

Muodon mittaus polarisaatiolla

Janne KOLJONEN

Sähkö- ja automaatiotekniikan laitos, Vaasan yliopisto

Harjoitustyö kurssiin:
MIT-3230
Kuvaan perustuva mittaus 2
Tampereen Teknillinen yliopisto
Tarkastaja: Kalle Marjanen

Tiivistelmä

Kiiltävien, läpinäkyvien ja tekstuurittomien kohteiden muodon mittaaminen konenäöllä voi olla hankalaa. Tässä raportissa esitellään kyseisiin tilanteisiin sopiva valon polarisaatioon perustuva menetelmä. Kohteesta heijastuvan valon intensiteetti riippuu nimittäin valon tulokulmasta, materiaalin taitekertoimesta ja polarisaatiosuunnasta. Mittaamalla eri polarisaatiokulmien intensiteettejä ja kiinnittämällä taitekerroin, saadaan käänteisesti laskettua valon heijastuskulma sekä tulotason kulma, jotka määräävät pinnan normaalin. Valitettavasti käänteiskuvaus ei ole yksiselitteinen vaan ratkaisu joudutaan päättämään ennakkorajoitteista tai muilla menetelmillä. Tässä raportissa esitellään menetelmää yleensä sekä testitapausta joulukuusen muovipallon muodon mittauksesta. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että menetelmä toimii kohtuullisen hyvin yksinkertaisella kappaleella, mutta mittausjärjestelyt ovat työläitä ja menetelmä on herkkä häiriöille.

Avainsanat. Kuvaan perustuva mittaus, optiikka, polarisaatio, valaistus.

1. Johdanto

Sähkömagneettisen säteilyn suureista sensorointiin käytetään yleisimmin intensiteettiä (harmaasävykuvat) sekä aallonpituutta (RGB-kuvat, monikanavakuvat). Kolmas sähkömagneettisen säteilyn ominaisuus on polarisaatio, jonka hyödyntäminen on ollut vähäisempää kenties johtuen ihmissilmän kyvyttömyydestä normaalisti havaita valon polarisaatiokulmaa tai ympyräpolarisoituneen valon suuntaa. Luonnossa sen sijaan esiintyy muun muassa hyönteisiä ja sammakkoeläimiä, joille valon polarisaatio on tärkeä esimerkiksi suunnistuksessa.

Tekstuurittomien, kiiltävien ja läpinäkyvien kohteiden muodon mittaukseen on ehdotettu polarisaatioon perustuvaa menetelmää [1–5]. Siinä kohdetta valaistaan tasaisella polarisoimattomalla valolla ja kuvataan polarisaattorin lävitse vakioidulla kuvausgeometrialla käyttäen eri polarisaatiokulmia. Teoriassa kolmella mittauksella saadaan jo selville valon polarisaatioakseleiden suunnat ja polarisaatioaste.

Fresnell'n yhtälöistä johtuen voidaan polarisaatiokulmasta ja -asteesta päätellä kappaleesta heijastuneen valon tulokulma sekä tulotason kulma ja edelleen pinnan normaalin suunta kuvaelementeittään. Yleisessä tapauksessa ratkaisukandidaatteja on kuitenkin neljä, joista oikea joudutaan päättämään esimerkiksi kappaleesta tiedettävien geometriarajoitteiden avulla.

Jotta pinnan normaaleista voitaisiin rekonstruoida kappaleen muoto, täytyy kappaleen olla pinnaltaan sileä sekä lokaalisti että globaalisti. Kappaleessa ei siis saa esiintyä karheutta eikä teräviä reunoja. Lisäksi kappaleen taitekerroin tulisi tuntea. Menetelmällä on siis paljon rajoitteita eivätkä saadut tulokset ole olleet erityisen hyviä. Menetelmällä voi kuitenkin löytyä käyttöä vaikkapa lasiteollisuudesta.

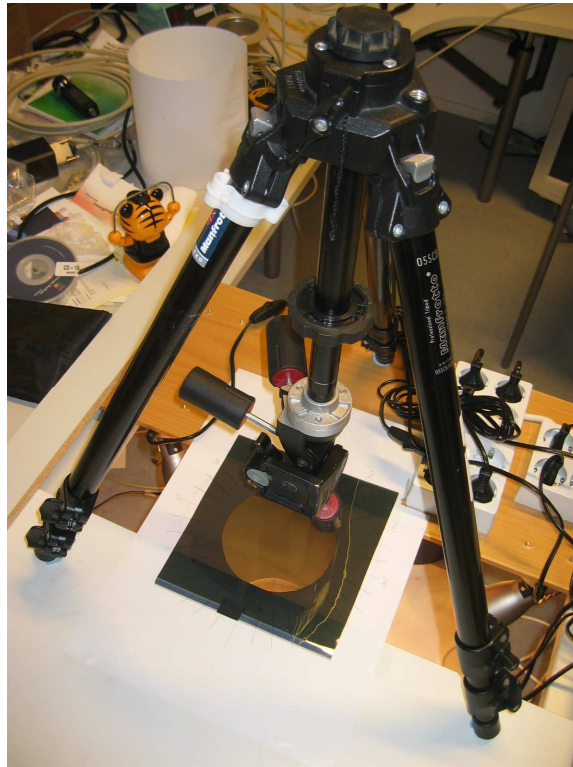
Tässä raportissa esitetään menetelmällä tehtyä ensimmäistä kokeilua yksinkertaisella kappaleella: joulupallolla. Luvussa 2 kuvataan mittausjärjestelyt, luku 3 referoi lyhyesti menetelmän teoriaa ja käytettyjä algoritmeja. Luvussa 4 esitetään ja arvioidaan tuloksia. Lopuksi esitetään johtopäätöksiä ja verrataan tuloksia kirjallisuudessa annettuihin lukuihin.

2. Mittausjärjestelyt

Mittausjärjestelyillä pyrittiin luomaan tasainen valaistus, mittaamaan polarisaattorin kulmaa ja eliminoimaan kappaleen ja kameran liikkeet kuvauksien aikana ja niiden välissä.

Kamera kiinnitettiin kolmijalkaan, joka vuorostaan kiinnitettiin ja tärinävaimennettiin sinitarralla (Kuva 1, kamera puuttuu). Liikkuminen minimoitiin lisäksi käyttämällä kameran ajastinlaukaisua. Kullakin polarisaatiokulmalla otettiin lisäksi kolme kuvaa suodatusta varten. Kameran parametrit, kuten valotusaika ja fokus pidettiin vakioina. Kuvausgeometrian havaittiin pysyneen riittävän vakioina mittauksen aikana.

Polarisaattorin kulmaa mitattiin paperille piirretyn kulma-asteikon avulla. Polarisaattoria käännettiin käsin mittauksen välillä. Mittauksissa käytettyjen polarisaattorikulmien järjestys satunnaistettiin. Kulman virhemarginaaliksi arvioitiin viisi astetta. Mittauksia tehtiin kahdenkymmenen asteen välein.

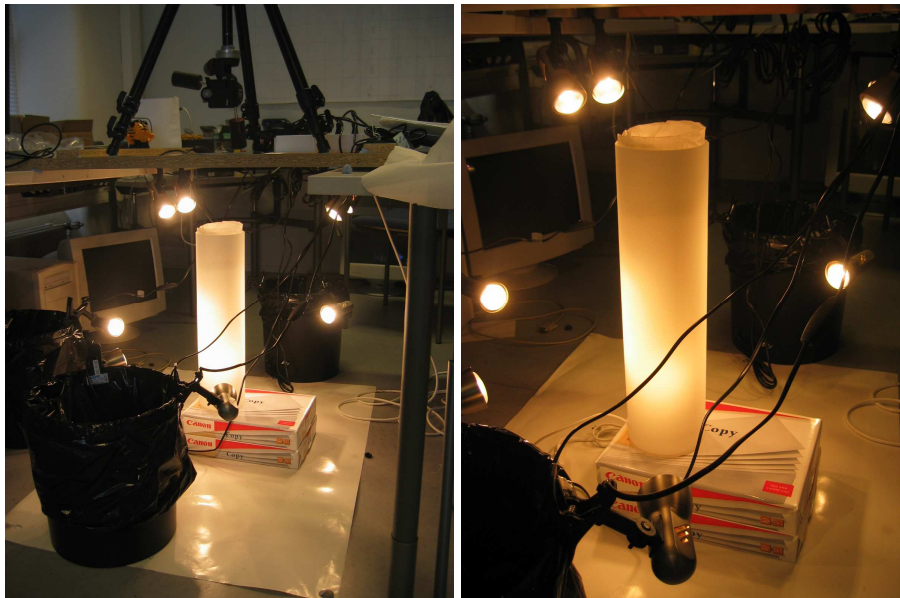


Kuva 1. Polarisaattorin kulmanmittaus ja kameran jalustin.

Tasaisen valaistuksen tuottamiseen käytettiin valkoista lasista valmistettu lampunvarjostinta, joka vuorattiin lisäksi sisältä voipaperilla. Näin syntynyt diffuusoria valaistiin ulkopuolelta kymmenellä spottivalaisimella (Kuvat 2 ja 3).

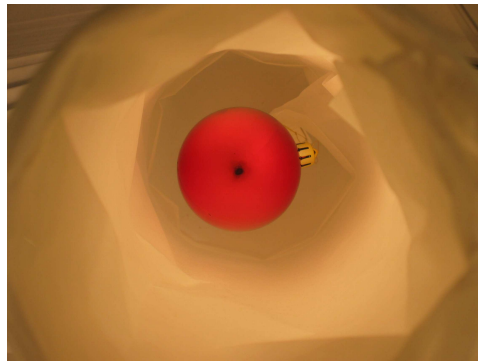


Kuva 2. Diffuusi valaistus luotiin spottilampuilla, lampunvarjostimella, jonka sisällä oli lisäksi voipaperia. Tärinä vaimennettiin sinitarralla.

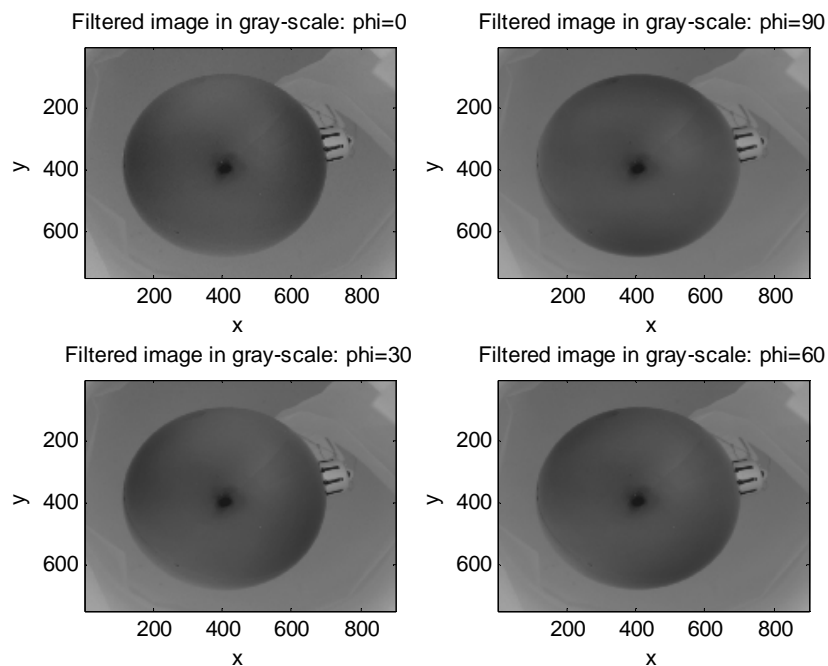


Kuva 3. Valaistusjärjestely.

Kuvassa 4 on värikuva joulupallosta. Valaistuksen havaitaan olevan varsin tasainen. Intensiteettierot johtuvat polarisaatioaste-eroista. Kuvassa 5 esitetään neljä harmaasävykuviksi muutettua, reunoilta rajattua kuvaa kohteesta. Niissä havaitaan selkeitä eroja eri polarisaattorikulmien välillä.



Kuva 4. Joulupallo kuvattuna polarisaattorin kulmalla $\phi = 0$.



Kuva 5. Neljä eri polarisaatiokulmilla otettua kuvaa, joista havaitaan pieniä pinnan muodosta johtuvia intensiteettieroja, joihin muodon mittaus voidaan perustaa.

3. Pinnan normaalin määrittäminen kuvista

Kullakin polarisaattorin kulmalla otettiin kolme kuvaa. Kuvista rajattiin alue, jossa joulupallo sijaitsee ja muutettiin harmaasävykuviksi seuraavasti:

$$gray(m,n) = 0.2989r(m,n) + 0.5870g(m,n) + 0.1140b(m,n) \quad (1)$$

Kullakin polarisaattorin kulmalla otetusta kuvasta tehtiin kuvaelementtikohtaisella mediaanisuuodatuksella yksi kuva:

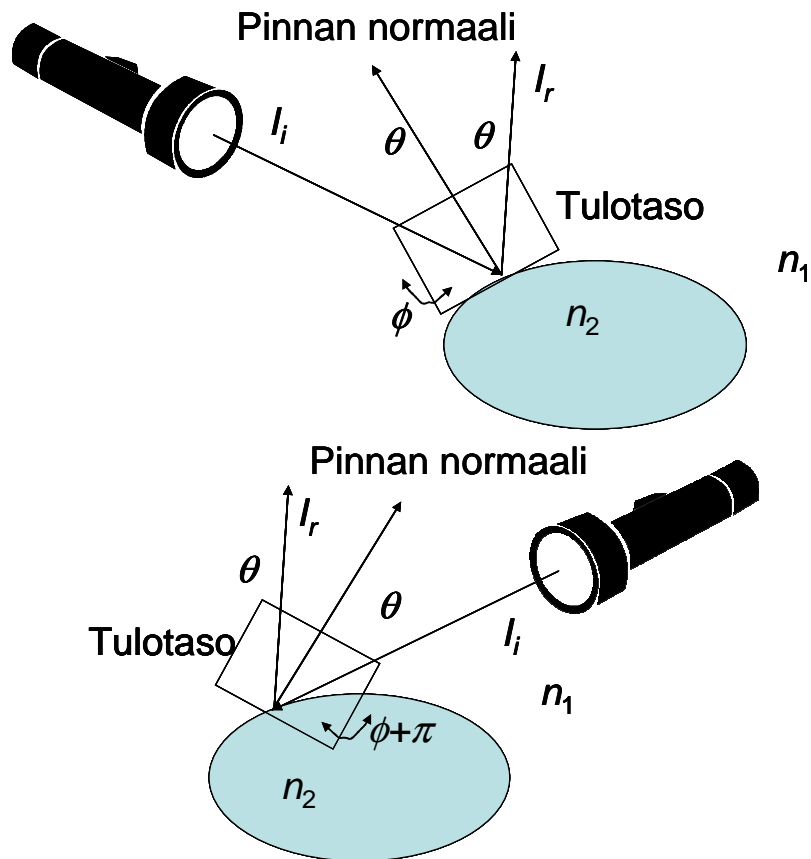
$$gray_{\phi=\phi_i}^{med}(m,n) = \text{med}\{gray_{\phi=\phi_i}^1(m,n) \quad gray_{\phi=\phi_i}^2(m,n) \quad gray_{\phi=\phi_i}^3(m,n)\} \quad (2)$$

Kuvaelementtikohtaisella mediaanisuuodatuksella voidaan poistaa muun muassa impulssikohina tehokkaasti. Mediaanisuuodatuksen lisäksi saadut kuvat suodatettiin 3×3 -ikkunaisella spatiaalisella keskiarvosuotimella.

Valon tulotason kulma määritettiin hakemalla polarisaattorin kulmaa, jossa kunkin kuva-alkion intensiteetti oli pienin. Lisäksi haettiin suurinta intensiteettiä, jotta saatujen suuntien välistä kulmaa voitaisiin käyttää tarkkuusanalyysiin.

Teoriassa saman ja kenties tarkemmankin tuloksen saavuttaisi käyttämällä kolmea tai useampaa mittausta ja sovittamalla niihin ellipsiä, jonka pikkuakselin suunta vastaisi tulotason suuntaa. Tämän menetelmän soveltaminen jätettiin myöhempiin tutkimuksiin.

Tulotason kulma ei ole kuitenkaan yksiselitteinen, sillä vastakkaiset polarisaattorin kulmat ϕ ja $\phi+180^\circ$ antavat täsmälleen saman vasteen (Kuva 6). Oikean kulman valinta tehtiin tässä tutkimuksessa kappaleen geometrian perusteella. Täsmällisemmin määritettiin kuvasta suora, jonka alapuolella kulmiin lisätään 180° .



Kuva 6. Tulotason kulman moniselitteisyys.

Tulotason suunnan lisäksi pinnan normaalin määrittämiseen tarvitaan valon tulokulma θ (Ks. Kuva 6). Sen määrittämiseen käytetään polarisaatioastetta:

$$\rho = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3)$$

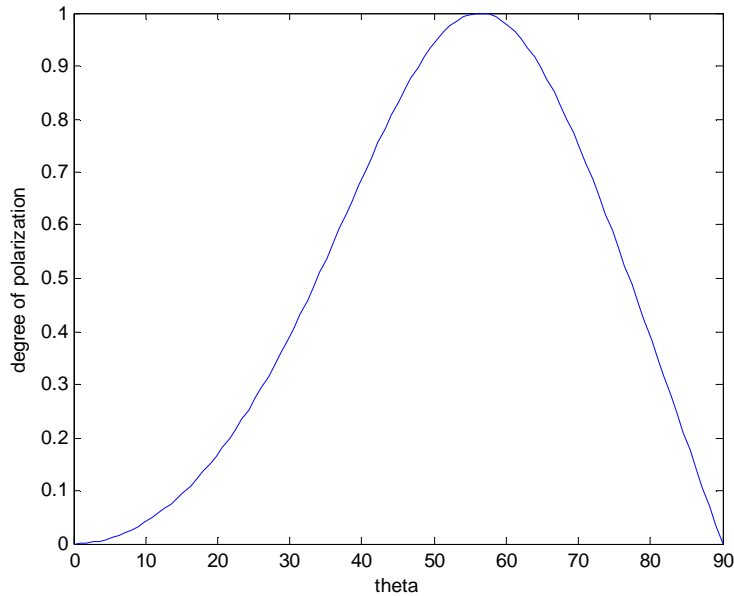
ja tulokulman ja polarisaatioasteen välistä yhteyttä [2]:

$$\rho = \frac{2 \sin^2 \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + \sin^4 \theta}}{n^2 - \sin^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + 2 \sin^4 \theta}, \quad (4)$$

Tulokulman määrittämiseen tarvitaan lisäksi kohdekappaleen taitekerroin n , joka tässä tutkimuksessa arvioitiin olevan muoville tyypillinen 1,5.

Käyttämällä taitekerrointa $n = 1,5$ saadaan Kuvan 7 mukainen funktio, jolla ei ole käänteisfunktioita. Jokaista polarisaatioastetta vastaa kaksi tulokulmaa, Brewsterin kulmaa θ_{Brew} lukuun ottamatta. Brewsterin kulmaa voidaan käyttää erottamaan kappaleesta alueita, joista toisissa $\theta > \theta_{Brew}$ ja toisissa $\theta < \theta_{Brew}$. Teoriassa tasaisilla kappaleilla alueita erottaa suljettu käyrä, Brewsterin käyrä, jossa $\theta = \theta_{Brew}$ [2].

Käytännössä polarisaatioaste ei saavuta ykköstä ja Brewsterin kulmassa olevien kuvaelementtien polarisaatioaste vaihtelee. Näin ollen kuvan segmentointi eri tulokulman käänteisfunktioihin vaikeutuu.



Kuva 7. Polarisaatioasteen ja tulokulman välinen yhteys ilman ja materiaalin rajapinnalla, jossa $n = 1.5$. Havaitaan, että kutakin polarisaatioastetta vastaa kaksi tulokulmaa.

Tässä tutkimuksessa segmentointi toteutettiin skaalaamalla polarisaatioasteet uudelleen globaalisti:

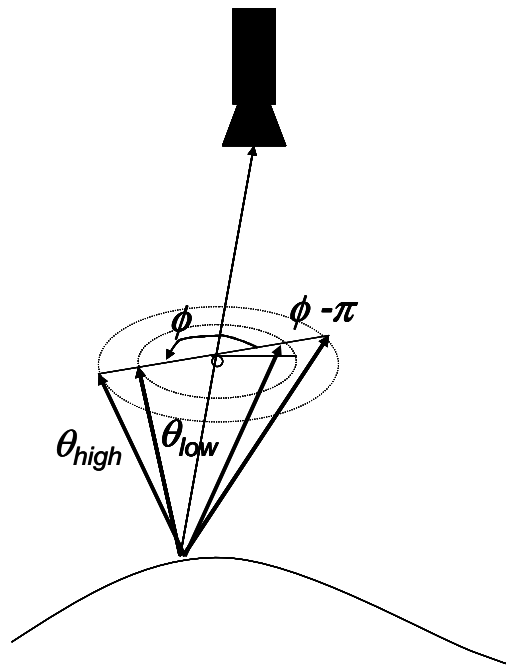
$$\rho_{rs} = \frac{\rho - a}{b - a}. \quad (5)$$

Skaalauksen jälkeen kuva segmentoitiin etenemällä kuvassa riveittäin vasemmalta oikealle, kunnes ylemmän tulokulman käänteisfunktion arvot olivat annettua marginaalia lähempänä alemmaa tulokulmaa. Sama

toistettiin oikealta. Väliin jäävään alueeseen käytettiin alempia tulokulmia ja kuvan reunoille ylempiä.

Segmentointi toistettiin vertikaalisti. Saaduista segmentoinneista otettiin looginen AND ja tulos suodatettiin keskiarvoistamalla. Saadusta sumeasta segmentoinnista koottiin lopullinen tulokulma käyttämällä joko ylempää tai alempaa kulmavaihtoehtoa riippuen, kumpaa lähempänä segmentointi oli. Täsmäytysmenetelmänä olisi voitu käyttää myös painotettua keskiarvoa ylemmästä ja alemmasta kulmasta, jolloin olisi saatu tasaisempi tulos Brewsterin käyrän läheisyydessä.

Kuvassa 8 esitetään menetelmän antamat neljä pinnan normaalin vaihtoehtoa. Normaalit esitetään pallokoordinaatistossa, jossa r vapaasti valittavissa, useimmiten $r = 1$ eli normaalit ovat yksikkövektoreita.



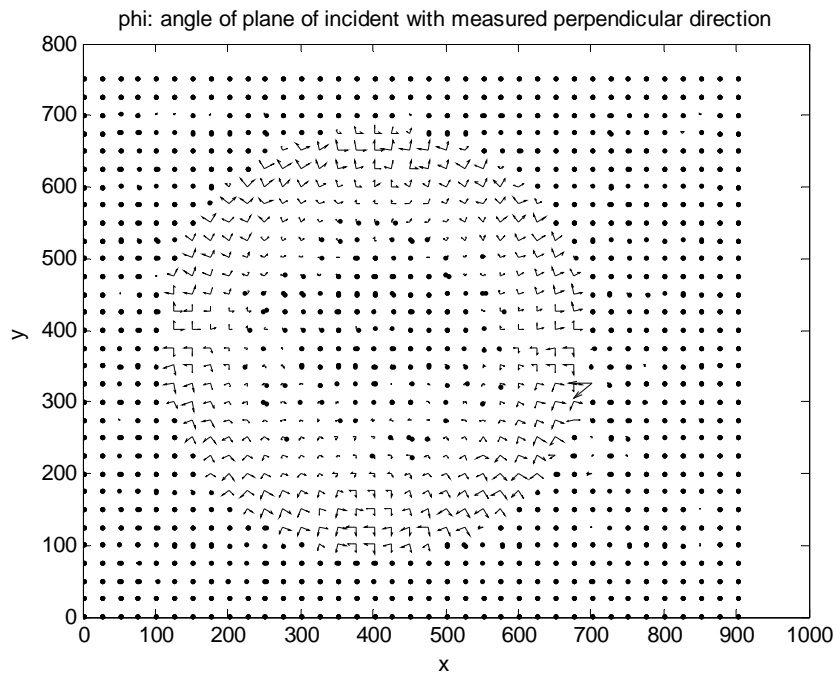
Kuva 8. Mitatun minimipolarisaation kulman (ϕ) ja polarisaatioasteesta määritettyjen tulokulmien (θ) tarjoamat vaihtoehdot pinnan normaaliksi.

4. Tulokset

Menetelmää sovellettiin joulupallon muodon mittaamiseen. Tuloksissa esitetään kuvista määritetyt tulotason kulmat ja tulokulmat. Tuloksia verrataan rekonstruoituun täydelliseen palloon, jonka säde ja sijainti on arvioitu kuvasta.

4.1. Tulotason kulma

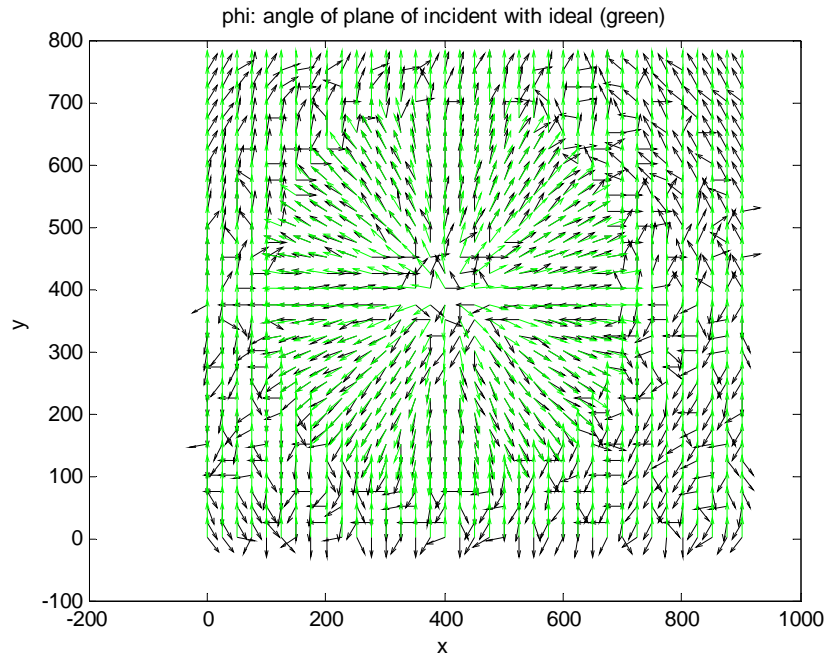
Tulotason kulma ϕ ja maksimi-intensiteetin mukainen kulma määritettiin joka viidennen rivin joka viidennelle sarakkeelle. Tuloksista alinäytteistetty kuvaaja on Kuvassa 9. Siitä on havaittavissa pallon muoto. Lisäksi saadut kulmat ovat lähes kohtisuorassa toisiaan vasten erityisesti pallon reunamilla, jossa polarisaatioaste on suurimmillaan.



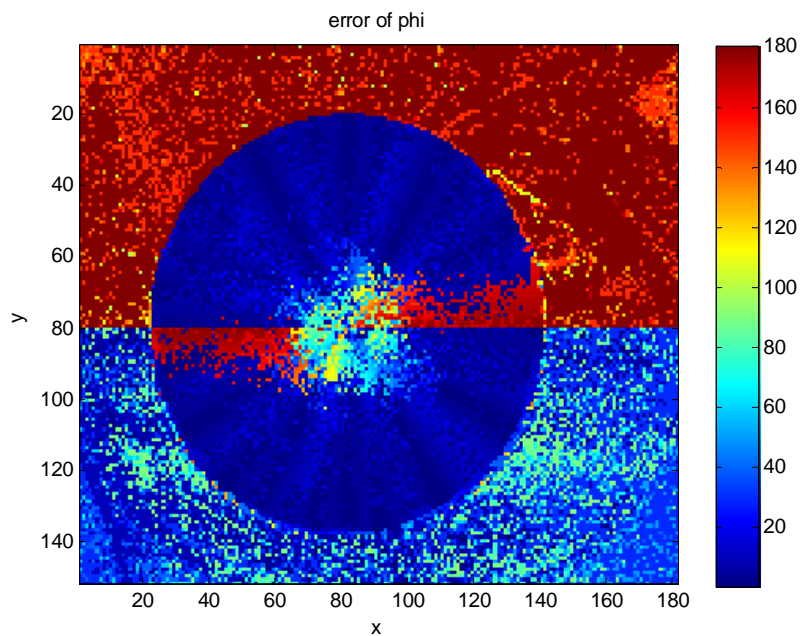
Kuva 9. Tulotason suunta sekä maksimi-intensiteetin mukainen suunta, jonka pitäisi olla kohtisuorassa tulotasoja kohti. Vektoreiden pituus kuvaa polarisaatioastetta.

Kuvassa 10 vuorostaan verrataan mitattua kulmaa laskettuun vertailuarvoon. Tulokset osoittavat, että pallon keskikohdassa tulotason kulmaa ei saatu luotettavasti määritettyä, mikä johtuu pienestä polarisaatioasteesta.

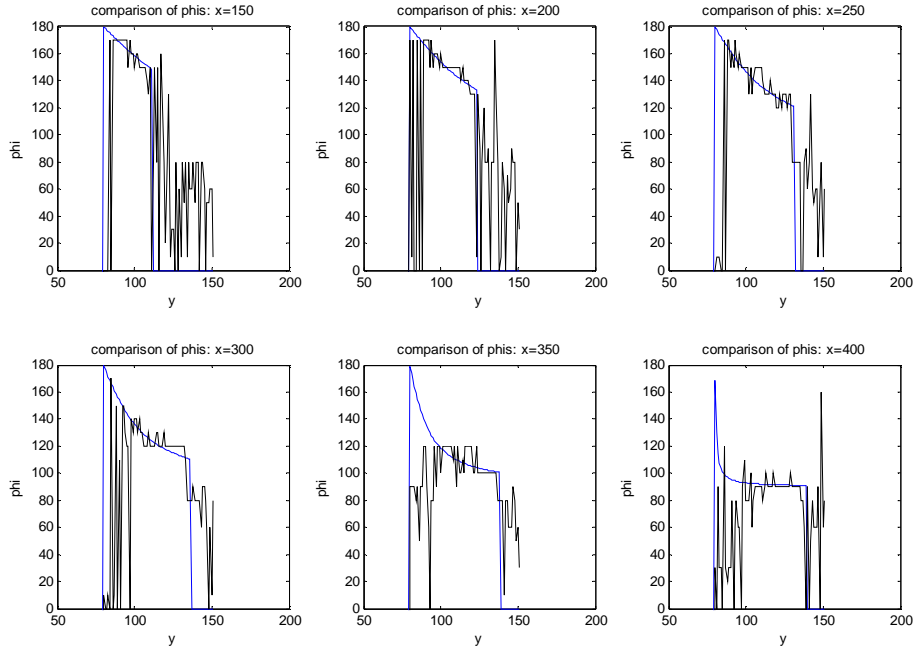
Kuvan 11 virhekartasta havaitaan myös virheen suureneminen keskustaa kohti. Lisäksi nähdään vahva horisontaalinen virhevyö pallon puolivälissä. Virhe aiheutunee algoritmisen 180° asteen käynnön heikkoudesta. Mielenkiintoinen ilmiö on myös tangentialisesti esiintyvä virheen moduloituminen. Ilmiö voitaneen lukea epätasaisen valaistuksen ja kappaleen pinnalla tapahtuvan sironnan aiheuttamaksi.



Kuva 10. Mitattu tulotason kulma (musta) ja ideaalisen pallon teoreettinen tulotason kulma (vihreä). Pallon keskiosassa, jossa polarisaatioaste on pieni, on mitatussa kulmassa runsaasti virhettä.



Kuva 11. Tulotason virhe väärävärinä. Horisontaalinen virhealue selittyy 180° käännön virheellä.



Kuva 12. Tulotason kulma kuudessa vertikaalisessa poikkileikkauksessa (musta) sekä laskettu ideaalinen kulma (sininen).

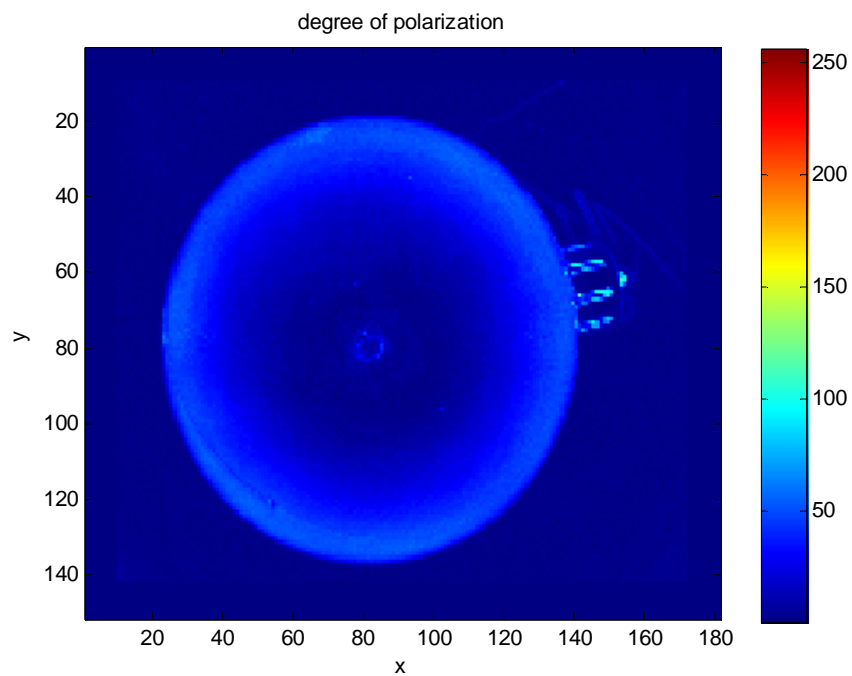
Kuvassa 12 esitetyistä lasketun ja mitatun tulokulman välisistä poikkileikkauksuvaajista voidaan arvioida, että suodattamalla korkeataajuiset komponentit tulosta voitaisiin tasoittaa ja parantaa.

Pallon alueelta lasketun tulotason kulman keskivirhe oli $24,3^\circ$. Ottaen huomioon, että mittausväli oli 20° , voidaan tulosta pitää kuitenkin kohtuullisen hyvänä. Tasajakautuneen virheen odotusarvo ideaalisesti olisi nimittäin 10° .

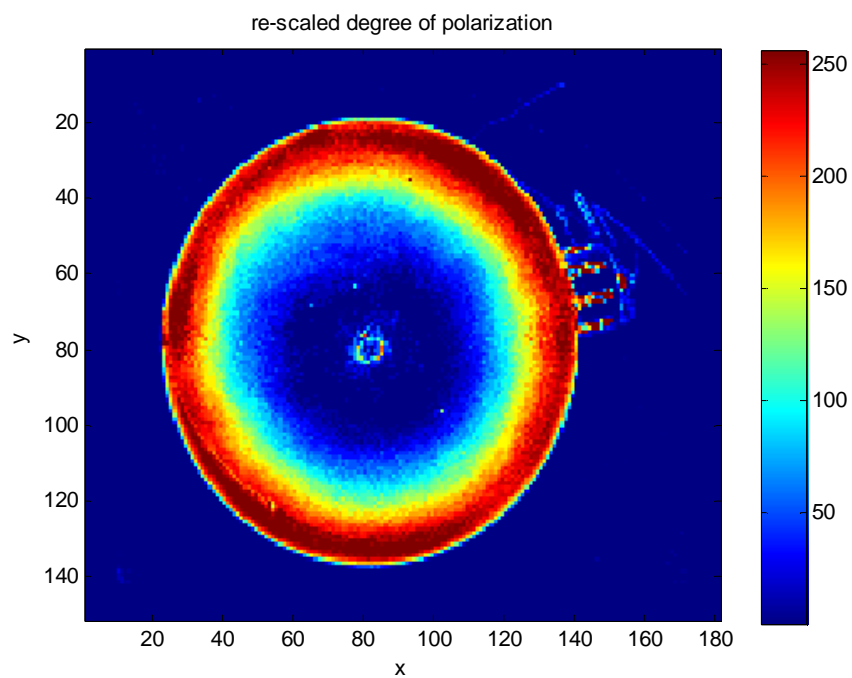
4.2. Tulokulma

Tulokulman määrittäminen perustuu polarisaatioasteeseen (Kaavat 3 ja 4). Käytännössä polarisaatioaste on pienempi kuin mitä Kaava 4 antaisi johtuen muun muassa sironnasta. Kuvassa 13 esitetään alkuperäinen, kuvasta laskettu polarisaatioaste, joka jää hyvin alhaiseksi.

Kaavan (5) mukaisesti skaalaamalla parametreilla $a = 0.02$ ja $b = 0.2$ polarisaatioaste tulee Kuvan 14 mukaiseksi. Nyt Brewsterin kulmalla ($\theta \approx 55^\circ$) saavutetaan noin polarisaatioaste $\rho = 1$. Kuvaa ei kuitenkaan saada aivan selvää ja yhtenäistä Brewsterin käyrää.

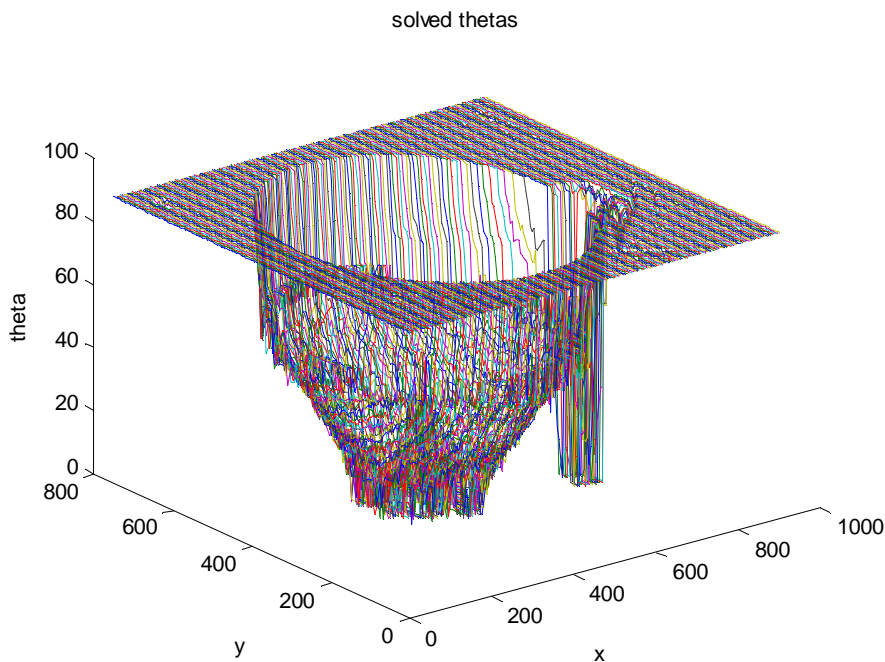


Kuva 13. Alkuperäinen polarisaatioaste $\times 256$.



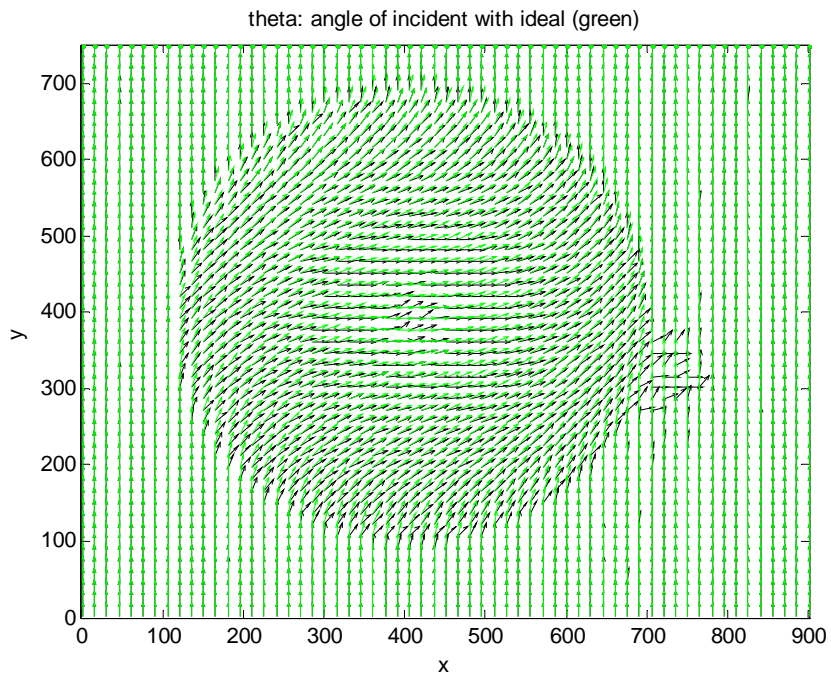
Kuva 14. Polarisaatioaste $\times 256$ skaalauksen jälkeen.

Segmentoinnin jälkeen valittiin käänteisfunktiovaihtoehdoista toinen. Saadut tulokulmat on esitetty Kuvassa 15, josta ilmenee, että suurempi tulokulma pienenee ehkä hieman liian nopeasti pallon reunamilla aiheuttaen derivaatan epäjatkuvuutta vaihtumiskohdassa. Keskiarvoistavalla täsmäytyksellä tilannetta voisi kenties parantaa.

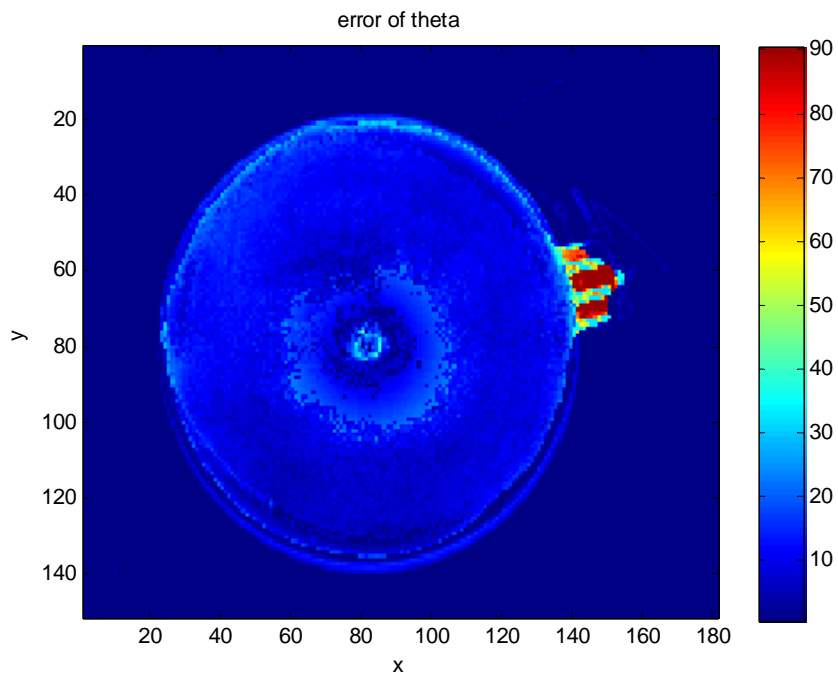


Kuva 15. Ratkaistut tulokulmat segmentoinnin jälkeen.

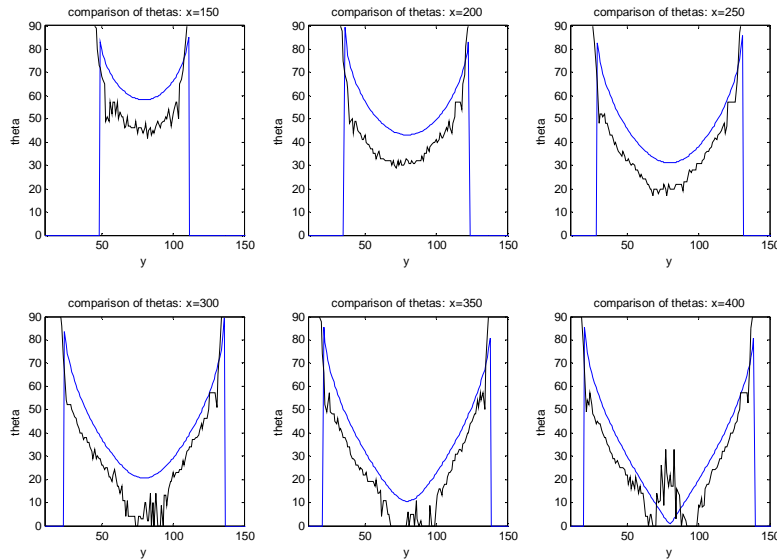
Kuvassa 16 lasketut ja mitatut tulokulmat on esitetty vektoreina. Tuloksista on havaittavissa, että mitatut kulmat ovat hieman laskettuja pienempiä, erityisesti reunassa. Lisäksi keskustassa polarisaatioaste poikkeaa selvästi nollasta. Kuvassa 17 esitetään tulokulman virhe väärävärinä. Siinä esiintyy ympyrän muotoinen artefakti, joka selittyy ideaalisen referenssipallon ja todellisen pallon sijainnin ja koon eroavuudella. Pallon kiinnitysruuvi oli eri materiaalia ja uritettu, mikä näkyy Kuvassa 17 selkeästi.



Kuva 16. Mitatut (musta) ja lasketut tulokulmat (vihreä) suhteessa x -akseliin.



Kuva 17. Tulokulman virhe asteina.



Kuva 18. Mitatun ja lasketun tulokulma vertikaalisia poikkileikkauksia.

Kuvassa 18 esitetyistä poikkileikkauksista käy ilmi, että mitattu tulokulma on järjestäen todellista pienempi. Kohinan määrä on sen sijaan tulokulman tasoa pienempi, mikä johtuu 3×8 bitin intensiteetin mittatarkkuudesta tulokulman tason 20° verrattuna.

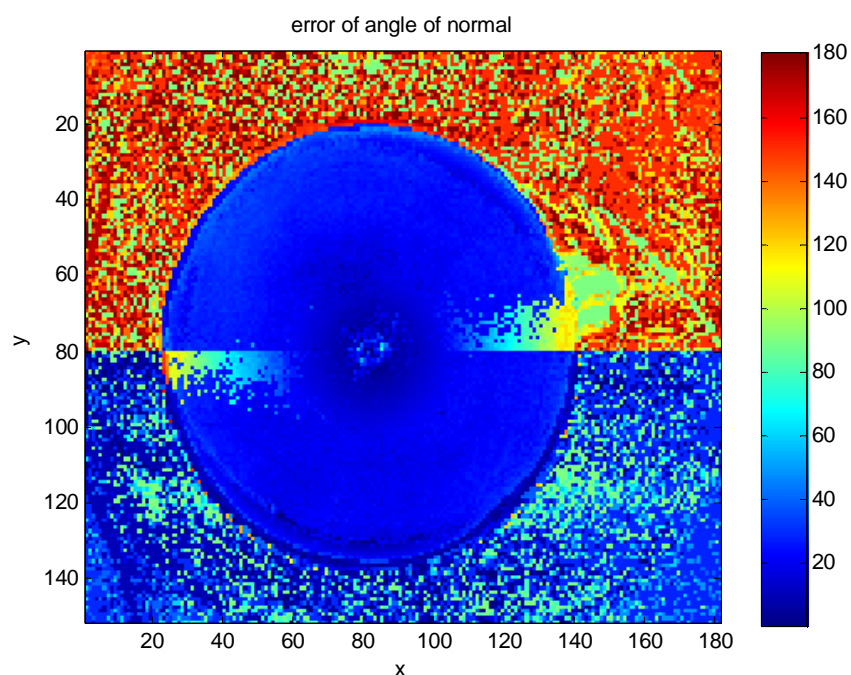
Tulokulman keskivirhe pallon alueelta oli $11,2^\circ$. Virhe on pienempi kuin tulokulman tason kulmavirhe, mutta toisaalta tulokulman määrittäminen perustuu intensiteettiin, jonka mittausdynamiikka oli huomattavasti parempi.

4.3. Normaali

Lopuksi tutkitaan pinnan normaalin kokonaisvirhettä suhteessa ideaalisen pallon normaaliin. Kuvassa 19 esitetään virhe väärävärivä. Siinä on havaittavissa horisontaalinen virhealue keskivaiheilla, kuten tulotason kulman virheessäkin, sekä pallon keskustan ja reunojen virheet. Tangentiaalista modulaatiota ei sen sijaan ole enää havaittavissa.

Pinnan normaalin kulman keskivirhe oli $26,7^\circ$. Tulotason kulman ja tulokulman virhe ovat kokonaisuudessaan ortogonaalisia, koska $\varepsilon_\phi^2 + \varepsilon_\theta^2 = \varepsilon_{norm}^2$, $24,3^2 + 11,2^2 = 26,7^2$. Virheet eivät kuitenkaan ole joka pisteessä riippumattomia. Virheen suuruuksien välillä on selvää

paikasta riippuvaa korrelaatiota. Erityisesti pallon keskikohdassa molemmat virhekomponentit ovat suuria.



Kuva 19. Mitatun ja lasketun pinnan normaalin välinen kulma.

5. Johtopäätökset ja yhteenveto

Polarisaatioon perustuva muodonmittaus osoittautui lupaavaksi menetelmäksi yksinkertaisella pallomaisella kappaleella. Kirjallisuudesta löytyvät vertailuarvot virheille osoittavat, että tässä raportissa esitetyt tulokset ovat hieman heikompia: tulokulman virhe $11,2^\circ$ vs. $8,5^\circ$ [2], normaalin virhe $26,7^\circ$ vs. 19° [1]. Erityisesti normaalin virheeseen vaikuttaa kuitenkin tässä tutkimuksessa käytetty polarisaattorikulman resoluutio 10° vs. tyypillinen 5° , jota lienee käytetty myös Miyazakin [1] tutkimuksessa. Tulotason kulman määrittystä pystyisi parantamaan yksinkertaisimmin ellipsin sovituksella.

Polarisaatioon perustuvan muodonmittauksen heikkoina puolina pidettäköön mittausjärjestelyiden hankaluutta ja hitautta sekä mitattaville kappaleille asetettuja rajoitteita. Tutkimuksessa kävi ilmi, että yksinkertaisenkin kappaleen polarisaatioaste vaihteli runsaasti johtuen luultavimmin epätasaisesta valaistuksesta ja sironnasta. Algoritmeissa on

lisäksi vapaita parametreja, joiden vaikutusta tuloksiin ei juurikaan tutkittu.

Kiitokset

Olli Kanniaisen apu mittausten teossa oli suureksi hyödyksi. Kiitokset Kalle Marjaselle ja kurssin muille opiskelijoille interaktiivisesta asiointiin perehtymisestä.

Viitteet

- [1] D. Miyazaki, R.T. Tan, K. Hara, K. Ikeuchi (2003): Polarization-based inverse rendering from a single view. In: *Proc. of the 9th IEEE Int. Conf. on Computer Vision*.
- [2] D. Miyazaki, M. Kagesawa, K. Ikeuchi (2004): Transparent surface modeling from a pair of polarization images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **26**(1): 73-82.
- [3] D. Miyazaki, K. Ikeuchi (2005): Inverse polarization raytracing: estimating surface shapes of transparent objects. In: *Proc. Of the 2005 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 910-917.
- [4] S. Rahmann (2000): Polarization images: a geometric interpretation for shape analysis. In: *Proc. of the 15th Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol. 3, pp. 538-542.
- [5] S. Rahmann, N. Canterakis (2001): Reconstruction of specular surfaces using polarization imaging. In: *Proc. of the 2001 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 149-155.