

การพัฒนาระบบวัดโครงสร้างพื้นผิวด้วย Mirau Interferometry  
Objective Lens และโปรแกรมประมวลผลภาพ

DEVELOPMENT OF SURFACE PROFILE MEASUREMENT  
SYSTEM USING MIRAU INTERFEROMETRY OBJECTIVE  
LENS AND IMAGE PROCESSING SOFTWARE

รณกร สิงห์โตทอง

ศรุตดา การธนะภักดี

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

DEVELOPMENT OF SURFACE PROFILE MEASUREMENT  
SYSTEM USING MIRAU INTERFEROMETRY OBJECTIVE  
LENS AND IMAGE PROCESSING SOFTWARE

RONNAKORN SHINGTOTONG

SARUTA KANTANAPUKDEE




A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2018

**หัวข้อโครงการพิเศษ**    การพัฒนาระบบวัดโครงร่างพื้นผิวด้วย Mirau Interferometry Objective Lens และโปรแกรมประมวลผลภาพ  
 Development of Surface Profile Measurement System using Mirau Interferometry Objective Lens and Image Processing Software

**ชื่อนักศึกษา**            นายธรมกร สิงห์โตทอง      รหัสนักศึกษา 58051127  
                                   นางสาวศรุตดา การธนะภักดี    รหัสนักศึกษา 58051145

**ปริญญา**                    วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
**ภาควิชา**                    ฟิสิกส์  
**ปีการศึกษา**                2561  
**อาจารย์ที่ปรึกษา**        รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา  
**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม**   ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ภาณุพล โขลอนกระโทก ประธานกรรมการ	
ดร.เมตยา กิติวรรณ กรรมการ	
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<b>หัวข้อโครงการพิเศษ</b>	การพัฒนาระบบวัดโครงสร้างพื้นผิวด้วย Mirau Interferometry Objective Lens และโปรแกรมประมวลผลภาพ
<b>ชื่อนักศึกษา</b>	นายธกร สิงห์โตทอง รหัสนักศึกษา 58051127 นางสาวศรุตดา การชนะภักดี รหัสนักศึกษา 58051145
<b>ปริญญา</b>	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
<b>ภาควิชา</b>	ฟิสิกส์
<b>คณะ</b>	วิทยาศาสตร์
<b>มหาวิทยาลัย</b>	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
<b>การศึกษา</b>	2561
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	รศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา
<b>อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม</b>	ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างสามมิติของพื้นผิววัสดุโดยใช้เทคนิคการแทรกสอดของแสงแบบกวาดแนวตั้งด้วยเลนส์วัตถุชนิดมิเรอ โครงการพิเศษนี้ใช้ไดโอดเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่น 455 nm เป็นแหล่งกำเนิดแสง อุปกรณ์แยกลำแสงแบบลูกบาศก์จะนำลำแสงเข้าสู่เลนส์วัตถุชนิดมิเรอ ภายในเลนส์วัตถุชนิดมิเรอแสงส่วนหนึ่งจะถูกแยกไปตกกระทบบนแผ่นเรียบอ้างอิง อีกส่วนหนึ่งจะตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุที่ต้องการตรวจสอบด้วยแผ่นแยกลำแสง แสงทั้งสองส่วนนี้จะสะท้อนกลับมารวมกันและเกิดการแทรกสอดกัน รั้วแทรกสอดนี้จะเดินทางผ่านอุปกรณ์แยกลำแสงอีกครั้งหนึ่งและถูกบันทึกด้วยกล้องซีซีดีความละเอียด 5 ล้านพิกเซล วัตถุที่ต้องการตรวจสอบจะวางอยู่บนแท่นที่เคลื่อนขึ้น-ลงได้โดยการขับเคลื่อนวัสดุเพียโซอิเล็กทริก มีระยะขับเคลื่อนในระดับนาโนเมตร เนื่องจากแสงจากไดโอดเปล่งแสงมีความยาวโคฮีเรนซ์สั้น ภาพรั้วแทรกสอดจะเปลี่ยนแปลงทุกครั้งที่แท่นวางวัตถุขยับขึ้นหรือลง ภาพรั้วแทรกสอดนี้ถูกบันทึกทุกครั้งที่แท่นวางขยับเป็นระยะที่ต้องการ ข้อมูลจากภาพรั้วแทรกสอดและระยะที่แท่นขยับไปของแต่ละภาพจะถูกนำมาประมวลผล การเคลื่อนที่ของแท่นและการบันทึกภาพจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW ที่พัฒนาขึ้น ส่วนการประมวลผลภาพและสร้างภาพโครงสร้างสามมิติของพื้นผิวจะดำเนินการโดยโปรแกรม Matlab ที่พัฒนาขึ้น

**คำสำคัญ :** การแทรกสอดของแสงแบบการกวาดในแนวตั้ง การตรวจสอบแบบไม่สัมผัส เลนส์วัตถุชนิดมิเรอ โครงสร้างสามมิติของพื้นผิว

<b>Title</b>	Development of Surface Profile Measurement System using Mirau Interferometry Objective Lens and Image Processing Software
<b>Students</b>	Mr. Ronnakorn Shingtotong Student ID 58051127 Miss. saruta kantanapukdee Student ID 58051145
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)
<b>Department</b>	Physics
<b>Faculty</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2018
<b>Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Warawoot Thowladda
<b>Co-Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. S.Tipawan Khlayboonme

### Abstracts

This special project is the study of the three-dimensional surface profile of the material, using light-interference technique with Mirau interferometry objective lens. A light emitting diode with a wavelength of 455 nm is used as a light source. Inside the objective lens, light is separated in two parts by a beam splitter plate, one part impinges on reference flat plate and another part impinges on the surface to be test. Both parts are reflected in reverse direction and interference occurs. This interference pattern is recorded by a 5-megapixel CCD camera. The object to be test is placed on a piezo-driven stage. The stage can be moved up-down in order of nanometer. Due to LED is the short coherence light source, the interference pattern changes every time that the piezo-driven stage changes its position up or down. This interference image is recorded every time that the stage is moved to the desired distance. The data from each interference image and the position of the moving stage are processed. The movement of the stage is controlled by the developed labVIEW program. The 3-dimension surface profile are performed by the developed Matlab program.

**Keywords** : Vertical Scanning Interferometry, Non-contact Inspection, Mirau Objective Lens, 3-dimension Surface Profile

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับการสนับสนุนและความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ และชี้แนะแนวทางและวิธีการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ และดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่คอยให้คำปรึกษาต่าง ๆ ที่สามารถทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างราบรื่น ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่คอยอบรมสั่งสอนพร้อมทั้งให้ความรู้ ความสามารถ ที่สามารถนำไปใช้ในอนาคตได้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนใน Surface Analysis and Plasma Applications Laboratory ที่คอยช่วยเหลือให้โครงการพิเศษเล่มนี้ผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัว ที่คอยให้ความสนับสนุนและส่งเสริมในการศึกษาตลอด 4 ปีที่ผ่านมา อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจและเป็นที่ปรึกษาที่ดีเสมอ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกคนที่ไม่ได้กล่าวถึงที่ทำให้พวกเราประสบความสำเร็จในโครงการพิเศษเล่มนี้ อีกทั้งยังมอบประสบการณ์และการใช้ชีวิตเพื่อนำไปใช้ต่อในอนาคตได้

ธกร สิงห์โตทอง

ศรดา การชนะภักดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูปภาพ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย.....	3
2.1.1 ความหมายของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย.....	3
2.1.2 วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย.....	3
2.1.3 ข้อได้เปรียบของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย.....	4
2.1.4 ข้อจำกัดของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย.....	5
2.2 ความหยาบของพื้นผิว.....	5
2.2.1 การวัดความหยาบผิวเฉลี่ย.....	5
2.2.2 การวัดความหยาบผิวโดยขนาด.....	7
2.3 การแทรกสอดของแสง (Interference).....	8
2.4 โคฮีเรนซ์ (Coherence).....	10
2.5 ไมเคิลสันอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์.....	11
2.5.1 หลักการพื้นฐานของไมเคิลสันอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์.....	11
2.5.2 แนวทางการเดินทางของแสงของไมเคิลสันอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์.....	11
2.6 Mirau Interferometry Objective Lens .....	13

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7 มิราอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์ (Mirau Interferometer).....	14
2.8 Vertical scanning interferometry (VSI).....	15
2.9 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect).....	16
2.10 สเตรนเกจ (strain gauge).....	17
2.11 การเฉลี่ยข้อมูล.....	18
2.12 ภาพกราฟิก.....	20
2.12.1 ภาพกราฟิกแบบราสเตอร์ (Raster).....	20
2.12.2 ภาพกราฟิกชนิดเวกเตอร์ (Vector).....	21
2.13 การหักเหของแสงผ่านเลนส์นูนและเลนส์เว้า.....	22
2.13.1 เลนส์นูน.....	23
2.13.2 เลนส์เว้า.....	23
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>25</b>
3.1 การจัดระบบแสง Mirau Interferometry Objective Lens ด้วย แหล่งกำเนิดแสง Blue LED.....	25
3.2 ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานที่ตรวจสอบ.....	26
3.2.1 เพียโซอิเล็กทริกและสเตรนเกจ.....	26
3.2.2 การเชื่อมต่อ Piezo Driver T-Cube (KPZ101) กับ Strain Gauge Reader T-Cube (TSG001).....	27
3.3 สร้างโปรแกรมบันทึกภาพ.....	28
3.4 การวิเคราะห์ภาพ.....	29
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....</b>	<b>32</b>
4.1 ผลจากการจัดระบบแสง Mirau Interferometry Objective Lens ด้วย แหล่งกำเนิดแสง Blue LED.....	32
4.2 การพัฒนาโปรแกรมบันทึกภาพ.....	33
4.3 การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ.....	35
4.4 ผลการทดลองจากการจัดระบบแสง Mirau Interferometry Objective Lens ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED กับกระจกที่มีระดับพื้นผิวด้านขวาสูง กว่าด้านซ้าย.....	36

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.1 การใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์ความเรียบพื้นผิวของตัวอย่าง (VSI Analyze Simulation).....	36
4.5 ผลการวิเคราะห์ภาพรีวิการแทรกสอด.....	37
4.5.1. ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 20 nm.....	38
4.5.2. ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 50 nm.....	39
4.5.3. ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 100 nm.....	40
4.5.4. ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซขยับไปเป็นระยะ 150 nm.....	41
4.6 ผลการทดลองตรวจสอบชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นวงกลม.....	42
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>44</b>
5.1 สรุปผล.....	44
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	45
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก.....	47
ภาคผนวก ก.....	47
ภาคผนวก ข.....	50
ภาคผนวก ค.....	75

## สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ความหยابพื้นผิวเฉลี่ยเลขคณิต.....	6
2.2 ลักษณะการวิเคราะห์ของความหยابพื้นผิวเฉลี่ย.....	6
2.3 ลักษณะการวิเคราะห์ของความหยابพื้นผิวเฉลี่ยกำลังสอง.....	6
2.4 ความหยابผิวเฉลี่ยปริมาณ.....	7
2.5 ความหยابผิวเฉลี่ยรูปร่าง.....	7
2.6 ความหยابผิวโดยรวม.....	7
2.7 ความหยابผิวขนาดหลุมลึกสุด.....	8
2.8 ความหยابผิวขนาดยอดสูงสุด.....	8
2.9 การแทรกสอดของแสง.....	9
2.10 (ก) การแทรกสอดแบบหักล้างและ (ข) การแทรกสอดแบบเสริมสร้าง.....	9
2.11 คุณสมบัติของคลื่นแบบ Coherence และ Incoherence.....	10
2.12 ไมเคิลสันอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์.....	11
2.13 พิจารณาแนวทางเดินแสง.....	12
2.14 รูปแบบของฟริ้งกอลม.....	13
2.15 (ก) mirau objective lens และ (ข) ไตอะแกรมภายใน.....	14
2.16 ไตอะแกรมระบบมิเรออินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์.....	14
2.17 ภาพจำลองการวางรี้วการแทรกสอดในแนวตั้งเพื่อวิเคราะห์ภาพ.....	15
2.18 Piezoelectric Effect.....	16
2.19 Inverse Piezoelectric Effect.....	16
2.20 ตัวอย่างสเตรนเกจ.....	18
2.21 Wheatstone bridge.....	18
2.22 ตัวอย่างการเฉลี่ยค่าแบบเคลื่อนที่.....	19
2.23 รูปแบบของเลนส์นูนและเลนส์เว้า.....	22
2.24 การรวมแสงของเลนส์นูน.....	23
2.25 การรวมแสงของเลนส์เว้า.....	23
3.1 ระบบ Mirau Interferometry Objective Lens.....	25
3.2 องค์ประกอบระบบแสง Mirau Interferometry Objective Lens.....	26

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 (ก) การเชื่อมต่อ Piezo Driver และ Strain Gauge Reader กับ computer และ (ข) การเชื่อมต่อระหว่าง Piezo Driver กับ Strain Gauge Reade.....	27
3.4 ตัวอย่างการประกอบเพียโซอิเล็กทริกและสเตรนเกจเข้ากับระบบการควบคุม.....	27
3.5 แผนผังการเชื่อมต่อ Piezo Driver กับ Strain Gauge Reader.....	28
3.6 แผนผังการทำงานโปรแกรมบันทึกภาพ.....	28
3.7 block diagram โปรแกรมที่ใช้ควบคุม Piezo Driver.....	29
3.8 interferogram ของภาพใน 1 พิกเซลที่บันทึกด้วยกล้อง CCD.....	29
3.9 แผนผังการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์รีจิสเตอร์การแทรกสอด.....	30
3.10 หน้าต่าง Matlab.....	30
3.11 หน้าต่างผู้ใช้งาน.....	31
4.1 การจัดอุปกรณ์ของระบบแสง Mirau Interferometry.....	32
4.2 ภาพรีจิสเตอร์การแทรกสอดเมื่อแหล่งกำเนิดแสงคือ Blue LED.....	33
4.3 Front Panel โปรแกรมที่ใช้ควบคุม Piezo Driver.....	33
4.4 เปรียบเทียบระหว่างภาพที่ยังไม่ได้เฉลี่ย (1) กับภาพที่มีการเฉลี่ยแล้ว (2).....	35
4.5 เปรียบเทียบระหว่างภาพตัดขวางที่ยังไม่ได้เฉลี่ย (1) กับภาพที่มีการเฉลี่ยแล้ว(2) .....	35
4.6 ภาพรีจิสเตอร์การแทรกสอดของผิวตัวอย่างทดสอบเป็นกระจกความเรียบสูงที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มโดยลักษณะพื้นผิวด้านขวาสูงกว่าพื้นผิวด้านซ้าย.....	36
4.7 การวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม Matlab แต่ละพิกเซลของภาพที่บันทึกได้ทั้งหมด.....	36
4.8 ภาพมุมมองสูงของภาพที่วิเคราะห์.....	37
4.9 ภาพ 3D ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่มีพื้นผิวความสูงต่างระดับกัน.....	37
4.10 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะระยะ 20 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 5%.....	38
4.11 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะระยะ 20 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 10%.....	38
4.12 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะระยะ 20 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 15%.....	38
4.13 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะระยะ 50 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 5%.....	39
4.14 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะระยะ 50 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 10%.....	39
4.15 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะระยะ 50 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 15%.....	39
4.16 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะระยะ 100 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 5%.....	40
4.17 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะระยะ 100 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 10%.....	40

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะ 100 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 15%.....	40
4.19 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะ 150 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 5%.....	41
4.20 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะ 150 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 10%.....	41
4.21 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะ 150 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 15%.....	41
4.22 ภาพชิ้นงานตัวอย่าง.....	42
4.23 ภาพมุมมอง 3D ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง.....	43
4.24 ภาพ 3D ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง.....	43

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางกิจกรรม.....	2
2.1 ตัวอย่างการเฉลี่ยค่าแบบเคลื่อนที่ 3 จำนวน.....	18
2.2 ตารางข้อมูลประเภทไฟล์ภาพกราฟิกแบบบราสเตอร์.....	19
2.3 ตารางข้อมูลประเภทไฟล์ภาพกราฟิกชนิดเวกเตอร์.....	20
2.4 การแทนเครื่องหมายของการคำนวณหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูนและเลนส์เว้า.....	23
4.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพรีการแทรกสอดเมื่อเพียวโซซัยบ.....	41

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ลักษณะสภาพโครงสร้างพื้นผิววัสดุ เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีบนพื้นผิววัสดุ รวมทั้งอุปกรณ์ หรือชิ้นงานต่าง ๆ ที่เป็นผลผลิตของการใช้พื้นผิววัสดุ เช่น สมบัติทางด้านไฟฟ้า ทางแสง ทางความร้อน ทางโทรโพลยี (Tribology) การยึดเกาะ การเคลือบผิว เป็นต้น เนื่องจากพื้นผิววัสดุเป็นส่วนที่มีการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมตลอดเวลา ลักษณะพื้นผิววัสดุจึงมีผลต่อประสิทธิภาพและสมบัติของพื้นผิวและผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ทำจากวัสดุ จึงมีความสำคัญต่อทั้งในวงการอุตสาหกรรมและวงการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เทคโนโลยีนาโน (Nanotechnology) ปัจจุบันการตรวจสอบพื้นผิวโดยใช้หลักการการแทรกสอดทางแสง (Interferometric optical testing) กำลังเป็นที่ได้รับความสนใจ ทั้งในงานวิจัยทางด้านการพัฒนาเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์ รวมทั้งอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ สารกึ่งตัวนำ กระจก และ เลนส์ ระบบการวัด หรือเครื่องมือวัดลักษณะ หรือโครงสร้างของพื้นผิววัสดุจึงมีความจำเป็น ซึ่งอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ (Interferometer) จัดได้ว่าเป็นเครื่องมือที่ความเหมาะสมต่อกลุ่มงานเหล่านี้ โดยผลการวัดโครงสร้างของพื้นผิวด้วยอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ความเข้มแสงจากลวดลายริ้วการแทรกสอด (Interference fringes pattern) รวมทั้งเพื่อความสะดวกและง่ายต่อการจัดระบบการวัดทางแสงจากเดิมซึ่งใช้ Michelson interferometer ในโครงการพิเศษนี้จึงได้นำ Mirau interferometry objective lens มาประยุกต์กับการวัดโครงสร้างพื้นผิวนี้นี้ด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อทำการจัดเตรียมระบบการวัดโครงสร้างพื้นผิว
2. เพื่อทำการพัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพริ้วการแทรกสอดที่สามารถใช้งานได้กับระบบการวัดโครงสร้างพื้นผิว

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาความเป็นมาของหลักการแทรกสอดของแสง
2. ติดตั้งระบบการจัดแสงแบบ Mirau Interferometry objective
3. จัดเก็บภาพริ้วการแทรกสอดของแสงจากชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละตำแหน่ง

4. ศึกษาการเขียนโปรแกรมวิเคราะห์ภาพที่ได้จากการทดลอง
5. เขียนโปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ความเรียบของวัตถุ
6. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลอง

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางกิจกรรม

กิจกรรม	ระยะเวลา							
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	ม.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ศึกษาหลักการตรวจสอบพื้นผิว								
ศึกษาหลักการ Michelson Interferometry และ Mirau Interferometry								
ปรับปรุงระบบแสงโดยใช้ Mirau Interferometry objective และทดลองตามทฤษฎี								
ออกแบบโปรแกรมและเก็บข้อมูล								
สรุปผลการทดลอง								

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องการแทรกสอดของแสงและโปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ความเรียบของวัตถุ
2. สร้างชุดการตรวจสอบพื้นผิวของวัตถุโดยระบบการจัดแสงแบบ Mirau Interferometry objective
3. สามารถจำลองโครงสร้างพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการตรวจสอบ
4. ระบบของเครื่องมือวัดมีความง่ายต่อการใช้งานมากขึ้น

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

#### 2.1.1 ความหมายของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย หมายถึงกรรมวิธีที่ใช้ค้นหารอยบกพร่อง หรือความผิดปกติที่มีอยู่ในชิ้นงาน ทั้งที่เป็นอันตรายต่อการใช้งาน หรือไม่เป็นอันตรายต่อการใช้งาน โดยที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับชิ้นงานนั้น ซึ่งต่อไปนี้รอยบกพร่อง หรือความผิดปกติใด ๆ ที่กล่าวถึงนี้จะเรียกโดยรวมว่า ความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity) จากความหมายของการตรวจสอบโดยไม่ทำลายนี้ สามารถแบ่งย่อยได้เป็นการตรวจสอบแบบสัมผัสชิ้นงานและการตรวจสอบแบบไม่สัมผัสชิ้นงาน

##### 2.1.1.1 การตรวจสอบแบบสัมผัสชิ้นงาน

การตรวจสอบแบบสัมผัสชิ้นงาน หมายถึงกระบวนการตรวจสอบชิ้นงานโดยชิ้นงานจะถูกสัมผัสจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบ เนื่องจากหลักการของการตรวจสอบจำเป็นต้องมีบางส่วนของอุปกรณ์สัมผัสกับชิ้นงานมีฉะนั้นจะไม่สามารถตรวจสอบชิ้นงานได้เช่น การตรวจสอบด้วยคลื่นเสียงที่ต้องใช้หัวทดสอบ (Probe) สัมผัสกับพื้นผิวชิ้นงาน หรือการตรวจสอบโดยใช้สารแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing) ที่มีการฉีดหรือพ่นสารละลายลงไปบนพื้นผิวของชิ้นงาน เป็นต้น

##### 2.1.1.2 การตรวจสอบแบบไม่สัมผัสชิ้นงาน

การตรวจสอบแบบไม่สัมผัสชิ้นงาน หมายถึงกระบวนการตรวจสอบชิ้นงานโดยชิ้นงานไม่ถูกสัมผัสจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบหากชิ้นงานมีความไม่ต่อเนื่องที่สามารถพิจารณาได้ง่ายการตรวจสอบที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ การตรวจสอบโดยใช้สายตา (Visual Inspection) เป็นการตรวจสอบโดยไม่ทำลายที่สะดวก รวดเร็ว และประหยัดที่สุด ดังนั้นหากสามารถตัดสินผลของการตรวจสอบโดยใช้การตรวจสอบโดยใช้สายตาได้แล้ว ก็ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้การตรวจสอบโดยวิธีอื่นอีกแต่อย่างไรก็ตามความไม่ต่อเนื่องอาจเกิดในตำแหน่งหรือขนาดที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าจึงได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายวิธีต่างๆขึ้นมาเพื่อช่วยให้สามารถตรวจสอบความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวนี้ได้เช่น การตรวจสอบโดยวิธีถ่ายภาพรังสี (Radiographic Testing) การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน (Eddy Current Testing) และการตรวจสอบด้วยหลักการทางแสง (Interferometer) เป็นต้น ซึ่งโครงการพิเศษนี้ใช้หลักการตรวจสอบแบบไม่สัมผัสชิ้นงานโดยใช้หลักการทางแสง

#### 2.1.2 วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

##### 2.1.2.1 เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นของผลิตภัณฑ์

อุปกรณ์และโครงสร้างต่าง ๆ นั้น จะต้องมีความปลอดภัยในขณะที่ใช้งาน ถ้าไม่มีรอยบกพร่องอยู่เลยก็จะมี ความแข็งแรงทางกลเท่าเทียมกับวัสดุที่ไม่มีรอยบกพร่อง ซึ่งตามความเป็น

จริงแล้วการที่จะให้มีวัสดุที่ไม่มีรอยบกพร่องเลยย่อมเป็นไปได้ ทำนองเดียวกันวิธีการผลิตที่จะไม่ก่อให้เกิดรอยบกพร่องเลยก็เป็นไปไม่ได้ ดังนั้นที่ตัวชิ้นส่วน หรือบริเวณรอยเชื่อมนั้นมีรอยบกพร่องอยู่เท่าใดจะประเมินได้โดย การตรวจสอบอุปกรณ์ หรือโครงสร้างจริงที่จะใช้งาน แล้วตัดสินใจว่ารอยบกพร่องที่มีนั้นมีความปลอดภัยเพียงพอสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการใช้งานหรือไม่ ข้อมูลที่จะใช้ในการตัดสินใจดังกล่าวจะได้จากการทดสอบโดยไม่ทำลายนั่นเอง โดยการใช้วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายอย่างเหมาะสม จะสามารถตรวจสอบให้แน่ใจ ถึงความปลอดภัยและเพิ่มความเชื่อมั่นขึ้นได้ ซึ่งก็เป็นวัตถุประสงค์ที่สำคัญประการหนึ่ง ของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

#### 2.1.2.2 เพื่อการปรับปรุงเทคนิคการผลิต

ตัวอย่างเพื่อการปรับปรุงเทคนิคการผลิตเช่น เพื่อกำหนดวิธีการเชื่อมที่เหมาะสม จะทำการวางแผนการเชื่อมต่าง ๆ แล้ว สร้างแผนทดสอบโดยเชื่อมตามแผนที่วางไว้ จากนั้นก็ทำการทดสอบโดยไม่ทำลายโดยวิธีการ ต่าง ๆ เริ่มตั้งแต่การทดสอบด้วยรังสีจากผลการทดสอบก็จะนำมาแก้ไขปรับปรุงวิธีการเชื่อม แล้วตัดสินใจเลือกวิธีการเชื่อมที่จะได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพตามต้องการ ซึ่งวิธีการทดสอบโดยไม่ทำลายก็มีส่วนช่วยในการปรับปรุงเทคนิคในการเชื่อมได้ปัจจุบันนี้ การทดสอบแบบไม่ทำลายได้มีส่วนช่วยในการปรับปรุงเทคนิคการผลิตต่าง ๆ เป็นอย่างมากเริ่มจากเทคนิคในการเชื่อมเป็นประการแรก ต่อไปในอนาคตการทดสอบโดยไม่ทำลายก็จะยิ่งมีบทบาทสำคัญ โดยขาดเสียมิได้ในการช่วยพัฒนาปรับปรุงเทคนิคการผลิตต่าง ๆ มากยิ่งขึ้น

#### 2.1.2.3 เพื่อลดต้นทุนการผลิต

การทำการทดสอบแบบไม่ทำลายนั้น จะเพิ่มค่าใช้จ่ายในการทดสอบขึ้น และอาจคิดว่าค่าใช้จ่ายในการผลิตจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าทำการทดสอบโดยไม่ทำลายในระหว่างกระบวนการผลิตอย่างเคร่งครัด จะทำให้ไม่มีการส่งผ่านผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียไปยังกระบวนการต่อไปโดยไม่รู้ล่วงหน้า ลดการสูญเสียในขั้นตอนต่อ ๆ ไปได้ซึ่งทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตโดยรวมลงไป อุปมาเหมือนกับการเจ็บไข้ได้ป่วย ถ้ารู้อาการล่วงหน้าได้ยิ่งเร็วเท่าใด ก็สามารถรักษาให้หายได้เร็วขึ้นเท่านั้น ทำนองเดียวกันถ้าได้ประยุกต์การทดสอบโดยไม่ทำลายตั้งแต่ขั้นต้น ๆ ของกระบวนการผลิตประหยัดกระบวนการและค่าใช้จ่ายโดยรวมไปได้ ซึ่งเท่ากับเป็นการลดต้นทุนการผลิตลง

#### 2.1.3 ข้อได้เปรียบของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

1. สามารถทำการตรวจสอบได้โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายใด ๆ กับชิ้นงาน ดังนั้นหลังการตรวจสอบจึงสามารถนำชิ้นงานกลับมาใช้ได้อีก
2. สามารถทำการตรวจสอบทุกชิ้นงานและแบบสุ่มตัวอย่าง
3. ใช้ในการตรวจสอบหลายชนิดกับงานชิ้นเดียวกันได้เพื่อความถูกต้องของการตรวจสอบ
4. สามารถทำการตรวจสอบซ้ำกับชิ้นงานเดิมได้
5. สามารถตรวจสอบชิ้นงานขณะใช้งานได้ (ใช้ได้บางวิธีการ )

6. สามารถทำการตรวจสอบชิ้นงานตามระยะเวลาการใช้งานได้ จึงทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพของชิ้นงานหลังผ่านการใช้งานแล้ว
7. มีอุปกรณ์ที่ใช้ในงานภาคสนามได้สะดวก
8. ในการตรวจสอบชิ้นงานที่เหมือนกัน อาจออกแบบการตรวจสอบให้เป็นระบบอัตโนมัติได้

#### 2.1.4 ข้อจำกัดของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย

การตรวจสอบโดยไม่ทำลายเป็นการตรวจสอบความไม่ต่อเนื่องที่ซ่อนอยู่ เปรียบเทียบได้กับการคลำวัตถุในที่มีดจึงอาจทำให้เกิดการแปลผลการตรวจสอบที่ผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ผู้ตรวจสอบที่มีความชำนาญเป็นพิเศษ นอกจากนั้นการแปลผลการตรวจสอบมักต้องกระทำผ่านสื่อกลางจึงทำให้ความไว (Sensitivity) ในการตรวจสอบต่ำลงและอาจเกิดการแปลผลที่แตกต่างกันระหว่างผู้ทำการตรวจสอบแต่ละราย ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งคือผลการตรวจสอบที่ได้มักเกิดจากการเปรียบเทียบกับสิ่งที่ทราบค่ามาก่อนหน้าที่แล้ว ดังนั้นจึงมักต้องมีการเตรียมชิ้นงานจำลองที่มีความไม่ต่อเนื่องที่ทราบค่า เช่น ขนาด ตำแหน่งที่แน่นอนเพื่อผลการตรวจสอบที่ถูกต้อง จึงเป็นการเสียเวลาและค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น

## 2.2 ความหยาบของพื้นผิว

ความเรียบผิว หรือความหยาบผิว ในภาษาอังกฤษเรียกว่า "Surface Roughness" หากมีความขรุขระของพื้นผิวมากแสดงว่ามีความหยาบมาก หากมีความขรุขระพื้นผิวน้อยแสดงว่ามีความหยาบน้อย

ความหยาบจัดเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งในด้านโลหะวิทยา อุปกรณ์ที่ใช้วัดความหยาบเรียกว่า เครื่องวัดความหยาบ หรือเครื่องวัดความเรียบผิว (Surface Roughness Tester) การวัดความหยาบนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ วัดความหยาบผิวโดยค่าเฉลี่ย กับความหยาบผิวโดยขนาด

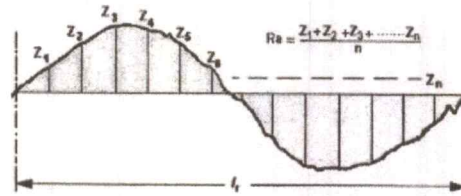
### 2.2.1 การวัดความหยาบผิวเฉลี่ย

การวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Average Parameter) คือการวัดและคำนวณความหยาบผิว ทำให้เรารู้ความหยาบโดยรวม แต่ไม่สามารถรู้ลักษณะความคลาดเคลื่อนสูงต่ำของความหยาบผิว พารามิเตอร์ของการวัดแบบเฉลี่ยได้แก่  $R_a$  ,  $R_{uk}$  ,  $R_q$  และ  $R_{sk}$

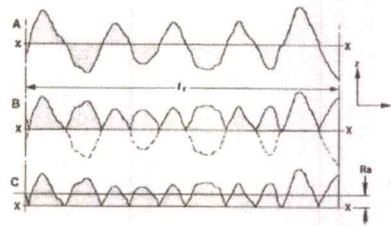
#### 2.2.1.1 ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness Average: $R_a$ )

ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต เป็นการแสดงความหยาบด้วยค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิวที่วัด ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุด และหลายมาตรฐานมักจะนิยมใช้ในการกำหนดมาตรฐานความหยาบ

วิธีการหาความหยาบผิว การหาความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิตได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย โดยค่าของ  $R_a$  มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ )

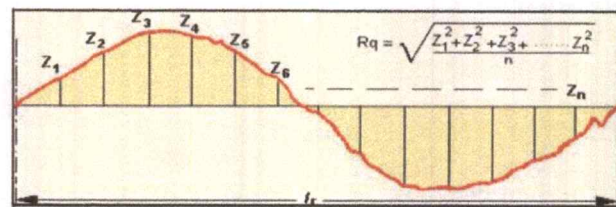


รูปที่ 2.1 ความหยาบพื้นผิวเฉลี่ยเลขคณิต



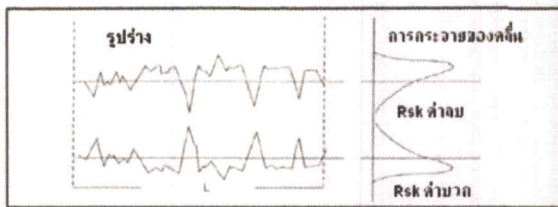
รูปที่ 2.2 ลักษณะการวิเคราะห์ของความหยาบพื้นผิวเฉลี่ย  $R_a$

2.2.1.2 ความหยาบพื้นผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness root mean square:  $R_q$ )  
ความหยาบพื้นผิวเฉลี่ยกำลังสองเป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยยกกำลังสองของพื้นผิว



รูปที่ 2.3 ลักษณะการวิเคราะห์ของความหยาบพื้นผิวเฉลี่ยกำลังสอง

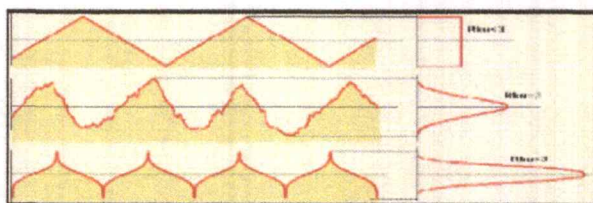
2.2.1.3 ความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาตร (Roughness Skewness:  $R_{sk}$ )  
ความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาตร เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยการวัดปริมาณของยอดและหลุม โดยปริมาณของยอดให้ค่าเป็นบวก ส่วนปริมาณของหลุมให้ค่าเป็นลบ หากค่าใดมีมากก็แสดงให้เห็นถึงการมียอด หรือหลุมมากนั่นเอง



รูปที่ 2.4 ความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาณ

2.2.1.4 ความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง (Roughness Kurtosis :  $R_{uk}$ )

ความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยแสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปร่าง หรือยอดผิวว่ามีลักษณะเป็นยอดโค้ง ยอดเรียบ หรือยอดแหลม



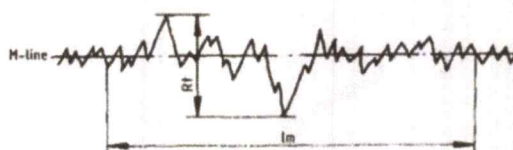
รูปที่ 2.5 ความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง

2.2.2 การวัดความหยาบผิวโดยขนาด

การวัดความหยาบผิวโดยขนาด (Amplitude Parameter) คืออาศัยการวัดค่าสูงต่ำของขนาดความหยาบของพื้นผิว ทำให้เรารู้ลักษณะของความหยาบพื้นผิวได้ชัดเจนกว่า พารามิเตอร์ของวิธีวัดนี้ ได้แก่  $R_p$  ,  $R_t$  ,  $R_v$  และ  $R_z$

2.2.2.1 ความหยาบผิวโดยรวม (Roughness total Height :  $R_t$ )

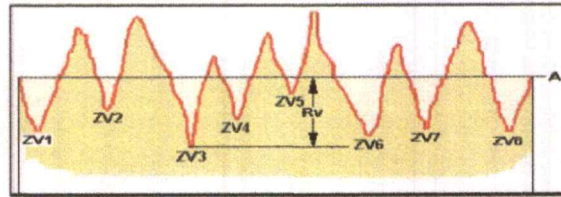
เป็นการแสดงความหยาบผิวโดยวัดขนาดจากยอดสูงสุดถึงจุดที่เป็นหลุมลึกที่สุด ค่านี้มีประโยชน์มากตรงที่หากเราต้องการขัดพื้นผิวเพื่อวัดความขรุขระออกให้หมดเราจะได้ว่าต้องขัดพื้นผิวลงไปกี่ไมครอน



รูปที่ 2.6 ความหยาบผิวโดยรวม

### 2.2.2.2 ความหยาบผิวขนาดหลุมลึกสุด (Roughness Valley : $R_v$ )

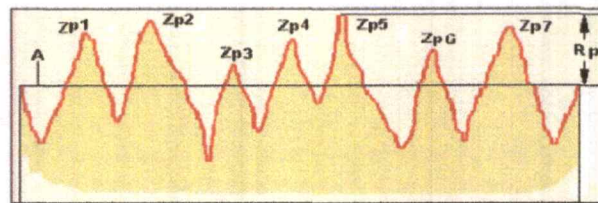
ความหยาบผิวขนาดหลุมลึกสุด เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยการวัดขนาดความลึกของหลุม โดยแสดงความลึกหลุมที่ลึกที่สุด



รูปที่ 2.7 ความหยาบผิวขนาดหลุมลึกสุด

### 2.2.2.3 ความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุด (Roughness Peak : $R_p$ )

ความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุด เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยการวัดขนาดยอดสูงสุด



รูปที่ 2.8 ความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุด

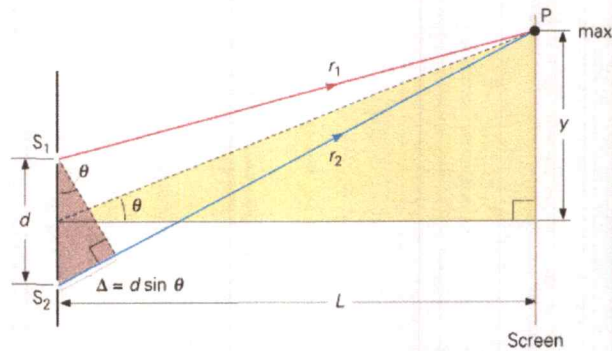
ปัจจุบันมีการตรวจสอบความเรียบของพื้นผิวโดยวิธีการการตรวจสอบแบบสัมผัสและการตรวจสอบแบบไม่สัมผัส โดยเทคนิคการตรวจสอบความเรียบของพื้นผิวแบบสัมผัสตัวอย่างเช่น เครื่องวัดความเรียบแบบใช้เข็มลาก ซึ่งการลากเข็มลงบนชิ้นงานอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อพื้นผิวชิ้นงานได้ ในโครงการพิเศษนี้จึงนำเทคนิคการตรวจสอบความเรียบของพื้นผิวแบบไม่สัมผัสโดยใช้วิธีการทางแสงตัวอย่างเช่น อินเตอร์เฟอริเตอร์ โดยผลการวัดความเรียบของพื้นผิวสามารถหาได้โดยการวิเคราะห์ความเข้มแสงจากลวดลายริ้วการแทรกสอดทำให้การตรวจสอบอินเตอร์เฟอริเตอร์ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นผิวของชิ้นงาน

## 2.3 การแทรกสอดของแสง (Interference)

เกิดได้ต่อเมื่อคลื่นแสง 2 ขบวนเคลื่อนที่มาพบกัน จะเกิดการรวมตัวกันและแทรกสอดกันเกิดเป็นแถบมืดและแถบสว่างบนฉาก โดยแหล่งกำเนิดแสงจะต้องเป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์ คลื่นแสงจัดอยู่ในกลุ่มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (เช่นเดียวกับคลื่นไมโครเวฟ คลื่นวิทยุ ตลอดจน รังสีเอ็กซ์ซึ่งจำแนกตามความถี่ หรือความยาวคลื่น) โดยคลื่นแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น ความถี่ของคลื่น ( $f$ ) และ ความเร็วคลื่น เป็นดังนี้

$$f = c\lambda \quad (1)$$

การแทรกสอดของคลื่นคือการรวมกันของคลื่นหลายขบวน โดยผลลัพธ์ของการรวมคลื่นจะหาได้จากการรวมกันแบบพีชคณิตโดยตรง ซึ่งการรวมคลื่นมีทั้งการรวมแบบเสริมกันและแบบหักล้างกัน เมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งจะเกิดการรวมคลื่นเสมอ แต่อาจไม่เห็นผลของการแทรกสอดเนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงต่างเป็นอิสระจากกัน ทำให้ความต่างเฟสของแสงจากแต่ละแหล่งไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา จึงไม่เห็นผลของการแทรกสอด ดังนั้นเงื่อนไขสำคัญเพื่อสังเกตผลของการแทรกสอดด้วยตาเปล่า คือความต่างเฟสที่คงตัว  $F$

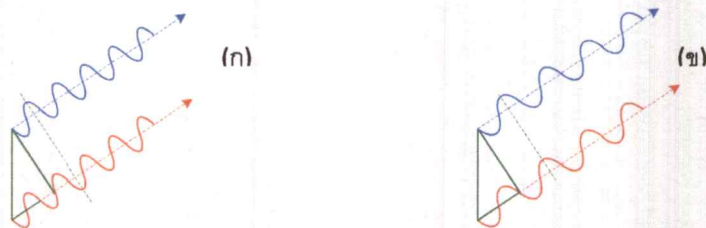


รูปที่ 2.9 การแทรกสอดของแสง

จากรูปการแทรกสอดของแสง พบว่าเมื่อช่องแคบ  $S_1$  และ  $S_2$  เป็นแหล่งกำเนิดแสงห่างกันเป็นระยะ  $d$  เมื่อแสงเดินทางจากช่องแคบมาถึงฉากด้วยระยะทางที่ต่างกัน (path difference:  $\delta$ ) เดินทางมาพบกันบนจุดเดียวกันคือจุด  $P$  จะได้ผลต่าง  $S_1P$  กับ  $S_2P$  เป็นดังสมการ

$$\delta = |S_1P - S_2P| = d \sin \theta \quad (2)$$

สิ่งสำคัญที่มีผลต่อรูปแบบการแทรกสอดบนฉากคือระยะทางที่ต่างกัน  $\delta$  ของแสง จากแหล่งกำเนิด จะเห็นว่าในระบบนี้ถ้า  $\delta$  เป็นจำนวนเต็มของความยาวคลื่น  $\lambda$  ผลรวมของคลื่น จะเป็นแบบเสริมกันเห็นเป็นแถบสว่าง (bright fringes) และถ้า  $\delta$  เป็นจำนวนครึ่งของความยาวคลื่น  $\lambda$  ผลรวมของคลื่นจะเป็นแบบหักล้างกันเห็นเป็นแถบมืด (dark fringes)



รูปที่ 2.10 (ก) การแทรกสอดแบบหักล้างและ (ข) การแทรกสอดแบบเสริมสร้าง

สำหรับการแทรกสอดแบบหักล้าง

$$\delta = d \sin \theta_{\text{bright}} \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda \quad (3)$$

สำหรับการแทรกสอดแบบเสริม

$$\delta = d \sin \theta_{\text{bright}} m \lambda \quad (4)$$

โดยที่  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

## 2.4 โคฮีเรนซ์ (Coherence)

คุณสมบัติของคลื่น 2 คลื่นที่มีเฟสต่างกันคงที่ หรือมีหน้าคลื่นตรงกัน เช่น แสงเลเซอร์ เนื่องจากอะตอมของตัวกลางเลเซอร์ถูกกระตุ้นให้เปล่งแสงออกมาพร้อมกันในทิศทางเดียวกัน ส่วนที่เกิดจากแสงอื่นๆ เช่น หลอดไฟ อะตอมจะเปล่งแสงออกมาไม่พร้อมกันและทิศทางที่แตกต่างกันอย่างอิสระ จะเรียกว่า incoherence

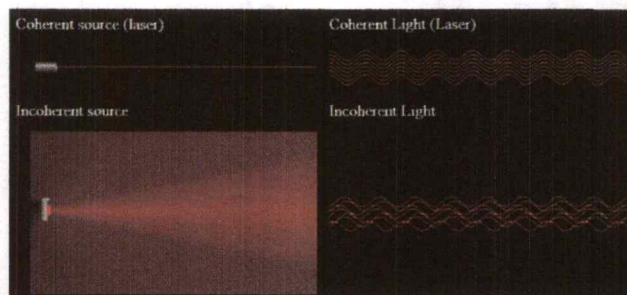
ในกรณีที่คลื่นทั้งสองต้องมีความถี่เดียวกันและเท่ากัน แหล่งกำเนิดแสงจะต้องมีขนาดเป็นอนันต์ นั่นคือแหล่งกำเนิดแสงที่มีเฟสต่างกันคงที่ตลอดเวลาไม่มีจริงในธรรมชาติ มีแต่แหล่งกำเนิดแสงที่มีเฟสต่างกันคงที่ในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น เรียกว่า coherence time และระยะทางที่แสงเดินทางได้ในเวลานี้เรียกว่า ความยาวโคฮีเรนซ์ โดยที่ความยาวโคฮีเรนซ์มีความสัมพันธ์กับ coherence time ดังสมการ

$$l_c = c \tau_c = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda} \quad (5)$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ

$\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นศูนย์กลางของแหล่งกำเนิด

$\Delta \lambda$  คือ ความกว้างสเปกตรัม



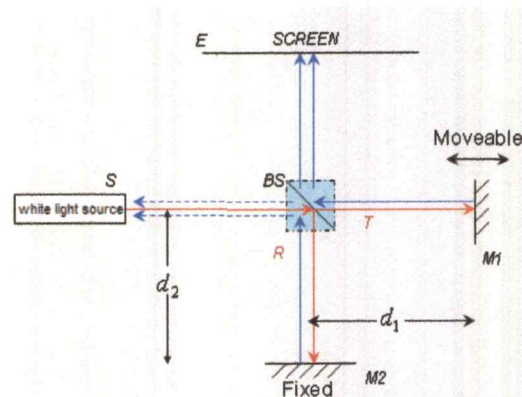
รูปที่ 2.11 คุณสมบัติของคลื่นแบบ Coherence และ Incoherence

## 2.5 ไมเคิลสันอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์

ไมเคิลสันอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการแทรกสอดของคลื่นแสงสองขบวน คลื่นที่แทรกสอดกันจะเกิดเป็นฟริ้ง (Fringe) ลำแสงทั้งสองขบวนต้องเป็นแสงโคฮีเรนต์และกำเนิดจากแหล่งกำเนิดเดียวกันถึงจะสามารถสังเกตเห็นฟริ้งที่เกิดได้ โดยอาศัยการทางแสงของอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์สามารถวัดระยะทางในเทอมของความยาวคลื่นได้ โดยอาศัยการนับฟริ้งของคลื่นแสงสองขบวนที่แทรกสอดกัน

### 2.5.1 หลักการพื้นฐานของไมเคิลสันอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์

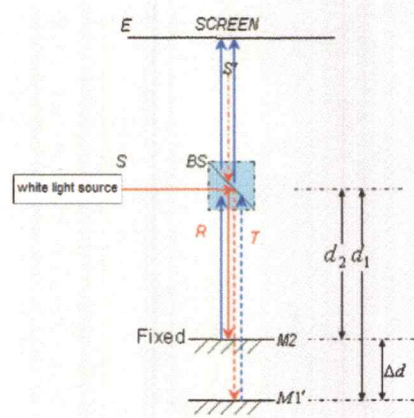
จากแหล่งกำเนิดแสงโคฮีเรนต์เดียวกันลำแสงจะถูกแยกออกเป็นสองขบวนโดยตัวแยกแสง (Beam Splitter : BS) โดยปกติ ลำแสงลำที่ 1 จะสะท้อน (Reflected : R) ตัวแยกแสงและไปตกกระทบ Mirror 2 (M2) จากนั้นจะสะท้อนกระจกกลับมายังตัวแยกแสง และส่งผ่านละแสงไปยังฉากรับแสง (Screen) และลำแสงอีกลำหนึ่งจะส่งผ่าน (Transmitted : T) โดยตัวแยกแสงไปยัง Mirror 1 (M1) และสะท้อนกระจกกลับมายังตัวแยกแสง จากนั้นจะสะท้อนตัวแยกแสงไปยังฉากรับแสง ทำให้ได้ลำแสง 2 ลำมาแทรกสอดกันและเกิดภาพริ้วการแทรกสอดบนฉากรับภาพ



รูปที่ 2.12 ไมเคิลสันอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์

### 2.5.2 แนวทางเดินทางของแสงของไมเคิลสันอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์

พิจารณาแนวทางเดินทางของแสงทั้งหมดโดยดูจากรูปที่ 2.13 จะช่วยให้สามารถเข้าใจความแตกต่างของทางเดินทางแสงเสมือนกับมองเข้าไปใน BS จากด้านหลังแหล่งกำเนิดแสง แทนที่กระจก M1 ด้วยภาพเสมือน (Virtual image) M1' และแทนแหล่งกำเนิดแสง S ด้วย แหล่งกำเนิดแสงเสมือน S' เมื่อมองเข้าไปใน BS ในตำแหน่งที่ M2



รูปที่ 2.13 พิจารณาแนวทางเดินแสง

พริ้งที่เกิดขึ้นมาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน ที่เป็นผลจากการสะท้อน และความแตกต่างของระยะกระจาก M2 และ M1' แทนค่าความต่างของระยะห่างทั้งสองด้วย  $\Delta d$  สมมติให้ M1 เลื่อน ดังนั้นเมื่อเลื่อน M1 จะทำให้ความแตกต่างระยะทางเดินแสงระหว่างจุดที่รังสีสะท้อนจาก M1' และ M2 เป็น  $2\Delta d$

สมมติว่ามีคลื่นสองขบวน

$$u_1 = U_1 e^{i\phi_1} \tag{6}$$

$$u_2 = U_2 e^{i\phi_2} \tag{7}$$

เคลื่อนที่มาซ้อนทับกัน (Overlap) จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้ผลรวมของสนามรวมเป็น

$$U = u_1 + u_2 \tag{8}$$

เนื่องจากความเข้มแสงเป็นปฏิภาคกับกำลังสองของแอมปริจูด ดังนั้นจากสมการที่ (8) จะได้

$$I = |u|^2 = |u_1 + u_2|^2 \tag{9}$$

$$I = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \tag{10}$$

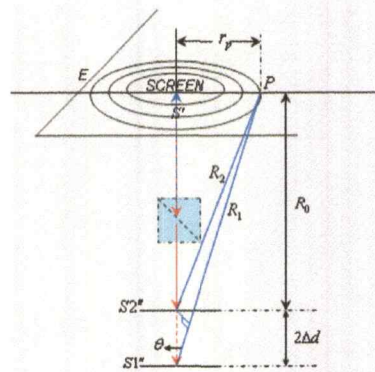
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \phi \tag{11}$$

เมื่อ  $\Delta \phi = \phi_1 - \phi_2$

เนื่องจากไมเคิลสันอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์นั้น เป็นการแทรกสอดแบบแบ่งแอมปริจูด (Amplitude division) และ Beam Splitter ที่ใช้เป็นแบบแบ่งแสง 50:50 ดังนั้น  $I_1 = I_2$  ดังนั้น จากสมการที่ (11) จะได้

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\Delta \phi}{2}\right) \tag{12}$$

สมการที่ (12) เป็นเทอมที่เราสนใจในการพิจารณาพริ้งที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.14 รูปแบบของฟริ้งวงกลม

พิจารณารูปที่ 2.14 ลักษณะทางเรขาคณิตของฟริ้งวงกลมเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นจุด เขียนให้อยู่ในระนาบเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นจากแหล่งกำเนิดแสง  $s$  แทนด้วยแหล่งกำเนิดแสงเหมือน  $S'$  ในรูปแบบที่สะท้อนใน BS การสะท้อนของ  $M_1'$  จะได้  $S1''$  ในขณะที่การสะท้อนของ  $M_2$  จะได้  $S2''$  ความแตกต่างระหว่างทางเดินแสง  $R_1$  และ  $R_2$  ของการแทรกสอดทำให้เกิดฟริ้งวงกลมขึ้นในระนาบที่ฉาก E พิจารณาที่จุด P บนฟริ้งวงกลม

$$(R_1 - R_2) = 2\Delta d \cos \theta \quad (13)$$

ที่จุดกลางของฉากจะเป็นริ้วสว่าง เมื่อความต่างระยะทางเดินแสงเป็นจำนวนเต็มของความยาวคลื่น เงื่อนไขสำหรับความเข้มแสงสูงสุดที่จุดกลางฉากเขียนเป็นความสัมพันธ์ดังสมการ

$$2\Delta d = n\lambda \quad (14)$$

เมื่อ  $n$  อันดับของฟริ้ง ดังนั้น

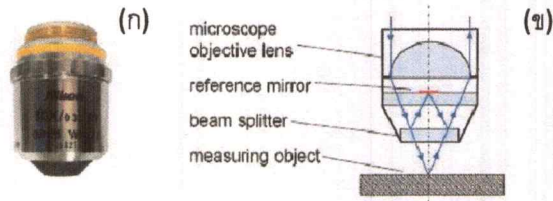
$$\Delta d = \frac{n\lambda}{2} \quad (15)$$

ถ้าระยะห่างระหว่าง  $M1'$  กับ  $M2$  เป็นระยะ  $\Delta d$  จะทำให้ฟริ้งที่จุดศูนย์กลางหดตัวเข้า หรือขยายตัวออกที่ละฟริ้ง จะสามารถนับจำนวนฟริ้งได้ ถ้ากำหนดขีดอ้างอิงไว้โดยการนับจำนวนฟริ้งที่เปลี่ยนไป  $\Delta n$  ก็จะสามารถคำนวณหาระยะทางที่กระจกเลื่อนไปได้จากสมการที่ (15) โดยที่เราทราบค่าที่แน่นอนของความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้

## 2.6 Mirau Interferometry Objective Lens

Mirau objective lens คืออุปกรณ์ทางแสงอย่างหนึ่งที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.15 (ก) ภายใน mirau objective lens มีอุปกรณ์ที่สำคัญหลายชิ้นดังรูปที่ 2.15 (ข) มี objective lens ทำหน้าที่รวมแสงเพื่อส่งไปยัง beam splitter เพื่อแบ่งลำแสงออกเป็นสองลำ และมีกระจกอ้างอิงที่มีความเรียบสูง โดยระยะห่างระหว่าง beam splitter กับกระจกอ้างอิง จะเป็นตัวกำหนดระยะการทำงาน ของ mirau objective lens เรียกว่า working distance และขอบเขตของการมองเห็นของ mirau

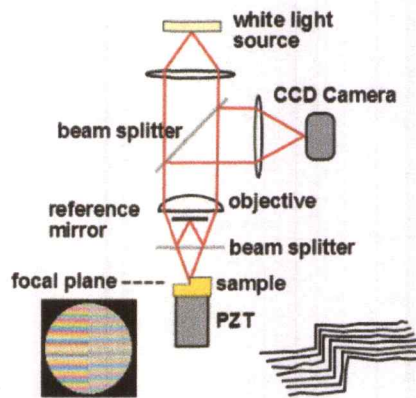
objective lens จะแตกต่างกันตามกำลังขยายหาก mirau objective lens มีกำลังขยายน้อยจะมีขอบเขตของการมองเห็นมากในทางกลับกันหากมีกำลังขยายมากจะมีขอบเขตของการมองเห็นลดน้อยลง



รูปที่ 2.15 (ก) mirau objective lens และ (ข) ไดอะแกรมภายใน

## 2.7 มิเรออินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์ (Mirau Interferometer)

มิเรออินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการแทรกสอดของคลื่นแสงสองขบวน คลื่นที่แทรกสอดกันจะเกิดเป็นฟริ่งเช่นเดียวกันกับไมเคิลสันอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์ โดยมีรูปแบบการจัดระบบแสงที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.16 ไดอะแกรมระบบมิเรออินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์

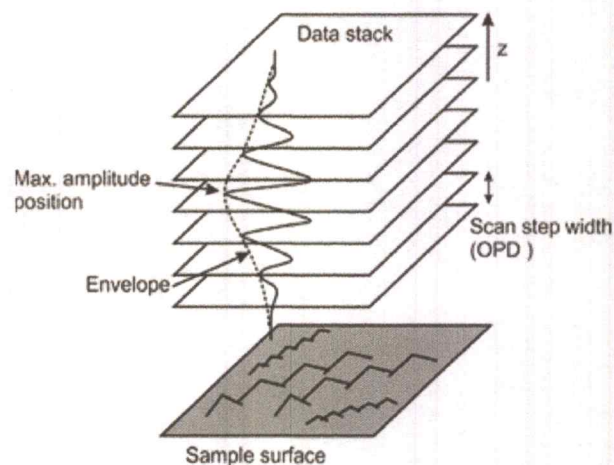
จากรูปที่ 2.16 จะแสดงถึงทางเดินแสงจากแหล่งกำเนิดแสง แหล่งกำเนิดแสงจะถูกแบ่งออกเป็นสองลำ โดยระบบนี้จะใช้แสงลำที่ถูกส่งผ่านไปยังเลนส์มิเรอ ภายในเลนส์มิเรอจะประกอบไปด้วยเลนส์นูนแกมระนาบ กระจกอ้างอิง ตัวแยกแสง แสงที่ส่งมายังมิเรอจะกระทบกับเลนส์นูนแกมระนาบเพื่อรวมแสง ไปยังตัวแยกแสงจะทำหน้าที่ส่งผ่านลำแสงไปยังชิ้นงานและสะท้อนลำแสงไปยังกระจกอ้างอิง จากนั้นแสงจากกระจกชิ้นงานและกระจกอ้างอิงจะเกิดการแทรกสอดกัน แล้วเดิน

ทางออกจากเลนส์มีเราไปสะท้อนตัวแยกแสง ทำให้แสงที่เกิดการแทรกสอดกันตกกระทบบนที่ฉากรับภาพ โดยภาพรบกวนการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะบอกถึงลักษณะของพื้นผิวตัวอย่างชิ้นงานที่นำมาทดสอบ

ในการตรวจสอบโดยมีเรออินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์จำเป็นจะต้องวางกระจกชิ้นงานให้อยู่ในระนาบการทำงานของเลนส์มีเรา เนื่องจากภายในตัวเลนส์ของมีเรานั้นจะมีกระจกอ้างอิงอยู่ โดยหลักการของการเกิดรบกวนการแทรกสอดคือเมื่อระยะระหว่างตัวแยกลำแสงกับกระจกอ้างอิง และระยะระหว่างตัวแยกลำแสงกับกระจกตัวอย่างมีระยะทางที่เท่ากันหรือไม่เกินความยาวโคฮีเรนซ์ของแหล่งกำเนิดแสง

## 2.8 Vertical Scanning Interferometry (VSI)

การวิเคราะห์ภาพรบกวนการแทรกสอดเพื่อสร้างภาพโครงร่างพื้นผิววัสดุนั้นมีหลายวิธี แต่วิธี Vertical scanning Interferometry นั้นสามารถวิเคราะห์ได้ง่าย การวิเคราะห์ด้วย Vertical scanning Interferometry เป็นการวิเคราะห์ภาพรบกวนการแทรกสอดของแสงแบบกวาดแนวตั้งบนภาพรบกวนการแทรกสอด



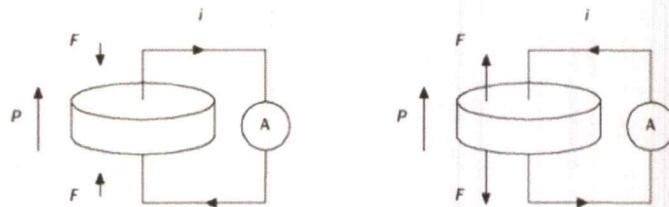
รูปที่ 2.17 ภาพจำลองการวางรบกวนการแทรกสอดในแนวตั้งเพื่อวิเคราะห์ภาพ

โดยหลักการของ Vertical scanning Interferometry จะที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงความเข้มของรบกวนการแทรกสอดในตำแหน่งต่างๆที่เราขยับชิ้นงาน เข้าหรือออก โดยจะขยับชิ้นงานเป็นระยะที่สม่ำเสมอและเก็บภาพในทุกๆระยะที่ขยับไป และนำภาพมาเรียงซ้อนกันเพื่อพิจารณาค่าความเข้มแสงในแต่ละพิกเซลในตำแหน่งเดียวกันของภาพ ซึ่งค่าความเข้มของแสงที่สูงที่สุดของแต่ละ pixel จะเป็นค่าที่บ่งบอกว่าตำแหน่งนั้นเป็นความสูงของชิ้นงานที่เรามาตรวจสอบ

## 2.9 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)

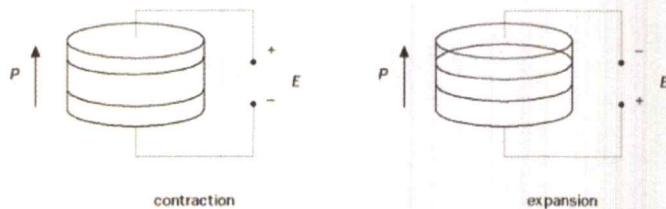
เพียโซอิเล็กทริกเป็นคุณสมบัติชนิดหนึ่งของวัสดุที่มาจากคริสตัลรวมไปถึงคริสตัลธรรมชาติ ทั้ง ควอตซ์ (Quartz) ดีเกลือ (Rochelle Salt) อัญมณี (Tourmaline) รวมกับเซรามิก เช่นแบเรียมไททาเนต และลิตโซโคเนต เมื่อใช้ความดันทางกลปรับให้เข้ากับวัสดุเหล่านี้โครงสร้างที่เป็นคริสตัลจะสร้างสนามไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมกับความดัน ทำให้โครงสร้างถูกเปลี่ยนรูปร่างจนทำให้เกิดการเปลี่ยนมิติของวัสดุ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ปรากฏการณ์คือ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) และปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางกลับ (Inverse piezoelectric effect)

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกเกิดเนื่องจากความไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลางของผลึกเซลล์ (Non Centrosymmetry) เมื่อมีแรงมากระทำกับผลึกคริสตัลจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างและขนาดของผลึกและเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.18 Piezoelectric Effect

ในทางกลับกันเมื่อเราป้อนแรงดันบนผลึกคริสตัล ผลึกคริสตัลจะขยายและหดตัว ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลโดยซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางกลับ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.19 Inverse Piezoelectric Effect

เมื่อความดัน หรือแรงถูกนำไปใช้กับคริสตัลควอตซ์ ประจุสามารถผ่านคริสตัลโดยเป็นสัดส่วนกับแรงที่ใช้ ความแตกต่างระหว่างคริสตัลเซ็นเซอร์และเซ็นเซอร์ที่ใช้แรงทางกล เช่น Strain Gauge คือสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากคริสตัลจะปล่อยกัมมันตรังสีอย่างรวดเร็ว ความเฉพาตัวดังกล่าวจึงไม่เหมาะที่จะใช้วัดแรงสถิตหรือความดัน แต่ใช้ได้ผลดีกับการวัดที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

## 2.10 สเตรนเกจ (Strain Gauge)

คือเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด(Strain) ของวัตถุ ส่วนใหญ่สเตรนเกจ จะทำจากเส้นลวดโลหะขนาดเล็กขดเป็นรูปร่างต่างๆอยู่บนแผ่นฉนวน นอกจากนั้นยังมีสเตรนเกจแบบอุปกรณ์กึ่งตัวนำด้วย ซึ่งมีความไวสูงกว่าและขนาดเล็กกว่าแบบลวดโลหะ แต่ก็มีราคาแพงกว่าเช่นกัน สเตรนเกจ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือแบบยึดติด (Bonded Strain Gauge) และแบบไม่ยึดติด (Unbonded Strain Gauge) ซึ่งสเตรนเกจ ทั้งสองชนิดจะมีลักษณะของโครงสร้างและการทำงานที่คล้ายกันคือ ทำด้วยเส้นลวดเล็กๆ ขดไปขดมาและนำไปติดกับวัตถุที่ต้องการตรวจวัดความเครียด

หลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในเส้นลวด เพื่อการตรวจวัดความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากระทำบนเส้นลวดนี้ สเตรนเกจมีการใช้งานในการตรวจวัดได้อย่างกว้างขวาง เช่น การวัดน้ำหนัก ความดัน แรงเชิงกล หรือการเคลื่อนที่ (Displacement) เมื่อสเตรนเกจถูกดึงให้ยืดออกความยาวของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่พื้นที่หน้าตัดจะลดลง ผลก็คือความต้านทานของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความต้านทานโลหะตัวนำจะแปรค่าโดยตรงตามความยาว และแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด โดยเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (16)$$

เมื่อ  $R$  = ความต้านทานของสเตรนเกจ

$\rho$  = ค่าความต้านทานคงที่ของโลหะ

$L$  = ความยาวของขดลวด

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

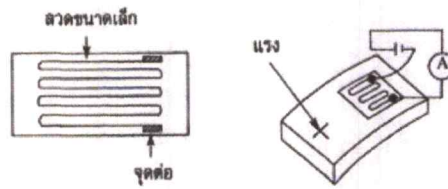
สเตรนเกจใช้หลักการนี้ในการวัดค่าความเครียดผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โดยทั่วไปตัวรับสัญญาณของสเตรนเกจทำจากโลหะผสมแผ่นบางที่เป็นส่วนผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล โลหะผสมแผ่นบางนี้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าต่อความเครียดเป็นแบบเชิงเส้นที่มีค่าคงที่แน่นอนค่าหนึ่ง กำหนดความสัมพันธ์หลักดังนี้:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \cdot \epsilon \quad (17)$$

เมื่อ  $R$  = ความต้านทานทางไฟฟ้าเดิมของสเตรนเกจ

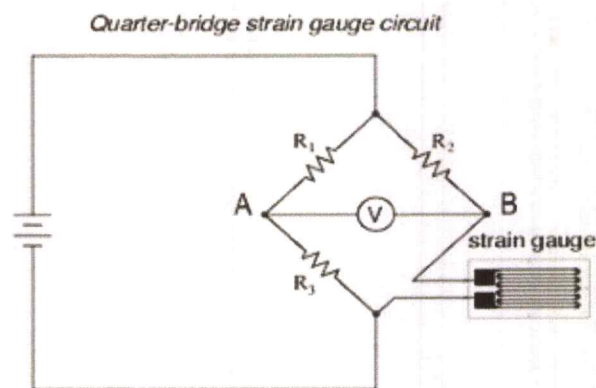
$K_s$  = ค่าคงที่ของความสัมพันธ์

$\epsilon$  = ความเครียด



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างสเตรนเกจ

การนำไปใช้จะใช้การต่อวงจร Wheatstone bridge เพื่อหาความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าเมื่อความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.21 Wheatstone bridge

จากรูปที่ 2.20 ในสภาวะปกติ ความต่างศักย์ที่จุด A และความต่างศักย์ที่จุด B มีเท่ากัน หากมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตัวหนึ่งตัวใดในสี่ตัว จะมีการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างจุด A กับจุด B ดังนั้นในตอนเริ่มต้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับเทียบให้ค่ากระแสไหลมีค่าเป็นศูนย์ การปรับค่าความต้านทานหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการ

$$R_1 R_{\text{gauge}} = R_2 R_3 \quad (18)$$

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อการวัดค่าของสเตรนเกจ แต่สามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้หนึ่งตัวในวงจรวีทสโตนบริดจ์ เพื่อปรับค่าชดเชยให้กับวงจรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

## 2.11 การเฉลี่ยข้อมูล

การเฉลี่ยข้อมูลมีหลายวิธีด้วยกันตัวอย่างเช่น ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (arithmetic mean) ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric mean) และค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ได้ใช้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เนื่องจากมีความเหมาะสมในการนำประยุกต์ใช้ในการเฉลี่ยโครงร่างสามมิติ

ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่(Moving Average) คือการเฉลี่ยค่าเป็นช่วงตามที่กำหนด โดยจะยึดตำแหน่งที่พิจารณาหาค่าเฉลี่ยกับตำแหน่งข้างเคียงทั้งด้านหน้าและด้านหลังตามช่วงที่กำหนด เมื่อเฉลี่ยค่าเรียบร้อยแล้วที่ได้จะเป็นค่าใหม่ของตำแหน่งที่พิจารณา

จากตารางที่ 2.1 เป็นตัวอย่างการเฉลี่ยค่าแบบเคลื่อนที่ 3 จำนวนจะเห็นว่าค่า  $a_1$  คือค่าเฉลี่ยที่ได้จากผลรวมของ 3 ค่าแรก โดยเทียบค่าจากตัวแปร  $Y_2$  เป็นค่ากลาง และเมื่อคำนวณค่าเฉลี่ย 3 ค่าถัดไปก็จะได้  $a_2$  โดยเทียบตัวแปร  $Y_3$  เป็นค่ากลาง

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการเฉลี่ยค่าแบบเคลื่อนที่ 3 จำนวน

ตัวแปร (Y)	ผลรวมค่า 3 จำนวนเคลื่อนที่	ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของ 3 จำนวน
$Y_1$	----	-----
$Y_2$	$Y_1 + Y_2 + Y_3$	$\frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{3} = a_1$
$Y_3$	$Y_2 + Y_3 + Y_4$	$\frac{Y_2 + Y_3 + Y_4}{3} = a_2$
$Y_4$	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$Y_{n-2}$	.	.
$Y_{n-1}$	$Y_{n-2} + Y_{n-1} + Y_n$	$\frac{Y_{n-2} + Y_{n-1} + Y_n}{3} = a_{n-2}$
$Y_n$	----	-----

หากพิจารณาให้ตัวแปร Y แทนตำแหน่งของพิกเซลในภาพก็จะสามารถใช้หลักการนี้เฉลี่ยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพเพื่อลดปัญหาการรบกวนจากระบบภายนอกขณะทำการตรวจสอบชิ้นงานได้บางส่วนดังตัวอย่างที่แสดงในรูป 2.21 จะเห็นว่าหากเลือกพิจารณาที่ค่า  $Y_6$  เป็นตำแหน่งกลาง และช่วงที่ต้องการเฉลี่ยคือ 3 จำนวน ค่าใหม่ของตำแหน่ง  $Y_6$  คือค่าเฉลี่ย 3 จำนวนของตำแหน่ง  $Y_5$   $Y_6$  และ  $Y_7$

$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_8$
2	7	3	5	9	6	4	3
-	4	5	5.6667	6.6667	6.3333	4.3333	-

รูปที่ 2.22 ตัวอย่างการเฉลี่ยค่าแบบเคลื่อนที่

## 2.12 ภาพกราฟิก

ภาพกราฟิกเป็นภาพที่ไม่มีการเคลื่อนไหวเช่น ภาพถ่าย ภาพวาด และภาพถ่ายลายเส้น เป็นต้น ภาพกราฟิกนับว่ามีบทบาทต่อระบบงานมัลติมีเดียเนื่องจากสามารถสื่อความหมายได้กว้างกว่าข้อความหรือตัวอักษร ภาพจะให้ผลในเชิงการรับรู้ด้วยการมองเห็นได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังสามารถถ่ายทอดความหมายได้ลึกซึ้งซึ่งมากกว่าข้อความหรือตัวอักษรเพราะข้อความหรือตัวอักษรจะมีข้อจำกัดทางด้านความแตกต่างของภาษา แต่ภาพนั้นสามารถสื่อความหมายได้กับทุกชนชาติ สามารถแบ่งภาพกราฟิกได้ 2 ประเภทได้แก่

### 2.12.1 ภาพกราฟิกแบบราสเตอร์ (Raster)

ภาพกราฟิกแบบราสเตอร์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า บิตแมป (Bitmap) เป็นภาพกราฟิกที่เกิดจากการเรียงตัวของจุดสีเหลี่ยมเล็ก ๆ ที่เรียกว่า พิกเซล (Pixel) จำนวนมากมาประกอบกันโดยในแต่ละพิกเซลจะมีค่าและขนาดที่แน่นอนหากมีการขยายภาพให้ขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ภาพมีความละเอียดลดลง เมื่อนำมาใช้จะบีบอัดข้อมูลเป็นไฟล์ในรูปแบบที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติการใช้งานที่นิยมมีดังนี้

ตารางที่ 2.2 ตารางข้อมูลประเภทไฟล์ภาพกราฟิกแบบราสเตอร์

ประเภทไฟล์	ย่อมาจากคำว่า	คุณสมบัติของไฟล์	ลักษณะการใช้งาน
BMP	Bitmap	สามารถบันทึกภาพชนิดขาวดำแบบ 16 สี และภาพสีขนาด 24 บิตได้	เป็นรูปแบบของไฟล์ภาพมาตรฐานที่ใช้ได้ในระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โดยมีลักษณะการจัดเก็บไฟล์ภาพเป็นจุดสีทีละจุดจึงทำให้ภาพดูเสมือนจริง
JPEG	Joint Photographic Experts Group	เก็บข้อมูลภาพในลักษณะของการบีบอัดข้อมูล สามารถเก็บภาพสีได้สูงถึง 16.7 ล้านสี	เป็นรูปแบบไฟล์ที่เก็บภาพแบบราสเตอร์ที่ไม่ต้องการคุณภาพสูงมากนัก เช่น ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัล ภาพถ่ายจากโทรศัพท์มือถือและภาพกราฟิกสำหรับแสดงบนอินเทอร์เน็ต
PNG	Portable Network Graphics	แสดงสีได้มากกว่า 256 สี สามารถทำพื้นหลังภาพให้โปร่งใส	สามารถถูกบีบอัดให้เล็กโดยสูญเสียรายละเอียดของภาพน้อยมาก นิยมใช้ในเว็บเพจ ทั้งภาพ

			ทั่วไป ภาพพื้นหลังโปร่งใส และ ภาพเคลื่อนไหว
GIF	Graphic Interchange Format	ภาพมีขนาดไฟล์ต่ำ สามารถใช้งานข้ามระบบได้ทั้งระบบปฏิบัติการ วินโดวส์และระบบปฏิบัติการยูนิกซ์	ใช้บันทึกเป็นไฟล์ภาพเคลื่อนไหว และนิยมมากในการใช้งานบนเว็บเพจ
TIFF	Tagged Image File Format	บันทึกภาพได้หลายชนิดทั้งภาพลายเส้น (Line-Art), ภาพ halftone, ภาพ grayscale และภาพสี ตั้งแต่ 1 บิตจนถึงภาพสี 32 บิต	สามารถใช้ได้ทั้งในเครื่อง PC และ Mac ส่วนใหญ่ใช้ในงานโปรแกรมเกี่ยวกับสิ่งพิมพ์ เนื่องจากไฟล์มีคุณภาพและความคมชัดสูง

### 2.12.2 ภาพกราฟิกชนิดเวกเตอร์(Vector)

ภาพกราฟิกชนิดเวกเตอร์เป็นภาพที่มีลักษณะของการสร้างให้แต่ละส่วนเป็นอิสระต่อกัน โดยแยกชิ้นส่วนของภาพทั้งหมดออกเป็นเส้นตรง หรือรูปทรง เป็นการรวมเอาวัตถุต่างชนิดมาผสมกัน มีทิศทางการลากเส้นไปในแนวต่างๆ เพื่อสร้างภาพที่แตกต่างกันโดยใช้คำสั่งง่ายๆ จึงเรียกภาพประเภทนี้ว่า กราฟิกเวกเตอร์ สามารถยืดหรือหดภาพเท่าใดก็ได้ โดยที่ภาพจะไม่แตก ความละเอียดของภาพไม่เปลี่ยนแปลง และไฟล์มีขนาดเล็กกว่าภาพ ภาพกราฟิกแบบบราสเตอร์

### ตารางที่ 2.3 ตารางข้อมูลประเภทไฟล์ภาพกราฟิกชนิดเวกเตอร์

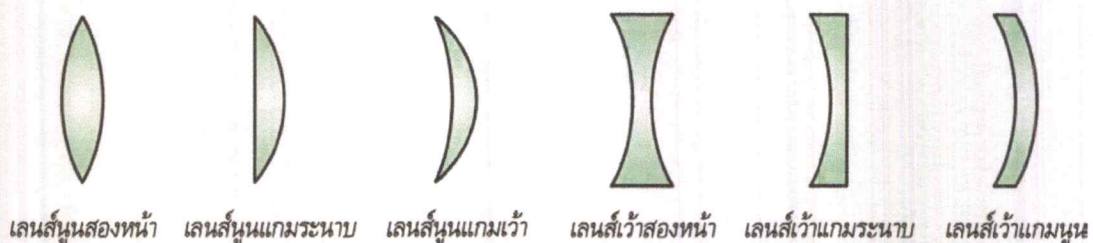
ประเภทไฟล์	ย่อมาจากคำว่า	ลักษณะการใช้งาน
EPS	Encapsulated Postscript	สร้างขึ้นมาเพื่อใช้งาน ออกแบบสื่อสิ่งพิมพ์ เป็นสกุลไฟล์เวกเตอร์มาตรฐานใช้งานได้กับโปรแกรมหลายโปรแกรม สามารถทำการแยกสีเพื่องานพิมพ์ได้ นอกจากนี้ยังใช้ในการเซฟไฟล์ จากโปรแกรมหนึ่ง

		เพื่อนำไปโหลดใช้งานในอีกโปรแกรมหนึ่งอีกด้วย ไฟล์ชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่กว่าไฟล์เวกเตอร์ ชนิดอื่นๆ
AI	Adobe Illustrator Sequence	ใช้เป็นสกุลไฟล์ของ Adobe Illustrator แกะไขไฟล์ AI บนโปรแกรม Illustrator เท่านั้น
DWG	Drawing file	ใช้เป็นสกุลไฟล์ของโปรแกรม AutoCAD
FLA	Flash	ใช้เป็นสกุลไฟล์ Vector ของโปรแกรม Macromedia Flash ใช้ในการสร้างอนิเมชันบนเว็บเพจ

### 2.13 การหักเหของแสงผ่านเลนส์นูนและเลนส์เว้า

การหักเหของแสง หมายถึง การเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสง เมื่อแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางชนิดหนึ่งไปยังอีกตัวกลางชนิดหนึ่งที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน สาเหตุที่ทำให้แสงหักเหเนื่องจากอัตราเร็วของแสงในตัวกลางทั้งสองไม่เท่ากัน การหักเหของแสงเกิดขึ้นตรงผิวรอยต่อของตัวกลาง ลักษณะการหักเหของแสง เมื่อแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยเข้าสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่า แสงจะหักเหเข้าหาเส้นปกติ ในทางตรงกันข้ามถ้าแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากเข้าสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า แสงจะหักเหออกจากเส้นปกติ

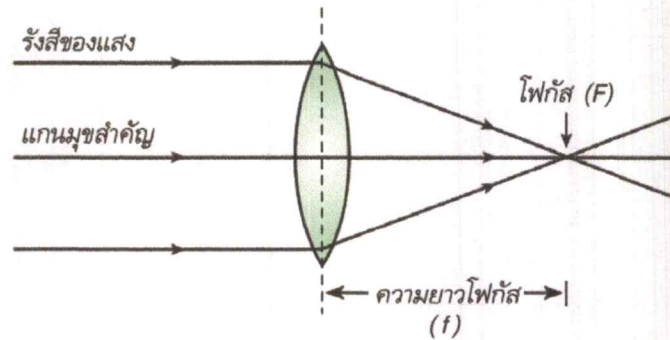
เลนส์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เลนส์นูน (convex lens) ที่มีบริเวณส่วนกลางหนากว่าบริเวณขอบ และเลนส์เว้า (concave lens) ที่มีบริเวณส่วนกลางบางกว่าบริเวณขอบ



รูปที่ 2.23 รูปแบบของเลนส์นูนและเลนส์เว้า

### 2.13.1 เลนส์นูน

เลนส์นูนทำหน้าที่รวมแสงให้มารวมกันที่จุดจุดหนึ่ง เมื่อรังสีของแสงขนานจากแหล่งกำเนิดแสงมาตกกระทบเลนส์นูน จะเกิดการหักเหของแสงไปตัดกันที่จุด ๆ หนึ่ง เรียกว่า โฟกัสของเลนส์ ระยะจากจุดโฟกัสถึงกึ่งกลางเลนส์ เรียกว่า ความยาวโฟกัส และเส้นตรงที่ลากผ่านกึ่งกลางเลนส์และตั้งฉากกับระนาบของเลนส์เรียกว่า แกนमुखสำคัญ



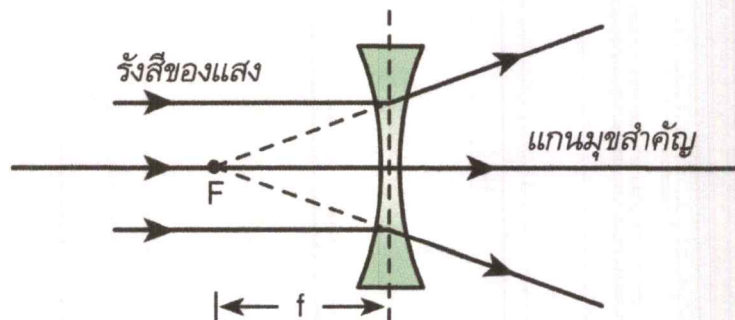
รูปที่ 2.24 การรวมแสงของเลนส์นูน

เมื่อใช้เลนส์นูนเป็นตัวรับแสงแล้วภาพที่เกิดขึ้น เราเรียกระยะห่างจากวัตถุถึงเลนส์ว่า ระยะวัตถุ และเรียกระยะจากตำแหน่งภาพถึงเลนส์ว่า ระยะภาพ

การหาตำแหน่งของภาพเกิดจากเลนส์นูนทำได้โดยการลากแนวรังสีจากวัตถุตกกระทบเลนส์ 2 เส้น เส้นแรกลากตกกระทบจุดกึ่งกลางของเลนส์ รังสีจะไม่เปลี่ยนทิศทางเมื่อผ่านเลนส์ เส้นที่สองให้ลากขนานกับแกนमुखสำคัญ จะได้รังสีหักเหผ่านจุดโฟกัสของเลนส์

### 2.13.2 เลนส์เว้า

เลนส์เว้ามีสมบัติในการกระจายแสงออก แสงขนานที่ผ่านเลนส์เว้าจะกระจายออก เมื่อต่อแนวรังสีที่กระจายออกมาจะตัดกันที่จุดจุดหนึ่งที่ตำแหน่งหน้าเลนส์ เรียกจุดนี้ว่า โฟกัสของเลนส์เว้า เกิดเป็นภาพเสมือนหัวตั้ง ขนาดเล็กกว่าวัตถุเสมอ



รูปที่ 2.25 การรวมแสงของเลนส์เว้า

สมการที่ใช้สำหรับการคำนวณเกี่ยวกับเลนส์นูนและเลนส์เว้า คือ

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

โดยที่  $f$  คือ ความยาวโฟกัส

$s$  คือ ระยะวัตถุ

$s'$  คือ ระยะภาพ

การคำนวณต้องแทนเครื่องหมายของตัวแปรแต่ละตัวแปร ซึ่งหลักการใช้เครื่องหมายสำหรับการคำนวณพิจารณาได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การแทนเครื่องหมายของการคำนวณหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูนและเลนส์เว้า

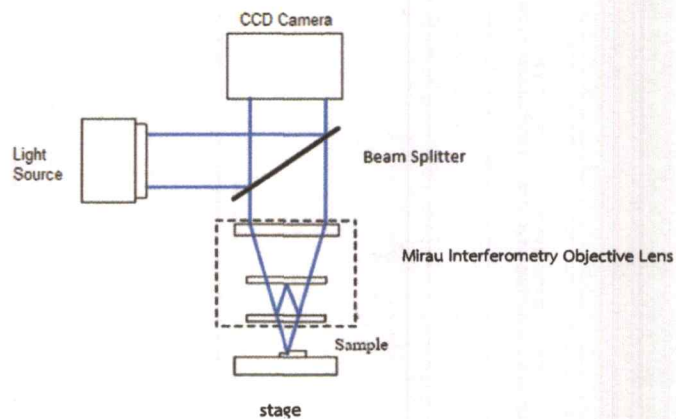
ปริมาณที่พิจารณา	เงื่อนไข	เครื่องหมาย
ความยาวโฟกัส	เลนส์นูน	+
	เลนส์เว้า	-
ระยะวัตถุ	ภาพจริง	+
	ภาพเสมือน	-
ระยะภาพ	ภาพจริง	+
	ภาพเสมือน	-

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 การจัดระบบแสง Mirau Interferometry Objective Lens ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED

เนื่องจาก Blue LED (Light emitting diode) เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 455 นาโนเมตร กำลังไฟฟ้า 2 วัตต์ และความยาวโคฮีเรนซ์สั้นมากคือประมาณ 20 ไมโครเมตร ทำให้การสร้างภาพรีฟlectionแทรกสอดนั้นทำได้ค่อนข้างยากเพราะจะเกิดรีฟlectionแทรกสอดได้เมื่อระยะห่างระหว่าง Beam Splitter ถึงกระจกบานอ้างอิง และระยะห่างระหว่าง Beam Splitter ถึงกระจกของตัวอย่าง จะต้องแตกต่างกันไม่เกินความยาวโคฮีเรนซ์ของแสง ซึ่งก็คือ 20 ไมโครเมตรเท่านั้น

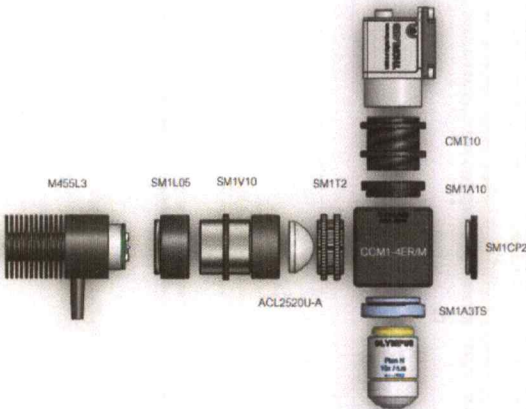


รูปที่ 3.1 ระบบ Mirau Interferometry Objective Lens

อุปกรณ์ของการจัดระบบ Mirau Interferometry Objective Lens ประกอบด้วย

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source): แหล่งกำเนิดแสง Blue LED
2. ตัวแยกแสง (Beam Splitter): กระจกที่สามารถแยกแสงออกเป็น 2 ส่วน โดยแสงจะทะลุผ่านได้ 50% และสะท้อนกลับได้ 50%
3. ชิ้นงานตัวอย่าง (sample): फिल्मบางวาเนเดียม
4. ฉากรับแสง (screen): อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับรับภาพรีฟlectionของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นโดยใช้เป็นกล้อง CCD
5. Mirau Objective Lens: อุปกรณ์สร้างรีฟlectionแทรกสอด
6. เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric): ใช้สำหรับการขยับชิ้นงานตัวอย่าง

จัดอุปกรณ์ดังรูป 3.1 โดยการวางแหล่งกำเนิดแสง Blue LEDในแนวตั้งทำมุมตั้งฉากกับโต๊ะ ลม จากนั้นนำกระจกแยกแสง (BS) มาว่าในระนาบเดียวกันกับแหล่งกำเนิดแสง โดยถัดลงมาจาก กระจกแยกแสงจะวาง Mirau Objective Lens ซึ่งมีความยาวโฟกัส 20 มิลลิเมตร ระยะการทำงาน ของเลนส์ใกล้วัตถุ 7.4 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงต้องวางชิ้นงานตัวอย่างห่างจาก Mirau Objective Lens ไม่เกิน 7.4 มิลลิเมตร และสามารถดูภาพวีการแทรกสอดของแสงได้จากกล้อง CCD โดยวางตั้งฉาก กับกระจกแยกแสง



รูปที่ 3.2 องค์ประกอบระบบแสง Mirau Interferometry Objective Lens

เมื่อจัดอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว จะทำให้เกิดรีฟการแทรกสอด ซึ่งหลักการของระบบ Mirau Interferometry Objective Lens คือ การที่แสง 2 ลำเดินทางมาแทรกสอดกันที่ฉากรับ โดยแสงจะ เดินทางจากแหล่งกำเนิดแสงส่องไปยังกระจกแยกแสงชิ้นที่1 ลำแสงจะถูกส่งผ่านไปยัง Mirau Objective Lens ภายใน Mirau Objective Lens แสงจะเดินทางผ่านเลนส์นูนแกมระนาบเพื่อรวม แสง จากนั้นแสงจะเดินทางไปกระทบกระจกแยกชิ้นที่2แสงในตัวของเลนส์เกิดการแบ่งแสงออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะสะท้อนไปยังกระจกอ้างอิง และจะมีการสะท้อนไปยังกระจกแยกแสงแยกชิ้นที่2 อีกครั้ง ส่วนที่สองจะถูกส่งผ่านไปยังชิ้นงานตัวอย่าง และจะสะท้อนไปยังกระจกแยกแสงแยกชิ้นที่2 แสงสองลำจะมาแทรกสอดกันที่กระจกแยกแสงแยกชิ้นที่2ก่อนจะเดินทางไปยังเลนส์นูนแกมระนาบ ออกจาก Mirau Objective Lens ไปกระทบกับกระจกแยกแสงชิ้นที่ 1 แล้วเกิดการสะท้อนไปยังฉากรับ แสง

3.2 ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานที่ตรวจสอบ

3.2.1. เพียโซอิเล็กทริกและสเตรนเกจ

ในส่วนนี้จะทำการให้โวลต์เตจแก่ผลึกเพียโซ เพื่อให้ผลึกเพียโซยับซึ่งผลึกเพียโซจะ ติดอยู่กับกระจกด้านหนึ่งของระบบการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสันทำให้ชิ้นงานที่ตรวจสอบ เลื่อนไปตามระยะที่ต้องการ จากนั้นจะทำการบันทึกภาพวีการแทรกสอดที่ระยะต่างๆของชิ้นงานที่

เลื่อนไป โดยระยะที่ผลึกเพียโซเลื่อนไปนั้นจะถูกอ่านค่าโดยอุปกรณ์สเตรนเกจ อุปกรณ์ทั้งสองจะเชื่อมต่อกันและใช้โปรแกรมในการควบคุมระยะที่ต้องการให้ผลึกเพียโซเลื่อนไป โดยที่สเตรนเกจจะบ่งบอกว่าผลึกเพียโซนั้นมีการยืดหรือหดเป็นระยะเท่าใด ผลึกเพียโซเปลี่ยนระยะเท่ากับที่สั่งในโปรแกรมหรือไม่ เนื่องจากคุณสมบัติของสเตรนเกจนั้นสามารถอ่านค่าความเครียดของวัสดุและสามารถแปลงโดยใช้สมการกลายเป็นค่าระยะทางที่เปลี่ยนแปลงได้เมื่อวัสดุมีความเครียดเปลี่ยนไป ด้วยเหตุนี้จึงใช้สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ที่จะป้อนค่ากลับมาสู่การทดลองว่า ผลึกเพียโซขยับไปจริงหรือไม่และขยับไปเท่าไร ทั้งนี้จะต้องทำการทดสอบก่อนว่าสเตรนเกจนั้นแสดงค่าระยะทางที่ผลึกเพียโซเลื่อนไปอย่างถูกต้องคือระยะทางที่สั่งโปรแกรมให้ขยับเคลื่อนผลึกเพียโซกับค่าระยะทางที่แสดงบนอุปกรณ์สเตรนเกจนั้นเป็นค่าเดียวกัน

### 3.2.2 การเชื่อมต่อ Piezo Driver T-Cube (KPZ101) กับ Strain Gauge Reader T-Cube (TSG001)



(ก)



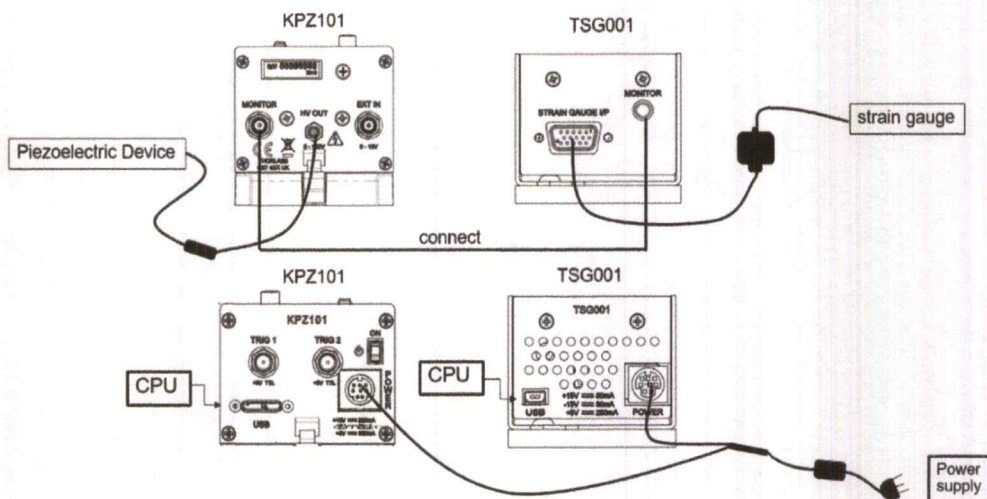
(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) การเชื่อมต่อ Piezo Driver และ Strain Gauge Reader กับ computer  
(ข) การเชื่อมต่อระหว่าง Piezo Driver กับ Strain Gauge Reader

จากรูปที่ 3.2 เป็นการเชื่อมต่อ Piezo Driver กับ Strain Gauge Reader เพื่อควบคุมและอ่านค่าของผลึกเพียโซที่ใช้ในการขยับชิ้นงานที่ตรวจสอบโดยควบคุมการขยับเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อจ่ายแรงดันให้กับ Piezo Driver ระยะที่ผลึกเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ยืดหรือหดจะถูกอ่านค่าด้วย Strain Gauge Reader



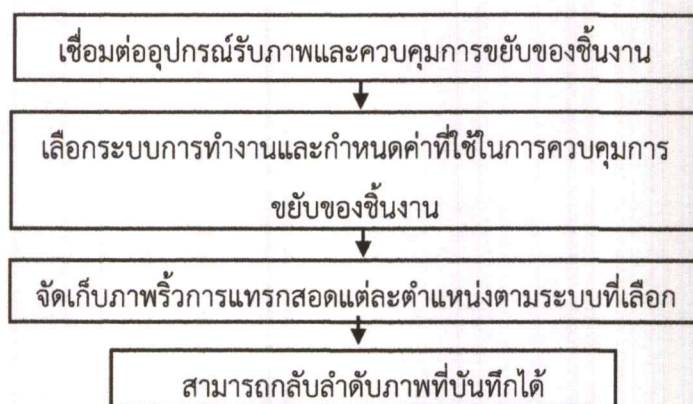
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการประกอบเพียโซอิเล็กทรอนิกส์และสเตรนเกจเข้ากับระบบการควบคุม



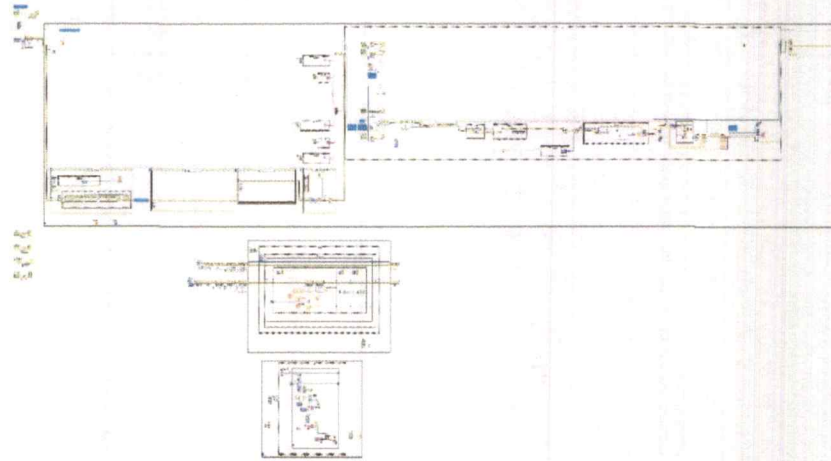
รูปที่ 3.5 แผนผังการเชื่อมต่อ Piezo Driver กับ Strain Gauge Reader

### 3.3 สร้างโปรแกรมบันทึกภาพ

เขียนโปรแกรมในการบันทึกภาพวีรกรรมแทรกสอดของแสง โดยให้โปรแกรมสามารถบันทึกภาพได้ทั้งการบันทึกด้วยตัวเอง และการบันทึกภาพด้วยระบบอัตโนมัติ ซึ่งในการสร้างโปรแกรมบันทึกภาพจะใช้โปรแกรม Labview เป็นตัวเชื่อมต่อกล้อง CCD, Piezo Driver T-Cube (KPZ101) กับ Strain Gauge Reader T-Cube (TSG001) สรุปขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเป็นแผนผังการทำงานได้ดังรูปที่ 3.6



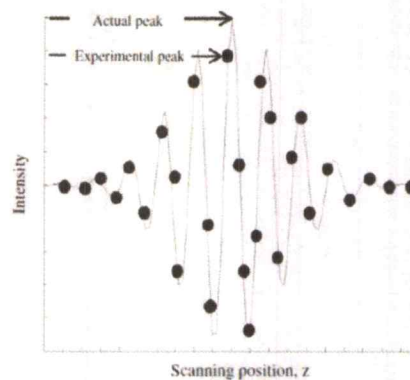
รูปที่ 3.6 แผนผังการทำงานโปรแกรมบันทึกภาพ



รูปที่ 3.7 block diagram โปรแกรมที่ใช้ควบคุม Piezo Driver

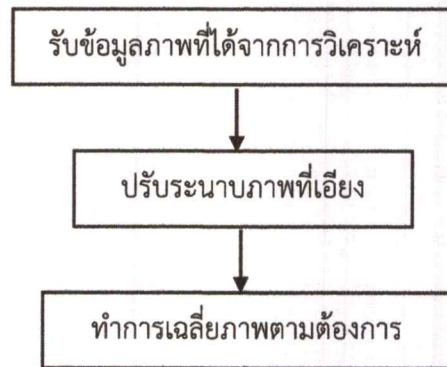
### 3.4 การวิเคราะห์ภาพ

สำหรับการบันทึก interferogram วัตถุตั้งอยู่บนแท่น PZT โดยจะค่อยๆขยับไปตามทิศทางในแนวแกน Z และถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ เพราะ Blue LED มีความยาวคลื่นกลางเป็น 455 นาโนเมตร และเมื่อขยับ PZT ให้เป็น 50 นาโนเมตร และ 100 นาโนเมตร แสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวของชิ้นงานที่วางอยู่บนแท่น PZT จะทำให้เกิดฟริ้งบนฉากรับภาพ และฟริ้งที่เกิดจะถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD เมื่อขยับ PZT ไปในแนวแกน Z ในระยะที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้เกิดความเข้มของแสงในแต่ละภาพที่แตกต่างกัน เพราะในการเกิดฟริ้งนั้น จะมีความเข้มแสงที่มากที่สุดเพียงจุดเดียว คือจุดที่ระยะของแสงที่สะท้อนจากตัวแยกแสงกระทบกับผิวของชิ้นงานที่ตรวจสอบ เท่ากับระยะของแสงที่สะท้อนจากตัวแยกแสงกับกระจกอ้างอิง ยกตัวอย่างเช่น เราสามารถเก็บบันทึกรูปภาพได้ทั้งหมด 100 ภาพ โดยที่พิกเซลที่ 1 ของทั้ง 100 ภาพ อาจจะมีค่าความเข้มแสงมากที่สุดในภาพที่ 50 ซึ่งค่าความเข้มของแสงจะพบได้มากที่สุดเพียงค่าเดียวและความเข้มของแสงที่เกิดขึ้นในแต่ละภาพที่พิกเซลต่างกัน เกิดจากการขยับ PZT ในแนวแกน Z



รูปที่ 3.8 interferogram ของภาพใน 1 พิกเซลที่บันทึกด้วยกล้อง CCD

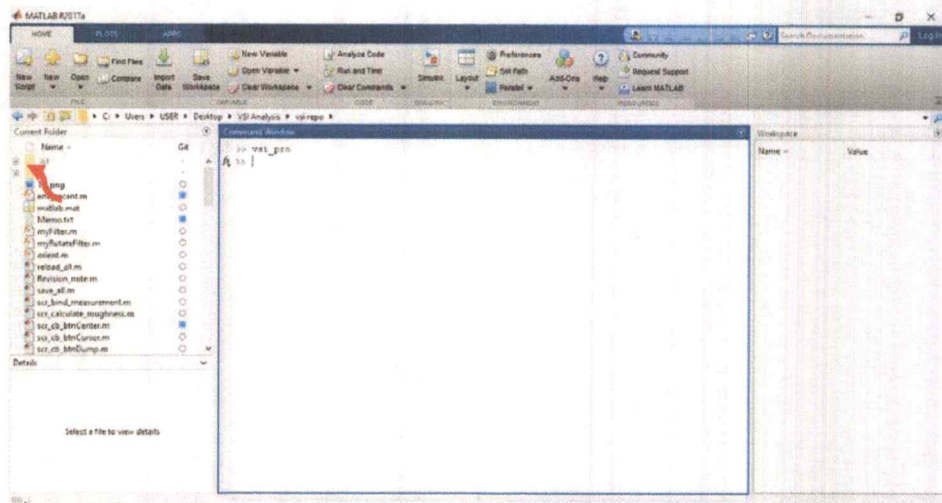
ในโครงการพิเศษนี้มีการพัฒนาโปรแกรม Matlab สำหรับการวิเคราะห์ภาพรีจิสเทรชัน สอด ซึ่งจะมีการพัฒนาในเรื่องของไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวเนื่องจากมีการรบกวนของระบบภายนอก และความเอียงของระนาบภาพสามมิติ โดยมีการเปลี่ยนพัฒนาตามแผนผังตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.9 แผนผังการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์รีจิสเทรชัน

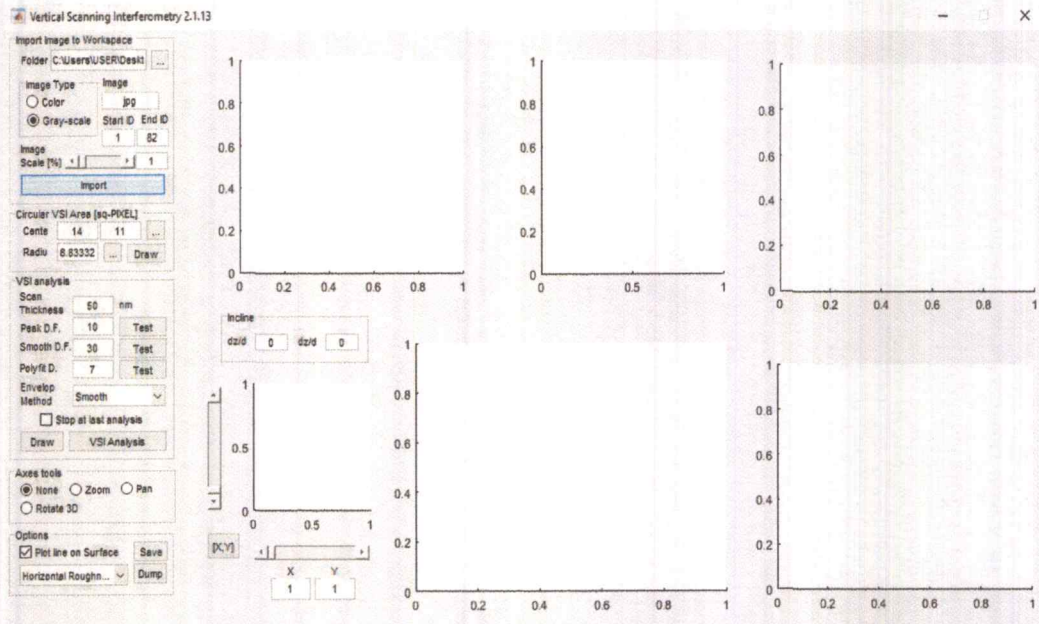
### วิธีการใช้โปรแกรม

1. เปิดโปรแกรม Matlab
2. เปิดโฟลเดอร์ที่เก็บโปรแกรม VSI Analysis > vsi repo



รูปที่ 3.10 หน้าต่าง Matlab

3. พิมพ์ vsi\_pro ที่หน้า Command Window แล้วกด Enter โปรแกรม Matlab จะทำการเปิดหน้า user



รูปที่ 3.11 หน้าต่างผู้ใช้งาน

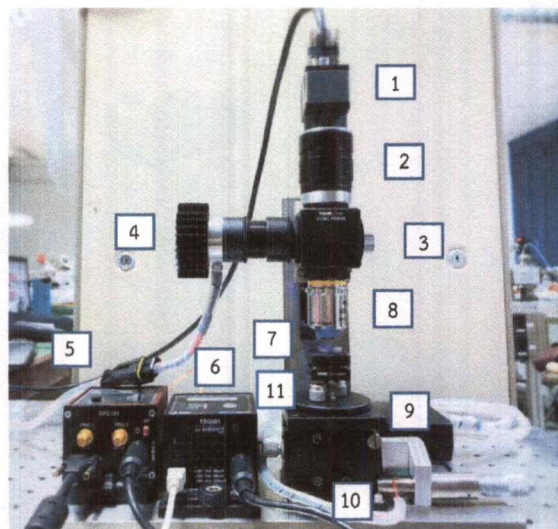
4. เลือกโฟลเดอร์ที่บันทึกภาพรีจิสเตอร์แทรกสอด
5. ช่อง Image type เลือก Gray-scale
6. เลือกภาพแรกที่ต้องการวิเคราะห์ (Start ID) และภาพสุดท้ายที่ต้องการวิเคราะห์ (End ID)
7. กำหนด Image Scale ตามที่ผู้ทำการทดลองต้องการวัด
8. กด Import
9. ช่อง Circular VSI Area กดปุ่ม ... ของ center เพื่อใส่จุดศูนย์กลางของภาพที่นำมาวิเคราะห์
10. ช่อง Circular VSI Area กดปุ่ม ... ของ Radian เพื่อใส่ขอบเขตของภาพที่นำมาวิเคราะห์
11. กด Draw
12. กำหนดค่า Scan Thickness โดยค่าที่ใส่คือระยะเพียงโซที่ขยับไปแต่ละครั้ง
13. กด VSI Analysis รอจนกว่าโปรแกรมจะวิเคราะห์ จากนั้นกด Draw เพื่อสร้างรูปสามมิติ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลจากการจัดระบบแสง Mirau Interferometry Objective Lens ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED

จากการปรับปรุงพัฒนาระบบการจัดแสงเพื่อให้สะดวกต่อการหาวิธีการแทรกสอดของแสงเพื่อใช้ตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง ผู้จัดทำโครงการงานพิเศษได้ปรับเปลี่ยนจากระบบการจัดแสงแบบไมเคิลสันอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์เป็นมิเรออินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์จนได้ระบบดังรูป 4.1 ซึ่งระบบที่ได้จัดทำมีขอบเขตที่สามารถตรวจสอบเป็นพื้นที่วงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร สามารถหาวิธีการแทรกสอดของแสงโดยที่ระยะห่างระหว่างชิ้นงานที่ตรวจสอบกับหน้าเลนส์คือ 7.4 มิลลิเมตร มีอุปกรณ์ที่สำคัญได้แก่



รูปที่ 4.1 การจัดอุปกรณ์ของระบบแสง Mirau Interferometry

หมายเลข 1 คือ กล้อง CCD สำหรับบันทึกภาพรีวการแทรกสอด

หมายเลข 2 คือ เลนส์รับภาพ

หมายเลข 3 คือ Cule Beam Splitter

หมายเลข 4 คือ แหล่งกำเนิดแสง Blue LED ความยาวคลื่น 455 นาโนเมตร กำลังไฟ 2 วัตต์

หมายเลข 5 คือ Piezo Driver T-Cube (KPZ101)

หมายเลข 6 คือ Strain Gauge Reader T-Cube (TSG001)

หมายเลข 7 คือ ชิ้นงานที่ตรวจสอบ

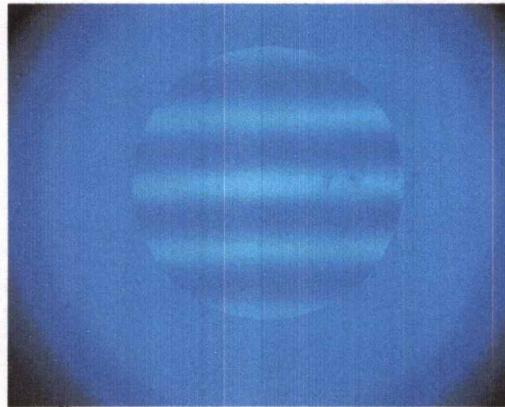
หมายเลข 8 คือ Mirau Interferometry Objective Lens

หมายเลข 9 คือ ฐานวางชิ้นงานที่สามารถยับขึ้นลงได้

หมายเลข 10 คือ Piezo และ Strain Gauge

หมายเลข 11 คือ ตัวปรับระนาบชิ้นงาน

เมื่อทดลองการจัดระบบแสง Mirau Interferometry Objective Lens ด้วย Blue LED พบว่าริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นมีลักษณะเรียงกันเป็นเส้นตรงขนานกันระหว่างแถบมืดแถบสว่างดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพริ้วการแทรกสอดเมื่อแหล่งกำเนิดแสงคือ Blue LED

#### 4.2 การพัฒนาโปรแกรมบันทึกภาพ

จากการเขียนโปรแกรมบันทึกภาพ เราสามารถควบคุมอุปกรณ์ให้เคลื่อนที่ขึ้นงานได้ตามกำหนดและสามารถจัดเก็บภาพริ้วการแทรกสอดของแสงได้ตามที่ต้องการโดยสามารถยับเพียงโซอิเล็ทริกได้ต่ำสุดที่ครั้งละ 20 นาโนเมตร ถ้าเครื่องที่ในระดับที่น้อยกว่านั้นเพียงโซอิเล็ทริกจะมีการสั่นทำให้ตำแหน่งไม่คงที่



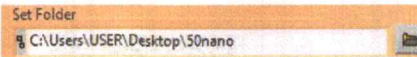
รูปที่ 4.3 Front Panel โปรแกรมที่ใช้ควบคุม Piezo Driver

## วิธีการใช้โปรแกรม

1. เปิดโปรแกรม Piezo Stage control

2. เลือก พอร์ตกล้อง (Camera name) และตั้งค่ากล้อง

3. เลือกโฟลเดอร์ที่ต้องการบันทึกภาพ



4. เลือกระบบการทำงาน (Process) โดยจะแบ่งออกเป็น Automatic กับ Manual

### 4.1 Automatic

1. ตั้งค่า Automatic Setting โดยใส่ระยะที่ต้องการให้เพียโซขยับที่ช่อง Step size และใส่ตำแหน่งที่ต้องการให้เพียโซหยุดที่ช่อง End Position

2. กด Run ที่สัญลักษณ์ ⇨

3. กดช่อง Init Camera เพื่อตั้งค่ากล้องเลือกค่า 4X ที่ช่อง Zoom จากนั้นปรับเปลี่ยน Pixelclock และ Exposure ตามความต้องการ

4. กด Start Live

5. เมื่อกด Run แล้วรอจนกว่า strain gauge reader อ่านค่า null ถอยหลังจนแสดงค่าเป็น 0 หรือใกล้เคียง

6. กด START เพื่อเริ่มบันทึกรูปภาพ ระบบจะทำการบันทึกภาพและขยับชิ้นงานอ้างอิงจนถึงระยะที่กำหนดโดยอัตโนมัติ

### 4.2 Manual

1. ตั้งค่า Manual Setting โดยใส่ระยะที่ต้องการให้เพียโซขยับที่ช่อง Step Size

2. กด Run ที่สัญลักษณ์ ⇨

3. กดช่อง Init Camera เพื่อตั้งค่ากล้องเลือกค่า 4X ที่ช่อง Zoom จากนั้นปรับเปลี่ยน Pixelclock และ Exposure ตามความต้องการ

4. กด Start Live

5. เมื่อกด Run แล้วรอจนกว่า strain gauge reader อ่านค่า null ถอยหลังจนแสดงค่าเป็น 0 หรือใกล้เคียง

6. กดปุ่ม Start เพื่อขยับเพียโซ

7. กดปุ่ม Save Picture เพื่อบันทึกภาพ

8. ทำข้อ 4 กับข้อ 5 ซ้ำไปจนกว่าจะถึงตำแหน่งที่ต้องการ

5. เมื่อทำการบันทึกภาพรีวการแทรกสอดเสร็จแล้ว นำรูปที่ได้ทั้งหมดมากลับลำดับภาพโดยการเลือกโฟลเดอร์ที่เราบันทึกรูปที่ Folder of JPEG file และเลือกโฟลเดอร์ที่ต้องการเปลี่ยนลำดับภาพใหม่ที่ Folder to JPEG file

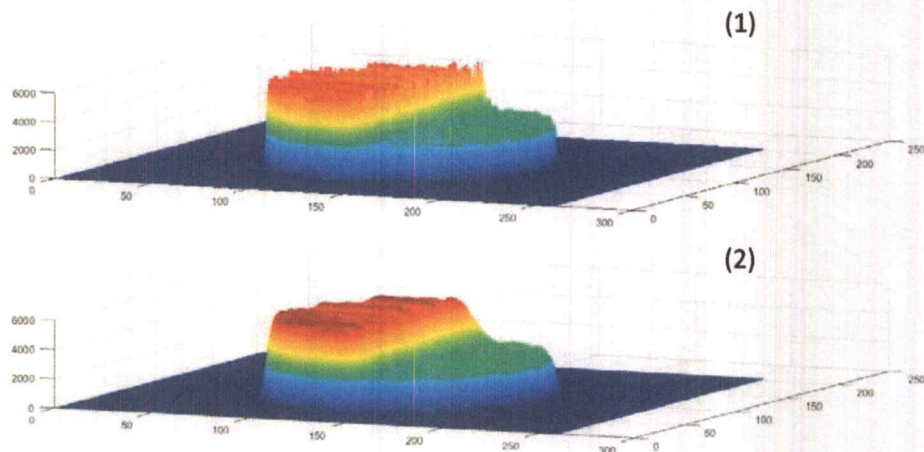
6. ใส่จำนวนรูปภาพที่บันทึกลงในช่อง Last number of file โดยสามารถดูจำนวนรูปภาพได้ที่ Pictures Order

7. กด OK ที่ช่อง Change image order

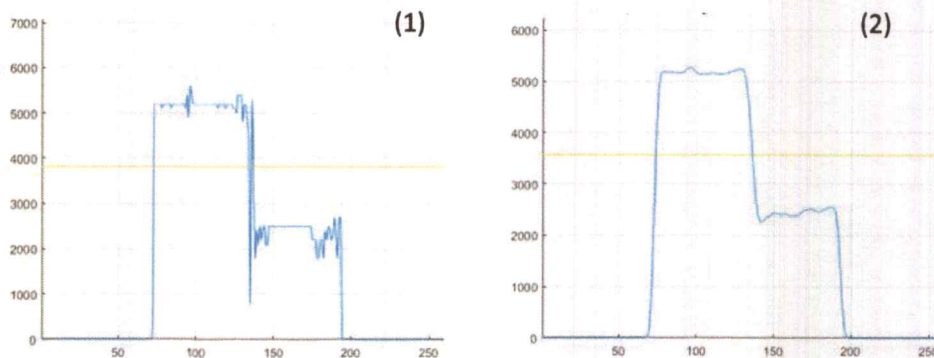
สามารถตั้งค่ากล้องโดยใช้ชื่อกำสั่ง Attribute Name โดยเลือกคำสั่งที่ต้องการตั้งค่า และสามารถใส่ค่าได้ในช่อง Attribute Value

#### 4.3 การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

จากการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ทำให้ภาพสามมิติมีลักษณะเรียบขึ้นซึ่งจะสามารถลดปัญหาการรบกวนจากระบบภายนอก และแก้ไขปัญหาคอมพิวเตอร์ของระบบภาพสามมิติ

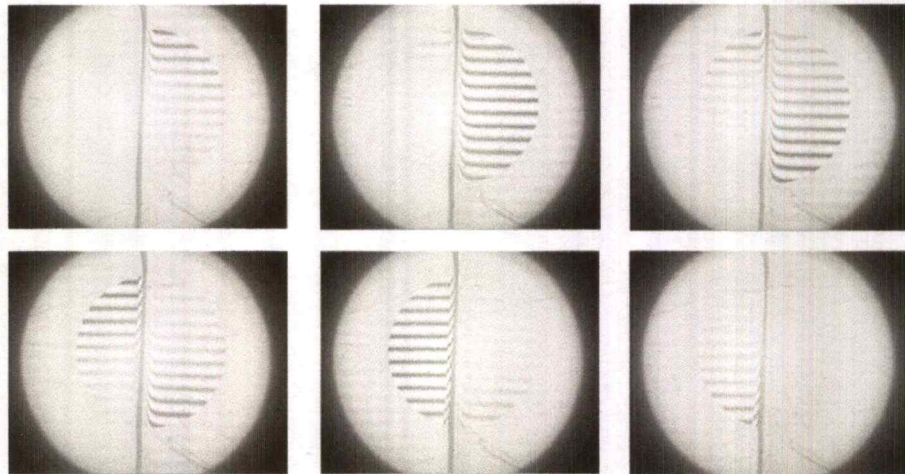


รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบระหว่างภาพที่ยังไม่ได้เฉลี่ย (1) กับภาพที่มีการเฉลี่ยแล้ว (2)



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบระหว่างภาพตัดขวางที่ยังไม่ได้เฉลี่ย (1) กับภาพที่มีการเฉลี่ยแล้ว (2)

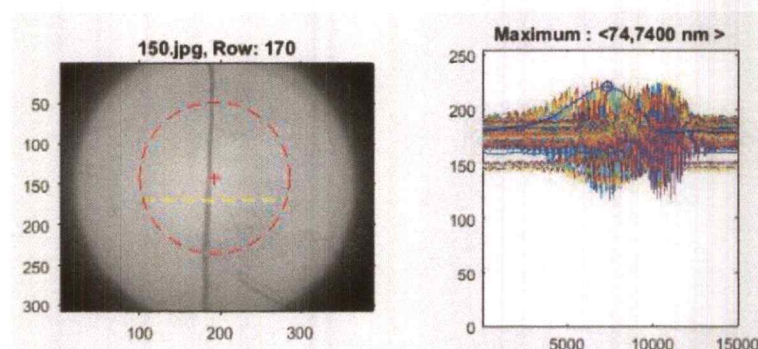
#### 4.4 ผลการทดลองจากการจัดระบบแสง Mirau Interferometry Objective Lens ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED กับกระจกที่มีระดับพื้นผิวด้านขวาสูงกว่าด้านซ้าย



รูปที่ 4.6 ภาพรีวการแทรกสอดของผิวตัวอย่างทดสอบเป็นกระจกความเรียบสูงที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มโดยลักษณะพื้นผิวด้านขวาสูงกว่าพื้นผิวด้านซ้าย

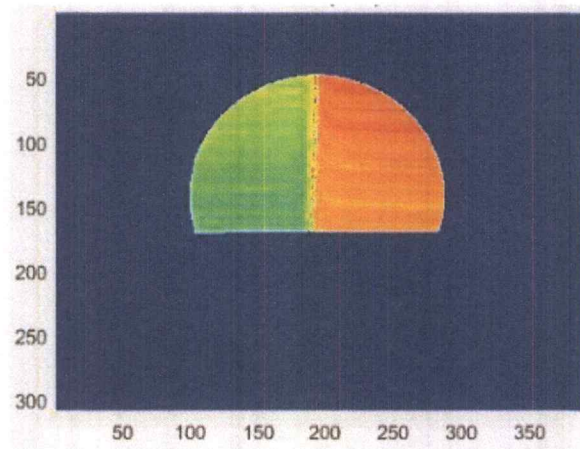
##### 4.4.1 การใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์ความเรียบพื้นผิวของตัวอย่าง (VSI Analyze Simulation)

จากการทดลองได้ทำการเก็บรูปรีวการแทรกสอดของพื้นผิวตัวอย่างของชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบด้วยโปรแกรม LabVIEW เมื่อได้ภาพรีวการแทรกสอดตามที่เรากำลังต้องการ จึงนำภาพที่ได้ไปวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม Matlab

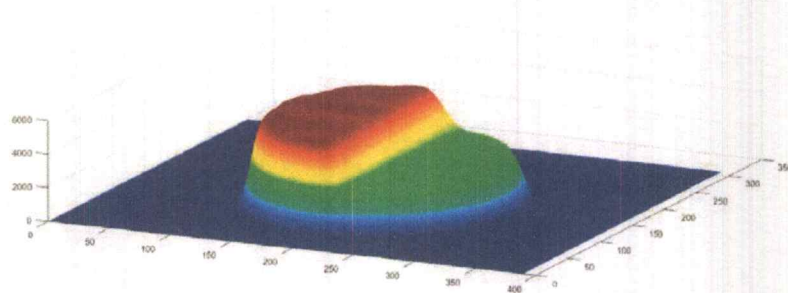


รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม Matlab แต่ละพิกเซลของภาพที่บันทึกได้ทั้งหมด

จากรูปที่ 4.7 เป็นการวิเคราะห์ภาพทั้งหมดที่บันทึกได้ โดยวิเคราะห์ทีละพิกเซลในแต่ละแถวตามแนวเส้นประสีแดง กราฟที่ได้จะแสดงความเข้มแสงของแต่ละพิกเซลใน 1 รูป โดยจุดสูงสุดของกราฟคือจุดที่มีความเข้มแสงมากที่สุด



รูปที่ 4.8 ภาพมุมสูงของภาพที่วิเคราะห์



รูปที่ 4.9 ภาพ 3D ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่มีพื้นผิวความสูงต่างระดับกัน

จากรูปที่ 4.9 จะแสดงลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์และเฉลี่ยภาพเรียบร้อยแล้ว โดยในแนวแกน z จะแสดงความสูงของพื้นผิวที่วิเคราะห์ แกน x และ แกน y จะแสดงพิกเซลทั้งหมดของรูปภาพ

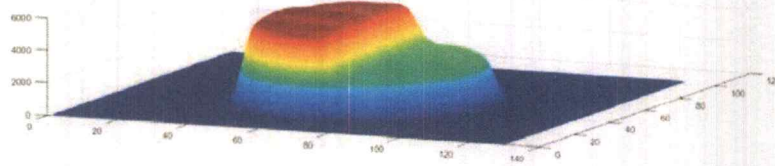
#### 4.5 ผลการวิเคราะห์ภาพรีการแทรกสอด

เนื่องจากทฤษฎีของการวิเคราะห์ภาพเพื่อสร้างภาพสามมิติระยะที่แตกต่างของการขยับเพียที่ใช้ในการเก็บภาพนำมาวิเคราะห์มีผลต่อการประมวลผลภาพเพื่อสร้างภาพสามมิติ ผู้จัดทำโครงการพิเศษจึงได้ทำการทดลองขยับเพียโซในระยะ 20 นาโนเมตร 50 นาโนเมตร 100 นาโนเมตรและ 150 นาโนเมตร เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของภาพสามมิติที่ได้จากการประมวลผล

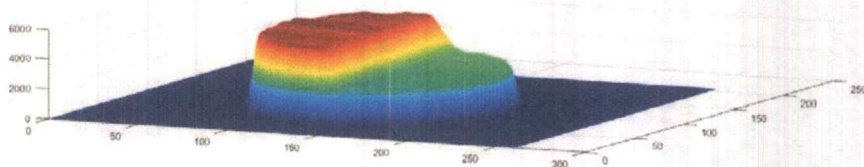
#### 4.5.1. ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพ็ชโซขยับไปเป็นระยะ 20 นาโนเมตร

เมื่อเก็บภาพรีจิสเทรชันที่เพ็ชโซขยับไปเป็นระยะ 20 นาโนเมตร โดยทุกครั้ง  
ที่เพ็ชโซขยับจะทำการบันทึกภาพรีจิสเทรชันที่เกิดขึ้น ทำให้ได้ภาพรีจิสเทรชันทั้งหมด  
300 ภาพ และนำภาพที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matlab ซึ่งความละเอียดของภาพที่ได้มี  
มากเกินไปทำให้ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ภาพนาน จึงลดความละเอียดของภาพลงเพื่อให้ใช้  
ระยะเวลาในการวิเคราะห์ลดลง ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ได้ทดลองลดความละเอียดของภาพจาก  
100% เหลือ 5%, 10% และ 15%

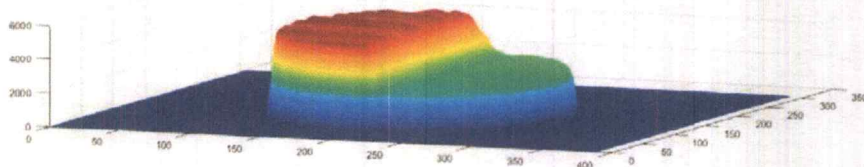
เมื่อนำภาพที่บันทึกได้มาลดความละเอียดของภาพให้เหลือ 5%, 10% และ 15%  
และนำภาพที่ได้ไปทำการเฉลี่ยภาพจะเห็นได้ว่า ความละเอียดของภาพ 3D Surface ที่ได้จากการ  
วิเคราะห์มีลักษณะที่แตกต่างกัน ผลการวัดความสูงของชั้นเมื่อเฉลี่ยค่าจากการวัดชิ้นงานเมื่อลดความ  
ละเอียดของภาพให้เหลือ 5%, 10% และ 15% ได้เท่ากับ 2,790 นาโนเมตร



รูปที่ 4.10 ภาพ 3D Surface ขยับทีละระยะ 20 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 5%



รูปที่ 4.11 ภาพ 3D Surface ขยับทีละระยะ 20 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 10%

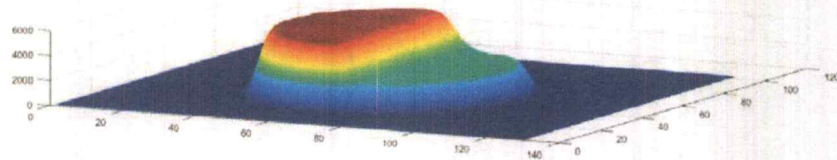


รูปที่ 4.12 ภาพ 3D Surface ขยับทีละระยะ 20 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 15%

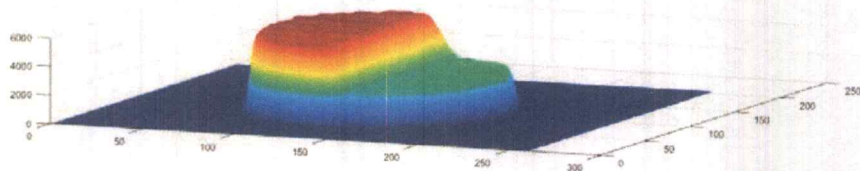
#### 4.5.2. ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซฮัยปไปเป็นระยะ 50 นาโนเมตร

เมื่อเก็บภาพรีวการแทรกสอดที่เพียโซฮัยปไปเป็นระยะ 50 นาโนเมตร โดยทุกครั้ง  
ที่เพียโซฮัยปจะทำการบันทึกภาพรีวการแทรกสอดที่เกิดขึ้น ทำให้ได้ภาพรีวการแทรกสอดทั้งหมด  
120 ภาพ และนำภาพที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matlab ซึ่งความละเอียดของภาพที่ได้มี  
มากเกินไปทำให้ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ภาพนาน จึงลดความละเอียดของภาพลงเพื่อให้ใช้  
ระยะเวลาในการวิเคราะห์ลดลง ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ ได้ทดลองลดความละเอียดของภาพจาก  
100% เหลือ 5%, 10% และ 15%

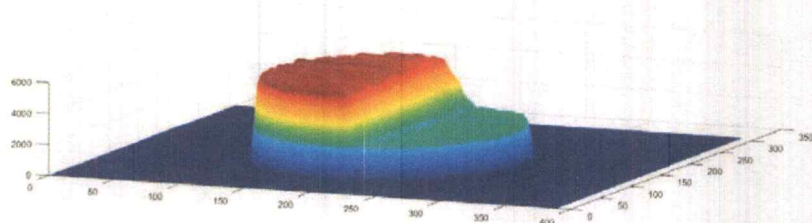
เมื่อนำภาพที่บันทึกได้มาลดความละเอียดของภาพให้เหลือ 5%, 10% และ 15%  
และนำภาพที่ได้ไปทำการเฉลี่ยภาพจะเห็นได้ว่า ความละเอียดของภาพ 3D Surface ที่ได้จากการ  
วิเคราะห์มีลักษณะที่แตกต่างกัน ผลการวัดความสูงของชั้นเมื่อเฉลี่ยค่าจากการวัดชิ้นงานเมื่อลดความ  
ละเอียดของภาพให้เหลือ 5%, 10% และ 15% ได้เท่ากับ 2,860 นาโนเมตร



รูปที่ 4.13 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะ 50 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 5%



รูปที่ 4.14 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะ 50 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 10%

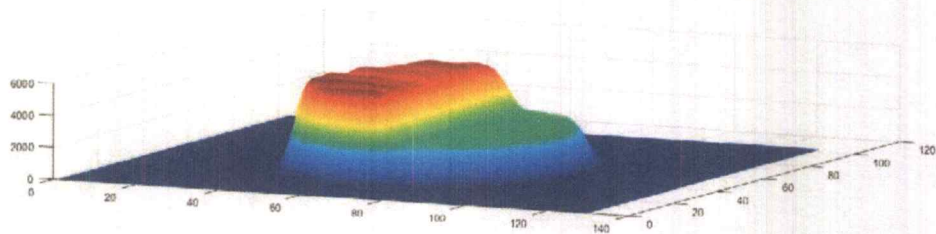


รูปที่ 4.15 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะ 50 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 15%

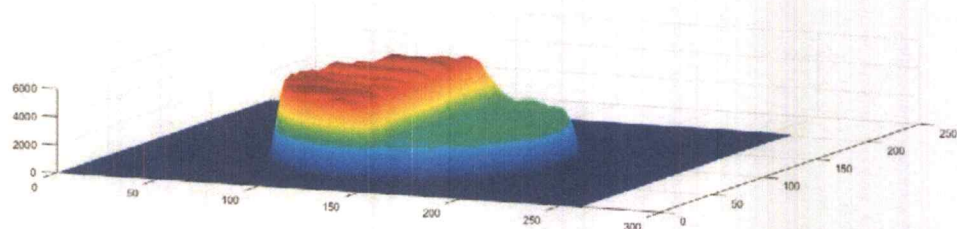
#### 4.5.3. ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซยับไปเป็นระยะ 100 นาโนเมตร

เมื่อเก็บภาพรีการแทรกสอดที่เพียโซยับไปเป็นระยะ 100 นาโนเมตร โดยทุกครั้ง ที่เพียโซยับจะทำการบันทึกภาพรีการแทรกสอดที่เกิดขึ้น ทำให้ได้ภาพรีการแทรกสอดทั้งหมด 60 ภาพ และนำภาพที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matlab ซึ่งความละเอียดของภาพที่ได้มีมาก เกินไปทำให้ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ภาพนาน จึงลดความละเอียดของภาพลงเพื่อให้ใช้ระยะเวลา ในการวิเคราะห์ลดลง ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ ได้ทดลองลดความละเอียดของภาพจาก 100% เหลือ 5%, 10% และ 15%

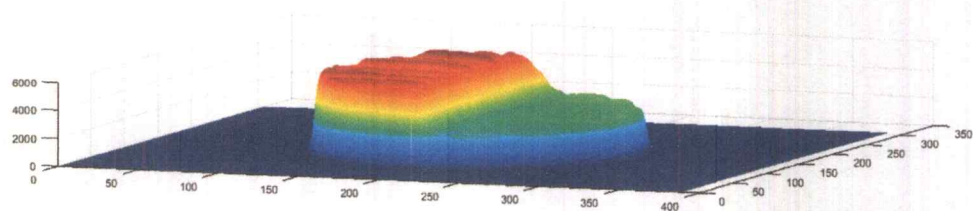
เมื่อนำภาพที่บันทึกได้มาลดความละเอียดของภาพให้เหลือ 5%, 10% และ 15% และนำภาพที่ได้ไปทำการเฉลี่ยภาพจะเห็นได้ว่า ความละเอียดของภาพ 3D Surface ที่ได้จากการ วิเคราะห์มีลักษณะที่แตกต่างกัน ผลการวัดความสูงของชั้นเมื่อเฉลี่ยค่าจากการวัดชิ้นงานเมื่อลดความ ละเอียดของภาพให้เหลือ 5%, 10% และ 15% ได้เท่ากับ 2,890 นาโนเมตร



รูปที่ 4.16 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะ 100 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 5%



รูปที่ 4.17 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะ 100 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 10%

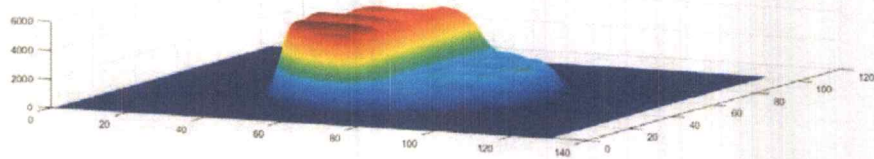


รูปที่ 4.18 ภาพ 3D Surface ขยับที่ระยะ 100 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 15%

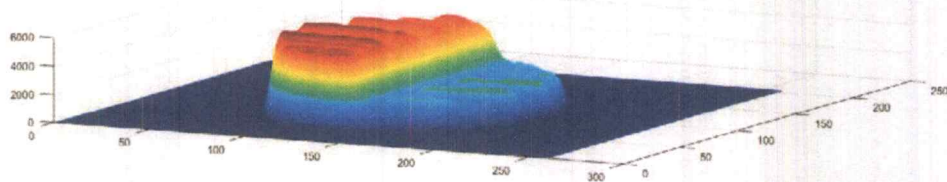
#### 4.5.4. ผลการวิเคราะห์ภาพเมื่อเพียโซซยับไปเป็นระยะ 150 นาโนเมตร

เมื่อเก็บภาพรีการแทรกสอดที่เพียโซซยับไปเป็นระยะ 150 นาโนเมตร โดยทุกครั้ง ที่เพียโซซยับจะทำการบันทึกภาพรีการแทรกสอดที่เกิดขึ้น ทำให้ได้ภาพรีการแทรกสอดทั้งหมด 39 ภาพ และนำภาพที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matlab ซึ่งความละเอียดของภาพที่ได้มีมาก เกินไปทำให้ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ภาพนาน จึงลดความละเอียดของภาพลงเพื่อให้ใช้ระยะเวลา ในการวิเคราะห์ลดลง ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ ได้ทดลองลดความละเอียดของภาพจาก 100% เหลือ 5%, 10% และ 15%

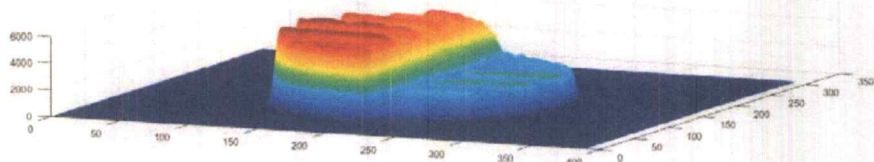
เมื่อนำภาพที่บันทึกได้มาลดความละเอียดของภาพให้เหลือ 5%, 10% และ 15% และนำภาพที่ได้ไปทำการเฉลี่ยภาพจะเห็นได้ว่า ความละเอียดของภาพ 3D Surface ที่ได้จากการ วิเคราะห์มีลักษณะที่แตกต่างกัน ผลการวัดความสูงของชั้นเมื่อเฉลี่ยค่าจากการวัดชิ้นงานเมื่อลดความ ละเอียดของภาพให้เหลือ 5%, 10% และ 15% ได้เท่ากับ 3,130 นาโนเมตร



รูปที่ 4.19 ภาพ 3D Surface ขยับทีละระยะ 150 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 5%



รูปที่ 4.20 ภาพ 3D Surface ขยับทีละระยะ 150 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 10%



รูปที่ 4.21 ภาพ 3D Surface ขยับทีละระยะ 150 นาโนเมตร ความละเอียดภาพเหลือ 15%

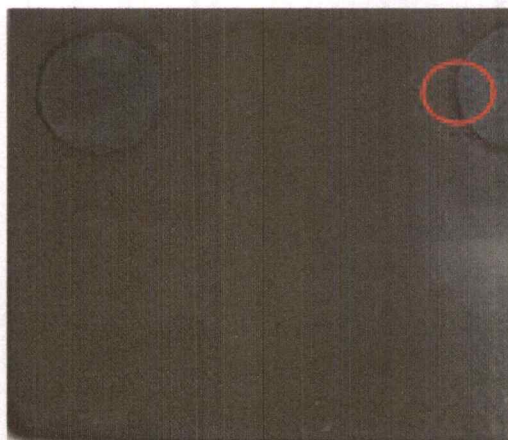
ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพรีเวอร์การแทรกสอดเมื่อเพียโซซัยป์

Scale Scan thickness	5%	10%	15%
20 นาโนเมตร	45 นาที	140 นาที	350 นาที
50 นาโนเมตร	30 นาที	115 นาที	280 นาที
100 นาโนเมตร	25 นาที	65 นาที	210 นาที
150 นาโนเมตร	20 นาที	55 นาที	180 นาที

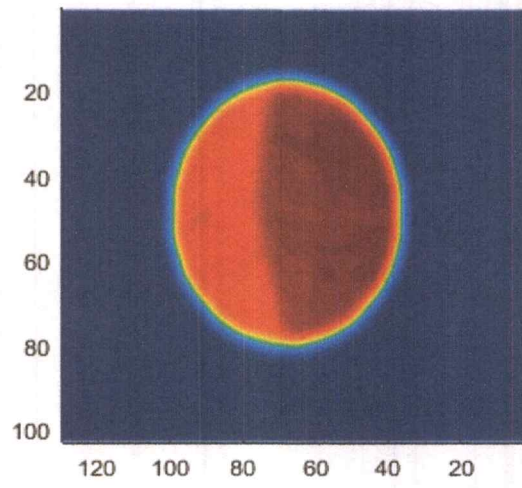
สามารถสรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือระยะที่ขยับไปเป็นระยะ 20 นาโนเมตร และลดความละเอียดภาพให้เหลือ 15% แต่จากการทดลองพบว่าการลดความละเอียดภาพเหลือ 15% ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์นานเกินไป ในโครงการพิเศษนี้จึงเลือกวิเคราะห์ภาพที่ระยะเพียโซซัยป์ไปเป็นระยะ 20 นาโนเมตร และลดความละเอียดภาพเหลือ 5 %

#### 4.6 ผลการทดลองตรวจสอบชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นวงกลม

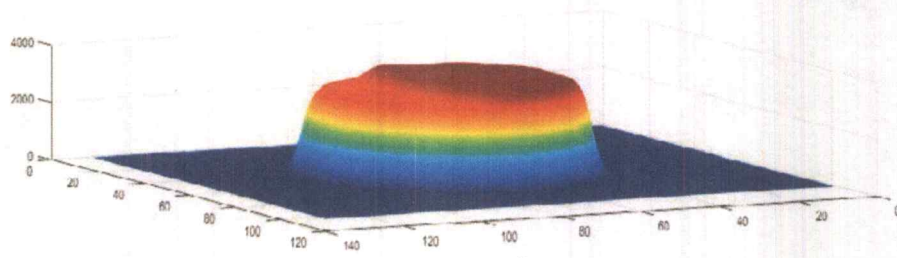
จากการทดลองนำชิ้นงานที่มีการเคลือบฟิล์มให้มีลักษณะเป็นวงกลมที่มีความสูงกว่าพื้นผิวบริเวณรอบข้าง มาตรวจสอบด้วยการจัดระบบแสง Mirau Interferometry Objective Lens ด้วยแหล่งกำเนิดแสง Blue LED ภาพสามมิติที่ได้มีลักษณะเป็นหนึ่งในวงกลมเท่านั้น เนื่องจากระบบที่ใช้ในการตรวจมีข้อจำกัดของแสงที่ออกมาจาก Mirau Interferometry Objective Lens โดยแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ภาพชิ้นงานตัวอย่าง



รูปที่ 4.23 ภาพมุมมองสูง 3D ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง



รูปที่ 4.24 ภาพ 3D ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

ในโครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อจัดเตรียมระบบการวัดโครงร่างพื้นผิวโดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงด้วยการจัดแสงแบบมิเรอ และทำการพัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพรีเวิร์กการแทรกสอดที่สามารถใช้งานได้กับระบบการวัดโครงร่างพื้นผิว จากการทดลองนี้ได้เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสง Blue LED มาใช้ในการทดลองเพราะมีความยาวโคฮีเรนซ์ที่สั้น ทำให้สามารถวัดความเรียบของพื้นผิวได้ในระดับนาโนเมตร การจัดระบบแสงด้วย Blue LED ค่อนข้างมีข้อจำกัดในเรื่องของแสงสว่างที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อม เพื่อให้การจัดแสงมีประสิทธิภาพสูงสุดควรทำในห้องที่มืดไม่มีแสงสว่าง และไม่มีการสั่นจากภายนอกมารบกวนจึงจำเป็นต้องใช้โต๊ะลมเข้ามาช่วย และในการจัดระบบแสงหากปรับระนาบของกระจก 45 องศาให้เอียงมากเกินไป อาจทำให้เรามองไม่เห็นการแทรกสอดของแสงได้ เมื่อได้รีเวิร์กการแทรกสอดที่ต้องการในโครงการพิเศษนี้จะใช้โปรแกรมควบคุมเพียโซอิเล็กทริก และเก็บภาพรีเวิร์กการแทรกสอดที่ได้สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Labview โดยจะเลื่อนเพียโซอิเล็กทริกตั้งแต่ระยะที่เห็นภาพเริ่มชัดไปจนภาพเบลออีกครั้งโดยที่ระยะที่เก็บภาพอยู่ภายในระยะความยาวโคฮีเรนซ์ การวัดปรับระยะจากการควบคุมเพียโซอิเล็กทริกจะเทียบกับ Strain Gauge Reader ว่าระยะที่ขยับไปมีความแม่นยำมากแค่ไหน การเลื่อนเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้รีเวิร์กการแทรกสอดมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะที่ขยับ โดยรีเวิร์กที่สร้างขึ้นจะชัดที่สุดที่ระยะห่างระหว่างกระจกชิ้นงานและกระจกอ้างอิงในเลนส์มิเรอเท่ากัน ดังนั้นกระจกที่นำมาเป็นตัวอย่างได้ทำการเคลือบสารเป็นชั้นที่มีความสูงแตกต่างกัน เมื่อนำไปตรวจสอบหากพบตำแหน่งที่เกิดรีเวิร์กการแทรกสอดที่ชัดในบริเวณตำแหน่งหนึ่ง และหากขยับควบคุมเพียโซอิเล็กทริกต่อไปจนเกิดรีเวิร์กการแทรกสอดอีกบริเวณแสดงว่าพื้นผิวทั้งสองบริเวณมีความสูงที่แตกต่างกัน

ในโครงการพิเศษนี้ทำการเก็บภาพรีเวิร์กการแทรกสอดโดยการขยับเพียโซอิเล็กทริกครั้งละ 20 50 100 และ 150 นาโนเมตร นำภาพที่เก็บได้มาวิเคราะห์โดยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพที่สร้างขึ้นด้วย matlab เมื่อนำภาพสามมิติมาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าในการประมวลผลเพื่อสร้างภาพ 3 มิติ การขยับเพียโซอิเล็กทริกครั้งละ 20 นาโนเมตร จะได้ภาพที่ดีกว่าของ 50 100 และ 150 นาโนเมตร ตามลำดับ และลักษณะของภาพก็ตรงกับลักษณะของกระจกที่เคลือบไป

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1.เนื่องจากการรบกวนของสภาพแวดล้อม ทำให้ระบบเกิดการสั่นจึงมีผลต่อตำแหน่งของรีจิสเตอร์การแทรกสอดจึงอาจทำให้การวิเคราะห์มีการคาดเคลื่อนได้

2.เนื่องจากเพียโซอิเล็กทริกมีข้อจำกัดในการขยับ หากต้องการตรวจสอบพื้นผิวที่มีความขรุขระในระดับที่เล็กลงควรหาเพียโซที่สามารถขยับในระดับที่ต่ำกว่า 10 นาโนเมตร

## เอกสารอ้างอิง

- วิรุณ เล้าพรพิชัยยานุวัฒน์. 2551. “การวัดความขรุขระของผิวสแตนเลสโดยอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์แบบ ไมเคิลสัน.” วิทยาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชามาตรวิทยา คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- ศุภกฤต ช่างทำ และ อิศรียา นิสสัย. 2559. “การปรับปรุงระบบการวัดความเรียบผิวโดยอาศัย หลักการแทรกสอดแบบกวาดแนวตั้ง.” วิทยาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.
- Mathwork. 2562. Movmean. [Online]. Available : <https://ww2.mathworks.cn/help/matlab/ref/movmean.html?requestedDomain=en>
- Sarapuk. 2562. **ทำความเข้าใจ Strain Gauge, Piezoelectric และ Accelerometer.** [Online]. Available : <http://www.biomed.in.th/strain-gauge-piezoelectric-accelerometer-in-medical-engineering/>
- Thorlabs. 2562. PZS001 - Piezoelectric Actuator w/ Strain Gauge. [Online]. Available : <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PZS001>
- Thorlabs. 2562. P KPZ101 - K-Cube Piezo Controller. [Online]. Available : <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=KPZ101>
- Thorlabs. 2562. TSG001 - T-Cube Strain Gauge Reade. [Online]. Available : <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=TSG001>
- Wiroj Sudatham. 2562. ไมเคิลสันอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์. [Online]. Available : <http://pirun.ku.ac.th/~fsciwrs>.

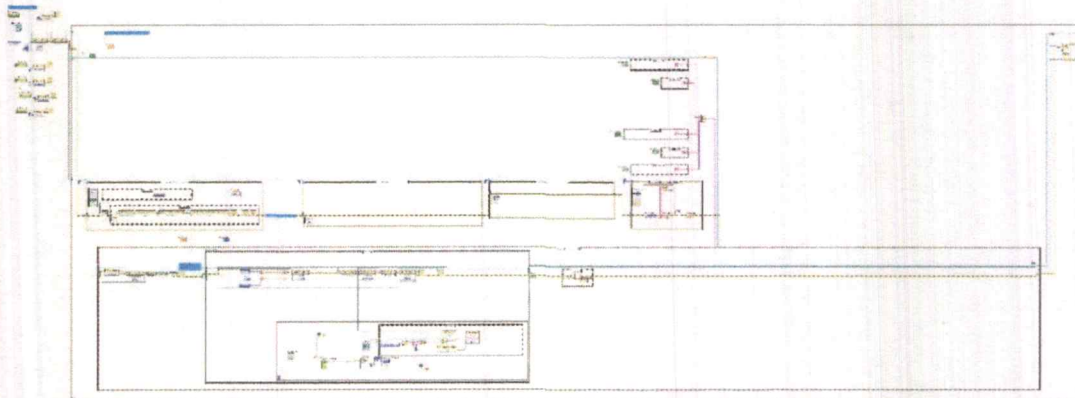
ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### โปรแกรมบันทึกภาพ Piezo Stage control

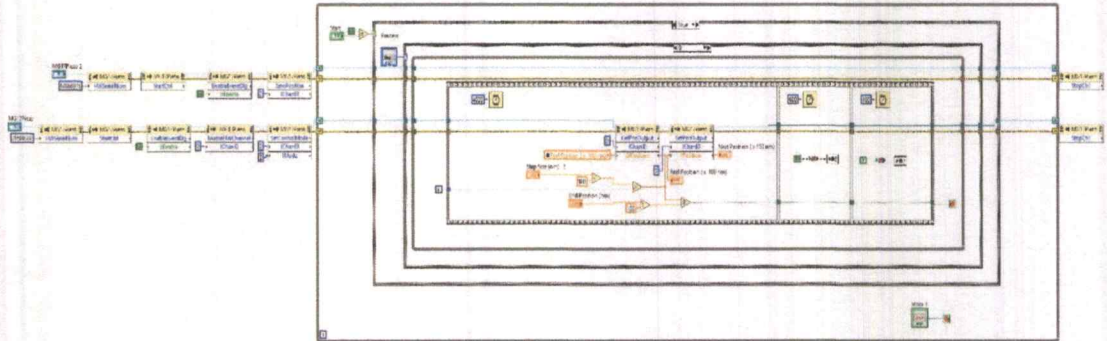


ภาพหน้าต่างผู้ใช้งานสำหรับหน้าจอแสดงผลที่มีขนาดเล็ก

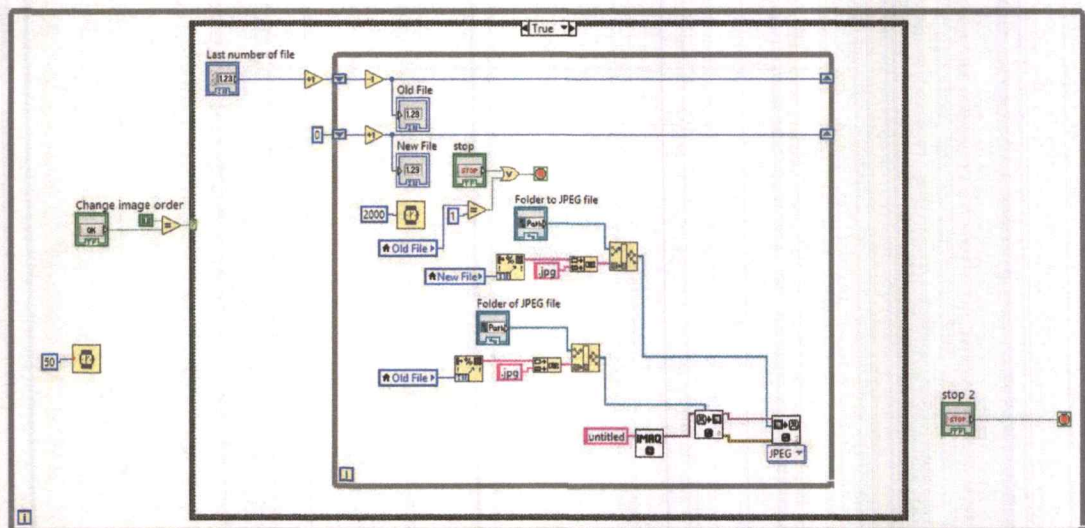


โปรแกรมส่วนตั้งค่ากล้องและบันทึกภาพ

### ภาคผนวก ก (ต่อ)



โปรแกรมส่วนตั้งค่าเพียโซอิเล็กทริกและสเตรนเกจ



โปรแกรมส่วนเปลี่ยนลำดับไฟล์ภาพ

## ภาคผนวก ข

### การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

```

global height hSurface q
set(findall(handles.figMain, '-property', 'enable'), 'enable', 'off')
try
    folder_name = get(handles.txtFolder,'String');
    load([folder_name '/vsi_data/image_family.mat'])
    load([folder_name '/vsi_data/GrayImage.mat']);
    s = str2double(get(handles.txtStartImageID,'String'));
    e = str2double(get(handles.txtEndImageID,'String'));
    cx = str2double(get(handles.txtCenterX,'String'));
    cy = str2double(get(handles.txtCenterY,'String'));
    r = str2double(get(handles.txtRadius,'String'));
    load([folder_name '/vsi_data/mask.mat']);
    dh = str2double(get(handles.txtScanThickness,'String'));
    df = str2double(get(handles.txtPeakDF,'String'));
    ds = str2double(get(handles.txtSmoothDF,'String'));
    pd = str2double(get(handles.txtPolyfitDegree,'String'));
    switch get(handles.cboEnvelopMethod,'Value')
        case 1
            method = 'peak';
        case 2

```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```

method = 'smooth';

    case 3

        method = 'polyfit';

    otherwise

        method = 'peak';

end

axImage = handles.axImage;

axVSI = handles.axVSI;

axSurface = handles.axSurface;

%% เริ่มต้นพื้นผิว

xci = linspace(cx - r, cx + r, 180);

y1 = sqrt(r^2 - (xci - cx).^2) + cy;

y2 = -sqrt(r^2 - (xci - cx).^2) + cy;

y1 = real(y1);

y2 = real(y2);

gray_img = gray_struct(1).gray_img;

[ny, nx] = size(gray_img);

[xx, yy] = meshgrid(1:nx, 1:ny);

zz = xx*0;

height = zz;

```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```

try
    load([folder_name '/vsi_data/vsi_temp.mat']);
    height = zz;
    try
        delete(hSurface);
    catch
    end
    dz_dx = str2double(get(handles.txtDz_Dx,'String'));
    dz_dy = str2double(get(handles.txtDz_Dy,'String'));
    zz = orient(xx,yy,zz,dz_dx,dz_dy,0);
    %height = zz;
    %hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);
    %_____
    q = q+1;
    zc1 = movmean(zz,3,1);%column
    zr1 = movmean(zc1,3,2);%row
    zc2 = movmean(zr1,3,1);%column
    zr2 = movmean(zc2,3,2);%row
    zc3 = movmean(zr2,3,1);%column
    zr3 = movmean(zc3,3,2);%row
    zc4 = movmean(zr3,3,1);%column

```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

zr4 = movmean(zc4,3,2);%row

zc5 = movmean(zr4,3,1);%column

zr5 = movmean(zc5,3,2);%row

zc6 = movmean(zr5,3,1);%column

zr6 = movmean(zc6,3,2);%row

zc7 = movmean(zr6,3,1);%column

zr7 = movmean(zc7,3,2);%row

zc8 = movmean(zr7,3,1);%column

zr8 = movmean(zc8,3,2);%row

zc9 = movmean(zr8,3,1);%column

zr9 = movmean(zc9,3,2);%row

zc10 = movmean(zr9,3,1);%column

zr10 = movmean(zc10,3,2);%row

zc11 = movmean(zr10,3,1);%column

zr11 = movmean(zc11,3,2);%row

zc12 = movmean(zr11,3,1);%column

zr12 = movmean(zc12,3,2);%row

zc13 = movmean(zr12,3,1);%column

zr13 = movmean(zc13,3,2);%row

zc14 = movmean(zr13,3,1);%column

zr14 = movmean(zc14,3,2);%row

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```

zc15 = movmean(zr14,3,1);%column
zr15 = movmean(zc15,3,2);%row
zc16 = movmean(zr15,3,1);%column
zr16 = movmean(zc16,3,2);%row
zc17 = movmean(zr16,3,1);%column
zr17 = movmean(zc17,3,2);%row
zc18 = movmean(zr17,3,1);%column
zr18 = movmean(zc18,3,2);%row
zc19 = movmean(zr18,3,1);%column
zr19 = movmean(zc19,3,2);%row
zc20 = movmean(zr19,3,1);%column
zr20 = movmean(zc20,3,2);%row

```

```
%{
```

**เริ่มสร้างระนาบตัด**

```

c = zz(:,52);

mc = mean(c,1);

ca = c.\c;

cz = zz.\zz;

cz(isnan(cz)) = 0

cs = ca.*c;

cs(isnan(cs)) = mc;

```

## ;ภาคผนวก ข (ต่อ)

```

xc = [1:size(cs)];%สร้างค่า1ถึงตามจำนวนข้อมูล
xa = xc.%; %กลับ
p = polyfit(xa,cs,1); %สร้างสมการเส้นตรงมีslope
f = polyval(p,xa);
fa = flip(f);
ps = f(:,ones(1,130));
%psf = flip(ps);
zz = zz-(ps.*2.2);
zz = zz+((-1)*(mean(min(zz))));
zz = zz.*cz;
%สิ้นสุด
height = zz;
hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);
%}
switch q
    case 1
        zz = zr1;
        height = zz;
        hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);
        shading(axSurface,'interp');
        colormap(axSurface,'jet');

```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

case 2

```
zz = zr2;  
height = zz;  
hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
shading(axSurface,'interp');  
colormap(axSurface,'jet');
```

case 3

```
zz = zr3;  
height = zz;  
hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
shading(axSurface,'interp');  
colormap(axSurface,'jet');
```

case 4

```
zz = zr4;  
height = zz;  
hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
shading(axSurface,'interp');  
colormap(axSurface,'jet');
```

case 5

```
zz = zr5;  
height = zz;  
hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);
```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```
shading(axSurface,'interp');  
  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
    case 6  
  
zz = zr6;  
  
    height = zz;  
  
    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
  
    shading(axSurface,'interp');  
  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
    case 7  
  
zz = zr7;  
  
    height = zz;  
  
    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
  
    shading(axSurface,'interp');  
  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
    case 8  
  
zz = zr8;  
  
    height = zz;  
  
    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
  
    shading(axSurface,'interp');  
  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
    case 9  
  
zz = zr9;
```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```
height = zz;

hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

shading(axSurface,'interp');

colormap(axSurface,'jet');

case 10

zz = zr10;

height = zz;

hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

shading(axSurface,'interp');

colormap(axSurface,'jet');

case 11

zz = zr11;

height = zz;

hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

shading(axSurface,'interp');

colormap(axSurface,'jet');

case 12

zz = zr12;

height = zz;

hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

shading(axSurface,'interp');

colormap(axSurface,'jet');
```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

case 13

```
zz = zr13;  
  
height = zz;  
  
hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
  
shading(axSurface,'interp');  
  
colormap(axSurface,'jet');
```

case 14

```
zz = zr14;  
  
height = zz;  
  
hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
  
shading(axSurface,'interp');  
  
colormap(axSurface,'jet');
```

case 15

```
zz = zr15;  
  
height = zz;  
  
hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
  
shading(axSurface,'interp');  
  
colormap(axSurface,'jet');
```

case 16

```
zz = zr16;  
  
height = zz;  
  
hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);
```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```
shading(axSurface,'interp');  
  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
    case 17  
  
zz = zr17;  
  
    height = zz;  
  
    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
  
    shading(axSurface,'interp');  
  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
    case 18  
  
zz = zr18;  
  
    height = zz;  
  
    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
  
    shading(axSurface,'interp');  
  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
    case 19  
  
zz = zr19;  
  
    height = zz;  
  
    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
  
    shading(axSurface,'interp');  
  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
    case 20  
  
zz = zr20;
```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```

height = zz;

    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

    shading(axSurface,'interp');

    colormap(axSurface,'jet');

otherwise

    height = zz;

    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

    shading(axSurface,'interp');

    colormap(axSurface,'jet');

end

%}

shading(axSurface,'interp');

colormap(axSurface,'jet')

axis(axSurface,'ij')

axis(axSurface,[1 nx 1 ny])

view(axSurface,2)

drawnow

fig = figure;

ax = axes;

new_handle = copyobj(hSurface,ax);

colormap jet;

scr_bind_measurement;

```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```

catch

    hmsg = msgbox('Previous VSI analysis not found!','VSI draw now
error','warn','modal');

    frames = java.awt.Frame.getFrames();

    frames(end).setAlwaysOnTop(1);

    uiwait(hmsg);

end

catch ex

    hmsg = msgbox(ex.message,'VSI analysis error','warn','modal');

    frames = java.awt.Frame.getFrames();

    frames(end).setAlwaysOnTop(1);

    uiwait(hmsg);

end

set(findall(handles.figMain, '-property', 'enable'), 'enable', 'on')

global height hSurface q

set(findall(handles.figMain, '-property', 'enable'), 'enable', 'off')

try

    folder_name = get(handles.txtFolder,'String');

    load([folder_name '/vsi_data/image_family.mat'])

    load([folder_name '/vsi_data/GrayImage.mat']);

    s = str2double(get(handles.txtStartImageID,'String'));

```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```
e = str2double(get(handles.txtEndImageID,'String'));

cx = str2double(get(handles.txtCenterX,'String'));

cy = str2double(get(handles.txtCenterY,'String'));

r = str2double(get(handles.txtRadius,'String'));

load([folder_name '/vsi_data/mask.mat']);

dh = str2double(get(handles.txtScanThickness,'String'));

df = str2double(get(handles.txtPeakDF,'String'));

ds = str2double(get(handles.txtSmoothDF,'String'));

pd = str2double(get(handles.txtPolyfitDegree,'String'));

switch get(handles.cboEnvelopMethod,'Value')

    case 1

        method = 'peak';

    case 2

        method = 'smooth';

    case 3

        method = 'polyfit';

    otherwise

        method = 'peak';

end

axImage = handles.axImage;
```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```

axVSI = handles.axVSI;

axSurface = handles.axSurface

%% เริ่มต้นพื้นผิว

xci = linspace(cx - r,cx + r,180);

y1 = sqrt(r^2 - (xci-cx).^2) + cy;

y2 = -sqrt(r^2 - (xci-cx).^2) + cy;

y1 = real(y1);

y2 = real(y2);

gray_img = gray_struct(1).gray_img;

[ny,nx] = size(gray_img);

[xx,yy] = meshgrid(1:nx,1:ny);

zz = xx*0;

height = zz;

try

    load([folder_name 'vsi_data/vsi_temp.mat']);

    height = zz;

    try

        delete(hSurface);

    catch

    end

    dz_dx = str2double(get(handles.txtDz_Dx,'String'));

```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```
dz_dy = str2double(get(handles.txtDz_Dy,'String'));
```

```
zz = orient(xx,yy,zz,dz_dx,dz_dy,0);
```

```
%height = zz;
```

```
%hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);
```

```
%_____
```

```
q = q-1;
```

```
zc1 = movmean(zz,3,1);%column
```

```
zr1 = movmean(zc1,3,2);%row
```

```
zc2 = movmean(zr1,3,1);%column
```

```
zr2 = movmean(zc2,3,2);%row
```

```
zc3 = movmean(zr2,3,1);%column
```

```
zr3 = movmean(zc3,3,2);%row
```

```
zc4 = movmean(zr3,3,1);%column
```

```
zr4 = movmean(zc4,3,2);%row
```

```
zc5 = movmean(zr4,3,1);%column
```

```
zr5 = movmean(zc5,3,2);%row
```

```
zc6 = movmean(zr5,3,1);%column
```

```
zr6 = movmean(zc6,3,2);%row
```

```
zc7 = movmean(zr6,3,1);%column
```

```
zr7 = movmean(zc7,3,2);%row
```

```
zc8 = movmean(zr7,3,1);%column
```

```
zr8 = movmean(zc8,3,2);%row
```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```
zc9 = movmean(zr8,3,1);%column
zr9 = movmean(zc9,3,2);%row
zc10 = movmean(zr9,3,1);%column
zr10 = movmean(zc10,3,2);%row
zc11 = movmean(zr10,3,1);%column
zr11 = movmean(zc11,3,2);%row
zc12 = movmean(zr11,3,1);%column
zr12 = movmean(zc12,3,2);%row
zc13 = movmean(zr12,3,1);%column
zr13 = movmean(zc13,3,2);%row
zc14 = movmean(zr13,3,1);%column
zr14 = movmean(zc14,3,2);%row
zc15 = movmean(zr14,3,1);%column
zr15 = movmean(zc15,3,2);%row
zc16 = movmean(zr15,3,1);%column
zr16 = movmean(zc16,3,2);%row
zc17 = movmean(zr16,3,1);%column
zr17 = movmean(zc17,3,2);%row
zc18 = movmean(zr17,3,1);%column
zr18 = movmean(zc18,3,2);%row
zc19 = movmean(zr18,3,1);%column
zr19 = movmean(zc19,3,2);%row
```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```

zc20 = movmean(zr19,3,1);%column
zr20 = movmean(zc20,3,2);%row
%{
เริ่มสร้างระนาบตัด
c = zz(:,52);
mc = mean(c,1);
ca = c.\c;
cz = zz.\zz;
cz(isnan(cz)) = 0;
cs = ca.*c;
cs(isnan(cs)) = mc;
xc = [1:size(cs)];%สร้างค่า1ถึงตามจำนวนข้อมูล
xa = xc.%; %กลับ
p = polyfit(xa,cs,1); %สร้างสมการเส้นตรงมีslop
f = polyval(p,xa);
fa = flip(f);
ps = f(:,ones(1,130));
%psf = flip(ps);
zz = zz-(ps.*2.2);
zz = zz+((-1)*(mean(min(zz))));
zz = zz.*cz;
%สิ้นสุด

```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```
height = zz;

hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

%}

switch q

    case 1

        zz = zr1;

        height = zz;

        hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

        shading(axSurface,'interp');

        colormap(axSurface,'jet');

    case 2

        zz = zr2;

        height = zz;

        hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

        shading(axSurface,'interp');

        colormap(axSurface,'jet');

    case 3

        zz = zr3;

        height = zz;

        hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

        shading(axSurface,'interp');

        colormap(axSurface,'jet');

    case 4
```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```
zz = zr4;

height = zz;

hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

shading(axSurface,'interp');

colormap(axSurface,'jet');

    case 5

zz = zr5;

height = zz;

hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

shading(axSurface,'interp');

colormap(axSurface,'jet');

    case 6

zz = zr6;

height = zz;

hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

shading(axSurface,'interp');

colormap(axSurface,'jet');

    case 7

zz = zr7;

height = zz;

hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

shading(axSurface,'interp');
```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```
colormap(axSurface,'jet');  
  
    case 8  
  
    zz = zr8;  
  
    height = zz;  
  
    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
  
    shading(axSurface,'interp');  
  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
    case 9  
  
    zz = zr9;  
  
    height = zz;  
  
    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
  
    shading(axSurface,'interp');  
  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
    case 10  
  
    zz = zr10;  
  
    height = zz;  
  
    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
  
    shading(axSurface,'interp');  
  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
    case 11  
  
    zz = zr11;  
  
    height = zz;
```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```
hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
    shading(axSurface,'interp');  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
case 12  
    zz = zr12;  
    height = zz;  
    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
    shading(axSurface,'interp');  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
case 13  
    zz = zr13;  
    height = zz;  
    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
    shading(axSurface,'interp');  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
case 14  
    zz = zr14;  
    height = zz;  
    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);  
    shading(axSurface,'interp');  
    colormap(axSurface,'jet');  
  
case 15
```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```
zz = zr15;

    height = zz;

    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

    shading(axSurface,'interp');

    colormap(axSurface,'jet');

    case 16

zz = zr16;

    height = zz;

    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

    shading(axSurface,'interp');

    colormap(axSurface,'jet');

    case 17

zz = zr17;

    height = zz;

    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

    shading(axSurface,'interp');

    colormap(axSurface,'jet');

    case 18

zz = zr18;

    height = zz;

    hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

    shading(axSurface,'interp');

    colormap(axSurface,'jet');
```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```

    case 19
zz = zr19;

height = zz;

hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

shading(axSurface,'interp');

colormap(axSurface,'jet');

    case 20
zz = zr20;

height = zz;

hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

shading(axSurface,'interp');

colormap(axSurface,'jet');

otherwise

height = zz;

hSurface = surf(handles.axSurface,xx,yy,zz);

shading(axSurface,'interp');

colormap(axSurface,'jet');

end

%}

% shading(axSurface,'interp');

%colormap(axSurface,'jet');

axis(axSurface,'ij')

```

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

```

axis(axSurface,[1 nx 1 ny])

    view(axSurface,2)

    drawnow

    fig = figure;

    ax = axes;

    new_handle = copyobj(hSurface,ax);

    scr_bind_measurement;

catch

    hmsg = msgbox('Previous VSI analysis not found!','VSI draw now
error','warn','modal');

    frames = java.awt.Frame.getFrames();

    frames(end).setAlwaysOnTop(1);

    uiwait(hmsg);

end

catch ex

    hmsg = msgbox(ex.message,'VSI analysis error','warn','modal');

    frames = java.awt.Frame.getFrames();

    frames(end).setAlwaysOnTop(1);

    uiwait(hmsg);

end

set(findall(handles.figMain, '-property', 'enable'), 'enable', 'on')

```

## ภาคผนวก ค

### ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในการขยับชิ้นงาน

#### อุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกและสเตรนเกจ

ใช้อุปกรณ์ของ Thorlabs รุ่น PZS001 Bare Piezo Stacks with Strain Gauge  
สามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่ :

<https://www.thorlabs.com/drawings/84ad560226f4a0a8-C07E9912-EB28-CCB9-A2E2C607E75554CF/PZS001Manual.pdf?fbclid=IwAR1Kfyp3WUYPK9onWuPVWVgSIOvOrhjCPhioP3uiu66RY4CwyiW69YbLdrg>

#### Piezo Driver

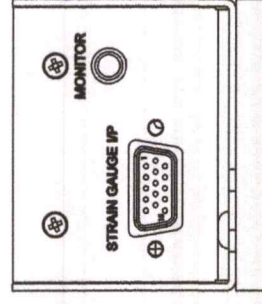
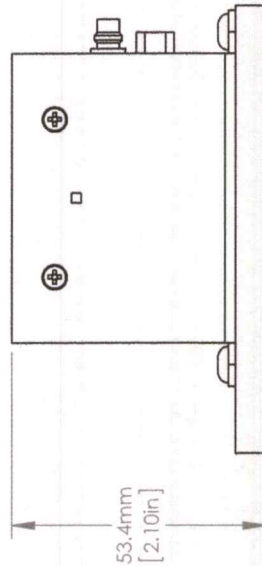
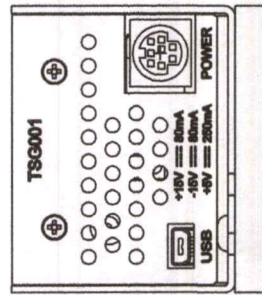
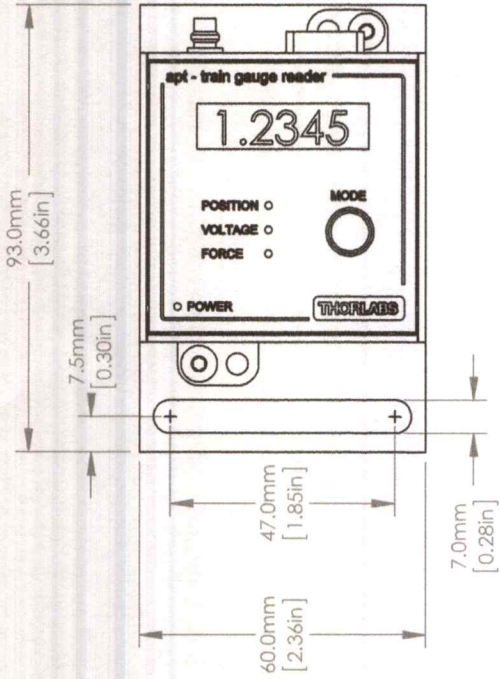
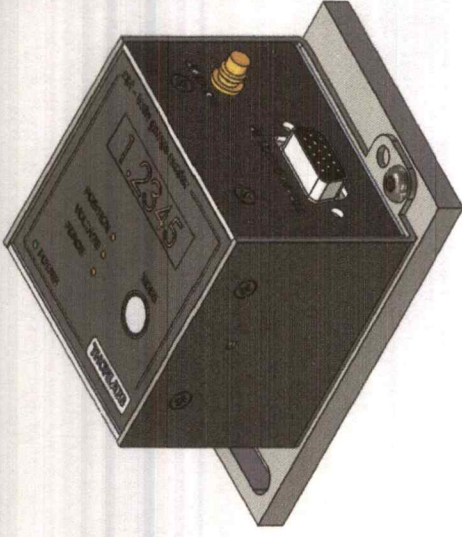
ใช้อุปกรณ์ของ Thorlabs รุ่น KPZ101 - K-Cube Piezo Controller  
สามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่ :

<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=KPZ101>

#### Strain Gauge Reader

ใช้อุปกรณ์ของ Thorlabs รุ่น TSG001 - T-Cube Strain Gauge Reader  
สามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่ :

<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=TSG001>



DRAWING PROJECTION		NAME		DATE		THORLABS www.thorlabs.com		
DRAWN	ATB	ATB	SF	21/OCT/14	21/OCT/14	T-CUBE STRAIN GAUGE READER		
APPROVAL						MATERIAL	N/A	
COPYRIGHT © 2014 BY THORLABS VALUES IN PARENTHESES ARE CALCULATED AND MAY CONTAIN ROUND-OFF ERRORS							ITEM #	TSG001
							REV	A
							APPROX WEIGHT	0.22 kg

FOR INFORMATION ONLY  
NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES

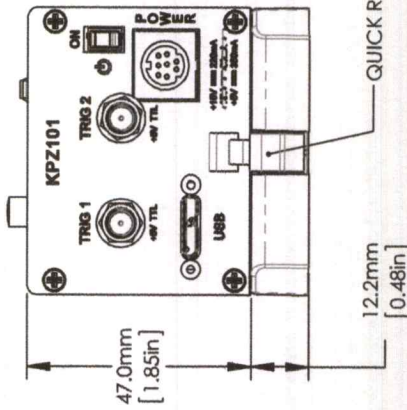
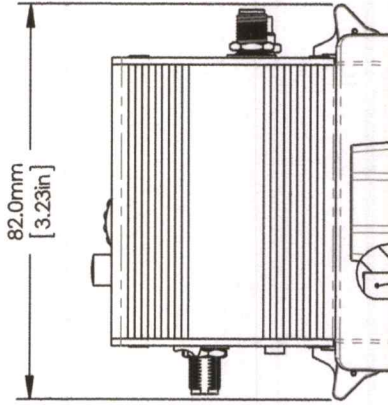
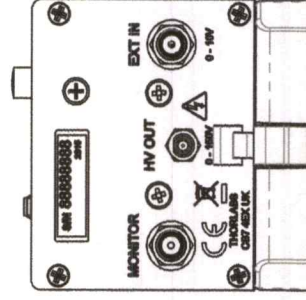
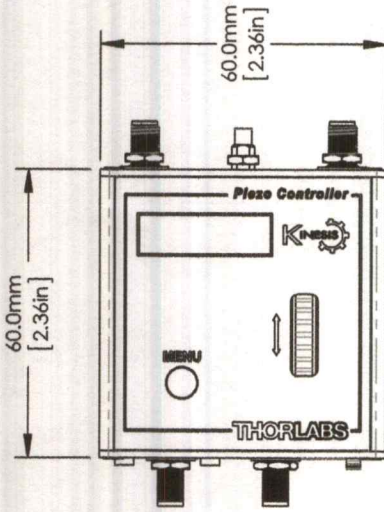
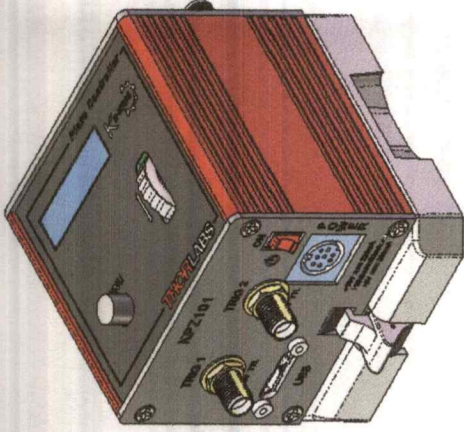
## Appendix C Specifications and Associated Parts

### C.1 Specifications

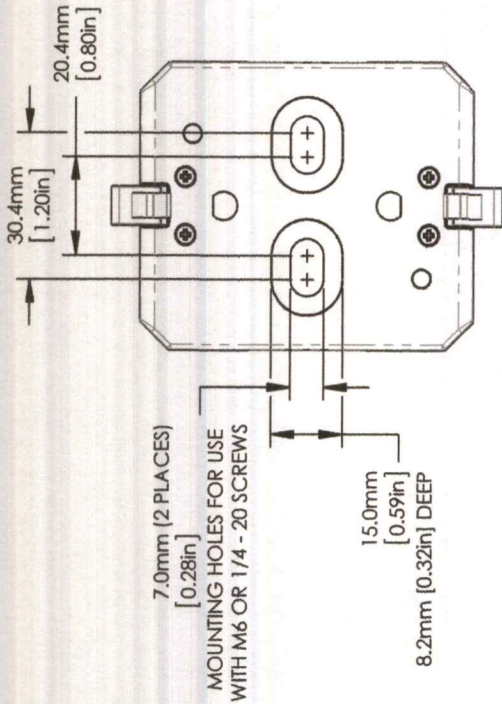
Parameter	Value
Strain Gauge Input (9-pin D-type)	
Bridge Type	AC
Excitation Frequency	18 kHz
Supply	±15 V
Monitor Output	0-10V (SMA Connector)
Reading Resolution	Position mode 1 nm Force mode 1 mN Voltage mode 1 mV
Reading Display	5 Digit 7 Segment LED
USB Port	Version 1.1 (mini)
T-Cube Controller Hub Connector	26 way ERNI
Input Power Requirements (DIN Connector)	
Voltages:	+15V (80mA), -15V (80mA), +5V (250mA)
General Data	
Housing Dimensions (W x D x H)	60 x 60 x 47 mm (2.4" x 2.4" x 1.8")
Weight	160 g (5.5 oz)

### C.2 Associated Products

Product Name	Part Number
Drive Cable for Piezoelectric Actuators (3.0 m)	PAA100
Drive Cable for Piezoelectric Actuators (1.5 m)	PAA101
T-Cube Strain Gauge Reader	TSG001
Piezoelectric Feedback Cable, Male D-type to Female LEMO converter (3.0 m)	PAA622
2-Way Power Supply Unit	TPS002
T-Cube Controller Hub	TCH002
T-Cube Controller Hub Power Supply Unit	TPS006
SMA to BNC Converter Cable 6"	CA2806
SMA Female to BNC Male Converter	T4289
SMA Male to BNC Female Converter	T4290



MAGNET FOR BRIEF PLACEMENT



ADAPTER PLATE

				 www.thorlabs.com	
DRAWN	SP	DATE	DC	NAME	ITEM #
APPROVAL	DC	02/FEB/16	02/FEB/16	KINESIS PIEZO MOTOR CONTROLLER	KPZ101
COPYRIGHT © 2015 BY THORLABS VALUES IN PARENTHESES ARE CALCULATED AND MAY CONTAIN ROUND-OFF ERRORS				MATERIAL	APPROX WEIGHT
				N/A	0.13 kg
				REV	A

FOR INFORMATION ONLY  
NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES

## Appendix F Thorlabs Worldwide Contacts

### USA, Canada, and South America

Thorlabs, Inc.  
56 Sparta Avenue  
Newton, NJ 07860  
USA  
Tel: 973-300-3000  
Fax: 973-300-3600  
www.thorlabs.com  
www.thorlabs.us (West Coast)  
Email: sales@thorlabs.com  
Support: techsupport@thorlabs.com

### Europe

Thorlabs GmbH  
Hans-Böckler-Str. 6  
85221 Dachau  
Germany  
Tel: +49-(0)8131-5956-0  
Fax: +49-(0)8131-5956-99  
www.thorlabs.de  
Email: europe@thorlabs.com

### France

Thorlabs SAS  
109, rue des Côtes  
78600 Maisons-Laffitte  
France  
Tel: +33 (0) 970 444 844  
Fax: +33 (0) 825 744 800  
www.thorlabs.com  
Email: sales.fr@thorlabs.com

### Japan

Thorlabs Japan, Inc.  
3-6-3 Kitamachi,  
Nerima-ku, Tokyo 179-0081  
Japan  
Tel: +81-3-6915-7701  
Fax: +81-3-6915-7716  
www.thorlabs.co.jp  
Email: sales@thorlabs.jp

### UK and Ireland

Thorlabs Ltd.  
1 Saint Thomas Place, Ely  
Cambridgeshire CB7 4EX  
Great Britain  
Tel: +44 (0)1353-654440  
Fax: +44 (0)1353-654444  
www.thorlabs.de  
email: sales@uk.thorlabs.com  
Support: techsupport.uk@thorlabs.com

### Scandinavia

Thorlabs Sweden AB  
Bergfotsgatan 7  
431 35 Mölndal  
Sweden  
Tel: +46-31-733-30-00  
Fax: +46-31-703-40-45  
www.thorlabs.com  
Email: scandinavia@thorlabs.com

### Brazil

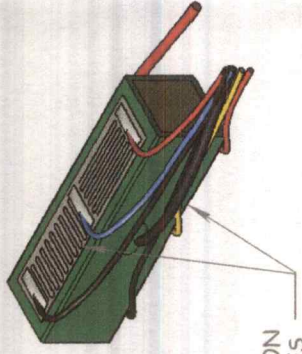
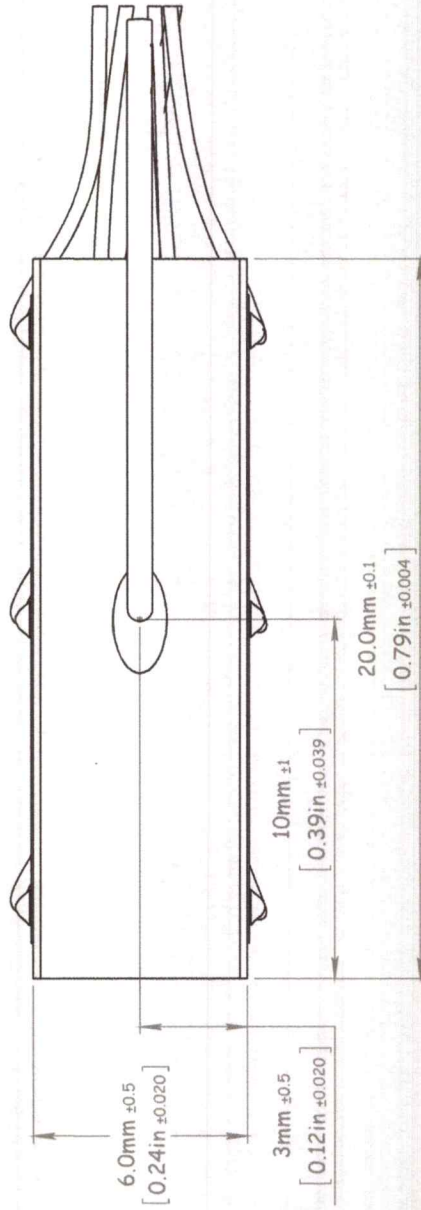
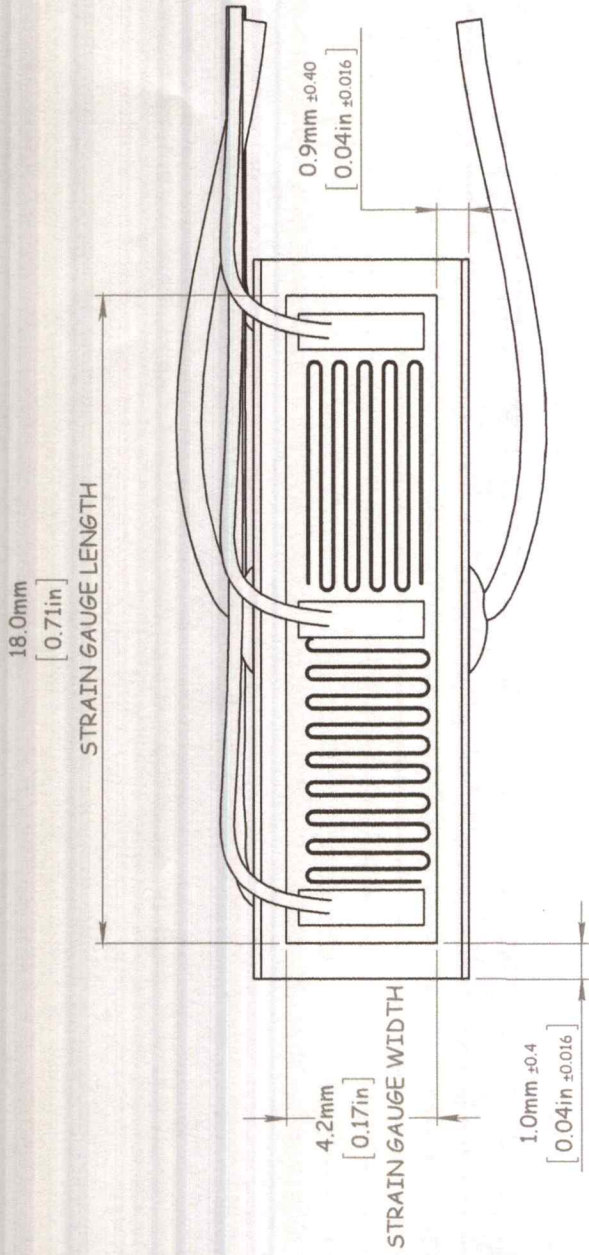
Thorlabs Vendas de Fotônicos Ltda.  
Rua Riachuelo, 171  
São Carlos, SP 13560-110  
Brazil  
Tel: +55-16-3413 7062  
Fax: +55-16-3413 7064  
www.thorlabs.com  
Email: brasil@thorlabs.com

### China

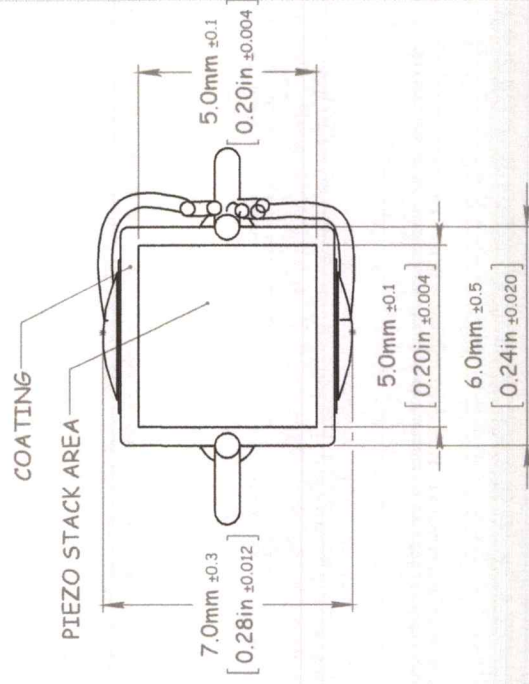
Thorlabs China  
Room A101, No. 100  
Lane 2891, South Qilianshan Road  
Putuo District  
Shanghai 200331  
China  
Tel: +86 (0) 21-60561122  
Fax: +86 (0)21-32513480  
www.thorlabschina.cn  
Email: chinasales@thorlabs.com

Thorlabs verifies our compliance with the WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) directive of the European Community and the corresponding national laws. Accordingly, all end users in the EC may return "end of life" Annex I category electrical and electronic equipment sold after August 13, 2005 to Thorlabs, without incurring disposal charges. Eligible units are marked with the crossed out "wheelie bin" logo (see right), were sold to and are currently owned by a company or institute within the EC, and are not disassembled or contaminated. Contact Thorlabs for more information. Waste treatment is your own responsibility. "End of life" units must be returned to Thorlabs or handed to a company specializing in waste recovery. Do not dispose of the unit in a litter bin or at a public waste disposal site.





TWO STRAIN GAUGES ON TOP AND BOTTOM SIDES



DRAWING PROJECTION



**THORLABS**  
www.thorlabs.com

NAME	DATE	PIEZO-ELECTRIC ACTUATOR FITTED WITH A STRAIN GAUGE
DRAWN SF	04/FEB/14	
APPROVAL MR	04/FEB/14	
COPYRIGHT © 2014 BY THORLABS		
VALUES IN PARENTHESES ARE CALCULATED AND MAY CONTAIN ROUND-OFF ERRORS		
ITEM #	PZS001	APPROX WEIGHT 0.006 kg
MATERIAL	PZT	REV A

FOR INFORMATION ONLY  
NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES

## About the Company

Thorlabs has been an active member of the Photonics community for over 25 years.

We strive to be the ultimate resource for the photonics community—a place to find the products you need to enable your experiments, as well as the information you need to get your application working.

Thorlabs designs, develops, and manufactures building blocks for the photonics industry including equipment for opto-mechanics, motion control, nano-positioning, alignment, optical components, laser diodes, tunable lasers and vibration isolation systems. In addition to core photonics building blocks, we now provide system level solutions including complete OCT and imaging systems.

## Trademarks

THORLABS is a registered trademark of Thorlabs Inc.

## Technical Support

Thorlabs provide a comprehensive after sales service. Contact us through your local representative, or at the address below:

### Thorlabs Ltd

Saint Thomas Place

Ely

Cambridgeshire CB7 4EX, UK

Tel: +44 (0) 1353 654440

Fax: +44 (0) 1353 654444

email: [techsupport.uk@thorlabs.com](mailto:techsupport.uk@thorlabs.com)

## Product Warranty

All Thorlabs products are covered by a manufacturers warranty against faulty workmanship and materials, valid for 12 months from the date of original purchase. All products returned under warranty must be returned in their original packaging.

Prior to installation, the equipment referred to in this handbook must be stored in a clean, dry environment, in accordance with any instructions given. Periodic checks must be made on the equipment's condition.

## Customer Feedback

It is always helpful to have detailed and accurate information about any problems encountered by customers

We welcome comments or suggestions about any aspect of the equipment and instruction handbooks.

# THORLABS

## PZS001 Bare Piezo Stacks with Strain Gauge

### 1.1 Introduction

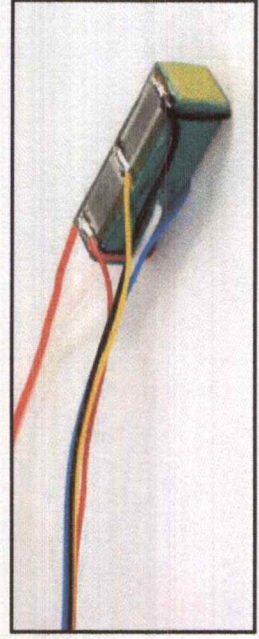
Piezo-electric actuators transform electrical energy into precisely controlled mechanical displacements. The PZS001 actuators incorporate full bridge strain gauges which can be used to monitor this displacement. This strain gauge feedback and fast response time make them ideal for use in applications that require precise nanometer positioning. They are designed to be incorporated into OEM products to form a tightly controlled high speed closed loop actuator.



Caution

It is the responsibility of the end user to ensure the application is CE compliant.

The piezos can be driven by a Thorlabs Piezo Controller (see [www.thorlabs.com](http://www.thorlabs.com) for details on the range of controllers available) or any third party device - see Section 1.6 for electrical connection details.



## 1.2 Coupling of Piezo Actuator to External Mechanics

### Cautions

Poor piezo-mechanical coupling design can lead to local mechanical stress concentration around the edges of the piezo stack, which in turn can generate cracks and may lead to a failure of the stack due to electrical short-circuit.

The ceramics must be mechanically coupled and mounted via the end-faces of the stack. Mechanical contact to the side-faces should be avoided because this will affect the strain gauge performance and/or piezo travel.

To ensure play and backlash is eliminated, only compressive mechanical coupling should be employed between the actuator and the mechanics.

To avoid local stress concentration, the coupling joint should offer homogeneously distributed compressive stress over the actuator's end faces, with a resulting force vector along the actuator's central axis within a virtual cylinder of  $\pm 10\%$  of actuator's cross-section.

The Strain gauge sensors are covered with a thin transparent polyurethane coating to minimize damage when handling. Avoid unnecessary contact in this area.

## 1.3 Specification

Drive Voltage:	150V
Displacement:	17.4 $\mu$ m $\pm$ 2 $\mu$ m
Bridge Arm Resistance:	350 ohm
Piezo Capacitance:	1.4 $\mu$ F
Resonant Frequency:	69kHz
Gauge Factor:	2

## 1.4 Storage Precautions

Piezos can store and release large amounts of energy and should be handled with caution.

### Caution

To prevent charge build up, piezos must be stored with the high voltage wires (red and white) short circuit.

## 1.5 Dimensions

all dimensions in mm (in.)

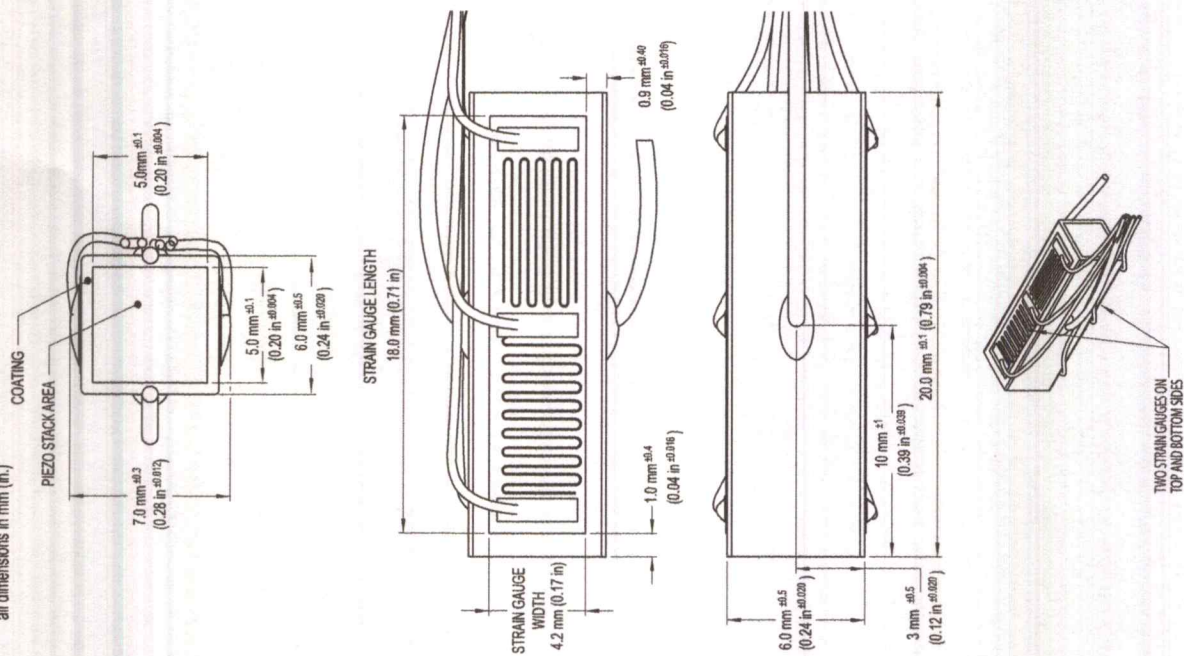
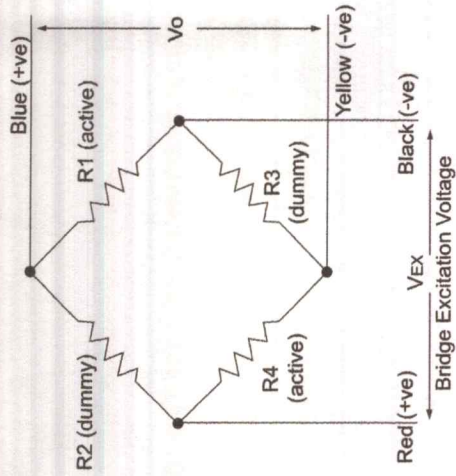


Fig. 1.1 Dimensions

## 1.6 Electrical Connections

### 1.6.1 Strain Gauge Connections

The connections to the bridge circuit are detailed in Fig. 1.2.



### Note

The maximum recommended excitation voltage is 4.5 V rms. The dummy gauges are arranged at 90° to the active gauges, and therefore only temperature changes affect these arms of the bridge.

V <sub>0</sub>	Output Voltage of Full Bridge
V <sub>EX</sub>	Excitation Voltage (4.5V rms MAX)

Fig. 1.2 Bridge Connection Descriptions

### 1.6.2 Piezo Connections

The piezo connections are identified by the larger diameter red and white wires as follows:

RED	Piezo Drive Positive Volts
WHITE	Piezo Drive Negative Volts



Thortabs Inc.  
56 Sparta Ave  
Newton, NJ07860  
USA

Thortabs Ltd.  
Saint Thomas Place, Ely  
Cambridgeshire CB7 4EX,  
UK

Tel: +1 973 579 7227  
Fax: +1 973 300 3600  
www.thortabs.com

Tel: +44 (0) 1353 654440  
Fax: +44 (0) 1353 654444  
www.thortabs.com

## Plagiarism Checking Report

Created on Jul 1, 2019 at 19:29 PM

### Submission Information

ID	SUBMISSION DATE	SUBMITTED BY	ORGANIZATION	FILENAME	STATUS
1283189	Jul 1, 2019 at 19:29 PM	58051145@kmitl.ac.th	สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้า คุณทหาร ลาดกระบัง	DEVELOPMENT OF SURFACE PROFILE MEASUREMENT SYSTEM USING MIRAU INTERFEROMETRY OBJECTIVE LENS AND IMAGE PROCESSING SOFTWARE.docx	Completed

### Match Overview

NO.	TITLE	AUTHOR(S)	SOURCE	SIMILARITY INDEX
1	การปรับปรุงผิวรัตนโลหะที่มี ไทเทเนียมเป็นส่วนประกอบหลัก โดยกระบวนการทางกล เพื่อ ประยุกต์ใช้ในงานทันตกรรม รากฟันเทียม\,IMPROVEMENT OF TITANIUM – BASED BULK METALLIC GLASS SURFACE BY MECHANICAL PROCESS FOR DENTAL IMPLANT APPLICATIONS	สุภารัตน์ อุดมเลิศปรีชา	จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย	1.02 %
2	การตรวจวัดการสั่นสะเทือนของดี ซีบัสเลสมอเตอร์,Online vibration measurement of brushless DC motor.	ศุภกิจ ไตรรัตน์ภิบาล	สถาบัน เทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้า คุณทหาร ลาดกระบัง	0.35 %
3	ผลของเครื่องดื่มที่มีฤทธิ์เป็นกรด ต่อความหยาบพื้นผิวของซีเมนต์ ยึดติดชนิดเรซิน\,EFFECT OF ACIDIC BEVERAGES ON SURFACE ROUGHNESS OF RESIN LUTING CEMENTS	พงศธร จินตกานนท์	จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย	0.24 %

NO.	TITLE	AUTHOR(S)	SOURCE	SIMILARITY INDEX
4	การศึกษาประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 ด้วยลวดไฟฟ้า: วิทยานิพนธ์, A Study of Performance in WEDM Processes on Tool Steel Material JIS -SKD 11	กมลพงศ์ แจ่มกมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	0.06 %
5	โครงการศูนย์การเรียนรู้และวิจัยข้าวไทย /Project Thai Rice Education and Research Center	ทศพล เจริญบุญมา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.03 %

## Match Details

TEXT FROM SUBMITTED DOCUMENT	TEXT FROM SOURCE DOCUMENT(S)
.....สารบัญ รูปภาพ..... .....ขสารบัญ ตาราง..... .....ฉบับที่ 1 บทนำ	III \ n สารบัญ IV \ n สารบัญภาพ VII \ n สารบัญตาราง XIV \ n บทที่ 1 บทนำ\ n.1
..... 5 2 2 ความหยาบของพื้น ผิว..... ..... 5 2 2 1 การวัดความหยาบผิว เฉลี่ย..... 5 2 2 2 การวัดความหยาบผิวโดยขนาด.....	มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัดชิ้นงาน 67 \ n.4.33ความถี่ของการสปาร์คที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra 67 \ n.4.34ความถี่ของการสปาร์คที่มีผลต่อความหยาบ ผิวเฉลี่ยแบบสิบลวด Rz 68 \ n.4.35
..... ..... 75 สารบัญรูปภาพรูปที่หน้า 2 1 ความ หยาบพื้นผิวเฉลี่ย เลขคณิต..... ..... 6 2 2 ลักษณะการวิเคราะห์ของความหยาบพื้น ผิวเฉลี่ย.....	..... 43 \ n \ n การ วัดความหยาบพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างหลังการจำลองการ ต้มเครื่องต้ม..... 43 \ n \ n การประเมิน ลักษณะพื้นผิวของเรซินซีเมนต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็ก ตรอน\ n \ n ชนิดสอง กราด..... ..... 44
..... 7 2 6 ความหยาบผิวโดย รวม..... ..... 7 2 7 ความหยาบผิวขนาดหลุมลึก สุด.....	..... 47 \ n \ n 17 แผนภูมิแห่งแสดงค่าเฉลี่ยความหยาบพื้นผิว เชิงเส้นของเรซินซีเมนต์\ n \ n ก่อนและหลังการจำลอง
3 ความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาณ Roughness Skewness ความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาณเป็นการแสดงความหยาบพื้นผิว โดยการวัดปริมาณของยอดและหลุมโดยปริมาณของยอด ให้ค่าเป็นบวกส่วนปริมาณของหลุมให้ค่าเป็นลบหากค่าใดมี มากก็แสดงให้เห็นถึงการมียอดหรือหลุมมากนั่นเองรูปที่ 2 4 ความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาณ 2 2 1 4 ความหยาบผิวเฉลี่ย รูปร่าง Roughness Kurtosis ความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยแสดงให้เห็นถึงลักษณะ รูปร่างหรือยอด	)เป็นการแสดงความหยาบ\ n ผิวด้วยค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต ของผิวที่วัดซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุดและหลาย มาตรฐานมักอ้างอิง\ n ค่านี้ในการกำหนดมาตรฐานความ หยาบผิวการหาค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิตได้จากการ รวม\ n พื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง(M- Line)กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหาร\ n ด้วยความยาวเฉลี่ย( Lm )โดยที่ค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็น ไมโครเมตร( $\mu\text{m}$ )\ n \ n \ n \ n รูปที่ 2.6การหาค่าความ หยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต( Roughness average : Ra )\ n \ n \ n \ n 2)ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง( Roughness root mean square : Rq )เป็นการ\ n แสดงความหยาบผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง ของผิวที่วัด\ n \ n 3)ความหยาบผิวเฉลี่ยปริมาณ( Roughness skewness : Rsk )เป็นการแสดงความ\ n หยาบผิวโดยการวัดปริมาณของยอดและหลุมโดยปริมาณ ของยอดให้เป็นค่าบวกส่วนปริมาณของ\ n หลุมให้เป็น ค่าลบหากค่าใดมีมากก็แสดงให้เห็นถึงการมียอดหรือ หลุมมากนั่นเอง\ n \ n 4)ความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง( Roughness kurtosis : Rku )เป็นการแสดงความหยาบ\ n ผิวโดยแสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปร่างของยอดผิว

TEXT FROM SUBMITTED DOCUMENT

TEXT FROM SOURCE DOCUMENT(S)

ผิวว่ามีลักษณะเป็นยอดโค้งยอดเรียบหรือยอดแหลมรูปที่ 2 5 ความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง 2 2 การวัดความหยาบผิว โดยขนาดการวัดความหยาบผิวโดยขนาด Amplitude Parameter คืออาศัยการวัดค่าสูงต่ำของขนาดความหยาบของพื้นผิวทำให้เรารู้ลักษณะของความหยาบพื้นผิว ได้ชัดเจนกว่าพารามิเตอร์ของวิธีวัดนี้ได้แก่และ 2 2 1 ความหยาบผิวโดยรวม Roughness total Height เป็นการ แสดงความหยาบผิวโดยวัดขนาดจากยอดสูงสุดถึง

)เป็นการ\ n แสดงความหยาบผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของผิวที่วัด\ n \ n3)ความหยาบผิวเฉลี่ย ปริมาณ( Roughness skewness : Rsk )เป็นการแสดง ความ\ n หยาบผิวโดยการวัดปริมาณของยอดและหลุมโดย ปริมาณของยอดให้เป็นค่าบวกส่วนปริมาณของ\ n หลุมให้เป็นค่าลบหากค่าใดมีมากก็แสดงให้เห็นถึงการมียอดหรือ หลุมมากนั่นเอง\ n \ n4)ความหยาบผิวเฉลี่ยรูปร่าง( Roughness kurtosis : Rku )เป็นการแสดงความหยาบ\ n ผิวโดยแสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปร่างของยอดผิวว่ามี ลักษณะยอดโค้งยอดแหลมหรือยอดเรียบ\ n \ n \n2.3.2การวัดความหยาบผิวโดยขนาด( Amplitude parameter )\ n การวัดความหยาบผิวโดยขนาดคืออาศัย การวัดค่าสูงต่ำของขนาดความหยาบของผิว\ n \ n ซึ่ง จะทำให้เรารู้รูปลักษณะของความหยาบได้ชัดเจนกว่าวิธี การกลุ่มนี้ได้แก่ Rp \ n, Rt \ n, Rv และ Rz \ n1)ความ หยาบผิวขนาดโดยรวม( Roughness total height : Rt \ n, Ry )เป็นการแสดง\ n \ n ความหยาบผิวโดยวัดขนาด ความห่างระหว่างยอดสูงสุดถึงหลุมลึกสุดของผิวค่านี้มี ประโยชน์มาก\ n ตรง

จุดที่เป็นหลุมลึกที่สุดค่านี้มีประโยชน์มากตรงที่หากเรา ต้องการขีดพื้นผิวเพื่อวัดความขรุขระออกให้หมดเราจะได้ว่า ต้องขีดพื้นผิวลงไปกี่ไมครอนรูปที่ 2 6 ความหยาบผิว โดยรวม 2 2 2 ความหยาบผิวขนาดหลุมลึกสุด Roughness Valley ความหยาบผิวขนาดหลุมลึกสุด เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยการวัดขนาดความลึก ของหลุมโดยแสดงความลึกหลุมที่ลึกที่สุดรูปที่ 2 7 ความ หยาบผิวขนาดหลุมลึก

total height : Rt \ n, Ry )เป็นการแสดง\ n \ n ความ หยาบผิวโดยวัดขนาดความห่างระหว่างยอดสูงสุดถึง หลุมลึกสุดของผิวค่านี้มีประโยชน์มาก\ n ตรงที่หากเรา ต้องการขีดผิวเพื่อขจัดความขรุขระออกให้หมดเราจะรู้ได้ ว่าจะต้องขีดผิวลงไปลึกกี่\ n ไมโครเมตร\ n \ n n3684196732 \ n \ n \ n \ n \ n15 \ n \ n \ n รูปที่2.7การหาค่าความหยาบผิวขนาดโดยรวม( Roughness total height : Rt \ n, Ry )\ n \ n \ n 2)ความหยาบผิวขนาดหลุมลึกสุด( Roughness valley : Rv )เป็นการแสดงความ\ n หยาบผิวโดยวัดขนาดความลึก ของหลุมโดยแสดงความลึกหลุมที่มีขนาดลึกที่สุด\ n \ n 3)ความหยาบผิวขนาดยอดสูงสุด( Roughness Peak : Rp )เป็นการแสดงความหยาบ\ n ผิวโดยวัดขนาดความสูง ของยอดโดยแสดงความสูงของยอดที่มีขนาดสูงที่สุด\ n \ n 4)ความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย 10 จุด( Roughness Ten-point mean : Rz )เป็น\ n การแสดงความหยาบผิว โดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุม โดย แสดงขนาดเฉลี่ยของ\ n ระยะระหว่างความสูงของยอดกับความ ลึกของหลุม

TEXT FROM SUBMITTED DOCUMENT

TEXT FROM SOURCE DOCUMENT(S)

พลังงานกลโดยซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก  
ทางกลับดังรูปที่ 2 18 รูปที่ 2 19 Inverse Piezoelectric  
Effect เมื่อความดันหรือแรงถูกนำไปใช้กับคริสตัลควอดซ์  
ประจุสามารถผ่านคริสตัลโดยเป็นส่วนส่วนกับแรงที่ใช้ความ  
แตกต่างระหว่างคริสตัลเซ็นเซอร์และเซ็นเซอร์ที่ใช้แรง  
ทางกลเช่น Strain Gauge คือสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจาก  
คริสตัลจะปล่อยกับมันตรงสืออย่างรวดเร็วความเฉพาะตัวตั้ง  
กล่าวจึงไม่เหมาะที่จะใช้วัดแรงสกดหรือความดันแต่  
ใช้ได้ผลดีกับการวัดที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

เกิดขึ้นและเป็นผลทำให้เกิดกระแสขึ้นเช่นกันดังรูป  
ที่ 2.1a ในทานองเดียวกันเมื่อเราบีบอัดบนพีโซอิเล็ก  
ทริกเซรามิกตัวเซรามิกจะขยายและหดตัว n ซึ่งจะเป็นการ  
เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลดังรูปที่ 2.1b n  
รูป 2.1 แสดงปรากฏการณ์ Piezoelectricity n เมื่อ  
ความดันแรงความแรงถูกนำไปใช้กับคริสตัลควอดซ์  
สามารถผ่านคริสตัลโดยเป็นส่วนส่วน n กับแรงที่ใช้ความ  
แตกต่างระหว่างคริสตัลเซ็นเซอร์และแรงทางกลเช่น  
Strain Gages คือ n สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากคริสตัล  
ปล่อยกับมันตรงสืออย่างรวดเร็วความเฉพาะตัวตั้งกล่าว  
จึงไม่ n เหมาะที่จะใช้วัดแรงสกดหรือความดันแต่  
ใช้ได้ผลดีกับการวัดที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเมื่อ n  
ความดันกระทำกับคริสตัลที่เรียกว่า Elastically  
Deformed ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างและการ n โหลด  
ของประจุซึ่งสัญญาณที่ได้สามารถนำไปวัดความดันได้  
เซ็นเซอร์นี้จะไม่สามารถวัดความดัน n สกิดได้แต่สามารถ  
ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็วเช่นการระเบิด  
ของเครื่องยนต์การ n วัดการสั่นสะเทือนหรือแรงสั่น  
สะเทือนได้มีคุณสมบัติที่สามารถตรวจจับสัญญาณได้ถึง  
หนึ่งในส่วน n ส่วนของวินาที n 6 n รูปที่ 2.2 แสดง  
Pressure Piezoelectric Sensor [ 8 ] n จากรูปที่ 2 . 2  
ในการวัดแบบ Pressure Sensors