



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การวัดความเรียบของพื้นผิวโดยใช้เทคนิคอินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนเฟส
Surface flatness measurement using phase shift interferometry



อ.ธนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH

OD

63

. ๕5

เลขหมู่ ๖ 152 ก

เลขทะเบียน 131074

วัน เดือน ปี 22 มี.ค. 2557

b. 12603995
i.

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การวัดความเรียบของพื้นผิวโดยใช้เทคนิคอินเตอร์เฟอโรเมตรีแบบเลื่อนเฟส
แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2556

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2556 /

หัวหน้าโครงการวิจัย : นางสาว ชนภรณ์ ธีลาวัฒน์นนท์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ร่วมโครงการวิจัย : นาย วรารุฒิ เถาลัดดา สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาผิวเรียบของวัสดุที่มีความละเอียดสูง โดยใช้เทคนิคอินเตอร์เฟอโรเมตรีแบบเลื่อนเฟส ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่สัมผัส การทดสอบจะใช้แสงจากแหล่งกำเนิดซึ่งเป็นฮีเลียม-นีออน เลเซอร์กำลัง 10 มิลลิวัตต์ ที่ให้ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร และทำให้เป็นลำแสงขนานโดยระบบเลนส์ ขยายลำแสง ลำแสงที่ขนานแล้วจะตกกระทบตัวแยกลำแสง และบางส่วนของลำแสงจะทะลุผ่านตัวแยก ลำแสงไปตกกระทบบนผิวเรียบอ้างอิง ซึ่งผิวอ้างอิงนี้จะถูกยึดติดกับเพียร์โซอิเล็กทริก และบางส่วนของลำแสงจะหักเหผ่านตัวแยกลำแสงไปตกกระทบที่ผิวของวัสดุทดสอบ ลำแสงทั้งสองลำนี้จะสะท้อนจากผิวทั้งสองชนิด แล้วเกิดการแทรกสอดระหว่างลำแสงทั้งสองเป็นริ้วการแทรกสอด ริ้วการแทรกสอดนี้จะถูกบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความละเอียดสูงและจะถูกแปลความหมายเป็นความเรียบของผิวทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับเฟสที่เลื่อนไปโดยใช้เพียร์โซอิเล็กทริกซึ่งมีคุณสมบัติความไม่เชิงเส้นนั้น จะถูกพิจารณาจากการคำนวณด้วยวิธีกาลิเบชันเฟสชิฟติง

คำสำคัญ : เทคนิคอินเตอร์เฟอโรเมตรีแบบเลื่อนเฟส, ริ้วการแทรกสอด, วิธีคำนวณกาลิเบชันเฟสชิฟติง

Research Title: Surface flatness measurement using phase shift interferometry

Researcher: Miss Tanaporn Leelawattananon

Faculty: The Faculty of Sciences

Department: Department of Physics

Co - Researcher: Mr. Warawoot Taoladda

Faculty: The Faculty of Sciences

Department: Department of Physics

ABSTRACT

This research work is to study a high accuracy surface flatness of surface materials by phase shift interferometry technique (PSI) which is a non-contacting method for flatness testing. Coherence light beam from He-Ne laser with output 10 mw at wavelength of 632.8 nm is expanded and collimated by a beam expander. The collimated laser beam is incident on a beam splitter and parts of the incident light is transmitted and incident on the reference surface which fixed on piezoelectric transducer (PZT). Parts of the incident light is refracted and incident on the test surface. Two reflected light beam from both surfaces will interfere and form the interference fringes. The fringe pattern is recorded by the high resolution digital camera. The surface flatness of test object is then determined by the interference fringes pattern. The phase shifter used in the experiment is a PZT that has a nonlinearity is determined by a calibration phase shifting calculation.

Keywords : phase shift interferometry technique , interference fringes pattern , calibration phase shifting calculation

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยการเล่มนี้เป็นการวิจัยเกี่ยวกับการวัดความเรียบของพื้นผิวโดยใช้เทคนิคอินเตอร์เฟอโรเมตริแบบเลื่อนเฟส เกิดขึ้นและดำเนินการจนสำเร็จลงได้ด้วยความเพียรพยายาม และความตั้งใจของผู้วิจัย รวมถึงการได้รับความร่วมมือที่ดีจากผู้ร่วมวิจัย รศ.ดร. วราวุฒิ เถาสัตตา ที่มีส่วนร่วมในการให้ความช่วยเหลือต่างๆตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบบูชาพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความสนับสนุนทางด้านทุนจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แหล่งทุนการจัดสรรทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 จึงขอขอบคุณ ณ ที่นี้

อ.ธนภรณ์ สีลาวัฒนานนท์
รศ. ดร. วราวุฒิ เถาสัตตา
คณะผู้วิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีและหลักการของอินเตอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนเฟส (Phase Shifting Interferometry, PSI)	6
2.1.1 Four position phase-shifting technique	8
2.1.2 Five position phase-shifting technique	9
2.1.3 Phase Unwrapping	10
2.1.3.1 Unwrapping in one Dimension	10
2.1.4 phase shift calibration	14
2.2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature review)	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	16
บทที่ 4 ผลการวิจัย	19
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	30
เอกสารอ้างอิง	31
ประวัตินักวิจัย	32

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงแผนภาพของอุปกรณ์ในการทดสอบความเรียบของผิววัสดุ	3
รูปที่ 1.2 ตัวอย่างภาพ 3 มิติแสดงความสูงต่ำของพื้นผิวที่เราต้องการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ	5
รูปที่ 2.1 Twyman-Green interferometer สำหรับการตรวจสอบพื้นผิววัตถุ	6
รูปที่ 2.2.1 แสดงข้อมูลเฟสของหน้าคลื่นที่ modulo กับ 2π	11
รูปที่ 2.2.2 แสดงเฟสในทุกกรณีที่จะสามารถนำมาเป็นเฟสของหน้าคลื่นได้	11
รูปที่ 2.2.3 แสดงเฟสของหน้าคลื่นหลังจากสร้างความต่อเนื่องให้กับหน้าคลื่นแล้ว	12
รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการสำหรับสร้างความต่อเนื่องเพื่อพิจารณาค่าให้กับฟังก์ชัน $p(i)$ แบบ 1 มิติ ซึ่งค่าของฟังก์ชัน $p(i)$ นี้คำนวณมาจากการคูณด้วยค่า 2π หรือผลคูณของค่า 2π	13
รูปที่ 3.1.1 แผนภาพของชุดทดลองไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์	16
รูปที่ 3.1.2 แสดงอุปกรณ์ชุดทดลอง Michelson Interferometer	17
รูปที่ 3.2 รี้วการแทรกสอดโดยใช้กระจกเลเซอร์ชนิดที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/4$ เป็นพื้นผิวทดสอบที่บันทึกได้เมื่อความต่างเฟสของทางเดินแสงมีค่าต่างๆ	17
รูปที่ 3.3 รี้วการแทรกสอดโดยใช้กระจกเลเซอร์ชนิดที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/10$ เป็นพื้นผิวทดสอบที่บันทึกได้เมื่อความต่างเฟสของทางเดินแสงมีค่าต่างๆ	18
รูปที่ 4.1.1 แสดงภาพพื้นผิว 2 มิติของผิวทดสอบที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/4$ ที่วิเคราะห์จากวิธี Five position phase-shifting technique	19
รูปที่ 4.1.2 แสดงภาพพื้นผิว 3 มิติของผิวทดสอบที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/4$ ที่วิเคราะห์จากวิธี Five position phase-shifting technique	20

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.1.3: ค่า peak to valley ที่แนวแกน y ของกระจกที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/4$ ตำแหน่งพิกเซลที่ 550 จำนวนได้เท่ากับ 200 nm	21
รูปที่ 4.1.4: ค่า peak to valley ที่แนวแกน x ของกระจกที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/4$ ตำแหน่งพิกเซลที่ 520 จำนวนได้เท่ากับ 27 nm	21
รูปที่ 4.2.2 Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 400 จำนวนค่า $\alpha = 1.5355$ rad	22
รูปที่ 4.2.3 Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 560 จำนวนค่า $\alpha = 1.6250$ rad	23
รูปที่ 4.2.4 Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 650 จำนวนค่า $\alpha = 1.6469$ rad	23
รูปที่ 4.3.1 แสดงภาพพื้นผิว 2 มิติของผิวทดสอบที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/10$ ที่วิเคราะห์จากวิธี Five position phase-shifting technique	24
รูปที่ 4.3.2 แสดงภาพพื้นผิว 3 มิติของผิวทดสอบที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/10$ ที่วิเคราะห์จากวิธี Five position phase-shifting technique	25
รูปที่ 4.3.3 แสดงค่า peak to valley ของกระจกที่แนวแกน y ของกระจกตำแหน่งพิกเซลที่ 550 ที่วิเคราะห์ได้จากการคำนวณในงานวิจัยนี้ได้เท่ากับ 120 nm	26
รูปที่ 4.3.4 แสดงค่า peak to valley ของกระจกที่แนวแกน x ของกระจก ตำแหน่งพิกเซลที่ 530 ที่วิเคราะห์ได้จากการคำนวณในงานวิจัยนี้ได้เท่ากับ 15 nm	26
รูปที่ 4.4.1 Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 350 จำนวนค่า $\alpha = 1.6262$ rad	27
รูปที่ 4.4.2 Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 400 จำนวนค่า $\alpha = 1.4806$ rad	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.4.3 Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 500 ค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 1.5769$ rad	28
รูปที่ 4.4.4 Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 600 ค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 1.4824$ rad	29



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ผลิตจำพวก เลนส์ กระจก และอุปกรณ์ทางแสง และการผลิตซิลิกอนเวเฟอร์ รวมทั้งอุตสาหกรรมประเภทจักรกล อุตสาหกรรม ความเรียบของวัสดุเป็นข้อกำหนดในการยอมรับชิ้นงานนั้นๆ เพราะคุณภาพของชิ้นงาน เหล่านี้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นชิ้นงานเหล่านี้จะมีมูลค่าของ ชิ้นงานค่อนข้างสูง เนื่องจากจะต้องใช้เทคโนโลยีในการผลิตและการทดสอบที่เป็นเทคโนโลยีระดับสูง นั่นคือมีความละเอียดและความถูกต้องสูง เครื่องวัดความเรียบที่มีการใช้งานอยู่อย่างแพร่หลายเป็น เครื่องมือเชิงกล ที่ใช้หลักการของหัวลาก (Stylus profile instrument) โดยที่หัวลากนี้จะมีขนาดเล็กและมี ให้เลือกหลายขนาดขึ้นอยู่กับความละเอียด ในขณะที่ทำการวัดหัววัดจะถูกลากไปบนผิวของชิ้นงาน และหัวลากก็จะสัมผัสตามลักษณะของพื้นผิวซึ่งก็จะส่งสัญญาณออกไปยังส่วนประมวลผลและ แสดงผลออกมาในรูปแบบกราฟและค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดของแอมพลิจูดสูงสุด ความกว้างของลูกคลื่น ค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูด ด้วยวิธีการวัดลักษณะนี้จะเห็นได้ว่ามีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ข้อมูลที่ได้จากการวัดความเรียบจะอยู่ในเส้นเท่านั้น และเนื่องจากในขณะที่ทำการวัดจะต้องลากหัวลากไปบนพื้นผิวที่ ทดสอบดังนั้นพื้นผิวที่ทดสอบอาจเกิดการเสียหายได้ สำหรับความละเอียดในการวัดก็จะมีข้อจำกัดซึ่ง ขึ้นอยู่กับขนาดของหัวลาก จึงทำให้เครื่องมือชนิดนี้เหมาะสำหรับการวัดที่ไม่ละเอียดนักจำพวกชิ้นงาน จากงานจักรกลอุตสาหกรรม

สำหรับในการวัดความเรียบในระดับสูงจะใช้เครื่องมือที่ใช้หลักการทางแสง โดยใช้การ วิเคราะห์ลวดลายของการแทรกสอด (Interferogram) ซึ่งเกิดจากการแทรกสอดของแสง 2 ขบวน โดย แสงขบวนหนึ่งสะท้อนมาจากผิวที่ทราบความเรียบและมีความเรียบสูง (Reference optical flat) ส่วน ลำแสงอีกขบวนหนึ่งจะสะท้อนมาจากพื้นผิวที่ต้องการทดสอบ ซึ่งลักษณะของพื้นผิวที่แตกต่างกันนี้จะ ให้รู้การแทรกสอดที่แตกต่างกัน ซึ่งรู้การแทรกสอดที่ได้นี้จะนำมาแปรความหมายที่จะบอกถึง ลักษณะพื้นผิวต่อไป ด้วยวิธีการวัดดังกล่าวนี้จะมีข้อดีกว่าวิธีทางกลคือในขณะที่ทำการทดสอบผิวของ ชิ้นงานจะไม่ถูกสัมผัสดังนั้นจึงแน่ใจได้ว่าชิ้นงานจะไม่เสียหายหลังจากการทดสอบ และข้อดีมากคือ

ภาพรีวการแทรกสอดที่เกิดขึ้นสามารถนำมาแปลความหมายในลักษณะของพื้นผิวที่เป็น 3 มิติได้ซึ่งในส่วนนี้จะต้องมีโปรแกรมที่นำข้อมูลของรีวการแทรกสอดมาคำนวณให้เป็นภาพ 3 มิติ

ในวิธีการวัดความเรียบผิวโดยใช้หลักการของการแทรกสอดนั้นมีด้วยกันหลายวิธี สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการแทรกสอดแบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์มาศึกษาวัสดุที่มีความละเอียดสูง เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและให้ผลที่ชัดเจนพอสมควร ซึ่งงานที่นำมาทดสอบนี้จะเป็นประเภทอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์ที่สามารถสะท้อนแสงได้ดี เช่นกระจกของระบบเลเซอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

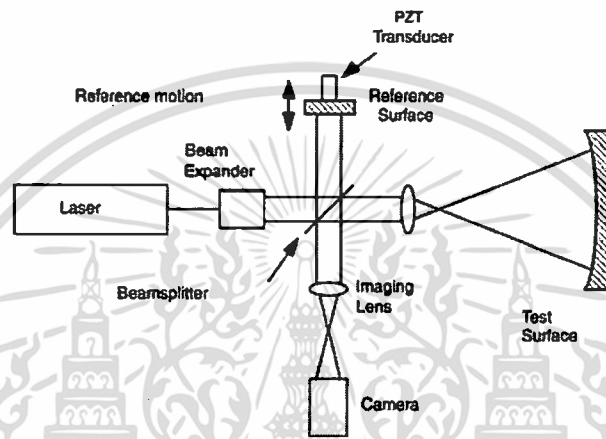
1. ศึกษาวิธีการตรวจสอบความเรียบของผิววัสดุ เพื่อให้สามารถบอกระดับความเรียบและลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงานที่ทดสอบได้
2. ศึกษาวิธีการคำนวณเพื่อนำภาพรีวการแทรกสอดที่เกิดขึ้นมาแสดงผลเป็นภาพพื้นผิว 3 มิติ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของ ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์
2. ศึกษาทฤษฎีทางแสงที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์ได้จากภาพรีวการแทรกสอดทางแสง
3. ศึกษาหลักการการประมวลผลภาพ (image processing) ซึ่งเกิดจากการแทรกสอดทางแสง
4. ศึกษาการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงภาพ 3 มิติ ของพื้นผิวที่ต้องการทดสอบความเรียบ
5. สร้างอุปกรณ์เพื่อศึกษาความเรียบของผิวที่ต้องการทดสอบ โดยใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์
6. บันทึกข้อมูลภาพรีวการแทรกสอดทางแสงที่เฟสต่างๆ ลงในคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป
7. แสดงผลการคำนวณความเรียบของผิววัตถุที่ต้องการทดสอบเป็นภาพ 3 มิติของพื้นผิวนั้น

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ความเรียบของผิววัสดุ โดยใช้เทคนิคไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรเมตรี ซึ่งเป็นวิธีทดสอบแบบไม่สัมผัสกับผิววัสดุ สำหรับชุดทดสอบความเรียบแบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรเมตรีในงานวิจัยนี้จะแสดง โดยแผนภาพดังในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงแผนภาพของอุปกรณ์ในการทดสอบความเรียบของผิววัสดุ

ในรูปที่ 1 เป็นการแสดงทางเดินของแสงที่เกิดการแทรกสอดแบบไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรเมตรี แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร กำลัง 10 มิลลิวัตต์ ขนาดของลำแสงจะถูกขยายด้วยระบบของบีมเอ็กแพนเดอร์ ทำให้ได้ขนาดของลำแสงเป็นวงกลมรัศมีประมาณ 1 นิ้ว โดยที่ลำแสงยังคงเป็นแสงขนานอยู่ จากนั้นลำแสงจะถูกแยกด้วยตัวแยกลำแสง (beam splitter) ชนิดผลึกแยกลำแสง กลายเป็นลำแสง 2 ลำซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแสงอาพันธ์ ลำแสงหนึ่งจะทะลุผ่านผลึกแยกลำแสงไปตกกระทบพื้นผิวที่ต้องการทดสอบและจะสะท้อนกลับทางเดิมซึ่งหน้าคลื่นที่สะท้อนกลับมานี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของพื้นผิว ส่วนลำแสงอีกหนึ่งลำจะสะท้อนไปตกกระทบยังแผ่นผิวเรียบอ้างอิง และจะสะท้อนกลับออกมา ลำแสงที่สะท้อนกลับออกมาทั้ง 2 ลำจะเกิดการแทรกสอดกัน ซึ่งภาพลวดลายของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายรูป และจะเป็นภาพที่ถูกนำไปใช้ในการประมวลผลเพื่อคำนวณหาค่าความเรียบของผิววัสดุต่อไป

ในงานวิจัยนี้จะทำการบันทึกภาพการแทรกสอดที่เกิดขึ้น โดยการเลื่อนเฟสของผิวที่ต้องการทดสอบให้แตกต่างกันทั้งหมด 5 เฟส เพื่อให้ได้ภาพการแทรกสอดที่แตกต่างกันทั้งหมด 5 ภาพ โดย

เฟสของแต่ละภาพจะแตกต่างกันเป็นดังนี้ คือ $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ และ 2π ภาพรีจิสเทรชันที่แตกต่างกันทั้ง 5 ภาพนี้จะมีตำแหน่งของรีจิสเตอร์และรีจิสเตอร์ที่ว่างแตกต่างกัน เมื่อนำภาพรีจิสเทรชันที่แตกต่างกันทั้ง 5 ภาพนี้ ไปวิเคราะห์ระดับความเข้มแสงที่ตำแหน่งเดียวกันของทั้ง 5 ภาพจะทำให้ทราบความต่างเฟส (phase difference) ที่ตำแหน่งนั้น ซึ่งความต่างเฟสจะมีความสัมพันธ์กับความต่างวิถี (path difference) ที่ตำแหน่งนั้นๆ ทำให้เราทราบถึงความสูงต่ำของพื้นผิวแต่ละตำแหน่งได้ ซึ่งทำให้เราทราบถึงค่าความเรียบของผิววัสดุที่เราต้องการทดสอบได้ในที่สุด

ความเข้มแสงที่ตำแหน่งต่างๆของภาพรีจิสเทรชันที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นจากการเลื่อนเฟสแตกต่างกัน หากวิเคราะห์ด้วยวิธี four position phase-shifting technique จะใช้ภาพรีจิสเทรชันจำนวน 4 ภาพแรก สมการความเข้มแสงที่จุดต่างๆ ของแต่ละภาพ เป็นดังนี้

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad ; \text{เฟสเลื่อนไป } 0 \text{ rad}$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi/2] \quad ; \text{เฟสเลื่อนไป } \pi/2 \text{ rad}$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi] \quad ; \text{เฟสเลื่อนไป } \pi \text{ rad}$$

$$I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + 3\pi/2] \quad ; \text{เฟสเลื่อนไป } 3\pi/2 \text{ rad}$$

จากค่าความเข้มแสงที่ตำแหน่งต่างๆของภาพทั้ง 4 ภาพจะทำให้เราสามารถคำนวณความต่างเฟส ($\Phi(x, y)$) ที่เราต้องการรู้ที่ตำแหน่งนั้นๆได้ ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \frac{\sin[\phi(x, y)]}{\cos[\phi(x, y)]} = \tan[\phi(x, y)]$$

ดังนั้นจากการเลื่อนเฟสของผิวที่เราต้องการทดสอบแบบ phase shifting method ทั้งหมด 4 step ทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นความต่างเฟสที่ตำแหน่งต่างๆของผิวที่ต้องการทดสอบเป็นดังนี้

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right]$$

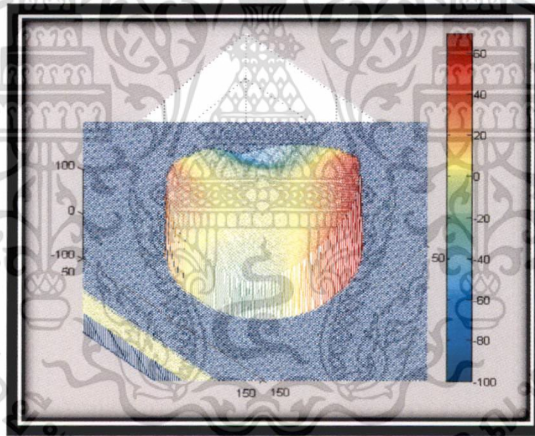
สำหรับงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ความเรียบของพื้นผิวทดสอบ โดยใช้การวิเคราะห์แบบ five position phase-shifting technique ซึ่งเป็นวิธีที่แก้ปัญหา phase step errors ซึ่งเกิดขึ้นจากคุณสมบัติ non

linearities ของเพียร์โซอิเล็กทริกได้มากกว่าวิธี four position phase-shifting technique หลังจากนั้นเราจะนำข้อมูลของความต่างเฟสที่ตำแหน่งต่างๆเหล่านี้ไปทำการปรับแต่งเพื่อตัดส่วนที่เฟสไม่ต่อเนื่องกัน (Phase unwrapping) ออกไป จะได้ข้อมูลของความต่างเฟสที่ต่อเนื่องกันทั้งหมดตลอดพื้นผิววัสดุที่เราต้องการทดสอบ

ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการคำนวณความสูงต่ำที่ตำแหน่งต่างๆ ($h(x,y)$) ของพื้นผิวที่เราต้องการทดสอบ โดยความสูงต่ำที่ตำแหน่งต่างๆจะมีความสัมพันธ์กับความต่างเฟส ($\Phi(x,y)$) ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

$$\phi(x,y) = 4\pi h(x,y)/\lambda$$

เมื่อนำข้อมูลความสูงต่ำที่ตำแหน่งต่างๆเหล่านี้ไปพลอตกราฟ 3 มิติ เราจะได้ภาพ 3 มิติของพื้นผิวที่เราต้องการทดสอบซึ่งจำลองขึ้นมาด้วยคอมพิวเตอร์ดังในรูปที่ 2



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างภาพ 3 มิติแสดงความสูงต่ำของพื้นผิวที่เราต้องการทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

1. สามารถนำชุดอุปกรณ์ทดสอบความเรียบของผิววัสดุที่สร้างขึ้นมานี้ เป็นต้นแบบสำหรับศึกษาความเรียบของผิววัสดุชนิดอื่นๆ ได้
2. สามารถนำชุดอุปกรณ์ทดสอบความเรียบของผิววัสดุที่สร้างขึ้นมานี้ ไปพัฒนาต่อเพื่อให้ได้อุปกรณ์การวัดความเรียบของผิววัสดุที่มีความละเอียดสูงต่อไปได้ในอนาคต
3. สามารถประหยัดต้นทุนในการซื้อเครื่องวัดความเรียบของผิววัสดุซึ่งมีราคาแพงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

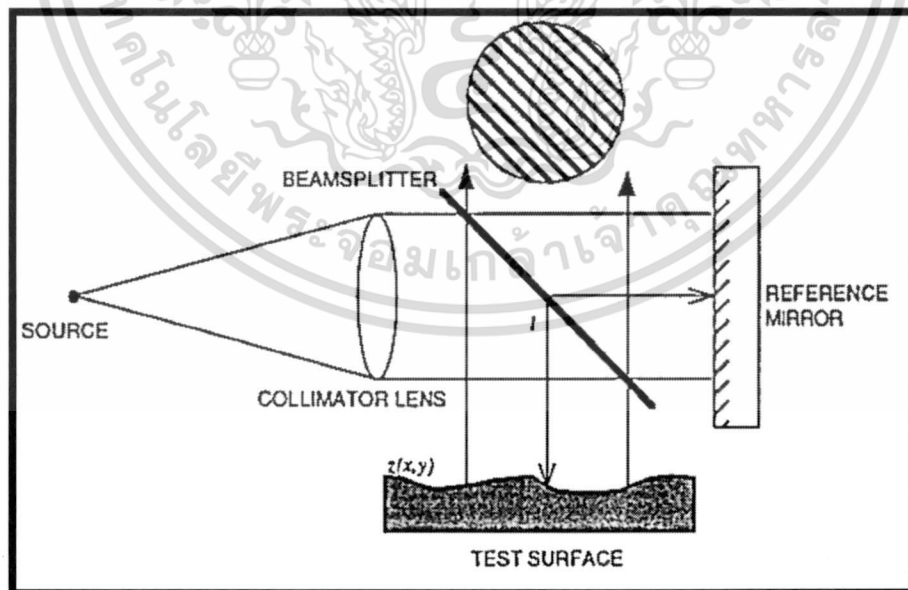
แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีและหลักการของอินเตอร์เฟอโรเมตรีแบบเลื่อนเฟส (Phase Shifting Interferometry, PSI)

อินเตอร์เฟอโรเมตรีแบบเลื่อนเฟสหรือที่เรียกกันว่า PSI เป็นเทคนิคหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์รูปร่างการแทรกสอด ซึ่งเกิดจากลำแสงหลายลำแทรกสอดกันแบบเฉพาะจุด (fixed spatial coordinates) [1,2,3,4,5]

เทคนิค PSI เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ตั้งแต่กลางปีค.ศ. 1980 โดยนำเทคนิคนี้มาใช้ในการตรวจสอบและประมวลผลรูปภาพ (image detection and processing) นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือวัดค่าต่างๆทางแสงอีกด้วย เช่น ค่าดัชนีหักเหของวัตถุ ค่าความเรียบของวัตถุ เป็นต้น

การคำนวณเฟสของ PSI จะขึ้นอยู่กับความเข้มแสง ($I(x,y)$) ที่จุดต่างๆ (x,y) จากการแทรกสอดกันของหน้าคลื่น 2 ชุดในอินเตอร์เฟอโรแกรม โดยจากรูป 2.1 เป็นตัวอย่างชุดทดลองทางแสง Twyman-Green interferometer, $z(x,y)$ ในรูปคือลักษณะพื้นผิวทดสอบที่จุดต่างๆ, λ คือความยาวคลื่นแสงของ monochromatic light และ l คือผลต่างทางเดินแสงระหว่างพื้นผิวอ้างอิงและพื้นผิวทดสอบ



รูป 2.1 Twyman-Green interferometer สำหรับการตรวจสอบพื้นผิววัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับเทคนิคอินเทอร์เฟอโรเมทรีแบบเลื่อนเฟส คือเฟสที่เลื่อนออกไประหว่างหน้าคลื่นอ้างอิง (reference wavefront) และหน้าคลื่นผิวทดสอบ (sample wavefront) จะทำให้เกิดริ้วการแทรกสอดทางแสงที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะจุดในอินเทอร์เฟอโรแกรม (interferogram) หากเราวิเคราะห์เฟสที่หน้าคลื่นเหล่านี้ เราจะสามารถทราบผลต่างทางเดินแสง (optical path difference, OPD) หรือความคลาดเคลื่อนของความสูง (height errors, $h(x,y)$) ของพื้นผิวที่เราทดสอบได้ โดยวิเคราะห์จากความคลาดเคลื่อนของหน้าคลื่น (wavefront errors, $\Phi(x,y)$) ที่สะท้อนออกมาจากผิวทดสอบนั้น จะมีความสัมพันธ์กับความคลาดเคลื่อนของความสูง (height errors, $h(x,y)$) ดังนี้

$$\Phi(x,y) / \lambda = 4\pi h(x,y) / \lambda$$

โดยที่ x และ y คือ spatial coordinates และ λ คือความยาวคลื่นแสง

สำหรับสมการโดยทั่วไปของหน้าคลื่นอ้างอิง และหน้าคลื่นผิวทดสอบในอินเทอร์เฟอโรเมทรีจะมีรูปสมการดังต่อไปนี้

$$w_r = ae^{2ikl}$$

$$w_t = be^{2ikz(x,y)}$$

$k = 2\pi/\lambda$ และ a, b คือค่าแอมพลิจูดของหน้าคลื่นที่แทรกสอดกัน เนื่องจากการสะท้อนกับผิวทดสอบที่มีความเรียบไม่สม่ำเสมอ ความเข้มแสงของคลื่นที่แทรกสอดกันจะมีรูปสมการดังนี้

$$I(x,y,l) = (w_r + w_t)(w_r + w_t)^*$$

$$= a^2 + b^2 + 2ab \cos(2k(z(x,y) - l))$$

เทอม $(a^2 + b^2)$ คือ background intensity และ เทอม $(2ab \cos(2k(z(x,y) - l)))$ คือริ้วการแทรกสอดที่อยู่ในรูปของ sinusoidal เราสามารถเปลี่ยนค่าความเข้มแสง $I(x,y,l)$ ให้มีค่าแตกต่างกันได้ ด้วยการเคลื่อนที่พื้นผิวทดสอบจนทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของลำแสงใดลำแสงหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้ผลต่างทางเดินแสง (1) เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

เมื่อค่า l เปลี่ยน ความเข้มแสง $I(x,y,l)$ ที่จุดต่างๆ (x,y) ในอินเทอร์เฟอโรแกรมจะเปลี่ยนไปด้วยแบบ sinusoidal pattern ในกรณีของ PSI หากเราทราบค่า l และสังเกตจากความเข้มแสง $I(x,y,l)$ ที่

เปลี่ยนแปลงไป เราจะหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองนี้ได้ ทำให้เราสามารถวิเคราะห์ความสูงต่ำของพื้นผิว ($z(x,y)$) ในเทอมของ k หรือ λ ได้

เพื่อที่จะทำให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีวิเคราะห์แบบ Four position phase-shifting technique ซึ่งเป็นวิธีที่ลดปัญหาที่เกิดจาก phase stepper errors ระหว่างการทดลองได้

2.1.1 Four position phase-shifting technique

วิธี Four position phase-shifting technique จะต้องมีการบันทึกอินเตอร์เฟอโรแกรม จำนวน 4 รูป โดยที่แต่ละรูปจะถูกบันทึกในขณะที่ผลต่างเฟส (optical phase shift) ระหว่างหน้าคลื่นอ้างอิงและหน้าคลื่นผิวทดสอบต่างกันครึ่งละ 90 องศา (nominal phase step คือ $\pi/2$ rad) พื้นผิวอ้างอิงจะถูกเคลื่อนที่เพื่อทำให้เฟสของหน้าคลื่นอ้างอิงถูกเลื่อนให้มีค่าเท่ากับ 0 rad, $\pi/2$ rad, π rad และ $3\pi/2$ rad ตามลำดับ [4,5,6] โดยการใช้ความต่างเฟสต่างๆเหล่านี้ ความเข้มแสงที่แต่ละจุดในอินเตอร์เฟอโรแกรม ทั้ง 4 รูปถูกอธิบายได้ด้วยสมการความเข้มแสง $I(x,y)$ ดังนี้

$$I_1(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y) \cos[\phi(x,y)] \quad ; \text{เฟสเลื่อนไป } 0 \text{ rad}$$

$$I_2(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y) \cos[\phi(x,y) + \pi/2] \quad ; \text{เฟสเลื่อนไป } \pi/2 \text{ rad}$$

$$I_3(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y) \cos[\phi(x,y) + \pi] \quad ; \text{เฟสเลื่อนไป } \pi \text{ rad}$$

$$I_4(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y) \cos[\phi(x,y) + 3\pi/2] \quad ; \text{เฟสเลื่อนไป } 3\pi/2 \text{ rad}$$

จากค่าความเข้มแสงที่ตำแหน่งต่างๆของภาพทั้ง 4 ภาพจะทำให้เราสามารถคำนวณความต่างเฟส ($\Phi(x,y)$) ที่เราต้องการรู้ที่ตำแหน่งนั้นๆได้ ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \frac{\sin[\phi(x,y)]}{\cos[\phi(x,y)]} = \tan[\phi(x,y)]$$

ดังนั้นจากการเลื่อนเฟสของผิวที่เราต้องการทดสอบแบบ phase shifting method ทั้งหมด 4 step ทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นความต่างเฟสที่ตำแหน่งต่างๆของผิวที่ต้องการทดสอบเป็นดังนี้

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right]$$

หลังจากนั้นเราจะนำข้อมูลของความต่างเฟสที่ตำแหน่งต่างๆเหล่านี้ไปทำการปรับแต่งเพื่อให้เฟสทั้งหมดมีความต่อเนื่องกัน ซึ่งเรียกว่า การทำ Phase unwrapping จึงจะได้ข้อมูลของความต่างเฟสที่ต่อเนื่องกันทั้งหมดตลอดพื้นผิววัสดุที่เราต้องการทดสอบ

ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการคำนวณความสูงต่ำที่ตำแหน่งต่างๆ ($h(x,y)$) ของพื้นผิวที่เราต้องการทดสอบ โดยความสูงต่ำที่ตำแหน่งต่างๆจะมีความสัมพันธ์กับความต่างเฟส (สมการ 1 ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

$$\phi(x, y) = 4\pi h(x, y) / \lambda$$

วิธี Four position phase-shifting technique จะมีข้อดีมากกว่าวิธี Three position phase-shifting technique คือเป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า แต่มีข้อเสียตรงที่ว่า วิธีนี้ต้องใช้พื้นที่และหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลเฟสมากกว่า

2.1.2 Five position phase-shifting technique

วิธี Five position phase-shifting technique ถูกคิดค้นขึ้นโดย Hariharan et al [4] โดยวิธีนี้จะลดปัญหา phase step errors ซึ่งเกิดขึ้นจากคุณสมบัติ non linearities ของเพียร์โซอิเล็กทริกได้มากกว่าวิธีอื่นๆ วิธีนี้จะทำการเลื่อนเฟสของหน้าคลื่นอ้างอิงให้มีค่าต่างๆดังนี้คือ 0 rad , $\pi/2 \text{ rad}$, $\pi \text{ rad}$, $3\pi/2 \text{ rad}$ และ $2\pi \text{ rad}$

ในการวิเคราะห์จะต้องมีสมการความเข้มแสงที่จุดต่างๆ ในอินเตอร์ฟอโรแกรมจำนวน 5 สมการ ความเข้มแสงแต่ละสมการจะสัมพันธ์กับ phase shift ของ $\alpha = \pi/2 \text{ rad}$ ดังนี้ -2α , $-\alpha$, 0 , α , 2α

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) - 2\alpha]$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) - \alpha]$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y)]$$

$$I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) + \alpha]$$

$$I_5(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y, \Delta) \cos[\phi(x, y) + 2\alpha]$$

จากค่าความเข้มแสงที่ตำแหน่งต่างๆของภาพทั้ง 5 ภาพจะทำให้เราสามารถคำนวณความต่างเฟส ($\Phi(x,y)$) ที่เราต้องการรู้ที่ตำแหน่งนั้นๆได้ ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\phi(x,y) = \tan^{-1} \left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right]$$

2.1.3 Phase Unwrapping

ขั้นตอนนี้จะเป็นการกำจัดเฟสที่ไม่ต่อเนื่องบริเวณ 2π ของหน้าคลื่นออกไป และทำให้เฟสของหน้าคลื่นมีความต่อเนื่องกันอย่างสมบูรณ์ตลอดพื้นผิวทดสอบ โดยการนำเฟสที่ยังไม่ต่อเนื่องนั้นมาทำ modulo กับ 2π ก่อน จากนั้นจึงจะเริ่มสร้างความต่อเนื่องให้กับเฟสที่บริเวณ 2π นั้น [7]

2.1.3.1 Unwrapping in one Dimension

กระบวนการสร้างความต่อเนื่องให้กับเฟสของหน้าคลื่นแบบ 1 มิติ ดังในรูปที่ 2.2.1- รูปที่ 2.2.3 สามารถทำได้ด้วยการนำเฟสที่ยังไม่ต่อเนื่องนั้นมาคูณกับ 2π โดยจะใช้ฟังก์ชัน $p(i)$ ร่วมกับการคูณ 2π ตามสมการ นี้

$$\Phi_{\text{unwrapped}}(i) = \Phi_{\text{wrapped}}(i) + p(i) \cdot 2\pi$$

สำหรับการพิจารณาค่าของฟังก์ชัน $P(i)$ ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะการเกิดพีคแหลมของเฟสในบริเวณที่ไม่ต่อเนื่อง จะพิจารณาจากการคำนวณผลต่างเฟส ($\Delta\Phi$) ตามแนวแกน i โดยตำแหน่งที่ $(i-1)$ คือจุดที่มา ก่อนตำแหน่ง $i-1$ จุดในแนวแกน i และ $\Delta\Phi$ จะคำนวณตามสมการ.....

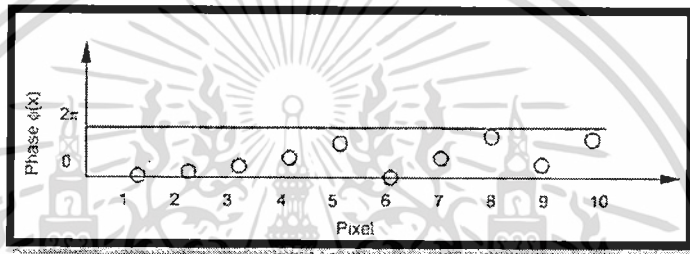
ดังนี้

$$\Delta\Phi_{\text{wrapped}}(i) = \Phi_{\text{wrapped}}(i) - \Phi_{\text{wrapped}}(i-1)$$

ค่าของ $\Delta\Phi$ ที่คำนวณได้นี้ จะทำให้เราสามารถกำหนดค่าให้กับฟังก์ชัน $p(i)$ ได้ ดังในรูปที่ 2.3 โดยใช้เงื่อนไขของผลต่างเฟสดังต่อไปนี้

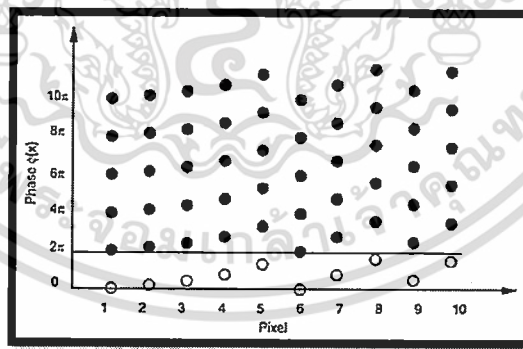
$$p(i) \begin{cases} = p(i-1) - 1 & ; \Delta\Phi(i) > \pi \\ = p(i-1) & ; -\pi < \Delta\Phi(i) < \pi \\ = p(i-1) + 1 & ; \Delta\Phi(i) < -\pi \end{cases}$$

ถ้าผลต่างเฟสที่คำนวณได้ระหว่าง 2 ตำแหน่งใดๆ มีค่ามากกว่า π แสดงว่าจะต้องนำค่า 2π หรือค่าที่เป็นผลคูณของ 2π มาบวกหรือลบออกจากค่าเฟสที่คำนวณได้ของตำแหน่งหลัง (ตำแหน่ง i ใดๆ) และกำหนดให้ค่าเริ่มต้นของ $p(i)$ เท่ากับศูนย์



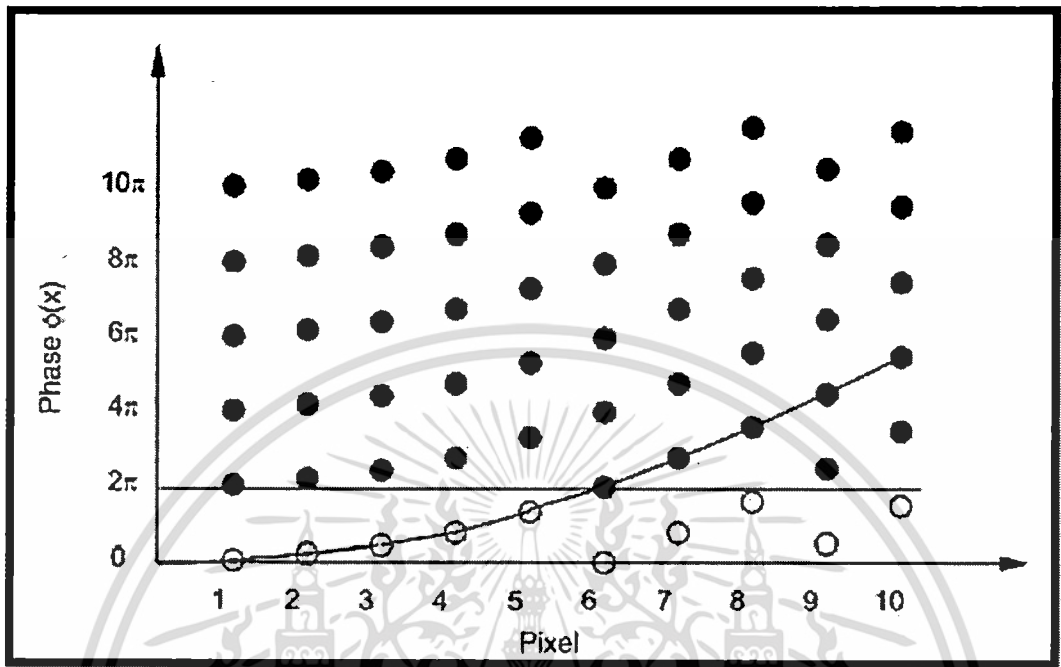
รูปที่ 2.2.1: แสดงข้อมูลเฟสของหน้าคลื่นที่ modulo กับ 2π

ที่มา : Optical Shop Testing Third Edition, Daniel Malacara, Copyright _ 2007 by John Wiley & Sons, Inc



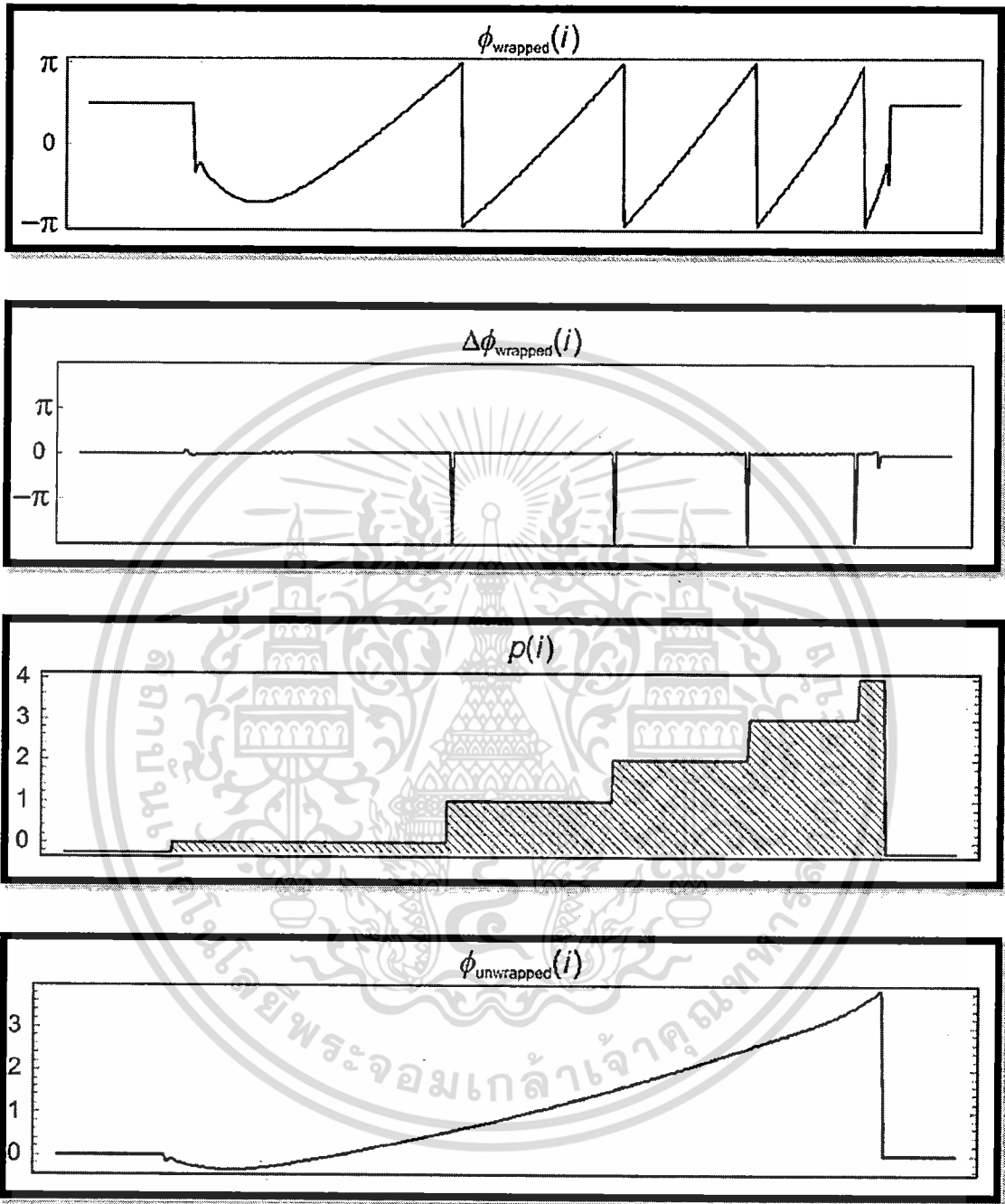
รูปที่ 2.2.2: แสดงเฟสในทุกกรณีที่จะสามารถนำมาเป็นเฟสของหน้าคลื่นได้

ที่มา : Optical Shop Testing Third Edition, Daniel Malacara, Copyright _ 2007 by John Wiley & Sons, Inc



รูปที่ 2.2.3: แสดงเฟสของหน้าคลื่นหลังจากสร้างความต่อเนื่องให้กับหน้าคลื่นแล้ว

ที่มา : Optical Shop Testing Third Edition, Daniel Malacara, Copyright _ 2007 by John Wiley & Sons, Inc



รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการสำหรับสร้างความต่อเนื่องเพื่อพิจารณาค่าให้กับฟังก์ชัน $p(i)$ แบบ 1 มิติ ซึ่งค่าของฟังก์ชัน $p(i)$ นี้คำนวณมาจากการคูณด้วยค่า 2π หรือผลคูณของค่า 2π

ที่มา : Optical Shop Testing Third Edition, Daniel Malacara, Copyright _ 2007 by John Wiley & Sons, Inc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 phase shift calibration

ขั้นตอนที่สำคัญสำหรับระบบการวัดที่ใช้เทคนิค PSI คือการปรับเทียบ(calibrate) phase shift α ที่เกิดขึ้นระหว่างอินเตอร์เฟอโรแกรมที่บันทึกไว้แต่ละชุด ซึ่ง phase shift นี้ควรจะมีค่าเท่ากับ 90 องศา วิธีปรับเทียบ phase shift แบบง่ายและนำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ การใช้ Carre' algorithm หาค่า phase shift α

วิธีของ Carre' จะใช้ค่าความเข้มแสงที่จุด (x,y) เดียวกันของทั้ง 5 อินเตอร์เฟอโรแกรม [Schwider et al., 1983, Cheng and Wyant, 1985, Hariharan] มาสร้างสมการอย่างง่ายของ phase shift α ดังนี้

$$\alpha(x, y) = \cos^{-1} \left[\frac{I_5(x,y) - I_1(x,y)}{2(I_4(x,y) - I_2(x,y))} \right]$$

กำหนดให้ ε คือ phase step error และ α คือ phase shift ปริมาณทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\alpha = \pi/2 + \varepsilon$$

และความเข้มแสงที่จุดต่างๆของอินเตอร์เฟอโรแกรมแต่ละชุดเป็นดังนี้

$$I_1 = A + B + 2\sqrt{AB}\cos(\varnothing - \pi - 2\varepsilon)$$

$$I_2 = A + B + 2\sqrt{AB}\cos(\varnothing - \pi/2 - \varepsilon)$$

$$I_3 = A + B + 2\sqrt{AB}\cos(\varnothing)$$

$$I_4 = A + B + 2\sqrt{AB}\cos(\varnothing + \frac{\pi}{2} + \varepsilon)$$

$$I_5 = A + B + 2\sqrt{AB}\cos(\varnothing + \pi + \varepsilon)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \tan \varnothing' &= \frac{2[\cos(\varnothing - \frac{\pi}{2} - \varepsilon) - \cos(\varnothing + \frac{\pi}{2} + \varepsilon)]}{2\cos\varnothing - \cos(\varnothing + \frac{\pi}{2} + \varepsilon) - \cos(\varnothing - \pi - 2\varepsilon)} \\ &= \frac{2[\sin(\varnothing - \varepsilon) + \sin(\varnothing + \varepsilon)]}{2\cos\varnothing + \cos(\varnothing + 2\varepsilon) + \cos(\varnothing - 2\varepsilon)} \\ &= \frac{2\sin\varnothing \cos\varepsilon}{\cos\varnothing + \cos\varnothing \cos 2\varepsilon} \end{aligned}$$

$$\therefore \tan \varnothing' = \tan \varnothing \left(\frac{2\cos\varepsilon}{1 + \cos 2\varepsilon} \right)$$

ดังนั้นหาก phase step error , $\varepsilon = 1$ องศา จากการคำนวณโดยใช้สมการ $\tan\phi' = \tan\phi \left(\frac{2\cos\varepsilon}{1+\cos2\varepsilon} \right)$ ทำให้ทราบว่า ผลต่างเฟสที่วัดได้ ($\Phi(x,y)$) จะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 0.05 องศา

2.2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

เทคนิคหนึ่งที่ยอมรับใช้กันในปัจจุบันสำหรับการวัดความเรียบของผิววัสดุแบบไม่ทำลายพื้นผิวของวัตถุ คือเทคนิคทางแสงในการวัดแบบไม่สัมผัสกับวัตถุ เครื่องมือวัดทางแสงที่มีความถูกต้องสูง จำเป็นต้องใช้ซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูลภาพที่มีความน่าเชื่อถือมากตามไปด้วย จึงจะช่วยให้ระบบการวัดมีความแม่นยำและเชื่อถือได้ ซึ่งระบบวัดทางแสงได้รับความนิยมถูกนำไปใช้งานวัดทั้งทางด้านวิศวกรรมและทางด้านวิทยาศาสตร์เป็นอย่างมาก รวมไปถึงงานวัดทางการแพทย์อีกด้วย

เทคนิคการวัดทางแสงแบบไม่สัมผัสกับวัตถุจะใช้วิธีการแทรกสอดทางแสงที่เกิดการการตกกระทบกับผิววัตถุที่ต้องการวัดสภาพพื้นผิวมาประมวลผลเป็นภาพ 3 มิติที่แสดงถึงความเรียบของสภาพผิววัตถุนั้นๆ จากงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันพบว่ามีเทคนิคการวิเคราะห์หรือการแทรกสอดอยู่หลายแบบ เช่น เทคนิคการวิเคราะห์แบบนับจำนวนริ้วการแทรกสอด (Fringe tracing method), เทคนิคการวิเคราะห์หรือการแทรกสอดโดยใช้ฟูเรียร์ (Fourier fringe analysis, FFA), เทคนิคการวิเคราะห์แบบเลื่อนเฟส (Phase shifting interferometry, PSI) โดยแต่ละวิธีมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป

ปัญหาใหญ่สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์แบบนับจำนวนริ้วการแทรกสอดคือ จะต้องหาวิธีตรงกลางของริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นให้ได้ก่อน จึงจะคำนวณมุมเฟสที่สัมพันธ์กับความเข้มของริ้วการแทรกสอดที่ตำแหน่งนั้นได้ สำหรับวิธีวิเคราะห์แบบฟูเรียร์มีข้อเสียตรงที่ว่าจะต้องใช้ตัวกรองสัญญาณ (adaptive bandpass filter) ที่เหมาะสมในการกำจัดสัญญาณรบกวนและสัญญาณอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องออกไปให้หมดก่อน มิฉะนั้นจะทำให้การคำนวณเกิดความผิดพลาดเป็นอย่างมาก นอกจากนี้วิธีวิเคราะห์แบบฟูเรียร์จำเป็นต้องใช้สมการคณิตศาสตร์ที่มีความยากและซับซ้อนอีกด้วย

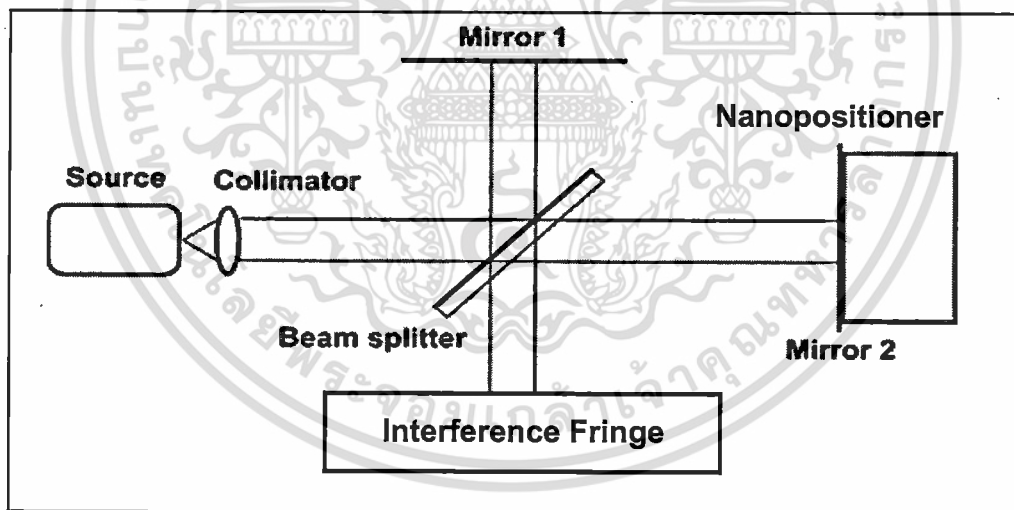
เพื่อที่จะแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นใน 2 วิธีแรกนี้ ในปัจจุบันจึงนิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเลื่อนเฟสกันเป็นจำนวนมาก เนื่องจากวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องทราบตำแหน่งของริ้วกลาง และเป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีความง่าย ให้ผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดมากกว่าอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเลื่อนเฟส โดยใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการทดสอบความเรียบของผิววัสดุ

บทที่ 3

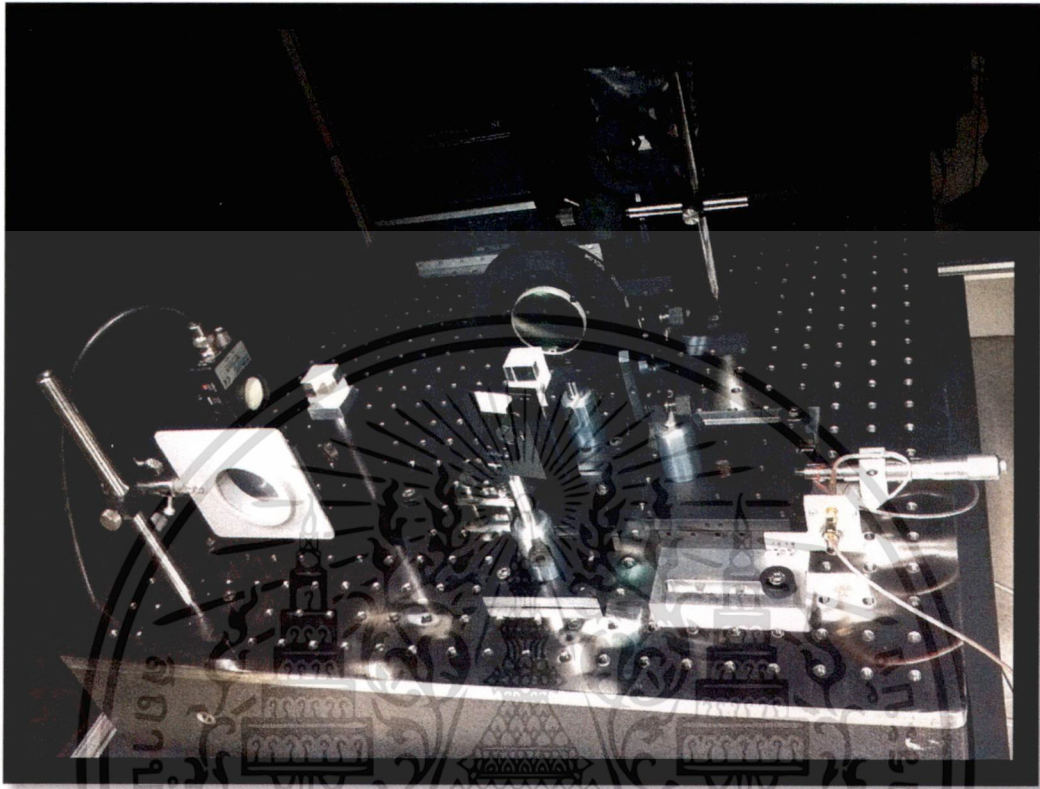
วิธีดำเนินงานวิจัย

สำหรับการทดลอง จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด โดยการทดลองชุดที่ 1 จะทำการทดลองโดยใช้กระจกเลเซอร์ชนิดที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/4$ เป็นพื้นผิวทดสอบ (กระจกบานที่ 1) และใช้กระจกเลเซอร์ชนิดที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/20$ เป็นพื้นผิวอ้างอิง (กระจกบานที่ 2) สำหรับแหล่งกำเนิดแสงจะเป็นเลเซอร์ He-Ne สีแดงที่มีความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 632 nm ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆบนโต๊ะ optic ชนิดป้องกันการสั่นสะเทือนได้ ดังแผนภาพในรูปที่ 3.1.1 และรูปแสดงอุปกรณ์ชุดทดลอง Michelson Interferometer ในงานวิจัยนี้ดังรูปที่ 3.1.2

ในการทดลองกระจกบานที่หนึ่งจะหยุดนิ่ง ส่วนกระจกบานที่สองซึ่งเป็นกระจกของพื้นผิวอ้างอิงจะถูกเคลื่อนที่ด้วยเพียร์โซอิเล็กทริก จนกระทั่งความต่างเฟสของทางเดินแสงระหว่างกระจก 2 บานนี้เท่ากับ 0 rad , $\pi/2 \text{ rad}$, $\pi \text{ rad}$, $3\pi/2 \text{ rad}$ และ 2π หลังจากนั้นจะทำการบันทึกภาพรีวการแทรกสอดที่เกิดขึ้นดังในรูปที่ 3.2 รวมทั้งหมด 5 รูปด้วยกล้องถ่ายภาพ



รูปที่ 3.1.1 แผนภาพของชุดทดลองไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์



รูปที่ 3.1.2 แสดงอุปกรณ์ชุดทดลอง Michelson Interferometer



3.2(a)

3.2(b)

3.2(c)

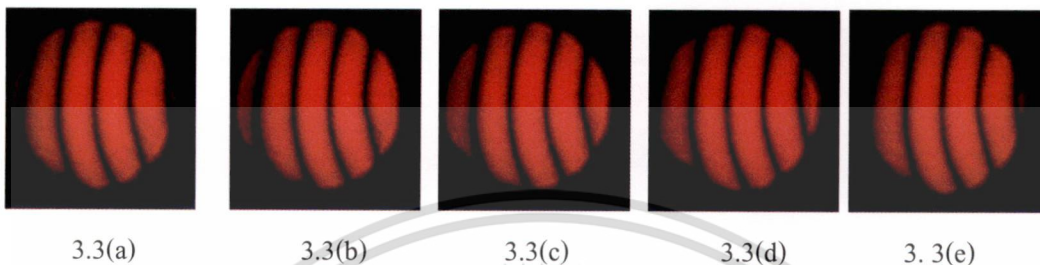
3.2(d)

3.2(e)

รูปที่ 3.2 ธีวการแทรกสอดโดยใช้กระจกเลเซอร์ชนิดที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/4$ เป็นพื้นผิวทดสอบ ที่บันทึกได้เมื่อความต่างเฟสของทางเดินแสงมีค่าต่างๆ โดย 3.2(a) ต่างกัน 0 rad , 3.2(b) ต่างกัน $\pi/2 \text{ rad}$, 3.2(c) ต่างกัน $\pi \text{ rad}$, 3.2(d) ต่างกัน $3\pi/2 \text{ rad}$ และ 3.2(e) ต่างกัน $2\pi \text{ rad}$

สำหรับการทดลองชุดที่ 2 จะทำการทดลองโดยใช้กระจกเลเซอร์ชนิดที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/10$ เป็นพื้นผิวทดสอบ (กระจกบานที่ 1) และใช้กระจกเลเซอร์ชนิดที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/20$ เป็นพื้นผิวอ้างอิง (กระจกบานที่ 2) สำหรับแหล่งกำเนิดแสงจะเป็นเลเซอร์ He-Ne สีแดงซึ่งมีความยาวคลื่น

แสงเท่ากับ 632 nm ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆบนโต๊ะ optic ชนิดป้องกันการสั่นสะเทือนได้ เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 หลังจากนั้นจะทำการบันทึกภาพริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นดังในรูปที่ 3.3 รวมทั้งหมด 5 รูป ด้วยกล้องถ่ายรูป



รูปที่ 3.3 ริ้วการแทรกสอดโดยใช้กระจกเลเซอร์ชนิดที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/10$ เป็นพื้นผิวทดสอบ ที่บันทึกได้เมื่อความต่างเฟสของทางเดินแสงมีค่าต่างๆ โดย 3.3(a) ต่างกัน 0 rad , 3.3(b) ต่างกัน $\pi/2$ rad , 3.3(c) ต่างกัน π rad , 3.3(d) ต่างกัน $3\pi/2$ rad และ 3.3(e) ต่างกัน 2π rad

หลังจากได้ภาพริ้วการแทรกสอดจากการทดลองทั้ง 2 ชุดนี้แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำภาพริ้วการแทรกสอดทั้งหมดนี้ไปทำการวิเคราะห์ความเรียบของพื้นผิวทดสอบ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบ PSI ต่อไปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยเขียนขึ้นเองสำหรับงานวิจัยนี้

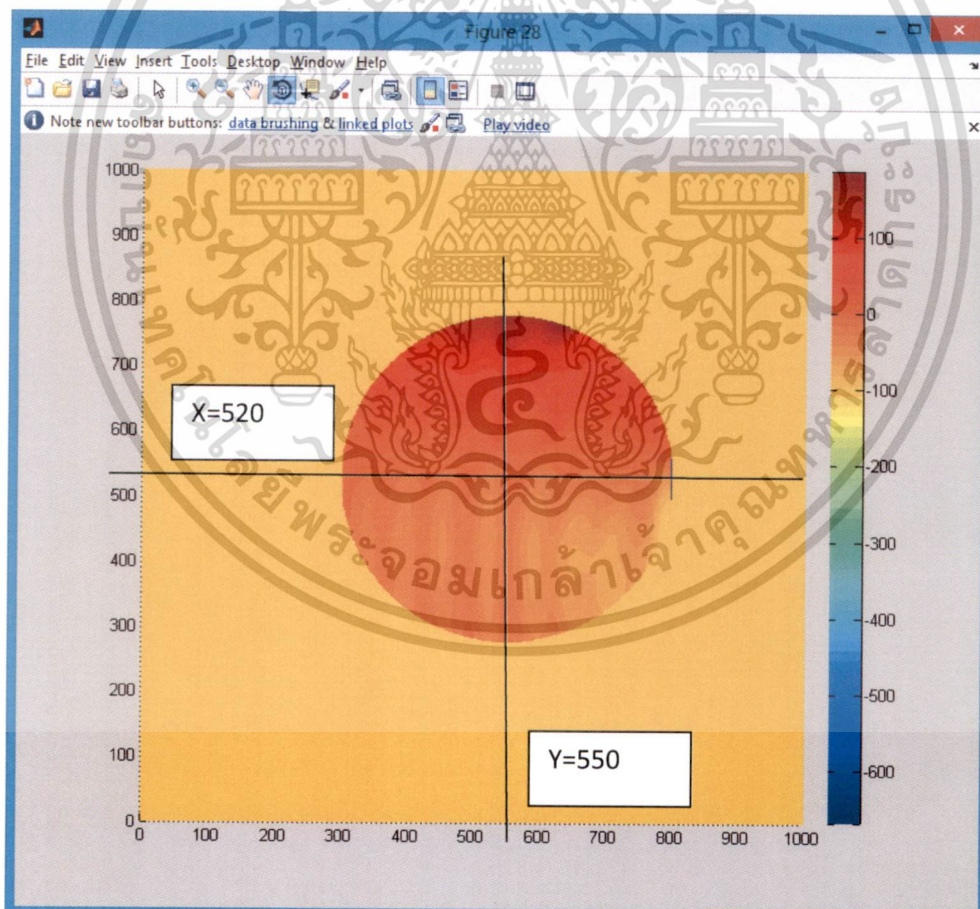
และในขั้นตอนสุดท้ายของงานวิจัยนี้จะนำกระจกทดสอบทั้ง 2 บานไปทำการวัดค่าความเรียบด้วยเครื่องมือวัด Frequency Step Interferometer ที่สถาบันมาตรวิทยา เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่เครื่องมือวัดได้กับผลที่คำนวณได้ในงานวิจัยนี้ต่อไป

บทที่ 4

ผลการวิจัย

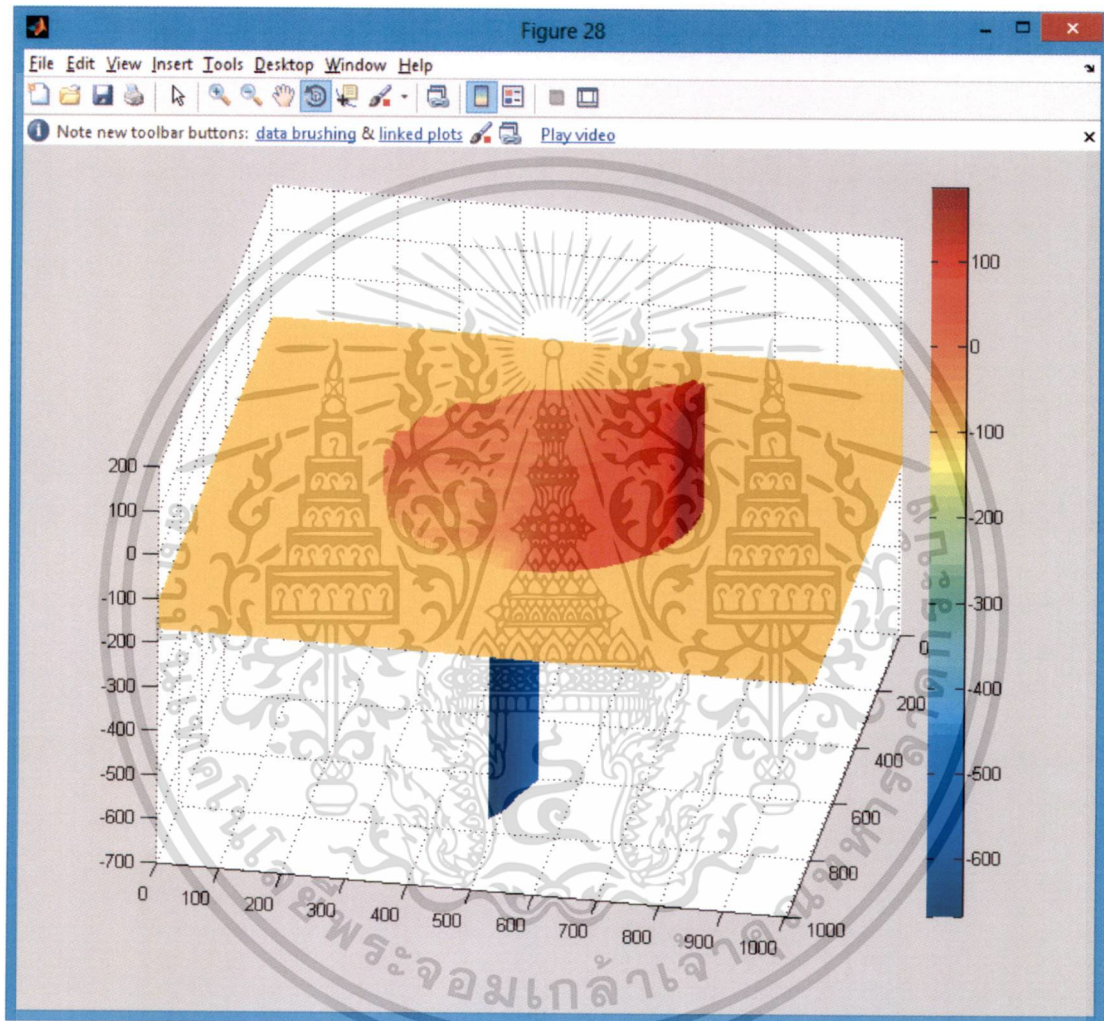
ผลที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1

จากการทดลองใช้ผิวกระจกทดสอบ (mirror 1) เป็นกระจกเลเซอร์ที่มีความเรียบไม่เกิน $\lambda/4$ หลังจากวิเคราะห์และสร้างภาพพื้นผิวจากรีการแทรกสอดที่บันทึกได้จำนวน 5 รูป เป็นดังในรูปที่ 4.1.1 และรูปที่ 4.1.2 สำหรับค่า peak to valley ของกระจกที่แนวแกน y ของกระจก ตำแหน่งพิกเซลที่ 550 ที่วิเคราะห์ได้จากการคำนวณในงานวิจัยนี้ได้เท่ากับ 200 nm ดังในรูปที่ 4.1.3 สำหรับค่า peak to valley ของกระจกที่แนวแกน x ของกระจก ตำแหน่งพิกเซลที่ 520 ที่วิเคราะห์ได้จากการคำนวณในงานวิจัยนี้ได้เท่ากับ 27 nm ดังในรูปที่ 4.1.4



รูปที่ 4.1.1: แสดงภาพพื้นผิว 2 มิติของผิวทดสอบที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/4$ ที่วิเคราะห์จากวิธี Five position phase-shifting technique

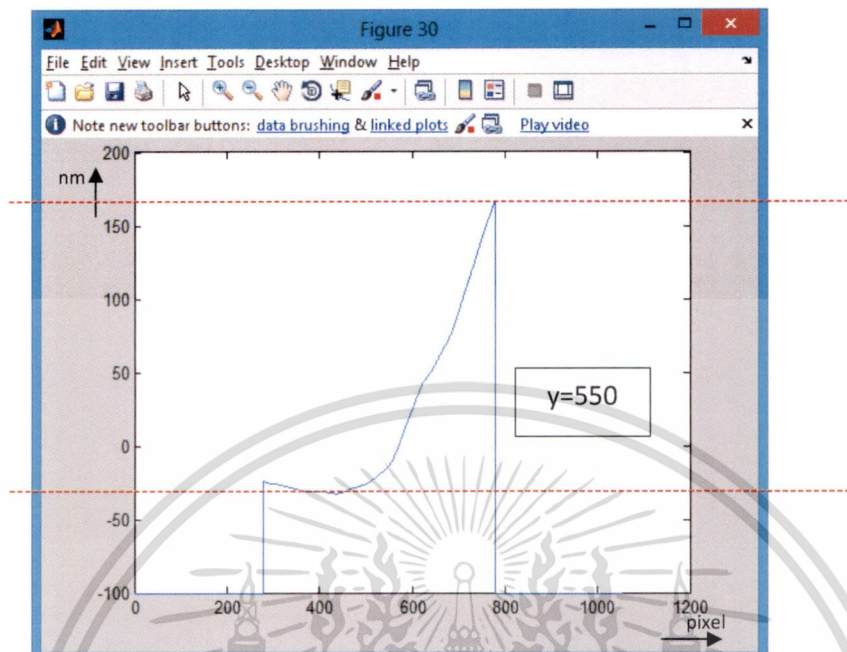
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



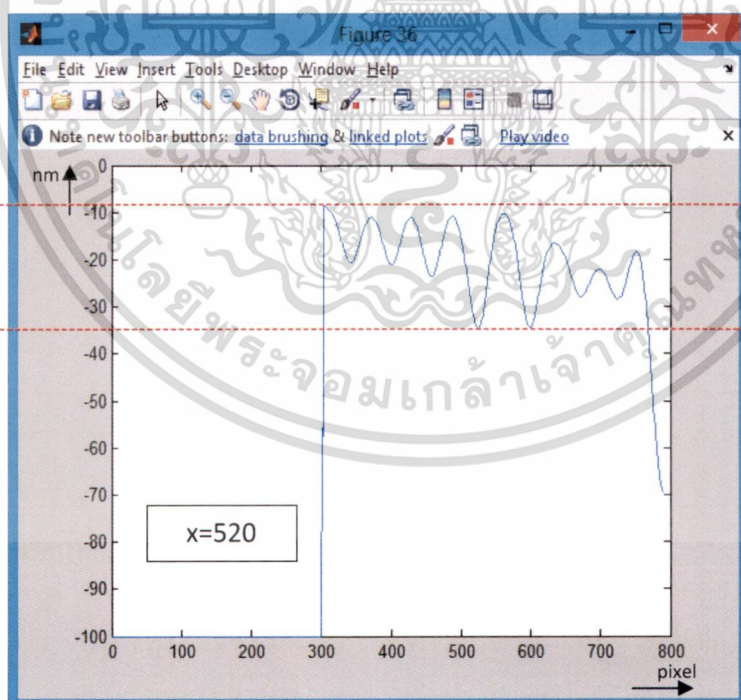
รูปที่ 4.1.2: แสดงภาพพื้นผิว 3 มิติของผิวทดสอบที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/4$

ที่วิเคราะห์จากวิธี Five position phase-shifting technique

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



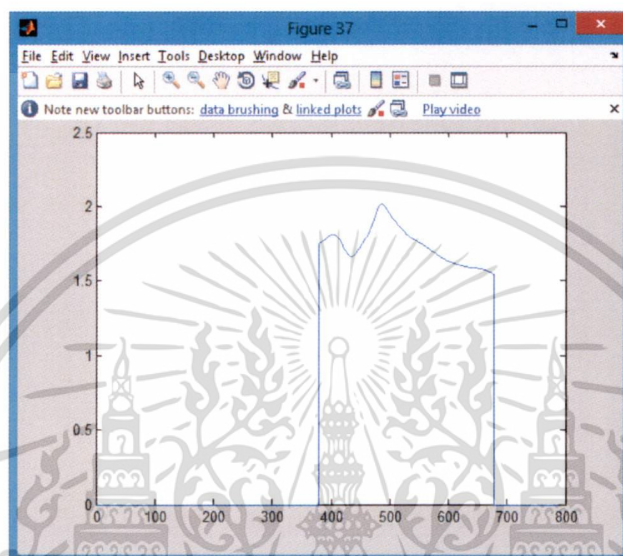
รูปที่ 4.1.3: ค่า peak to valley ที่แนวแกน y ของกระจกตำแหน่งพิกเซลที่ 550 ที่วิเคราะห์ได้จากการคำนวณในงานวิจัยนี้เท่ากับ 200 nm



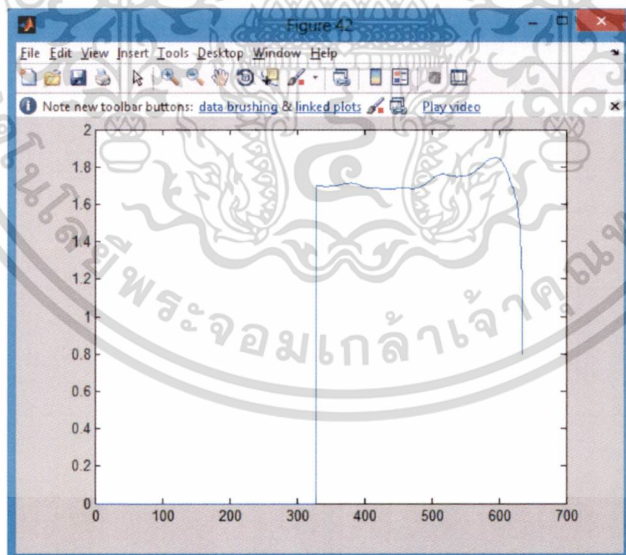
รูปที่ 4.1.4: ค่า peak to valley ที่แนวแกน x ของกระจกตำแหน่งพิกเซลที่ 520 ที่วิเคราะห์ได้จากการคำนวณในงานวิจัยนี้เท่ากับ 27 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการคำนวณ phase shift ที่ $\alpha = \pi/2$ หรือ 1.5708 rad พบว่าค่า phase shift ที่คำนวณได้ในบริเวณต่างๆตลอดพื้นผิวทดสอบที่ 1 มีค่า α อยู่ระหว่าง 1.2862 - 1.6469 rad ดังแสดงในรูปที่ 4.2.1-รูปที่ 4.2.4 ดังนี้

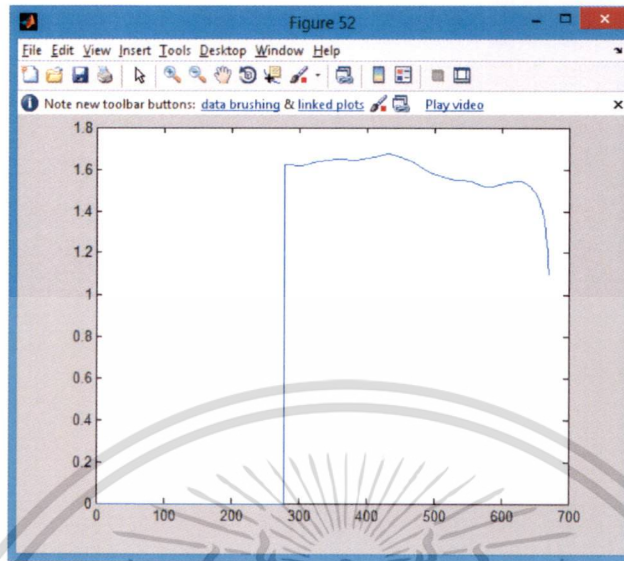


รูปที่ 4.2.1 Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 350 ค่าพหุนค่า $\alpha = 1.2862$ rad

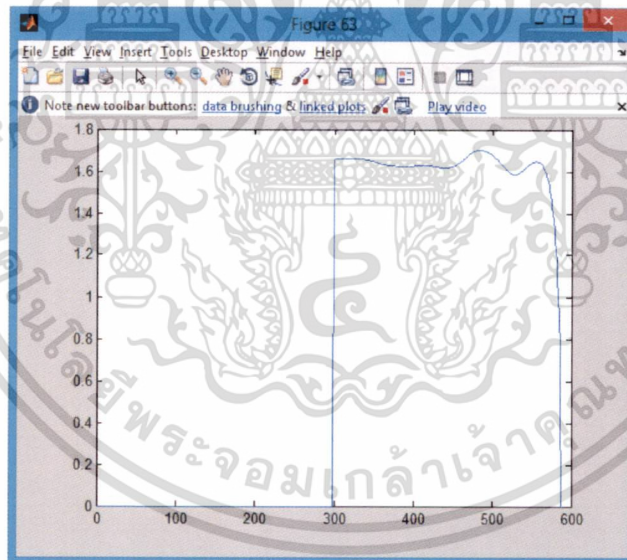


รูปที่ 4.2.2 Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 400 ค่าพหุนค่า $\alpha = 1.5355$ rad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2.3 Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 560 คำนวณค่า $\alpha = 1.6250$ rad



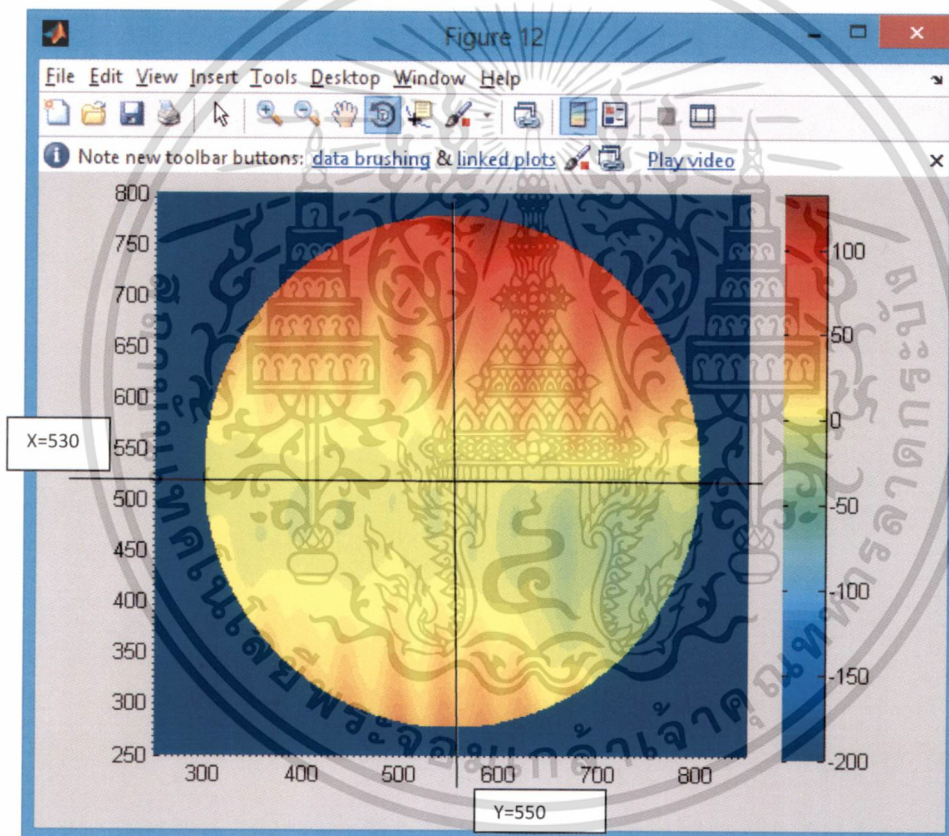
รูปที่ 4.2.4 Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 650 คำนวณค่า $\alpha = 1.6469$ rad

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ phase shift เท่ากับ 1.5865 เมื่อกำหนดให้ ϵ คือ phase shift error และ α คือ phase shift ปริมาณทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังนี้ $\alpha = \pi/2 + \epsilon$ ดังนั้น phase shift error สำหรับการทดลองชุดที่ 1; $\epsilon = 0.0474$ rad หรือ 2.72 องศา ทำให้ทราบได้ว่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดของผลต่างเฟสที่วัดได้ในการทดลองที่ 1 นี้เท่ากับ 0.003 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 2

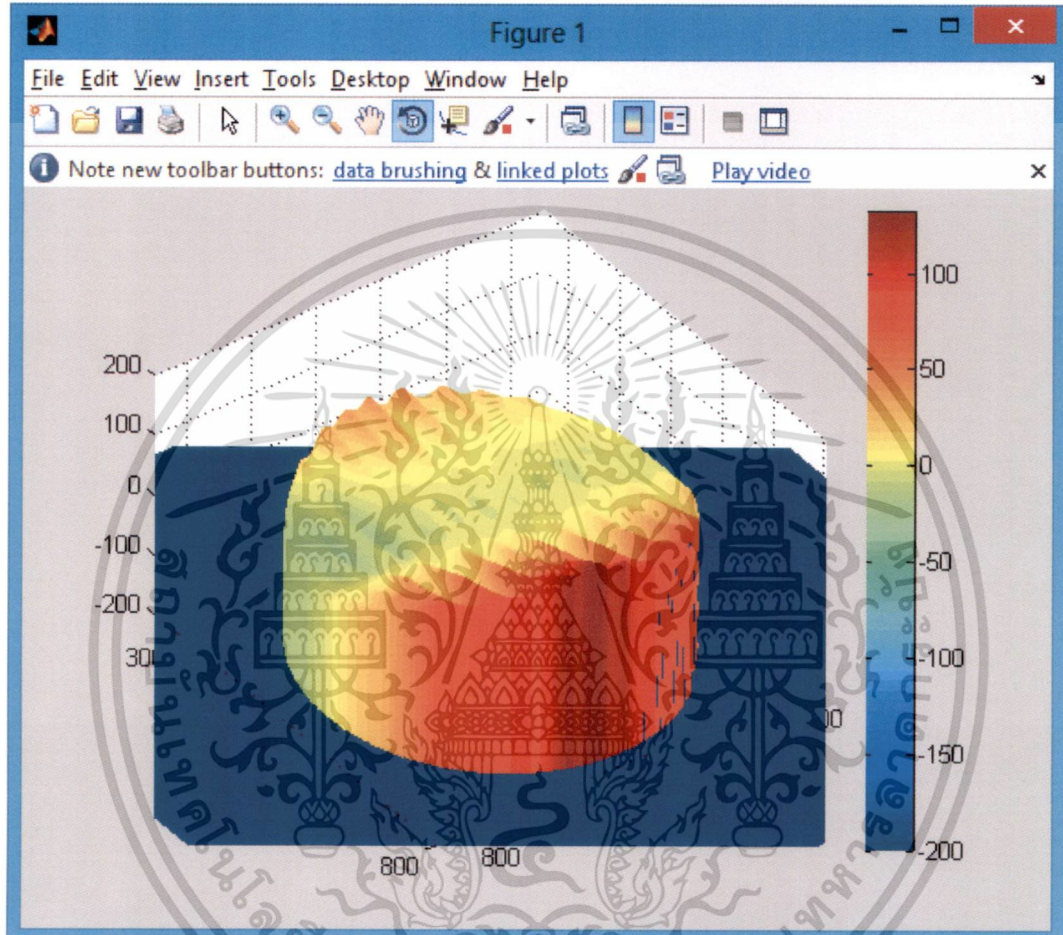
จากการทดลองใช้ผิวกระจกทดสอบ (mirror 1) เป็นกระจกเลเซอร์ที่มีความเรียบไม่เกิน $\lambda/10$ หลังจากวิเคราะห์และสร้างภาพพื้นผิวจากรี้วการแทรกสอดที่บันทึกได้จำนวน 5 รูป เป็นดังในรูปที่ 4.3.1 และรูปที่ 4.3.2 สำหรับค่า peak to valley ของกระจกที่แนวแกน y ของกระจก ตำแหน่งพิกเซลที่ 550 ที่วิเคราะห์ได้จากการคำนวณในงานวิจัยนี้ได้เท่ากับ 120 nm ดังในรูปที่ 4.3.3 สำหรับค่า peak to valley ของกระจกที่แนวแกน x ของกระจก ตำแหน่งพิกเซลที่ 530 ที่วิเคราะห์ได้จากการคำนวณในงานวิจัยนี้ได้เท่ากับ 15 nm ดังในรูปที่ 4.3.4



รูปที่ 4.3.1: แสดงภาพพื้นผิว 2 มิติของผิวทดสอบที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/10$

ที่วิเคราะห์จากวิธี Five position phase-shifting technique

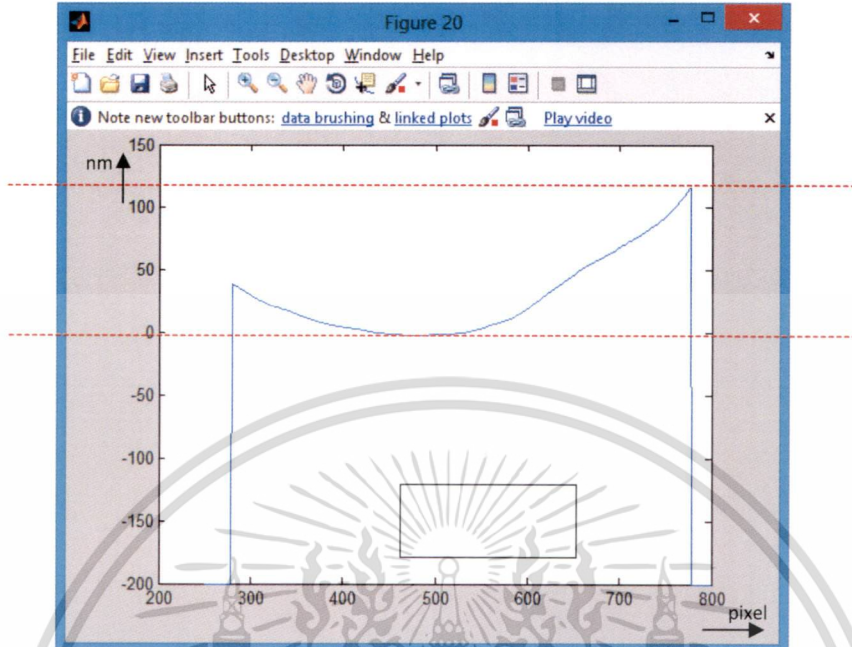
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



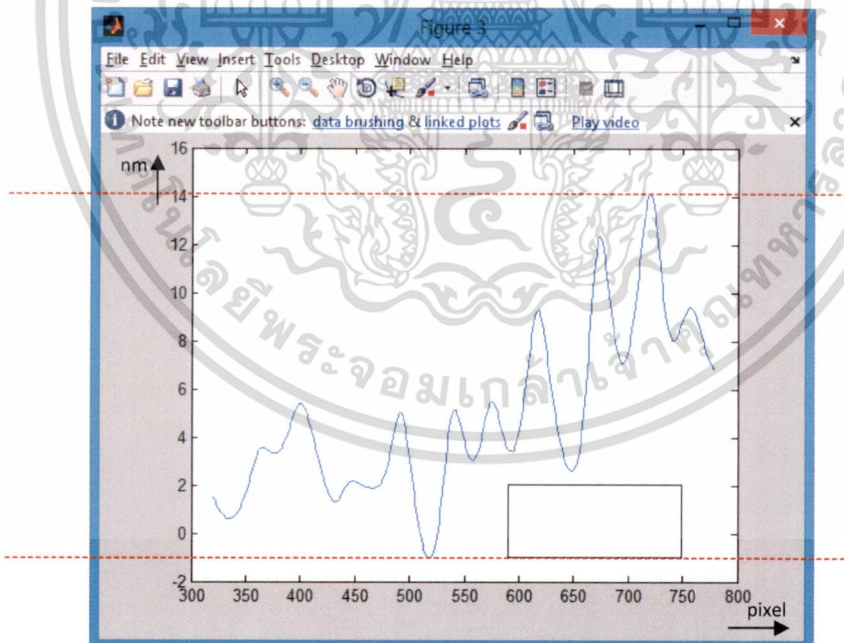
รูปที่ 4.3.2: แสดงภาพพื้นผิว 3 มิติของผิวทดสอบที่มีความเรียบเท่ากับ $\lambda/10$

ที่วิเคราะห์จากวิธี Five position phase-shifting technique

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



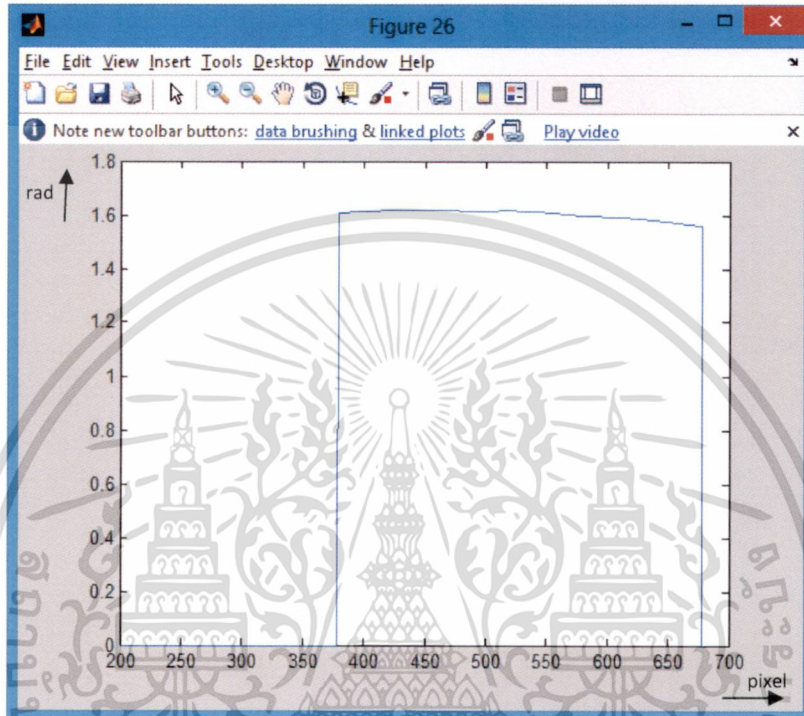
รูปที่ 4.3.3: ค่า peak to valley ของกระจกที่แนวแกน y ของกระจกตำแหน่งพิทเชลที่ 550 ที่วิเคราะห์ได้จากการคำนวณในงานวิจัยนี้ได้เท่ากับ 120 nm



รูปที่ 4.3.4: ค่า peak to valley ของกระจกที่แนวแกน x ของกระจก ตำแหน่งพิทเชลที่ 530 ที่วิเคราะห์ได้จากการคำนวณในงานวิจัยนี้ได้เท่ากับ 15 nm

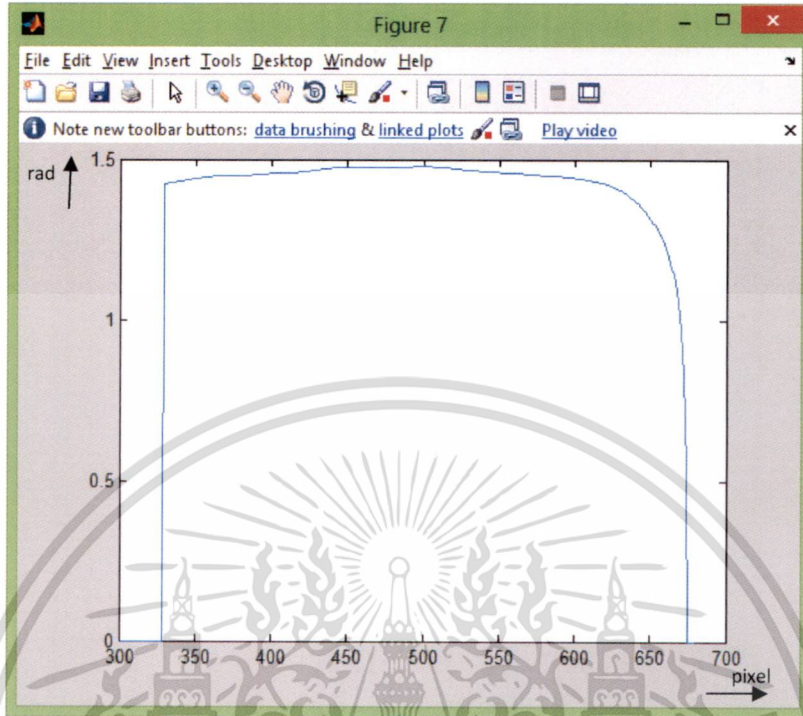
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการคำนวณ phase shift ที่ $\alpha = \pi/2$ หรือ 1.5708 rad พบว่าค่า phase shift ที่คำนวณได้ในบริเวณต่างๆตลอดพื้นผิวทดสอบที่ 1 มีค่า α อยู่ระหว่าง 1.3953- 1.6262 rad ดังแสดงในรูปที่ 4.4.1- รูปที่ 4.4.4 ดังนี้

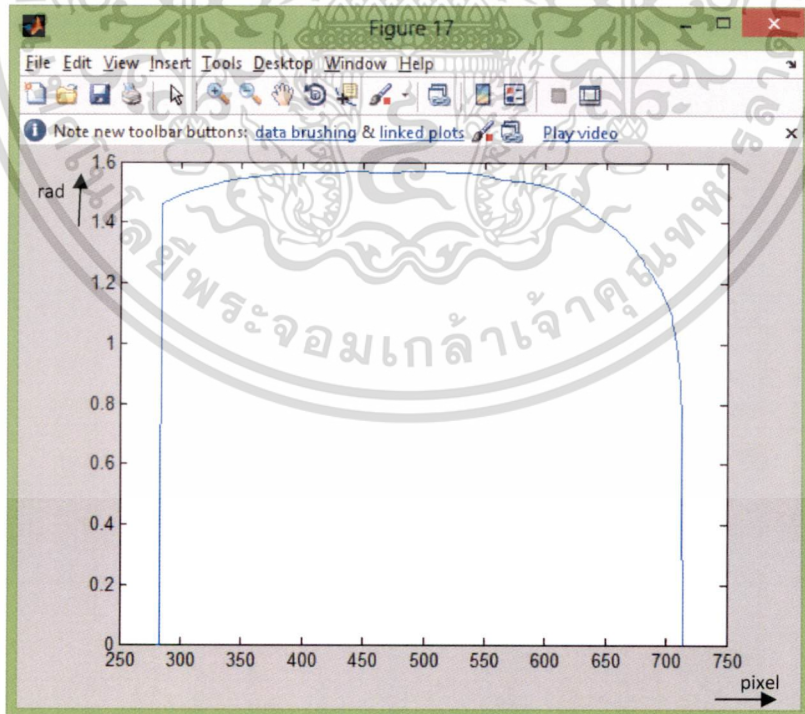


รูปที่ 4.4.1: Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 350 ค่าอนุภาค $\alpha = 1.6262$ rad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

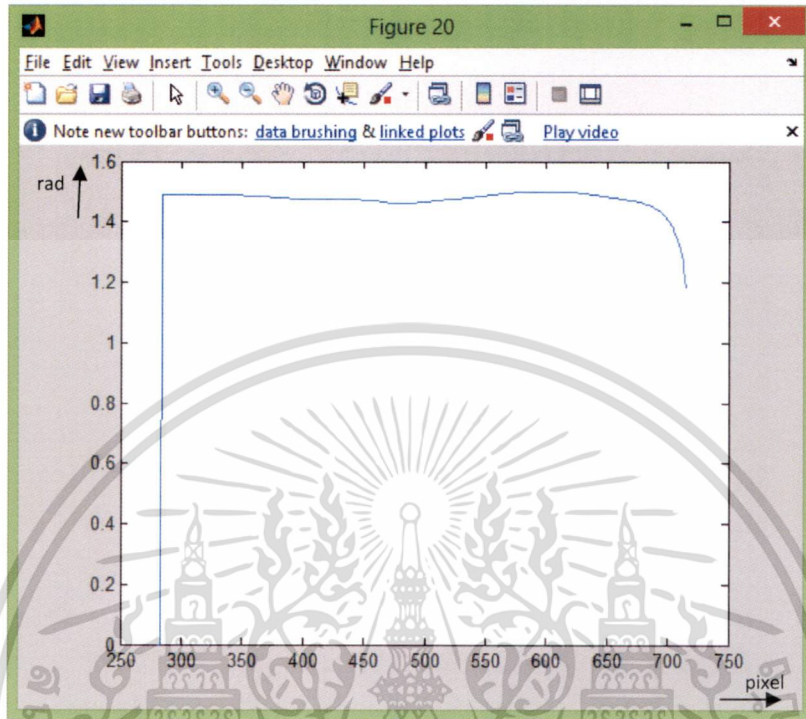


รูปที่ 4.4.2: Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 400 คำนวณค่า $\alpha = 1.4806$ rad



รูปที่ 4.4.3: Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 500 คำนวณค่า $\alpha = 1.5769$ rad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4.4: Phase shift ที่แนวแกนตั้ง ตำแหน่ง pixel: 600 ค่าพหุนค่า $\alpha = 1.4824$ rad

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ phase shift เท่ากับ 1.4691 เมื่อกำหนดให้ ϵ คือ phase shift error และ α คือ phase shift ปริมาณทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังนี้ $\alpha = \pi/2 + \epsilon$ ดังนั้น phase shift error สำหรับการทดลองชุดที่ 1; $\epsilon = 0.1017$ rad หรือ 5.83 องศา ทำให้ทราบได้ว่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดของผลต่างเฟสที่วัดได้ในการทดลองที่ 1 นี้เท่ากับ 0.2 องศา

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์พบว่าผิวกระจกเลเซอร์ที่มีความเรียบไม่เกิน $\lambda/4$ และผิวกระจกเลเซอร์ที่มีความเรียบไม่เกิน $\lambda/10$ ให้ค่า Peak to Valley ตามแนวแกน y ของกระจกเท่ากับ 200 nm และ 120 nm ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง เนื่องมาจากกรรมวิธีในการเคลือบสารสะท้อนแสงบนกระจกทดสอบทั้งสอง ซึ่งทำให้สารสะท้อนที่เคลือบบริเวณขอบกระจกมีความหนาแน่นมากกว่าบริเวณส่วนกลางกระจก จึงทำให้ค่า Peak to Valley ที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูง

หลังจากการนำผิวกระจกทดสอบไปวัดด้วยเครื่อง Frequency Step Interferometer พบว่า Peak to Valley ของผิวกระจกเลเซอร์ที่มีความเรียบไม่เกิน $\lambda/4$ มีค่าเท่ากับ 22 nm และ Peak to Valley ของผิวกระจกเลเซอร์ที่มีความเรียบไม่เกิน $\lambda/10$ มีค่าเท่ากับ 14 nm ซึ่งต่างจากค่า peak to valley ตามแนวแกน x ของกระจกทดสอบที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น สำหรับค่า phase shift error ของการทดลองทั้งสองชุดที่คำนวณได้ มีค่าน้อยมาก โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของการเลื่อนเฟสเท่ากับ 2.72 องศา และ 5.83 องศา ตามลำดับ ทำให้ทราบได้ว่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดของผลต่างเฟสที่วัดได้ของการทดลองทั้งสองชุด มีค่าไม่เกิน 0.003 องศา และ 0.2 องศา ตามลำดับ

ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลการวิจัยได้ว่า วิธีการวิเคราะห์แบบเลื่อนเฟสเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถวิเคราะห์ความเรียบของพื้นผิวได้อย่างถูกต้อง และมีค่าความคลาดเคลื่อนของเฟสที่วิเคราะห์ได้น้อยมาก ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเลื่อนเฟสกันเป็นจำนวนมาก เนื่องจากวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องทราบตำแหน่งของรีวกกลาง และเป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีความง่าย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bruning J. H. , Herriott D R, Gallagher J E, Rosenfeld D P, White A D & Brangaccio D J , Digital wavefront measuring interferometers for testing optical surfaces and lenses, *Appl. Opt.* **13** (1974) 2693-2703
- [2] Wyant J. C. , Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction systems, *Appl. Opt.* **14** (1975) 2622-2626
- [4] Schwider J, Burow R, Elssner K E, Grzanna R, Spolaczyk R & Merkel K, Digital wavefront measuring interferometry: some systematic error sources, *Appl. Opt.* **22** (1983) 3421-3432
- [5] Yeou-Yen Cheng and James C. Wyant, Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry, *Appl. Opt.* **24** (1985) 3049-3052
- [6] Cheng YY & Wyant J C, Two wavelength phase shifting interferometry, *Appl. Opt.* **23** (1984) 4539-4543
- [7] Optical Shop Testing Third Edition, Daniel Malacara, Copyright _ 2007 by John Wiley & Sons, Inc

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย)

นางสาว ธนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์

หน่วยงานที่สังกัด

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ที่อยู่

เลขที่ 3 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520

โทรศัพท์

02-329-8000 ต่อ 6212

โทรศัพท์มือถือ

089-131-5442

E-mail:

kltanapo@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อ ปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อ สถาบันการศึกษา
2540	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	สจล.กรุงเทพฯ
2548	ปริญญาโท	วท.ม.	วิทยาการ สารสนเทศ	สจล.กรุงเทพฯ

ประสบการณ์งานวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง “การหาผลเฉลยเชิงตัวเลขโดยใช้สมการ Gross-Pitaevskii equation สำหรับ Bose-Einstein condensation (BEC)”

ตำแหน่ง

หัวหน้าโครงการวิจัย

แหล่งทุนสนับสนุน

เงินรายได้ ประจำปี 2553

งบประมาณ 50,000 บาท

ผลงานตีพิมพ์

1. Thanaporn, Leelawattananon and Suphamit Chittayasothorn , **A Student-oriented Physics E-tutorial System**, Proceedings of the 9th WSEAS International on COMPUTERS 2005, July 11-16, 2005, Vouliagmeni, Athens, Greece. (ผู้วิจัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Thanaporn, Leelawattananon and Suphamit Chittayasothorn, **The ORM Model as a Knowledge Representation for E-tutorial Systems**, Proceedings of the 6th International Conference on Enterprise Information Systems 2004, vol.2, 2004, pp. 479-484, Feb.12-16, 2004, Porto, Portugal. (ผู้วิจัย)

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย)

นาย วรารุณี เถาถัดดา

หน่วยงานที่สังกัด

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ที่อยู่

เลขที่ 3 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520

โทรศัพท์

02-329-8000 ต่อ 6197

โทรศัพท์มือถือ

081-927-9570

E-mail

ktwarawo@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปี	ระดับ	วุฒิ	สถาบัน	ประเทศ
2522	ปริญญาตรี	วท.บ (ฟิสิกส์) เกียรตินิยม	รามคำแหง	ไทย
2525	ปริญญาโท	วท.ม (ฟิสิกส์การแพทย์)	มหิดล	ไทย
2535	ปริญญาเอก	Dr.rer.nat (Surface Analysis)	Free University of Berlin	เยอรมัน

ประสบการณ์งานวิจัย

- 1 การพัฒนาเทคนิคโฟกัสลำไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลับแซนวิช” Phase 1A

ตำแหน่ง

ผู้ร่วมวิจัย

แหล่งทุนสนับสนุน

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ.

2541-2544 งบประมาณ 5,104,960.00 บาท

- 2 การพัฒนาเทคนิคโฟกัสลำไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลับแซนวิช” Phase 1B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
 แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ.
 2541-2546 งบประมาณ 2,701,496.00 บาท

3 การพัฒนาเทคนิคโฟกัสลำไอออนเพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัสเตอร์แซนวิช” Phase 2

ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
 แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ.
 2546-2548 งบประมาณ 3,815,350.00 บาท

4 การพัฒนาอุปกรณ์ชุด Secondary Ion Mass Spectroscopy และการใช้งาน

ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
 แหล่งทุนสนับสนุน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ปี
 พ.ศ. 2546-2548 งบประมาณ 4,069,109.00 บาท

5 การพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนแบบรวมลำไอออนและระบบโฟกัสเพื่อการประยุกต์ใช้
 ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัสเตอร์แซนวิช”

ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
 แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ.
 2548-2550 งบประมาณ 9,986,000.00 บาท

ผลงานตีพิมพ์

1. Pattareeya Kittidachachan, Warawoot Thowladda, Use of Organic Dyes to Modify Solar Spectrum, 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim, 139-143, 2009
2. S.T. Khlayboonme and W. Thowladda, Effect of Abrasion Methods on Nucleation Density for Growing of Diamond Thin Films by Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, SIAM PHYSICS CONGRESS 2009.
3. S. Saejia, A. Thedsakhulwong and W. Thowladda, Finite Element Modeling of Magnetic Field Profile for Magnetron Sputtering Cathode, SIAM PHYSICS CONGRESS 2009.

4. A.Thedsakhulwong and W. Thowladda, Removal of Carbon Contamination on Silicon Wafer Surfaces by Microwave Oxygen Plasma, J. Met. Mater. Miner. Vol.18(2) (Special issue MSAT 5) 2008
5. S.T. Khlayboonme and W. Thowladda, Determination of Silicon Isotope Abundance on Boron Dope P-Type Silicon Wafer Surface Using Static SIMS, THAI JOURNAL OF PHYSICS, SERIES 4, 134-137 (2009).
6. S. Tochoer and W. Thowladda, Optical Flat Calibration Using Laser Interferometer Method, 30th conference of Electrical Engineering, KMITT, 1225-1228, 2007.
7. M. Pakkratok and W. Thowladda, Laser Doppler Interferometer for Small Angle Measurement, 26th conference of Electrical Engineering, KMITN, 859-864, 2003.
8. P. Kuanpraekaw and W. Thowladda, Interferogram Evaluation using Zernike Polynomial, 24th conference of Electrical Engineering, KMITL, 637-642, 2001.
9. S. Pulthep and W. Thowladda, Light Spectrum Measurement Using Photodiode Array, 24th conference of Electrical Engineering, KMITL, 671-675, 2001.
10. H.B. Nielsen and W. Thowladda, Position and line width of the K-induced 4s resonance on Ag (100) : a two-photon photoemission study, Surf.Sci.Lett.,284, L426-L429, 1993.