

การตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออริฟิต  
โดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง

INSPECTION OF ORIFICE PLATE FLATNESS USING LASER LIGHT TECHNIQUES

ภทิล อัครกรวิชญ  
PHATHILL AKKARAKRURAWISH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-060-202

การตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออริฟิต  
โดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง

INSPECTION OF ORIFICE PLATE FLATNESS USING LASER LIGHT TECHNIQUES



ภทิล อัครกูรวิชญ์

PHATHILL AKKARAKRURAWISH

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 148237  
วันที่คืน 1-8 ต.ค. 2559



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-060-202

# INSPECTION OF ORIFICE PLATE FLATNESS USING LASER LIGHT TECHNIQUES

PHATHILL AKKAKRURAWISH

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016  
KMITL-2016-EN-M-060-202


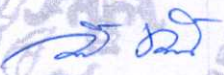


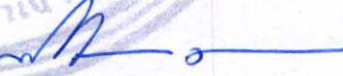
COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออริฟิตโดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง  
Thesis Title Inspection of Orifice Plate Flatness Using Laser Light Techniques  
นักศึกษา นายภทิล อัครกูรวิษณุ  
รหัสประจำตัว 54611658  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ทวิพล ชื้อสัตย์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-060-202

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.ยุทธพงศ์	ทัฬหผดุง	
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.วิริยะ	กองรัตน์	
รศ.ดร.สุพรรณ	กุลพาณิชย์	
รศ.ดร.ทวิพล	ชื้อสัตย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 10.30-12.30 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตโดยใช้เทคนิค  
ลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง

นักศึกษา

นายภทิล อัครกูรวิชญ

รหัสประจำตัว

54611658

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมการวัดคุม

พ.ศ.

2559

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.ทวีพล ชี้อสัตย์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอในเรื่องการตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตแบบไม่สัมผัส โดยวัดความราบเรียบผิวของวัตถุด้วยเทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวางซึ่งเป็นการฉายลำแสงเลเซอร์ไปบนพื้นผิวของแผ่นออร์ฟิตเพื่อเป็นตัวกำหนดลักษณะของวัตถุตัวอย่างที่จะทำการตรวจหาความราบเรียบของผิววัตถุจากกล้องด้วยการประมวลผลภาพบนโปรแกรม Labview แผ่นออร์ฟิตที่ทำการทดสอบจะวางอยู่กับชุดหมุนชิ้นงานซึ่งถูกติดตั้งกับมอเตอร์ความเร็วต่ำอยู่ที่แกนเพลลา ความหนาของแผ่นออร์ฟิตจะถูกวัดจากภาพตัวอย่างจากเส้นลำแสงเลเซอร์และทำการประมวลผลภาพเพื่อนำมาคำนวณหาขนาดความหนาของแผ่นออร์ฟิตแล้วโปรแกรม Labview จะทำการเก็บข้อมูลความหนาแผ่นออร์ฟิต หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้ออกไปทำการประมวลผลโดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลแบบรีเกสชันจากการทดสอบระบบการประมวลผลภาพจากโปรแกรมสามารถแยกแยะวัตถุที่ดีและเสียได้ถูกต้องและแม่นยำ แต่การบ่งชี้จุดที่เกินมาตรฐานบนแผ่นออร์ฟิตควรมีระบบวัดผลที่ทำได้เป็นเชิงปริมาณ เช่น จำนวนที่ทดสอบ ขนาดและผลการทดสอบเพื่ออำนวยความสะดวกกับผู้ที่ใช้งาน

<b>Thesis</b>	Inspection of Orifice Plate Flatness Using Laser Light Techniques
<b>Student</b>	Mr.Phathill Akkarakurawish
<b>Student ID.</b>	54611658
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Instrumentation Engineering
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Taweepol Suesut

## **ABSTRACT**

This thesis presents a non-contact inspection of orifice plate flatness based on laser light techniques. The laser source projects a laser beam (red light) on the orifice plate and the CCD camera equipped with filter captures image of red laser beam. The image processing algorithms applies to enhance the laser line image quality then the thickness measurement of orifice plate performs, all processes perform in Lab View application. The sampling data automatically logs and analyzes based on Regression Analysis in order to identify the accepted or rejected orifice plate. The experiment indicates that the established software application can precisely detect the accepted or rejected orifice plate but the system can continually develop as quantitative measurement i.e. amount of test, size and test result for user accommodation.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีพล ซื่อสัตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่คอยช่วยเหลือแนะนำตลอดจนให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ในการศึกษา เจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมและของบัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุก ๆ ท่าน

ขอกราบขอบพระคุณนายวิเชียรและนางเวียน ทับทิมเทศ ซึ่งเป็นบิดาและมารดาของผู้เขียนที่ให้กำเนิด รวมถึงเลี้ยงดูจนทำให้เติบโตจนจบจนทุกวันนี้ รวมทั้งภรรยาและลูกที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านจนทำให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จได้ และขอขอบพระคุณ นายรัชพล ภิวัฒน์ภคพล ที่คอยให้คำปรึกษาที่ด้านโปรแกรม Labview เป็นอย่างดี รวมไปถึงเพื่อนๆในภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมบัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกคนที่คอยให้ช่วยเหลือในด้านต่างๆที่ตนเองมีความรู้ความสามารถจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ในที่สุด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าและขอให้ทุกๆท่านจงประสูสุขแต่ความสุขและความเจริญตลอดกาล

ภทิล อัครกูรวิชญ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VI
สารบัญรูป .....	VII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย .....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ .....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การวัดความราบเรียบของวัตถุโดยใช้เทคนิคการฉายแสงเลเซอร์ลงบนวัตถุแบบ สามเหลี่ยม (Flatness Measurement by Optical Triangle Technique)...	6
2.2 การวัดความราบเรียบของวัตถุโดยใช้เทคนิคฟิไซอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Flatness Measurement by Fizeau Interferometer Technique).....	12
2.3 ระบบการวัดความราบเรียบของวัตถุแบบไม่สัมผัสชิ้นงานขนาดใหญ่แบบ 2 มิติ (A New Noncontact Flatness Measuring System of Large 2-D Flat Workpiece).....	15
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	18
3.1 การเก็บข้อมูลสามมิติ (3D Range Acquisition) .....	18
3.2 รูปแบบการสแกนวัตถุ (Scanning Patterns) .....	34
3.3 อัลกอริทึมเส้นตรง (Bresenham's Line Algorithm) .....	38
3.4 ตัวกรองสวิตซกี-โกลีย์ (Savitzky-Golay Filter) .....	41
3.5 การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing).....	44
3.6 การปรับปรุงภาพ (Image Enhancement) .....	45

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การออกแบบระบบการวัดความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตโดยใช้ลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง.....	51
4.1 หลักการสร้างภาพที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ .....	51
4.2 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการวัดความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตโดยใช้ลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง.....	54
4.3 ขั้นตอนการประมวลผลภาพและการทำงานของระบบการวัดความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตโดยใช้ลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง.....	57
4.4 ความไม่แน่นอนในการวัด (Uncertainty of Measurement).....	63
บทที่ 5 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	66
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	66
5.2 วัตถุที่ใช้ในการทดสอบ .....	67
5.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด.....	68
5.4 ผลการทดลองและวิจารณ์ .....	69
5.5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	75
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	77
6.1 สรุปผลการวิจัย .....	77
6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ .....	77
เอกสารอ้างอิง .....	79
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์ .....	81
ประวัติผู้เขียน .....	96

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 แสดงการสอบเทียบค่าความผิดพลาดของความหนา.....	67
5.2 แสดงค่าการวัดซ้ำเพื่อหาค่าความไม่แน่นอนในการวัด.....	69
5.3 แสดงค่าความราบเรียบของแผ่นตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ.....	70
5.4 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองหาความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตโดยใช้มือหมุน.....	72
5.5 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองหาความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตโดยใช้ความเร็วในการ หมุนแทนวางชิ้นงาน 3 รอบต่อนาที.....	73
5.6 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองหาความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตโดยใช้ความเร็วในการ หมุนแทนวางชิ้นงาน 4 รอบต่อนาที.....	74
5.7 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองหาความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตโดยใช้ความเร็วในการ หมุนแทนวางชิ้นงาน 5 รอบต่อนาที.....	75

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 วิธีการวัดความราบเรียบแผ่นออร์ฟิตแบบปัจจุบัน .....	2
2.1 หลักการเรขาคณิตใช้สำหรับการวัดความสูง .....	6
2.2 ระยะความสูง ( $\Delta h$ ) ต่อการเคลื่อนที่ในแนวนอน ( $\Delta d$ ).....	8
2.3 การไม่อยู่ในตำแหน่งเรขาคณิตของแนวการวัด .....	9
2.4 อุปกรณ์ทดสอบความเรียบผิวของวัสดุ.....	12
2.5 ชุดการทดสอบความเรียบผิวแบบพีโซอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ .....	13
2.6 แสดงลดทอนการแทรกสอดที่เกิดจากผิวลักษณะต่างๆกัน .....	14
2.7 แสดงการหาความเรียบด้วยวิธี Fringe splitting .....	15
2.8 โครงสร้างการวัดแสงแบบสามเหลี่ยม.....	16
3.1 หลักการวัดระยะทางโดยใช้คลื่นแสง .....	19
3.2 ความต่างของมุมเฟสที่สะท้อนกลับมาเมื่อกระทบวัตถุ .....	19
3.3 การวัดระยะทางโดยหลักการของรูปสามเหลี่ยม .....	20
3.4 หลักการของระบบสเตอริโอวิชั่น (Stereo Vision) .....	21
3.5 การวัดระยะทางในระบบสเตอริโอวิชั่น .....	22
3.6 ภาพถ่ายสเตอริโอที่ได้จากกล้องซ้ายและกล้องขวา .....	23
3.7 ภาพความแตกต่างของกล้องทั้งสองเมื่อนำมารวมกัน .....	24
3.8 ตัวอย่างการคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ .....	24
3.9 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบจุด. ....	26
3.10 การวิเคราะห์ระยะทางของรูปสามเหลี่ยมแบบแอกทิฟ .....	27
3.11 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบเส้น .....	29
3.12 ฉากรหัสไบนารี (Binary Code Pattern) .....	29
3.13 เทคนิคการฉายแสงผ่านรหัสไบนารี (Binary Code Pattern) .....	30
3.14 ภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารี .....	30
3.15 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสไบนารี .....	32
3.16 ฉากรหัสเกรย์ (Gray Code Pattern) .....	32
3.17 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสเกรย์ .....	34

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนวัตถุ .....	35
3.19 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ .....	35
3.20 การสแกนโดยการใช้แสงแบ่งส่วนวัตถุ (Light-Sectioning) .....	36
3.21 (ก) การเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านเส้นแสง (ข) ภาพที่ได้ในเฟรมต่าง ๆ เมื่อมีวัตถุตัดผ่าน .....	37
3.22 ตัวอย่างการนำภาพตัดขวางแต่ละส่วนมารวมกันเพื่อสร้างภาพตัดขวาง 3 มิติ .....	37
3.23 แสดงการสร้างเส้นตรงบนจอภาพ.....	39
3.24 อัลกอริทึมในการวาดเส้นตรงของ Bresenham .....	43
3.25 แสดงผลการทดสอบการใช้ตัวกรอง ภาพบน: สัญญาณอินพุตที่ถูกเพิ่มสัญญาณรบกวน (เส้นประคือสัญญาณหลัก) ภาพกลาง: ตัวกรองเฉลี่ยเลื่อนหน้าต่างแบบธรรมดา (Simple Moving Window Average) ภาพล่าง: ตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ โดยใช้ค่าพหุนาม $M = 4$ .....	43
3.26 แสดงความแตกต่างระหว่างภาพแอนาล็อก (ซ้าย) กับภาพดิจิทัล (ขวา).....	44
3.27 ระบบพิกัดของภาพดิจิทัล.....	45
3.28 การรวมกันของสี RGB แบบ Additive.....	46
3.29 แสดงระดับสีเทาที่มีขนาด 8 บิต.....	46
3.30 แสดงภาพระดับสีเทาและภาพแบบไบนารี.....	47
3.31 แสดงการทำเทรซโฮลด์แบบไบนารี.....	48
3.32 แสดงการทำเทรซโฮลด์แบบไบนารีกลับด้าน.....	48
3.33 แสดงการทำเทรซโฮลด์แบบหัวตัด.....	49
3.34 แสดงการทำเทรซโฮลด์แบบฐานตัดกลับด้าน.....	50
4.1 แนวคิดในการสร้างภาพด้วยวิธีการลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ.....	52
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของเซนเซอร์ซีซีดีกับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์.....	52
4.3 แสดงการแปลงข้อมูลภาพเป็นข้อมูลตัวเลขในเชิงพิกัดคาร์ทีเซียน.....	53
4.4 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุ.....	55
4.5 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดแบบเส้นที่ใช้ในงานวิจัย.....	55
4.6 กล้อง Basler รุ่น ac A640-120gm/gc .....	56
4.7 เลนส์ SV-1214V .....	56

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ตัวกรองคลื่นแสงย่านสีแดง Sharp Cut Filters R64-27 M27x0.5.....	57
4.9 ขั้นตอนการประมวลผลภาพ.....	58
4.10 Extract Color Planes (RGB – Red Plane 8 Bit Image) .....	59
4.11 Extract Color Planes Code ของโปรแกรม .....	60
4.12 Threshold Setup and Lookup Table .....	60
4.13 Threshold Setup and Lookup Table Code ของโปรแกรม .....	61
4.14 การคำนวณความหนาของแผ่นออริฟิต (Thickness Calculation).....	61
4.15 การเลือกรูปแบบ Point Distance Calibration ในการสอบเทียบ.....	62
4.16 ไม้บรรทัดมาตรฐานที่ได้รับการสอบเทียบ.....	62
4.17 แผนภูมิกำงปลาความไม่แน่นอนในการวัด.....	65
5.1 แผ่นออริฟิตที่ผ่านมาตรฐาน.....	66
5.2 แผ่นออริฟิตที่ไม่ผ่านมาตรฐาน.....	67
5.3 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดจากการสอบเทียบ.....	68
5.4 การวัดความหนาแผ่นออริฟิตด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์แบบดิจิทัล.....	68
5.5 (ก) การเก็บภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ (ข) การเก็บภาพโดยไม่ใช้ฟิลเตอร์.....	71

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการวัดปริมาณก๊าซธรรมชาติมีหลากหลายวิธีและหลากหลายมาตรวัดในหาปริมาณก๊าซธรรมชาติ เช่น การวัดแบบความดันแตกต่าง (Differential Pressure) การวัดแบบคอลิโอริส (Coriolis) การวัดแบบเทอร์บาย (Turbine) ฯลฯ แต่การวัดปริมาณก๊าซธรรมชาติจากแท่นผลิตนอกฝั่งของประเทศไทยทั้งหมดใช้การวัดแบบความดันแตกต่างแบบออริฟิต (Orifice Meter) ดังนั้นการตรวจสอบแผ่นออริฟิตเป็นประจำทุกเดือนตามมาตรฐานสถาบันปิโตรแห่งประเทศไทย [1] เนื่องจากผู้ผลิตจะต้องจ่ายค่าภาคหลวงแก่กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ [17] ตามปริมาณก๊าซธรรมชาติที่รายงานจากมาตรวัด ดังนั้นการคงความแม่นยำของมาตรวัดก๊าซธรรมชาติให้ถูกต้องหรือมีความผิดพลาดที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้จึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในการวัดปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ผลิตจากแท่นนอกฝั่ง

มาตรวัดปริมาณก๊าซธรรมชาติโดยใช้หลักการความดันแตกต่างแบบออริฟิตนั้นถูกกำหนดให้ใช้เป็นมาตรวัดมาตรฐานเพื่อใช้สำหรับการหาปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ผลิตจากแท่นผลิตนอกฝั่งระหว่างผู้ผลิตและผู้รับซื้อก๊าซธรรมชาติ ผู้รับซื้อก๊าซธรรมชาติรวมถึงกรมเชื้อเพลิงธรรมชาติได้กำหนดให้มีการสอบเทียบและทวนสอบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับมาตรวัดปริมาณก๊าซธรรมชาติทุกๆ 30 วัน [17] เช่น หน่วยวัดอุณหภูมิ (Temperature Transmitter) หน่วยวัดความดัน (Pressure Transmitter) หน่วยวัดความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter) ความราบเรียบของแผ่นออริฟิต (Orifice Plate Flatness) ความเรียบผิวของแผ่นออริฟิต (Orifice Plate Roughness) ฯลฯ จะเห็นว่าการทวนสอบแผ่นออริฟิตนั้นมีความจำเป็น เพื่อให้มั่นใจได้ว่าแผ่นออริฟิตเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานของสถาบันสถาบันปิโตรแห่งประเทศไทย [1] ในบทที่ 14.3.2 เรื่องข้อกำหนดคุณลักษณะและการติดตั้งการวัดก๊าซธรรมชาติแบบแผ่นออริฟิตจุดร่วมศูนย์กลาง [1]

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การวัดความราบเรียบของแผ่นออริฟิต (Orifice Plate Flatness) เนื่องวิธีการวัดในปัจจุบันนั้นยังคงเป็นการวัดแบบสัมผัสที่ตัวแผ่นออริฟิตโดยตรง ซึ่งอาจมีความเสี่ยงที่จะทำให้พื้นผิวของแผ่นออริฟิตมีรอยขีดข่วนจากการวัดและอาจจะมีข้อผิดพลาดจากการวัดเนื่องจากใช้สายตาของมนุษย์เป็นเกณฑ์การตัดสินใจในการยอมรับว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของสถาบันสถาบันปิโตรแห่งประเทศไทย [1] หรือไม่ แล้วในวิธีการวัดความราบเรียบของแผ่นออริฟิตที่แท่นผลิตนอกฝั่งยังคงเป็นแบบสัมผัสซึ่งอาจเกิดความเสี่ยงจากการสัมผัสไม่ทั่วทั้งแผ่น ดังนั้นเพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้นำเอาหลักการฉายแสงเลเซอร์ลงบน

วัดดู [3][4][8] แล้วทำการประมวลผลภาพ [5][6][7] มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อลดความผิดพลาดจากการประเมินด้วยสายตาของผู้ที่วัดและการวัดที่ไม่เป็นแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 1.1 วิธีการวัดความราบเรียบแผ่นออร์ฟิตแบบปัจจุบัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอระบบที่มีความสามารถในการประมวลผลภาพตามเวลาจริง สำหรับการตรวจวัดความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตที่มีความสะดวกในการใช้งานและการติดตั้ง รวมทั้งมีความเร็วในการประมวลผลและสามารถบอกได้ถึงความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตเป็นหน่วยวัดมาตรฐานสากลได้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาวิธีการตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นประมวลผลภาพตามเวลาจริง ประกอบกับการใช้เทคนิคการประมวลผลภาพบนระนาบภาพ 2 มิติ [7] มาประยุกต์ร่วมกับเทคนิคที่ใช้หลักการของแสงเลเซอร์ที่ฉายลงไปที่วัดดูและทำการปรับปรุงภาพเพื่อให้ได้โครงร่างของแสงเลเซอร์ที่สมบูรณ์ [3][4][8] ก่อนนำมาคำนวณหาความหนาของแผ่นออร์ฟิต การคำนวณอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลของภาพ [6] ให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (มิลลิเมตร) ในขณะที่วัดดูเคลื่อนที่ผ่านไปบนจานหมุนที่ถูกขับเคลื่อนด้วยความเร็วต่ำ ความหนาของแผ่นออร์ฟิตที่ถูกคำนวณจะถูกแปลงมาหน่วยของการวัดมาตรฐานสากล การออกแบบระบบที่นำเสนอ คำนึงถึงความง่ายในการออกแบบและการใช้งานทั้งยังมีความเร็วในการทำงาน มีความถูกต้องแม่นยำและมีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การวัดด้วยวิธีเดิม

### 1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากการศึกษาถึงปัญหาและข้อจำกัดต่าง ๆ จึงมีแนวความคิดในการออกแบบพัฒนาระบบการวิธีการตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออริฟิต ในลักษณะที่สามารถตรวจสอบได้ตลอดทั้งแผ่นบนแท่นหมุนวัตถุและนำเสนอเทคนิคการใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ (Laser Light Sectioning) [7][8] ที่เป็นเทคนิคการวัดรูปร่างแบบตัดขวางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความสะดวกและง่ายในการออกแบบ โดยเป็นการฉายแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิววัตถุเพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงตกกระทบและภาพของลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุที่รับได้จากกล้องจะถูกประมวลผลด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ โดยวัตถุจะเคลื่อนที่ไปบนแท่นหมุนวัตถุ ภาพของลำแสงเลเซอร์สีแดงที่ได้ผ่านตัวกรองแสงความยาวคลื่นย่านแคบที่ 650 nm เพื่อตัดแสงรบกวนจากภายนอกและทำการปรับปรุงภาพด้วย Bresenham's Line Algorithm และ Savitzky-Golay Filter เพื่อให้ได้โครงร่างของแสงเลเซอร์ที่สมบูรณ์หลังจากนั้นนำมาคำนวณหาความหนาของวัตถุ การคำนวณอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลของภาพให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) ในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ข้อมูลความหนาของวัตถุจะถูกเก็บในรูปแบบ CSV เพื่อนำมาประมวลผลทางสถิติ [2] ต่อไป

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออริฟิตขนาดต่างๆ ตั้งแต่ขนาด 1 นิ้วถึงขนาด 12 นิ้ว โดยการใช้เทคนิคแสงเลเซอร์บนวัตถุร่วมกับการประมวลผลภาพตามเวลาจริง แล้วทำการคำนวณหาความหนาของวัตถุโดยอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลของภาพที่ได้ให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) ในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากล โดยให้ความถูกต้องแม่นยำและมีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

### 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 6 บทด้วยกัน โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการวัดความราบเรียบของวัตถุแบบต่าง ๆ เช่น การวัดความราบเรียบของวัตถุโดยใช้เทคนิคการฉายแสงเลเซอร์ลงบนวัตถุแบบสามเหลี่ยม การวัดความราบเรียบของวัตถุโดยใช้เทคนิคพีโซอินเตอร์เฟอร์โรมิเตอร์ การวัดความราบเรียบของวัตถุแบบไม่สัมผัสชิ้นงานขนาดใหญ่แบบ 2 มิติ

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การเก็บข้อมูลสามมิติ รูปแบบการสแกนวัตถุ ทฤษฎีตัวกรองแบบ สาทวิทซกีโกเลย์ และการปรับปรุงภาพ

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบระบบการออกแบบระบบการวัดความราบเรียบของแผ่นออริฟิตโดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวางและการติดตั้งอุปกรณ์ ขั้นตอนการประมวลผลภาพและการทำงานของระบบ

บทที่ 5 กล่าวถึงขั้นตอนของการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง การเก็บภาพทั้งแบบใส่ตัวกรองแสงเลเซอร์และไม่ใส่ตัวกรองแสงเลเซอร์ การเปรียบเทียบผลกระทบจากความเร็วในการหมุนแท่นวางชิ้นงานโดยใช้มือหมุนและใช้มอเตอร์

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะต่างๆ

## บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

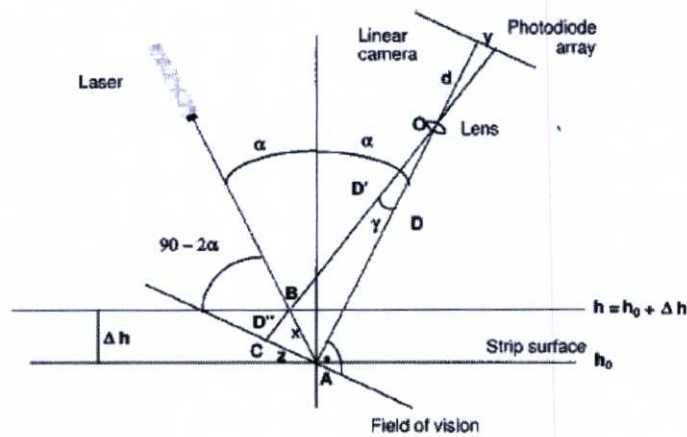
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดความราบเรียบของวัตถุแบบต่าง ๆ ส่วนใหญ่เป็นการใช้เครื่องจักรกลวิทัศน์ในการหาความราบเรียบของวัตถุนั้น สามารถที่จะช่วยประหยัดเวลาและยังสามารถลดความผิดพลาดในการวัดที่เกิดจากสายตาของมนุษย์ได้ด้วย ทั้งช่วยลดต้นทุนในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์และเพิ่มความน่าเชื่อถือในตัวผลิตภัณฑ์อีกด้วย วิธีการที่แตกต่างกันสำหรับการวัดความราบเรียบของวัตถุแบบไม่สัมผัสตัววัตถุ โดยจะมุ่งเน้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสามารถวัดวัดความราบเรียบของวัตถุแบบไม่สัมผัสตัววัตถุ [7] การวิเคราะห์ระบบที่แตกต่างกันได้ถูกนำมาเปรียบเทียบในเงื่อนไขของความสามารถ ความแม่นยำและปริมาณงานที่ทำในช่วงเวลาหนึ่ง อย่างไรก็ตามการประเมินผลอย่างรวดเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งจำเป็นในการแยกประเภทของดีหรือเสีย [6]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาาระบบการวัดความราบเรียบของวัตถุได้ถูกพัฒนาแต่การวัดความราบเรียบของวัตถุโดยวิธีการฉายแสงเลเซอร์ลงบนผิวของวัตถุได้ถูกเริ่มต้นพัฒนาในปลายปีคริสต์ศักราช 1980 จนถึงต้นปีคริสต์ศักราช 1990 [4] แต่ระบบนั้นยังมีข้อจำกัดอยู่มากเนื่องจากราคาของส่วนประกอบออปติคอลที่มีราคาค่อนข้างสูง และการได้ถูกพัฒนาขึ้นการวัดความราบเรียบของวัตถุแบบไม่สัมผัสหลายวิธีที่แตกต่างกันไปดังนี้

1. การวัดความราบเรียบของวัตถุโดยใช้เทคนิคการฉายแสงเลเซอร์ลงบนวัตถุแบบสามเหลี่ยม (Flatness Measurement by Optical Triangle Technique)
2. การวัดความราบเรียบของวัตถุโดยใช้เทคนิคพีโซอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Flatness Measurement by Fizeau Interferometer Technique)
3. ระบบการวัดความราบเรียบของวัตถุแบบไม่สัมผัสชิ้นงานขนาดใหญ่แบบ 2 มิติ (A New Noncontact Flatness Measuring System of Large 2-D Flat Workpiece)

## 2.1 การวัดความราบเรียบของวัตถุโดยใช้เทคนิคการฉายแสงเลเซอร์ลงบนวัตถุแบบสามเหลี่ยม (Flatness Measurement by Optical Triangle Technique)

การวัดความราบเรียบของวัตถุโดยวิธีการฉายแสงเลเซอร์ลงบนผิวของวัตถุได้ถูกเริ่มต้นพัฒนาในปลายปีคริสต์ศักราช 1980 จนถึงต้นปีคริสต์ศักราช 1990 หลักการพื้นฐานคือเมื่อลำแสงเลเซอร์ปะทะกับผิวของวัตถุที่ตำแหน่ง A และวัตถุมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้งแสงเลเซอร์กระทบผิวของวัตถุที่ตำแหน่ง B ตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างจุด A และ B จะถูกวัดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแสงเลเซอร์คือ  $\alpha$  การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแสงเลเซอร์ถูกจับภาพด้วยกล้องที่ส่องลงบนวัตถุในมุม  $z$  ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการเรขาคณิตใช้สำหรับการวัดความสูง [8]

โดยใช้ความสัมพันธ์ตรีโกณมิติเราสามารถได้สมการสำหรับการเปลี่ยนรูปแบบการประมาณการของตำแหน่งเลเซอร์ลงบนความสูงของวัตถุ ในสมการที่นี้เรากำหนดให้เป็น  $D$  คือระยะทางจากเลนส์กล้องไปยังตำแหน่งวัตถุที่เริ่มต้น และ  $\chi$  คือมุมที่รูปแบบองค์ประกอบแสง (เลเซอร์และกล้อง) กับแนวตั้ง (ในกรณีนี้ทั้งสองมุมที่จะถือว่าเป็นแบบเดียวกัน) ดังนั้นในการใช้รูปสามเหลี่ยม ABQ ประยุกต์กับทฤษฎีบทไซน์ที่เรามีดังสมการที่ 2.1

$$\sin \gamma = \frac{\chi \sin 2\alpha}{D'} \quad (2.1)$$

และทฤษฎีบทโคไซน์ดังสมการที่ 2.2

$$\cos \gamma = \frac{D^2 + D'^2 - \chi^2}{2DD'} \quad (2.2)$$

จากมุมสามเหลี่ยม  $ACO$  ด้านขวาเราจะได้สมการที่ 2.3

$$z = D \times \tan \gamma = D \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.3 เราแทน  $\sin \gamma$  และ  $\cos \gamma$  เราจะได้สมการที่ 2.4

$$z = \frac{D\chi \sin 2\alpha}{D - \chi \cos 2\alpha} \quad (2.4)$$

จากรูปที่ 2.1 มีความเป็นไปได้ที่จะได้สมการที่ 2.5

$$\chi = \frac{\Delta h}{\cos \alpha} \quad (2.5)$$

แทน  $\chi$  ในสมการที่ 2.4 เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งเลเซอร์กับความสูงที่เพิ่มขึ้น

$$z = \frac{D\Delta h \sin 2\alpha}{D \cos \alpha - \Delta h \cos 2\alpha} \quad (2.6)$$

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดฉายเลเซอร์  $z$  จับภาพในกล้องโฟโตไดโอดอาร์เรย์ได้เป็นระยะทาง  $y$  สามารถเห็นได้จากจากรูปที่ 2.1

ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างการเปลี่ยนแปลง  $z$  กับ  $y$  ขึ้นอยู่กับระยะทาง  $D$  และความยาวโฟกัสของกล้อง  $d$  เราจะเรียกความสัมพันธ์นี้ว่าปัจจัยการขยายและแทนด้วย  $K$

$$z = K \times y \quad (2.7)$$

ระยะทาง  $y$  สามารถวัดได้จากการคูณจำนวนพิกเซล  $N_{px}$  และระยะห่างระหว่างสองพิกเซลที่ต่อเนื่องกัน  $K_{px}$

$$y = K_{px} \times N_{px} \quad (2.8)$$

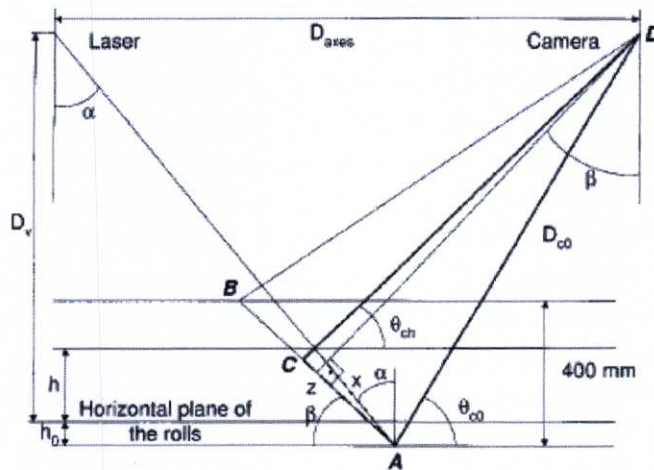


ใหม่ที่  $30^\circ$  ซึ่งมีข้อได้เปรียบหลักคือการลดลงของการเคลื่อนที่ในแนวนอน  $\Delta d$  ซึ่งได้สมการใหม่ในสมการที่ 2.10 การเพิ่ม 100% ในช่วงการวัดความสูงจะประสบความสำเร็จมีเพียง 15.5% ที่เพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ในแนวนอน

$$\Delta d = \Delta h \times \tan \alpha \quad (2.10)$$

สมการนี้ทำให้มีกระบวนการของการคำนวณความสูงที่ซับซ้อนมากขึ้นได้

การวิเคราะห์ที่ง่าย ๆ ได้ดำเนินการพิจารณาว่าทั้งเลเซอร์และกล้องของเส้นสามเหลี่ยมแต่ละเส้นเป็นรูปแบบที่มุมเดียวกันคือ  $\alpha$  จากแนวตั้งอย่างไรก็ตามในระบบจริงมุมของเลเซอร์  $\alpha$  และมุมของกล้อง  $\beta$  ไม่เหมือนกันเนื่องจากการไม่อยู่ในตำแหน่งเรขาคณิตและการเคลื่อนไหวของสมการเส้นในเพื่อที่จะปรับตำแหน่งของพวกเขากับความกว้างของแถบที่จะวัด นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงในค่าของมุมที่ส่งผลกระทบต่อปัจจัย  $D$  ของสมการที่ 2.9 ซึ่งในทางกลับกันเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่า  $K$  ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องได้รับการค่าทั่วไปมากขึ้นสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและพิทเชล ความสัมพันธ์ใหม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางเรขาคณิตจะประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ตรีโกณมิติดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การไม่อยู่ในตำแหน่งเรขาคณิตของแนวการวัด [8]

ในรูปนี้  $D_{axes}$ ,  $D_v$  และ  $h_0$  คือค่าคงที่ของระบบ  $D_{axes}$  แทนระยะห่างระหว่างแกนขององค์ประกอบแสงในเส้นที่วัด  $D_v$  คือระยะห่างจากแนวขององค์ประกอบของแสงกับระนาบของวัตถุ และ  $h_0$  คือช่วงการวัดพิจารณาภายใต้แนววัด  $\alpha$  และ  $\beta$  คือมุมของเลเซอร์และกล้องในแนวตั้งตามลำดับ  $D_{co}$ ,  $\theta_{co}$  และ  $\theta_{ch}$  คือปัจจัยทางเรขาคณิตซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของแนวการวัด  $D_c$  คือระยะทางจากเลนส์กล้องไปยังตำแหน่งที่ต่ำกว่าขอบเขตของวิสัยทัศน์และ  $\theta_{co}$  คือมุมระหว่าง

$D_{c0}$  กับแนวนอน และ  $\theta_{ch}$  คือมุมระหว่างลำแสงที่สะท้อนกับแนวนอน ตัวแปรที่เหลือในรูปที่ 2.3 จะเหมือนกับรูปที่ 2.1

โดยการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันตรีโกณมิติที่เรารู้จักกันดีในรูปที่ 2.3 สมการสำหรับการฉายของภาพเลเซอร์บนสนามของกล้องของวิสัยทัศน์จะได้ดังนี้

$$z(h, \alpha, \beta) = D_{c0}(\alpha) \frac{[\sin \theta_{c0} - \cos \theta_{c0}(\alpha) \frac{D_y - h}{D_{axes} - (D_v - h) \tan \alpha}]}{[\frac{D_y - h}{D_{axes} - (D_v - h) \tan \alpha} \cos \beta + \sin \beta]} \quad (2.11)$$

ใช้ความสัมพันธ์ 2.7, 2.8 และ 2.11 สามารถเขียนใหม่

$$N_{px} \cdot K \cdot L_{px} = \frac{(D_v - h_0)[1 - \cot \theta_{c0}(\alpha) \frac{D_y - h}{D_{axes} - (D_v - h) \tan \alpha}]}{[\frac{D_y - h}{D_{axes} - (D_v - h) \tan \alpha} \cos \beta + \sin \beta]} \quad (2.12)$$

หาค่าของ  $h$  ในสมการที่ 2.12 เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและพิกเซลสามารถเขียนเป็นสมการง่ายๆ ดังนี้

$$h(N_{px}, \alpha, \beta) = \frac{N_{px} \cdot k_1(\alpha, \beta) + k_2(\alpha, \beta)}{N_{px} \cdot k_3(\alpha, \beta) + k_4(\alpha, \beta)} \quad (2.13)$$

ที่  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  และ  $k_4$  คือค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเป็น

$$k_1(\alpha, \beta) = K \cdot L_{px} \left( \cot \alpha + \frac{D_{axes} \tan \beta}{D_v \tan \alpha} - \tan \beta \right)$$

$$k_2(\alpha, \beta) = \frac{D_v + h_0}{\cos \beta} \left( \frac{\cot \theta_{c0}(\alpha)}{\tan \alpha} + 1 - \frac{D_{axes}}{D_v \tan \alpha} \right)$$

$$k_3(\alpha, \beta) = \frac{D_v + h_0}{D_v \cos \beta} \left( 1 + \frac{\cot \theta_{c0}(\alpha)}{\tan \alpha} \right)$$

$$k_4(\alpha, \beta) = K \cdot \frac{L_{px}}{D_v} (\cot \alpha - \tan \beta)$$

หาค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดระหว่าง  $k_4$  เราได้สมการที่ง่ายสำหรับ 2.13 มีเพียงสัมประสิทธิ์ 3 ตัว  $k_1$ ,  $k_2$  และ  $k_3$

$$h(N_{px}, \alpha, \beta) = \frac{N_{px} \cdot k_1 \cdot (\alpha, \beta) + k_2 \cdot (\alpha, \beta)}{N_{px} \cdot k_3 \cdot (\alpha, \beta) + 1} \quad (2.14)$$

การคำนวณความสูงมีความซับซ้อนมากขึ้นกว่าในสถานการณ์เชิงเส้นใน 2.9 กับ  $\alpha = 45^\circ$  และเวลาในการคำนวณของอัลกอริทึมที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นนี้ได้รับการวัดและพบว่าเป็น  $20 \pm 5$  ไมโครวินาทีความแตกต่างนี้จะไม่ถือว่ามีความสำคัญเมื่อเทียบกับเวลาที่กลุ่มตัวอย่างที่ 2 มิลลิวินาทีที่ใช้ในระบบนี้ เพื่อประยุกต์ 2.14 สำหรับสามเหลี่ยมในแต่ละเส้นค่าสัมประสิทธิ์ 3 ตัว  $k_1$ ,  $k_2$  และ  $k_3$  จะต้องถูกคำนวณค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้จะแปรผันตรงต่อมุม  $\alpha$  และ  $\beta$  เนื่องจากความซับซ้อนของการเป็นตัวแทนของการอ้างอิงทั้งหมดเหล่านี้วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ที่จะได้รับการสอบเทียบดังต่อไปนี้

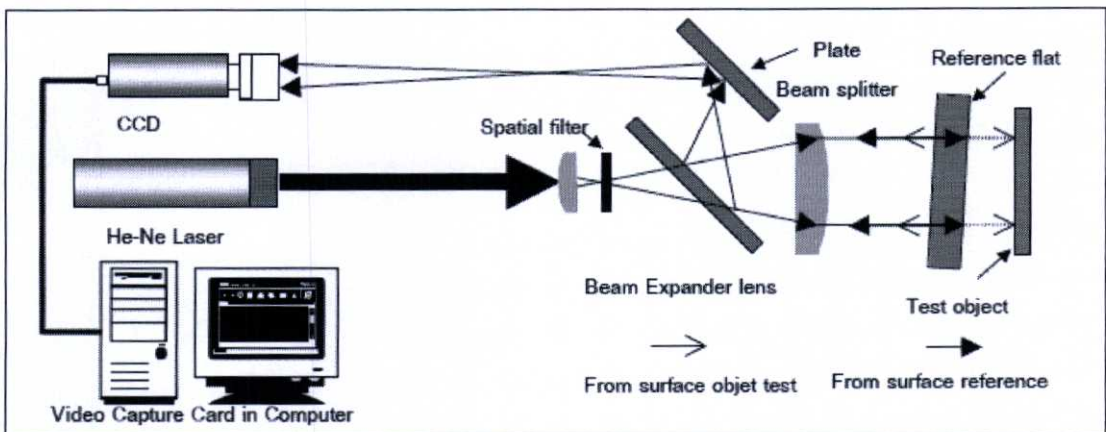
ด้วยการวัดความสูงของสามจุดต่ำคือจุด ต่ำ กลางและสูงของระยะความสูงทั้งหมดระบบสมการเชิงเส้นจะจัดมีค่าเฉลี่ยของความสูงที่วัดวิธีการแก้ปัญหาของพวกเขาจะช่วยให้ค่าในสามของค่าสัมประสิทธิ์ ขั้นตอนนี้จะต้องทำซ้ำสำหรับแต่ละรูปทรงเรขาคณิตที่จะวัด อย่างน้อยทำการกำหนดค่าเรขาคณิตจะต้องใช้ซึ่งต้องกำหนดอย่างน้อย 5 จุดของเรขาคณิตต้องใช้ที่สอดคล้องกับความแคบกว้างและ 3 ค่ากลาง เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการกำหนดค่าใด ๆ ทางเรขาคณิตของระบบแต่ละสัมประสิทธิ์ของ  $k_i$  คือการประมาณค่าใน 2.15 ของพารามิเตอร์  $a_{ij}$  จะคำนวณโดยใช้วิธีการลดสี่เหลี่ยม สมการ 2.15 ขึ้นอยู่กับเพียงมุมเลเซอร์มุมหนึ่ง ในกรณีนี้มุมอื่น ๆ ปรับโดยอัตโนมัติเพื่อค่าที่เหมาะสมในการตั้งจุดเลเซอร์ที่อ้างอิงความสูง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้พหุนามประมาณถูกนำมาใช้เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับมุมอื่น ๆ แต่ละห้วงของสัมประสิทธิ์โดยแสดงสมการ

$$K_i(\alpha) = a_{i0} + a_{i1}\alpha + a_{i2}\alpha^2 + a_{i3}\alpha^3 \quad (2.15)$$

ขั้นตอนในระหว่างการสอบเทียบมีการวัดอย่าง 15 ครั้ง 5 มุมที่แตกต่างกันและ 3 ความสูงสำหรับแต่ละมุมและจะต้องทำซ้ำ ๆ สำหรับสายสามเหลี่ยมแต่ละรอบปิดคอลลอยกเว้นจุดกึ่งกลางที่ไม่เปลี่ยนแปลงเพื่อที่จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ ระหว่างการดำเนินการออนไลน์ของระบบการวัดความราบเรียบค่าสัมประสิทธิ์  $k_1$ ,  $k_2$  และ  $k_3$  สามารถได้มาอย่างง่ายดายสำหรับการกำหนดค่าเรขาคณิตใด ๆ ที่กำหนดโดยมุม  $\alpha$  ของ 2.15

## 2.2 การวัดความราบเรียบของวัตถุโดยใช้เทคนิคฟิโซอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Flatness Measurement by Fizeau Interferometer Technique)

การวัดความเรียบระดับสูงจะใช้หลักการทางแสง [12] วิเคราะห์ลวดลายของการแทรกสอด (Interferogram) ซึ่งเกิดจากการแทรกสอดของแสง 2 ขบวน โดยแสงขบวนหนึ่งจะสะท้อนมาจากผิวที่มีความเรียบที่แน่นอนและมีความเรียบสูง (Reference optical flat) ส่วนลำแสงอีกขบวนหนึ่งจะสะท้อนมาจากผิววัตถุที่ต้องการทดสอบ ลักษณะของผิววัตถุที่แตกต่างกันจะให้ลวดลายที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งลวดลายที่เกิดการสอดแทรกที่ได้นี้ จะถูกนำมาแปลความหมายเพื่อที่จะบ่งบอกถึงลักษณะพื้นผิวที่ทดสอบ ด้วยวิธีการวัดดังกล่าวนี้จะมีข้อดีมากกว่าวิธีในทางกล กล่าวคือในขณะระหว่างทำการทดสอบผิวของชิ้นงานจะไม่ถูกสัมผัส ดังนั้นชิ้นงานจะไม่เกิดความเสียหายหลังจากการทดสอบและข้อดีอีกประการหนึ่งคือภาพที่ได้จะมีลวดลายการสอดแทรกที่เกิดขึ้นสามารถนำมาไปแปลความหมายในลักษณะของพื้นผิวที่เป็น 3 มิติได้ วิธีการสอดแทรกแบบฟิโซอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและให้ผลที่ชัดเจนในระดับหนึ่ง

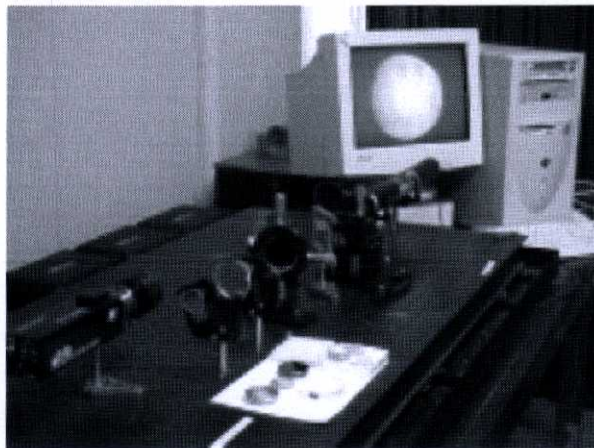


รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ทดสอบความเรียบผิวของวัสดุ [12]

ในรูปที่ 2.4 แสดงทางเดินของแสงที่เกิดการสอดแทรกแบบฟิโซอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ แหล่งกำเนิดแสงเป็นฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ขนาดกำลัง 10 มิลลิวัตต์ ขนาดของลำแสงเลเซอร์ประมาณ 1 มิลลิเมตรเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการตรวจสอบผิววัตถุที่ทดสอบ ขนาดของลำแสงจะถูกขยายด้วยบีมเอ็กแพนเดอร์เลนส์ ประกอบด้วยเลนส์เข้าและเลนส์ออกโดยที่ทั้งสองเลนส์เป็นเลนส์นูน เลนส์เข้าและเลนส์ออกมีความยาวโฟกัส 5.1 และ 209.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ เลนส์อยู่ห่างกัน 214.5 มิลลิเมตรทำให้เพื่อกำลังขยายเป็น 20 เท่า ส่งผลให้ขนาดของลำแสงเลเซอร์เป็นวงกลมมีรัศมีประมาณ 2 เซนติเมตร โดยลำแสงเลเซอร์ยังคงเป็นลำแสงขนานอยู่ ระหว่างเลนส์ทั้งสองจะทำการติดตั้งตัวแยกลำแสง (Beam Splitter) วางทำมุม 45 องศากับแนวลำแสง ประเภทของตัวแยกลำแสงที่ใช้งานนี้เป็นชนิดแผ่น (Plate Beam Splitter) ถ้าใช้เป็นผลึก

แยกลำแสง (Cube Beam Splitter) จะเกิดการสะท้อนภายในผลึกและทำให้เกิดลำแสงมารบกวน การสอดแทรก ทำให้ลวดลายการสอดแทรกไม่ชัดเจนสังเกตยากและตัวแยกลำแสงชนิดแผ่น สามารถเลือกให้มีขนาดใหญ่ได้แต่ถ้าเป็นผลึกแยกลำแสงแล้วจะมีขนาดที่จำกัด

ในการทดสอบนี้ใช้แผ่นแยกลำแสงขนาด 5 ตารางเซนติเมตร แสงที่ผ่านแผ่นแยกลำแสง จะแยกแสงออกเป็น 2 ลำ ลำแสงหนึ่งจะสะท้อนทำมุม  $90^\circ$  กับแนวเดิม ซึ่งลำแสงแนวนี้จะไม่ถูก พิจารณา ส่วนอีกลำหนึ่งจะทะลุผ่านแผ่นแยกลำแสงไปตกกระทบยังแผ่นผิวเรียบอ้างอิงที่มีความเรียบ  $\lambda/20$  ทำมุมเอียงเล็กน้อยและจะสะท้อนกลับออกมา ในเวลาเดียวกันจะมีแสงบางส่วนทะลุผ่านแผ่น ผิวเรียบอ้างอิงเนื่องจากมีความโปร่งใส ลำแสงส่วนนี้จะเดินทางไปตกกระทบพื้นผิววัสดุที่ต้องการ ทดสอบและจะสะท้อนกลับทางเดิม คลื่นที่สะท้อนกลับมานี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของ พื้นผิว ลำแสงที่สะท้อนกลับออกมาจากทั้งสองผิววัตถุจะเกิดการสอดแทรกกัน ภาพลวดลายการ สอดแทรกที่เกิดขึ้นจะตกกระทบบนแผ่นแยกลำแสงแล้วสะท้อนไปตกกระทบกับแผ่นแยกลำแสงอีก แผ่นหนึ่งเพื่อให้ลำแสงทำมุม  $180^\circ$  กับแนวลำแสงที่ออกมาจากฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ ภาพ ลวดลายการแทรกสอดที่เกิดขึ้นนี้ถูกบันทึกโดยกล้อง CCD ซึ่งเชื่อมต่อเข้ากับตัวบันทึกภาพที่มีแคป เจอร์การ์ดที่ติดอยู่ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งระบบทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ชุดการทดสอบความเรียบผิวแบบพีโซอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ [12]

### 2.2.1 การคำนวณหาความเรียบของพื้นผิว

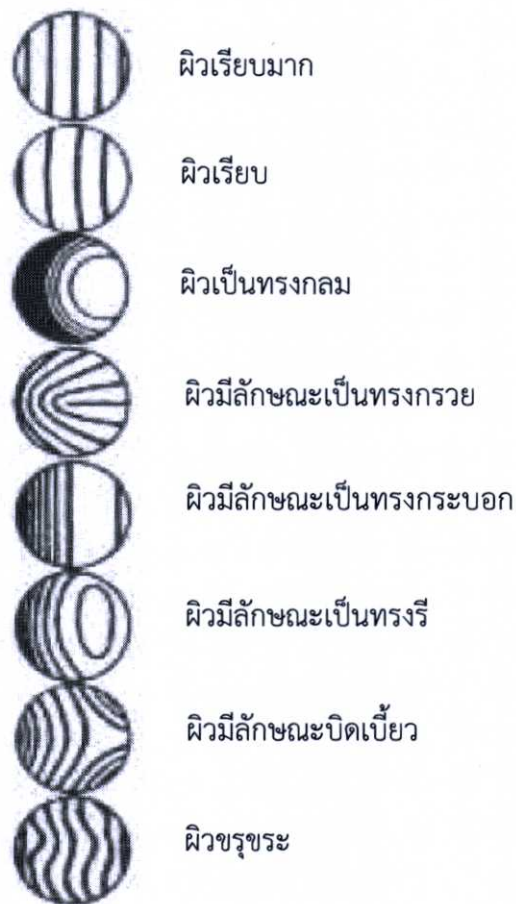
สำหรับวิธีการในการบอกความหมายของพื้นผิวจากลวดลายการแทรกสอดนั้น ใช้วิธีวิเคราะห์จากภาพลวดลายการสอดแทรกดังรูปที่ 2.6 และการหาความเรียบของผิวใช้วิธี Fringe splitting ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งวิธีการนี้เป็นการศึกษาจากลักษณะรูปร่างของลวดลายการแทรกสอดที่เกิดขึ้น ได้แก่พวกความตรง ความขนาน และระยะห่างของแถบมืดแถบสว่าง ซึ่งใช้ได้ในกรณีของผิววัสดุที่มีความเรียบจะได้สมการที่ 2.16

$$PV = \frac{B}{A} \times \frac{\lambda}{2} \quad (2.16)$$

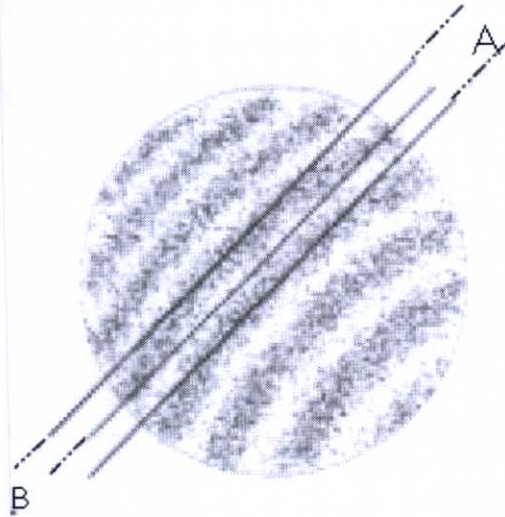
เมื่อ  $PV$  คือความเรียบ

$B$  คือความโค้งของฟริ่งเป็นระยะจากกึ่งกลางยอดของฟริ่งจนถึงริมขอบฟริ่งสองฟริ่งที่ติดกัน

$A$  คือระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางยอดของฟริ่งสอง



รูปที่ 2.6 แสดงลวดลายการแทรกสอดที่เกิดจากผิวลักษณะต่าง ๆ กัน [12]



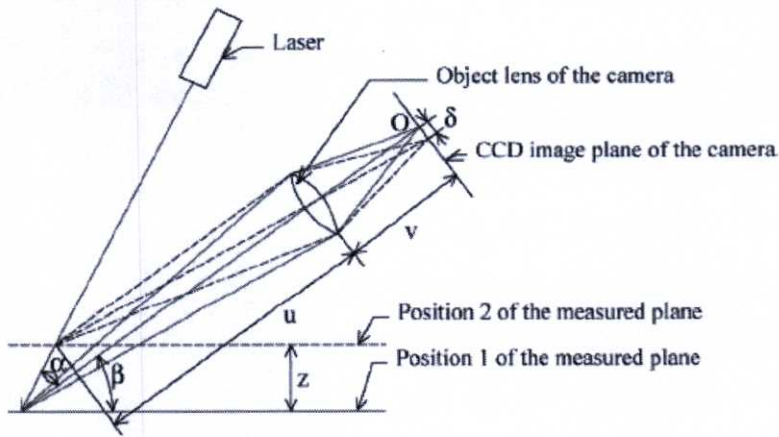
รูปที่ 2.7 แสดงการหาความเรียบด้วยวิธี Fringe splitting [12]

### 2.3 ระบบการวัดความราบเรียบของวัตถุแบบไม่สัมผัสชิ้นงานขนาดใหญ่แบบ 2 มิติ (A New Noncontact Flatness Measuring System of Large 2-D Flat Workpiece)

คอस्ता (Costa) ทำการพัฒนาระบบการวัดแบบรูปสามเหลี่ยมแสงโดยที่ความเรียบของพื้นผิวซิลิคอนชิปที่สามารถวัดได้อย่างถูกต้องแต่ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเฉพาะผิวพื้นที่มีขนาดเล็ก การ์เซีย (Garcia) อธิบายการพัฒนาของระบบการวัดความเรียบด้วยเทคนิคแสงสามเหลี่ยมที่บรรจุอยู่ การในขั้นตอนการควบคุมของโรงเหล็กรีดร้อนในอุตสาหกรรมเหล็ก รูปแบบของพง (Phong's Model) ถูกใช้ในการจำลองการสะท้อนพื้นผิวในระบบที่เสนอโดยคาตะฟูจิ (Katafuchi) แต่ไม่เหมาะสมสำหรับพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบการวัดความราบเรียบแบบไม่สัมผัสแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาไม่จำเป็นต้องมีความแม่นยำทางกายภาพในการวัดและมีข้อได้เปรียบในเรื่องของความแม่นยำสูง ต้นทุนต่ำ และมีความสะดวกสบาย

#### 2.3.1 โครงสร้างการวัดแสงแบบสามเหลี่ยม

การตระหนักถึงการวัดความเรียบของชิ้นงานขนาดใหญ่พื้นที่โดยวิธีการฉายแสงแบบสามเหลี่ยมจะถูกนำเสนอตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างการวัดแสงแบบสามเหลี่ยม [10]

เมื่อจุดเลเซอร์ฉายแสงบนตำแหน่งที่ 1 ของแนวที่วัดภาพจะถือว่าสอดคล้องกับจุดเดิมของแนวภาพจากกล้องซีซีดี (CCD) เมื่อจุดเลเซอร์ฉายแสงบนตำแหน่งที่ 2 ของแนวที่วัดก็หมายความว่าจุดที่วัดได้มีการเพิ่มความสูงของ  $Z$  แล้วจุดภาพจะมีการขดเขย  $\delta$  เมื่อเทียบกับจุดเดิม สมมติว่าอัตราการขยายของระบบการวัดแสงคือ  $\lambda$  มุมระหว่างแกนของลำแสงเลเซอร์และแกนหลักแสงของกล้องคือ  $\alpha$  แกนของลำแสงเลเซอร์และแกนหลักของกล้องอยู่ในแนวเดียวกับออปติคอลเป็นการวัดหาค่าเริ่มต้นและมุมเฉียงแสงระหว่างระนาบสามเหลี่ยมและแนวเครื่องมือวัดที่เป็น  $\beta$  โครงสร้างแนวสามเหลี่ยมแสงตั้งฉากกับกระดาษหรือหน้าจอและมุมของ  $\alpha$  ไม่ควรเห็นในภาพที่ 2.8 อย่างไรก็ตามการอธิบายการกำหนดของ  $\alpha$  ในโครงสร้างแนวสามเหลี่ยมถูกวาดอยู่ในรูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่าง  $\alpha$  กับ  $\beta$  สามารถอธิบายได้อย่างกระจ่างชัดการเพิ่มขึ้นของความสูง  $z$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\delta = \frac{\tan \alpha}{\sin \beta} \cdot \lambda \cdot z \quad (2.17)$$

$$z = \frac{\sin \beta}{\lambda \cdot \tan \alpha} \cdot \delta = k \cdot \delta \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.18 การเปลี่ยนแปลงความสูง  $z$  ของจุดการวัดสามารถคำนวณได้โดยการเปลี่ยนตำแหน่ง  $\delta$  ของจุดภาพบนกล้องซีซีดี ความละเอียดของการวัดระบบการวัดสามารถขยายอย่างมากโดยการเพิ่ม  $\alpha$  ( $\alpha < 90^\circ$ ) หรือลด  $\beta$  เพราะมันสามารถขยายการกระจัดจุดบนภาพที่ได้จากกล้องซีซีดีที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของจุดที่วัด เพราะว่ามุม  $\beta$  ระหว่างแนวสามเหลี่ยมแสงเฉียงและแนวที่วัดที่มีขนาดเล็กมากระบบการวัดสามารถวัดความเรียบในแนวที่มีพื้นที่

ที่มีขนาดใหญ่  $k$  จะถูกกำหนดให้เหมาะสมในการออกแบบโครงสร้างที่ใช้ในการวัดเพราะว่า  $\alpha$  กับ  $\beta$  จะไม่ได้รับการเปลี่ยนแปลงโดยเครื่องมือวัดในกรอบเชิงกลและ  $\lambda$  ถูกกำหนดให้ตายตัวโดยระบบวัดแสง  $k$  จะเป็นค่าคงที่ในช่วงที่ระบบวัดความราบเรียบเข้ามาวัดที่พื้นผิวซึ่งหมายความว่าเรขาคณิตสามเหลี่ยมออปติคอลลจะยังคงเหมือนเดิมในตำแหน่งของการวัดแต่ละที่เมื่อระบบการวัดที่มีการเคลื่อนไหวบนชิ้นงาน 2 มิติขนาดใหญ่ เพื่อที่จะรักษาความมั่นคงของ  $k$  อันดับแรกเราต้องทำให้มั่นใจได้ว่าบริษัทที่ผลิตเครื่องมือวัดเชิงกลต้องมีความแม่นยำ อย่างที่สองคือเราต้องทำการสอบเทียบทุกๆครั้งก่อนทำการวัด

## บทที่ 3

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 3.1 การเก็บข้อมูลสามมิติ (3D Range Acquisition)

ในการเก็บข้อมูลสามมิติจะใช้ตัวตรวจจับชนิดต่าง ๆ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจจับยังไม่ใช้เป็นระยะทางจริง จะต้องนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการคำนวณใหม่เสียก่อน ซึ่งเรียกข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจจับนี้ว่าข้อมูลระยะทาง (Range data) โดยที่ข้อมูลระยะทางที่ได้จะมีประโยชน์มากในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น การมองเห็นของหุ่นยนต์ การวินิจฉัยโรคในด้านการแพทย์ กระบวนการผลิตในงานด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเก็บข้อมูลสามมิติแบบต่าง ๆ รวมทั้งการสแกนวัตถุที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

การเก็บข้อมูลสามมิติเป็นการตรวจจับหรือตรวจวัดข้อมูลของวัตถุที่ต้องการ ในลักษณะทั้งความกว้าง ความยาว รวมทั้งความสูงหรือความหนาของวัตถุ การเก็บข้อมูลสามมิติมีหลักการและวิธีการอยู่หลายอย่าง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเก็บข้อมูลสามมิติแบบต่าง ๆ ที่น่าสนใจ [11]  
[12]

#### 3.1.1 หลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไป (Time of Flight)

การวัดระยะทางวิธีนี้จะใช้การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปยังวัตถุที่ต้องการ เมื่อสัญญาณนี้กระทบกับวัตถุมันก็จะสะท้อนกลับมาที่ตัวรับ ซึ่งรูปแบบของสัญญาณมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน และระยะทางหาได้จากผลคูณระหว่างความเร็วกับเวลา โดยสามารถที่จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (3.1)$$

เมื่อ

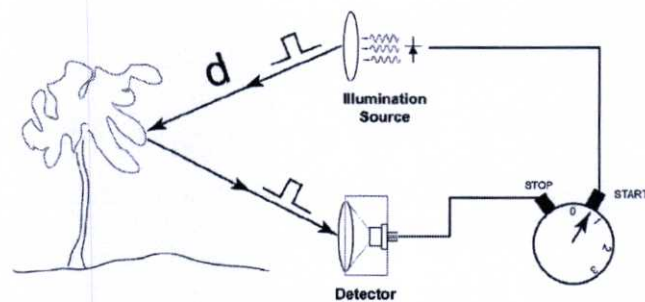
$d$  คือ ระยะทางจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปยังวัตถุ (เมตร)

$v$  คือ ความเร็วขึ้นอยู่กับชนิดของสัญญาณที่ใช้ (เมตร/วินาที)

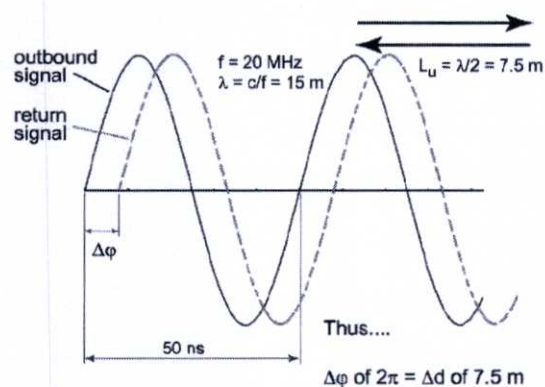
$t$  คือ เวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปและสะท้อนกลับมา (วินาที)

โดยคุณสมบัติของสัญญาณโดยทั่วไปที่ต้องคำนึงถึงที่นำมาใช้ในหลักการของเวลาที่สูญเสียไปนี้แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ มุมเบี่ยงเบนของสัญญาณ และความเร็วของสัญญาณซึ่งมุมเบี่ยงเบนของสัญญาณที่ส่งออกไปมีมุมกว้างแต่วัตถุมีขนาดเล็ก จะทำให้ระยะทางที่คำนวณได้มีความแม่นยำลดลงเพราะสัญญาณจะครอบคลุมบริเวณได้กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่มีมุมแคบกว่า ซึ่งทำให้มีความแม่นยำมากกว่า

ซึ่งทั่วไปแล้วมีสัญญาณอยู่ 3 ชนิดที่นำมาใช้ในหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปซึ่งได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแสง และคลื่นเสียง ซึ่งวิธีในการคำนวณหาระยะทางจะมีลักษณะเหมือนกัน อย่างไรก็ตามสัญญาณแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวของมัน และจะมีผลต่อความแม่นยำของระยะทางที่คำนวณได้ ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะสัญญาณที่เป็นคลื่นแสงเท่านั้น โดยการใช้คลื่นแสงมาใช้ในหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปวิธีนี้ถูกเรียกว่า LIDAR (Light Detection and Ranging) ซึ่งจะกำเนิดคลื่นแสงสั้น ๆ ออกไปและรอคลื่นสะท้อนกลับมานำเวลาที่สูญเสียไปมาคำนวณหาระยะทาง ในวิธีนี้จะนิยมใช้แสงเลเซอร์ (Laser) เพราะว่ามีมุมเบี่ยงเบนของคลื่นจะแคบมากเป็นผลให้ระยะทางที่คำนวณได้มีความถูกต้องสูงซึ่งจะดีกว่าคลื่นแสงทั่วไป นอกเหนือจากเวลาที่นำไปใช้คำนวณแล้วความเข้มแสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับมาสามารถนำมาเปลี่ยนเป็นความเข้มในระดับเกรย์ได้อีกด้วย ความเข้มแสงที่สะท้อนกลับมาจะเปลี่ยนไปตามสัดส่วนกับจำนวนแสงที่ถูกดูดซึมด้วยวัตถุที่แตกต่างกัน ดังนั้นนอกจากจะรู้ระยะทางแล้ว ความเข้มแสงที่ได้รับมาในแต่ละจุดสามารถนำมาแสดงรวมกันได้ภาพสามมิติอีกด้วย



รูปที่ 3.1 หลักการวัดระยะทางโดยใช้คลื่นแสง [6]

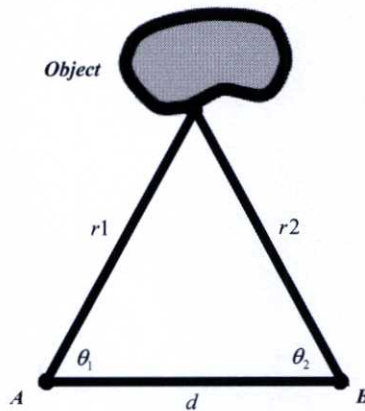


รูปที่ 3.2 ความต่างของมุมเฟสที่สะท้อนกลับมาเมื่อกระทบวัตถุ [6]

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวิธีนี้คือถ้านำไปวัดระยะทางที่น้อยกว่าหนึ่งฟุต แสงเลเซอร์จะใช้เวลาการเดินทางและสะท้อนกลับประมาณ 1 นาโนวินาทีที่จะไม่สามารถตรวจวัดได้ทัน วิธีแก้คือเปลี่ยนไปวัดเฟสของคลื่นที่สะท้อนกลับมาแทน โดยใช้แสงเลเซอร์นี้ผสม (Modulate) แบบ AM (Amplitude Modulation) [13] แล้วจึงส่งออกไปเมื่อแสงไปกระทบวัตถุและสะท้อนกลับมาจะมีเฟสต่างกับ คลื่นที่ส่งออกไปปริมาณความต่างเฟสจะเป็นสัดส่วนกับระยะทางของวัตถุ นอกจากนี้ยังสามารถวัดระยะทางที่ 1 เซนติเมตรได้อีกด้วย ดังนั้นวิธีนี้สามารถนำไปวัดระยะทางในระบบการมองเห็นของหุ่นยนต์ได้

### 3.1.2 หลักการของรูปสามเหลี่ยม (Triangulation)

เราอาจจะคุ้นเคยกับแนวความคิดของการนำหลักการของรูปสามเหลี่ยมมาวัดระยะทาง สมมุติว่ามีเครื่องมืออยู่สองตัวซึ่งวางห่างกันเป็นระยะทางที่แน่นอน ( $d$ ) อุปกรณ์ A และ B จะเก็บตำแหน่งบนวัตถุที่ตำแหน่งเดียวกันดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การวัดระยะทางโดยหลักการของรูปสามเหลี่ยม [3]

จะเห็นว่าอุปกรณ์ทั้งสอง (A, B) และวัตถุวางในลักษณะรูปสามเหลี่ยม มีด้านหนึ่งด้านและมุมสองมุมที่เราทราบอยู่ก่อนแล้วคือด้าน  $d$  กำหนดให้มุมที่เกิดขึ้นระหว่าง  $d$  และ  $r_1$  คือมุม  $\theta_1$  ส่วนมุมที่เกิดขึ้นระหว่าง  $d$  และ  $r_2$  คือมุม  $\theta_2$  ส่วนมุมที่สามสามารถหาได้โดยใช้มุมสองมุมที่เราทราบค่าลบออกจาก 180 องศา ซึ่งระยะทางระหว่างอุปกรณ์แต่ละตัวไปยังวัตถุสามารถหาได้โดย

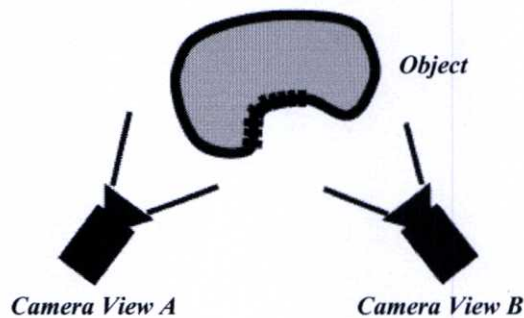
$$r_1 = \frac{d \sin \theta_2}{\sin(180^\circ - (\theta_1 + \theta_2))} \quad (3.2)$$

$$r_2 = \frac{d \sin \theta_1}{\sin(180^\circ - (\theta_1 + \theta_2))} \quad (3.3)$$

ในการวัดระยะทางโดยใช้หลักการรูปสามเหลี่ยมจะเป็นพื้นฐานในการวัดระยะทางแบบต่าง ๆ ซึ่งหลักการรูปสามเหลี่ยมจะแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ซึ่งวิธีแรกเรียกว่าแบบแอคทีฟ (Active) จะใช้เครื่องมือเก็บภาพ 1 ตัวร่วมกับเครื่องกำเนิดแสงอีก 1 ตัว อีกวิธีเรียกว่าแบบพาสซีฟ (Passive) จะใช้เครื่องมือเก็บภาพ 2 ตัว เช่นกล้องวิดีโอเป็นต้น

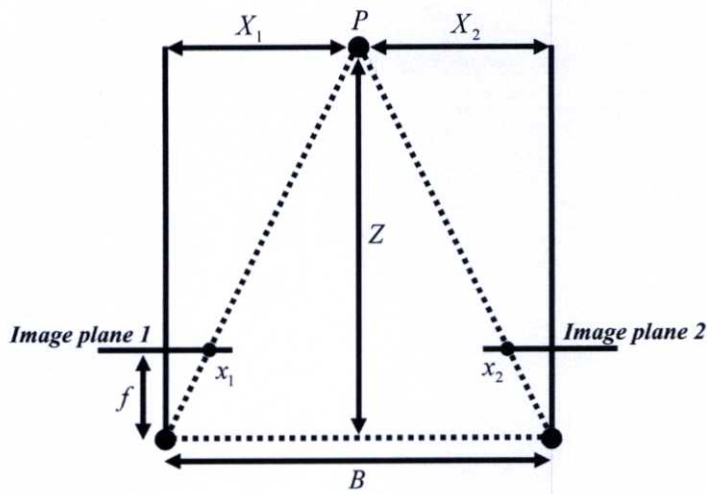
### 3.1.3 หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟ (Passive Triangulation)

วิธีนี้บางครั้งถูกเรียกว่าสเตอริโอวิชัน (Stereo Vision) อธิบายได้เหมือนกับการใช้ตาทั้งสองของมนุษย์ในการวัดระยะทาง ในวิธีนี้ใช้กล้องวิดีโอเป็นเครื่องมือที่ใช้เก็บภาพ โดยใช้กล้องวิดีโอทั้งสองตัววางห่างกันในระยะทางที่แน่นอนดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 หลักการของระบบสเตอริโอวิชัน (Stereo Vision) [6]

หลักการของสเตอริโอวิชันหรือรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟเป็นการหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ โดยอาศัยความแตกต่าง (Disparity) ของจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพของกล้องทั้งสอง ซึ่งในการคำนวณหาระยะทางโดยวิธีนี้สามารถอธิบายได้ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การวัดระยะทางในระบบสเตอริโอวิชั่น [15]

จากรูปที่ 3.5 นั้นสามารถนำมาเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกล้องทั้งสองได้โดยกำหนดให้  $P$  เป็นจุดของวัตถุในระบบพิกัดกล้อง โดย  $X_1$  และ  $X_2$  เป็นขนาดของวัตถุเมื่อเปรียบเทียบกับแนวแกน  $Z$  ของระบบพิกัดกล้อง และ  $x_1$ ,  $x_2$  เป็นขนาดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพดังนั้น

กล้องที่ 1

$$\frac{x_1}{f} = \frac{X_1}{Z} \quad (3.4)$$

กล้องที่ 2

$$\frac{x_2}{f} = \frac{X_2}{Z} \quad (3.5)$$

และ

$$X_2 = X_1 + B \quad (3.6)$$

นำสมการที่ 3.6 แทนลงในสมการที่ 3.5 เขียนใหม่ได้เป็น

$$B + X_1 = \frac{Z \cdot x_2}{f} \quad (3.7)$$

นำสมการที่ 3.7 ลบสมการที่ 3.4 ดังนั้นระยะทาง  $Z$  จะหาได้ดังสมการที่ 3.8

$$Z = \frac{B \cdot f}{x_2 - x_1} \quad (3.8)$$

โดยกำหนดให้

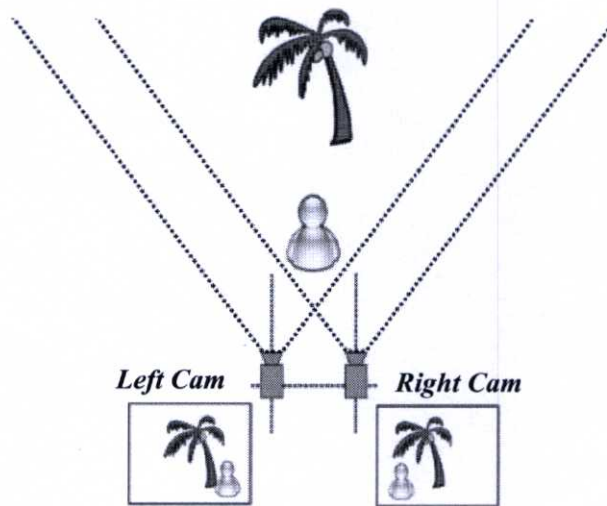
$Z$  คือ ระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ  $P$

$B$  คือ ระยะทางระหว่างกล้องทั้งสองตัว

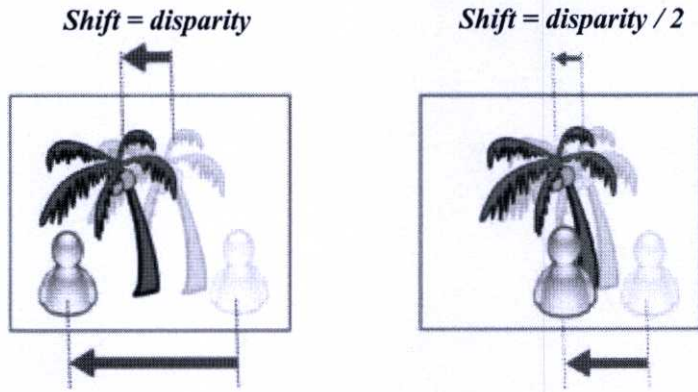
$f$  คือ ความยาวโฟกัสของกล้องทั้งสองตัว

$x_1, x_2$  คือ ระยะจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพ

จุดของภาพทั้งสองคือ  $x_1$  และ  $x_2$  จะไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกันจะได้ระยะห่างระหว่างจุดเรียกว่าค่าความแตกต่าง ระยะทาง  $Z$  จากกล้องวิดีโอไปยังจุดบนวัตถุจะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าความแตกต่างระหว่าง  $x_1$  และ  $x_2$  เช่นถ้าค่าความแตกต่างเข้าใกล้ศูนย์ระยะทาง  $Z$  จะมีค่าได้ไม่สิ้นสุด (Infinite) ซึ่งจะไม่เกิดระยะทางขึ้นระหว่างจุดภาพทั้งสองที่สอดคล้องกัน ในทางกลับกันถ้าระยะทาง  $Z$  ลดลงค่าความแตกต่างก็จะเพิ่มขึ้น

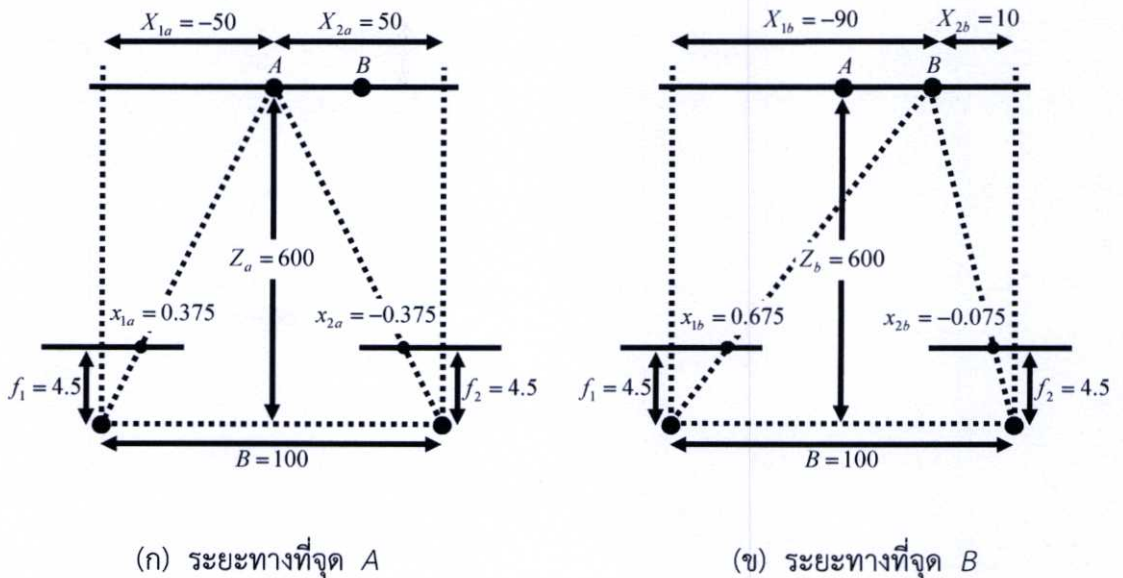


รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายสเตอริโอที่ได้จากกล้องซ้ายและกล้องขวา [15]



รูปที่ 3.7 ภาพความแตกต่างของกล้องทั้งสองเมื่อนำมารวมกัน [15]

รูปที่ 3.6 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากกล้องซ้ายและขวา ถ้าเรานำภาพทั้งสองกล้องมาซ้อนกัน ดังรูปที่ 3.7 จะเห็นความแตกต่างของวัตถุที่อยู่ในภาพได้ รูปที่ 3.7 อาจจะเรียกได้ว่าเป็นภาพความแตกต่างหรือภาพสเตอริโอ (Stereo Image) ซึ่งค่าความแตกต่างของตำแหน่งจุดภาพสามารถนำมาคำนวณหาระยะทางแบบสามมิติที่จะแสดงให้เห็นในตัวอย่างดังต่อไปนี้ การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ กำหนดให้กล้องทั้งสองมีความยาวโฟกัส ( $f$ ) 4.5 มม. มีระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสอง ( $B$ ) 100 มม. CCD มีขนาด 4.8x3.6 มม. ขนาดของภาพคือ 384x244 พิกเซล (1 พิกเซล = 0.0125 มม.)



(ก) ระยะทางที่จุด A

(ข) ระยะทางที่จุด B

รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ [3][15]

การคำนวณหาระยะทางที่จุด  $A$  ในรูปที่ 3.8 (ก) กำหนดให้  $x_{1a} = 30$  พิกเซล = 0.375 มม. เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางซ้าย และ  $x_{2a} = 30$  พิกเซล = - 0.375 มม. เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางขวา ดังนั้น

$$\begin{aligned} Z_a &= \frac{B \cdot f_1}{x_{2a} - x_{1a}} \\ &= \frac{100 \cdot (-45)}{(-0.375 - 0.375)} \\ &= 600 \text{ มม.} \end{aligned} \quad (3.9)$$

การคำนวณหาระยะทางที่จุด  $B$  ในรูปที่ 3.8 (ข) กำหนดให้  $x_{1b} = 54$  พิกเซล = 0.675 มม. เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางซ้าย และ  $x_{2b} = 6$  พิกเซล = - 0.075 มม. เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางขวาดังนั้น

$$\begin{aligned} Z_a &= \frac{B \cdot f_1}{x_{2a} - x_{1a}} \\ &= \frac{100 \cdot (-45)}{(-0.375 - 0.375)} \\ &= 600 \text{ มม.} \end{aligned} \quad (3.10)$$

จะเห็นได้ว่าในระบบสเตอริโอที่ความแม่นยำของการหาระยะทางจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดภาพที่ตรงกันหรือสอดคล้องกันของภาพที่ได้จากระนาบของกล้องทั้งสองตัว และตำแหน่งของสองจุดภาพนี้จะต้องคำนวณให้ถูกต้องด้วย ซึ่งกลายเป็นปัญหาหลักที่เกิดขึ้นเสมอกับวิธีนี้ และปัญหาดังกล่าวนี้ได้ถูกเรียกว่าปัญหาการหาจุดสอดคล้องกันของกล้องทั้งสองตัว (Correspondence Problem) ในทางอุดมคติมันเป็นไปได้ในการหาจุดภาพจากกล้องตัวที่หนึ่งซึ่งสอดคล้องกับจุดภาพจากกล้องตัวที่สอง แต่ในความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถรับประกันได้ว่า สองจุดภาพซึ่งมีค่าระดับสีหรือระดับเกรย์ที่เหมือนกันจะเป็นจุดภาพบนวัตถุจุดเดียวกัน ในการหาจุดภาพจุดเดียวกันของภาพ 2 ภาพจากกล้องทั้งสองไม่ยากนัก ถ้าหากภาพวัตถุที่เกิดขึ้นในภาพทั้งสองมีรูปร่างเหมือนกัน อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยสำหรับวิธีนี้ก็คือ ภาพวัตถุที่เกิดขึ้นในภาพทั้งสองมีลักษณะรูปร่าง

ไม่เหมือนกัน ยิ่งไปกว่านั้นวัตถุในภาพแรกอาจจะดูมืดมัวไม่ชัดเจนหรือไม่ปรากฏรูปร่างวัตถุขึ้นในภาพที่สอง ในการแก้ไขเราสามารถลดระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสอง เพื่อช่วยลดปัญหาการหาจุดสอดคล้องกันของกล้องทั้งสองตัว แต่ในการลดระยะห่างนี้จะเป็นผลทำให้ความแม่นยำของระบบลดลงตามไปด้วย

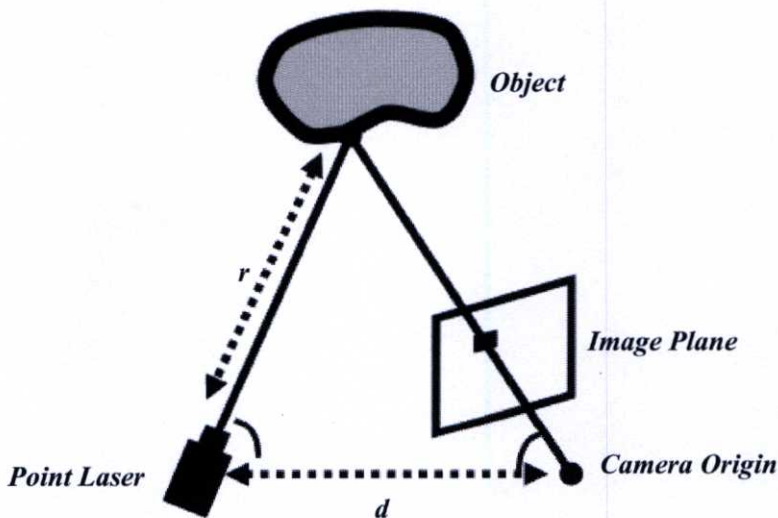
ปัญหาการหาจุดสอดคล้องกันของกล้องทั้งสองตัวที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไข และทำให้ลดลงได้ด้วยการตัดอุปกรณ์เก็บภาพออกไป 1 ตัว ซึ่งมันจะไม่ถูกเรียกว่าวิธีสเตอริโอวีชันอีกต่อไป อย่างไรก็ตามหลักการของรูปสามเหลี่ยมยังคงนำมาใช้กับวิธีนี้ได้ โดยการแทนกล้องตัวที่ตัดออกไปด้วยเครื่องกำเนิดแสงและเรียกรวี่นี้ว่าหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป

### 3.1.4 หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ (Active Triangulation)

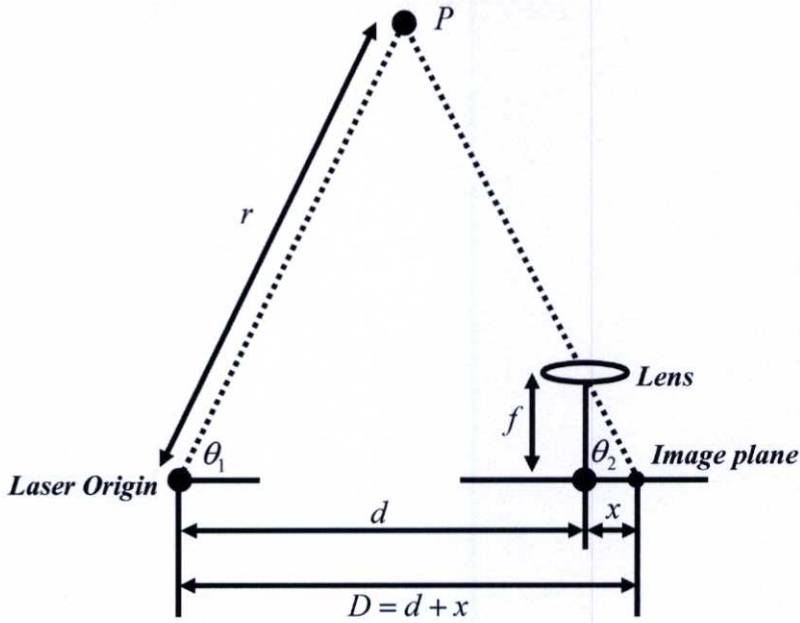
หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟจะแตกต่างกับวิธีแบบพาสซีฟ คือการใช้เครื่องกำเนิดแสงร่วมกับกล้องวิดีโอเพียง 1 ตัว โดยเครื่องกำเนิดแสงจะเป็นแบบจุด แบบสายเส้น ซึ่งภาพที่ได้เราจะนำจุดภาพที่ถูกแสงกระทบหรือถูกฉายมาคำนวณหาระยะทาง

#### 3.1.4.1 วิธีฉายแสงแบบจุด (Light Spot Triangulation)

สมมุติว่าเราฉายลำแสงไปบนวัตถุดังรูปที่ 3.9 ลำแสงดังกล่าวจะสร้างจุดแสงบนวัตถุและจะสะท้อนไปยังกล้องวิดีโอ โดยระยะห่างระหว่างกล้องวิดีโอกับเครื่องกำเนิดแสงเป็นระยะ  $d$  จะเห็นว่าเกิดเป็นรูปสามเหลี่ยมขึ้นระหว่างเครื่องกำเนิดแสง วัตถุและกล้องวิดีโอ ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาระยะทาง  $r$  จากกล้องวิดีโอไปยังจุดบนวัตถุได้



รูปที่ 3.9 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบจุด [3][8]



รูปที่ 3.10 การวิเคราะห์ระยะทางของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทิฟ [3][8]

จุดแสงที่สะท้อนไปยังกล้องวิดีโอจะเกิดเป็นจุดภาพขึ้น จุดภาพนี้พบได้ง่ายซึ่งมันจะเป็นจุดที่มีความสว่างมากที่สุด ในการคำนวณหาระยะทาง  $r$  นั้นสามารถคำนวณหาได้จากมุม  $\theta_1, \theta_2$  และระยะทาง  $d$  ซึ่งมุม  $\theta_2$  คำนวณได้จากความยาวโฟกัสของกล้องวิดีโอ ( $f$ ) ซึ่งมีค่าคงที่กับระยะห่างจากศูนย์กลางเลนส์กล้องกับจุดภาพ ( $x$ ) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.10 ดังนั้นมุม  $\theta_2$  สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{f}{x}\right) \quad (3.11)$$

และระยะทางระหว่างเครื่องกำเนิดแสงและจุดภาพนั้นสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$D = d + x \quad (3.12)$$

เมื่อ

$f$  คือ ความยาวโฟกัสของกล้องวิดีโอ

$x$  คือ ระยะห่างจากศูนย์กลางของเลนส์กล้องกับจุดภาพที่ได้

$d$  คือ ระยะห่างคงที่ระหว่างเครื่องกำเนิดแสงกับกล้องวิดีโอ

ซึ่ง  $x$  สามารถเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับว่าจุดภาพที่ถูกแสงนั้นอยู่ด้านขวา (เป็นบวก) หรืออยู่ด้านซ้าย (เป็นลบ) ของจุดศูนย์กลางของเลนส์กล้อง มุม  $\theta_1$  เป็นมุมเอียงของเครื่องกำเนิดแสง ดังนั้นระยะทาง  $r$  สามารถคำนวณได้โดยใช้กฎของซายน์ดังต่อไปนี้

$$\frac{r}{\sin \theta_2} = \frac{D}{\sin(180^\circ - (\theta_1 + \theta_2))} \quad (3.13)$$

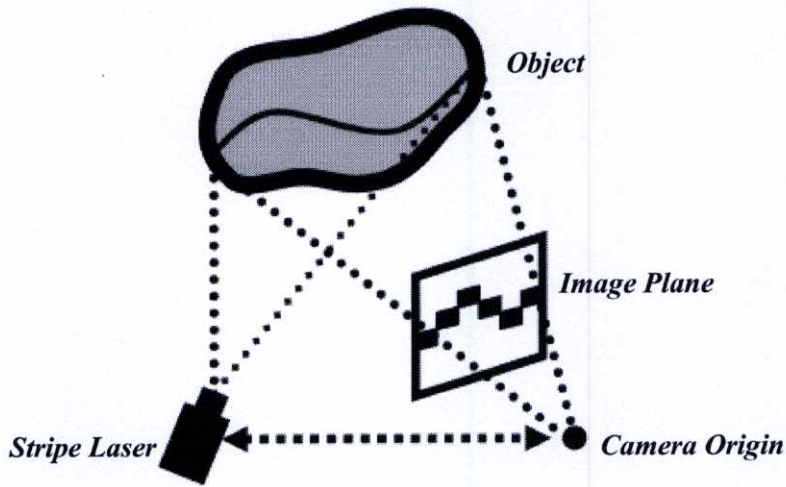
$$r = \frac{D \cdot \sin \theta_2}{\sin(180^\circ - (\theta_1 + \theta_2))} \quad (3.14)$$

ในวิธีนี้เมื่อต้องการหาระยะทางที่จุดอื่น ๆ บนวัตถุจะต้องเลื่อนจุดแสงไปทั่วตลอดภาพ ซึ่งต้องใช้เวลาอย่างมาก ส่วนเครื่องกำเนิดแสงที่นิยมใช้ได้แก่ แสงอินฟราเรดและแสงเลเซอร์ โดยสามารถใช้ได้ดีและไม่จำเป็นต้องใช้เฉพาะที่มีด ห้องที่มีระดับแสงปกติก็ใช้ได้แต่ควรติดตั้งตัวกรองแสง (Filter) ไว้ที่ด้านหน้าของกล้องด้วยเพื่อลดปริมาณแสงบริเวณห้องนั้น แสงเลเซอร์เป็นแสงที่ดีที่สุดเพราะให้จุดแสงที่ชัดเจนและมีขนาดเล็กมากและการกระจายของแสงน้อย เป็นผลให้สามารถใช้ในระยะทางที่ไกล ๆ ได้ดี

#### 3.1.4.2 วิธีฉายแสงแบบลายเส้น (Light Stripe Triangulation)

หลักการฉายแสงแบบลายเส้นเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีฉายแสงแบบจุด โดยลายเส้นของแสงจะได้จากการฉายแสงผ่านร่องแสงหรือจากเครื่องกำเนิดแสงแบบจุดผ่านเลนส์ที่มีลักษณะกลมซึ่งทำให้แสงที่แตกกลายเป็นเส้นแสง โดยทำการฉายแสงที่ได้นี้ไปยังวัตถุและใช้กล้องเก็บลายเส้นที่เกิดขึ้นบนวัตถุ ดังรูปที่ 3.11 โดยลายเส้นจะถูกแบ่งออกเป็นจุดภาพย่อย ๆ และระยะทางจะคำนวณที่แต่ละจุดตามลายเส้น ส่วนวิธีการคำนวณหาระยะทางจะเหมือนกับวิธีการฉายแสงแบบจุดทุกประการรวมทั้งการวางและติดตั้งอุปกรณ์ก็มีความเหมือนกัน

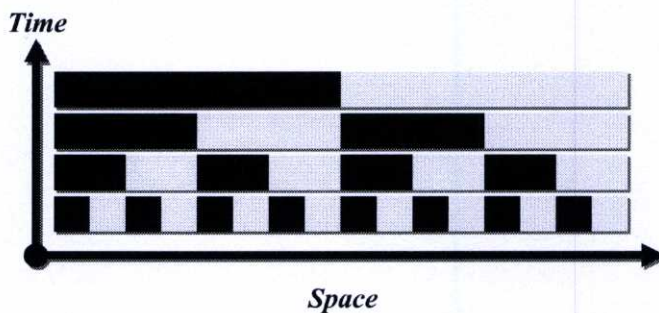
ข้อดีของวิธีการฉายแสงแบบลายเส้นเดี่ยวคือง่ายและรวดเร็วกว่าวิธีการฉายแสงแบบจุด นอกจากนั้นขอบเขตและพื้นที่ของวัตถุ สามารถหาได้โดยการต่อที่จุดปลายของแต่ละลายเส้นเข้าด้วยกัน ดังนั้นวิธีการใช้แสงแบบลายเส้นนี้สามารถใช้ในการแบ่งย่านภาพวัตถุ (Image Segmentation) ได้อีกด้วย



รูปที่ 3.11 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบเส้น [3][8]

### 3.1.5 เทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสไบนารี (Binary Code Pattern)

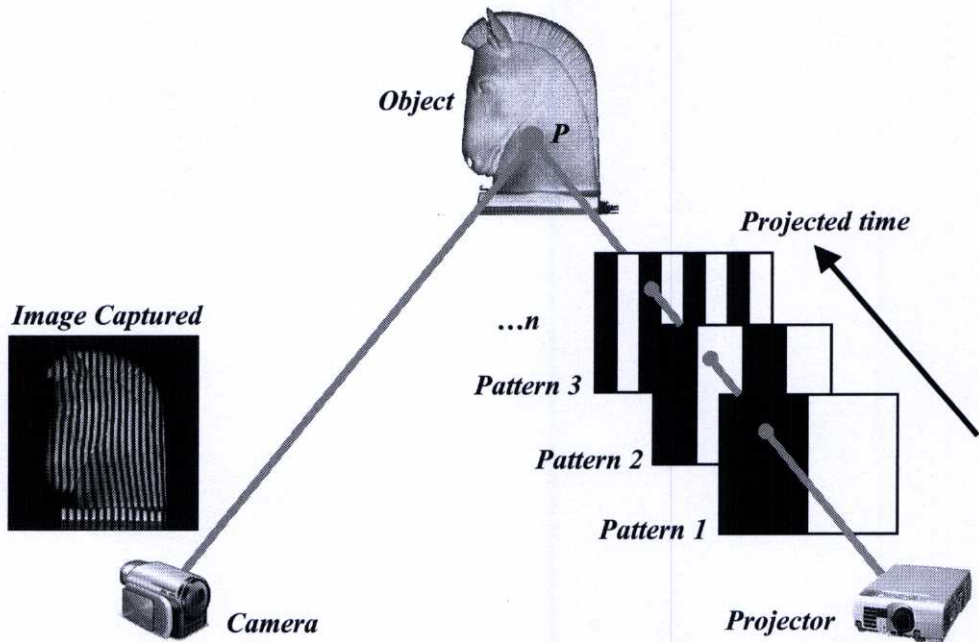
วิธีนี้จะใช้เครื่องกำเนิดแสงร่วมกับกล้องวิดีโอ ซึ่งส่วนมากนิยมใช้โปรเจคเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการฉายแสง โดยแสงที่ฉายไปยังวัตถุจะเป็นรหัสไบนารี (Binary Code) [15] และใช้กล้องวิดีโอเก็บภาพแสงที่กระทบกับวัตถุ ซึ่งข้อมูลภาพที่ได้นี้จะจะเป็นข้อมูลของระยะทางบนตำแหน่งของวัตถุซึ่งจะถูกเข้ารหัสเป็นระดับความสว่างและความมืดของแสง โดยจุดของภาพที่มีความสว่างจะเป็น “1” และจุดของภาพที่มีความสว่างน้อยหรือมืดจะเป็น “0” จึงจำเป็นต้องนำรหัสบนจุดภาพดังกล่าวไปถอดรหัสและคำนวณเพื่อทำการหาระยะทางจริงบนวัตถุ



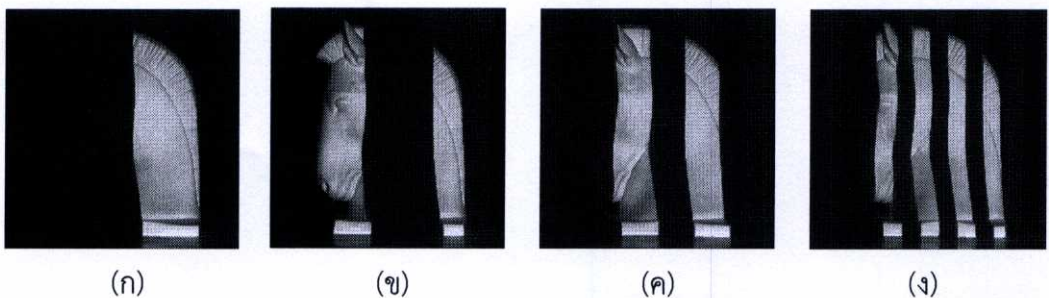
รูปที่ 3.12 ฉากรหัสไบนารี (Binary Code Pattern) [15]

ในรูปที่ 3.13 สมมติใช้ฉากจำนวน 3 ฉาก จุด  $P$  ซึ่งอยู่บนผิวของวัตถุจะถูกเข้ารหัสเป็นระดับมืดหรือ “0” โดยฉากที่ 1 บิตนี้ถูกกำหนดเป็นบิตที่อยู่ซ้ายมือสุดเป็นบิตที่มีค่าประจำหลักมากที่สุด (Most Significant Bit: MSB) เมื่อเปลี่ยนฉากเป็นฉากที่ 2 จะถูกเข้ารหัสใหม่

เป็นระดับสว่างหรือ “1” และในฉากที่ 3 จะถูกเข้ารหัสใหม่เป็นระดับมืดหรือ “0” ซึ่งในบิตนี้ถูกกำหนดเป็นบิตที่อยู่ขวามือสุดเป็นบิตที่มีค่าประจำหลักน้อยที่สุด (Least Significant Bit: LSB) เมื่อนำข้อมูลในแต่ละฉากที่ได้มานุกรมกันตั้งนั้นจุด  $P$  จะถูกเข้ารหัสเป็น “101” ดังนั้นถ้าหากใช้ฉากจำนวน  $n$  ฉากก็จะสามารถรหัสได้เป็น  $2^n$  ถ้าสมมติว่าใช้ฉากจำนวน 7 ฉากก็จะเข้ารหัสให้มีความละเอียดได้เป็น  $2^7$  หรือ 128 รหัส



รูปที่ 3.13 เทคนิคการฉายแสงผ่านรหัสไบนารี (Binary Code Pattern) [15]



รูปที่ 3.14 ภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารี [15]

การเปลี่ยนภาพรหัสไบนารีไปเป็นข้อมูลระยะทางนั้น จะนำภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารีไปเปรียบเทียบกับภาพวัตถุที่ระดับแสงปกติ โดยเปรียบเทียบทีละจุดภาพแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าเบี่ยงเบน (Deviation) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง เพื่อเป็นการแยกภาพที่ได้

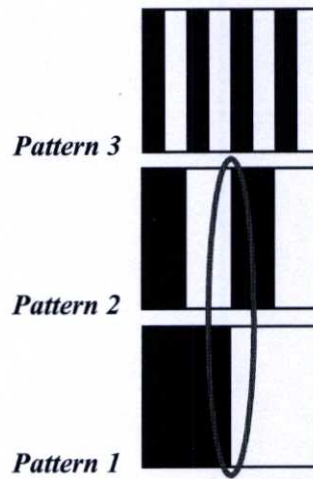
จากการฉายแสงผ่านฉากรังสีไบนารีให้ได้เป็นภาพ 2 ระดับ (Binary Image) จากนั้นนำข้อมูลแต่ละจุดของภาพมาอนุกรมกันจะได้ข้อมูลไบนารีขนาด 7 บิต ซึ่งก็คือข้อมูลระยะทางของแต่ละจุดบนภาพนั่นเองจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 127 ถ้าหากใช้จำนวนฉากรเท่ากับ 7 ฉาก โดยระยะทางจริงจะได้จากการแปลงข้อมูลไบนารีเป็นตัวเลขฐานสิบซึ่งสามารถแปลงได้โดย

$$d = \sum_{i=0}^{n-1} (B_{(i)} \times 2^i) \quad (3.15)$$

เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนฉาก และ  $B$  เป็นตำแหน่งแต่ละจุดของภาพไบนารีของภาพทั้งหมด 7 ภาพ ( $n=7$ ) ซึ่งจะต้องกระทำการแปลงทุกจุดของภาพตัวอย่างเช่น ที่จุดภาพ  $B$  ที่ตำแหน่ง  $x=120, y=80$  ภาพแรกที่เป็นบิตที่อยู่ขวามือสุดและมีค่า  $B_{(0)}=1$  ภาพที่สอง  $B_{(1)}=0$  ภาพที่สาม  $B_{(2)}=1$  ภาพที่สี่  $B_{(3)}=0$  ภาพที่ห้า  $B_{(4)}=1$  ภาพที่หก  $B_{(5)}=1$  ส่วนภาพที่เจ็ดซึ่งเป็นบิตที่อยู่ซ้ายมือสุดและมีค่า  $B_{(6)}=0$  เมื่อนำมาอนุกรมกันจะได้  $B_{(120,80)} = (0110101)_B$  ซึ่งแปลงเป็นระยะทางได้โดย

$$\begin{aligned} \text{ข้อมูลระยะทางที่ } B_{(120,80)} &= (B_{(0)} \times 2^0) + (B_{(1)} \times 2^1) + (B_{(2)} \times 2^2) + \dots + (B_{(6)} \times 2^6) \\ &= (1 \times 1) + (0 \times 2) + (1 \times 4) + \dots + (0 \times 64) = 53 \end{aligned}$$

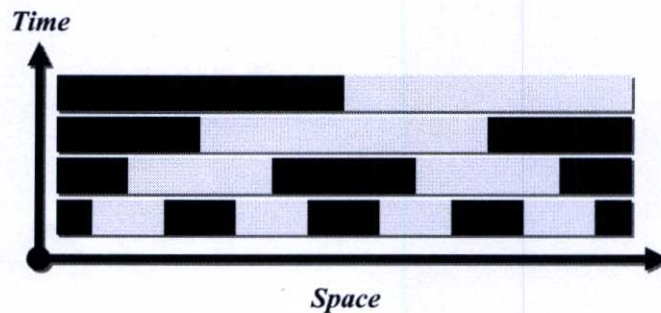
การฉายแสงผ่านรหัสไบนารี (Binary Code Pattern) นั้นจะเกิดปัญหาขึ้นที่ความเหลื่อมล้ำของแสงระหว่างร่องแสงข้างเคียงที่อยู่ติดกัน ซึ่งเป็นผลให้ระยะทางบางตำแหน่งที่ได้ผิดไปมาก เช่นถ้าหากในฉากที่ 1 มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น การเข้ารหัสอาจผิดพลาดจาก "011" หรือ 3 ไปเป็น "111" หรือ 7 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดไปถึง 4 ตำแหน่งและอาจเกิดขึ้นได้ในทุก ๆ ฉาก



รูปที่ 3.15 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสไบนารี [15]

### 3.1.6 เทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสเกรย์ (Gray Code Pattern)

เนื่องจากเทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสไบนารีจะมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นที่บางตำแหน่งบนวัตถุ โดยเฉพาะบริเวณร่องแสงที่ติดกัน เพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าวจึงเปลี่ยนการเข้ารหัสระยะจากการใช้รหัสไบนารีด้วยการใช้รหัสเกรย์ [15] [16] [17] เนื่องจากทั้งรหัสไบนารี และรหัสเกรย์ต่างก็เป็นเลขฐานสองจึงสามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้ ลักษณะการฉายแสงและการวางตำแหน่งของอุปกรณ์สามารถใช้วิธีการเดียวกับการใช้รหัสไบนารี เพียงแต่รหัสเกรย์มีขั้นตอนในการแปลงข้อมูลที่ซับซ้อนกว่า ส่วนในการคำนวณหาระยะทางจะเหมือนกันทุกประการ



รูปที่ 3.16 ฉากรหัสเกรย์ (Gray Code Pattern) [15]

การเปลี่ยนภาพรหัสเกรย์เป็นข้อมูลระยะทางจะเหมือนกับการเปลี่ยนของภาพรหัสไบนารี ซึ่งจะนำจุดภาพที่ตำแหน่งเดียวกันของทุกภาพที่ได้จากการฉายฉากรหัสเกรย์ มาทำการอนุกรมกัน จะได้เป็นข้อมูลรหัสเกรย์แล้วเปลี่ยนเป็นข้อมูลรหัสไบนารีโดยบิตที่เป็นบิตที่อยู่ซ้ายมือสุด (MSB)

$$B_{(n-1)} = G_{(n-1)} \quad (3.16)$$

ซึ่ง  $B$  คือตำแหน่งบิตของจุดภาพรหัสไบนารี  $G$  คือตำแหน่งบิตของจุดภาพรหัสเกรย์ และบิตที่เหลือจนถึงบิตที่อยู่ขวาสุด (LSB) เมื่อ  $i = n-2, n-3, \dots, 1, 0$  และ  $\oplus$  คือเครื่องหมาย Exclusive-OR จะสามารถทำได้โดย

$$B_{(i)} = B_{(i+1)} \oplus G_i \quad (3.17)$$

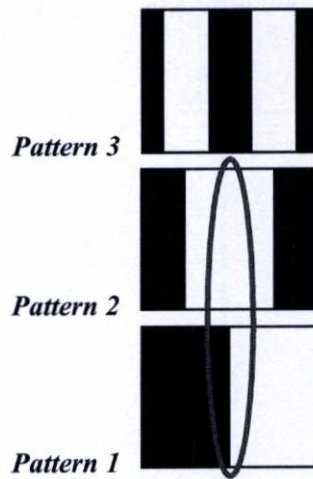
จากนั้นทำการเปลี่ยนข้อมูลรหัสไบนารีที่ได้ให้เป็นข้อมูลระยะทางอีกครั้งโดยที่

$$\text{ข้อมูลระยะทาง} = \sum_{i=0}^{n-1} (B_i \times 2^i) \quad (3.18)$$

ตัวอย่างการหาระยะทางจากฉากรหัสเกรย์ที่จุดภาพ  $x = 120, y = 80$  และใช้จำนวนฉากรหัสเกรย์ทั้งหมด 7 ฉาก ในภาพแรกซึ่งเป็นบิตที่อยู่ขวามือสุด (LSB) มีค่า  $G_{(0)} = 1$  ภาพที่สองมีค่า  $G_{(1)} = 1$  ภาพที่สามมีค่า  $G_{(2)} = 1$  ภาพที่สี่มีค่า  $G_{(3)} = 1$  ภาพที่ห้ามีค่า  $G_{(4)} = 0$  ภาพที่หกมีค่า  $G_{(5)} = 1$  และภาพที่เจ็ดซึ่งเป็นบิตที่อยู่ซ้ายมือสุด (MSB) มีค่า  $G_{(6)} = 0$  เมื่อนำมาอนุกรมกันจะได้  $(0101111)_G$  และทำการแปลงเป็นรหัสไบนารีจะได้เป็น  $(0110101)_B$  คำนวณเป็นระยะทางจะได้

$$\begin{aligned} d_{(120,80)} &= (B_{(0)} \times 2^0) + (B_{(1)} \times 2^1) + (B_{(2)} \times 2^2) + \dots + (B_{(6)} \times 2^6) \\ &= (1 \times 1) + (0 \times 2) + (1 \times 4) + \dots + (0 \times 64) = 53 \end{aligned}$$

เมื่อเปลี่ยนมาใช้ฉากรหัสเกรย์ในการเข้ารหัสระยะทางแทนฉากไบนารี หากมีความเหลื่อมล้ำของแสงระหว่างร่องแสงข้างเคียง ความผิดพลาดจากการใช้ฉากรหัสเกรย์จะลดลงเนื่องจากความเหลื่อมล้ำของสองตำแหน่งที่อยู่ติดกันจะมีค่าผิดพลาดไปได้แค่ 1 ค่า ตัวอย่างเช่น ถ้าหากในฉากที่ 1 มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น การเข้ารหัสเกรย์อาจผิดพลาดจาก “010” ไปเป็น “110” หรือเมื่อแปลงเป็นระยะทางแล้วคือมีค่าความผิดพลาด “3” ไปเป็น “4” มีค่าความผิดพลาดไปเพียง 1 ตำแหน่งเท่านั้น



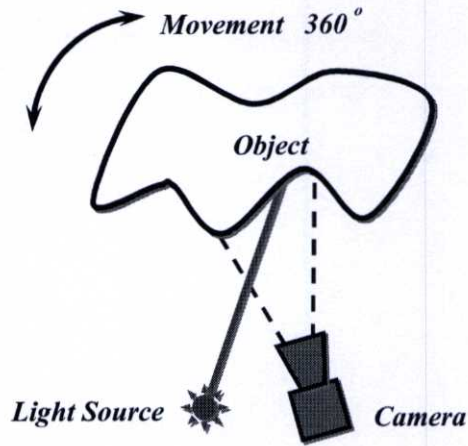
รูปที่ 3.17 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสเกรย์ [15]

### 3.2 รูปแบบการสแกนวัตถุ (Scanning Patterns)

การสแกนวัตถุเป็นรูปแบบในการเก็บข้อมูลสามมิติของวัตถุต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่สามารถแบ่งลักษณะของการสแกนวัตถุได้เป็น 3 แบบ คือ การสแกนโดยการหมุนวัตถุ 360 องศา การสแกนโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ และการสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุ

#### 3.2.1 การสแกนโดยการหมุนวัตถุ

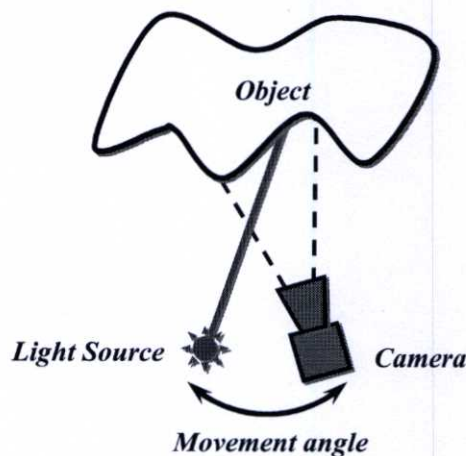
วิธีการสแกนโดยการหมุนวัตถุจะทำการวางวัตถุที่ต้องการเก็บข้อมูลระยะทางลงบนแท่นหมุน โดยทำการหมุนวัตถุเพื่อเก็บข้อมูลระยะทางของวัตถุทั้ง 360 องศา ลักษณะการสแกนโดยการหมุนวัตถุส่วนใหญ่จะใช้ร่วมกับหลักการเก็บข้อมูลระยะทางด้วยหลักการสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟด้วยลำแสงแบบเส้น (Light Stripe Triangulation) เมื่อทำการฉายแสงลงไปบนวัตถุแล้วทำการเก็บข้อมูลโดยกล้องวิดีโอ ก็จะสามารถนำมาคำนวณหาข้อมูลระยะทางของวัตถุตัวอย่างได้ ถ้าทำการหมุนวัตถุเคลื่อนที่ไปเป็นมุมต่าง ๆ ก็จะทำให้ได้ข้อมูลระยะทางในมุมอื่น ๆ ของวัตถุ หากทำการหมุนไปเรื่อย ๆ จนครบ 360 องศา ก็จะทำให้ได้ข้อมูลระยะทางของวัตถุครบทุก ๆ ส่วนของวัตถุ ดังนั้นการสแกนด้วยการหมุนวัตถุนี้จะทำให้ได้ข้อมูลระยะทางของวัตถุครบทั้ง 360 องศาจึงนิยมนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุ



รูปที่ 3.18 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนวัตถุ [20]

### 3.2.2 การสแกนโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ

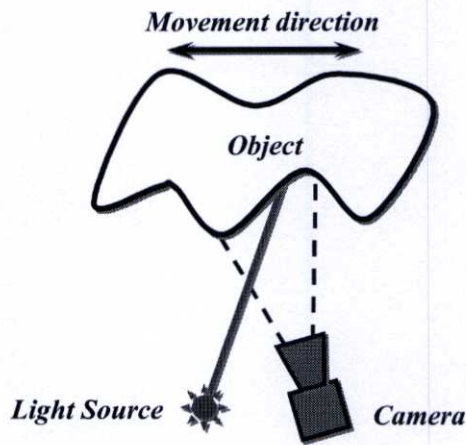
การสแกนโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพจะกำหนดให้วัตถุที่ต้องการเก็บข้อมูลระยะทางวางอยู่กับที่ ส่วนที่เคลื่อนที่จะเป็นส่วนของแหล่งกำเนิดแสงเพียงอย่างเดียว ซึ่งในกรณีนี้จะใช้ร่วมกับหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปโดยการใช้แสง หรือส่วนเคลื่อนที่จะเป็นส่วนของแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์ตรวจจับภาพ ในกรณีนี้จะใช้ร่วมกับการเก็บข้อมูลระยะทางด้วยหลักการสามเหลี่ยมแอกทีฟโดยการใช้แสงแบบจุดอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการควบคุมการหมุนหรือเปลี่ยนมุมของแสงคือ MEMS (Micro Electro Mechanical System) ซึ่งเป็นอุปกรณ์นี้ประกอบด้วยกระจกขนาดเล็กและส่วนควบคุมการเอียงของกระจก การสแกนโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพจะนิยมใช้ในงานการสร้างแผนที่สามมิติ หรือการเก็บข้อมูลของวัตถุขนาดเล็กเพราะจะใช้เวลาในการสแกนมาก



รูปที่ 3.19 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ [20]

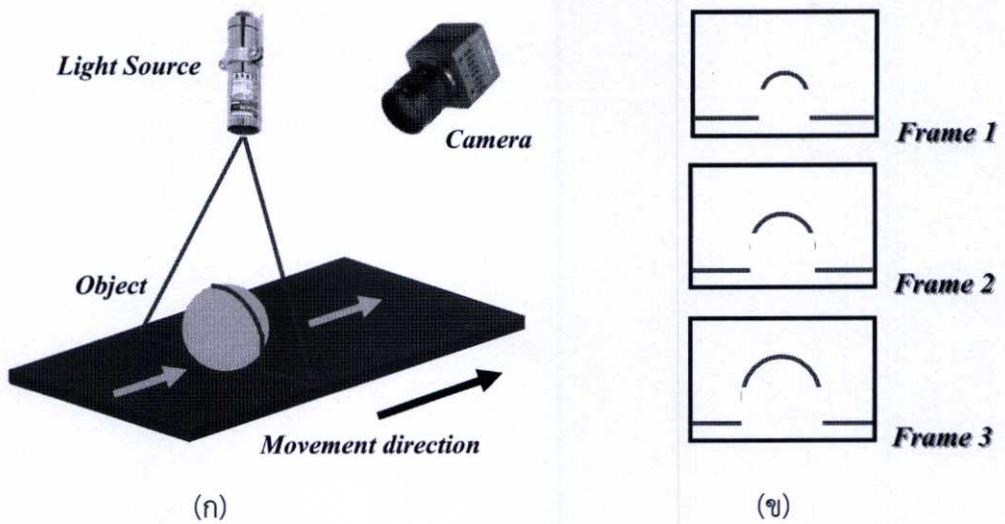
### 3.2.3 การสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุ

การสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือเรียกว่า การสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนของวัตถุ (Light-Sectioning) เป็นเทคนิคการวัดรูปทรงแบบตัดขวางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในขบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ [6] [7] ซึ่งการสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนของวัตถุเป็นส่วนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งวิธีนี้เปรียบเสมือนจะเป็นการแบ่งวัตถุ 3 มิติออกเป็นส่วนย่อย ๆ (2 มิติ) ตามแนวความยาวของวัตถุ โดยการฉายแหล่งกำเนิดแสงลงบนพื้นผิววัตถุเพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงตกกระทบ ซึ่งส่วนมากแล้วแหล่งกำเนิดแสงจะใช้เส้นเลเซอร์สีแดง เนื่องจากการนำมาวิเคราะห์และประมวลผลทำได้ง่าย นอกจากนั้นยังช่วยลดขั้นตอนในการแบ่งส่วนวัตถุกับภาพพื้นหลัง

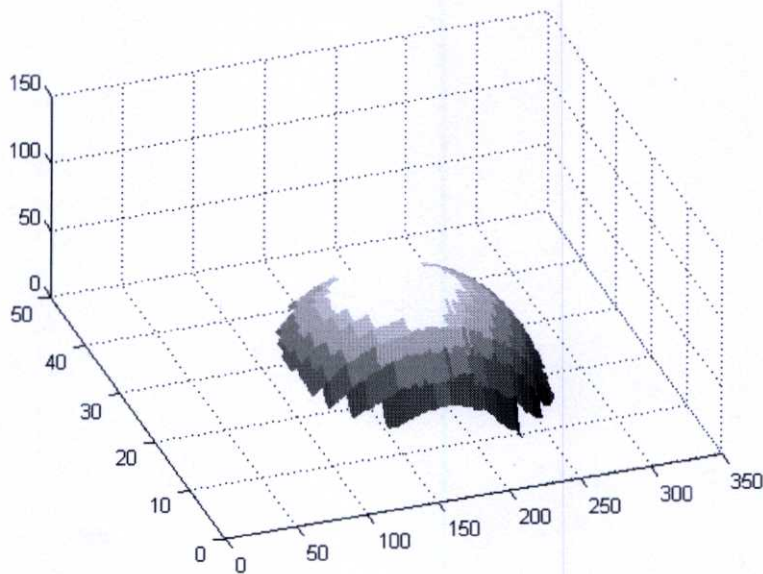


รูปที่ 3.20 การสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนวัตถุ (Light-Sectioning) [20]

โดยแสงที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพและบันทึกไว้ด้วยกล้องที่วางทำมุมเอียงกับแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งข้อมูลของภาพที่ได้มาจะเปรียบเสมือนเป็นข้อมูลความหนาและความกว้างในแต่ละจุดบนพื้นผิววัตถุ เมื่อทำการเคลื่อนที่วัตถุก็จะได้ข้อมูลในส่วนต่อไปของวัตถุในลักษณะของภาพตัดขวางของแต่ละส่วน และนำภาพตัดขวางแบบ 2 มิติแต่ละส่วนของวัตถุมารวมกันเพื่อสร้างเป็นภาพตัดขวาง 3 มิติที่เป็นตัวบอกได้ถึงความกว้าง ความสูง และความยาวของวัตถุนั้น ๆ [6]



รูปที่ 3.21 (ก) การเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านเส้นแสง (ข) ภาพที่ได้ในเฟรมต่าง ๆ เมื่อมีวัตถุตัดผ่าน [20]



รูปที่ 3.22 ตัวอย่างการนำภาพตัดขวางแต่ละส่วนมารวมกันเพื่อสร้างภาพตัดขวาง 3 มิติ [20]

จากรูปที่ 3.21 (ข) แสดงภาพที่ได้จากกล้องในเฟรมต่าง ๆ [6] เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่าน ทำให้เส้นแสงเลเซอร์เปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามพื้นผิวของวัตถุ โดยรูปร่างของเส้นแสงที่ได้จะบอกถึงคุณลักษณะของวัตถุที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติ 2 มิติในเชิงระยะพิคัดหรือขนาดของวัตถุที่จะบอกถึงความกว้างและความสูง นอกจากนี้เมื่อให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สอดคล้องกับความเร็วในการเก็บภาพของกล้อง (Frame per Second) แล้วทำการเก็บ

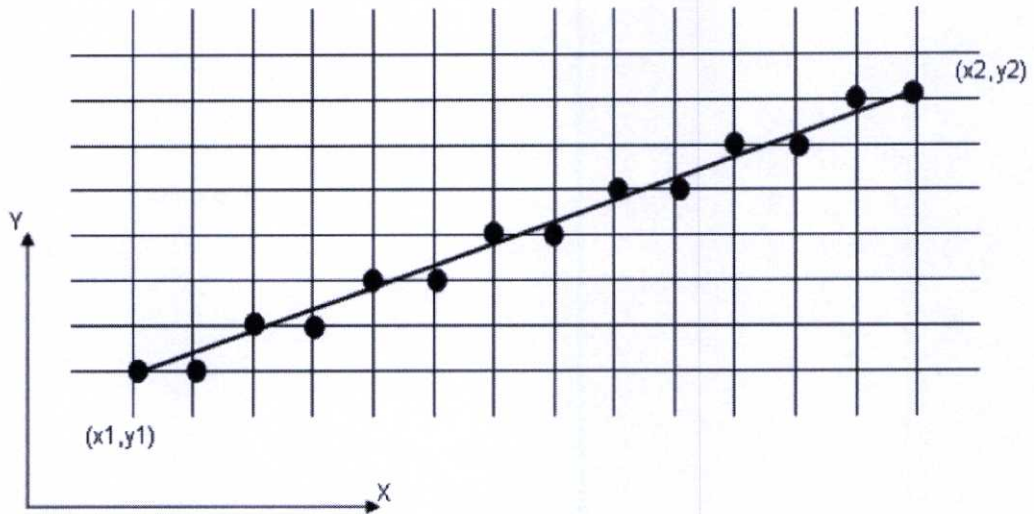
ข้อมูลภาพอย่างต่อเนื่อง เมื่อนำข้อมูลภาพที่ได้ในแต่ละส่วนที่เป็น 2 มิติของวัตถุมาต่อ ๆ กันจะทำให้เกิดคุณลักษณะของวัตถุใน 3 มิติ ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติที่เป็นขนาดของวัตถุทั้ง ความกว้าง ความยาว และความหนาของวัตถุ รวมทั้งพื้นที่โดยรวมของวัตถุซึ่งปกตินิยมใช้หลักการของรูปสามเหลี่ยมมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีข้อจำกัดคือถ้าการติดตั้งไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของหลักการรูปสามเหลี่ยมเช่น ระยะห่างระหว่างกล้องกับแหล่งกำเนิดแสงรวมทั้งการท่ามุมของกล้องหรือแหล่งกำเนิดแสงมีการคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งนอกจากนั้นหลักการของรูปสามเหลี่ยมมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดของวัตถุไม่สามารถทำการขยายย่อในการตรวจวัด (Non Scale-Up)

การใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนของวัตถุ (Laser Light-Sectioning) เป็นวิธีการที่แบ่งวัตถุสามมิติออกเป็นส่วน ๆ ในลักษณะสองมิติจึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำมาใช้วัดขนาดวัตถุในงานวิจัยนี้แต่จากข้อจำกัดของหลักการของรูปสามเหลี่ยมในการวิเคราะห์ถึงขนาดของวัตถุ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการแปลงจุดพิกัดภาพเป็นพิกัดจริงโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งเป็นการแปลงของภาพสองมิติจึงสามารถนำมาใช้ร่วมกับหลักการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนของวัตถุได้โดยตรง การแปลงจุดพิกัดภาพเป็นพิกัดจริงโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปนั้นจะนำมาแปลงภาพของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จากการฉายไปยังวัตถุมาวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของวัตถุ

### 3.3 อัลกอริทึมเส้นตรง (Bresenham's Line Algorithm)

ในการแสดงพิกัดของภาพดิจิทัลปกติจะบอกในลักษณะของจุดภาพ (พิกเซล) ซึ่งอาจเรียกอีกชื่อว่าอุปกรณ์ราสเตอร์ (Raster Devices) เช่น จอภาพหรือเครื่องพิมพ์ ในการวาดเส้นตรงลงบนอุปกรณ์ประเภทนี้ จะใช้การเชื่อมจุดระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของเส้นตรง ดังนั้นถ้าอุปกรณ์มีความละเอียดสูง จะทำให้ได้รูปเส้นตรงที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าจอภาพที่มีความละเอียดต่ำ ในรูปที่ 3.24 แสดงกระบวนการวาดเส้นตรงบนอุปกรณ์ประเภทราสเตอร์โดยการตัดกันของเส้นแสดงถึงตัวแทนของจุดภาพและเส้นตรงแสดงถึงเส้นตรงที่ต้องการวาด

### Converting Line into Pixel Coordinates



รูปที่ 3.23 แสดงการสร้างเส้นตรงบนจอภาพ [20]

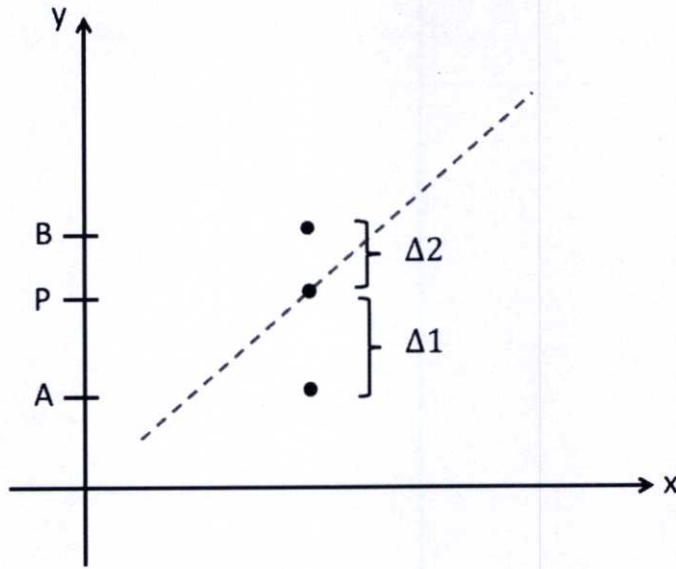
ในแต่ละตำแหน่งบนแกน X ของจอภาพ จะต้องคำนวณหาเลขจำนวนเต็มที่จะใช้แทนค่า y เนื่องจากการอ้างอิงจุดภาพจะเป็นจำนวนเต็มเสมอ โดยต้องเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่า y ที่แท้จริงมากที่สุด โดยวิธีที่ง่ายที่สุดคือการใช้สมการเส้นตรง

$$y = mx + c \quad (3.19)$$

ตัวแปร m คือค่าความชันของเส้นตรง ซึ่งจะสามารถหาค่าความชันได้จาก

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (3.20)$$

ผลการคำนวณจากสมการจะได้เป็นจุดทศนิยม จึงต้องทำการค่า y ขึ้นหรือลง เพื่อให้ได้จำนวนเต็มที่ใกล้เคียงมากที่สุด ปัญหาจากการใช้วิธีดังกล่าวข้างต้นคือ จะใช้เวลาในการคำนวณมาก เนื่องจากมีทั้งการคูณและการหาร ในปี 1965 J.E. Bresenham ได้นำเสนอวิธีการวาดเส้นตรงที่ใช้วิธีการอันชาญฉลาด โดยในการคำนวณมีเพียงแค่การบวกและการคูณด้วยสองเท่านั้น และนิยมใช้กันอย่างมากในปัจจุบัน



รูปที่ 3.24 อัลกอริทึมในการวาดเส้นตรงของ Bresenham [20]

จากรูปที่ 3.24 จะเป็นการแสดงวิธีการคำนวณของ Bresenham เพื่อสร้างเส้นตรง ถ้าจุด (P) คือจุดที่เส้นตรงพาดผ่านบริเวณจุดภาพ A และ B โดยแนวคิดของ Bresenham นั้นจะทำการหาค่า  $\Delta_2$  และ  $\Delta_1$  แล้วทำการเปรียบเทียบค่ากัน โดยความแตกต่างของระยะทั้งสองจะหาได้จากสมการที่ 3.21

$$\Delta_2 - \Delta_1 = 2m(x+1) - 2A + 2c - 1 \quad (3.21)$$

กำหนดให้  $m = \frac{\Delta y}{\Delta x}$  และ สามารถนิยามในการเลือกตำแหน่ง y ได้ดังนี้

$$P = \Delta x(d_1 - d_2) \quad (3.22)$$

$$P = 2\Delta y \cdot x - 2\Delta x \cdot A + c \quad (3.23)$$

ถ้า  $P$  เป็นลบแสดงว่า  $\Delta_1 < \Delta_2$  หรือจุด A ใกล้เคียงกับเส้นตรงดังนั้นจะเลือก จุด A

ถ้า  $P$  เป็นบวกแสดงว่า  $\Delta_2 < \Delta_1$  หรือจุด B ใกล้เคียงกับเส้นตรงดังนั้นจะเลือก จุด B

### 3.4 ตัวกรองสวิตซ์โกเลย์ (Savitzky Golay Filter)

การประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล (Digital Signal Processing) หรือ อาจเรียกง่าย ๆ ว่า DSP นั้น คือกระบวนการปรับแต่งข้อมูลของสัญญาณด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ โดยจะกระทำกับสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Signal) ซึ่งในปัจจุบันการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัลมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ทั้งในทางด้านการแพทย์ การสื่อสาร คอมพิวเตอร์ ฯลฯ

จุดประสงค์หลัก ๆ ของการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัลคือ การวัด การกรอง การบีบอัดข้อมูลสัญญาณแบบต่อเนื่อง (Analog Signal) ซึ่งไม่สามารถกระทำได้โดยตรง การได้มาของข้อมูลสัญญาณแบบดิจิทัลนั้น จะต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital-to-Analog Converter) หนึ่งในเทคนิคสำคัญของการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัลคือ ตัวกรองสัญญาณ (Filter) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่ไม่ต้องการออกจากสัญญาณหลัก ตัวกรองที่พิจารณานำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ตัวกรองแบบสวิตซ์โกเลย์ โดยในปี 1964 Abraham Savitzky และ Marcel J. E. Golay ได้ตีพิมพ์งานวิจัย “Smoothing and differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures.” ลงในวารสาร Analytical Chemistry โดยงานวิจัยฉบับนี้ถูกอ้างอิงเป็นอย่างมาก เช่น งานวิจัยของ Nakajima, Juzoji, Zhao, และ Hamamoto (2003) [19] ได้เสนอวิธีการใช้ตัวกรองชนิดสวิตซ์โกเลย์ ในการกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องตรวจวัดและบันทึกคลื่นไฟฟ้าของหัวใจ (ECG) ซึ่งสามารถกรองสัญญาณรบกวนได้ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติ (Gaussian Noise) และอุปกรณ์ต่าง ๆ (Impulse Noise) และได้มีงานวิจัยของ Paul O’Leary, Matthew Harker และ Richard Neumayr (2010) [18] ได้นำวิธีการตัวกรองสวิตซ์โกเลย์ไปประยุกต์ใช้ในการกรองข้อมูลรูปทรงของวัตถุ

#### 3.4.1 หลักการทำงานของตัวกรองสวิตซ์โกเลย์

ตัวกรองแบบสวิตซ์โกเลย์ (Savitzky Golay Filter) ใช้หลักการของการประมาณพหุนามเป็นช่วง ๆ และการหาค่าเฉลี่ย โดยการเลื่อนหน้าต่าง (Window) แบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอันดับของพหุนามที่มีค่าสูงจะให้ผลการกรองที่ดี โดยไม่เกิดการลดขนาดของสัญญาณเดิม โดยค่าเอาต์พุตของตัวกรองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.24

$$g_i = \sum_{n=-n_L}^{n_R} c_n f_{i+n} \quad ; i = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (3.24)$$

เมื่อ

$f_{i+n}$  คือ สัญญาณอินพุต

$g_i$  คือ สัญญาณเอาต์พุต

$n_L$  คือ จำนวนของจุดข้อมูลฝั่งทางซ้ายของข้อมูลตำแหน่งที่  $i$

$n_R$  คือ จำนวนของจุดข้อมูลฝั่งทางขวาของข้อมูลตำแหน่งที่  $i$

$C_n$  คือ สัมประสิทธิ์ของตัวกรอง (Filter Coefficient)

แนวคิดของตัวกรองสวิตชก-โกเลย์ คือการหาสัมประสิทธิ์ตัวกรอง  $C_n$  ที่โดยปกติจะเป็นค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูล  $i$  แต่แนวคิดของตัวกรองสวิตชก-โกเลย์คือ สัมประสิทธิ์ตัวกรอง  $C_n$  จะต้องไม่ใช่ค่าคงที่ แต่สามารถปรับค่าได้ตามค่าของข้อมูลที่ได้มาจากการเลื่อนของหน้าต่าง ถ้าสัมประสิทธิ์  $C_n$  ถูกแทนที่ด้วยพหุนามอันดับ  $M$  ที่อยู่ในรูป  $a_0 + a_1i + \dots + a_Mi^M$  จะแสดงเวกเตอร์สัมประสิทธิ์  $a$  ได้ดังสมการที่ 3.25 และ 3.26

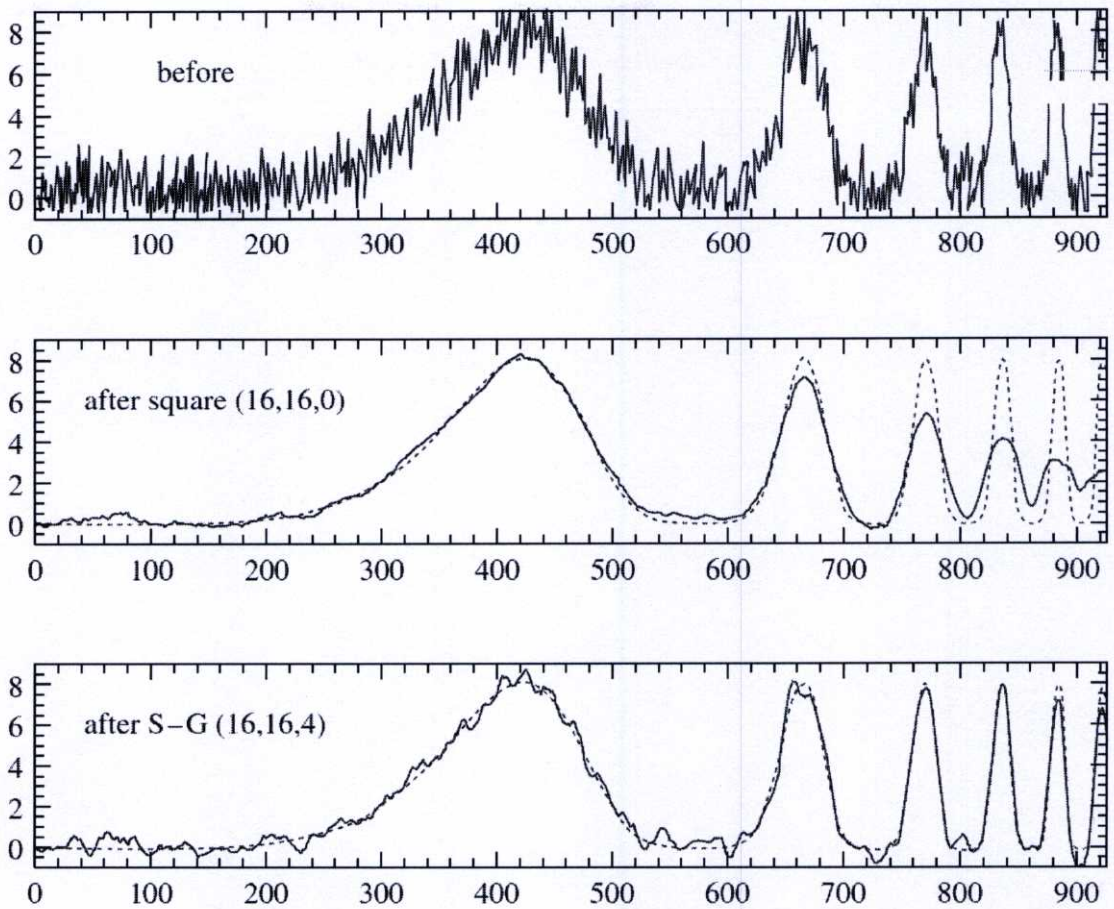
$$A \cdot a = f \quad ; \quad a = (a_0 a_1 \dots a_M)^T \quad (3.25)$$

$$(A^T \cdot A) \cdot a = A^T \cdot f \quad \text{และ} \quad a = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot f \quad (3.26)$$

เนื่องจากการประมาณแบบกำลังสองน้อยที่สุด จะทำให้ข้อมูลเป็นเชิงเส้น ดังนั้น  $f$  ในสมการที่ 3.26 สามารถแทนด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector)  $e_n$  ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสวิตชก-โกเลย์จะหาได้จากสมการที่ 3.27

$$c_n = \left\{ (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot e_n) \right\}_0 = \sum_{m=0}^M \left\{ (A^T \cdot A)^{-1} \right\}_{0m} n^m \quad (3.27)$$

โดยที่  $n = 2n_L + 1$  หรือ  $n = 2n_R + 1$  (จำนวนคี่)

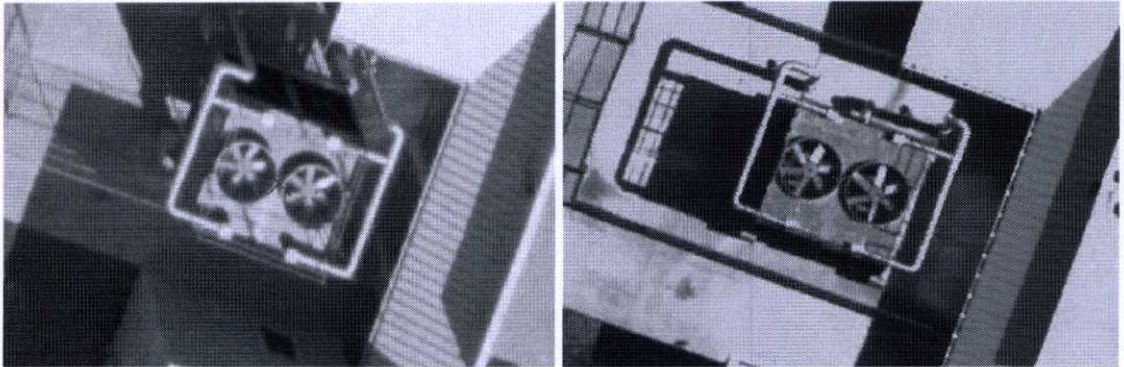


รูปที่ 3.25 แสดงผลการทดสอบการใช้ตัวกรอง ภาพบน: สัญญาณอินพุตที่ถูกเพิ่มสัญญาณรบกวน (เส้นประคือสัญญาณหลัก) ภาพกลาง: ตัวกรองเฉลี่ยเลื่อนหน้าต่างแบบธรรมดา (Simple Moving Window Average) ภาพล่าง: ตัวกรองสวิตซ์กี-โกเลย์ โดยใช้ค่าพหุนาม  $M=4$  [20]

จากสมการที่ 3.27 จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสวิตซ์กี-โกเลย์ คือ  $M$  และ  $n$  รูปที่ 3.26 แสดงผลการทดสอบตัวกรองสวิตซ์กี-โกเลย์ โดยใช้ความกว้างของหน้าต่างมีค่าเท่ากับ 33 จุด นั่นคือ  $n_L = n_R = 16$  โดยภาพบนคือฟังก์ชันคลื่นสัญญาณที่ใช้ทดสอบที่เพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไป (สัญญาณหลักคือเส้นประ) ภาพตรงกลางแสดงถึงผลลัพธ์จากการปรับสัญญาณให้เรียบโดยใช้วิธีการเฉลี่ยแบบเลื่อนหน้าต่าง (Moving Average) จะเห็นได้ว่าขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณถูกลดทอนไปด้วยเป็นอย่างมาก กลับกันที่ภาพล่างเป็นการใช้ตัวกรองแบบสวิตซ์กี-โกเลย์ โดยใช้พหุนามอันดับที่  $M=4$  ซึ่งผลลัพธ์ที่เห็นได้ว่าขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณมีความใกล้เคียงกับสัญญาณจริงมาก

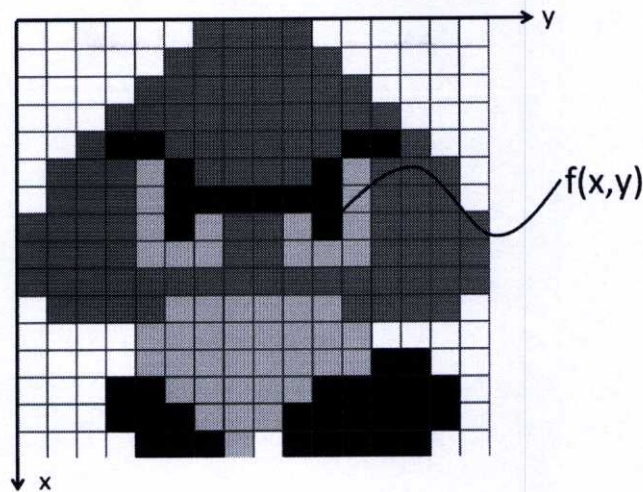
### 3.5 การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing)

การประมวลผลภาพเชิงดิจิทัล คือการปรับปรุงและนำข้อมูลภาพดิจิทัลที่ได้มาใช้ให้เป็นประโยชน์ในกระบวนการ จัดเก็บภาพ และการส่งผ่านสัญญาณภาพ เป็นการประยุกต์การประมวลผลข้อมูลแบบสัญญาณ (Signal processing) และขั้นตอนวิธีต่างๆ มากระทำบนภาพดิจิทัล เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการประมวลผลหรือวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.26 แสดงความแตกต่างระหว่างภาพแอนะล็อก (ซ้าย) กับภาพดิจิทัล (ขวา) [21]

เนื่องจากภาพที่มองเห็นโดยปกติผ่านสายตามนุษย์นั้น จะมองเห็นภาพในลักษณะที่เรียกว่า ภาพแอนะล็อก (Analog) ซึ่งอธิบายในทางคณิตศาสตร์ได้ด้วยตัวแปรค่าต่อเนื่อง (Continuous variables) แต่เครื่องคอมพิวเตอร์นั้นจะใช้เลขฐาน 2 ซึ่งเป็นตัวแปรค่าไม่ต่อเนื่อง (Discrete variables) เป็นหลักในการคำนวณ โดยภาพนั้นจะถูกแทนด้วยตัวเลขในรูปเมตริก ทำให้ภาพที่นำมาแปลงเข้าสู่คอมพิวเตอร์ กลายเป็นภาพดิจิทัลที่มีจำนวนสีและค่าความเปรียบต่าง (Contrast) มากกว่าภาพแอนะล็อก ภาพดิจิทัลจึงสามารถแสดงให้เห็นถึงรายละเอียดของภาพได้อย่างชัดเจนทำให้สามารถนำไปประมวลผล หรือปรับปรุงข้อมูลภาพโดยใช้เทคนิคต่างๆผ่านคอมพิวเตอร์ได้ง่ายกว่า ภาพอนาล็อก



รูปที่ 3.27 ระบบพิกัดของภาพดิจิทัล [21]

ภาพดิจิทัลนั้นจะแสดงโดยใช้ระบบพิกัดเชิงพื้นที่บนระนาบสองมิติ (Spatial Coordinate) โดยที่แกน  $x$  และแกน  $y$  เป็นพิกัดของระยะ ส่วนจุดใดๆที่อยู่บนระนาบ  $xy$  นั้นจะแทนด้วยฟังก์ชันของความเข้มแสง  $f(x, y)$  เมื่อ  $x, y$  และค่าของ  $f$  เป็นค่าจำกัด (finite value) ถ้ากำหนดให้ภาพ  $f(x, y)$  มีขนาด  $M$  แถวและ  $N$  คอลัมน์ จะสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0, N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1, N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1, N-1) \end{bmatrix}$$

โดยจุดใดๆในระนาบ  $x$  และ  $y$  อาจเรียกแทนด้วยคำว่า “พิกเซล” (Pixel) ถ้าความเข้มแสง  $f(x, y)$  ถูกแทนด้วยเลขขนาด 8 บิต ค่าระดับเทาที่ 0 แทนความสว่างน้อยหรือสีดำ ส่วนค่าระดับเทาที่ 255 แทนด้วยความสว่างมากหรือสีขาว ภาพชนิดนี้เรียกว่าภาพระดับเทา (Gray scale image)

การประมวลผลภาพเชิงดิจิทัลนั้นจะนำข้อมูลที่เป็นความเข้มแสงหรือตำแหน่งที่ได้มาประมวลผล ได้แก่ การหาจุดเด่นของภาพ การปรับปรุงภาพ ฯลฯ เพื่อให้ภาพมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นสำหรับการนำไปแสดงผลหรือวิเคราะห์

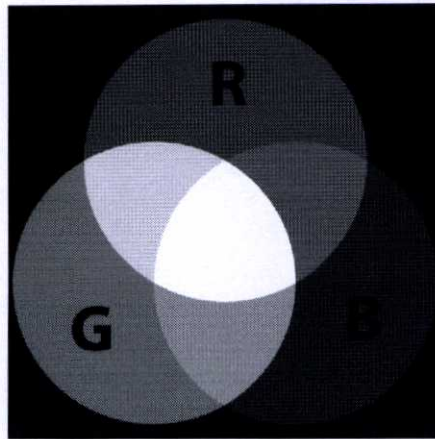
### 3.6 การปรับปรุงภาพ (Image Enhancement)

การปรับปรุงภาพ คือการประมวลผลภาพเพื่อให้ภาพผลลัพธ์ที่ได้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทางได้ดีกว่าภาพต้นฉบับ คำว่าเฉพาะทางในที่นี้มีความสำคัญ เช่น การปรับปรุงคุณภาพของภาพเอ็กซเรย์จะไม่สามารถนำมาใช้ได้ดีกับการปรับปรุงภาพดาวอังคาร [16] เนื่องจากการ

ตีความหมายของภาพนั้นขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานเป็นหลัก ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของภาพไม่สามารถใช้ทฤษฎีที่ตายตัวได้เสมอไป อย่างไรก็ตามการปรับปรุงภาพเป็นหนึ่งในหัวข้อที่สำคัญที่สุด เพราะพบการประยุกต์ใช้งานอย่างมากในการประมวลผลภาพเชิงดิจิทัล ในบทนี้เราจะกล่าวถึงวิธีการปรับปรุงภาพที่สำคัญสำหรับวิทยานิพนธ์นี้

### 3.6.1 การแปลงภาพสีให้เป็นขาวดำแบบ Grayscale

มาตรฐานของสีที่ใช้ในการประมวลผลภาพมีอยู่ด้วยหลายระบบด้วยกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การนำไปใช้ แต่โดยทั่วไปแล้วจะใช้ระบบสี RGB โดยทุกระบบสีสามารถทำการแปลงไปแปลงมาได้ แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ระบบสี RGB เป็นหลัก ซึ่งระบบสี RGB เกิดจากระบบแม่สีพื้นฐาน 3 สีด้วยกันคือ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน โดยเป็นการรวมแบบ Additive คือ ถ้าไม่มีสีใดเลยจะมองเป็นสีดำ ในทางกลับกันถ้ามีครบทุกสีจะมองเป็นสีขาว



รูปที่ 3.28 การรวมกันของสี RGB แบบ Additive [20][21]

ในการแปลงภาพสีแบบ RGB ไปเป็นภาพระดับเทา (Gray Scale Image) เป็นการปรับ จากภาพสีให้ไปเป็นภาพที่แสดงถึงค่าความเข้ม (Intensity) ของภาพเพียงอย่างเดียวเท่านั้น กล่าวคือ จากเมทริกซ์ R G และ B ให้เหลือเพียงแค่เมทริกซ์เดียวที่เป็นเมทริกซ์แสดงถึงค่าความเข้ม โดยทั่วไป ภาพระดับสีเทาในกรณีที่เป็นภาพแบบ 8 บิต มีค่าความเข้ม 256 ระดับ นั่นคือจะมีค่าตั้งแต่ 0-255 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.29



รูปที่ 3.29 แสดงระดับสีเทาที่มีขนาด 8 บิต [21]

การแปลงภาพสีแบบ RGB ในแต่ละจุดของภาพสี ให้เป็นค่าระดับสีเทาทำได้โดยการดึงค่าของสีแดง 29.89% สีเขียว 58.70% และสีน้ำเงิน 11.40% รวมเป็น 100% โดยแสดงความสัมพันธ์ได้ในสมการที่ 3.28

$$f(x, y) = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (3.28)$$

เมื่อ  $R$  คือ ค่าสีแดงในภาพระบบสี RGB ที่จุดภาพ  $R(x, y)$

$G$  คือ ค่าสีเขียวในภาพระบบสี RGB ที่จุดภาพ  $G(x, y)$

$B$  คือ ค่าสีน้ำเงินในภาพระบบสี RGB ที่จุดภาพ  $B(x, y)$

### 3.6.2 การแปลงภาพระดับสีเทาด้วยกระบวนการเทรชโฮลด์ (Thresholding)

เป็นกระบวนการปรับภาพด้วยการปรับค่าความเข้มแสงด้วยการกำหนดค่าอ้างอิง ที่เรียกว่าค่าเทรชโฮลด์ (Threshold value) เป็นหนึ่งในพื้นฐานของการทำกระบวนการแยกภาพ กระบวนการทำเทรชโฮลด์ (Thresholding) สามารถแปลงภาพระดับสีเทาให้เป็นภาพขาวดำแบบ 2 บิตได้ ซึ่งเป็นการทำภาพระดับสีเทาให้เป็นภาพขาวดำ ที่มีเพียงสองระดับซึ่งเรียกว่าภาพแบบไบนารี (Binary Image) ดังภาพในรูปที่ 3.6 กล่าวคือภาพสีเทาปกติที่มีขนาด 8 บิต ในแต่ละจุดของภาพจะมีค่าความเข้มได้ตั้งแต่ 0 ถึง 255 แต่เมื่อสร้างเป็นภาพขาวดำแต่ละจุดจะมีค่าความเข้มเพียง 2 ค่าเท่านั้นคือ '0' และ '1' โดย '0' เป็นตัวแทนของสีดำและ '1' เป็นตัวแทนของสีขาว



(ก) ภาพแบบระดับสีเทา

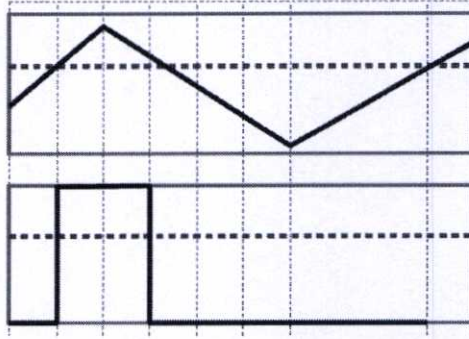


(ข) ภาพแบบไบนารี

รูปที่ 3.30 แสดงภาพระดับสีเทาและภาพแบบไบนารี (ที่มา : <http://en.wikipedia.org>)

กระบวนการเทรชโฮลด์ทำได้โดยการนำค่าแต่ละจุดของภาพเปรียบเทียบกับค่าคงที่ค่าหนึ่ง ที่เรียกว่าค่าเทรชโฮลด์ (Threshold value) กล่าวคือ ถ้าฟังก์ชันความเข้มแสงของจุดใดๆ  $f(x, y)$  ที่มีความเข้มแสงตั้งแต่ 0 ถึง  $T$  ถูกแปลงค่าให้เป็น '0' ในขณะที่ค่าความเข้มแสงที่มากกว่า  $T$  จะถูกแปลงให้มีค่าเท่ากับ 'maxVal' ซึ่งค่า  $T$  นี้เรียกว่า "ค่าเทรชโฮลด์ (Threshold value)" โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.35 เพื่อความเข้าใจสามารถดูรูปประกอบได้ที่ 3.31

$$dst(x,y) = \begin{cases} \max Val & \text{if } f(x,y) > T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.29)$$



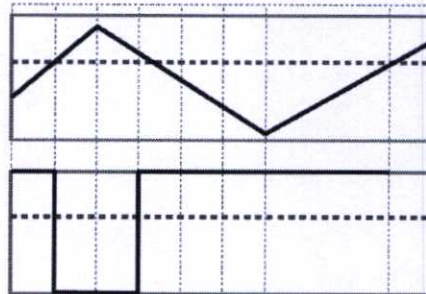
รูปที่ 3.31 แสดงการทำเทรชโฮลด์แบบไบนารี [21]

รูปแบบการเทรชโฮลด์ที่กล่าวไว้ข้างต้นคือกระบวนการทำเทรชโฮลด์แบบไบนารี (Threshold Binary) โดยไลบรารี OpenCV นั้นมีรูปแบบการเทรชโฮลด์อีกด้วยกัน 5 รูปแบบ คือ

### 3.6.2.1 การเทรชโฮลด์ไบนารีแบบกลับด้าน (Threshold Binary, Inverted)

ถ้าฟังก์ชันความเข้มแสงของจุดใดๆ  $f(x,y)$  ที่มีความเข้มแสงตั้งแต่ 0 ถึง  $T$  ถูกแปลงค่าให้เป็น 'maxVal' ในขณะที่ค่าความเข้มแสงที่มากกว่า  $T$  จะถูกแปลงให้มีค่าเท่ากับ '0' สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.30 และเพื่อความเข้าใจสามารถอธิบายได้ในรูปที่ 3.32

$$dst(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{if } f(x,y) > T \\ \max Val & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.30)$$

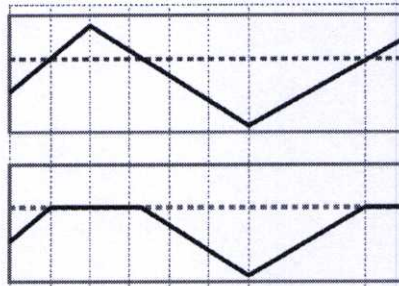


รูปที่ 3.32 แสดงการทำเทรชโฮลด์แบบไบนารีกลับด้าน [21]

### 3.6.2.2 การเทรชโฮลด์ไบนารีแบบห้วนตัด (Truncate)

ถ้าฟังก์ชันความเข้มแสงของจุดใดๆ  $f(x, y)$  ที่มีความเข้มแสงมากกว่า  $T$  ถูกแปลงให้มีค่าเท่ากับค่าเทรชโฮลด์  $T$  (Threshold value) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.31 และเพื่อความเข้าใจสามารถอธิบายได้ในรูปที่ 3.33

$$dst(x, y) = \begin{cases} T & \text{if } f(x, y) > T \\ f(x, y) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.31)$$

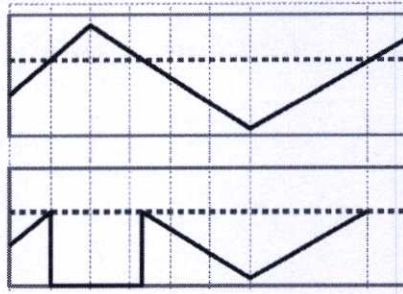


รูปที่ 3.33 แสดงการทำเทรชโฮลด์แบบห้วนตัด [21]

### 3.6.2.4 การเทรชโฮลด์ไบนารีแบบฐานตัดกลับด้าน (Threshold to Zero, Inverted)

ถ้าฟังก์ชันความเข้มแสงของจุดใดๆ  $f(x, y)$  ที่มีความเข้มแสงตั้งแต่ 0 ถึง  $T$  ถูกแปลงให้มีค่าเป็น  $f(x, y)$  เท่าเดิม ในขณะที่ค่าความเข้มแสงที่มากกว่า  $T$  จะถูกแปลงให้มีค่าเท่ากับ '0' ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.32 และเพื่อความเข้าใจสามารถอธิบายได้ในรูปที่ 3.34

$$dst(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{if } f(x, y) > T \\ f(x, y) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.32)$$



รูปที่ 3.34 แสดงการทำเทรซโฮลด์แบบฐานตัดกลับด้าน [21]

## บทที่ 4

# การออกแบบระบบการวัดความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตโดยใช้ เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง

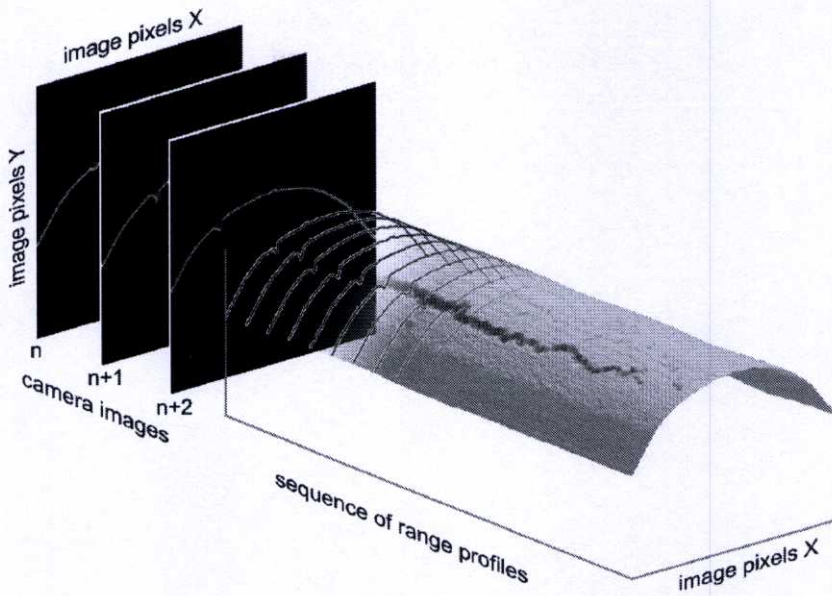
ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการศึกษาวิจัยและขั้นตอนการออกแบบการวัดความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตแบบไม่สัมผัสโดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง การออกแบบระบบประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ แท่นวางชิ้นงานพร้อมมอเตอร์ความเร็วต่ำ กล้องรับภาพ แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ และคอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพ การทำงานของระบบเบื้องต้นคือคอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพจากกล้องที่รับภาพของลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ โดยวัตถุจะเคลื่อนที่ไปบนจานหมุนชิ้นงานที่เป็นวงกลม ภาพของลำแสงเลเซอร์สีแดงที่ได้ผ่านตัวกรองแสงความยาวคลื่นย่านแคบที่ 650 nm เพื่อตัดแสงรบกวนจากภายนอกและทำการปรับปรุงภาพด้วยโดยใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เช่น Extract Color Threshold Setup Lookup Table การวาดเส้นด้วยอัลกอริทึมแบบ Bresenham ตัวกรองแบบสาขาวิทซกี-โกลเลย์ (Savitzky-Golay Filter) เติมพื้นที่ของ Cross Section ด้วยพิกเซลสีขาวให้เต็มในแนวแกน Y เพื่อให้ได้โครงร่างของแสงเลเซอร์ที่สมบูรณ์ ก่อนนำมาคำนวณหาความหนาของวัตถุโดยอาศัยการคำนวณความหนาของวัตถุจากจำนวนพิกเซลของภาพแปลงให้เป็นหน่วยวัด (เซนติเมตร) ในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ความหนาของวัตถุจะถูกคำนวณและถูกเก็บค่าไว้ในรูปแบบไฟล์ csv ซึ่งได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วน คือ หลักการสร้างภาพที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการวัดความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิต และขั้นตอนการประมวลผลภาพ

### 4.1 หลักการสร้างภาพที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงหลักการในการของการสร้างภาพความหนาของแผ่นออร์ฟิตที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

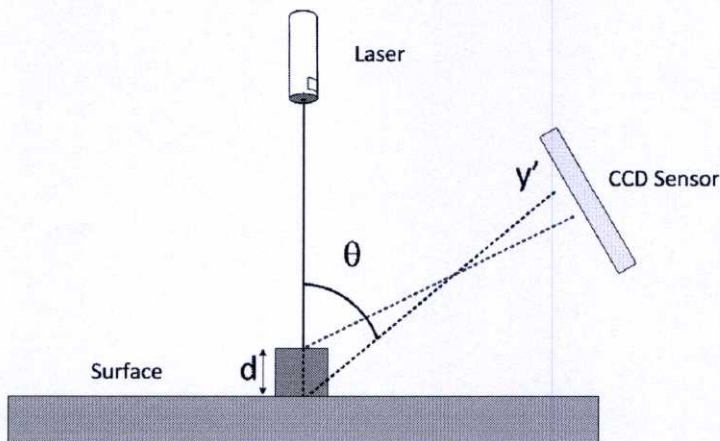
#### 4.1.1 หลักการสร้างภาพด้วยวิธีการลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง

หลักการสร้างภาพสามมิติที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ หลักการของการฉายแสงเลเซอร์แบบเส้นลงไปบนวัตถุเพื่อทำการแบ่งวัตถุออกเป็นแผ่นบางๆ ภาพของลำแสงที่ตัดขวางลงบนวัตถุนี้จะมีลักษณะเป็นภาพตัดขวางสองมิติ โดยแนวคิดของหลักการนี้แสดงได้ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แนวคิดในการสร้างภาพด้วยวิธีการลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ [21]

ปัจจัยมุมระหว่างกล้องซีซีดีกับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์นั้น สามารถอธิบายได้รูปที่ 4.2 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าตำแหน่งของแสงที่ตกกระทบบนเซนเซอร์ซีซีดี  $y'$  นั้นคือตำแหน่งของแสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุ จากความสัมพันธ์ที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ถ้ามุม  $\theta$  มีค่าสูง (แต่ไม่เกิน 90 องศา) จะทำให้ตำแหน่ง  $y'$  มีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น (โดยมุม  $\theta$  จะต้องมีค่าระหว่าง 0 ถึง 90 องศา)



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของเซนเซอร์ซีซีดีกับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ [21]

$$y' = d \cdot \sin(\theta) \quad (4.1)$$

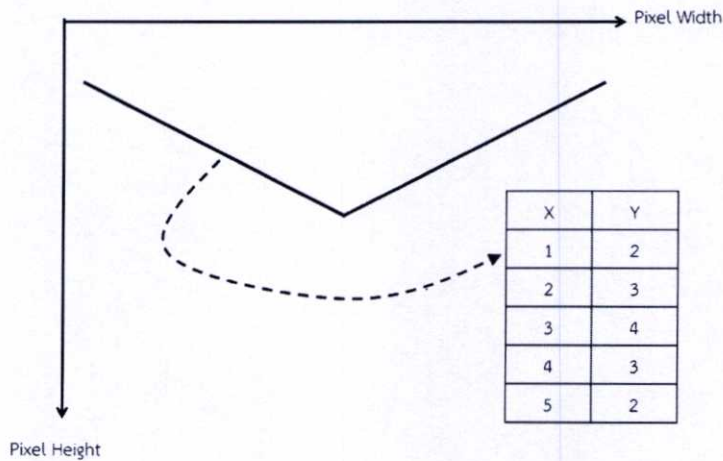
โดยที่  $y'$  คือ ตำแหน่งของแสงที่ตกกระทบบนซีซีดีเซนเซอร์

$d$  คือ ความสูงของพื้นผิวที่แสงตกกระทบบน

$\theta$  คือ มุมระหว่างแสงตกกระทบบนกับแสงที่สะท้อน

#### 4.1.2 การประยุกต์ใช้ตัวกรองสวิตซ์-โกลีย์กับภาพตัดขวางสองมิติ

เทคนิคตัวกรองสวิตซ์-โกลีย์เป็นเทคนิคในการแปลงสัญญาณจึงไม่สามารถนำมาใช้กับการประมวลผลภาพได้โดยตรง จึงต้องทำการแปลงข้อมูลของภาพตัดขวางออกมาเป็นชุดของตัวเลขในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian Coordinate) ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 4.3 โดย X เป็นตัวแทนตำแหน่งของจุดภาพในแกนความกว้างของภาพ และ Y เป็นตัวแทนจุดภาพในแกนความสูงของภาพ จากนั้นจึงนำชุดของตัวเลขที่ได้ไปคำนวณกับสมการของตัวกรองสวิตซ์-โกลีย์



รูปที่ 4.3 แสดงการแปลงข้อมูลภาพเป็นข้อมูลตัวเลขในเชิงพิกัดคาร์ทีเซียน [21]

#### 4.1.3 ความละเอียดในการตรวจวัด

การฉายแสงเลเซอร์แบบเส้นบนพื้นผิวของวัตถุนอกจากแบ่งวัตถุออกเป็นส่วน ๆ แล้วยังทำให้ได้คุณลักษณะของวัตถุตามพื้นผิวของวัตถุด้วย ซึ่งสิ่งที่ได้จากแสงที่ฉายบนพื้นผิวของวัตถุจะบอกถึงความกว้างและความหนาของวัตถุ เมื่อจับภาพด้วยกล้องวิดีโอ รูปภาพของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จะบอกถึงขนาดของวัตถุในหน่วยของพิกเซลที่เกิดขึ้นบนตัวเซนเซอร์ (CCD) ของกล้อง ดังนั้นในการแปลงพิกัดขนาดของวัตถุที่อยู่ในหน่วยพิกเซลของภาพ ให้เป็นขนาดพิกัดจริงในหน่วยวัดมาตรฐาน (Metric System) เช่น มิลลิเมตร เซนติเมตร จำเป็นต้องใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการสอบเทียบในงานวิจัยนี้ จะทำการแปลงพิกัดของจุดบนระนาบของภาพ (Image Plane) ให้เป็นพิกัดจริง (Real World Coordinate) เพื่อทำการคำนวณหาปริมาตรของวัตถุจากจำนวนพิกเซลของภาพ ที่ได้จากการแปลงพิกัดของวัตถุในหน่วยวัดมาตรฐาน ส่วนความยาวของวัตถุนั้นหาได้จากสมการที่ 4.1 ซึ่งความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุจะต้องสัมพันธ์กับความเร็วในการจับภาพของ

กล้องวีดีโอ เช่น กล้องสามารถจับภาพด้วยความเร็ว 30 fps ดังนั้นความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 30 mm/s เพื่อที่จะให้ได้ความละเอียดในด้านของความยาวของวัตถุ 1 mm/Frame หรือถ้าหากมีความต้องการความละเอียดในการวัดความยาวของวัตถุที่ 0.5 mm/Frame ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุต้องมีค่าเท่ากับ 15 mm/s

$$L = \frac{Os}{Cs} \quad (4.2)$$

เมื่อ

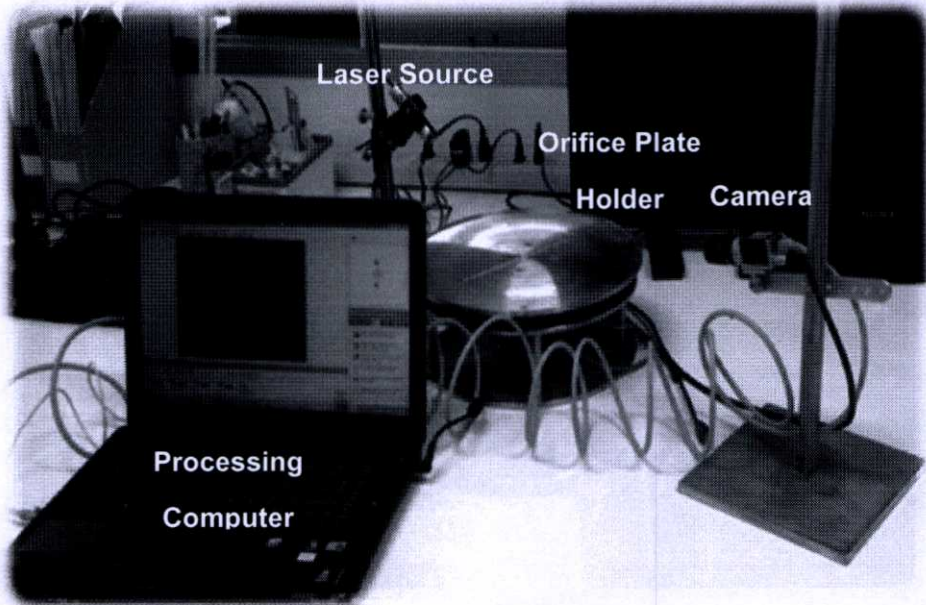
$L$  คือ ค่าความละเอียดในการตรวจวัดความยาววัตถุ (mm/Frame)

$Os$  คือ ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ (mm/s)

$Cs$  คือ ค่าความสามารถจับภาพด้วยความเร็วของกล้อง (Frame/s)

#### 4.2 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการวัดความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิต

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการวัดความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิต การวัดความราบเรียบของแผ่นออร์ฟิตที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะใช้ลักษณะการสแกนวัตถุโดยใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ ดังนั้นอุปกรณ์ที่สำคัญสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ ๆ คือ แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ซึ่งจะให้แสงเลเซอร์แบบเส้นสีแดง อุปกรณ์การตรวจจับภาพโดยใช้กล้องซีซีดี อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุและคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการประมวลผลภาพ โดยระบบการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุ

#### 4.2.1 อุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เลเซอร์ไดโอดแบบเส้นของบริษัท Lasic Electro-Optics Co.,Ltd. ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ เส้นของลำแสงมีความหนาของเส้น 0.5 มิลลิเมตร มีความยาวคลื่นระหว่าง 630 ถึง 650 นาโนเมตร (สีแดง) และมีกำลังสูงสุดที่ 5 มิลลิวัตต์



รูปที่ 4.5 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดแบบเส้นที่ใช้ในงานวิจัย

#### 4.2.2 อุปกรณ์รับภาพกล้องซีซีดี (CCD Camera)

ในการทดลองอุปกรณ์ตรวจจับลำแสงเลเซอร์ที่ถูกฉายลงบนพื้นผิวของวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ จะใช้อุปกรณ์จับภาพซึ่งถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของระบบ เนื่องจากต้องคำนึงถึงความละเอียดของกล้อง (Resolution) และความเร็วในการจับภาพ ซึ่งความเร็วในการจับภาพของกล้องจะมีผลต่อความเร็วในการประมวลผลของระบบ ซึ่งปัจจุบันความเร็วในการจับภาพของกล้องมีตั้งแต่ 1-1000 เฟรมต่อวินาทีหรือมากกว่า แต่กล้องยิ่งมีความเร็วสูงมากก็จะมีราคาแพงขึ้นตามมาด้วย ซึ่ง

กล้องที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้กล้องซีซีดี ของบริษัท Basler รุ่น ac A640-120gm/gc ที่มีความละเอียด 659x494 พิกเซล มีความเร็วในการจับภาพที่ 120 เฟรมต่อวินาที สามารถควบคุมการจับภาพได้จากสัญญาณภายนอก และใช้การเชื่อมต่อแบบอีเทอร์เน็ต (Ethernet) ความเร็ว 100 เมก้าบิตต่อวินาที ในการติดตั้งกล้องจะต้องคำนึงถึงทิศทางในการตรวจจับด้วย ดังนั้นจึงควรติดตั้งให้กล้องทำมุมกับระนาบของเลเซอร์ที่ระหว่าง 30 ถึง 60 องศา โดยกล้องได้ทำการติดตั้งตัวกรองคลื่นแสงย่านสีแดงไว้ด้วย เพื่อช่วยในการป้องกันแสงรบกวนจากคลื่นแสงย่านความถี่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่ความถี่ของคลื่นแสงสีแดงที่ต้องการตรวจจับ ที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดแบบเส้นที่ใช้ในงานวิจัย ที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 630 ถึง 650 นาโนเมตร (สีแดง) ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.6 กล้อง Basler รุ่น ac A640-120gm/gc



รูปที่ 4.7 เลนส์ SV-1214V



**รูปที่ 4.8** ตัวกรองคลื่นแสงย่านสีแดง Sharp Cut Filters R64-27 M27x0.5

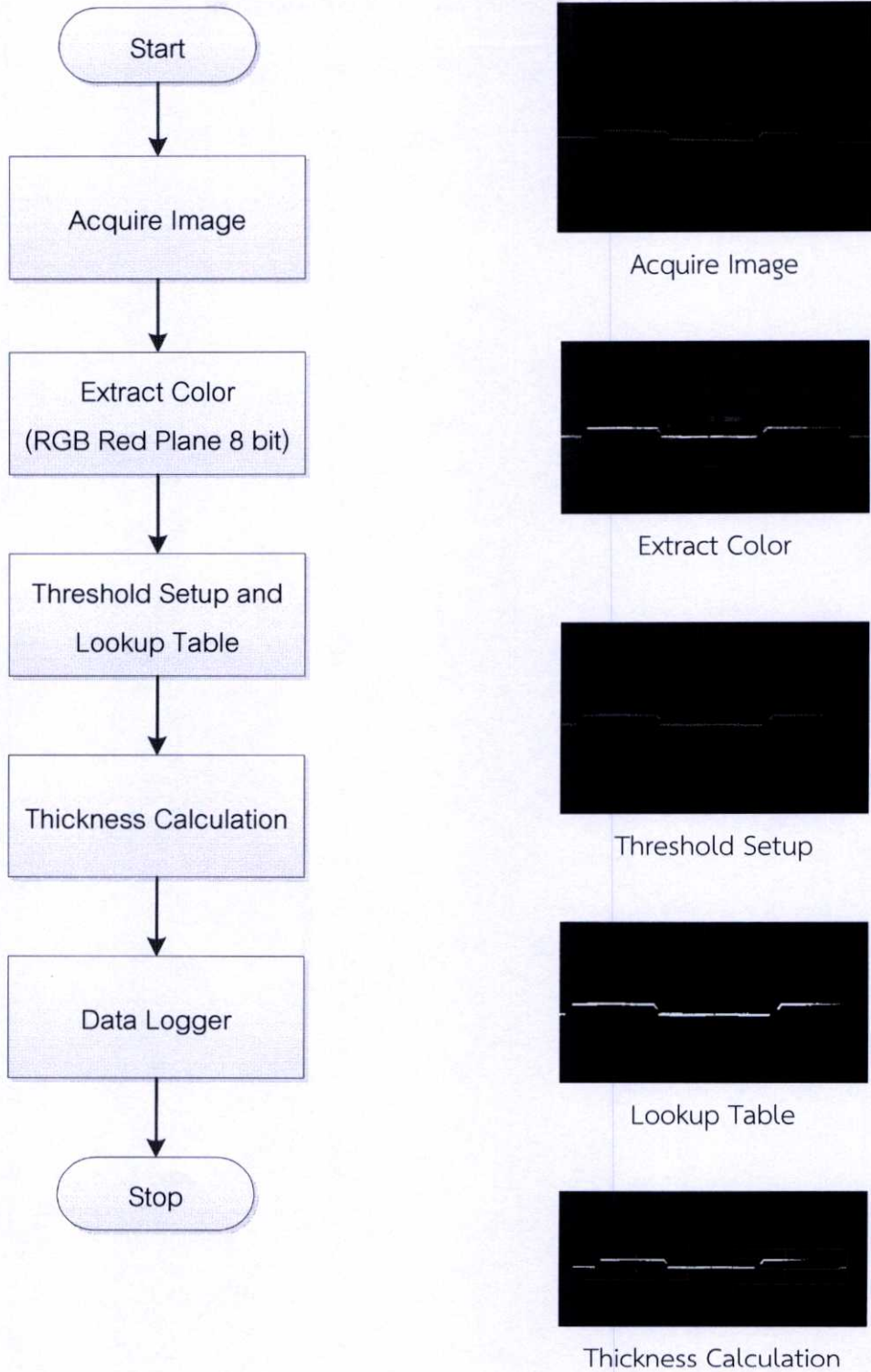
#### 4.2.4 อุปกรณ์คอมพิวเตอรืที่ใช้ในการประมวลผลภาพ

การประมวลผลภาพที่ได้จากกล้องเพื่อทำการหาปริมาตรของวัตถุนั้นจะใช้คอมพิวเตอรืในการประมวลผล โดยใช้โปรแกรมประมวลผลภาพที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น ในการวัดความราบเรียบของแผ่นออริฟิต เนื่องจากโปรแกรมประมวลผลภาพที่เลือกใช้ มีฟังก์ชันที่เกี่ยวกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์และประมวลผลภาพให้เลือกมากมายจึงช่วยลดเวลาที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมลงมาก

#### 4.3 ขั้นตอนการประมวลผลภาพและการทำงานของระบบการวัดความราบเรียบของแผ่นออริฟิต

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เพื่อใช้ในการวัดความราบเรียบของแผ่นออริฟิต ซึ่งการทำงานจะแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนได้ดังนี้คือ การสอบเทียบ การเก็บข้อมูลภาพของวัตถุที่ถูกตรวจวัด การประมวลผลภาพ การวิเคราะห์ภาพเพื่อคำนวณหาความหนาของแผ่นออริฟิต ขั้นตอนและลำดับการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุแสดงดังรูปที่ 4.9

จากรูปที่ 4.9 (ก) แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ และ (ข) แสดงภาพที่ได้จากขั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งถูกดำเนินการโดยโปรแกรมประมวลผลภาพและรับภาพมาจากกล้อง Basler ทำการปรับปรุงภาพก่อนการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด โดยแต่ละกระบวนการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



(ก) แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ

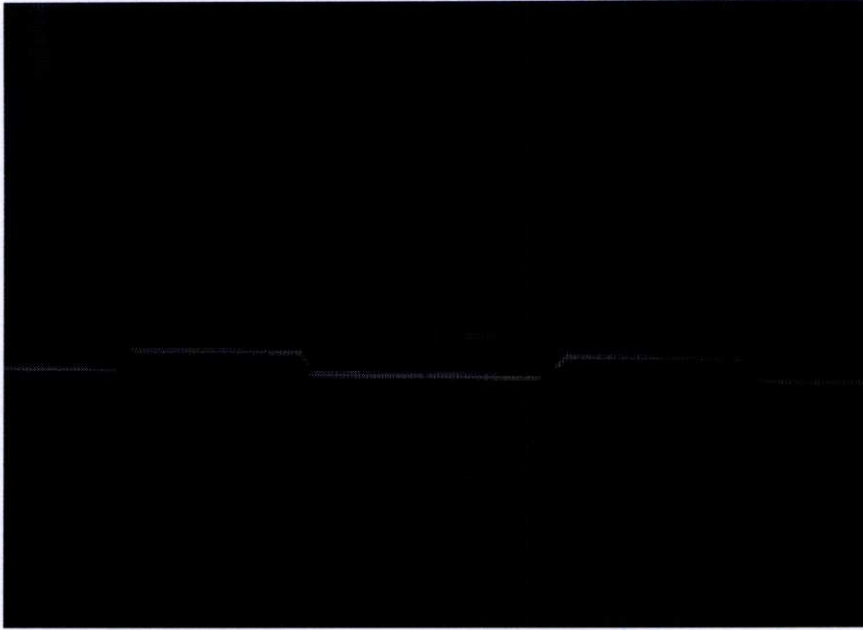
(ข) แสดงภาพที่ได้จากขั้นตอนต่าง ๆ

รูปที่ 4.9 ขั้นตอนการประมวลผลภาพ

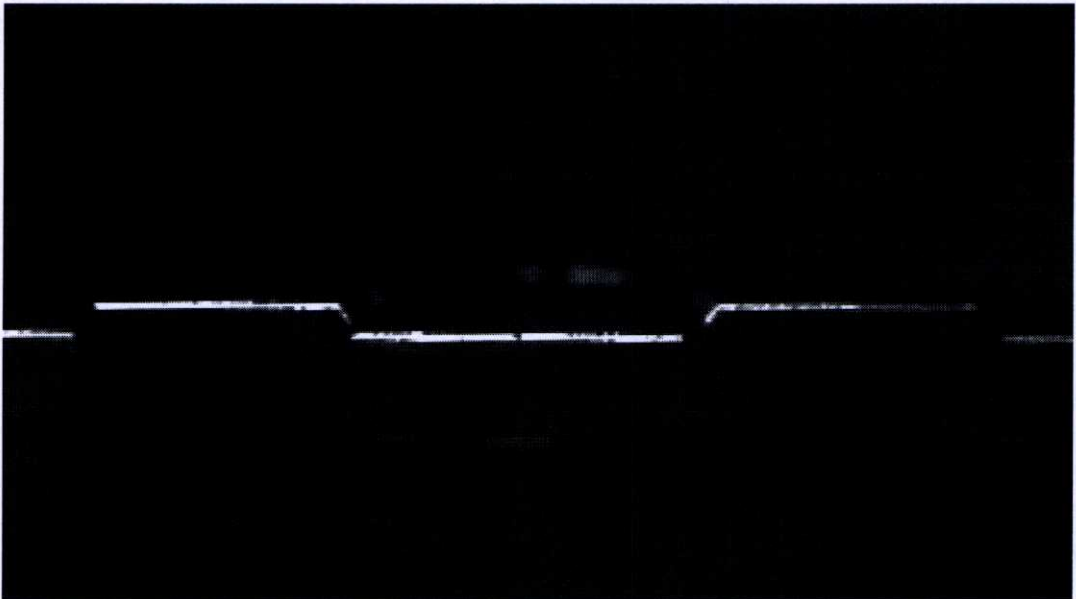
#### 4.3.1 Extract Color Planes (RGB – Red Plane 8 Bit Image)

เป็นกระบวนการดึงโครงร่างของแสงเลเซอร์สีแดงที่ต้องการออกจากภาพ ภาพที่ได้เป็น

ภาพ 8-Bit Grayscale

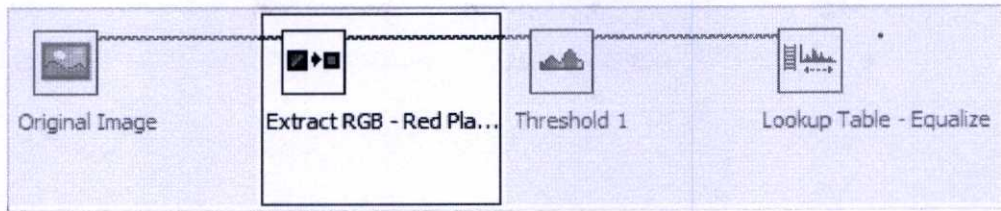


(ก) ภาพลำแสงเลเซอร์สีแดงตัดขวางวัตถุ



(ข) ภาพ Extract Color Planes

รูปที่ 4.10 Extract Color Planes (RGB – Red Plane 8 Bit Image)



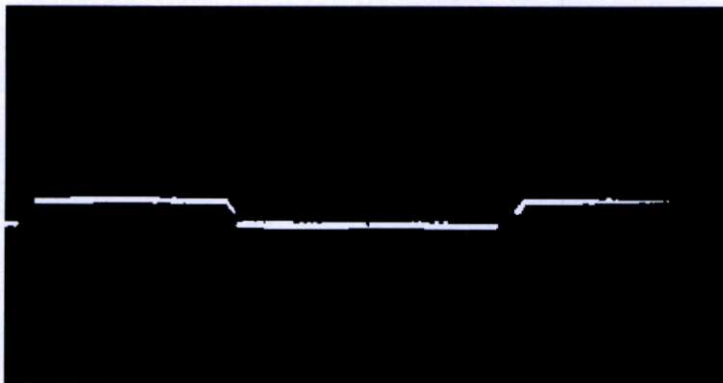
รูปที่ 4.11 Extract Color Planes Code ของโปรแกรม

#### 4.3.2 Threshold Setup and Lookup Table

เป็นกระบวนการแยกโครงร่างของแสงเลเซอร์ที่มีค่าความเข้มของแสงอยู่ใน Range ตามที่ต้องการออกจากภาพ โดยค่าเทรชโอล์ในตัวโปรแกรมจะทำการปรับค่าด้วยมือ (Manual Threshold) เพื่อหาค่าเทรชโอล์ของภาพที่เหมาะสม และทำ Lookup Table เพื่อเปลี่ยนภาพให้เป็น Full Grayscale [0, 255] หรือมีเฉพาะสีดำกับสีขาวเท่านั้น

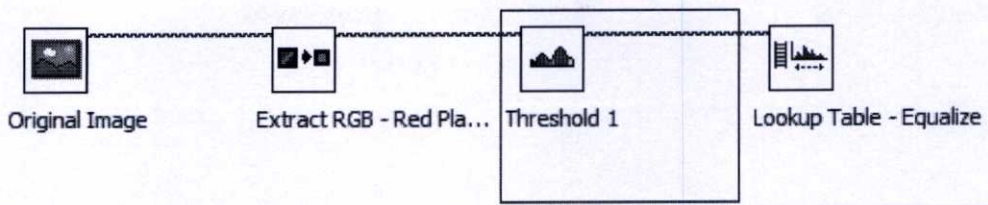


(ก) ภาพ Threshold Setup



(ข) ภาพ Lookup Table

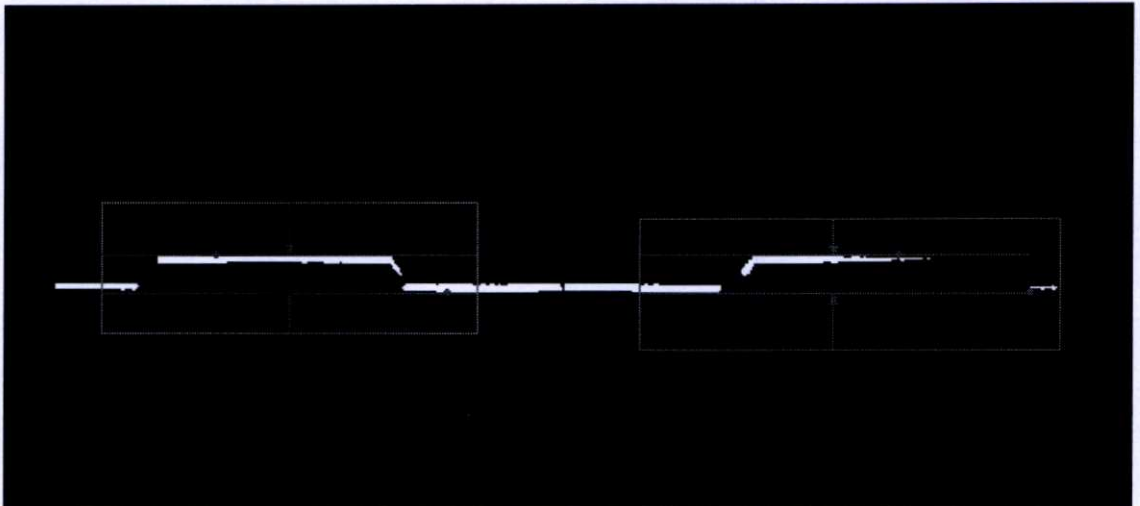
รูปที่ 4.12 Threshold Setup and Lookup Table



รูปที่ 4.13 Threshold Setup and Lookup Table Code ของโปรแกรม

#### 4.3.3 การคำนวณความหนาของแผ่นออริฟิต (Thickness Calculation)

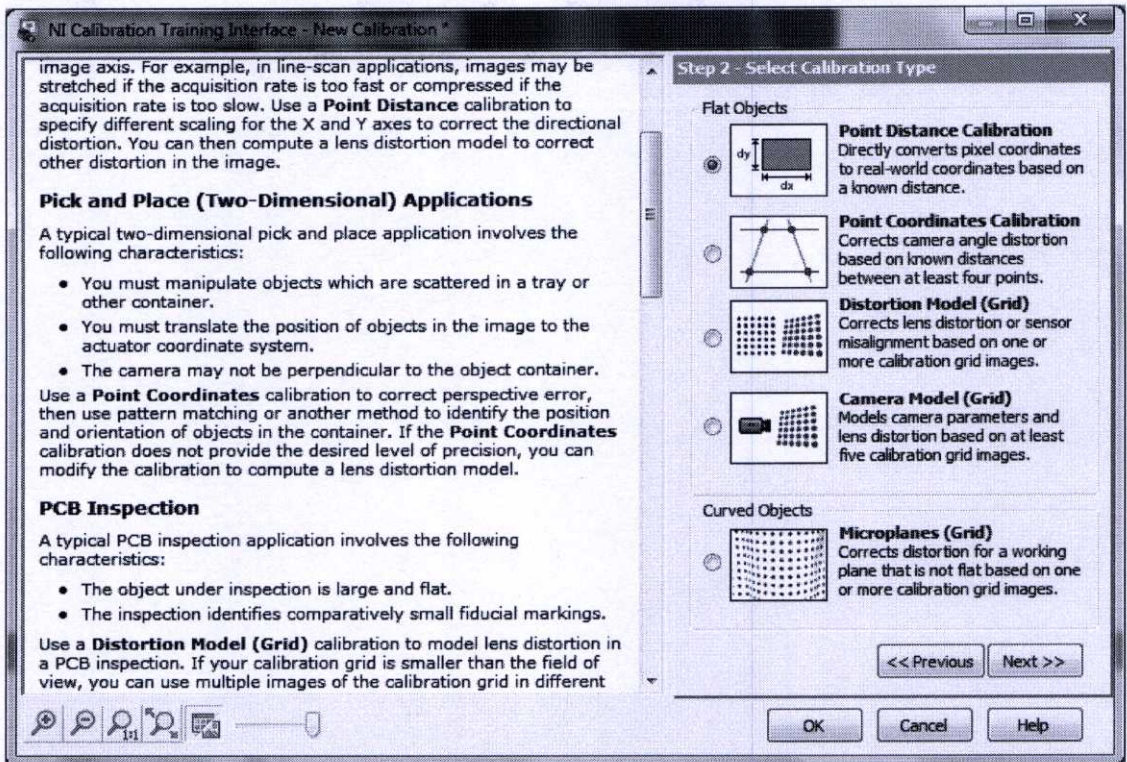
เป็นกระบวนการแปลงจำนวนพิกเซลโดยวัดระยะสีขาวจากแนวระนาบเส้นล่างไปจนถึงเส้นสีขาวด้านบนซึ่งเป็นพื้นผิวของแผ่นออริฟิตก่อนนำจำนวนพิกเซลที่ไปคำนวณหาความหนาของแผ่นออริฟิตตามรูปที่ 4.14



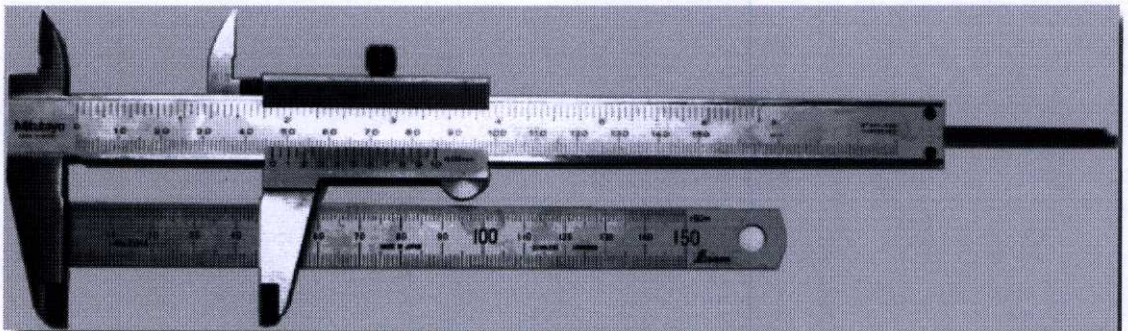
รูปที่ 4.14 การคำนวณความหนาของแผ่นออริฟิต (Thickness Calculation)

#### 4.3.4 การสอบเทียบ

การสอบเทียบเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งในการตรวจวัดความราบเรียบของแผ่นออริฟิต เพราะจะมีผลกับความผิดพลาดในการตรวจวัด การสอบเทียบนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการสอบเทียบ เป็นการแปลงจุดพิกัดภาพเป็นพิกัดจริง ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงใช้ไม้บรรทัดมาตรฐานที่ได้รับการสอบเทียบ [13] มาทำการสอบเทียบพิกัดภาพ 10 มิลลิเมตร ในการสอบเทียบจะต้องวางตำแหน่งของไม้บรรทัดให้ตั้งฉากกับระนาบของเส้นแสงเลเซอร์ที่จะฉายลงบนวัตถุ จากนั้นก็จะทำการบันทึกภาพโดยกล้องที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุซึ่งจะทำมุมเดียวกับระนาบของแสงเลเซอร์ เมื่อได้ภาพของแผ่นตารางที่ใช้ในการสอบเทียบแล้วเลือกรูปแบบ Point Distance Calibration ในการสอบเทียบ



รูปที่ 4.15 การเลือกรูปแบบ Point Distance Calibration ในการสอบเทียบ



รูปที่ 4.16 ไม้บรรทัดมาตรฐานที่ได้รับการสอบเทียบ

#### 4.3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากที่โปรแกรมทำการเก็บข้อมูล ข้อมูลนั้นจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยรีเกรสชัน (Regression Analysis) โดยการหาความสัมพันธ์ความหนาของแผ่นออริฟิตทั้งด้านซ้ายและด้านขวา เพื่อตัดสินใจว่าแผ่นออริฟิตแผ่นนั้นมีวราบเรียบหรือไม่ การวิเคราะห์ด้วยรีเกรสชันเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผันตาม  $y$  เป็นแบบเชิงเส้นของอีกหนึ่งตัวแปรอิสระ  $X$  ดังนั้นสมการเชิงคณิตศาสตร์เขียนในรูปแบบ

$$y = b_0 + b_1x \quad (4.3)$$

โดยที่  $b_0$  ให้เป็นจุดตัดเส้นรีเกรสชันบนแกน  $y$  และ  $b_1$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์รีเกรสชันแทนความชันของเส้นรีเกรสชัน [2] เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาแทนลงสมการแล้วหาค่าสัมประสิทธิ์กำหนด ( $R^2$ ) จะพบว่าถ้าแผ่นออริฟิตนั้นมีความราบเรียบผ่านเกณฑ์มาตรฐาน [1] ค่า  $R^2$  นั้นมีค่าเข้าใกล้ 1 ตรงกันข้ามถ้าแผ่นออริฟิตนั้นมีความราบเรียบไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน [1] ค่า  $R^2$  นั้นมีค่าออกห่าง 1 [2]

#### 4.4 ความไม่แน่นอนในการวัด (Uncertainty of Measurement)

ในการวัดค่าของสิ่งต่างๆด้วยเครื่องมือ ค่าที่เราวัดได้จะไม่มีทางเที่ยงตรง 100% จะต้องมีความผิดพลาดจากการวัดเกิดขึ้นเสมอ หากเป็นการวัดที่ต้องการความแม่นยำและต้องนำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัด จะเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสนใจ สิ่งที่เป็นจะต้องวิเคราะห์ออกมาและจะต้องทำเป็นรายงานที่แนบติดไปกับผลของการวัดนั้น ถูกเรียกว่า ความไม่แน่นอนของการวัด หรือ Uncertainty of Measurement

ในการวัดมักจะมี ความไม่แน่นอนเกิดขึ้น ความไม่แน่นอนของการวัดนี้เกิดขึ้นจากผลของการวัด ซึ่งอาจจะเกิดกลับเมตรที่มีอยู่หรือมิเตอร์ที่ใช้อยู่นั้นมันน่าเชื่อถือได้และให้ความถูกต้องแต่ในความเป็นจริงนั้น ผลที่ได้จากการวัดในทุกๆสิ่งจะมีความน่าสงสัยนี้แฝงอยู่เสมอ คำถามที่อาจมีอยู่ในใจของผู้ที่เกี่ยวข้องคือความไม่แน่นอนในการวัดนี้มีขนาดเท่าไร สิ่งที่ใช้ในการบอกความสงสัยนี้มีอยู่ 2 จำนวนด้วยกัน คือ ขนาดของความไม่แน่นอน (margin) และอีกค่าหนึ่งคือ ระดับความเชื่อมั่น (confidence level) ซึ่งเป็นข้อความที่บอกว่า เรามั่นใจแค่ไหนว่าค่าที่ถูกต้องนั้นจะอยู่ในช่วงของขนาดของความไม่แน่นอนนั้น ตัวอย่างเช่น ความยาวของแท่งเหล็ก A เท่ากับ  $45 \pm 2$  เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หมายความว่าเรามีความมั่นใจ 95% ว่า แท่งเหล็ก A มีขนาดความยาวอยู่ระหว่าง 43 ถึง 47 เซนติเมตร

##### 4.4.1 รูปแบบของความไม่แน่นอนในการวัด

รูปแบบของความไม่แน่นอนของการวัด ก็สามารถที่จะแบ่งคร่าวๆออกเป็น 2 รูปแบบคือ

###### 4.4.1.1 แบบสุ่ม (Random)

ลักษณะที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนแบบนี้จะสามารถสังเกตได้จาก ผลของการวัดที่แปรเปลี่ยนไปเรื่อยๆ เมื่อเป็นเช่นนี้การวัดหลายๆครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยออกมา จะทำให้สามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าจริงได้

###### 4.4.1.2 แบบเป็นระบบ (Random)

ผลของการวัดที่มีลักษณะแบบนี้คือ ค่าที่วัดได้จะซ้ำๆกัน เมื่อมีลักษณะ แบบนี้ก็จะไม่ได้อะไรเลย จากการวัดหลายๆครั้ง เพราะมันก็จะซ้ำเหมือนเดิม จึงจำเป็นต้องใช้วิธีอื่นในการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด เช่น เปลี่ยนวิธีการวัด หรือเปลี่ยนวิธีการคำนวณ เป็นต้น

#### 4.4.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด

คำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัด ก่อนอื่นจะต้องระบุแหล่งของความไม่แน่นอนในการวัดออกมาก่อน หลังจากนั้นจึงประเมินขนาดของความไม่แน่นอนจากแต่ละแหล่งแยกจากกัน หลังจากนั้นจึงรวมความไม่แน่นอนทั้งหมดเข้าด้วยกันออกมาเป็นภาพรวม การประเมินความไม่แน่นอนนี้มี 2 แนวทางด้วยกัน คือ Type A และ Type B ซึ่งตามปกติแล้ว จะมีการใช้ทั้ง 2 แนวทางไปด้วยกัน

การประเมินแบบ A (Type A Evaluation) คือการประเมินความไม่แน่นอนโดยใช้เทคนิคสถิติ ส่วนการประเมินแบบ B (Type B Evaluation) คือการประเมินความไม่แน่นอนจากข้อมูลข่าวสารอย่างอื่นที่อาจประกอบด้วยประสบการณ์ในอดีตของการวัด จากใบรับรองการสอบเทียบจากข้อกำหนด (specification) ของผู้ผลิต จากการคำนวณ จากสิ่งพิมพ์ต่างๆ และจากสามัญสำนึก

#### 4.4.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอน

ค่าความไม่แน่นอนของแต่ละปัจจัยนั้นจะต้องเป็นหน่วยเดียวกันและมีระดับของความเชื่อมั่นเดียวกันจึงจะสามารถรวมกันเข้าไปได้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย

##### 4.4.3.1 ความไม่แน่นอนมาตรฐาน (Standard Uncertainty)

ขนาดของความไม่แน่นอนมาตรฐานจะมีค่าเท่ากับ  $\pm 1 \sigma$  (1 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของความไม่แน่นอน ไม่ใช่ค่าการกระจาย สัญลักษณ์ที่ใช้คือตัว  $u$  ซึ่งจะประเมินความไม่แน่นอน Type A ได้จากสมการ

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (a^2 - b^2)}{n-1}} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $SD$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$n$  คือ จำนวนครั้งที่ทำการวัด

$$u = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (4.5)$$

เมื่อ  $SD$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$n$  คือ จำนวนครั้งที่ทำการวัด

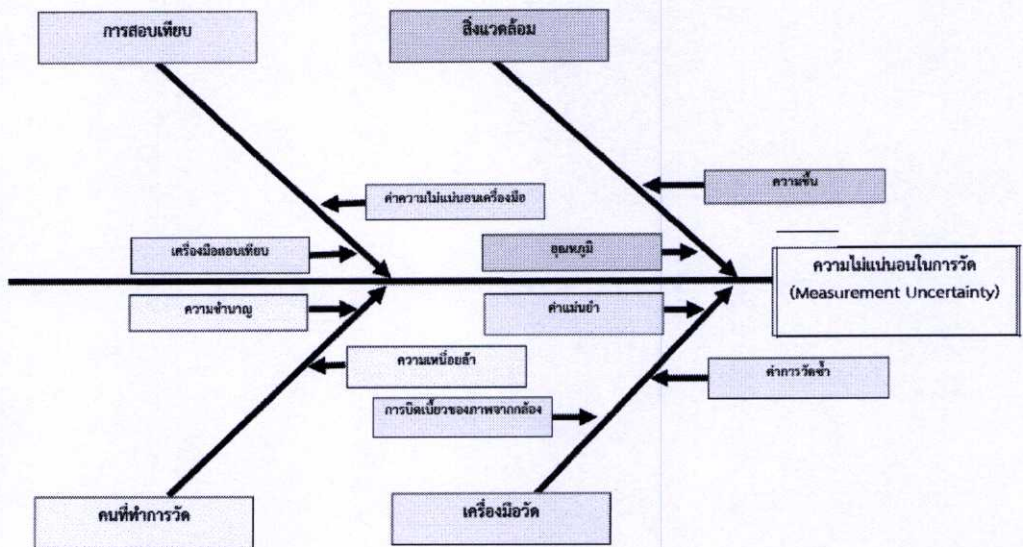
##### 4.4.3.2 การรวมความไม่แน่นอนมาตรฐาน (Combined Uncertainty)

การรวมความไม่แน่นอนมาตรฐานต้องใช้วิธีการทางสถิติที่เรียกว่า ผลรวมกำลังสอง (Root Sum Square) ซึ่งผลของการรวมนี้จะเรียกว่า การรวมความไม่แน่นอนมาตรฐาน

$$\text{Combined Uncertainty} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 \dots} \quad (4.5)$$

#### 4.4.4 ปัจจัยที่ก่อให้เกิดความไม่แน่นอนในการวัด

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการวิจัยนี้จะถูกแสดงในแผนภูมิแกงปลาตามรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แผนภูมิแกงปลาความไม่แน่นอนในการวัด

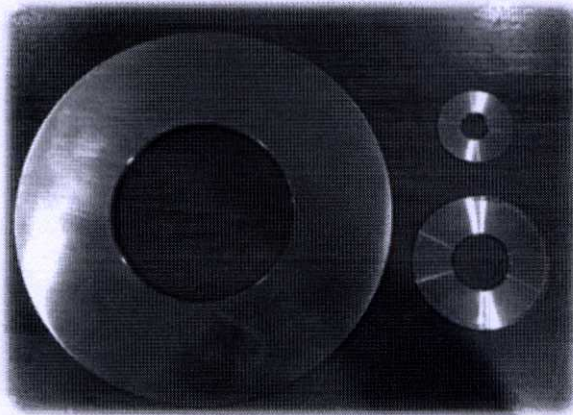
## บทที่ 5

### การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

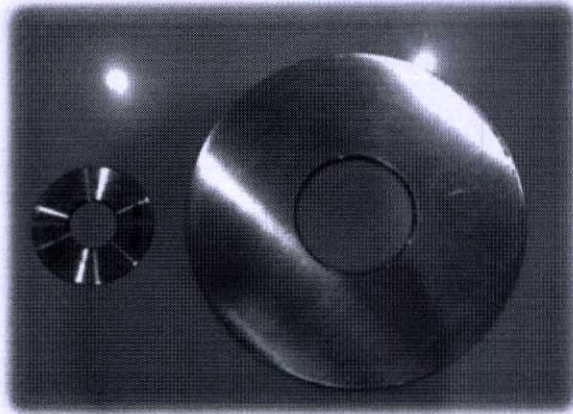
ในบทนี้จะเป็นการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองความราบเรียบของแผ่นอริฟิตขนาดต่าง ๆ โดยทำการทดลองกับแผ่นอริฟิตทั้งแผ่นที่ผ่านมาตรฐานและแผ่นที่ไม่ผ่านมาตรฐาน ตั้งแต่ขนาด 1-12 นิ้ว เพื่อนำเอาหลักการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุมาประยุกต์ในการทำการทดสอบ

#### 5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้เวอเนียร์แบบดิจิทัลทำการวัดขนาดความหนาของแผ่นอริฟิตขนาดตั้งแต่ 1-12 นิ้ว เพื่อทำการสอบเทียบค่าที่วัดได้จากวิธีการที่ได้นำเสนอเทียบกับค่าที่ได้จากวัดด้วยเวอร์เนียร์คาลิเบรแบบดิจิทัล เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวัดความหนาของแผ่นอริฟิต



รูปที่ 5.1 แผ่นอริฟิตที่ผ่านมาตรฐาน



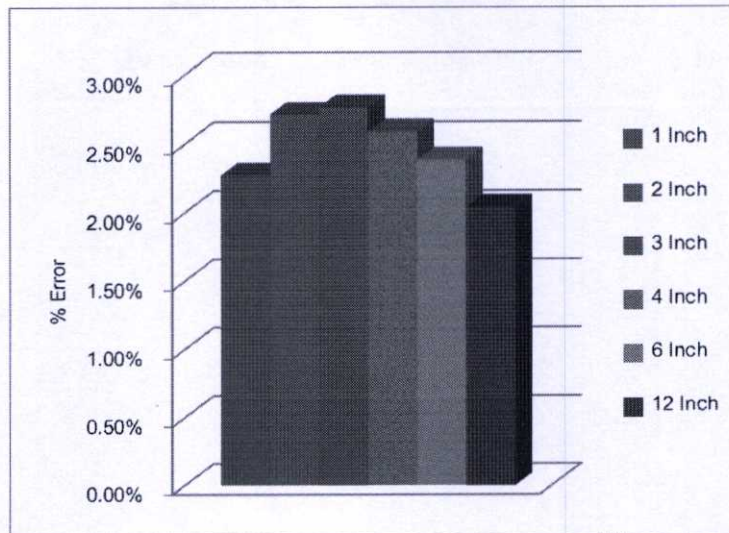
รูปที่ 5.2 แผ่นออริฟิตที่ไม่ผ่านมาตรฐาน

## 5.2 การสอบเทียบ

ในการทดลองได้ทำการสอบเทียบความถูกต้องของระบบการวัดด้วยการสอบเทียบค่าความหนาที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอกับการวัดด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์แบบดิจิทัลซึ่งมีความละเอียดในการวัด 0.0001 นิ้ว กับแผ่นออริฟิตที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-12 นิ้ว จำนวน 6 แผ่น มีความหนาเท่ากันที่ 0.25 นิ้ว จากตารางที่ 5.1 แสดงการสอบเทียบค่าความผิดพลาดของความหนาพบว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ เมื่อทวนสอบกับมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่นได้ไม่เกิน 5% [13][14]

ตารางที่ 5.1 แสดงการสอบเทียบค่าความผิดพลาดของความหนา

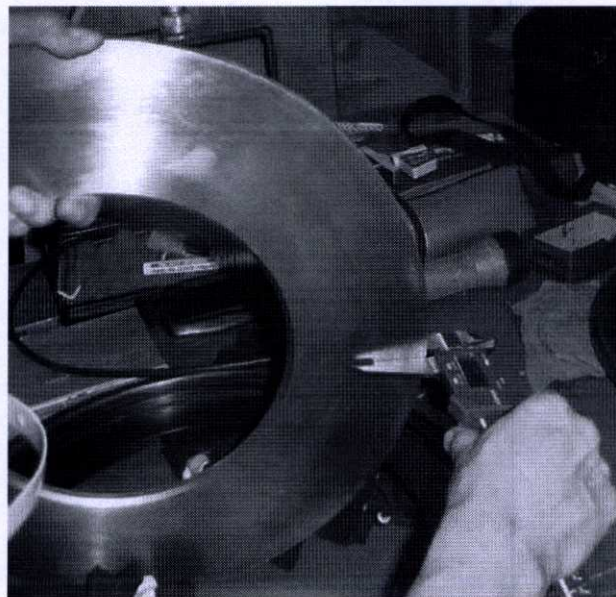
ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ของแผ่นออริฟิต (นิ้ว)	ความหนา มาตรฐานของ แผ่นออริฟิต (นิ้ว)	ความหนาที่วัดด้วย เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ (นิ้ว)	ความหนาที่วัด ด้วยระบบที่ นำเสนอ (นิ้ว)	ค่าความผิดพลาด (%)
1	0.2500	0.2508	0.2565	2.273%
2	0.2500	0.2505	0.2437	2.715%
3	0.2500	0.2495	0.2564	2.766%
4	0.2500	0.2510	0.2575	2.590%
6	0.2500	0.2515	0.2455	2.386%
12	0.2500	0.2501	0.2450	2.039%



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดจากการสอบเทียบ

### 5.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด

ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัดของงานวิจัยนี้จะมีการคำนวณค่าความไม่แน่นอนแบบ Type A โดยที่จะนำแผ่นอริฟิตที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 12 นิ้ว มีความหนาเท่ากับ 0.25 นิ้ว มาทำการวัดซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง เราจะได้ผลการวัดตามตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.4 การวัดความหนาแผ่นอริฟิตด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์แบบดิจิตอล

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าการวัดซ้ำเพื่อหาค่าความไม่แน่นอนในการวัด

วัดครั้งที่	ความหนาจากวัดด้วย	ความหนาจากวัดด้วย	A-B	(A-B) <sup>2</sup>
	ระบบที่นำเสนอ (นิ้ว) A	เวอร์เนียคาลิเปอร์ (นิ้ว) B		
1	0.2532	0.2505	0.0027	0.00000729
2	0.2518	0.2504	0.0014	0.00000196
3	0.2501	0.2505	-0.0004	0.00000016
4	0.2512	0.2505	0.0007	0.00000049
5	0.2490	0.2505	-0.0015	0.00000225
6	0.2523	0.2504	0.0019	0.00000361
7	0.2511	0.2504	0.0007	0.00000049
8	0.2515	0.2506	0.0009	0.00000081
9	0.2512	0.2505	0.0007	0.00000049
10	0.2509	0.2505	0.0004	0.00000016

ทำการคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานได้ตามสมการที่ 4.4 เราจะได้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0014 นิ้ว จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานตามสมการที่ 4.5 เราจะได้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเท่ากับ 0.004 นิ้ว โดยที่  $k$  เท่ากับ 1 เราจะต้องนำค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเข้ากับค่าความไม่แน่นอนของเวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิทัลตามสมการที่ 4.5

เนื่องจากรายงานการสอบเทียบของเวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิทัลเท่ากับ 0.007 ที่  $k$  เท่ากับ 2 ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่คำนวณได้โดยทำการคูณด้วย 2 เราจะได้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานใหม่เท่า 0.008 นิ้ว ที่  $k$  เท่ากับ 2 ดังนั้นทำการรวมค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานกับค่าความไม่แน่นอนของเวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิทัลกับตามสมการที่ 4.5 เราจะได้ค่าความไม่แน่นอนรวมเท่ากับ 0.0011 นิ้ว ที่  $k$  เท่ากับ 2 หรือที่ระดับความมั่นใจที่ 95%

#### 5.4 ผลการทดลองและวิจารณ์

ระบบการตรวจวัดความหนาของแผ่นออริฟิตโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุเพื่อไปประยุกต์ใช้กับการหาความเรียบราบของแผ่นออริฟิต โดยการหาความสัมพันธ์ของความหนาของแผ่นออริฟิตทั้งสองด้านมาเปรียบเทียบกันโดยอ้างอิงจากสมการเส้นตรงแบบตัวแปรถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) แล้วใช้ค่าสัมประสิทธิ์กำหนด ( $R^2$ ) เพื่อบ่งชี้ว่าแผ่นออริฟิตมีความเรียบหรือไม่ ตัวอย่างแผ่นออริฟิตที่นำมาทดสอบมีขนาดแตกต่างกัน ซึ่งเป็นแผ่นที่ตีจำนวน 6 แผ่นขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลาง 1, 2, 3, 4, 6 และ 12 นิ้ว และแผ่นที่เสียจำนวน 6 แผ่นขนาด 2, 3, 4, 6, 8, และ 12 นิ้ว ในการทดลองจะทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งต่อแผ่นออริฟิต 1 แผ่น ข้อมูลความหนาของแผ่นออริฟิตทั้ง 2 ด้านขณะหมุนผ่านแสงเลเซอร์จะถูกเก็บบันทึกในรูปแบบไฟล์ CSV (Comma Separated Value) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากไฟล์ CSV ไปทำการแปลงเป็นให้อยู่ในรูปแบบของโปรแกรมการจัดการสำเร็จรูปเพื่อนำข้อมูลนั้นมาทำการวิเคราะห์หาค่า  $R^2$

โดยทำการวัดความราบเรียบของแต่ละแผ่นด้วยฟิลเลอร์เกจที่มีขนาด 0.0015 – 0.025 นิ้วและจดบันทึกได้ตามตารางที่ 5.3

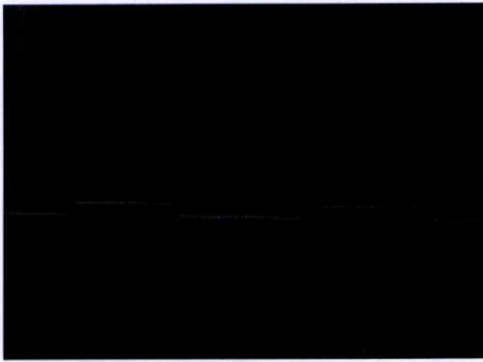
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความราบเรียบของแผ่นตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นออริฟิต (นิ้ว)	ค่าความราบเรียบแผ่นที่ผ่านมาตรฐาน (นิ้ว)	ค่าความราบเรียบแผ่นที่ไม่ผ่านมาตรฐาน (นิ้ว)
1	<0.0015	ไม่มี*
2	<0.0015	0.041
3	<0.0015	0.030
4	<0.0015	0.055
6	<0.0015	0.077
8	ไม่มี*	0.032
12	<0.0015	0.059

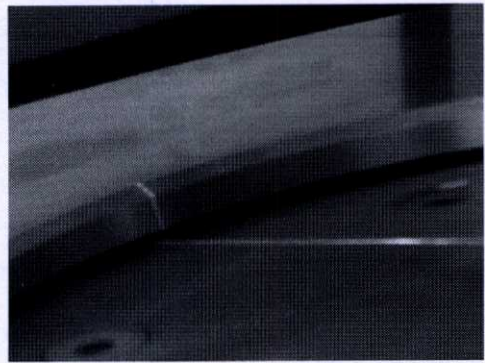
ไม่มี\* คือไม่มีอุปกรณ์ทดสอบ

#### 5.4.1 การทดลองการเก็บภาพโดยใช้ตัวกรองแสงเลเซอร์และไม่ใช้ตัวกรองแสงเลเซอร์

ในการเก็บภาพของลำแสงเลเซอร์ที่ถูกฉายลงบนแผ่นออริฟิตนั้น แสงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเป็นสิ่งที่ควบคุมได้ยาก ถ้าทำการเก็บภาพโดยมีสิ่งแวดล้อมเข้ามาจนระหว่างทำการเก็บภาพ อาจส่งผลทำให้การประมวลผลภาพมีความผิดพลาดขึ้นได้ ตัวกรองแสงเลเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถกำจัดคลื่นแสงย่านที่ไม่ต้องการออกไปได้ ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบการเก็บภาพระหว่างการใช้ตัวกรองแสงเลเซอร์และไม่ใช้ตัวกรองแสงเลเซอร์ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ในรูปที่ 5.4



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.5 (ก) การเก็บภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ (ข) การเก็บภาพโดยไม่ใช้ฟิลเตอร์

จากการทดลองพบว่าการเก็บภาพโดยไม่ใช้ตัวกรองแสงเลเซอร์นั้นภาพที่ได้จะมีเห็นความชัดเจนของลำแสงเลเซอร์น้อยกว่าการใส่ตัวกรองแสงเลเซอร์ แต่สามารถที่จะเห็นแผ่นออริพิทได้ชัดเจนดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.4 (ข) แสงจากสิ่งแวดล้อมมีความสว่างมากทำให้เกิดความยุ่งยากในการประมวลผลภาพ ในรูปที่ 5.4 (ก) เป็นการเก็บภาพโดยใช้ตัวกรองแสงเลเซอร์ จะเห็นได้ว่าความสว่างของลำแสงเลเซอร์นั้นมีความเหมาะสมในการประมวลผลของภาพ แต่จะสามารถเห็นลักษณะแผ่นออริพิทได้เพียงคร่าวๆเท่านั้น ดังนั้นในกรณีถ้าที่มีแสงจากสิ่งแวดล้อมเข้ามารบกวนจะไม่ส่งผลกระทบต่อประมวลผลภาพ

#### 5.4.2 การทดลองหาความราบเรียบของแผ่นออริพิทโดยใช้มือหมุน

ในการทดลองนี้จะทำการใช้มือหมุนแทนที่วางแผ่นออริพิทอย่างช้าๆ จนครบ 1 รอบ แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่า  $R^2$  โดยจะทำการวัดซ้ำ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย ผลการทดลองตามตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองหาความราบเรียบของแผ่นอริฟิตโดยใช้มือหมุน

ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง งแผ่นอริฟิต (นิ้ว)	ค่า $R^2$ ของแผ่นอริฟิตที่ผ่านมาตรฐาน				ค่า $R^2$ ของแผ่นอริฟิตที่ไม่ผ่านมาตรฐาน			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
1	0.955	0.923	0.965	0.948	ไม่มี*	ไม่มี*	ไม่มี*	ไม่มี*
2	0.965	0.989	0.994	0.983	0.644	0.666	0.623	0.644
3	0.944	0.915	0.918	0.926	0.777	0.698	0.753	0.743
4	0.977	0.979	0.945	0.967	0.665	0.643	0.612	0.640
6	0.905	0.919	0.921	0.915	0.442	0.489	0.433	0.455
8	ไม่มี*	ไม่มี*	ไม่มี*	ไม่มี*	0.699	0.684	0.645	0.676
12	0.966	0.933	0.945	0.948	0.612	0.632	0.622	0.622

ไม่มี\* คือไม่มีอุปกรณ์ทดสอบ

#### 5.4.3 การทดลองหาความราบเรียบของแผ่นอริฟิตโดยใช้มอเตอร์

ในการทดลองนี้จะทำการใช้มอเตอร์ความเร็วต่ำขับเคลื่อนที่วางแผ่นอริฟิตด้วยความเร็วคงที่ที่ 3, 4 และ 5 รอบต่อนาทีจนครบ 1 รอบ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกไปวิเคราะห์หาค่า  $R^2$  และจะทำการวัดซ้ำ 3 ครั้งต่อแผ่นเพื่อทำการหาค่าเฉลี่ย

##### 5.4.3.1 การทดลองหาความราบเรียบของแผ่นอริฟิตโดยใช้ความเร็วในการหมุนแทนวางชิ้นงาน 3 รอบต่อนาที

ในการทดลองนี้เราจะใช้มอเตอร์หมุนแทนวางอริฟิตด้วยความเร็วคงที่ 3 รอบต่อนาทีและความเร็วในการจับภาพ 30 เฟรมต่อวินาที ดังนั้นเราจะสามารถคำนวณความละเอียดในการวัดตามสมการที่ 4.2 ได้เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตรต่อเฟรม จากผลการทดลองตารางที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าความเร็วในการหมุนแทนวางอริฟิตด้วยความเร็วคงที่ 3 รอบต่อนาที ค่า  $R^2$  ของแผ่นที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานมีค่าเข้าใกล้ 1 เสมอในขณะที่แผ่นที่ไม่ผ่านมาตรฐานค่า  $R^2$  ก็จะออกห่างจาก 1

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองหาความราบเรียบของแผ่นอริฟิตโดยใช้ความเร็วในการหมุนแทนวางชิ้นงาน 3 รอบต่อนาที

ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง แผ่นอริฟิต (นิ้ว)	ค่า R <sup>2</sup> ของแผ่นอริฟิตที่ผ่านมาตรฐาน				ค่า R <sup>2</sup> ของแผ่นอริฟิตที่ไม่ผ่านมาตรฐาน			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
1	0.989	0.977	0.98	0.982	ไม่มี*	ไม่มี*	ไม่มี*	ไม่มี*
2	0.984	0.975	0.974	0.978	0.735	0.72	0.719	0.725
3	0.991	0.995	0.995	0.994	0.893	0.897	0.888	0.893
4	0.99	0.992	0.992	0.991	0.694	0.681	0.689	0.688
6	0.958	0.96	0.959	0.959	0.482	0.456	0.478	0.472
8	ไม่มี	ไม่มี*	ไม่มี*	ไม่มี*	0.823	0.809	0.805	0.812
12	0.995	0.995	0.993	0.994	0.677	0.67	0.674	0.674

ไม่มี\* คือไม่มีอุปกรณ์ทดสอบ

#### 5.4.3.2 การทดลองหาความราบเรียบของแผ่นอริฟิตโดยใช้ความเร็วในการหมุนแทนวางชิ้นงาน 4 รอบต่อนาที

ในการทดลองนี้เราจะใช้มอเตอร์หมุนแทนวางอริฟิตด้วยความเร็วคงที่ 4 รอบต่อนาทีและความเร็วในการจับภาพ 30 เฟรมต่อวินาทีเท่าครั้งที่แล้ว ดังนั้นเราจะสามารถคำนวณความละเอียดในการวัดตามสมการที่ 4.2 ได้เท่ากับ 0.117 มิลลิเมตรต่อเฟรม จากผลการทดลองตารางที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าความเร็วในการหมุนแทนวางอริฟิตด้วยความเร็วคงที่ 4 รอบต่อนาที ค่า R<sup>2</sup> ค่า R<sup>2</sup> ของแผ่นที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและแผ่นที่ไม่ผ่านมาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกับการใช้มอเตอร์หมุนแทนวางอริฟิตด้วยความเร็วคงที่ 3 รอบต่อนาที

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองหาความราบเรียบของแผ่นออริฟิตโดยใช้ความเร็วในการหมุนแทนวางชิ้นงาน 4 รอบต่อนาที

ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง แผ่นออริฟิต (นิ้ว)	ค่า R <sup>2</sup> ของแผ่นออริฟิตที่ผ่านมาตรฐาน				ค่า R <sup>2</sup> ของแผ่นออริฟิตที่ไม่ผ่านมาตรฐาน			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
1	0.985	0.980	0.989	0.985	ไม่มี*	ไม่มี*	ไม่มี*	ไม่มี*
2	0.977	0.975	0.985	0.979	0.700	0.720	0.705	0.708
3	0.999	0.999	0.993	0.997	0.888	0.890	0.887	0.888
4	0.994	0.995	0.995	0.995	0.685	0.678	0.679	0.681
6	0.969	0.977	0.963	0.970	0.460	0.456	0.451	0.456
8	ไม่มี	ไม่มี*	ไม่มี*	ไม่มี*	0.833	0.815	0.840	0.829
12	1.001	0.999	0.993	0.998	0.668	0.665	0.671	0.668

ไม่มี\* คือไม่มีอุปกรณ์ทดสอบ

#### 5.4.3.3 การทดลองหาความราบเรียบของแผ่นออริฟิตโดยใช้ความเร็วในการหมุนแทนวางชิ้นงาน 5 รอบต่อนาที

ในการทดลองนี้เราจะใช้มอเตอร์หมุนแทนวางออริฟิตด้วยความเร็วคงที่ 5 รอบต่อนาทีและความเร็วในการจับภาพ 30 เฟรมต่อวินาทีเท่าครั้งที่แล้ว ดังนั้นเราจะสามารถคำนวณความละเอียดในการวัดตามสมการที่ 4.2 ได้เท่ากับ 0.133 มิลลิเมตรต่อเฟรม จากผลการทดลองตารางที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าความเร็วในการหมุนแทนวางออริฟิตด้วยความเร็วคงที่ 5 รอบต่อนาที ค่า R<sup>2</sup> ของแผ่นที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและแผ่นที่ไม่ผ่านมาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกับการใช้มอเตอร์หมุนแทนวางออริฟิตด้วยความเร็วคงที่ 3 และ 4 รอบต่อนาที

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าที่ได้จากการทดลองหาความราบเรียบของแผ่นอริฟิตโดยใช้ความเร็วในการหมุนแทนวางชิ้นงาน 5 รอบต่อนาที

ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง แผ่นอริฟิต (นิ้ว)	ค่า R <sup>2</sup> ของแผ่นอริฟิตที่ผ่านมาตรฐาน				ค่า R <sup>2</sup> ของแผ่นอริฟิตที่ไม่ผ่านมาตรฐาน			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
1	0.984	0.981	0.990	0.985	ไม่มี*	ไม่มี*	ไม่มี*	ไม่มี*
2	0.973	0.979	0.980	0.977	0.700	0.709	0.705	0.705
3	0.995	0.994	0.993	0.994	0.885	0.887	0.887	0.886
4	0.998	0.996	0.994	0.996	0.680	0.675	0.679	0.678
6	0.988	0.980	0.979	0.982	0.455	0.456	0.453	0.455
8	ไม่มี	ไม่มี*	ไม่มี*	ไม่มี*	0.835	0.831	0.837	0.834
12	0.992	0.990	0.989	0.990	0.655	0.660	0.666	0.660

ไม่มี\* คือไม่มีอุปกรณ์ทดสอบ

## 5.5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองในหัวข้อการทดลองคือ การทดสอบการเก็บภาพทั้งแบบใส่ตัวกรองแสงเลเซอร์และไม่ใส่ตัวกรองแสงเลเซอร์ การทดสอบหาความราบเรียบโดยใช้มือหมุนแทนวางชิ้นงานและใช้มอเตอร์หมุนแทนวางชิ้นด้วยความเร็วครั้งที่ 3, 4 และ 5 รอบต่อนาที จากผลการทดสอบจะสามารถสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

ตัวกรองแสงเลเซอร์นั้นมีนัยสำคัญต่อการทดลองอย่างมาก เพราะว่าตัวกรองแสงเลเซอร์ที่กรองแสงที่อยู่ในย่านความถี่แสง 650 นาโนเมตร สามารถช่วยตัดแสงรบกวนจากภายนอกที่ไม่จำเป็นต่อการทดลองออกไปได้ให้เหลือแต่แสงเลเซอร์สีแดงเท่านั้น เป็นผลให้แสงเลเซอร์ที่ได้มีความคมชัดเป็นอย่างมากและเส้นเลเซอร์ที่มีความคมชัดนั้นยังส่งผลให้การประมวลผลภาพนั้นทำได้ด้วยความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากกว่าการที่ไม่ใส่ตัวกรองแสงเลเซอร์ ซึ่งแสงเลเซอร์ที่ได้จากการไม่ใส่ตัวกรองแสงเลเซอร์นั้นไม่มีความคมชัดเนื่องจากแสงรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอกรวมไปถึงการสะท้อนจากผิวของแผ่นอริฟิตที่เป็นวัสดุสแตนเลส ทำให้การประมวลผลภาพทำได้ยากลำบากส่งผลให้ค่าที่ได้มีความผิดพลาดค่อนข้างสูงและไม่สามารถยอมรับค่าผิดพลาดนั้นได้

ในขณะที่การทดลองหาผลกระทบจากความเร็วในการหมุนแทนของชิ้นงานโดยการเปรียบเทียบกันระหว่างการใช้มือหมุนและการใช้มอเตอร์หมุนแทนวางชิ้นงานด้วยความเร็วครั้งที่ 3, 4 และ 5 รอบต่อนาที ผลจากการทดลองนี้จะพบว่าความเร็วในการหมุนแทนวางชิ้นงานไม่มี

ผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการบ่งชี้ความราบเรียบของแผ่นออริฟิต ผลกระทบที่ทำให้ผลการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันอยู่เล็กน้อยก็คือความเสถียรของแท่นวางชิ้นงาน การใช้มือหมุนแท่นวางชิ้นงานทำให้เกิดการขยับตัวของแท่นวางชิ้นงานเล็กน้อยส่งผลให้ค่าของผลการทดลองนั้นแตกต่างเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลการทดลองโดยการใช้มอเตอร์หมุนแท่นวางชิ้นงานซึ่งมีความเสถียรของแท่นวางชิ้นงานที่ดีกว่าการใช้มือหมุน

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการวัดความราบเรียบของแผ่นออริฟิตโดยใช้แสงเลเซอร์ฉายลงบนแผ่นออริฟิตทำมุม 45 องศาและแผ่นออริฟิตนั้นถูกวางบนแท่นจับชิ้นงานซึ่งถูกหมุนด้วยมอเตอร์ความเร็วต่ำ โดยทำการทดลองเก็บภาพแผ่นออริฟิตโดยการใส่ตัวกรองแสงเลเซอร์และไม่ใส่ตัวกรองแสงเลเซอร์ จะพบว่าเมื่อไม่ใส่ตัวกรองแสงเลเซอร์จะทำให้กระบวนการประมวลผลภาพและการแปลงข้อมูลจากภาพมีความยากลำบากและให้หารวัดมีความผิดพลาดค่อนข้างสูง ซึ่งแตกต่างจากการใส่ตัวกรองแสงเลเซอร์เข้าไป ตัวกรองแสงความยาวคลื่นย่าน 650 นาโนเมตรจะทำการตัดแสงรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอกออกไปและกรองเอาแต่แสงเลเซอร์ที่อยู่ในย่านความถี่แสงเดียวกัน จากนั้นจะทำการปรับปรุงภาพด้วย Threshold Setup Lookup Table เพื่อให้ได้แสงเลเซอร์ที่สมบูรณ์ ก่อนนำมาคำนวณหาความหนาของแผ่นออริฟิตโดยอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลของภาพให้เป็นหน่วยนิ้ว ในขณะที่การทดลองผลกระทบจากความเร็วของการหมุนของแท่นวางชิ้นงานจะพบว่าความเร็วจากการใช้มือหมุนเทียบกับการใช้มอเตอร์ความเร็วต่ำหมุนแท่นวางชิ้นงานด้วยความเร็ว 3, 4 และ 5 รอบต่อนาที จะส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนต่อการแบบไม่เป็นนัยสำคัญ เนื่องจากการใช้มือหมุนแท่นวางชิ้นงานจะทำให้เกิดความสั่นสะเทือนของแท่นวางชิ้นงานส่งกระทบไปยังการประมวลผลภาพด้วย แต่ค่าความผิดพลาดยังอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้

วิธีการที่นำเสนอนี้จัดเป็นวิธีการวัดความราบเรียบของแผ่นออริฟิตแบบไม่สัมผัส ซึ่งระบบต้นแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแผ่นออริฟิตที่มีขนาด 1-12 นิ้ว ที่มีขนาดความหนาต่างๆได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามระบบยังสามารถพัฒนาต่อเพื่อให้ระบบมีความเป็นอัตโนมัติมากขึ้น

### 6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

จากการทดลองกับระบบต้นแบบจะพบปัญหาในปรับระยะการรับภาพของแผ่นออริฟิต เนื่องเลนส์รุ่น SV-1214V มีระยะการจับภาพ (Angle of View – AOV) ที่กว้าง 21.9°, สูง 29.1° และ ระยะโฟกัสที่ 12 มิลลิเมตร ซึ่งถ้าเป็นแผ่นออริฟิตที่มีขนาดไม่เกิน 6 นิ้ว กล้องจะสามารถเก็บภาพของแผ่นออริฟิตได้ทั้งหมด แต่ถ้าแผ่นออริฟิตที่มีขนาดเกิน 6 นิ้วขึ้นไป จะต้องทำการปรับระยะแล้วทำการสอบเทียบใหม่ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการทำการทดลองมากขึ้น ดังนั้นเพื่อให้การเก็บภาพมีความครอบคลุมระยะการวัดของแผ่นออริฟิตตั้งแต่ขนาด 1-12 นิ้ว เลนส์ควรมีระยะการจับภาพที่กว้าง 60° และ สูง 70° เป็นอย่างน้อยเพื่อให้ครอบคลุมแผ่นออริฟิตถึงขนาด 12 นิ้วโดยไม่ต้องทำการปรับระยะภาพและทำการสอบเทียบใหม่

ในส่วนการประมวลผลเพื่อตัดสินใจว่าแผ่นออริฟิตนั้นผ่านมาตรฐานหรือไม่นั้นยังคงต้องนำ การเก็บข้อมูลความหนาแผ่นออริฟิตที่อยู่ในรูปของไฟล์ csv ประมวลผลที่โปรแกรมสำเร็จรูป (excel) ซึ่งยังไม่ค่อยมีความสะดวกในการทำงานเพราะยังเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติและไม่สะดวกในการ ใช้งาน ดังนั้นถ้ามีการปรับปรุงความละเอียดของกล้องรับภาพและการประมวลผลเพื่อตัดสินใจว่า แผ่นออริฟิตนั้นผ่านมาตรฐานหรือไม่ให้มีความเป็นอัตโนมัติแก่ผู้ใช้งาน แล้วยังเพิ่มแม่นยำในการวัด และเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] American Petroleum Institute, 2000. **Chapter 14 Natural Gas Fuel Measurement, Section 3 Concentric Square Edged Orifice Meters, Part 2 Specification and Installation Requirement**, 4-9
- [2] A. D. Aczel, 1995. **Statistics Concepts and Applications**. New York: Richard D. Irwin Inc.
- [3] M. F. M. Costa, 1996. **Surface inspection by an optical triangulation method.**, In Proceeding of SPIE - Optical Engineering, vol. 35, no. 9, pp. 2743–2747, September 1996.
- [4] M. F. M. Costa, 2001. **Noninvasive microtomographic inspection of rough surfaces by active triangulation.** In Proceeding of SPIE - Laser Metrology Precision Measurement Industry. September 2001, vol. 4420, pp. 174–184.
- [5] A.Criminisi, I.Reid and A.Zisserman, 2000. **Single View Metrology**, International Journal of Computer vision, 40(2), 123-148.
- [6] F.Pernkopf and P.O’Leary, 2003. **Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces**, In Proceeding of NDT&E International Conference 2003, Vol.36, 609–617.
- [7] N.Nunak and T.Suesut, 2007. **Measuring geometric mean diameter of fruit and vegetable using computer vision**, In Proceeding of PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE-2007. Thailand.
- [8] Daniel F. Garcia, Fellow, IEEE, Manuel Garcia, Faustino Obeso, and Valentin Fernandez, 2002. **Flatness Measurement System Based on a NonLinear Optical Triangulation Technique.** In Proceeding of IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. April 2002, Vol.51, No.2, 188-195
- [9] N. Katafuchi, M. Sano, S. Ohara, and M. Okudaira, 2000. **A method for inspecting industrial parts surfaces based on an optics model.** In Proceeding Machine Vision and Application, vol. 12, no. 4, pp. 170–176, Dec. 2000.
- [10] Shiping Zhu, Member, IEEE, Jiancheng Fang, Rui Zhou, Jianhui Zhao, and Wenbo Yu, 2008. **A New Noncontact Flatness Measuring System of Large 2-D Flat Workpiece.** In Proceeding of IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. December 12, 2008, Vol.57, 2891-2903.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] Yayli, M.O., Kandemir, S.Y. and Toklu, Y.C., 2015. **Assessment of Lunar Material**. In Proceeding of Recent Advances in Space Technologies, IEEE International Conference. 7-9, Jun. 2015.
- [12] พงศ์สิทธิ์ รัตนกรวิทย์ และ พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ. 2554 “การศึกษาผิวเรียบของวัสดุความละเอียดสูงโดยใช้เทคนิคพีโซอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์” หน้า 27 – 32 ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39. กรุงเทพฯ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [13] Japanese Industrial Standard, 2005. JIS B 7512, **Steel Tape Measure**
- [14] Japanese Industrial Standard, 2005. JIS B 7516, **Metal Rules**
- [15] Schalk, P. O’Leary, P. Ofner, R. and Gfrerrer, A. **Measuring and Analyzing Cross-Sectional Profiles of Rotating Objects Using Light Sectioning**. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. Volume 57 No. 10. 2008. page 2329–2338.
- [16] Jinjun Shan, Member, 2012. **Flatness Measurement and Active Control for a Membrane Structure**. In Proceeding of International Conference on Mechatronics and Automation. page 1062 – 1067
- [17] กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. “พระราชบัญญัติปิโตรเลียม” 2514
- [18] O’Leary P., Harker M and Neumayr R., **Savitzky-Goley smoothing for multivariate cyclic measurement data.**, I2MTC., May. 2010. pp. 1585-1590
- [19] William H. Press, Member. **Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing** 2<sup>nd</sup> ED. Press Syndicate of the University of Cambridge, Inc 1997
- [20] รัชพล ภัวฒ์ภักคพล. 2557 **ระบบวิทัศน์จักรกลสำหรับวัดปริมาตรแบบต่อเนื่อง** หน้า 712-719 ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 28 ขอนแก่น มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [21] ศิวกร สุขประเสริฐชัย. 2556 **ระบบสร้างภาพพื้นผิวของแก้มยางรถยนต์ด้วยวิธีการเลเซอร์สแกน 3 มิติ** หน้า 456-464 ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมครั้งที่ 32 กรุงเทพฯ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์



เรื่องเดิมการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

# The Proceedings of 54<sup>th</sup> KASETSART UNIVERSITY ANNUAL CONFERENCE

สาขาวิทยาศาสตร์ Science

สาขาพันธุวิศวกรรม Genetic Engineering

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

Architecture and Engineering

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร Agro-Industry

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

Natural Resources and Environment

กลุ่มที่ **2**



นวัตกรรมด้านการเกษตรเพื่อห่วงโซ่มูลค่าระดับโลก

## Agricultural Innovation for Global Value Chain



เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
The Proceedings of 54<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference

เล่มที่ 2

สาขาวิทยาศาสตร์ (Subject: Science)  
สาขาพันธุวิศวกรรม (Subject: Genetic Engineering)  
สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์  
(Subject: Architecture and Engineering)  
สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Subject: Agro-Industry)  
และ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม  
(Subject: Natural Resources and Environment)

จัดโดย (Organized by)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University)

ร่วมกับ (in cooperation with)

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (Office of the Higher Education Commission)

กระทรวงศึกษาธิการ (Ministry of Education)

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (Ministry of Agriculture and Cooperatives)

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (Ministry of Science and Technology)

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Ministry of Natural Resource and Environment)

กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

(Ministry of Information and Communication Technology)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (National Research Council of Thailand)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (The Thailand Research Fund)

2 - 5 กุมภาพันธ์ 2559 (February 2 - 5, 2016)

ISBN : 978-616-278-304-3

## คำนำ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ได้จัดให้มีการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54 ระหว่างวันที่ 2 – 5 กุมภาพันธ์ 2559 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมสร้างและพัฒนาคุณภาพของงานวิจัย และเผยแพร่ความรู้ความก้าวหน้าทางด้านวิชาการและเทคโนโลยี ตลอดจนเป็นการแลกเปลี่ยนความรู้และระดมความคิดเห็นระหว่างนักวิชาการ อันจะนำไปสู่แนวทางการสร้างผลงานวิจัยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศชาติต่อไป

เอกสารฉบับนี้รวบรวมเรื่องเต็มผลงานวิจัยภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ทั้งภาคบรรยายและภาคโปสเตอร์ของ สาขาวิทยาศาสตร์ จำนวน 27 เรื่อง สาขาพันธวิศกรรม จำนวน 3 เรื่อง สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ จำนวน 53 เรื่อง สาขาอุตสาหกรรมเกษตร จำนวน 40 เรื่อง และสาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จำนวน 19 เรื่อง ซึ่งได้ผ่านการคัดเลือกจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขาและนำเสนอในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54

ในนามของคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54 ขอขอบคุณนักวิจัย นักวิชาการ คณาจารย์ที่ได้นำผลงานมาเสนอ และผู้ที่สนใจเข้าร่วมการประชุมทางวิชาการในครั้งนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกฝ่ายที่สละเวลา แรงกาย แรงใจและความคิด ร่วมมือกันจัดเตรียมการประชุม จนทำให้การประชุมทางวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



(รองศาสตราจารย์ ดร.ลิลลี่ กาวีตี๊ะ)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ประธานคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54

9.	สถ.วศ.14/O43	การออกแบบและสร้างเครื่องยีผลตาลโตนดเพื่อการแปรรูปอาหาร.....311 Design and Construction of Palmyra Palm Crushing Machine for Food Processing โดย อรุณ สุขแก้ว วิมล บุญรอด และสุจิต สิงห์พันธุ์	
10.	สถ.วศ.18/O55	ผลของแสงสว่างที่มีต่อการเปลี่ยนสีของไส้กรอกหมูในระหว่างการจัดเก็บ.... 319 Effect of Illumination on Color Changes in Cooked Pork Sausages During Storage โดย ขวัญชัย ขอบสำราญ เอกพงษ์ ชีวีตโสภณ ทวีพล ชี้อัสตย์ และนวกัทธา หนูนาค	
11.	สถ.วศ.21/O74	อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาของการย่างของเครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้..... 327 Effects of Grilling Temperature and Time of the Automatic Infrared Grilling Machine on Quality of Pork-Skewer Products โดย เอกพงษ์ ชีวีตโสภณ	
12.	สถ.วศ.22/O76	การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการตัดก้อนยางวัตถุบให้ได้น้ำหนักตามค่าที่กำหนด เพื่อผลิตยางล้อจักรยานยนต์..... 335 Efficiency Improvement of Rubble Bale Cutting with Specific Weight for Motorcycle Tire Production โดย ชัชพันธ์ ขำญาติ	
13.	สถ.วศ.23/O84	การตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออริฟิตโดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง.....343 Inspection of Orifice Plate Flatness Using Laser Light Techniques โดย ภทิล อัครกูรวิษณุ วิทยา ทิพย์สุวรรณพร และทวีพล ชี้อัสตย์	
14.	สถ.วศ.24/O260	การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้วในจังหวัดจันทบุรี..... 352 Life Cycle Assessment of Melon in Syrup in Chanthaburi Province โดย สุภิญญา เสือสะอาด และปณณมี สัจจกมล	

## การตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออริฟิตโดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง

## Inspection of Orifice Plate Flatness Using Laser Light Techniques

ภทิล อัครกรวิชัย<sup>1</sup> วิทยา ทิพย์สุวรรณพร<sup>1</sup> และ ทวีพล ชื้อสตัย<sup>1</sup>Phathill Akkarakurawish<sup>1</sup>, Vittaya Thipsuwannaporn<sup>1</sup>, and Taweepol Suesut<sup>1</sup>

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอในเรื่องการตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออริฟิตแบบไม่สัมผัส โดยวัดความราบเรียบผิวของวัตถุด้วยเทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวางซึ่งเป็นการฉายลำแสงเลเซอร์ไปบนพื้นผิวของแผ่นออริฟิตเพื่อเป็นตัวกำหนดลักษณะของวัตถุตัวอย่างที่จะทำการตรวจหาความราบเรียบของผิววัตถุจากกล้องด้วยการประมวลผลภาพบนโปรแกรม แผ่นออริฟิตที่ทำการทดสอบจะวางอยู่กับชุดหมุนขึ้นงานซึ่งถูกติดตั้งกับมอเตอร์ความเร็วต่ำอยู่ที่แกนเพลลา ความหนาของแผ่นออริฟิตจะถูกสร้างขึ้นจากภาพตัวอย่างจากเส้นลำแสงเลเซอร์และทำการประมวลผลภาพเพื่อนำมาคำนวณหาขนาดความหนาของแผ่นออริฟิตแล้วโปรแกรมจะทำการเก็บข้อมูลความหนาแผ่นออริฟิต หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้ออกไปทำการประมวลผลโดยใช้การอ้างอิงจากสมการเส้นตรง จากการทดสอบระบบการประมวลผลภาพจากโปรแกรมสามารถแยกแยะวัตถุที่ดีและเสียได้ถูกต้องและแม่นยำ แต่การบ่งชี้จุดที่เกินมาตรฐานบนแผ่นออริฟิตควรต้องมีการพัฒนาต่อไปเพื่ออำนวยความสะดวกกับผู้ที่ใช้งาน

## ABSTRACT

The research presents a non-contact inspection of orifice plate flatness based on laser light techniques. The laser source projects a laser beam (red light) on the orifice plate and the CCD camera equipped with filter captures image of red laser beam. The image processing algorithms applies to enhance the laser line image quality then the calculation of orifice plate flatness processes via Lab View application. The sampling data automatically logs and processes reference to Linear Equation System in order to identify the accepted or rejected orifice plate. The experiment indicates that the established software application can precisely detect the accepted or rejected orifice plate but the system will develop to identify defective areas on the orifice plate for user accommodation.

Key Words: Orifice Plate, Flatness, Machine Vision, Laser Techniques

\* Corresponding author; e-mail address: tab.n@hotmail.com

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520<sup>1</sup>Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang 10520

### คำนำ

ปัจจุบันมีมาตรวัดปริมาตรก๊าซธรรมชาติหลากหลายแบบที่ใช้ทำการวัด เช่น การวัดแบบความดันแตกต่าง การวัดแบบอัลตราโซนิก ฯลฯ ในประเทศไทยมาตรวัดปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ผลิตจากแท่นนอกฝั่งทุกแท่นจะถูกวัดด้วยมาตรวัดแบบความดันแตกต่างแบบออริฟิตซึ่งการวัดจะอ้างอิงตามข้อกำหนดมาตรฐานของสถาบันปิโตรเลียมแห่งสหรัฐอเมริกา (American Petroleum Institute – [API], 2000) บทที่ 14. การวัดก๊าซธรรมชาติหมวดที่ 3 มาตรวัดออริฟิตขอคมแบบวงกลมร่วมศูนย์กลาง จะมีทั้งหมด 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 สูตรการคำนวณทั่วไปและแนวทางของความไม่แน่นอนในการวัด ส่วนที่ 2 ข้อมูลจำเพาะและสิ่งที่จำเป็นในการติดตั้งมาตรวัด และส่วนที่ 3 การประยุกต์ใช้สำหรับก๊าซธรรมชาติ โดยจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้จะเลือกทำการวิจัยในส่วนของ การประมาณค่าความราบเรียบของแผ่นออริฟิตเพื่อตรวจสอบว่าแผ่นออริฟิตนั้นยังสามารถใช้งานได้ตามข้อกำหนด (API, 2000)

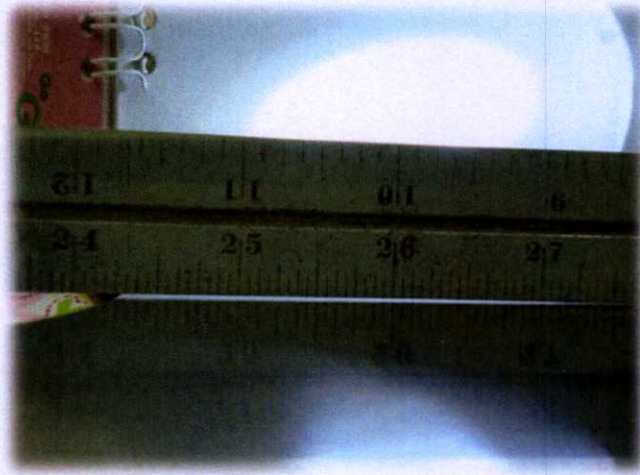


Figure 1 Current Methodology for Orifice Plate Flatness Identification

รูปที่ 1 เป็นวิธีที่ใช้การวัดแบบในปัจจุบันโดยใช้ไม้บรรทัดมาตรฐานทาบบนแผ่นออริฟิตแล้วใช้แหล่งกำเนิดแสงส่องเพื่อหาความไม่ราบเรียบ วิธีการวัดแบบนี้เป็นแบบชும்และใช้เวลานานหากจะวัดให้ได้ทั่วทั้งแผ่นซึ่งอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดได้ ดังนั้นการวิจัยนี้ได้นำเทคโนโลยีเครื่องจักรกลวิทัศน์ (F.Pernkopf et al., 2003) มาประยุกต์ใช้ในการประเมินหาความราบเรียบของแผ่นออริฟิตแบบต่อเนื่องตลอดทั้งแผ่น โดยการประมวลผลจากข้อมูลภาพที่ได้จากลำแสงเลเซอร์ตัดขวางที่กระทบลงพื้นผิวของวัตถุ โดยเป็นการวัดเป็นแบบสองมิติ (Daniel F. Garcia et al., 2002; Shiping Zhu et al., 2008) ภาพที่ได้จะถูกทำการแปลงข้อมูลขนาดรูปภาพเป็นข้อมูลพิกัดในระบบสองมิติเพื่อหาขนาดของวัตถุตัวอย่าง (M. F. M. Costa, 1996; M. F. M. Costa, 2001; D. F. Garcia et al., 2002) ในบทความนี้ได้ทำการทดสอบแผ่นออริฟิตที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-12 นิ้ว ซึ่งมีทั้งแผ่นออริฟิตที่ผ่านมาตรฐานและไม่ผ่านมาตรฐาน (API, 2000) มาทำการทดสอบเพื่อศึกษาว่าเทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุสามารถบ่งชี้แผ่นออริฟิตที่ดีและเสียได้

## อุปกรณ์และวิธีการ

### ชุดทดลองระบบการวัดโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ

รูปที่ 2 แสดงชุดการทดลองระบบแสงเลเซอร์ตัดขวางสำหรับวัดความราบเรียบของวัตถุ ประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักคือ 1) แท่นวางชิ้นงานพร้อมแกนเพลลาติดกับมอเตอร์ความเร็วต่ำ, 2) กล้องจับภาพ, 3) แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ และ 4) คอมพิวเตอร์ประมวลผล วัตถุตัวอย่างจะถูกวางบนที่วางชิ้นงานมีลักษณะเป็นวงกลมและจะถูกหมุนด้วยมอเตอร์ความเร็วต่ำที่ความเร็วรอบคงที่ 5 รอบต่อนาที โดยติดตั้งแสงเลเซอร์ให้เส้นของแสงเลเซอร์ฉายไปในทิศทางขวางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแสงเลเซอร์ตามลักษณะพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งเลเซอร์ที่ใช้เป็นเลเซอร์แบบเส้นสีแดงมีความยาวคลื่น 650 - 670 nm ขนาด 5 mW (Roithner Laser Technik, Austria) และทำการเก็บข้อมูลรูปภาพโดยใช้กล้องรุ่น Basler Gig E รุ่น acA640-120-gc ความละเอียดในการรับภาพ 658 Pixels x 492 Pixels และอัตราความเร็วในการรับภาพ 120 เฟรมต่อวินาที โดยข้อมูลรูปภาพที่ได้มาจะเป็นข้อมูลความหนาของแผ่นออริฟิตแต่ละจุดบนพื้นผิวของแผ่นออริฟิต เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ก็จะได้ข้อมูลในส่วนถัดไปของวัตถุจนครบ 1 รอบ



Figure 2 Inspection of Orifice Plate Flatness Using Laser Light Techniques System

เทคนิคการใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุนี้เป็นการฉายแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์สีแดงมีความยาวคลื่น 650 - 670 nm ลงบนพื้นผิวของวัตถุเพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงเลเซอร์ตกกระทบ เนื่องจากนำมาวิเคราะห์และประมวลผลได้ง่ายและขั้นตอนในการปรับแต่งรูปภาพน้อย แสงเลเซอร์ที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพและบันทึกไว้ด้วยกล้อง CCD ที่วางทำมุมเอียงกับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ (M. F. M. Costa, 1996) โดยข้อมูลรูปภาพที่ได้มาจะเป็นข้อมูลความหนาของแผ่นออริฟิตแต่ละจุดบนแผ่นออริฟิต เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ก็จะได้ข้อมูลในส่วนถัดไปของวัตถุในลักษณะของภาพตัดขวางของแต่ละส่วนดังรูปที่ 4 และนำมารวมกันเพื่อสร้างเป็นระบบพิกัดแบบสองมิติที่เป็นตัวบอกได้ถึงความหนาของแผ่นออริฟิตนั้น ๆ ด้วยเทคนิคการใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุนี้ ทำให้การวัดมีความสะดวกและรวดเร็วกว่าการวัดที่เป็นรูปแบบปัจจุบัน จากการจับเวลาในช่วงการทดลองจะใช้เวลาตั้งแต่เริ่มทำการวัดจนถึงการวัดเสร็จสิ้นภายใน 2 นาทีต่อการวัด 1 ครั้งทำให้ผู้ใช้งานมี

สะดวกและรวดเร็วในการที่จะตัดสินใจได้ว่าชิ้นงานผ่านตามข้อกำหนดมาตรฐาน หรือไม่เมื่อเปรียบเทียบกับการวัดในแบบวิธีดั้งเดิมตามรูปที่ 1 (API, 2000)

**ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมและการประมวลผลภาพ**

จากรูปที่ 3 จะเป็นขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการรับภาพและการประมวลผลภาพซึ่งภาพที่ได้จากกล้อง Basler Gig E จะถูกนำมาทำการปรับปรุงแก้ไขโดยแต่ละกระบวนการมีรายละเอียดตามรูปที่ 4 หลังจากนั้นจะนำภาพที่ได้ถูกปรับปรุงแก้ไขไปคำนวณหาความหนาของแผ่นออร์ฟิตจนถึงการเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรม LabVIEW 2013 ในแต่ละขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจะสามารถอธิบายการทำงานเบื้องต้นได้ดังนี้

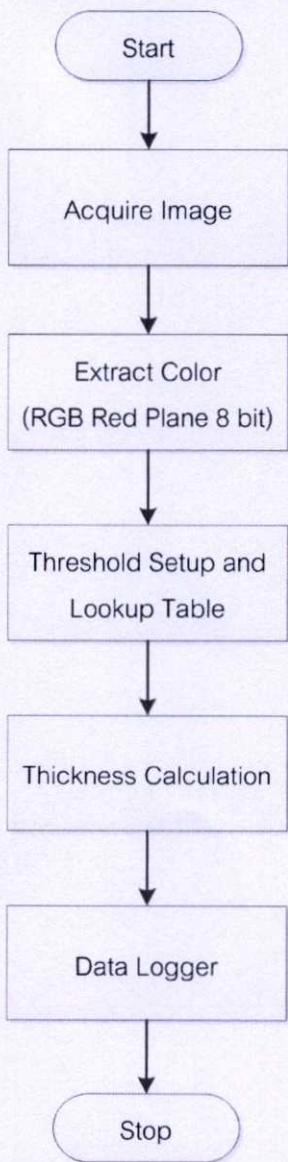


Figure 3 Flowchart of Image Processing



Acquire Image – acquires image from camera.



Extract Color - extracts red plane of color image.



Threshold and Lookup Table – isolates pixels and modifies the dynamic intensity of regions.

Figure 4 Image Processing Step

- Acquire Image คือกระบวนการรับภาพจากกล้อง Basler Gig E
- Extract Color Planes คือกระบวนการดึงโครงร่างของแสงเลเซอร์สีแดงที่ต้องการออกจากภาพภาพที่ได้เป็นภาพ grayscale
- Threshold Setup and Lookup Table คือกระบวนการแยกโครงร่างของแสงเลเซอร์ที่มีค่าความเข้มของแสงอยู่ในช่วงตามที่ต้องการออกจากภาพและเปลี่ยนภาพ grayscale ให้มีเฉพาะสีดำกับสีขาว
- Calculation คือกระบวนการแปลงจำนวน Pixel สีขาวของภาพในแต่ละ Cross Section ให้เป็นพื้นที่และทำการรวมพื้นที่ของแต่ละส่วนให้เป็นความหนา
- Data Logger คือกระบวนการเก็บข้อมูลความหนาของแผ่นออริฟิตในแต่ละช่วงเวลา

### การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากที่โปรแกรมทำการเก็บข้อมูล ข้อมูลนั้นจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีเกสชัน (Regression Analysis) โดยการหาความสัมพันธ์ความหนาของแผ่นออริฟิตทั้งด้านซ้ายและด้านขวาเพื่อตัดสินใจว่าแผ่นออริฟิตแผ่นนั้นมีว่าราบเรียบหรือไม่ การวิเคราะห์ด้วยวิธีเกสชันเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผันตาม  $y$  เป็นแบบเชิงเส้นของอีกหนึ่งตัวแปรอิสระ  $X$  ดังนั้นสมการเชิงคณิตศาสตร์เขียนในรูปแบบ

$$y = b_0 + b_1x \quad (1)$$

โดยที่  $b_0$  ใหญ่เป็นจุดตัดเส้นรีเกสชันบนแกน  $y$  และ  $b_1$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์รีเกสชันแทนความชันของเส้นรีเกสชัน (A. D. Aczel, 1995.) เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาแทนลงสมการแล้วหาค่าสัมประสิทธิ์กำหนด ( $R^2$ ) จะพบว่าถ้าแผ่นออริฟิตนั้นมีความราบเรียบผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (API, 2000) ค่า  $R^2$  นั้นมีค่าเข้าใกล้ 1 ตรงกันข้ามถ้าแผ่นออริฟิตนั้นมีความราบเรียบไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (API, 2000) ค่า  $R^2$  นั้นมีค่าออกห่าง 1 (M. Ozgur Yayli et al., 2015)

### แผ่นออริฟิตตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้จะนำแผ่นออริฟิตที่มีขนาดแตกต่างกันตั้งแต่ขนาด 4-12 นิ้วซึ่งมีทั้งแผ่นที่ผ่านและไม่ผ่านตามข้อกำหนดมาตรฐาน (API, 2000) โดยใช้เวอเนียร์คาลิเปอร์เพื่อทำการสอบเทียบค่ามาตรฐานขนาดความหนาของแผ่นออริฟิต (สูง) แล้วมาเปรียบเทียบกับวิธีการที่ได้นำเสนอเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

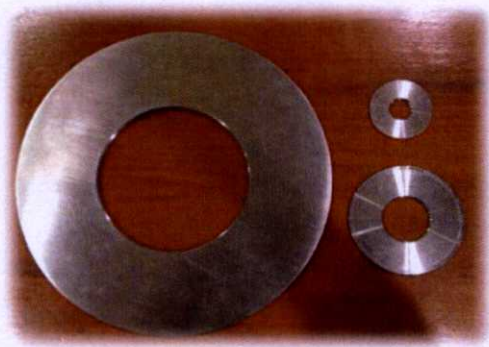


Figure 5 Example of Accepted Orifice Plates

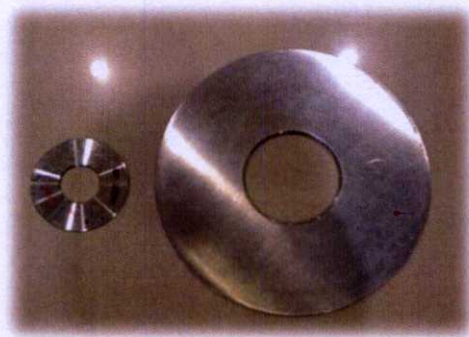


Figure 6 Example of Rejected Orifice Plates

### การสอบเทียบความหนาแผ่นออริฟิต

ในการทดลองได้ทำการสอบเทียบความหนาของแผ่นออริฟิตขนาด 1-12 นิ้วจำนวน 6 แผ่นเทียบกับเวอเนียร์คาลิเปอร์เพื่อทดสอบความผิดพลาดจากวิธีการนำเสนอ ในรูปที่ 7 แสดงกราฟค่าความผิดพลาดของการสอบเทียบ พบว่าค่าที่ได้มีค่าความผิดพลาดจากการสอบเทียบน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้

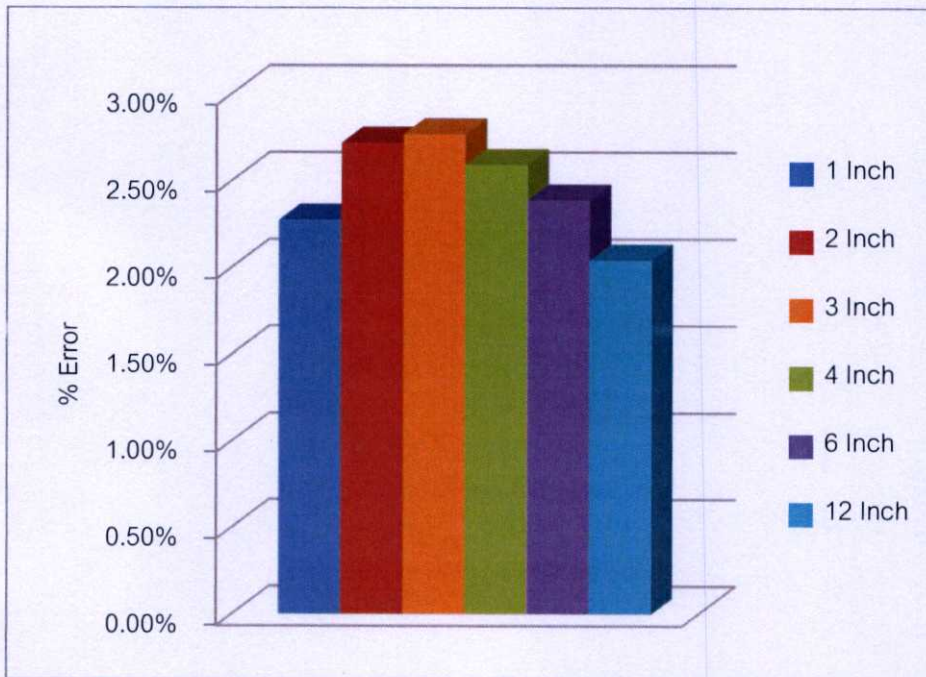


Figure 7 Error of Orifice Plate Thickness Measurement

### ผลการทดลองและวิจารณ์

ระบบการตรวจวัดความหนาของแผ่นออริฟิตโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุเพื่อไปประยุกต์ใช้กับการหาความเรียบราบของแผ่นออริฟิต โดยการหาความสัมพันธ์ของความหนาของแผ่นออริฟิตทั้งสองด้านมาเปรียบเทียบกันโดยอ้างอิงจากสมการเส้นตรงแบบตัวแปรถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) แล้วใช้ค่าสัมประสิทธิ์กำหนด ( $R^2$ ) เพื่อบ่งชี้ว่าแผ่นออริฟิตมีความราบเรียบหรือไม่ ตัวอย่างแผ่นออริฟิตที่นำมาทดสอบมีขนาดแตกต่างกัน ซึ่งเป็นแผ่นที่ดีจำนวน 6 แผ่นขนาด 1, 2, 3, 4, 6 และ 12 นิ้ว และแผ่นที่เสียจำนวน 6 แผ่นขนาด 2, 3, 4, 6, 8, และ 12 นิ้ว ในการทดลองจะทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งต่อแผ่นออริฟิต 1 แผ่น ข้อมูลความหนาของแผ่นออริฟิตทั้ง 2 ด้านขณะหมุนผ่านแสงเลเซอร์จะถูกเก็บบันทึกในรูปแบบไฟล์ CSV (Comma Separated Value) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากไฟล์ CSV ไปทำการแปลงเป็นให้อยู่ในรูปแบบของ Excel เพื่อนำข้อมูลนั้นมาทำการวิเคราะห์หาค่า  $R^2$

ผลจากการทดลองในตารางที่ 1 จะแสดงให้เห็นค่า  $R^2$  ที่ได้จากความสัมพันธ์ของความหนาของแผ่นอริฟิตที่ดี และ  $R^2$  ที่ได้จากความสัมพันธ์ของความหนาของแผ่นอริฟิตที่เสียจากการทดลองใช้เทคนิคการตรวจวัดความหนาของแผ่นอริฟิตโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ

Table 1 Table of Accepted and Rejected Orifice Paste Linear Regression ( $R^2$ )

Orifice Plate Size (Inch)	Accepted Orifice Paste Linear Regression ( $R^2$ )				Rejected Orifice Paste Linear Regression ( $R^2$ )			
	1st	2nd	3rd	Average	1st	2nd	3rd	Average
1	0.989	0.977	0.980	0.982	-	-	-	-
2	0.984	0.975	0.974	0.978	0.735	0.720	0.719	0.725
3	0.991	0.995	0.995	0.994	0.893	0.897	0.888	0.893
4	1.004	1.004	1.003	1.004	0.694	0.681	0.689	0.688
6	0.958	0.960	0.959	0.959	0.482	0.456	0.478	0.472
8	-	-	-	-	0.823	0.809	0.805	0.812
12	0.995	0.995	0.993	0.994	0.677	0.670	0.674	0.674

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 จะพบว่าแผ่นอริฟิตที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจะมีค่าเฉลี่ย  $R^2$  มากกว่า 0.950 ขึ้นไปในขณะที่แผ่นอริฟิตที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจะมีค่าเฉลี่ย  $R^2$  น้อยกว่า 0.900 ลงไป

### สรุป

การวัดความราบเรียบของแผ่นอริฟิตด้วยวิธีจักรกลวัดผิวหน้าโดยอาศัยเทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุพบว่าเทคนิคนี้สามารถตรวจสอบแยกแยะความราบเรียบของแผ่นอริฟิตได้ดี แต่ยังคงนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลที่โปรแกรม Excel อีกครั้งซึ่งยังไม่ค่อยมีความสะดวกในการทำงานเพราะยังไม่เป็นแบบอัตโนมัติและยังพบว่ายังมีปัจจัยอื่นที่ทำให้การวัดความราบเรียบของแผ่นอริฟิตมีความคลาดเคลื่อนได้ เช่น ปัญหาที่เกิดจากระยะการจับภาพของแผ่นอริฟิตที่มีขนาดน้อยกว่า 6 นิ้วกับแผ่นอริฟิตที่มีขนาดมากกว่า 6 นิ้วมีระยะไม่เท่ากันทำให้ต้องมีการปรับระยะการจับภาพใหม่ทุกครั้ง การปรับปรุงควรทำการเพิ่มเติมตัวปรับระยะการจับภาพให้มี 2 ระยะเพื่อจะทำให้การทำงานของชุดการวัดความราบเรียบของแผ่นอริฟิตมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

**เอกสารอ้างอิง**

- American Petroleum Institute, 2000. Chapter 14 Natural Gas Fuel Measurement, Section 3 Concentric Square Edged Orifice Meters, Part 2 Specification and Installation Requirement, 4-9
- A. D. Aczel, 1995. *Statistics Concepts and Applications*. New York: Richard D. Irwin Inc.
- M. F. M. Costa, 1996. Surface inspection by an optical triangulation method., *In Proceeding of SPIE - Optical Engineering*, vol. 35, no. 9, pp. 2743–2747, September 1996.
- M. F. M. Costa, 2001. Noninvasive microtomographic inspection of rough surfaces by active triangulation. *In Proceeding of SPIE - Laser Metrology Precision Measurement Industry*. September 2001, vol. 4420, pp. 174–184.
- A.Criminisi, I.Reid and A.Zisserman, 2000. *Single View Metrology*, *International Journal of Computer vision*, 40(2), 123-148.
- F.Pernkopf and P.O'Leary, 2003. Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces, *In Proceeding of NDT&E International Conference 2003*, Vol.36, 609–617.
- N.Nunak and T.Suesut, 2007. Measuring geometric mean diameter of fruit and vegetable using computer vision, *In Proceeding of PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE-2007*. Thailand.
- Daniel F. Garcia, Fellow, IEEE, Manuel Garcia, Faustino Obeso, and Valentin Fernandez, 2002. Flatness Measurement System Based on a NonLinear Optical Triangulation Technique. *In Proceeding of IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. April 2002, Vol.51, No.2, 188-195
- D. F. Garcia, M. Garcia, F. Obeso, and V. Fernandez, 2002. Flatness measurement system based on a nonlinear optical triangulation technique, *In Proceeding of IEEE Transaction on Instrument and Measurement*, vol. 51, no. 2, pp. 188–195, Apr. 2002.

N. Katafuchi, M. Sano, S. Ohara, and M. Okudaira, 2000. A method for inspecting industrial parts surfaces based on an optics model. *In Proceeding Machine Vision and Application*, vol. 12, no. 4, pp. 170–176, Dec. 2000.

Shiping Zhu, Member, IEEE, Jiancheng Fang, Rui Zhou, Jianhui Zhao, and Wenbo Yu, 2008. A New Noncontact Flatness Measuring System of Large 2-D Flat Workpiece. *In Proceeding of IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. December 12, 2008, Vol.57, 2891-2903.

Yayli, M.O., Kandemir, S.Y. and Toklu, Y.C., 2015. Assessment of Lunar Material. *In Proceeding of Recent Advances in Space Technologies, IEEE International Conference*. 7-9, Jun. 2015.



**มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**  
**ว.ศ. 2486-2558**

ฝ่ายบริการการศึกษา สำนักทะเบียนและประมวลผล

อาคาร: ฟ้าครุฑ ชั้น 7 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Tel. Fax 0 2118 0145 ต่อ 8214, 8215 E-mail : [annualconference@ku.ac.th](mailto:annualconference@ku.ac.th)

<http://www.annualconference.ku.ac.th>

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล           ภทิล อัครกูรวิชญ  
 วัน เดือน ปีเกิด       8 พฤศจิกายน 2522  
 ที่อยู่                     99/138 หมู่ 4 หมู่บ้านคาสาวิลล์ (ราชพฤกษ์-แจ้งวัฒนะ) ตำบลคลอง  
                                   ข่อย อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี 11120

### ประวัติการศึกษา

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคชัชนาท ในปี  
 การศึกษา 2537 - 2540

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล  
 วิทยาเขตนนทบุรี ในปีการศึกษา 2541 - 2543

ระดับปริญญาตรี (อสบ.) หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการวัดและควบคุม  
 คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปี  
 การศึกษา 2544 - 2546

### ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2543 - 2547       ตำแหน่งช่างเทคนิค บริษัทเอเอ็มดีประเทศไทยจำกัด

พ.ศ. 2547 - ปัจจุบัน   ตำแหน่งวิศวกรระบบการวัดและมาตรวัด บริษัทเซฟรอนประเทศไทย  
                                   สำรวจและผลิตจำกัด