

Time-of-Flight -tekniikan soveltaminen jätesäiliön tilavuusmittaukseen

Mikael Ovaska

Opinnäytetyö
Toukokuu 2020
Tekniikan ala
Insinööri (AMK), sähkö- ja automaatiotekniikka

Tekijä(t) Ovaska, Mikael	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2020
	Sivumäärä 66	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Time-of-Flight -tekniikan soveltaminen jätesäiliön tilavuusmittaukseen		
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikka		
Työn ohjaaja(t) Juho Riekkinen, Veli-Matti Häkkinen		
Toimeksiantaja(t) Devecto Oy		
Tiivistelmä <p>Maailmassa tuotetaan tänä päivänä jätettä kestävästi tahtia. Nykyään Suomessa taloyhtiöissä jätemaksut jaetaan tasan asukkaiden kesken. Vedenjakelussa oli opittu, että taloyhtiökohtaisesta laskutuksesta huoneistokohtaiseen laskutukseen siirryttäessä taloyhtiön kokonaisvedenkulutus laskee. Jyväskylän kaupunki halusi luoda vastaavan kannustimen vähentää myös jätteen tuottamista.</p> <p>Jotta laskutus olisi voitu muuttaa huoneistokohtaisiksi, piti pystyä tunnistamaan kuka laittoi jätettä taloyhtiön yhteiseen jätesäiliöön ja kuinka paljon. Laitetun jätteen määrän mittaamiseen ei ollut olemassa valmista ratkaisua. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, sopiiko Time-of-Flight -kamera jätesäiliön sisään laitetun jätteen tilavuuden mittaamiseen. Time-of-Flight -kamera tunnistettiin mahdolliseksi ratkaisuksi, koska sillä kuvaamalla voitaisi muodostaa tarkka kuva jätesäiliön jätteen pinnasta, mistä voitaisiin laskea jätteen tilavuus.</p> <p>Opinnäytetyö oli kehittämistutkimus, jossa perehdyttiin ToF-kameran toimintaperiaatteen ja sen etäisyysmittauksen virheidenaiheuttajiin, ja tutkittiin etäisyysmittauksen sekä opinnäytetyössä luodun tilavuuden mittausalgoritmin tarkkuutta kokeellisin mittauksin. Mittaukset toteutettiin kameralle hyvissä olosuhteissa sekä jätesäiliötä vastaavissa olosuhteissa.</p> <p>Tutkimuksen tuloksena oli selkeä käsitys ToF-kameran mittaukselle aiheuttavista asioista, tutkimuksessa käytetyn PMDtec Camboard pico flexx -kameran etäisyysmittauksen tarkkuudesta ja luodun laskenta-algoritmin tarkkuudesta. Johtopäätöksenä jätesäiliö on toimintaympäristönä ToF-kameralla erittäin haastava ja nykyisellä tekniikalla tarkkaa tilavuusmittausta ei voi toteuttaa ToF-kameralla siinä toimintaympäristössä kustannustehokkaasti.</p>		
Avainsanat (asiasanat) ToF, Time-of-Flight, tilavuusmittaus, pinnanmittaus, jätehuolto, PMDtec Camboard pico flexx, konenäkö		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Ovaska, Mikael	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2020 Language of publication: Finnish
	Number of pages 66	Permission for web publication: X
	Title of publication Applying Time-of-Flight technology to measure waste container volume	
Degree programme Bachelor of Engineering, Electrical and Automation Engineering		
Supervisor(s) Riekkinen Juho, Veli-Matti Häkkinen		
Assigned by Devecto Oy		
Abstract <p>Society is currently creating waste at an unsustainable rate. In Finnish neighborhoods, the billing of waste has been divided evenly between residents who live in the same house. In water distribution it has been learned that when the billing is shifted from the whole house to separate apartments, the overall water usage of the house is reduced. The City of Jyväskylä wanted to create such an incentive for waste disposal as well.</p> <p>To change billing to the individual apartment, a system needs to know who disposed waste to the shared waste container and how much. No system was readily available to measure the volume of the waste. The objective of the thesis was to find if it is possible to use a Time-of-flight camera as a sensor to measure the volume of the waste. Time-of-Flight was recognized as a possible solution because it creates a precise image that can be used to calculate the volume of the waste.</p> <p>The thesis was carried out as a development study. The working principles and error sources of the Time-of-Flight cameras were studied. The built algorithm and the accuracy of the camera used in the study, a PMDtec Camboard pico flexx, were measured in two different conditions, in great working conditions for the camera and in conditions comparable to those inside the waste container.</p> <p>As a result of the study, a good understanding of the ToF-camera and its error sources was acquired. Measurements to support the conclusions were done. The conclusion of the study was that a waste container is a very challenging working environment for a ToF-camera and it is not possible to develop accurate volume measurement inside a waste container based on a ToF-camera in a cost-effective way.</p>		
Keywords/tags (subjects) Time-of-Flight, ToF, volume measurement, surface measurement, waste disposal		
Miscellaneous (Confidential information)		

Sisältö

1	Johdanto	6
1.1	Opinnäytetyön tausta.....	6
1.2	Opinnäytetyön tavoitteet.....	7
1.3	Tutkimuksen rakenne	8
2	PMD CamBoard pico flexx.....	8
3	Time-Of-Flight -tekniikan toimintaperusteet	10
3.1	Pulssimodulointi	11
3.2	Kantoaaltomodulointi	12
4	Tiedon tallennusmuodot.....	15
5	Time-Of-Flight -tekniikan virheidenaiheuttajat.....	16
5.1	Systemaattiset virheet	16
5.1.1	Tutinavirhe (eng. Wiggling error)	16
5.1.2	Signaalin voimakkuudesta riippuvaiset virheet.....	17
5.1.3	Lämpötilariippuvaiset virheet.....	18
5.1.4	Kiinteäkuviainen kohina (eng. Fixed-pattern noise)	19
5.2	Epäsystemaattiset virheet.....	19
5.2.1	Liike-epäterävyys (eng. motion blur).....	19
5.2.2	Fotoni raekohina (eng. photon shot noise).....	20
5.2.3	Valonsironta (eng. light scattering)	20
5.2.4	Monitieheijastus (eng. multi path illumination).....	21
5.3	Kuvattavan kohteen materiaalin ja värin vaikutus mittaustarkkuuteen ..	22
6	Kameraoptiikka	23
6.1	Kameran projektio.....	23
6.2	Polttopiste ja polttoväli	25
6.3	Linssivääristymät	25

	2
7 Kameran mitoitus säiliöön	28
8 Tilavuuden laskeminen kameran syvyystedosta	29
8.1 Vain yhden kuvakulman käyttö rajoittaa tilavuuden laskemisen tarkkuutta 29	
8.2 Yhden pikselin pinta-ala	31
8.3 Luotu algoritmi	33
9 Kuvan prosessointi	35
9.1 Camboard pico flexx sisäinen kuvanprosessointi.....	35
9.2 Yksinkertainen kuvan kynnyvertailu (Image thresholding)	36
9.3 Inpainting.....	36
9.4 Binäärisen kuvan muokkaukset.....	38
9.4.1 Eroosio (eng. erosion) ja Laajennus (eng. dilation)	38
9.4.2 Avaaminen (eng. opening) ja Sulkeminen (eng. closing)	39
10 Mittausten toteutus	39
10.1 Kameran etäisyysmittauksen tarkkuuden mittaus hyvissä olosuhteissa..	39
10.2 Kameran etäisyysmittauksen tarkkuuden mittaus jätesäiliötä vastaavissa olosuhteissa	41
10.3 Lasketun tilavuuden tarkkuuden mittaus avonaisessa tilassa	42
10.4 Lasketun tilavuuden tarkkuuden mittaus säiliössä	42
10.5 Läpinäkyvien materiaalien kuvaamisen testaus.....	42
11 Mittausten tulokset	44
11.1 Kameran etäisyysmittauksen tarkkuuden mittaus hyvissä olosuhteissa..	44
11.2 Kameran etäisyysmittauksen tarkkuuden mittaus jätesäiliötä vastaavissa olosuhteissa	45
11.3 Lasketun tilavuuden tarkkuuden mittaus avonaisessa tilassa	47
11.3.1 Keskellä kuva-aluetta.....	48
11.3.2 Lähellä kuva-alueen kulmaa	49
11.3.3 Lähellä kuva-alueen laitaa	50
11.4 Lasketun tilavuuden tarkkuuden mittaus säiliössä	51
11.4.1 Keskellä säiliötä	51

	3
11.4.2 Säiliön kulmassa.....	52
11.4.3 Säiliön laidassa.....	53
11.5 Läpinäkyvä materiaali.....	55
12 Johtopäätökset.....	57
12.1 Kirjallisuus.....	57
12.2 Mittaukset	58
13 Pohdinta.....	60
Lähteet	63
Liitteet	66
Liite 1. Kuva karahvista ja tölkki skaalana.....	66

Kuviot

Kuvio 1. pico flexx kameran kuva-alueet.....	10
Kuvio 2. Pulssimoduloinnin toimintaperiaate	12
Kuvio 3. PMD ToF-kameran toimintaperiaate.....	13
Kuvio 4. Demodulaation periaate PMD metodilla.....	14
Kuvio 5. Syvyys vääristymä pico flexx kamerassa.....	16
Kuvio 6. (a) Pico flexx amplitudikuva (b) Kinect v2 amplitudikuva.....	17
Kuvio 7. Amplitudi virheisiin johtavat syyt ja niiden korjaaminen	18
Kuvio 8. Pico flexx mittausvirhe kameran ollessa pitkään päällä	19
Kuvio 9. Valonsironta ToF-kameran sisällä.....	21
Kuvio 10. Erilaisia tilanteita, jotka aiheuttavat MPI virhettä.....	22
Kuvio 11. Kohteen värin vaikutus mittaustulokseen	23
Kuvio 12. Perspektiivi luonnossa	24
Kuvio 13. Erilaiset linssi vääristymät.....	26
Kuvio 14. Esimerkki kalibrointi funktion toiminnasta.....	26
Kuvio 15. Kalibroimaton harmaakuva	27
Kuvio 16. Kalibroitu kuva	27

Kuvio 17. Vaadittava kuvakulma, jotta kuva on 160 cm leveä 20 cm etäisyydellä kamerasta.	28
Kuvio 18. Esimerkki saatavasta informaatiosta kappaleen muodosta yhdestä kuvakulmasta kuvattuna.....	30
Kuvio 19. Yhden pikselin sivujen pituudet eri etäisyyksillä	32
Kuvio 20. Yhden pikselin pinta-ala eri etäisyyksillä	32
Kuvio 21. Kamerasta suoraan otettu kuva	35
Kuvio 22. Esimerkki kuvan kynnystämisestä	36
Kuvio 23. Morphologisten operaatioiden tulokset	39
Kuvio 24. Mittaustilanne hyvissä olosuhteissa	40
Kuvio 25. Mittaustilanne jätesäiliötä vastaavissa olosuhteissa.....	41
Kuvio 26. Kuvio etäisyysmittauksen tarkkuudesta	44
Kuvio 27. Kameran etäisyysmittauksen suhteellinen tarkkuus.....	45
Kuvio 28. Etäisyysmittauksen tarkkuus pienoismallisäiliössä	46
Kuvio 29. Etäisyysmittauksen suhteellinen tarkkuus pienoismallisäiliössä.....	47
Kuvio 30. Kappale lähellä kuva alueen keskustaa	48
Kuvio 31. Kappale lähellä kuva-alueen kulmaa	49
Kuvio 32. Kappale lähellä kuva alueen laitaa.....	50
Kuvio 33. Kappale lähellä kuva-alueen keskikohtaa säiliön sisällä	52
Kuvio 34. Kappale kulmassa säiliön sisällä.....	53
Kuvio 35. Kappale laidassa säiliön sisällä	54
Kuvio 36. Lasinen karahvi kuvattuna säiliön sisällä	55
Kuvio 37. Kolmiulotteisesti piirrettynä huomaa selvästi, miten lasinen karahvi on kuvassa ikään kuin uponnut pinnan sisään.	56
Kuvio 38. Kuva karahvista esitettynä pistepilvenä	56

Taulukot

Taulukko 1. PMDtec Camboard pico flexx kameran tuotetiedot	10
Taulukko 2. Inpaint funktion parametrit	37
Taulukko 3. Kameran etäisyysmittauksen tarkkuus hyvissä olosuhteissa	44

Taulukko 4. Kameran etäisyysmittauksen tarkkuus jätesäiliön sisällä	46
Taulukko 5. Mitatun kappaleen mitat	47
Taulukko 6. Mitatut tilavuudet ja niiden virhe kappaleen ollessa kuva-alueen keskellä	48
Taulukko 7. Mitatut tilavuudet ja niiden virhe kappaleen ollessa lähellä kuva-alueen kulmaa.....	49
Taulukko 8. Mitatut tilavuudet ja niiden virhe kappaleen ollessa kuva-alueen laitaa	50
Taulukko 9. Mitatut tilavuudet ja niiden virhe kappaleen ollessa säiliön keskellä	51
Taulukko 10. Mitatut tilavuudet ja niiden virhe kappaleen ollessa säiliön kulmassa	52
Taulukko 11. Mitatut tilavuudet ja niiden virhe kappaleen ollessa säiliön laidassa	54
Taulukko 12. Karahvin mitat, laskettu todellinen tilavuus sekä algoritmilla laskettu tilavuus.....	55

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta

Maaailma tuottaa vuosittain jätettä kestävämmällä tahdilla. Esimerkiksi Suomessa tuotettiin yhteiskuntajätettä vuonna 2018 asukasta kohden 550 kilogrammaa (Yhdyskuntajätettä kertyi vuonna 2018 aiempia vuosia enemmän 2020). Ongelmaan tuskin on yhtä ainuttakaan suurta ratkaisua, joka korjaisi ongelman. Siksi on tärkeää yrittää vähentää tuotetun jätteen määrää monin keinoin. Tällä hetkellä suomessa taloyhtiöissä jätemaksut jaetaan tasan huoneistojen kesken riippumatta siitä, kuinka paljon yksittäisen huoneiston asukkaat tuottavat jätettä. Vedenjakelussa on huomattu, että siirtäessä taloyhtiökohtaisesta laskutuksesta huoneistokohtaiseen laskutukseen, taloyhtiön kokonaisvedenkulutus laskee (Huoneistokohtaisten vesimittareiden käyttö ja vaikutukset rakennusten energiankulutukseen -työryhmä 2009). Asukkaille syntyy selkeä kannustin vähentää omaa veden kulutusta, kun oma vesilasku on sidottu suoraan omaan kulutukseen. Olisi toivottavaa, että myös jätemaksuihin luotaisiin vastaava kannustin vähentää jätteen määrää. Jotta sellainen laskutustapa voitaisiin ottaa käyttöön, tulisi olla olemassa tapa mitata asukkaiden henkilökohtaisesti tuottamaa jätteenmäärää. Tällaisessa järjestelmässä taloyhtiön säiliöt olisivat luultavasti edelleen yhteiset, joten tulisi pystyä identifioimaan, kuka laittoi roskia säiliöön ja kuinka paljon.

Toimeksiantajan Devecto Oy:n asiakas Jyväskylän kaupunki, halusi kokeilla tällaista järjestelmää Jyväskylän Kankaalla osana CIRCWASTE – Kohti kiertotaloutta (LIFE15 IPE/FI/000004) -hanketta. Kankaalla oli jo käytössä Molok-säiliöitä, joten järjestelmää suunniteltiin ensisijaisesti käytettäväksi niissä. Säiliöön roskia laittaneen henkilön tunnistamiseen on myös olemassa järjestelmä, joka on jo käytössä Jyväskylän Kankaalla. Säiliön luukku on lukittu, ja sen saa avattua vain avaimilla, jotka on annettu asukkaille. Jokaisella avaimella on käyttäjätunnus, jonka perusteella tiedetään, kuka luukun avasi. Avain voi käytännössä olla esimerkiksi RFID-lätkä tai puhelinsovellus. Jyväskylän Kankaalla säiliöiden avaimena on RFID-lätkä. Jäljelle jää yhdistää avaustietoon, kuinka paljon jätteenmäärä kasvoi luukun avaamisen jälkeen. Koska olemassa

oleva lukitusysteemi toimii langattomilla tiedonsiirtoyhteyksillä akkukäyttöisesti, tulisi mittauslaitteiston myös toimia akkukäyttöisesti. Mittauslaitteiston, ja siten myös mittalaitteen, olisi mielellään oltava vähän energiakuluttava, jotta akut kestäisivät mahdollisimman kauan.

Käytännössä jätemäärien kohdalla haluttaisiin mitata jätteen tilavuutta tai massaa. Mittauksen tarkkuuden ja luotettavuuden tulisi olla niin hyvä, että sen perusteella voi laskuttaa asukkaita. Massan mittauksen rakentamista olemassa oleviin syväkeräyssäiliöihin pidettiin liian hankalana, joten jäljelle jäi tilavuuden mittaamiseen perustuva ratkaisu. Valmista ratkaisua mitata jätesäiliön tilavuutta tarkasti ei ollut markkinoilla. Toimeksiantajan tekemän alustavan selvityksen perusteella Time-Of-Flight (ToF) -tekniikalla toimiva 3D-kamera voisi olla tarkoitukseen sopiva sensori. ToF-kamera tuottaa kuvausalueesta etäisyyskuvan, joka kertoo kuinka kaukana kuvassa olevat kohteet ovat. Jätesäiliön jätteen pintaa kuvaamalla kameralla voisi muodostaa tarkan kuvan jätteen pinnankorkeudesta, jonka muutoksesta luukun avaamisen jälkeen voisi laskea säiliöön lisätyn jätteen tilavuuden.

1.2 Opinnäytetyön tavoitteet

Työ toteutettiin kehitystutkimuksena. Kehitystutkimuksessa pyritään muutokseen, joka tarkoittaa käytännössä tutkittavan ongelman poistamista tai parantunutta olotilaa muodossa tai toisessa (Kananen 2015, 11-12). Tutkimusongelma oli valmiin mittausratkaisun puuttuminen jätteen tilavuuden tarkasti mittaamiseen, minkä takia ToF-kameran soveltumista tarkoitukseen haluttiin tutkia. Tämän työn tavoitteena oli selvittää, sopiiko ToF-kamera jätesäiliön sisään laitetun jätteen tilavuuden mittaamiseen. Tutkimusta varten hankittiin ToF-kamera nimeltään PMDtec Camboard pico flexx, jota käytettiin apuna tutkimuskysymyksiin vastaamisessa. Tutkimuskysymykset, joihin tässä työssä haettiin vastauksia ovat:

- Mitkä asiat vaikuttavat Time-of-Flight -kameran etäisyysmittauksen tarkkuuteen?
- Mitkä asiat vaikuttavat etäisyysmittauksen tarkkuuteen jätesäiliön sisällä?
- Sopiiko PMDtec Camboard pico flexx -kamera jätesäiliöön sisään laitetun jätteen tilavuuden mittaamiseen?

- Sopiiko Time-of-Flight -kamera yleisesti jätesäiliöön sisään laitettun jätteen tilavuuden mittaamiseen?

1.3 Tutkimuksen rakenne

Opinnäytetyön luvuissa 2-6 esitellään työssä käytetty ToF-kamera ja perehdytään ToF-kameran toimintaperusteisiin, yleisiin virheen aiheuttajiin ToF-kameroissa ja konenäössä optiikasta huomioitaviin asioihin. Tietolähteiden keräämisen pohjana käytettiin aikaisemmin tehtyjä suomalaisia opinnäytetöitä ja diplomitöitä ToF-kameroihin liittyen, esimerkiksi Finnen JAMK:in opinnäytetyö vuodelta 2017 ”Kinect-liiketunnistimen soveltuvuus keihäänheiton lähtöparametrien määrittämiseen” ja Laukkasen Aalto yliopiston diplomityö ”Performance Evaluation of Time-of-Flight Depth Cameras” vuodelta 2015. Työn tietoperustana on ToF-tekniikan osalta kansainväliset tutkimukset ja kirjallisuus. Konenäön osalta tietoperustana on kansainvälinen kirjallisuus, tutkimukset sekä avoimen lähdekoodin ohjelmistojen dokumentaatio.

Luvuissa 7-9 kuvataan työn käytännön osuus, jossa luotiin algoritmi kappaleen tilavuuden laskemiseen etäisyyskuvien perusteella ja ohjelmat kameran etäisyysmittauksen tarkkuuden mittaamiseen. Työssä on esitelty algoritmissa käytetyt laskukaavat sekä kuvan prosessointitekniikat. Algoritmi ohjelmoitiin Pythonilla Ubuntu-käyttöjärjestelmässä. Matemaattisissa laskuissa hyödynnettiin Numpy-kirjastoa, konenäkö funktioihin OpenCV-kirjastoa ja datan visualisointiin Matplotlib-kirjastoa.

Työn loppuosassa on esitelty tehtyjen mittausten toteutustapa ja mittausten tulokset. Työn viimeisessä luvussa on pyritty vastaamaan tutkimuskysymyksiin perustellen, tukeutuen tietopohjaan sekä toteutettuihin empiirisiin mittauksiin.

2 PMD CamBoard pico flex -kamera

Tavoitteena oli rakentaa mittauslaite, joka on riittävän pieni ja edullinen asennettavaksi jätesäiliöön. Laitteen ollessa akkukäyttöinen, kameran virrankulutuksen tulee

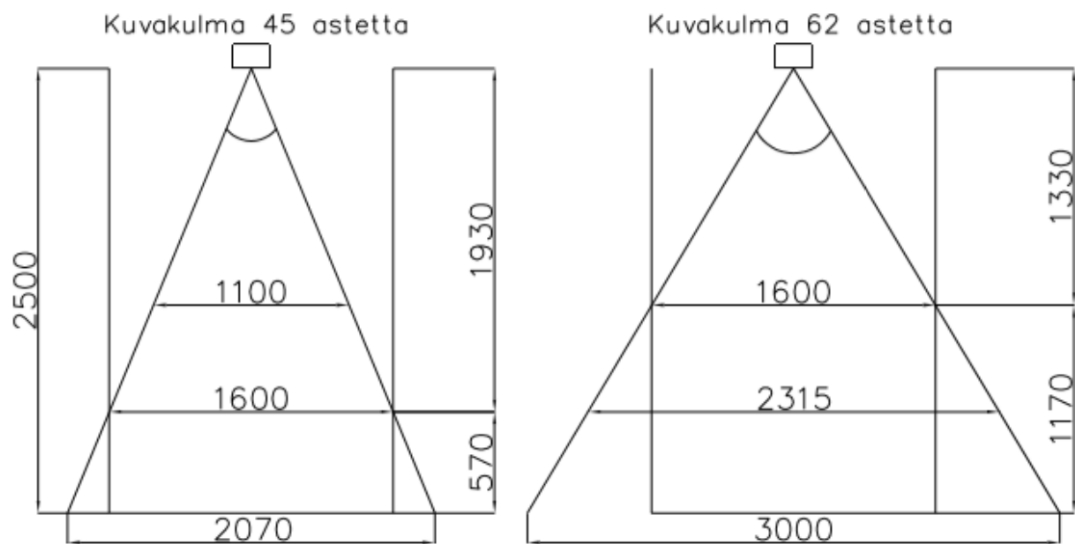
myös olla melko pieni. Lisäksi kameran mittausalueen tulisi yltää jätesäiliön pohjaan saakka, eli 2,5 metriä Kankaan jätesäiliöiden tapauksessa.

Näiden vaatimusten perusteella sopivaksi kameraksi valikoitui PMDtec CamBoard pico flexx. Valinta toteutettiin vertailemalla mahdollisia kameroita toimeksiantajan kanssa. Kamera on hinnaltaan markkinoiden halvimpia, joten oli myös mielenkiintoista selvittää, mikä on halvimpien kameroiden suorituskyky. Kameran valintaa ei pidetty tutkimuksen kannalta kriittisenä, kunhan selvitetään ovatko kameran toiminnassa havaitut ongelmat tai ominaisuudet kamerariippuvaisia vai ToF-kameroissa yleisiä.

Kameralla on ulkomitat ovat 68 mm x 17 mm x 7,35 mm, eli se on noin peukalon kokoinen. Energiankulutukseksi valmistaja antaa keskimäärin 300mW. Kameran mittausalueeksi valmistaja mainostaa 0.1 – 4 metriä, mikä on suurempi kuin Molok jätesäiliön 2,5 metrin syvyys. (Camboard pico flexx data-sheet 2020) Ainut ongelma mittausalueen osalta on kameran katselukulmat, 62 astetta horisontaalisesti ja 45 astetta vertikaalisesti. 45 asteen katselmuskulma aiheuttaa sen, että suurelta osaa säiliötä kameran kuva-alue ei peitä säiliön pinta-alaa kokonaan (Kuvio 1). Työn tutkimuksen luonteen vuoksi tätä ei kuitenkaan koettu toimeksiantajan kanssa ylitsepääsemättömäksi ongelmaksi. Oletus on, että jos löydetty mittaustekniikka toimii tässä tutkimuksessa käytetyllä kameralla mittausalueen peittäessä koko säiliön pinta-alan, voi samaa tekniikkaa käyttää myöhemmin kameralla, jossa katselmuskulmat ovat suuremmat. Kamera lähettää ja vastaanottaa infrapunavaloa 850 nanometrin aallonpituudella, ja se kuuluu laser luokkaan 1. Luokan 1 laser ei aiheuta vaaraa normaalissa käyttötilanteessa edes pitkillä altistusajoilla (Laserluokat STUK 2019).

Taulukko 1. PMDtec Camboard pico flexx -kameran tuotetiedot

Ulkomitat	68mm x 17mm x 7,35mm
Paino	8g
Mittausalue	0.1 - 4 metriä
Kuvataajuus	max 45 fps
Energiankulutus	USB2.0 sopiva, keskimäärin 300mW
Valaistus, aallonpituus	850nm, VCSEL, Laser Class 1
Mukana toimitettava ohjelmisto	Royale SDK (C/C++ pohjainen, tukee Matlab, DotNet, CAPI, OpenCV, OpenNI2, ROS)
Resoluutio (H x V)	224 x 171 (38k) px
Katselmuskulma (H x V)	62 astetta x 45 astetta
Etäisyysmittauksen tarkkuus	<=1% etäisyydestä (0.5 – 4m @ 5fps) <=2% etäisyydestä (0.1 – 1m @ 45fps)



Mitat millimetreissä

Kuvio 1. Pico flexx -kameran kuva-alueet Molok Domino 5m3 syväkeräyssäiliössä

3 Time-Of-Flight -tekniikan toimintaperusteet

Perusidea ToF-kamerassa on valaista kuvauskohde moduloidulla valolla ja mitata kuinka kauan heijastuneella valolla kestää palata takaisin sensorille. Koska valonnopeus on vakio, objektin, josta valo heijastui, etäisyys voidaan laskea lähetetyn ja saa-

puneen valo signaalin aikaerosta. Kuvauskohteen valaisemiseen käytetään ToF-kameroissa kahta erilaista tekniikkaa: pulssivalomodulointia (eng. Pulsed Light) tai kantoaaltomodulointia (eng. Continuous Wave). (Foix 2011) Työssä käytetty kamera käyttää kantoaaltomodulointia.

3.1 Pulssimodulointi

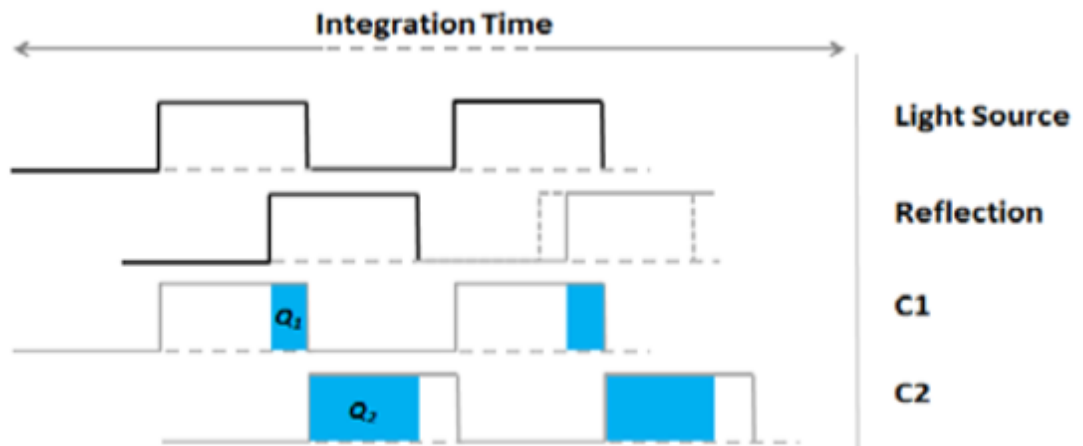
Pulssimodulointi metodin idea on yksinkertainen. Järjestelmä lähettää lyhyitä pulsseja, mikä käynnistää ajastimen, joka pysähtyy heijastuneen valon saapuessa takaisin sensorille. Kohteen etäisyys lasketaan kaavalla:

$$d = \Delta t \frac{c}{2} \quad (1)$$

missä d on kohteen etäisyys
 Δt on pulssin lentoaika
 c on valonnopeus.

Usein kuvauskohteen ympäristönvalaistuksessa on samoja aallonpituuksia kuin kameran lähettämässä pulssissa, joten sen vuoksi kameran vastaanottama signaali on ympäristön ja lähetetyn valon summa. Saapuneessa signaalissa on usein paljon kohinaa, minkä takia on tarpeellista mitata useista pulsseista keskiarvo. Tätä aikaväliä kutsutaan integrointiajaksi (Kuvio 2). Saapuneesta signaalista otetaan näytteitä kahdessa eri aikaikkunassa C_1 ja C_2 joiden aikana kertyneistä energialatauksista Q_1 ja Q_2 lasketaan kohteen etäisyys d kaavalla (Li 2014):

$$d = \frac{1}{2} c \Delta t \left(\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \right) \quad (2)$$



Kuvio 2. Pulssimoduloinnin toimintaperiaate (Li 2014)

Pulssimodulaation etuna on suuri mittauskantama (Xuming 2001). Toisaalta se vaatii paljon laitteiston elektroniikalta, sillä 1 mm tarkkuuteen pääseminen vaatii 6.6 pikosekunnin tarkkuutta ajastuksessa, mikä on lähes mahdotonta saavuttaa piisiruilla huoneenlämmössä (Charbon 2014).

3.2 Kantoaaltomodulointi

Suoraan valon lentoajan mittaamisen sijaan kantoaaltomoduloitu metodi perustuu lähetettyjen ja vastaanotettujen signaalien vaihesiirron vertailemiseen. Modulaatio valolle saadaan aikaan sulkemalla ja avaamalla valon lähdettä nopeasti. Erilaisia aallonmuotoja on mahdollista käyttää, mutta käytännön sovelluksissa aallon tyyppi on usein neliöaalto (eng. square wave). (Goturk 2004)

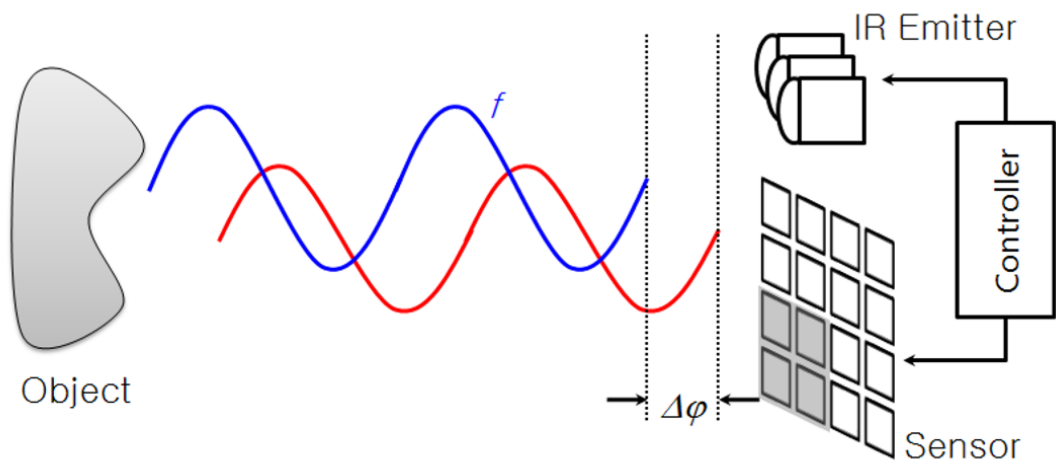
Kantoaaltomoduloidun signaalin demodulointiin on erilaisia tapoja. Perinteinen tapa on laskea ristikorrelaatio alkuperäisen moduloidun signaalin ja heijastuneen signaalin välillä. Ristikorrelaatio voidaan laskea mittaamalla heijastuneen signaalin voimakkuutta ja vaiheensiirtoa. Vaiheensiirrosta voidaan sitten laskea kappaleen etäisyys d :

$$d = \frac{c\phi}{4\pi f_m} \quad (3)$$

missä ϕ on vaiheensiirto
 f_m on modulaatio taajuus (Goturk 2004)

Tämä mittaus voidaan toteuttaa yhdistelemällä mixer- ja alapäästösuotimia, mikä vaatii monimutkaisen virtapiirin rakentamisen. (Goturk 2004)

Toinen, tehokkaampi tapa toteuttaa demodulaatio on tekniikka, jota kutsutaan joko Photonic Mixer Device:ksi (PMD) tai lock-in pikseliksi riippuen lähteestä (Langmann 2012, Lange 2000, Foix 2011). PMD demodulointiin perustuvat sensorit mittaavat vaihe-eroa lähetetyn ja vastaanotetun signaalin välillä. Jokainen pikseli sensorilla ottaa näytteen heijastuneen valon sähkövarauksesta neljä kertaa tasaisin välein eri vaiheisiin yhden integrointiperiodin aikana (Kuvio 3 ja 4).



Kuvio 3. PMD ToF-kameran toimintaperiaate (Hansard 2012, muokattu)

Näistä neljästä varauksesta lasketaan pikseli kohtainen vaiheensiirto:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Q_4 - Q_2}{Q_1 - Q_3}\right) \quad (4)$$

sen offset B , toisin sanoen intensiteetti

$$B = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4}{4} \quad (5)$$

signaalin voimakkuus A , toisin sanoen amplitudi

$$A = \frac{\sqrt{(Q_4 - Q_2)^2 + (Q_1 + Q_3)^2}}{2} \quad (6)$$

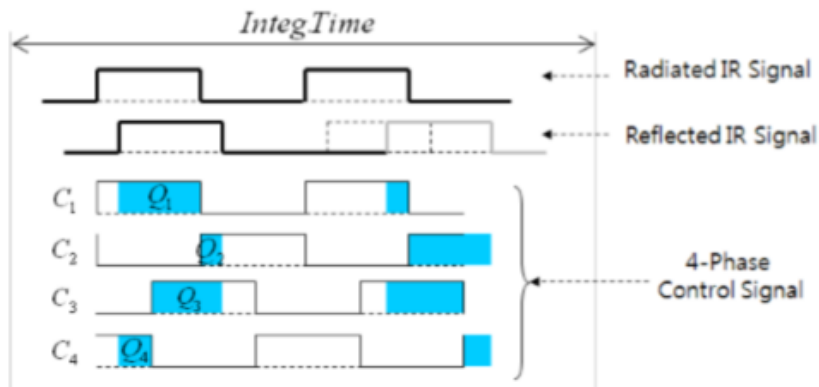
ja kohteen etäisyys d

$$d = L \frac{\varphi}{2\pi} \quad (7)$$

(Foix 2011, Lange 2000) Intensiteetti ja amplitudi auttavat arvioimaan mittauksen laatua (Mure-Dubois 2000). Pienellä amplitudilla mittauksen luotettavuus on huono. Koska mittauksia tehdään jaksollisesti, vaiheensiirron kääntyen ympäri 2π radiaanin välein, modulaatiotaajuus f_m määrittää mittaukselle kantaman, johon saakka mitaukset ovat yksiselitteisiä. Tähän rajaan saakka eri etäisyyksiltä heijastuneet aallot eivät voi saapua sensorille samanaikaisesti. Yksiselitteisen etäisyyden kantama L on:

$$L = \frac{c}{2f_m} \quad (8)$$

(Foix 2011, Lange 2000)



Kuvio 4. Demodulaation periaate PMD metodilla. C signaalit ovat kontrollisignaaleja 90 astetta toisistaan. (Hansard 2012)

PMD tekniikalla saadaan luotettava etäisyysmittaus nopeammin kuin pulssimoduloinnilla. PMD tekniikka on myös helpompi toteuttaa, koska se ei vaadi äärimmäisen nopeaa elektroniikkaa toimiakseen tarkasti. Toisaalta mittauksen kantama on PMD tekniikalla pienempi kuin pulssi moduloidussa ToF-kamerassa.

4 Tiedon tallennusmuodot

Kolmiulotteisen datan voi tallentaa monissa eri muodoissa, käyttötarkoituksen mukaan. ToF-kameroissa yleisimmin käytetyt tallennusmuodot ovat etäisyyskuva (eng. depth map, range map tai depth image) ja pistepilvi (eng. point cloud).

Etäisyyskuva muistuttaa paljon tavallista intensiteettikuvaa, jota kutustaan myös harmaasävykuvaksi. Se on kaksiulotteinen taulukko, jonka leveys on x ja korkeus on y . Taulukon soluissa, eli pikseleissä, on intensiteetin sijaan etäisyyden arvo z . ToF-kamerat tuottavat yleensä myös intensiteettikuvan, jolloin pikselitietona on signaalin voimakkuus. Etäisyyskuva on tallennusmuodoista muistin kannalta kevyempi, sillä siinä tarvitsee tallentaa vain yksi liukuluku per pikseli, x ja y koordinaattien ollessa kokonaislukuja.

Pistepilvi on epämuodollinen tiedon tallennusmuoto, jossa kolmiulotteinen tieto on tallennettu joukkona pisteitä. Jokaisella pisteellä on x,y,z koordinaatti reaaliyksikössä, esimerkiksi metreissä. Lisäksi pisteeseen voi olla tallennettuna muutakin tietoa, esimerkiksi sen väri. Pistepilveen on mahdollista tallentaa monimutkaisempia geometrisiä muotoja kuin etäisyyskuvaan yhdistämällä useammasta kuvakulmasta otettua dataa yhteen rakenteeseen. Toisaalta pistepilvi vie enemmän muistia, koska jokainen koordinaatti täytyy tallentaa liukulukuna. Pistepilviä on myös huomattavasti vaikeampi käsitellä kuin etäisyyskuvia: niitä ei voi esittää yksinkertaisina kuvina, sellaiseen pistepilvestä ei voi erottaa pintoja tai muotoja vaan ne täytyy uudelleenrakentaa jollain algoritmilla, jotka ovat laskennallisesti raskaita. Varsinkin reaaliajassa toimivissa sovelluksissa pistepilviin täytyy tehdä rajuja yksinkertaistuksia. (Castro 2015, 67)

5 Time-Of-Flight -tekniikan virheidenaiheuttajat

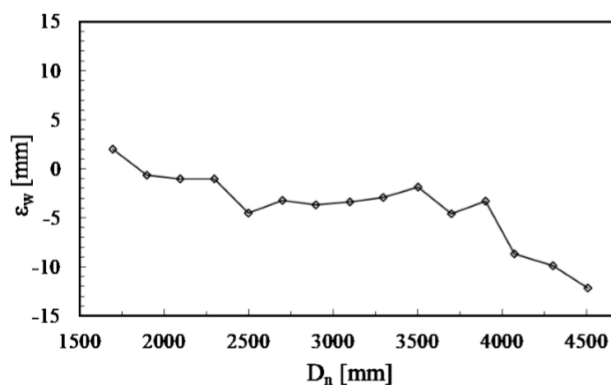
5.1 Systemaattiset virheet

5.1.1 Tutinavirhe (eng. Wiggling error)

Tutinavirhe on seurausta siitä, ettei valoa pystytä käytännössä lähettämään niin kuin on teoriassa suunniteltu modulointi prosessin epäsäännöllisyyksien vuoksi. Usein kuvaajalle piirrettynä etäisyyden suhteen virhe seuraa sinikäyrää, mistä syystä tätä virhettä kutsutaan tutinavirheeksi (eng. wiggling error). (Foix 2011)

Virheen suuruus riippuu mitatusta etäisyydestä, joten sitä voi yrittää korjata vertaamalla mitattua etäisyyttä referenssi sensorin mittaukseen, tai mallintamalla virheen tekemällä useita mittauksia. Ensimmäinen ratkaisu vaatii ylimääräisen sensorin käyttämistä, ja jälkimmäinen vaatii suuren määrän työtä mittausten tekemiseen. (Foix 2011)

Simone Pasinetti (2019) kollegoineen on tutkinut PMD Camboard pico flexx kameran tutinavirhettä 1.5 m – 4.5 m välillä (Kuvio 5). Yllättäen heidän mittauksissansa virhe ei seuraakaan kovin paljon sinikäyrää, vaan virhe on lähempänä lineaarista käyttäytymistä. Tässä työssä kiinnostavalla alle 2.5 metrin alueella tutinavirhe jää alle 5 millimetrin. (Pasinetti 2019)

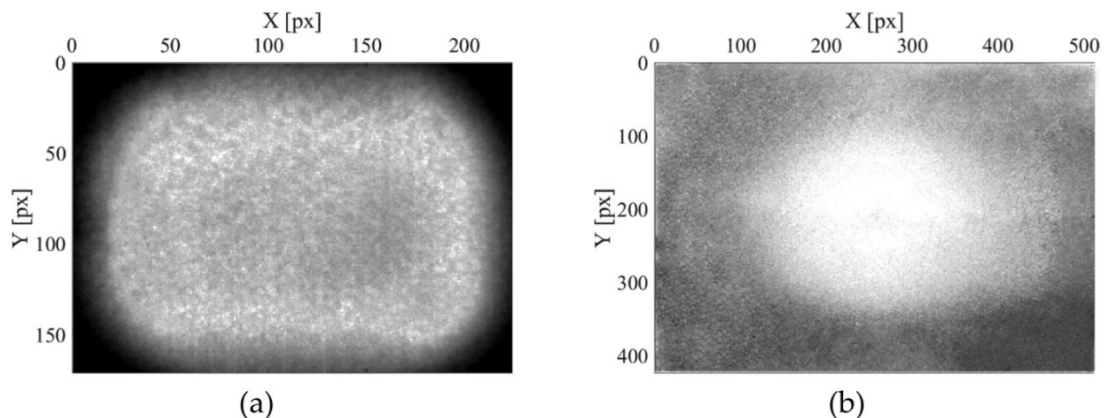


Kuvio 5. Syvyys vääristymä pico flexx -kamerassa (Pasinetti 2019)

5.1.2 Signaalin voimakkuudesta riippuvaiset virheet

Signaalin voimakkuudesta (amplitudi) riippuvaiset virheet syntyvät joko pikselin alitai ylivalotuksesta. Signaalin voimakkuudesta riippuvaisia virheitä voi syntyä heikon tai epätasaisen valotuksen takia, kuvauskohteen materiaalien erilaisista heijastuvuusominaisuuksista, tai kuvauskohteessa olevien objektien suurista etäisyyksistä syvyyssuunnassa. Yleisesti sanottuna suuri signaalin voimakkuus indikoi hyvää mittaustarkkuutta, kunhan pikseli ei ole saturoitunut, eli ylivalottunut. Taas heikko signaalin voimakkuus johtaa usein myös heikkoon mittaustulokseen. (Foix 2011)

Matalat amplitudit ovat usein ongelma kuva-alueen kulmissa, koska valon lähde ei valaise koko kuva-aluetta tasaisesti, valaisten kuva-alueen keskustaa enemmän kuin reunoja. (Foix 2011) Kuviossa 6 on amplitudikuvat pico flexx -kamerasta sekä Kinect V2 kamerasta. Mitä vaaleampi kuvan väri on, sitä voimakkaampi signaali on saatu tarkaisiin siinä kohtaa kuvaa. Pico flexx -kamerassa valotus on melko tasainen juuri kuvan kulmia lukuun ottamatta, Kinect v2 kamerassa signaali on hyvin voimakas keskellä kuvaa, mutta muuten tasaisen heikko. (Pasinetti 2019)

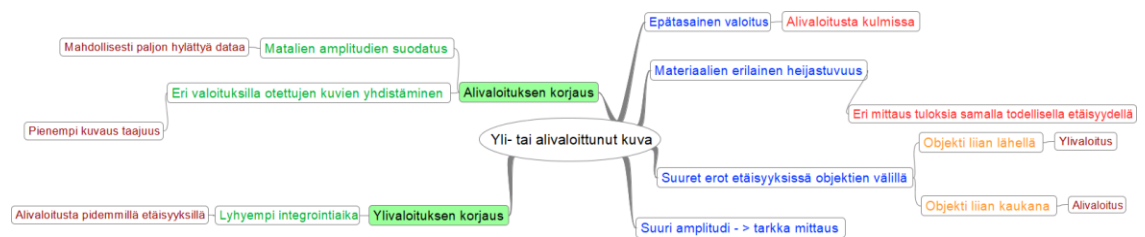


Kuvio 6. (a) Pico flexx amplitudikuva (b) Kinect v2 amplitudikuva (Pasinetti 2019)

Suuret etäisyydet kuvattavien objektien välillä aiheuttavat ongelmia, koska ei ole mahdollista valita sellaista valotusaikaa, joka olisi sopiva koko kuva-alueelle. Lähellä oleville kohteille sopiva valotus jättää kaukana olevat kohteet alivalottuneeksi, ja kaukana oleville kohteille sopiva valotus päinvastoin saa lähellä olevat kohteet saturoituneeksi, ylivalottuneeksi. (Foix 2011)

Alivalotusta voidaan korjata joko suodattamalla matalat amplitudit pois kuvasta, tai yhdistämällä eri valotuksilla otettuja kuvia. Matalien amplitudien suodattaminen on yksinkertainen ja helppo operaatio, mutta se voi johtaa suureen määrään hylättyä dataa. (Foix 2011) Eri valotuksilla otettujen kuvien yhdistämisellä voidaan päästä parempaan tarkkuuteen koko kuva-alueella, kuvataajuuden (fps) jääden vähintään puoleen kameran maksimista.

Ylivalotusta voidaan korjata ainoastaan lyhentämällä valotusaikaa, mikä johtaa alivalotukseen pidemmillä etäisyyksillä. (Foix 2011)

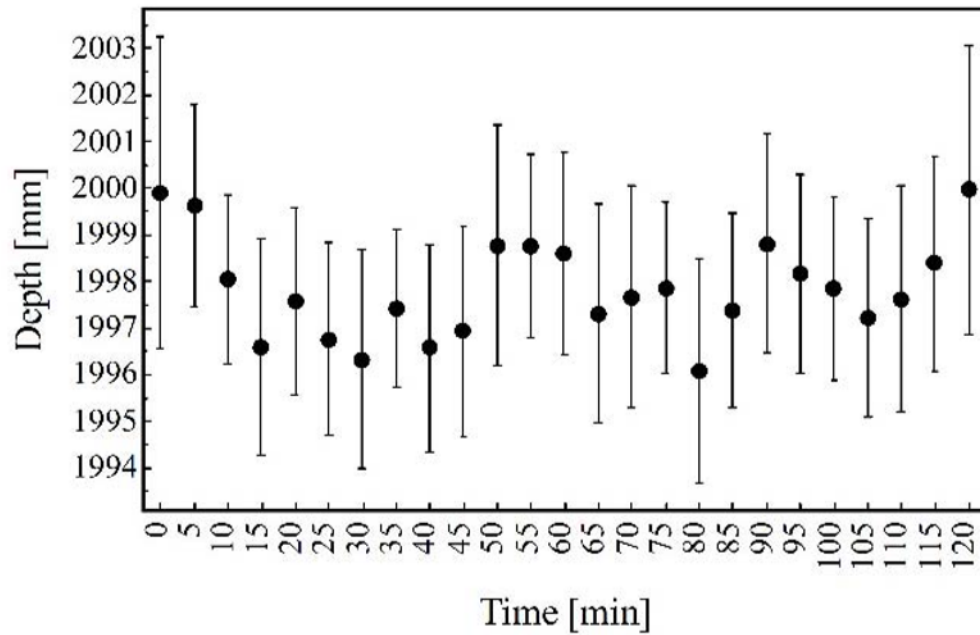


Kuvio 7. Amplitudivirheisiin johtavat syyt ja niiden korjaaminen

5.1.3 Lämpötilariippuvaiset virheet

Lämpötilalla on suuri vaikutus puolijohde kuvasensoreiden toimintaan. Lämpötilan noustessa sensorille päätyy suurempi määrä elektroneja ympäristöstä, kasvattaen mittausvirhettä. Sensorin näkökulmasta lämmöstä generoidut elektronit näyttävät samalta kuin kameran lähettämät heijastuneet valon säteet, kasvattaen mitattua amplitudia. Lämpötilan kasvaessa mittaustulokset siis kasvavat. (Kahlmann 2006)

Kamera itsessään myös tuottaa lämpöä päällä ollessaan, aiheuttaen mittausvirhettä. Tästä syystä moniin ToF-kameroihin on rakennettu tuuletin jäähdyttämään kameraa, ja tasapainottamaan mittausta. Pico flexx -kamerassa ei ole aktiivista jäähdytystä, vaan se jäähtyy ainoastaan säteilemällä. (Pasinetti 2019)



Kuvio 8. Pico flexx mittausvirhe kameran ollessa pitkään päällä. (Pasinetti 2019)

5.1.4 Kiinteäkuviainen kohina (eng. Fixed-pattern noise)

Johtuen epätäydellisestä valmistusprosessista, ja sensorin toimintatekniikasta, jokaisella sensorin pikselillä on oma vakiovirheensä. Sensorin rivit tai sarakkeet on kytketty sarjaan, mikä aiheuttaa viiveen pikselien tietoja luettaessa. Virheen ollessa vakio jokaiselle pikselille, se on kalibroituavissa luotettavasti. (Foix 2011, Kahlmann 2006)

5.2 Epäsystemaattiset virheet

5.2.1 Liike-epäterävyys (eng. motion blur)

Kuten tavallisissa videokameroissa, myös ToF-kameroiden videoissa esiintyy liike epäterävyttä (eng. motion blur). Liike epäterävyttä syntyy, kun kuvattava kohde liikkuu kameran valotusajan aikana. Vaikka sekä tavallisissa, että ToF-kameroissa, liike epäterävyys aiheutuu samasta syystä, liike epäterävyys esiintyy eri tavalla ToF-kameroissa kuin tavallisissa, ja epäterävyyden korjaamiseen täytyy käyttää eri tekniikoita. Tavallisissa värikuvissa liike epäterävyys esiintyy pehmeänä siirtymänä kuvan etu- ja

taka-alan välillä. ToF-kameran syvyyskuivissa liike epäterävyys näkyy taas joko syvyyden yli- tai aliarvioimisena kuvan etu- ja taka-alan reuna-alueilla. (Hansard 2012, Foix 2011)

5.2.2 Fotoni-raekohina (eng. photon shot noise)

Raekohina on kohinaa, joka voidaan mallintaa Poisson jakaumalla. Raekohina on ongelma lyhyillä valotusajoilla, jolloin signaalin voi jäädä heikoksi. Lyhyttä valotusaikaa voidaan joutua käyttämään esimerkiksi silloin kun taustavalaistus on hyvin vahva. (Lange 2000, What is photon shot noise? n.d) Käytännössä ulkoilmassa, aurinkoisena päivänä raekohina voi aiheuttaa ongelmia. Raekohina rajoittaa teoriassa mahdollisen signaali/kohina suhteen ja syvyys tarkkuuden. Etäisyysmittauksen absoluuttinen maksimi tarkkuus ΔL saadaan kaavalla:

$$\Delta L = \frac{L}{\sqrt{8}} \frac{\sqrt{B}}{2A} \quad (9)$$

missä A on amplitudi (6)

B on offset (5)

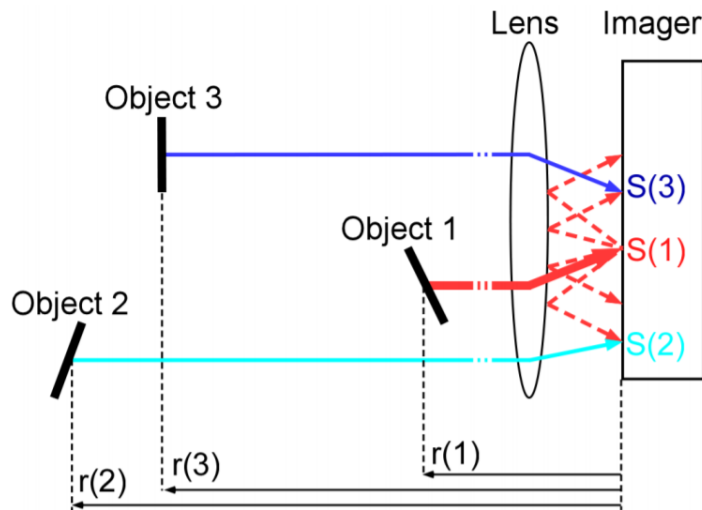
L on yksiselitteinen etäisyyden kantama (8) (Lange 2000)

5.2.3 Valonsironta (eng. light scattering)

Valonsirontaa voi syntyä kameran sisällä, kun valo heijastuu useamman kerran linssin ja sensorin välillä kameran sisällä. Valonsironta aiheuttaa etäisyyden aliarvioimista pikseleissä, joihin se vaikuttaa, koska siroutuneet säteet heijastuvat viereisiin pikseleihin. Koska siroutuminen tapahtuu kameran sisällä, siihen on mahdollista vaikuttaa rankentamalla sensori mahdollisimman vähän heijastavasta materiaalista. (Foix 2011)

Toisaalta valonsiroutumista voi tapahtua myös kameran ulkopuolella itse kuvauskohteessa. Silloin virhe on kuvauskohtekohainen, ja sen korjaaminen on paljon vaikeampaa. (Dorrington 2011) Kun kuvauskohteessa on objekteja eri etäisyyksillä, sirou-

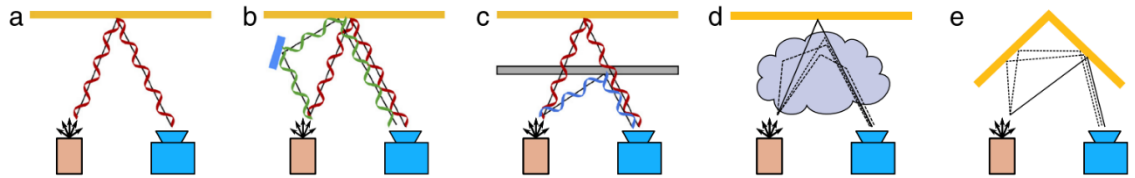
tuminen lähellä olevista objekteista saa kauempana olevat objektit näkymään lähempänä kuin ne oikeasti ovat. Valonsiroutumiseen kompensoimiseen mittauksessa on kehitetty algoritmeja, jotka toimivat jopa Real-Time sovelluksissa (Mure-Dubois 2000)



Kuvio 9. Valonsironta ToF-kameran sisällä (Mure-Dubois 2000)

5.2.4 Monitieheijastus (eng. multi path illumination)

Monitieheijastusvirhe syntyy, kun sensorille heijastuu samaan pikseliin säteitä eri reittejä pitkin (Foix 2011, Jarabo 2017). Optimaalisessa tapauksessa sensorille heijastuu ainoastaan säteitä, jotka ovat heijastuneet kohti suoraan sensorista (Kuvio 6a). Todellisuudessa sensorille voi heijastua myös säteitä muitakin reittejä pitkin. Kuvauskohteessa voi olla esimerkiksi useita objekteja, joista valonsäde voi heijastua (Kuvio 6b). Kuvauskohteessa voi myös olla materiaaleja, jotka heijastavat säteen osittain, tai taittaa sitä (Kuvio 6c). Toisaalta valon väliaineessa tai heijastavassa pinnassa voi tapahtua valon sirontaa, monimutkaistaen ongelmaa entisestään (Kuvio 7 d ja e). Monitieheijastuksen huomaa yleensä hyvin selvästi kulmissa, jotka monitieheijastusvirheen takia pyöristyvät ja näyttävät olevan kauempana kuin ne ovat oikeasti. (Jarabo 2017)



Kuvio 10. Erilaisia tilanteita, jotka aiheuttavat MPI virhettä. (a) Kuvassa on esitetty ns. täydellinen tilanne, jossa sensorille heijastuu ainoastaan suoria säteitä ilman heijastumia. (Jarabo 2017)

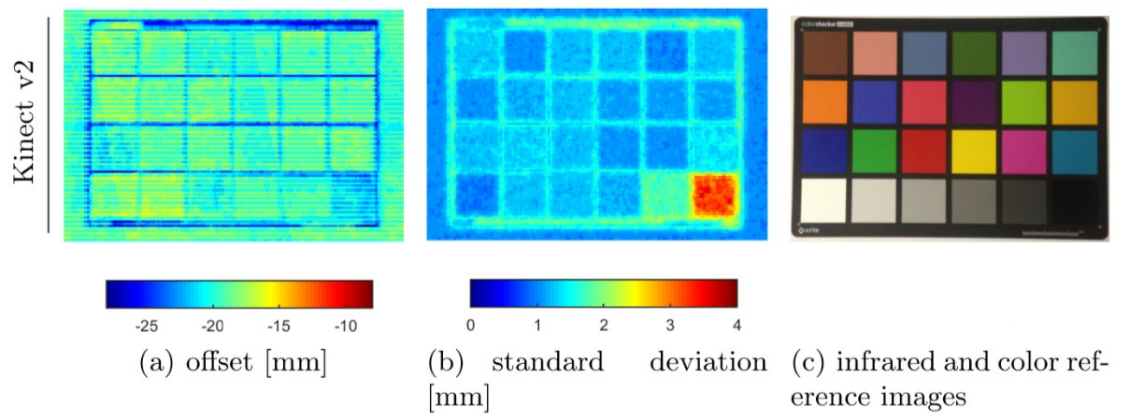
Monitieheijastus ongelma on yksi eniten ToF-kameroiden käyttökohteita rajoittava tekijä (Marco 2017). Virheen korjaamiseksi tai kompensoimiseksi on tehty monia tutkimuksia. Ongelman kompleksisuuden ja kuvaustilanneriippuvuuden takia korjaustekniikat ovat kuitenkin yleensä vajavaisia jossain määrin. Joko tekniikat vaativat useampien modulointitajuuksien käyttöä, eivät toimi kaikilla materiaaleilla, toimivat vain joissain kuvaustilanteissa, ovat laskennallisesti liian raskaita, tai yhdistelmä edellisistä. Marco Julio kollegoineen ovat esitelleet lupaavan neuroverkkoon perustuvan tekniikan monitieheijastusvirheen korjaamiseksi reaaliajassa (Marco 2017), mutta tässä työssä käytetyssä pico flexx -kamerassa ei ole kompensoitu monitieheijastusvirhettä.

On myös mahdollista, että kuvauskohteen objektit heijastavat säteitä niin, ettei joillekin sensorin pikseleille heijastu ollenkaan säteitä takaisin. Tätä virhettä kutsutaan hyppiväksi reunaksi (eng. jump edges), sillä esiintyy yleensä tasojen reunoilla. (Foix 2011, May 2009) Hyppivät reunat näkyvät kuvassa ”nollana”, joten sen huomaa kuvissa hyvin selvästi. Sen korjaamiseen on myös kehitetty algoritmeja, joita voidaan käyttää myös reaaliajassa toimivissa sovelluksissa. (Foix 2011, May 2009, Dorrington 2011)

5.3 Kuvattavan kohteen materiaalin ja värin vaikutus mittaustarkkuuteen

ToF-kamera mittaa valonsäteen lentoaikaa kameran ja kuvattun kohteen välillä, valonsäteen täytyy siis heijastua jostain, jotta se palaisi takaisin kameralle. Materiaalien välillä on eroja niiden heijastumisominaisuuksissa. Jos kuvauskohteen materiaaleilla

on hyvin erilainen heijastuvuus, samalta etäisyydeltä saadaan erilaisia mittaustuloksia (Foix 2011). Materiaalin lisäksi kuvauskohteiden värillä on vaikutusta heijastuvuuteen, tummien sävyjen vääristäen mittaustulosta. Esimerkiksi Kinect v2 kameran mittaustulos heittää yli senttimetrin riippuen siitä, onko kohde valkoinen vai tumman musta (Kuvio 11). RGB värikameraa hyödyntämällä on mahdollista laskea kuvan eri kohtien albedo, eli heijastavuus. (Wasenmüller 2016) Tästä syystä ToF-kameralla on usein parina RGB kamera.



Kuvio 11. Kohteen värin vaikutus mittaustulokseen. (a) Virhe (offset) todellisesta etäisyydestä (b) virheen normaalijakauma (c) Värikuva kohteesta (Wasenmüller 2016)

6 Kameraoptiikka

6.1 Kameran projektio

Kameran luoma kuva on ideaaltilassa ilman vääristymiä hyvin lähellä ihmisen näkemää kuvaa. Sekä kamerassa, että ihmissilmässä, objektiivi keskittää kohteen heijastamat valonsäteet kennolle kameran tapauksessa, ja verkkokalvolle silmässä. Tämän takia monia kameroiden ilmiöitä voi testata ja havainnoida omien silmien avulla.

Kameran kuvaamat kuvat muodostuvat keskusprojektiolla, ja niitä kutsutaan perspektiivikuviksi (Kivelä 2008). Perspektiivikuvassa luodaan kolmiulotteinen näkövaihtelma esineiden sijainnista ja etäisyydestä kaksiulotteiseen kuvaan. Kaukana olevat

esineet näkyvät kuvassa pienempinä kuin todellisuudessa, ja lähellä olevat vastaavasti suurempina. Ilmiötä voi havainnoida esimerkiksi katsomalla omaa kättä. Asettaessa käsi lähelle kasvoja, käsi peittää paljon suuremman osan silmän näkemästä alasta, kuin jos asetat käden suoraksi eteenpäin. Tämän takia tulee tietää, tai laskea, kohteiden etäisyys, jotta voidaan määrittää esineiden koko perspektiivikuvasta. Myös ToF-kameran etäisyyskuva on perspektiivikuva.

Kuvasta kappaleen mittoja laskiessa perspektiivin tuoma virhe pitää ottaa huomioon, koska yhden pikselin peittämä ala luonnossa riippuu kohteen etäisyydestä. Kappale on pikseleissä eri kokoinen riippuen siitä, kuinka kaukana se on ja missä kulmassa se on suhteessa kameran kuvan keskilinjaan. Mitä kauempana kappale on kamerasta, sitä pienempi se on pikseleissä. Mitä kauempana kappale on kameran keskilinjasta, sitä suurempi se on pikseleissä.



Kuvio 12. Perspektiivi luonnossa. Rautatien raideleveys on lähes vakio, mutta kuvassa se pienenee kauemmaksi mentäessä. (pixabay)

6.2 Polttopiste ja polttoväli

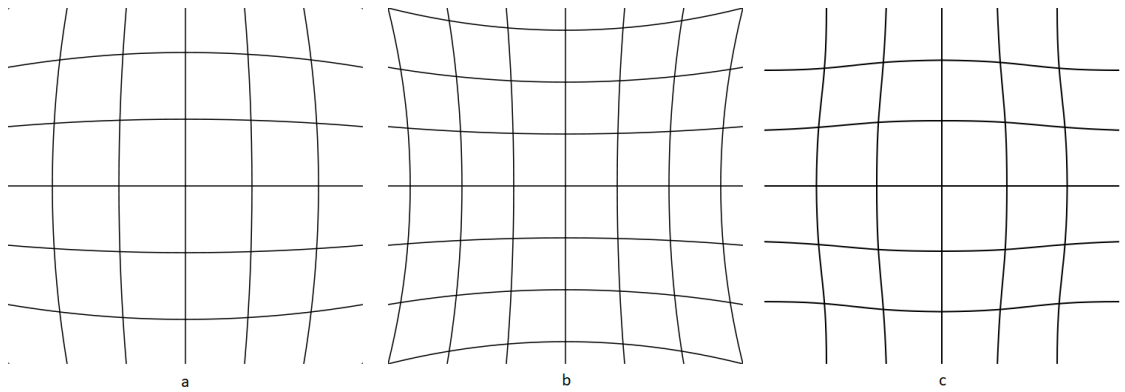
Kameran objektiivi on suunniteltu niin, että se taittaa objektiivin läpäisseet valonsäteet yhteen pisteeseen optiselle pääakselille. Tätä pistettä kutsutaan polttopisteeksi. Polttopisteen etäisyys riippuu objektiivin optisesta taittokyvystä. Välimatka objektista polttopisteeseen on polttoväli, joka vaikuttaa siihen, miten suurena kohde näkyy kuvassa ja mikä on kuvakulma. Pitkä polttoväli suurentaa kohdetta, ja pienentää kuvakulmaa. Lyhyt polttoväli päinvastoin pienentää kohdetta, mutta tuottaa laajan kuvakulman.

Käytettävän objektiivin polttovälin valinta on siis kompromissi kuvan laajuuden ja kuvauskohteen etäisyyden välillä. Haluttaessa laaja kuvakulma, valitaan lyhyt polttoväli, jolloin kuvassa näkyvät kohteet näkyvät melko pieninä.

6.3 Linssivääristymät

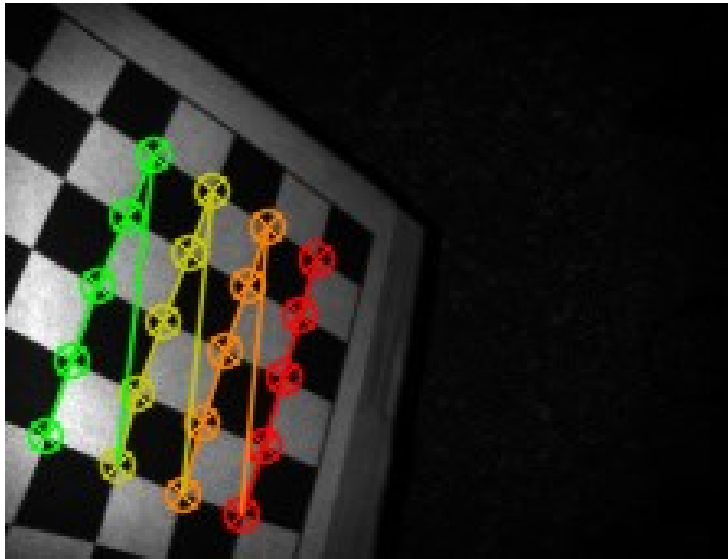
Käytettäessä kameraa mittalaitteena, on oleellista, että kamerasuora vastaa todellisuutta mahdollisimman tarkasti. Kuvassa syntyvät vääristymät tulee pyrkiä eliminomaan mahdollisimman tarkasti, suorien linjojen tulee olla suorina myös kuvassa.

Kuvitellaan, että kameralla on otettu kuva ruutupaperista. Todellisuudessa kaikki viivat ovat suorina ja ne risteävät 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Kuvassa viivat voivat olla taipuneita sisään- tai ulospäin keskipisteestä, tai molempia yhtä aikaa. Tynnyrivääristyneessä (eng. barrel distortion) kuvassa kuva on taipunut ulospäin, luoden kuvan tynnyrin muotoa muistuttavan efektin. Neulatyyny (eng. pincushion distortion) vääristymäksi kutsutaan vääristymää kuvassa, missä suorat linjat taipuvat keskipistettä kohti. (van Walhree 2009) Viiksivääristymä (eng. moustache distortion) on yhdistelmä molempia vääristymiä, se saa kuvan vaakasuorat viivat keskitason yläpuolella taipumaan suuria viiksiä muistuttavaan muotoon.



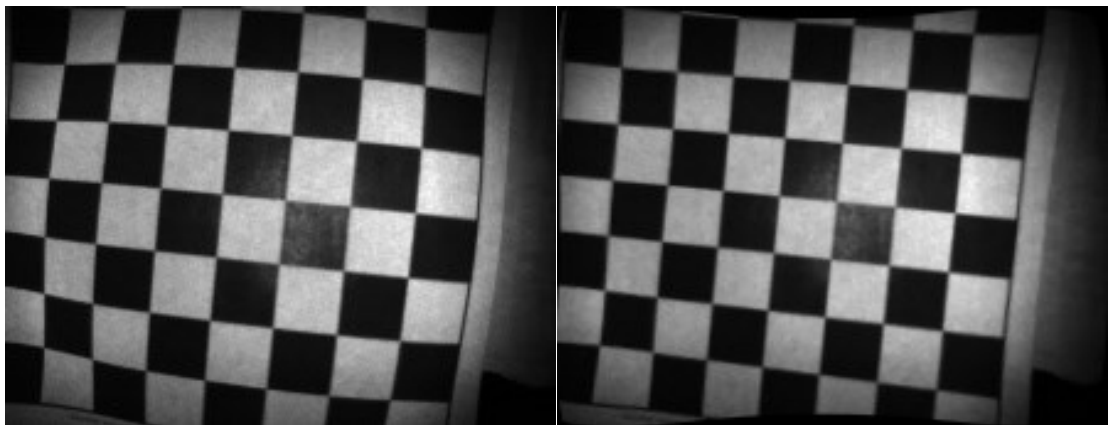
Kuvio 13. Erilaiset linssi vääristymät. a) Tynnyrivääristymä b) Neulatyynyvääristymä c) Viiksivääristymä

Vääristymät johtuvat objektiivin epätäydellisyydestä. Objektiivin taittamat säteet eivät kohtaa täydellisesti polttopisteessä, aiheuttaen vääristymiä. Vääristymät kuvassa on kalibroitu, mutta kalibrointi on tehtävä jokaiselle kameralle erikseen ja se on kameralle yksilöllinen. Kalibroinnissa otetaan useita kuvia jostain kuviosta, jonka piirteet ovat tunnettuja, esimerkiksi shakkilauta tai symmetrinen ympyrä kuvio. Kalibrointikuvien perusteella lasketaan vääristymäkertoimet, joiden avulla kuva saadaan korjattua vääristymistä.



Kuvio 14. Esimerkki kalibrointi funktion toiminnasta. Jotta kuvaa voi käyttää kalibroimiseen, tulee siitä löytää haluttu kuvio. Kuvassa löydetyt 5x4 shakkilaudan kulmat piirrettyä kuvaan.

Pico flexx -kameran dokumentaatiosta löytyy funktio `setCalibrationData`, mutta sen käyttäminen vaatii lisäoikeudet, joten päädyin käyttämään kalibroimiseen OpenCV kirjastoa. Periaatteessa ToF-kameroiden kalibroimiseen voi käyttää samoja tekniikoita kuin tavallisiin kameroihin, koska ToF-kameran voi mallintaa neulanreikäkamerana. ToF-kameran tuottamasta amplitudikuvasta, toisin sanoen harmaasävykuvasta, on tunnistettavissa shakkilaudan kuvio. Mutta ToF-kameroiden pieni resoluutio tekee shakkilaudan kuvion löytämisestä luotettavasti hankalaa. (Hansard 2012). Tämä huomattiin myös työssä, kun 46 otetusta kalibroituvasta OpenCV kirjaston `findChessboardCorners` algoritmi (Camera Calibration n.d.) löysi vain kymmenestä kuvasta shakkilaudan. Kuviossa 15 on kalibroimaton kuva ja kuviossa 16 on kalibroitu kuva. Kalibroimattomassa kuvassa on nähtävissä viiksivääristymää, kuva on selvästi keskeltä pullistuneen muotoinen, mutta se ei ole jatkuva vaan kuvan reunoja lähestyessä linja suoristuu. Kalibroidusta kuvasta on nähtävissä, että kuva on parempi kuin alkuperäinen muttei täydellinen. Kuvan sekä oikeassa, että vasemmassa reunassa näkyy selvää taipumista sisäänpäin.



Kuvio 15. Kalibroimaton harmaakuva, kuvan keskellä on näkyvissä selvää pyöreyttä.

Kuvio 16. Kalibroitu kuva, pyöreys kuvan keskellä on onnistuttu eliminoimaan, mutta sisäänpäin kääntyneisyyttä on vielä nähtävissä.

7 Kameran mitoitus säiliöön

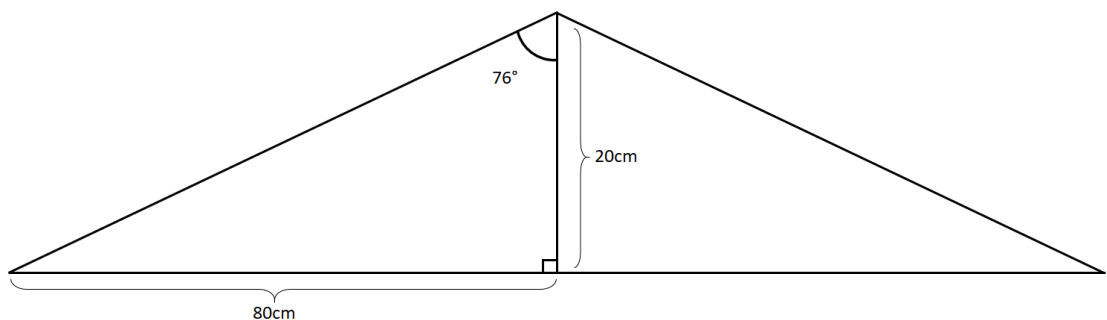
Jyväskylän Kankaalla on Molok:in Domino $5m^3$ syväkeräysjätessäiliöt, joten oli luonnollista tutkia järjestelmää siitä näkökulmasta, että se asennettaisiin Molok:in Domino jäteastiaan. Käytännössä valinta vaikuttaa suunnitteluun niin, että kameran mittauskantaman ja kuva-alueen tulee olla säiliöön sopiva. Säiliö on ulkomitoiltaan 2,5 metriä syvä, ja 1,6 metriä sivuiltaan oleva nelikulmainen lieriö, jonka sisällä on säkki (MolokDomino tuotetiedot n.d.). Koska säkki on ulkorakenteiden sisällä, ulkorakenteiden mukaan mitoittamalla säkki sopii varmasti myös kuva-alueen sisään.

Jos esimerkiksi halutaan syvyyskuvan kantamaksi 20 cm – 250 cm, tulee laskea kuinka suuri kuvakulma (eng. field-of-view, fov) kameralla on oltava, jotta koko säiliö mahtuu kuvaan 20 cm päässä. Kun a on puolet kuvattavan alueen leveydestä, b on kameran etäisyys kuvattavasta alueesta ja α on kuvakulma,

$$\alpha = 2 * \tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right) \quad (10)$$

johon sijoittamalla saadaan vaadittava kuvakulma 20 cm etäisyydelle

$$152^\circ = 2 * \tan^{-1}\left(\frac{80cm}{20cm}\right) \quad (11)$$



Kuvio 17. Vaadittava kuvakulma, jotta kuva on 160 cm leveä 20 cm etäisyydellä kamerasta.

PMDtec Camboard pico flexxin kuvakulmat ovat 62° ja 45° , eli Domino jätesäiliössä koko pinta-ala mahtuu kameran kuvaan vasta 193 cm etäisyydellä (Kuvio 17). Tällä

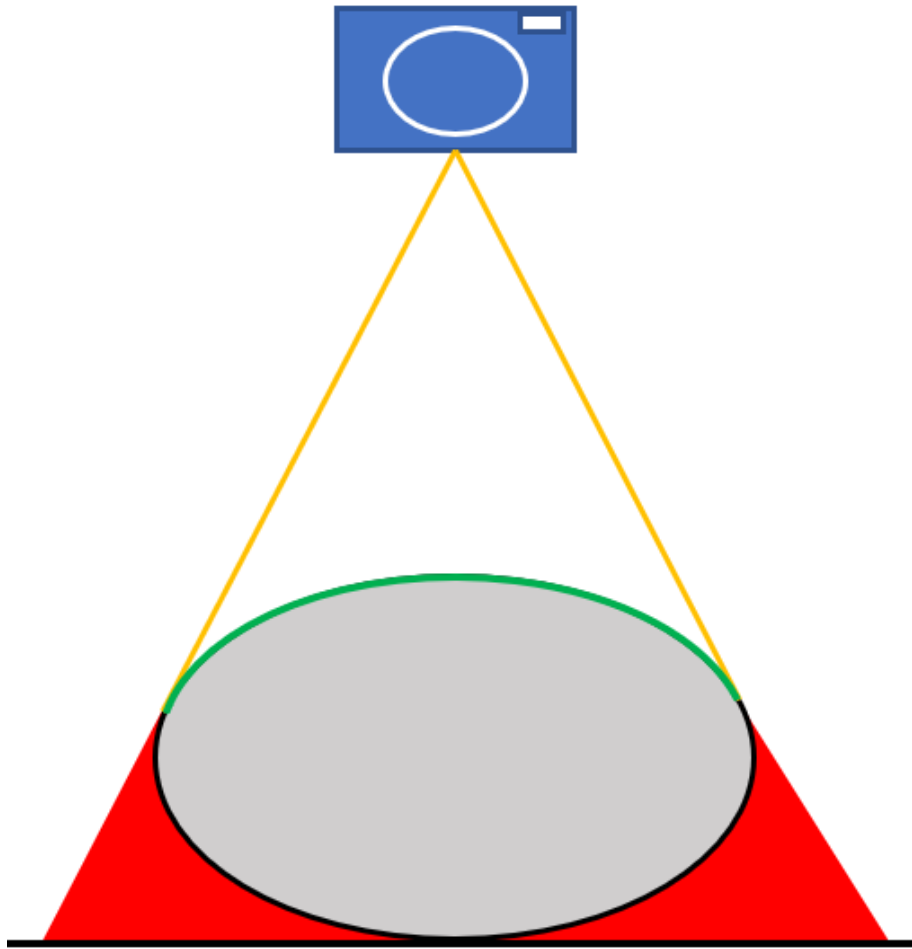
kameralla ei siis voi kuvata koko Domino jätesäiliön pinta-alaa kuin noin puolen metrin päähän säiliön pohjasta. Katsoimme kuitenkin, että jos pystyn kehittämään tälle kameralle algoritmin, joka toimii koko pinta-alan mahtuessa kameran kuvaan, samaa algoritmia voisi käyttää myös muilla kameroilla. Toinen vaihtoehto olisi kehittää erilliset algoritmit tilanteisiin, joissa säiliön pinta-ala mahtuu kuvaan vain osittain. Kuvan reunoja voitaisiin esimerkiksi ekstrapoloida niin kauan, kunnes kuvan kokonaispinta-ala on yhtä suuri kuin säiliön pohjan pinta-ala. Tällaista algoritmia ei kuitenkaan tässä työssä kehitetty.

8 Tilavuuden laskeminen kameran syvyystedosta

8.1 Vain yhden kuvakulman käyttö rajoittaa tilavuuden laskemisen tarkkuutta

Koska ToF-kameran etäisyyskuva on kuvattu ainoastaan yhdestä näkökulmasta, kuvassa voi olla ainoastaan yksi etäisyyspiste yhtä (x, y) pistettä kohti. Jos kuvassa on toistensa päälle meneviä esineitä kameran näkökulmasta, vain lähin piste tallentuu etäisyyskuvaan. Tämän takia ToF-kameran etäisyyskuvaa pidetään 2.5D-kuvana aidon 3D-kuvan sijasta. (Pears 2012)

Edellä mainitusta syystä, vain yhdestä kuvakulmasta otetusta syvyyskuvasta tilavuutta laskiessa, laskettu tilavuus on aina enemmän tai vähemmän arvio. Käytettävissä on vain osa informaatiosta. Varsinkin jos yritetään laskea jonkin hyvin monimutkaisen kappaleen tilavuutta, vain yhdestä kuvakulmasta kuvatulla etäisyyskuvalla heitto todelliseen tilavuuteen voi olla huima. Yleisesti voidaan sanoa, että yhdestä kuvakulmasta kuvatusta etäisyyskuvasta, jossa ei ole mitään mittavirheitä ja näin kuvaa pinnan täydellisesti, tilavuutta laskiessa tilavuus arvioidaan todellisuutta suuremmaksi. Mittausvirheitten takia tilavuus voidaan myös arvioida liian pieneksi, esimerkiksi jos kuvassa kappaleen pinnan pinta-ala on paljon pienempi kuin todellisuudessa.



Kuvio 18. Esimerkki saatavasta informaatiosta kappaleen muodosta yhdestä kuvakulmasta kuvattuna. Harmaan kappaleen vihreä osa on saatavilla oleva informaatio. Harmaa ja punainen alue on ToF-kameran etäisyyskuvassa tuntematonta.

8.2 Yhden pikselin pinta-ala

ToF-kamera tuottaa siis etäisyyskuvan, jossa jokaisella pikselillä (x, y) koordinaatilla on oma etäisyysarvo d . Jos oletetaan kuvan resoluution olevan niin suuri, että nelikulmaisilla pikseleillä voi mallintaa kuvattavan kohteen muodot riittävän tarkasti, on pikselien syvyysarvoista laskettavissa pikselin kuvaama pinta-ala kuvauskohteessa, ja sitä kautta koko kuvauskohteen pinta-ala. Jotta yhden pikselin kuvaama pinta-ala voidaan laskea etäisyysarvosta, tulee olla tiedossa kameran kuvakulma (fov) asteissa ja kameran resoluution. Pikselin sivunpituus leveysuunnassa lasketaan:

$$Pikselin\ leveys = \frac{2 * \tan\left(\frac{fov\ leveysuunnassa}{2}\right) * d}{resoluutio\ leveysuunnassa} \quad (12)$$

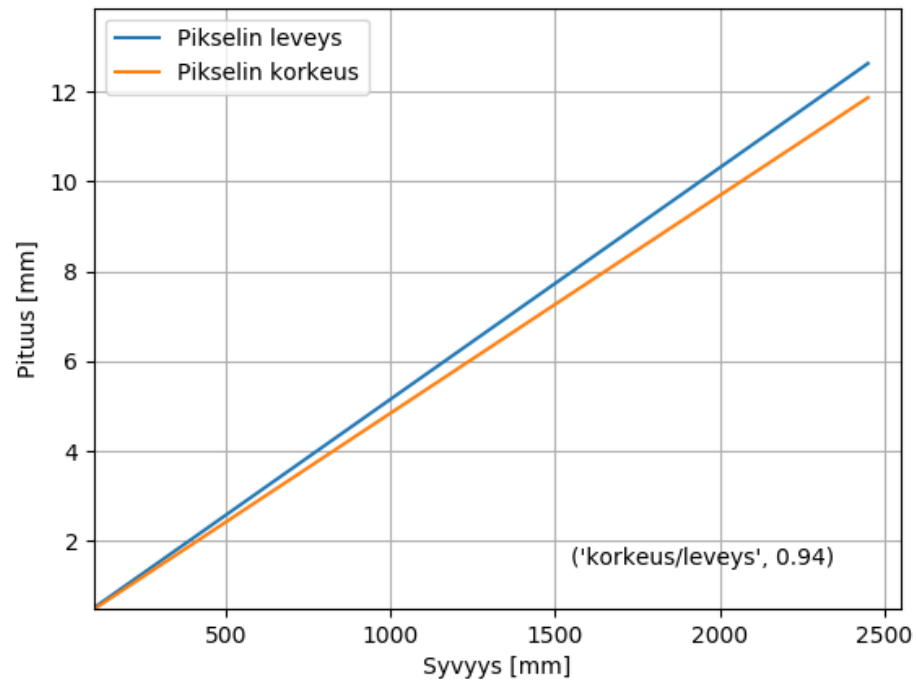
korkeussuunnassa,

$$Pikselin\ korkeus = \frac{2 * \tan\left(\frac{fov\ korkeussuunnassa}{2}\right) * d}{resoluutio\ korkeussuunnassa} \quad (13)$$

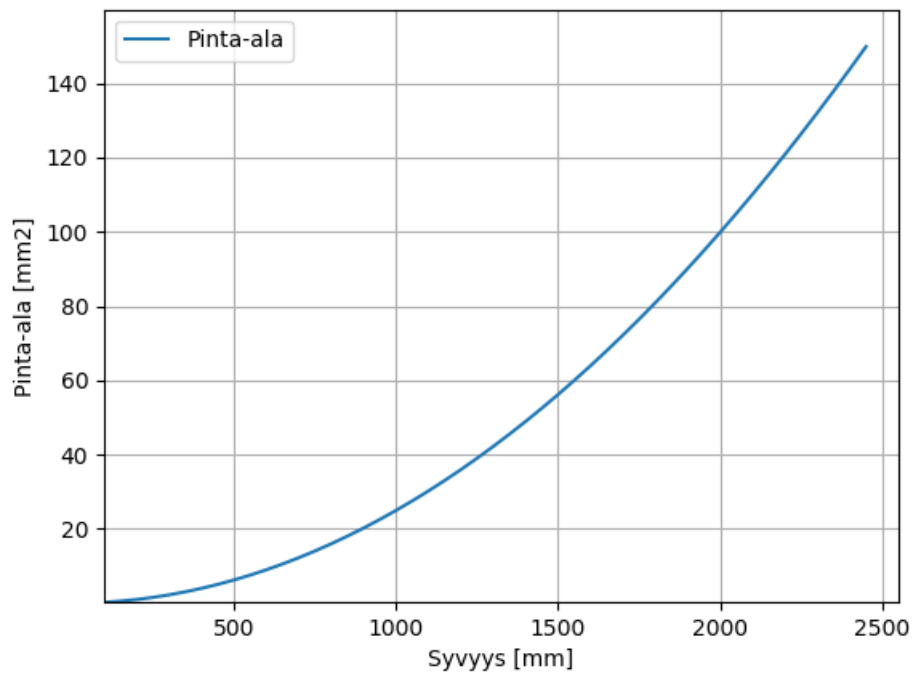
pikselin pinta-ala,

$$A_{pix}(d) = Pikselin\ korkeus * Pikselin\ leveys \quad (14)$$

Pico flexxin kuvakulmiksi on ilmoitettu leveysuunnassa 60° ja korkeussuunnassa 45° . Näiden tietojen perusteella voimme piirtää käyrän yhden pikselin sivujen pituuksista ja pinta-alasta etäisyyden suhteen (Kuvio 19 ja Kuvio 20). Ilmoitetuista tiedoista huomaamme, etteivät kameran pikselit ole täysin neliskulmaisia.



Kuvio 19. Yhden pikselin sivujen pituudet eri etäisyyksillä.



Kuvio 20. Yhden pikselin pinta-ala eri etäisyyksillä.

8.3 Luotu algoritmi

Kappaleessa 8.2 lasketusta pinta-alasta saamme laskettua kameran tason ja kuvatun alan tilavuuden yhden pikselin alalta yhtälöllä:

$$V_{pix \text{ kameran ja kuvan väli}} = A_{pix} * d \quad (15)$$

Koko kuva-alueen ja kameran tason välinen tilavuus saadaan toistamalla laskutoimitus jokaiselle kuvan pikselille.

Yleensä kameran tason ja kuva-alueen välinen tilavuus ei ole itsessään kiinnostava, mutta siitä voidaan johtaa kuvatun alueen tilavuus tai tilavuuden muutos. Koska haluttu tieto on, kuinka paljon jätettä on lisätty jätesäiliöön luukun avaamisen ja sulkeamisen välissä, tilavuuden muutoksen laskeminen on loogista. Yksinkertaistettuna tilavuuden muutos on:

$$\Delta V = V_{ennen} - V_{jälkeen} \quad (16)$$

Eli toisin selitettynä, ΔV kuvaa kuinka paljon vähemmän säiliössä on tyhjää tilaa, kääntäen kuinka paljon säiliö täyttyi. Mutta tällä laskutavalla ΔV voisi jopa olla negatiivinen, vaikka tosiasiaassa säiliö täyttyi, koska säiliön täytyessä sen pinta lähestyy kameraa, jolloin yksi pikseli kuvaa pienempää pinta-alaa. Siis pinnan lähestyessä kameraa, pikseleitten pinta-alojen summa pienenee.

Jotta yllä selitetyltä ongelmalta vältyttäisiin, kuva-alalta tulisi rajata vain alue, jolla muuttunut etäisyys on. Etäisyyskuvan D muutos ΔD on

$$\Delta D = D_e - D_j \quad (17)$$

missä D_e on etäisyyskuva ennen muutosta

D_j on etäisyyskuva muutoksen jälkeen

Alkuperäisistä kuvista oikea alue saadaan rajattua tekemällä ΔD avulla binäärinen maski, jossa alkion arvoksi on annettu 1, jos $\Delta D > \text{raja-arvo}$, muuten alkion arvo on 0. Raja-arvolla pyritään suodattamaan kohinaa ΔD kuvasta. Yhtälö maskille on:

$$\text{mask}(x, y) = \begin{cases} 1, & \Delta D(x, y) < \text{raja_arvo} \\ 0, & \text{Muissa tapauksissa} \end{cases} \quad (18)$$

Rajattu etäisyyskuva muutoksen jälkeen D_{rj} saadaan yhtälöstä:

$$D_{rj} = \text{mask} * D_j \quad (19)$$

Kun pikselin pinta-ala (14) lasketaan jokaiselle D_{rj} solulle, saadaan kuva, jossa on rajatun alueen pinta-ala:

$$A_{rj}(x, y) = A_{pix}(D_{rj}(x, y)) \quad (20)$$

Kertomalla rajatun alueen pinta-ala muutoksen jälkeen otetulla etäisyyskuvalla A_{rj} , saadaan kameran tason ja rajatun kuva-alueen välinen tilavuus muutoksen jälkeen V_{rj} .

$$V_{rj} = D_{rj} * A_{rj} \quad (21)$$

Muutosta edeltäneen tilavuuden V_{re} tulee laskea muutoksen jälkeistä pinta-ala kuvaa hyödyntäen, koska silloin pinta-ala sekä sille alalle mahtuva pikselien määrä on oikea. V_{re} lasketaan siis yhtälöstä:

$$V_{re} = D_{re} * A_{rj} \quad (22)$$

Paranneltu ΔV_r saadaan kaavasta:

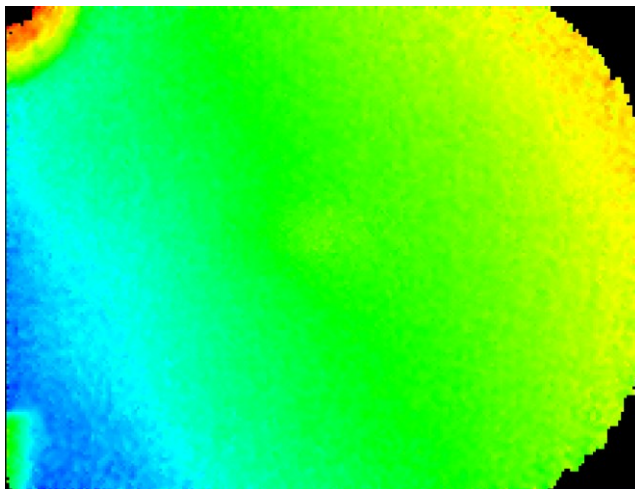
$$\Delta V_r = V_{re} - V_{rj} \quad (23)$$

Kuten kappaleessa 8.1 on kuvattu, algoritmi ei voi ottaa huomioon, minkä muotoinen kuvattu kappale on kameran näkökulmasta ”pimeällä puolella”. Esimerkiksi pallon tilavuudeksi tämä algoritmi laskisi sylinterin ja puoliympyrän yhdistelmän tilavuuden.

9 Kuvan prosessointi

9.1 Camboard pico flexx sisäinen kuvan prosessointi

Aikaisemmin on tuotu esiin erilaisia virheitä, jotka voivat heikentää ToF-kameran kuvanlaatua. Camboard pico flexxin tapauksessa, valmistaja on pyrkinyt korjaamaan ja kompensoimaan monia luetelluista virheistä, mutta menetelmiä ei ole julkisesti saatavilla. Joten voidaan vain arvailla, miten kamera sisäisesti muokkaa sensorin raakaa dataa. Kaikkia virheitä kamera ei kuitenkaan pysty sisäisesti korjaamaan työn kirjoitushetkellä, ja jotkin sen tekemät korjaukset muokkaavat kuvaa tämän käyttökohteen kannalta epäsuotuisasti. Esimerkiksi kamera selvästi poistaa heikosti valottuneiden pikselien arvot, minkä takia kuvan kulmissa ei ole laajoilla alueilla mittaustulosta (Kuvio 21). Joten muokkasin kuvaa tavoilla, jotka omasta mielestäni tekivät kuvasta käyttökelpoisempia. Toisaalta algoritmissa oikean alueen rajaaminen on yksi kriittinen osa prosessia, mikä myös vaatii kuvan prosessointia. Tässä luvussa kuvaan, mitä tekniikoita käytin kuvan laadun parantamiseen, ja kiinnostavan alueen rajaamiseen.



Kuvio 21. Kamerasta suoraan otettu kuva. Kuva alueen kulmissa olevilla mustilla alueilla mittaustulos on nolla metriä.

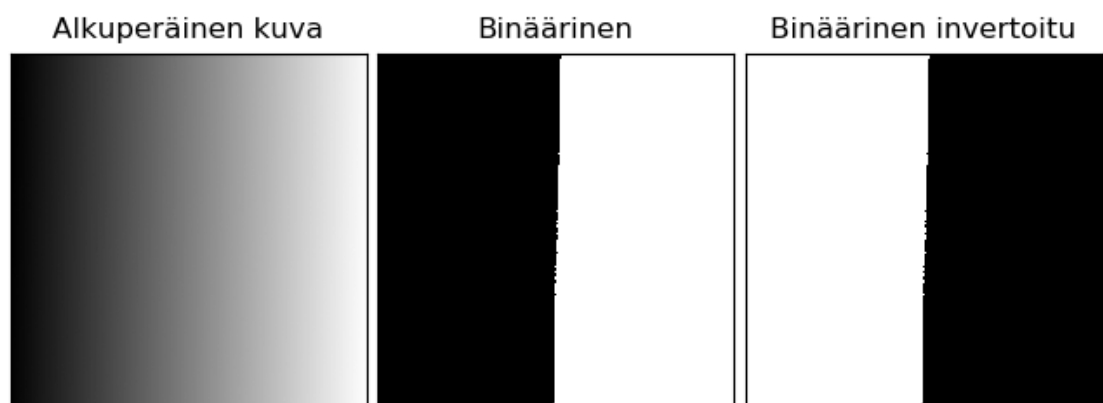
9.2 Yksinkertainen kuvan kynnysvertailu (Image thresholding)

Yleensä kuvan kynnysvertailulla pyritään jakamaan kuva tiettyihin osiin tai raajamaan kuvasta jokin kiinnostava alue. Esimerkiksi voidaan jakaa kuva pikselien värin perusteella eri osiin, tai rajata kuvasta vain varjot pikselien intensiteetin perusteella ja nostaa vain varjossa olevien pikseleiden kirkkautta. Kynnysvertailuun on monia eri metodeja, mutta tässä esittelen vain niistä yksinkertaisimman, binäärisen kynnysvertailun. Binäärisen kynnysvertailun tuloksena kuvan pikselien arvona voi olla vain nolla tai *maxval*, joka voi olla mikä tahansa käyttäjän valitsema arvo. Matemaattisesti binäärisen kynnysvertailun funktio on:

$$dst(x,y) = \begin{cases} maxval, & src(x,y) > raja - arvo, \\ 0, & muissa tapauksissa \end{cases} \quad (24)$$

Eli kun pikselin arvo on suurempi kuin raja-arvo asetetaan pikselin arvoksi *maxval*.

(Basic Thresholding Operations n.d.)



Kuvio 22. Esimerkki kuvan kynnystämisestä. Raja-arvolla 127 kuva jakautuu noin keskeltä.

9.3 Inpainting

Inpainting on hyvä tekniikka tilanteessa, jossa kuvassa on jokin yhtenäinen huonolaatuinen tai vioittunut alue, joka halutaan korjata. Perusidea on yksinkertainen: korva-

taan vioittunut alue naapuri pikseleillä niin se näyttää naapureitansa vastaavalta. Inpaintingilla yritin korjata pikseleitä, joissa syvyysarvo on hyppivien reunojen tai pienen amplitudin takia nolla. Hyppiviä reunoja syntyy tasoille, jotka heijastavat säteet niin etteivät ne palaa takaisin sensorille.

Käytin OpenCV kirjastoa, jonka inpaint() (inpaint() Function Documentation n.d.) funktion kutsu pythonissa on seuraava:

```
dst = cv.inpaint(src, InpaintMask, inpaintRadius, flags[, dst])
```

Taulukko 2. Inpaint funktion parametrit.

src	Tulo (Input). 8-bit, 16-bit unsigned tai 32-bit float 1-kanavainen tai 8-bit 3-kanavainen kuva
inpaintMask	Inpainting maski, 8-bit 1-kanavainen kuva. Pikselit, joiden arvo on muu kuin nolla maalataan.
dst	Lähtö (Output). Kuva, joka on samankokoinen ja tyyppinen kuin src
inpaintRadius	Ympyrän säde pikseleinä, minka algoritmi ottaa huomioon maalatessa
flags	Inpainting metodi, joko INPAINT_TELEA (Telea 2004), tai INPAINT_NS (Bertalmio 2001)

Taulukossa 2 näkyy inpaint() funktion parametrien selitykset. Inpaint funktion parametri inpaintMask siis kertoo, minkä alueen funktio maalaa. Pico flexx -kamerasta on saatavilla pikselikohtainen depthConfidence arvo, joka kertoo 0 – 255 asteikolla kuinka luotettava mittaustulos on, 255 arvon kertoen täydestä luotettavuudesta. Sitä, kuinka luotettavuus arvo lasketaan, ei avata kameran dokumentaatiossa, mutta luotettavuusarvojen kuvan nolla-arvot vastaavat lähes täydellisesti syvyyskuvassa olevien nollien sijaintiin. Siksi loin hyvin pienistä luotettavuus arvoista maskin inpaint

funktiolle. Käytännössä se onnistuu $\text{threshold}()$ funktiolla, tekemällä käänteisen binäärimaskin pienellä raja-arvolla.

9.4 Binäärisen kuvan muokkaukset

9.4.1 Eroosio (eng. erosion) ja Laajennus (eng. dilation)

Usein pelkkä kuvan kynnystäminen binääriseksi ei tuo haluttua lopputulosta. Toivotut piirteet voivat olla kiinni toisissaan, tai kuvassa on kohinan takia ylimääräisiä pikseleitä. Siksi binäärikuvaa usein muokataan jotenkin, jotta kuvaan jäisi vain halutut piirteet tai haluttu piirre tulisi esiin. (Russ 2007) Tämän työn tapauksessa binäärikuva pyrittiin saamaan vain muuttuneen alueen kohdalle, eli paikkaan, johon tavaraa on lisätty kuvien välillä.

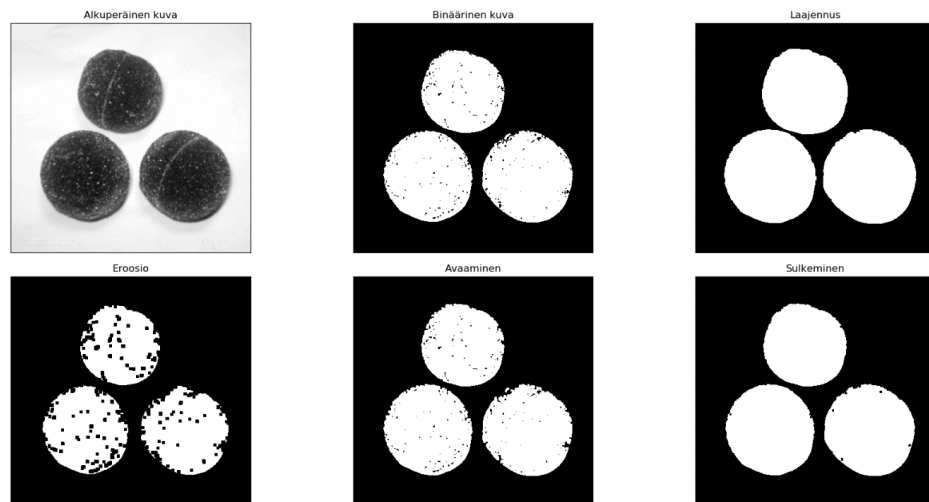
Yksinkertaisesti kuvasta poistetaan tai lisätään pikseleitä jonkin säännön mukaan. Yleisempiä binäärikuville tehtäviä operaatioita kutsutaan yhteisesti morphologisiksi operaatioiksi, joita ovat eroosio (eng. erosion), laajennus (eng. dilation), niiden muunnelmät sekä niiden yhdistelmät. (Russ 2007)

Eroosio (Kuvio 23 vasen ala) muuttaa kuvassa pikselin, jonka arvo on yksi nolllaksi. Yksinkertaisin eroosio on asettaa kaikki pikselit nolllaksi, jotka ovat valmiiksi pikselien vieressä, joiden arvo on nolla. Näin kuvasta poistetaan kaikki yhden tai kahden pikselin levyiset alueet, mutta toisaalta kaikki muutkin alueet pienenevät kooltaan. (Russ 2007)

Eroosion vastaoperaatio on Laajennus (Kuvio 23 oikea ylä), jossa lisätään pikseleitä poistamisen sijaan. Vastaavasti yksinkertaisessa laajennuksessa kaikki pikselit asetetaan ykköseksi, jotka ovat valmiiksi pikselien vieressä, joiden arvo on yksi. Tästä seuraa, että kuvan pienet reiät täyttyvät, kuvan alueet laajenevat ja saattavat yhdistyä toisiinsa. (Russ 2007)

9.4.2 Avaaminen (eng. opening) ja Sulkeminen (eng. closing)

Yhdistelmää, jossa ensin tehdään eroosio ja sitten laajennus kutsutaan Avaamiseksi (eng. opening) (Kuvio 23 keskellä ala). Nimensä se saa siitä ominaisuudesta, että se usein avaa rakoja toisissaan kiinni oleviin piirteisiin (eng. feature). Operaation jälkeen piirteiden koot ja muodot ovat melko samat kuin ennen operaatiota, mutta pienet aukot sekä ”kannakset” kuvassa poistuvat. Kun operaatiot tehdään päinvastaisessa järjestyksessä, sitä kutsutaan Sulkemiseksi (eng. closing) (Kuvio 23 vasen ala). Sulke-
misen tuloksena pienet raot ja reiät poistuvat ja piirteet voivat yhdistyä suuremmiksi piirteiksi. Eroosion ansiosta piirteiden koot ja muodot ovat kuitenkin suunnilleen samanlaisia kuin ennen operaatiota.



Kuvio 23. Morphologisten operaatioiden tulokset.

10 Mittausten toteutus

10.1 Kameran etäisyysmittauksen tarkkuuden mittaus hyvissä olosuh- teissa

Ensimmäisenä mittatiin, kuinka tarkka kameran syvyysmittaus on hyvissä olosuh-
teissa. Tässä skenaariossa kuvattava kohde on kokonaan tasainen ja kokonaan sa-

massa tasossa oleva pinta, joka on väriltään vaalea (Kuvio 24). Mittaus tehtiin sisätiloissa, joten kuvassa ei pitäisi juurikaan olla auringon valosta johtuvia häiriöitä. Kuvaa ei pitäisi syntyä monista heijastuksista johtuvia häiriöitä, ja tasaisen ja vaalean pinnan pitäisi heijastaa säteitä hyvin sekä tasaisesti. Kameran ja mitattavan kohteen todellinen etäisyys mitattiin rullamitalla. Mittauksen virheeksi arviotiin ± 2 millimetriä, koska oli vaikea määrittellä, onko rullamitta aivan suorassa linjassa ja heijastava pinta ei ole täydellisen tasaisen värinen. Todellista etäisyyttä verrattiin kameran antamaan tulokseen kuvan keskellä, mistä saatiin sekä absoluuttinen että suhteellinen virhe.



Kuvio 24. Mittaustilanne hyvissä olosuhteissa.

10.2 Kameran etäisyysmittauksen tarkkuuden mittaaminen jätesäiliötä vastaavissa olosuhteissa

Toisessa skenaariossa pyrittiin luomaan jätesäiliötä vastaavat olosuhteet. Mittauksia varten oikean jätesäiliön hankkiminen tai samankokoisen säiliön rakentaminen olisi ollut suuri urakka, eikä käytettävissä ollut tiloja mihin se olisi mahtunut, joten päätettiin rakentamaan siitä pienoismalli pahvilaatikosta (Kuvio 25). Pahvilaatikon neliön muotoisen pohjan sivunpituus oli 368 millimetriä, ja oikean säiliön 1600 millimetriä, jolloin suhdeluvuksi tuli 1:4,35. Suhdeluvusta laskettuna säiliössä 2,5 metrin päähän pohjasta asennettuna kamera olisi suhteellisesti yhtä kaukana pohjasta kuin 57,5 senttimetrin päähän pohjasta asetettu kamera pienoismallissa. Kameran alaspäin laskeminen vastaa pinnan nousemista säiliössä. Mielenkiinnosta nostettiin kameraa myös ylöspäin, vaikkei sellaista tilannetta oikeassa säiliössä tapahtuisikaan. Kameran ja mitattavan kohteen todellinen etäisyys mitattiin rullamitalalla, kuten edellä on mainittu. Mittatarkkuudeksi arviottiin myös sama kuin ensimmäisessä kokeessa, ± 2 millimetriä.



Kuvio 25. Mittaustilanne jätesäiliötä vastaavissa olosuhteissa.

10.3 Lasketun tilavuuden tarkkuuden mittaaminen avonaisessa tilassa

Kolmannessa skenaariossa mitattiin lasketun tilavuuden tarkkuutta kappaleen ollessa avonaisessa tilassa. Tämän mittauksen tarkoitus on selvittää, kuinka tarkka laskettu tilavuus on hyvissä olosuhteissa ilman heijastuksia. Mittaus toteutettiin ensin ottamalla kuva tyhjästä vaalean ruskean värisestä pöydästä, jonka jälkeen siihen asetettiin neliskulmainen esine ja otettiin uusi kuva. Sitten algoritmi laski kappaleelle tilavuuden, jota verrattiin esineen todelliseen tilavuuteen. Mittauksia tehtiin kappaleesta kolmessa eri kohdassa säiliön sisällä useita kertoja, jotta nähtiin mittausten jakauma. Kappaleen sivujen pituudet mitattiin rullamitalla, mistä laskettiin tilavuus. Kappaleen suhteen mittausvirhe oli tässä tapauksessa pienempi kuin edellä, koska tilanne oli helpommin hallittavissa, ja siksi mittausvirheeksi arvioitiin $\pm 0,5$ mm.

10.4 Lasketun tilavuuden tarkkuuden mittaaminen säiliössä

Neljäs skenaario oli mitata pienoismallin sisällä olevalle kappaleelle lasketun tilavuuden tarkkuutta. Mittauksesta selviää, kuinka hyvin luotu algoritmi toimisi käyttökohteissa. Mittaus toteutettiin ensin ottamalla kuva tyhjästä säiliöstä, jonka jälkeen sinne lisättiin neliskulmainen esine ja otettiin uusi kuva. Sitten algoritmi laski kappaleelle tilavuuden, jota verrattiin esineen todelliseen tilavuuteen. Mittauksia tehtiin kappaleesta kolmessa eri kohdassa säiliön sisällä useita kertoja, jotta nähtiin mittausten jakauma. Kappaleen sivujen pituudet mitattiin rullamitalla, mistä laskettiin kappaleen tilavuus. Kappaleen suhteen mittausvirhe on tässä tapauksessa pienempi kuin edellä, koska tilanne oli helpommin hallittavissa, ja siksi mittausvirheeksi arvioitiin $\pm 0,5$ mm.

10.5 Läpinäkyvien materiaalien kuvaamisen testaus

Mittausten lisäksi kokeiltiin, kuinka kamera reagoi läpinäkyviin materiaaleihin. Teorian perusteella läpinäkyvien materiaalien pitäisi aiheuttaa häiriöitä, mutta tarkka vaikutus selviää kokeilemalla. Tässä kokeessa mitattiin lasisen vesikarahvin tilavuutta.

Karahvin tilavuus laskettiin suurin piirteisesti sen ympärysmittojen ja korkeudet perusteella. Tätä tilavuutta verrattiin etäisyydestä laskettuun tilavuuteen. Ympärysmittat ja korkeudet mitattiin nauhamitalla, mittavirheeksi arvioitiin ± 1 mm. Tilavuutta laskiessa karahvi karkeistettiin olevan kahden päällekkäisen sylinterin muotoinen.

Kuva karahvista liitteissä. (Liite 1)

11 Mittausten tulokset

11.1 Kameran etäisyysmittauksen tarkkuuden mittaus hyvissä olosuhteissa

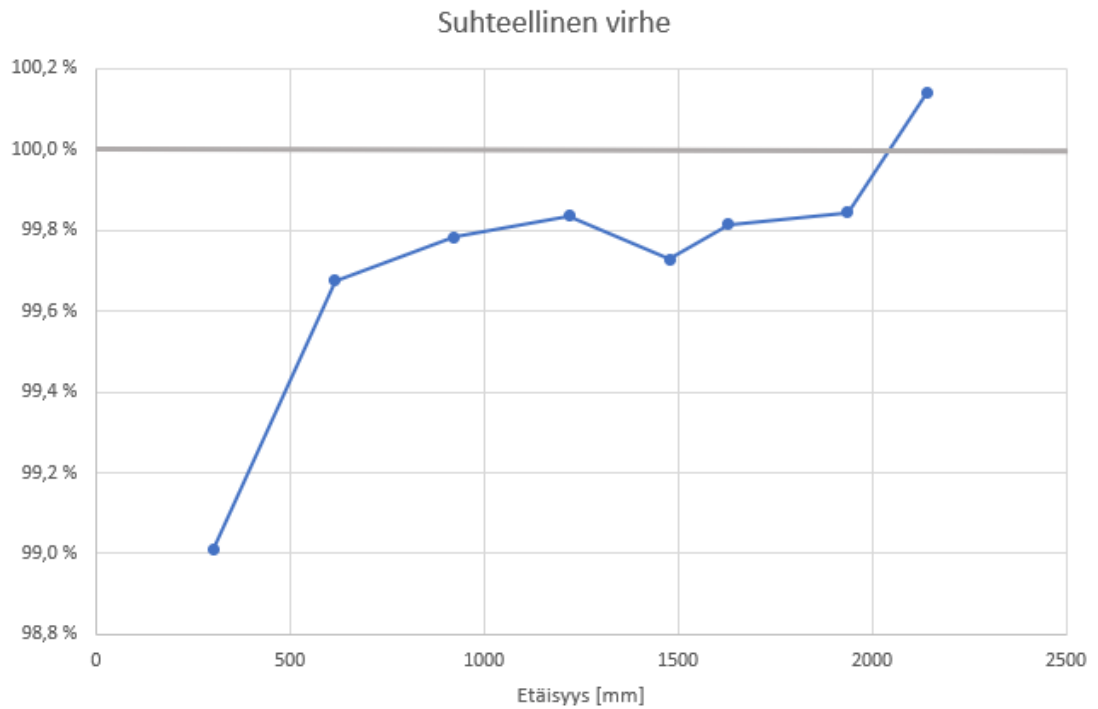
Mittausten perusteella kameran etäisyysmittauksen tarkkuus on hyvä olosuhteiden ollessa hyvät. Mittausten absoluuttinen virhe on hyvin lähellä arvioitua mittavirhettä. (Taulukko 3)

Taulukko 3. Kameran etäisyysmittauksen tarkkuus hyvissä olosuhteissa.

todellinen etäisyys [mm]	kameran mittaama etäisyys [mm]	virhe [mm]	suhde
303	300	-3	99,0 %
616	614	-2	99,7 %
923	921	-2	99,8 %
1220	1218	-2	99,8 %
1479	1475	-4	99,7 %
1630	1627	-3	99,8 %
1936	1933	-3	99,8 %
2140	2143	3	100,1 %



Kuvio 26. Kuvio etäisyysmittauksen tarkkuudesta.



Kuvio 27. Kameran etäisyysmittauksen suhteellinen tarkkuus.

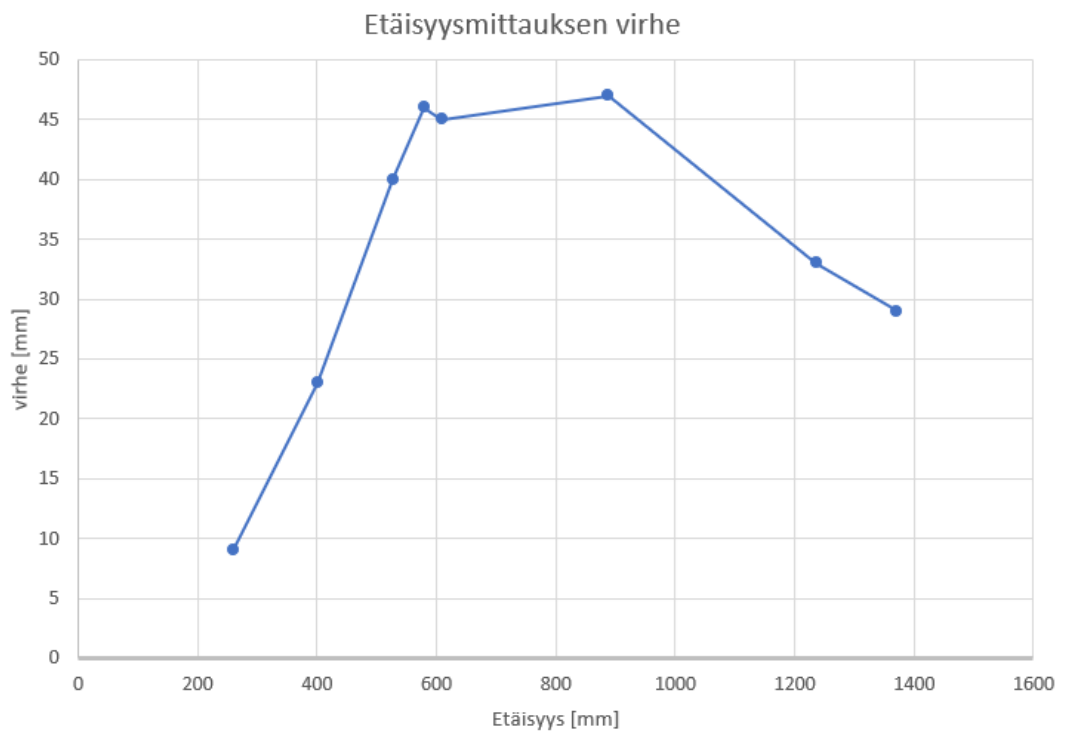
11.2 Kameran etäisyysmittauksen tarkkuuden mittaus jätesäiliötä vastaavissa olosuhteissa

Tämän mittauksen tuloksista on huomattavissa, että kameran etäisyysmittauksen tarkkuus heikkenee huomattavasti, kun mitattava pinta on suljetussa tilassa. Virhe johtuu oletettavasti monta reittiä pitkin heijastuneista säteistä. Kameran sensorille palaa säteitä, jotka ovat heijastuneet useita eri reittejä pitkin, sen sijaan, että sensorille palaisi vain suoraan kohteesta heijastuneita säteitä. Suurimmillaan virhe on kameran etäisyyden pohjasta ollessa 40,1 cm ja 123,6 cm välillä. Varsinkin 40 cm lähempänä virhe pienenee reilusti. Luulen virheen pienenevän, koska alle 40 cm etäisyydellä säiliön pohjasta, kamera ei lähetä säteitä suoraan pystysuoraan pintaan, jolloin säteiden reitit takaisin sensorille ovat luonnostaan lyhyempiä. 124 cm jälkeen virheen pienemistä voisi taas selittää se, että kameran ollessa kauempana säiliöstä koko kameran valovoimasta pienempi määrä päätyy säiliön sisään, jolloin myös häiriöitä aiheuttavia säteitä on vähemmän. Toisaalta virheen pieneminen voi johtua myös geometriasta, kameran ollessa kauempana ei häiriöitä aiheuttaville säteille ole niin

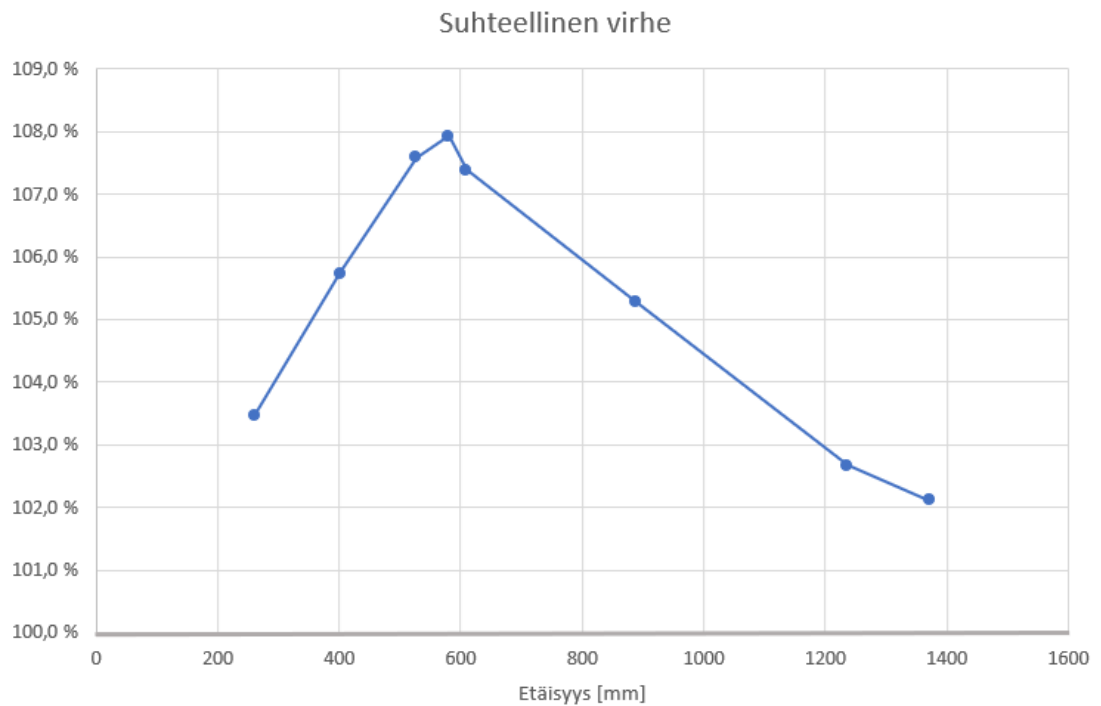
paljon oikeasta lentoajasta poikkeavia reittejä tarjolla. Tulokset osoittavat miten vaikea monista heijastuksista johtuvia virheitä on ennakoida ja korjata, sillä ne ovat täysin kuvauskohteesta riippuvaisia.

Taulukko 4. Kameran etäisyysmittauksen tarkkuus jätesäiliön sisällä.

todellinen etäisyys [mm]	kameran mittaama etäisyys [mm]	virhe [mm]	suhde
260	269	9	103,5 %
401	424	23	105,7 %
527	567	40	107,6 %
580	626	46	107,9 %
609	654	45	107,4 %
888	935	47	105,3 %
1236	1269	33	102,7 %
1371	1400	29	102,1 %



Kuvio 28. Etäisyysmittauksen tarkkuus pienoismallisäiliössä.



Kuvio 29. Etäisyysmittauksen suhteellinen tarkkuus pienoismallisäiliössä.

11.3 Lasketun tilavuuden tarkkuuden mittaaminen avonaisessa tilassa

Mittaustilanteessa kamera oli 538 millimetrin päässä pöydästä. Mitatun neliskanttisen kappaleen mitat olivat 17,6 cm*3,4 cm*6,6 cm, mistä tulee tilavuudeksi 0,3949 Litraa (Taulukko 5). Mitattu kappale oli jäykkä, eli se ei mukautunut sen taustapinnan mukaan.

Taulukko 5. Mitatun kappaleen mitat.

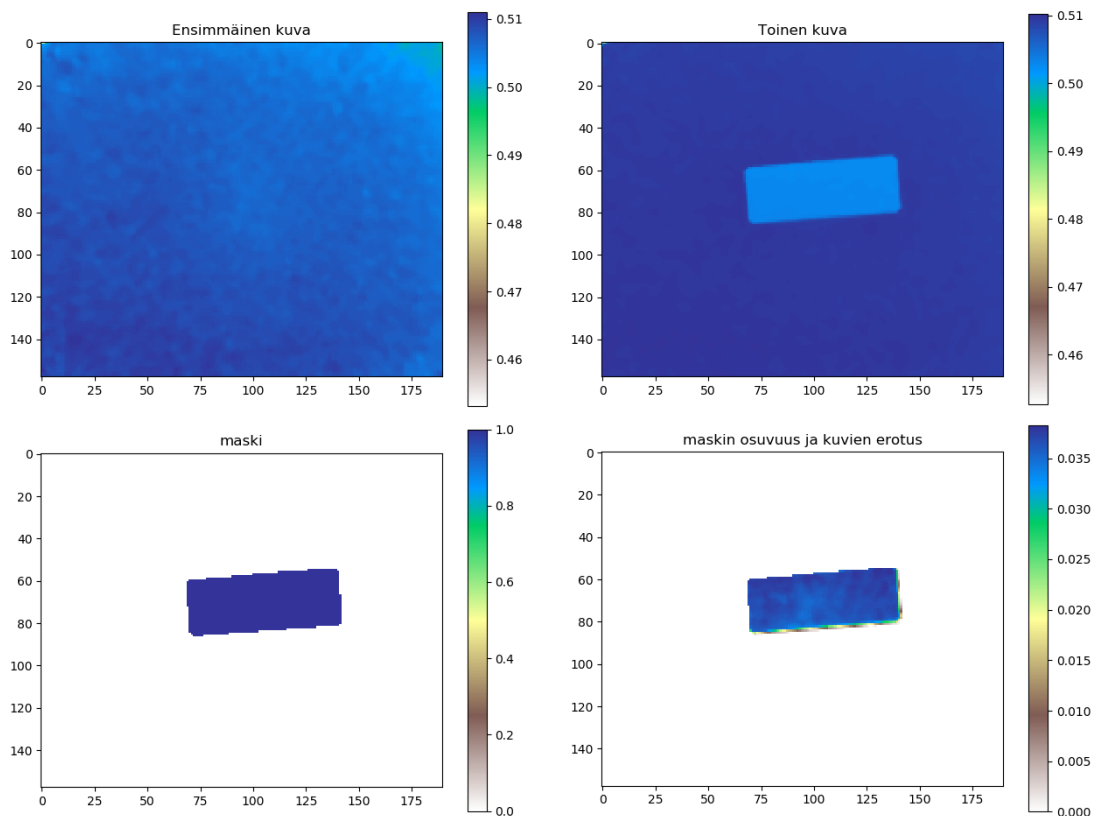
Kappaleen koko	
pituus	1,76 dm
leveys	0,34 dm
korkeus	0,66 dm
	0,3949 dm ³ tai L

11.3.1 Keskellä kuva-aluetta

Taulukossa 6 on tämän mittauksen tulokset. Tilavuus on mitattu n. 3 senttilitraa liian pieneksi, mikä vastaa n. 8 prosentin heittoa. Maski, eli rajattu alue, sopii kappaleeseen melko hyvin, vai vasemmassa ja yläreunassa pieni osa kappaleesta rajautuu maskin ulkopuolelle.

Taulukko 6. Mitatut tilavuudet ja niiden virhe kappaleen ollessa kuva-alueen keskellä.

Laskettu tilavuus [L]	Virhe [L]	Suhteellinen virhe
0,3631	-0,031844	-8,1 %
0,3632	-0,031744	-8,0 %
0,3633	-0,031644	-8,0 %
0,3644	-0,030544	-7,7 %
0,3646	-0,030344	-7,7 %



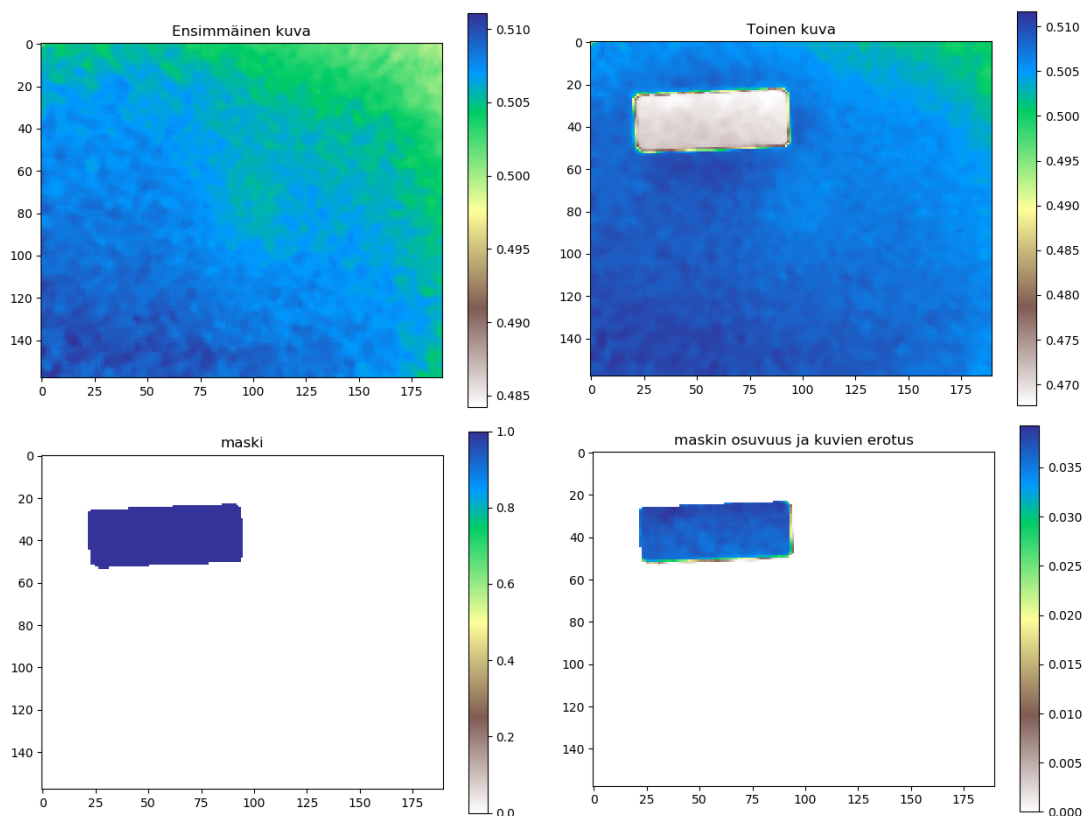
Kuvio 30. Kappale lähellä kuva alueen keskusta. Väriasteikko kertoo pisteen etäisyyden kamerasta metreissä. Oikealla alhaalla olevasta kuvasta lasketaan kappaleen tilavuus.

11.3.2 Lähellä kuva-alueen kulmaa

Taulukossa 7 on tämän mittauksen tulokset. Tilavuus on mitattu n. 1,5 senttilitraa liian pieneksi, mikä vastaa n. 4 prosentin heittoa. Maski sopii kappaleeseen melko hyvin, vain vasemmassa ja yläreunassa pieni osa kappaleesta rajautuu maskin ulkopuolelle.

Taulukko 7. Mitatut tilavuudet ja niiden virhe kappaleen ollessa lähellä kuva-alueen kulmaa.

Laskettu tilavuus [L]	Virhe [L]	Suhteellinen virhe
0,3791	-0,015844	-4,0 %
0,3758	-0,019144	-4,8 %
0,3779	-0,017044	-4,3 %
0,3798	-0,015144	-3,8 %
0,3789	-0,016044	-4,1 %



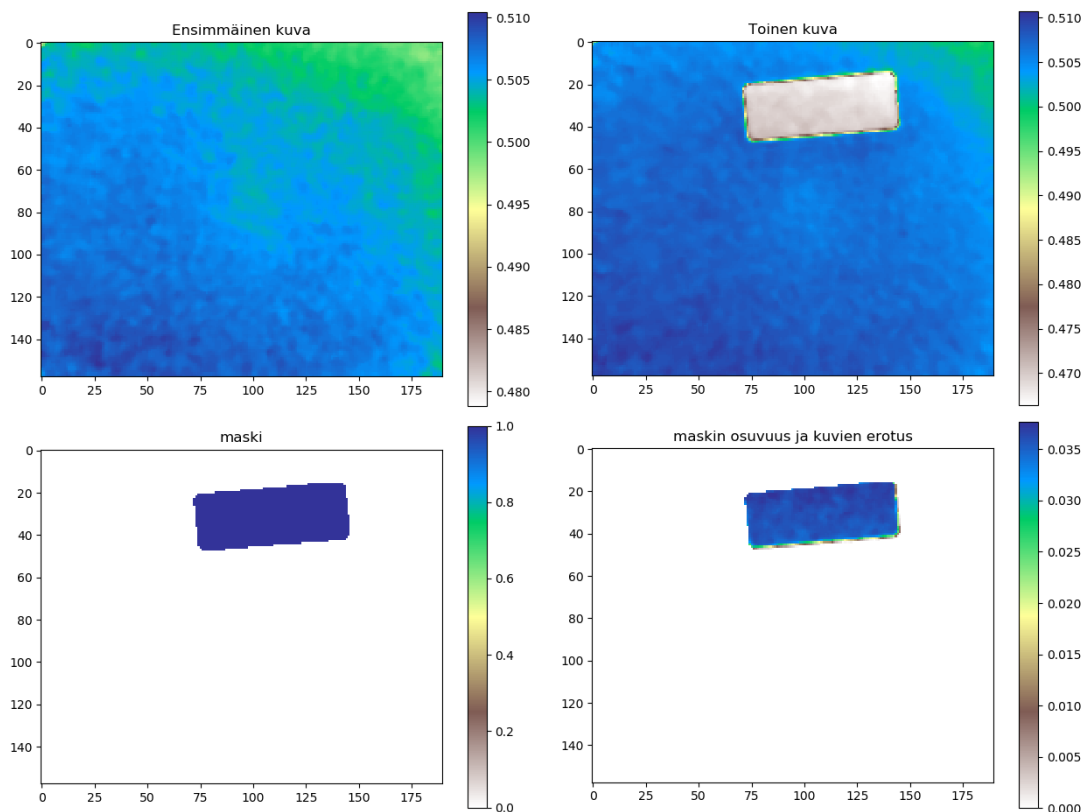
Kuvio 31. Kappale lähellä kuva-alueen kulmaa. Väriasteikko kertoo pisteen etäisyyden kamerasta metreissä. Oikealla alhaalla olevasta kuvasta lasketaan kappaleen tilavuus.

11.3.3 Lähellä kuva-alueen laitaa

Taulukossa 8 on tämän mittauksen tulokset. Tilavuus on mitattu n. 2,4 senttilitraa liian pieneksi, mikä vastaa n. 6 prosentin heittoa. Maski sopii kappaleeseen melko hyvin, vai vasemmalla ja yläreunassa pieni osa kappaleesta rajautuu maskin ulkopuolelle.

Taulukko 8. Mitatut tilavuudet ja niiden virhe kappaleen ollessa kuva-alueen laitaa.

Laskettu tilavuus [L]	Virhe [L]	Suhteellinen virhe
0,3708	-0,024144	-6,1 %
0,3706	-0,024344	-6,2 %
0,367	-0,027944	-7,1 %
0,3696	-0,025344	-6,4 %
0,3685	-0,026444	-6,7 %



Kuvio 32. Kappale lähellä kuva alueen laitaa. Väriasteikko kertoo pisteen etäisyyden kamerasta metreissä. Oikealla alhaalla olevasta kuvasta lasketaan kappaleen tilavuus.

11.4 Lasketun tilavuuden tarkkuuden mittaus säiliössä

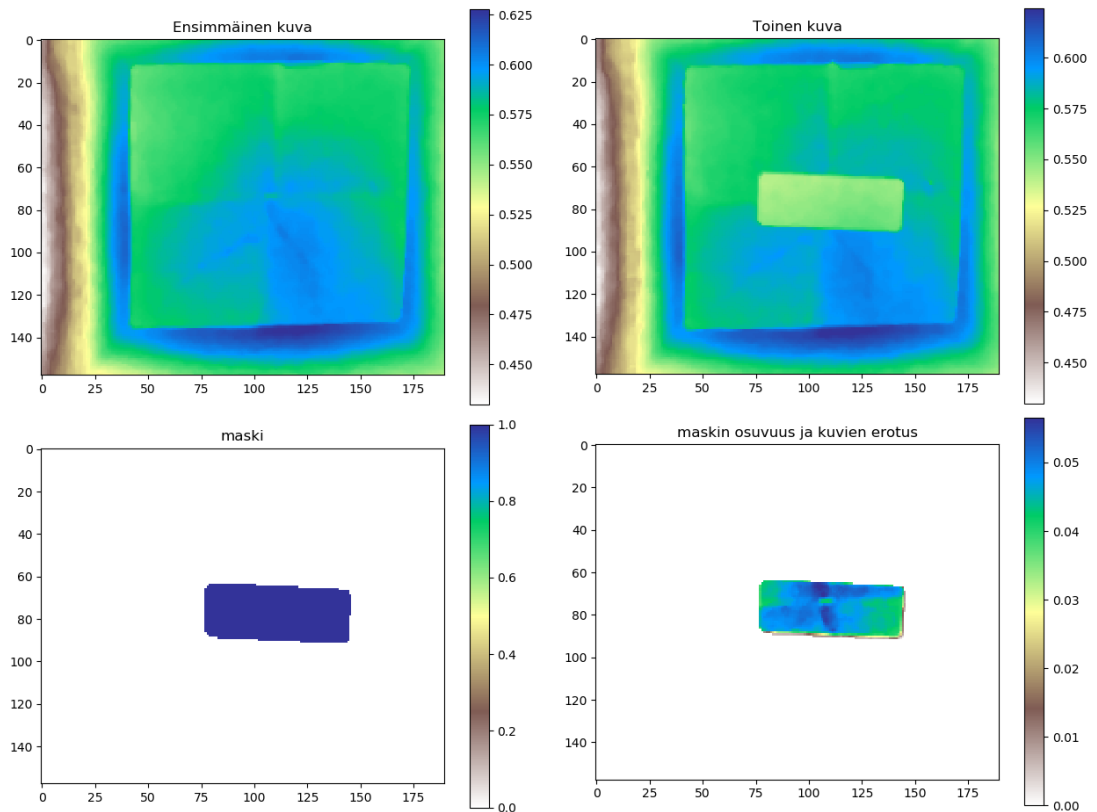
Mitattava kappale oli sama kuin kappaleessa 11.3 käytetty. Kappaleen mitat on kuvattu taulukossa 5. Kamera oli 508 millimetrin etäisyydellä laatikon pohjasta kuvaustilanteissa.

11.4.1 Keskellä säiliötä

Taulukossa 9 on tämän mittauksen tulokset. Tilavuus on mitattu n. 1,8 desilitraa liian suureksi, mikä vastaa n. 45 prosentin heittoa. Jonkin verran heittoa tulee siitä, että kappale ja laatikon pohja eivät ole aivan saman muotoisia, mutta se ei selitä näin suurta heittoa tuloksessa. Mitattava alue sopii myös hyvin kappaleeseen, joten suuri heitto johtuu todennäköisesti liian suureksi arvioiduksi etäisyydestä.

Taulukko 9. Mitatut tilavuudet ja niiden virhe kappaleen ollessa säiliön keskellä.

Laskettu tilavuus [L]	Virhe [L]	Suhteellinen virhe
0,5734	0,1785	45,2 %
0,5749	0,1800	45,6 %
0,575	0,1801	45,6 %
0,5757	0,1808	45,8 %
0,5759	0,1810	45,8 %



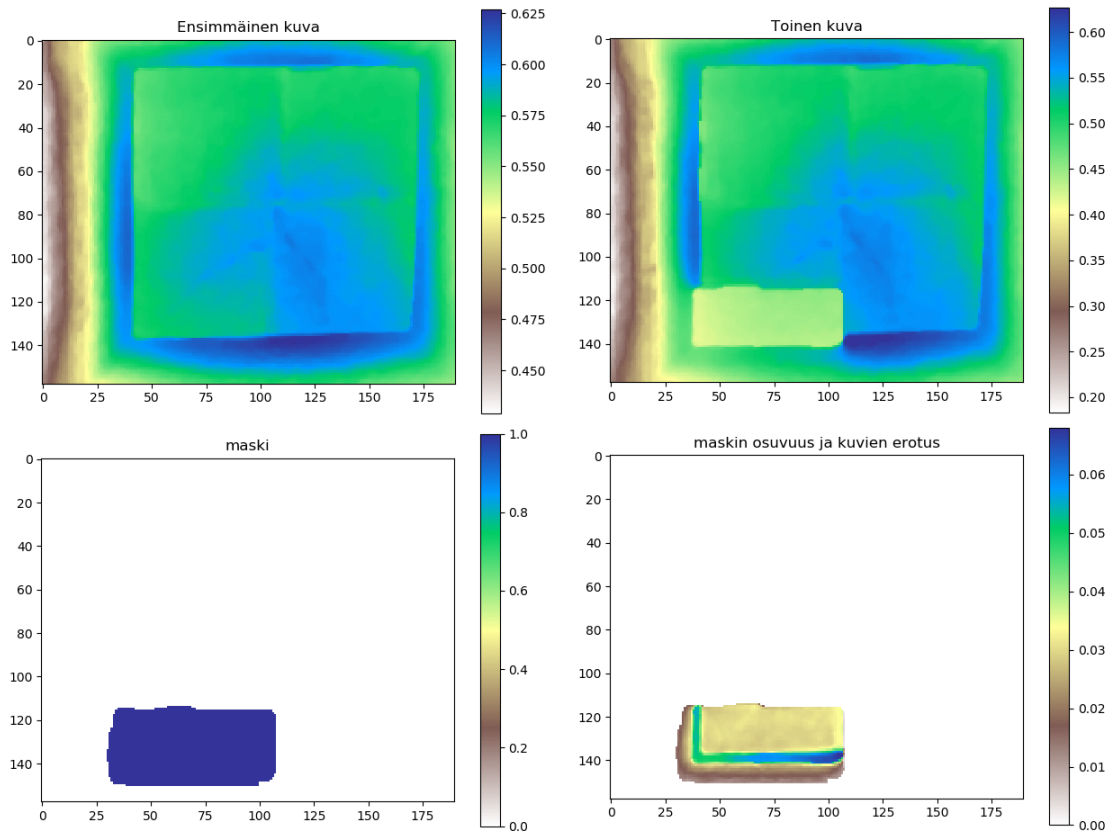
Kuvio 33. Kappale lähellä kuva-alueen keskikohtaa säiliön sisällä. Väriasteikko kertoo pisteen etäisyyden kamerasta metreissä. Oikealla alhaalla olevasta kuvasta lasketaan kappaleen tilavuus.

11.4.2 Säiliön kulmassa

Taulukossa 10 on tämän mittauksen tulokset. Tilavuus on mitattu n. 3,6 desilitraa liian suureksi, mikä vastaa n. 92 prosentin heittoa. Mittausalue on paljon kappaletta suurempi, mikä selittää suurta virhettä, sekä suurta eroa tulokseen kappaleen ollessa keskellä laatikkoa.

Taulukko 10. Mitatut tilavuudet ja niiden virhe kappaleen ollessa säiliön kulmassa.

Laskettu tilavuus [L]	Virhe [L]	Suhteellinen virhe
0,7598	0,3649	92,4 %
0,7624	0,3675	93,0 %
0,763	0,3681	93,2 %
0,7574	0,3625	91,8 %
0,7588	0,3639	92,1 %



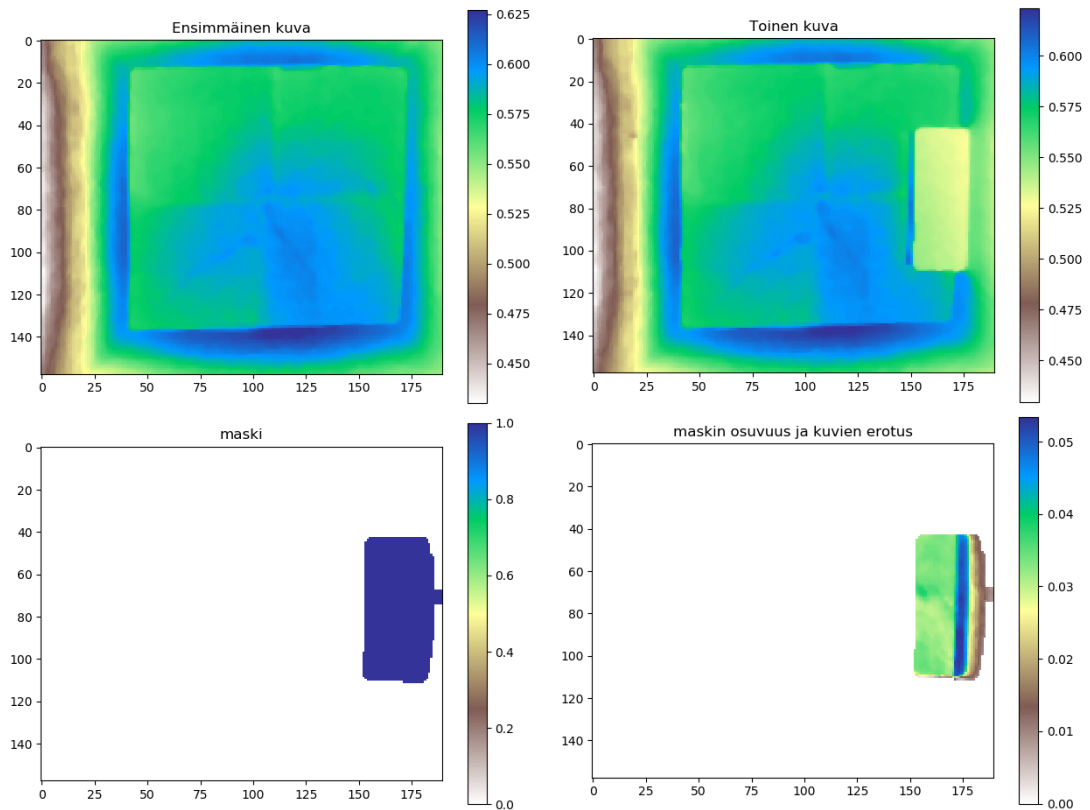
Kuvio 34. Kappale kulmassa säiliön sisällä. Väriasteikko kertoo pisteen etäisyyden kamerasta metreissä. Oikealla alhaalla olevasta kuvasta lasketaan kappaleen tilavuus.

11.4.3 Säiliön laidassa

Taulukossa 11 on tämän mittauksen tulokset. Tilavuus on mitattu n. 2,58 desilitraa liian suureksi, mikä vastaa n. 65 prosentin heittoa. Jonkin verran heittoa tulee siitä, että kappale ja laatikon pohja eivät ole aivan saman muotoisia, mutta se ei selitä näin suurta heittoa tuloksessa. Mittausalue on paljon kappaletta suurempi, mikä selittää suuren heiton tuloksessa. Virhe on kuitenkin pienempi kuin kappaleen ollessa kulmassa, koska kappale on vähemmän laatikon seinämää vasten.

Taulukko 11. Mitatut tilavuudet ja niiden virhe kappaleen ollessa säiliön laidassa.

Laskettu tilavuus [L]	Virhe [L]	Suhteellinen virhe
0,6537	0,2588	65,5 %
0,6515	0,2566	65,0 %
0,6528	0,2579	65,3 %
0,6547	0,2598	65,8 %
0,6507	0,2558	64,8 %



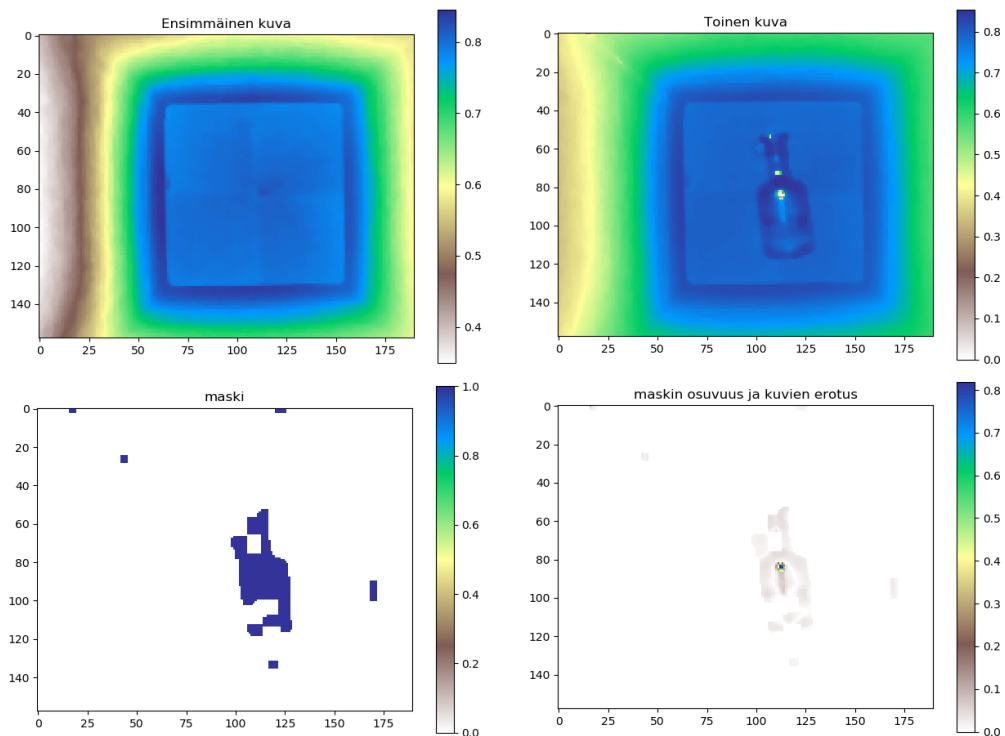
Kuvio 35. Kappale laidassa säiliön sisällä. Väriasteikko kertoo pisteen etäisyyden kamerasta metreissä. Oikealla alhaalla olevasta kuvasta lasketaan kappaleen tilavuus.

11.5 Läpinäkyvä materiaali

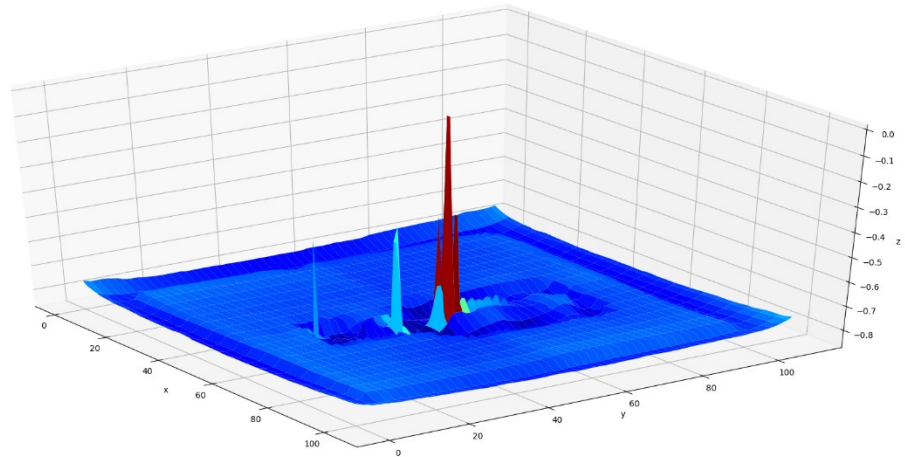
Taulukossa 12 on karahvista mitatut mitat, niistä laskettu niin sanottu todellinen tilavuus, sekä etäisyyskuvan perusteella laskettu tilavuus. ToF-kamera ei onnistunut hahmottamaan lasisen läpinäkyvän kappaleen etäisyyttä oikein, minkä takia sen tilavuus laskettiin negatiiviseksi. Kuvissa näyttää siltä, kuin kappale olisi painunut maan sisälle. Jostain syystä etäisyysmittauksiin on tullut vaihtelua myös muualla, kuin kuvan asetetun kappaleen kohdalla. Kuvatussa kappaleessa on joitain pisteitä, jotka on mitattu olevan huomattavasti lähempänä kuin kappale oikeasti on, mikä on merkittävää. Kuviossa 36 oikealla ylhäällä nämä pisteet näkyvät keltaisina.

Taulukko 12. Karahvin mitat, laskettu todellinen tilavuus sekä algoritmilla laskettu tilavuus.

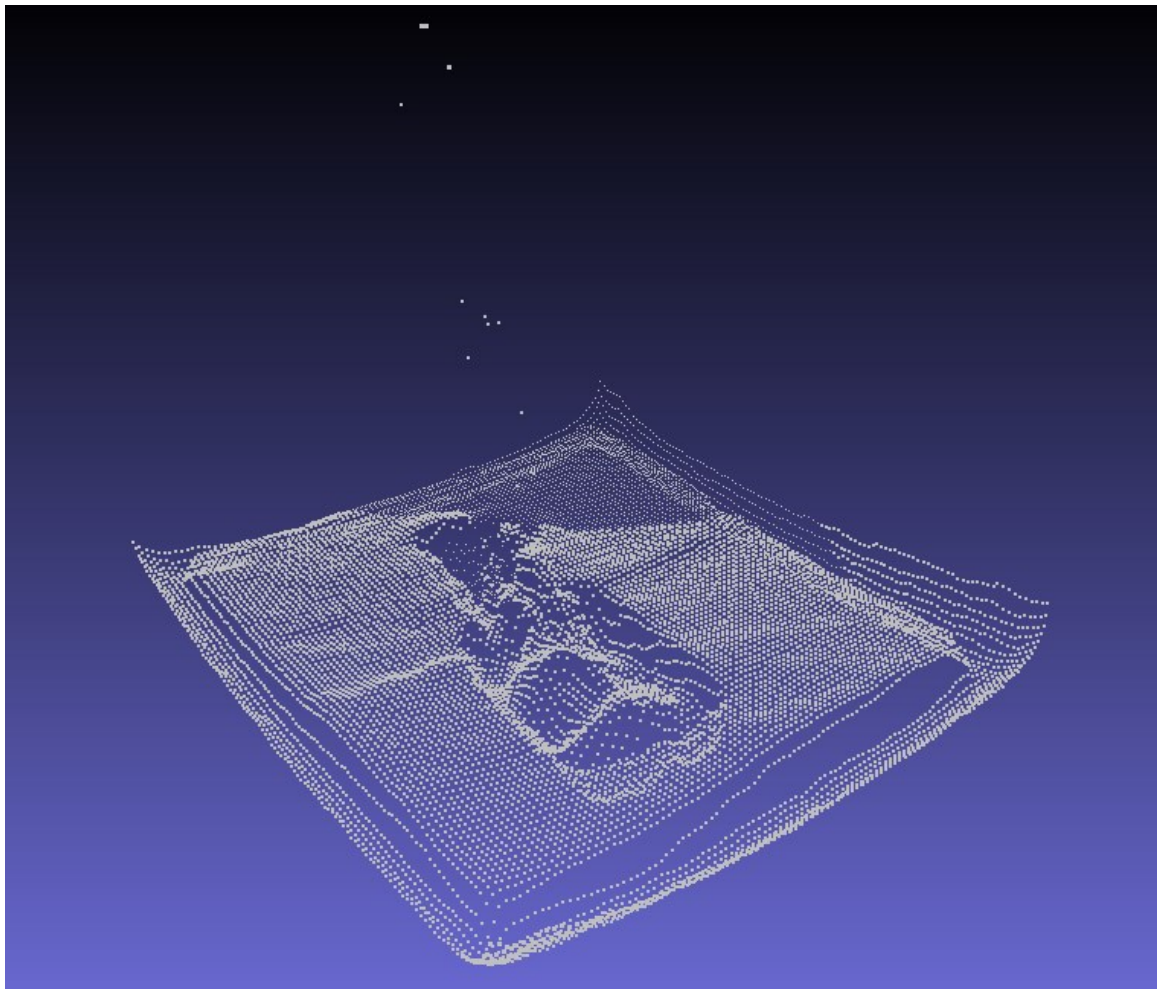
Alaosan ympärysmitta	3,00 dm	Yläosan ympärysmitta	1,30 dm
Alaosan säde	0,48 dm	Yläosan säde	0,21 dm
Alaosan pinta-ala	0,72 dm ²	Yläosan pinta-ala	0,13 dm ²
Alaosan korkeus	1,40 dm	Yläosan korkeus	0,90 dm
Alaosan tilavuus	1,00 dm³	Yläosan tilavuus	0,12 dm³
Tilavuus yhteensä	1,12 dm³, Litraa		
Laskettu tilavuus	-0,16 Litraa		
Virhe	1,28 Litraa		



Kuvio 36. Lasinen karahvi kuvattuna säiliön sisällä.



Kuvio 37. Kolmiulotteisesti piirrettynä huomaa selvästi, miten lasinen karahvi on kuvassa ikään kuin uponnut pinnan sisään.



Kuvio 38. Kuva karahvista esitettyinä pistepilvenä.

12 Johtopäätökset

12.1 Kirjallisuus

Työn tavoitteena oli selvittää, soveltuuko ToF-kamera jätesäiliön sisään laitetun jätteen tilavuuden mittaamiseen. ToF-tekniikkaan liittyviin teknisiin haasteisiin tutustuttiin kirjallisuuden ja tutkimusten avulla. Niistä selvisi, että PMD ToF-tekniikkaa käyttävissä kameroissa on monia teknisiä haasteita, mutta niihin on myös pystytty kehittämään monia ratkaisuja.

Elektronisten piirien lämpötila vaikuttaa aina mittaustulokseen. Tutkimusten mukaan PMDtec:n Camboard pico flexxissä kameran sisäisestä kuumenemisestä johtuva virhe on onnistuttu kompensoimaan hyvin, vaikka kamera on jäähdytetty vain passiivisesti (Pasinetti 2019). Tutkimusta ulkoisen lämpötilan vaikutuksesta kyseisen kameran tarkkuuteen ei löytynyt, mutta kirjallisuuden perusteella lämpötilan vaikutus mittaukseen on lineaarinen, joten sen korjaaminen tuskin on ylitsepääsemätön este. Lämpötilan vaikutusta etäisyysmittaukseen ei tässä työssä tutkittu.

Valotukseen liittyviä ongelmia kamera pyrkii korjaamaan ainakin kahdella eri tavalla. Ylivalotusta pyritään estämään automaattisella integrointiajalla tai toisin sanoen valotusajalla. Automattinen valotus toimii mielestäni hyvin, vaikkakin pienellä viiveellä. Kaikki tässä työssä nähtävät kuvat on otettu automaattista valotusta käyttäen. Alivalotusta kamera pyrkii korjaamaan suodattamalla alivalottuneet pikselit kokonaan pois kuvasta. Tämän korjauksen takia mittauksia ei ole saatavissa koko kuvan alalta, ja siitä syystä kuvaa täytyy joko rajata, tai puuttuvat pikselit täytyy maalata jollain tekniikalla, jos halutaan käyttää mahdollisimman suurta neliskulmaista kuvaa.

Tässä työssä päädyttiin estimoimaan puuttuvat pikselit, jotta kuvaan ei jäisi pikseleitä, joissa ei ole etäisyys arvoa. Maalattujen pikselien arvo riippuu niiden lähistöllä olevien pikselien arvoista, eli tekniikka pyrkii maalaamaan puuttuvan alueen kuvassa lähellä olevia alueita vastaavaksi. Vaarana tekniikassa on, että puuttuva alue ei todell-

lisuudessa olekaan sitä lähellä olevan alueen kaltainen, jolloin maalatut arvot poikkeaisivat paljon todellisuudesta. On kuitenkin parempi, että pikselit on maalattu, kuin että niissä ei olisi tietoa ollenkaan. Paras tapa olisi kuitenkin hankkia myös heikosti valottuneilta alueilta tarkka mittaus, mikä onnistuisi yhdistämällä kaksi eri valotuksella otettua kuvaa yhdeksi. Silloin kuvataajuus myös putoaisi vähintään puoleen, mikä ei tässä käyttötarkoituksessa haittaisi. Nyt ei kuitenkaan ollut mahdollisuutta toteuttaa tällaista järjestelyä, koska kameran sisäiseen koodiin ei ollut pääsyä.

Useiden heijastusten ja läpinäkyvien materiaalien, aiheuttamat ongelmat ToF-kameroissa on usein kirjallisuudessa ja tutkimuksissa mainittu ongelma, ja sitä on pyritty ratkaisemaan monissa eri tutkimuksissa. Ongelman ratkaisussa on selvästi edistytty vuosien mittaan, mutta ongelmaa ei silti olla vielä pystytty täysin ratkaisemaan. Neuroverkkoja hyödyntämällä on saatu lupaavia jopa reaaliajassa toimivia tuloksia, mutta nekään tulokset eivät ole täydellisiä (Marco 2017). Myös ilman neuroverkkoja on päästy lupaaviin tuloksiin, mutta omin rajoituksin (Naik 2015). Kyseiset tutkimukset ovat ainakin osittain Microsoftin rahoittamia, joten olisi mielenkiintoista nähdä, mikä on uusimpien ja tulevien Xbox Kinect mallien suorituskyky tässä suhteessa.

12.2 Mittaukset

Tässä työssä käytetyn kameran mittaustarkkuuteen ylimääräiset heijastukset vaikuttavat suuresti. Avonaisessa tilassa, jossa kameran mittauksissa ei ole ylimääräisistä heijastuksista aiheutuvia virheitä, etäisyysmittauksen tarkkuus on hyvä ja tilavuus lasketaan melko tarkasti. Etäisyysmittauksen tarkkuus oli 3 - 4 millimetrin välillä, mikä oli hyvin lähellä arvioitua mittavirhettä, joka syntyy mitatessa etäisyyksiä rullamitalla. Lasketun tilavuuden virhe oikeaan tilavuuteen on 3.8 - 8.1 prosentin välillä, mutta laskettu tilavuus oli aina todellista tilavuutta pienempi. Ylimääräisten heijastuksien takia etäisyysmittauksen tarkkuus oli laatikon sisällä huonompi kuin avonaisessa tilassa. Mittausten virhe oli 9 - 46 millimetrin välillä, prosentteina 3 - 8 prosenttia. Virhe etäisyysmittauksessa ei ole järkyttävän suuri, mutta koska kappaleen pinta-ala ja tilavuus johdetaan siitä, virhe kertaantuu kappaleen tilavuutta laskiessa. Kehi-

tetyn algoritmin tarkkuus suljetussa tilassa oli sen takia huono, laskettujen tilavuuksien ollessa 45 - 92 prosenttia suurempi kuin mitatun kappaleen todellinen tilavuus. Virhe lasketussa tilavuudessa oli sitä suurempi, mitä lähempänä mitattava kappale oli laatikon seiniä.

Pääsyy virheen syntyyn on kappaleen pinta-alan yliarviointi, joka johtuu kahdesta syystä. Heijastusvirheen takia mittaustulokset muuttuvat paljon kappaleen pinta-ala suuremmalla alalla. Algoritmi olettaa, että mittaustulokset muuttuvat vain niissä pikselissä, missä mitattava kappale sijaitsee. Koska mittaustulokset muuttuvat liian suurelta alalta, kappaleen pinta-ala yliarvioidaan ja tilavuus lasketaan myös luonnollisesti liian suureksi. Toinen syy on se, että kappale mitataan olevan kauempana kuin se oikeasti on, minkä takia pikselin peittämä pinta-ala lasketaan todellisuutta suuremmaksi. Koska etäisyysmittauksen tarkkuutta testattiin vain pienoismallin avulla, on mahdollista, että suuremman säiliön sisällä tarkkuus olisi parempi. Toisaalta pinta-alan mittauksen tarkkuus heikkenee luonnostaan mitä kauempana kohde on kamerasta, koska pikselin kuvaama pinta-ala kasvaa suhteessa etäisyyteen.

Avonaisessa tilassa taas kappaleen pinta-ala mitataan todellisuutta hieman pienemmäksi, minkä takia laskettu tilavuus myös jää todellista tilavuutta pienemmäksi. Tämän virheen aiheuttaja jäi hämärämmäksi. Voi olla, että maskille tehdyt morfologiset operaatiot pienentävät mittausalueen pinta-ala. Morfologiset operaatiot lisättiin prosessiin poistamaan kohinasta johtuvat virheet maskissa, joten niiden tilalle voisi kokeilla myös jotain toista tekniikkaa. Toisaalta lähestymistapa laskea tilavuus etäisyystiedosta voi myös olla huono.

Lasista läpinäkyvää vesikarahvia kuvatessa ToF-kameralla, näyttää aivan siltä kuin karahvi katoaisi kuvasta. Etäisyyskuvassa karahvin paikalla näkyy kuoppa, ja se ala-arvioidaan olevan kauempana kuin laatikon pohja. Infrapunavalolla toimiva ToF-kamera ei pystynyt tunnistamaan läpinäkyvää kappaletta oikein.

13 Pohdinta

Tässä työssä kehitetty tapa laskea säiliöön laitetun jätteen tilavuus ei ole täydellinen. Jo lähtökohtaisesti laskettu tilavuus on karkeistus, koska kameralta piiloon jäävien pintojen muotoja ei pyritä mitenkään erityisesti arvioimaan. Kappaleen sijainti ja koko voitaisiin myös havaita jollain edistyneemmällä tekniikalla, kuin olettamalla mittauksen muuttuvan vain kappaleen peittämällä pinta-alalla. Vaikka kappaleen sijainti ja pinta-ala saataisiin tunnistettua täydellisesti, ei tilavuutta silti saataisi laskettua tarkasti käytettävissä olevalla kameralla jätesäiliön olosuhteissa. Ylimääräiset heijastukset aiheuttavat etäisyysmittaukseen virheen, minkä takia kappaleen etäisyys arvioidaan vääräksi, ja sitä kautta myös tilavuus lasketaan vääräksi. Laskettu tilavuus ei kuitenkaan ollut mittauksissa erinomainen edes hyvissä olosuhteissa, joten kehitettävää siltä osin jäi edelleen. Algoritmi oli kuitenkin riittävän hyvä osoittamaan tilavuuden laskennan haastavuus jätesäiliön sisällä ToF-kameran etäisyyskuvasta.

Jos ylimääräisistä heijastuksista johtuvat virheet saataisiinkin eliminoitua, pico flexx -kameran käyttämiseksi jätteen tilavuuden mittaamiseen säiliössä olisi silti vielä esteitä. Läpinäkyvät materiaalit ovat infrapunavalolla toimivalle kameralle haastavia, koska ne heijastavat infrapunavaloa todella heikosti. Etäisyyskuvassa läpinäkyvästä materiaalista tehdyt esineet näkyvät kauempana kuin ne todellisuudessa ovat. Esimerkiksi tämän työn kontekstissa se tarkoittaa, että läpinäkyvän pussin sisään laitettuna jätteen laskettu tilavuus voisi olla jopa negatiivinen.

Vaikka todellisuudessa ongelma olisikaan niin dramaattinen, tosi asia on, että materiaalin väri vaikuttaa siihen, miten hyvin se heijastaa infrapunavaloa. Se tekee pelkästään infrapunavalolla toteutetusta mittauksesta aina jollain tasolla epätarkan, jos mittavan kohteen heijastuvuutta ei voida kontrolloida. Jos samasta kohteesta otetaan myös RGB-kuva, on mahdollista eri värien aiheuttama virhe mahdollista korjata (Kerl 2014). Silti eri materiaalien erilaiset heijastavuus ominaisuudet aiheuttaisivat harmia etäisyysmittaukselle. Siksi mittaustarkkuuden kannalta olisi parasta, jos säili-

öön laitettaisiin vain yhden tyyppistä materiaalia, joka on mielellään vain yhden väristä. Sen puoleen kartongin mittaamiseen ToF-kamera voisi sopia, kunhan ylimääräisistä heijastuksista aiheutuvat ongelmat pystytään eliminoimaan.

Edellä mainittujen syiden takia yhdestä kuvakulmasta mitattuna ToF-kamerat eivät sovellu ainakaan sekajätteen tilavuuden mittaamiseen. Homogeenisemmän jätteen, esimerkiksi kartongin tilavuuden mittaamiseen ToF-kamera voisi sopia, kun ylimääräisten heijastuksen aiheuttamat virheet onnistutaan korjaamaan. Useammasta kuvakulmasta kuvattuna pinnanmuodot voitaisiin kuvata tarkemmin, jolloin laskettu tilavuus olisi oletettavasti myös tarkempi. Optimitilanteessa kappale kuvattaisiin joka suunnasta ennen kuin se kulkeutuu jätesäiliöön. Silloin kappaleen tilavuus voitaisiin laskea mahdollisimman tarkasti. Siinäkin tilanteessa materiaalien erilaiset heijastuvuus ominaisuudet aiheuttaisivat todennäköisesti ongelmia, joten se ei olisi ongelmaa kokonaan kattava ratkaisu. Ja luonnollisesti järjestelmästä tulisi myös paljon kalliimpi ja monimutkaisempi kuin vain yhdestä kuvakulmasta kuvaavasta järjestelmästä.

Tämän työn tuloksien perusteella PMDtec:in Camboard pico flexx ei sovellu yhdestä kuvakulmasta kuvaamalla jätesäiliöön laitettun jätteen tilavuuden mittaamiseen. Pico flexx -kamera on selvästi suunniteltu kuvaamaan mahdollisimman nopeaa etäisyysvideokuvaa riittävällä tarkkuudella esimerkiksi roboteissa. Kameran säätömahdollisuudet on ilman salassapitosopimuksen vaativia oikeuksia rajalliset, ja käyttäjältä on rajoitettu pääsy moniin kameran toimintoihin. Esimerkiksi kameran kalibroiminen vaatii lisäoikeudet, joten käyttäjän on tehtävä kompromissi kameran kalibroimisen ja täyden resoluution käyttämisen välillä. Pico flexx -kamerasta puuttuu myös kokonaan RGB kamera, mikä rajoittaa monien tekniikoiden käyttöä. Myös Pico flexxin resoluutio 224x171px on melko pieni. Kovin pieniä asioita ei pico flexxin resoluutiolla voi kuvata, koska noin 2 metrin päässä kamerasta yksi pikseli peittää jo 1cmx1cm kokoisen alueen (Kuva 17). ToF-tekniikan käyttämistä tähän tarkoitukseen en kuitenkaan täysin tuomitsisi, koska siihen kohdistuu jatkuvasti tutkimuksellista mielenkiintoa. Mutta kameroiden resoluution tulisi kasvaa nykyisestä, ylimääräisistä heijastuksista johtuvat virheet ja läpinäkyvien materiaalien aiheuttamat virheet tulisi korjata ennen kuin

ToF-kameraa voisi käyttää tässä tarkoituksessa. Tältä osalta työn tulokset ovat luotettavia, koska ToF-kameran soveltumattomuutta sovelluskohteeseen tukee monet havainnot.

Opinnäytetyötä voidaan käyttää pohjana tulevissa opinnäytetöissä, projekteissa ja tutkimuksissa. ToF-kamerat ovat vielä kehittyvää tekniikkaa ja tässä työssä käytettiin vain yhtä kameraa markkinoilta, joten tällä alueella on vielä paljon tutkittavaa. Parhaat käyttökohteet ToF-kameroille eivät kuitenkaan ole tarkoissa mittauksissa staattisista kohteista, vaan käyttökohteissa, joissa tarvitaan etäisyysvideota, tai tilanteissa, joissa tavallisen kameran kuva ei ole luotettava ja millimetrin tarkkaa mittausta ei kaivata.

Lähteet

Basic Thresholding Operations. n.d. Opas OpenCV dokumentaatiossa. Viitattu 23.4.2020. <https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/threshold/threshold.html>.

Bertalmio, M., Bertozzi, A. L. & Sapiro, G. 2001. Navier-Stokes, Fluid Dynamics, and Image and Video Inpainting. IEEE. https://www.researchgate.net/publication/3940597_Navier-Stokes_fluid_dynamics_and_image_and_video_inpainting.

Camera Calibration. n.d. OpenCV opas. Viitattu 23.4.2020. https://docs.opencv.org/master/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html.

Castro, H. 2015. From images to point clouds. Practical considerations for three-dimensional computer vision. Oulu: University of Oulu. ISBN 978-952-62-0853-4.

Charbon, E. 2014. SPAD based image sensors. 2014 IEEE International Electron.

Dorrington, A. A., Godbaz, J. P., Cree, M. J., Payne, A. D. & Streeter, L. V. 2011. Separating true range measurements from multi-path and scattering interference in commercial range cameras. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. <http://dx.doi.org/10.1117/12.876586>.

Foix, S., Alenyá & G., Torras, C. 2011. Lock-in Time-of-Flight (ToF) cameras: A survey. Sensors Journal, IEEE. https://www.researchgate.net/publication/224211658_Lock-in_Time-of-Flight_ToF_cameras_A_survey.

Gokturk, S. B., Yalcin, H. & Bamji, C. 2004. A Time-Of-Flight Depth Sensor - System Description, Issues and Solutions. IEEE.

Hansard, M., Lee, S., Choi, O. & Horaud, R. 2012. Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications. Springer, pp.95, SpringerBriefs in Computer Science, ISBN 978-1-4471-4658-2.

Huoneistokohtaisten vesimittareiden käyttö ja vaikutukset rakennusten energiankulutukseen -työryhmä. 2009. Työryhmämuistio. Ympäristöministeriö. https://www.motiva.fi/files/5725/Tyoryhmamuistio_Huoneistokohtaisten_vesimittareiden_kaytto_ja_vaikutukset_rakennusten_energiankulutukseen.pdf.

Inpaint() Function Documentation. n.d. OpenCV dokumentaatio. Viitattu 23.4.2020. https://docs.opencv.org/master/d7/d8b/group__photo__inpaint.html#gaedd30dfa0214fec4c88138b51d678085.

Jarabo, A., Masia, B., Marco, J. & Gutierrez, D. 2017. Recent advances in transient imaging: A computer graphics and vision perspective. Zhejiang University. <https://doi.org/10.1016/j.visinf.2017.01.008>.

Kahlmann, T., Remondino, F. & Ingensand, H. 2006. Calibration for increased accuracy of the range imaging camera SwissRanger. Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'. ISPRS.

Kananen, J. 2015. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kerl, C., Souiai, M., Sturm, J. & Cremers, D. 2014. Towards Illumination-invariant 3D Reconstruction using ToF RGB-D Cameras. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7035807>.

Kivelä, S. K. 2008. Perspektiivikuvan geometriset perusteet. Tammertekniikka / AMK-Kustannus.

Lange, R. & Seitz, P. 2000. Solid-State Time-of-Flight Range Camera. IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 37, NO. 3, MARCH 2001. IEEE.

Langmann, B., Hartmann, K. & Loffeld, O. 2012. Depth camera technology comparison and performance evaluation. Siegen: University of Siegen.

Laserluokat STUK. 2019. STUK. Viitattu 11.5.2020. <https://www.stuk.fi/aiheet/laserit/laserluokat>.

Li, L. 2014. Time-of-Flight Camera – An Introduction. Technical White Paper. Texas Instruments.

Marco, J., Hernandez, Q., Muñoz, A., Dong, Y., Jarabo, A., Kim, M. H., Tong, X. & Gutierrez, D. 2017. DeepToF: Off-the-Shelf Real-Time Correction of Multipath Interference in Time-of-Flight Imaging. ACM Transactions on Graphics, Vol. 36, No. 6, Article 219. <https://doi.org/10.1145/3130800.3130884>.

May, S., Droschel, D., Holz, D., Fuchs, S., Malis, E., Nüchter, A. & Hertzberg, J. 2009. Three-Dimensional Mapping with Time-of-Flight Cameras. Wiley Periodicals. <https://doi.org/10.1002/rob.20321>.

MolokDomino tuotetiedot. n.d. Tuotetiedot valmistajan nettisivuilla. Viitattu 23.4.2020. <https://www.molok.com/fi/molok-tuotteet/molokdomino>.

Mure-Dubois, J. & Hügli, H. 2000. Real-time scattering compensation for time-of-flight camera. Neuchâtel: University of Neuchâtel.

Naik, N., Kadambi, A., Rhemann, C., Izadi, S., Raskar, R. & Kang, S. B. 2015. A Light Transport Model for Mitigating Multipath Interference in Time-of-Flight Sensors. IEEE. http://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2015/html/Naik_A_Light_Transport_2015_CVPR_paper.html.

Pasinetti, S., Hassan, M., Eberhardt, J., Lancini, M., Docchio, F. & Sansoni, G. 2019. Performance Analysis of the PMD Camboard Picoflexx Time-of-Flight Camera for Markerless Motion Capture Applications. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. IEEE.

Pears, N., Liu, Y. & Bunting, P. 2012. 3D Imaging, Analysis and Applications. Springer London.

Pixabay. <https://pixabay.com/photos/houston-texas-rail-road-crossing-2731099/> Viitattu 23.4.2020.

PMDtec, 2020. Camboard pico flexx data-sheet. Viitattu 23.4.2020
https://pmdtec.com/picofamily/wp-content/uploads/2018/03/PMD_DevKit_Brief_CB_pico_flexx_CE_V0218-1.pdf.

Russ, J. C., 2007. The Image Processing Handbook, Fifth Edition. Taylor & Francis Group.

Telea, A. 2004. An Image Inpainting Technique Based on the Fast Marching Method. Journal of Graphics Tools, 9(1), 23-34.
<https://doi.org/10.1080/10867651.2004.10487596>.

Van Walree, P. 2009. Distortion. <https://web.archive.org/web/20090129134205/http://toothwalker.org/optics/distortion.html> Ar- kistoitu 2.2.2009. Viitattu 23.4.2020.

Wasenmüller, O. & Stricker, D. 2016. Comparison of Kinect V1 and V2 Depth Images in Terms of Accuracy and Precision. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54427-4_3.

What is photon shot noise?. n.d. Artikkel. Hamamatsu. https://camera.hamamatsu.com/jp/en/technical_guides/photon_shot_noise/index.html Viitattu 23.4.2020.

Xuming, L. 2001. Experimental Investigation of Photonic Mixer Device and Development of TOF 3D Ranging Systems Based on PMD Technology. Siegen: University of Siegen.

Yhdyskuntajätettä kertyi vuonna 2018 aiempia vuosia enemmän. 2020. Suomen virallinen tilasto (SVT): Jätetilasto. Helsinki: Tilastokeskus Viitattu: 27.2.2020
http://www.stat.fi/til/jate/2018/jate_2018_2020-01-15_tie_001_fi.html.

Liitteet

Liite 1. Kuva karahvista ja tölkki skaalana

