Aalto-yliopisto Perustieteiden korkeakoulu Tietotekniikan koulutusohjelma

Virheen mittaus valkoisen valon 3D-skannauksessa

Kandidaatintyö

11. lokakuuta 2016

Sami Lappalainen

KANDIDAATINTYÖN TIIVISTELMÄ

Aalto-yliopisto Perustieteiden korkeakoulu Tietotekniikan koulutusohjelma

Tekijä:	Sami Lappalainen		
Työn nimi:	Virheen mittaus valkoisen valon 3D-skannauksessa		
Päiväys:	11. lokakuuta 2016		
Sivumäärä:	22		
Pääaine:	Tietotekniikka		
Koodi:	SCI3027		
Vastuuopettaja:	Juho Kannala		
Työn ohjaaja(t):): Prof. Antti Hannukainen, TkT Jarmo Malinen (Matematiikan		
	systeemitekniikan laitos)		

Tässä työssä tutkitaan valkoisen valon 3D-skannausta ja tekniikalla tuotetun pintamallin sisältämää virhettä. Työn tavoitteena on selvittää ovatko tuotetut pintamallit soveltuvia käytettäviksi puheakustisissa malleissa, joissa muut virhelähteet ovat pieniä. Työssä huomioidaan ainoastaan tekniikan aiheuttama geometrinen virhe.

Tutkimusta varten rakennettiin mittausjärjestelmä, jolla tehtiin kolmenkymmenen mittauksen sarja. Matemaattisilla menetelmillä määritettiin pintamallien virhe suhteessa alkuperäiseen kappaleeseen. Tutkimme virheen suuruutta suhteessa skannatun kappaleen kallistuskulmiin sekä kamera-asetusten vaikutusta virheeseen.

Virheen mittareiksi valittiin vinouma sekä pistejoukon etäisyys oikeasta muodosta. Tuloksena saatiin pistejoukon etäisyyden neliöllisen keskiarvon vaihteluväliksi 0.14-0.47mm, joka vastasi aiempien tutkimusten havaintoja. Lopputuloksena havaitsimme että kuluttajaluokan 3D-skannerilla tuotettuja pintamalleja voidaan virheen suuruuden osalta käyttää hyväksi akustisissa tilamalleissa.

Avainsanat:	Valkoisen valon menetelmä, 3D-skannaus, virhe,
Kieli:	Suomi

1	Joh	danto	4				
2	Taustaa						
3	Vall	koisen valon menetelmä	5				
4	Tek	niikka	6				
	4.1	Mittausjärjestely	7				
	4.2	Mittausjärjestelmän kalibrointi	8				
	4.3	Skannauksessa käytettävien kuvien enkoodaus	10				
	4.4	Datan kerääminen	11				
	4.5	Kuvien dekoodaus	12				
	4.6	Pistepilven määrittäminen	12				
	4.7	Pinnan muodostaminen	12				
5	Mit	taukset	13				
	5.1	Skannattava kappale	13				
	5.2	Järjestely	14				
6	Mit	taustulosten analysointi	15				
7	Tul	osten tarkastelu	17				
	7.1	Levyn kallistuskulman suhde virheeseen	17				
	7.2	Virhelähteet	17				
	7.3	Lopputulokset	21				
Lä	ihtee	t	22				

1 Johdanto

3D-skannaus on kiinnostanut tutkijoita jo 1960-luvulta lähtien, mutta siitä on vasta viime vuosina tullut varteenotettava kuluttajaluokan teknologia esineiden pinnanmuotojen digitoimiseen. Saatavilla on sekä kaupallisia, että avoimeen lähdekoodiin perustuvia skannausjärjestelmiä, joissa käytetään useita eri teknologioita. Skannaukseen voidaan käyttää useita eri menetelmiä päätyyppien ollessa kontaktimittaus ja kontaktiton mittaus. Kontaktittomiin tekniikoihin kuuluvat esimerkiksi mittaukset laserin tai strukturoidun valon avulla. Kontaktillisissa mittauksissa kappaletta mitataan anturilla, joka mittaa kappaleen siihen aiheuttamaa siirtymää kontaktissa. Tämä on kuitenkin hidasta, sillä kappale joudutaan käymään läpi piste kerrallaan. Kontaktittomien tekniikoiden etuihin kuuluvatkin varsinkin nopeat mittaukset.

Valkoisen valon 3D-skannaus on kontaktiton skannaustekniikka, jossa digitoitavaa kappaletta valaistaan sarjalla tietokoneella generoituja kuvioita yhden tai useamman kameran kuvatessa sitä. Valkoisen valon 3D-skannaus on ollut käytössä jo 1980-luvun puolivälistä lähtien [3], mutta tietokoneiden prosessointitehon ja suppean muistikapasiteetin vuoksi siitä on tullut vasta viime vuosina kuluttajakäyttöön sopiva teknologia. Tekniikassa kappaleen pintamalli määritetään vertailemalla kuvista löytyviä vääristymiä suhteessa alkuperäiseen kuvioon. Kappaleen pintaan projisoitava kuvio on suunniteltu siten, että jokainen pikseli voidaan yksilöidä saaduista kuvista. [2]

Tämä kandidaatintyö käsittelee virheen mittaamista valkoisen valon menetelmällä 3Dskannatuista kappaleista. Osana työtä on rakennettu ja esitelty Structured Light Scanning (SLS) tekniikkaan perustuva järjestelmä käyttäen avoimen lähdekoodin ohjelmistoa, kahta harrastekäyttöön tarkoitettua järjestelmäkameraa sekä kuluttajaluokan videoprojektoria. Tässä tutkimuksessa keskitymme kappaleen oikean muodon ja tuotetun pintamallin väliseen virheeseen. Virheen määrittämiseksi skannaamme rakentamallamme järjestelmällä kappaleita joiden fyysiset mitat ja ominaisuudet tunnetaan. Tutkimuksessa selvitämme onko virhe tutkimusjärjestelmästä johtuva systemaattinen virhe, vaiko tekniikasta ja kappaleen muodoista johtuva virhe. Virheen määrittämisen lisäksi tutkitaan virhelähteitä ja niiden osuutta kokonaisvirheeseen. Tämä tutkimus ei ota kantaa saadun pinnan värin tai heijastumisen määrittämiseen vaan olemme kiinnostuneita vain pintamallin geometrisestä virheestä.

Tämän työn rakenne on seuraava: Luvussa 2 käsitellään tutkimuksen taustaa, luvussa 3 käsitellään valkoisen valon 3D-skannauksen menetelmää ja ongelmia. Luvussa 4 käydään läpi skannauksessa käytettävää tekniikkaa ja esitellään tässä tutkimuksessa käytetty mittausjärjestely. Luvussa 5 käydään läpi suoritetut mittaukset ja luvussa 6 mittausten analysointi. Lopuksi luvussa 7 määritämme virheen, virhelähteet ja esittelemme tulokset.

2 Taustaa

Työ tehdään Matematiikan ja Systeemitekniikan laitoksen puheentutkimuksen ryhmässä osana projektia, jonka tavoitteena on tuottaa tarkka kolmiulotteinen malli Turun yliopistollisessa sairaalassa käytössä olevasta magneettikuvauslaitteesta (MRI). Työn tavoitteena on tutkia mihin virheluokkaan valkoisen valon 3D-skannauksella on mahdollista päästä ei-kaupallisella skannausjärjestelmällä ja mitkä näistä virhetekijöistä voidaan minimoida mittausjärjestelmää rakennettaessa. Työssä tutkitaan onko SLS-teknologialla tuotetun pintamallin virhe luokaltaan suurempi verrattuna tutkimuksessa aiemmin käyttämiimme teknologioihin, kuten MRI-kuvantamisen avulla tuotettuihin ääntöväylägeometrioihin. Virheen määrittäminen on tärkeää sillä molemmilla tekniikoilla tuotettuja pintamalleja on tarkoitus käyttää osana samaa puheakustista mallia, jossa puheäänteitä pyritään simuloimaan numeerisesti. Koska numeerisesti simuloitua puhetta verrataan MRIkuvauksen aikana äänitettyyn puheääneen, tulee mallissa ottaa huomioon myös MRIkelojen aiheuttaman rajoitetun tilan akustiikka.

Turun Yliopistollisesta sairaalasta löytyvällä Siemens Avanto 1.5T MRI-kuvantamislaitteella saavutetaan interopoloinnin kautta jopa 0.4mm tarkkuus kuvantamisen aikana. MRIlaitteessa käytettävä pääkela on riittämätön kaulan alueen kuvantamiseen, joten sen kanssa käytetään myös tarkkuutta kurkunpään alueella parantavaa kaulakelaa.

3 Valkoisen valon menetelmä

Valkoisen valon 3D-skannaus perustuu skannattavan kappaleen pinnanmuodon aiheuttamiin vääristymiin sen pintaan projisoidussa kuviossa. Useimmiten kuviona käytetään binääri- tai harmaaenkoodattua raitakuviota, mutta käytettäväksi soveltuvat myös viivalaser tai monivärinen valo [4]. Menetelmän vaatima mittausjärjestelmä on halpa ja yksinkertainen toteuttaa. SLS-järjestelmä koostuu yksinkertaisimmillaan vain kamerasta, projektorista sekä kalibrointilevystä.

Skannauksessa käytettävien kameroiden resoluution tulisi olla projektorin resoluutiota suurempi, jotta kappaleen pintaan projisoidun kuvion pikselit voidaan luotettavasti yksilöidä kuvista. Kameroiden resoluutio ei kuitenkaan vaikuta lopullisen pintamallin resoluutioon sillä lopullinen pistepilvi muodostetaan projektorin näkökulmasta. Järjestelmän tarkkuutta voidaan nostaa suuremman erottelutarkkuuden omaavilla kameroilla sekä projektorilla.

Koska menetelmässä käytetään paikallaan pysyvää valonlähdettä, ei sillä pystytä skannaamaan alueita joihin valo ei pääse kappaleen pinnalla. Tämä aiheuttaa saatuihin kuviin varjoalueita joita ei voida rekonstruoida ilman että kappaletta skannataan useista eri asennoista. Useiden pintamallien yhdistäminen yhdeksi on haastavaa varsinkin jos pintamallit ovat epämuodostuneita tai sisältävät artefakteja. Menetelmä aiheuttaa myös enemmän virhettä kaarevilla pinnoilla kuin projektoriin kohden kohtisuorilla pinnoilla, sillä projisoidut kuviot venyvät suuremmalle pinta-alalle kappaleen pinnalla, jolloin menetelmän tarkkuus heikkenee.

Lopullinen pintamalli saattaa sisältää reikiä jos useampi kuin yksi skannauskuvion pikseleistä on havaittu samalla kameran kennon pikselillä. Tämä ilmiö voidaan havaita alta löytyvistä kuvista 1(a) ja 1(b), joista ensimmäisessä skannattava levy on asetettu kohtisuoraan projektoriin nähden ja toisessa pieneen kulmaan suhteessa toisen kameran optiseen akseliin. Kuvassa 1(b) nähtävä pinta on aiemmin esitetyn ilmiön takia hyvin puutteellinen, kun taas kuvan 1(a) pintamalli on hyvälaatuinen.



(a) Projektorin optista akselia kohtisuorassa ole- (b) Toisen kameran optisen akselin suuntainen van tason rekonstruktio taso

Kuva 1: Kaksi rekonstruktiota samasta levystä eri olosuhteissa

Virhettä mittauksiin voivat tuoda ainakin mittausjärjestelyn muuttuminen, käytettävän kalibrointilevyn pinnan epätasaisuudet, kameroiden optiikka ja etäisyys mittausalueesta, projektorin erottelukyky ja tarkennusalue sekä mittausjärjestelmän ulkopuolelta tuleva kirkas valo.

4 Tekniikka

Tässä kappaleessa esitellään rakentamamme mittausjärjestelmä sekä itse menetelmän toteutuksessa käytettyä tekniikkaa.

Käyttämässämme 3D-UNDERWORLDSLS ohjelmistossa pintamalli saadaan alla kuvatulla prosessilla:

- 1. Skannauksessa käytettävien kuvioiden enkoodaus
- 2. Kameroiden kalibrointi
- 3. Datan kerääminen
- 4. Kuvien dekoodaus
- 5. Pistepilven luominen
- 6. 3D-pinnanmuodostus

Prosessin lopuksi ohjelmisto on generoinut pintamallin digitoitavasta kappaleesta.

4.1 Mittausjärjestely

Työtä varten rakennettiin kuvan 2 mukainen mittausjärjestelmä joka koostuu käyttämämme ohjelmiston [2] vaatimusten mukaisesti kahdesta kamerasta ja LCD-projektorista. Kameroina käytimme Canon EOS 1000D järjestelmäkameroita joiden kuvakennon resoluutio on 3888 x 2592. Tarkkuuden maksimoimiseki kaikki kuvanäytteet otettiin tällä resoluutiolla. Molempiin kameroihin on kiinnitetty samanlaiset Canon EF-S 18-55mm 3.5-5.6 objektiivit, joiden polttovälit ovat lineaarisesti säädettävissä välillä 18-55mm. Tutkimuksessa käytettävä valonlähde on kuluttajaluokan InFocus LP755 LCD projektori 1024x768 resoluutiolla.

Mittausjärjestelmää testatessa havaitsimme että projektorissa käytettävä tekniikka saattaa vaikuttaa skannauksen aikana otettavien kuvien laatuun. Kokeilimme aluksi korkeamman resoluution omaavaa DLP-tekniikkaa (Digital Light Processing) käyttävää BenQ W1011 projektoria, mutta kuvia otettaessa havaittiin värisiirtymää kuva-alueella johtuen DLP-tekniikan tavasta muodostaa kuvan värit yksi kerrallaan projektorin sisällä pyörivällä värikiekolla. Värisiirtymä vaikutti kuvien dekoodaamiseen haitallisesti, joten vaihdoimme projektorin matalamman resoluution omaavaan LCD-projektoriin, jolla värisiirtymää ei pääse erilaisen kuvanmuodostustekniikan vuoksi tapahtumaan.

Mittausjärjestelmässä projektori on noin 100cm päässä skannattavasta kappaleesta ja sen heijastama valokeila peittää kappaleen mahdollisimman hyvin. Käytettävät kamerat sijaitsevat noin 50cm päässä projektorista, sen molemmilla puolilla ja noin projektorin korkeudella. Tynnyrivääristymän minimoimiseksi käytämme objektiivien suurinta polttoväliä eli 55mm:ää. Kameroiden ja projektorin optiikka on tarkennettu skannattavan kappaleen syvyysalueelle. Järjestelmä kalibroidaan OpenCV ohjelmiston mukana tulevalla, mustavalkoisella shakkilautakuviolla, esitettynä kuvassa 3, joka on liimattu 16mm paksuisen 300x300mm melamiinilevyn päälle. Melamiinilevy on valittu materiaaliksi, sillä se valmistetaan tarkoilla toleransseilla suoraksi. Levyn suoruus on tärkeää sillä järjestelmä kalibroidaan sen määrittämään tasoon. Jos levystä löytyy pullistumia tai kuoppia niin ne siirtyvät vääristymäksi tuotettuun pintamalliin. Kalibrointikuvion ruutujen kooksi mitattiin työntömitalla 23.9x23.6mm (korkeus, leveys).



Kuva 2: Mittausjärjestelmä

4.2 Mittausjärjestelmän kalibrointi

Mittausjärjestelmän kalibrointi suoritetaan kahdessa vaiheessa. Ensin poistetaan kameroiden optiikan aiheuttamat vääristymät ja tämän jälkeen kalibroidaan koko mittausjärjestelmä. Kameroissa ja valonlähteessä käytettävä optiikka ei ole virheetöntä vaan kuvantamiseen käytettävissä linsseissä voidaan havaita esimerkiksi vinjetointia sekä tynnyrivääristymää. Optiikan aiheuttamien vääristymien kompensoimiseksi, on skannausjärjestelmä kalibroitava ennen mittauksia. Käyttämämme ohjelmiston avulla kamerat kalibroitiin OpenCV-kirjaston kalibrointityökalulla.

Kameroiden luonnollisten parametrien kalibrointi sisältää optisten laitteiden polttopisteen, tangentiaalisen- (vinjetointi, linssien siirtymät) että radiaalisen vääristymän (esim. tynnyrivääristymä) määrittämisen. Tämä tapahtuu kuvaamalla tähän tarkoitettua kalibrointikuviota kameralla ja analysoimalla saatavia kuvia. Käytettävä kuvio voi olla esimerkiksi kuvassa 3 esitelty ruutukuvio, tai muu kuvio jonka mitat ja muodot voidaan tarkasti määrittää. Parametrien määrittämiseksi kuviosta otetaan kuvia eri asennoissa ja kulmissa suhteessa kameraan. [2] [6] Vaikka kameran parametrit on mahdollista laskea jo kahdesta kuvasta, Zhang suosittelee artikkelissaan [8] käyttämään yksittäisten kame-



Kuva 3: OpenCV ohjelmiston mukana tullut 10x7 kalibrointikuvio

roiden kalibroinnin aikana vähintään neljää tai viittä eri kalibrointikuvion orientaatiota. Jokainen kamera on kalibroitava erikseen, sillä kamerat ja niiden parametrit eivät vastaa toisiaan. Yksittäisen kameran kalibroinnista saatavia parametreja voidaan käyttää vaikka kameran paikka tai orientaatio muuttuisikin [5].

Projektorin luonnollisten vääristymien kalibrointi tapahtuu asettamalla kalibrointikuvio projektorin eteen skannattavan kappaleen paikalle. Kamerat kohdistetaan skannattavalle alueelle ja projektorilla heijastetaan kalibrointikuvion päälle enkoodattu raitakuvio. Järjestelmän kamerat ottavat kuvia projisoidusta kuviosta ja ohjelmisto laskee kalibrointiparametrit projektorille samaan tapaan kuten kameroillekin. Vaikka projektorin kalibroiminen on mahdollista OpenCV-kirjastolla, sitä ei ole toteutettu käyttämäämme 3D-UNDERWORLDSLS ohjelmistoon.

Koko mittausjärjestelmän kalibroimiseksi käytettävät kamerat ja projektori asetetaan paikoilleen mittausjärjestelmässä. Kalibrointilevy asetetaan mittausjärjestelmän keskelle, siten että molemmat kamerat näkevät sen. Molemmilla kameroilla otetaan kuva levystä ja kuvista voidaan laskea järjestelmän ulkoiset kalibrointiparametrit. Saadut arvot kuvaavat muutoksen skannausjärjestelmän koordinaatistosta kameroiden ja projektorin koordinaatistoihin. [5] Järjestelmän kalibroinnin jälkeen kaikkien laitteiden tulee pysyä paikallaan, tai järjestelmä joudutaan kalibroimaan uudestaan [2].

Koska skannaukseen käytettävä järjestelmä kalibroidaan ennen mittauksia, pitäisi sen pysyä mahdollisimman staattisena skannauksen aikana. Kameroiden tai projektorin siirtäminen muuttaa kalibroinnin aikana määritettyjä järjestelmäparametreja ja mittauksen tarkkuus kärsii. Mittauslaitteiston liikuttaminen kalibroinnin jälkeen voi myös johtaa katastrofaalisiin rekonstruktioartefakteihin pintamallissa. [2]

4.3 Skannauksessa käytettävien kuvien enkoodaus

Herakleous ja Charambolos esittelevät ohjelmistosta tekemässään artikkelissa kaksi suosittua tekniikkaa kuvien enkoodaukselle; harmaasävy- ja binäärienkoodauksen. Molemmat esitellyt tekniikat ovat temporaalisia, eli enkoodaus toimii siten että kappaleen pinnalle heijastetaan yksi kerrallaan tietokoneella generoituja kuvioita joiden avulla jokainen projektorin pikseli voidaan sen valoisuuden perusteella tunnistaa kuvien ottamisen jälkeen yksikäsitteisesti. Enkoodauksen tapahtuessa temporaalisesti, tulee jokaisesta heijastetusta kuviosta saada kuva pikseleiden tunnistamiseksi.

Binäärienkoodauksessa jokaisen pikselin rivi- ja kolumnisijainti enkoodataan binääriksi, missä musta pikseli vastaa bittiä 0 ja valkoinen bittiä 1 kuten kuvassa 4 on havainnollistettu. Rivi- ja kolumnitiedon saamiseksi projisoidaan kappaleen pinnalle erikseen rividatan sisältävät kuviot ja kolumnidatan sisältävät kuviot. Kuviot heijastetaan kappaleen pinnalle siten että merkitsevimmän bitin kuvio tulee ensimmäisenä ja vähiten merkitsevän kuvio viimeisenä. Heijastettavien kuvioiden määrä riippuu projektorin vaaka ja pystyresoluutiosta seuraavalla tavalla

$$N_{kolumnit} = log_2(Res_x)$$

 $N_{rivit} = log_2(Res_y)$

Harmaaenkoodaus on toiminnalta samanlainen kuin binäärienkoodaus, mutta siinä desimaalinumerosta harmaakoodiksi konvertoitaessa perättäisten lukujen bittikoodissa on ainoastaan yhden bitin eroavaisuus (esimerkiksi numero 1 on 01 molemmissa koodauksissa, mutta numero 2:n binäärissä ollessa 10 on se harmaakoodissa 11, jolloin perättäisten lukujen koodauksessa on vain yhden bitin ero). Näin toteutetussa koodauksessa voidaan käyttää paksumpia raitoja kuin binäärienkoodauksessa joka voi johtaa parempaan tulokseen skannatessa, sillä paksummat viivat estävät esimerkiksi värivuotoa pikselien välillä. [2] Harmaakoodausta käytetään paljon juuri sen yksinkertaisuuden ja vakauden vuoksi [7].

Harmaaenkoodausta voidaan laajentaa kaistalesiirroksi kutsutulla tekniikalla joka sisältää viiva- ja vaihesiirtotekniikat projektorin normaalia resoluutiota korkeamman tarkkuuden

0	0	1	1	0 0	01	10	11
0	0	1	1	0 0	01	10	11
0	0	1	1	0 0	01	10	11
0	0	1	1	0 0	01	10	11
0 0 0	01 0	10 0	11 0	0 0 0 0	0 1 0 0	1 0 0 0	1 1 0 0
0 0 0	0 1 0	10 0	11 0	0 0 0 1	0 1 0 1	10 01	11 01
0 0 1	01 1	10 1	11 1	00 10	0 1 1 0	10 10	11 10
001	01 1	10 1	11 1	00 11	0 1 1 1	10 11	1 1 1 1

Kuva 4: Binäärienkoodaus havainnollistettuna

saavuttamiseksi. Nämä tekniikat laajentavat harmaakoodausta projisoimalla sinimuotoista intensiteettikuviota harmaaenkoodattujen kuvioiden jälkeen suuremmalla erottelutarkkuudella jolloin jokaiselle pikselille voidaan laskea myös vaihekulma, jota voidaan käyttää dekoodauksen aikana tarkkuuden kasvattamiseen. [7]

4.4 Datan kerääminen

Datan kerääminen tapahtuu projisoimalla ensimmäisessä vaiheessa määritellyt enkoodatut raitakuviot skannattavan kappaleen pinnalle kameroiden kuvatessa. Koska kyseessä on stereoskooppinen kuvantamismenetelmä, rekonstruoida voidaan ainoastaan ne osat kappaleesta jotka kaikki järjestelmän kamerat näkevät. Hyvän ja reiättömän pintamallin saamiseksi kappale saatetaan joutua skannaamaan useasta eri suunnasta.

4.5 Kuvien dekoodaus

Kuvien dekoodauksessa kameroilla otetuista kuvista määritetään projektorin pikseleiden sijainti kappaleen pinnalla. Koska kamerat ja valonlähde eivät ole samassa pisteessä, saattavat kamerat nähdä kappaleesta alueita joihin projisoitu valo ei pääse. Näitä varjokohtia ei voida käsitellä, joten ne on poistettava kuvista ennen dekoodausta. Varjomaskin saamiseksi voidaan kappaletta valaista valkoisella valolla ja ottaa siitä kuva kaikilla järjestelmän kameroilla. Saaduista kuvista löytyvät pikselit, joiden intensiteetti ei ylitä määriteltyä arvoa, jätetään käsittelemättä. Tuloksena on mustavalkoinen maski, josta löytyvät mustat pikselit jätetään käsittelemättä. [2] [1]

Kuvien dekoodaus tapahtuu selvittämällä jokaiselle kuvassa näkyvälle projisoidulle pikselille sen x, y koordinaatit. Koordinaatit saadaan kuvista vertailemalla jokaisen pikselin intensiteettiarvoa peräkkäin otetuissa kuvissa, dekoodaamalla saatu binääriarvo ja muuttamalla se koordinaateiksi. Kun kappaleen pinnalle heijastetut pikselit on tunnistettu voidaan ne kuvata sekä projektorin, että muiden kameroiden koordinaattijärjestelmään [2].

4.6 Pistepilven määrittäminen

Kuvien dekoodauksen jälkeen, voidaan saaduista kuvista määritellä trianguloimalla kameroille kalibroinnissa generoidun kalibrointimatriisin ja kameroista ja projektorista muodostettavien säteiden avulla pisteen paikka projektorin koordinaatistossa [2]. Pisteen muodostus tapahtuu ottamalla kaikista kameroista löytyvä pikseli ja muodostamalla säde jokaista kameraa kohden. Näiden säteiden kohtauspisteestä löytyy pinnan piste. Herakleou mainitsee artikkelissaan että kolmiointi on hankala ongelma, sillä todellisuudessa generoidut säteet eivät yleensä kohtaa vaan sivuavat toisiaan erittäin läheltä. Tämän ongelman korjaamiseksi etsitään paikka missä näiden kahden säteen etäisyys on mahdollisimman pieni ja lasketaan tämän lyhyimmän viivan keskikohta. Saatu piste tulkitaan lopulliseksi pisteeksi pistepilvessä [2].

4.7 Pinnan muodostaminen

Pistepilvestä muodostetaan lopullinen pintamalli olettamalla että kappaleen pinnalle heijastetuissa kuvioissa vierekkäin olevat pikselit ovat myös pintamallissa naapureita. Jos kaksi vierekkäistä pikseliä on tunnistettu ja molemmille on pystytty muodostamaan pintamalliin verteksi ne yhdistetään reunalla. Näin tehdään pikseleiden jokaiselle kahdeksalle naapurille. Jos pikseliä ei ole tunnistettu tai verteksin luomisessa on ongelmia, jätetään kaikki siihen kohdistuvat reunat muodostamatta. Tämä johtaa siihen että pintamalli saattaa jäädä reikäiseksi kun pikseleitä ei voida kappaleen pinnalta tunnistaa [2].

5 Mittaukset

5.1 Skannattava kappale

Skannattavana kappaleena käytettiin kuvan 5 mallin mukaan melamiinista valmistettua neliökappaletta, johon oli tietokoneohjatulla jyrsimellä koneistettu neliön mallinen ura ja neljä kappaletta 10mm halkaisijalla olevia reikiä. Nämä reiät ja ura toimivat referenssipisteinä mittauksista saatua dataa analysoitaessa. Toisessa mittauksessa skannasimme suoraa neliömallista melamiinilevyä määrittääksemme kameroiden kuvantamisasetusten aiheuttamaa virhettä.



Kuva 5: Tietokoneavusteisesti suunniteltu malli skannattavasta kappaleesta

5.2 Järjestely

Mittaukset suoritettiin Matematiikan ja systeemianalyysin laitoksella Otaniemessä luvussa 4 esitellyllä mittausjärjestelmällä. Aluksi kamerat kalibroitiin skannausta varten yksittäin kuvassa 6 esiintyvällä kalibrointilevyllä ja aiemmin esitellyllä tekniikallla. Molemmilla kameroilla otettiin 7 kalibrointikuvaa parametrien määrittämistä varten. Tämän jälkeen koko järjestelmä kalibroitiin ottamalla samaan aika kuva skannausalueella sijainneesta kalibrointilevystä. Skannaustila pimennettiin ulkopuolisten valonlähteiden minimoimiseksi ja parhaan skannaustuloksen saavuttamiseksi.



Kuva 6: Kalibrointilevy skannauspaikalla

Skannattava levy oli kiinnitettynä pöytään pallonivelellisellä ruuvipuristimella, jonka ansiosta levyä pystyttiin kääntelemään eri asentoihin skannausalueen sisäpuolella. Levyn asennon aiheuttaman vääristymän mittaamiseksi se skannattiin 25:ssä eri asennossa suhteessa kameran optiseen akseliin. Kameroiden ja projektorin asetukset pysyivät samana näiden mittauksien aikana.

Kameran kuvantamisasetusten aiheuttaman virheen määrittämiseksi skannattiin suoraa melamiinikappaletta eri ISO-arvoilla ja valotusajoilla. Kappaletta liikuttamatta kuvasim-

me sitä ISO arvoilla 100, 200, 400, 800 ja 1600, vastaavien valotusaikojen ollessa 1/25 s
, 1/50 s, 1/100 s, 1/200 s ja 1/400 s.

6 Mittaustulosten analysointi

Tässä luvussa käymme läpi datapisteiden käsittelyn sekä mittarit virheelle. Merkitään pintamallin verteksejä

$$\mathbf{x_i} \in \mathbb{R}^3, i = 1, 2, 3, \dots, N$$

Käyttämässämme mittausjärjestelyssä skannatun levyn sijainti ja orientaatio suhteessa projektoriin on tuntematon. Skannauksen aiheuttaman vääristymän vuoksi datapisteiden joukko $\mathbf{x_i}$ ei kuitenkaan ole samassa tasossa. Tämän kompensoimiseksi, joten sovitetaan pintamallin $\mathbf{x_i}$ dataan taso jota minimoidaan pisteiden etäisyyden tasosta mukaan. Taso on joukko pisteitä joille pätee:

$$\{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3 \,|\, \mathbf{n_0} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{r_0}) = 0\}$$

missä $\mathbf{n_0} \in \mathbb{R}^3$, $\|\mathbf{n_0}\| = 1$ on yksikkönormaali ja $\mathbf{r_0}$ on jokin tason piste. Lisäksi määritetään kaksi kohtisuoraa suuntavektoria $\mathbf{t_1}, \mathbf{t_2} \in \mathbb{R}^3$ jotka virittävät tason. Tason määritelmästä seuraa, että $\mathbf{n_0} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{n_0} \cdot \mathbf{r_0} = 0$. Oletetaan, että $n_{0,1} \neq 0$ jolloin saadaan

$$x_1 + \frac{n_{02}}{n_{01}}x_2 + \frac{n_{03}}{n_{01}}x_3 - \frac{\mathbf{n_0} \cdot \mathbf{r_0}}{n_{01}} = 0.$$

Olkoot $\alpha \in \mathbb{R}^3$ siten, että $\alpha_1 = \frac{n_{02}}{n_{01}}, \alpha_2 = \frac{n_{03}}{n_{01}}, \alpha_3 = \frac{\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{r}_0}{n_{01}}$. Etsitään PNS-mielessä pistejoukkoon parhaiten sopivan tason minimoimalla yhtälöä

$$\min_{\alpha \in \mathbb{R}^3} \sum_{i=1}^N (x_{i,1} + \alpha_1 x_{i,2} + \alpha_2 x_{i,3} - \alpha_3)^2 \tag{1}$$

Olkoon matriisi $A \in \mathbb{R}^{N \times 3}$ siten, että

$$A(i,:) = \begin{bmatrix} x_{i,2} & x_{i,3} & -1 \end{bmatrix}$$

ja $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^N$ siten, että $\mathbf{b}_i = x_{i,1}$. Matriisi A:n avulla saadaan minimointitehtävälle (1) PNS-ratkaisu muodossa

$$\alpha = (A^*A)^{-1}A^*\mathbf{b}$$

Ratkaisu antaa meille datajoukkoome parhaiten PNS-mielessä sovitetun tason. Pintamallin verteksit voidaan projisoida saatuun PNS-tasoon seuraavalla tavalla:

$$\mathbf{x_{i}} \rightarrow (\underbrace{\mathbf{t_{1}} \cdot (\mathbf{x_{i}} - \mathbf{r_{0}}), \mathbf{t_{2}} \cdot (\mathbf{x_{i}} - \mathbf{r_{0}})}_{x, y \text{ koordinaatit PNS-tasossa}}, \underbrace{\mathbf{n} \cdot (\mathbf{x_{i}} - \mathbf{r_{0}})}_{z, \text{ poikkeama tasosta}})$$
(2)

Missä vektorit $\mathbf{t_1}$ ja $\mathbf{t_2}$ ovat tason virittävät vektorit. Levyyn koneistettuja reikiä käytetään tasossa tapahtuvan vääristymän määrittämiseen seuraavalla tavalla: Tasoon projisoidusta pintamallista etsitään alkuperäisestä kappaleesta löytyvät reiät. Jokaiselle reiälle lasketaan keskipiste ja säde

$$(r_i, \mathbf{V_i}), r_i \in \mathbb{R}, \mathbf{V_i} \in \mathbb{R}^2$$
 (3)

Reikien sijainnin avulla voidaan PNS-tasoon projisoidulle pintamallille laskea affiini kuvaus

$$f(\mathbf{x}): \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}^2, f(\mathbf{x}) = M\mathbf{x} + \mathbf{z}$$
(4)



Kuva 7: Datalle tehtävä affiinikuvaus

jossa $M \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ ja $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^2$, kun alkuperäisen kappaleen reikien paikat tunnetaan. Kuvauksesta 4 saatava matriisi M sisältää kuvaukseen liittyvän tiedon skannauksen kappaleeseen aiheuttamasta vääristymästä ja skaalauksesta, muuttuja \mathbf{z} sisältää koordinaatiston siirron eikä vaikuta virheeseen.

Kappaleessa tapahtuneen kierron ja vääristymän määrittämiseksi kuvauksen 4 matriisiM:lle laskettiin Matlabilla polaarihajotelma

$$M = UP$$

jossa $U \in \mathbb{R}^{2\times 2}$ ja $P \in \mathbb{R}^{2\times 2}$. Ortogonaalimatriisi U sisältää tiedon kuvauksen kierrosta ja matriisi P tiedon kuvauksen vääristymästä. Tutkimalla matriisin P ominaisuuksia, voimme määrittää skannauksen seurauksena tapahtuneet vino- ja skaalausvääristymät. Jos matriisille P pätee P = I, niin kuvaus M sisältää vain kierron, eikä skaalausta tai vinoumaa. Tässä tutkimuksessa valitaan kokonaisvääristymän mitaksi

 $||P - I||_2$

Matriisin Psisältämä vinouma voidaan selvittää sen sarakevektoreiden $\mathbf{p_1}$ ja $\mathbf{p_2}$ avulla seuraavasti

$$\frac{\mathbf{p_1}^\top \mathbf{p_2}}{\|\mathbf{p_1}\| \|\mathbf{p_2}\|}$$

Kappaleessa 7 tarkastellaan virhemittojen suhdetta skannatun levyn kiertokulmaan kameraan suhteen.

7 Tulosten tarkastelu

7.1 Levyn kallistuskulman suhde virheeseen

Mittauksista saatu data käsiteltiin aiemmin esitellyllä tavalla Matlab ohjelmistossa. Datasta poistettiin ne pintamallit joista ei voitu löytää kaikkia neljää reikää, joiden avulla affiini kuvaus tasolle laskettaisiin. Tämän jälkeen käsiteltäväksi jäi 23 pintamallia. Kuvassa ?? on esitetty skannatussa tasossa havaittu vinouma ja sen suhde levyn kallistuskulmaan. Kuvasta voidaan havaita että kallistuskulmasta riippumatta tasossa havaittava venymä on melko pientä myös suurissa kallistuskulmissa. Tason ollessa voimakkaasti taaksepäin kallistettu on tuloksissa kuitenkin havaittavissa suurempaa vääristymää.

Affiinikuvauksesta saatavan matriisin sisältämän vinouman määrä kokonaisvääristymästä voidaan nähdä kuvista 8 ja 9, joista ensimmäisessä on kuvattu kokonaisvääristymä ja toisessa vinouma. Kaikilla pintamalleilla suurin osa kokonaisvääristymästä muodostuu vinoumasta.

Pisteparven ja tason etäisyyden mitaksi valittiin pisteiden neliöllinen keskiarvo, joka kertoo pisteiden ja tason keskimääräisestä etäisyydestä. Neliöllinen keskiarvo on kuitenkin huono mitta virheelle tapauksissa, joissa voidaan havaita suuria vääristymiä pienellä alueella. Kuvassa 10, joka kuvaa pisteiden keskimääräistä etäisyyttä suhteessa kääntökulmaan, on havaittavissa pientä vaihtelua virheessä tasoa käänneltäessä. Tämä virhe on kuitenkin suurimmillaankin vain alle 0.5mm.

7.2 Virhelähteet

Kuten kuvasta 11 voidaan havaita, tasoon jyrsittyjen reikien reunoilla esiintyy suurempaa pistemäistä virhettä kuin muualla tason pinnalla. Kuvasta 12 voidaan havaita aaltomaista



Kuva 8: Tasossa havaittava kokonaisvääristymä suhteessa pysty- ja vaakatason kallistuskulmiin. Kuvassa käytössä logaritminen asteikko Z-akselilla.



Kuva 9: Tasossa havaittava vinouma suhteessa pysty- ja vaakatason kallistuskulmiin. Kuvassa käytössä logaritminen asteikko Z-akselilla.

virhettä, joka johtuu kameran ja/tai projektorin optiikan aiheuttamasta tyynyvääristymästä.

Kohinan aiheuttaman virheen selvittämiseksi kuvasimme suoraa levyä samassa asennos-



Kuva 10: Pistepilven neliöllinen keskiarvo suhteessa pysty- ja vaakatason kallistuskulmiin. Vaikka kuvassa on havaittavissa vaihtelua niin suurin havaittu virhe on vain alle 0.5mm.

ISO	MSE
100	0.1013
200	0.0936
400	0.0800
800	0.0718
1600	0.0911

Taulukko 1: Pisteparven neliöllinen keskiarvo samalla levyn orientaatiolla ISO-arvon muuttuessa

sa eri ISO-arvoilla. Kuten taulukosta 7.2 voidaan havaita ISO-arvolla ei ole kovin suurta merkitystä pistepilven neliölliseen keskiarvoon. Vaihtelu on suurimmillaan 0.03mm luokkaa eri ISO-arvojen välillä.



Kuva 11: Tasokartta, jossa pinnan pisteen etäisyys määritetystä tasosta on visualisoitu väreillä. Jyrsittyjen reikien ja uran alueella on havaittavissa suurempaa virhettä.



Kuva 12: Erään pistepilven pisteiden etäisyys määritetystä tasosta visualisoituna. Pistepilvessä on havaittavissa optiikan aiheuttamaa tynnyrivääristymää.

7.3 Lopputulokset

Valkoisen valon skannauksen ongelmat tulevat esiin varsinkin monimutkaisten ja epätasaisten skannattavien pintojen kanssa. Jotta järjestelmä pystyy luomaan 3D-pinnan skannattavasta kappaleesta, täytyy jokaisen pinnan pisteen olla valaistavissa käytössä olevalla järjestelmällä. Varsinkin pienten kolojen ja aukkojen digitoiminen tarkasti voi olla hankalaa, sillä valon pääsy ja kameroiden näkyvyys niihin on rajoitettua. Tekniikan tarkkuuteen vaikuttavat varsinkin kameroiden sekä käytettävän valonlähteen erottelukyky sekä käytetty optiikka.

Virheen mittaamiseen haasteeksi muodostui 3D-pintamallin vertaaminen alkuperäiseen kappaleeseen. Työssä käytettäväksi kappaleeksi valittiin tästä johtuen taso, sillä muuten saadun 3D-pintamallin orientaatiota ja pinnanmuotoa on vaikea vertailla alkuperäiseen kappaleeseen. Tason orientaatiota ja sijaintia avaruudessa on yksinkertaista tutkia.

Zhangin ja Peisenin [8] havainnot menetelmän aiheuttaman virheen neliöllisestä keskiarvosta oli 0.10-0.22mm välillä 342*376*658 mm (korkeus, leveys, syvyys) skannaustilassa. He raportoivat myös että virhe oli suurempi skannattavan kappaleen ollessa kauempana skannausjärjestelmästä. Tutkimuksessa saamamme tulokset neliöllisestä keskiarvosta olivat välillä 0.14-0.47mm, joka vastaa Zhangin ja Peisenin havaintoa menetelmän tarkkuudesta.

Tutkimuksessa havaittiin että kuluttajaluokan osista rakennetulla valkoisen valon 3Dskannerilla voidaan päästä pintamallien virheen osalta samaan tarkkuusluokkaan kuin MRI-kuvantamisen avulla tuotetuissa ääntöväyläpintamalleissa. Tämän tuloksena SLStekniikalla tuotettuja pintamalleja voidaan käyttää hyväksi tutkimusryhmämme akustisten tilamallien laskennassa.

Lähteet

- C. Montani P. Pingi C. Rocchini, P. Cignoni ja R. Scopigno. A low cost 3D scanner based on structured light. Saatavissa http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10. 1111/1467-8659.00522/epdf. Viitattu 25.10.2015.
- [2] Kyriakos Herakleous ja Charalambos Poullis. 3DUNDERWORLD-SLS: An Open-Source Structured-Light Scanning System for Rapid Geometry Acquisition. Saatavissa http://arxiv.org/pdf/1406.6595v1.pdf. Viitattu 5.10.2015.
- [3] Richard C. Kim Jeffrey A. Jalkio ja Steven K. Case. Three Dimensional Inspection Using Multistripe Structured Light. Saatavissa http://opticalengineering. spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=1222789. Viitattu 23.8.2016.
- [4] Brian Curless Li Zhang ja Steven M. Seitz. Rapid Shape Acquisition Using Color Structured Light and Multi-pass Dynamic Programming. Saatavissa http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1024035. Viitattu 25.10.2015.
- [5] Peisen S. Huang Song Zhang. Novel method for structured light system calibration. Saatavissa http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article. aspx?articleid=1076854. Viitattu 25.10.2015.
- [6] Unknown. Camera Calibration and 3D Reconstruction. Saatavissa http://docs.opencv.org/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_ 3d_reconstruction.html#id1. Viitattu 25.10.2015.
- Song Zhan. High Accuracy Structured Light Sensing System with a Novel Calibration Mechanism. Saatavissa http://english.siat.cas.cn/sp/boa/201008/ W020100824557799091450.pdf. Viitattu 25.10.2015.
- [8] Zhengyou Zhang. A Flexible New Technique for Camera Calibration. Saatavissa http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=888718. Viitattu 25.10.2015.