimisen ennalta määräämättömistä paikoista ja asennoissa. Esimerkiksi japanilainen automaatiojärjestelmiin erikoistuva Fanuc tarjoaa

valmista järjestelmää, joka sisältää kuusiakselisen robotin sekä valokuviomenetelmää hyödyntävän iRVision 3D Area Sensor -kameran. Kameran avulla järjestelmä tunnistaa erilliset osat laatikosta ja robotilla voidaan nostaa yksi osa kerrallaan törmäämättä laatikon seiniin. (Bogue Consultant, 2014; Fanuc)

3D-konenäköä voidaan hyödyntää myös yhteistyörobotiikassa, jossa ihmiset työskentelevät yhdessä tai samassa tilassa robotin kanssa. 3D-konenäön avulla voidaan havaita robotin työtilassa oleva ihminen tai muun este, jolloin robotti hidastaa liikkeitään ja lopulta pysähtyy, ennen kuin se törmäisi ihmiseen tai muuhun esteeseen. Hyvä esimerkki tästä on Mercedes-Benzin, Daimler Groupin ja Pilz GmbH & Co. KG:n yhteistyössä kehittämä SafetyEYE-järjestelmä, joka on yksi ensimmäisiä kolmiulotteista kamerateknologiaa hyödyntävä turvajärjestelmä (Wöhler, 2009, s. 280–282). SafetyEYE-järjestelmä koostuu kolmesta kamerasta ja kahdesta tietokoneesta, jotka muodostavat kolmen kameran kuvasta kolmiulotteisen pistepilven kahta eri algoritmia hyödyntäen. SafetyEYE-kamera hyödyntää siis kolmikameraista stereonäköä. SafetyEYE-järjestelmä voidaan asettaa tarkkailemaan tiettyä aluetta ja järjestelmä reagoi, kun alueella havaitaan tietty määrä kolmiulotteisia pisteitä, toisin sanoen ihminen tai jokin muu este. (Wöhler, 2009, s. 280–282) Pilz GmbH & Co. KG kehittää ja valmistaa yhä erilaisia turvajärjestelmiä, joista osa perustuu kolmiulotteiseen konenäköön.

3D-konenäköä voidaan käyttää lisäksi robottien ohjaamisessa eleiden ja liikkeiden avulla. Ihmisen liikkeet, esimerkiksi käden heilautus tai sormella osoittaminen, voidaan havaita 3D-kameroilla ja vertaamalla havaittuja eleitä ja liikkeitä esiasetettuihin esimerkkieleisiin ja -liikkeisiin 3D-konenäköjärjestelmä tunnistaa ihmisen antamat komennot, joiden mukaan robotti toimii (Wöhler, 2009, s. 282–289).

4. 3D-KUVANTAMISMENETELMIEN VERTAILU

Valittaessa sopivaa 3D-konenäköjärjestelmää eri käyttökohteisiin valmistavassa teollisuudessa, on vertailtava eri järjestelmien käyttämien menetelmien ominaisuuksia. Tärkeitä 3D-konenäkölaitteiston ominaisuuksia ovat tarkkuus, mittausalue ja kuvantamisen nopeus. Kun laitteisto otetaan käyttöön valmistavassa teollisuudessa, on sen käyttöönottamisen oltava myös kannattavaa, joten myös laitteiston hinta on merkityksellistä. Joissakin sovelluksissa on tärkeää tietää, onko laitteisto helposti liikuteltavissa tai onko kameran ja kuvattavan kohteen oltava paikoillaan kuvantamisen aikana, vai voidaanko kuvaa saada reaaliajassa. Käytettävän laitteiston ja menetelmän valinnassa on myös huomioitava olosuhteet, jossa laitteistoa aiotaan käyttää. Esimerkiksi stereonäköön perustuvat menetelmät vaativat ulkoisen valonlähteen, sillä menetelmät eivät itsessään lähetä valoa. Ulkoinen valo voi kuitenkin myös haitata kuvantamista, kuten light coding ja jatkuvan aallon kulkuaiikamenetelmissä. Eri 3D-kuvantamismenetelmien ominaisuuksia on esitelty taulukossa 1.

Taulukko 1. 3D-kuvantamismenetelmien ominaisuuksia. Perustuu lähteisiin (Horaud et al., 2016; Pérez et al., 2016; Shang et al., 2022; Luo et al., 2022; Sick; Pratt and Whitney Measurement Systems, Inc.)

Menetelmä	Tarkkuus (mm)	Mittaus-alue (m)	Kuvantamisen nopeus	Hinta	Helposti liikuteltava laitteisto	Kamera/kohde saa liikkua	Ulkoisen valon vaikutus
Kaksikamerainen stereonäkö	0,1	0,25–3,00	Nopea	Halpa	Kyllä	Ei	Vaatii toimiakseen
Laserkolmiomittaus	0,00001–0,1	0,01–1,20	Nopea	Halpa	Kyllä	Vaatii toimiakseen	Ei
Usean valokuvion menetelmä	0,015–0,127	0,157–0,480	Hidas	Kallis	Kyllä	Ei	Ei
Light coding	10	1–3	Nopea	Halpa	Kyllä	Kyllä	Saman- taajuinen haittaa
Pulssikamerat	1	1–1500	Nopea	Halpa	Kyllä	Kyllä	Ei
Jatkuvan aallon kamerat	10	0–10	Nopea	Halpa	Kyllä	Kyllä	Saman- taajuinen haittaa
Holografinen interferometria	0,00005	0,00005–0,356	Nopea	Kallis	Ei	Ei	Ei
Monikameraiset menetelmät	0,05	>0,25	Nopea	Kallis	Ei	Kyllä	Vaatii toimiakseen
Teollinen fotogrammetria	0,005–0,050	>0,25	Hidas	Kallis	Kyllä/Ei (kameroiden määrä)	Ei	Vaatii toimiakseen

Kaksikameraisen stereonäön etuja ovat laitteiston rakenteen yksinkertaisuus, luotettavuus, kuvantamisen nopeus ja suhteellisen hyvä tarkkuus. Yksinkertaisen rakenteensa vuoksi kaksikameraista stereonäköä hyödyntävät laitteet ovat myös usein edullisia muihin 3D-kuvantamismenetelmiin nähden. (Shang et al., 2022; Yuechao et al., 2022) Kaksikameraisen stereonäön haasteena on yhteisten pisteiden löytäminen kuvattavan kohteen homogeenisistä osista (Kolb et al., 2010). Ongelman ratkaisemiseksi kaksikameraisen stereonäön yhteydessä käytetään usein myös valokuvamenetelmiä. Kolmiulotteisen kuvainformaation muodostaminen vaatii suurta laskentatehoa, mikä hidastaa kuvantamisprosessia (Pérez et al., 2016).

Laserkolmiomittauksen etuja ovat hyvä tarkkuus ja laitteiden halpa hinta (Pérez et al., 2016). Suuritehoisten laservalaisimien valo on ihmisilmälle vaarallista, minkä vuoksi osa laserkolmiomittausta hyödyntävistä laitteista ei sovellu esimerkiksi yhteistyörobotiikkaan tai käytettäväksi tiloissa, joissa työskentelee myös ihmisiä.

Useita valokuvioita käyttävän menetelmän etuna on hyvä tarkkuus, jota voidaan edelleen parantaa kasvattamalla heijastettavien valokuvioiden määrää. Menetelmän heikkoutena on laitteiston kallis hinta. Käyttöä rajoittaa myös se, että kameran ja kuvattavan kohteen on oltava pakoillaan kuvauksen aikana tarkan pistepilven aikaansaamiseksi. Lisäksi kuvantaminen voi olla hidasta, mikäli käytetään suurta määrää erilaisia valokuvioita. (Pérez et al., 2016; Shang et al., 2022)

Light coding -menetelmä on yleistynyt viime vuosina lähinnä edullisen hintansa vuoksi. Valonlähteen ollessa jatkuvasti päällä kuvauksen aikana, on kuvantaminen suhteellisen nopeaa. Menetelmä kykenee vielä toistaiseksi suhteellisen huonoon tarkkuuteen, eivätkä kamerat tuota kovin tiheää pistepilveä. (Pérez et al., 2016) Harvan pistepilven vuoksi erityisen terävien muotojen kuvantaminen on haasteellista. Light coding -menetelmällä voi esiintyä ongelmia myös läpinäkyviä tai heijastavaa materiaalia olevien kohteiden kuvantamisessa (Pérez et al., 2016).

Kulkuaiikamenetelmää hyödyntävien pulssikameroiden etu on suuri mittausalue. Monilla laitteilla voidaan mitata kymmenien tai satojen metrien etäisyyksiä ja jotkin laitteet toimivat yli kilometrin säteellä (Höraud et al., 2016). Pulssikamerat ovat myös yleensä edullisia. Menetelmän heikkoutena on pieni tarkkuus, yleensä joitain millimetrejä (Höraud et al., 2016). Tosin tarkkuus on usein riittävä moniin käyttökohteisiin.

Jatkuvan aallon kulkuaiikamenetelmää hyödyntävien kameroiden etuna on nopea kuvantamisnopeus, joka mahdollistaa reaaliaikaisen ja myös videokuvan analysoinnin (He and Chen, 2019). Menetelmää hyödyntävät laitteet ovat myös edullisia. Kuten pulssikameroilla, myös jatkuvan aallon kameroilla on vielä toistaiseksi alhainen tarkkuus

(Pérez et al., 2016). Moniin käyttökohteisiin nykyisten laitteiden tarkkuus on kuitenkin riittävä. Jatkuvan aallon kamerat ovat alttiita samantaajuisen valon vaikutukselle, mikä heikentää kuvanlaatua (Shang et al., 2022). Kun laitteistoa käytetään sisätiloissa, ulkoisen valon vaikutus on kuitenkin yleensä vähäistä, sillä erityisesti auringon valo häiritsee toimintaa.

Holografisen interferometrian etu muihin 3D-kuvantamismenetelmiin nähden on sen suuri tarkkuus. Holografista interferometriaa hyödyntävillä laitteilla voidaan kuvantaa mikroskooppisen pieniä kohteita suurella tarkkuudella (Shang et al., 2022). Menetelmän rajoitteena on, että sillä ei voida kuvata suuria kohteita.

Monikameraisia menetelmiä käytettäessä saavutetaan samat edut, kuin kaksikameraisella stereonäöllä, pois lukien hinta, joka nousee kameroiden määrän kasvaessa. Monikameraisten menetelmien etu kaksikameraiseen stereonäköön nähden on, että menetelmää käytettäessä saavutetaan laajempi kuvakulma yhdellä kuvauskerralla, sekä lisäksi suurempi tarkkuus (Shang et al., 2022). Monikameraiset menetelmät jakavat myös kaksikameraisen stereonäön heikkoudet, eli vastaavuusongelman ja kuvankäsittelyn raskauden. Useita kameroita käytettäessä kuvamateriaalin käsittely vaatii yhä enemmän laskentatehoa. Teollinen fotogrammetria pitää sisällään samat vahvuudet ja heikkoudet, mutta vastaavuusongelman ratkaiseminen on helpompaa kuvattavan kohteen pinnalle aseteltavien merkkipisteiden ansiosta. Toisaalta merkkipisteiden asettaminen on työlästä ja aikaa vievää, eikä tämän vuoksi voida kuvata kuin ennalta määrättyjä kappaleita. Eri menetelmien vahvuudet ja heikkoudet on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. 3D-kuvantamismenetelmien heikkoudet ja vahvuudet. Mukailtu lähteistä (Pérez et al., 2016, taulukko 3; Shang et al., 2022, taulukko 1).

Menetelmä	Vahvuudet	Heikkoudet
Kaksikamerainen stereonäkö	Yksinkertainen laitteisto, halpa, hyvä tarkkuus	Kuvankäsittely on raskasta, pieni mitta-alue
Laserkolmio-mittaus	Hyvä tarkkuus, halpa	Suuritehoinen laser on vaarallinen ihmisilmälle, lyhyt mitta-alue, vaatii kuvattavan kohteen skannaamisen
Usean valokuvion menetelmä	Hyvä tarkkuus	Kallis, lyhyt mitta-alue, laitteiston ja kuvattavan kohteen on pysyttävä paikoillaan kuvauksen aikana
Light coding	Halpa	Huono tarkkuus
Pulssikamerat	Reaaliaikainen ja nopea kuvantaminen on mahdollista	Huono tarkkuus
Jatkuvan aallon kamerat	Reaaliaikainen ja nopea kuvantaminen on mahdollista	Huono tarkkuus, ulkoinen valo voi häiritä kuvausta
Holografinen interferometria	Todella hyvä tarkkuus	Pieni mitta-alue, soveltuu vain pienten kohteiden ja mikrovaurioiden kuvantamiseen
Monikameraiset menetelmät	Laaja kuvakulma yhdellä kuvauskerralla, soveltuu suurten muotovaihteluiden kuvantamiseen	Kuvankäsittely on raskasta, kallis
Teollinen fotogrammetria	Suuri mitta-alue, hyvä tarkkuus, soveltuu suurten muotovaihteluiden kuvantamiseen	Vaatii käsin aseteltavia merkkipisteitä kuvattavan kohteen pintaan, tiheän pistepilven aikaansaaminen voi olla haastavaa, kuvattavan kohteen on pysyttävä paikoillaan kuvauksen aikana

Valmistavan teollisuuden laadunvalvonta perustuu yleensä valmistetun tuotteen joidenkin parametrien mittaamiseen. Mittauksissa korostuva 3D-konenäköjärjestelmä

vaadittava ominaisuus on mittaustarkkuus. Mikäli laadunvalvontaa tehdään suurissa määrin, halutaan esimerkiksi tarkastaa jokainen tuotettu osa tai kappale, korostuu myös kuvantamisen nopeus ja kuvankäsittelyn helppous. Tarkkuutensa puolesta teollisuuden mittaukseen ja laadunvalvontaan soveltuvat stereonäköön perustuvat menetelmät, tasovalokuviomenetelmät sekä holografinen interferometria. Kaksikamerainen stereonäkö on kohtalaisen tarkka ja nopeatoiminen. Tarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä stereonäön kanssa yhdessä esimerkiksi yhden kuvion valokuviomenetelmää. Tämän vuoksi stereonäkö yhdessä valokuviomenetelmien kanssa on hyvin pätevä teollisuuden mittauksiin ja laadunvalvontaan suurissakin määrin.

Monikameraiset menetelmät ja teollinen fotogrammetria vaativat raskasta kuvankäsittelyä ja lisäksi teollinen fotogrammetria esivalmistelua (Shang et al., 2022), minkä vuoksi ne eivät sovellu suurten kappalemäärien yksittäistarkasteluun. Ne ovat kuitenkin erittäin hyviä menetelmiä suurten yksittäistuotettujen kappaleiden mittaamiseen ja laaduntarkastukseen, sillä niillä voidaan saada tarkkoja kuvia laajalla kuvakulmalla. Holografisella interferometrialla saavutetaan suurin mittaustarkkuus, mutta koska sen mittausalue on erittäin pieni, on sillä keskityttävä pienten kappaleiden tarkasteluun. Kuten monikameraisten menetelmien, myös holografisen interferometrian laitteisto on kohtalaisen kömpelö, sillä se koostuu paikoillaan olevista peileistä, kamerasta ja valonlähettimestä. Menetelmä soveltuukin yksittäisten pienten kappaleiden laadunvalvontaan.

Paikallaolon tarkistus on usein toistuva toiminto ja siihen vaadittava tarkkuus riippuu kuvattavasta kohteesta. Mikäli kappale on yksinkertainen ja siinä on selkeästi tunnistettavat yksinkertaiset piirteet, riittää pienempi tarkkuus ja kuvantamisen nopeus korostuu. Jos kuvattava osa tai komponentti on erityisen pieni tai siinä on vaikeasti tunnistettavia piirteitä, on kuvantamistarkkuuden oltava korkeampi. Yksinkertaisten kappaleiden paikallaolon tarkastukseen soveltuvat kaksikamerainen stereonäkö, laserkolmiomittaus, light coding ja kulkuaiikamenetelmät. Monimutkaisten kokoonpanojen tarkastamiseen tarkkuutensa puolesta soveltuvat useita kuviota käyttävät valokuviomenetelmät, sekä monikameraiset stereonäköön perustuvat menetelmät, mutta monikameraisten menetelmien kuvankäsittelyn raskauden vuoksi valokuviomenetelmien käyttäminen voi olla perustellumpaa.

Myös paikallaolon tarkistuksen jälkeen tapahtuva paikoitus osana automatisoitua tuotantoa on usein tapahtuva ja toistuva toiminto, joten erityisen tärkeä ominaisuus 3D-konenäköjärjestelmältä on kuvantamisen ja kuvankäsittelyn nopeus. Paikoitukseen käytettävän kameran kuvantamistarkkuuden on hyvä olla linjastolla toimivien robottien ja manipulaattorien tarkkuutta suurempi epätarkkuuksista aiheutuvien paikoitusvirheiden

summautumisen estämiseksi. Kappaleiden paikoitukseen esimerkiksi tuotantolinjalla soveltuvat laserkolmiomittaus ja kulkuaikamenetelmät. Myös kaksikameraista stereonäköä voidaan käyttää, mutta kuvankäsittelyn nopeuttamiseksi on tarpeellista heijastaa kohteen pintaan myös valokuvio. Laserkolmiointi soveltuu erityisen hyvin liukuhihnalla liikkuvien kohteiden paikantamiseen, sillä kohteiden liikkuessa poistuu tarve liikuttaa kameraa kohteen skannaamiseksi, jolloin voidaan hyödyntää laserkolmiomittauksen tarkkuus halvalla, kun erikseen liikkuvia osia ei tarvita.

Robotinohjauksessa korostuu kuvantamisen nopeus, jotta robotin toiminta on mahdollisimman nopeaa. Kuvantamistarkkuuden ei yleensä tarvitse olla erityisen suuri, kunhan se on robotin liikkeiden tarkkuutta suurempi. Lisäksi monissa sovelluksissa kamerajärjestelmä asennetaan suoraan robottiin, jolloin laitteiston on oltava myös mahdollisimman kompakti ja kevyt robotin kuormankantokyvyn maksimoimiseksi. Esimerkiksi kappaleiden poimimiseen robotilla soveltuvat kaksikamerainen stereonäkö valokuvion kanssa käytettynä ja jatkuvan aallon kulkuaikamenetelmä. Mikäli tarvitaan suurempaa tarkkuutta, eikä samassa tilassa työskentele ihmisiä, voidaan käyttää myös suuritehoisia laserkolmiomittauslaitteita.

Robotin asennon ja sijainnin määrittämiseen voidaan käyttää myös paikallaan olevaa kameraa, joka on sijoitettu kiinteästi irti robotista. Tämä on erityisen hyödyllistä robottia kalibroitaessa käyttöönoton yhteydessä. Erityisesti kalibroinnin yhteydessä käytetään usein monikameraisia menetelmiä tai teollista fotogrammetriaa, sillä niiden avulla kalibrointi voidaan tehdä suurella tarkkuudella, eikä kuvankäsittelyn raskaus ole rajoite, mikäli kalibrointia ei tarvitse tehdä usein. Robotin asennon tarkkaan tunnistamiseen soveltuu myös usean kuvion valokuviomenetelmä, mikäli vaatimuksena ei ole kuvantamisen nopeus. Kaikki kyseisistä menetelmistä ovat kuitenkin suhteellisen kalliita (Pérez et al., 2016). Edullisempänä vaihtoehtona robotin asento ja sijainti voidaan määrittää myös laserkolmiomittauksella, mutta tarkempaan kalibrointiin kalliimmat menetelmät ovat usein parempia.

Robotinohjaus voi vaatia myös ympäristön tunnistamista, mikäli robotin työskentely-ympäristössä tapahtuu muutoksia tai toiminta vaatii ympäristöön sopeutumista. Tässä tarkoituksessa korostuu kuvantamisen nopeus ja mahdollisuus reaaliaikaiseen kuvantamiseen ja kuvankäsittelyyn. Tämän vuoksi raskasta kuvankäsittelyä vaativia, eli stereonäköön perustuvia ja usean valokuvion menetelmiä ei voida käyttää. Sen sijaan kulkuaika- ja laserkolmiomittaus soveltuvat ympäristön tunnistamiseen hyvin. Mikäli vaaditaan suurta tarkkuutta suhteellisen pienellä mittausalueella, on laserkolmiomittaus soveltuvampi. Kulkuaikamenetelmiä käyttämällä saavutetaan suurempi mittausalue. Erityisen suurta mittausetäisyyttä vaadittaessa paras vaihtoehto on

kulkuaikamenetelmää hyödyntävä pulssikamera, jota käytetään yleensä suurien etäisyyksien mittaamiseen, usein ulkokäytössä (Horaus et al., 2016).

Robotinohjauksessa, kuten muissakin valmistavan teollisuuden toiminnoissa turvallisuus ja esimerkiksi ihmisen havaitseminen ovat tärkeitä toimintoja. Ihmisen tai muun esteen havaitsemisessa on ensiarvoisen tärkeää, että kuvantaminen tapahtuu nopeasti, jotta robotin tai muiden liikkuvien laitteiden toiminta ehditään pysäyttää ennen kontaktia ihmiseen tai muuhun esteeseen. Erityisen suuri kuvantamistarkkuus ei ole kaikissa käyttökohteissa tarpeellista, varsinkin, mikäli toiminta pysäytetään heti kun este havaitaan. Ihmisen havaitsemiseen käytetään usein kulkuaikamenetelmään perustuvia konenäkölaitteita juuri niiden suuren kuvantamisnopeuden vuoksi. Light coding -menetelmien yleistyessä viime vuosina myös niitä on alettu käyttää enenevässä määrin ihmisen havaitsemiseen samoista syistä (Pérez et al., 2016). Light coding ja kulkuaikamenetelmiä käyttämällä voidaan toteuttaa varsin varmatoimiset ratkaisut ihmisen tai esteen havaitsemiseksi edullisesti ja ihmissilmälle turvallisesti.

Taulukko 3. Kvanttamismenetelmien soveltuminen valmistavan teollisuuden käyttökohteisiin

	Kappaleen ulkomuotojen mittaaminen	Laadunvalvonta	Paikallaolon tarkistus	Paikoitus	Robotinohjaus	Liikkuvan kohteen havaitseminen
Kaksi-kamerainen stereonäkö	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Laser triangulation	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Usean kuvion valokuvio-menetelmät	✓	✓	✓	✓	✓	
Light coding	✓		✓	✓	✓	✓
Pulssikamerat	✓		✓	✓	✓	✓
Jatkuvan aallon kamerat	✓		✓	✓	✓	✓
Holografinen interferometria		✓				
Moni-kameraiset menetelmät	✓	✓	✓		✓	
Teollinen fotogrammetria	✓	✓				

Eri kuvantamismenetelmien soveltuminen valmistavan teollisuuden käyttökohteisiin on tiivistetty taulukkoon 3. Vaikka useat menetelmät sopivat moniin käyttökohteisiin, ovat tietyt menetelmät usein muita parempia tiettyihin sovelluksiin. Kuten Ye et al. (2020) toteavat, ovat kaksikamerainen stereonäkö, valokuvio-menetelmät ja kulkuaikeamenetelmät tällä hetkellä tärkeimmät kuvantamismenetelmät 3D-konenäön toteuttamiseksi. Parhaat tulokset saadaan usein yhdistelemällä eri menetelmiä, kuten valokuvio ja stereonäkö. Kulkuaikeamenetelmää käyttäviä kameroita voidaan parittaa tavallisten kameroiden kanssa, jolloin saadaan värillistä kolmiulotteista kuvaa myös kulkuaikeamenetelmää hyödyntäen. Kuten Vandonen et al. (2020) vision boxissa, voidaan kolmiulotteisten kuvantamismenetelmien rinnalla kerätä myös muuta tietoa, kuten kuvattavan kappaleen eri kohtien lämpötila lämpökameran avulla.

Eri menetelmiä yhdessä hyödynnettäessä niiden keskinäinen kalibrointi korostuu. Mikäli kalibrointi ei ole suoritettu oikein, kohdataan sama vastaavuusongelma, kuin stereokuvan yhdistämisessä. Nykyaikaisten prosessorien laskentatehon ollessa suuri,

stereonäköön perustuvien menetelmien kuvankäsittelyn raskauden aiheuttamat ongelmat eivät ole yhtä suuri rajoite, kuin esimerkiksi 2000-luvun alussa, jolloin 3D-konenäkö ei vielä ollut yhtä merkittävässä asemassa kuin nykypäivänä.

5. YHTEENVETO

Tässä tutkielmassa käsiteltiin 3D-konenäköjärjestelmien käyttämiä kolmiulotteisia kuvantamismenetelmiä. Tutkielman ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää, mitä erialaisia 3D-konenäön teknologioita on olemassa ja miten eri teknologiat eroavat toisistaan. Tutkielman toisena tavoitteena oli selvittää millaisiin käyttökohteisiin eri teknologiat soveltuvat valmistavassa teollisuudessa.

Kirjallisuuskatsauksen tuloksena selvisi, että tällä hetkellä yleisimmät konenäköön käytettävät kolmiulotteiset kuvantamismenetelmät ovat kaksikamerainen stereonäkö, valokuviomenetelmät ja kulkuaiikamenetelmä. Lisäksi kolmiulotteiseen kuvantamiseen voidaan käyttää myös holografista interferometriä, stereonäköön perustuvia monikameraisia menetelmiä ja teollista fotogrammetriä.

Valmistavassa teollisuudessa kolmiulotteista konenäköä voidaan käyttää esimerkiksi mittaamiseen ja laadunvalvontaan, kappaleiden paikallaolon tarkistamiseen ja paikoitukseen, robotinohjaukseen ja ympäristössä navigoimiseen, sekä turvajärjestelmissä ihmisen tai muiden esteiden havaitsemiseksi. Mittauksessa ja laadunvalvonnassa korostuu kuvantamismenetelmien kuvantamistarkkuus. Paikallaolon tarkistuksessa ja paikoituksessa korostuu kuvantamisnopeus, mutta suurella tarkkuudella voidaan vähentää paikoitusvirheitä. Robotinohjauksessa kuvantamisnopeus ja reaaliaikainen kuvankäsittely on tärkeää. Ihmisten ja muiden esteiden havaitsemisessa ensiarvoisen tärkeää on nopea kuvantaminen, jotta toiminta voidaan pysäyttää ennen törmäystä tai onnettomuutta.

Kaksikamerainen stereonäkö jäljittelee ihmissilmän syvyysnäön toimintaa ja kolmiulotteinen kuva muodostetaan kahdesta kaksiulotteisesta kuvasta yhteisten pisteiden avulla. Menetelmä sopii erityisesti heijastetun valokuvion kanssa käytettynä moniin käyttökohteisiin ja sitä käytetään muun muassa robotinohjauksessa, erityisesti bin-picking-tehtävissä.

Valokuviomenetelmä voidaan jakaa piste-, viiva- ja tasokuviota käyttäviin menetelmiin. Pistemäistä ja viivamaista kuviota käyttäviä menetelmiä kutsutaan usein laserkolmiomittaukseksi, sillä niiden valonlähteenä käytetään yleensä laserlähetintä. Tasomaista valokuviota käyttävät menetelmät voivat käyttää yhtä tai useampaa erilaista valokuviota. Valokuviomenetelmän uusimpana versiona nähdään light coding -menetelmä. Laserkolmiomittaus erityisesti sellaisiin käyttökohteisiin, joissa kuvattava kohde liikkuu valmiiksi, jolloin skannaamisen tarve täyttyy. Suuritehoisia laserlähettämiä

valonlähteenään käyttävät laitteet eivät kuitenkaan sovellu ihmisten kanssa samoissa tiloissa käytettäväksi. Tasovalokuviomenetelmät soveltuvat kohteisiin, joissa vaaditaan suurta tarkkuutta, mutta kuvantamisnopeus ei ole ensiarvoisen tärkeää.

Kulkuaiikamenetelmään perustuvat laitteet voidaan jakaa kahteen osaan: pulssikameroihin ja jatkuvan aallon kameroihin. Kulkuaiikakamerat ovat suosittuja monissa käyttökohteissa kuvantamisnopeutensa ja edullisen hintansa ansiosta, mutta niiden tarkkuus vaatii yhä kehittämistä.

Holografinen interferometria perustuu valoaaltojen keskinäiseen vuorovaikutukseen. Siinä kuvattava kohde valaistetaan suoraan valonlähteellä, sekä peilin avulla heijastetulla valolla. Menetelmä on valoon perustuvista 3D-kuvantamismenetelmistä paras mikroskooppisen pienten kohteiden ja optiikkakomponenttien tarkasteluun. Sen käyttö rajoittuu kuitenkin edellä mainittuihin, sillä sen avulla ei ole mahdollista kuvata suuria kappaleita.

Stereonäköön perustuvat monikameraiset menetelmät ja teollinen fotogrammetria ovat erityisen hyviä kuvantamaan suuria kappaleita ja pintoja. Niiden avulla voidaan saavuttaa laaja kuvakulma ja suuri mittaustarkkuus. Teollinen fotogrammetria on erittäin hyvä suurten komponenttien ja pintojen kuvantamiseen ja sillä päästään vastaavuusongelman helpon ratkaisemisen ansiosta suuriin tarkkuuksiin.

Tulevaisuudessa tekoälyn yhdistäminen konenäköjärjestelmien kanssa luo potentiaalisesti uusia mahdollisuuksia. Tekoäly voi myös mahdollisesti helpottaa vastaavuusongelman ratkaisemista tekoälyn tunnistessa eri kuvakulmista saatujen kuvien yhteiset piirteet. Monissa viimeisten kymmenen vuoden aikana tehdyissä tutkimuksissa (ks. esim. Langmann et al. (2013) ja He & Chen (2019)) on keskitytty kulkuaiikamenetelmän tarkkuuden parantamiseen ja siihen vaikuttavien tekijöiden löytämiseen, sillä kulkuaiikamenetelmä on moneen sovellukseen käyttökelpoinen, mutta sen kuvantamistarkkuudessa on yhä parantamisen varaa. Näkisin, että myös light coding -menetelmän tarkkuuden parantaminen on yksi tulevaisuuden kehityksen suunnista. Mikäli light coding -menetelmän tarkkuutta saadaan parannettua, voi se nousta valokuviomenetelmistä suosituimmaksi valmistavassa teollisuudessa nopean kuvantamisen ja edullisen hintansa ansiosta.

LÄHTEET

- Bogue Consultant, R. (2014). Random bin picking: Has its time finally come? *Assembly Automation*, 34(3), 217–221. DOI: 10.1108/AA-03-2014-024
- Dekiff, M., Berssenbrügge, P., Kemper, B., Denz, C., & Dirksen, D. (2015). Simultaneous acquisition of 3D shape and deformation by combination of interferometric and correlation-based laser speckle metrology. *Biomedical Optics Express*, 6(12), 4825. DOI: 10.1364/BOE.6.004825
- Fanuc. iRVision Efficiency Highlights. Saatavissa (viitattu 27.3.2023): <https://www.fanucamerica.com/products/robots/vision-products>
- He, Y., & Chen, S. (2019). Recent Advances in 3D Data Acquisition and Processing by Time-of-Flight Camera. *IEEE Access*, 7, 12495–12510. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2891693
- Horaud, R., Hansard, M., Evangelidis, G., & Ménier, C. (2016). An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies. *Machine Vision and Applications*, 27(7), 1005–1020. DOI: 10.1007/s00138-016-0784-4
- Kolb, A., Barth, E., Koch, R., & Larsen, R. (2010). Time-of-Flight Cameras in Computer Graphics. *Computer Graphics Forum*, 29(1), 141–159. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2009.01583.x
- Langmann, B., Hartmann, K., & Loffeld, O. (2013). Increasing the accuracy of Time-of-Flight cameras for machine vision applications. *Computers in Industry*, 64(9), 1090–1098. DOI: 10.1016/j.compind.2013.06.006
- Lazarević, D., Nedić, B., Jović, S., Šarkoćević, Ž., & Blagojević, M. (2019). Optical inspection of cutting parts by 3D scanning. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 531, 121583. DOI: 10.1016/j.physa.2019.121583
- Luo, H., Zhang, K., Li, R., Xia, Y., & Liang, P. (2022). A structured-light 3D sensor-based shape measurement method for casting allowance evaluation. *Frontiers in Physics*, 10, 979450. DOI: 10.3389/fphy.2022.979450
- Pérez, L., Rodríguez, Í., Rodríguez, N., Usamentiaga, R., & García, D. (2016). Robot Guidance Using Machine Vision Techniques in Industrial Environments: A Comparative Review. *Sensors*, 16(3), 335. DOI: 10.3390/s16030335
- Pratt and Whitney Measurement Systems, Inc. Labmaster Universal - Model 175. Saatavissa (viitattu 28.4.2023): https://www.prattandwhitney.com/products/LabMaster_Universal_Length_Comparator/
- Shang, H., Liu, C., & Wang, R. (2022). Measurement methods of 3D shape of large-scale complex surfaces based on computer vision: A review. *Measurement*, 197, 111302. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111302
- Sick. Etäisyysanturit. Saatavissa (viitattu 28.4.2023): https://www.sick.com/fi/fi/etaisyysanturit/c/g132151?q=:Def_Type:Product:prem.g132151.Technologie%3C%40%3ETeknologiati:Laserkolmiomittaus:productsegmentcode:g132151&fs=10000
- Vandone, A., Baraldo, S., Anastassiou, D., Marchetti, A., & Valente, A. (2020). 3D vision system integration on Additive Manufacturing machine for in-line part inspection. *Procedia CIRP*, 95, 72–77. DOI: 10.1016/j.procir.2020.01.191

Virelabs. Konenäkö lyhyesti. Saatavissa (viitattu 10.3.2023): <https://www.virelabs.com/fi/virebox/konenako/>

Wöhler, C. (2009). *3D Computer Vision: Efficient Methods and Applications*. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-01732-2

Yang, L., Wang, B., Zhang, R., Zhou, H., & Wang, R. (2018). Analysis on Location Accuracy for the Binocular Stereo Vision System. *IEEE Photonics Journal*, 10(1), 1–16. DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2784958

Ye, Y., Chang, H., Song, Z., & Zhao, J. (2020). Accurate infrared structured light sensing system for dynamic 3D acquisition. *Applied Optics*, 59(17), E80. DOI: 10.1364/AO.388483

Yuechao, Z., Xingyu, Y., Yuan, Z., Alang, L., Yanduo, Z., Chunhui, P., Yakun, Z., & Xianglan, D. (2022). Research on 3D visualization technology of electromagnetic source arc based on machine vision. *2022 International Conference on Computer Engineering and Artificial Intelligence (ICCEAI)*, 750–755. DOI: 10.1109/ICCEAI55464.2022.00158

Zhang, S. (Ed.). (2016). *Handbook of 3D Machine Vision* (0 ed.). CRC Press. DOI: 10.1201/b13856