

SELVITYS OPTISEN 3D-MITTAUSJÄRJESTELMÄN KA- MEROISTA

Tuomainen Martti

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

2019

Tekniikka ja liikenne
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Martti Tuomainen	Vuosi	2019
Ohjaaja	DI Tapani Ruokanen		
Toimeksiantaja	Mionex Oy/Pikkarainen Harri		
Työn nimi	Selvitys optisen 3D-mittausjärjestelmän kameroista		
Sivu- ja liitesivumäärä	34		

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä selvitys optisen 3D-mittausjärjestelmän kameroista. Selvitys sisältää kirjallisuustutkimuksen CMOS-kennon ja kameran ominaisuuksista. Opinnäytetyössä käsiteltiin myös kyseistä mittaustapaa ja verrattiin kahta kameraa toisiinsa.

Opinnäytetyön aihe tuli Mionex Oy:ltä. Opinnäytetyöhön liittyvää aineistoa saatiin Mionex Oy:ltä, laitevalmistajilta, alan julkaisuista ja standardeista. Opinnäytetyön tuloksena saatiin koostettua katsaus tarvittavista kameroiden ominaisuuksista sekä vertailudataa kameroista.

Technology, Communication and Transport
Electrical and Automation Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Martti Tuomainen	Year	2019
Supervisor	Tapani Ruokanen, M.Sc.		
Commissioned by	Mionex Oy/Harri Pikkarainen		
Subject of thesis	Analysis of the cameras in the optical 3D measurement system		
Number of pages	34		

The aim of this thesis was to make an analysis of the cameras in the optical 3D measurement system. The study includes a literature study on the characteristics of the CMOS sensor and camera. The thesis also dealt with this measurement method and compared the two cameras to each other.

The subject of the thesis came from Mionex Oy. Material related to the thesis was obtained from Mionex Oy, equipment manufacturers and industry publication and standards. As the result of the thesis, a compiled overview of the required camera features was obtained, as well as comparative data from the cameras.

Key words

linelaser, laser triangulation, CMOS, EMVA 1288

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	3D-MITTAUSMENETELMÄ.....	8
2.1	Lasertriangulaatio	8
2.2	Okklusio	9
2.3	Eri triangulaatiogeometriat.....	10
3	3D-KAMERA.....	13
3.1	EMVA 1288-direktiivi.....	13
3.2	Ominaisuudet.....	13
3.2.1	Sensitivity	14
3.2.2	Rolling Shutter ja Global Shutter	15
3.2.3	Quantum Efficiency.....	17
3.2.4	Pixel size	18
3.2.5	Temporal Dark Noise	20
3.2.6	Saturation Capacity.....	20
3.2.7	Absolute Sensitivity Threshold	21
3.2.8	Dynamic Range.....	21
3.2.9	Signal-to-Noise Ratio	22
4	TESTIT JA TULOKSET	23
4.1	Tulokset	26
4.2	Tulosten analysointi	29
5	POHDINTA.....	32
	LÄHTEET.....	33

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

NEE	Noise Equivalent Exposure
SEE	Saturation Equivalent Exposure
DN	Digital Number
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
AD-muunnin	Analogia/Digitaalimuunnin
QE	Quantum Efficiency
CRA	Chief Ray Angle
SNR	Signal-to-Noise Ratio
DR	Dynamic Range
FPS	Frames Per Second

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Mionex Oy. Mionex on Kemissä toimiva teknologiayritys. Mionex valmistaa optista 3D-mittaustekniikkaa hyödyntäviä hihnakuuljettimien hihnojen kunnonvalvontajärjestelmiä materiaalien käsittelyteollisuudelle. Mionexin myymistä tuotteista yli 90 % päätyy ulkomaille kansainvälisen jakelijan toimesta. Mionex on niin sanottu spin-off-yritys Lapin ammattikorkeakoulun optisen mittaustekniikan laboratorion.

Hihnojen kunnonvalvontajärjestelmät muodostuvat hihnojen materiaali- ja puhtaanpuolen kunnonvalvontalaitteista. Laitteita asennetaan kuljettimille tarvittava määrä ja ne kytketään toisiinsa lähiverkon avulla. Järjestelmää ohjataan ohjelmistokäyttöliittymästä, joka sijaitsee tyypillisesti laitosten ohjaamossa. Kuvassa 1 näkyvät kuljetinhihnan kunnonvalvontalaitteet.



Kuva 1. Kuljetinhihnan materiaali- ja puhtaanpuolen kunnonvalvontalaite

Valvontalaitteissa käytetään laservaloistusta sekä kameraa hihnan pinnan 3D-mittaukseen. Optimaalisten komponenttien käyttäminen 3D-mittaukseen on keskeistä tuotteiden valmistuksessa. Tekniikan kehittyessä uusien komponenttien ja teknologioiden seuraaminen ja hyödyntäminen on tärkeää tuotteiden suorituskyvyn ja kustannustason kannalta.

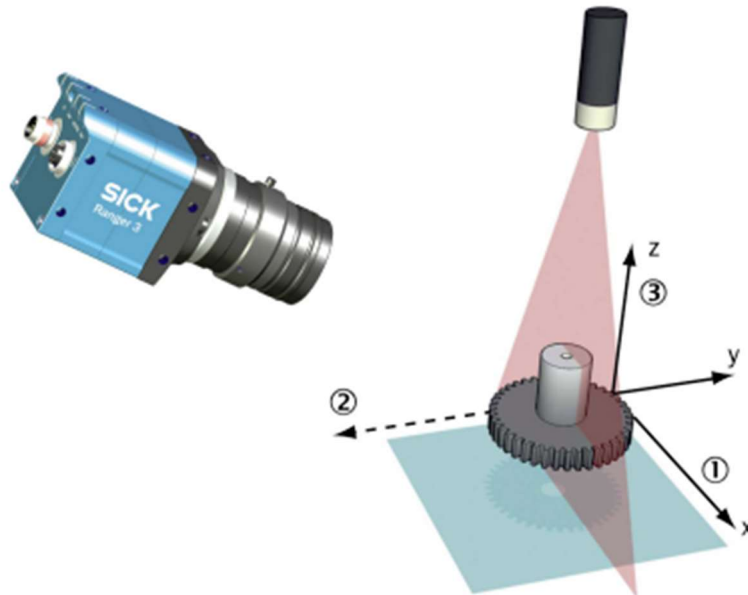
Opinnäytetyön tarkoituksena on tehdä selvitys saatavilla olevista uusista optisen 3D-mittaustekniikan kameroista. Tämä johtuu siitä, että optiikka ja laservalo oli jo lukittu kyseiseen laitteeseen ja kamera on mittauksen kannalta keskeisin komponentti.

Työn tavoitteena on selvittää tähän tarkoitukseen tärkeimmät kameroiden ominaisuudet, jotka ovat tärkeitä vertailtaessa eri kameroita. Työssä verrataan kahta eri kameramallia, jotka olivat soveltuvia tähän laitteeseen.

2 3D-MITTAUSMENETELMÄ

2.1 Lasertriangulaatio

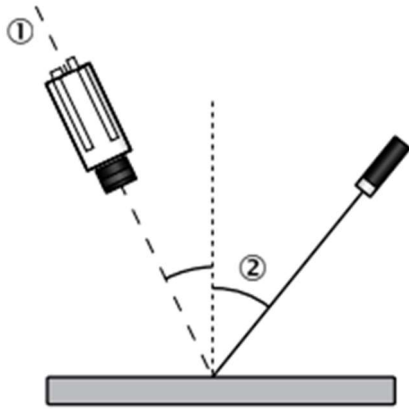
3D-kamera mittaa etäisyyttä käyttämällä triangulaatiota. Tämä tarkoittaa sitä, että kohdetta valaistaan viivavalolla yhdestä suunnasta ja kamera mittaa kohdetta toisesta suunnasta. Kohteen mittauksessa yleisin valonlähde on viivalaser. Kamera analysoi sensorin kuvista laserin viivaa. Korkein kohta löytyy viivasta pitkin x-akselia (kohteen leveys), joka vastaa kohteen korkeinta kohtaa. Koordinaatisto etäisyyden mittaamiseen on esitettyä kuvassa 2, jossa 1 on kohteen leveys, 2 on kohteen suunta ja 3 kohteen etäisyys. (Ranger 2018, 11.)



Kuva 2. Koordinaatisto etäisyyden mittaamiseen (Ranger 2018, 11.)

Kun mitataan etäisyyttä, tulevat 2 kulmaa tärkeimmäksi, ensiksi kameran kulma ja toiseksi tulevan valon kulma. Kummatkin kulmat mitataan kohteen liikkumissuunnan normaalista. Kameran kulma mitataan kameran optisesta akselista, joka on linssin keskikohta. Kuvassa 3 asia esitetään ja siinä 1 on optinen akseli ja 2 on valon kulma. Lisäksi luotettavien mittaustuloksien saavuttamiseksi laserin linjan pitää olla kohtisuorassa kohteen liikkeen suuntaan ja myös linjassa kameran sensorin riveissä. Myös linssi tulee fokusoida, jotta laserin viiva näkyy terävänä ja

laser on fokusoitu siten, että kohteessa näkyy terävä viiva ja laserviivan paksuus kattaa muutaman rivin kameran sensorilta. (Ranger 2018, 11.)

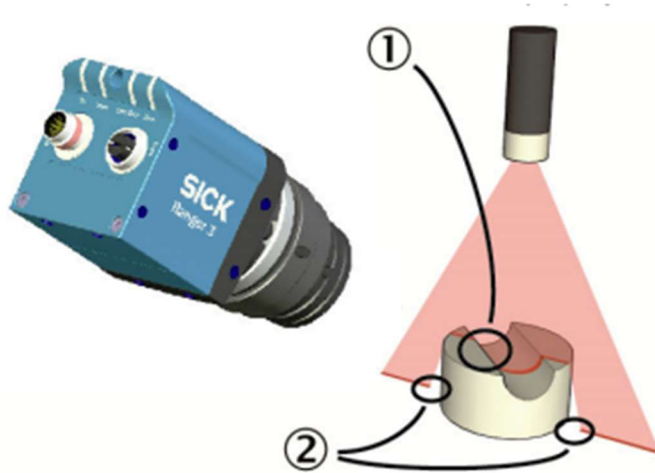


Kuva 3. Kulmat ja optinen akseli (Ranger 2018, 11.)

2.2 Okkluusio

Okkluusio ilmenee, kun 3D-kameran sensorissa ei näy laserviivaa. Okkluusion seurauksena puuttuvat tiedot mittauksen kohteena olevista kohdista. Okkluusiota on kahta tyyppiä, joista ensimmäisenä kameran okkluusio. Tämä tapahtuu silloin, kun laserin viiva jää kameran piiloon kohteessa. Toisena on laserin okkluusio, jossa laser ei pysty kunnolla valaisemaan kohdetta. Tämä on esitetty kuvassa 4, jossa 1 on kameran okkluusio ja 2 on laserin okkluusio. (Ranger 2018, 12.)

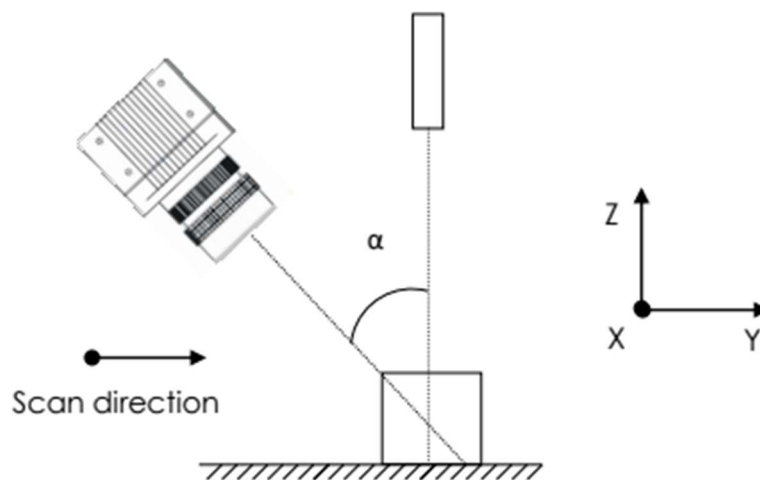
Kameran ja laserin kulman säätö voi pienentää okkluusion vaikutusta. Yleisin keino okkluusioiden estämiseksi tai vähentämiseksi on lisätä lasereita ja/tai kameroita eri kulmiin. (Ranger 2018, 12.)



Kuva 4. Okklusionin eri tyypit (Ranger 2018, 11.)

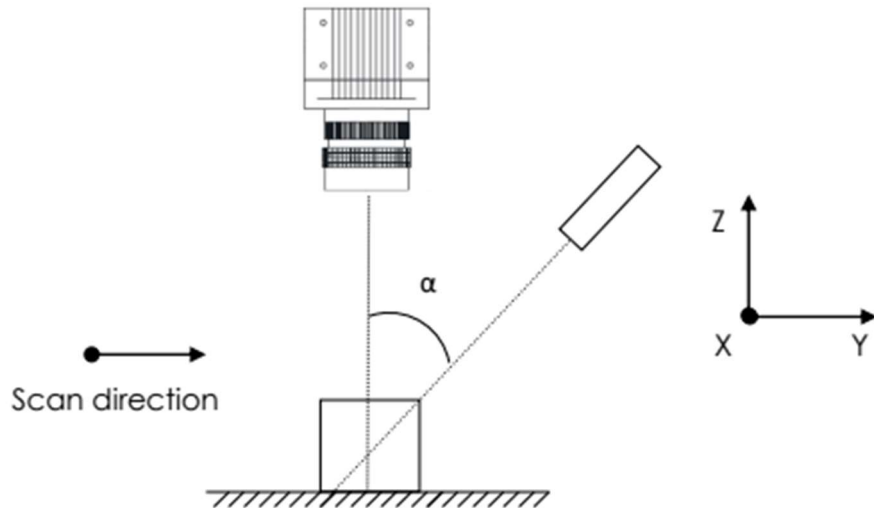
2.3 Eri triangulaatiogeometriat

Tässä ovat tyypillisimmät triangulaatiogeometriat, jossa ΔX on resoluutio laserlinjaa pitkin (sivusuunnassa), ΔY on lasersuuntaan nähden kohtisuorassa oleva resoluutio (pituussuuntainen liikkeen suunnassa) ja ΔZ on korkeuden resoluutio. (AT 2018, 22.)



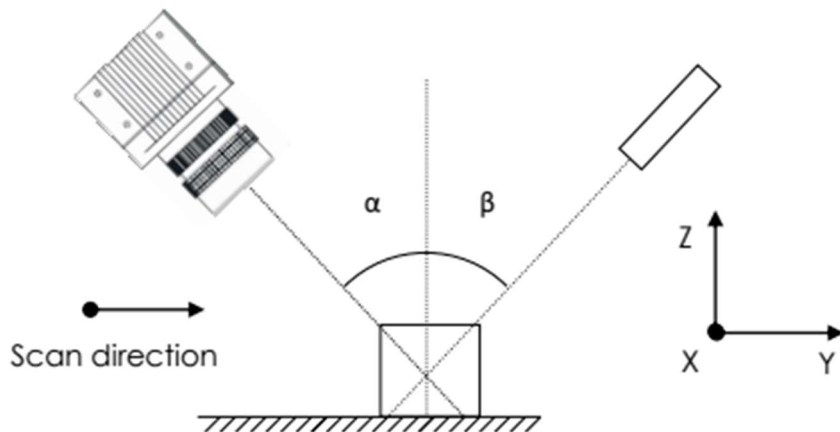
Kuva 5. Geometria 1 (AT 2018, 22.)

Laserlinja heijastetaan kohtisuoraan kohteeseen ja kamera katsoo kohdetta kulmalla α , kuten kuva 5 näyttää. Korkeusresoluutio on likimääräisesti $\Delta Z \approx \Delta X / \sin(\alpha)$. (AT 2018, 23.)



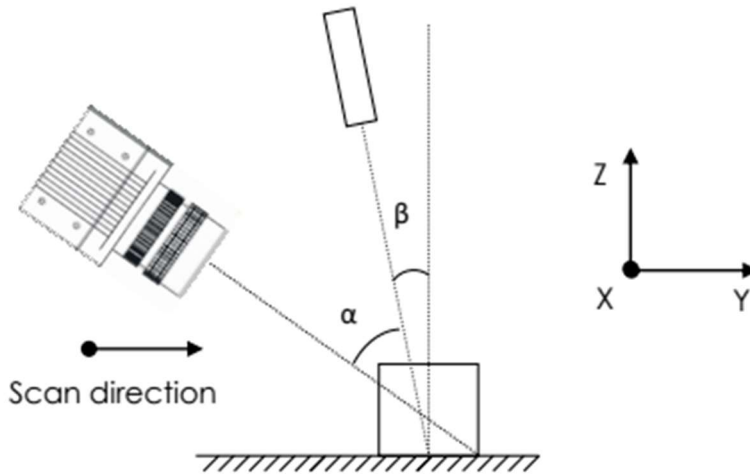
Kuva 6. Geometria 2 (AT 2018, 23.)

Kamera katsoo kohdetta kohtisuoraan ja laser valaisee kulmassa α (Kuva 6). Korkeusresoluutio on likimääräisesti $\Delta Z \approx \Delta X / \tan(\alpha)$. (AT 2018, 23.)



Kuva 7. Geometria 3 (AT 2018, 23.)

Kamera katsoo kohdetta kulmassa α ja laser valaisee kulmassa β (Kuva 7). Korkeusresoluutio on likimääräisesti $\Delta Z \approx \Delta X * \cos(\beta) / \sin(\alpha + \beta)$. Jos $\alpha = \beta$ (suora heijastus), niin $\Delta Z \approx \Delta X / 2 * \sin(\alpha)$. (AT 2018, 23.)



Kuva 8. Geometria 4 (AT 2018, 24.)

Kamera katsoo kohdetta kulmassa α ja laser valaisee kohdetta kameran puolella kulmassa β (Kuva 8). Korkeusresoluutio on likimääräisesti $\Delta Z \approx \Delta X * \cos(\beta) / \sin(\alpha)$. (AT 2018, 24.)

3 3D-KAMERA

Teollisuuskameroita on saatavissa joko CCD- tai CMOS-kennoilla. Kummankin periaate on sama, pikseliin tulee valoa ja se muuttuu sähkövaraukseksi, joka on verrannollinen valon kirkkauteen. CCD (Charge Coupled Device) -kenno siirtää varauksia riveittäin ja varaukset luetaan rivi ja sarake kerrallaan. Kennon nurkalla sijaitseva AD-muunnin muuntaa varaukset digitaaliseksi arvoksi. (Oksanen 2017.) Tämä on erittäin hidasta verrattuna CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) -kennoon, jossa vahvistus ja muunnos tehdään jokaisessa pikselissä erikseen. (Nilsson 2011.) Muita CMOS-kennon etuja ovat myös pienempi virrankulutus ja joustava luku (pystyy ottamaan esim. vain tarvittavan osan kuvasta ja näin vähentää tiedonsiirron määrää). (Jai 2019.)

Nykyajan markkinoilla CMOS-kennot ovat ottaneet tuntuvan yliotteen. Yhtenä syynä varmasti puhelimet, joita on valtavasti. Sonyhan ilmoitti jo aiemmin lopettavansa CCD-kennojen tuotannon ja CCD-kennot jäävät vain erityissovelluksiin.

3.1 EMVA 1288-direktiivi

EMVA 1288 on elektronisen mittauksen standardi, jonka laatijana on European Machine Vision Association. Sen tarkoituksena on määritellä menetelmät konenäköön käytettävien kameroiden vertailemisesta. Siinä on myös säännöt ja ohjeet tulosten ilmoittamisesta. (EMVA 2019.)

Standardointi on erittäin merkityksellistä kaikille toimialoille ja varsinkin monimutkaiselle ja maailmalaajuiselle konenäköteollisuudelle. EMVA pitää tärkeänä, että tietoa standardeista ja tilastostandardien kehittämisestä on aina saatavilla ja kaikki konenäköyritykset saavat osallistua EMVA:n standardointiin. (EMVA 2019.)

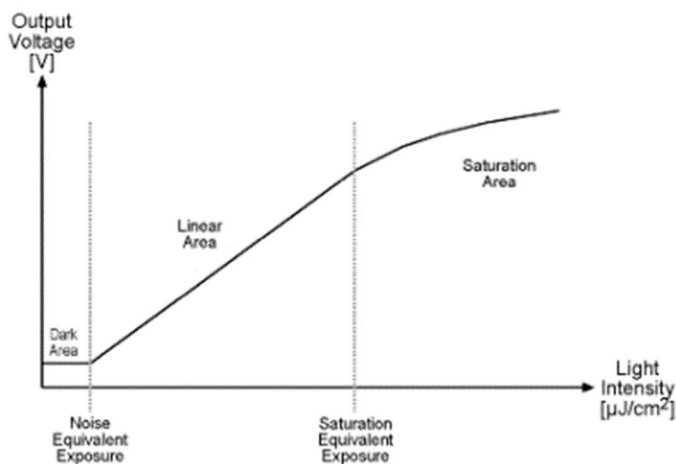
3.2 Ominaisuudet

Kun kameran valintaa aletaan suunnitella, ainakin seuraavat ominaisuudet olisi hyvä sisäistää. En ole ominaisuuksissa huomioinut nopeutta, resoluutiota, liitintää ja olosuhteisiin liittyviä asioita, koska näillä on joka kuvausolosuhteissa jokin minimivaatimus ja ne pitää kuitenkin määrittää.

Näistä suurin osa on pakollista ilmoittaa EMVA 1288-standardin mukaan. Kaikkia pakollisia ominaisuuksia ei ole otettu tähän mukaan.

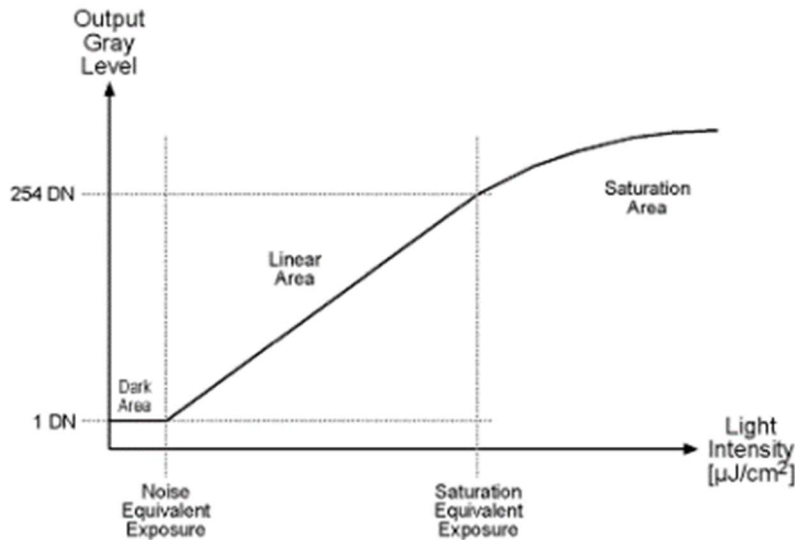
3.2.1 Sensitivity

Kennon (pikselin) herkkyys ilmaistaan usein vastekäyrällä, joka näkyy kuviossa 1. Tyypillinen vastekäyrä on jaettu kolmeen osaan. Ensimmäinen osa on dark area, joka näyttää kennon herkkyuden vähäiseen valon intensiteettiin. Käyrässä tapahtuu muutos, kun signaali/kohinasuhde on 1. Tätä pistettä kutsutaan NEE-kohtaksi. Tästä eteenpäin vastekäyrä nousee lineaarisesti valon intensiteetin mukaan SEE-kohtaan saakka. Tämän jälkeen vastekäyrä muuttuu epälineaariseksi, koska pikseli alkaa olemaan täysin saturoitunut. (Allen & Triantaphillidou 2011, 453; Basler sens 2019.)



Kuvio 1. Kennon (pikselin) vastekäyrä voltteina (Basler sens 2019.)

Kuviossa 2 on vastaava käyrä, mutta pystyakselissa on ulostulojännitteen sijaan DN. Tässä on otettu huomioon mm. AD-muunnin ja vahvistin ulostulevaan signaaliin. Kuviossa 2 jännitesignaali on muunnettu 8-bittiseksi digitaaliarvoksi, eli harmaasävyjä on 255. Kameran elektroniikka on säädetty niin, että harmaasävyarvoja tulee vain lineaarisen käyrän alueelta. (Allen & Triantaphillidou 2011, 453; Basler sens 2019.)

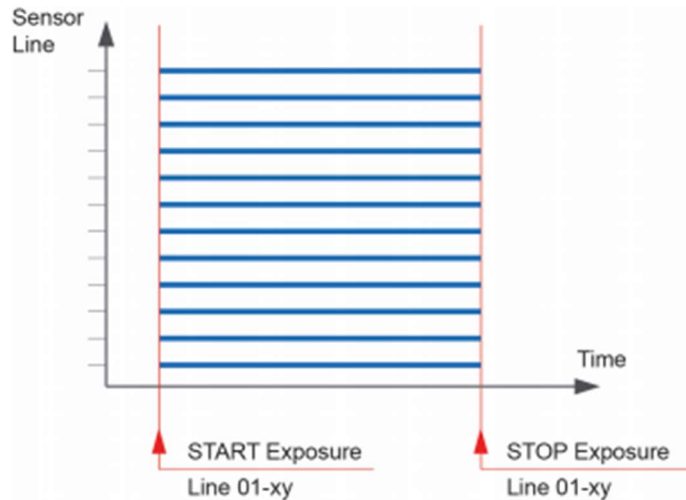


Kuvio 2. Kennon (pikselin) vastekäyrä digitaaliarvona (Basler sens 2019.)

3.2.2 Rolling Shutter ja Global Shutter

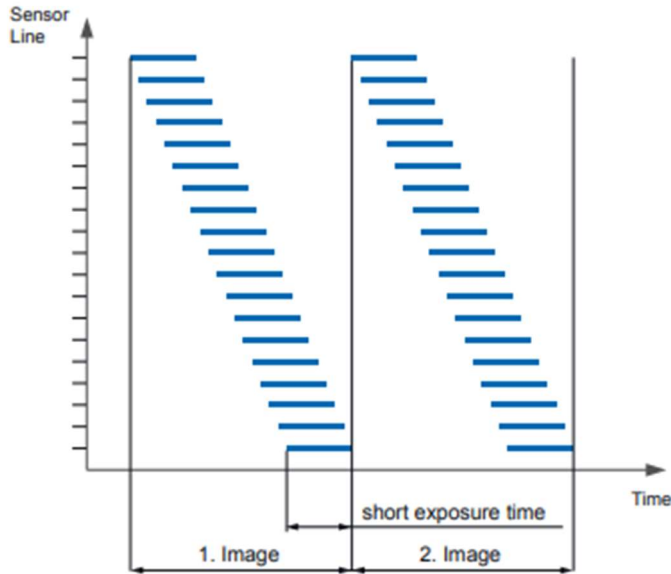
Perinteisissä filmikameroissa suljin suojasi filmiä valoa vastaan avautuen vain silloin, kun suljinnappia painettiin. Suljinnopeuden arvo määräsi ajan, kuinka kauan se pysyi auki. Jos valotusaika oli liian pieni, niin kuva alivalottui. Liian pitkällä valotusajalla kuva ylivalottui. Kennot ovat filmien sijasta nykyaikaa, mutta perusperiaate valotuksesta pätee edelleen. Valoherkät kennot tyhjenetään varauksesta valotuksen alussa ja luetaan valotusajan päättyessä. (Basler 2018, 1.)

Global Shutter -valotus toimii samalla periaatteella, kuin perinteinen aukko filmikameroissa. Suljin aukeaa, valo tunkeutuu koko kennon alueelle ja suljin sulkeutuu. Global tässä asiassa liittyy yhtäaikaiseen valotukseen koko pinnalla, koko kuvan alue vallataan kerralla. Vain muutamia vuosia sitten, tällaista suljinta oli vain CCD-kennojen käytössä. Tämä tekniikka mahdollistaa kuvaamisen nopeasti liikkuvasta kohteesta tai kamerasta. Kyseisen sulkimen toiminta näkyy kuviosta 3. (Basler 2018, 2.)



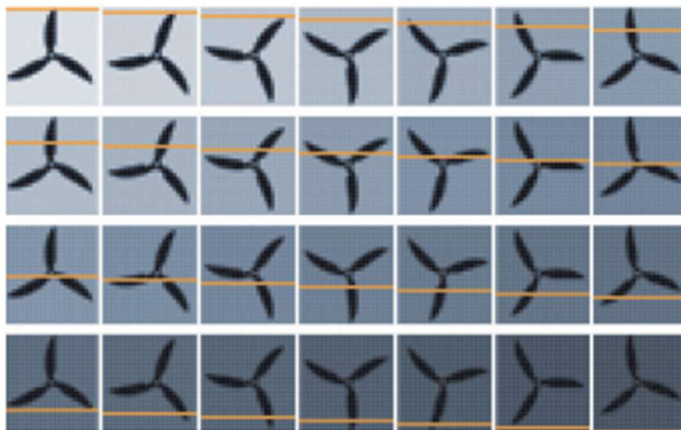
Kuvio 3. Valotus alkaa ja loppuu yhtä aikaa joka pikselillä (Basler 2018, 2.)

Rolling Shutter on valotustekniikka, jota käytettiin ensisijaisesti CMOS-kennoissa. Toisin kuin Global Shutter -valotustekniikassa, tässä ei ole yksittäistä yhtäaikaista valotusta. Kun laukaisinta painetaan ja kamera käynnistyy, pikselirivit valotetaan peräkkäin rivi riviltä. Tässä voi tulla joissain tapauksissa päällekkäisyyksiä. Kun kuvan viimeinen rivi on täysin valotettu, alkaa seuraavan kuvan valotus ensimmäiseltä riviltä. Tämä valotustekniikka ei tarvitse kuin kaksi transistoria pikselissä siirtämään elektroneja. Tämä aiheuttaa vähemmän lämpöä ja tuottaa vähemmän taustakohinaa kuin Global Shutter, jonka 4-5 transistoria tuottaa reilusti taustakohinaa ja lämpöä. Toisaalta liikkuvat kohteet usein aiheuttavat vääristymiä, jotka ylittävät hyväksyttävän kynnsarvon joissain sovelluksissa. Kuviossa 4 näkyy tämä peräkkäisyys. (Basler 2018, 2.)



Kuvio 4. Rolling Shutter esitettynä (Basler 2018, 2.)

Vääristymät ilmenevät, jos kohde tai kamera liikkuu rivikohtaisen valotuksen aikana. Kuvassa 9 keltainen viiva osoittaa valotuksen kohteena olevaa riviä ylimmästä alimpaan. Valotuksen aikana potkuri teki 4 pyörähdystä. (Basler 2018, 3.)



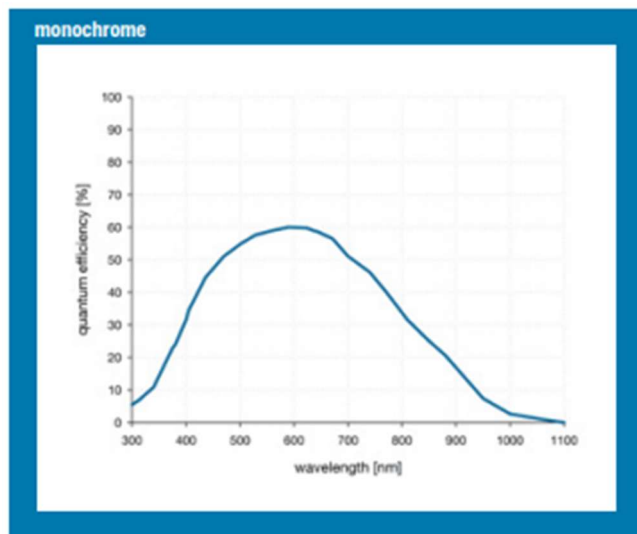
Kuva 9. Vääristymää Rolling Shutter -tekniikalla (Basler 2018, 3.)

3.2.3 Quantum Efficiency

QE-arvolla tarkoitetaan suhdelukua, joka tulevasta valosta (fotoneista) muutetaan elektroneiksi pikselillä valotusajan aikana. Luku ilmoitetaan 0-1 tai 0-100%,

jossa 1 tai 100% tarkoittaa sitä, että kaikki tulevat fotonit saadaan muutettua elektroneiksi. Kyseinen arvo on riippuvainen valon aallonpituudesta. Tämä luku pitää sisällään koko pikselin alueen, eikä vain valoherkkää aluetta. CMOS-kennoissahan osa elektroniikasta sijaitsee pikselissä ja vie tilaa valoherkältä alueelta. (Utsav thesis 2016, 22-23.)

Kuviossa 5 näkyy tyypillinen harmaasävykameran QE-käyrä, jossa pystyakselilla QE prosentteina ja vaaka-akselilla valon aallonpituus nanometreinä.

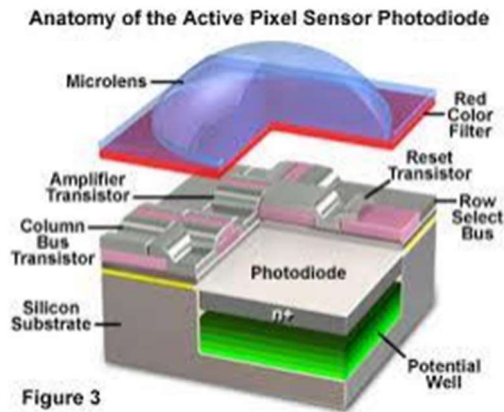


Kuvio 5. Tyypillinen harmaasävykameran QE-käyrä (Pco 2018.)

3.2.4 Pixel size

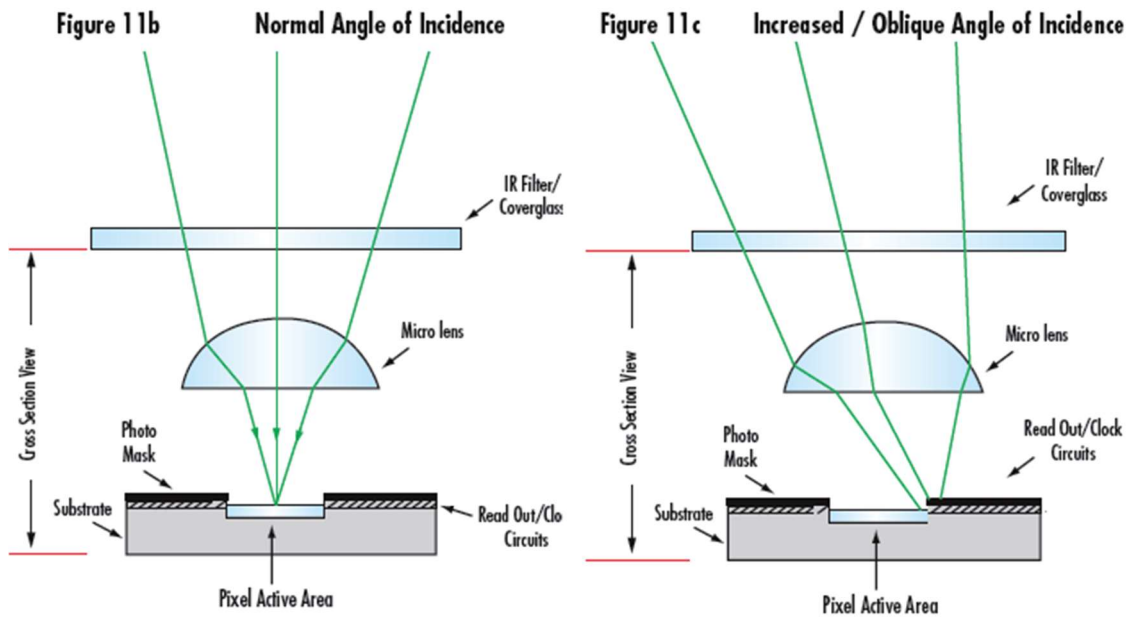
Nykypäivän trendi on ollut kameroissa se, että pikselimäärät kasvavat ja sitä myöten pikselin koko pienenee. CMOS-kennoissa pikselin täyttöaste (fillrate) voi olla vaikkapa 20 %. Eli pikselin alueesta vain 20 % on valoherkkää aluetta. CMOS-kennoissahan voi olla nykyään jo 8 transistoria pikselillä, joissa on Global Shutter, vahvistin ja niin edelleen. Kun valoherkkä alue on pienentynyt jatkuvasti, on pitänyt kehittää uusia keinoja saada Saturation Capacity pysymään edes samalla tasolla. Tämähän on yleensä verrannollinen pikselin kokoon. Yhtenä keinona tä-

hän ongelmaan on kehitetty mikrolinssit, jotka kohdistavat valoa pienelle valoherkälle alueelle ja tällä on saatu herkkyyttä ja täyttöastetta kasvatettua jopa kaksinkertaiseksi. (Edmund 2019.) Kuvassa 10 on esitetty tyypillinen pikselin rakenne.



Kuva 10. Pikselin rakenne (Stemmer 2019.)

Ongelma vaan voi olla erilaiset kuvausolosuhteet. Jos joutuu kuvaamaan läheltä leveää aluetta, ongelmaksi tulee muutenkin iso kuvauskulma (Chief Ray Angle CRA), joka aiheuttaa valaisun heikkenemistä (vignetting ja illumination roll-off) sensorin laiduille. Tätä tilannetta vielä pahentaa monen mikrolinssin optimi CRA, joka voi olla vain 5-7 astetta. Kuvassa 11 näkyy tämä mikrolinssin aiheuttama lisä valaisun heikkenemiseen. (Edmund 2019.)



Kuva 11. CRA:n liika muutos heikentää valon vastaanottoa (Edmund 2019.)

3.2.5 Temporal Dark Noise

Tämä on kennon pohjakohinaa, joka näkyy vaikkapa ottamalla kuvan täysin pimeässä. Tämä esitetään elektroneissa (e^-). Tämä syntyy, kun tuotetaan signaalia. Kameran elektroniikalla on tähän vaikutusta. Pienempi kohina on parempi, jolloin hyvin hämärässä otetut kuvat näkyvät selkeämmin. (Flir 2018; Thinklucid 2019.)

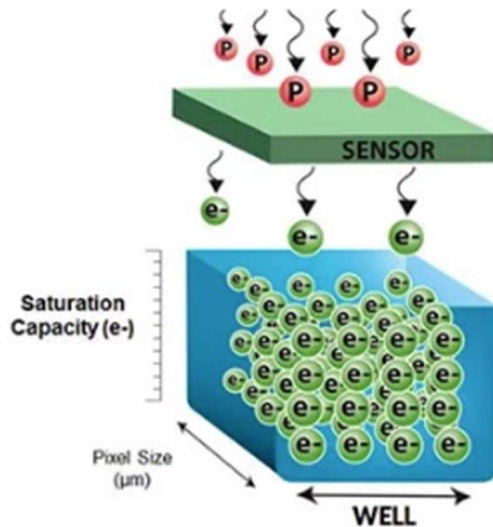
Nimi Temporal Dark Noise (ajallinen pimeä kohina) tulee siitä, että tämä pitää ottaa mahdollisimman pienellä valotusajalla, koska valotusajan kuluessa Dark Current (pimeä virta) kasvaa voimakkaasti. Tämä arvo vaikuttaa dynaamisen alueen leveyteen (Dynamic Range). (Emva 2019.)

3.2.6 Saturation Capacity

Tämä kuvaa elektronien määrää, jonka pikseli pystyy varastoimaan valotusajan ajaksi. Yleensä isompi pikselikoko vastaa suurempaa elektronimäärää, mutta eri tekniikat kuten mikrolinssit, ovat nostaneet elektronimäärää. Tällä arvolla on suora vaikutus signaali/kohina-suhteeseen (SNR) ja tässäkin arvossa suurempi

on parempi. Tämä antaa kennolle erottelukykä varsinkin hyvin valaistuissa kohteissa. Kuvassa 12 on esitetty pikselin varastoimaa elektronimäärää. (Flir 2018.)

5,5 mikrometrin kokoisessa pikselissä on noin 20000 elektronia ja 7,4 mikrometrin pikselissä 40000 elektronia. 1,7 mikrometrin pikseli ei tarvitse kuin 1000 elektronia pikselin saturaatioon. (Vision doctor 2019.)



Kuva 12. Pikselin saturaatiokapasiteetin periaatekuva (Flir 2018.)

3.2.7 Absolute Sensitivity Threshold

Tämä arvo kertoo, montako fotonia tarvitaan kohinan ylittämiseksi. Tämä on yksi tärkeimmistä parametreista sovelluksille, joissa on vain vähän valoa käytössä. Tässä otetaan huomioon QE ja Temporal Shot Noise. (Flir 2018.)

Tässä ei oteta huomioon pikselin kokoa. Jos toisessa kamerassa on isommat pikselit, se tarvitsee vähemmän valoa samaan Absolute Sensitivity Threshold-arvoon ja on siten herkempi. (Lumenera 2018.)

3.2.8 Dynamic Range

Dynaaminen alue tarkoittaa maksimisignaalin (Saturation Capacity) suhdetta minimisignaaliin (Temporal Dark Noise). Tämä ilmaistaan suhdelukuna, desibeleinä tai bitteinä. Tämä arvo on tärkeä kohteille, joissa on kirkkaita ja tummia kohteita.

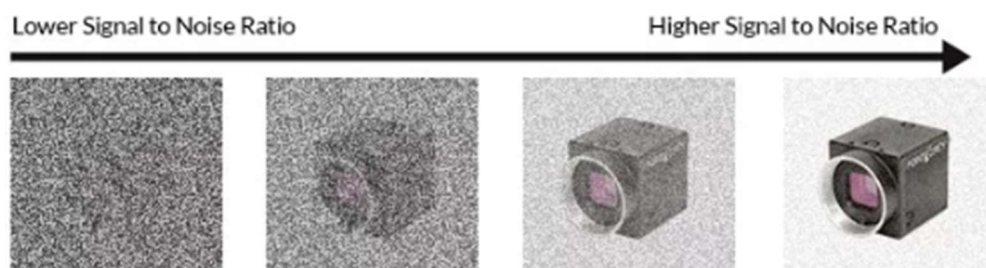
Tätä kennon kykyä tuottaa laaja alue voi rajoittaa heikko AD-muunnin. Esimerkiksi kenno tuottaa alueeksi 60 dB, joka vastaa 10-bittistä aluetta, AD-muunnin voi 8-bittisenä hukata paljon erottelukykyyä. Yhtä huono tilanne on toisinpäin, nyt tulevista harmaasävyistä moni olisi samoja. (Thinklucid 2018; Tokyoinst 2019.)

Monessa kennossa on lisäksi High Dynamic Range tai Extended Dynamic Range. Siinä valotetaan kuva esimerkiksi kolmessa osassa, jolloin kirkkaat kohdat eivät saturoidu ja tummemmat kohdat tulevat näkyviin pitemmän valotusajan turvin. Tämä hidastaa kuvataajuutta, joka voi tulla joissain sovelluksissa ongelmaksi. (Vs 2014.)

3.2.9 Signal-to-Noise Ratio

Tämä arvo kertoo saturaatiosignaalin suhteen saturaatiokohinaan. Tässä arvossa näkyy tärkeimpänä Saturation Capacity ja tämä kertoo kennon kykyä erottaa kirkkaita sävyjä toisistaan. Tämä ilmaistaan desibeleinä tai bitteinä ja tämä on aina pienempi kuin dynaaminen alue. Kuvassa 13 näkyy kohinan vaikutus kuvaan. (Lumenera 2017; Flir 2018.)

Tähän vaikuttaa kennon ja elektroniikan laatu, sekä elektroniikan arkkitehtuuri, lämpötila ja esimerkiksi johdosta tulevat häiriöt. (Basler 2019.)



Kuva 13. Signaali/kohinasuhde esitettynä (Flir 2018.)

4 TESTIT JA TULOKSET

Työn ensimmäinen tulos on selvitys siitä, mitkä tekijät vaikuttavat eniten toimeksiantajan sovelluksessa kameroiden suorituskykyyn ja miten eri kameramalleja voidaan verrata. Ilman tätä työtä kameroita ei voi verrata, koska niiden ominaisuuksia on lukuisia ja vain osa niistä on tärkeitä tässä sovelluksessa. Nämä tulokset on esitetty edellisessä luvussa.

Esiselvityksen perusteella valittiin kaksi kameraa kokeelliseen vertailuun. Kameroita testattiin testijärjestelyllä, jossa kamera, optiikka, kohde ja laser asetettiin toimeksiantajan sovelluksen kannalta oleelliseen geometriaan. Kohteena toimi mattamusta tasopinta. Laserina oli 660 nm 100 mW viivalaser. Optiikka oli valittu molempiin kameroihin siten, että kuva-alueen leveys oli lähellä samaa. Testijärjestely peitettiin valoa läpäisettömällä kankaalla, jotta kameralle muualta kuin kohteesta heijastuva laservalo voitiin minimoida. Tällä järjestelyllä voitiin verrata mahdollisimman objektiivisesti kameroiden kuvan hyvyttä keskenään. Kuvan hyvyyden kannalta tässä sovelluksessa keskeisimmät parametrit ovat kameran kyky muuntaa laserviivan valo pikseleiden harmaasävyarvoiksi (herkkyys) ja kohinan taso.

Kamera 1 on niin sanottu 3D-kamera, jossa harmaasävykuvasta laskettu 3D-profiili suoritetaan kameran sisällä olevalla prosessorilla. Kamera 2 on ns. tavallinen CMOS-kamera, jossa kuvausnopeus riittää sovelluksen vaatimukseen, ja 3D-informaatio voitaisiin laskea erillisellä prosessointiyksiköllä.

Keskeisimmät ominaisuudet kameroille näkyvät taulukossa 1.

Taulukko 1. Kameroiden ominaisuudet

	Kamera 1	Kamera 2
Kenno	Cmosis CMV2000	Sony IMX273
Resoluutio	2048*1088	1440 * 1080
Pikselin koko / μm	5,5	3,45
Shutter	global	global
QE / %	63	62,7
Dark noise / e^-	14	2,8
Saturation capacity / e^-	9000	10500
Dynamic range / dB	57	71,5
Signal-to-noise ratio / dB	40	40,2
Kuvataajuus / FPS	700	800

Testeissä käytettiin kameroiden tehdasasetuksia ja 850 us valotusaikaa. Kameroiden vertailussa muutettiin vain vahvistusta (gain). Nämä valinnat tehtiin toimeksiantajan pitkän kokemuksen perusteella. Muilla asetuksilla voidaan hienosäätää kuvanlaatua, mutta keskeisimmäksi kuitenkin muodostuivat valotusaika ja vahvistus. Valotusajan vaikutus harmaasävyjen arvoihin on lähes lineaarinen. Valotusajan kaksinkertaistuessa harmaasävyjen arvot kaksinkertaistuvat, kunnes pikselit saturoituvat. 850 us valotusaika haarukoitiin siten, että kameroiden koko dynaaminen alue tulisi käyttöön eri vahvistuksilla. 850 us on myös lyhyempi valotusaika, kuin nykyään käytetään, mikä on taas etu sovelluksen kannalta. Lyhyempiä valotusaikoja käytettäessä voitaisiin parantaa liikkeen suuntaista mitausresoluutiota tai pienentää lasertehoa.

Käytetyt vahvistusarvot olivat:

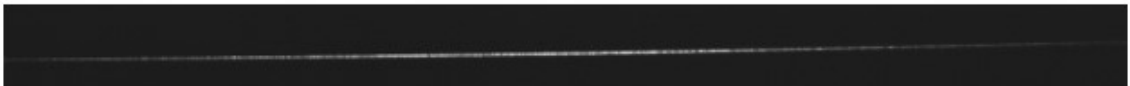
- Kamera 1 g1 (minimi), g2, g3.2 (maksimi)
- Kamera 2, g0 (minimi), g10, g20, g30, g36 (maksimi)

Vahvistukset eivät ole suoraan verrannollisia, mutta vahvistuksen minimi ja maksimi määräävät käytettävissä olevan alueen. Lasertriangulaation kannalta kamerakuvassa pitää olla sarakkeittainen laserviivan harmaasävyintensiteetti yli valitun kynnsarvon ja toisaalta mahdollisimman kirkas. Pikseleiden saturoituminen ei ole tavoite, mutta ei vaikuta paljoa tähän sovellukseen. Kynnsarvo voidaan

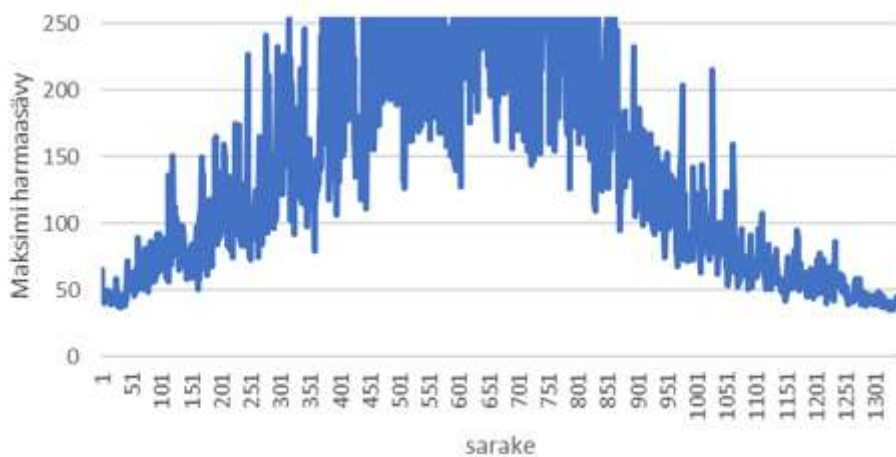
valita vallitsevan kohinatason mukaan. Kynnysarvon täytyy olla suurempi kuin sallittu kuvan kohina.

Testijärjestelyssä kuvausgeometria valittiin siten, että laserviivan intensiteetti kuvassa on keskellä kirkkaimmillaan ja reunoilla himmeimmillään. Tämä myös siksi, että kameran toiminta koko dynaamisella alueella tulee mahdollisimman hyvin esille lopputuloksista. Varsinaisessa sovelluksessa geometria on erilainen.

Kameroilla 1 ja 2 otettiin testikuvat yhden tunnin aikana eri vahvistusten arvoilla. Jokaisesta testikuvasta laskettiin kuvan sarakeittainen maksimi harmaasävyarvo, josta voidaan muodostaa harmaasävyprofiili kuvan leveydelle. Kuvassa 14 näkyy kameran muodostama kuva laserviivasta ja kuviossa 6 harmaasävyprofiili.



Kuva 14. Kameran muodostama esimerkkikuva laserviivasta



Kuvio 6. Esimerkkikuvasta muodostettu harmaasävyprofiili

Harmaasävyprofiili on havainnollinen esitys kameran kyvystä nähdä laserviiva. Sovelluksen kannalta kameran herkytydestä kertoo eniten harmaasävyprofiilin keskiarvo, koska testijärjestely kameroiden kesken oli samanlainen (sama geometria, kohde ja laser). Suurempi keskiarvo on parempi.

Toinen keskeinen suure on kuvan kohina. Jos kohina kasvaa liian suureksi, 3D-mittauksessa esiintyy kohinaa. Kohinan taso tyypillisesti kasvaa kameran vahvistuksen kasvaessa. Kohina määritettiin manuaalisesti jokaiselle testikuvalla siten, että kuvaa kynnystettiin kynnyseroa kasvattamalla kunnes kuvaan ei jäänyt kohinapikseleitä laserviiva-alueen ulkopuolelle. Tämä harmaasävykynnysarvo oli kohina. Alla olevassa kuvassa 15 näkyy kohinaa.



Kuva 15. Kohinaa esimerkkikuvassa

Harmaasävyprofiilin keskiarvon ja kohinan erotuksena saadaan laskettua suhteellinen käytettävissä oleva harmaasävyprofiilin keskiarvo (RANGE taulukoissa). Tässäkin suurempi arvo on parempi.

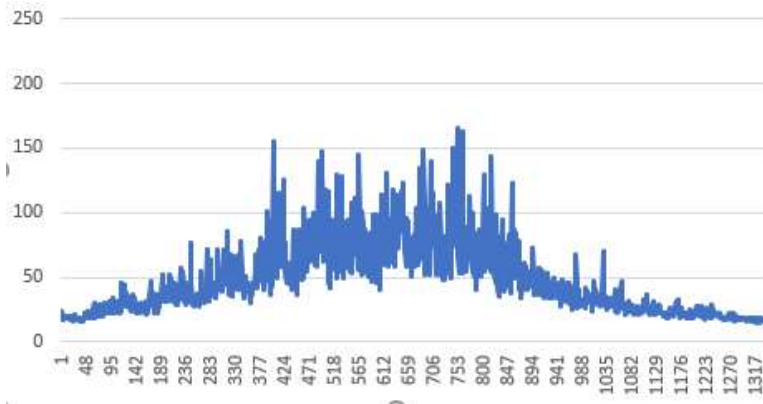
4.1 Tulokset

Taulukosta 2 näkyvät tulokset eri vahvistuksen arvoilla.

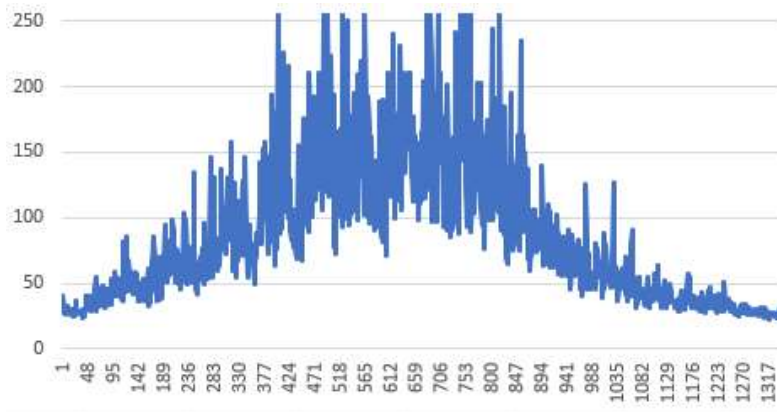
Taulukko 2. Kameroiden tulokset

	Vahvistus / G	Harmaasävyprofiilin keskiarvo	Kohina	Käytettävissä oleva harmaasävyprofiilin keskiarvo
Kamera 1	1	47	15	32
	2	85	25	60
	3,2	136	35	101
Kamera 2	0	11	1	10
	10	37	2	35
	20	108	5	103
	30	193	15	178
	36	226	41	185

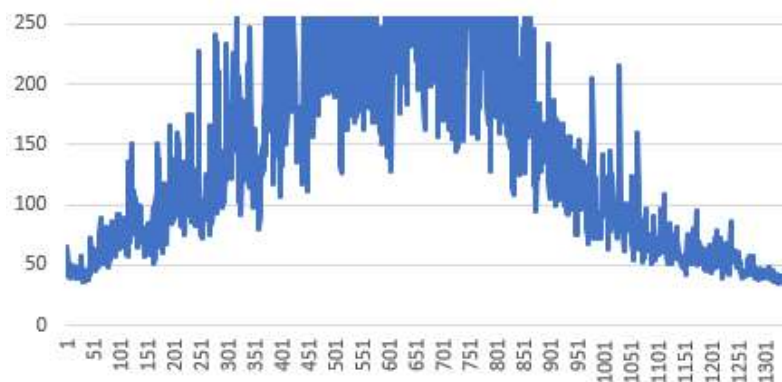
Kuviossa 7 on kamera 1, vahvistuksen arvolla G1, kuviossa 8 vahvistuksen arvolla G2 ja kuviossa 9 vahvistuksen arvolla 3,2.



Kuvio 7. Kamera 1 harmaasävyarvot vahvistuksella G1

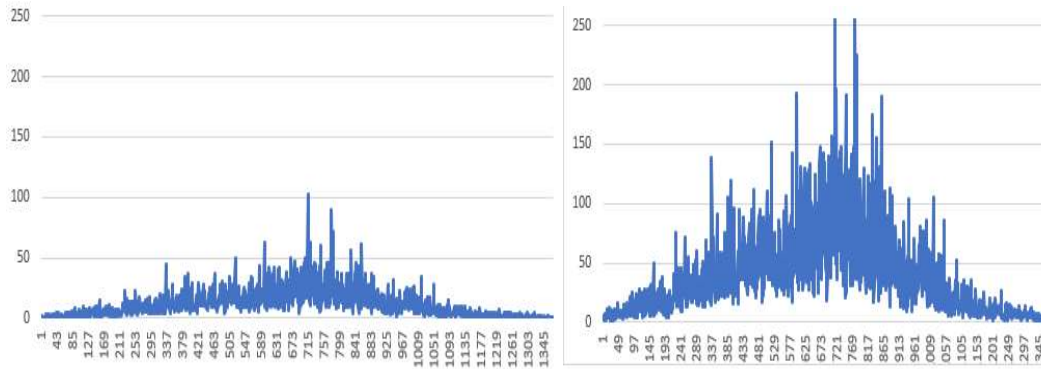


Kuvio 8. Kamera 1 harmaasävyarvot vahvistuksella G2

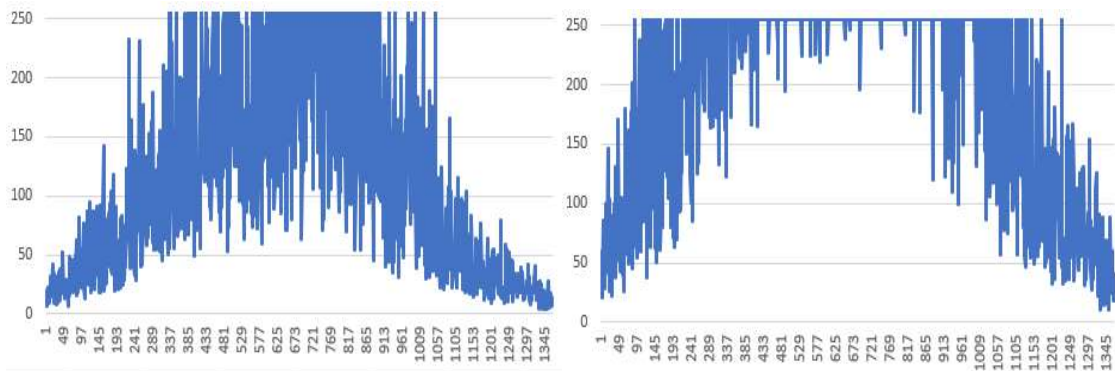


Kuvio 9. Kamera 1 harmaasävyarvot vahvistuksella G3,2

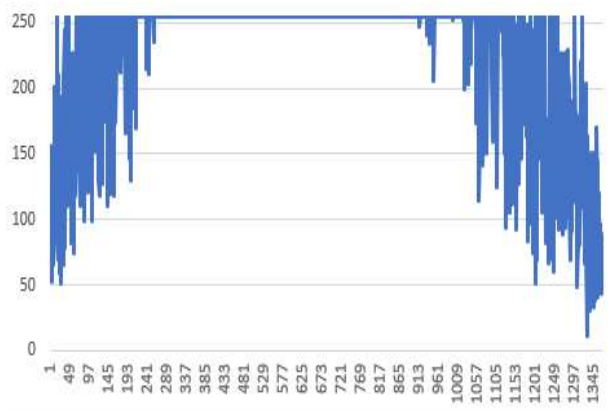
Kuviossa 10 on kamera 2, vahvistuksen arvolla G0 ja G10, kuviossa 11 vahvistuksen arvolla G20 ja G30 ja kuviossa 12 vahvistuksen arvolla G36.



Kuvio 10. Kamera 2 harmaasävyarvot vahvistuksella G0 ja G10



Kuvio 11. Kamera 2 harmaasävyarvot vahvistuksella G20 ja G30



Kuvio 12. Kamera 2 harmaasävyarvot vahvistuksella G36

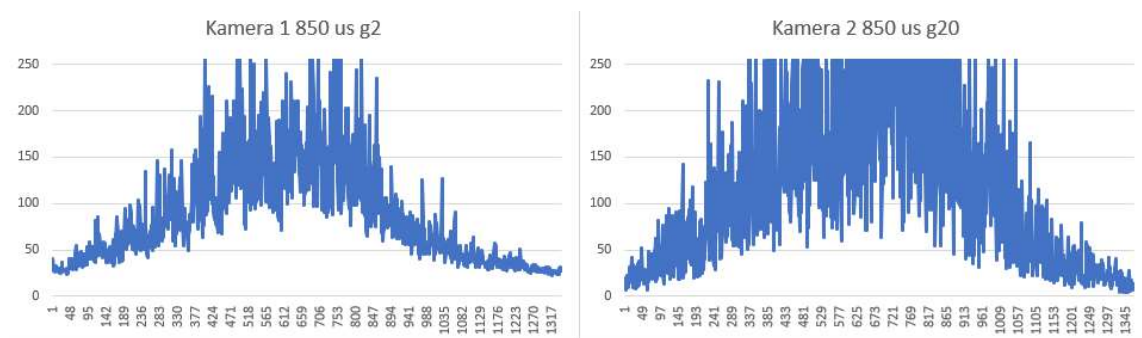
4.2 Tulosten analysointi

Kameroiden vahvistusta ei voida suoraan verrata vahvistusarvoilla, koska vahvistuksen arvo ja skaala on erilainen. Vertailua varten laskettiin suhteellinen vahvistus, joka on vahvistuksen suhde vahvistuksen kokonaisvaihteluväliin (max-min). Kameran 1 vahvistusarvot skaalattiin vielä alkamaan nolasta suhteellista vertailua varten. Taulukossa 3 esitetään suhteellinen vahvistus.

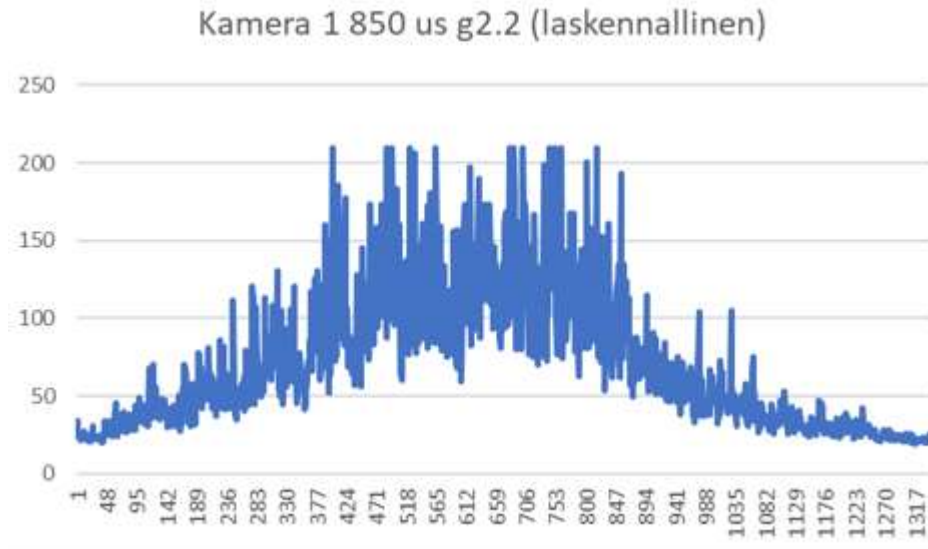
Taulukko 3. Suhteellinen vahvistus

Vahvistus/G	Suhteellinen vahvistus
0	0 %
10	28 %
20	56 %
30	83 %
36	100 %
1	0 %
2	45 %
3,2	100 %

Suhteellisen vahvistuksen avulla voidaan kameran 1 G2-arvoa ja kameran 2 G20-arvoa pitää lähimpänä toisiaan. Kuviossa 13 näkyvät lähinnä olevat arvot.



Kuvio 13. Kameroiden arvot lähimmillä vahvistuksien arvoilla



Kuvio 14. Kamera 1 laskennallinen harmaasävyprofiili

Kuviossa 14 on laskennallinen harmaasävyprofiili, joka vastaa kameran 2 vahvistusarvoa G20. Kamera 2 kuviossa 13 saturoituu merkittävästi, joten harmaasävykeskiarvo ei anna suoraan vertailukelpoista tulosta. Kamera 2 olisi vieläkin parempi, mutta käytettävissä oleva harmaasävyprofiilin keskiarvo kuvastaa sitä paremmin. Taulukossa 4 on laskettu kameroiden arvot.

Taulukko 4. Kameroiden arvot

	Harmaasävyprofiilin keskiarvo	Kohina	Käytettävissä oleva harmaasävyprofiilin keskiarvo
Kamera 1 G2,2 (lask. 56 %)	94	28	66
Kamera 2 G20 (56 %)	108	5	103

Tuloksista näkyy, että kamera 2:ssa on enemmän herkkyttä, vähemmän kohinaa ja käytettävissä oleva harmaasävyprofiilin keskiarvo on 56 % suurempi. Muitakin havaintoja voidaan tehdä kameran 2 eduksi.

- Sama käytettävissä oleva harmaasävyprofiilin keskiarvo saavutetaan kameralla 2 jo vahvistuksen arvolla G20, kuin kameralla 1 täydellä vahvistuksella. Kameran 1 kohina vahvistuksen arvolla G20 on 5, jota voidaan pitää erittäin alhaisena.
- Yleisesti ottaen kameran 2 kohinan taso on huomattavasti pienempi.

Tuloksena saatiin selvitys kameran ominaisuuksista ja asetuksista, sekä kokeelliset testit. EMVA 1288 on hyvä vertailussa, jotta voidaan varmistua oikeiden testikameroiden hankkimisesta, ei kaikkia voi ostaa.

Kamera 2 on parempi kuvanlaadun osalta. Se on herkempi ja siinä on huomattavasti vähemmän kohinaa. Sitä voi käyttää suurillakin vahvistuksen arvoilla kohinan ollessa hallinnassa.

5 POHDINTA

Kameran toiminta on ymmärrettävä kohtuullisella tasolla, mikäli haluaa verrata niiden tärkeimpiä ominaisuuksia omille sovelluksille. EMVA 1288-standardi auttaa hieman asiassa, että kameroista pitää ainakin samat arvot olla esillä. Opinnäytetyön tavoitteena oli hakea ja selventää perustiedot, jonka jälkeen vertailu on helpompaa.

Työssä tutustuttiin eri kameroihin ja ominaisuuksiin. Tiedonhakuja vaikeutti se, että CMOS-kennoissa on ihan viimevuosina tullut suuria teknologiaharppauksia eteenpäin. Tästä johtuen monella aiheeseen liittyvällä sivulla oli hyvin ristiriitaisia tai jopa vääriä informaatioita. Työ hidastui tästä syystä reilusti, kun ylimääräistä aikaa meni tarpeettomaan selvittelyyn.

Työssä päästiin hyvin tavoitteisiin ja ymmärrystä kehittyi roimasti lisää opinnäytetyön teon aikana. Voisi jopa sanoa, että nousi dilettantista seuraavalle tasolle. Tämä työ tuotti myös jatkokehityksen aiheita, esimerkiksi kennon asetusten vaikutukset kuvanlaatuun.

LÄHTEET

Allen, E. & Triantaphillidou, S. 2011. The manual of photography. Luettu 01.05.2019.

AT 2018. User Manual. Viitattu 20.4.2019. 117760-Automation-Technology-User-Manual-C5-Series_56cK82d%20.pdf.

Basler 2019. Knowledge base. Viitattu 11.5.2019. <https://www.baslerweb.com/en/sales-support/knowledge-base/frequently-asked-questions/what-is-a-signal-to-noise-ratio-and-how-can-i-improve-it/14990/>.

Basler sens. 2019. Knowledge base. Viitattu 01.05.2019. <https://www.baslerweb.com/en/sales-support/knowledge-base/frequently-asked-questions/what-is-sensitivity-and-why-are-sensitivity-statements-often-misleading/14987/>.

Edmund 2019. Imaging electronics resource. Viitattu 20.4.2019. <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/understanding-camera-sensors-for-machine-vision-applications/>.

EMVA 2019. Standardi. Viitattu 2.5.2019. <https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-3.1a.pdf>.

Flir 2018. EMVA 1288 overview. Viitattu 4.5.2019. <https://www.flir.com/discover/iis/machine-vision/emva-1288-overview-imaging-performance/>.

Jai 2019. Technology. CCD to CMOS transition. Viitattu 01.05.2019. <https://www.jai.com/technology/ccd-to-cmos-transition>.

Lappenkuper, D. 2018. White paper. Viitattu 26.4.2019. https://www.baslerweb.com/fp-1528105088/media/en/downloads/documents/white_papers/BAS1401_White_Paper_Rolling_Shutter.pdf.

Lumenera 2017. Blog. Viitattu 4.5.2019. <https://www.lumenera.com/blog/understanding-dynamic-range-and-signal-to-noise-ratio-when-comparing-cameras>.

Lumenera 2018. Understanding camera sensitivity a look at the numbers. Viitattu 11.5.2019. <https://www.lumenera.com/blog/understanding-camera-sensitivity-a-look-at-the-numbers>.

Nilsson, K. 2011. CCD-kamerat ja kuvankäsittely. Viitattu 21.4.2019. <http://www.caelus.fi/NOT-tiedekoulu/Tuorla/CCD.pdf>.

Oksanen, A. 2017. CCD-fotometria työpaja. Viitattu 20.4.2019. https://www.ursa.fi/fileadmin/ursa2010/Harrastus/Jaostot/Tieteellinen-yhteistyo/Fotometria2017/fotometria2017_arto.pdf.

Pco 2018. Data Sheet pco.edge_55_data_sheet. Viitattu 19.4.2019. https://www.pco.de/fileadmin/user_upload/pco-product_sheets/pco.edge_55_data_sheet.pdf.

Ranger 2018. Operating instructions. Luettu 10.4.2019. [Operating_instructions_Ranger3_3D_Vision_en_IM0080063.PDF](#).

Stemmer 2019. Dalsa. Viitattu 4.5.2019. https://www.stemmer-imaging.com/media/uploads/dalsa/SI/SISE-2015_1_4-Teledyne-DALSA-Tomorrows-CMOS_.pdf.

Stemmer 2019. Knowledge base. Viitattu 11.5.2019. <https://www.stemmer-imaging.com/en-fi/knowledge-base/sensor-noise/>.

Thinklucid 2019. Tech briefs. Viitattu 4.5.2019. <https://thinklucid.com/tech-briefs/emva-1288/>.

Tokyoinst 2019. Knowledge base. Viitattu 4.5.2019. http://www.tokyo-inst.co.jp/product_file/file/PC03_tec05_ja.pdf.

Utsav, J. 2016. Master thesis. Characterization of CMOS Image Sensor. Viitattu 20.4.2019. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:5ea21702-d6fb-484c-8fbf-15c5b8563ff1?collection=education>.

Vision doctor 2019. Camera technology basics. Viitattu 11.5.2019. <https://www.vision-doctor.com/en/camera-technology-basics/sensor-and-pixel-sizes.html>.

Vs 2014. CMOS imagers look to increase dynamic range. Viitattu 11.5.2019. <https://www.vision-systems.com/articles/print/volume-19/issue-9/features/cmos-imagers-look-to-increase-dynamic-range.html>.