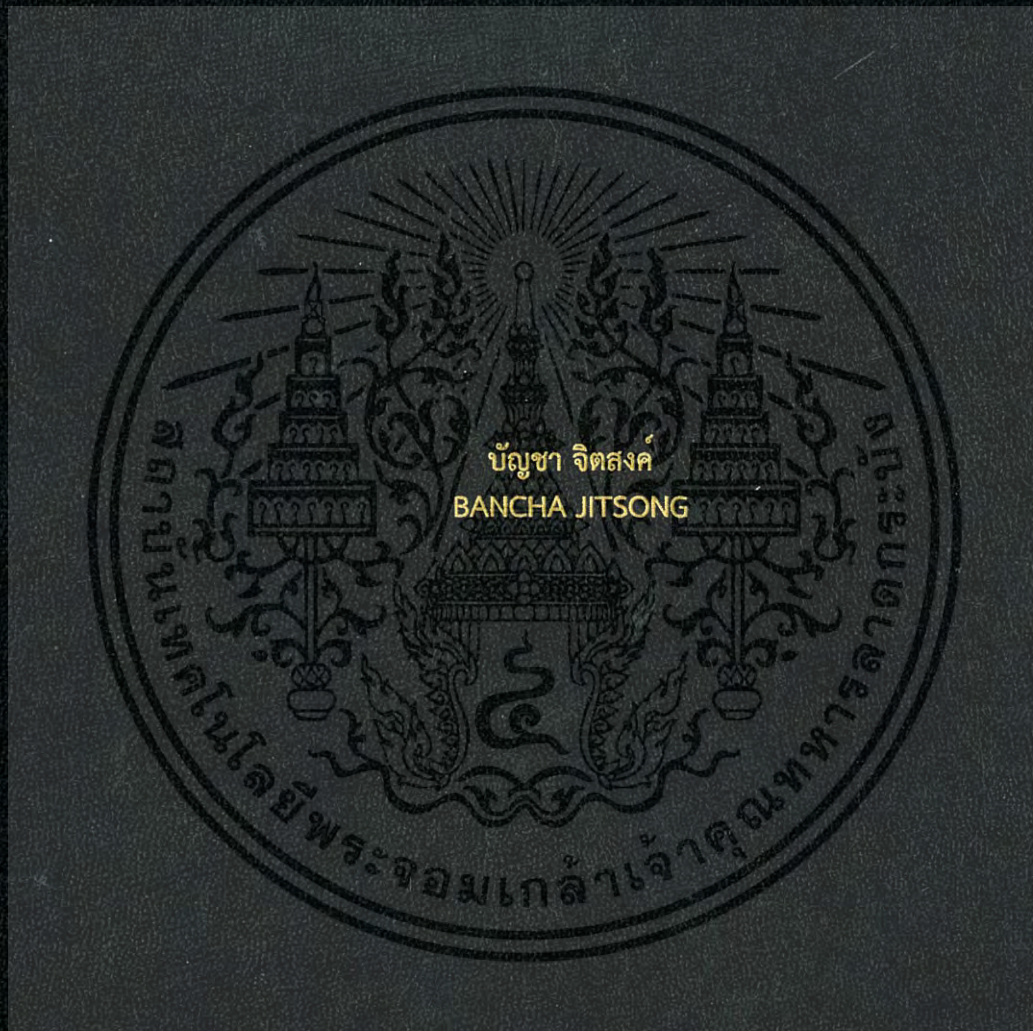


ระบบวิทัศน์จักรกลสำหรับตรวจสอบกาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

MACHINE VISION SYSTEM FOR INSPECTION OF GLUE ROUTE QUALITY IN  
HARD DISK DRIVE TOP COVER ASSEMBLY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2559  
KMITL-2016-EN-M-060-090

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบวิทัศน์จักรกลสำหรับตรวจสอบกาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

MACHINE VISION SYSTEM FOR INSPECTION OF GLUE ROUTE QUALITY IN  
HARD DISK DRIVE TOP COVER ASSEMBLY



T144098

บัญชา จิตสงค์  
BANCHA JITSONG

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 144098  
วันเดือนปี 25 มี.ค. 2559

b. 00267039  
f. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MACHINE VISION SYSTEM FOR INSPECTION OF GLUE ROUTE QUALITY IN  
HARD DISK DRIVE TOP COVER ASSEMBLY



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ KMUTL-2016-EN-M-060-090 นี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบวิทัศน์จักรกลสำหรับตรวจสอบกาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์  
Thesis Title Machine Vision System for Inspection of Glue Route Quality in Hard Disk Drive Top Cover Assembly  
นักศึกษา นายบัญชา จิตสงค์  
รหัสประจำตัว 55611721  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ทวิพล ชื้อสัตย์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-060-090

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.วิริยะ	กองรัตน์	
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุพรรณพร	
ดร.ยุทธพงศ์	ทัพผดุง	
รศ.ดร.สุพรรณ	กุลพานิชย์	
รศ.ดร.ทวิพล	ชื้อสัตย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 15.00-17.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ค้นคว้า วิจัย และเผยแพร่ประโยชน์ด้านวิชาการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้นฉบับเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระบบวิทัศน์จักรกลสำหรับตรวจสอบกาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์  
ไดรฟ์

นักศึกษา

นายบัญชา จิตสงค์

รหัสประจำตัว

55611721

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมการวัดคุม

พ.ศ.

2559

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอระบบวิทัศน์แบบอัตโนมัติสำหรับการตรวจสอบคุณภาพเส้นทางเดินของกาวในฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้เทคนิคจากลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง ระบบวิทัศน์นี้ ใช้กล้องเพื่อตรวจสอบและจับ ลักษณะเฉพาะของ การประกอบฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในส่วนกาว โดยสามารถเห็นลำแสงเลเซอร์ ที่ตั้งฉากกับชิ้นงานบนโต๊ะลำเลียง จากภาพของลำแสงเลเซอร์สีแดงที่ได้ผ่านตัวกรองแสงความยาวคลื่นย่านแคบที่ 650 นาโนเมตรเพื่อ ขจัดแสงตัดความยาวคลื่นที่ไม่พึงประสงค์จากสภาพแวดล้อมในการประมวลผลของภาพที่สอดคล้องกัน และจากนั้นก็สกัดเส้นทางเดินของกาว เพื่อตรวจสอบแบบ สามมิติ โดยละเอียด ลักษณะเฉพาะที่ใช้นี้เป็นลำแสงเลเซอร์ แสดงถึงพื้นที่ต่างๆ ที่พร้อมประกอบฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แสดงการเปลี่ยนแปลง แบบสามมิติจากภาพต้นแบบที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งภาพต้นแบบสามมิติจะถูกนำมาใช้เพื่อระบุเส้นทางที่มี ข้อบกพร่องของทางเดินกาวและ นำมาตรวจสอบคุณภาพในการผลิต โดยระบบยังมีประสิทธิภาพ สามารถบรรลุ ในการบูรณาการสำหรับกระบวนการทางอุตสาหกรรมได้เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Machine Vision System for Inspection of Glue Route Quality in Hard Disk Drive Top Cover Assembly
Student	Mr. Bancha Jitsong
Student ID.	55611721
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Taweepol Suesut

### ABSTRACT

This thesis presents the automated vision based system for inspecting glue route quality in hard disk drive top cover assembly using laser light sectioning is proposed. The machine vision camera captures a number of features of hard disk drive top cover assembly perpendicular to a conveyor table as seen by a laser strip light. The narrow bands pass filter of a wavelength of 650 nm for eliminating the light in order to cut off the unwanted wavelength from the environment. In the image processing unit, the image is aligned and then the glue route is extracted. The features used here are the laser strip profile at various locations along the hard disk drive top cover assembly formulating the 3D transformation from predefined template images. 3D templates are used to identify the defective route in the test image. This system is efficient and can achieve to integration in industrial processes as well as integration in industrial processes.

# 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 .....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ .....	3
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.2 การเก็บข้อมูลสามมิติ .....	6
2.3 รูปแบบการสแกนวัตถุ .....	20
2.4 วิธีการหาจุดศูนย์กลาง .....	24
2.5 อัลกอริทึมเส้นตรง Bresenham .....	26
2.6 ตัวกรองเสาวิซกี-โกลีย์ .....	28
2.7 โฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม .....	31
บทที่ 3 การออกแบบระบบตรวจวัดชิ้นงานโดยใช้แสงเลเซอร์ .....	42
3.1 หลักการตรวจวัดคุณภาพของกาวที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ .....	42
3.2 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจสอบคุณภาพกาว.....	44
3.3 ขั้นตอนการประมวลผลและการทำงานของระบบตรวจสอบคุณภาพกาว.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	52
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	52
4.2 การทดสอบตรวจวัดคุณภาพทากาว .....	54
4.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	61
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	61
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ .....	61
เอกสารอ้างอิง .....	62
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	64
ประวัติผู้เขียน .....	74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	แสดงผลการทดลองตรวจสอบชิ้นงานที่มีลักษณะเส้นกาวหนา (ภาพแบบ 2 มิติ) ..... 56
4.2	แสดงผลการทดลองตรวจสอบชิ้นงานที่มีลักษณะเส้นกาวหนา (ภาพแบบ 3 มิติ) ..... 56
4.3	แสดงผลการทดลองตรวจสอบชิ้นงานที่มีลักษณะเส้นกาวขาด (ภาพแบบ 2 มิติ) ..... 57
4.4	แสดงผลการทดลองตรวจสอบชิ้นงานที่มีลักษณะเส้นกาวขาด (ภาพแบบ 3 มิติ) ..... 57
4.5	แสดงผลการทดลองการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุในการทดสอบ 5 มุม ..... 58
4.6	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากผลการทดลองตรวจสอบคุณภาพของวัตถุ ..... 59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงระบบการฉีดยาและชุดการตรวจสอบ .....	4
2.2 แสดงต้นแบบเครื่องตรวจสอบคุณภาพรอยกาบบนฝาปิดฮาร์ดิสก์ .....	5
2.3 แสดงต้นแบบเครื่อง 3D Laser Scanner .....	5
2.4 หลักการวัดระยะทางโดยใช้คลื่นแสง .....	7
2.5 ความต่างของมุมเฟสที่สะท้อนกลับมาเมื่อกระทบวัตถุ .....	7
2.6 การวัดระยะทางโดยหลักการของรูปสามเหลี่ยม .....	8
2.7 หลักการของระบบสเตอริโอวิชั่น .....	9
2.8 การวัดระยะทางในระบบสเตอริโอวิชั่น .....	9
2.9 ภาพถ่ายสเตอริโอที่ได้จากกล้องซ้ายและกล้องขวา .....	11
2.10 ภาพความแตกต่างของกล้องทั้งสองเมื่อนำมารวมกัน .....	11
2.11 ตัวอย่างการคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องทั้งสองตัวกับวัตถุ .....	12
2.12 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบจุด .....	14
2.13 การวิเคราะห์ระยะทางของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ .....	14
2.14 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบเส้น .....	16
2.15 ฉากรหัสบาร์โค้ด .....	16
2.16 เทคนิคการฉายแสงผ่านรหัสบาร์โค้ด .....	17
2.17 ภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากบาร์โค้ด .....	17
2.18 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสบาร์โค้ด .....	18
2.19 ฉากรหัสเกรย์ .....	19
2.20 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสเกรย์ .....	20
2.21 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนวัตถุ .....	21
2.22 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ .....	22
2.23 การสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนวัตถุ .....	22
2.24 การเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านเส้นแสงและภาพที่ได้ในเฟรมต่างๆเมื่อมีวัตถุตัดผ่าน .....	23
2.25 ตัวอย่างการนำภาพตัดขวางแต่ละส่วนมารวมเพื่อสร้างภาพตัดขวาง 3 มิติ .....	23
2.26 เมทริกซ์ขนาด 4x5 .....	25
2.27 แสดงการสร้างเส้นตรงบนจอภาพ .....	26
2.28 อัลกอริทึมในการวาดเส้นตรงของ Bresenham .....	27
2.29 แสดงผลการทดสอบการใช้ตัวกรอง .....	30
2.30 ความสัมพันธ์และการโปรเจกชันของจุดที่อยู่บนระนาบนั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขใดๆในเอกสารนี้	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขใดๆในเอกสารนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.31 ตัวอย่างลักษณะของการแปลงในเชิงการโปรเจกชันแบบต่างๆ .....	32
2.32 การบิดเบือนของระนาบซึ่งเป็นผลของการแปลงแบบ Affine .....	35
2.33 คุณสมบัติและลักษณะของการแปลงภาพแบบต่างๆ .....	36
3.1 แนวคิดที่นำมาใช้ในการตรวจวัดวัตถุ .....	42
3.2 แสดงระบบแสงเลเซอร์ตัดขวางที่ตกกระทบกับพื้นผิวของวัตถุตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ .....	44
3.3 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจคุณภาพของกาว .....	45
3.4 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดแบบเส้นที่ใช้ในงานวิจัย .....	45
3.5 กล้อง Gocator รุ่น 2350A-3R-01 .....	46
3.6 เลนส์และตัวกรองคลื่นแสงย่านความถี่สีแดง .....	46
3.7 แสดงทุกย่านความถี่ของคลื่นแสง .....	47
3.8 อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ .....	47
3.9 แสดงโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในการประมวลผลภาพ .....	48
3.10 ขั้นตอนการประมวลผลของระบบตรวจสอบคุณภาพกาวบนฝาครอบฮาร์ดิสก์ไดรฟ์ .....	49
3.11 ตารางหมากรุขขนาด 10x10mm. ที่ใช้ในการสอบเทียบวัตถุบนมุมกล้องจริง .....	50
3.12 แสดง COG Calculation บนโปรแกรม LabVIEW .....	51
4.1 กล้อง Gocator รุ่น 2350A-3R-01 .....	52
4.2 ระบบตรวจสอบคุณภาพของกาวบนฝาครอบฮาร์ดิสก์ไดรฟ์ .....	53
4.3 วัตถุตัวอย่างในการทดลอง .....	53
4.4 แสดงการสอบเทียบกล้องก่อนตรวจสอบชิ้นงาน .....	54
4.5 แสดงเครื่องมือในการจำลองแบบทดลอง .....	54
4.6 การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานกรณีเส้นกาวหนา .....	55
4.7 แสดงคุณภาพชิ้นงานจุดที่มีเส้นกาวหนา .....	55
4.8 การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานกรณีเส้นกาวขาด .....	56
4.9 แสดงคุณภาพชิ้นงานจุดที่มีเส้นกาวขาด .....	57
4.10 การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานโดยวางวัตถุในมุมและองศาต่างกัน .....	58
4.11 แสดงผลการประมวลผลภาพฝาครอบฮาร์ดิสก์ไดรฟ์แบบ 3 มิติ .....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีพล ชื้อสัตย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ในการศึกษา เจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม และเจ้าหน้าที่บัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้อง รวมทั้งเพื่อน พี่ น้อง ที่น่ารักทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนช่วยเหลือในทุกด้านทั้งเรื่องการเรียนรู้ และเรื่องส่วนตัวจนทำให้ผู้เขียนผ่านทุกอย่างจนมาถึงทุกวันนี้ได้

สุดท้ายสำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า และขอให้ทุกท่านจงมีแต่ความสุขตลอดไป

บัญชา จิตสงค์

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำหน้าที่เป็นหน่วยความจำหลักในการจัดเก็บข้อมูลต่างๆ อย่างถาวรไว้ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่เป็นองค์ประกอบจำเป็นอย่างมากของเครื่องคอมพิวเตอร์ไม่ว่าจะเป็นคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ หรือคอมพิวเตอร์พกพา ฯลฯ และเนื่องจากอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงต้องมีการพัฒนาควบคู่ไปด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ในปัจจุบัน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นับเป็นผลิตภัณฑ์ ชิ้นส่วนอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญต่อภาคการส่งออกของไทยและประเทศไทยยังจัดได้ว่าเป็นฐานการผลิต ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่สำคัญของโลก มีมูลค่าการส่งออกสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2548 ประเทศไทยได้ก้าวขึ้นมาเป็นผู้ส่งออก ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ อันดับหนึ่งของโลก

ในการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น เป้าหมายหลักของการพัฒนา คือการลดความผิดพลาดในการอ่านหรือบันทึกข้อมูลและอายุการใช้งานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งของความผิดพลาดหรือกรณีอายุการใช้งานลดลงนั้น คือ ความผิดปกติของกระบวนการฉีดกาวลงบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ อย่างไรก็ตามนอกจากปัญหาเรื่องคุณภาพที่เกิดขึ้นนั้น จะส่งผลถึงอายุการใช้งานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แล้วยังส่งผลเรื่องความสวยงามอีกด้วย ดังนั้น เพื่อให้สามารถควบคุมคุณภาพการผลิต ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า จึงเลือก เทคโนโลยีด้านระบบอัตโนมัติและระบบการประมวลผลภาพเพื่อพัฒนาและใช้ในการตรวจสอบ (Visual Inspection System) นับเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสม และเป็นอีกแนวทางที่จะมาช่วยเพิ่มผลผลิตและควบคุมคุณภาพการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ส่งมอบให้ลูกค้าได้คุณภาพตามที่ลูกค้าต้องการ

สามารถที่จะลดต้นทุนที่เกิดจากความสูญเสียในด้านการผลิต และสร้างผลผลิตที่ดีขึ้นกว่าเดิม โดยการประยุกต์ใช้ระบบอัตโนมัติในทางอุตสาหกรรมยังได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวม และเป็นการลดต้นทุนทางด้านแรงงานและลดข้อบกพร่องของการตรวจสอบคุณภาพกาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เมื่อทำการคัดเลือกโดยคน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอระบบที่มีความสามารถตรวจสอบหรือวัดคุณภาพกาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และคัดแยกของเสีย ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกในการใช้งานและติดตั้งได้ง่าย รวมทั้งมีความเร็วในการประมวลผลและบอกได้ถึงคุณภาพกาวของวัตถุตัวอย่าง และชนิดต่างๆ ก่อให้เกิดประโยชน์ในการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้เกิดข้อผิดพลาดน้อยที่สุดและเกิดประโยชน์สูงสุดในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้มากยิ่งขึ้น จึงเป็นกลยุทธ์อย่างหนึ่งที่สร้างความได้เปรียบในการแข่งขันกับองค์กรอื่นๆ เอกสารรวมทั้งยังสร้างกำไรอันสูงสุดแก่องค์กรอีกด้วย การศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการค้นคว้าและพัฒนาวิธีการตรวจวัดคุณภาพของการฉีดยาลงบนฝาคีโรบฮาร์ตีสก์ไดร์ฟ ของวัตถุตัวอย่าง ด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น ซึ่งนำภาพที่ได้จากกล้องแสดงแบบ 3 มิติ และทำการตรวจสอบคุณภาพของกาว ของวัตถุตัวอย่าง ด้วยระบบประมวลผลภาพแบบต่อเนื่อง (Real-time) โดยเป็นการนำเสนอการใช้เทคนิควิธีการวัดขนาดด้วยภาพ (Metric Vision) บนระนาบภาพ 2 มิติมาประยุกต์ร่วมกับเทคนิคที่ใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ (Laser Light Sectioning) ร่วมกับเทคนิคการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล โดยใช้ตัวกรองแบบซาวิตซกี-โกเลย์ (Savitzky-Golay Filter) โดยอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลของภาพให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) ในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านไปบนสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่องและทำการตรวจสอบข้อผิดพลาดของคุณภาพกาวบนฝาคีโรบฮาร์ตีสก์ไดร์ฟ ในกรณี ภาพ 2 มิติไม่สามารถตรวจจับได้จึงจำเป็นต้องใช้ ภาพ 3 มิติเข้ามาช่วยตรวจสอบ โดยการออกแบบยังคงคำนึงถึงความง่ายในการออกแบบติดตั้ง รวมทั้งให้ความเร็วในการทำงาน และผลของความถูกต้องแม่นยำ ที่มีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

## 1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากการศึกษาถึงปัญหาในการตรวจสอบคุณภาพรอยกาวจึงมีแนวความคิดในการออกแบบระบบตรวจวัดคุณภาพของการฉีดยาลงบนฝาคีโรบฮาร์ตีสก์ไดร์ฟ ในลักษณะการสแกนบนสายพานลำเลียงซึ่งอยู่ในกระบวนการผลิตทั่วไป และนำเสนอเทคนิคการใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ (Laser Light Sectioning) ที่เป็นเทคนิคการประมวลผลของภาพแบบตัดขวางที่นิยมใช้ เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายในการออกแบบ โดยวิธีนี้เป็นการฉายแหล่งกำเนิดแสงลงบนพื้นผิววัตถุ เพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงตกกระทบ และแสงที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพแล้วนำไปประมวลผลโดยใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล โดยใช้ตัวกรองแบบซาวิตซกี-โกเลย์ (Savitzky-Golay Filter) เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก แล้วใช้ไฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์มเพื่อทำการแปลงพิกัดที่อยู่บนภาพให้เป็นพิกัดจริง และทำการตรวจสอบคุณภาพของการฉีดยาลงบนฝาคีโรบฮาร์ตีสก์ไดร์ฟ โดยอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลของภาพให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) ในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านไปบนสายพานลำเลียง โดยกระบวนการประมวลผลทั้งหมดจะพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม LabVIEW ของ National Instrument เพื่อใช้ตรวจจับข้อผิดพลาด

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการตรวจสอบกระบวนการฉีดยาลงบนฝาคีโรบฮาร์ตีสก์ไดร์ฟและพัฒนาาระบบอัตโนมัติสำหรับตรวจสอบคุณภาพกาวด้วยการประมวลผลด้วยภาพต้นแบบ โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะตรวจสอบและวิเคราะห์คุณภาพรอยกาวที่ฉีดเสร็จแล้ว ซึ่งสามารถตรวจสอบรอยกาวได้ที่ความผิดพลาด +/- 0.1 มม. และสามารถตัดแยกงานตั้งงานเสียได้ โดยทำการพัฒนาและออกแบบโปรแกรมบน LabVIEW ของ National Instrument ให้สามารถวัดปริมาตรของวัตถุตัวอย่างชนิดต่างๆ ในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากล โดยให้ความถูกต้องแม่นยำและมีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

## 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 5 บทด้วยกัน โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง, งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง, การเก็บข้อมูลสามมิติ, รูปแบบการสแกนวัตถุ, วิธีการหาจุดศูนย์กลาง, อังกลริทึมเส้นตรง, ทฤษฎีตัวกรองแบบสวาทซกี-โกเลย์

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบระบบตรวจสอบคุณภาพกาวบนฝาคาร์บอนไฟเบอร์ โดยใช้แสงเลเซอร์, หลักการตรวจสอบคุณภาพของกาว, การติดตั้งระบบและขั้นตอนการออกแบบโปรแกรม

บทที่ 4 เป็นขั้นตอนของการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของระบบ โดยใช้วัตถุตัวอย่างคือฝาคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบ รวมถึงการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะและแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งาน

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

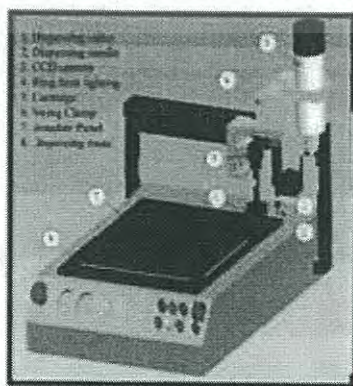
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพื่อนำมาเป็นแนวคิดในการออกแบบการวิจัย ทั้งการปรับปรุงกระบวนการโดยรวม เทคนิคต่างๆ ที่จะใช้ประกอบการดำเนินการวิจัยต่อไป

ส่วนใหญ่แล้ว การใช้เครื่องจักรในการตรวจสอบหาข้อบกพร่องของชิ้นงานนั้น สามารถที่จะช่วยในการลดต้นทุนในการผลิต รวมไปถึงการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการในสายการผลิตนี้ ยังสามารถเพิ่มคุณภาพของผลผลิตโดยรวมได้ แต่ในทางกลับกัน ก็ยังเป็นการเพิ่มการลงทุน และเป็นการเพิ่มความสลับซับซ้อนของกระบวนการผลิต เมื่อกระบวนการตัดแยกนี้ มีความเกี่ยวข้องกับวัตถุดิบหลักซึ่งก็คือต้นทุนของแรงงานของมนุษย์

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบอัตโนมัตินั้นมีประโยชน์ต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมทั้งด้านการเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการผลิต ซึ่งได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องรวมทั้งการนำระบบการประมวลผลภาพเข้ามาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพเพื่อหาข้อบกพร่องของชิ้นงาน (Defect) แทนการทำงานของพนักงาน เพื่อให้กระบวนการตรวจสอบมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงได้มีการพัฒนากันอย่างแพร่หลาย ดังเช่นงานวิจัยต่อไปนี้

งานวิจัยของ Yung Ting et al. [1] ได้มีการออกแบบระบบการตรวจสอบรอยกาวด้วยการประมวลผลภาพโดยที่กล้องเคลื่อนที่ไปพร้อมกับหัวฉีดดังรูปที่ 2.1 เพื่อใช้หาข้อบกพร่องของเส้นกาว เช่น เส้นกาวเสียรูป (Deformation) ผิดตำแหน่ง (Offset) มีเศษกาวติดกับเส้นกาว (Protrusion) และเส้นกาวขาด (Broken) โดยใช้เทคนิค Back-Propagation Neural (BPN) Network ทำการตรวจสอบหาจำนวนพิกเซล (Pixel) ของเส้นกาวได้แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานต้นแบบโดยต้องนำข้อมูลของเส้นกาวเข้ามาให้ระบบได้เรียนรู้ก่อน ซึ่งสามารถทำงานได้ประสิทธิภาพที่ 96.45%



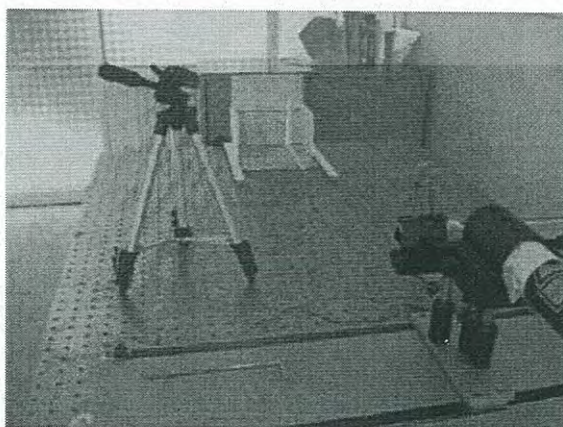
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.1 แสดงระบบการฉีดกาวและชุดการตรวจสอบ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยของ วิรัตน์ ราชวงษ์ [2] ได้พัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับการฉีดยาและตรวจสอบคุณภาพรอยกวาดในฝาปิดฮาร์ดดิสก์ แบ่งเป็นสองส่วน ดังรูปที่ 2.2 คือ ส่วนที่หนึ่งการป้อนฝาปิดฮาร์ดดิสก์ให้กับเครื่องฉีดยาได้นาระบบนิวแมติก (Pneumatics) มาใช้และส่วนที่สองการตรวจสอบคุณภาพรอยกวาดเพื่อใช้งานแทนพนักงานได้นำเอาเทคโนโลยีการประมวลผลภาพมาใช้ในการตรวจจับขอบร่องของเส้นกวาด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบใช้วิธีการ (Thresholding) และ (Segmentation) เปรียบเทียบข้อมูลกันระหว่างภาพที่นำมาตรวจสอบกับภาพต้นแบบที่สร้างขึ้น



รูปที่ 2.2 แสดงต้นแบบเครื่องตรวจสอบคุณภาพรอยกวาดบนฝาปิดฮาร์ดดิสก์

งานวิจัยของ พิมพ์ภัส ธนสุทธิยาภรณ์ [3] ได้ศึกษาระบบการสร้างรูปสามมิติจากเครื่องสแกนที่ราคาไม่แพงคำนวณข้อมูลสามมิติอาศัยข้อมูลจากรูปภาพที่ถ่ายมาเท่านั้นโดยสามารถหาได้ด้วยการซ่อมแซมเนื้อหาในกรอบสี่เหลี่ยมที่เกิดการบิดเบือนแบบเชิงเส้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาแนวทางการแก้ปัญหาการสแกนพื้นผิวที่มีความมันวาวโดยอาศัยความรู้เรื่องโพลาไรเซชันของแสงและการประมวลผลภาพ โดยใช้เทคนิค สามมิติ เลเซอร์สแกน ผ่านโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 2.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.3 แสดงต้นแบบเครื่อง 3D Laser Scanner ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การเก็บข้อมูลสามมิติ (3D Range Acquisition)

ในการเก็บข้อมูลสามมิติจะใช้ตัวตรวจจับชนิดต่างๆซึ่งของข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจจับยังไม่ใช้เป็นระยะทางจริง จะต้องนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการคำนวณใหม่เสียก่อน ซึ่งเรียกข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจจับนี้ว่าข้อมูลระยะทาง (Range data) โดยที่ข้อมูลระยะทางที่ได้จะมีประโยชน์มากในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น การมองเห็นของหุ่นยนต์ การวินิจฉัยโรคในด้านการแพทย์ กระบวนการผลิตในงานด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเก็บข้อมูลสามมิติแบบต่างๆ รวมทั้งการสแกนวัตถุที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

การเก็บข้อมูลสามมิติเป็นการตรวจจับหรือตรวจวัดข้อมูลของวัตถุที่ต้องการ ในลักษณะทั้งความกว้าง ความยาว รวมทั้งความสูงหรือความหนาของวัตถุ การเก็บข้อมูลสามมิติมีหลักการและวิธีการอยู่หลายอย่าง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเก็บข้อมูลสามมิติแบบต่างๆที่น่าสนใจ

### 2.1.1 หลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไป (Time of flight)

การวัดระยะทางวิธีนี้จะใช้การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปยังวัตถุที่ต้องการเมื่อสัญญาณนี้กระทบกับวัตถุมันก็จะสะท้อนกลับมาที่ตัวรับ ซึ่งรูปแบบของสัญญาณมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน และระยะทางหาได้จากผลคูณระหว่างความเร็วกับเวลา โดยสมการที่จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $d$  คือ ระยะทางจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปยังวัตถุ (เมตร)  
 $v$  คือ ความเร็วขึ้นอยู่กับชนิดของสัญญาณที่ใช้ (เมตร/วินาที)  
 $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปและสะท้อนกลับมา (วินาที)

โดยคุณสมบัติของสัญญาณโดยทั่วไปที่ต้องคำนึงถึงที่นำมาใช้ในหลักการของเวลาที่สูญเสียไปนี้แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ มุมเบี่ยงเบนของสัญญาณ และความเร็วของสัญญาณซึ่งมุมเบี่ยงเบนของสัญญาณที่ส่งออกไปมีมุมกว้างแต่วัตถุมีขนาดเล็ก จะทำให้ระยะทางที่คำนวณได้มีความแม่นยำลดลง เพราะสัญญาณจะครอบคลุมบริเวณได้กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่มีมุมแคบกว่า ซึ่งทำให้มีความแม่นยำมากกว่า

ซึ่งทั่วไปแล้วมีสัญญาณอยู่ 3 ชนิดที่นำมาใช้ในหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปซึ่งได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแสง และคลื่นเสียง ซึ่งวิธีในการคำนวณหาระยะทางจะมีลักษณะเหมือนกัน อย่างไรก็ตามสัญญาณแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวของมัน และจะมีผลต่อความแม่นยำของระยะทางที่คำนวณได้ ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะสัญญาณที่เป็นคลื่นแสงเท่านั้น โดยการใช้คลื่นแสงมาใช้ในหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปวิธีนี้ถูกเรียกว่า LIDAR (Light Detection and Ranging) ซึ่งจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็น เเบ้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำเนิดคลื่นแสงสั้นๆออกไปและรอคลื่นสะท้อนกลับมานำเวลาที่สูญเสียไปมาคำนวณหาระยะทาง ในวิธีนี้จะนิยมใช้แสงเลเซอร์ (Laser) เพราะว่ามีมุมเบี่ยงเบนของคลื่นจะแคบมากเป็นผลให้ระยะทางที่คำนวณได้มีความถูกต้องสูงซึ่งจะดีกว่าคลื่นแสงทั่วไป นอกเหนือจากเวลาที่นำไปใช้คำนวณแล้วความเข้มแสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับมาสามารถนำมาเปลี่ยนเป็นความเข้มในระดับเกรย์ได้อีกด้วย ความเข้มแสงที่สะท้อนกลับมาจะเปลี่ยนไปตามสัดส่วนกับจำนวนแสงที่ถูกดูดซึมด้วยวัตถุที่แตกต่างกัน ดังนั้นนอกจากจะรู้ระยะทางแล้ว ความเข้มแสงที่ได้รับมาในแต่ละจุดสามารถนำมาแสดงรวมกันได้ภาพสามมิติอีกด้วย



รูปที่ 2.5 ความต่างของมุมเฟสที่สะท้อนกลับมาเมื่อกระทบวัตถุ

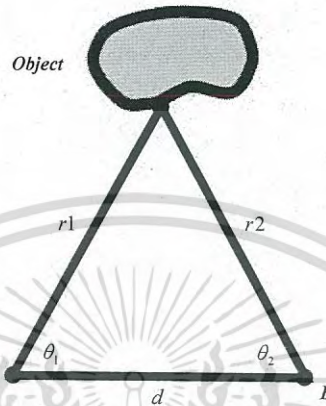
ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวิธีนี้คือถ้านำไปวัดระยะทางที่น้อยกว่าหนึ่งฟุต แสงเลเซอร์จะใช้เวลาการเดินทางและสะท้อนกลับประมาณ 1 นาโนวินาทีที่จะไม่สามารถตรวจวัดได้ทัน วิธีแก้คือเปลี่ยนไปวัดเฟสของคลื่นที่สะท้อนกลับมาแทน โดยใช้แสงเลเซอร์นี้ผสม (Modulate) แบบ AM (Amplitude Modulation) [4] แล้วจึงส่งออกไปเมื่อแสงไปกระทบวัตถุและสะท้อนกลับมาจะมีเฟสต่างกับ คลื่นที่ส่งออกไปปริมาณความต่างเฟสจะเป็นสัดส่วนกับระยะทางของวัตถุ นอกจากนี้ยังสามารถวัดระยะทาง

ที่ 1 เซนติเมตรได้อีกด้วย ดังนั้นวิธีนี้สามารถนำไปวัดระยะทางในระบบการมองเห็นของหุ่นยนต์ได้

ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 หลักการของรูปสามเหลี่ยม (Triangulation)

เราอาจจะคุ้นเคยกับแนวความคิดของการนำหลักการของรูปสามเหลี่ยมมาวัดระยะทางสมมุติว่ามีเครื่องมืออยู่สองตัวซึ่งวางห่างกันเป็นระยะทางที่แน่นอน ( $d$ ) อุปกรณ์ A และ B จะเก็บตำแหน่งบนวัตถุที่ตำแหน่งเดียวกันดังภาพที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การวัดระยะทางโดยหลักการของรูปสามเหลี่ยม

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

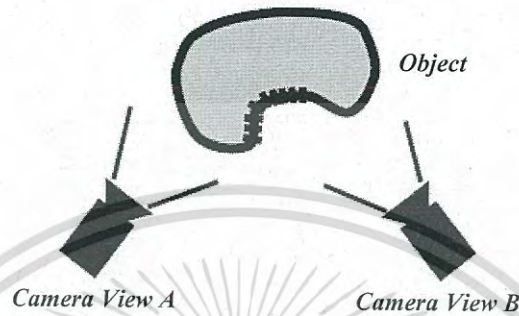
$$r_1 = \frac{d \sin \theta_2}{\sin(180^\circ - (\theta_1 + \theta_2))} \quad (2.2)$$

$$r_2 = \frac{d \sin \theta_1}{\sin(180^\circ - (\theta_1 + \theta_2))} \quad (2.3)$$

ในการวัดระยะทางโดยใช้หลักการรูปสามเหลี่ยมจะเป็นพื้นฐานในการวัดระยะทางแบบต่างๆ ซึ่งหลักการรูปสามเหลี่ยมจะแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ซึ่งวิธีแรกเรียกว่าแบบแอคทีฟ (Active) จะใช้เครื่องมือเก็บภาพ 1 ตัวร่วมกับเครื่องกำเนิดแสงอีก 1 ตัว อีกวิธีเรียกว่าแบบพาสซีฟ (Passive) จะใช้เครื่องมือเก็บภาพ 2 ตัว เช่นกล้องวิดีโอ เป็นต้น

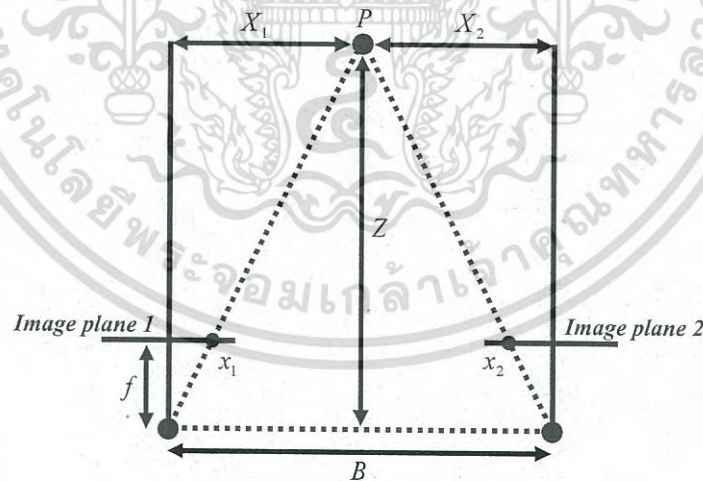
### 2.1.3 หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟ (Passive Triangulation)

วิธีนี้บางครั้งถูกเรียกว่าสเตอริโอวิชัน (Stereo vision) อธิบายได้เหมือนกับการใช้ตาทั้งสองของมนุษย์ในการวัดระยะทาง ในวิธีนี้ใช้กล้องวิดีโอเป็นเครื่องมือที่ใช้เก็บภาพ โดยใช้กล้องวิดีโอทั้งสองตัววางห่างกันในระยะทางที่แน่นอนดังภาพที่ 2.7



รูปที่ 2.7 หลักการของระบบสเตอริโอวิชัน (Stereo vision)

หลักการของสเตอริโอวิชันหรือรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟเป็นการหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ โดยอาศัยความแตกต่าง (Disparity) ของจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพของกล้องทั้งสอง ซึ่งในการคำนวณหาระยะทางโดยวิธีนี้สามารถอธิบายได้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การวัดระยะทางในระบบสเตอริโอวิชัน

จากรูปที่ 2.8 นั้นสามารถนำมาเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกล้องทั้งสองได้โดยกำหนดให้  $P$  เป็นจุดของวัตถุในระบบพิกัดกล้อง โดย  $X_1$  และ  $X_2$  เป็นขนาดของวัตถุเมื่อเปรียบเทียบกับแนวแกน  $Z$  ของระบบพิกัดกล้อง และ  $x_1, x_2$  เป็นขนาดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพตั้งนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องที่ 1

$$\frac{x_1}{f} = \frac{X_1}{Z} \quad (2.4)$$

กล้องที่ 2

$$\frac{x_2}{f} = \frac{X_2}{Z} \quad (2.5)$$

และ

$$X_2 = X_1 + B \quad (2.6)$$

นำสมการที่ 2.6 แทนลงในสมการที่ 2.5 เขียนใหม่ได้เป็น

$$B + X_1 = \frac{Z \cdot x_2}{f} \quad (2.7)$$

นำสมการที่ 2.7 ลบสมการที่ 2.4 ดังนั้นระยะทาง  $Z$  จะหาได้ดังสมการที่ 2.8

$$Z = \frac{B \cdot f}{x_2 - x_1} \quad (2.8)$$

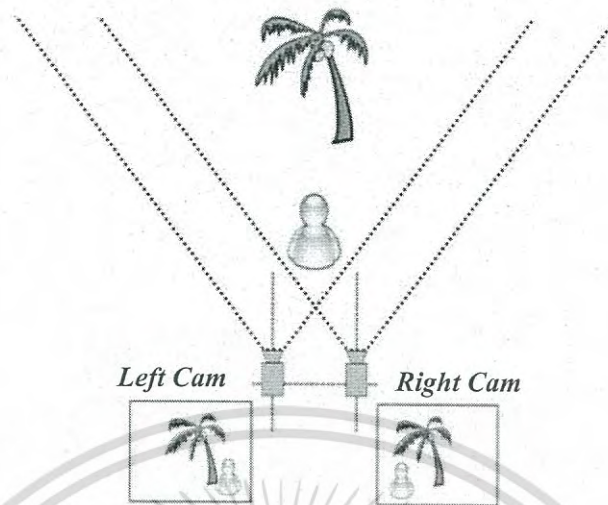
โดยกำหนดให้  $Z$  คือระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ  $P$

$B$  คือระยะทางระหว่างกล้องทั้งสองตัว

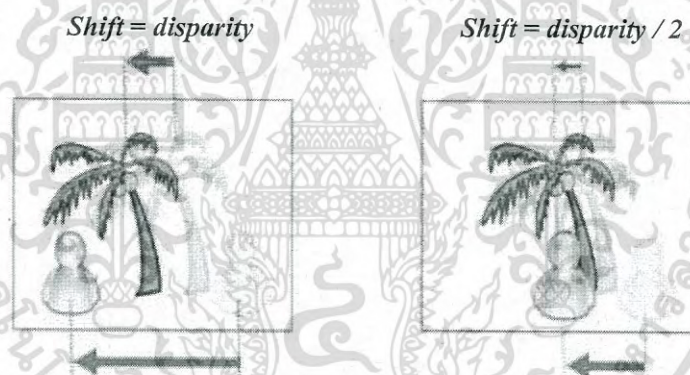
$f$  คือความยาวโฟกัสของกล้องทั้งสองตัว

$x_1, x_2$  คือระยะจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพ

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



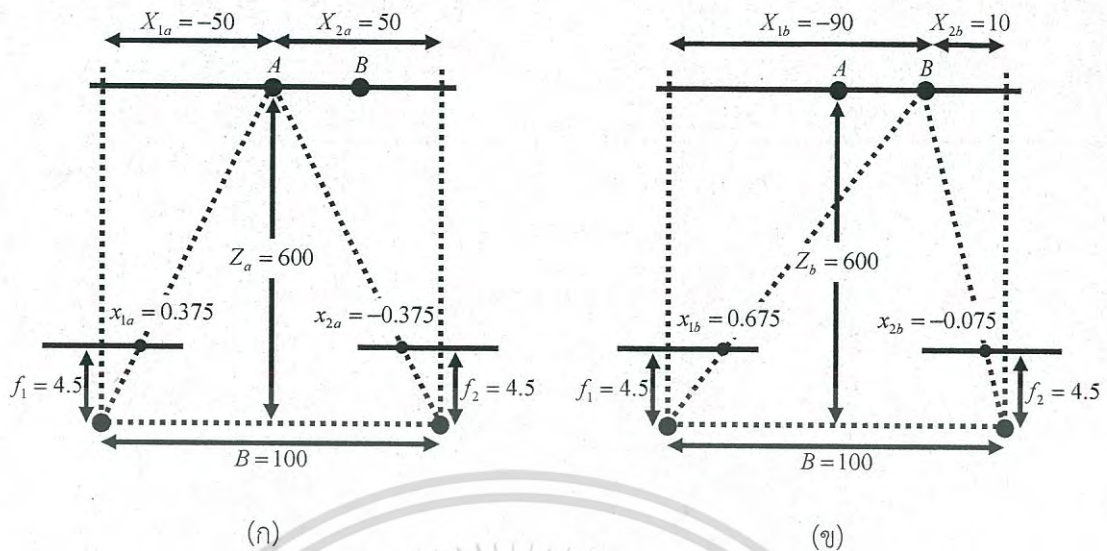
รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายสเตอริโอที่ได้จากกล้องซ้ายและกล้องขวา



รูปที่ 2.10 ภาพความแตกต่างของกล้องทั้งสองเมื่อนำมารวมกัน

รูปที่ 2.9 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากกล้องซ้ายและขวา ถ้าเรานำภาพทั้งสองกล้องมาซ้อนกันดังรูปที่ 2.10 จะเห็นความแตกต่างของวัตถุที่อยู่ในภาพได้ รูปที่ 2.10 อาจจะเรียกได้ว่าเป็นภาพความแตกต่างหรือภาพสเตอริโอ (Stereo image) ซึ่งค่าความแตกต่างของตำแหน่งจุดภาพสามารถนำมาคำนวณหาระยะทางแบบสามมิติที่จะแสดงให้เห็นในตัวอย่างดังต่อไปนี้ การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ กำหนดให้กล้องทั้งสองมีความยาวโฟกัส ( $f$ ) 4.5 มม. มีระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสอง ( $B$ ) 100 มม. CCD มีขนาด  $4.8 \times 3.6$  มม. ขนาดของภาพคือ  $384 \times 244$  พิกเซล (1 พิกเซล = 0.0125 มม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ (ก) ระยะทางที่จุด A (ข) ระยะที่จุด B

การคำนวณหาระยะทางที่จุด A ในภาพที่ 2.11 (ก) กำหนดให้  $x_{1a} = 30$  พิกเซล = 0.375 มม. เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางซ้าย และ  $x_{2a} = 30$  พิกเซล = -0.375 มม. เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางขวาดังนั้น

$$Z_a = \frac{B \cdot f_1}{x_{2a} - x_{1a}} \quad (2.9)$$

$$= \frac{100 \cdot (-45)}{(-0.375 - 0.375)}$$

$$= 600 \text{ มม.}$$

การคำนวณหาระยะทางที่จุด B ในภาพที่ 2.11 (ข) กำหนดให้  $x_{1b} = 54$  พิกเซล = 0.675 มม. เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางซ้าย และ  $x_{2b} = 6$  พิกเซล = -0.075 มม. เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางขวาดังนั้น

$$Z_a = \frac{B \cdot f_1}{x_{2a} - x_{1a}} \quad (2.10)$$

$$= \frac{100 \cdot (-45)}{(-0.375 - 0.375)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อกรณี 600 มม. นั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าในระบบสเตอริโอ นั้นความแม่นยำของการหาระยะทางจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดภาพที่ตรงกันหรือสอดคล้องกันของภาพที่ได้จากระนาบของกล้องทั้งสองตัว และตำแหน่งของสองจุดภาพนี้จะต้องคำนวณให้ถูกต้องด้วย ซึ่งกลายเป็นปัญหาหลักที่เกิดขึ้นเสมอกับวิธีนี้ และปัญหาดังกล่าวนี้ได้ถูกเรียกว่า ปัญหาการหาจุดสอดคล้องกันของกล้องทั้งสองตัว (Correspondence Problem)

ในทางอุดมคติมันเป็นไปได้ในการหาจุดภาพจากกล้องตัวที่หนึ่งซึ่งสอดคล้องกับจุดภาพจากกล้องตัวที่สอง แต่ในความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถรับประกันได้ว่า สองจุดภาพซึ่งมีค่าระดับสีหรือระดับเกรย์ที่เหมือนกันจะเป็นจุดภาพบนวัตถุจุดเดียวกัน ในการหาจุดภาพจุดเดียวกันของภาพ 2 ภาพจากกล้องทั้งสองไม่ยากนัก ถ้าหากภาพวัตถุที่เกิดขึ้นในภาพทั้งสองมีรูปร่างเหมือนกัน อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยสำหรับวิธีนี้ก็คือ ภาพวัตถุที่เกิดขึ้นในภาพทั้งสองมีลักษณะรูปร่างไม่เหมือนกัน ยิ่งไปกว่านั้นวัตถุในภาพแรกอาจจะดูมืดมัวไม่ชัดเจนหรือไม่ปรากฏรูปร่างวัตถุขึ้นในภาพที่สอง ในการแก้ไขเราสามารถลดระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสอง เพื่อช่วยลดปัญหาการหาจุดสอดคล้องกันของกล้องทั้งสองตัว แต่ในการลดระยะห่างนี้จะเป็นผลทำให้ความแม่นยำของระบบลดลงตามไปด้วย

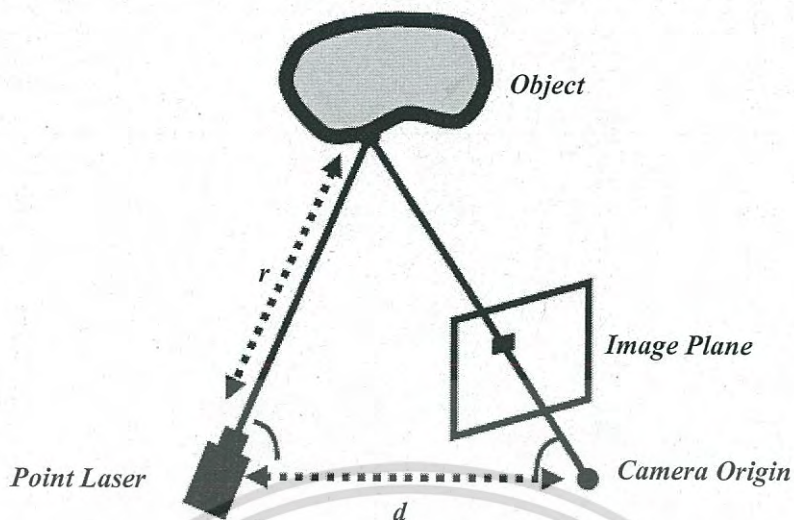
ปัญหาการหาจุดสอดคล้องกันของกล้องทั้งสองตัวที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไข และทำให้ลดลงได้ด้วยการตัดอุปกรณ์เก็บภาพออกไป 1 ตัว ซึ่งมันจะไม่ถูกเรียกว่าวิธีสเตอริโอขึ้นอีกต่อไป อย่างไรก็ตามหลักการของรูปสามเหลี่ยมยังคงนำมาใช้กับวิธีนี้ได้ โดยการแทนกล้องตัวที่ตัดออกไปด้วยเครื่องกำเนิดแสงและเรียกวินิจฉัยว่าหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป

## 2.1.4 หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ (Active Triangulation)

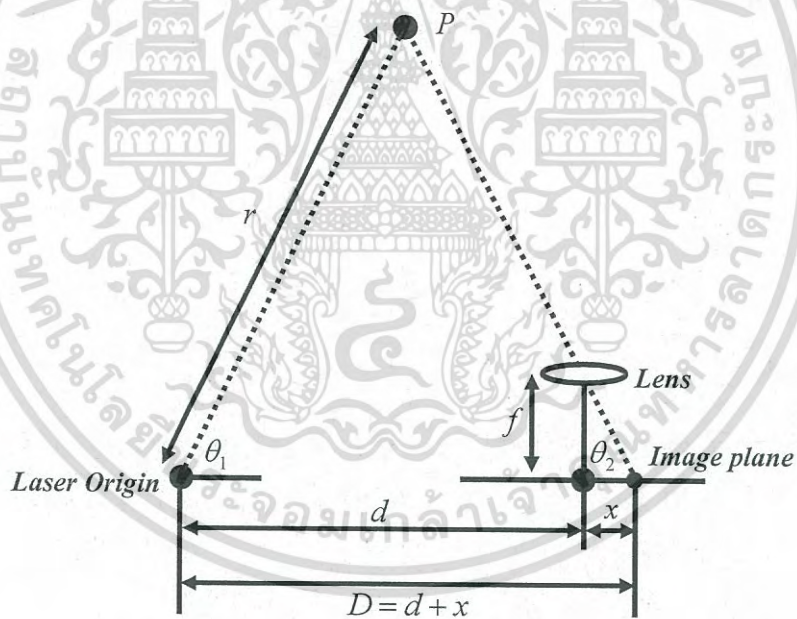
หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟจะแตกต่างกับวิธีแบบพาสซีฟ คือการใช้เครื่องกำเนิดแสงร่วมกับกล้องวิดีโอเพียง 1 ตัว โดยเครื่องกำเนิดแสงจะเป็นแบบจุด แบบสาย ซึ่งภาพที่ได้เราจะนำจุดภาพที่ถูกแสงกระทบหรือถูกฉายมาคำนวณหาระยะทาง

### 2.1.4.1 วิธีฉายแสงแบบจุด (Light Spot Triangulation)

สมมุติว่าเราฉายลำแสงไปบนวัตถุดังรูปที่ 2.12 ลำแสงดังกล่าวจะสร้างจุดแสงบนวัตถุและจะสะท้อนไปยังกล้องวิดีโอ โดยระยะห่างระหว่างกล้องวิดีโอกับเครื่องกำเนิดแสงเป็นระยะ  $d$  จะเห็นว่าเกิดเป็นรูปสามเหลี่ยมขึ้นระหว่างเครื่องกำเนิดแสง วัตถุและกล้องวิดีโอ ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาระยะทาง  $r$  จากกล้องวิดีโอไปยังจุดบนวัตถุได้



รูปที่ 2.12 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบจุด



รูปที่ 2.13 การวิเคราะห์ระยะทางของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ

จุดแสงที่สะท้อนไปยังกล้องวิดีโอจะเกิดเป็นจุดภาพขึ้น จุดภาพนี้พบได้ง่ายซึ่งมันจะเป็นจุดที่มีความสว่างมากที่สุด ในการคำนวณหาระยะทาง  $r$  นั้นสามารถคำนวณหาได้จากมุม  $\theta_1, \theta_2$  และระยะทาง  $d$  ซึ่งมุม  $\theta_2$  คำนวณได้จากความยาวโฟกัสของกล้องวิดีโอ ( $f$ ) ซึ่งมีค่าคงที่ที่กระยะห่างจากศูนย์กลางเลนส์กล้องกับจุดภาพ ( $x$ ) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.13 ดังนั้นมุม  $\theta_2$  สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{f}{x}\right) \quad (2.11)$$

และระยะทางระหว่างเครื่องกำเนิดแสงและจุดภาพนั้นสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$D = d + x \quad (2.12)$$

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

$$\frac{r}{\sin \theta_2} = \frac{D}{\sin(180^\circ - (\theta_1 + \theta_2))} \quad (2.13)$$

$$r = \frac{D \cdot \sin \theta_2}{\sin(180^\circ - (\theta_1 + \theta_2))} \quad (2.14)$$

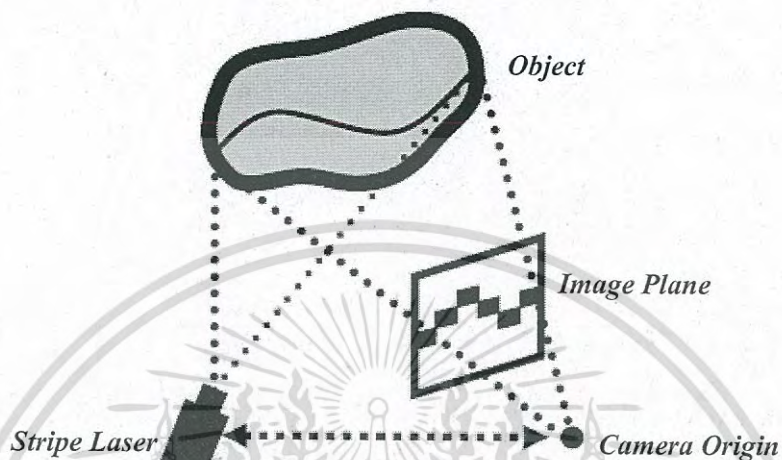
ในวิธีนี้เมื่อต้องการหาระยะทางที่จุดอื่น ๆ บนวัตถุจะต้องเลื่อนจุดแสงไปทั่วตลอดภาพ ซึ่งต้องใช้เวลานานมาก ส่วนเครื่องกำเนิดแสงที่นิยมใช้ได้แก่ แสงอินฟราเรดและแสงเลเซอร์ โดยสามารถใช้ได้ดีและไม่จำเป็นต้องใช้เฉพาะที่มีด ห้องที่มีระดับแสงปกติก็สามารถใช้ได้แต่ควรติดตั้งตัวกรองแสง (Filter) ไว้ที่ด้านหน้าของกล้องด้วยเพื่อลดปริมาณแสงบริเวณห้องนั้น แสงเลเซอร์เป็นแสงที่ดีที่สุดเพราะให้จุดแสงที่ชัดเจนและมีขนาดเล็กมากและการกระจายของแสงน้อยเป็นผลให้สามารถใช้ใน ระยะทางที่ไกลๆ ได้ดี

#### 2.1.4.2 วิธีฉายแสงแบบลายเส้น (Light Stripe Triangulation)

หลักการฉายแสงแบบลายเส้นเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีฉายแสงแบบจุด โดยลายเส้นของแสง จะได้จากการฉายแสงผ่านร่องแสงหรือจากเครื่องกำเนิดแสงแบบจุดผ่านเลนส์ที่มีลักษณะกลมซึ่งทำให้ แสงที่ได้กลายเป็นเส้นแสง โดยทำการฉายแสงที่ได้นี้ไปยังวัตถุและใช้กล้องเก็บลายเส้นที่เกิดขึ้นบนวัตถุ ดังรูปที่ 2.14 โดยลายเส้นจะถูกแบ่งออกเป็นจุดภาพย่อยๆ และระยะทางจะคำนวณที่แต่ละจุดตาม ลายเส้น ส่วนวิธีการคำนวณหาระยะทางจะเหมือนกับวิธีการฉายแสงแบบจุดทุกประการรวมทั้งการวาง และติดตั้งอุปกรณ์ก็มีความเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

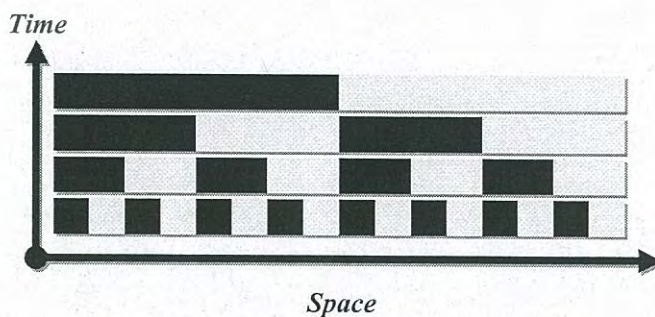
ข้อดีของวิธีการฉายแสงแบบลายเส้นเดียวคือง่ายและรวดเร็วกว่าวิธีการฉายแสงแบบจุด นอกจากนั้นขอบเขตและพื้นที่ของวัตถุ สามารถหาได้โดยการต่อที่จุดปลายของแต่ละลายเส้นเข้าด้วยกัน ดังนั้นวิธีการใช้แสงแบบลายเส้นนี้สามารถใช้ในการแบ่งย่านภาพวัตถุ (Image segmentation) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.14 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบเส้น

### 2.1.5 เทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสไบนารี (Binary code pattern)

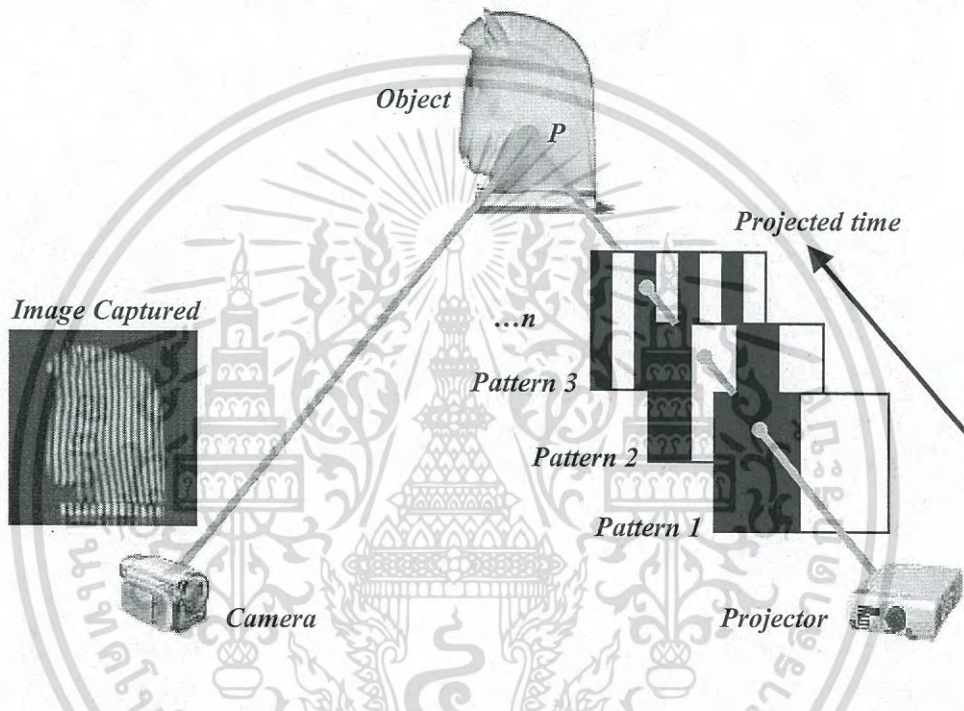
วิธีนี้จะใช้เครื่องกำเนิดแสงร่วมกับกล้องวิดีโอ ซึ่งส่วนมากนิยมใช้โปรเจคเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการฉายแสง โดยแสงที่ฉายไปยังวัตถุจะเป็นรหัสไบนารี (Binary code) [5] และใช้กล้องวิดีโอเก็บภาพแสงที่กระทบกับวัตถุ ซึ่งข้อมูลภาพที่ได้นี้จะข้อมูลของระยะทางบนตำแหน่งของวัตถุซึ่งจะถูกเข้ารหัสเป็นระดับความสว่างและความมืดของแสง โดยจุดของภาพที่มีความสว่างจะเป็น “1” และจุดของภาพที่มีความสว่างน้อยหรือมืดจะเป็น “0” จึงจำเป็นต้องนำรหัสบนจุดภาพดังกล่าวไปถอดรหัสและคำนวณเพื่อทำการหาระยะทางจริงบนวัตถุ



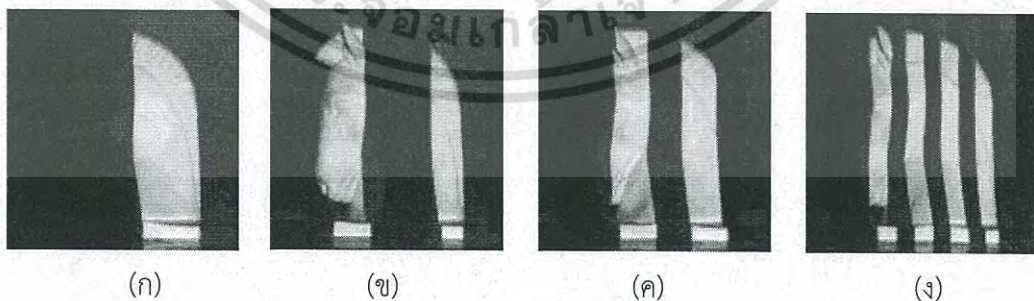
รูปที่ 2.15 ฉากรหัสไบนารี (Binary code pattern) [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.16 สมมติใช้ฉากจำนวน 3 ฉาก จุด  $P$  ซึ่งอยู่บนผิวของวัตถุจะถูกเข้ารหัสเป็นระดับมืดหรือ "0" โดยฉากที่ 1 บิตนี้ถูกกำหนดเป็นบิตที่อยู่ซ้ายมือสุดเป็นบิตที่มีค่าประจำหลักมากที่สุด (Most Significant Bit : MSB) เมื่อเปลี่ยนฉากเป็นฉากที่ 2 จะถูกเข้ารหัสใหม่เป็นระดับสว่างหรือ "1" และในฉากที่ 3 จะถูกเข้ารหัสใหม่เป็นระดับมืดหรือ "0" ซึ่งในบิตนี้ถูกกำหนดเป็นบิตที่อยู่ขวามือสุดเป็นบิตที่มีค่าประจำหลักน้อยที่สุด (Least Significant Bit : LSB) เมื่อนำข้อมูลในแต่ละฉากที่ได้มาอนุกรมกันดังนั้นจุด  $P$  จะถูกเข้ารหัสเป็น "101" ดังนั้นถ้าหากใช้ฉากจำนวน  $n$  ฉากก็จะสามารถรหัสได้เป็น  $2^n$  ถ้าสมมติว่าใช้ฉากจำนวน 7 ฉากก็จะเข้ารหัสให้มีความละเอียดได้เป็น  $2^7$  หรือ 128 รหัส



รูปที่ 2.16 เทคนิคการฉายแสงผ่านรหัสไบนารี (Binary code pattern)



รูปที่ 2.17 ภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารี

การเปลี่ยนภาพรหัสไบนารีไปเป็นข้อมูลระยะทางนั้น จะนำภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารีไปเปรียบเทียบกับภาพวัตถุที่ระดับแสงปกติ โดยเปรียบเทียบทีละจุดภาพแล้วนำมาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่เอกสารนี้ถูกเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้าเปรียบเทียบกับค่าเบี่ยงเบน (Deviation) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง เพื่อเป็นการแยกภาพที่ได้จากไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

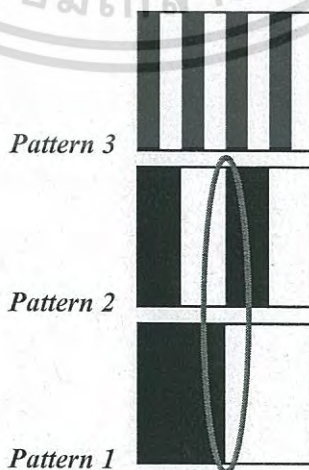
การฉายแสงผ่านฉากรังสีไบนารีให้ได้เป็นภาพ 2 ระดับ (Binary Image) จากนั้นนำข้อมูลแต่ละจุดของภาพมาอนุกรมกันจะได้ข้อมูลไบนารีขนาด 7 บิต ซึ่งก็คือข้อมูลระยะทางของแต่ละจุดบนภาพนั่นเองจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 127 ถ้าหากใช้จำนวนฉากเท่ากับ 7 ฉาก โดยระยะทางจริงจะได้รับการแปลงข้อมูลไบนารีเป็นตัวเลขฐานสิบซึ่งสามารถแปลงได้โดย

$$d = \sum_{i=0}^{n-1} (B_{(i)} \times 2^i) \quad (2.15)$$

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

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

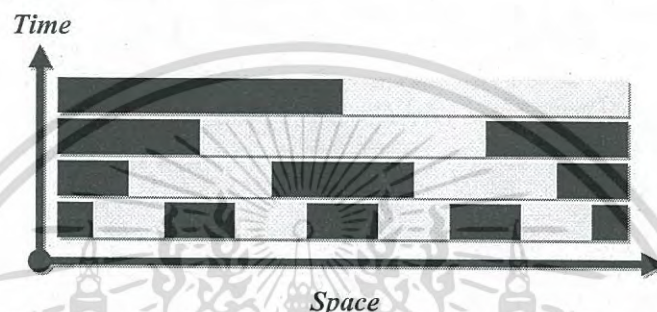
การฉายแสงผ่านรหัสไบนารี (Binary code pattern) นั้นจะเกิดปัญหาขึ้นที่ความเหลี่ยมล้ำของแสงระหว่างร่องแสงข้างเคียงที่อยู่ติดกัน ซึ่งเป็นผลให้ระยะทางบางตำแหน่งที่ได้ผิดพลาดไปมาก เช่นถ้าหากในฉากที่ 1 มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น การเข้ารหัสอาจผิดพลาดจาก "011" หรือ 3 ไปเป็น "111" หรือ 7 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดไปถึง 4 ตำแหน่งและอาจเกิดขึ้นได้ในทุกๆฉาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.18 ความผิดพลาดจากความเหลี่ยมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสไบนารี  
ไม่วารณใด ๆ หังสิน อักทังหามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.6 เทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสเกรย์ (Gray code pattern)

เนื่องจากเทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสไบนารีจะมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นที่บางตำแหน่งบนวัตถุ โดยเฉพาะบริเวณร่องแสงที่ติดกัน เพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าวจึงเปลี่ยนการเข้ารหัสระยะจากการใช้รหัสไบนารีด้วยการใช้รหัสเกรย์ [5][6][7] เนื่องจากทั้งรหัสไบนารี และรหัสเกรย์ต่างก็เป็นเลขฐานสอง จึงสามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้ ลักษณะการฉายแสงและการวางตำแหน่งของอุปกรณ์สามารถใช้วิธีการเดียวกับการใช้รหัสไบนารี เพียงแต่รหัสเกรย์มีขั้นตอนในการแปลงข้อมูลที่ซับซ้อนกว่า ส่วนในการคำนวณหาระยะทางจะเหมือนกันทุกประการ



รูปที่ 2.19 ฉากรหัสเกรย์ (Gray code pattern)

การเปลี่ยนภาพรหัสเกรย์เป็นข้อมูลระยะทางจะเหมือนกับการเปลี่ยนของภาพรหัสไบนารี ซึ่งจะนำจุดภาพที่ตำแหน่งเดียวกันของทุกภาพที่ได้จากการฉายฉากรหัสเกรย์ มาทำการอนุกรมกันจะได้เป็นข้อมูลรหัสเกรย์แล้วเปลี่ยนเป็นข้อมูลรหัสไบนารีโดยบิตที่เป็นบิตที่อยู่ซ้ายมือสุด(MSB)

$$B_{(n-i)} = G_{(n-i)} \quad (2.16)$$

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

$$B_{(i)} = B_{(i+1)} \oplus G_i \quad (2.17)$$

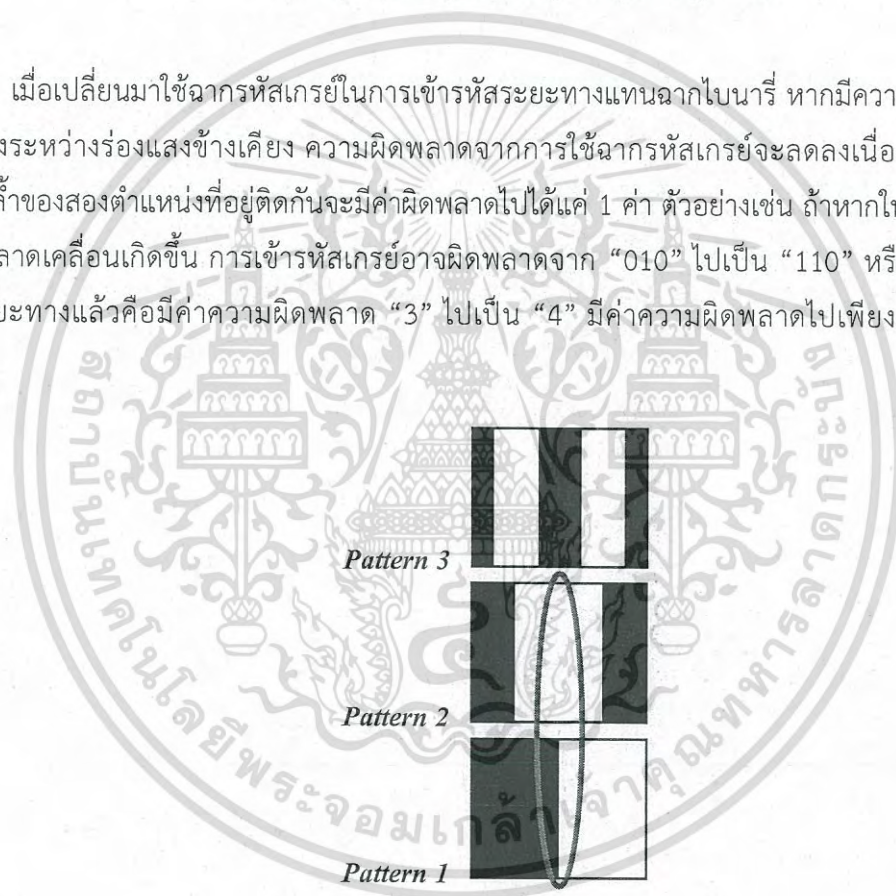
จากนั้นทำการเปลี่ยนข้อมูลรหัสไบนารีที่ได้ให้เป็นข้อมูลระยะทางอีกครั้งโดยที่

$$\text{ข้อมูลระยะทาง} = \sum_{i=0}^{n-1} (B_i \times 2^i) \quad (2.18)$$

เกรย์ทั้งหมด 7ฉาก ในภาพแรกซึ่งเป็นบิตที่อยู่ขวามือสุด(LSB) มีค่า  $G_{(0)} = 1$ , ภาพที่สองมีค่า  $G_{(1)} = 1$ , ภาพที่สามมีค่า  $G_{(2)} = 1$ , ภาพที่สี่มีค่า  $G_{(3)} = 1$ , ภาพที่ห้ามีค่า  $G_{(4)} = 0$ , ภาพที่หกมีค่า  $G_{(5)} = 1$  และ ภาพที่เจ็ดซึ่งเป็นบิตที่อยู่ซ้ายมือสุด(MSB) มีค่า  $G_{(6)} = 0$  เมื่อนำมาอนุกรมกันจะได้  $(0101111)_G$  และ ทำการแปลงเป็นรหัสไบนารีจะได้เป็น  $(0110101)_B$  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 2.20 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสเกรย์

### 2.3 รูปแบบการสแกนวัตถุ (Scanning Patterns)

การสแกนวัตถุเป็นรูปแบบในการเก็บข้อมูลสามมิติของวัตถุต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่สามารถแบ่งลักษณะของการสแกนวัตถุได้เป็น 3 แบบ คือ การสแกนโดยการหมุนวัตถุ ( $360^\circ$ ) การสแกนโดยการหมุนท่ามุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ และการสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 การสแกนโดยการหมุนวัตถุ

วิธีการสแกนโดยการหมุนวัตถุจะทำการวางวัตถุที่ต้องการเก็บข้อมูลระยะทางลงบนแท่นหมุน โดยทำการหมุนวัตถุเพื่อเก็บข้อมูลระยะทางของวัตถุทั้ง 360 องศา ลักษณะการสแกนโดยการหมุนวัตถุ ส่วนใหญ่จะใช้ร่วมกับหลักการเก็บข้อมูลระยะทางด้วยหลักการสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟด้วยลำแสง แบบเส้น (Light Stripe Triangulation) เมื่อทำการฉายแสงลงไปบนวัตถุแล้วทำการเก็บข้อมูลโดย กล้องวีดีโอ ก็จะสามารถนำมาคำนวณหาข้อมูลระยะทางของวัตถุตัวอย่างได้ ถ้าทำการหมุนวัตถุ เคลื่อนที่ไปเป็นมุมต่างๆก็จะทำให้ได้ข้อมูลระยะทางในมุมอื่นๆของวัตถุ หากทำการหมุนไปเรื่อยๆจน ครบ 360 องศา ก็จะทำให้ได้ข้อมูลระยะทางของวัตถุครบทุกส่วนของวัตถุ ดังนั้นการสแกนด้วยการ หมุนวัตถุนี้จะทำให้ได้ข้อมูลระยะทางของวัตถุครบทั้ง 360 องศาจึงนิยมนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุ

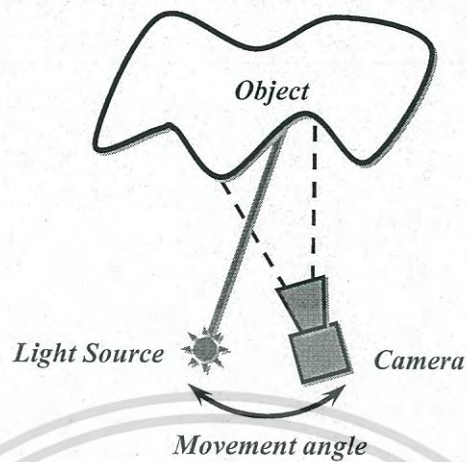


รูปที่ 2.21 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนวัตถุ

### 2.3.2 การสแกนโดยการหมุนท่ามุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ

การสแกนโดยการหมุนท่ามุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพจะกำหนดให้วัตถุที่ต้องการเก็บ ข้อมูลระยะทางวางอยู่กับที่ ส่วนที่เคลื่อนที่จะเป็นส่วนของแหล่งกำเนิดแสงเพียงอย่างเดียว ซึ่งในกรณี นี้จะใช้ร่วมกับหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปโดยการใช้แสง หรือส่วนเคลื่อนที่จะเป็นส่วนของ แหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์ตรวจจับภาพ ในกรณีนี้จะใช้ร่วมกับการเก็บข้อมูลระยะทางด้วยหลักการ สามเหลี่ยมแอคทีฟโดยการใช้แสงแบบจุดอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการควบคุมการหมุนหรือเปลี่ยนมุมของ แสงคือ MEMS (Micro Electro Mechanical System) ซึ่งเป็นอุปกรณ์นี้ประกอบด้วยกระจกขนาด เล็กและส่วนควบคุมการเอียงของกระจก การสแกนโดยการหมุนท่ามุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพจะ นิยมใช้ในงานการสร้างแผนที่สามมิติ หรือการเก็บข้อมูลของวัตถุขนาดเล็กเพราะจะใช้เวลาในการ สแกนมาก

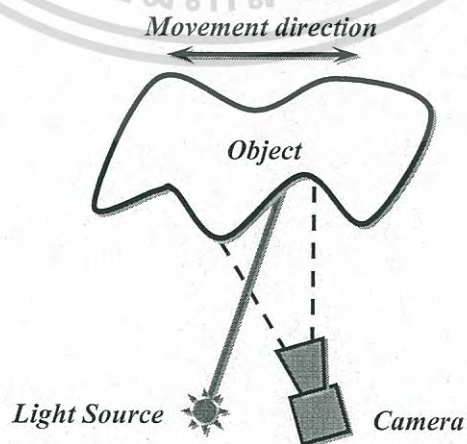
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ

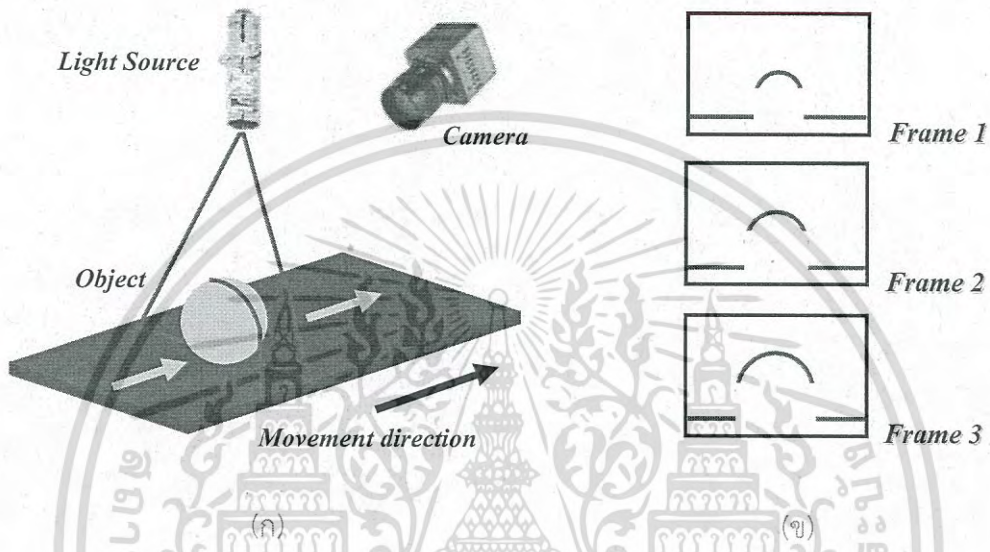
### 2.3.3 การสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุ

การสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือเรียกว่า การสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนของวัตถุ (Light-Sectioning) เป็นเทคนิคการวัดรูปทรงแบบตัดขวางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในขบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ [8][9] ซึ่งการสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนของวัตถุเป็นส่วนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งวิธีนี้เปรียบเสมือนจะเป็นการแบ่งวัตถุ 3 มิติออกเป็นส่วนย่อยๆ (2 มิติ) ตามแนวความยาวของวัตถุ โดยการฉายแหล่งกำเนิดแสงลงบนพื้นผิววัตถุเพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงตกกระทบ ซึ่งส่วนมากแล้วแหล่งกำเนิดแสงจะใช้เส้นเลเซอร์สีแดงเนื่องจากการนำมาวิเคราะห์และประมวลผลทำได้ง่าย นอกจากนั้นยังช่วยลดขั้นตอนในการแบ่งส่วนวัตถุกับภาพพื้นหลัง

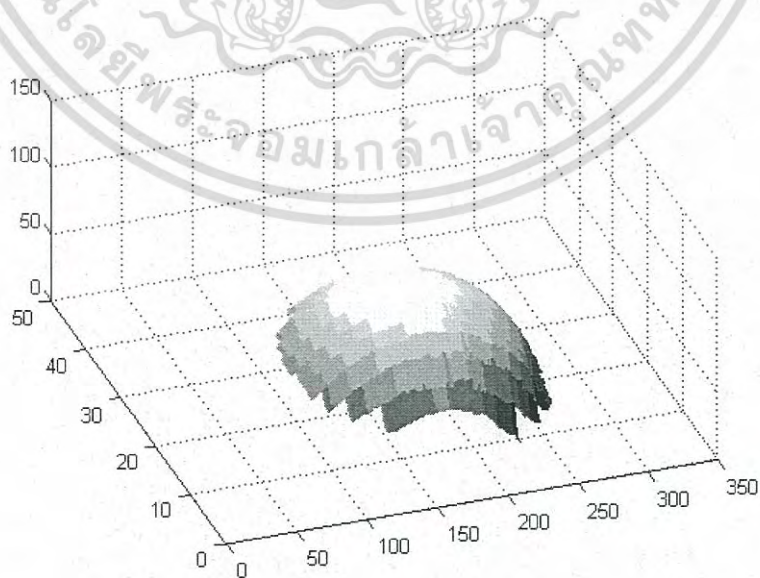


เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2.23 การสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนวัตถุ (Light-Sectioning) ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแสงที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพและบันทึกไว้ด้วยกล้องที่วางทำมุมเอียงกับแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งข้อมูลของภาพที่ได้มาจะเปรียบเสมือนเป็นข้อมูลความหนาและความกว้างในแต่ละจุดบนพื้นผิววัตถุ เมื่อทำการเคลื่อนที่วัตถุก็จะได้ข้อมูลในส่วนต่อไปของวัตถุในลักษณะของภาพตัดขวางของแต่ละส่วน และนำภาพตัดขวางแบบ 2 มิติแต่ละส่วนของวัตถุมารวมกันเพื่อสร้างเป็นภาพตัดขวาง 3 มิติที่เป็นตัวบอกได้ถึง ความกว้าง ความสูง และความยาวของวัตถุนั้นๆ [6]



รูปที่ 2.24 (ก) การเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านเส้นแสง (ข) ภาพที่ได้ในเฟรมต่างๆเมื่อมีวัตถุตัดผ่าน



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการนำภาพตัดขวางแต่ละส่วนมารวมเพื่อสร้างภาพตัดขวาง 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นหน้าเว็บไซต์หรือเอกสารฉบับนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.24 (ข) แสดงภาพที่ได้จากกล้องในเฟรมต่างๆ [10] เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่านทำให้เส้นแสงเลเซอร์เปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามพื้นผิวของวัตถุ โดยรูปร่างของเส้นแสงที่ได้จะบอกถึงคุณลักษณะของวัตถุสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติ 2 มิติในเชิงระยะพิกัดหรือขนาดของวัตถุที่จะบอกถึงความกว้างและความสูง นอกจากนั้นเมื่อให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สอดคล้องกับความเร็วในการเก็บภาพของกล้อง (Frame per Second) แล้วทำการเก็บข้อมูลภาพอย่างต่อเนื่อง เมื่อนำข้อมูลภาพที่ได้ในแต่ละส่วนที่เป็น 2 มิติของวัตถุมาต่อกันจะทำให้เกิดคุณลักษณะของวัตถุใน 3 มิติซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติที่เป็นขนาดของวัตถุทั้ง ความกว้าง ความยาว และความหนาของวัตถุ รวมทั้งพื้นที่โดยรวมของวัตถุซึ่งปกตินิยมใช้หลักการของรูปสามเหลี่ยมมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีข้อจำกัดคือถ้าการติดตั้งไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของหลักการรูปสามเหลี่ยมเช่น ระยะห่างระหว่างกล้องกับแหล่งกำเนิดแสงรวมทั้งการทำมุมของกล้องหรือแหล่งกำเนิดแสงมีการคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งนอกจากนั้นหลักการของรูปสามเหลี่ยมมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดของวัตถุไม่สามารถทำการขยายย่อในการตรวจวัด (Non Scale-Up)

การใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนของวัตถุ (Laser Light-Sectioning) เป็นวิธีการที่แบ่งวัตถุสามมิติออกเป็นส่วนๆ ในลักษณะสองมิติจึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำมาใช้วัดขนาดวัตถุในงานวิจัยนี้ แต่จากข้อจำกัดของหลักการของรูปสามเหลี่ยมในการวิเคราะห์ถึงขนาดของวัตถุ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการแปลงแบบโฮโมกราฟฟีซึ่งเป็นการแปลงของภาพสองมิติจึงสามารถนำมาใช้ร่วมกับหลักการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนของวัตถุได้โดยตรง การแปลงแบบโฮโมกราฟฟีจะนำมาแปลงภาพของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จากการฉายไปยังวัตถุมาวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของวัตถุ

## 2.4 วิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง (Central of Gravity: COG)

วิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง (Central of Gravity: COG) คือการหาค่าเฉลี่ยของพิกัดของภาพจากแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนวัตถุ เนื่องจากแสงเลเซอร์มีความกว้างและความเข้มแสงที่ไม่เท่ากันทุกจุด การหา COG คือการหาค่าถ่วงน้ำหนัก ในแต่ละคอลัมน์ของภาพ เพื่อทำการแยกพิกัดที่สอดคล้อง (Profile Extraction) กับวัตถุมากที่สุด จากตัวอย่างการหา COG คือการหาจุดในแต่ละคอลัมน์ที่สัมพันธ์กับแสงเลเซอร์เพื่อให้เข้าใจง่ายจึงยกตัวอย่างการคำนวณ COG จากสมการที่ 3.19 เป็นการคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Center of gravity) [18]

$$COG = \frac{\sum y \cdot I(y, x)}{\sum I(y, x)} = \frac{Wm}{m} \quad (2.19)$$

เมื่อ  $I(y, x) > \text{Threshold}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารเมื่อ กำหนดค่า Threshold = 30, เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I(y,x)$  คือ ความเข้มของระดับสีเทา

$y$  คือ แถวในแนวแกน  $y$

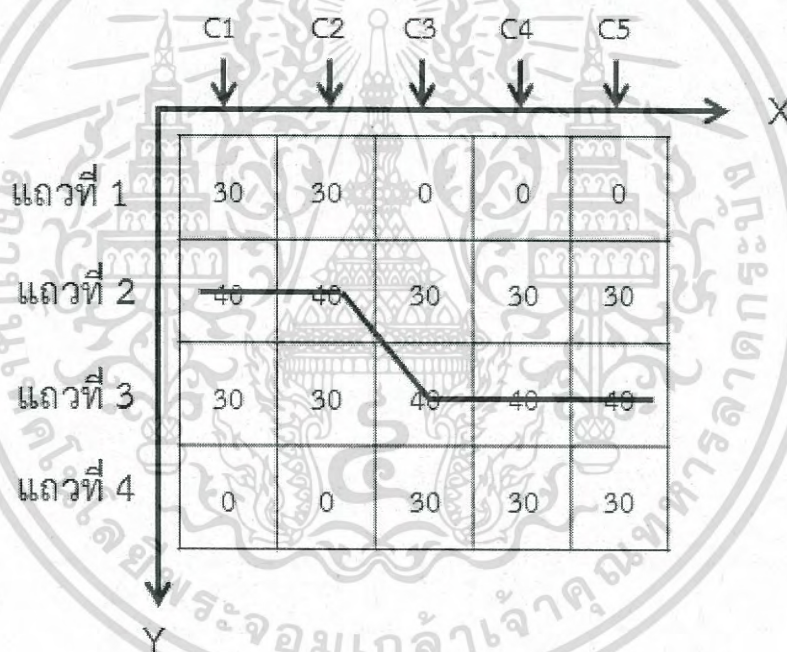
ตัวอย่างการคำนวณมีดังนี้

มีขนาดเมทริกซ์  $4 \times 5$  พิกเซลค่าภายในเมทริกซ์คือค่าความเข้มของระดับสีเทา (Intensity) ใช้ค่าเทรสโฮล์ด 30 ในการคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Center of gravity) ของเมทริกซ์  $4 \times 5$  พิกเซล

กำหนดให้

$Wm$  = ผลรวมของค่าความเข้มของระดับสีเทาคู่กับค่าตำแหน่งของแถว  $y$

$m$  = ผลรวมของค่าความเข้มระดับสีเทา



รูปที่ 2.26 เมทริกซ์ขนาด  $4 \times 5$

พิจารณาค่าความเข้มของระดับสีเทา (Intensity) ที่มีค่ามากกว่าค่าเทรสโฮล์ดคือ 30 คำนวณหาค่า COG ของ  $Y$  ในแต่ละคอลัมน์ C1, C2, C3, C4 และ C5

$$(C1) \text{ COG } (X=1) = \frac{Wm}{m} = \frac{(1 \times 30) + (2 \times 40) + (3 \times 30) + (4 \times 0)}{30 + 40 + 30 + 0} = 2 \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็น (C2)  $\text{COG } (X=2) = \frac{Wm}{m} = \frac{(1 \times 30) + (2 \times 40) + (3 \times 30) + (4 \times 0)}{30 + 40 + 30 + 0} = 2$  ใช้ประโยชน์ (2.21) ราคา  
ไม่วารณมีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(C3) \text{ COG } (X=3) = \frac{Wm}{m} = \frac{(1 \times 0) + (2 \times 30) + (3 \times 40) + (4 \times 30)}{0 + 30 + 40 + 30} = 3 \quad (2.22)$$

$$(C4) \text{ COG } (X=4) = \frac{Wm}{m} = \frac{(1 \times 0) + (2 \times 30) + (3 \times 40) + (4 \times 30)}{0 + 30 + 40 + 30} = 3 \quad (2.23)$$

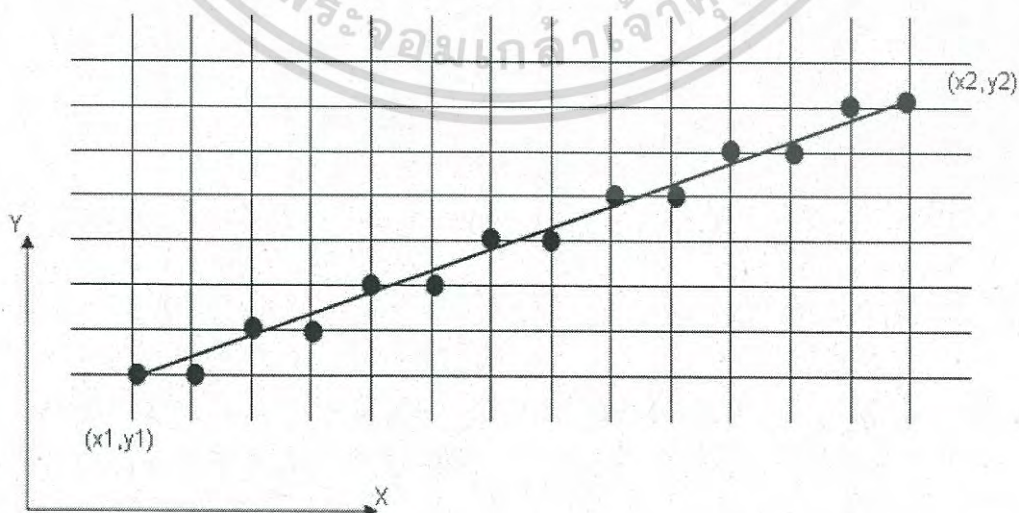
$$(C5) \text{ COG } (X=5) = \frac{Wm}{m} = \frac{(1 \times 0) + (2 \times 30) + (3 \times 40) + (4 \times 30)}{0 + 30 + 40 + 30} = 3 \quad (2.24)$$

ผลลัพธ์ที่ได้คือ ค่าพิกัด X และ Y โดยที่ X เป็นคอลัมน์ที่ 1,2,3...n สัมพันธ์กับค่าของ Y เป็นค่าแถวที่ 1,2,3...n ดังนั้นคำตอบที่ได้คือ  $(X,Y) = \{(1,2), (2,2), (3,3), (4,3), (5,3)\}$

## 2.5 อัลกอริทึมเส้นตรง Bresenham

ในการแสดงพิกัดของภาพดิจิทัลจะบอกในลักษณะของจุดภาพ (พิกเซล) ซึ่งอาจเรียกอีกชื่อว่าอุปกรณ์แรสเตอร์ (Raster Devices) เช่น จอภาพหรือเครื่องพิมพ์ ในการวาดเส้นตรงลงบนอุปกรณ์ประเภทนี้ จะใช้การเชื่อมจุดระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของเส้นตรง ดังนั้นถ้าอุปกรณ์มีความละเอียดสูง จะทำให้ได้รูปเส้นตรงที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าจอภาพที่มีความละเอียดต่ำ ในรูปที่ 3.24 แสดงกระบวนการวาดเส้นตรงบนอุปกรณ์ประเภทแรสเตอร์โดยการตัดกันของเส้นแสดงถึงตัวแทนของจุดภาพ และเส้นตรงแสดงถึงเส้นตรงที่ต้องการวาด

Converting Line into Pixel Coordinates



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.27 แสดงการสร้างเส้นตรงบนจอภาพ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแต่ละตำแหน่งบนแกน X ของจอภาพ จะต้องคำนวณหาเลขจำนวนเต็มที่จะใช้แทนค่า y เนื่องจากการอ้างอิงจุดภาพจะเป็นจำนวนเต็มเสมอ โดยต้องเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่า y ที่แท้จริงมากที่สุด โดยวิธีที่ง่ายที่สุดคือการใช้สมการเส้นตรง

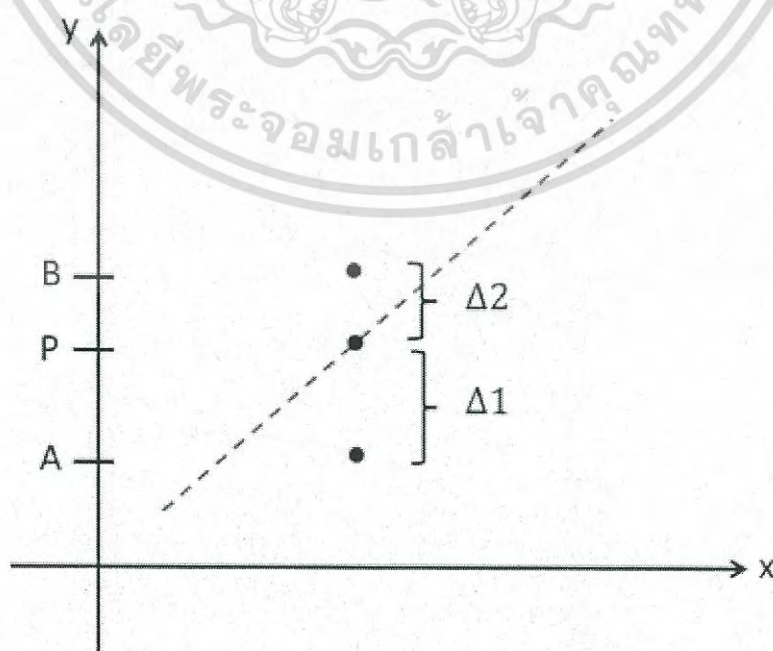
$$y = mx + c \quad (2.25)$$

ตัวแปร m คือค่าความชันของเส้นตรง ซึ่งจะสามารถหาค่าความชันได้จาก

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2.26)$$

ผลการคำนวณจากสมการจะได้เป็นจุดทศนิยม จึงต้องทำการค่า y ขึ้นหรือลง เพื่อให้ได้จำนวนเต็มที่ใกล้เคียงมากที่สุด

ปัญหาจากการใช้วิธีดังกล่าวข้างต้นคือ จะใช้เวลาในการคำนวณมาก เนื่องจากมีทั้งการคูณและการหาร ในปี 1965 J.E. Bresenham ได้นำเสนอวิธีการวาดเส้นตรงที่ใช้วิธีการอันชาญฉลาด โดยในการคำนวณมีเพียงแค่การบวกและการคูณด้วยสองเท่านั้น และนิยมใช้กันอย่างมากในปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.28 อัลกอริทึมในการวาดเส้นตรงของ Bresenham  
ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.28 จะเป็นการแสดงวิธีการคำนวณของ Bresenham เพื่อสร้างเส้นตรง ถ้าจุด (P) คือจุดที่เส้นตรงพาดผ่านบริเวณจุดภาพ A และ B โดยแนวคิดของ Bresenham นั้นจะทำการหาค่า  $\Delta_2$  และ  $\Delta_1$  แล้วทำการเปรียบเทียบค่ากัน โดยความแตกต่างของระยะทั้งสองจะหาได้จากสมการที่ 3.27

$$\Delta_2 - \Delta_1 = 2m(x+1) - 2A + 2c - 1 \quad (2.27)$$

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

$$P = \Delta x(d_1 - d_2) \quad (2.28)$$

$$P = 2\Delta y \cdot x - 2\Delta x \cdot A + c \quad (2.29)$$

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

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

## 2.6 ตัวกรองสอวิทซกี-โกเลย์ (Savitzky-Goley filter)

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

จุดประสงค์หลักๆของการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล คือ การวัด การกรอง การบีบอัด ข้อมูลสัญญาณแบบต่อเนื่อง (Analog Signal) ซึ่งไม่สามารถกระทำได้โดยตรง การได้มาของข้อมูลสัญญาณแบบดิจิทัลนั้น จะต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital-to-Analog Converter)

หนึ่งในเทคนิคสำคัญของการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัลคือ ตัวกรองสัญญาณ (filter) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำการกำจัดสัญญาณรบกวน (noise) ที่ไม่ต้องการออกจากสัญญาณหลัก ตัวกรองไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่พิจารณานำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ตัวกรองแบบแบบสวิตซกี-โกเลย์ (Savitzky-Goley filter) โดยในปี 1964 Abraham Savitzky และ Marcel J. E. Golay ได้ตีพิมพ์งานวิจัย “Smoothing and differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures.” ลงในวารสาร Analytical Chemistry [11] โดยงานวิจัยฉบับนี้ถูกอ้างอิงเป็นอย่างมาก เช่น งานวิจัยของ Nakajima, Juzoji, Zhao, และ Hamamoto (2003) [12] ได้เสนอวิธีการใช้ตัวกรองชนิดสวิตซกี-โกเลย์ ในการกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องตรวจวัดและบันทึกคลื่นไฟฟ้าของหัวใจ (ECG) ซึ่งสามารถกรองสัญญาณรบกวนได้ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติ (Gaussian noise) และอุปกรณ์ต่างๆ (Impulse noise) และได้มีงานวิจัยของ Paul O’Leary, Matthew Harker และ Richard Neumayr (2010) [13] ได้นำวิธีการตัวกรองสวิตซกี-โกเลย์ไปประยุกต์ใช้ในการกรองข้อมูลรูปทรงของวัตถุ

### 2.6.1 หลักการทำงานของตัวกรองสวิตซกี-โกเลย์

ตัวกรองแบบสวิตซกี-โกเลย์ (Savitzky-Goley filter) ใช้หลักการของการประมาณพหุนามเป็นช่วงๆ และการหาค่าเฉลี่ย โดยการเลื่อนหน้าต่าง (Window) แบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอันดับของพหุนามที่มีค่าสูงจะให้ผลการกรองที่ดี โดยไม่เกิดการลดขนาดของสัญญาณเดิม โดยค่าเอาต์พุตของตัวกรองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.30 [14]

$$g_i = \sum_{n=-n_L}^{n_R} c_n f_{i+n} \quad ; i = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (2.30)$$

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)

แนวคิดของตัวกรองสวิตซกี-โกเลย์ คือการหาสัมประสิทธิ์ตัวกรอง  $c_n$  ที่โดยปกติจะเป็นค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูล  $i$  แต่แนวคิดของตัวกรองสวิตซกี-โกเลย์คือ สัมประสิทธิ์ตัวกรองไม่วารณมีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$c_n$  จะต้องไม่ใช่ค่าคงที่ แต่สามารถปรับค่าได้ตามค่าของข้อมูลที่ได้มาจากการเลื่อนของหน้าต่าง ถ้าสัมประสิทธิ์  $c_n$  ถูกแทนที่ด้วยพหุนามอันดับ  $M$  ที่อยู่ในรูป  $a_0 + a_1i + \dots + a_M i^M$  จะแสดงเวกเตอร์สัมประสิทธิ์  $a$  ได้ดังสมการที่ 3.31 และ 3.32

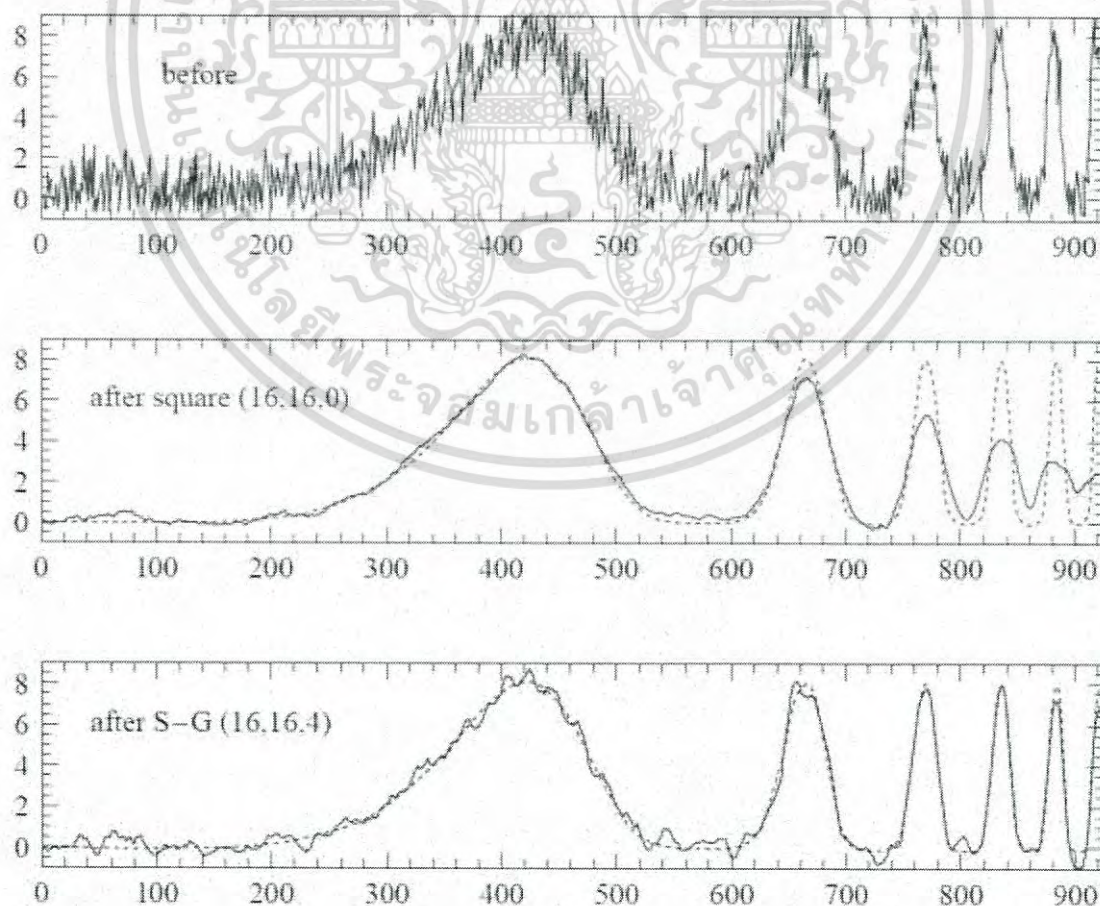
$$A \cdot a = f \quad ; \quad a = (a_0 a_1 \dots a_M)^T \quad (2.31)$$

$$(A^T \cdot A) \cdot a = A^T \cdot f \quad \text{และ} \quad a = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot f \quad (2.32)$$

เนื่องจากการประมาณแบบกำลังสองน้อยที่สุด จะทำให้ข้อมูลเป็นเชิงเส้น ดังนั้น  $f$  ในสมการที่ 2.32 สามารถแทนด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector)  $e_n$  ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสวิตซิก-โกเลย์จะหาได้จากสมการที่ 3.33

$$c_n = \left\{ (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot e_n) \right\}_0 = \sum_{m=0}^M \left\{ (A^T \cdot A)^{-1} \right\}_{0m} n^m \quad (2.33)$$

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



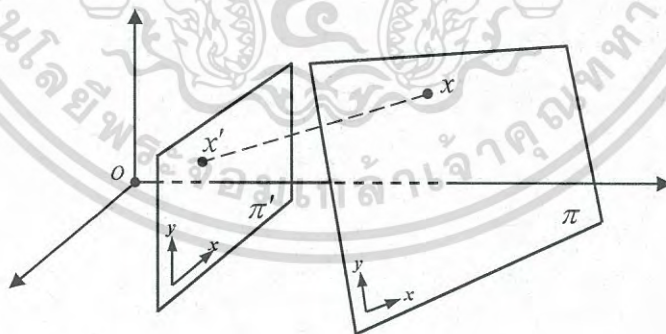
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะวิชาการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ผ่านการคำ  
รูปที่ 2.29 แสดงผลการทดสอบการใช้ตัวกรอง ภาพบน: สัญญาณอินพุตที่ถูกเพิ่มสัญญาณรบกวน  
ไม่ทราบชนิดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(เส้นประคือสัญญาณหลัก) ภาพกลาง: ตัวกรองเฉลี่ยเลื่อนหน้าต่างแบบธรรมดา (Simple moving window average) ภาพล่าง: ตัวกรองสวิตซ์-โกเลย์ โดยใช้ค่าพหุนาม  $M = 4$

จากสมการที่ 2.33 จะเห็นว่ามีค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสวิตซ์-โกเลย์ คือ  $M$  และ  $n$  รูปที่ 2.29 แสดงผลการทดสอบตัวกรองสวิตซ์-โกเลย์ โดยใช้ความกว้างของหน้าต่างมีค่าเท่ากับ 33 จุด นั่นคือ  $n_L = n_R = 16$  โดยภาพบนคือฟังก์ชันคลื่นสัญญาณที่ใช้ทดสอบที่เพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไป (สัญญาณหลักคือเส้นประ) ภาพตรงกลางแสดงถึงผลลัพธ์จากการปรับสัญญาณให้เรียบโดยใช้วิธีการเฉลี่ยแบบเลื่อนหน้าต่าง (moving average) จะเห็นว่าขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณถูกลดทอนไปด้วยเป็นอย่างมาก กลับกันที่ภาพล่างเป็นการใช้ตัวกรองแบบสวิตซ์-โกเลย์ โดยใช้พหุนามอันดับที่  $M = 4$  ซึ่งผลลัพธ์ที่เห็นได้ว่าขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณมีความใกล้เคียงกับสัญญาณจริงมาก

## 2.7 โฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม

โฮโมกราฟฟีเป็นการแปลงในลักษณะการโปรเจกชันของจุดหรือเส้นที่อยู่บนระนาบ ( $\pi$ ) โดยสามารถเรียกได้หลายชื่อเช่น Collineation, Projectivity และ Projective Transformation ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการแปลงระหว่างที่กัตจริงกับระนาบของภาพที่เป็นผลมาจากการรับภาพของกล้องที่เป็นลักษณะการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ ( $2D \rightarrow 2D$ )



รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์และการโปรเจกชันของจุดที่อยู่บนระนาบ

โดย Hartley และ Zisserman [15] ได้ให้คำนิยามของโฮโมกราฟฟีว่าเป็นการแปลงระนาบ  $\pi$  ที่เกิดในลักษณะของการโปรเจกชันนั่นเอง ดังนั้นถ้ามีเส้นตรงจากจุด  $x$  ที่อยู่บนระนาบ  $\pi$  ไปยังจุดศูนย์กลางของการฉาย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระนาบ  $\pi$  ไปยังระนาบ  $\pi'$  ดังนั้นจุด  $x$  บนเอกสารระนาบ  $\pi$  จะถูกย้ายไปยัง  $x'$  บนระนาบ  $\pi'$  ซึ่งจุด  $x'$  จะมีตำแหน่งอยู่บนเส้นตรงที่ลากจาก  $x$  ไปยังจุดรศังค์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

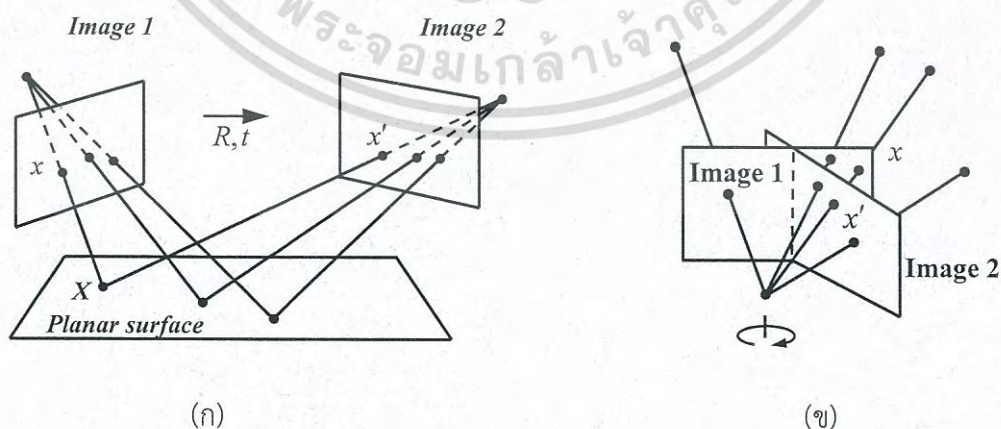
ศูนย์กลางโปรเจกชัน จากความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของระนาบ  $\pi \rightarrow \pi'$  ที่เป็นลักษณะการโปรเจกชันสามารถแทนได้ด้วยเมทริกซ์  $3 \times 3$  ที่เป็น non-singular matrix และจุดใดๆบนระนาบ  $\pi$  แทนด้วยเวกเตอร์  $x$  หากมีการเปลี่ยนแปลงระนาบ  $\pi \rightarrow \pi'$  ดังนั้นตำแหน่งของจุด  $x$  นั้นจะถูกแปลงไปโดยมีค่าเท่ากับ  $Hx$

$$x' = Hx \quad (2.34)$$

เมื่อ  $x$  คือ จุดใดๆ บนระนาบ 2 มิติ,  $x'$  คือ จุด  $x$  ที่ถูกแปลงไปตามลักษณะการโปรเจกชัน,  $H$  คือ เมทริกซ์การแปลงแบบโปรเจกชันของระนาบ (Homography Matrix) โดยสามารถแทนจุด  $x$  และ  $x'$  ให้อยู่ในลักษณะของโฮโมจีเนียสเวกเตอร์ และแทน  $H$  ด้วยเมทริกซ์ non-singular ขนาด  $3 \times 3$  ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} wx' \\ wy' \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

เมทริกซ์  $H$  (Homography Matrix) สามารถเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆทั้ง 9 ตัว โดยการคูณกับเฟกเตอร์การสเกล (Scale Factor) ใดๆที่ไม่เท่ากับ 0 โดยจะไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการแปลงเชิงการโปรเจกชันของเมทริกซ์  $H$  หรือสรุปได้ว่าเมทริกซ์  $H$  เป็นเมทริกซ์โฮโมจีเนียสนั่นเองและจะมีเพียง 8 degree of freedom (8 dof) จากจำนวนองค์ประกอบทั้งหมด 9 ตัวในเมทริกซ์  $H$



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างลักษณะของการแปลงในเชิงการโปรเจกชันแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.1 ความสัมพันธ์ของโฮโมกราฟฟีกับการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบอื่นๆ

การเปรียบเทียบโฮโมกราฟฟีกับการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพแบบอื่นๆจะช่วยให้เข้าใจถึงโฮโมกราฟฟีมากยิ่งขึ้น ซึ่งในการแปลงของภาพส่วนใหญ่จะเป็นการแปลงที่รวมการแปลงเชิงเรขาคณิตพื้นฐานเข้าด้วยกัน เช่น การหมุน การสเกล การย้ายตำแหน่ง รวมทั้งการแปลงเชิงการฉายภาพเข้าด้วยกัน โดยสามารถที่แบ่งการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพต่างๆออกเป็นกลุ่มๆได้ดังนี้

#### 2.7.1.1 Euclidian Transformation

การแปลงแบบ Euclidian เป็นการแปลงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดภาพ ซึ่งหมายความว่าระยะห่างระหว่าง 2 จุดบนภาพจะคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะมีการหมุนและการย้ายตำแหน่งของภาพไปจากเดิม โดยการแปลงแบบ Euclidian จะมีเพียง 3 degree of freedom (3 dof) ซึ่งการแปลงแบบ Euclidian สามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & tx \\ \sin\theta & \cos\theta & ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

หรือเขียนสมการในรูปแบบง่ายได้เป็น

$$x' = H_E x = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} x \quad (2.37)$$

เมื่อ  $H_E$  คือ เมทริกซ์ของการแปลง Euclidian

$x$  คือ เมทริกซ์การหมุนที่มีขนาด  $2 \times 2$

$t$  คือ เวกเตอร์การย้ายตำแหน่ง

$0^T$  คือ ค่า 0 ในแต่ละหลักของ  $H_E$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.1.2 Similarity Transformation

การแปลงแบบ Similarity จะมีความคล้ายคลึงกับการแปลงแบบ Euclidian แต่จะเพิ่มในส่วนของการย่อขยายเข้ามา ทำให้การแปลงแบบ Similarity จะมีผลในการหมุน การย้ายตำแหน่ง และการย่อขยายเข้าด้วยกัน ในส่วนของการสเกลที่เพิ่มขึ้นมาทำให้มี 4 degree of freedom (4 dof) การเพิ่มการสเกลเข้ามาทำให้ระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดบนภาพมีการย่อขยายขึ้นและการสเกลในแกนต่างๆ จะมีอัตราส่วนเท่ากันทั้งภาพ โดยเขียนให้อยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s\cos\theta & -s\sin\theta & tx \\ s\sin\theta & s\cos\theta & ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

และสามารถเขียนสมการในรูปแบบง่ายได้เป็น

$$x' = H_s x = \begin{bmatrix} sR & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} x \quad (2.39)$$

เมื่อ  $s$  คือ ค่าของการสเกลที่เพิ่มขึ้นในพจน์ที่เหลือนั้นจะเหมือนกับการแปลงแบบ Euclidian

### 3.6.1.3 Affine Transformation

การแปลงแบบ Affine มีความคล้ายคลึงกับการแปลงแบบ Similarity แต่ Similarity จะมีการหมุนเพียงมุมเดียวและการย่อขยายจะเท่ากันทุกแกน ส่วนการแปลงแบบ Affine จะมีมุมการหมุน 2 มุมและย่อขยายในแต่ละแกนจะไม่เท่ากัน ดังนั้นการแปลงแบบ Affine จะมี 6 dof โดยจะเพิ่มมุมที่ใช้ระบุหรือกำหนดทิศทางของสเกลและอัตราส่วนของการสเกลในแต่ละแกน ซึ่งการแปลงแบบ Affine มีผลทำให้มุมระหว่างเส้นตรงแต่ละแกนของภาพเปลี่ยนแปลงไป แต่เส้นเหล่านี้ยังคงขนานกันอยู่และเส้นตรงนี้ขนานกันจะมีความยาวของเส้นเท่ากัน นอกจากนั้นพื้นที่ของภาพก่อนถูกแปลงไปและหลังจากการถูกแปลงไปแล้วยังคงมีพื้นที่เท่ากัน การแปลง Affine สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & tx \\ a_{21} & a_{22} & ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถเขียนสมการในรูปแบบง่ายได้เป็น

$$x' = H_A x = \begin{bmatrix} A & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} x \tag{2.41}$$

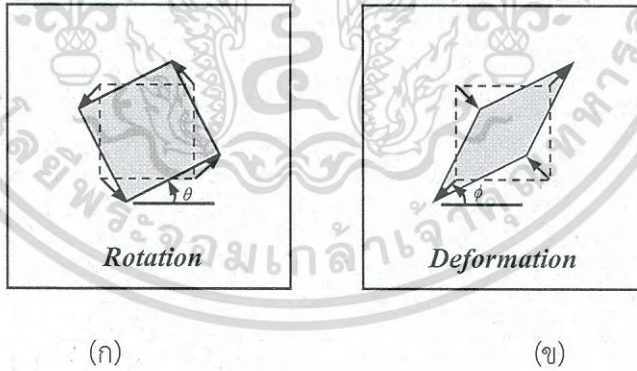
เมื่อ  $A$  คือ เมทริกซ์ Non-Singular ขนาด  $2 \times 2$  ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบออกได้เป็น

$$A = R_\theta R_{(-\phi)} D R_{(\phi)} \tag{2.42}$$

โดยที่  $R_{(\theta)}$  และ  $R_{(\phi)}$  เป็นเมทริกซ์การหมุนโดยมุม  $\theta$  และ  $\phi$  ตามลำดับ และ  $D$  เป็นเมทริกซ์ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์การสเกล 2 ตัว

$$D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \tag{2.43}$$

โดย  $\lambda_1$  เป็นการสเกลในทิศทางแกน  $x$  และ  $\lambda_2$  เป็นการสเกลในทิศทางแกน  $y$



รูปที่ 2.32 การบิดเบือนของระนาบซึ่งเป็นผลของการแปลงแบบ Affine (ก) การหมุนของระนาบโดย  $R_{(\theta)}$  (ข) การผิดรูปไปของระนาบซึ่งเป็นผลจาก  $R_{(-\phi)}DR_{(\phi)}$

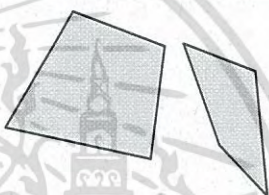
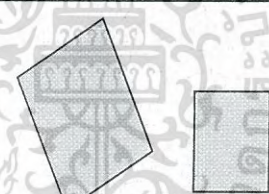
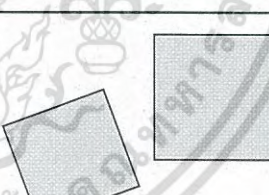
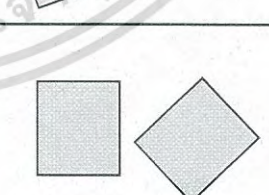
### 2.7.1.4 Homography หรือ Projective Transformation

การแปลงแบบ Projective หรือ Homography เป็นการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นของระบบพิกัดโฮโมจีเนียส การแปลงแบบ Projective จะมี 8 dof ซึ่งมากกว่าการแปลงแบบ Affine ที่จะมีเพียง 6 dof โดยการแปลงแบบ Projective จะมีส่วนประกอบอยู่ 9 ตัวที่เป็นอัตราส่วนกัน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเงาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้งานและสามารถเขียนในรูปแบบโฮโมจีเนียสมทริกซ์ได้ดังในสมการที่ 2.44 หรือเขียนใหม่ในรูปแบบง่ายได้เป็น

$$x' = Hx = \begin{pmatrix} A & t \\ V^T & v \end{pmatrix} x \quad (2.44)$$

เมื่อ  $V = (V_1 \ V_2)^T$  และ  $v$  เป็นค่าสเกลเฟกเตอร์ใดๆที่ไม่กับ 0 ซึ่งจะตัวที่เป็นอัตราส่วนกับองค์ประกอบอื่นๆที่เหลืออีก 8 ตัว ภายในเมทริกซ์ของการแปลงแบบ Projective

Group	Matrix	Distortion
Projective	$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$	
Affine	$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & t_x \\ a_{21} & a_{22} & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
Similarity	$\begin{bmatrix} sr_{11} & sr_{12} & t_x \\ sr_{21} & sr_{22} & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
Euclidean	$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	

รูปที่ 2.33 คุณสมบัติและลักษณะของการแปลงภาพแบบต่างๆ

ส่วนที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างการแปลงแบบ Projective และการแปลงแบบ Affine คือ เวกเตอร์  $V$  ซึ่งจะ เป็น 0 ในการแปลง Affine โดยเวกเตอร์  $V$  นี้จะเป็นส่วนที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากผลของการโปรเจกชัน ในการแปลงแบบอื่นๆที่ได้กล่าวมา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนของการสเกลจะเท่ากันในทุกๆจุดของภาพ แต่ในการแปลงแบบ Projective ในแต่ละตำแหน่งของภาพอัตราส่วนของการสเกลจะไม่เท่ากัน การแปลงแบบ Projective หรือ Homography สามารถแยกองค์ประกอบออกเป็นกลุ่มของการแปลงแบบต่างๆได้เป็น

$$H = H_A H_P = \begin{pmatrix} A & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I & 0 \\ v^T & v \end{pmatrix} \quad (2.45)$$

เมื่อ  $A = R_{(\theta)} R_{(-\phi)} D R_{(\phi)}$  จากสมการที่ 3.61 ดังนั้นจะได้

$$\eta H = T R_\theta R_{-\phi} D R_\phi P \quad (2.46)$$

โดย  $\eta$  คือ  $Sign(h_{33}) / \sqrt{h_{31}^2 + h_{32}^2 + h_{33}^2}$  (Normalized for  $h_{33} = 1$ )

$T$  คือ เมทริกซ์การย้ายตำแหน่ง (Translation)

$P$  คือ เมทริกซ์การโปรเจคทีฟ (Projective)

$R_\theta$  คือ เมทริกซ์ของการหมุน (Rotation)

$S$  คือ เมทริกซ์ของการสเกล (Scaling)

$R_{\pm\phi}$  คือ เมทริกซ์ของการสเกลในแต่ละแกน (Axis alignment)

ซึ่งรายละเอียดและขั้นตอนการแยกส่วนประกอบต่างๆของ Homography สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [15][16] ซึ่งได้อธิบายและแสดงการแยกส่วนประกอบของ Homography โดยการใช่วิธีการแยกค่าเดียว (SVD)

### 2.7.2 การคำนวณและประมาณค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์

วิธีการหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ (Homography Matrix) ที่เป็นการแปลงระหว่างพิกัดจริง (Real World Coordinate) กับพิกัดรูปภาพ (Image Coordinate System) ส่วนมากนิยมใช้ความสัมพันธ์ของจุดที่อยู่บนพิกัดจริงกับพิกัดรูปภาพที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน และเป็นจุดพิกัดที่ทราบค่าเป็นตัวช่วยในการประมาณหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ ( $H$ ) ซึ่งจะเรียกหลักการของการนำความสัมพันธ์ระหว่าง 2 จุดคือ  $P \leftrightarrow P'$  ที่อยู่บนระนาบพิกัดจริงกับระนาบพิกัดของภาพมาใช้เพื่อประมาณค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ ( $H$ ) ว่า Direct Linear Transformation (DLT)[9][10] ดังนั้นจากสมการที่ 3.47 สามารถนำมาเขียนได้ใหม่เป็น

$$p' = Hp \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $p$  เป็นจุดที่อยู่บนระบบพิกัดของภาพ (Image Coordinate) และ  $p'$  เป็นจุดที่อยู่บนระบบพิกัดจริง (Real World Coordinate) ซึ่งสามารถจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบของพิกัดโฮโมจีเนียสได้เป็น

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

และ

$$p' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

และ  $H$  เป็นโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ (Homography Matrix) ซึ่งเป็นเมทริกซ์โฮโมจีเนียสขนาด  $3 \times 3$  โดยเมทริกซ์  $H$  จะประกอบด้วยพารามิเตอร์อยู่ทั้งหมด 9 ตัวคือ

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.47) จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

นำ  $H$  คูณกับ  $p$  จะได้สมการใหม่ 3 สมการ คือ

$$x' = h_{11}x + h_{12}y + h_{13}w \quad (2.52)$$

$$y' = h_{21}x + h_{22}y + h_{23}w \quad (2.53)$$

$$w' = h_{31}x + h_{32}y + h_{33}w \quad (2.54)$$

เมื่อต้องการให้อยู่ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน  $(x, y)$  นำสมการที่ (2.54) หารสมการที่ (2.52) และ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่เชิงพาณิชย์ในกรณี  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.53) จะได้

$$\frac{x'}{w'} = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}w}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}w} \quad (2.55)$$

$$\frac{y'}{w'} = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}w}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}w} \quad (2.56)$$

เมื่อ  $w$  และ  $w'$  เป็นจุดที่สมมุติขึ้นมาในพิกัดโฮโมจีเนียส โดยที่ค่า  $w = w' = 1$  จัดรูปแบบสมการใหม่ได้เป็น

$$x' = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad (2.57)$$

$$y' = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad (2.58)$$

จัดสมการใหม่ให้เป็นสมการโฮโมจีเนียส (Homogeneous Equations)

$$h_{11}x + h_{12}y + h_{13} - h_{31}x x' + h_{32}y x' - h_{33}x' = 0 \quad (2.59)$$

$$h_{21}x + h_{22}y + h_{23} - h_{31}x y' + h_{32}y y' - h_{33}y' = 0 \quad (2.60)$$

จากสมการที่ (3.59) และสมการที่ (3.60) จัดรูปแบบใหม่เป็น

$$Ah = 0 \quad (2.61)$$

โดยกำหนดให้  $A = [ ]_{2 \times 9}$

$$A = \begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'x & -x'y & -x' \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -y'x & -y'y & -y' \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

เอกสารนี้และกำหนดให้  $h = [ ]_{9 \times 1}$  ได้รับความใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h = (h_{11} \ h_{12} \ h_{13} \ h_{21} \ h_{22} \ h_{23} \ h_{31} \ h_{32} \ h_{33})^T \quad (2.63)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.61 จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'x & -x'y & -x' \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -y'x & -y'y & -y' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

จากสมการที่ (3.64) จะเห็นว่าแต่ละจุด  $p$  และ  $p'$  ที่สัมพันธ์กันบนระนาบทั้งสองจะให้สมการ 2 สมการ เนื่องจากโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์  $H$  จะมี 8 dof (8 degrees of freedom) และมีเฟกเตอร์การสเกล ( $h_{33} = \text{non-zero scale factor}$ ) ซึ่งสามารถที่จะกำหนดให้เป็นค่าใดๆโดยส่วนมากเท่ากับ 1 (Homogeneous Matrix) จากตัวแปร  $h_{ij}$  ที่ไม่ทราบค่าทั้งหมด 9 ตัว ดังนั้นจะเหลือตัวแปร  $h$  ที่ไม่ทราบค่าอยู่ 8 ตัว ซึ่งในการแก้สมการต้องใช้จุดที่ทราบค่าเท่ากับ 4 จุดเพื่อให้ได้สมการทั้งหมด 8 สมการจึงจะสามารถแก้ปัญหาหาค่า  $H$  ถ้าในกรณีที่ใช้จุดที่ทราบค่ามากกว่า 4 จุดซึ่งจะเรียกว่าเป็น over-determined solution ที่สามารถแก้ปัญหาหาค่า  $H$  ได้เช่นกัน ดังนั้นในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าของเมทริกซ์  $H$  ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์  $h_{ij}$  จำเป็นต้องใช้จุดบนทั้งสองระนาบที่สัมพันธ์กันอย่างน้อย 4 จุดหรือ  $n \geq 4$  เพื่อคำนวณหาโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1x_1 & -x'_1y_1 & -x'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_nx_n & -x'_ny_n & -x'_n \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -y'_1x_1 & -y'_1y_1 & -y'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -y'_nx_n & -y'_ny_n & -y'_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

ในการคำนวณหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ (Homography Matrix) สามารถที่จะหาคำตอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมาได้ โดยใช้การแก้ปัญหาของระบบสมการเชิงเส้นด้วยการประมาณค่าแบบ Least-Squares (LS) หรือใช้การแยกส่วนประกอบของเมทริกซ์  $A = UDV^T$  ซึ่งเป็นการหา Singular value decomposition (SVD) ของเมทริกซ์  $A$  โดยค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ที่เป็นคำตอบของสมการจะได้จากหลักสุดท้ายของเมทริกซ์  $V$  ที่ได้จากค่า SVD ของเมทริกซ์  $A$  [9][15][17]

การแปลงโฮโมกราฟฟีซึ่งเป็นการแปลงของระนาบ 2 มิติจะถูกนำมาใช้ในการแปลงพิกัดของภาพที่ได้จากกล้อง ซึ่งเป็นภาพวัตถุที่มีลักษณะคล้ายกับถูกแบ่งส่วนออกเป็น 2 มิติจากการใช้หลักการแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ เมื่อทำการแปลงพิกัดของวัตถุในภาพเป็นพิกัดจริงได้โดยการใช้การแปลงแบบโฮโมกราฟฟีก็จะสามารถนำพิกัดเหล่านี้ไปคำนวณหาเป็นขนาดและพื้นที่แต่ละส่วนของวัตถุ รวมทั้งพื้นที่โดยรวมเชิงปริมาตรของวัตถุนั้นๆได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

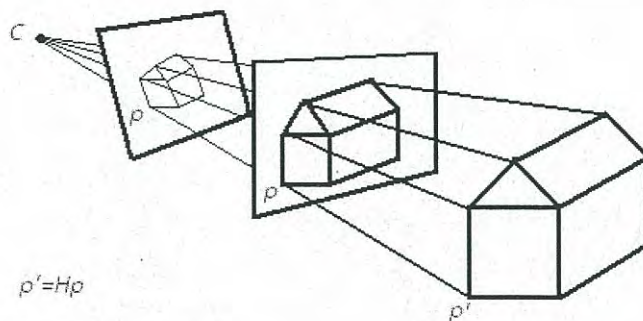
## การออกแบบระบบตรวจสอบคุณภาพภาพ บนฝาคอบฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์โดยใช้แสงเลเซอร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการศึกษาวิจัยและขั้นตอนการออกแบบระบบตรวจสอบคุณภาพภาพบนฝาคอบฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์โดยใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัล ร่วมกับการใช้แสงเลเซอร์ แบ่งส่วนวัตถุ โดยใช้วิธีการหาจุดศูนย์กลาง (Central of Gravity: COG) และการวาดเส้นด้วยอัลกอริทึมแบบ Bresenham ร่วมกับ ตัวกรองแบบซาวิทซกี-โกลีย์ (Savitzky-Golay Filter) แล้วทำการคำนวณพื้นที่โดยอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลของภาพให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) ซึ่งได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วน คือ หลักการตรวจสอบคุณภาพภาพของวัตถุตัวอย่างที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจสอบคุณภาพนี้ และขั้นตอนการประมวลผลและการทำงานของระบบตรวจวัดคุณภาพของวัตถุตัวอย่าง และภาพบนฝาคอบฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ที่ได้นำเสนอในงานวิจัย

### 3.1 หลักการตรวจวัดคุณภาพของภาพที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงหลักการในการตรวจวัดคุณภาพของวัตถุตัวอย่าง และบนฝาคอบฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ ซึ่งสามารถหาตรวจจับขอบภาพพร้อมโดยรวมของวัตถุได้เป็นต้น

3.1.1 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีโฮโมกราฟฟีและแสงเลเซอร์แบ่งส่วนในการตรวจวัดขนาดวัตถุ แนวคิดที่ได้นำมาใช้ในการตรวจวัดวัตถุในงานวิจัยนี้คือการนำหลักการของการฉายแสงเลเซอร์บนวัตถุ เพื่อเป็นการแบ่งวัตถุที่เป็น 3 มิติออกเป็นแผ่นบางๆตามระนาบของลำแสงเลเซอร์ที่ฉายไปบนวัตถุซึ่งเป็นลักษณะระนาบ 2 มิติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.1 แนวคิดที่นำมาใช้ในการตรวจวัดวัตถุ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การฉายแสงเลเซอร์แบบเส้นบนวัตถุนอกจากแบ่งวัตถุเป็นส่วนๆแล้วยังทำให้ได้คุณลักษณะของวัตถุตามพื้นผิวของวัตถุด้วย ซึ่งสิ่งที่ได้จากแสงที่ฉายบนพื้นผิววัตถุจะบอกถึงความกว้างและความหนาของวัตถุ เมื่อจับภาพด้วยกล้องวิดีโอรูปภาพของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จะบอกถึงขนาดของวัตถุในหน่วยของพิกเซลที่เกิดขึ้นบนตัวเซนเซอร์ (CCD) ดังนั้นในการแปลงพิกัดขนาดของวัตถุที่อยู่ในหน่วยพิกเซลของภาพ ให้เป็นขนาดที่เป็นพิกัดจริงในหน่วยของหน่วยของหน่วยวัดมาตรฐาน (Metric system) เช่น มิลลิเมตร เซนติเมตร จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพมาช่วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอและใช้ทฤษฎีของโฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์ม จะเป็นการแปลงพิกัดของจุดระหว่างระนาบ 2 มิติใดๆ ในงานวิจัยนี้จะทำการแปลงพิกัดของจุดบนระนาบของภาพ (Image Plane) ให้เป็นพิกัดจริง (Real World Coordinate) เพื่อทำการคำนวณหาปริมาตรของวัตถุจากจำนวนของพิกเซลที่อยู่บนภาพที่ได้จากการแปลงพิกัดของวัตถุในหน่วยวัดมาตรฐาน ส่วนความยาวของวัตถุนั้นได้จากการทำการเลื่อนวัตถุแล้วใช้กล้องวิดีโอจับภาพในเฟรมติดไปจนครบทั้งวัตถุ เมื่อนำภาพแต่ละเฟรมมารวมกันได้เป็นความยาวของวัตถุนั้นๆ ซึ่งความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุจะต้องสัมพันธ์กับความเร็วในการจับภาพของกล้องวิดีโอ เช่น กล้องสามารถจับภาพด้วยความเร็ว 30 fps ดังนั้นความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 35 mm/Sec เพื่อที่จะให้ได้ความละเอียดในด้านของความยาวของวัตถุ 1 mm/Frame หรือถ้าหากมีความต้องการความละเอียดในการวัดความยาวของวัตถุที่ 0.5 mm/Frame ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุต้องมีค่าเท่ากับ 15 mm/Sec

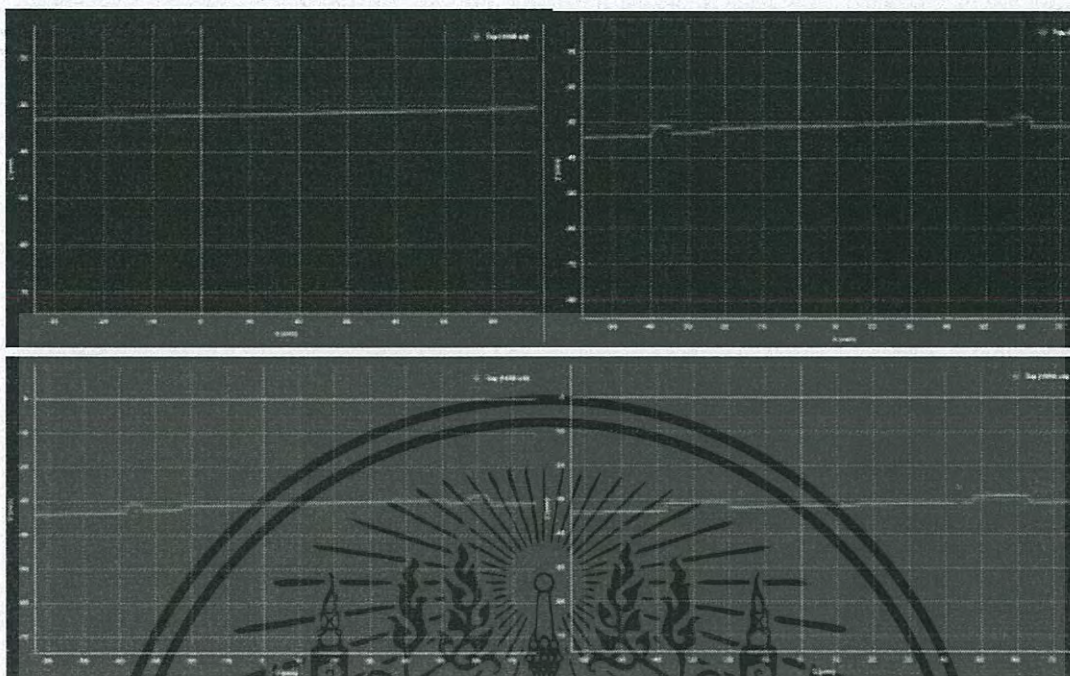
$$L = \frac{O_s}{C_s} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $L$  คือ ค่าความละเอียดในการตรวจวัดความยาววัตถุ (mm/Frame)  
 $O_s$  คือ ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ (mm/S)  
 $C_s$  คือ ค่าความสามารถจับภาพด้วยความเร็วของกล้อง (Frame/S)

จากสมการที่ 3.1 แสดงถึงวิธีการหาค่าของความละเอียดในการตรวจวัดความยาววัตถุต่อ 1 เฟรมภาพ เพื่อที่จะนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาผลรวมของพื้นที่รวมในเชิงปริมาตร โดยจากการทดลองภาพลำแสงเลเซอร์ตัดขวางที่ได้มีแสงรบกวนจากภายนอกเข้ามา ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการแก้ปัญหา โดยการติดตั้งตัวกรองแสงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร เพื่อตัดแสงรบกวนจากภายนอก

### 3.1.2 การวิเคราะห์ปริมาตรของวัตถุจากเส้นแสงเลเซอร์

เมื่อทำการฉายแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของวัตถุจะทำให้เส้นแสงเลเซอร์เปลี่ยนแปลงไปตามพื้นผิวของวัตถุนั้นๆ ซึ่งสามารถนำแสงเลเซอร์ที่ได้จากการมองด้วยกล้องซีซีดี มาวิเคราะห์ถึงรูปทรงของวัตถุได้ โดยงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบจากวัตถุตัวอย่างและขึ้นงานจริงโดยลักษณะของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้เมื่อฉายลงบนพื้นผิวของวัตถุได้แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงระบบแสงเลเซอร์ตัดขวางที่ตกกระทบกับพื้นผิวของวัตถุตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ

ในการหาปริมาตรของวัตถุจำเป็นต้องแปลงพิกัดภาพให้อยู่บนพิกัดจริงเสียก่อน โดยการใช้ไฮโมกราฟพีทธานส์ฟอร์มในการแปลงจุดพิกัดเหล่านี้ จากนั้นก็จะทำการนับจำนวนพิกเซล เพื่อที่จะทำการแปลงพิกเซลที่ได้มาทำการแปลงเป็นพื้นที่ในหน่วยของหน่วยวัดมาตรฐานของภาพที่ได้ต่อเวลา

ดังนั้น เมื่อนำพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนมารวมกัน ก็จะได้เป็นพื้นที่โดยรวมหรือปริมาตรของวัตถุ ซึ่งสามารถหาได้โดย

$$V = \sum_{n=1}^L A_n \quad (4.2)$$

เมื่อ  $V$  คือ ปริมาตรหรือพื้นที่รวมของวัตถุ

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุ

$L$  คือ จำนวนเฟรมที่มีวัตถุตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์หรือความยาวของวัตถุ

### 3.2 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบตรวจสอบคุณภาพการ

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการออกแบบระบบการตรวจวัดขนาดของวัตถุ การวัดขนาดวัตถุที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สามารถใช้งานได้ฟรีโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายใด ๆ ในอนาคตหากมีค่าใช้จ่ายในการนำเสนองานวิจัยนี้จะใช้ลักษณะการสแกนวัตถุโดยใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ ดังนั้นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

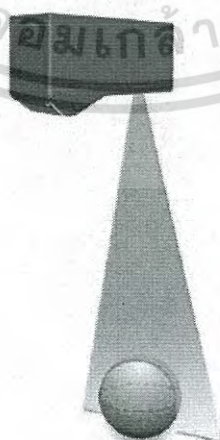
อุปกรณ์ที่สำคัญสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ตรวจจับภาพโดยใช้กล้องซีซีดีและแสงเลเซอร์แบบเส้น อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ และคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการประมวลผล โดยระบบที่ออกแบบรวมทั้งตำแหน่งการติดตั้งแสดงอยู่ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจคุณภาพของกา

### 3.2.1 แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้เลเซอร์ไดโอดแบบเส้นติดตั้งพร้อมกล่องของบริษัท Gocator.,LTD. ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ เส้นของลำแสงมีความหนาของเส้น 0.5 มิลลิเมตร มีความยาวคลื่นระหว่าง 630 ถึง 650 นาโนเมตร (สีแดง) และมีกำลังสูงสุดที่ 5 มิลลิวัตต์



รูปที่ 3.4 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดแบบเส้นที่ใช้ในงานวิจัย

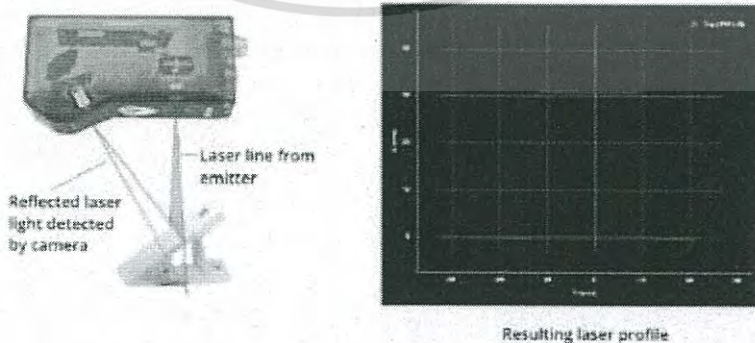
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 อุปกรณ์จับภาพกล้องซีซีดี (CCD Camera)

ในการทดลองอุปกรณ์ตรวจจับลำแสงเลเซอร์ที่ถูกฉายลงบนพื้นผิวของวัตถุตัวอย่าง และผาครอบฮาร์ดิสก์ไดรฟ์ จะใช้อุปกรณ์จับภาพซึ่งถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของระบบ เนื่องจากต้องคำนึงถึงความละเอียดของกล้อง (Resolution) และความเร็วในการจับภาพซึ่งความเร็วในการเก็บภาพของกล้องจะมีต่อความเร็วในการประมวลผล ซึ่งปัจจุบันความเร็วในการเก็บภาพของกล้องมีตั้งแต่ 1-1000 เฟรมต่อวินาทีหรือมากกว่า ซึ่งกล้องที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้กล้องซีซีดี ของบริษัท Gocator รุ่น 2350A-3R-01 ที่มีความละเอียด 1032x778 พิกเซล มีความเร็วในการจับภาพที่ 35 เฟรมต่อวินาที สามารถควบคุมการจับภาพได้จากสัญญาณภายนอก และใช้การเชื่อมต่อแบบ IEEE1394b โดยการกำหนด EtherNet/IP Protocol ในการตั้งค่าของระบบกล้อง และในการติดตั้งยังต้องคำนึงถึงทิศทางในการตรวจจับด้วย ดังนั้นจึงควรติดตั้งโดยที่กล้องทำมุมกับระนาบของเลเซอร์ที่ระหว่าง 70 ถึง 90 องศา โดยกล้องได้ทำการติดตั้งตัวกรองคลื่นแสงย่านสีแดง (620-650 Narrow band pass filter) ไว้ด้วย เพื่อช่วยในการป้องกันแสงรบกวนจากคลื่นแสงย่านความถี่อื่นๆ ที่ไม่ใช่ความถี่ในของคลื่นแสงย่านของสีแดงที่ต้องการตรวจจับ ที่ได้กำเนิดจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดแบบเส้นที่ใช้ในงานวิจัย จากรูปที่ 3.7 แสดงถึงทุกย่านความถี่ของคลื่นแสง

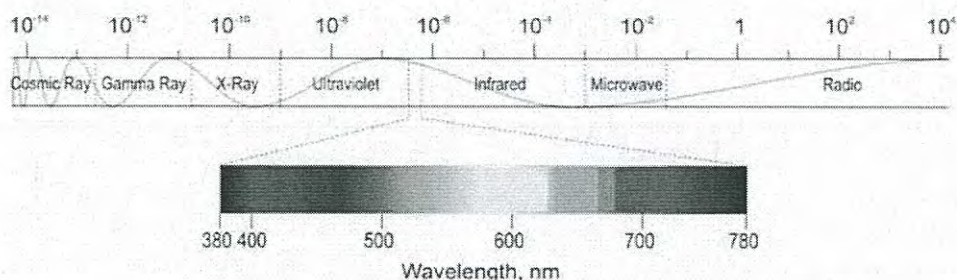


รูปที่ 3.5 กล้อง Gocator รุ่น 2350A-3R-01



รูปที่ 3.6 เลนซ์และตัวกรองคลื่นแสงย่านสีแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

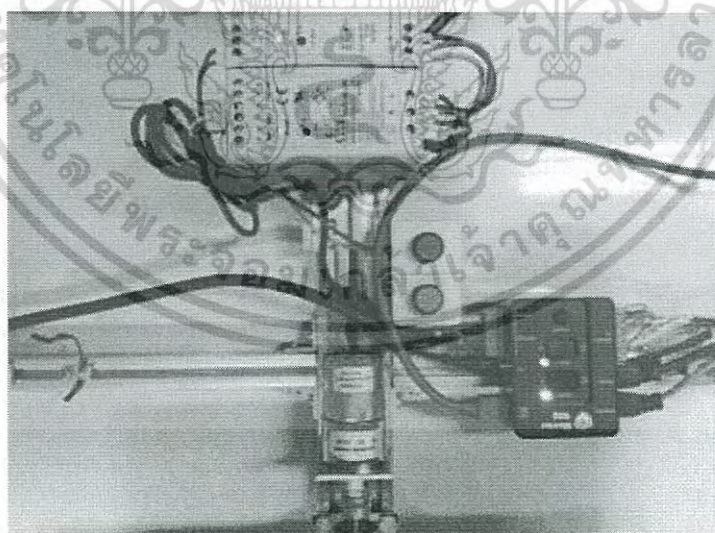


รูปที่ 3.7 แสดงทุกย่านความถี่ของคลื่นแสง

ที่มา: [www.thelia.org.uk](http://www.thelia.org.uk)

### 3.2.3 อุปกรณ์การควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ (Speed Controller)

การเคลื่อนที่ของวัตถุจำเป็นต้องสอดคล้องกับความเร็วในการถ่ายภาพของกล้อง ในการออกแบบใช้ตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงที่ขับเคลื่อนสายพานลำเลียง โดยควบคุมความเร็วของสายพานลำเลียงไว้ที่ 35 mm/Sec เพื่อให้ได้ความละเอียดในการตรวจวัดความยาววัตถุที่ 1 mm/frame โดยหากจากสมการที่ 3.1 งานวิจัยนี้จะใช้ตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์ซึ่งใช้ขับเคลื่อนสายพาน แบบควบคุมภายนอก Trigger Delay ซึ่งสามารถที่จะปรับความเร็วของมอเตอร์ ทำให้สามารถที่จะควบคุมความเร็วของสายพานตามที่ต้องการทดลองได้ การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุได้แสดงดังรูปที่ 3.8

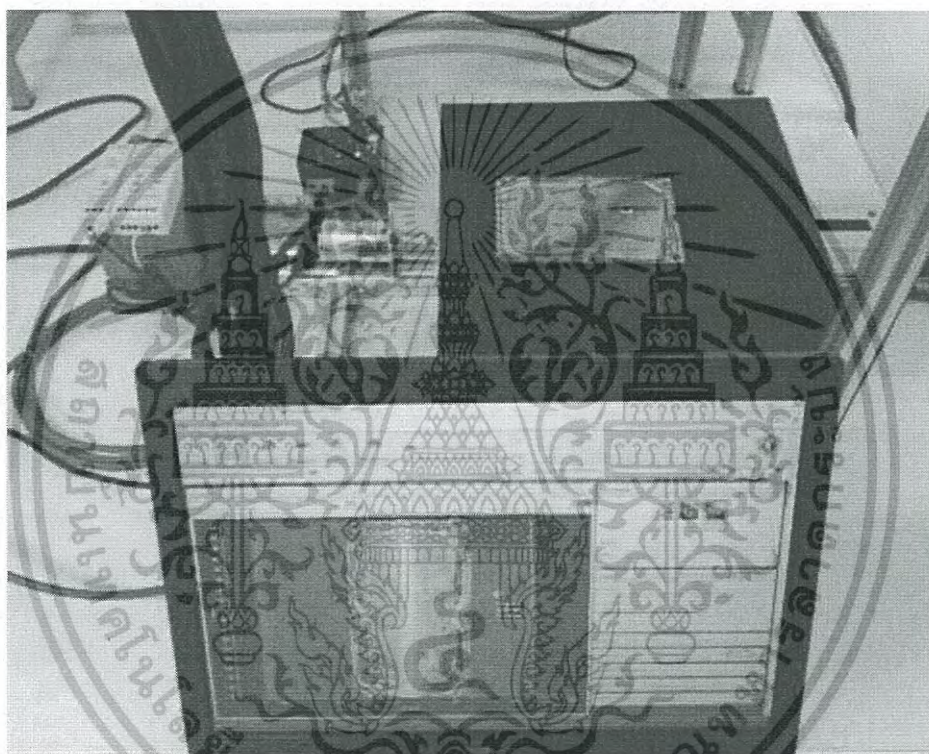


รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ

### 3.2.4 อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

การประมวลผลภาพที่ได้จากกล้องเพื่อทำการหาขนาดของวัตถุนั้นจะใช้คอมพิวเตอร์ในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ด้านการค้า ประมวลผลโดยผ่านทางโปรแกรมที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม LabVIEW ไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) เวอร์ชัน 2013 ของ National Instrument ในการเขียนโปรแกรมเพื่อทดสอบและใช้ในการตรวจวัดปริมาณของวัตถุ เนื่องจากโปรแกรม LabVIEW มีฟังก์ชันที่เกี่ยวกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์และประมวลผลภาพให้เลือกมากมายจึงช่วยลดเวลาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมลงมากนอกจากนั้นยังสามารถทำการวิเคราะห์ผลการทำงานและประสิทธิภาพในการทำงานของโปรแกรมที่เขียนขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบและพัฒนาโปรแกรม จากรูปที่ 3.9 แสดงโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในการประมวลผลภาพแบบต่อเนื่อง รับภาพสีจากกล้องซีซีดี

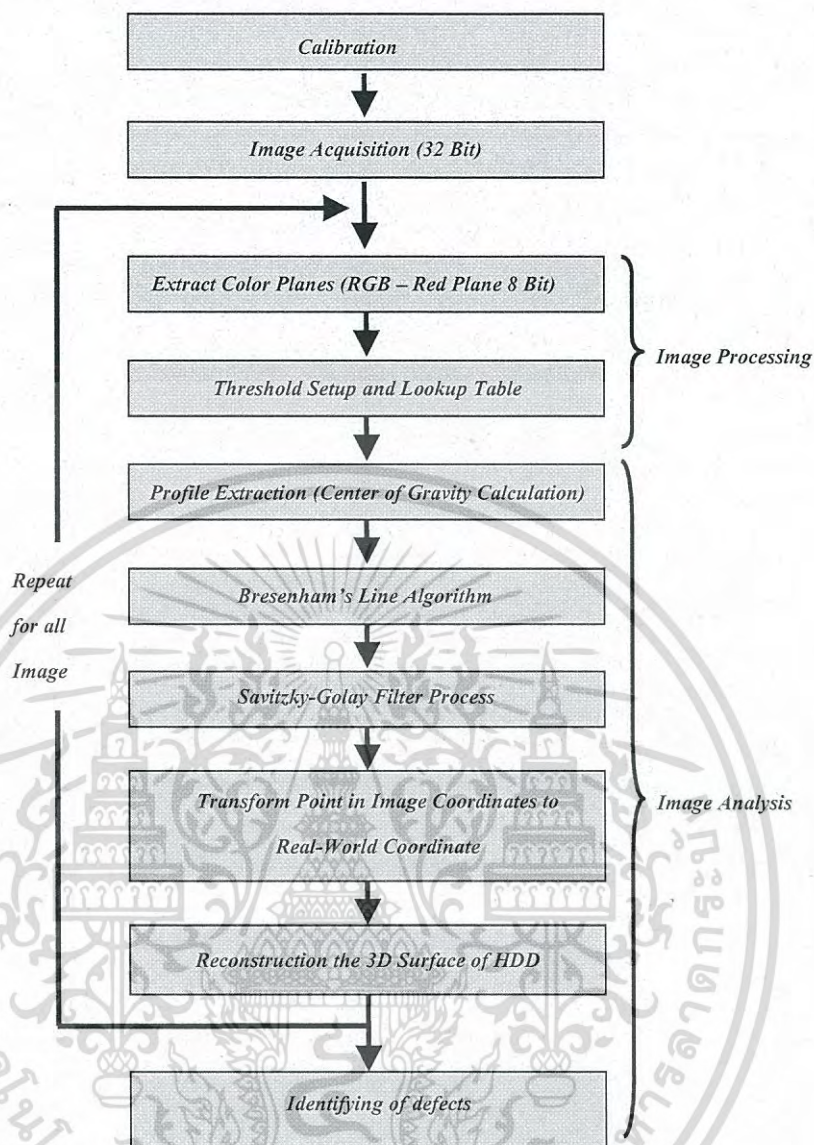


รูปที่ 3.9 แสดงโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในการประมวลผลภาพ

### 3.3 ขั้นตอนการประมวลผลและการทำงานของระบบตรวจสอบคุณภาพการ

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจวัดขนาดของวัตถุ ซึ่งการทำงานจะแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนได้ดังนี้คือ การสอบเทียบ การเก็บข้อมูลภาพของวัตถุที่ตรวจวัด การประมวลผลภาพ การวิเคราะห์ภาพเพื่อตรวจสอบข้อบกพร่องและคุณภาพรอยการโดยรวมของวัตถุตัวอย่าง โดยขั้นตอนและลำดับการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจวัดของวัตถุจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.10

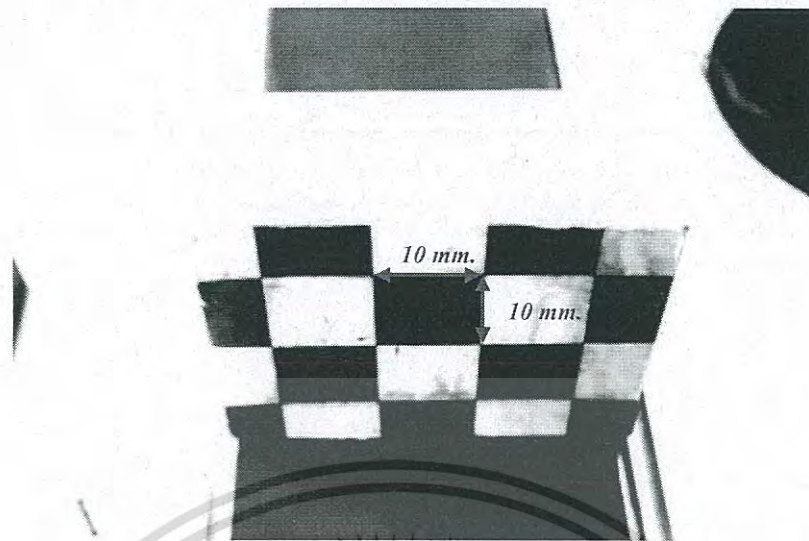
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การประมวลผลของระบบตรวจสอบคุณภาพกาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

### 3.3.1 การสอบเทียบ

การสอบเทียบเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งในการตรวจวัดขนาดของวัตถุเพราะจะมีผลกับความผิดพลาดในการตรวจวัด การสอบเทียบนี้เป็นการหาค่าของโฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์มซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการแปลงจุดพิกัดภาพเป็นพิกัดจริงจากที่ได้กล่าวถึงการหาค่าของโฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์มไว้ในบทที่ 2 การหาค่าของโฮโมกราฟฟิเมทริกซ์สามารถหาได้โดยการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของจุดบนพิกัดภาพกับตำแหน่งของจุดที่อยู่บนพิกัดจริงที่ทราบค่าตำแหน่งของจุดอย่างน้อย 4 จุดเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าโฮโมกราฟฟิเมทริกซ์ ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงใช้ตารางหมากรุกในการสอบเทียบ ซึ่งในเอกสารแต่ละช่องของตารางหมากรุกจะมีความกว้างและความยาวเท่ากับ 30 มิลลิเมตรไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณวาทกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ตารางหมากรุกขนาด  $10 \times 10 \text{ mm}$  ที่ใช้ในการสอบเทียบบนนมูกกล้อง

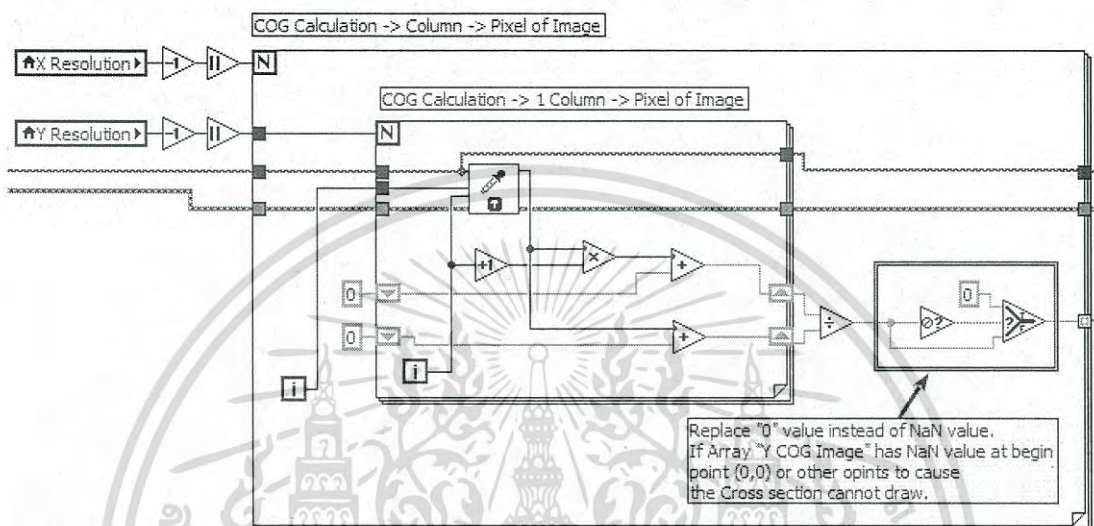
ในการสอบเทียบจะต้องวางตำแหน่งของแผ่นตารางหมากรุกที่ใช้ในการสอบเทียบที่ระนาบเดียวกับระนาบของเส้นแสงเลเซอร์ที่จะฉายลงบนวัตถุ จากนั้นก็จะทำการบันทึกภาพโดยกล้องที่ใช้ในการตรวจวัดวัตถุซึ่งจะทำมุมเดียวกับระนาบของแสงเลเซอร์ เมื่อได้ภาพของแผ่นตารางที่ใช้ในการสอบเทียบแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดตำแหน่งทั้ง 4 จุดบนจุดภาพที่ได้จากภาพของแผ่นตารางที่ใช้ให้สอดคล้องกับตำแหน่งพิกัดจริงของตารางที่ใช้ ในการกำหนดจุดซึ่งเป็นบริเวณมุมในแต่ละช่องของตารางหากทำการกำหนดเองด้วยสายตาอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้หากจุดที่กำหนดไม่ใช่บริเวณที่เป็นมุมจริงๆของตาราง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำทฤษฎีการหามุมของแฮร์ริส (Harris Corner Detector) [18] ซึ่งเป็นวิธีการหาจุดพิกัดที่เป็นส่วนหนึ่งของมุมจากบริเวณที่อยู่ใกล้เคียงจากจุดที่เรากำหนดลงไปบนภาพตารางที่เราใช้สอบเทียบ การใช้ทฤษฎีการหามุมของแฮร์ริสมาช่วยในการกำหนดจุดพิกัดที่เป็นมุมของตารางช่วยให้การสอบเทียบมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

### 3.3.2 การประมวลผลภาพ

หลังจากที่ทำการสอบเทียบเสร็จสิ้นแล้วก็จะเข้าสู่ขั้นตอนในการประมวลผลภาพจากการรับภาพมาจากกล้องซีซีดี และทำการปรับปรุงภาพก่อนการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด โดยใช้กระบวนการดังที่แสดงตามรูปที่ 3.10 ในขณะที่รับค่าจากกล้องเฟรมแรก โปรแกรมประมวลผลลำดับแรกคือกระบวนการดึงโครงร่างของแสงเลเซอร์สีแดงที่ต้องการออกจากภาพ ภาพที่ได้จะเป็นภาพ 8-bit ระดับสีเทา โดยค่าเทรชโฮลในตัวโปรแกรมจะทำการปรับค่าด้วยมือ (Manual Threshold) เพื่อหาค่าเทรชโฮลของภาพที่เหมาะสม หลังจากทำการปรับค่าเทรชโฮลให้เส้นแสงเลเซอร์ที่มีค่าความเข้มของแสงอยู่ในช่วงการวัด ตามที่ต้องการจากภาพและเปลี่ยนภาพให้เป็นเฉพาะสีดำกับสีขาวเท่านั้น จากนั้นนำเส้นแสงที่ได้มาผ่านกระบวนการหาจุดศูนย์กลาง (Central of Gravity: COG) คือการหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่อผู้เช่าเห็นหน้าใบเสร็จประจำเดือนการเช่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยของพิกัดของภาพจากแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนวัตถุ เนื่องจากแสงเลเซอร์มีความกว้างและความเข้มแสงที่ไม่เท่ากันทุกจุด การหา COG คือการหาค่าถ่วงน้ำหนัก ในแต่ละคอลัมน์ของภาพ เพื่อทำการแยกพิกัดที่สอดคล้อง (Profile Extraction) กับวัตถุมากที่สุด จากตัวอย่างการหา COG คือการหาจุดในแต่ละคอลัมน์ที่สัมพันธ์กับแสงเลเซอร์



รูปที่ 3.12 แสดง COG Calculation บนโปรแกรม LabVIEW

จากรูปที่ 3.12 แสดง COG Calculation ของโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในการคำนวณหาเส้น COG เป็นวิธีการหาจุดศูนย์กลาง (Central of Gravity: COG) คือการหาค่าเฉลี่ยของพิกัดของภาพ จากแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนวัตถุ เนื่องจากแสงเลเซอร์มีความกว้างและความเข้มแสงที่ไม่เท่ากันทุกจุด การหา COG คือการหาค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละคอลัมน์ของภาพ เพื่อทำการแยกพิกัดที่สอดคล้อง (Profile Extraction) กับวัตถุมากที่สุด

จากการทดสอบหลังจากที่ได้เส้นแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนวัตถุแล้วจะเห็นได้ว่าภาพของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบ ที่รับเข้ามาประมวลผล มีบางภาพเส้นขาดหายไปเป็นผลอันเนื่องมาจากฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดฟ์ที่นำมาทดสอบเกิดการสะท้อนแสง จึงทำให้กล้องจับภาพเส้นของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบขาดไปในบางขณะจึงได้นำเอาหลักการของอัลกอริทึมเส้นตรง Bresenham เข้ามาช่วยเติมจุดที่ขาดหายของเส้นแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบหลังจากที่ผ่านกระบวนการ COG ทำให้เส้นของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบสมบูรณ์ใกล้เคียงกับโครงร่างจริงของวัตถุจริงที่ใช้ในการทดลอง

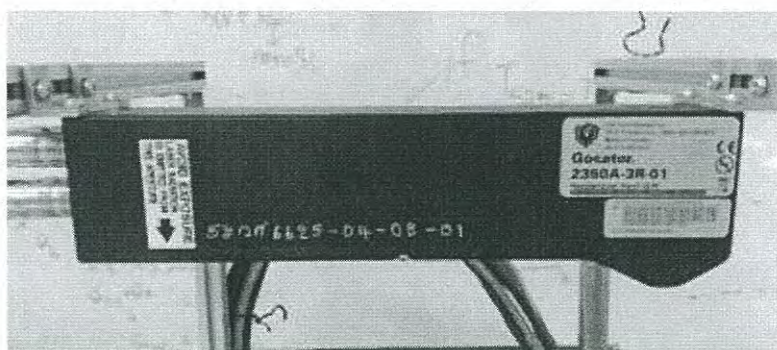
## บทที่ 4

### การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

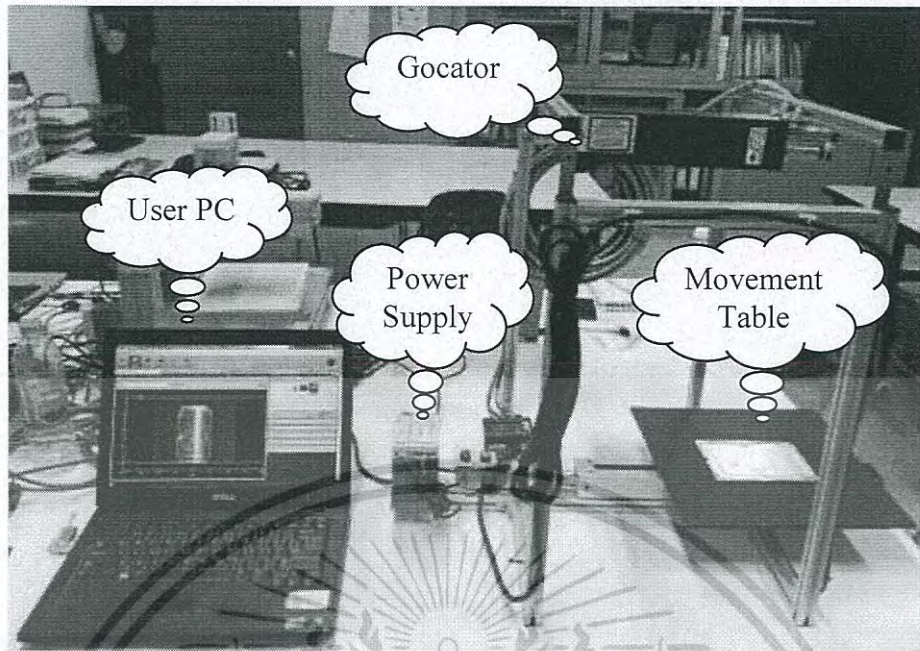
ในบทนี้จะเป็นการทดลองและวิเคราะห์ผลจากการทดลองที่ได้นำเอาระบบตรวจสอบคุณภาพ รอยกวอบนฝาคาร์บอนไฮดรอกไซด์ โดยใช้เทคนิคแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอมาทำการ ทดสอบ เพื่อดูประสิทธิภาพและความแม่นยำของระบบตรวจสอบร่องลักษณะเส้นกาวแล้วทำการ เปรียบเทียบ กรณี การประมวลผลแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของการแสดงผลแบบต่อเนื่องโดยใช้แสง เลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ เพื่อการทดลองวัดและตรวจสอบคุณภาพรอยกวอบนวัตถุจากวัตถุตัวอย่าง และ ตรวจสอบความบกพร่อง ของรอยกวอบนแต่ละกรณี เพื่อทำการแยกแยะชิ้นงานดีและเสียได้

#### 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองจะใช้โปรแกรมที่ออกแบบจากโปรแกรม LabVIEW เวอร์ชัน 2013 ของ National Instrument ให้ระบบที่ออกแบบสามารถที่จะตรวจสอบค่าความถูกต้องของวัตถุตัวอย่างใน ข้อบกพร่องโดยรวม เชิงคุณภาพของรอยกวอบนอย่างต่อเนื่องในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากล โดยการ ประมวลผล บนคอมพิวเตอร์ และใช้อุปกรณ์จับภาพกล้องซีซีดี (CCD Camera) เป็นตัวเก็บ ข้อมูลภาพ ของบริษัท Gocator รุ่น 2350A-3R-01 ซึ่งมีความละเอียด 1032x778 พิกเซล มีความเร็ว ในการจับภาพที่ 35 เฟรมต่อวินาที สามารถควบคุมการจับภาพได้จากสัญญาณภายนอก และใช้การ เชื่อมต่อแบบ EtherNet/IP Protocol ในการติดตั้งกล้องจะต้องคำนึงถึงการบัดบังด้วย ดังนั้นจึงควร ติดตั้งโดยที่กล้องทำมุมกับระนาบของเลเซอร์ที่ระหว่าง 70 ถึง 90 องศา โดยภายในกล้องจะมีการ ติดตั้งตัวกรองคลื่นแสงย่านสีแดง (620-650 Narrow band pass filter) เพื่อช่วยในการป้องกันแสง รับกวอนจากคลื่นแสงย่านความถี่อื่นๆ ที่ไม่ใช่ความถี่ในของคลื่นแสงย่านของสีแดงที่ต้องการตรวจจับ จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ใช้แสงเลเซอร์แบบเส้นความยาวคลื่น 650 nm ส่วนอุปกรณ์ควบคุมการ เคลื่อนที่ของวัตถุเป็นสายพานใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นตัวขับเคลื่อน สอบเทียบโดยใช้แผ่นตาราง หมากรุกลีขาวดำช่องขนาด 10x10 mm.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.1 กล้อง Gocator รุ่น 2350A-3R-01  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

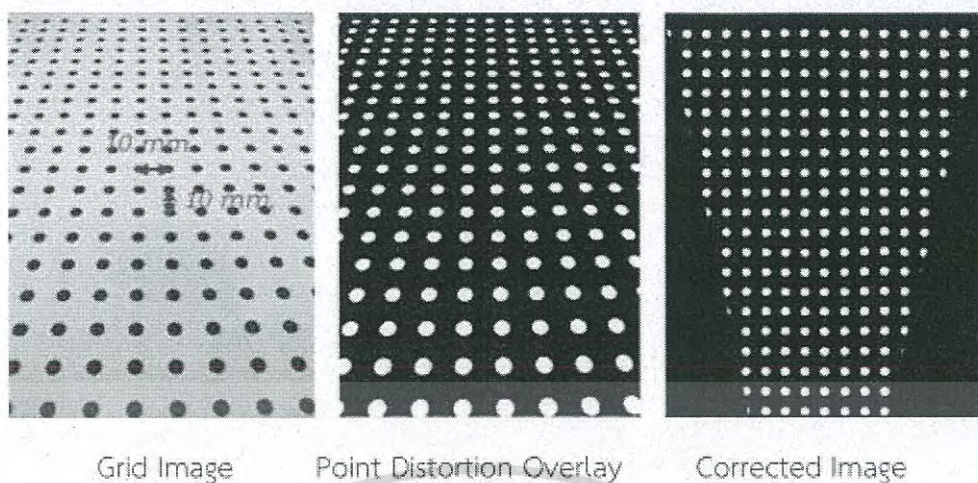


รูปที่ 4.2 ระบบตรวจสอบคุณภาพของกาวบนฝาครอบฮาร์ดิสก์ไดรฟ์



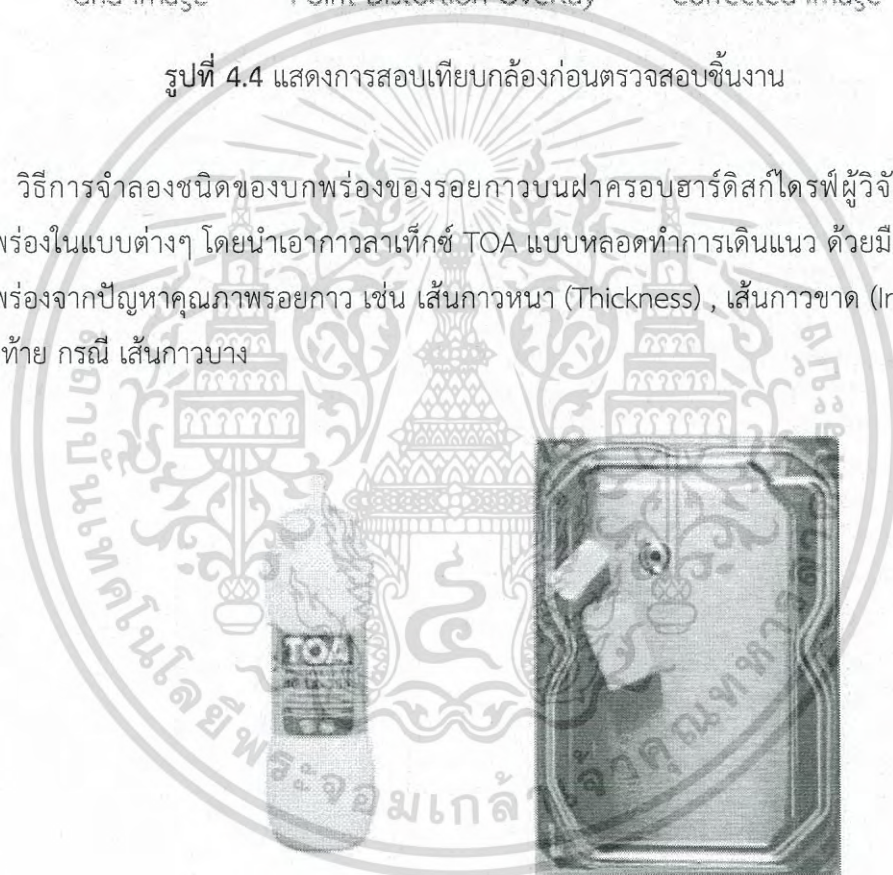
รูปที่ 4.3 วัตถุตัวอย่างในการทดลอง

จากรูปที่ 4.3 แสดง ภาพของวัตถุตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองโดย ระบบที่พัฒนาขึ้นจะสร้างภาพต้นแบบที่เป็นคุณภาพรอยกาวที่ดี เพื่อใช้เปรียบเทียบในการตรวจสอบและวิเคราะห์คุณภาพรอยกาวที่ฉีดเสร็จแล้ว ซึ่งสามารถตรวจสอบรอยกาวได้ที่ความผิดพลาด  $\pm 0.1$  มม. เพื่อคัดแยก ของดีและของเสียออกจากกันได้และใช้เวลาในการประมวลผลภาพน้อยที่สุดหรือไม่เกิน 15 วินาที ซึ่งก่อนการใช้เครื่องตรวจสอบรอยกาวทุกครั้งต้องทำการสอบเทียบ กล้อง ก่อนทำการใช้งานระบบโดยแสดงดังรูปที่ 4.4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงการสอบเทียบกล้องก่อนตรวจสอบชิ้นงาน

วิธีการจำลองชนิดของบัพพร่องของรอยการบนฝาครอบฮาร์ดิสก์ไดรฟ์ผู้วิจัยได้ จำลองข้อบกพร่องในแบบต่างๆ โดยนำเอาเวลาเท็กซ์ TOA แบบหลอดทำการเดินแนว ด้วยมือเพื่อจำลองข้อบกพร่องจากปัญหาคุณภาพรอยการ เช่น เส้นกาวหนา (Thickness) , เส้นกาวขาด (Incomplete) และสุดท้าย กรณี เส้นกาวบาง



รูปที่ 4.5 แสดงเครื่องมือในการจำลองแบบทดลอง

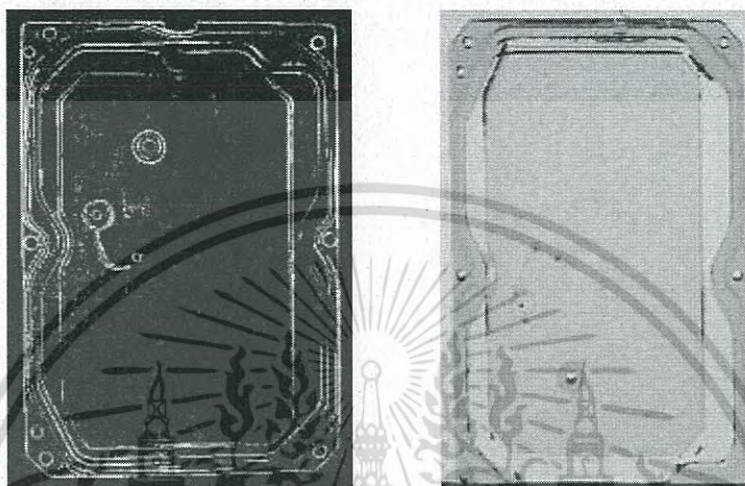
#### 4.2 การทดสอบตรวจวัดคุณภาพการ

ในการทดลองนี้เป็นการทดสอบเพื่อทำการแสดงความแตกต่างของการตรวจสอบคุณภาพรอยการบนฝาครอบฮาร์ดิสก์ไดรฟ์ คือ นำภาพถ่ายจากกล้อง CCD มาทำการประมวลผลโดยได้ทำการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบ กรณีแสดง ผลแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ซึ่งสามารถอธิบายการทดลองได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 เส้นกาวหนา (Thickness)

การทดลองการประมวลผลภาพ เพื่อดูว่าระบบการประมวลผลภาพสามารถตรวจจับชิ้นงานที่มีลักษณะเส้นกาวหนาได้ถูกต้องหรือไม่ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองนำชิ้นงานเข้าตรวจสอบด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นโดยเลือกชิ้นงาน 5 ตัวอย่างซึ่งมีชิ้นงาน 1 ตัวอย่างที่มีชิ้นงานหนาดังแสดงผลจากรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานกรณีเส้นกาวหนา



ก. กรณีรูป 2 มิติ

ข. กรณีรูป 3 มิติ

รูปที่ 4.7 แสดงคุณภาพชิ้นงานจุดที่มีเส้นกาวหนา

จากรูปที่ 4.7 คือข้อมูลภาพที่ได้จากการทำ Segmentation แล้วจึงนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลต้นแบบ ผลที่ได้คือ ระบบการประมวลผล ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ สามารถตรวจสอบได้ว่าชิ้นงานดังกล่าวเป็นงาน เสีย หลังจากนั้นได้ทำการทดลองเปลี่ยนตำแหน่งในการเอกสารตรวจสอบข้อบกพร่องโดยสามารถแสดงผลดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองตรวจสอบชิ้นงานที่มีลักษณะเส้นกาวหนา (ภาพแบบ 2 มิติ)

ครั้งที่	การทดลองเปลี่ยนตำแหน่ง					ผลการตรวจสอบ
	ตำแหน่งที่1	ตำแหน่งที่2	ตำแหน่งที่3	ตำแหน่งที่4	ตำแหน่งที่5	
1	NOT	PASS	PASS	PASS	PASS	ถูกต้อง
2	PASS	NOT	PASS	PASS	PASS	ถูกต้อง
3	PASS	PASS	NOT	PASS	PASS	ถูกต้อง
4	PASS	PASS	PASS	PASS	PASS	ไม่ถูกต้อง
5	PASS	PASS	PASS	PASS	NOT	ถูกต้อง

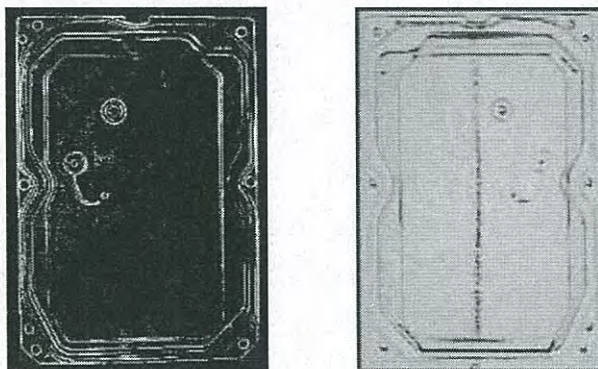
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองตรวจสอบชิ้นงานที่มีลักษณะเส้นกาวหนา (ภาพแบบ 3 มิติ)

ครั้งที่	การทดลองเปลี่ยนตำแหน่ง					ผลการตรวจสอบ
	ตำแหน่งที่1	ตำแหน่งที่2	ตำแหน่งที่3	ตำแหน่งที่4	ตำแหน่งที่5	
1	NOT	PASS	PASS	PASS	PASS	ถูกต้อง
2	PASS	NOT	PASS	PASS	PASS	ถูกต้อง
3	PASS	PASS	NOT	PASS	PASS	ถูกต้อง
4	PASS	PASS	PASS	NOT	PASS	ถูกต้อง
5	PASS	PASS	PASS	PASS	NOT	ถูกต้อง

จากผลการทดลองการประมวลผลภาพในการตรวจสอบชิ้นงานที่เส้นกาวหนาจึงสามารถสรุปได้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจสอบข้อบกพร่องของชิ้นงานตัวอย่างได้อย่างถูกต้อง โดยการประมวลผลภาพแบบ 3 มิติ เท่านั้น ดังแสดงผลการทดลองใน ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ

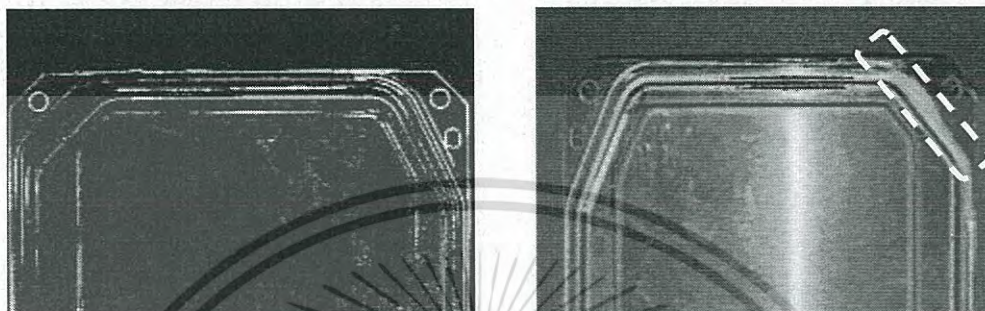
#### 4.2.2 เส้นกาวขาด (Incomplete)

ในการทดลองการประมวลผลภาพ เพื่อดูว่าระบบการประมวลผลภาพสามารถตรวจจับคุณภาพของชิ้นงานที่มีลักษณะเส้นกาวขาดได้ถูกต้องหรือไม่ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองนำชิ้นงานเข้าตรวจสอบด้วยระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยเลือกชิ้นงาน 5 ตัวอย่างโดย ซึ่งมีชิ้นงาน 1 ตัวที่มีชิ้นงานกาวขาดโดยการประมวลผลภาพจะแสดงดังรูปที่ 4.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.8 การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานกรณีเส้นกาวขาด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 คือข้อมูลภาพที่ได้จากการประมวลผลภาพสามารถ แสดงผลเปรียบเทียบกับข้อมูล ต้นแบบ ผลที่ได้คือ ระบบการประมวลผล 2 มิติ และ 3 มิติ สามารถตรวจสอบชิ้นงานในกรณีเส้นกาว ขาดหรือเสียรูปได้ 100 % สามารถตรวจสอบได้ว่าชิ้นงานดังกล่าวเป็นงาน เสีย หลังจากนั้นได้ทำการ ทดลองเปลี่ยนตำแหน่งการตรวจสอบ ได้ผลดังตารางที่ 4.3 และ 4.4



ก. กรณีรูป 2 มิติ

ข. กรณีรูป 3 มิติ

รูปที่ 4.9 การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานจุดที่มีเส้นกาวขาด

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองตรวจสอบชิ้นงานที่มีลักษณะเส้นกาวขาด (ภาพแบบ 2 มิติ)

ครั้งที่	การทดลองเปลี่ยนตำแหน่ง					ผลการตรวจสอบ
	ตำแหน่งที่1	ตำแหน่งที่2	ตำแหน่งที่3	ตำแหน่งที่4	ตำแหน่งที่5	
1	NOT	PASS	PASS	PASS	PASS	ถูกต้อง
2	PASS	NOT	PASS	PASS	PASS	ถูกต้อง
3	PASS	PASS	NOT	PASS	PASS	ถูกต้อง
4	PASS	PASS	PASS	NOT	PASS	ถูกต้อง
5	PASS	PASS	PASS	PASS	NOT	ถูกต้อง

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองตรวจสอบชิ้นงานที่มีลักษณะเส้นกาวขาด (ภาพแบบ 3 มิติ)

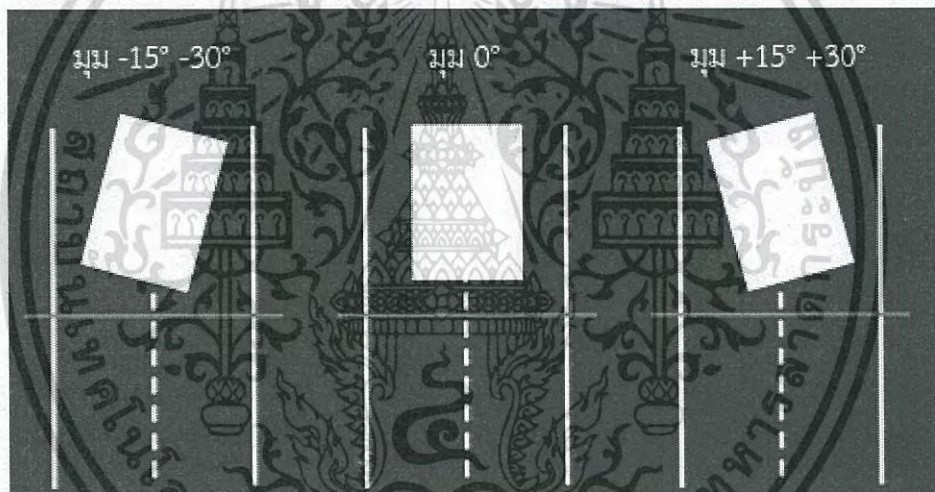
ครั้งที่	การทดลองเปลี่ยนตำแหน่ง					ผลการตรวจสอบ
	ตำแหน่งที่1	ตำแหน่งที่2	ตำแหน่งที่3	ตำแหน่งที่4	ตำแหน่งที่5	
1	NOT	PASS	PASS	PASS	PASS	ถูกต้อง
2	PASS	NOT	PASS	PASS	PASS	ถูกต้อง
3	PASS	PASS	NOT	PASS	PASS	ถูกต้อง
4	PASS	PASS	PASS	NOT	PASS	ถูกต้อง
5	PASS	PASS	PASS	PASS	NOT	ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองการประมวลผลภาพในการตรวจสอบชิ้นงานที่เส้นกาวขาดสามารถสรุปได้ว่าระบบสามารถตรวจสอบได้อย่างถูกต้อง 100% ทั้งแบบการประมวลผลภาพแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ

ในงานวิจัยนี้ ยังได้ทดลองใช้หลักการเปรียบเทียบการตรวจสอบข้อบกพร่องของชิ้นงานตัวอย่างโดย พนักงานผู้มี ประสบการณ์ในการตรวจสอบคุณภาพรอยกาวแล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อดูค่าความผิดพลาดจากการทดสอบเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจสอบคุณภาพกาวของวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งในการทดลองจะทำการตรวจจับการเคลื่อนที่ของวัตถุขณะตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์ และในการทดลองจะใช้การสอบเทียบโดยใช้จำนวนจุดในการสอบเทียบ 4 จุด โดยใช้การประมวลผลภาพแบบ 3 มิติเท่านั้น

และในการวิจัยยังได้มีการทดลองปรับเปลี่ยนมุมและองศา ในการโหลดชิ้นงานก่อนเข้าระบบตรวจสอบข้อบกพร่องของรอยกาว โดยชิ้นงานจะเคลื่อนที่ผ่านชุดลำแสงและทำการตรวจสอบคุณภาพก่อนแสดงผลไปยัง หน้าจอตั้ง แสดงดังตัวอย่างใน รูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานโดยวางวัตถุในมุมและองศาต่างกัน

จากตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 แสดงการตรวจสอบคุณภาพกาวของวัตถุตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ในการทดลองได้ทดสอบการตรวจสอบข้อบกพร่องของวัตถุโดยการวางวัตถุที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 5 มุม คือ มุม -30, -15, 0, +15, +30 องศา ตามลำดับ ที่ความเร็วสายพานคงที่ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองดังในตาราง

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุในการทดสอบ 5 มุม

Defect	Standard Pixels	Results				
		-30	-15	0	15	30
Thickness	350.12	361.13	358.43	352.12	354.23	363.98
Incomplete	298.11	310.11	305.11	299.11	303.02	309.02

เมื่อได้ผลการทดลองการไหลตื้นในงานในมุมและองศาต่างๆกันออกไปหลังจากนั้นเราก็ได้ทำการคำนวณเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ดังแสดงในตารางที่ 4.6

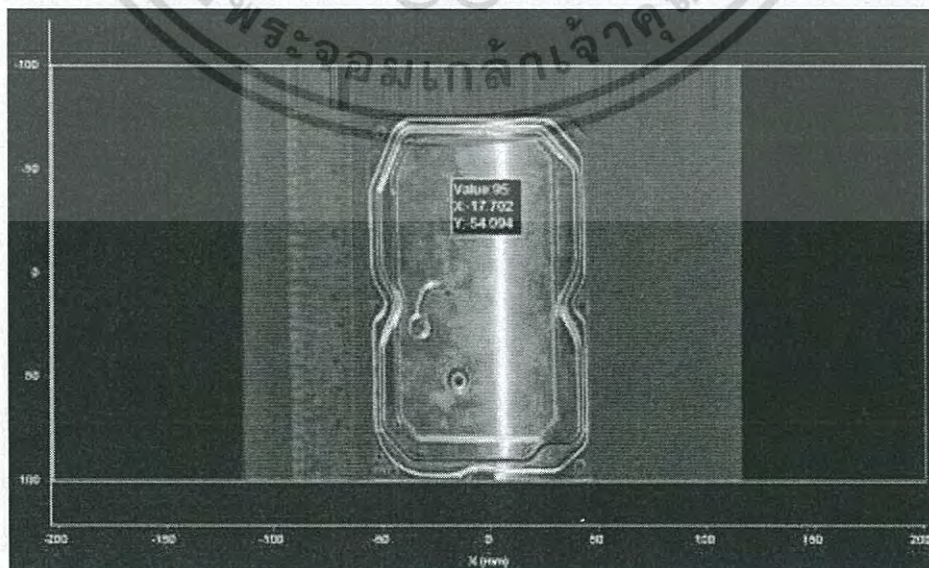
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากผลการทดลองตรวจสอบคุณภาพของวัตถุ

Defect	Pixels Error (%)				
	-30	-15	0	15	30
Thickness	3.05	2.32	0.57	1.16	3.81
Incomplete	3.88	2.29	0.33	1.62	3.53

จากตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 ผลการทดลองการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุ โดยการเปลี่ยนแปลงมุมของวัตถุตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองทำให้ทราบว่ามุมของวัตถุที่เข้ามาทำการตรวจจับ มีผลทำให้การวัดค่าการตรวจวัดคุณภาพพร่องยาวของวัตถุตัวอย่างคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และยังสามารถแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือวัดที่ได้ทำการออกแบบมานี้ สามารถป้อนวัตถุเข้ามาในมุมใดก็ได้ ไม่จำเป็นต้องอยู่ในมุม 0 องศา เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่วัตถุที่ทำการตรวจวัดจะต้องอยู่ในเฟรมของกล้องที่ใช้ในการตรวจวัดทั้งหมดตลอดช่วงเวลาในการตรวจวัด

#### 4.2.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบข้อบกพร่องของกาวแบบ 3 มิติ

ในการทดลองนี้เป็นการทดสอบเพื่อแสดงข้อบกพร่องเชิงคุณภาพของเส้นกาวบนฝาครอบฮาร์ดิสก์ไดรฟ์ ที่สามารถมองเห็นได้เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ชิ้นงานที่เสียได้ดังแสดงผลที่ออกมาเช่น กาวหนา กาวผิดตำแหน่ง และมีก้อนกาวบริเวณเส้นกาว เป็นต้น ซึ่งจากการทดลองแบบ 3 มิติ แสดงให้เห็นจากรูปที่ 4.11 การทดลองสามารถคัดแยกคุณภาพของชิ้นงานแบบต่อเนื่องได้ดีที่สุด ดังที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ ข้างต้นซึ่งในการทดลองด้วยโปรแกรมที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น โดยประมวลผลแบบต่อเนื่องจากภาพที่ได้จากกล้อง ซึ่งทำการตรวจจับการเคลื่อนที่ของวัตถุขณะตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.11 แสดงผลการประมวลผลภาพฝาครอบฮาร์ดิสก์ไดรฟ์แบบ 3 มิติ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองในหัวข้อต่างๆทั้งสอง การทดลองคือ การทดสอบตรวจสอบข้อบกพร่องแบบสร้างภาพต้นแบบแล้วทำการเปรียบเทียบเทียบกับภาพจริงที่ได้รับจากการประมวลผลภาพแบบต่อเนื่องและการทดลองโดยให้วัตถุตัวอย่างโดยการเปลี่ยนแปลงมุมของวัตถุทดสอบ ตัวอย่างการทดสอบ โดยจากการทดสอบสามารถสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

ผลการทดสอบตรวจสอบข้อบกพร่องของกาวแบบสร้างภาพต้นแบบโดยการสลับเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของชิ้นงานที่มีข้อบกพร่อง จากจำนวน 5 ชิ้น โดยผลจากการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าการสลับตำแหน่งไม่มีผลทำให้การตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานที่นำมาทดลอง ทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติ กรณีกาวขาดและสามารถตรวจสอบข้อบกพร่อง กรณีกาวหนาได้แบบ 3 มิติ โดยมีคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือตรวจสอบที่ได้ทำการออกแบบมานี้ สามารถที่จะตรวจจับข้อบกพร่องของรอยกาวได้แบบต่อเนื่องทุกกรณีในแบบ 3 มิติโดยที่ความเร็วที่คงที่ แต่อย่างไรก็ดีถ้าต้องการค่าที่ถูกต้องก็ควรปรับความเร็วของสายพานให้ถูกเหมาะสมกับความเร็วของกล้องที่ใช้ตรวจจับ และการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดความเร็วของสายพาน ก็จะช่วยทำให้ได้ค่าที่วัดถูกต้องและชัดเจนยิ่งขึ้น

ผลจากการทดสอบตรวจสอบข้อบกพร่องของกาวในวัตถุตัวอย่างโดยการเปลี่ยนแปลงมุมของวัตถุทดสอบ โดยจากการทดสอบเปลี่ยนแปลงมุมของวัตถุทดสอบมีผลทำให้การคุณภาพของการตรวจสอบวัตถุ มีค่าคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย ซึ่งการคลาดเคลื่อนเป็นผลมาจากความเร็วของสายพานทดลองที่ 31.5 มิลลิเมตร/วินาที ไม่เชื่อมโยงกับความเร็วของกล้องที่ใช้ในการจับภาพ (35 ภาพ/วินาที) มีผลทำให้ค่าที่ได้จากการปรับมุมของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลกระทบกับการตรวจจับคุณภาพของวัตถุที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีค่าความผิดพลาดที่ได้จากผลการทดลอง แต่ค่าความคลาดเคลื่อนนั้นมีผลอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือวัดที่ได้ทำการออกแบบมานี้ สามารถที่จะบ่อนวัตถุเข้ามาในมุมใดก็ได้ ไม่จำเป็นต้องอยู่ในมุมตรงเพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ดีวัตถุที่นำมาทำการตรวจสอบตำแหน่งในการวางที่ มุม 0 องศาจะได้ผลดีที่สุดและจำเป็นต้องอยู่ในเฟรมของกล้องที่ใช้ในการตรวจวัดทั้งหมดตลอดช่วงเวลาในการตรวจวัด

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการตรวจสอบข้อบกพร่องของกาวในวัตถุผาครอบฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์โดยสร้างภาพเป็นรูปทรง 3 มิติ สำหรับการทดลอง โดยทำการตรวจสอบคุณภาพด้วยระบบวิทัศน์จักรกลเป็นกรณีศึกษา ระบบต้นแบบประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพจากกล้องที่รับภาพของลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุโดยใช้โปรแกรม LabVIEW ของ National Instrument ตัวอย่างจะเคลื่อนที่ไปบนสายพานอย่างต่อเนื่อง ภาพของเลเซอร์ที่ได้ผ่านตัวกรองความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร เพื่อตัดแสงรบกวนจากภายนอกจากนั้นทำการปรับปรุงภาพด้วยวิธีการกรองแบบ Savitzky-Golay Filter เพื่อลดสัญญาณรบกวนและเติมเส้นที่ขาดหายไปให้สมบูรณ์ก่อนการนำมาเปรียบเทียบกับภาพต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นในตัวอย่าง การตรวจสอบอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลส์ของภาพให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) ในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านไบนสายพานลำเลียงพื้นที่หน้าตัดจะถูกนำมารวมกันเป็นปริมาตรของวัตถุ และไปเปรียบเทียบกับภาพต้นแบบ ในข้อบกพร่องแต่ละกรณีไป โดยในการทดลองได้ทำการทดสอบความถูกต้องของระบบ จากวัตถุตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างมาเปรียบกับระบบ 2 มิติและการใช้พนักงานตรวจสอบ ซึ่งระบบแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่ได้นำเสนอมีประสิทธิภาพและความแม่นยำอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งวิธีที่นำเสนอนี้จัดเป็นวิธีการวัดที่ไม่ทำลายวัตถุสามารถประยุกต์สำหรับการตรวจสอบคุณภาพชิ้นส่วนต่างๆ ในงานอุตสาหกรรมได้ทันที และยังสามารถประยุกต์ใช้กับพืชผลทางการเกษตรอื่นๆ ที่มีลักษณะรูปทรงสมมาตรได้เป็นอย่างดี โดยให้ผลลัพธ์ของการวัดในหน่วยสากลและสามารถปรับเปลี่ยนสเกลของการวัดได้ง่ายด้วยการสอบเทียบ

### 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

จากการวิจัยพบปัญหาในการควบคุมความเร็วของสายพานส่งผลให้การตรวจสอบคุณภาพของวัตถุ ในบางขณะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งอาจสามารถแก้ไขโดยการติดตั้งวัดความเร็วสายพานเพื่อนำความเร็วที่เปลี่ยนแปลงมาใช้ในการประมวลค่าอย่างถูกต้อง โดยตัววัดความเร็วสายพานนั้นจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณความเร็วของสายพานไปที่โปรแกรมเพื่อปรับค่าความเหมาะสมในการตรวจสอบคุณภาพซึ่งทำให้ภาพที่ต้องการตรวจสอบได้เหมือนจริง และทำการเปรียบเทียบกับภาพต้นแบบในระยะเวลาที่ได้เหมาะสม จึงสามารถที่จะช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากความเร็วของสายพานในช่วงที่ไม่สม่ำเสมอได้ ซึ่งทำให้ระบบมีความถูกต้อง และแม่นยำในการวัดและตรวจสอบยิ่งขึ้น แล้วถ้าได้ทำการพัฒนาระบบให้สามารถควบคุมแบบออนไลน์ รวมถึงปรับปรุงเรื่องความเร็วในการประมวลผลและเพิ่มระบบป้องกันงานแบบอัตโนมัติ ก็จะทำให้ระบบมีความสมบูรณ์และเหมาะสมในงานอุตสาหกรรมต่อไป

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Yung, T., Chih-Ho, C., Hui-Yi F. and Shin-Liang C., "Glue dispenser route inspection by using computer vision and neural network", *Int J Adv Manuf Technol*, 2008, pp. 905-918.
- [2] วิรัตน์ ราชวงษ์, "ระบบอัตโนมัติสำหรับการฉีดกาวและการตรวจสอบคุณภาพรอยกาวในฝาปิดฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์", <วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม>, กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ; 2554.
- [3] พิมพ์ภัส ธนสุทธยาภรณ์, "เครื่องสแกนเลเซอร์สามมิติเชิงภาพที่ใช้การแปลงเรขาคณิตสำหรับแบบจำลองสามมิติชิ้นใหม่", <วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์>, กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ; 2553.
- [4] William C. Stone, Maris Juberts, Nick Dagalakis, "Performance Analysis of Next-Generation LADAR for Manufacturing, Construction, and Mobility", United States Department of Commerce Technology Administration National Institute of Standards and Technology, NISTIR 7117, May 2004
- [5] Posdamer, J.L. and Altscholer, M.D. , "Surface measurement by Space-encoded Projected beam system", *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 18, 1982
- [6] Bitner, J.R., Erlich, G. and Reingold, E.M. , "Efficient generation of the binary reflected gray code and its applications", *CACM*, Vol. 19, No. 9, 1976
- [7] K. Sato and S. Inokuchi , "Three-dimensional surface measurement by space encoding range imaging", *Journal of Robotic Systems*, vol. 2, pp. 27-39, 1985.
- [8] Peter Schalk, Paul O'Leary, Ronald Ofner and Anton Gfrerrer , "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
- [9] Beverly D. Bradley, Adrian D.C. Chan, M. John D. Hayes, "Calibration of a Simple, Low Cost, 3D Laser Light-Sectioning Scanner System for Biomedical Purposes", *Systems and Computer Engineering*, Carleton University

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] ศราวุธ อินทุเศรษฐ, “การวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ”, <วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม>, กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ; 2553.
- [11] Abraham Savitzky and Marcel J.E. Golay., “Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures” Journal of Analytical Chemistry, Vol.36, Issue.8, 1964, pp.1627-1638
- [12] Nakajima I., Juzoji H., Zhao Y and Hamamoto N., “DSP Technology in Wearable Satellite Terminals for ETS-VII <Savitzky-Golay smoothing filter>”, Seventh International Workshop on Digital Signal Processing Techniques for Space Communications., 2001. pp. 131-136
- [13] O’Leary P., Harker M and Neumayr R., “Savitzky-Golay smoothing for multivariate cyclic measurement data.” I2MTC, May. 2010. pp. 1585-1590
- [14] William H. Press, Brian P.Flannery, Saul A.Teukolsky and William T.Vetterling. Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing 2<sup>nd</sup> ED. Press Syndicate of the University of Cambridge, Inc 1997
- [15] R. Hartley and A. Zisserman. “Multiple View Geometry in Computer Vision”. Cambridge University Press, second edition, 2003.
- [16] TzuYen Wong, Peter Kovasi, Amitava Datta, “Projective Transformations for Image Transition Animations”, The University of Western Australia, School of Computer Science & Software Engineering, 35 Stirling Highway, Crawley, W.A. 6009, Australia
- [17] Elan Dubrofsky, “Homography Estimation”, The Faculty of Graduate Studies (Computer Science), University of British Columbia, March 2009
- [18] Gary Bradski and Adrian Keabler. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. 1<sup>st</sup> ED. O’Reilly Media, Inc 2008



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่องเติมการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

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

สาขาวิทยาศาสตร์ Science

สาขาพันธุวิศวกรรม Genetic Engineering

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

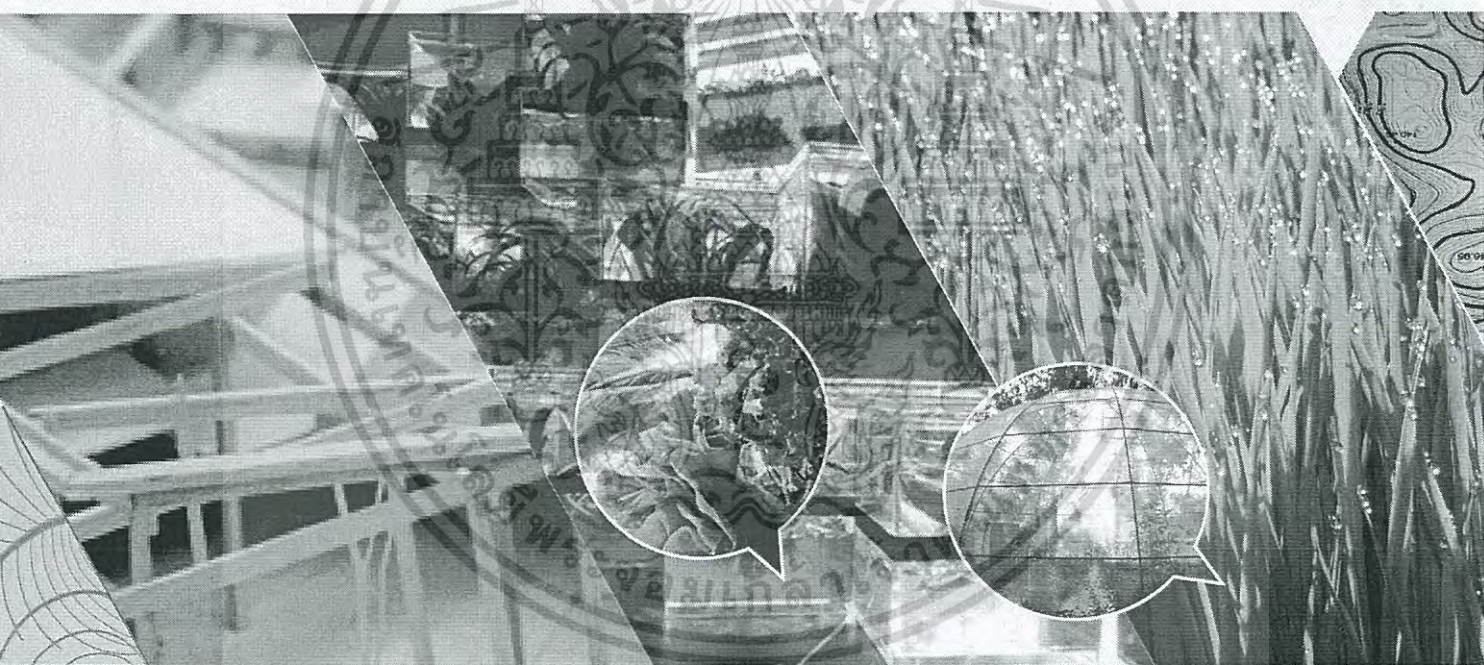
Architecture and Engineering

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร Agro-Industry

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

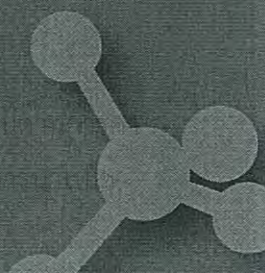
Natural Resources and Environment

กลุ่มที่ 2



นวัตกรรมด้านการเกษตรเพื่อห่วงโซ่มูลค่าระดับโลก

## Agricultural Innovation for Global Value Chain



ระบบตรวจสอบคุณภาพของกาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีเลเซอร์สแกน  
 Inspection Glue Route Quality in HDD Top Cover Assembly Using Laser Scanning

บัญชา จิตสงค์<sup>1\*</sup> และ ทวีพล ชื้อสัตย์<sup>1</sup>

Bancha Jitsong<sup>1\*</sup> and Taweepol.suesut<sup>1</sup>

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอระบบวิสัยทัศน์แบบอัตโนมัติสำหรับการตรวจสอบคุณภาพเส้นทางเดินของกาวในฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้เทคนิคจากลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง ระบบวิสัยทัศน์นี้ ใช้กล้องเพื่อตรวจสอบและจับ ลักษณะเฉพาะของ การประกอบฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในส่วนของกาว โดยสามารถเห็นลำแสงเลเซอร์ ที่ตั้งฉากกับชิ้นงานบนโต๊ะลำเลียง จากภาพของลำแสงเลเซอร์สีแดงที่ได้ผ่านตัวกรองแสงความยาวคลื่นย่านแคบที่ 650 นาโนเมตรเพื่อ ขจัดแสงตัดความยาวคลื่นที่ไม่พึงประสงค์จากสภาพแวดล้อมในการประมวลผลของภาพที่สอดคล้องกันและจากนั้นก็สกัดเส้นทางเดินของกาว เพื่อตรวจสอบ โดยรายละเอียดลักษณะเฉพาะที่ใช้ นี้ เป็นลำแสงเลเซอร์ แสดงถึงพื้นที่ต่างๆ ที่พร้อมประกอบฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แสดงการเปลี่ยนแปลง แบบสามมิติจากภาพต้นแบบที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ภาพต้นแบบสามมิติจะถูกนำมาใช้เพื่อระบุเส้นทางที่มี ข้อบกพร่องของทางเดินกาวและ นำมาตรวจสอบคุณภาพในการผลิต โดยระบบยังมีประสิทธิภาพ สามารถบรรลุในการบูรณาการสำหรับกระบวนการทางอุตสาหกรรม

ABSTRACT

This paper presents the automated vision based system for inspecting glue route quality in hard disk drive top cover assembly using laser light sectioning is proposed. The machine vision camera captures a number of features of hard disk drive top cover assembly perpendicular to a conveyor table as seen by a laser strip light. The narrow bands pass filter of a wavelength of 650 nm for eliminating the light in order to cut off the unwanted wavelength from the environment. In the image processing unit, the image is aligned and then the glue route is extracted. The features used here are the laser strip profile at various locations along the hard disk drive top cover assembly formulating the 3D transformation from predefined template images. 3D templates are used to identify the defective route in the test image. This system is efficient and can achieve to integration in industrial processes as well as integration in industrial processes.

Key Words: image processing, hard disk drive, machine vision

\*Corresponding author; e-mail address: Bancha.kmutt@hotmail.com

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

<sup>1</sup>Department of Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านนการคา Bangkok, 10520

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำนำ

โดยทั่วไปการวัดควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรม ไฟฟ้า และ อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึง อุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน ก่อนส่งมอบถึงลูกค้า โดยสำหรับสินค้าอุตสาหกรรมบางอย่าง จำเป็นต้องกำหนดขนาดโดย มิติเชิงเรขาคณิต (Francisco de Asís Lopez a, Celestino Ordonez. 2014) เช่น ความกว้าง ความยาว ความ สูง พื้นที่หน้าตัด ปริมาตร เป็นต้น เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการกำหนดคุณภาพและราคาของสินค้า ซึ่งจุดมุ่งหมาย ของการวิจัยชิ้นนี้คือ การควบคุมคุณภาพ ของเส้นทางเดินของกาวในฝาคกรอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ก่อน ทำ การประกอบ ในกระบวนการ ของสายการผลิต เพื่อทำการคัดแยกชิ้นส่วนที่ดีและมีควบคุมคุณภาพ แบบ อัตโนมัติบนสายพานลำเลียง (Julio Molleda, Ruben Usamentiaga. 2013) โดยวิธีการวัดต่อเนื่องแบบไม่ ทำลายวัตถุ ซึ่งเทคโนโลยีเครื่องจักรกลวิทัศน์ ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินขนาดของผลิตภัณฑ์ สำหรับการ ตรวจสอบนี้ ใช้วัดขนาดเป็นพื้นที่หน้าตัดและคุณภาพมิติของวัตถุ โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ การวัดขนาดวัตถุที่มี รูปทรง สมมาตรและใช้เทคนิคการประมวลผลภาพแบบสามมิติ เพื่อหาข้อบกพร่องของทางเดินกาวบนผลิตภัณฑ์ และตรวจสอบความถูกต้อง ก่อนทำการประกอบและส่งถึงลูกค้า โดยอาจมีข้อจำกัดด้านการวัดที่ไม่มีข้อมูลความ หนา หรือในพื้นที่แสงมากทำให้ผลการวัดที่ได้ไม่ถูกต้อง วิธีการลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง ซึ่งใช้การจับภาพของ ลำแสงเลเซอร์ที่กระทบลงพื้นผิวของวัตถุ โดยเป็นการวัดแบบสามมิติ (N.Nunak & T.Suesut. 2007) เพื่อนำมา สร้างเป็นพื้นที่หน้าตัดและปริมาตรเพื่อตรวจสอบคุณภาพ โดยเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ งานหลายอย่าง เช่น การสร้างพื้นผิว (B.D. Bradley, M.J.D. Hayes, & A.D.C. Chan. 2008) การสร้าง แบบจำลองพื้นผิวและการตรวจสอบชิ้นงาน (F.Pernkopf & P.O'Leary. 2003) และการวัดมิติเชิงเรขาคณิต การ ติดตามตำแหน่งจากภาพเลเซอร์ในมุมมอง 2 มิติและ 3 มิติในระบบนำทางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ และการหา ปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรโดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง (F.Pernkopf & P.O'Leary. 2003) ซึ่งใช้ วิธีการแบบเดียวกันแต่ใช้วิธีการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดจากสูตรทางเรขาคณิต และมีข้อจำกัดในการวางวัตถุ ซึ่ง ต้องวางวัตถุในแนวเส้นตรง สำหรับวิธีการที่ได้นำเสนอนี้สามารถหาปริมาตรรวมถึงตรวจสอบคุณภาพ ของวัตถุ ได้ใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวณ เมื่อวางวัตถุในมุมเอียงต่าง ๆ

การศึกษาครั้งนี้ได้นำเสนอการตรวจสอบคุณภาพเส้นทางเดินของกาวบนฝาคกรอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดขนาดของวัตถุและเปรียบเทียบกับภาพต้นแบบ นำค่าที่ได้มาวัดโดยเทคนิคการวัด ปริมาตรจากภาพโครงร่างของแสงเลเซอร์ โดยทำการทดลองวางวัตถุในมุมเอียงที่แตกต่างกัน คือ ทำมุมกับ สายพานลำเลียง  $-30^\circ$   $-15^\circ$   $0^\circ$   $+15^\circ$   $+30^\circ$  เพื่อศึกษาผลกระทบจากการวางวัตถุเอียง ค่าเปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาดสูงสุดเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยยังมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ เพื่อความถูกต้องของผลการ ทดลองให้มากที่สุด เช่น กรณีจะแน่ใจว่าสายพานได้เคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอจึงมีการสอบเทียบโดยการวัดระยะ การหมุนด้วยไม้บรรทัดตั้งบนสายพานดูการเคลื่อนที่แล้วเทียบกับเวลาที่จับ โดยในการทดลอง กล้องจะจับภาพที่ คาบเวลาเท่ากันเสมอ เป็นต้น

วิธีที่ได้นำเสนอนี้จัดเป็นวิธีการวัดแบบไม่ทำลายวัตถุสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจสอบ คุณภาพการผลิตกับวัสดุอื่น ๆ ที่มีลักษณะรูปทรงสมมาตรได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อุปกรณ์หรือวิธีการ

### เทคนิคการวัดโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกเอาเทคนิคการวัดแบบไม่ทำลายโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุโดยการติดตั้งแสงเลเซอร์ให้เส้นของแสงเลเซอร์ฉายไปในทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแสงเลเซอร์ตามลักษณะพื้นผิวของวัตถุที่ใช้ในการทดลองต่อไป

### หลักการของระบบการวัดโดยใช้แสงเลเซอร์

จากการศึกษาตาม (Figure 1) แสดงระบบแสงเลเซอร์ตัดขวางสำหรับวัดและตรวจสอบ ซीलยาง บนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งวัตถุตัวอย่างจะถูกวางบนสายพานลำเลียงที่สามารถปรับระดับความเร็วได้ โดยติดตั้งแสงเลเซอร์ให้เส้นของแสงเลเซอร์ฉายไปในทิศทางขวางกับทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแสงเลเซอร์ตามลักษณะพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งเลเซอร์ที่ใช้เป็นเลเซอร์แบบเส้นสีแดงมีความยาวคลื่น 650 nm ขนาด 16 mW (Roithner Laser Technik, Austria) และทำการเก็บข้อมูลรูปภาพโดยใช้กล้องรุ่น Gocator 2350A-3R-01 ความละเอียดในการรับภาพ 1032 Pixels x 778 Pixels และอัตราความเร็วในการรับภาพ 30 เฟรมต่อวินาที

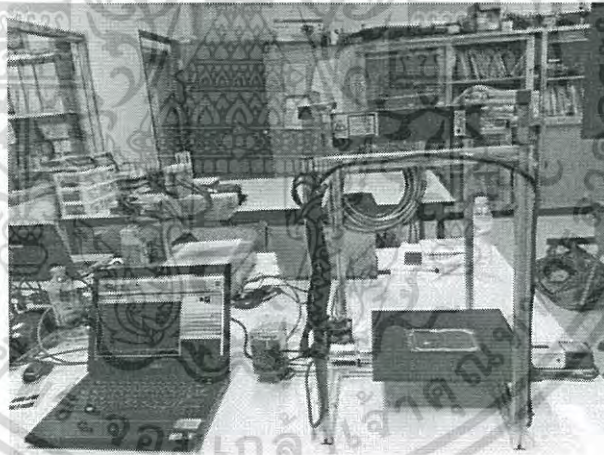


Figure 1 Overall system structure test facility

หลักการใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางเป็นเทคนิคการวัดรูปทรงที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายในการออกแบบ โดยวิธีนี้เป็นการฉายแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของวัตถุ เพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงเลเซอร์ตกกระทบ ซึ่งส่วนมากแล้วแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์นี้จะใช้เส้นแสงเลเซอร์สีแดง เนื่องจากนำมาวิเคราะห์และประมวลผลได้ง่ายและช่วยลดขั้นตอนในการปรับแต่งรูปภาพ แสงที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพและบันทึกไว้ด้วยกล้องที่วางทำมุมเอียงกับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ โดยข้อมูลรูปภาพที่ได้มาจะเปรียบเสมือนเป็นข้อมูลความสูงและความกว้างของแต่ละจุดบนพื้นผิวของวัตถุ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ก็จะได้ข้อมูลในส่วนถัดไปของวัตถุในลักษณะของภาพตัดขวางของแต่ละส่วนดัง (Figure 2) และนำมาไว้รวมกันเพื่อสร้างเป็นระบบพิกัดสามมิติที่เป็นตัวบอกได้ถึง ความกว้าง ความยาวและความสูงของวัตถุนั้น ๆ ใช้

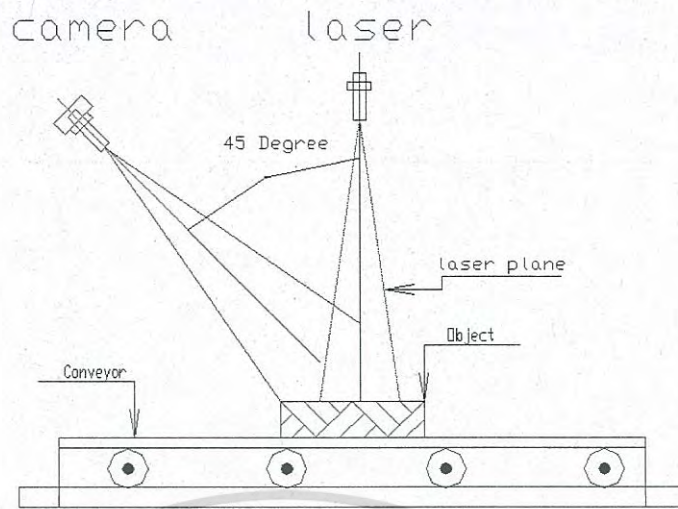


Figure 2 HDD top cover of the slit scanner for strip shape measurement

### วัตถุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ในการศึกษานี้ใช้ เวอเนียร์ทำการวัดขนาดความกว้าง ความยาวและความสูงของเส้นทางเดิน กาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากวัตถุ ตัวอย่างเพื่อทำการสอบเทียบค่าที่ได้จากวิธีการที่ได้นำเสนอกับค่าที่ได้ จากการคำนวณเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ (Figure 1) ของระบบการวัดโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุความผิดพลาด ของการวัดความยาวของวัตถุและคุณภาพ



Figure 3 Profiles computed from HDD top cover strip

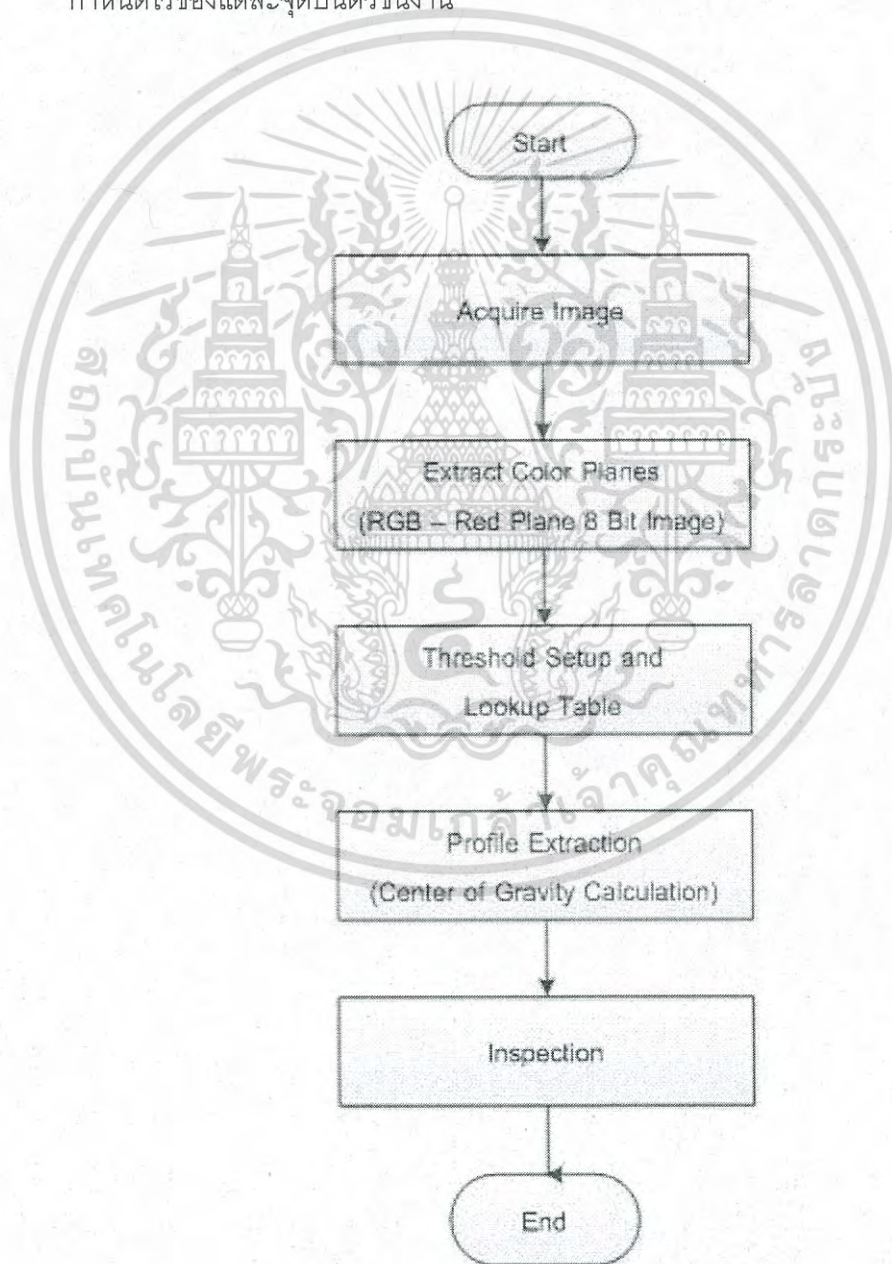
ตัวอย่างแสดงภาพขาวดำของลักษณะเฉพาะของเส้นทางเดินของกาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

### การประมวลผลภาพ

ในการศึกษานี้แสดงรายละเอียดจาก (Figure 4) แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ และ (Figure 5) แสดงภาพที่ได้จากขั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งถูกดำเนินการโดยใช้โปรแกรม LabVIEW 2013 และรับภาพมาจากกล้อง Gocator ทำการปรับปรุงภาพก่อนการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดและตรวจสอบคุณภาพ จุดข้อบกพร่องของทางเดิน กาว โดยแต่ละกระบวนการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Extract Color Planes (RGB – Red Plane 8 Bit Image) เป็นกระบวนการดึงโครงร่างของแสงเลเซอร์สีแดงที่ต้องการออกจากภาพ แล้วแปลงภาพที่ได้เป็นภาพ 8-bit grayscale
2. Threshold Setup and Lookup Table เป็นกระบวนการแยกโครงร่างของแสงเลเซอร์ที่มีค่าความเข้มของแสงอยู่ใน Range ตามที่ต้องการออกจากภาพและเปลี่ยนภาพให้เป็น Full Grayscale [0, 255]
3. Profile Extraction (Center of Gravity) หรือ COG เป็นกระบวนการหาค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละคอลัมน์ของภาพ เมื่อหาครบทุกคอลัมน์ จะได้เส้นโครงร่างของแสงเลเซอร์
4. Dimensional Quality Inspection เป็นกระบวนการตรวจสอบชิ้นงานตามค่ามาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ของแต่ละจุดบนตัวชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ Figure 4 Feedback block diagram of a shape control process ยืนยันด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

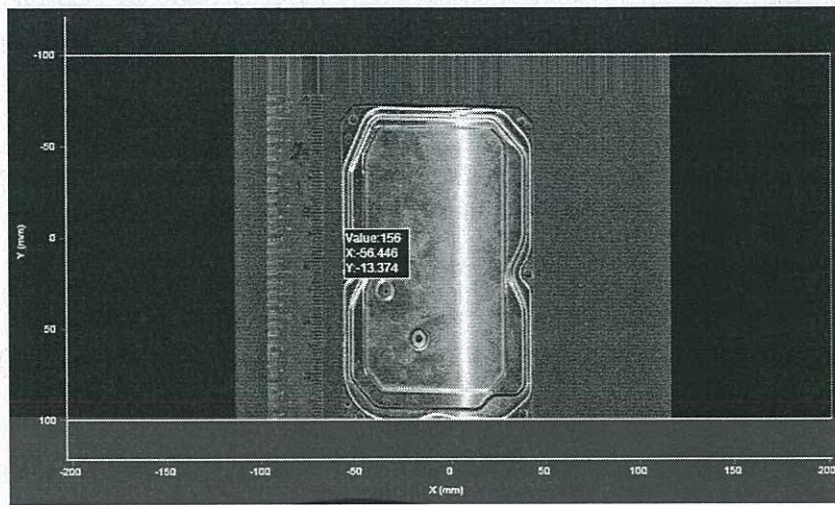


Figure 5 HDD top cover of the laser stripe scanner

การคำนวณหาเส้น COG

ในการศึกษางานแสดงรายละเอียด วิธีการหาจุดศูนย์กลาง (Central of Gravity) คือการหาค่าเฉลี่ยของพิกัดของภาพ จากแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนวัตถุ เนื่องจากแสงเลเซอร์มีความกว้างและความเข้มแสงที่ไม่เท่ากันทุกจุด การหา COG คือการหาค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละคอลัมน์ของภาพ ดังสมการข้างล่างมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$COG = \frac{\sum y \cdot I(y, x)}{\sum I(y, x)} = \frac{W_m}{m} \quad (1)$$

$I(y, x)$  คือความเข้มของระดับสีเทาและมีค่าน้อยกว่า Threshold

$y$  คือแถวในแนวแกน  $y$

เอกสารนี้เป็น  $W_m$  สารที่สงวนไว้คือผลรวมของค่าความเข้มของระดับสีเทาคูณกับค่าตำแหน่งของแถว  $y$  ด้านการคำนวณหา  $m$  ทั้งสิ้น อีกทั้งผลรวมของค่าความเข้มระดับสีเทาอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณหาความยาวของวัตถุ

ในการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียด วิธีการการคำนวณหาความยาวของวัตถุ โดยใช้สมการความเร็ว  
เส้นตรงคือความเร็วไปหน้าหรือถอยหลัง วัตถุเป็นแนวตรง ดังสมการข้างล่างมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$V = \frac{S}{t} \quad (2)$$

ดังนั้นความยาวของวัตถุ

$$s = V.t \quad (3)$$

$V$  ความเร็วของสายพานลำเลียง (มิลลิเมตรวินาที)

$s$  ความยาวของวัตถุ (มิลลิเมตร)

$t$  เวลาที่วัตถุตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์ (วินาที)

## ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

## ผลของการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของการวัดในแบบต่างๆ

จากการศึกษาและทดสอบสามารถแสดงผลได้ จากเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดในการวัดตรวจสอบ  
คุณภาพเส้นทางเดินของกาว ในฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เมื่อวางวัตถุ  $-30^{\circ}$   $-15^{\circ}$   $0^{\circ}$   $+15^{\circ}$   $+30^{\circ}$  โดย  
แสดงใน (Table 1, Figure 5) วัตถุ ตัวอย่าง เช่น ฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สามารถ แสดงค่าเปอร์เซ็นต์  
ความผิดพลาดสูงสุด 1.54% 1.48% และ 1.35% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำสุด 1.46% 1.38%  
และ 1.32% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ย 1.49% 1.41% และ 1.34% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์  
ความผิดพลาดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.03% 0.04% และ 0.02% ตามลำดับตามลำดับ

Table 1 Comparative results of measurement methods error

Degree	Material HDD#A (%)	Material HDD#B (%)	Material HDD#C (%)
-30	1.48	1.40	1.35
-15	1.50	1.48	1.32
0	1.54	1.45	1.34
+15	1.50	1.36	1.35
+30	1.46	1.38	1.34
Mean Error	1.49	1.41	1.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์ที่นำเอกสาร  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของการวัดตรวจสอบคุณภาพเส้นทางเดินของ การในจุดควบคุมคุณภาพของวัตถุซึ่งใช้วิธีจากการทดลองวางวัตถุแต่ละแบบในองศาต่าง ๆ พบว่าค่าที่ได้จาก วิธีการที่ได้นำเสนอกับค่าที่ได้จากการวัดและตรวจสอบจากเครื่องมือจริง มีค่าใกล้เคียงกัน มีความแม่นยำอยู่ใน ช่วงที่สามารถยอมรับได้ คือค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ย 1.41% จากสามกลุ่มตัวอย่างค่าความผิดพลาด โดยรวมที่เกิดขึ้น เกิดมาจากวิธีการที่ใช้ในการหาเนื่องจากเป็นการรวมพื้นที่หน้าตัดของแต่ละส่วนของวัตถุเข้า ด้วยกัน และถ้าการประมวลผลภาพมีความผิดพลาดอยู่แล้วเมื่อคำนวณ ก็จะผิดพลาดให้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

### สรุป

ผลการทดสอบวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้ให้ผลลัพธ์ในการวัดระบุเส้นทางที่มี ข้อบกพร่องของ ทางเดินการของวัตถุที่มีความแม่นยำสูงและมีค่าเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดค่อนข้างต่ำ และจะมีความผิดพลาดอยู่บ้างพอสมควรในการวัดและตรวจสอบแต่ก็ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการตัดฝาคอบด้านบน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ หรือนำมาตรวจสอบวัตถุที่ไม่ได้ต้องการความแม่นยำสูงมาก เป็นต้น และที่สำคัญระบบได้ พัฒนาขึ้นให้มีความเร็วในการประมวลผลมากขึ้นเป็นจุดเด่นรวมถึงต้นทุนในการผลิตต่ำลงเมื่อเทียบกับในอดีต

นอกจากนั้นวิธีการที่ได้นำเสนอนี้อาจเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปเป็นระบบอัตโนมัติแบบ ระบบปฏิบัติการแบบเวลาจริง และพัฒนาให้เพิ่มความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ระบบ คัดแยกและตรวจสอบขนาดวัตถุดิบ ระบบคัดแยกและตรวจสอบขนาดชิ้นส่วน ระบบคัดแยกและตรวจสอบขนาด ผลผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตรและอาหารเป็นต้นต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการ ระบบโรงงานอุตสาหกรรมอัตโนมัติ ที่ช่วยเหลือเพื่อสถานที่ ใช้ในการทดลอง

### เอกสารอ้างอิง

- Francisco de Asis Lopez a, Celestino Ordonez. 2014. Point cloud comparison under uncertainty. Application to beam bridge measurement with terrestrial laser scanning. Science Direct: 250-264.
- N.Nunak & T.Suesut. 2007. Measuring geometric mean diameter of fruit and vegetable using computer vision. International Conference on Engineering and Environment-ICEE: 1062-1067.
- B.D. Bradley, M.J.D. Hayes, & A.D.C. Chan. 2008. A simple low cost 3D scanning system using the laser light-sectioning method. IEEE conference on Instrumentation and Measurement Technology (I2MTC): 1155-1158.
- F.Pernkopf & P.O'Leary. 2003. Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces. NDT&E International: Vol.36, 2003, 609-617.

Julio Molleda, Ruben Usamentiaga. 2013. An improved 3D imaging system for dimensional quality inspection of rolled products in the metal industry. Science Direct: 1186-1200.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขโดยไม่ขออนุญาตจากทางภาควิชาฯ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



72 ปี  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
พ.ศ. 2486-2558

ฝ่ายบริการการศึกษา สำนักทะเบียนและประมวลผล

อาคาร: พลากรักษ์ 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	บัญชา จิตสงค์
วัน เดือน ปี เกิด	07 มิถุนายน 2528
ที่อยู่	106/2 หมู่ที่ 7 ต.ตะเคียนทอง อ.กาญจนดิษฐ์ จ.สุราษฎร์ธานี 84160
ประวัติการศึกษา	ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง แผนกวิชาไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคสุราษฎร์ธานี ในปีการศึกษา 2544-2547  ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาเครื่องกลไฟฟ้า แผนกวิชาไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคสุราษฎร์ธานี ในปีการศึกษา 2547-2549  ระดับปริญญาตรี หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ค.อ.บ) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าอนบุรี ในปีการศึกษา 2549-2551
ประสบการณ์ทำงาน	พ.ศ. 2551 - 2554 ตำแหน่งวิศวกรระบบควบคุม บริษัท อีเลคโทรลักซ์ (ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ. 2554 - 2556 ตำแหน่งวิศวกรระบบเครื่องมือวัด บริษัท การ์เดียนอินดัสทรีส์ คอร์ป จำกัด พ.ศ. 2556 - ปัจจุบัน ตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า บริษัท สตาร์ ปีโตรเลียม รีไฟน์นิง จำกัด (มหาชน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้