



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Strukturoituun valoon perustuva 3D-pinnan mittaus monikamerajärjestelmällä

Aalto-yliopiston insinöörیتieteiden korkeakoulun
maankäyttötieteiden laitoksella tehty diplomityö

Helsinki, marraskuu 2014

Tekniikan kandidaatti Tommi Kaksonen

Valvoja: Professori Henrik Haggrén
Ohjaaja: TkL Petteri Pöntinen

Tekijä Tommi Kaksonen

Työn nimi Strukturoituun valoon perustuva 3D-pinnan mittausta monikamerajärjestelmällä

Koulutusohjelma Geomatiikka

Pää-/sivuaine Fotogrammetria ja kaukokartoitus**Professuurikoodi** Maa-57

Työn valvoja Professori Henrik Haggrén

Työn ohjaaja(t) TkL Petteri Pöntinen

Päivämäärä 3.11.2014**Sivumäärä** 48+17**Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tutkia, millä strukturoituun valoon perustuvilla menetelmillä saavutetaan vankimmat mittaustulokset 3D-pinnan mittauksessa monikamerajärjestelmällä. Työn teoriaosuudessa vertailtiin pinnan mittauksessa käytettyjä strukturoidun valon menetelmiä. Työn kokeellisessa osuudessa rakennettiin mittaustulokset, jossa oli yhteensä 16 kameraa ja yksi projektori. Mittakappaleina käytettiin tasoa ja auton ovea. Mittauksilla pyrittiin selvittämään, minkälainen tarkkuus, luotettavuus ja toistettavuus saavutetaan valituilla strukturoidun valon menetelmillä. Heijastettavina piirteinä käytettiin viivoja ja ympyröitä. Vastinpisteiden etsinnässä kuvien välillä hyödynnettiin Gray-koodausta ja lisäksi kokeiltiin epipolaarisuoriin perustuvaa menetelmää. Tutkimus toteutettiin toimeksiantona Mapvision Oy Ltd:lle ja kokeellisen osuuden sovelluskohteena oli autoteollisuuden laadunvarmistus.

Työn teoriaosuuden perusteella eri menetelmien vankkuus riippuu olennaisesti sovelluskohteen asettamista rajaehdoista. Paikallaan pysyvien kohteiden mittauksessa vankimmat menetelmät perustuvat useamman eri kuvion heijastamiseen kohteeseen. Liikkuvilla kohteilla saadaan vankimmat mittaustulokset yhden kuvanoton menetelmillä. Tämän työn tutkimustulosten perusteella yksi vankimmista usean kuvanoton menetelmistä monikamerajärjestelmällä perustuu pysty- ja vaakasuuntaisten viivojen käyttöön strukturoituna valona. Tällä menetelmällä saavutettiin 0.02 mm tarkkuus tason mittauksessa ja parhaimmillaan 0.02 – 0.05 mm toistotarkkuus auton oven mittauksessa. Käytännössä toistotarkkuus oli kuitenkin 0.02 – 0.2 mm laajoilla ja tasaisilla pinnoilla. Luotettavuus oli heikoin jyrkkien pinnanvaihteluiden lähellä. Vastinpisteiden etsintä epipolaarisuorien avulla osoittautui erittäin käyttökelpoiseksi vaihtoehdoksi Gray-koodaukselle.

Avainsanat Strukturoitu valo, pinnan mittausta, monikamerajärjestelmä, fotogrammetria

Author	Tommi Kaksonen	
Title of thesis	Structured light-based 3D surface measurement using a multi-camera system	
Degree programme	Degree Programme in Geomatics	
Major/minor	Photogrammetry and Remote Sensing	Code of professorship Maa-57
Thesis supervisor	Professor Henrik Haggrén	
Thesis advisor(s)	Lic. Sc. (Tech.) Petteri Pöntinen	
Date	Number of pages	Language
3.11.2014	48+17	Finnish

Abstract

The purpose of this master's thesis was to identify a structured light-based 3D surface measurement method that could provide the most robust measurement results using a multi-camera system. The thesis compares structured light methods used for surface measurement. To determine the accuracy, reliability and repeatability of these methods, a flat surface and a car door were measured using a measurement system consisting of 16 cameras and a projector. Lines and circles were used as projected features. Gray coding was used to detect corresponding points between images, and an epipolar line-based method was also tested. The study, commissioned by Mapvision Oy Ltd, will be used for ensuring quality control in the automotive industry.

The literature show that the robustness of the different methods essentially depends on the limitations of the specific application. The most robust methods for measuring static objects are based on projecting multiple different patterns on the scene. For moving objects, the most robust measurement results are achieved with one-shot methods. The study results found that one of the most robust multiple-shot methods in the multi-camera system is based on using vertical and horizontal lines as a structured light, which yielded an accuracy of 0.02 mm when measuring a flat object, with the best repeatability occurring at 0.02 – 0.05 mm when measuring a car door. In contrast, the repeatability for large flat surfaces was 0.02 – 0.2 mm, with the worst reliability being observed near steep surfaces. This study demonstrates that epipolar lines offer an effective alternative to Gray coding for detecting corresponding points.

Keywords Structured light, surface measurement, multi-camera system, photogrammetry

Alkusanat

Diplomityöni on valmis. Tähän työhön on käytetty vuoden aikana paljon aikaa ja ajatusta. Yksi tärkeimmistä työn aikana oppimistani asioista oli se, että usein asiat eivät tule kerralla valmiiksi. Riittävän hyväksi tullakseen työ vaatii aikaa, taukoja ja ennen kaikkea muiden ihmisten apua. Tämä työ antoi mahdollisuuden hyödyntää opintojen aikana kertynyttä osaamista ja tehdä jotain ainutlaatuista, josta on hyötyä tulevaisuudessa. Kiitän Henrik Haggrénia työn valvomisesta ja Petteri Pöntistä ohjauksesta. Kiitos Valtteri Tuomiselle erittäin mielenkiintoisen aiheen ideoimisesta ja Teemu Mehtiölle kaikesta avusta työn aikana. Kiitos myös kaikille muille Mapvision Oy Ltd:n työntekijöille, jotka autoitte työn edistymisessä. Työelämän ulkopuolelta haluan kiittää myös perhettäni tuesta opintojen ja elämän varrella. Suurin kiitos kuuluu puolisololleni Sannalle.

Helsinki, 3.11.2014

Tommi Kaksonen

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Pinnan mittaus strukturoidulla valolla	3
2.1	Strukturoitu valo	3
2.2	Monikamerajärjestelmä	5
2.3	Kuvajaksokoodaus	6
2.4	Paikallinen koodaus	8
2.5	Vaiheen laskenta	10
3	Mittausten toteutus	13
3.1	Sovelluskohde	13
3.2	Mittausjärjestelmä	14
3.3	Piirteiden irroitus kuvilta	16
3.4	Vastinpisteiden etsintä	19
3.5	3D-pisteiden laskenta	20
3.6	Tason mittaus	21
3.7	Auton oven mittaus	23
4	Tulokset	26
4.1	Tarkkuus	26
4.2	Luotettavuus	32
4.3	Toistettavuus	34
4.4	Mittausaika	36
5	Yhteenveto	38
	Lähteet	44
	Liitteet	
	Liite 1 – Tason mittaustulokset	
	Liite 2 – Oven mittaustulokset	

1 Johdanto

Pinnan kolmiulotteiseen mittaukseen on kehitetty useita erilaisia menetelmiä, jotka eivät perustu kappaleen koskettamiseen (Sansoni ym. 2009, 569–570). Strukturoidun valon käyttö on osoittautunut yhdeksi luotettavimmista menetelmistä kappaleen pinnan mittauksessa (Salvi ym. 2010, 2666). Strukturoituun valoon perustuvissa järjestelmissä kohteeseen heijastetaan kuvio projektorilla tai muulla valonlähteellä (Geng 2011, 131). Fotogrammetrinen pinnan mittaus perustuu vastinpisteiden tunnistukseen ja etsintään vähintään kahdelta kovalta, minkä avulla voidaan laskea kohteen 3D-koordinaatit. Strukturoidulla valolla luodaan kohteen pinnalle kuvio, josta vastinpisteet ovat tunnistettavissa. (Luhmann 2010, 565.) Heijastetulla kuviolla on olennainen vaikutus mittausten suorituskykyyn, kuten mittaustarkkuuteen, toistettavuuteen ja mittausaikaan (Xu ym. 2011, 1).

Strukturoidun valon käyttöä on tutkittu lähinnä yhden tai kahden kameran järjestelmissä (Salvi ym. 2010, 2668). Tällä tutkimuksella pyritään tuomaan uusia näkökulmia strukturoidun valon käyttöön monikamerajärjestelmissä. Useampien kameroiden lisäämistä järjestelmään ja kohteen havainnointia useasta eri kamera-asemasta on käytetty aiemmin esimerkiksi muodostetun pintamallin resoluution parantamiseen (Aliaga & Xu 2010; Weinmann ym. 2011).

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia, mitkä ovat vankimpia strukturoituun valoon perustuvia menetelmiä kappaleen 3D-pinnan mittaamiseen monikamerajärjestelmällä. Vankkuudella tarkoitetaan tässä työssä mittaustulosten tarkkuutta, luotettavuutta ja toistettavuutta. Työssä esitellään ensin pinnan mittaukseen käytettyjä strukturoidun valon menetelmiä. Tämän jälkeen työssä selvitetään kokeellisin mittauksin, minkälainen tarkkuus, luotettavuus ja toistettavuus saavutetaan valituilla strukturoituun valoon perustuvilla menetelmillä. Kokeellisen osuuden sovelluskohteeksi on valittu autoteollisuuden laadunvarmistus, mikä otetaan huomioon kokeiltavien menetelmien valinnassa.

Autoteollisuuden laadunvarmistuksessa on tarvetta 100%-tarkastukselle, jossa kaikki tuotetut osat mitataan ja tarkastetaan. Tuottamalla parempaa laatua voidaan pienentää virheellisistä tuotteista aiheutuvia kustannuksia. Vaatimus jokaisen osan mittauksesta edellyttää kuitenkin mittausmenetelmää, joka on riittävän tarkka ja nopea tarkastamaan kaikki tuotetut osat. (Tuominen 2012.) Tässä tutkimuksessa keskitytään mittausten tarkkuuteen, luotettavuuteen ja toistettavuuteen, mutta arvioidaan myös menetelmien nopeutta ja soveltuvuutta mittaukseen tuotantolinjalla.

Strukturoidun valon lisäksi muita pinnanmittausmenetelmiä ovat esimerkiksi laserkeilaus ja interferometria. Laserkeilaus perustuu laserpulssin kulkuajan tai vaihe-eron mittaamiseen. Laserkeilaimet vaativat erittäin tarkkaa laserpulssin kulkuajan mittausta, joten ne soveltuvat parhaiten pidemmän matkan etäisyysmittauksiin. Interferometriaa hyödyntävissä järjestelmissä kohteeseen heijastetaan kaksi valokuviota, jotka yhdistyvät interferenssikuviksi. Kohteen pinnan muoto voidaan selvittää interferenssikuvion perusteella. Interferometria on käyttökelpoinen menetelmä suhteellisen laajojen ja tasaisten pintojen mittauksissa. (Bi & Wang 2010, 405–406.) Menetelmällä voidaan saavuttaa jopa nanometriluokan tarkkuus (Blais 2004, 235–236).

Tutkimuksen aineiston hankintaa varten rakennetaan mittausjärjestelmä, jonka avulla voidaan tehdä mittauksia strukturoituun valoon perustuvilla menetelmillä. Mittausjärjestelmässä käytetään kuvioiden heijastukseen valoprojektorია. Rakennettava järjestelmä sisältää yhteensä 16 kameraa. Kameroiden resoluution vaikutuksen selvittämistä varten

järjestelmä on jaettu kahteen geometrialtaan samanlaiseen järjestelmään, joissa molemmissa on kahdeksan kameraa.

Mittaustulosten laskentaa varten tutkimuksessa toteutetaan valitut menetelmät. Mitattavina kappaleina käytetään tasoa ja auton ovea. Eri menetelmien avulla saatuja mittaustuloksia vertaillaan numeerisesti tilastollisilla tunnusluvuilla, kuten keskihajonnalla. Lisäksi tuloksia analysoidaan visuaalisesti esimerkiksi 3D-mallilla, joka on muodostettu mitatuista pinnan pisteistä.

Tutkimus on tehty toimeksiantona Mapvision Oy Ltd:lle. Yritys tarjoaa mittausjärjestelmiä autoteollisuuden laadunvarmistukseen tuotantolinjoille. Mittausjärjestelmät perustuvat monikamerajärjestelmään, ja ne on tarkoitettu tuotannon 100%-tarkastukseen. Tämän tutkimuksen mittausjärjestelmän rakentamisessa on käytetty Mapvision Oy Ltd:n kameroita, ohjelmistoja ja muita mittausjärjestelmän osia.

Tämä työ sisältää teoreettisen ja kokeellisen osuuden. Luvussa 2 esitellään strukturoituun valoon perustuvia menetelmiä ja teoriaa niiden käytöstä pinnan mittauksessa. Tarkoituksena on esitellä yleisimmin käytettyjä strukturoidun valon menetelmiä. Luvussa 3 käsitellään mittausjärjestelyt ja kokeellisen osuuden menetelmien toteutus teoriassa. Mittaustulokset esitellään luvussa 4. Lopuksi luvussa 5 pohditaan saatuja tutkimustuloksia ja jatkokehitysmahdollisuuksia.

2 Pinnan mittaus strukturoidulla valolla

Kappaleen pintaa voidaan mitata kameroilla fotogrammetristen menetelmien avulla. Strukturoidun valon avulla mittaaminen on yksi näistä menetelmistä. Tässä luvussa esitellään strukturoituun valoon perustuvia menetelmiä ja niiden käyttöä pinnan mittauksessa.

2.1 Strukturoitu valo

Strukturoidun valon käytöllä tarkoitetaan kohteen valaisua ennalta määrätyllä kuviolla. Kuvion voidaan ajatella olevan kaksikulotteinen kuva, jonka jokainen pikseli kuvaa heijastetun valon voimakkuutta. (Geng 2011, 131.) Kuviot voivat koostua esimerkiksi viivoista (Koninckx & Van Gool 2006), ympyröistä (Ben-Hamadou ym. 2013) tai ruudukosta (Sagawa ym. 2014). Kuviot voivat olla myös värillisiä (Chen ym. 2008; Fernandez & Salvi 2013). Kuvassa 1 on esimerkki kohteen valaisusta strukturoidun valolla, jossa kuvio koostuu pystysuuntaisista mustista ja valkoisista raidoista.



Kuva 1. Kartion muotoinen kohde valaistuna strukturoidulla valolla.

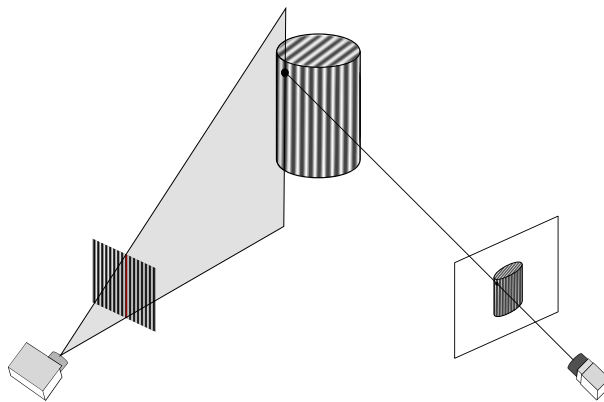
Käytetyille strukturoidun valon menetelmille ja kuvioille on kirjallisuudessa esitetty erilaisia luokituksia. Geng (2011) luokittelee pinnan muodostamiseen käytetyt tekniikat karkeasti kuvaotosten määrän perusteella yhden ja usean kuvaotoksen menetelmiin. Salvi ym. (2010) luokittelevat kuviot jatkuviin ja epäjatkuviin niiden profiilin perusteella. Jatkovien kuvioiden profiili on pehmeä, kuten esimerkiksi sinimuotoinen. Epäjatkovien kuvioiden profiili muodostuu diskreeteistä arvoista. Kuvio voi olla esimerkiksi binäärinen, jolloin se sisältää vain kahta eri valoisuusarvoa.

Heijastetun kuvion valintaan vaikuttaa olennaisesti sovelluskohteen vaatimukset. Ohuita raitoja sisältäviä kuvioita käytetään yleisesti kohteen 3D-mallinnukseen, jossa määritetään esimerkiksi kohteen pinnan muoto. Jos sovelluskohde vaatii pinnan tekstuurin ja muodon tallentamista samalla kuvanotolla, voidaan käyttää esimerkiksi harvaa ympyräkuvioita. (Ben-Hamadou ym. 2013, 1468.) Usean kuvaotoksen menetelmillä voidaan saavuttaa tarkkoja mittauksia paikallaan pysyvillä kohteilla, mutta kohteen liike kuvanottojen välillä voi aiheuttaa epätarkkuutta muodon mittauksessa. Yhden kuvaotoksen menetelmillä vältetään esimerkiksi kappaleen värinästä johtuvat epätarkkuudet. (Zhang 2012, 1097.)

Strukturoidulla valolla mittaamiseen tarvitaan vähintään yksi kamera ja yksi projektori. Yhden kameraselmissä projektori toimii käänteisenä kamerana, joka on kalibroitava

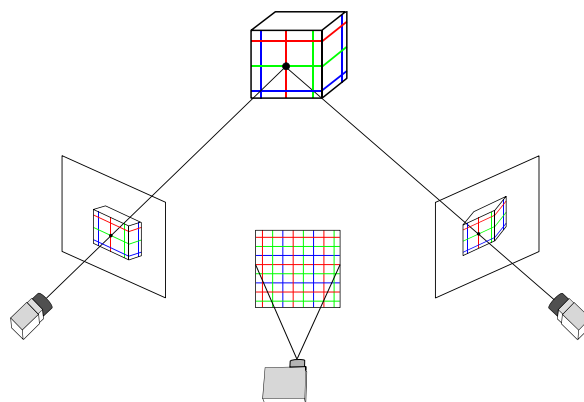
3D-koordinaattien laskemista varten. (Luhmann 2010, 564.) Projektorilla heijastettu kuvio osuu kohteeseen, ja kohteesta otetulla kuvalla näkyy pinnan muotojen mukaan muuttunut kuvio. Kohdekoordinaatit voidaan laskea kolmioinnilla, kun tunnetaan projektorin ja kameran välinen geometria. (Geng 2011, 131.)

Kohdekoordinaattien laskentamenetelmään vaikuttaa käytettävä kuvio ja kameroiden määrä. Yhden kameran ja projektorin järjestelmässä voidaan esimerkiksi kohteeseen heijastaa pystysuuntaisia raitoja sisältävä kuvio. Kohdekoordinaatit saadaan laskettua tason ja suoran leikkauspisteinä, kun kameran kuvalla näkyvää pistettä vastaava projektorin kuvion viiva on selvitetty. (Koninckx & Van Gool 2006, 433–434.) Kuvassa 2 on esimerkki yhden kameran ja yhden projektorin järjestelmässä, jossa kohdekoordinaatit lasketaan tason ja suoran leikkauspisteinä.



Kuva 2. Yhden kameran ja projektorin mittausjärjestelmä (mukaillen Zhang 2010, 150).

Kahden kameran järjestelmässä kohdekoordinaatit on mahdollista laskea eteenpäinleikkauksella. Tällöin projektoria ei tarvitse kalibroida, vaan sitä käytetään ainoastaan kuvion heijastukseen. (Luhmann 2010, 564–565.) Kuvassa 3 on esitetty kahden kameran ja yhden projektorin mittausjärjestelmä, jossa käytetään kuviona värillisiä ruudukkoita.



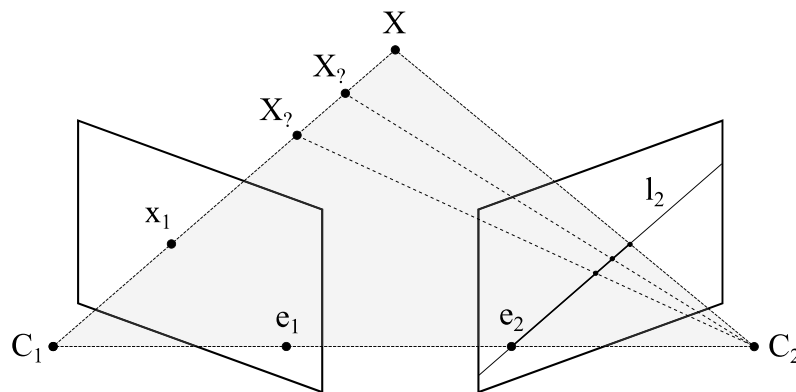
Kuva 3. Kahden kameran ja projektorin mittausjärjestelmä.

2.2 Monikamerajärjestelmä

Monikamerajärjestelmässä kameroita on kolme tai enemmän. Kuvahavainnoissa on ylimääritystä, kun mitattavat pisteet näkyvät useammalla kuin kahdella kuvalla. Tämän ansioista kohteen koordinaattien mittaaminen on luotettavampaa ja tarkempaa. Asettamalla kamerat eri puolille kohdetta osoittamaan kohteeseen siten, että niiden välinen kulma on suuri, voidaan saavuttaa yhtä hyvä tarkkuus jokaisella koordinaattiakselilla X , Y ja Z . (Luhmann 2010, 563.) Tällöin on myös mahdollista mitata kohdetta eri puolilta liikuttamatta kameroita tai kohdetta.

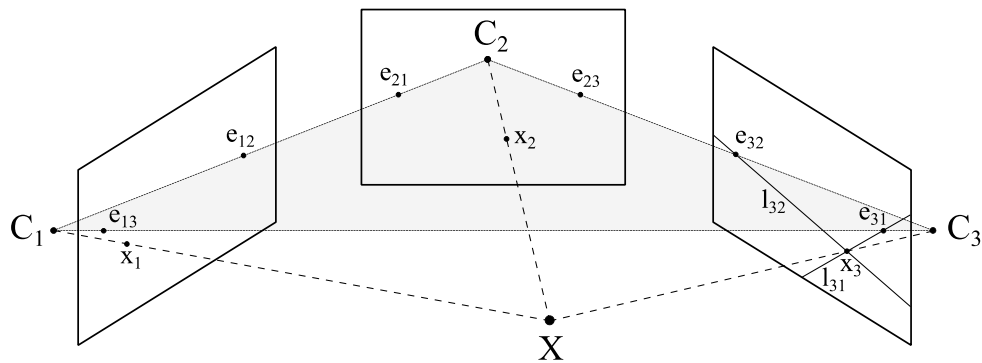
Strukturoituun valoon perustuvaan monikameramittausjärjestelmään voidaan asettaa myös useita projektoreita, jolloin yhtä projektoria ei tarvitse liikuttaa mittausten välillä koko kohteen mallintamiseksi (Aliaga & Xu 2010, 749). Projektoreita ei tarvitse välttämättä kalibroida, jos kameroilla saadaan riittävästi vastinhavaintoja (Weinmann ym. 2011, 398). Tällöin projektoreita käytetään pelkästään havaittavien pisteiden luonnissa kohteen pinnalle (Luhmann 2010, 564).

Monikamerajärjestelmässä voidaan hyödyntää myös kahden tai kolmen kuvan geometriaa. Kuvassa 4 on havainnollistettu kahden kuvan geometriaa, jota kutsutaan myös epipolaarigeometriaksi. Kameroiden projektiokeskusten välisen suoran ja kuvatason leikkauspisteitä kutsutaan epipolaaripisteiksi. Kohdepiste ja kameroiden projektiokeskukset virittävät epipolaaritason. Epipolaarisuora on epipolaaritason leikkaus kuvatason kanssa. Epipolaarisuoria voidaan käyttää vastinpisteiden etsinnässä kuvilta (Koninckx & Van Gool 2006, 435–436; Maurice ym. 2013, 174).



Kuva 4. Epipolaarigeometria kahden kuvan välillä. Kameroiden projektiokeskukset C_1 ja C_2 sekä kohdepiste X muodostavat epipolaaritason. Vasemman kuvan pisteen x_1 vastinpiste sijaitsee oikean kuvan epipolaarisuoralla l_2 , joka kulkee epipolaaripisteen e_2 kautta. (mukaiillen Hartley & Zisserman 2004, 240.)

Vastinpisteiden etsinnässä voidaan hyödyntää myös kolmea kuvaa. Jos kahdelta kuvalta tunnetaan vastinpari, on yleensä mahdollista laskea näiden pisteiden vastinpiste kolmannella kuvalla. Tätä kutsutaan pisteen siirroksi, ja se voidaan laskea epipolaarisuorien leikkauksien tai trifokaalitentorin avulla. Trifokaalitentori sisältää kolmen kuvan välisen geometrian. Kameroiden projektiokeskusten virittämää tasoa kutsutaan trifokaalitasoksi. (Hartley & Zisserman 2004, 365, 379–381.) Kuvassa 5 on esitetty kolmen kuvan projektiokeskusten muodostama trifokaalitaso ja epipolaaripisteet. Ensimmäisen ja toisen kuvan vastinpisteiden muodostamat epipolaarisuorat on piirretty kolmanteen kuvaan.



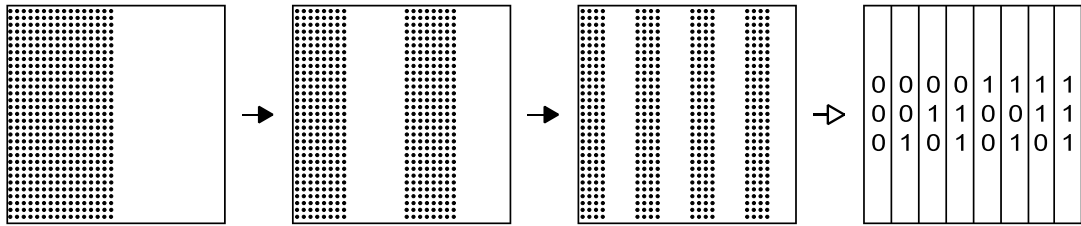
Kuva 5. Kolmen kuvan geometria. Kameroiden projektiokeskukset C_1 , C_2 ja C_3 virittävät trifokaalitason. Kolmannen kuvan epipolaaripisteiden e_{32} ja e_{31} kautta kulkevat suorat leikkaavat pisteessä x_3 , joka on pisteiden x_1 ja x_2 vastin piste. (mukaillen Hartley & Zisserman 2004, 371, 380–381.)

Monikamerajärjestelmä voidaan kalibroida sädekimpputasoituksella. Kalibroinnissa määritetään kameroiden paikat ja kierrot sekä kameroiden kalibrointiparametrit. Sädekimpputasoituksen avulla saadaan myös tilastollisia tunnuslukuja mittausten sisäisestä tarkkuudesta. Tunnuslukujen perusteella voidaan poistaa virheelliset havainnot ja arvioida kalibroinnin onnistumista. (Luhmann 2011, 6.) Kalibroinnissa käytetään usein koordinaateiltaan tunnettuja tähyksiä, jotka kattavat kuvattavan alueen (Pedersini ym. 1999, 55). Kalibroidulla monikamerajärjestelmällä voidaan laskea kohdekoordinaatit eteenpäinleikkauksella, kun tunnetaan kuvien väliset vastin pisteet (Luhmann ym. 2006, 283).

2.3 Kuvajaksokoodaus

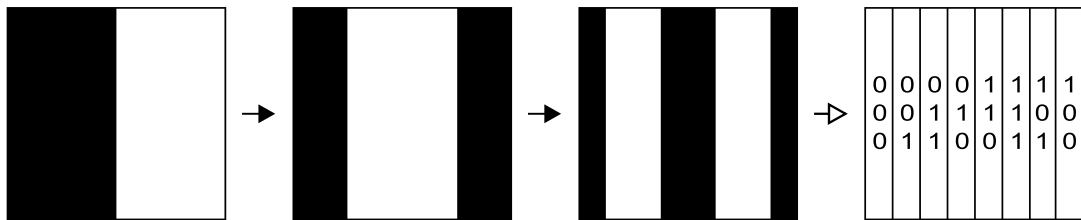
Kuvajaksokoodaukseen perustuvissa menetelmissä käytetään useita peräkkäisiä kuvioita kuvan eri alueiden koodaukseen. Näiden koodiarvojen perusteella voidaan tunnistaa vastinalueet eri kuvilta. Tyypillisesti kuvajaksokoodaus etenee karkeasta jaosta tiheämpään, jolloin ensimmäinen kuvio jakaa kuvan esimerkiksi kahteen osaan, toinen neljään osaan ja niin edelleen. Kuvan alueiden koodaus on valmis vasta, kun kaikki koodijakson kuviot on heijastettu. (Salvi ym. 2010, 2670.)

Posdamer ja Altschuler (1982) esittivät idean strukturoidun valon binäärikoodauksesta. Heidän kehittämässä menetelmässä kohteeseen heijastetaan ensin $N \times N$ -kokoinen ruudukko valopisteitä. Yhdellä kameralla otetaan kuva kohteesta ja kovalta etsitään valopisteet. Jokaiselle mittapisteelle saadaan kuvakoordinaatit valopisteiden paikoista kuvilla ja mittauskelvottomat pisteet voidaan tunnistaa. Tämän jälkeen kohteeseen heijastetaan sarja binäärikuvioita, joissa on jokaisessa puolet alkuperäisistä valopisteistä. Sarjan ensimmäisessä binäärikuviossa alkuperäinen ruudukko on jaettu kahteen osaan. Toisen puolen valopisteet ovat kirkkaina ja toisen tummina. Toisessa binäärikuviossa alkuperäinen ruudukko on jaettu neljään osaan, missä ensimmäinen ja kolmas neljännes on valaistu. Kuvion tihentämistä jatketaan kunnes joka toinen valopiste on valaistu. Jokaisella valaistuksella otetaan kohteesta yksi kuva. Menetelmällä saadaan mittapisteille vaakasuunnassa yksikäsitteinen binäärikoodijakso, kun mittapisteen valaisuus tunnistetaan kuvasarjan jokaiselta kovalta. Mittapiste saa arvon yksi jos se on valaistu, muuten arvo on nolla. Kuvassa 6 on esitetty binäärikoodausmenetelmän koodausperiaate kolmella binäärikuviolla, joilla saadaan kahdeksan yksikäsitteistä aluetta.



Kuva 6. Binäärikoodaus kolmella kuviolla Posdamerin ja Altschulerin (1982) kehittämän menetelmän mukaisesti.

Inokuchi ym. (1984) paransivat edellä esitetyn menetelmän luotettavuutta käyttämällä binäärikoodauksessa Gray-koodausta, jossa vierekkäiset binäärikoodijaksot poikkeavat toisistaan enintään yhden bitin verran. Menetelmä ei tällöin ole yhtä herkkä suurille koodausvirheille kuvion reunakohdissa, eli kun kuvion binääriarvo muuttuu. Gray-koodauksesta kolmella kuviolla on annettu esimerkki kuvassa 7.



Kuva 7. Gray-koodaus kolmella kuviolla Inokuchin ym. (1984) kehittämän menetelmän mukaisesti.

Kohdekoordinaattien laskentaan riittää joko vaaka- tai pystysuuntaisten binäärikuvioiden heijastaminen kohteeseen. Yhden kameran ja yhden projektorin järjestelmässä kolmiointi perustuu tason ja suoran leikkauspisteiden laskentaan. Taso on tässä tapauksessa kuvion yksi valoraita ja suora on säde, joka kulkee kameran kuvapistestä kohdepisteeseen. Ensin jokaisen valoraidan reunapisteen tunnustetaan kuvalta. Tämän jälkeen tason ja suoran leikkauspisteet voidaan laskea jokaiselle reunapisteelle, kun valoraitojen vastaavuudet kuvan ja kuvion välillä on yksilöity binäärikoodauksella. (Horn & Kiryati 1999, 87; Koninckx & Van Gool 2006, 434.)

Kahden tai useamman kameran järjestelmässä voidaan hyödyntää epipolaarisuoria vastinpisteiden etsinnässä. Young ym. (2007) esittivät epipolaarigeometriaa hyödyntävän menetelmän, jossa jokainen lisätty kamera vähentää tarvittavien binäärikuvioiden määrää yhdellä. Heidän kehittämässä mittausjärjestelmässä kameraa liikutellaan vaakasuunnassa, jotta saadaan kuvattua kohdetta useammasta kuvakulmasta. Tarkoin valituilla kameroiden asemilla on mahdollista koodata valoraidat yksikäsitteisesti. Yksikäsitteiset koodit muodostetaan tarkastelemalla vain määrättyä osaa epipolaarisuorasta jokaisella kamera-asemalla.

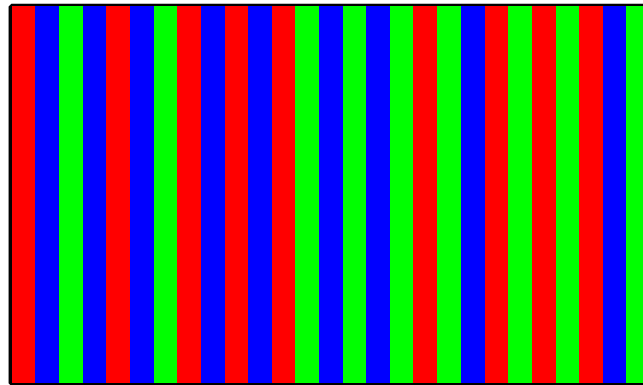
Caspi ym. (1998) käyttivät pinnan mittauksessa Gray-koodattuja värikuvioita. Heidän menetelmässään kuviot mukautuvat automaattisesti kohteen valoisuuden ja värin mukaan. Menetelmällä saavutetaan Gray-koodattujen kuvioiden luotettavuus ja tarkkuus pienemmällä määrällä kuvioita. Heijastettavia kuvioita voidaan myös optimoida suunnittelemalla ne kohinan ja muiden virhelähteiden perusteella (Horn & Kiryati 1999, 91).

Binäärikuvioita voidaan käyttää myös pelkästään vastinpisteiden etsintään. Gühring (2001) kehitti viivansiirtomenetelmän parantaakseen aiempien menetelmien tarkkuutta ja nopeutta. Menetelmässä kohteeseen heijastetaan ensin sarja kuvioita Gray-koodauksella. Tämän jälkeen heijastetaan sarja viivoja, joita siirretään eteenpäin jokaisen kuvanoton jälkeen. Gray-koodauksen avulla viivat saadaan yksilöityä kuvilta. Menetelmällä saadaan hyödynnettyä koko projektorin resoluutio, kun kohteeseen heijastetaan sekä pysty- että vaakasuuntaisia viivoja.

2.4 Paikallinen koodaus

Paikalliseen koodaukseen perustuvissa menetelmissä kuvion eri kohdat erotetaan toisistaan ympäröivien pisteiden, valoisuuden tai värien perusteella (Salvi ym. 2010, 2667). Menetelmillä saadaan kohteen pinta mitattua yhdellä kuvaotoksella (Geng 2011, 132). Paikallinen koodaus on erityisen hyödyllinen liikkuvien kohteiden mallinnuksessa. Myös kuvion yhdistäminen useamman kuvaotoksen menetelmiin on mahdollista. (Zhang ym. 2014, 97.)

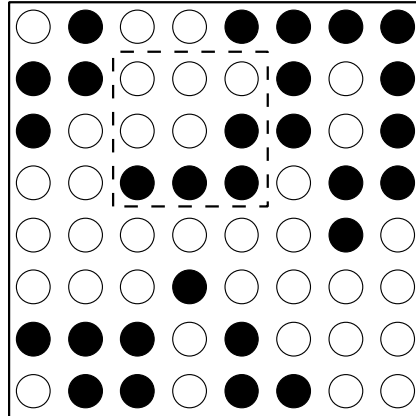
Boyer ja Kak (1987) käyttivät menetelmässään kuviota, jossa on värillisiä pystysuuntaisia raitoja. He muodostivat kuvion siten, että jokainen väriraita on tunnistettavissa yksikäsitteisesti tarkastelemalla määrätyn kokoista jaksoa kuviosta. Kuvion muodostuksessa käytettävät värit, raitojen määrä ja osajakson koko valitaan sovelluskohteen mukaan. Jokaisen väriraidan väliin voidaan laittaa tummia raitoja erottamaan värejä toisistaan. Menetelmässä käytettyä kuviota on kutsuttu myöhemmin myös De Bruijn-kuvioksi, jossa määrätyn kokoinen jakso väriraitoja on aina yksikäsitteinen. Kuviota voidaan optimoida väriraitojen kirkkauden vaihtelulla tarkkuuden ja erotuskyvyn parantamiseksi sekä käytettävien värien määrän vähentämiseksi. (Pagès ym. 2005.) Kuvassa 8 on annettu esimerkki kolmen värin De-Bruijn-kuviosta, jonka jokainen neljän raidan jakso on yksikäsitteinen.



Kuva 8. DeBruijn-kuvio kolmella värillä, missä jakson pituus on 27 raitaa ja yksikäsitteisen jakson pituus on neljä (mukaillen Boyer & Kak 1987, 27).

Yksiulotteisen kuviojakson tarkastelun lisäksi on kehitetty menetelmiä, joissa vastinkuviota etsitään kaksiulotteisesti. Morita ym. (1988) hyödynsivät heijastettavana kuviona binääristä M-tilukkoa, joka on kaksiulotteinen $M \times N$ -kokoinen matriisi. M-tilukossa jokainen $P \times Q$ -kokoinen osamatriisi on yksikäsitteinen lukuun ottamatta osamatriisia, jonka kaikki alkiot ovat nollija. Heidän menetelmässään tilukon alkiot olivat valaistuja tai valaisemattomia ympyröitä. M-tilukko voidaan muodostaa binääristen alkioiden lisäksi värikoodauksella (Chen ym. 2008) tai erityyppisillä piirrekuvioilla (Griffin ym. 1992). Kuvassa 9 on annettu

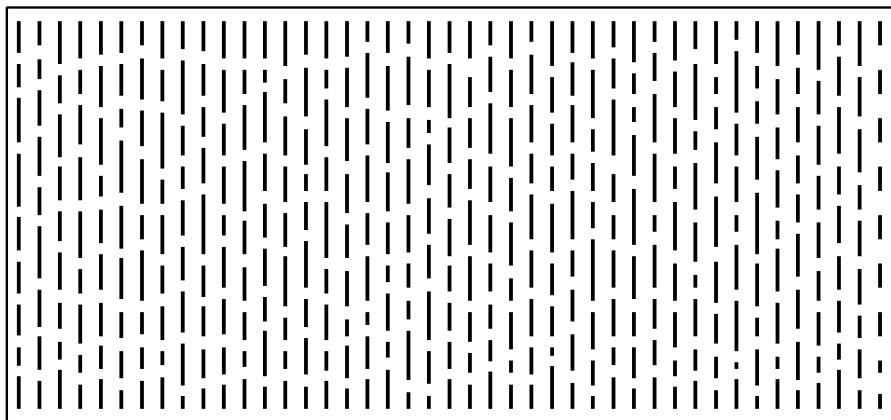
esimerkki M-taulukosta, jonka koko on 8 x 8. Tässä taulukossa jokainen 3 x 3-osakuvio on yksikäsitteinen. Alkioina on käytetty valaistuja ja valaisemattomia ympyröitä.



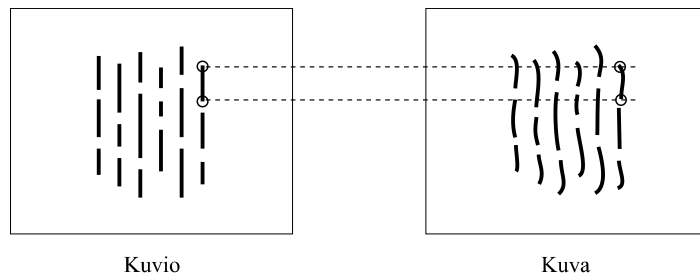
Kuva 9. M-taulukko, jossa alkioit ovat valaistuja ja valaisemattomia ympyröitä (mukaillen Morita ym. 1988, 469). Katkoviivalla on merkitty 3 x 3-kokoinen etsintäikkuna, jonka alkioit muodostavat yksikäsitteisen osakuvion.

M-taulukon rakenne vaikuttaa menetelmän vankkuuteen. Kohteen mukaan muuttuvalla kuviolla voidaan parantaa vastinkohtien etsintää ja pintamallin muodostusta. Kuvion muodostamisessa otetaan huomioon esimerkiksi kohteen muoto tai värit. Yksi menetelmä kuvion muodostamiseen reaaliaikaisesti on laskea kuvio yritykseen ja erehdykseen perustuvalla algoritmilla. (Maurice ym. 2013.)

Maruyama ja Abe (1993) kehittivät menetelmän, jossa heijastettavana kuviona käytetään pystysuuntaisia satunnaisesti katkaistuja viivoja. Näiden lyhyiden viivojen päätepisteitä voidaan verrata kuvalla näkyviin viivojen päätepisteisiin epipolaarisuorien suuntaisesti. Lisäksi vastinviivojen löytämisessä käytetään hyväksi tietoa viivojen naapuruussuhteista. Menetelmä soveltuu parhaiten tasaisten pintojen mittaukseen, ja yhden kuvaotoksen menetelmänä sillä voidaan mitata myös liikkuvia kohteita. Epätasaiset pinnat, kohina ja pintakuviointi kuitenkin heikentävät vastinviivojen etsinnän luotettavuutta. Kuvassa 10 on esitetty satunnaisesti katkaistuista viivoista muodostuva kuvio, ja kuvassa 11 on havainnollistettu vastinviivojen etsintä epipolaarisuorien avulla.

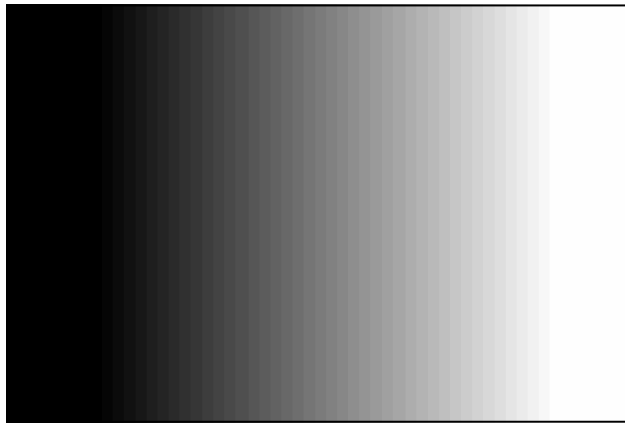


Kuva 10. Satunnaisesti katkaistuista viivoista muodostuva kuvio (mukaillen Maruyama & Abe 1993, 647).



Kuva 11. Vastinviivojen etsintä epipolaarisuorien avulla tunnetun kuvion ja kohteesta otetun kuvan välillä (mukaillen Maruyama & Abe 1993, 648).

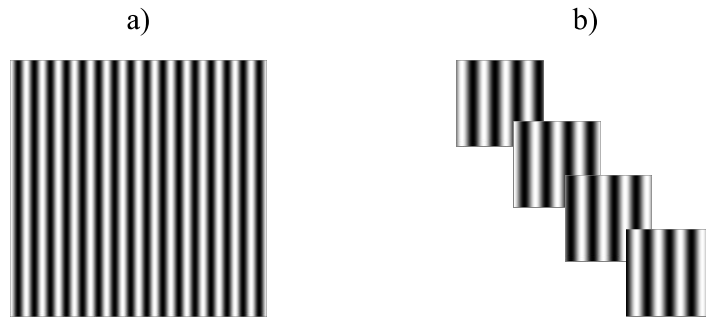
Carrihillin ja Hummelin (1985) menetelmässä käytetään gradienttikuviota, jossa harmaasävyn voimakkuus pienenee tasaisesti vaakasuunnassa. Pinnan mittaukseen tarvitaan kaksi kuvaa. Ensimmäinen kuva otetaan tasaisella valaistuksella, ja toinen gradienttikuviolla. Näiden kahden kuvan perusteella voidaan laskea erotuskuva eli jokaiselle pikselille valon voimakkuuden muutos. Menetelmässä oletetaan, että pikselin kirkkauden muutos johtuu muutoksesta kohteen valaisussa kahden kuvan välillä, eikä kohde valaise merkittävästi itseään heijastuksien kautta. Erotuskuvan avulla kohteen valaisusta aiheutuvien suorien heijastusten vaikutukset poistuvat. Jokaiselle pikselille saadaan suhteellisen valon voimakkuuden perusteella vastaava kohta alkuperäisellä gradienttikuviolla. Kohteen 3D-koordinaatit voidaan laskea kolmioinnilla, kun tunnetaan kameran ja projektorin välinen geometria. Kuvassa 12 on esitetty menetelmän mukainen gradienttikuvio.



Kuva 12. Carrihillin ja Hummelin (1985) menetelmän mukainen gradienttikuvio.

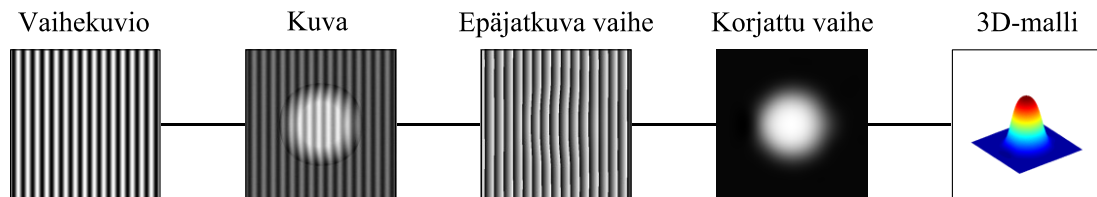
2.5 Vaiheen laskenta

Vaiheen laskentaan perustuvissa menetelmissä kohteeseen heijastetaan yksi tai useampi jatkuva kuvio. Kuviot voivat olla harmaasävyisiä tai värillisiä. (Zhang 2012, 1097.) Heijastukseen voidaan käyttää projektoria tai luoda kuvio mekaanisen säleikön avulla. Yksi tapa luoda sinimuotoisia kuvioita on heijastaa binäärikuvioita epäkohdistetulla projektorilla. (Gong & Zhang 2010, 19744–19747) Kuvassa 13 on esimerkki vaiheen laskennassa käytettävistä kuvioista, joiden profiili on vaakasuunnassa sinimuotoinen.



Kuva 13. Vaiheen laskentaan perustuvien menetelmien kuvioita. a) Sinimuotoinen vaihekuvio. b) Neljä vaihesiirrettyä kuviota.

Tyypillisessä vaiheen laskentaan perustuvassa järjestelmässä käytetään yhtä projektoria ja yhtä kameraa. Kohteen pinnan muodon vaihtelut näkyvät kuvalla alkuperäisen kuvion vaiheen muuttumisena eli vaihemodulaationa. Kohteesta otetusta kuvasta lasketaan vaihemodulaatio jollakin vaiheenlaskentamenetelmällä, jonka tuloksena on yleensä epäjatkuva vaihejakauma. Tästä lasketaan vaiheen korjauksella jatkuva vaihejakauma, joka vastaa kohteen pinnan muotoa. Kohteen pinnan 3D-koordinaatit voidaan laskea jatkuvan vaihejakauaman avulla kun mittausjärjestelmä on kalibroitu. (Gorthi & Rastogi 2010, 133–135.) Kuvassa 14 on havainnollistettu järjestelmän eri osavaiheet.



Kuva 14. Tyypillisen vaiheen laskentaan perustuvan järjestelmän osavaiheet (mukailen Gorthi & Rastogi 2010, 135).

Vaiheenlaskentamenetelmien laskennan tuloksena saatu vaihejakauma on yleensä rajoittunut välille $(-\pi, \pi]$. Todellisuudessa vaihe voi olla suurempi, jolloin saatu vaihejakauma on epäjatkuva. Vaiheen korjauksella muutetaan vaihejakauma jatkuvaksi. Vaihe voidaan korjata ideaalitapauksessa lisäämällä tai vähentämällä vaiheeseen 2π vierekkäisten pikselien suhteellisen vaiheen perusteella. Käytännön mittauksissa kuitenkin esimerkiksi kohina, varjot ja kuvion epäjatkuvuudet vaikeuttavat vaiheen korjausta. Tämän vuoksi vaiheen korjaukseen on kehitetty useita kehittyneempiä algoritmeja. (Gorthi & Rastogi 2010, 134.)

Yleisimmin käytetty yhden kuvion vaiheenlaskentamenetelmä perustuu vaiheen laskentaan Fourier-muunnoksen avulla (Zhang 2012, 1101). Takedan ja Mutohin (1983) kehittämällä Fourier-muunnos-menetelmällä on mahdollista laskea pinnan muoto yhdeltä kovalta. He käyttivät kuviota, jonka harmaasävyarvo vaihtelee sinimuotoisesti vaakasuunnassa. Kuvio muuttuu, kun se heijastetaan kohteeseen, jonka pinta ei ole tasainen. Kohteesta otetun kuvan voidaan ajatella koostuvan useista eritaajuisista sinimuotoisista signaaleista, joiden vaihe ja amplitudi ovat muuttuneet. Vaiheen muutos sisältää tietoa kohteen pinnan muodosta, ja amplitudin muutokset johtuvat kohteen heijastavuuden vaihtelusta. Tavoitteena on saada vaiheen muutos ilman amplitudin vaikutusta. Korkeuden laskennassa käytetään kameran kuvatason suuntaista vertailutasoa, jonka suhteen korkeus mitataan.

Fourier-muunnos-menetelmässä lasketaan jokaiselle kuvan riville erikseen yksiulotteinen Fourier-muunnos, jonka tuloksena saadaan kuvasignaalin yhden rivin taajuuskomponentit. Perustaajuus eli pienin taajuuskomponentti sisältää informaatiota kohteen muodosta. Muut taajuudet suodatetaan pois taajuustasossa. Tämän jälkeen suodatetulle signaalille lasketaan käänteinen Fourier-muunnos $\hat{g}(x, y)$. Myös vertailutasolle heijastuva kuvio suodatetaan samalla tavalla, jotta saadaan $\hat{g}_0(x, y)$. Vaiheen muutos $\Delta\varphi(x, y)$ saadaan laskettua kompleksisen logaritmin $\log(\hat{g}(x, y) \cdot \hat{g}_0^*(x, y))$ imaginääriosasta, missä \hat{g}_0^* on funktion \hat{g}_0 kompleksikonjugaatti. Kun järjestelmä on kalibroitu, voidaan laskea kohteen korkeus

$$h(x, y) = l_0 \frac{\Delta\varphi(x, y)}{(\Delta\varphi(x, y) - 2\pi f_0 d)} \quad (1)$$

jossa l_0 on etäisyys vertailutasoon, f_0 on perustaajuus, ja d on kameran ja projektorin välinen etäisyys. Menetelmä soveltuu ainoastaan tasaisten pintojen mittaukseen, koska jos pinnan korkeuden vaihtelu ylittää arvon $l_0/3d$, perustaajuuden erottaminen muista taajuuksista ei ole enää mahdollista. (Takeda & Mutoh 1983, 3978-3980.)

Srinivasan ym. (1984) käyttivät pinnan mittauksessa vaiheensiirtomenetelmää, jossa kohteeseen heijastetun sinimuotoisen kuvion vaihetta muutetaan kuvasarjan edetessä. Vaiheen siirto on jokaisen kuvanoton jälkeen $2\pi/N$, jossa N on heijastettavien kuviodien määrä. Jokaiselle pikselille saadaan N kirkkousarvoa, joiden perusteella lasketaan pikselin vaihe. Vaiheen muutos voidaan laskea kohteen muodon mukaan muuttuneen kuvion ja alkuperäisen eli muuttumattoman kuvion välillä. Vaiheen siirtoon perustuva kuviosarja on myös mahdollista yhdistää yhdeksi kuvioksi (Guan ym. 2003). Yhdistetyn kuvion menetelmät eivät kuitenkaan sovellu erittäin tarkkoihin mittauksiin, koska niissä vaiheen mittauksen erotuskyky on heikko (Zhang 2012, 1099).

Vaiheensiirtomenetelmä tuottaa ainoastaan suhteellisen vaiheen, kun kohteeseen heijastetaan useammasta kuin yhdestä jaksosta koostuva sinimuotoinen kuvio. Kohdekoordinaattien laskentaa varten tarvitaan kameran kuvan pikseliä vastaava kuvion viiva, joka on yksi kuvion sarake, kun kyseessä on profiililtaan vaakasuunnassa sinimuotoinen kuvio. Yksikäsitteinen vastaavuus saadaan muuntamalla suhteellinen vaihe absoluuttiseksi. Kohteeseen voidaan heijastaa esimerkiksi pisteitä tai viivoja, joiden avulla lasketaan absoluuttinen vaihe. (Zhang 2010, 150–152.) Sansoni ym. (1999) yhdistivät vaiheensiirron ja Gray-koodauksen, jonka avulla kuvapikseliä vastaava projektorin viiva voidaan selvittää yksikäsitteisesti. Menetelmällä saavutetaan parempi resoluutio ja tarkkuus kuin pelkällä Gray-koodauksella.

Kahdella tai useammalla kameralla vaiheensiirtomenetelmässä on mahdollista hyödyntää passiivisessa stereokuvauksessa käytettäviä yhteensovitusmenetelmiä. Tavoitteena on etsiä kuvien vastinpisteet jokaiselta kuvalta laskettujen vaihearvojen perusteella. Yhden kuvan vastaavaa vaihearvoa voidaan etsiä toisen kuvan epipolaarisuoralta esimerkiksi pienen kuvaikkunan avulla. Mahdollisten vastinpisteiden määrä on pieni, koska vaiheensiirtomenetelmä määrittää jokaiselle pikselin yksikäsitteisen koodin yhden jakson sisällä. (Pribanic ym. 2012, 1019.)

3 Mittausten toteutus

Strukturoituun valoon perustuvia menetelmiä on kehitetty runsaasti erilaisiin sovelluskohteisiin. Tässä tutkimuksessa näistä on valittu kirjallisuuden perusteella kaksi menetelmää, jotka toteutetaan. Tässä luvussa esitellään sovelluskohde, mittausjärjestelyt ja valittujen menetelmien toteutus.

3.1 Sovelluskohde

Tämän tutkimuksen käytännön mittausten sovelluskohteeksi on valittu autoteollisuuden laadunvarmistus. Sovelluskohde ja sen asettamat vaatimukset vaikuttavat pinnan mittaukseen käytettävän menetelmän valintaan olennaisesti. Eri menetelmien soveltuvuutta voidaan arvioida muun muassa tarkkuuden, erotuskyvyn, nopeuden, kustannusten, ja luotettavuuden perusteella. (Geng 2011, 157.) Tutkimuksen sovelluskohteen mitattavat kappaleet ovat auton osia, kuten esimerkiksi auton ovi, josta mitataan koko pintamalli tai osa siitä. Kuvien oton ajaksi kappale asetetaan mittauslaitteeseen, ja sen oletetaan pysyvän paikallaan. Liikkuva kohde asettaisi mittaukselle tiukempia vaatimuksia kuin paikallaan pysyvän kohteen mittaus. Esimerkiksi kappaleen liike tai ympäristön valaistuksen muuttuminen heikentävät mittauksarkkuutta. (Su & Zhang 2010, 203.)

Teollisuuden laadunvarmistuksessa käytetään useita eri optisia menetelmiä pinnan mittaukseen. Menetelmät perustuvat yleensä strukturoituun valoon tai laserkeilaukseen. Vaiheen laskentaan perustuvat menetelmät ovat laajalti käytössä, ja tyypillisesti mittausjärjestelmä käyttää vaiheensiirtomenetelmää. (Luhmann 2010, 564.) Autoteollisuuden laadunvarmistuksessa on kasvava tarve nopealle, tarkalle ja luotettavalle pinnan mittaukselle (Xu ym. 2011, 1–2).

Strukturoidun valon kuviot voivat olla binäärisiä, harmaasävyisiä tai värillisiä. Binäärikuvia on käytetty useissa eri tutkimuksissa ja kaupallisissa järjestelmissä (Gupta ym. 2013, 34). Binäärikuviot ovat erittäin vankkoja kohinan suhteen, koska niissä käytetään vain kahta valoisuusarvoa. Niiden koodaus ja purku on yksinkertaista toteuttaa, ja ne ovat laskennallisesti tehokkaita. Binäärikuvioiden määrä on kuitenkin suuri, jos tavoitteena on suuri resoluutio. (Zhang 2010, 150.) Heijastettavien kuvioiden määrää voidaan optimoida käyttämällä harmaasävyisiä (Horn & Kiryati 1999) tai värillisiä kuvia (Caspi ym. 1998). Harmaasävyiset ja värilliset kuviot ovat herkempiä kohinalle kuin binäärikuviot (Weinmann ym. 2011, 398). Värien erottamiseen toisistaan vaikuttaa myös kohteen heijastavuus, kuviointi ja ympäristön valaistus (Xu ym. 2011, 2).

Toteutettavaksi valitut menetelmät perustuvat Gühringin (2001) Gray-koodattuun viivansiirtomenetelmään. Gray-koodaus on luotettava tapa jakaa kohde yksikäsitteisiin alueisiin (Geng 2011, 134; Horn & Kiryati 1999, 87–88). Kuvajaksokoodaukseen perustuvilla kuvion siirtomenetelmillä, kuten vaiheen- tai viivansiirtomenetelmillä saavutetaan erinomainen tarkkuus ja tiheä pintamalli (Salvi ym. 2010, 2678). Tutkimuksen kokeellisessa osuudessa toteutettavat molemmat menetelmät käyttävät vastinpisteiden etsinnässä Gray-koodausta. Ensimmäisessä menetelmässä käytetään pinnan pisteiden muodostamisessa viivoja ja toisessa ympyröitä. Vastinpisteiden etsinnässä kokeillaan myös epipolaarisuoriin perustuvaa menetelmää ympyräkuviolla.

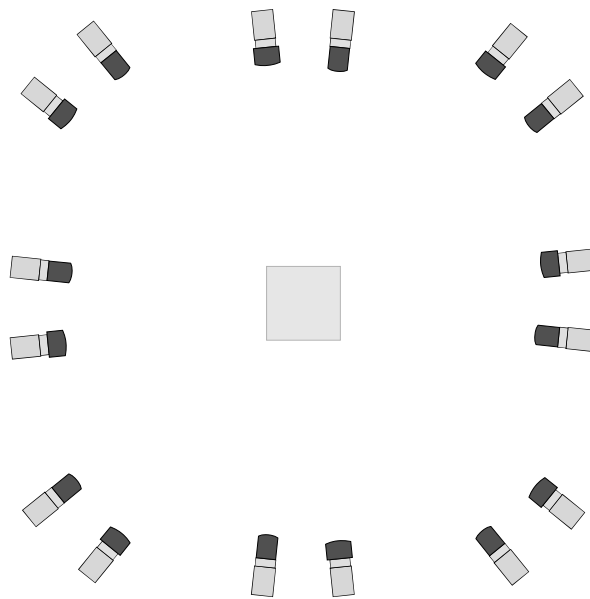
Toteutettavat menetelmät soveltuvat hyvin monikamerajärjestelmään, koska vastinpisteet kuvien välillä on helppo löytää. Viivoihin perustuvassa menetelmässä etsitään projektorin viivoja vastaavat kamerakoordinaatit jokaiselta kameralta eli vastinpisteet yhdistetään projektorikoordinaatistossa. Eri kameroiden vastinpisteiden kuvakoordinaattien välillä ei

olisi suoraa yhteyttä, jos käytettäisiin esimerkiksi Gray-koodattua vaiheensiirtomenetelmää. Siinä jokaiselle kameran pikselille saadaan vastaava projektorin viiva alipikselitarkkuudella. (Gühring 2001, 224–225.) Myös ympyröitä käyttävässä menetelmässä voidaan yhdistää vastinpisteet projektorikoordinaatistossa.

Tutkimuksen sovelluskohteeksi valittu autoteollisuuden laadunvarmistus määrittelee vaatimukset mittausten suorituskyvylle. Valittuja menetelmiä voidaan soveltaa joko nopeaan mittaukseen tuotantolinjalla tai hitaampaan suuren resoluution mittaukseen tuotantolinjan ulkopuolella. Viivoihin tai ympyröihin perustuvissa menetelmissä voidaan tarvittaessa käyttää useampia kuvioita mittauksen resoluution kasvattamiseksi. Myös piirteiden tiheyttä voidaan vaihdella sovelluskohteen tarpeiden mukaisesti.

3.2 Mittausjärjestelmä

Mittausjärjestelmään asennetaan yhteensä 16 kameraa ja yksi projektori. Kamerat ovat Basler Ace-digitaalikameroita, joiden resoluutio on 1296 x 966. Kuvioiden heijastukseen käytetään Acer P1200 DLP-projektorin, jonka optimaalinen resoluutio on 1024 x 768. Optiikkana käytetään 6 mm ja 12 mm polttovälin linsejä. Kahden eri polttovälin optiikoiden käytöllä tutkitaan resoluution vaikutusta mittauksiksiin. Kamerat asetellaan kuvan 15 mukaisesti siten että kamerat 6 mm ja 12 mm optiikalla ovat aina vierekkäin jokaisessa kahdeksassa asemassa. Näin ollen kameroiden geometria eri polttovälin linseillä on lähes samanlainen. Mittausjärjestelmä on esitetty kuvassa 16. Mittakopissa on lisäksi kaksi LED-valaisinta, joita käytetään apuna kohteeseen kiinnitettävien tähtysten mittauksessa.



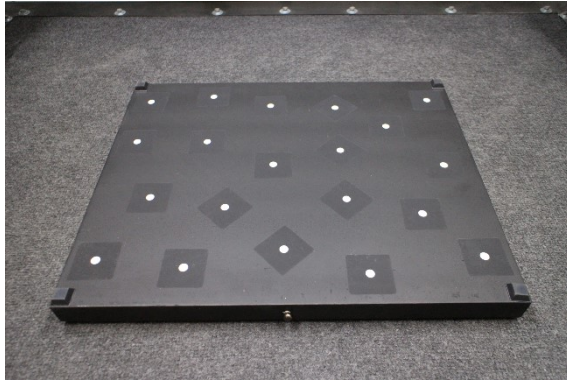
Kuva 15. Kameroiden asettelu mittalaitteessa. Yhteensä 16 kameraa asennetaan kiinteästi mittakopin kattoon kahdella eri optiikalla ja suunnataan lattialle asetettuun kohteeseen.



Kuva 16. Mittausjärjestelmä.

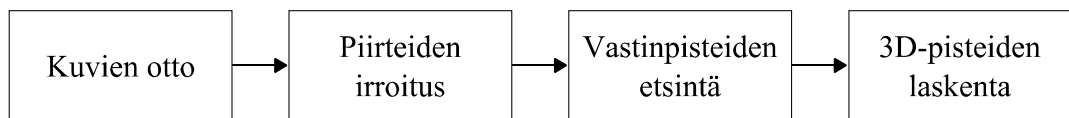
Kamerat on suunnattu mittakopin lattiaa kohti. Suuntauksessa on pyritty luomaan vastakkaisten kameroiden kuvasäteiden välille noin 90-asteen kulma. Näin voidaan saavuttaa samanlainen tarkkuus kaikilla koordinaattiakseleilla (Luhmann 2010, 563). Eri optiikoiden kameroiden kuvaamat alueet poikkeavat toisistaan, sillä 6 mm optiikalla kamera havaitsee suuremman kuva-alan kuin 12 mm optiikalla. Molempien optiikoiden kamerat on kuitenkin suunnattu siten että jokaisella kuvalla näkyy mittakopin keskikohta. Tällä tavalla mittakopin keskelle muodostuu alue, jossa molemmilla optiikoilla yhtä monta kameraa havaitsee samat mittauspisteet. Kameroiden etäisyys mittakopin lattiasta on noin 1.5 metriä.

Mittausjärjestelmän kalibroinnissa määritetään kameroiden paikat ja kierrot sekä jokaiselle kameralle pääpiste, polttoväli ja piirtovirheet. Kalibroinnissa käytetään kuvan 17 mukaista levyä, jossa on valkoisia ympyrätähyksiä mustalla pohjalla. Levyn koko on noin 40 x 50 cm. Tähysten keskipisteiden koordinaatit on mitattu koordinaattimittauskoneella. Kalibrointi-levystä otetaan jokaisella kameralla 27 kuvaa tasaisesti mittausalueelta kolmella eri korkeudella eli 9 kuvaa jokaiselta korkeudelta. Kalibroidun mittausalueen koko on noin 80 x 80 x 40 cm. Koordinaatistona käytetään oikean käden koordinaatistoa siten, että kuvan 16 mittakopin oviaukon suunnasta katsottuna positiivinen X-akseli osoittaa oikealle, Y-akseli osoittaa pois päin katsojasta ja Z-akseli mittakopin kattoon. Koordinaatiston nollapisteeksi on määritetty kalibrointi-levyn vasen alanurkka levyn ensimmäisessä asemassa, joka sijaitsee mittakopin vasemmassa alanurkassa.



Kuva 17. Kalibrointilevy.

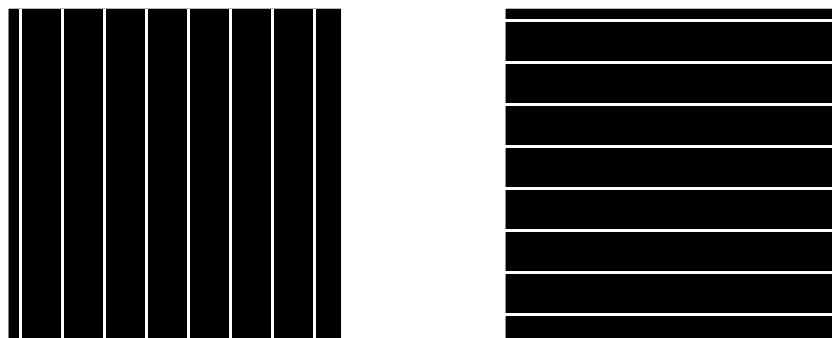
Kalibroidulla mittausjärjestelmällä voidaan laskea kohteen 3D-koordinaatteja. Kuvassa 18 on esitetty laskentaan tarvittavat vaiheet. Kohteeseen heijastetaan yksi strukturoidun valon kuvio kerrallaan ja mittausjärjestelmällä otetaan kuvat kohteesta kaikilla kameroilla. Tämän jälkeen kuvilta irrotetaan piirteet, kuten ympyrät tai viivat. Kohdekoordinaattien laskentaa varten selvitetään kuvien väliset vastinpisteet.



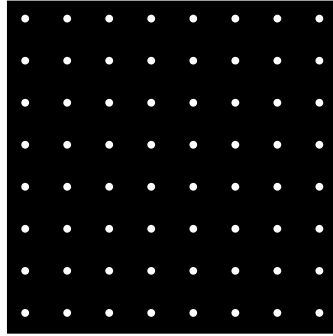
Kuva 18. Kohdekoordinaattien laskentaan tarvittavat vaiheet.

3.3 Piirteiden irroitus kuvilta

Kohteeseen heijastettavina piirteinä käytetään viivoja tai ympyröitä. Kuvassa 19 on esitetty viivoihin perustuvassa menetelmässä käytettävät kuviotyypit piirteiden irroitusta varten. Kohteeseen heijastetaan yksi tai useampi pysty- ja vaakasuuntainen viivakuvio. Pistetiheyttä voidaan kasvattaa käyttämällä useampia viivakuvioita, joissa viivoja siirretään kuviosarjan edetessä. Vastaavasti kuvassa 20 on esimerkki ympyröiden irroitukseen perustuvassa menetelmässä käytettävistä ympyräkuvioista.



Kuva 19. Viivoihin perustuvan menetelmän heijastettavat kuviotyypit piirteiden irroitusta varten.



Kuva 20. Ympyröihin perustuvan menetelmän heijastettava kuviotyppi piirteiden irroitusta varten.

Kohteesta otetaan myös kuvat täysin valaistulla kuviolla ja ilman valaistusta. Näitä kuvia hyödynnetään kuvien normalisoinnissa eli mahdollisen taustavalon poistamisessa ja valaistun alueen rajaamisessa kuvilta. Kuvan ottaminen ilman valaistusta ei ole välttämätöntä, mikäli taustavalon määrä on pieni mittaympäristössä. Kuvien normalisointia käytetään ainoastaan piirrekuvioille.

Viivojen keskikohtien määrittystä varten kuva suodatetaan vaaka- tai pystysuunnassa Blaisin ja Riouxin (1986) neljännen asteen lineaarisella suodattimella

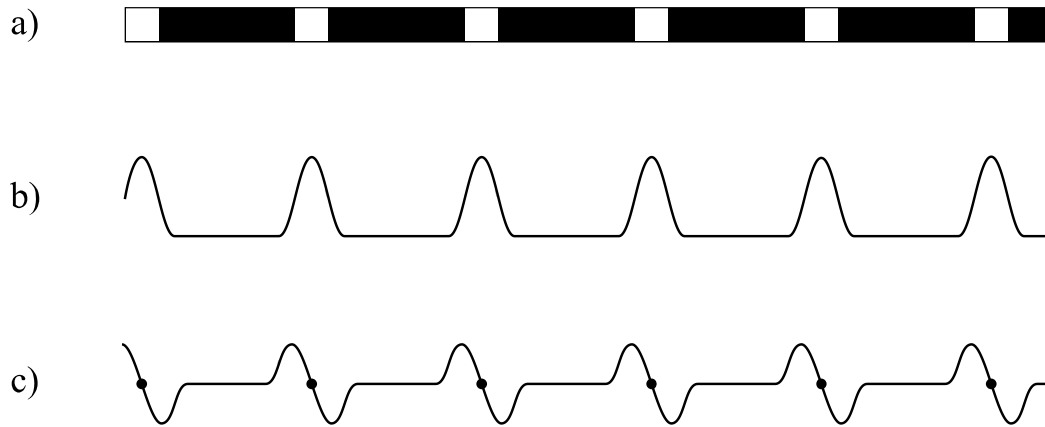
$$h_x = [1 \quad 1 \quad 0 \quad -1 \quad -1], \quad h_y = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

tai kahdeksannen asteen lineaarisella suodattimella

$$h_x = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad -1], \quad h_y = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

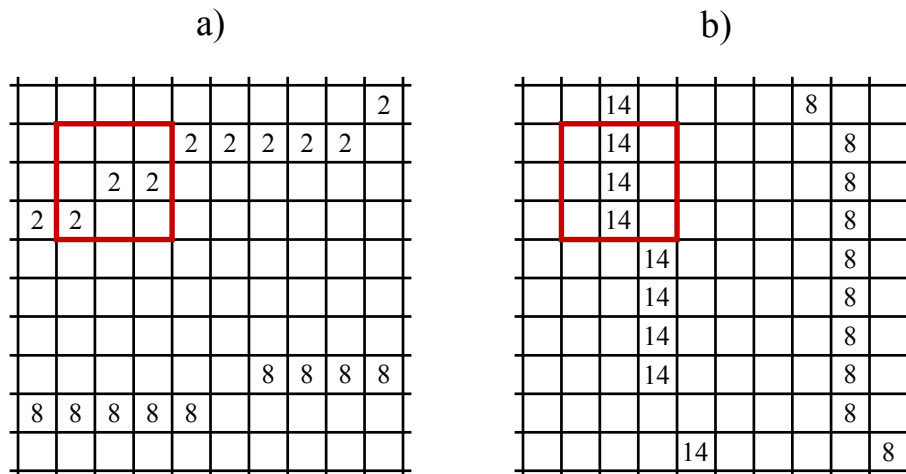
Suodattimen koon valintaan vaikuttaa kuvalla näkyvien viivojen koko. Neljännen asteen suodatinta voidaan käyttää esimerkiksi ohuille viivoille ja kahdeksannen asteen suodatinta paksummille viivoille. Tämän tutkimuksen mittauksissa kokeillaan myös korkeamman asteen suodattimia.

Jokaiselle kuvan riville tai sarakkeelle lasketaan viivojen keskikohdat suodatetun signaalin nollakohdista. Kuvassa 21 on esitetty ideaalinen viivakuvio, jonka yhden rivin kuvasignaali on suodatettu. Suodatetusta kuvasignaalista voidaan tunnistaa signaalin nollakohdat kohdista, joissa signaalin etumerkki vaihtuu negatiiviseksi. Viivojen keskikohtien laskennassa käytetään lineaarista interpolointia, jolla saadaan määritettyä keskikohdat alipikselitarkkuudella. Interpoloinnissa otetaan suodatetun signaalin positiivinen ja negatiivinen arvo nollakohdan molemmin puolin ja muodostetaan näiden välille suora, jonka nollakohta on kyseisen viivan interpoloitu keskikohta.



Kuva 21. Viivojen keskikohtien määrittäminen (mukaan Gühring 2001). a) viivakuvion yksi rivi. b) yhden kuvarivin signaali. c) lineaarisesti suodatettu signaali, jossa on merkitty pisteellä nollakohdat.

Kuvilta havaittujen viivojen keskikohdat tallennetaan erikseen x- ja y-koordinaateille kuvien resoluution kokoisiin matriiseihin. Erillisiin matriiseihin asetetaan myös viivojen numerot, jotka määritetään Gray-koodeilla. Vastinpisteiden etsinnästä Gray-koodeilla on kerrottu tarkemmin luvussa 3.4. Pysty- ja vaakasuuntaisten viivojen numeromatriiseiden avulla etsitään viivojen leikkauspisteet. Leikkauspisteiden laskennassa käytetään kuvan 22 mukaisesti etsintäikkunaa, jolla otetaan molemmilta numeromatriiseilta pieni alue tarkasteltavaksi kerrallaan. Etsintäikkunan koko voi olla esimerkiksi 3 x 3 tai 5 x 5. Etsintäikkunan alueella sijaitsevien samojen numeroiden koordinaatit yhdistetään murtoviivalla käyttämällä hyväksi tietoa viivojen keskikohtista. Kahden murtoviivan leikkauspisteestä saadaan viivojen leikkauspiste, joka tallennetaan projektorin resoluution kokoisiin matriiseihin x- ja y-koordinaateille. Jos murtoviivan leikkauspisteitä on useampia, leikkauspisteinä käytetään niiden keskiarvoa.

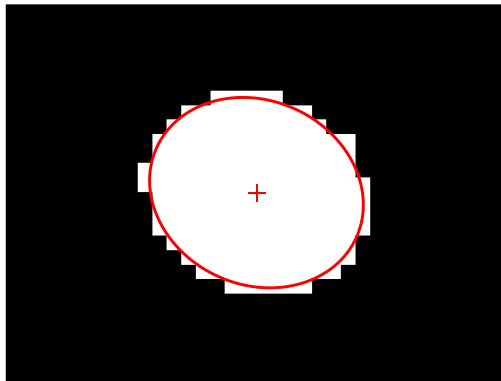


Kuva 22. Viivojen leikkauspisteiden etsintä 3 x 3-kokoisella etsintäikkunalla. a) Vaakasuuntaisten viivojen numeromatriisi. b) Pystysuuntaisten viivojen numeromatriisi.

Ympyröihin perustuvassa menetelmässä jokainen piirrekuva muutetaan binäärikuvaksi luokittelemalla pikselit kirkkauden perusteella joko taustaksi tai ympyröiksi. Parhaan kynnystysmenetelmän valintaan vaikuttaa ratkaisevasti kuvien tyyppi ja sovelluskohde (Sezgin & Sankur 2004, 166). Tässä tutkimuksessa on vertailtu kolmea eri kynnystysmenetelmää. Ensimmäinen on Sauvolan ja Pietikäisen (2000) menetelmä, jossa

kynnysarvo lasketaan paikallisesti pienille kuvaikkunoille keskiarvon ja keskihajonnan avulla. Toisena menetelmänä kokeillaan Otsun (1979) kynnystystä, joka perustuu yhteen kynnysarvoon koko kuvalle. Kolmannessa menetelmässä kuva jaetaan pienempiin osiin ja lasketaan kynnysarvot Otsun menetelmällä kuva-alueille erikseen.

Kynnistyksen jälkeen binäärikuvalta etsitään yhtenäiset alueet, joissa pikselit on luokiteltu ympyröiksi. Ympyröiden keskipisteiden määrittämisessä käytetään Fitzgibbonin ym. (1999) menetelmää, jossa annettuihin pisteisiin sovitetaan ellipsi. Menetelmä on nopea laskennan kannalta, koska pienimmän neliösumman sovitusta ei ratkaista iteroimalla. Ellipsi sovitetaan yhtenäisten alueiden pikseleihin. Kuvassa 23 on esimerkki kynnystetystä ympyrästä ja ellipsin sovituksesta yhtenäisen alueen pikseleihin. Tutkimuksessa kokeillaan myös ympyrän keskipisteen määrittämistä pikselien massakeskipisteen avulla. Ympyröiden etsinnän yhteydessä liian isot tai pienet ympyrät hylätään.



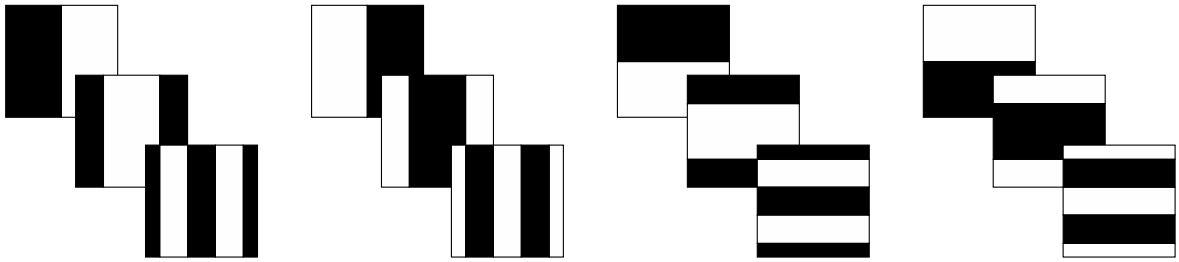
Kuva 23. Ympyrän keskipisteen määrittäminen ellipsin sovituksella.

3.4 Vastinpisteiden etsintä

Kolmiulotteista mittaamista varten kuvilta on etsittävä vastinpisteet kahdelta tai useammalta kuvalla. Pinnan mittauksessa kohteessa on joko oltava riittävä tekstuuri tai siihen on heijastettava kuvioita strukturoidulla valolla, jotta vastinpisteet saadaan määritettyä. (Luhmann 2010, 565.) Vastinpisteiden etsintä on yksi kolmiulotteisen mittauksen keskeisimmistä ongelmista, joka on vaikea toteuttaa tehokkaasti (Gühring 2001, 221).

Tässä tutkimuksessa toteutettavissa menetelmissä vastinpisteiden etsinnässä käytetään Inokuchin ym. (1984) kehittämää Gray-koodausta. Kuviot ovat binäärikuvioita eli kuvion pikseli on joko täysin valaistu tai täysin valaisematon. Luotettavuuden parantamiseksi kohteesta otetaan kuva sekä varsinaisella kuviolla että sen käänteisellä kuviolla. Ne kuvapisteet voidaan luokitella valaistetuiksi, joiden harmaasävyarvo on suurempi kuin sen käänteisellä kuviolla otetussa kuvassa. Oikean luokittelun oletuksena on, että jokaisen kohdepisteen valoisuuteen vaikuttaa vain yksi projektorin pikseli tai viiva. Todellisuudessa yhteen kohdepisteeseen voi tulla valoa useammasta projektorin pikselistä, mikä aiheuttaa virhettä luokittelussa. (Gupta ym. 2013, 36.)

Kuvassa 24 on esitetty käytettävät Gray-kuviotyypit eli pysty- ja vaakasuuntaiset kuviot ja niiden käänteiskuviot. Gray-kuvioiden määrä riippuu viivojen tai ympyröiden tiheydestä ja luotettavuusalueista. Vastinpisteiden etsinnän luotettavuutta voidaan parantaa kasvattamalla luotettavuusaluetta eli käyttämällä useampaa yksikäsitteistä Gray-koodia yhtä viivaa kohden (Gühring 2001, 226).



Kuva 24. Vastinpisteiden etsinnässä käytettävät Gray-kuviotyypit eli pysty- ja vaakasuuntaiset Gray-kuvio ja niiden käänteiskuvio.

Gray-kuvio voidaan muodostaa binäärikuvioiden avulla. Ensin valitaan kuvion leveys ja korkeus, jotka on oltava kahden potensseja. Binäärikuviojakson ensimmäinen kuvio muodostetaan jakamalla kuvio kahteen osaan ja asettamalla toinen puoli nolliksi ja toinen ykkösiksi. Toinen kuvio saadaan kun jaetaan kuvio neljään osaan ja asetetaan joka toinen alue nolliksi ja joka toinen ykkösiksi. Seuraavat kuvio jaetaan samalla tavalla aina pienempään osiin, kunnes jokaisen alueen leveys tai korkeus on yhden pikselin kokoinen tai haluttu kuviomäärä on saavutettu. Ensimmäinen Gray-kuvio on sama kuin binäärikuvio. Sitä seuraavat Gray-kuvio lasketaan peräkkäisistä binäärikuvioista loogisella XOR-opeeraatiolla

$$G_{i+1} = XOR(B_i, B_{i+1}), i = 1 \dots \log_2(n) - 1, \quad (4)$$

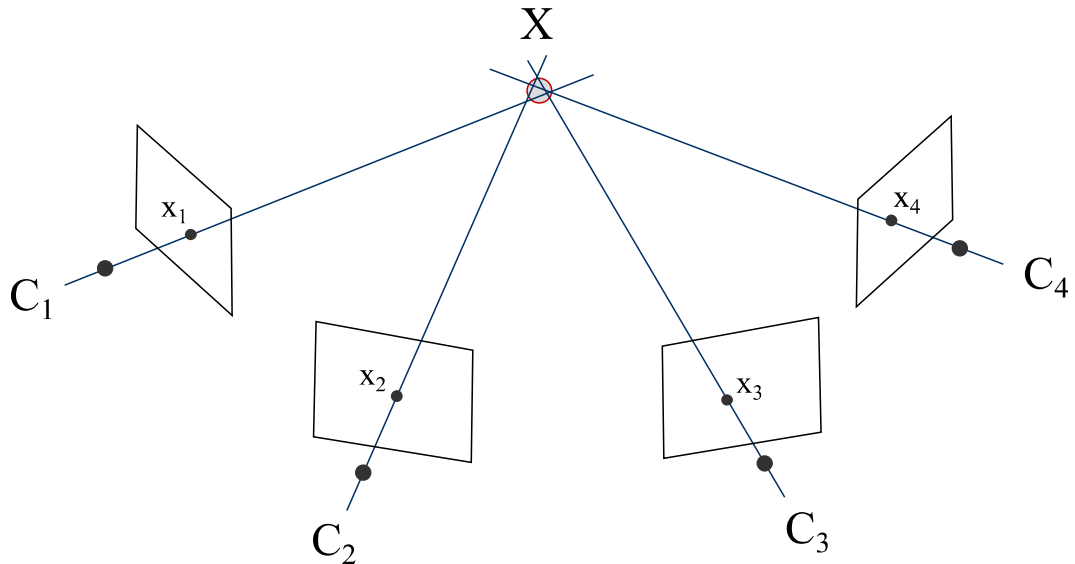
jossa G on Gray-kuvio, B on binäärikuvio, i on kuvion järjestysluku ja n on kuvion korkeus tai leveys. Looginen XOR-opeeraatio kahden binääriarvon kesken saa arvon yksi, jos toinen ja vain toinen arvoista on yksi.

Gray-koodit puretaan jokaiselle kameralle erikseen peräkkäisiltä kuvilta, joissa kohdetta on valaistu Gray-kuvioilla ja niiden käänteiskuvioilla. Tällä tavalla jokaiselle kuvan pikselille voidaan laskea numeroarvo eli kyseisen alueen Gray-koodi. Purkamalla vaaka- ja pystysuuntaiset Gray-koodit, voidaan eri kameroilla otetuilta kuvilta tunnistaa vastinpisteet vertailemalla pisteiden kohdalla olevia Gray-koodiarvoja.

Tässä tutkimuksessa toteutettavien menetelmien lisäksi käytetään vertailua varten epipolaarisuoriin perustuvaa vastinpisteiden etsintämenetelmää. Siinä vastinpisteet on mahdollista etsiä kuvilta, kun havaintoja on vähintään kolmelta kameralta. Vain kahdella kameralla näkyviä pisteitä ei oteta huomioon, koska niiden luotettavuus on heikko. (Niini 2002, 225.) Menetelmässä etsitään epipolaarisuorien avulla mahdolliset vastinpisteet muilta kuvilta määrätyn kokoisella etäisyydellä epipolaarisuorasta. Tätä etäisyyttä voidaan kasvattaa laskennan edetessä. Menetelmän käyttö edellyttää, että kamerat asetellaan riittävän suuressa kulmassa toisiinsa nähden. Vastinpisteiden etsintä epipolaarisuorilla ei onnistu, jos kuvien väliset epipolaarisuorat ovat yhdensuuntaisia.

3.5 3D-pisteiden laskenta

Kalibroidussa monikamerajärjestelmässä kohteen 3D-koordinaatit voidaan laskea eteenpäinleikkauksella, kun tunnetaan kuvien väliset vastinpisteet. Kalibrointi ja kuvahavainnot sisältävät aina jonkin verran virhettä, eivätkä eteenpäinleikkauksessa suorat leikkaa toisiaan. Lopulliset koordinaatit saadaan minimoimalla virheet pienimmän neliösumman tasoituksella. (Luhmann ym. 2006, 283.) Kuvassa 25 on havainnollistettu eteenpäinleikkausta neljällä kameralla.



Kuva 25. Eteenpäinleikkaus monikamerajärjestelmällä. Kameroiden projektiokeskusten C ja kuvapisteiden x kautta kulkevat suorat eivät leikkaa toisiaan kohdepisteessä X .

Laskettujen 3D-koordinaattien virhettä on mahdollista arvioida hyvyysluvulla, joka lasketaan virhe-ellipsoidin avulla. Hyvyysluku lasketaan ellipsoidin akselipituuksien keskiarvona tai ellipsoidin akselipituuksien koordinaattiakseleille projisoitujen pituuksien neliöllisenä keskiarvona. Hyvyyslukua voidaan käyttää huonojen havaintojen poistamisessa. Ennen mittauksia asetetun raja-arvon ylittävät havainnot hylätään mittauksista (FI 111660 2003, 3.) Hyvyysluku kertoo, miten hyvin eteenpäinleikkauksen suorat leikkaavat toisiaan, mutta sillä ei voi varsinaisesti arvioida mittausmenetelmän tarkkuutta.

Mitatuista 3D-pisteistä voidaan muodostaa pintamalli esimerkiksi Delaunay-kolmioinnilla. Se on määritelty siten, että yhdenkään kolmion pisteiden kautta kulkevan pallon sisällä ei ole yhtään pistettä. Pintamallin visualisointia varten on mahdollista laskea Delaunay-kolmioinnista johdettu alfa-muoto. Sen avulla voidaan visualisoida osajoukko alkuperäisen Delaunay-kolmioinnin kolmioista, ja tuoda esille kohteen yksityiskohtia. Kolmiointia voidaan muuttaa alfa-arvolla, joka määrittää, minkä kokoiset kolmiot säilytetään. (Edelsbrunner & Mücke 1994.)

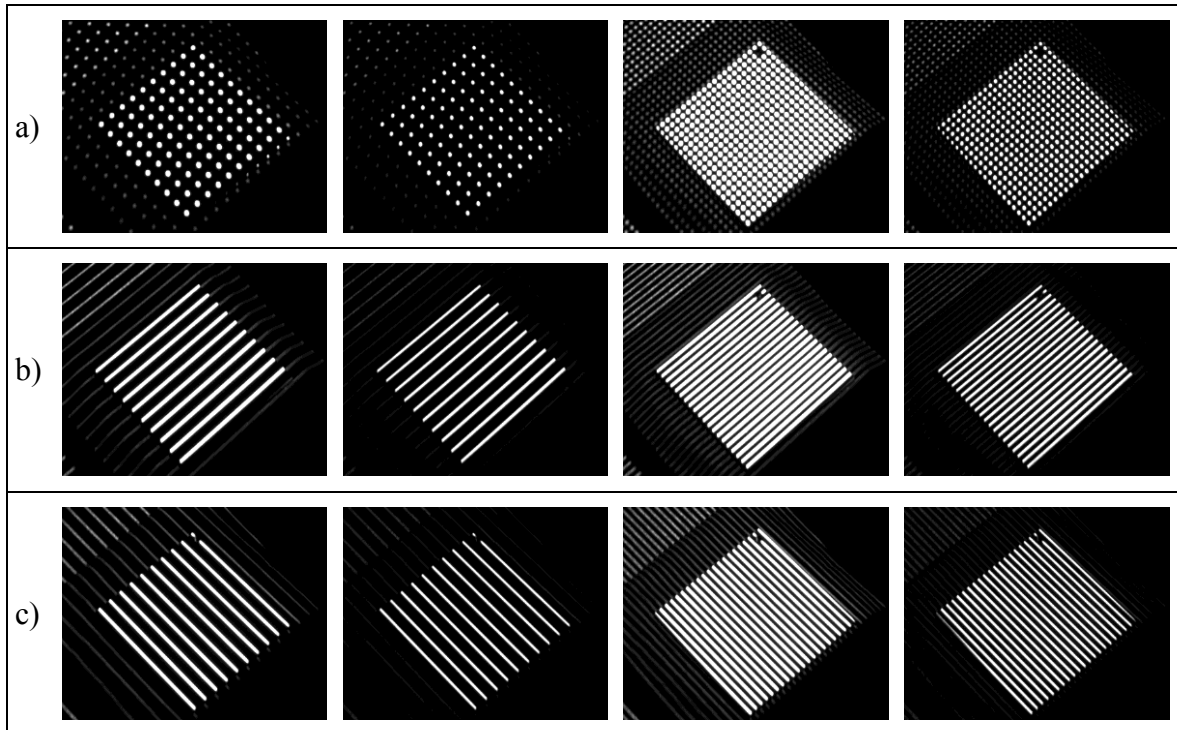
3.6 Tason mittaus

Eri menetelmien mittaustarkkuuden vertailua varten mitataan kuvan 26 mukaista tasokappaletta. Kappaleessa on tasainen pinta, joka on tasomainen 0.01 mm tarkkuudella. Pinnan koko on noin 20 x 20 cm, josta mitataan keskeltä noin 15 x 15 cm aluetta. Tason pinta on heijastavuudeltaan tasainen, jolloin siihen heijastetut piirteet näkyvät mahdollisimman ideaalisina kuvioina. Tällä pyritään selvittämään, mikä on paras mahdollinen saavutettava tarkkuus eri kuviotyypeillä. Taso asetetaan mittakopin keskelle siten, että molemmilla optiikoilla mahdollisimman moni kamera havaitsee mitta-alueen pisteet. Projektorin heijastama kuvio asetetaan tason reunojen suuntaisesti eli heijastetut viivat ovat lähes yhdensuuntaisia tason reunojen kanssa.



Kuva 26. Tason mittauksessa käytettävä mittakappale.

Tason mittauksessa käytetään viiva- tai ympyräkuviioihin perustuvia menetelmiä. Kuvassa 27 on esitetty eri piirrekuviotyypit. Kohteeseen heijastetaan kuvat kahdella eri pistetiheydellä. Harvalla pistetiheydellä pisteiden väli on noin 20 mm ja tiheällä noin 10 mm. Myös piirteiden eli ympyröiden tai viivojen kokona käytetään kahta eri kokoa. Isojen ympyröiden halkaisija kohteen pinnalla on noin 8 mm ja pienien noin 5.5 mm. Vaaka- ja pystysuuntaisten viivojen leveys on paksuilla viivoilla noin 5 mm ja ohuilla noin 3.5 mm. Piirteiden kokojen valinnassa on otettu huomioon piirteiden näkyvyys kuvilla ja niiden erottuminen toisistaan. Vastinpisteiden etsinnässä käytetään 7 pystysuuntaista ja 7 vaakasuuntaista Gray-kuvioita sekä niiden käännekuvioita. Näiden avulla jokaiselle mittauspisteelle saadaan kolmen yksikäsitteisen Gray-koodin luotettavuusalue.



Kuva 27. Tasolle heijastettavat piirrekuviotyypit. a) Ympyräkuviot; harva iso, harva pieni, tiheä iso ja tiheä pieni kuvio. b) Vaakasuuntaiset viivakuviot; harva paksu, harva ohut, tiheä paksu ja tiheä ohut kuvio. c) Pystysuuntaiset viivakuviot; harva paksu, harva ohut, tiheä paksu ja tiheä ohut kuvio.

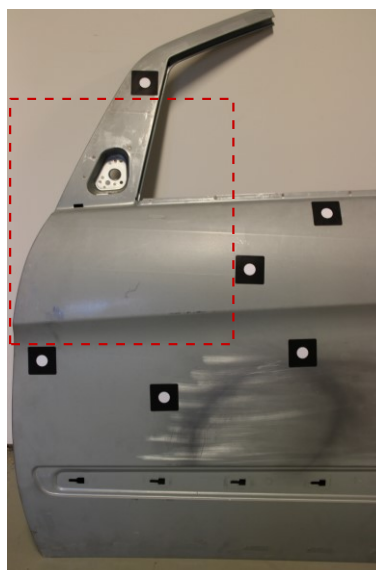
Mittausjärjestelmien tarkkuuden määrittämiseen on olemassa standardeja ja ohjeita, mutta yhtä yhtenäistä määritelmää ei ole. Tarkkuudella voidaan tarkoittaa muun muassa ulkoista tai sisäistä tarkkuutta, mittausvirhettä tai keskihajontaa. Ulkoisella tarkkuudella tarkoitetaan mitatun arvon poikkeamaa todellisesta arvosta ja sisäinen tarkkuus kuvaa mitausten tilastollista virhettä. Mittausvirhe on mitatun ja todellisen arvon erotus. Keskihajonta kuvaa mitattujen arvojen vaihtelua keskiarvon ympärillä. (Luhmann 2011, 3.) Tässä tutkimuksessa tarkkuudella tarkoitetaan keskihajontaa.

Mittausalueeksi on valittu tason keskeltä alue, jossa on tiheällä pistetiheydellä 256 mittapistettä ja harvalla pistetiheydellä 64 pistettä. Mitatuista kohdekoordinaateista poistetaan mittausalueen ulkopuolella sijaitsevat koordinaatit. Mittausalueen sisällä oleviin kohdekoordinaatteihin sovitetaan taso pienimmän neliösumman menetelmällä. Jokaiselle pisteelle lasketaan lyhin etäisyys tasosta eli mittausvirhe. Kaikkien pisteiden etäisyyksistä lasketaan keskihajonta ja suurin poikkeama.

Piirteiden irroituksessa ja vastinpisteiden etsinnässä käytetyt algoritmit toteutetaan Matlabilla. Vastinpisteiden avulla lasketaan eteenpäinleikkauksella 3D-kohdekoordinaatit Mapvision-ohjelmistolla. Kohdekoordinaatit lasketaan kaikilla mahdollisilla kamera-yhdistelmillä, joissa kamerahavaintoja on vähintään kolme. Lopullisiksi koordinaateiksi valitaan se yhdistelmä, jossa on eniten kamerahavaintoja ja hyvyysluku on pienempi kuin asetettu raja-arvo. Hyvyysluvun raja-arvona käytetään arvoa 0.3.

3.7 Auton oven mittaus

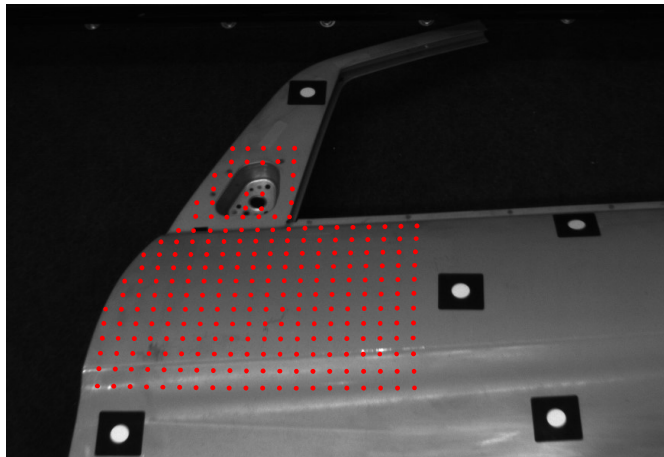
Valittujen mittausmenetelmien luotettavuuden ja toistettavuuden arviointia varten kokeellisessa osuudessa mitataan auton ovea. Mittauksissa käytetään toistotestiä, jossa samaa ovea mitataan 10 kertaa. Eri mitausten välillä ovi otetaan pois mittakopista ja asetetaan suunnilleen samalle paikalle kuin edellisillä mittauskerroilla. Ovi asetetaan noin 27 cm korkeudelle mittakopin lattiasta. Ovi on laajoilla pinnoilla mattapintainen ja heijastavuudeltaan tasainen. Jyrkkien reunojen kohdalla ja erityisesti ovipeilin kiinnityskohdassa pinta on hieman kiiltävä. Mittauksissa käytetty ovi on esitetty kuvassa 28, johon on myös piirretty mittausalue punaisella katkoviivalla. Mittausalueen koko on noin 37 x 53 cm.



Kuva 28. Mittauksissa käytetty auton ovi. Mittausalue on rajattu punaisella katkoviivalla.

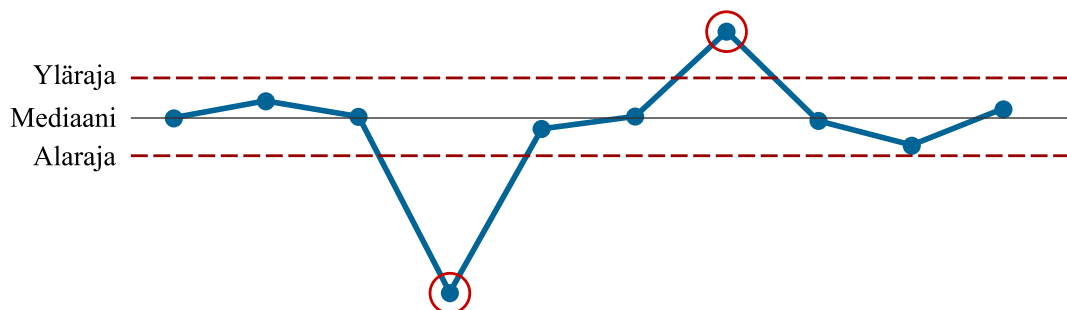
Oveen on kiinnitetty kuusi ympyrätähystä, joiden avulla eri mittauskertojen koordinaatit voidaan siirtää samaan koordinaatistoon. Näistä käytetään viittä tähystä, jotka näkyvät parhaiten mittakuvilla. Ympyrätähysten vastinpisteet osoitetaan käsin jokaiselta kuvalta, ja niiden 3D-koordinaatit lasketaan eteenpäinleikkauksella. Kaikilla toistokerroilla mitatut 3D-pisteiden koordinaatit muunnetaan ensimmäisen toistokerran mittauskoordinaatistoon.

Mitattuihin 3D-pisteisiin sovitetaan pinta muotoa $Z = F(X, Y)$ Delaunay-kolmioinnilla siten, että pinta kulkee jokaisen mitatun pisteen kautta. Ensimmäisen toistokerran mittakuvilta osoitetaan käsin kuvan 29 mukaiset näytepisteet oven pinnalta. Muodostetulta pinnalta lasketaan Z-koordinaatit lineaarisella interpoloinnilla näytepisteiden X ja Y-koordinaateissa. Kolmioidun mallin ulkopuolelle osuvat näytepisteet luokitellaan mittaamattomiksi pisteiksi.



Kuva 29. Näytepisteet auton oven pinnalla toistotestissä.

Luotettavuudella tarkoitetaan mittausjärjestelmän kykyä havaita poikkeavia arvoja (Knight ym. 2010). Tässä tutkimuksessa poikkeavien arvojen esiintyvyyttä selvitetään toistotestillä, jossa poikkeavat arvot luokitellaan laatikkojanakuvion perusteella. Mittauksissa saaduille arvoille lasketaan mediaani, alakvartiili Q_1 ja yläkvartiili Q_3 . Poikkeavien arvojen alarajaksi voidaan määrittellä $Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1)$ ja ylärajaksi $Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1)$. Ala- ja ylärajojen ulkopuolelle jäävät arvot luokitellaan poikkeaviksi havainnoiksi. (Chandola ym. 2009, 30.) Kuvassa 30 on havainnollistettu poikkeavien arvojen tunnistusmenetelmää kymmenen mittapisteen sarjalla. Kuvaan on piirretty mittapisteen mediaani, poikkeavien arvojen alaraja ja ylärajat, ja ympyröity poikkeavat arvot.



Kuva 30. Poikkeavien arvojen tunnistus. Ylä- ja alarajojen ulkopuolella sijaitsevat pisteet luokitellaan poikkeaviksi arvoiksi (ympyröidyt pisteet).

Jokaiselle mitatulle näytepisteelle saadaan 10 arvoa Z-koordinaateille. Näiden arvojen perusteella lasketaan ala- ja ylärajat poikkeaville havainnoille. Eri menetelmien luotettavuuden vertailua varten lasketaan kaikkien poikkeavien havaintojen yhteenlasketut prosenttiosuudet. Lisäksi lasketaan osuudet mittaamattomille pisteille.

Toistotestin lisäksi luotettavuutta arvioidaan visuaalisesti tiheämmän pistepilven mittauksella. Tällä tavalla voidaan arvioida mitkä pinnan alueet on mahdollista saada mitattua. Auton ovi mitataan viivansiirtomenetelmällä, jossa käytetään kuutta pysty- ja vaakasuuntaista viivakuviota. Mitattu pistepilvi on 36-kertaa tiheämpi kuin toistotestissä luodut pistepilvet.

Toistettavuuden arvioinnissa käytetään saman toistotestin mittaustuloksia kuin luotettavuuden mittauksessa. Toistettavuus kuvaa mittaustulosten vaihtelua saman kappaleen mittauksessa samoissa olosuhteissa lyhyen aikavälin sisällä. Toistettavuuden mittauksessa on käytettävä samaa menetelmää ja järjestelmää sekä saman henkilön on suoritettava mittaukset. (ISO 3534-2 2006.). Jokaiselle näytepisteelle lasketaan Z-koordinaattien keskihajonta eri toistokertojen välillä. Keskihajontaa käytetään toistotarkkuuden mittarina.

4 Tulokset

Mittausten tarkkuuden, luotettavuuden ja toistettavuuden arviointia varten tutkimuksessa toteutettiin viiva- ja ympyräkuvioihin perustuvat strukturoidun valon menetelmät. Mitattavina kappaleina olivat taso ja auton ovi. Tässä luvussa esitellään valittujen menetelmien avulla saadut mittaustulokset.

4.1 Tarkkuus

Mittausmenetelmien tarkkuutta selvitettiin tason mittauksella. Mittaustulokset laskettiin jokaiselle pistetiheydelle, piirrekoolle ja kuviotyypille kuudella eri algoritmin asetuksilla. Kaikki tason mittaustulokset on esitetty liitteessä 1. Ympyröihin perustuvassa menetelmässä käytettiin kynnystysmenetelmänä kolmea eri menetelmää, ja keskipisteen laskennassa joko massakeskipistettä tai ellipsin sovitusta. Erot näiden asetusten välillä olivat pieniä, mutta ellipsin sovitusta käytettäessä keskihajonta ja suurin poikkeama olivat yleensä pienempiä kuin massakeskipistemenetelmällä.

Viivoihin perustuvan menetelmän asetuksia olivat lineaarisen suodattimen koko ja viivojen leikkauspisteiden etsinnässä käytettävän ikkunan koko. Viivamenetelmässä pienimmät keskihajonnat saatiin kaikissa mittauksissa 6 mm optiikalla kahdeksannen asteen lineaarisella suodattimella ja 12 mm optiikalla 16-asteen lineaarisella suodattimella. Muilla suodattimen asteilla mittausalueelle saatiin tyypillisesti virhepisteitä tai pisteitä puuttui. Viivojen leikkauspisteiden laskennassa keskihajonnat olivat pienempiä 5 x 5-kokoisella etsintäikkunalla kuin 3 x 3-kokoisella ikkunalla.

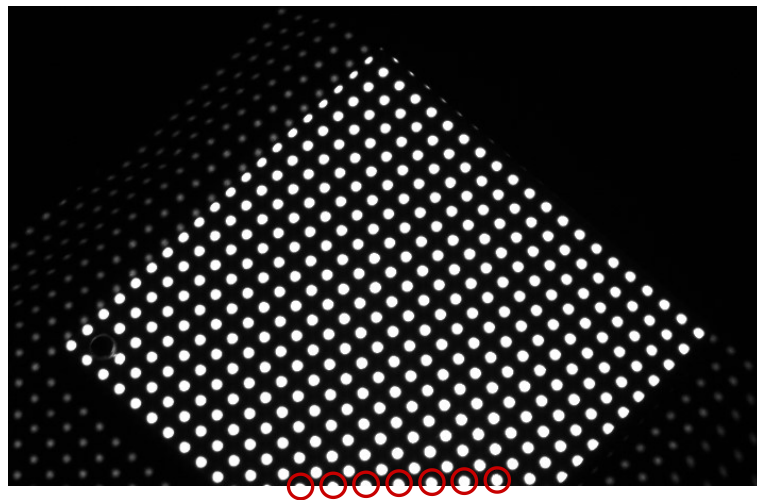
Eri asetuksilla saatujen mittaustulosten perusteella valittiin mittauksiin parhaiten soveltuvat asetukset. Ympyrämenetelmässä asetuksiksi valittiin molemmilla optiikoilla kynnystykseen paikallinen kynnystysmenetelmä ja ympyröiden keskipisteiden määrittämiseen ellipsin sovitukseen perustuva menetelmä. Viivamenetelmässä valittiin viivojen keskikohtien määrittämistä varten kahdeksannen asteen lineaarinen suodatin 6 mm optiikalla ja 16-asteen suodatin 12 mm optiikalla ja leikkauspisteiden etsintäikkunan kooksi 5 x 5-pikseliä. Valituilla asetuksilla saadut mittaustulokset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tason mittaustulokset valituilla asetuksilla Gray-koodaukseen perustuvalla vastinpisteiden etsintämenetelmällä.

Optiikka	Kuviotyyppi	Piirrekoko	Pistetiheys	Keskihajonta (mm)	Suurin poikkeama (mm)
6 mm	ympyrä	iso	harva	0.09	0.42
6 mm	ympyrä	iso	tiheä	0.08	0.51
6 mm	ympyrä	pieni	harva	0.06	0.24
6 mm	ympyrä	pieni	tiheä	0.07	0.40
6 mm	viiva	paksu	harva	0.06	0.24
6 mm	viiva	paksu	tiheä	0.06	0.28
6 mm	viiva	ohut	harva	0.05	0.19
6 mm	viiva	ohut	tiheä	0.05	0.28

Optiikka	Kuviotyyppi	Piirrekoko	Pistetiheys	Keskihajonta (mm)	Suurin poikkeama (mm)
12 mm	ympyrä	iso	harva	0.02	0.10
12 mm	ympyrä	iso	tiheä	0.10	0.74
12 mm	ympyrä	pieni	harva	0.03	0.14
12 mm	ympyrä	pieni	tiheä	0.09	0.59
12 mm	viiva	paksu	harva	0.02	0.08
12 mm	viiva	paksu	tiheä	0.03	0.28
12 mm	viiva	ohut	harva	0.02	0.07
12 mm	viiva	ohut	tiheä	0.02	0.09

Valituilla asetuksilla kaikilla eri kuvioilla saatiin mittausalueelle harvalla pistetiheydellä 64 pistettä ja tiheällä 256 pistettä. Lähes kaikilla kuvioilla 12 mm optiikalla mittaustulosten keskihajonnat ja suurimmat poikkeamat olivat pienempiä kuin 6 mm optiikalla. Ainoastaan isoilla ja pienillä ympyröillä tiheällä pistetiheydellä keskihajonnat olivat suurempia kuin 6 mm optiikalla. Näillä kuvioilla keskihajontaa heikensivät yksittäiset poikkeavat havainnot. Suuremmalla resoluutiolla kahden kameran kuvissa osa ympyröistä sijaitti kuvan reunalla, kuten kuvassa 31 on havainnollistettu. Tällöin vain osa ympyrästä näkyi kuvalla, mikä vaikutti heikentävästi ympyrän keskipisteen määrittämisen tarkkuuteen. Muilla kuvioilla ympyröitä ei ollut kuva-alueen reunoilla.



Kuva 31. Suuremmalla resoluutiolla eli 12 mm optiikalla kahden kameran kuvissa osa ympyröistä oli kuvan reunalla.

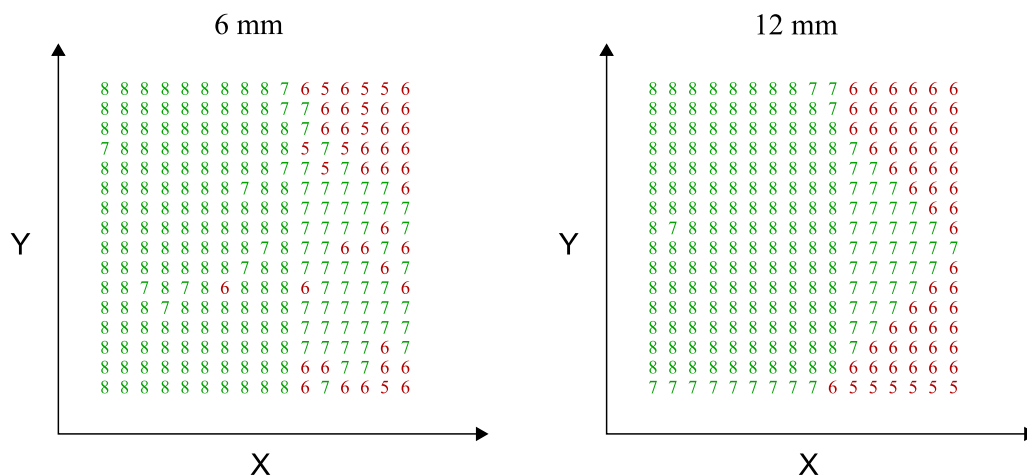
Pienemmällä resoluutiolla eli 6 mm optiikalla pienin keskihajonta oli ohuilla viivoilla ja suurin keskihajonta isoilla ympyröillä. Myös suuremmalla resoluutiolla eli 12 mm optiikalla ohuilla viivoilla saatiin pienemmät keskihajonnat, mutta harvalla pistetiheydellä erot ympyräkuvioiden tuloksiin olivat pieniä. Molemmilla optiikoilla myös ohuiden ja paksujen viivakuvioiden tulosten välillä erot olivat pieniä. Pienemmän resoluution optiikalla tiheillä ympyräkuvioilla kynnystys saattoi yhdistää kahden tai useamman ympyrän alueet kuvalla yhdeksi alueeksi. Tällöin ympyrän keskipisteeksi määriteltiin yhtenäisen alueen keskipiste, mikä heikensi mittaustarkkuutta.

Tässä tutkimuksessa toteutettujen menetelmien lisäksi taso mitattiin Mapvision-ohjelmiston pinnanmittausalgoritmeilla, jolla on mahdollista mitata ympyrämäisiä piirteitä. Algoritmissa vastinpisteiden etsintä on toteutettu epipolaarisuorien avulla. Ympyröiden keskikohdan määrittämisessä on käytetty massakeskipisteen laskentaa, ja kuvat kynnystetään Otsun menetelmällä määrätyn kokoisille kuva-alueille erikseen. Vastinpisteiden etsintämenetelmien vertailua varten mitattuihin pisteisiin sovitettiin taso samalla tavalla kuin edellä. Pisteiden etäisyyksille tasosta laskettiin vastaavat tunnusluvut, jotka on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Tason mittaustulokset ympyräkuviolla epipolaarisuoriin perustuvalla vastinpisteiden etsintämenetelmällä. Puuttuvia pisteitä sisältävät tulokset on merkitty sulkuihin.

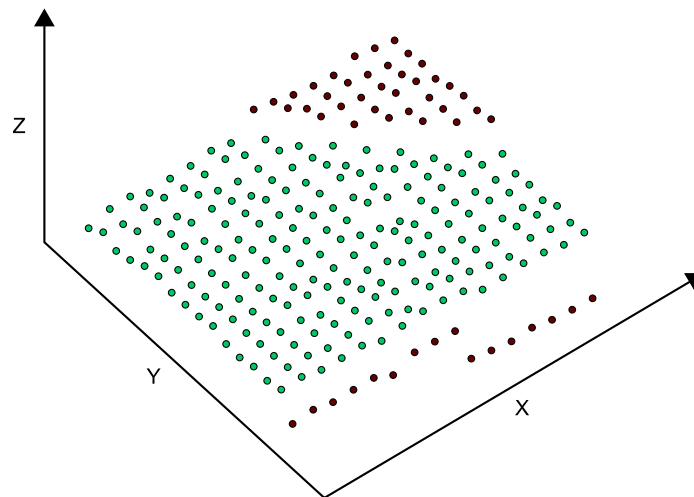
Optiikka	Kuviotyppi	Piirrekoko	Pistetiheys	Keskiahajonta (mm)	Suurin poikkeama (mm)
6 mm	ympyrä	iso	harva	0.03	0.15
6 mm	ympyrä	iso	tiheä	(0.07)	(0.39)
6 mm	ympyrä	pieni	harva	0.03	0.16
6 mm	ympyrä	pieni	tiheä	0.04	0.21
12 mm	ympyrä	iso	harva	0.04	0.18
12 mm	ympyrä	iso	tiheä	(0.03)	(0.23)
12 mm	ympyrä	pieni	harva	0.04	0.18
12 mm	ympyrä	pieni	tiheä	0.04	0.22

Epipolaarisuoriin perustuvan vastinpisteiden etsintämenetelmän avulla saaduissa tuloksissa tason etäisyyksien keskiahajonta oli 0.03 – 0.04 mm niillä kuvioilla, joissa kaikki näkyvät tason pisteet saatiin mitattua. Isoilla ympyröillä tiheällä pistetiheydellä mitattuja pisteitä puuttui 6 mm optiikalla kahdeksan ja 12 mm optiikalla yksi. Keskiahajonnat olivat suurempia 12 mm optiikalla kuin 6 mm optiikalla. Eri optiikoiden kameroiden asettelu oli hieman erilainen, jolloin 12 mm optiikalla tason kulmissa ja yhdellä reunalla oli vähemmän kamerahavaintoja kuin 6 mm optiikalla. Kuvassa 32 on esitetty kamerahavaintojen lukumäärät tason eri kohdissa tiheän pistevälillä pienien ympyräkuvioiden mittaustuloksissa.



Kuva 32. Kamerahavaintojen lukumäärä 6 mm ja 12 mm optiikoilla epipolaarisuoramenetelmän avulla saaduissa tuloksissa tiheällä pistevälillä ja pienillä ympyröillä.

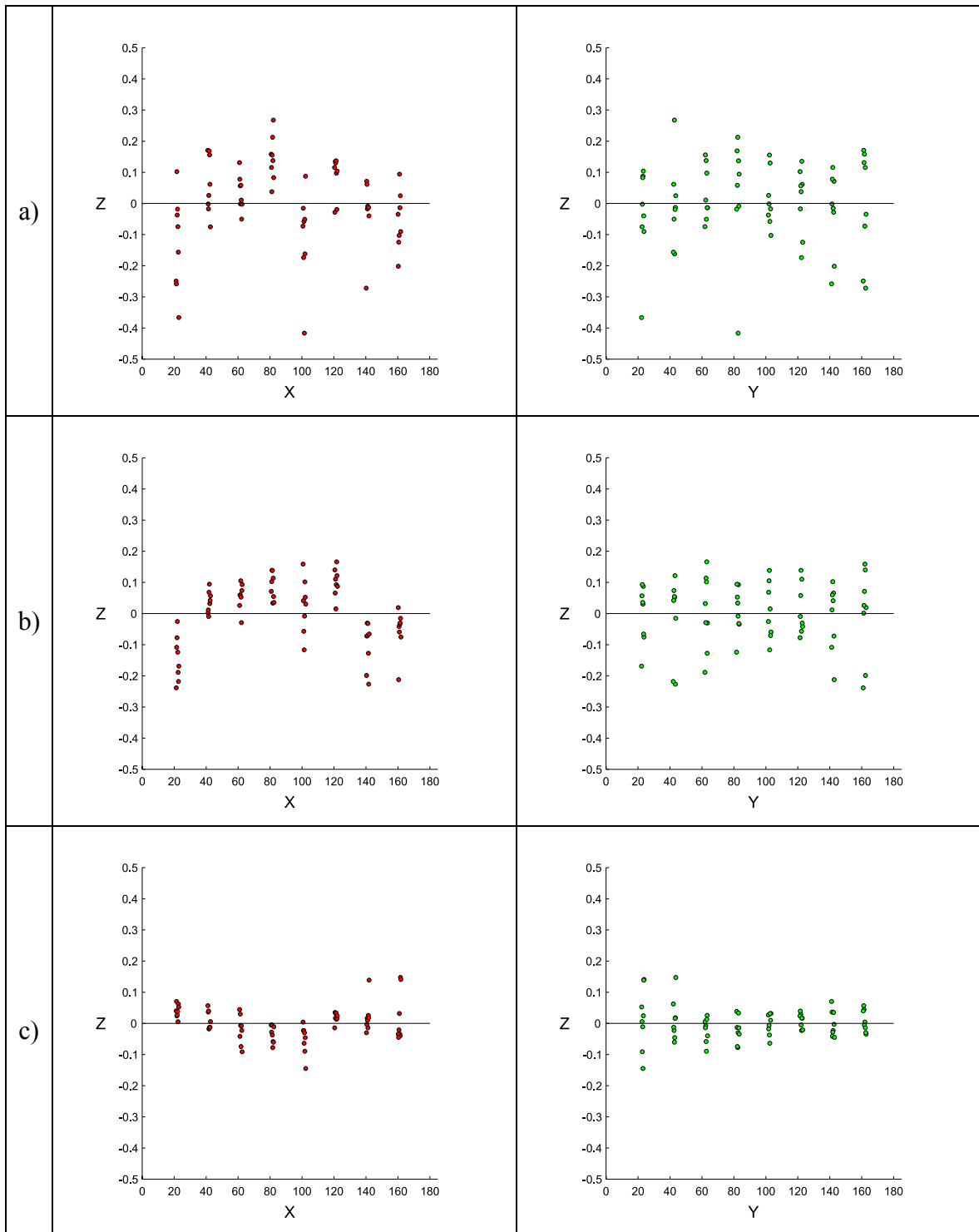
Kuvaan 33 on piirretty 3D-pisteet, jotka on mitattu 12 mm optiikalla tiheällä pistevälillä ja pienillä ympyröillä. Kuvassa on eroteltu sovitetun tason yläpuolella tai alapuolella sijaitsevat poikkeavat pisteet. Tason yhdellä reunalla sijaitsevat pisteet olivat selkeästi muiden pisteiden alapuolella Z-akselin suunnassa. Näillä poikkeavilla havainnoilla oli vähemmän kamerahavaintoja kuin muilla pisteillä. Tason yhdessä kulmassa sijaitsevat pisteet olivat hieman sovitetun tason yläpuolella. Toisaalta myös tason toisessa kulmassa oli yhtä paljon kamerahavaintoja, mutta pisteet sijaitsivat samassa tasossa kuin suurin osa pisteistä. Poikkeavat havainnot vaikuttivat olennaisesti keskihajontaan 12 mm optiikalla.



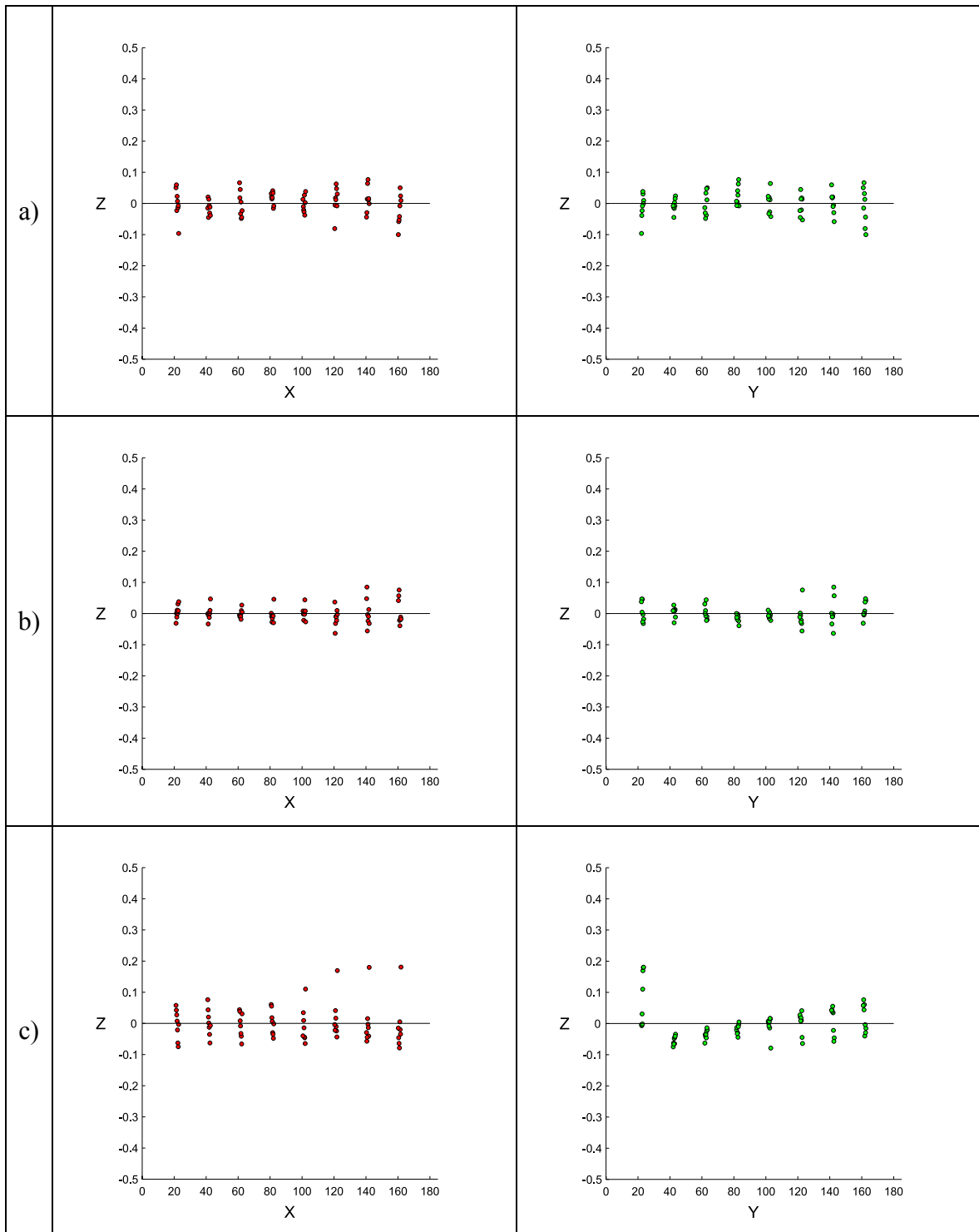
Kuva 33. Mitatut tason 3D-pisteet epipolaarisuoriin perustuvalla vastinpisteiden etsintämenetelmällä 12 mm optiikan järjestelmässä tiheällä pistevälillä ja pienillä ympyröillä. Pisteisiin sovitetun tason alapuolella tai yläpuolella sijaitsevat muista poikkeavat pisteet on merkitty punaisella.

Mitattuja pisteitä tarkasteltiin myös kuvaajilla, joihin piirrettiin mitatut pisteet X, Y ja Z-koordinaattiakselien suuntaisesti. Tällä tavalla voitiin arvioida, miten mitattujen pisteiden etäisyydet tasosta vaihtelevat tason eri kohdissa. Kuvassa 34 on esitetty eri menetelmillä mitatut pisteet X ja Y-koordinaattiakselien suuntaisesti isoilla ympyröillä ja paksuilla viivoilla harvalla pistetiheydellä 6 mm optiikan järjestelmässä, ja kuvassa 35 on vastaavat pisteet 12 mm optiikalla. Kaikki taulukoiden 1 ja 2 tuloksia vastaavat kuvaajat on esitetty liitteessä 1.

Kuvaajien perusteella mittaukset viivakuvioilla sisälsivät vähemmän yksittäisiä poikkeavia arvoja ja mitattujen pisteiden hajonta oli myös X ja Y-suunnassa pienempää kuin ympyräkuvioilla. Piirteiden koon vaikutus mitattujen pisteiden jakaumaan oli pieni, mutta useimmissa tapauksissa ohuiden viivojen ja pienien ympyröiden mittauksissa yksittäisten poikkeamien osuus oli pienempi. Mitattujen pisteiden hajonta oli samansuuruista tason reunoilla ja keskellä. Pisteiden mittauksessa oli kuitenkin havaittavissa aaltomaista vaihtelua, jolloin vierekkäiset pisteet olivat vuorotellen joko alempana tai ylempänä toisiinsa nähden. Aaltomaisuus korostui erityisesti viivakuvioilla 6 mm optiikalla X-akselin suuntaisesti, missä osa mitatuista pisteistä oli selkeästi sovitetun tason alapuolella, kun taas osa pisteistä oli tason yläpuolella.



Kuva 34. Mitatut tason pisteet X ja Y-akselien suunnassa 6 mm optiikalla harvalla pistetiheydellä. a) Isot ympyrät, vastinpisteet Gray-koodauksella. b) Paksut viivat, vastinpisteet Gray-koodauksella. c) Isot ympyrät, vastinpisteet epipolaarisuorilla.

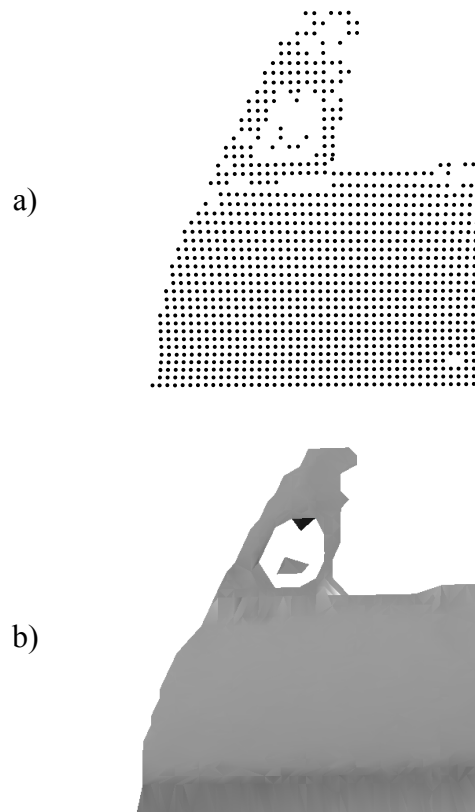


Kuva 35. Mitatut tason pisteet X ja Y-akselien suunnassa 12 mm optiikalla harvalla pistetiheydellä. a) Isot ympyrät, vastinpisteet Gray-koodauksella. b) Paksut viivat, vastinpisteet Gray-koodauksella. c) Isot ympyrät, vastinpisteet epipolaarisuorilla.

Suuremmalla resoluutiolla eli 12 mm optiikalla pisteiden hajonta oli Gray-koodausta käytettäessä kaikilla kuvioilla pienempää kuin pienellä resoluutiolla eli 6 mm optiikalla. Gray-koodauksella erot resoluutioiden välillä olivat suurempia kuin epipolaarisuoriin perustuvalla menetelmällä. Muutamit yksittäiset suuret poikkeamat heikensivät suuremmalla resoluutiolla koko pistejoukon keskihajontaa. Esimerkiksi ympyräkuvioilla tiheällä pistetiheydellä keskihajonnan ero optiikoiden välillä olisi ollut selkeämpi ilman yksittäisiä poikkeamia.

4.2 Luotettavuus

Menetelmien luotettavuutta mitattiin toistotestillä, jossa mittakappaleena oli yksi auton ovi. Oven mittauksessa käytettiin samoja kuvioita kuin tason mittauksessa. Mittausalgoritmien asetukset olivat samoja kuin taulukon 1 mittaustuloksissa. Myös mittapisteiden koordinaatit mitattiin samoilla asetuksilla. Esimerkki tiheään pistevälin isoilla ympyröillä 6 mm optiikalla mitatuista pisteistä ja sen visualisoinnista alfa-muodolla on kuvassa 36.



Kuva 36. Tiheään pistevälin isoilla ympyröillä ja 6 mm optiikalla mitatut koordinaatit ja niiden visualisointi. a) 3D-pistepilvi. b) Pisteistä muodostettu alfa-muoto.

Mittaustulosten luotettavuutta selvitettiin toistotestissä poikkeavien havaintojen lukumäärällä. Lisäksi laskettiin niiden näytepisteiden osuus, joita ei saatu mitattua. Poikkeavien havaintojen ja mittaamattomien näytepisteiden osuudet Gray-koodausta käyttävillä menetelmillä on esitetty taulukossa 3. Taulukossa 4 on vastaavat luvut epipolaarisuoramenetelmällä harvan pistetiheyden ympyräkuvioilla.

Taulukko 3. Oven mittaustulosten luotettavuus Gray-koodaukseen perustuvalla vastinpisteiden etsintämenetelmällä.

Optiikka	Kuviotyyppe	Piirrekoko	Pistetiheys	Poikkeavia havaintoja (%)	Ei mitattuja (%)
6 mm	ympyrä	iso	harva	2.1	0.5
6 mm	ympyrä	iso	tiheä	2.8	0.0
6 mm	ympyrä	pieni	harva	2.0	0.9
6 mm	ympyrä	pieni	tiheä	3.0	0.2
6 mm	viiva	paksu	harva	1.8	0.4
6 mm	viiva	paksu	tiheä	2.7	0.0
6 mm	viiva	ohut	harva	2.0	0.5
6 mm	viiva	ohut	tiheä	1.7	0.0
12 mm	ympyrä	iso	harva	1.9	3.2
12 mm	ympyrä	iso	tiheä	2.9	1.4
12 mm	ympyrä	pieni	harva	2.0	2.9
12 mm	ympyrä	pieni	tiheä	2.5	1.6
12 mm	viiva	paksu	harva	1.6	2.9
12 mm	viiva	paksu	tiheä	1.4	1.9
12 mm	viiva	ohut	harva	2.1	2.9
12 mm	viiva	ohut	tiheä	2.0	2.0

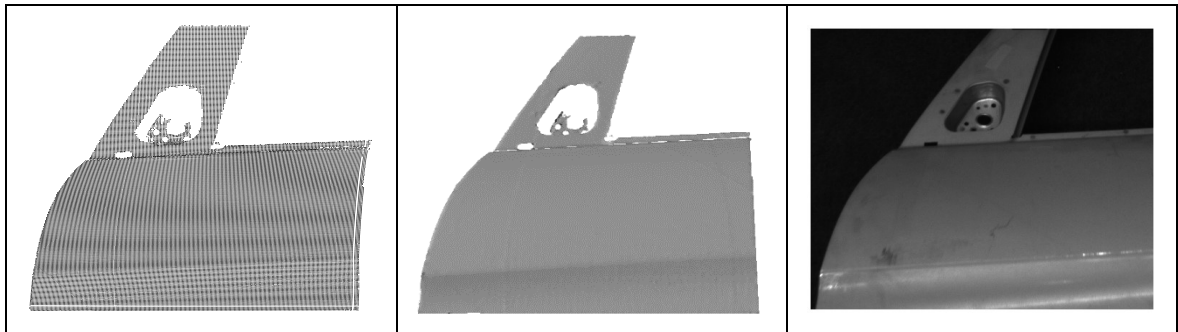
Taulukko 4. Oven mittaustulosten luotettavuus epipolaarisuoriin perustuvalla vastinpisteiden etsintämenetelmällä.

Optiikka	Pistetiheys	Piirrekoko	Kuviotyyppe	Poikkeavia havaintoja (%)	Ei mitattuja (%)
6 mm	harva	iso	ympyrä	1.1	0.2
12 mm	harva	iso	ympyrä	1.9	0.4

Poikkeavien havaintojen osuus kaikista mitatuista pisteistä oli 1 – 3 % riippuen käytetystä kuviotyypistä, optiikasta, pistetiheydestä ja vastinpisteiden etsintämenetelmästä. Viivakuvioilla poikkeavia havaintoja oli hieman vähemmän kuin ympyräkuvioilla. Tiheämmällä pistetiheydellä mitatuissa pisteissä oli enemmän poikkeavia arvoja kuin harvan pistetiheyden kuvioilla. Poikkeavien havaintojen lukumäärä oli pienempi kun vastinpisteiden etsinnässä käytettiin epipolaarisuoria Gray-koodauksen sijaan. Eniten poikkeavia havaintoja oli oven peilin kiinnityskohdan ympäristössä. Suuremman resoluution eli 12 mm optiikan tuloksissa oli enemmän mittaamattomia pisteitä, koska mittausalueen reunoilla oli vähemmän kameroiden kuvahavaintoja.

Luotettavuuden arviointia varten auton ovi mitattiin myös viivansiirtomenetelmällä. Tällä pyrittiin tarkastelemaan visuaalisesti miten pinnan pisteiden mittaus onnistuu eri oven kohdissa tiheämmällä pistevälillä. Menetelmällä saatiin kohdepisteitä erittäin tiheästi laajoilta ja tasaisilta pinnoilta. Reuna-alueet erottuivat selkeästi jyrkkien pinnanvaihteluiden kohdalla. Myös pienet yksityiskohdat, kuten reiät näkyivät pistepilvessä ja siitä muodostetussa visualisoinnissa, koska niiden reunat saatiin mitattua tiheästi. Tiheästä pistepilvestä huolimatta auton oven peilin kiinnityskohtaa ei saatu kokonaan mitattua. Tässä kohdassa pinta on kiiltävä ja siihen heijastettu valo heijastuu ympäröivistä pinnoista

vahvasti. Heijastukset vaikuttivat erityisesti Gray-koodauksen purkuun ja vastinpisteiden etsintä ei siten onnistunut, vaikka viivoilla saatiinkin usein mitattua piirteiden paikat kuvilta. Kuvassa 37 on esitetty menetelmällä tuotettu pistepilvi, alfa-muoto ja yhden kameran kuva kohteesta.

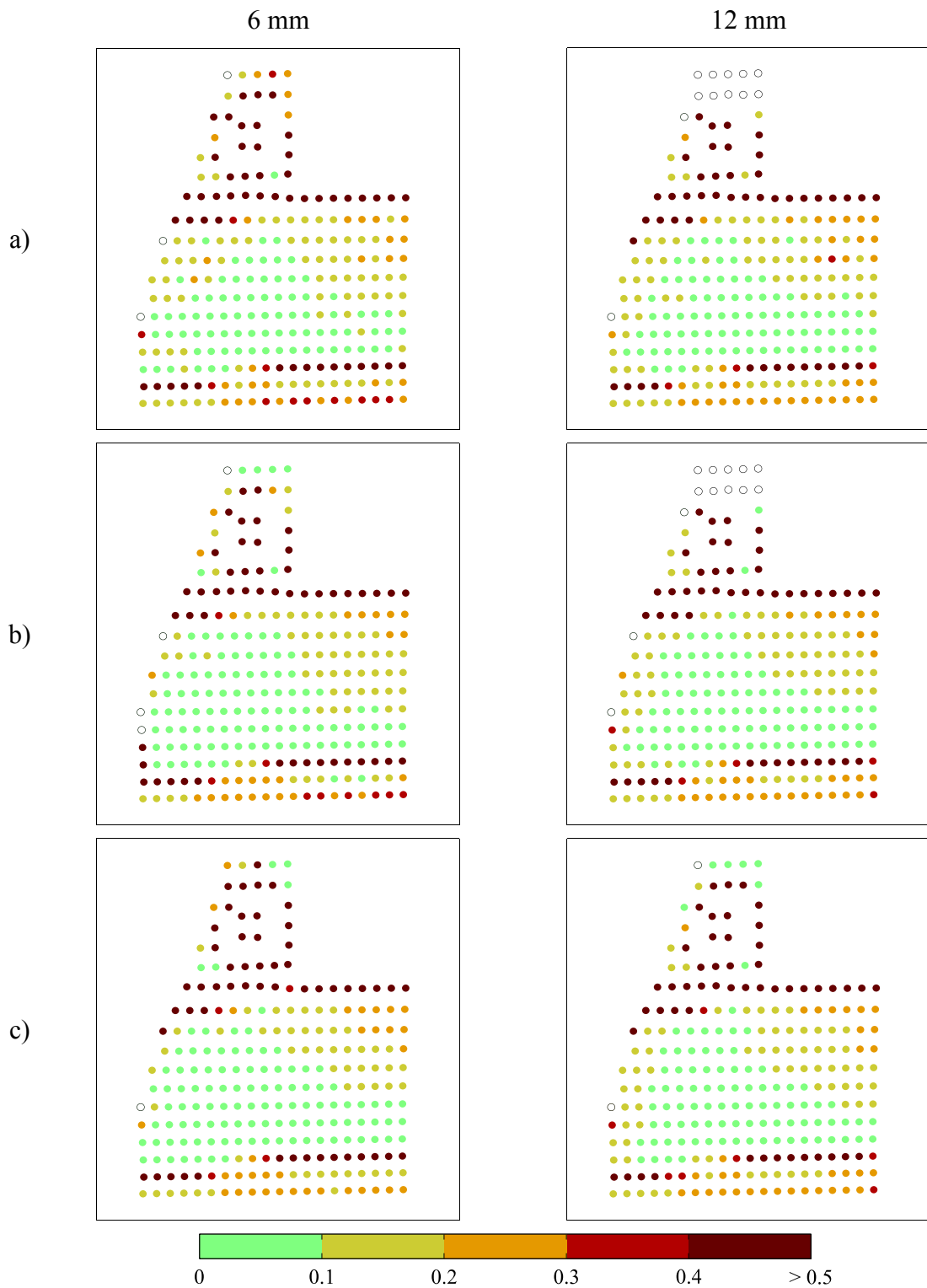


Kuva 37. Viivansiirtomenetelmällä 6 mm optiikalla mitattu 3D-pistepilvi, alfa-muoto ja kuva kohteesta.

4.3 Toistettavuus

Toistettavuuden arvioinnissa tarkasteltiin näytepisteiden keskihajontaa samassa toistotestissä kuin luotettavuuden mittauksessa. Oven mittaustuloksissa keskihajonta oli kaikilla menetelmillä alle 0.3 mm laajoilla tasaisilla pinnoilla. Viivoihin perustuvalla menetelmällä saavutettiin tiheällä pistevälillä 0.02 – 0.05 mm keskihajonta mittausalueen keskiosassa. Keskihajonta oli vastaavalla alueella 0.05 – 0.1 mm ympyräkuvioilla ja harvan pistetiheyden viivakuvioilla. Jyrkkien pinnanvaihteluiden kohdalla keskihajonta oli yli 0.5 mm kuvioityypistä riippumatta. Mittauksissa molempien optiikoiden kamerat oli suunnattu mittausalueen keskelle, jolloin 6 mm optiikalla useampi kamera havaitsi saman pisteen mittausalueen reunalla kuin 12 mm optiikalla. Näin ollen mittaustulosten perusteella keskihajonta oli reuna-alueilla 12 mm optiikalla suurempi kuin 6 mm optiikalla. Kuvassa 38 on esitetty näytepisteiden keskihajonnat mittausalueen eri kohdissa harvan pistetiheyden isoilla ympyröillä ja paksuilla viivoilla mitattuna. Kaikki kuvat näytepisteiden keskihajonnasta eri kuvioilla on esitetty liitteessä 2. Vastinpisteiden etsinnässä vertailumenetelmänä käytetyllä epipolaarisuoramenetelmällä toistotesti mitattiin vain isoilla ympyräkuvioilla.

Kaikilla menetelmillä näytepisteiden keskihajonnat riippuivat vahvasti mittausalueen kohdasta. Näin ollen yksikään menetelmä ei erottunut selkeästi muita paremmaksi esimerkiksi kiiltävillä oven pinnoilla. Harvan ja tiheän pistevälillä erot näkyivät selkeimmin jyrkissä reunoissa, eikä pistetiheydellä ollut tasaisilla pinnoilla suurta vaikutusta keskihajontaan. Piirteiden koon vaikutus keskihajontaan oli pieni, mutta pienemmällä piirteillä saavutettiin yleensä pienempi keskihajonta. Epipolaarisuoriin perustuvalla vastinpisteiden etsintämenetelmällä saadut tulokset olivat 12 mm optiikalla samanlaisia kuin Gray-koodausmenetelmän tuloksissa. Pienemmällä resoluutiolla eli 6 mm optiikalla epipolaarisuoramenetelmällä keskihajonnat olivat pienempiä kuin Gray-koodaukseen perustuvalla menetelmällä. Tämä johtui siitä että Gray-koodauksen purku ei onnistunut yhtä hyvin 6 mm optiikalla kuin 12 mm optiikalla. Gray-koodauksen viimeisellä kuviolla valaistun ja valaisemattoman alueen raja ei näkynyt pienemmän resoluution kuvilla yhtä selkeästi kuin suuremmalla resoluutiolla.



Kuva 38. Oven näytepisteiden keskihajonnat 10 mittauskerran välillä 6 mm ja 12 mm optiikoilla harvalla pistetiheydellä. a) Isot ympyrät, vastinpisteet Gray-koodauksella, b) Paksut viivat, vastinpisteet Gray-koodauksella, c) Isot ympyrät, vastinpisteet epipolaarisuorilla.

4.4 Mittausaika

Eri menetelmille laskettiin mittausajat, jotta voitiin arvioida niiden soveltuvuutta nopeaan mittaukseen tuotantolinjalla. Mittaustulokset laskettiin työpöytätietokoneella, jossa oli Intel Core2 Quad CPU 2.4Ghz-prosessori ja 2GB RAM-muistia. Piirteiden irroituksen ja vastinpisteiden etsinnän laskennassa sekä tulosten analysoinnissa käytettiin Matlab 8.2-ohjelmistoa. Mittaus-järjestelmän kalibrointi, kohteen 3D-koordinaattien laskenta ja koordinaatistomuunnokset laskettiin Mapvision 5.10.5-ohjelmistolla.

Mittausajat on laskettu 6 mm optiikan mittausjärjestelmällä tiheän pistevälin kuvioilla. Kuvien ottoon kuluviin aikoihin on lisätty 0.1 s viive jokaiselle kuvion vaihdolle. Viiveen tarkoitus on varmistaa, että kaikki kamerat ovat ottaneet kuvan ennen kuin kuvio vaihtuu. Kuvien valotusaika oli 80 ms. Piirteiden irroituksen laskenta-aikaan kuuluivat kuvan esikäsittely ja piirteiden etsintä kuvilta. Ympyräkuvioilla kuvien esikäsittely sisälsi kuvien normalisoinnin ja kynnestyksen. Viivakuvioilla esikäsittelyyn kuuluivat kuvien normalisointi ja viivojen suunnan laskenta. Viivojen etsinnän lisäksi piirteiden irroitukseen käytettyyn aikaan on lisätty viivojen leikkausten laskentaan kulunut aika. Vastinpisteiden etsinnän laskenta-aikaan on otettu mukaan molemmilla menetelmillä Gray-koodien purku kuvilta ja jokaisen mitattua pistettä vastaavan koodin haku. Tason ja oven mittausaikojen vertailu on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Tutkimuksessa toteutettujen menetelmien mittausaikojen vertailu.

Mitattava kappale	Mittausaika (s)			
	Taso		Ovi	
	Kuviotyyppi	Ympyrä	Viiva	Ympyrä
Kuvien otto	33	34	34	35
Piirteiden irroitus	3	106	5	128
Vastinpisteiden etsintä	4	8	4	10
3D-pisteiden laskenta	2	4	4	3
Yhteensä	42	152	47	176

Kahdeksan kameran kuvanottoajaksi mitattiin 0.96 sekuntia. Mittausjärjestelmä otti kuvat yksi kamera kerrallaan järjestyksessä ensimmäisestä kamerasta viimeiseen eli eri kameroiden kuvienottohetkellä oli lyhyt viive. Tason mittauksessa ympyröihin perustuvalla menetelmällä kuvioden määrä oli 31, joista 28 oli Gray-kuvioita, yksi valaistu ja yksi valaisematon sekä yksi piirrekuvio. Viivoihin perustuvassa menetelmässä kuvioita oli yksi enemmän, koska pysty- ja vaakasuuntaiset viivat heijastettiin erikseen. Oven mittauksessa otettiin lisäksi yksi kuva mittakopin LED-valaistuksella koordinaatistomuunnoksessa käytettyjen tähyksien mittausta varten.

Piirteiden irroitukseen kuluva aika oli lyhyt ympyräkuvioilla. Viivakuvioilla piirteiden irroituksessa viivojen leikkauksien laskentaan kului noin 90 % laskenta-ajasta. Tason mittauksessa piirteiden irroitukseen ja vastinpisteiden laskentaan kului vähemmän aikaa, koska näkyvien valopisteiden määrä oli pienempi kuin auton oven mittauksessa. Viivakuvioilla laskettavien pisteiden määrä oli suurempi kuin ympyräkuvioilla, koska viivakuvien käsittelyyn ei kuulunut kynnystä, joka poistaa heikosti näkyvät piirteet. Oven mittauksessa pisteiden määrän ero ei ollut niin suuri kuin tasolla, koska suurin osa pisteistä näkyi oven pinnalla. Kohteen 3D-pisteiden laskenta-aikaan vaikutti myös algoritmille

asetettujen rajaehtojen täyttyminen. Kaikkia mahdollisia kamerayhdistelmiä ei käyty läpi, jos laskentaa varten oli riittävästi kamerahavaintoja ja hyvyysluku oli riittävän pieni.

Oven mittauksessa käytettiin myös viivansiirtomenetelmää. Siinä heijastettavien kuvioiden määrä oli yhteensä 42. Menetelmällä kului kuvien ottoon ja laskentaan yhteensä noin 65 minuuttia. Suurin osa tästä ajasta kului viivojen leikkauspisteiden laskentaan. Jokaisella kuudella pystysuuntaisella viivakuviolla laskettiin leikkauspisteet kaikilla kuudella eri vaakasuuntaisella viivakuviolla. Viivojen leikkauspisteet laskettiin siten kaikkien viivakuvioiden yhdistelmien kesken.

Epipolaarisuoriin perustuvalla Mapvision-ohjelmiston pinnanmittausalgoritmilla kohdekoordinaatit saatiin laskettua yhdellä ympyräkuviolla. Tason ja oven mittausaikojen laskennassa käytettiin 6 mm optiikan mittausjärjestelmää ja harvan pistetiheyden isoja ympyröitä. Laskenta-ajat mittauksen eri vaiheille on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Mapvision-ohjelmiston pinnanmittausmenetelmän mittausajat ympyräkuviolla.

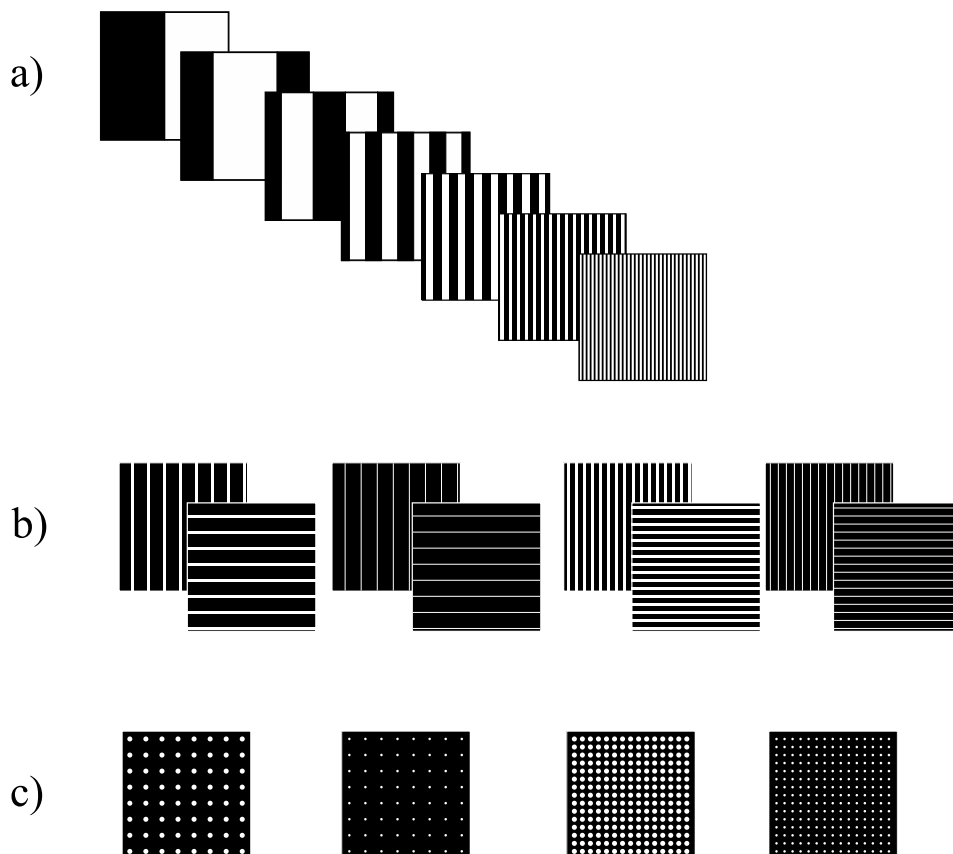
Mitattava kappale	Mittausaika (s)	
	Taso	Ovi
Kuviotyyppi	Ympyrä	Ympyrä
Kuvien otto	1	1
Piirteiden irroitus	1	2
Vastinpisteiden etsintä	39	45
3D-pisteiden laskenta	1	1
Yhteensä	42	49

Mittausaikojen perusteella suurin osa ajasta kului pinnanmittausalgoritmissa vastinpisteiden etsintään epipolaarisuorien avulla. Kohteen 3D-pisteiden laskenta-aika on pienempi kuin taulukon 5 laskenta-ajoissa, koska algoritmissa ei laskettu kaikkia mahdollisia kameroiden yhdistelmiä. Sen sijaan algoritmi käytti yhtä arvoa hyvyysluvulle, jonka perusteella virheelliset havainnot poistettiin. Vastinpisteiden etsintä oli selkeästi hitaampaa epipolaarisuorien avulla kuin Gray-koodauksella. Toisaalta epipolaarisuoramenetelmällä vastinpisteiden etsintään ei tarvittu muita kuvioita kuin piirrekuvat, jolloin kuvanottoaika oli huomattavasti lyhyempi. Mapvision-ohjelmiston pinnanmittausalgoritmin laskenta-aikoja ei voida suoraan verrata tässä tutkimuksessa Matlab-ohjelmistolla toteutettujen menetelmien vastaaviin aikoihin. Matlab on tulkattava ohjelmointikieli, joten sen laskenta-ajat ovat usein hitaampia kuin käännettävillä ohjelmointikielillä.

5 Yhteenveto

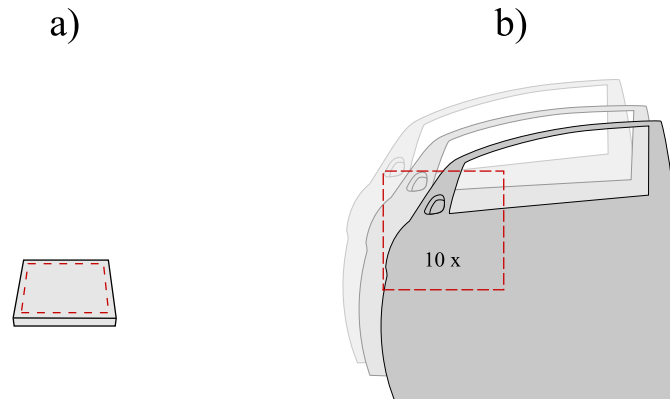
Tässä tutkimuksessa tutkittiin strukturoitua valoon perustuvia menetelmiä ja niiden vankkuutta kappaleen 3D-pinnan mittauksessa monikamerajärjestelmällä. Tutkimuksen sovelluskohteena oli autoteollisuuden laadunvarmistus. Teoriaosuudessa vertailtiin eri menetelmiä ja arvioitiin niiden soveltuvuutta monikamerajärjestelmään. Teoriaosuuden perusteella vankimman menetelmän valinta riippuu olennaisesti sovelluskohteen asettamista rajaehdoista. Liikkuvan tai värinälle altistuvan kohteen pinnan mittauksessa vankimmat mittaustulokset saavutetaan yhden kuvanoton menetelmillä. Jos kohteen voidaan olettaa pysyvän paikallaan, vankemmat mittaukset saadaan yleensä heijastamalla kohteeseen useampi erilainen kuvio peräkkäin. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella yksi vankimmista menetelmistä pinnan mittaamiseen monikamerajärjestelmällä perustuu pysty- ja vaakasuuntaisten viivojen heijastamiseen kohteeseen.

Teoriaosuuden perusteella valittiin toteutettavaksi viiva- ja ympyräkuvioihin perustuvat menetelmät. Vastinpisteiden etsinnässä käytettiin Gray-koodausta ja kokeiltiin lisäksi myös epipolaarisuoriin perustuvaa menetelmää. Kokeellisessa osuudessa selvitettiin valittujen menetelmien tarkkuutta, luotettavuutta ja toistettavuutta. Viiva- ja ympyräkuvioissa käytettiin kahta eri pistetiheyttä ja piirrekokoa. Kuvassa 39 on esitetty mittauksissa käytetyt strukturoidun valon kuvioityypit.



Kuva 39. Tutkimuksen kokeellisessa osuudessa käytetyt strukturoidun valon kuvioityypit. a) Gray-kuviot. b) Pysty- ja vaakasuuntaiset viivakuviot kahdella eri viivan paksuudella ja viivatiheydellä. c) Ympyräkuviot kahdella eri ympyrän koolla ja pistetiheydellä.

Tutkimuksen kokeellisia mittauksia varten rakennettiin monikamerajärjestelmä, jossa strukturoidun valon kuviot heijastettiin yhdellä projektorilla. Mittausjärjestelmässä oli yhteensä 16 kameraa kahdella eri optiikalla. Mittakappaleina käytettiin tasoa ja auton ovea, joista mitattiin kuvan 40 mukaiset rajatut alueet. Mitattu taso oli tasomainen 0.01 mm tarkkuudella, ja sen mittauksella pyrittiin vertailemaan eri menetelmien tarkkuutta. Mittausten luotettavuuden ja toistettavuuden vertailua varten auton ovea mitattiin toistotestillä 10 kertaa.



Kuva 40. Mittauksissa käytetyt kappaleet ja niistä mitatut alueet. a) Taso. b) Yksi auton ovi, jota mitattiin toistotestillä 10 kertaa.

Menetelmien vankkuudella tarkoitettiin tässä tutkimuksessa mittaustulosten tarkkuutta, luotettavuutta ja toistettavuutta. Taulukossa 7 on esitetty menetelmien vankkuuden vertailu. Tuloksiin vaikutti mittauksissa käytetty optiikka, pistetiheys ja piirteiden koko. Taulukon arvot kuvaavat keskihajonnan tai poikkeavien havaintojen osuuden vaihteluväliä. Tulokset on jaettu kuviotyypin ja vastinpisteiden etsintämenetelmän mukaan.

Taulukko 7. Mittausmenetelmien tarkkuuden, luotettavuuden ja toistettavuuden vertailu.

	Mittari	Kappale	Alue	Gray-koodaus		Epipolaari
				Ympyrä	Viiva	Ympyrä
Tarkkuus	Keskihajonta (mm)	Taso	Keskiosa (15 x 15 cm)	0.02 – 0.10	0.02 – 0.06	0.03 – 0.07
Luotettavuus	Poikkeavat havainnot (%)	Auton ovi	Koko mittaalue (37 x 53 cm)	1.9 – 3.0	1.4 – 2.7	1.1 – 1.9
Toistettavuus	Keskihajonta (mm)	Auton ovi	Laajat tasaiset pinnat	0.05 - 0.3	0.02 - 0.2	0.02 - 0.2
			Reuna-alueet, jyrkät pinnat	> 0.5	> 0.5	> 0.5

Tarkkuutta mitattiin sovittamalla taso mitattuihin pisteisiin ja laskemalla keskihajonta pisteiden ja sovitetun tason etäisyyksistä. Viiva- ja ympyräkuvioilla saavutettiin parhaimmillaan 0.02 mm mittaustarkkuus. Heikoin mittaustarkkuus oli 0.1 mm isoilla ympyräkuvioilla. Suuremmalla resoluutiolla eli 12 mm optiikalla mittaustarkkuus oli parempi kuin 6 mm optiikalla.

Mittausten luotettavuutta selvitettiin poikkeavien arvojen tunnistuksella oven mittauksen toistotestissä. Poikkeavien havaintojen osuus oli 1 – 3 %. Viivakuvioilla oli yleensä hieman vähemmän poikkeavia havaintoja kuin ympyräkuvioilla. Kuitenkin epipolaarisuoriin perustuvalla vastinpisteiden etsintämenetelmällä mitattuna ympyräkuvioilla poikkeavien havaintojen osuus oli pienempi kuin viivakuvioilla. Eniten poikkeavia havaintoja oli jyrkkien pintojen läheisyydessä.

Toistettavuuden vertailua varten mitattiin auton oven pinnalta 256 näytepisteen keskihajontaa eri mittauskertojen välillä. Viivakuvioilla toistotarkkuus oli parhaimmillaan 0.02 – 0.05 mm. Tyypillinen toistotarkkuus laajoilla ja tasaisilla pinnoilla oli kuitenkin 0.02 – 0.2 mm. Ympyräkuvioilla toistotarkkuus oli 0.05 – 0.1 mm mittausalueen keskiosassa. Muilla laajoilla pinnoilla toistotarkkuus oli 0.05 – 0.3 mm. Epipolaarisuoriin perustuvalla vastinpisteiden etsintämenetelmän avulla ympyräkuvioilla toistettavuus oli samaa luokkaa kuin viivakuvioilla. Kaikilla menetelmillä toistotarkkuus reuna-alueilla ja jyrkkien pinnanvaihteluiden lähellä oli yli 0.5 mm. Näillä alueilla kohteeseen heijastetut pisteet saattoivat jäädä kokonaan mittaamatta.

Tässä tutkimuksessa saatua tason mittaustarkkuutta voidaan verrata Gühringin (2001) tuloksiin, jossa koeasetelma oli samanlainen. LCD-projektorin ja kahden tai kolmen kameran järjestelmällä mitattujen pisteiden keskihajonta oli 0.03 mm ja suurin poikkeama tasosta 0.28 mm. Tässä tutkimuksessa toteutetulla vastaavalla menetelmällä ja kahdeksan kameran järjestelmällä saatiin parhaimmillaan tason keskihajonnaksi 0.02 mm, jolloin suurin poikkeama oli 0.07 mm tasosta. Gühringin tutkimuksessa oli myös havaittu mittapisteesä samanlaista aaltomaista vaihtelua kuin tämän tutkimuksen tuloksissa. Siinä LCD-projektorin pikselirakenne aiheutti moiré-kuvioita tason mittauspisteiden poikkeamista muodostettuun kuvaan.

Teollisuuden mittausjärjestelmissä käytetään usein vaiheen laskentaan perustuvia menetelmiä. Näillä menetelmillä voidaan saavuttaa käytännössä 0.05 – 0.1 mm tarkkuus kun kohteen koko on 1 x 1 x 0.3 metriä. Järjestelmiä tarjoavat useat kaupalliset yritykset kuten Breuckmann, GOM, Steinbichler ja Vialux. (Luhmann 2010, 564–565.) Vaiheen laskentaan perustuvia menetelmiä voitaisiin soveltaa myös monikamerajärjestelmässä. Vastinpisteet eri kuvien välillä on kuitenkin etsittävä esimerkiksi passiivisen stereokuvauksen yhteensovitusmenetelmillä (Pribanic ym. 2012, 1019).

Rakennetussa mittausjärjestelmässä kameroiden etäisyys kohteesta oli noin metrin luokkaa. Käytännössä järjestelmä soveltuu myös mittauksiin pidemmältä etäisyydeltä. Etäisyyttä rajoittaa ainoastaan heijastettujen kuvioden näkyvyys kohteen pinnalla. Kaupallisten mittausjärjestelmien toimintaetäisyys teollisuuskäytössä on tyypillisesti alle yksi metri (Bi & Wang 2010, 407). Blais (2004) on koonnut useiden eri mittausjärjestelmien toimintaetäisyyksiä ja tarkkuuksia. Näiden perusteella voidaan päätellä että järjestelmän tarkkuus on olennaisesti riippuvainen kohteen etäisyydestä suhteessa mittalaitteeseen.

Tutkimuksessa käytetyllä epipolaarisuoriin perustuvalla yhden kuvanoton menetelmällä saavutettiin 0.03 mm tarkkuus tasolla. Xu ym. (2011, 7) mittasivat yhden M-taulukkokuvion menetelmällä auton pilaria, ovea ja tuulilasia. Mittausjärjestelmä koostui neljästä

projektorista ja neljästä kamerasta, joista muodostettiin aina yksi projektorin ja kameran pari. Heidän mittausjärjestelmällä saavutettiin parhaimmillaan 0.18 mm mittaustarkkuus.

Vastinpisteiden etsinnässä käytetty Gray-koodaus osoittautui luotettavaksi menetelmäksi pinnoilla, joissa heijastukset ja pinnan vaihtelut ovat kohtuullisia. Pinnan heijastukset aiheuttavat virheitä Gray-kuviosarjan paksujen raitojen kuvioilla, ja sironta kohteen pinnasta sumentavat ohuita raitoja. Tästä johtuen Gray-koodien luotettavuus heikkenee. Gray-koodien sijaan voidaan käyttää myös XOR-koodeja. (Gupta ym. 2013.) Jatkotutkimushaasteena voisi olla selvittää saadaanko vastinpisteiden etsinnän luotettavuutta parannettua XOR-koodeilla. Kuvajaksokoodaus Gray-koodeilla vaatii paljon kuvia, mikä heikentää menetelmän käytettävyyttä esimerkiksi tuotantolinjalla. Tällöin kuvajaksokoodausta voidaan kuitenkin hyödyntää tunnetun osan mittauksissa, sillä vastinpisteet on mahdollista opettaa etukäteen järjestelmälle.

Monikamerajärjestelmässä voidaan hyödyntää kahden tai useamman kuvan geometriaa vastinpisteiden etsinnässä. Tutkimustulokset osoittivat että epipolaarisuoriin perustuvalla vastinpisteiden etsinnällä saavutetaan vähintään yhtä hyviä mittaustuloksia kuin Gray-koodauksella. Menetelmän etuna on tarvittavien kuvien pienempi määrä, ja ympyräkuvioilla menetelmää voitaisiin käyttää myös liikkuvien kohteiden mittaukseen. Menetelmän laskenta-aika on kuitenkin suurempi kuin Gray-koodauksella. Toisaalta Gray-koodauksessa kuvanottoaika on huomattavasti pidempi, mitä on vaikeampi nopeuttaa kuin laskenta-aikaa.

Kuvioiden heijastukseen käytetty projektori asettaa rajoitteita kuvioiden muodostamiselle. Ympyröiden halkaisija on oltava käytännössä vähintään 5 pikseliä, jotta ympyrä on ympyrämäinen kun se heijastetaan projektorilla. Ympyröiden suurempi koko vaikuttaa niiden tarkkuuteen heikentävästi jyrkkien pinnanvaihteluiden kohdalla tai kuvan reunalueilla, jolloin isosta ympyrästä saattaa näkyä vain osa. Ongelma on sama myös paksuilla viivoilla. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella ohuilla viivoilla saavutetaan parempi tarkkuus. Projektorilla on mahdollista heijastaa yhden pikselin levyinen viiva. Projektorin etäisyydellä kohteesta on olennainen vaikutus piirteiden kokoon kohteen pinnalla. Valo myös leviää kohteessa, joten viivat tulevat leveämmiksi kuin miten projektori ne heijastaa.

Kameroiden resoluution vaikutusta mittaustuloksiin selvitettiin tässä tutkimuksessa rakentamalla kaksi toisistaan riippumatonta kahdeksan kameran mittausjärjestelmää eri optiikoilla. Resoluution kasvattamisesta oli hyötyä erityisesti Gray-koodauksessa. Suuremmalla resoluutiolla eli 12 mm optiikalla Gray-koodijakson kuviot saatiin luotettavammin purettua, koska valaistun ja valaisemattoman alueen erot näkyivät selkeämmin kuvilla. Epipolaarisuoriin perustuvalla vastinpisteiden etsintämenetelmällä resoluution kasvattamisesta ei ollut yhtä merkittävää etua kuin Gray-koodauksessa, mutta mittauspisteiden hajonta oli pienempää kuin pienemmällä resoluutiolla.

Auton oven toistomittauksessa kaikkien mittausten pistepilvet siirrettiin samaan koordinaatistoon oveen kiinnitettyjen ympyrätähysten avulla. Tähyksen mittauksen ja koordinaatiston muunnoksen virheet kasautuvat muunnettuihin koordinaattien virheisiin. Suuremman resoluution mittausjärjestelmässä kaikki tähykset eivät näkyneet kuvilla yhtä monella kameralla kuin pienemmän resoluution järjestelmässä. Näin ollen mittausalueen reunalla sijaitsevien tähyksen koordinaattien mittausta oli epätarkempaa 12 mm optiikalla kuin 6 mm optiikalla. Pienempi määrä kamerahavaintoja vaikutti myös heijastettavien piirteiden mittauksen tarkkuuteen heikentävästi.

Ympyröiden keskikohtien määrittämiseen vaikuttaa olennaisesti kuvan kynnystys. Ympyrän keskikohdan määrittämisessä käytettiin ellipsin sovittusta tai massakeskipisteen laskentaa.

Kynnystämällä menetetään kuitenkin harmaasävyarvot, joita voitaisiin käyttää tarkemmassa keskikohdan määrittämisessä. Ellipsin sovituksella ja massakeskipisteen laskentaa vertailtiin tason mittauksessa. Tuloksista ilmeni, että ellipsin sovituksella saavutetaan hieman parempi ympyrän keskikohdan määrittäminen. Kuitenkaan ero massakeskipistemenetelmään ei ollut merkittävä.

Viivojen keskikohdan määrittämisessä käytetyllä Blais & Riouxin (1986) lineaarisella suodattimella saavutetaan paras tarkkuus kun viivat ovat pysty- tai vaakasuuntaisia. Lisäksi suodattimen aste on valittava sopivaksi viivan paksuuden mukaan. Monikamerajärjestelmässä kameroiden suuntaus voi olla käytännössä mielivaltaisen, joten viivat voivat näkyä kameroilla vaihtelevassa kulmassa. Jatkotutkimuksissa voitaisiin tutkia, millaisia tuloksia saadaan esimerkiksi Stegerin (2013) viivojen keskikohtien määrittämiseen tarkoitettulla menetelmällä. Samankaltaista menetelmää on käytetty muun muassa Yangin ym. (2008) viivansiirto-menetelmän toteutuksessa.

Ympyräkuvioiden saavutetaan merkittävästi lyhyempi laskenta-aika kuin vastaavilla viivakuvioiden saavutetaan. Ero johtuu pääosin viivojen leikkauspisteiden laskennan hitaudesta. Leikkauspisteiden laskennassa käytettiin etsintäikkunaa, jonka johdosta tarkasteltavien pikselien määrä on moninkertainen. Piirteiden ja vastinpisteiden etsinnässä käytetyt algoritmit toteutettiin Matlabilla, jonka suorituskyky on heikompi kuin alemman tason ohjelmointikielillä. Mittausten laskentaa voitaisiin nopeuttaa huomattavasti rinnakkaislaskennan avulla.

Tutkimuksessa kokeiltiin myös viivansiirtomenetelmää erittäin tiheän pintamallin muodostamisessa. Pysty- ja vaakasuuntaisten viivojen heijastaminen erikseen vähentää tarvittavien kuvien määrää, koska niiden avulla voidaan laskea viivojen leikkauspisteet kaikkien mahdollisten viivojen yhdistelmien kesken. Jos viivansiirtomenetelmässä käytetään kuutta viivan siirtoa, on heijastettavien piirrekuvioiden määrä yhteensä 12. Jos taas heijastettavina piirteinä käytettäisiin ympyröitä, tarvittava piirrekuvioiden määrä olisi 36. Menetelmällä voidaan myös helposti säätää pistetiheyttä vähentämällä tai lisäämällä viivan siirtojen määrää. Tässä tutkimuksessa keskityttiin eri kuviotyypin vertailuun pienemmällä pistetiheydellä. Jatkotutkimuksissa voisi tutkia viivansiirtomenetelmää laajemmin, ja hyödyntää myös menetelmässä vastinpisteiden etsintää epipolaarisuorien avulla.

Tason mittaustuloksista ei voida suoraan tehdä johtopäätöksiä eri menetelmien soveltuvuudesta monimutkaisten pintojen, kuten auton osien mittaamiseen. Silti tason mittaus antaa mahdollisuuden algoritmien asetusten hienosäätöön ja mahdollistaa menetelmien suorituskyvyn vertailun tasaisilla pinnoilla. Sen sijaan auton oven toistomittauksella pyrittiin luomaan tuotantolinjan mittausta vastaava mittaustilanne. Toistamalla mittaukset useampaan kertaan virheet mittaustilanteessa tai käytetyissä menetelmissä paljastuvat helpommin. Toistomittauksella ei kuitenkaan voida tunnistaa mahdollisia systemaattisia virheitä mittauksissa.

Tämän tutkimuksen tulokset eivät ole yleistettävissä kaikkiin sovelluskohteisiin, koska mittaustilanne, mitattavat kappaleet ja sovelluskohteen vaatimukset voivat olla hyvin erilaisia. Tutkimuksen mittaustilanne oli hyvin kontrolloitu, joten esimerkiksi valaistuksessa ympäristössä mittaustulokset olisivat todennäköisesti heikompia. Tulokset voidaan kuitenkin yleistää samantyyppisiin mittaustehtäviin, joissa sovelluskohteiden teollisuuden laadunvarmistus.

Tutkimuksen perusteella monikamerajärjestelmästä on mahdollista rakentaa pinnan mittaukseen käytettävä mittausjärjestelmä, jota voidaan käyttää autoteollisuuden laadunvarmistuksessa auton oven laajojen pintojen mittaukseen. Kiiltävien ja jyrkkien pintojen mittausta on vielä kehitettävä, koska niiden mittauksen luotettavuus osoittautui heikoksi. Menetelmien suorituskykyä on myös tutkittava erilaisilla auton osilla, jotta voidaan arvioida mittausjärjestelmän soveltuvuutta tuotantokäyttöön.

Lähteet

- Aliaga, D. G. & Xu, Y. (2010). A Self-calibrating method for photogeometric acquisition of 3D objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 32:4. 747–754. DOI:10.1109/TPAMI.2009.202. ISSN 0162-8828.
- Ben-Hamadou, A. & Soussen, C. & Daul, C. & Blondel, W. & Wolf, D. (2013). Flexible calibration of structured-light systems projecting point patterns. *Computer Vision and Image Understanding*. Vol. 117:10. 1468–1481. DOI:10.1016/j.cviu.2013.06.002. ISSN 1077-3142.
- Bi, Z. M. & Wang, L. (2010). Advances in 3D data acquisition and processing for industrial applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 26:5. 403–413. DOI:10.1016/j.rcim.2010.03.003. ISSN 0736-5845.
- Blais, F. (2004). Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging*. Vol. 13:1. 231–243. DOI:10.1117/1.1631921. ISSN 1017-9909.
- Blais, F. & Rioux, M. (1986). Real-time numerical peak detector. *Signal Processing*. Vol. 11:2. 145–155. DOI:10.1016/0165-1684(86)90033-2. ISSN 0165-1684.
- Boyer, K. L. & Kak, A. C. (1987). Color-Encoded Structured Light for Rapid Active Ranging. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 9:1. 14–28. DOI:10.1109/TPAMI.1987.4767869. ISSN 0162-8828.
- Carrhill, B. & Hummel, R. (1985). Experiments with the intensity ratio depth sensor. *Computer Vision, Graphics, & Image Processing*. Vol. 32:3. 337–358. DOI:10.1016/0734-189X(85)90056-8. ISSN 0734-189X.
- Caspi, D. & Kiryati, N. & Shamir, J. (1998). Range imaging with adaptive color structured light. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 20:5. 470–480. DOI:10.1109/34.682177. ISSN 0162-8828.
- Chandola, V. & Banerjee, A. & Kumar, V. (2009). Anomaly detection: A survey. *ACM Computing Surveys*. Vol. 41:3. 1–58. DOI:10.1145/1541880.1541882. ISSN 0360-0300.
- Chen, S. Y. & Li, Y. F. & Zhang, J. (2008). Vision processing for realtime 3-D data acquisition based on coded structured light. *IEEE Transactions on Image Processing*. Vol. 17:2. 167–176. DOI:10.1109/TIP.2007.914755. ISSN 1057-7149.
- Edelsbrunner, H. & Mücke, E. P. (1994). Three-dimensional alpha shapes. *ACM Transactions on Graphics*. Vol. 13:1. 43–72. DOI:10.1145/174462.156635. ISSN 0730-0301.
- Fernandez, S. & Salvi, J. (2013). One-shot absolute pattern for dense reconstruction using DeBruijn coding and Windowed Fourier Transform. *Optics Communications*. Vol. 291. 70–78. DOI:10.1016/j.optcom.2012.10.042. ISSN 0030-4018.
- Fitzgibbon, A. & Pilu, M. & Fisher, R. B. (1999). Direct least square fitting of ellipses. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 21:5. 476–480. DOI:10.1109/34.765658. ISSN 0162-8828.
- Geng, J. (2011). Structured-light 3D surface imaging: A tutorial. *Advances in Optics and Photonics*. Vol. 3:2. 128–160. DOI:10.1364/AOP.3.000128. ISSN 1943-8206.

- Gong, Y. & Zhang, S. (2010). Ultrafast 3-D shape measurement with an off-the-shelf DLP projector. *Optics Express*. Vol. 18:19. 19743–19754. DOI:10.1364/OE.18.019743. ISSN 1094-4087.
- Gorthi, S. S. & Rastogi, P. (2010). Fringe projection techniques: Whither we are?. *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 48:2. 133–140. DOI:10.1016/j.optlaseng.2009.09.001. ISSN 0143-8166.
- Griffin, P. M. & Narasimhan, L. S. & Yee, S. R. (1992). Generation of uniquely encoded light patterns for range data acquisition. *Pattern Recognition*. Vol. 25:6. 609–616. DOI:10.1016/0031-3203(92)90078-W. ISSN 0031-3203.
- Guan, C. & Hassebrook, L. G. & Lau, D. L. (2003). Composite structured light pattern for three-dimensional video. *Optics Express*. Vol. 11:5. 406–417. DOI:10.1364/OE.11.000406. ISSN 1094-4087.
- Gupta, M. & Agrawal, A. & Veeraraghavan, A. & Narasimhan, S. G. (2013). A practical approach to 3D scanning in the presence of interreflections, subsurface scattering and defocus. *International Journal of Computer Vision*. Vol. 102:1–3. 33–55. DOI:10.1007/s11263-012-0554-3. ISSN 0920-5691.
- Gühring, J. (2001). Dense 3-D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components. Teoksessa: El-Hakim, S. F. & Gruen, A. *Proceedings of SPIE Volume 4309, Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement*. San Jose, California, United States. 22-23.1.2001. Bellingham, Washington, United States, SPIE. 220–231. DOI:10.1117/12.410877. ISBN 978-0-8194-3987-1.
- Hartley, R. & Zisserman, A. (2004). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2nd ed. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. 655 s. ISBN 978-0-521-54051-3.
- Horn, E. & Kiryati, N. (1999). Toward optimal structured light patterns. *Image and Vision Computing*. Vol. 17:2. 87–97. DOI:10.1016/S0262-8856(98)00113-9. ISSN 0262-8856.
- Inokuchi, S. & Sato, K. & Matsuda, F. (1984). Range-imaging system for 3-D object recognition. Teoksessa: *Pattern Recognition: Proceedings of the Seventh International Conference on Pattern Recognition*. Montreal, Quebec, Canada. 30.7-2.8.1984. Silver Spring, Maryland, United States. IEEE Computer Society Press. 806–808. ISBN 978-0-444-87653-9.
- ISO 3534-2 (2006). *Statistics – Vocabulary and symbols – Part 2: Applied statistics*. 125 s.
- Knight, N. L. & Wang, J. & Rizos, C. (2010). Generalised measures of reliability for multiple outliers. *Journal of Geodesy*. Vol. 84:10. 625–635. DOI:10.1007/s00190-010-0392-4. ISSN 0949-7714.
- Koninckx, T. P. & Van Gool, L. (2006). Real-time range acquisition by adaptive structured light. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 28:3. 432–445. DOI:10.1109/TPAMI.2006.62. ISSN 0162-8828.
- FI 111660. (2003). *Hyvyysluku*. Mapvision Oy Ltd, Espoo, Suomi. (Leikas, E. & Haggrén, H. & Väättäin, S.). FI 20012295, 23.11.2001. Julk. 24.05.2003. 17 s.

- Luhmann, T. (2010). Close range photogrammetry for industrial applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 65:6. 558–569. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003. ISSN 0924-2716.
- Luhmann, T. (2011). 3D imaging - How to achieve highest accuracy. Teoksessa: Remondino, F. & Shortis, M. R. *Proceedings of SPIE Volume 8085, Videometrics, Range Imaging, and Applications XI*. Munich, Germany. 25-26.5.2011. Bellingham, Washington, United States, SPIE. 1–11. DOI:10.1117/12.892070. ISBN 978-0-8194-8681-3.
- Luhmann, T. & Robson, S. & Kyle, S. & Harley, I. (2006). *Close Range Photogrammetry*. 1st ed. Caithness, United Kingdom: Whittles Publishing. 510 s. ISBN 978-1-870325-50-9.
- Maruyama, M. & Abe, S. (1993). Range sensing by projecting multiple slits with random cuts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 15:6. 647–651. DOI:10.1109/34.216735. ISSN 0162-8828.
- Maurice, X. & Graebing, P. & Doignon, C. (2013). Real-time structured light coding for adaptive patterns. *Journal of Real-Time Image Processing*. Vol. 8:2. 169–178. DOI:10.1007/s11554-011-0200-2. ISSN 1861-8200.
- Morita, H. & Yajima, K. & Sakata, S. (1988). Reconstruction of surfaces of 3-d objects by M-array pattern projection method. Teoksessa: *Second International Conference on Computer Vision*. Tampa, Florida, United States. 5-8.12.1988. Washington DC, United States, IEEE Computer Society Press. 468–473. DOI:10.1109/CCV.1988.590025. ISBN 978-0-8186-0883-4.
- Niini, I. (2002). On the Calibration of Mapvision 4D system. Teoksessa: Kallianny, R. & Leberl, F. & Fraundorfer, F. *Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium on Photogrammetric Computer Vision Volume 34 Part 3A*. Graz, Austria. 9-13.9.2002. Amsterdam, Netherlands, ISPRS. 225–227.
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Trans Syst Man Cybern*. Vol. 9:1. 62–66. DOI:10.1109/TSMC.1979.4310076. ISSN 0018-9472.
- Pagès, J. & Salvi, J. & Collewet, C. & Forest, J. (2005). Optimised de Bruijn patterns for one-shot shape acquisition. *Image and Vision Computing*. Vol. 23:8. 707–720. DOI:10.1016/j.imavis.2005.05.007. ISSN 0262-8856.
- Pedersini, F. & Sarti, A. & Tubaro, S. (1999). Multi-camera systems: Calibration and applications. *IEEE Signal Processing Magazine*. Vol. 16:3. 55–65. DOI:10.1109/79.768573. ISSN 1053-5888.
- Posdamer, J. L. & Altschuler, M. D. (1982). Surface measurement by space-encoded projected beam systems. *Computer Graphics and Image Processing*. Vol. 18:1. 1–17. DOI:10.1016/0146-664X(82)90096-X. ISSN 0146-664X.
- Pribanic, T. & Obradovic, N. & Salvi, J. (2012). Stereo computation combining structured light and passive stereo matching. *Optics Communications*. Vol. 285:6. 1017–1022. DOI:10.1016/j.optcom.2011.10.045. ISSN 0030-4018.
- Sagawa, R. & Furukawa, R. & Kawasaki, H. (2014). Dense 3D reconstruction from high frame-rate video using a static grid pattern. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 36:9. 1733–1747. DOI:10.1109/TPAMI.2014.2300490. ISSN 0162-8828.

Salvi, J. & Fernandez, S. & Pribanic, T. & Llado, X. (2010). A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. *Pattern Recognition*. Vol. 43:8. 2666–2680. DOI:10.1016/j.patcog.2010.03.004. ISSN 0031-3203.

Sansoni, G. & Carocci, M. & Rodella, R. (1999). Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: Analysis and compensation of the systematic errors. *Applied Optics*. Vol. 38:31. 6565–6573. DOI:10.1364/AO.38.006565. ISSN 0003-6935.

Sansoni, G. & Trebeschi, M. & Docchio, F. (2009). State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation. *Sensors*. Vol. 9:1. 568–601. DOI:10.3390/s90100568. ISSN 1424-8220.

Sauvola, J. & Pietikäinen, M. (2000). Adaptive document image binarization. *Pattern Recognition*. Vol. 33:2. 225–236. DOI:10.1016/S0031-3203(99)00055-2. ISSN 0031-3203.

Sezgin, M. & Sankur, B. (2004). Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*. Vol. 13:1. 146–168. DOI:10.1117/1.1631315. ISSN 1017-9909.

Srinivasan, V. & Liu, H. C. & Halioua, M. (1984). Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Applied Optics*. Vol. 23:18. 3105–3108. DOI:10.1364/AO.23.003105. ISSN 0003-6935.

Steger, C. (2013). Unbiased extraction of lines with parabolic and Gaussian profiles. *Computer Vision and Image Understanding*. Vol. 117:2. 97–112. DOI:10.1016/j.cviu.2012.08.007. ISSN 1077-3142.

Su, X. & Zhang, Q. (2010). Dynamic 3-D shape measurement method: A review. *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 48:2. 191–204. DOI:10.1016/j.optlaseng.2009.03.012. ISSN 0143-8166.

Takeda, M. & Mutoh, K. (1983). Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Applied Optics*. Vol. 22:24. 3977–3982. DOI:10.1364/AO.22.003977. ISSN 0003-6935.

Tuominen, V. (2012). Cost Modeling of Inspection Strategies in Automotive Quality Control. *Engineering Management Research*. Vol. 1:2. 33–45. DOI:10.5539/emr.v1n2p33. ISSN 1927-7318.

Weinmann, M. & Schwartz, C. & Ruiters, R. & Klein, R. (2011). A Multi-Camera, Multi-Projector Super-resolution Framework for Structured Light. *Teoksessa: Proceedings of the 2011 International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission*. Hangzhou, China. 16-19.5.2011. Los Alamitos, California, United States, IEEE Computer Society. 397–404. DOI:10.1109/3DIMPVT.2011.57. ISBN 978-0-7695-4369-7.

Xu, J. & Xi, N. & Zhang, C. & Gregory, J. (2011). Real-time 3D shape inspection system of automotive parts based on structured light pattern. *Optics & Laser Technology*. Vol. 43:1. 1–8. DOI:10.1016/j.optlastec.2010.04.008. ISSN 0030-3992.

Yang, R. & Cheng, S. & Yang, W. & Chen, Y. (2008). Robust and accurate surface measurement using structured light. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 57:6. 1275–1280. DOI:10.1109/TIM.2007.915103. ISSN 0018-9456.

Young, M. & Beeson, E. & Davis, J. & Rusinkiewicz, S. & Ramamoorthi, R. (2007). Viewpoint-coded structured light. Teoksessa: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR'07. Minneapolis, Minnesota, United States. 17-22.6.2007. IEEE Computer Society. 1–8. DOI:10.1109/CVPR.2007.383292. ISBN 978-1-4244-1179-5.

Zhang, S. (2010). Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques. *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 48:2. 149–158. DOI:10.1016/j.optlaseng.2009.03.008. ISSN 0143-8166.

Zhang, Y. & Xiong, Z. & Yang, Z. & Wu, F. (2014). Real-time scalable depth sensing with hybrid structured light illumination. *IEEE Transactions on Image Processing*. Vol. 23:1. 97–109. DOI:10.1109/TIP.2013.2286901. ISSN 1057-7149.

Zhang, Z. H. (2012). Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques. *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 50:8. 1097–1106. DOI:10.1016/j.optlaseng.2012.01.007. ISSN 0143-8166.

Liitteet

Liite 1 – Tason mittaustulokset

Vastinpisteiden etsintä Gray-koodauksella

Optiikka	Piste- tiheys	Piirre- koko	Kuvio- tyyppi	Keski- hajonta (mm)	Suurin poikkeama (mm)	Pisteiden luku- määrä	Parametrit
6 mm	harva	iso	ympyrä	0.083	0.372	64	centroid ([1 10]), blockotsu ([128 128])
6 mm	harva	iso	ympyrä	0.085	0.375	64	centroid ([1 10]), otsu
6 mm	harva	iso	ympyrä	0.106	0.515	64	centroid ([1 10]), sauvola ([5 5], 0.34)
6 mm	harva	iso	ympyrä	0.083	0.381	64	fitellipse ([1 10]), blockotsu ([128 128])
6 mm	harva	iso	ympyrä	0.086	0.377	64	fitellipse ([1 10]), otsu
6 mm	harva	iso	ympyrä	0.088	0.417	64	fitellipse ([1 10]), sauvola ([5 5], 0.34)
6 mm	harva	paksu	viiva	0.602	2.289	55	polyintersect ([3 3]), linearfilter (4)
6 mm	harva	paksu	viiva	0.074	0.399	64	polyintersect ([3 3]), linearfilter (8)
6 mm	harva	paksu	viiva	0.086	0.477	64	polyintersect ([3 3]), linearfilter (16)
6 mm	harva	paksu	viiva	0.414	1.772	63	polyintersect ([5 5]), linearfilter (4)
6 mm	harva	paksu	viiva	0.059	0.239	64	polyintersect ([5 5]), linearfilter (8)
6 mm	harva	paksu	viiva	0.065	0.272	64	polyintersect ([5 5]), linearfilter (16)
6 mm	harva	pieni	ympyrä	0.063	0.241	64	centroid ([1 10]), blockotsu ([128 128])
6 mm	harva	pieni	ympyrä	0.065	0.274	64	centroid ([1 10]), otsu
6 mm	harva	pieni	ympyrä	0.069	0.250	64	centroid ([1 10]), sauvola ([5 5], 0.34)
6 mm	harva	pieni	ympyrä	0.061	0.252	64	fitellipse ([1 10]), blockotsu ([128 128])
6 mm	harva	pieni	ympyrä	0.069	0.288	64	fitellipse ([1 10]), otsu
6 mm	harva	pieni	ympyrä	0.063	0.240	64	fitellipse ([1 10]), sauvola ([5 5], 0.34)
6 mm	harva	ohut	viiva	0.066	0.316	64	polyintersect ([3 3]), linearfilter (4)
6 mm	harva	ohut	viiva	0.053	0.224	64	polyintersect ([3 3]), linearfilter (8)
6 mm	harva	ohut	viiva	0.053	0.197	64	polyintersect ([3 3]), linearfilter (16)
6 mm	harva	ohut	viiva	0.098	0.517	71	polyintersect ([5 5]), linearfilter (4)
6 mm	harva	ohut	viiva	0.049	0.194	64	polyintersect ([5 5]), linearfilter (8)
6 mm	harva	ohut	viiva	0.052	0.194	64	polyintersect ([5 5]), linearfilter (16)

Optiikka	Piste- tiheys	Piirre- koko	Kuvio- tyyppi	Keski- hajonta (mm)	Suurin poikkeama (mm)	Pisteiden luku- määrä	Parametrit
6 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.210	2.345	211	centroid ([1 10]), blockotsu ([128 128])
6 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.331	1.394	29	centroid ([1 10]), otsu
6 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.100	0.597	256	centroid ([1 10]), sauvola ([5 5], 0.34)
6 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.195	2.045	209	fitellipse ([1 10]), blockotsu ([128 128])
6 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.220	0.986	26	fitellipse ([1 10]), otsu
6 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.084	0.506	256	fitellipse ([1 10]), sauvola([5 5], 0.34)
6 mm	tiheä	paksu	viiva	0.455	3.001	216	polyintersect ([3 3]), linearfilter (4)
6 mm	tiheä	paksu	viiva	0.071	0.502	256	polyintersect ([3 3]), linearfilter (8)
6 mm	tiheä	paksu	viiva	0.284	1.460	247	polyintersect ([3 3]), linearfilter (16)
6 mm	tiheä	paksu	viiva	0.478	2.652	247	polyintersect ([5 5]), linearfilter (4)
6 mm	tiheä	paksu	viiva	0.058	0.282	256	polyintersect ([5 5]), linearfilter (8)
6 mm	tiheä	paksu	viiva	0.273	1.919	252	polyintersect ([5 5]), linearfilter (16)
6 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.069	0.424	256	centroid ([1 10]), blockotsu ([128 128])
6 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.069	0.410	256	centroid ([1 10]), otsu
6 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.072	0.412	256	centroid ([1 10]), sauvola ([5 5], 0.34)
6 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.070	0.458	256	fitellipse ([1 10]), blockotsu ([128 128])
6 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.070	0.422	256	fitellipse ([1 10]), otsu
6 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.069	0.400	256	fitellipse ([1 10]), sauvola ([5 5], 0.34)
6 mm	tiheä	ohut	viiva	0.073	0.390	256	polyintersect ([3 3]), linearfilter (4)
6 mm	tiheä	ohut	viiva	0.057	0.305	256	polyintersect ([3 3]), linearfilter (8)
6 mm	tiheä	ohut	viiva	0.084	0.423	256	polyintersect ([3 3]), linearfilter (16)
6 mm	tiheä	ohut	viiva	0.071	0.392	256	polyintersect ([5 5]), linearfilter (4)
6 mm	tiheä	ohut	viiva	0.052	0.279	256	polyintersect ([5 5]), linearfilter (8)
6 mm	tiheä	ohut	viiva	0.080	0.409	256	polyintersect ([5 5]), linearfilter (16)

Optiikka	Piste- tiheys	Piirre- koko	Kuvio- tyyppi	Keski- hajonta (mm)	Suurin poikkeama (mm)	Pisteiden luku- määrä	Parametrit
12 mm	harva	iso	ympyrä	0.022	0.096	64	centroid ([1 20]), blockotsu ([128 128])
12 mm	harva	iso	ympyrä	0.023	0.096	64	centroid ([1 20]), otsu
12 mm	harva	iso	ympyrä	0.024	0.101	64	centroid ([1 20]), sauvola ([15 15], 0.34)
12 mm	harva	iso	ympyrä	0.021	0.094	64	fitellipse ([1 20]), blockotsu ([128 128])
12 mm	harva	iso	ympyrä	0.023	0.095	64	fitellipse ([1 20]), otsu
12 mm	harva	iso	ympyrä	0.023	0.100	64	fitellipse ([1 20]), sauvola ([15 15], 0.34)
12 mm	harva	paksu	viiva	0.678	3.029	70	polyintersect ([3 3]), linearfilter (4)
12 mm	harva	paksu	viiva	0.096	0.389	64	polyintersect ([3 3]), linearfilter (8)
12 mm	harva	paksu	viiva	0.021	0.099	64	polyintersect ([3 3]), linearfilter (16)
12 mm	harva	paksu	viiva	1.099	7.573	134	polyintersect ([5 5]), linearfilter (4)
12 mm	harva	paksu	viiva	0.090	0.456	67	polyintersect ([5 5]), linearfilter (8)
12 mm	harva	paksu	viiva	0.019	0.085	64	polyintersect ([5 5]), linearfilter (16)
12 mm	harva	pieni	ympyrä	0.027	0.139	64	centroid ([1 20]), blockotsu ([128 128])
12 mm	harva	pieni	ympyrä	0.030	0.147	64	centroid ([1 20]), otsu
12 mm	harva	pieni	ympyrä	0.026	0.146	64	centroid ([1 20]), sauvola ([15 15], 0.34)
12 mm	harva	pieni	ympyrä	0.027	0.142	64	fitellipse ([1 20]), blockotsu ([128 128])
12 mm	harva	pieni	ympyrä	0.030	0.148	64	fitellipse ([1 20]), otsu
12 mm	harva	pieni	ympyrä	0.026	0.142	64	fitellipse ([1 20]), sauvola ([15 15], 0.34)
12 mm	harva	ohut	viiva	0.830	5.684	111	polyintersect ([3 3]), linearfilter (4)
12 mm	harva	ohut	viiva	0.105	0.700	67	polyintersect ([3 3]), linearfilter (8)
12 mm	harva	ohut	viiva	0.026	0.168	64	polyintersect ([3 3]), linearfilter (16)
12 mm	harva	ohut	viiva	2.257	12.463	124	polyintersect ([5 5]), linearfilter (4)
12 mm	harva	ohut	viiva	0.827	6.728	112	polyintersect ([5 5]), linearfilter (8)
12 mm	harva	ohut	viiva	0.018	0.073	64	polyintersect ([5 5]), linearfilter (16)

Optiikka	Piste- tiheys	Piirre- koko	Kuvio- tyyppi	Keski- hajonta (mm)	Suurin poikkeama (mm)	Pisteiden luku- määrä	Parametrit
12 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.100	0.725	256	centroid ([1 20]), blockotsu ([128 128])
12 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.091	0.689	256	centroid ([1 20]), otsu
12 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.099	0.742	256	centroid ([1 20]), sauvola ([15 15], 0.34)
12 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.098	0.718	256	fitellipse ([1 20]), blockotsu ([128 128])
12 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.097	0.688	256	fitellipse ([1 20]), otsu
12 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.097	0.736	256	fitellipse ([1 20]), sauvola ([15 15], 0.34)
12 mm	tiheä	paksu	viiva	0.543	2.848	208	polyintersect ([3 3]), linearfilter (4)
12 mm	tiheä	paksu	viiva	0.096	0.427	256	polyintersect ([3 3]), linearfilter (8)
12 mm	tiheä	paksu	viiva	0.036	0.385	256	polyintersect ([3 3]), linearfilter (16)
12 mm	tiheä	paksu	viiva	0.390	1.812	245	polyintersect ([5 5]), linearfilter (4)
12 mm	tiheä	paksu	viiva	0.082	0.409	256	polyintersect ([5 5]), linearfilter (8)
12 mm	tiheä	paksu	viiva	0.026	0.278	256	polyintersect ([5 5]), linearfilter (16)
12 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.088	0.629	256	centroid ([1 20]), blockotsu ([128 128])
12 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.086	0.601	256	centroid ([1 20]), otsu
12 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.087	0.596	256	centroid ([1 20]), sauvola ([15 15], 0.34)
12 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.088	0.628	256	fitellipse ([1 20]), blockotsu ([128 128])
12 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.086	0.601	256	fitellipse ([1 20]), otsu
12 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.087	0.591	256	fitellipse ([1 20]), sauvola ([15 15], 0.34)
12 mm	tiheä	ohut	viiva	0.078	0.388	256	polyintersect ([3 3]), linearfilter (4)
12 mm	tiheä	ohut	viiva	0.021	0.132	256	polyintersect ([3 3]), linearfilter (8)
12 mm	tiheä	ohut	viiva	0.023	0.176	256	polyintersect ([3 3]), linearfilter (16)
12 mm	tiheä	ohut	viiva	0.072	0.410	256	polyintersect ([5 5]), linearfilter (4)
12 mm	tiheä	ohut	viiva	0.019	0.084	256	polyintersect ([5 5]), linearfilter (8)
12 mm	tiheä	ohut	viiva	0.017	0.088	256	polyintersect ([5 5]), linearfilter (16)

Valitut asetukset on merkitty tummennetulla tekstillä

Vastinpisteiden etsintä epipolaarisuorilla

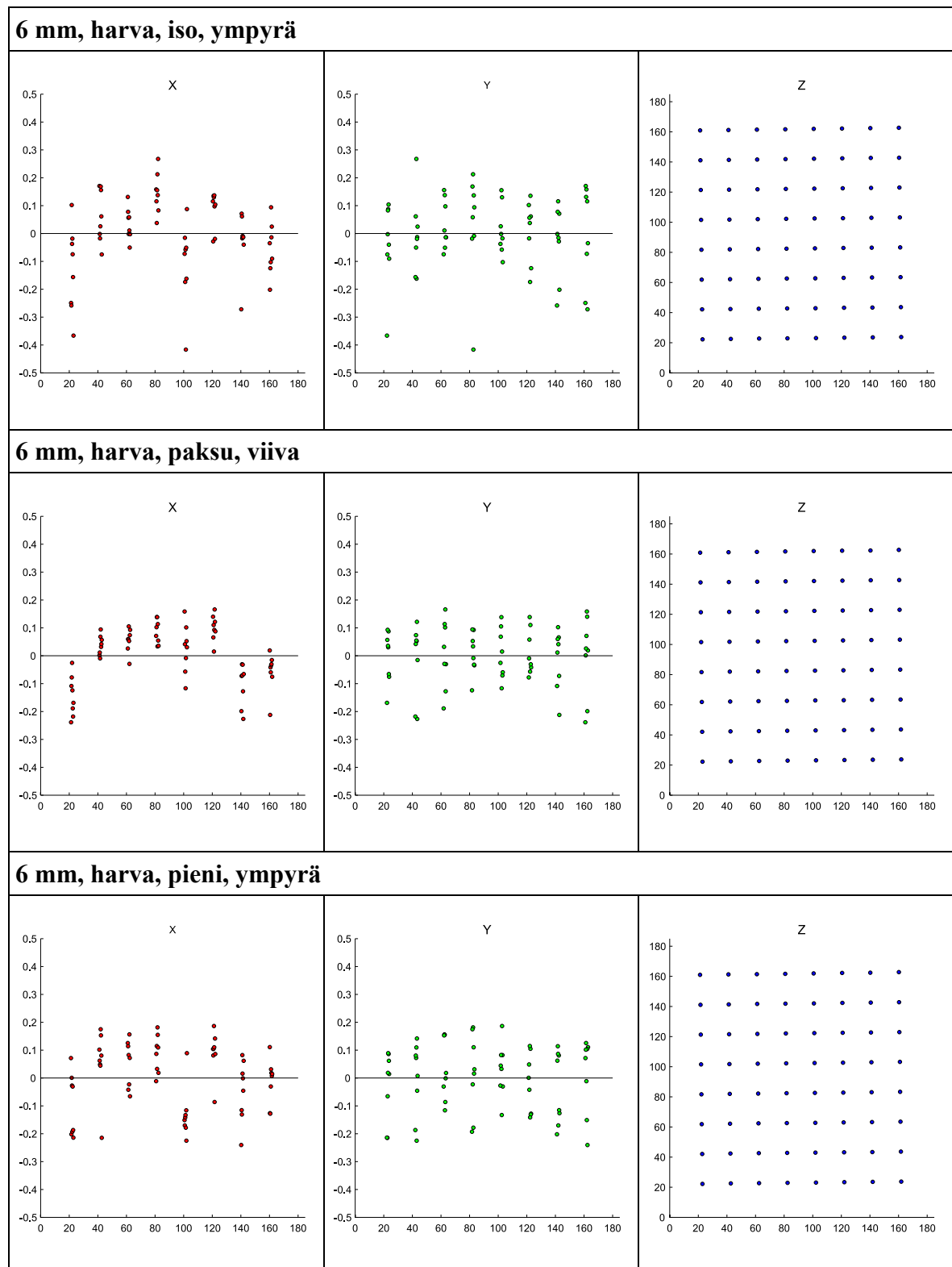
Optiikka	Piste- tiheys	Piirre- koko	Kuvio- tyyppi	Keski- hajonta (mm)	Suurin poikkeama (mm)	Pisteiden luku- määrä	Parametrit
6 mm	harva	iso	ympyrä	0.034	0.148	64	centroid, blockotsu
6 mm	harva	pieni	ympyrä	0.029	0.158	64	centroid, blockotsu
6 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.065	0.394	248	centroid, blockotsu
6 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.035	0.208	256	centroid, blockotsu
12 mm	harva	iso	ympyrä	0.038	0.181	64	centroid, blockotsu
12 mm	harva	pieni	ympyrä	0.041	0.183	64	centroid, blockotsu
12 mm	tiheä	iso	ympyrä	0.033	0.228	255	centroid, blockotsu
12 mm	tiheä	pieni	ympyrä	0.035	0.220	256	centroid, blockotsu

Parametrien kuvaukset:

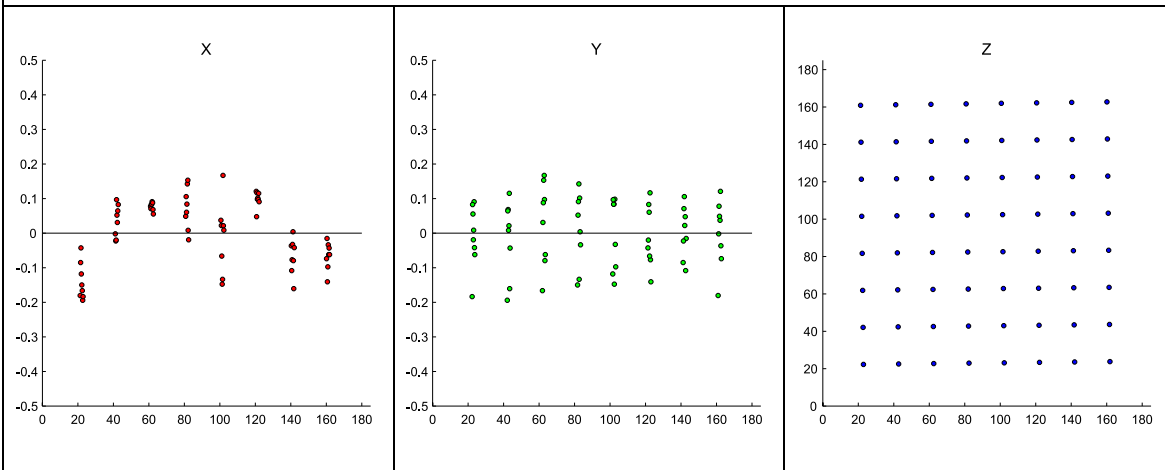
Parametri	Kuvaus
fitellipse (ympyröiden koko)	ympyrän keskipiste ellipsin sovituksella
centroid (ympyröiden koko)	ympyrän massakeskipisteen laskenta
otsu	kynnystys Otsun (1979) menetelmällä
blockotsu (ikkunan koko)	kynnystys kuvaikkunoille Otsun (1979) menetelmällä
sauvola (ikkunan koko, k-arvo)	kynnystys Sauvolan (2000) menetelmällä
polyintersect (etsintäikkunan koko)	viivojen leikkaus polygoneilla
linearfilter (suodattimen aste)	Blais & Rioux (1986) lineaarinen suodatus

Mitattujen pisteiden kuvaajat valituilla asetuksilla

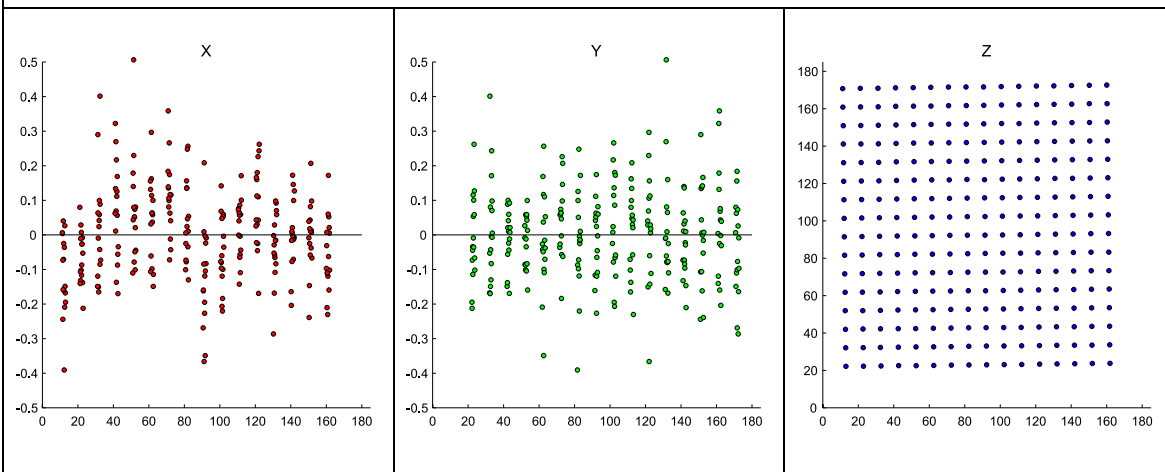
Vastinpisteiden etsintä Gray-koodauksella



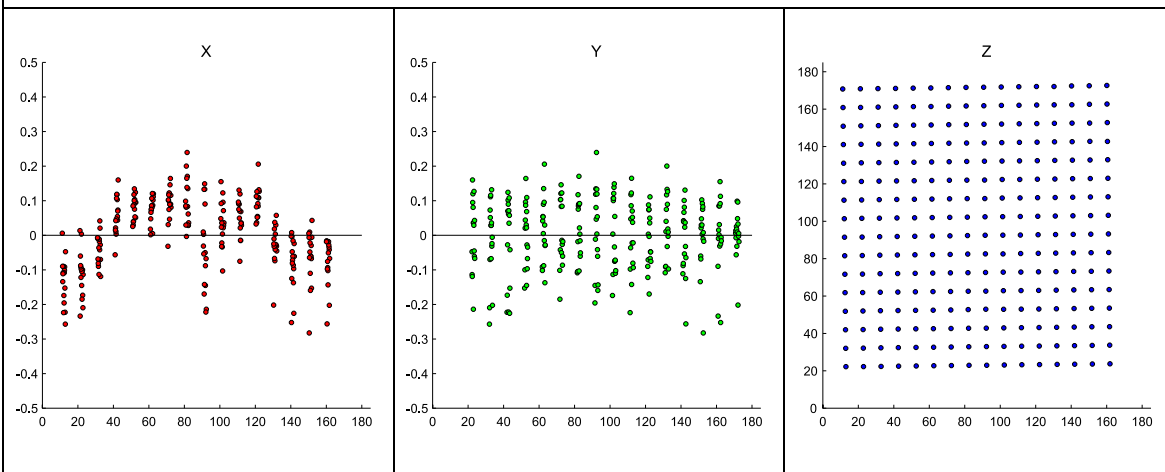
6 mm, harva, ohut, viiva



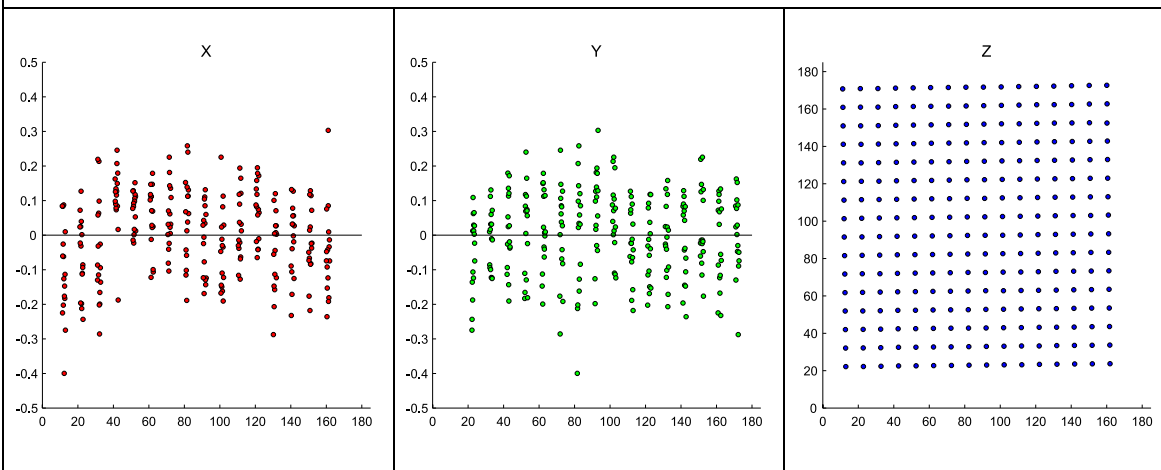
6 mm, tiheä, iso, ympyrä



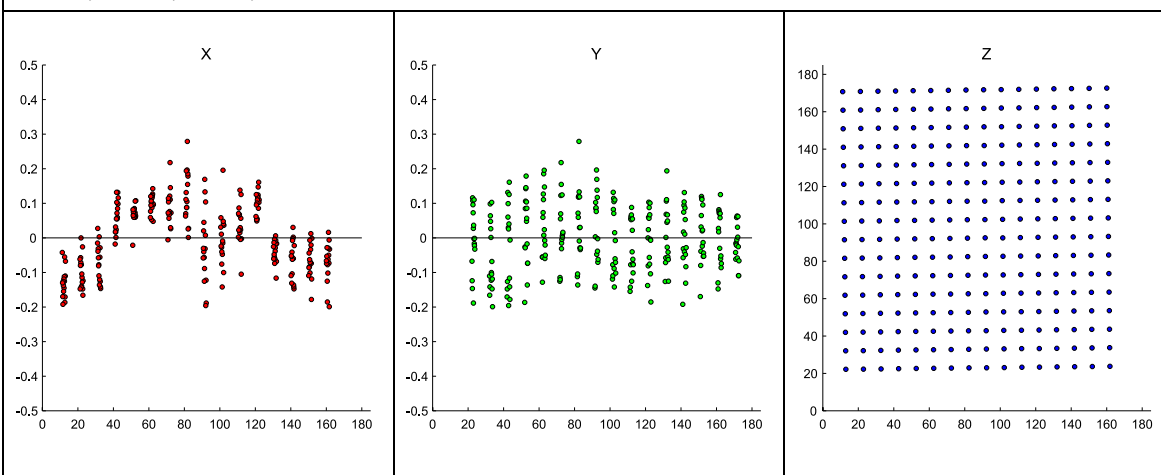
6 mm, tiheä, paksu, viiva



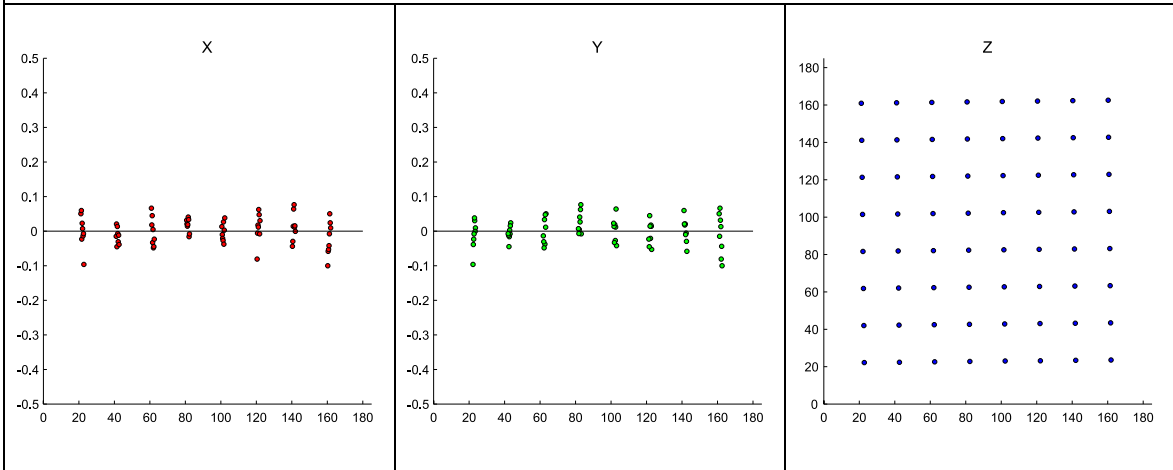
6 mm, tiheä, pieni, ympyrä



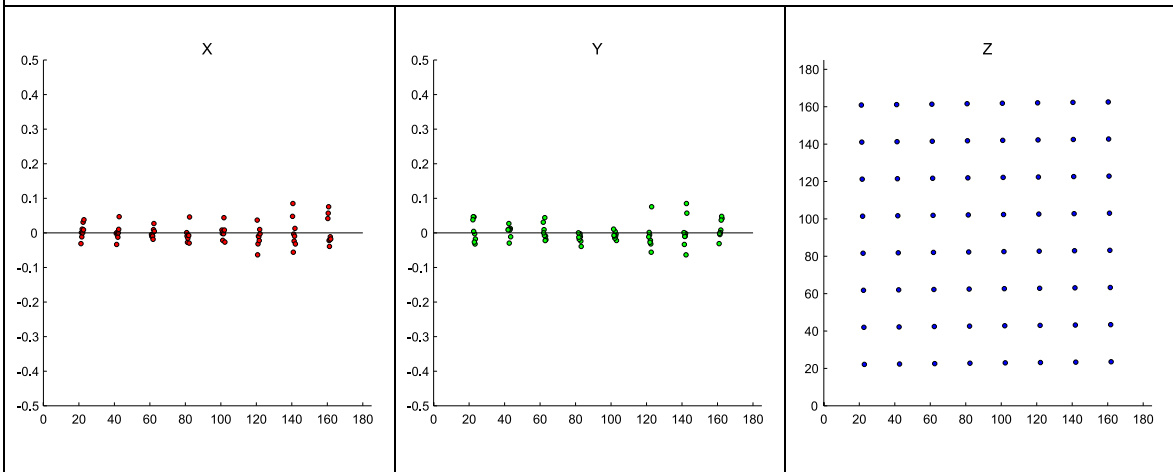
6 mm, tiheä, ohut, viiva



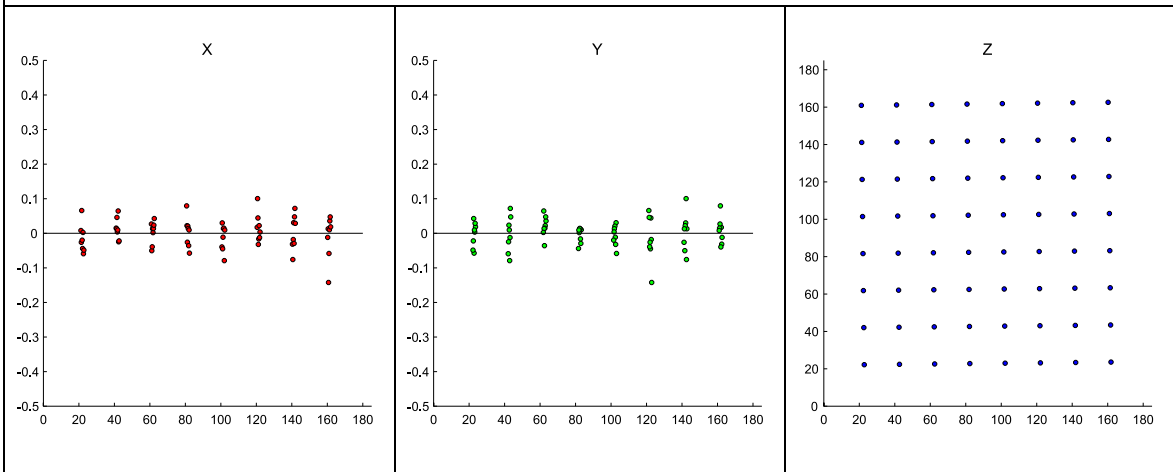
12 mm, harva, iso, ympyrä



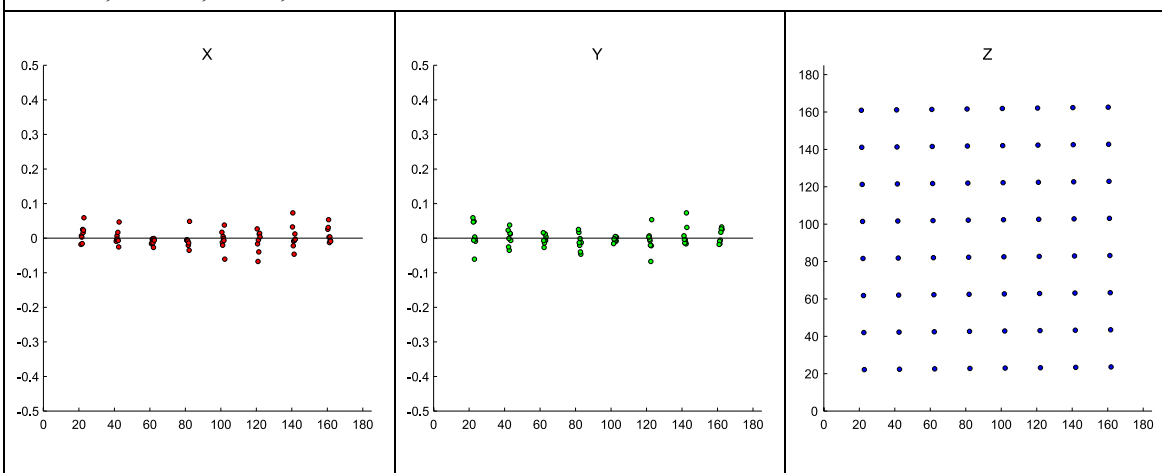
12 mm, harva, paksu, viiva



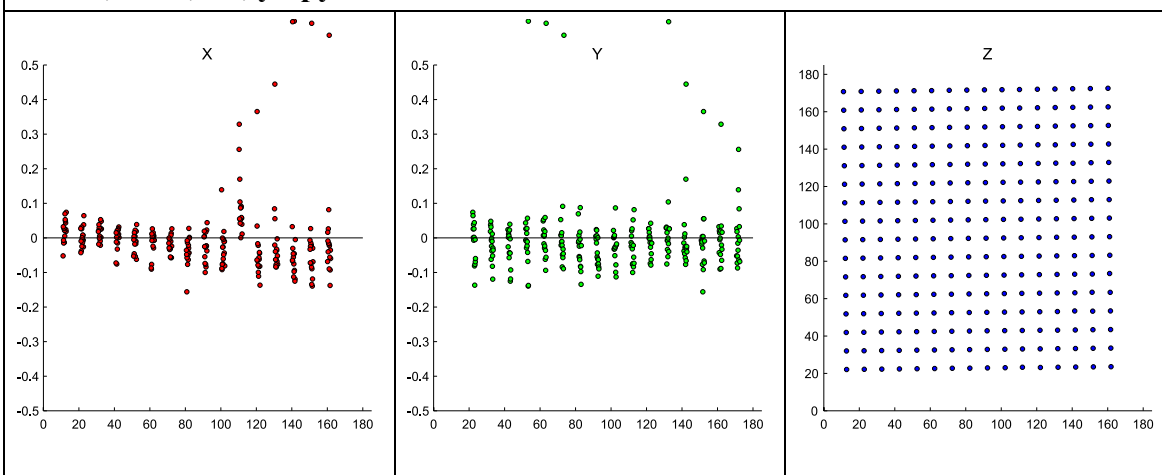
12 mm, harva, pieni, ympyrä



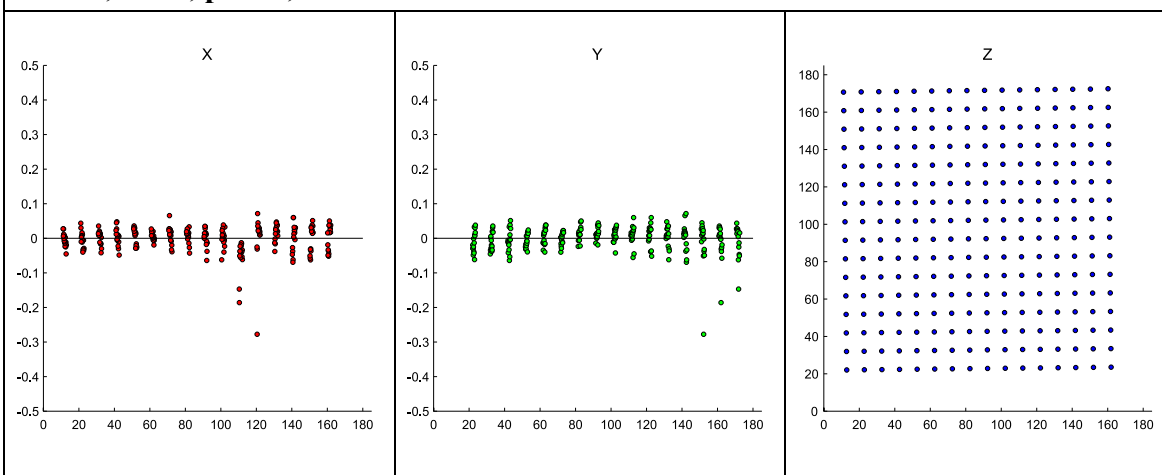
12 mm, harva, ohut, viiva



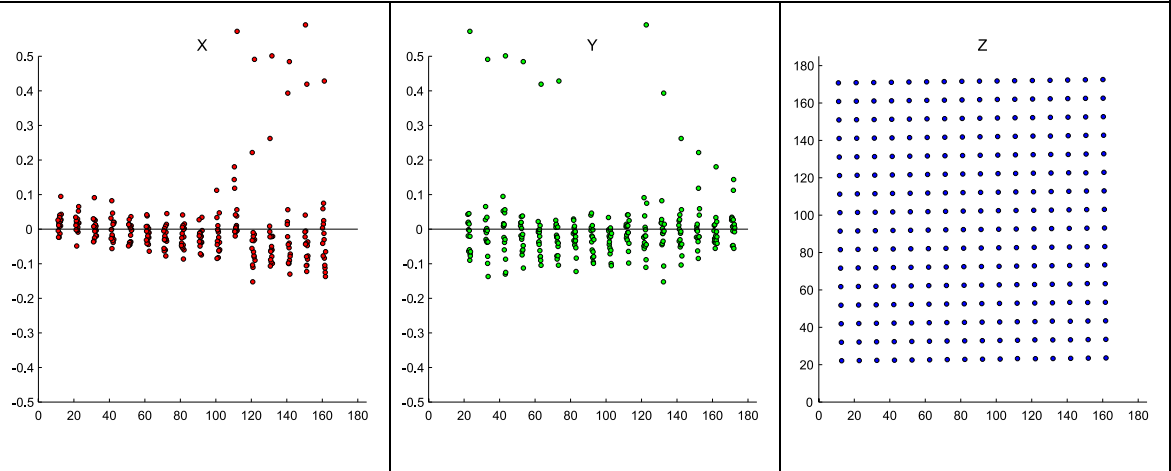
12 mm, tiheä, iso, ympyrä



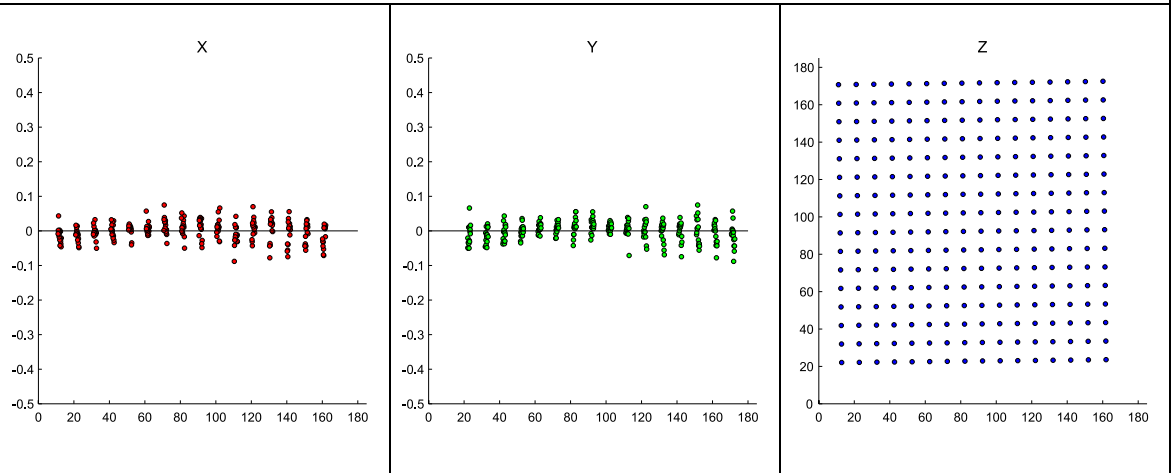
12 mm, tiheä, paksu, viiva



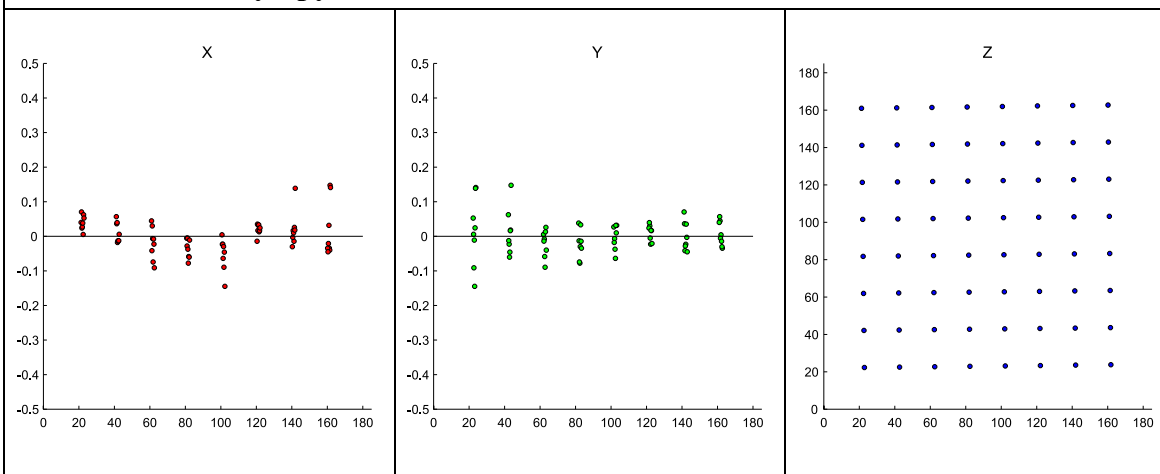
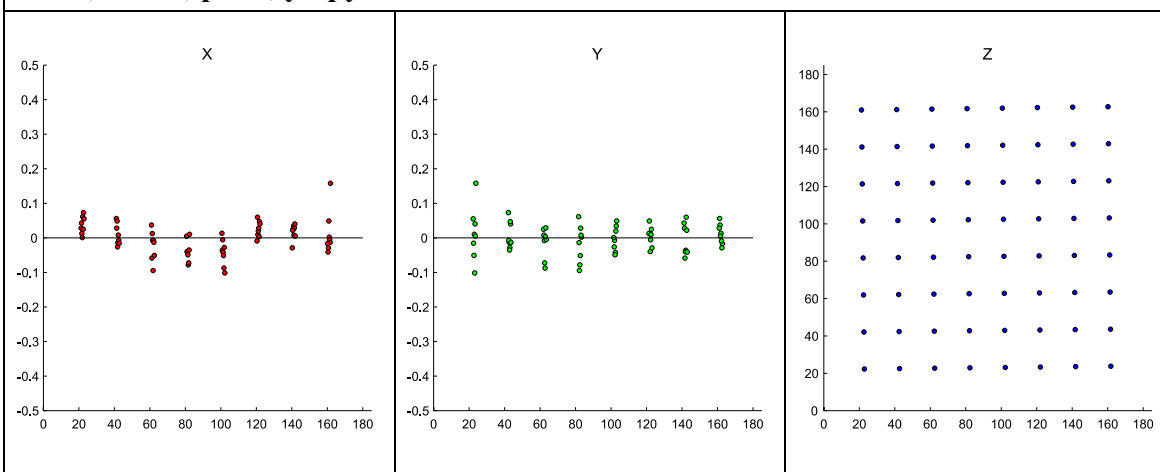
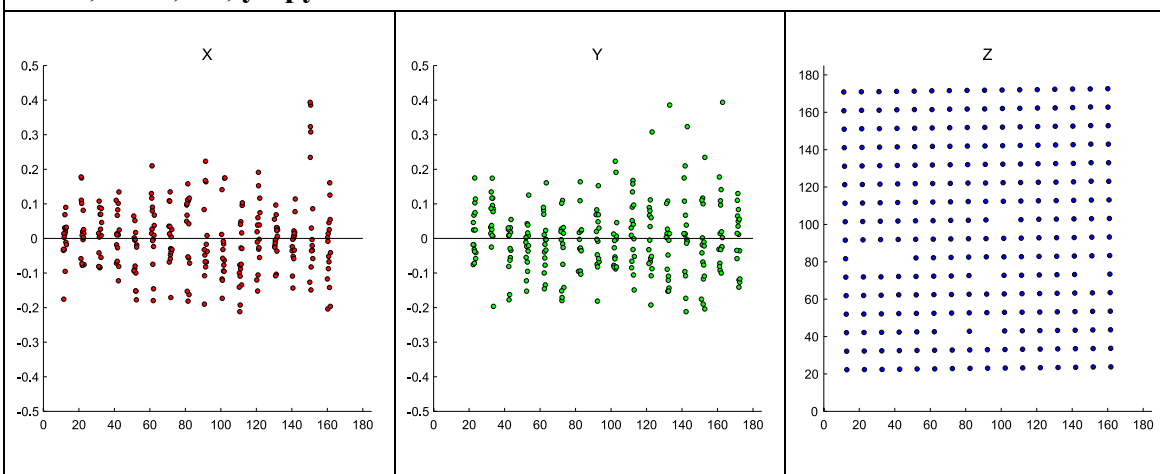
12 mm, tiheä, pieni, ympyrä



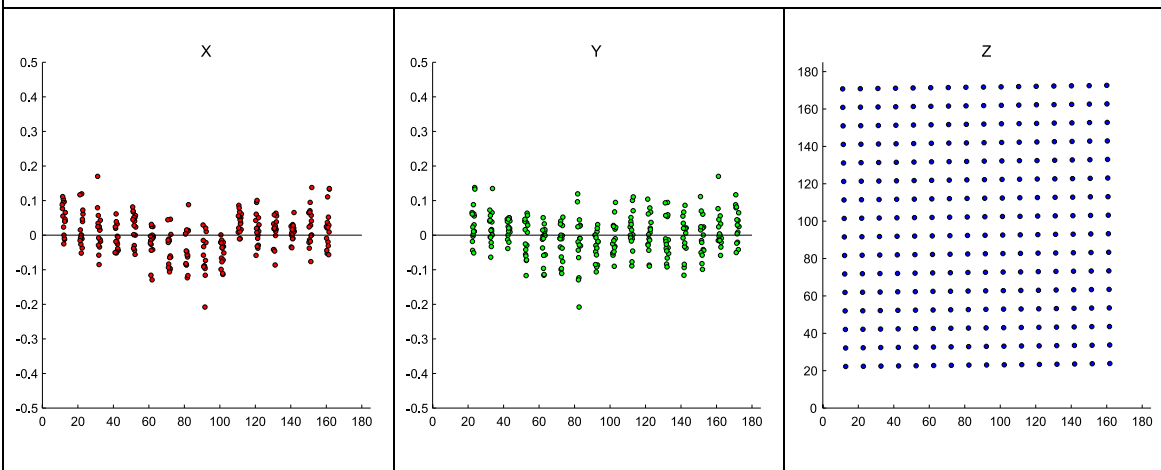
12 mm, tiheä, ohut, viiva



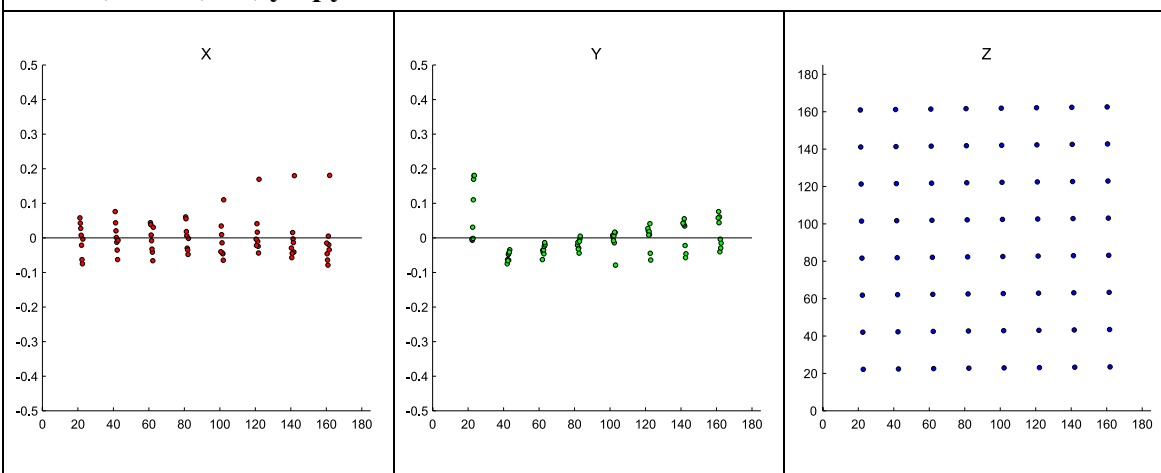
Vastinpisteiden etsintä epipolaarisuorilla

6 mm, harva, iso, ympyrä**6 mm, harva, pieni, ympyrä****6 mm, tiheä, iso, ympyrä**

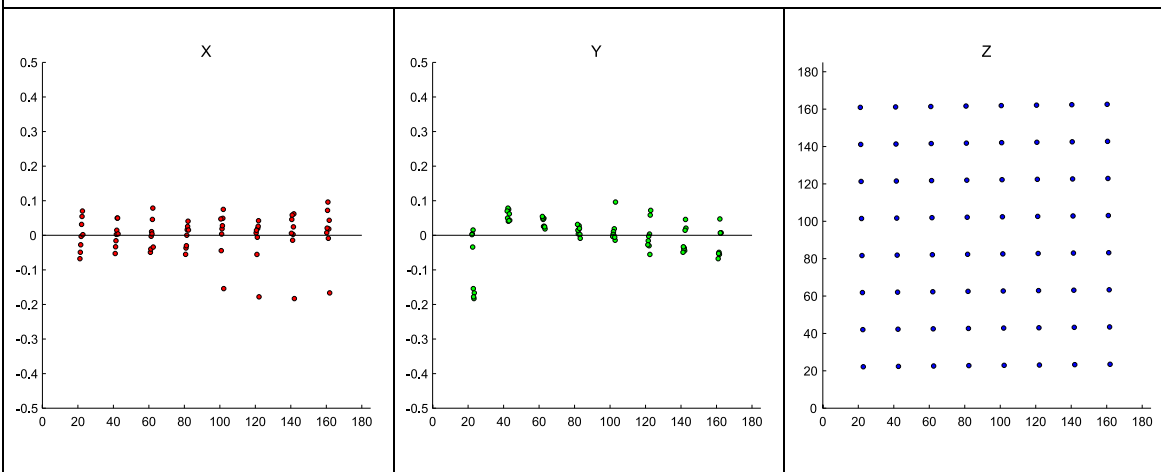
6 mm, tiheä, pieni, ympyrä



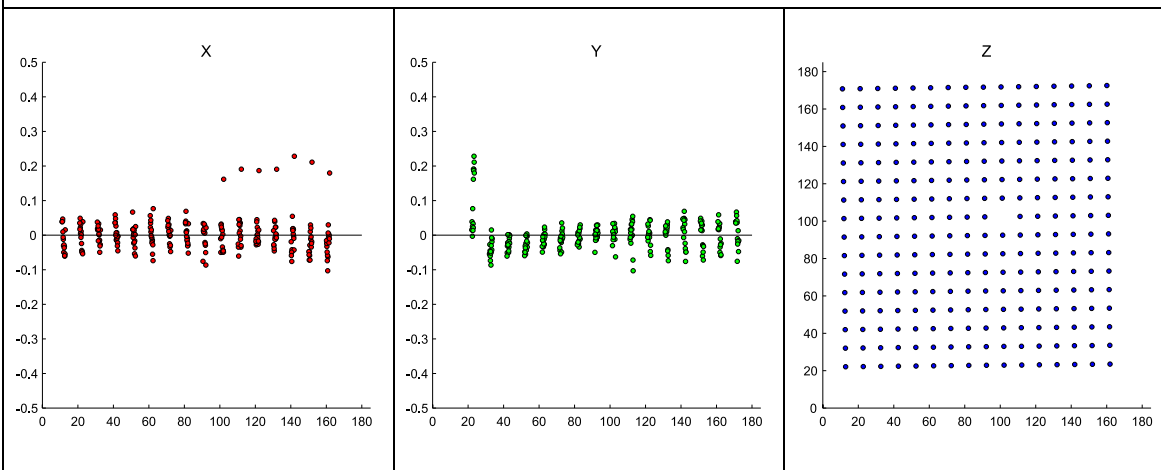
12 mm, harva, iso, ympyrä



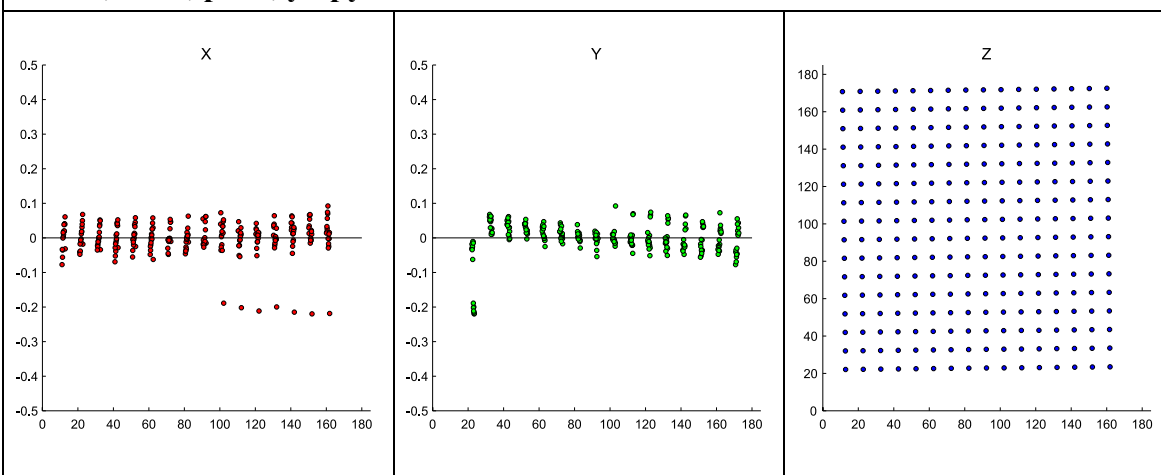
12 mm, harva, pieni, ympyrä



12 mm, tiheä, iso, ympyrä



12 mm, tiheä, pieni, ympyrä

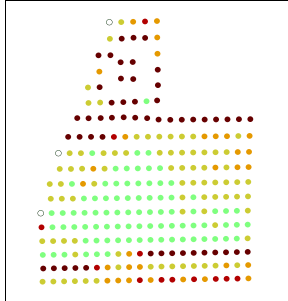


Liite 2 – Oven mittaustulokset

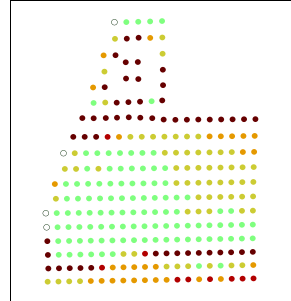
Mitattujen näytepisteiden keskihajonnat

Vastinpisteiden etsintä Gray-koodauksella

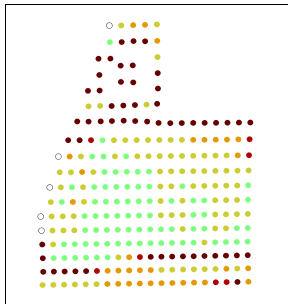
6 mm, harva, iso, ympyrä



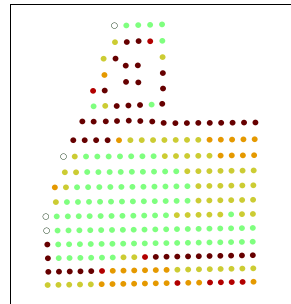
6 mm, harva, paksu, viiva



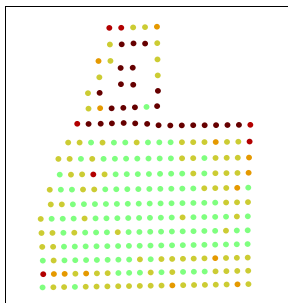
6 mm, harva, pieni, ympyrä



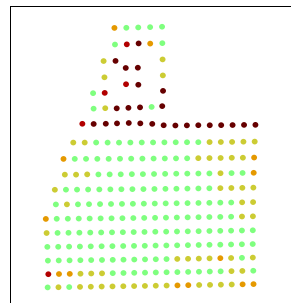
6 mm, harva, ohut, viiva



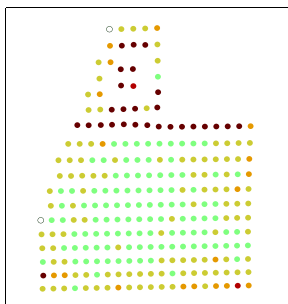
6 mm, tiheä, iso, ympyrä



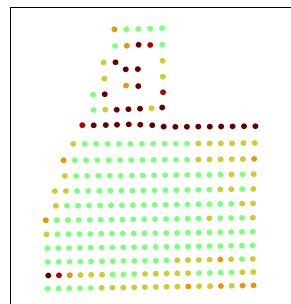
6 mm, tiheä, paksu, viiva



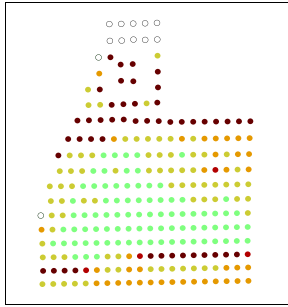
6 mm, tiheä, pieni, ympyrä



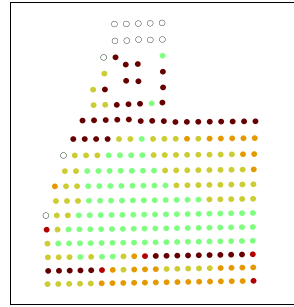
6 mm, tiheä, ohut, viiva



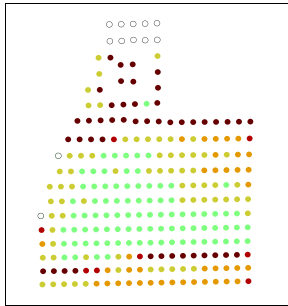
12 mm, harva, iso, ympyrä



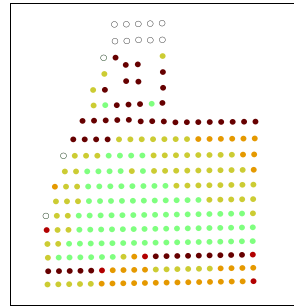
12 mm, harva, paksu, viiva



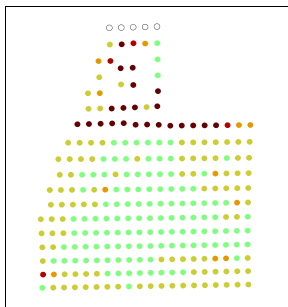
12 mm, harva, pieni, ympyrä



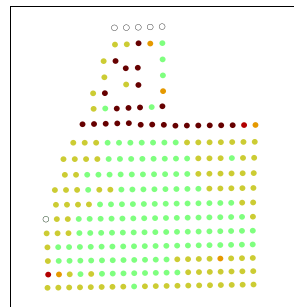
12 mm, harva, ohut, viiva



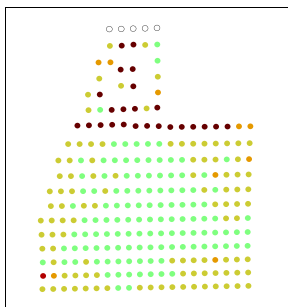
12 mm, tiheä, iso, ympyrä



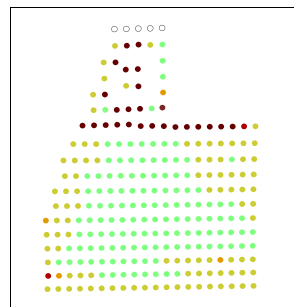
12 mm, tiheä, paksu, viiva



12 mm, tiheä, pieni, ympyrä

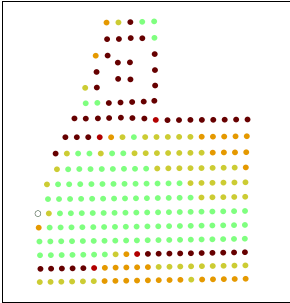


12 mm, tiheä, ohut, viiva



Vastinpisteiden etsintä epipolaarisuorilla

6 mm, harva, iso, ympyrä



12 mm, harva, pieni, ympyrä

