การสร้างภาพสามมิติจากพื้นฐานของการแทรกสอดทางแสง

นายจักรพล วิเศษสมิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชามาตรวิทยา
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4872235923

3-D IMAGE RECONSTRUCTION BASED ON OPTICAL INTERFEROMETRY

Mr. Jakkapol Visessamit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Metrological Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

512109

Thesis Title	3-D IMAGE RECONSTRUCTION BASED ON OPTICAL INTERFEROMETRY
By	Mr. Jakkapol Visessamit
Field of Study	Metrological Science
Advisor	Montian Tianprateep, Ph.D.

Accepted by the Faculty of Science, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Master's Degree

S. Harnwanfaeng
..... Dean of the Faculty of Science
(Professor Supot Hannongbua, Dr.rer.nat.)

THESIS COMMITTEE

Kajornyod Yoodee
..... Chairman
(Assistant Professor Kajornyod Yoodee, Ph.D.)

..... Advisor
(Montian Tianprateep, Ph.D.)

K. Ratanathammapan
..... Examiner
(Assistant Professor Kiranant Ratanathammapan)

R. Mongkolnavin
..... Examiner
(Assistant Professor Rattachat Mongkolnavin, Ph.D.)

จักรพล วิเศษสมิต : การสร้างภาพสามมิติจากพื้นฐานของการแทรกสอดทางแสง. (3-D IMAGE RECONSTRUCTION BASED ON OPTICAL INTERFEROMETRY) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. มนต์เทียน เทียนประทีป, 80 หน้า.

การสร้างภาพอาพันธ์เชิงแสงเป็นวิธีการที่ใช้อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ชนิดไมเคลสันแบบปรับระยะและซุปเปอร์ลูมิเนสเซนต์ไดโอดสร้างภาพพื้นผิวของวัสดุ การสร้างภาพอาพันธ์เชิงแสงนี้ใช้ลำแสงขนานและกล้องซีซีดีเพื่อลดเวลาที่ใช้เก็บข้อมูล ด้วยวิธีการนี้แต่ละพิกเซลของกล้องซีซีดีจะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัดแสงที่แยกกันอย่างเป็นเอกเทศ ท้ายสุดอินเตอร์ฟีรอแกรมซึ่งได้จากพิกเซลแต่ละจุดของกล้องซีซีดีจะนำไปวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีวิเคราะห์สัญญาณสองวิธี ได้แก่ การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง(CWT) และการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (DFT) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์สัญญาณข้างต้น ในขั้นแรกภาพพื้นผิวของแผ่นขั้นความสูงมาตรฐานจะสร้างขึ้นจากวิธีวิเคราะห์สัญญาณทั้งสองนี้ ซึ่งพบว่า ภาพพื้นผิวที่สร้างจาก CWT มีลักษณะใกล้เคียงกับพื้นผิวจริงของแผ่นขั้นความสูงมาตรฐานมากกว่าภาพพื้นผิวที่สร้าง DFT ต่อมาภาพตัดขวางของแผ่นสแตนเลสสามแผ่น (ตัวอย่างที่ 1 ตัวอย่างที่ 2 และ ตัวอย่างที่ 3) จะสร้างขึ้นจากการวิเคราะห์อินเตอร์ฟีรอแกรมของตัวอย่างแต่ละชิ้นด้วยวิธี CWT และ DFT กรณีของตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 นั้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความขรุขระรากที่สองยกกำลังสอง (R_q) ของภาพตัดขวางที่ใช้วิธี CWT กับค่า R_q ที่วัดได้จากเครื่อง เอสพี 500 ของโทเรย์ ซึ่งใช้เป็นเครื่องมือมาตรฐานแล้ว พบว่า มีค่าที่สอดคล้องกันในระดับที่ยอมรับได้ แต่ช่วงความไม่แน่นอนของ R_q ของตัวอย่างที่ 3 ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี CWT และ DFT ไม่สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือมาตรฐาน ค่าที่แตกต่างกันนี้เป็นผลมาจากวิธีวิเคราะห์ที่ต่างกันและความขรุขระพื้นผิวของตัวอย่างที่ 3 จากนั้นการสร้างภาพอาพันธ์เชิงแสงที่ใช้วิธีวิเคราะห์สัญญาณแบบ CWT จะนำไปสร้างภาพพื้นผิวของตัวอย่างทั้งสามชิ้นในกรณีที่พื้นผิวของตัวอย่างทั้งหมดมีแผ่นปิดสไลด์ปิดทับ เมื่อเปรียบเทียบภาพพื้นผิวที่ถูกปิดทับกับพื้นผิวที่ไม่ถูกปิดทับแล้วพบว่าภาพพื้นผิวของตัวอย่างทั้งสองชนิดมีความสอดคล้องกัน สุดท้ายการสร้างภาพอาพันธ์เชิงแสงจะถูกนำไปวัดค่าความหนาของแผ่นปิดสไลด์ ซึ่งพบว่า ความหนาของแผ่นปิดสไลด์ที่วัดด้วยวิธีการสร้างภาพอาพันธ์เชิงแสงมีค่าความละเอียดใกล้เคียงกับการวัดด้วยเครื่อง ยูแอลเอ็ม รูบิน 800 ของ มาร์

สาขาวิชามาตรวิทยา ลายมือชื่อนิสิต.....จักรพล วิเศษสมิต.....

ปีการศึกษา 2551 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

4872235923 :MAJOR METROLOGICAL SCIENCE
KEYWORDS: OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY/ 3-D SURFACE IMAGE/ LOW COHERECE LIGHT/ A CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM

JAKKAPOL VISESSAMIT: 3-D IMAGE RECONSTRUCTION BASED ON OPTICAL INTERFEROMETRY. ADVISOR: MONTIAN TIANPRATEEP, Ph.D., 80 pp.

Optical coherence tomography (OCT), based on a vertical scanning Michelson interferometer with a superluminescent diode (SLD), was applied for constructing a surface profile of material. To reduce time-consuming process, a parallel light beam and a CCD camera were set in this OCT. In this technique, each pixel of CCD camera acted as a separated light detector. Interferogram, taken by each pixel of CCD camera, was finally analyzed by two signal analysis methods. For comparing the efficiencies of two signal analysis methods, a continuous wavelet transform (CWT) and a discrete Fourier transform (DFT), surface profiles of a step-height standard plate were first individually determined by these two kinds of signal analysis methods. The result showed that the surface profile, constructed by CWT, was more closed to a real sample surface than the one constructed by DFT. Next, surface cross-sections of three stainless steel plates (Sample No.1, No.2 and No.3) were also defined by analyzing their interferograms with both CWT and DFT. For Sample No.1 and No.2, root-mean-square roughness (R_q) of cross-section, analyzed by CWT, was acceptable by comparing with the one, measured by SP-500 Series of Toray, used as a standard tool. But the uncertainty ranges of R_q for Sample No.3, analyzed with both methods, did not overlap with the ones measured by our standard tool. It was caused by the difference in analysis method and more surface roughness of this Sample No.3. Next, OCT with CWT was applied to construct surface profiles of these three samples, while their surfaces were covered with a cover slide. By comparing the profiles of covered surfaces with the uncovered ones, consistencies of their surface profiles were existed. Finally, this OCT was applied for measuring thickness of a cover slide. It was found that its thickness, measured by our OCT, was significantly closed to the one measured by ULM RUBIN 800 of MAHR.

Field of Study: Metrological Science Student's Signature Jakkapol Visessamit

Academic Year: 2008 Advisor's Signature

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to express my appreciation and gratitude to my advisor, Dr. Montian Tianprateep for his kind suggestions and time throughout the period of this thesis. I am also grateful to Assistant Professor Dr. Kajornyod Yoodee, Assistant Professor Kiranant Ratanathammapan and Assistant Professor Dr. Rattachat Mongkolnavin who spend their time serving as a chairman and committee, and inspecting through the thesis. All of whom have made usefulness comments and help in the production of this thesis.

I would like to thank Assistant Professor Dr. Sakuntam Sanorpim for his advices about the results. Much gratitude goes to staffs at the National Institute of Metrology (Thailand) (NIMT) who give very useful assistances for my work. Specially thanks go to Mrs. Monludee Ranusawud for her help and suggestions in the optical arrangement and Miss Rojana Leecharoen for her good advice and help in MATLAB program.

Many thanks to my friends and colleagues, whose name are not mentioned here, who embraced me with their friendships and encouragements.

Finally, a deep affectionate gratitude is acknowledged to my family for their love, understanding and supporting throughout my entire study.

CONTENTS

page

ABSTRACT (Thai) ..... **iv**

ABSTRACT (English) ..... **v**

ACKNOWLEDGEMENTS ..... **vi**

CONTENTS ..... **vii**

LIST OF FIGURES ..... **ix**

LIST OF TABLES ..... **xi**

CHAPTER

I INTRODUCTION **1**

1.1 Background and Motivation 1

1.2 Research Objectives 4

1.3 Research Overview 5

II THEORITICAL BACKGROUND **6**

2.1 Low Coherence Light 6

2.2 The Michelson Interferometer 9

2.3 Mathematical Description of the Interferogram 12

2.4 Discrete Fourier Transform and Continuous Wavelet Transform 17

2.5 Method for Defining the Thickness of Transparent Material 21

III EXPERIMENTAL SETUP **23**

3.1 Samples 23

3.2 Light Source and Controller 23

3.3 Experimental Setup 24

3.4 Experimental and Signal Analysis 26

3.4.1 Signal analysis process 26

3.4.2 Coherence length measurement 29

3.4.3 Discrete Fourier transform and continuous wavelet transform comparing 29

3.4.4 Surface profile construction 30

CHAPTER **page**

3.4.5 Application of OCT with the CWT by measuring the thickness of transparent material..... 30

IV RESULTS AND DISCUSSIONS..... 31

4.1 Coherence Length of SLD..... 31

4.2 Surface Profile of Step-height Standard Plate..... 33

4.3 Cross-section of Stainless Steel Plate..... 39

4.3.1 Cross-section images of Sample No.1..... 41

4.3.2 Cross-section images of Sample No.2..... 44

4.3.3 Cross-section images of Sample No.3..... 47

4.4 Surface Profile of Stainless Steel Plate with and without Transparent Cover..... 51

4.4.1 Surface profile of Sample No.1..... 52

4.4.2 Surface profile of Sample No.2..... 53

4.4.3 Surface profile of Sample No.3..... 54

4.5 Thickness of Cover Slide..... 57

V CONCLUSIONS..... 64

RFERENCES..... 67

APPENDICES..... 69

APPENDIX A: MATLAB SOURCE CODES..... 70

APPENDIX B: SPECIFICATIONS OF 3-D NON-CONTACT SURFACE PROFILER SP-500 SERIES..... 79

VITAE..... 80

LIST OF FIGURES

Figure		page
2.1	The wavetrains with different lift time.....	6
2.2	Temporal characteristic curve between the optical path difference (Δp) and light intensity.....	7
2.3	The Michelson interferometer.....	9
2.4	Equivalent optical system in one axis of the Michelson interferometer.....	10
2.5	Intensity signals at any movable mirror position.....	11
2.6	Interference at point P by aperture S_1 and S_2	12
2.7	Actual peak and experiment peak of interferogram.....	20
2.8	A transparent cover on a surface.....	21
3.1	Picture of (a) stainless steel plate and (b) MENSEL-GLASER cover slide.....	23
3.2	Picture of "Tow2" SLD with mount.....	24
3.3	Setup for this experiment.....	24
3.4	Interferogram of multi-layer sample.....	25
3.5	Signal analyzing diagram.....	28
3.6	Cross-section of step-height standard plate.....	29
4.1	Intensity signals of plain mirror.....	32
4.2	Coherence length of SLD light.....	33
4.3	(a) Picture of step-height standard plate and (b) its diagram.....	33
4.4	(a) Intensity signals in each vertical scanning step (b) its CWT spectrogram.....	34
4.5	Surface profile of step-height standard plate by (a) DFT and (b) CWT.....	35
4.6	Cross-section of step-height standard plate.....	36
4.7	Selection lines for constructing cross-section and surface image of Sample (a) No.1 (b) No.2 and (c) No.3.....	40
4.8	Cross-section of Sample No.1 in (a) line 1 (b) line 2 (c) line 3 and (d) line 4.....	42

Figure **page**

4.9 Cross-section of Sample No.2 in (a) line 1 (b) line 2 (c) line 3 and (d) line 4 45
4.10 Cross-section of Sample No.3 in (a) line 1 (b) line 2 (c) line 3 and (d) line 4 48
4.11 Average R_q of SP-500 Series, DFT and CWT 50
4.12 Surface profile of Sample No.1 (a) without cover slide and (b) with cover slide in area 1 52
4.13 Surface profile of Sample No.1 (a) without cover slide and (b) with cover slide in area 2 52
4.14 Surface profile of Sample No.2 (a) without cover slide and (b) with cover slide in area 1 53
4.15 Surface profile of Sample No.2 (a) without cover slide and (b) with cover slide in area 2 53
4.16 Surface profile of Sample No.3 (a) without cover slide and (b) with cover slide in area 1 54
4.17 Surface profile of Sample No.3 (a) without cover slide and (b) with cover slide in area 2 54
4.18 Average R_q of covered and uncovered surface in (a) area 1 and (b) area 2.. 56
4.19 (a) Surface height with cover slide (1) and without cover slide (2) and (b) the thickness of the cover slide in line 1 58
4.20 (a) Surface height with cover slide (1) and without cover slide (2) and (b) the thickness of the cover slide in line 2 59
4.21 (a) Surface height with cover slide (1) and without cover slide (2) and (b) the thickness of the cover slide in line 3 60
4.22 (a) Surface height with cover slide (1) and without cover slide (2) and (b) the thickness of the cover slide in line 4 61

LIST OF TABLES

Table		page
2.1	Example of some low coherence light sources.....	8
4.1	The depth of step-height standard plate.....	37
4.2	The standard uncertainty component.....	38
4.3	R_q of Sample No.1.....	43
4.4	R_q of Sample No.2.....	46
4.5	R_q of Sample No.3.....	49
4.6	Average R_q from SP-500 Series and OCT.....	49
4.7	R_q of covered and uncovered surface in area 1 and area 2.....	55
4.8	Thickness of the cover slide in line1, line 2, line 3 and line 4.....	62
4.9	Thickness of the cover slide by using ULM RUBIN 800 Series.....	62