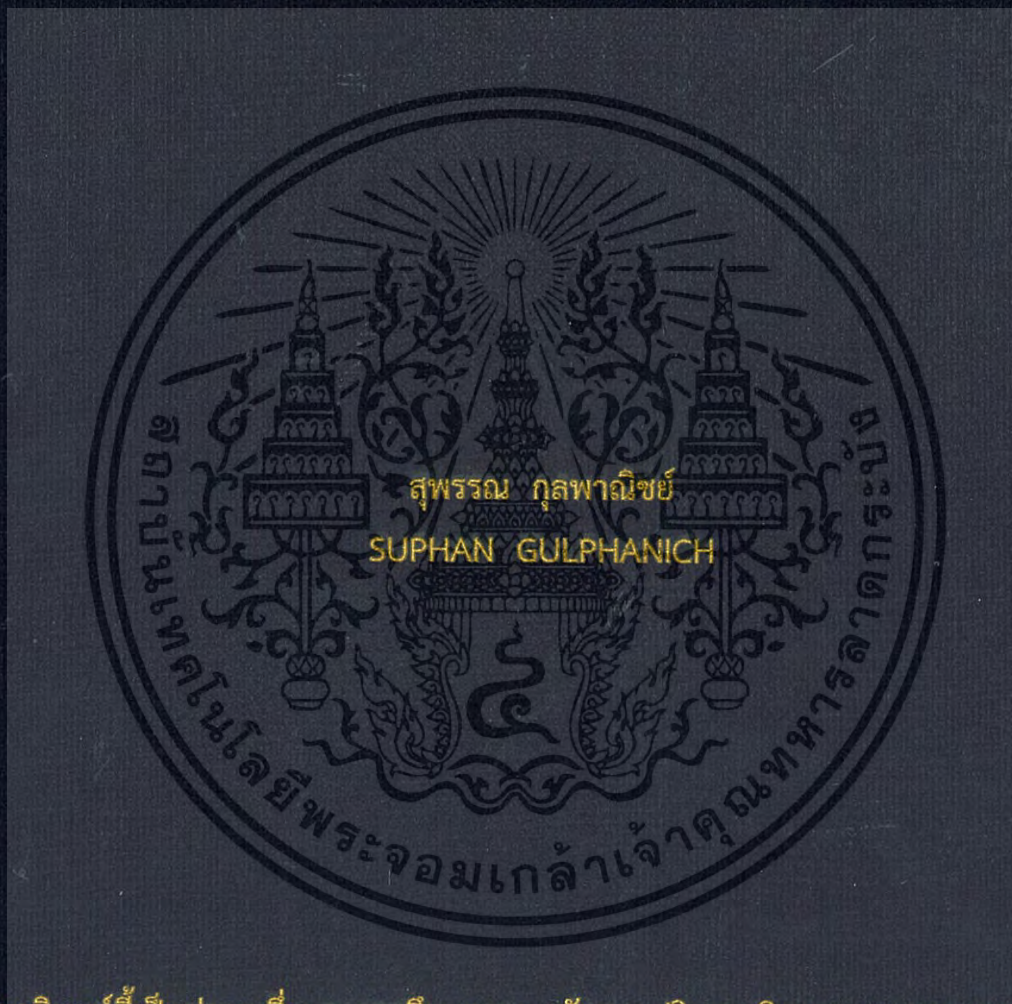


การประยุกต์ใช้ลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนเพื่อการตรวจสอบพื้นผิว
และการวัดเชิงเรขาคณิต

LASER LIGHT SECTIONING APPLIED TO SURFACE INSPECTION
AND GEOMETRICAL MEASUREMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-018-012

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์ใช้ลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนเพื่อการตรวจสอบพื้นผิว
และการวัดเชิงเรขาคณิต

LASER LIGHT SECTIONING APPLIED TO SURFACE INSPECTION
AND GEOMETRICAL MEASUREMENT



T144162

สุพรรณ กุลพานิชย์
SUPHAN GULPHANICH

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 144162
วันเดือนปี 01 2559

b. 00266972
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-018-012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LASER LIGHT SECTIONING APPLIED TO SURFACE INSPECTION
AND GEOMETRICAL MEASUREMENT

SUPHAN GULPHANICH



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016
KMITL-2016-EN-D-018-012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

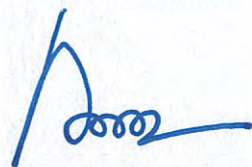
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้ลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนเพื่อการตรวจสอบพื้นผิวและการวัดเชิงเรขาคณิต
Thesis Title Laser Light Sectioning Applied to Surface Inspection and Geometrical Measurement
นักศึกษา นายสุพรรณ กุลพาณิชย์
รหัสประจำตัว 56601367
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ทวิพล ชือสัตย์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-018-012

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
ดร.อภิไฉย	ฤกษ์รัตน์	
รศ.ดร.ฟูศักดิ์	ชีวิสุทธิย์	
รศ.ดร.วิศรุต	ศรีรัตน์	
รศ.ดร.ทวิพล	ชือสัตย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษา **ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์** ระโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 ที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้ลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนเพื่อการตรวจสอบพื้นผิวและการวัดเชิงเรขาคณิต
นักศึกษา	นายสุพรรณ กุลพาณิชย์
รหัสประจำตัว	56601367
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้ลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนเพื่อการตรวจสอบพื้นผิวและการวัดเชิงเรขาคณิตสำหรับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เทคนิคที่นำเสนอนี้อาศัยการประมวลผลภาพของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบลงบนวัตถุ วิธีการวัดขนาดด้วยภาพบนระนาบ 2 มิติ ถูกนำมาใช้เพื่อหาระยะทาง พื้นที่หน้าตัด ซึ่งวัตถุที่ทำการตรวจวัดต้องมีการเคลื่อนผ่านลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบตั้งฉากเมื่อรวมแต่ละส่วนของภาพเข้าด้วยกันจะทำให้ได้ข้อมูลภาพเชิงระยะแบบ 3 มิติ ข้อมูลที่ได้นี้ สามารถนำมาคำนวณหาขนาดเชิงเรขาคณิต การสร้างแบบจำลองพื้นผิวเพื่อปรับพื้นผิวที่ไม่เรียบของวัตถุให้สามารถมองเห็นรายละเอียดพื้นผิวได้ โดยพื้นผิววัสดุที่ใช้เป็นกรณีศึกษาได้แก่ การตรวจสอบคุณภาพของพื้นผิวแผ่นทองแดง การอ่านรอยนูนของตัวเลขที่ประทับลงบนพื้นผิวโลหะที่ไม่เรียบ รวมถึงการวัดขนาดวัตถุรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะสมมาตร เช่น ทรงกระบอก และรูปทรงสี่เหลี่ยม ในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากล และการประยุกต์ใช้ในกระบวนการประกอบโครงสร้างการผลิตฮาร์ดดิสก์ ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นวิธีการตรวจสอบขนาดแบบไม่ทำลาย ทำงานได้แบบเวลาจริง มีความถูกต้องแม่นยำอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และสามารถพัฒนาต่อยอดในระดับอุตสาหกรรมได้

Thesis Title	Laser Light Sectioning Applied to Surface inspection and Geometrical Measurement
Student	Mr. Suphan Gulphanich
Student ID.	56601367
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Taweepol Suesut

ABSTRACT

This thesis presents applications of laser light sectioning for surface inspection and geometrical measurement in industrial manufacturing processes. This proposed technique is based on the projected laser image processing which two dimensional images are calculated the distance and the area of the object moving perpendicular with the laser light integrated to the three dimensional range image data. The range image can be calculated the geometric data as well as the surface modeling for relieving the clear surface appearance from the non-smooth surface. There are several cases studies in this work such as the copper surface inspection, reading the character from the non-smooth metal surface including the volume estimation of symmetrical objects and hard disk drive production process inspection. The developed prototype system can be operated in real-time with acceptable accuracy level and can be improved to the industrial applications as well.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. กิตติ ตีระเศรษฐ และ รศ.ดร. ทวีพล ชื่อสัตย์ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ ศ.ดร. วันชัย ธีร์รุจา ที่ให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณ รศ.ดร.นวกัทธา หนูนา และ ผศ.ดร.สุพันธุ์ ตั้งจิตกุศลมั่น ที่ช่วยทำให้เรื่องการ
เทียบโอนผลงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี และที่ขาดไม่ได้คือคณาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมการวัต
คุม ได้แก่ รศ. วิริยะ กองรัตน์ รศ.ดร. วิทยา ทิพย์สุวรรณพร รศ.ดร. ธนิตย์ ตรีสุวรรณวัฒน์ และท่าน
อื่นๆ ที่มีได้เอื้อนาม

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ แม่และญาติพี่น้อง ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุน
ช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจนมาถึงวันนี้ได้

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์อันที่พึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอบแต่ผู้มีพระคุณ
ทุกๆ ท่าน และขอให้ทุกๆ ท่านจงมีแต่ความสุขตลอดไป

สุพรรณ กุลพานิชย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและแนวคิดในการทำวิจัย	2
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	5
บทที่ 2 การเก็บภาพข้อมูลระยะทางสามมิติ	7
2.1 หลักการเดินทางของเวลา (Time of flight)	7
2.2 หลักการของรูปสามเหลี่ยม (Triangulation)	9
2.3 หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟ (Passive Triangulation)	10
2.4 หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอกทีฟ (Active Triangulation)	15
2.5 วิธีฉายแสงแบบจุด (Light Spot Triangulation)	15
2.6 วิธีฉายแสงแบบลายเส้น (Light Stripe Triangulation)	17
2.7 เทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสไบนารี (Binary code pattern)	18
2.8 เทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสเกรย์ (Gray code pattern)	21
2.9 รูปแบบการสแกนวัตถุ (Scanning patterns)	22
2.9.1 การสแกนโดยการหมุนวัตถุ	23
2.9.2 การสแกนโดยการหมุนท่ามุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ	23
2.9.3 การสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุ	24
บทที่ 3 การวัดเชิงเรขาคณิตด้วยการประมวลผลภาพ	27
3.1 การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric Transformation)	27
3.1.1 การเลื่อนภาพ (Translation)	28
3.1.2 การย่อขยายภาพ (Scaling)	29
3.1.3 การหมุน (Rotation)	30
3.1.4 การบิดภาพ (Shearing)	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.1.5 การสะท้อน (Reflection).....	32
3.1.5.1 การสะท้อนตามแกน x	33
3.1.5.2 การสะท้อนตามแกน y	34
3.2 การโปรเจกชัน (Projections)	36
3.2.1 การโปรเจกชันแบบขนาน (Parallel projections)	36
3.2.2 การโปรเจกชันแบบเพอสเปกทิฟ (Perspective projections).....	37
3.3 แบบจำลองของกล้อง	39
3.3.1 การเกิดภาพของกล้อง.....	39
3.3.2 พารามิเตอร์ภายในของกล้อง	41
3.3.3 พารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง.....	43
3.4 การแปลงโฮโมกราฟฟี (Homography Transform)	46
3.5 การแปลงยูคลีเดียน (Euclidian Transform).....	47
3.6 การแปลงแบบคล้าย (Similarity Transform)	48
3.7 การแปลงแบบแอฟไฟน์ (Affine Transform)	49
3.8 การแปลงแบบโปรเจกทิฟ (Projective Transform)	50
3.9 การคำนวณและประมาณค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์.....	52
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้ลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนในงานอุตสาหกรรม	58
4.1 การเก็บภาพสามมิติของพื้นผิวโลหะเพื่อการตรวจสอบและการอ่านตัวอักษร.....	58
4.1.1 หลักการทำงานพื้นฐาน.....	60
4.1.2 การประมวลผลภาพที่ได้จากลำแสงเลเซอร์.....	61
4.1.3 การหาพิกัดของแสงเลเซอร์บนภาพ.....	63
4.1.4 การปรับปรุงภาพพื้นผิวด้วยวิธี Surface relief.....	65
4.1.5 การสร้างแบบจำลองพื้นผิวจาก Polynomial moments.....	66
4.1.6 ผลการตรวจสอบพื้นผิวแผ่นทองแดงด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....	67
4.2 การประมาณค่าปริมาตรของวัตถุสมมาตรด้วยวิธีแสงเลเซอร์แบ่งส่วน.....	70
4.2.1 การประมวลผลภาพของลำแสงเลเซอร์.....	71
4.2.2 การสอบเทียบระยะของวัตถุจากกล้อง.....	72
4.2.3 การประมาณค่าปริมาตรของวัตถุสมมาตร.....	72
4.2.4 ผลการทดลองประมาณค่าปริมาตรของวัตถุสมมาตร.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การตรวจสอบแบบ 3 มิติในการผลิตฮาร์ดดิสก์ด้วยวิธีแสงเลเซอร์แบ่งส่วน.....	76
4.3.1 ลักษณะของปัญหาที่พบ.....	76
4.3.2 การประมวลผลภาพ.....	78
4.3.3 ผลการทดลองการตรวจสอบ HDD.....	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	81
5.1 สรุปผลการวิจัย	81
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย	82
เอกสารอ้างอิง	83
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์	87
ประวัติผู้เขียน	108



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อภาวศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการประมาณค่าความสูง	73
4.2 ผลการประมาณค่าความกว้าง	74
4.3 ผลการประมาณค่าความยาว	74
4.4 ผลการประมาณค่าปริมาตร	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หลักการวัดระยะทางโดยใช้คลื่นแสง.....	8
2.2 ความต่างของมุมเฟสที่สะท้อนกลับมาเมื่อกระทบวัตถุ.....	8
2.3 การวัดระยะทางโดยหลักการของรูปสามเหลี่ยม.....	9
2.4 หลักการของสเตอริโอวิชั่น	10
2.5 การวัดระยะทางในระบบของสเตอริโอวิชั่น.....	11
2.6 ภาพถ่ายสเตอริโอที่ได้จากกล้องซ้ายและกล้องขวา.....	12
2.7 ภาพความแตกต่างของกล้องทั้งสองเมื่อนำมารวมกัน.....	13
2.8 ตัวอย่างการคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องทั้งสองตัวกับวัตถุ.....	13
2.9 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบจุด.....	15
2.10 การวิเคราะห์ระยะทางของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ.....	16
2.11 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบเส้น.....	18
2.12 ฉากรหัสไบนารี.....	18
2.13 เทคนิคการฉายแสงผ่านรหัสไบนารี.....	19
2.14 ภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารี.....	19
2.15 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากไบนารี.....	20
2.16 ฉากรหัสเกรย์.....	21
2.17 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสเกรย์.....	22
2.18 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนวัตถุ.....	23
2.19 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนท่ามของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ.....	24
2.20 การสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนวัตถุ.....	24
2.21 (ก) การเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านเส้นแสง (ข) ภาพที่ได้ในเฟรมต่างๆ เมื่อมีวัตถุตัดผ่าน.....	25
2.22 ตัวอย่างการนำภาพตัดขวางแต่ละส่วนมารวมเพื่อสร้างภาพตัดขวาง 3 มิติ.....	25
3.1 แสดงระบบพิกัด Cartesian และ Homogeneous.....	26
3.2 การเลื่อนพิกัดภาพ	28
3.3 การขยายขนาดของภาพ.....	29
3.4 ระบบพิกัด Polar การบอกตำแหน่งจุดโดยใช้เวกเตอร์.....	30
3.5 การหมุนของภาพ.....	31
3.6 การบิดของภาพตามแกน x และตามแกน y	32
3.7 ภาพความแตกต่างของกล้องทั้งสองเมื่อนำมารวมกัน	23
3.8 การสะท้อนรอบเส้นตรง y	34
3.9 การสะท้อนรอบเส้นตรง $y=x$	34
3.9.1 หลักการของการโปรเจกชัน.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 การโปรเจกชันแบบขนาน	37
3.11 การโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective projections)	37
3.12 คุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายจากการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ.....	37
3.13 ความสัมพันธ์ระยะทางระหว่างผู้สังเกตกับวัตถุของ Perspective projections	39
3.14 แสดงลักษณะของ Vanishing Point และ Vanishing Line.....	39
3.15 แบบจำลองของระบบสร้างภาพของกล้อง	40
3.16 พิกัดบนระนาบของภาพ	42
3.17 แบบจำลองการสร้างภาพกรณีพิกัดของโลกไม่ซ้อนทับพิกัดของกล้อง	43
3.18 การแปลงแบบโปรเจกทีฟของระนาบ 2 มิติของกล้อง.....	45
3.19 ความสัมพันธ์และการโปรเจกชันของจุดที่อยู่บนระนาบ.....	46
3.20 ตัวอย่างลักษณะของการแปลงในเชิงโปรเจกชันแบบต่างๆ.....	47
3.21 การบิดเบือนของระนาบซึ่งเป็นผลของการแปลงแบบ Affine.....	50
3.22 คุณสมบัติและลักษณะของการแปลงภาพแบบต่างๆ	52
4.1 แสดงองค์ประกอบหลักของชุดสแกน 3 มิติ.....	57
4.2 การนำชุดสแกน 3 มิติในการตรวจสอบพื้นผิว.....	58
4.3 การสร้างภาพข้อมูลระยะจากภาพ 2 มิติที่ถูกแบ่งส่วน.....	60
4.4 การลดสัญญาณรบกวนแบบเป็นเชิงเส้นโดยใช้หลักการคอนโวลูชัน.....	61
4.5 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวนโดยใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ย.....	63
4.6 วิธีการของเส้นทางเดินของเส้น.....	64
4.7 การตรวจสอบพื้นผิวบนแผ่นทองแดงด้วยแสงเลเซอร์แบ่งส่วน.....	64
4.8 กระบวนการปรับปรุงภาพพื้นผิวด้วยวิธี Surface relief.....	65
4.9 ผลการปรับปรุงภาพข้อมูลระยะของพื้นผิวแผ่นทองแดง.....	68
4.10 ตัวอย่างแผ่นเหล็กที่ประทับตัวเลขนูนบนพื้นผิวที่ไม่เรียบ.....	69
4.11 ผลการปรับปรุงพื้นผิวโลหะแผ่นเพื่ออ่านตัวเลข.....	69
4.12 แผนผังการประมวลผลภาพของการประมาณค่าปริมาตรวัตถุ.....	71
4.13 การสอบเทียบโดยการวัดกริด.....	72
4.14 รูปทรงวัตถุสมมาตร.....	73
4.15 ลักษณะของปัญหาจากการขึ้นสกรูลงบนฝาครอบของตัวฮาร์ดดิสก์.....	77
4.16 เส้นแสงเลเซอร์สีแดงบนตัวเรือนของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	78
4.17 แผนผังการประมวลผลภาพ.....	78
4.18 ผลลัพธ์ภาพ 3 มิติของชิ้นงานฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่คัดแยกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ดี.....	79
4.19 ผลลัพธ์ภาพ 3 มิติของชิ้นงานฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่คัดแยกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่สมบูรณ์.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการด้านการตรวจสอบผลิตภัณฑ์อัตโนมัติเพื่อทดแทนการทำงานของมนุษย์มีสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การตรวจสอบชิ้นงาน วัสดุ หรือผลิตภัณฑ์มีหลากหลายรูปแบบ เช่น การตรวจสอบคุณภาพของพื้นผิว การตรวจสอบและวัดขนาดเชิงมิติ การตรวจสอบความผิดปกติจากต้นแบบ ซึ่งวิธีการตรวจสอบก็ขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ การตรวจสอบแบบอัตโนมัติจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตรวจรู้หรือเซ็นเซอร์ สำหรับตรวจจับคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยแบ่งการตรวจสอบเป็น 2 แบบคือแบบทำลายวัตถุ และแบบไม่ทำลายวัตถุ สำหรับการตรวจสอบอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรมส่วนมากจะเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวัตถุ โดยจะมีสัญญาณเอาท์พุททางไฟฟ้าจากส่วนของกระบวนการประมวลผลเพื่อส่งต่อไปให้กับระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการคัดแยกหรือปรับปรุงผลิตภัณฑ์ต่อไป

การตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติด้วยภาพ (Automatic Visual Inspection) หรือวิสัยทัศน์จักรกล (Machine Vision) เป็นกระบวนการตรวจสอบผลิตภัณฑ์แบบไม่สัมผัสวัตถุและไม่ทำลายวัตถุ ซึ่งได้รับความนิยมสูงขึ้นเนื่องจากเทคโนโลยีในการรับภาพและประมวลผลคอมพิวเตอร์ทำได้รวดเร็ว แม่นยำ และราคาถูกลง ทำให้มีผู้ผลิตเครื่องจักรอุตสาหกรรมหันมาผลิตและพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้านนี้มากขึ้น ส่วนประกอบหลักของระบบตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติด้วยภาพประกอบด้วย 2 ส่วนคือ อุปกรณ์รับภาพ และ อุปกรณ์ประมวลผลภาพหรือระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น (Computer Vision System) ซึ่งได้มีการวิจัยและพัฒนาเรื่อยมาตั้งแต่ปี 1920 จนถึงปัจจุบันและได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานสาขาต่างๆ มากมาย [24] เช่น ด้านการแพทย์ ชีววิทยา ภูมิศาสตร์และการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียม การคัดแยก การตรวจสอบหรือตรวจวัดขนาดของวัตถุดิบหรือชิ้นงานในกระบวนการผลิตสำหรับงานด้านอุตสาหกรรมการผลิตและอุตสาหกรรมเกษตร เป็นต้น ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวก ลดระยะเวลาในการดำเนินงาน ให้ความถูกต้องแม่นยำ เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต และช่วยลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากปฏิบัติงานเนื่องจากความเหนื่อยล้าและมาตรฐานที่แตกต่างกันของแต่ละบุคคล จากงานวิจัย [31] พบว่าการตรวจสอบชิ้นงานด้วยสายตามนุษย์ในอุตสาหกรรมสิ่งทอสามารถทำงานได้ระดับความน่าเชื่อถือสูงสุดที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งระบบตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติสามารถทำงานได้ 100 เปอร์เซ็นต์และเป็นการทำงานแบบเวลาจริง (Real-time) ที่สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วต่อเนื่อง

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและแนวคิดในการทำวิจัย

ในงานวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับระบบตรวจสอบพื้นผิว ตรวจสอบคุณภาพของวัสดุแบบอัตโนมัติด้วยภาพที่ผ่านมา โดยส่วนใหญ่มีการนำการประมวลผลภาพและระบบคอมพิวเตอร์มาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง การวัดขนาด รวมไปถึงการคัดแยกดั่งตัวอย่างงานวิจัยที่หลากหลายสาขาต่อไปนี้

M. Balaban (1997) และคณะ [1] ได้พัฒนาระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นมาใช้ในการควบคุมคุณภาพของกุ้งขาว โดยวิเคราะห์ค่าสีเพื่อในการหาความสดของกุ้งขาว อุปกรณ์ที่ใช้เป็นกล้องดิจิทัล สี และชุดควบคุมแสง การวิเคราะห์ได้แบ่งระดับสีออกเป็นกลุ่มย่อย 64 กลุ่มเพื่อแบ่งหาความสด นอกจากนี้ในการวัดยังแบ่งส่วนของกุ้งคือส่วนหัว ส่วนหาง และส่วนลำตัว พบว่าส่วนของหัวกุ้งสามารถแยกแยะความสดได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามวิธีนี้จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างจำนวนมากและการควบคุมแสงให้มีสภาพคงที่ทำได้ยากในกรณีที่ต้องการพัฒนาเป็นระบบคัดแยกแบบอัตโนมัติ

B. Zion (1999) และ คณะ [3] ค้นหาวีธีการคัดแยกชนิดหรือสายพันธุ์ปลาด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น ปลาที่ทำการคัดแยกมีสามสายพันธุ์ ซึ่งมีลักษณะเด่นที่ต่างกันคือ ปลาตัวกลม ปลาตัวแบน และลักษณะหางที่กลม และ เป็นแฉก การวิเคราะห์ใช้กล้องจับภาพขาวดำโดยจับแบบสองมิติ และทำการควบคุมแหล่งกำเนิดแสงในตู้ที่ปิดมิดชิด วิธีในการจำแนกและรู้จำอาศัยวิธี Moment Invariants เพื่อแยกลักษณะซึ่งมีข้อดีคือปลาสามารถวางในทิศทางใดก็ได้ แต่อย่างไรก็ตามความแม่นยำในการคัดแยกชนิดปลาขึ้นอยู่กับจำนวนการเก็บตัวอย่างหรือฐานข้อมูลที่เก็บ การควบคุมแสงก็มีความจำเป็น ระบบนี้ไม่สามารถวัดขนาดที่เป็นปริมาตรได้ และไม่ได้ออกแบบให้ทำการคัดแยกบนสายพาน

I.Nazrul (2005) และคณะ [2] ทำการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของสายพานในกระบวนการแช่แข็ง อาหารทะเล โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นในการจับภาพของอาหารทะเลที่เคลื่อนที่บนสายพาน กล้องจะทำการเก็บภาพให้คอมพิวเตอร์ประมวลวิเคราะห์ปริมาณของอาหารทะเลที่อยู่บนสายพาน เพื่อสั่งการให้ระบบควบคุมสายพานปรับความเร็วตามปริมาณของอาหารทะเลบนสายพาน ระบบควบคุมนี้เป็นแบบ Model Predictive Control (MPC) ระบบนี้เพียงแค่ประมาณความหนาแน่นของวัตถุดิบสายพานแต่ไม่ได้ทำการวัดค่าใดๆ

D.J. White (2006) และคณะ [4] ได้ออกแบบเครื่องคัดแยกชนิดหรือสายพันธุ์ปลาและวัดความยาวด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นบนสายพานลำเลียง วิธีในการจำแนกและรู้จำอาศัยวิธี Moment Invariants โดยมีแหล่งกำเนิดแสงจากด้านล่างเพื่อนับขอบภาพของตัวปลาในระนาบสองมิติ การวัดความยาวกำหนดโดยความเร็วของสายพานแต่อย่างไรก็ตามการแยกสายพันธุ์ของปลาต้องทำการแยกชนิดของรูปทรงปลาในการคัดแยกชนิด เช่น ปลาตัวกลม ปลาตัวแบน การวัดสามารถทำได้เร็วเนื่องจากเทคนิคฉายแสงจากด้านล่าง (Backlight) จะได้ภาพเป็นขาวดำซึ่งสามารถประมวลผลได้รวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังต้องอยู่ในที่ที่ต้องควบคุมแสงและไม่สามารถวัดค่าปริมาตรของปลาได้ ความแม่นยำขึ้นอยู่กับจำนวนการเก็บตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยข้างต้นพบว่าโดยส่วนใหญ่ระบบที่ใช้จะวัดขนาดและตรวจสอบวัตถุในลักษณะสองมิติคือความกว้างและยาวเท่านั้น ในการวัดขนาดของภาพในแบบสามมิติสามารถทำได้โดยใช้กล้องในการจับภาพสองชุดคือด้านบนและด้านล่าง D.Wulfsohn (2004) และคณะ[5] ใช้เทคนิคในการประมาณค่าปริมาตรของผลไม้จากภาพถ่ายด้านข้าง โดยหมุนวัตถุบนแท่น และใช้วิธีแคลคูลัสในการคำนวณหาค่าปริมาตร แต่วิธีที่สามารถทำได้โดยใช้กล้องตัวเดียวคืออาศัยการจับภาพจากลำแสงเลเซอร์ตัดผ่านเพื่อหามิติในแนวตั้ง ส่วนการหามิติในแนวกว้างและยาวจำเป็นจะต้องให้วัตถุนั้นเคลื่อนที่จึงจะทำได้

E. Guerra (2001) และคณะ [6] ได้ออกแบบระบบตรวจสอบแบบสามมิติสำหรับกระบวนการผลิตแผ่นวงจรแบบติดบนพื้นผิว (Surface Mount Technology) ในการตรวจสอบระบบเดิมที่เป็นสองมิติสามารถทำได้ดีสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องในการจัดวาง ข้อความตัวเลข และรหัสบนตัวอุปกรณ์ แต่ระบบสองมิติไม่สามารถแยกความผิดปกติของมิติความสูงได้ งานวิจัยนี้ได้แปลงค่าของภาพที่ได้จากสามมิติให้เป็นสองมิติโดยให้ค่าความสูงเป็นระดับความเข้มของภาพสองมิติ จากนั้นใช้วิธีฮาอีสโตรแกรมเพื่อแยกแยะความผิดปกติของแผ่นวงจร งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการวัดค่าในหน่วยของการวัดใดๆ

Peter Schalk และ Paul O'Leary [7] นำวิธีลำแสงเลเซอร์ตัดผ่านมาใช้กับการวัดและวิเคราะห์เส้นรอบวงหน้าตัดของกระบวนการผลิตท่อเหล็กเพื่อตรวจสอบคุณภาพในการผลิต โดยท่อเหล็กจะผ่านกระบวนการรีดร้อนและหมุนออกจากแท่นรีด ปัญหาของท่อที่เสียคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ได้ รูปทรงไม่กลม และ ท่อไม่ตรง การวัดนี้สามารถวัดค่ารัศมีของท่อทรงกระบอกจากการประมาณค่าของเส้นรอบวง และความตรงของท่อจากค่าความเบี่ยงเบนของจุดศูนย์กลาง ความละเอียดของการวัดอยู่ที่ 1 มิลลิเมตร การประมาณค่าใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดจากการแยกค่าเดียว (Singular Value Decomposition) และ การสอบเทียบขนาดจริงใช้วิธี Homography Transformation.

ในงานวิจัยทางด้านประมง Strobeck และ Daan (1991) [8] ได้นำเสนอวิธีลำแสงตัดขวางใช้ในการประมาณค่าปริมาตรของปลาที่เคลื่อนที่บนสายพานลำเลียง โดยพิจารณาจากความแตกต่างระหว่างลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนพื้นราบของสายพาน และตกกระทบบนตัวปลา จากนั้นทำการเก็บค่าที่ได้เทียบกับปริมาตรจริงเพื่อให้ระบบเครือข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ วิธีนี้จำเป็นจะต้องเก็บตัวอย่างจำนวนมากพอจึงจะสามารถวัดได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้การประมวลผลยังใช้เวลานาน จึงไม่สามารถนำมาใช้งานในแบบเวลาจริงได้ ต่อมา Strobeck และ Daan (2001) พบว่าปริมาตรและน้ำหนักของปลามีความสอดคล้องกับสายพันธุ์ของปลา พวกเขาจึงพัฒนางานเดิมให้สามารถแยกชนิดของปลาด้วยวิธีเดิม อย่างไรก็ตามหน่วยของการวัดขนาดและปริมาตรของปลาไม่ได้อยู่ในรูปของหน่วยการวัดสากล เช่น มิลลิเมตร หรือ เซนติเมตร ต่อมาได้มีการพัฒนาและนำวิธีนี้ไปใช้กับการแยกแยะพันธุ์ปลา โดยในปี 2000 Farag และ คณะ [13] ได้ทำการวิจัยเพื่อหาปริมาตรของปลาแบบวิธีซึ่งน้ำหนักผ่านคอมพิวเตอร์จากหลักการเบื้องต้นของการแทนที่ด้วยน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานหลายประเภทจำเป็นต้องตรวจสอบและวัดขนาดในลักษณะสามมิติ (กว้าง ยาว สูง) นวภัทรา และ ทวีพล (2007) [9] ได้นำเสนอวิธีการวัดขนาดของผลไม้และผักที่มีรูปทรงสมมาตร และในเวลาต่อมาได้พัฒนาระบบนี้สำหรับการวัดขนาดของปลานิลในหน่วยวัดสากลโดยใช้เทคนิค ลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ และนำเสนอการใช้เทคนิคการวัดเชิงเรขาคณิต (Geometrical measurement) ด้วยภาพหรือเรียกว่า Metric Vision เพื่อการวัดขนาดและปริมาตรของวัตถุร่วมกับ หลักการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ ซึ่งเป็นการฉายลำแสงไปบนวัตถุเพื่อเป็นตัวกำหนดลักษณะของ วัตถุตัวอย่างที่จะทำการตรวจวัด จากนั้นทำการแปลงข้อมูลรูปภาพที่ได้เป็นข้อมูลพิกัดในระบบสาม มิติโดยใช้ทฤษฎี Planar Metrology และทฤษฎีการหาระยะทางระหว่างสองระนาบมาประยุกต์เพื่อ หาขนาดความกว้างความยาวและความสูงของวัตถุตัวอย่าง สามารถคำนวณหาพื้นที่และปริมาตรของ วัตถุได้จากสูตรพื้นฐานของรูปทรงเรขาคณิตทั่วไป โดยนำเสนอวิธีใหม่ในการวัดพื้นที่หน้าตัดจากการ ประมาณเส้นรอบวงของตัวปลาในแต่ละพื้นที่หน้าตัดโดยใช้วิธี Polynomial moments และการหา คำตอบด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) [47]

จากการศึกษาถึงปัญหาต่างๆ จึงมีแนวความคิดในการออกแบบระบบการวัดขนาดและ ตรวจสอบวัตถุ ในลักษณะการสแกนบนสายพานลำเลียงซึ่งอยู่ในกระบวนการผลิตโดยทั่วไป และ นำเสนอเทคนิคการใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ (Laser Light Sectioning) ที่เป็นเทคนิค การวัดรูปทรงแบบตัดขวางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายในการ ออกแบบโดยวิธีนี้เป็นการฉายแหล่งกำเนิดแสงลงบนพื้นผิววัตถุเพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของ วัตถุที่แสดงตกกระทบ แสงที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพและบันทึกไว้ด้วยกล้องที่วางทำ มุมเอียงกับแหล่งกำเนิดแสง ร่วมกับการใช้เทคนิควิธีการวัดขนาดด้วยภาพ (Metric Vision) ที่ใช้ ทฤษฎีเกี่ยวกับการมองเห็นเชิงเรขาคณิตของกล้องตัวเดียว และทฤษฎีของการแปลงแบบโฮโมกราฟฟี (Homography Transformation) เพื่อใช้แปลงพิกัดของเส้นแสงเลเซอร์ในภาพที่ได้ซึ่งเป็นคุณสมบัติ ด้านขนาดของวัตถุให้เป็นพิกัดจริงของวัตถุทำให้สามารถคำนวณหาขนาดของวัตถุและพื้นที่ รวมไปถึง ปริมาตรของวัตถุเหล่านั้นได้

1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการค้นคว้าและพัฒนาวิธีการตรวจสอบความสมบูรณ์ของพื้นผิววัสดุ เช่น เหล็กแผ่น ทองแดงแผ่น การอ่านรายนูนของตัวเลขที่ประทับลงบนพื้นผิวโลหะ รวมไปถึงวัด ขนาดวัตถุทรงเรขาคณิตพื้นฐานที่มีรูปทรงเชิงสมมาตร ซึ่งมีรูปทรงใกล้เคียงกับวัตถุดิบใน กระบวนการผลิต เช่น ทรงกระบอก และรูปทรงสี่เหลี่ยมในเชิง 3 มิติ และกระบวนการผลิตใน อุตสาหกรรม เช่น กระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ เป็นต้น โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์จากภาพที่ได้ จากกล้องและทำการทดลองวัดขนาดวัตถุด้วยระบบประมวลผลภาพแบบ Off-line เมื่อได้วิธีการที่ ให้ผลลัพธ์ที่ดี ผู้วิจัยจึงพัฒนาระบบให้สามารถทำงานได้แบบเวลาจริงโดยเป็นการนำเสนอการใช้ เทคนิควิธีการวัดขนาดด้วยภาพ (Metric Vision) บนระนาบภาพ 2 มิติมาประยุกต์ร่วมกับเทคนิคที่ใช้

หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ เพื่อประยุกต์ใช้วัดขนาดความกว้าง ความยาว และความสูงและพื้นที่โดยรวมเชิงปริมาตรในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากลของวัตถุตัวอย่าง โดยคำนึงถึงความง่ายในการออกแบบติดตั้ง รวมทั้งให้ความเร็วในการทำงานและความถูกต้องแม่นยำ ที่มีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้รวมถึงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

สำหรับงานวิจัยที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการตรวจสอบชิ้นงานด้วยภาพแบบอัตโนมัติ 2 ด้านด้วยกัน คือ ในเชิงคุณภาพ และในเชิงปริมาณ โดยในเชิงคุณภาพสามารถหาความผิดปกติของพื้นผิววัสดุจากทางกายภาพ เช่น รอยแตก หรือการบิดเบี้ยว และส่วนเกินของพื้นผิว เช่น พื้นผิวของโลหะจากกระบวนการหล่อหรือรีดขึ้นรูป รวมไปถึงการอ่านข้อมูลจากรอยประทับรหัสสินค้าเป็นรหัสแถบ (Barcode) ตัวเลขหรือตัวอักษร ในเชิงปริมาณคือการวัดขนาดของรูปทรงเชิงเรขาคณิตของวัตถุ ซึ่งระบบที่ออกแบบนี้มีความสามารถในการตรวจสอบหรือวัดขนาดได้ในแบบ 3 มิติ ที่มีความสะดวกในการใช้งานและติดตั้งได้ง่าย รวมทั้งมีความเร็วในการประมวลผลในระดับที่ยอมรับได้ และบอกได้ถึงขนาดของวัตถุที่เป็นหน่วยวัดมาตรฐานสากล สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้มีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการตรวจวัดขนาดวัตถุทรงเรขาคณิตพื้นฐานที่มีรูปทรงเชิงสมมาตร เช่น ทรงกระบอก และรูปทรงสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นวัตถุแบบ 3 มิติ และการอ่านตัวเลขที่ประทับลงบนโลหะในสายการผลิตที่มีความซับซ้อน ด้วยการใช้เทคนิคแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ ร่วมกับการประมวลผลภาพจากภาพที่ทำการบันทึกเป็นภาพวีดีโอ (AVI) โดยทำการพัฒนาและออกแบบโปรแกรมบน MATLAB ให้สามารถวัดขนาดของวัตถุตัวอย่างทั้งความกว้าง ความยาว ความสูงและพื้นที่โดยรวมเชิงปริมาตรในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากล โดยให้ความถูกต้องแม่นยำและมีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากนั้นพัฒนากระบวนการวัดให้สามารถใช้งานได้แบบเวลาจริง สามารถทำงานบนสายการผลิตจำลองได้ ผลการทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของระบบที่ออกแบบได้นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์นี้เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 5 บทด้วยกัน โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงการสร้างภาพเชิงระยะของวัตถุแบบ 3 มิติ (3D Image acquisition) และการสร้างแบบจำลองของพื้นผิว (Surface modelling) รวมทั้งรูปแบบลักษณะการสแกนวัตถุในการตรวจวัดวัตถุแบบ 3 มิติ และอธิบายถึงหลักการของเทคนิคการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับการวัดเชิงเรขาคณิตด้วยการประมวลผลภาพ (Geometrical measurement based on digital image processing) ได้แก่ การแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพ หลักการของการโปรเจกชัน แบบจำลองของกล้อง ทฤษฎีโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม และการคำนวณหาค่าของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมทริกซ์

บทที่ 4 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้การออกแบบระบบตรวจวัดวัตถุโดยการใช้แสงเลเซอร์ แบ่งส่วนวัตถุสำหรับการวัดรูปทรงสามมิติ การติดตั้งระบบและอุปกรณ์ ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมรวมทั้งลักษณะการทำงานและขั้นตอนในการสอบเทียบ ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการตรวจสอบความปกติ และการอ่านค่าตัวเลขบนโลหะที่มีพื้นผิวขรุขระ วิธีในการวัดขนาดของรูปทรงที่สมมาตร และการประยุกต์ในการตรวจสอบความสมบูรณ์ในการขึ้นสกรูของหุ่นยนต์สำหรับกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะและแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การเก็บภาพข้อมูลระยะทางสามมิติ

ในบทนี้กล่าวถึงการเก็บภาพข้อมูลระยะทางสามมิติ (3D Range Data Acquisition) ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับชนิดต่างๆ ตามลักษณะการใช้งาน ซึ่งข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจจับยังไม่เป็นระยะทางจริงที่นำไปใช้งาน ต้องนำข้อมูลเหล่านี้มาทำการคำนวณใหม่หรือสอบเทียบระยะทางก่อนจึงจะใช้งานได้ถูกต้อง ซึ่งเรียกข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจจับนี้ว่าพิกัดข้อมูล (Range data) โดยที่พิกัดข้อมูลที่ได้จะมีประโยชน์มากในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น การมองเห็นของหุ่นยนต์ การวินิจฉัยโรคในด้านการแพทย์ กระบวนการผลิตในงานด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น การเก็บข้อมูลสามมิติเป็นการตรวจจับหรือตรวจวัดข้อมูลของวัตถุที่ต้องการ ในลักษณะทั้งความกว้าง ความยาว รวมทั้งความสูงหรือความหนาของวัตถุ การเก็บข้อมูลสามมิติมีหลักการและวิธีการอยู่หลายวิธีด้วยกัน โดยจะกล่าวถึงการเก็บข้อมูลสามมิติแบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังต่อไปนี้

2.1 หลักการเดินทางของเวลา (Time of flight)

การวัดระยะทางวิธีนี้จะใช้การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปยังวัตถุที่ต้องการ เมื่อสัญญาณนี้กระทบกับวัตถุมันก็จะสะท้อนกลับมาที่ตัวรับ 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

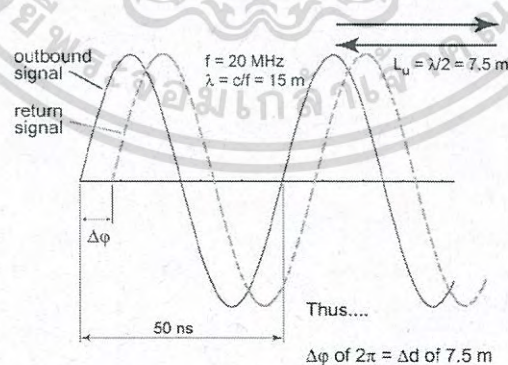
ซึ่งทั่วไปแล้วมีสัญญาณอยู่ 3 ชนิดที่นำมาใช้ในหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปซึ่งได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแสง และคลื่นเสียง ซึ่งวิธีในการคำนวณหาระยะทางจะมีลักษณะเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามสัญญาณแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวของมัน และจะมีผลต่อความแม่นยำของระยะทางที่คำนวณได้ ในที่นี้จะขอก้าวถึงเฉพาะสัญญาณที่เป็นคลื่นแสงเท่านั้น โดยการใช้คลื่นแสงมาใช้ในหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปวิธีนี้ถูกเรียกว่า LIDAR (Light Detection and Ranging) ซึ่งจะกำเนิดคลื่นแสงสั้นๆออกไปและรอคลื่นสะท้อนกลับมาหาเวลาที่สูญเสียไปมาคำนวณหาระยะทาง ในวิธีนี้จะนิยมใช้แสงเลเซอร์เพราะว่ามุมเบี่ยงเบนของคลื่นจะแคบมากเป็นผลให้ระยะทางที่คำนวณได้มีความถูกต้องสูงซึ่งจะดีกว่าคลื่นแสงทั่วไป นอกเหนือจากเวลาที่นำไปใช้คำนวณแล้วความเข้มแสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับมาสามารถนำมาเปลี่ยนเป็นความเข้มในระดับเกรย์ได้อีกด้วย ความเข้มแสงที่สะท้อนกลับมาจะเปลี่ยนไปตามสัดส่วนกับจำนวนแสงที่ถูกดูดกลืนด้วยวัตถุที่แตกต่างกัน ดังนั้นนอกจากจะรู้ระยะทางแล้ว ความเข้มแสงที่ได้รับมาในแต่ละจุดสามารถนำมาแสดงรวมกันได้ภาพสามมิติอีกด้วย



รูปที่ 2.1 หลักการวัดระยะทางโดยใช้คลื่นแสง



รูปที่ 2.2 ความต่างของมุมเฟสที่สะท้อนกลับมาเมื่อกระทบวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวิธีนี้คือถ้านำไปวัดระยะทางที่น้อยกว่าหนึ่งฟุต แสงเลเซอร์จะใช้เวลาการเดินทางและสะท้อนกลับประมาณ 1 นาโนวินาทีจะไม่สามารถตรวจวัดได้ทัน วิธีแก้คือเปลี่ยนไปวัดเฟสของคลื่นที่สะท้อนกลับมาแทน โดยใช้แสงเลเซอร์นี้ผสม (Modulate) แบบ AM (Amplitude Modulation) [15] แล้วจึงส่งออกไปเมื่อแสงไปกระทบวัตถุและสะท้อนกลับมาจะมีเฟสต่างกับคลื่นที่ส่งออกไป ปริมาณความต่างเฟสจะเป็นสัดส่วนกับระยะทางของวัตถุ นอกจากนี้ยังสามารถวัดระยะทางที่ 1 เซนติเมตรได้อีกด้วย ดังนั้นวิธีนี้สามารถนำไปวัดระยะทางในระบบการมองเห็นของหุ่นยนต์ได้

2.2 หลักการของรูปสามเหลี่ยม (Triangulation)

เราอาจจะคุ้นเคยกับแนวความคิดของการนำหลักการของรูปสามเหลี่ยมมาวัดระยะทาง สมมุติว่ามีเครื่องมืออยู่สองตัวซึ่งวางห่างกันเป็นระยะทางที่แน่นอน (d) อุปกรณ์ A และ B จะเก็บตำแหน่งบนวัตถุที่ตำแหน่งเดียวกันดังภาพ



รูปที่ 2.3 การวัดระยะทางโดยหลักการของรูปสามเหลี่ยม

จะเห็นว่าอุปกรณ์ทั้งสอง (A, B) และวัตถุวางในลักษณะรูปสามเหลี่ยม มีด้านหนึ่งด้านและมุมสองมุมที่เราทราบอยู่ก่อนแล้วคือด้าน d กำหนดให้มุมที่เกิดขึ้นระหว่าง d และ r_1 คือมุม θ_1 ส่วนมุมที่เกิดขึ้นระหว่าง d และ r_2 คือมุม θ_2 และมุมที่สามสามารถหาได้โดยใช้มุมสองมุมที่เราทราบค่าลบออกจาก 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) ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับเก็บภาพ 1 ตัวร่วมกับเครื่องกำเนิดแสงอีก 1 ตัว อีกวิธีเรียกว่าแบบพาสซีฟ (Passive) ใช้สำหรับเป็นเครื่องมือเก็บภาพ 2 ตัว เช่น กล้องวิดีโอ เป็นต้น

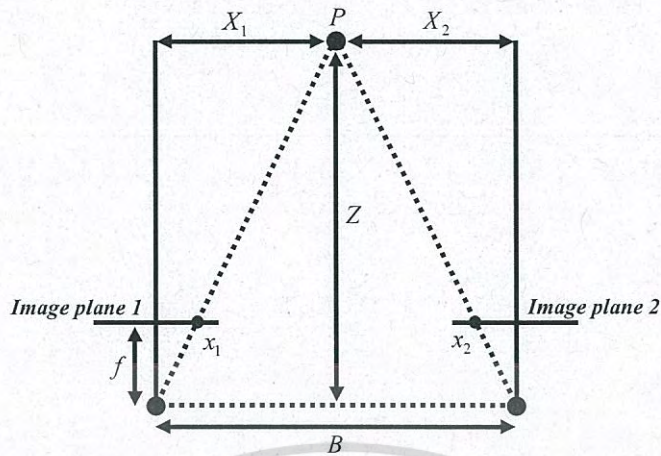
2.3 หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟ (Passive Triangulation)

วิธีนี้บางครั้งถูกเรียกว่าสเตอริโอวิชัน (Stereo vision) อธิบายได้เหมือนกับการใช้ตาทั้งสองของมนุษย์ในการวัดระยะทาง ในวิธีนี้ใช้กล้องวิดีโอเป็นเครื่องมือที่ใช้เก็บภาพ โดยใช้กล้องวิดีโอทั้งสองตัววางห่างกันในระยะทางที่แน่นอนตังภาพ



รูปที่ 2.4 หลักการของระบบสเตอริโอวิชัน (Stereo vision)

หลักการของสเตอริโอวิชันหรือรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟเป็นการหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ โดยอาศัยความแตกต่าง (Disparity) ของจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพของกล้องทั้งสอง ซึ่งในการคำนวณหาระยะทางโดยวิธีนี้สามารถอธิบายได้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 การวัดระยะทางในระบบสเตอริโอวิชั่น

จากรูปที่ 2.6 นั้นสามารถนำมาเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกล้องทั้งสองได้ โดยกำหนดให้ P เป็นจุดของวัตถุในระบบพิกัดกล้อง โดย X_1 และ X_2 เป็นขนาดของวัตถุเมื่อเปรียบเทียบกับแนวแกน Z ของระบบพิกัดกล้อง และ x_1, x_2 เป็นขนาดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพตั้งนั้น

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ 2.7 ลบสมการที่ 2.4 ดังนั้นระยะทาง Z จะหาได้ดังสมการที่ 2.8

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

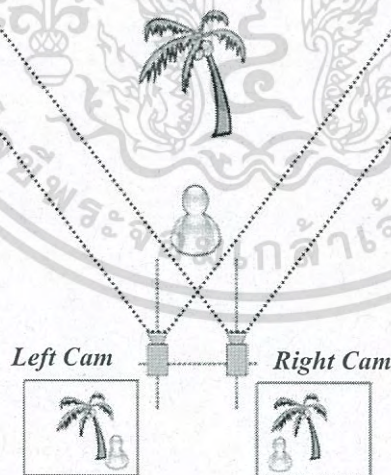
โดยกำหนดให้ Z คือระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ P

B คือระยะทางระหว่างกล้องทั้งสองตัว

f คือความยาวโฟกัสของกล้องทั้งสองตัว

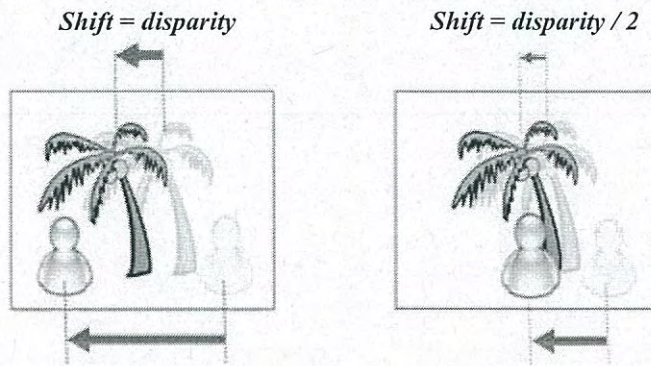
x_1, x_2 คือระยะจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพ

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



รูปที่ 2.6 ภาพถ่ายสเตอริโอที่ได้จากกล้องซ้ายและกล้องขวา

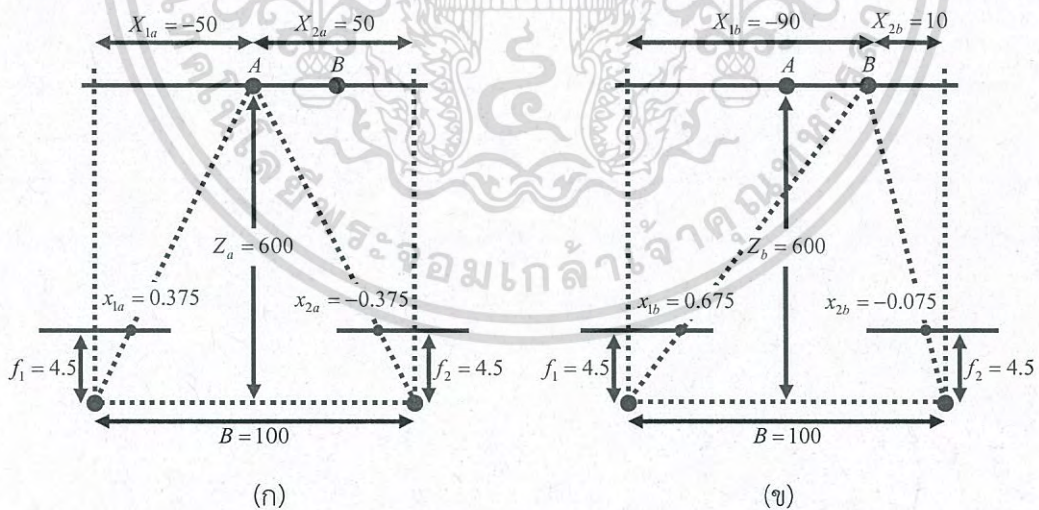
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ภาพความแตกต่างของกล้องทั้งสองเมื่อนำมารวมกัน

รูปที่ 2.7 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากกล้องซ้ายและขวา ถ้าเรานำภาพทั้งสองกล้องมาซ้อนกันดังรูปที่ 2.8 จะเห็นความแตกต่างของวัตถุที่อยู่ในภาพได้ รูปที่ 2.8 อาจจะเรียกได้ว่าเป็นภาพความแตกต่างหรือภาพสเตอริโอ (Stereo image) ซึ่งค่าความแตกต่างของตำแหน่งจุดภาพสามารถนำมาคำนวณหาระยะทางแบบสามมิติที่จะแสดงให้เห็นในตัวอย่างดังต่อไปนี้ การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ กำหนดให้กล้องทั้งสองมีความยาวโฟกัส (f) 4.5 มม. มีระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสอง (B) 100 มม. CCD มีขนาด 4.8x3.6 มม.ขนาดของภาพคือ 384x244 พิกเซล

(1 พิกเซล = 0.0125 มม.)



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องทั้งสองตัวกับวัตถุ

การคำนวณหาระยะทางที่จุด A ในภาพที่ 2.9 (ก) กำหนดให้ $x_{1a} = 30$ พิกเซล = 0.375 มม. เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางซ้าย และ $x_{2a} = 30$ พิกเซล = -0.375 มม. (เกิดขึ้นทางด้านลบ) เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางด้านขวา

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

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

$$= 600 \text{ มม.}$$

การคำนวณหาระยะทางที่จุด B ในภาพที่ 2.9 (ข) กำหนดให้ $x_{1b} = 54$ พิกเซล = 0.675 มม. เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางซ้าย และ $x_{2b} = 6$ พิกเซล = -0.075 มม. (เกิดขึ้นทางด้านลบ) เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางด้านขวา

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

$$= \frac{100 \cdot (-45)}{(-0.075 - 0.675)}$$

$$= 600 \text{ มม.}$$

จะเห็นได้ว่าในระบบสเตอริโอ นั้นความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดภาพที่ตรงกัน หรือสอดคล้องกันของภาพที่ได้จากระนาบของกล้องทั้งสองตัว และตำแหน่งของสองจุดภาพนี้จะต้องคำนวณให้ถูกต้องด้วย ซึ่งกลายเป็นปัญหาหลักที่เกิดขึ้นเสมือนกับวิธีนี้ และปัญหาดังกล่าวนี้ได้ถูกเรียกว่า “Correspondence Problem”

ในทางอุดมคติมันเป็นไปได้ในการหาจุดภาพจากกล้องตัวที่หนึ่งซึ่งสอดคล้องกับจุดภาพจากกล้องตัวที่สอง แต่ในความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถรับประกันได้ว่า สองจุดภาพซึ่งมีค่าระดับสีหรือระดับเกรย์ที่เหมือนกันจะเป็นจุดภาพบนวัตถุจุดเดียวกัน ในการหาจุดภาพจุดเดียวกันของภาพ 2 ภาพจากกล้องทั้งสองไม่ยากนัก ถ้าหากภาพวัตถุที่เกิดขึ้นในภาพทั้งสองมีรูปร่างเหมือนกัน อย่างไรก็ตาม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยสำหรับวิธีนี้ก็คือ ภาพวัตถุที่เกิดขึ้นในภาพทั้งสองมีลักษณะรูปร่างไม่เหมือนกัน ยิ่งไปกว่านั้นวัตถุในภาพแรกอาจจะคมชัดไม่ชัดเจนหรือไม่ปรากฏรูปร่างวัตถุขึ้นในภาพที่สอง ในการแก้ไขเราสามารถลดระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสอง เพื่อช่วยลดปัญหา Correspondence Problem แต่ในการลดระยะห่างนี้จะเป็นผลทำให้ความแม่นยำของระบบลดลงไปด้วย

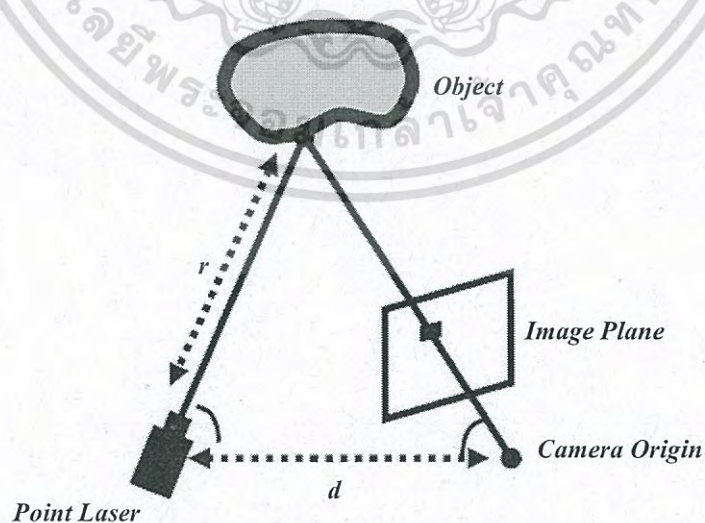
ปัญหาของ Correspondence Problem ที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขและทำให้ลดลงได้ด้วยการตัดอุปกรณ์เก็บภาพออกไป 1 ตัว ซึ่งมันจะไม่ถูกเรียกว่าวิธีสเตอริโออีกต่อไป อย่างไรก็ตามหลักการของรูปสามเหลี่ยมยังคงนำมาใช้กับวิธีนี้ได้ โดยการแทนกล้องตัวที่ตัดออกไปด้วยเครื่องกำเนิดแสงและเรียกวินี้ว่าหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ (Active Triangulation) ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป

2.4 หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ (Active Triangulation)

หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟจะแตกต่างกับวิธีแบบพาสซีฟ คือการใช้เครื่องกำเนิดแสงร่วมกับกล้องวิดีโอเพียง 1 ตัว โดยเครื่องกำเนิดแสงจะเป็นแบบจุด แบบลายเส้น ซึ่งภาพที่ได้เราจะนำจุดภาพที่ถูกแสงกระทบหรือถูกฉายมาคำนวณหาระยะทาง

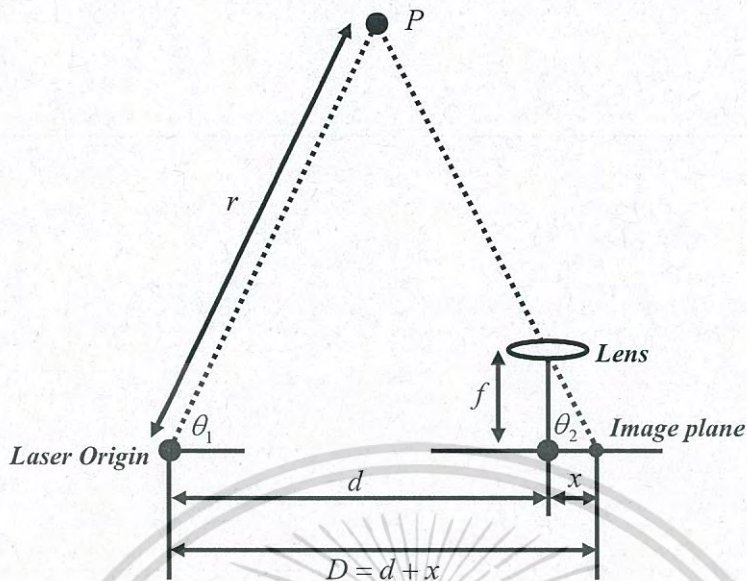
2.5 วิธีฉายแสงแบบจุด (Light Spot Triangulation)

สมมุติว่าเราฉายลำแสงไปบนวัตถุดังรูปที่ 2.10 ลำแสงดังกล่าวจะสร้างจุดแสงบนวัตถุและจะสะท้อนไปยังกล้องวิดีโอ โดยระยะห่างระหว่างกล้องวิดีโอกับเครื่องกำเนิดแสงเป็นระยะ d จะเห็นว่าเป็นรูปสามเหลี่ยมขึ้นระหว่างเครื่องกำเนิดแสง วัตถุและกล้องวิดีโอ ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาระยะทาง r จากกล้องวิดีโอไปยังจุดบนวัตถุได้



รูปที่ 2.9 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การวิเคราะห์ระยะทางของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ

จุดแสงที่สะท้อนไปยังกล้องวิดีโอจะเกิดเป็นจุดภาพขึ้น จุดภาพนี้พบได้ง่ายซึ่งมันจะเป็นจุดที่มีความสว่างมากที่สุด ในการคำนวณหาระยะทาง r นั้นสามารถคำนวณหาได้จากมุม θ_1, θ_2 และระยะทาง d ซึ่งมุม θ_2 คำนวณได้จากความยาวโฟกัสของกล้องวิดีโอ (f) ซึ่งมีค่าคงที่กับระยะห่างจากศูนย์กลางเลนส์กล้องกับจุดภาพ (x) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11 ดังนั้นมุม θ_2 สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

และระยะ D ระหว่างเครื่องกำเนิดแสงและจุดภาพ นั้นสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

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

เมื่อ f คือ ความยาวโฟกัสของกล้องวิดีโอ

x คือ ระยะห่างจากศูนย์กลางของเลนส์กล้องกับจุดภาพที่ได้

d คือ ระยะห่างคงที่ระหว่างเครื่องกำเนิดแสงกับกล้องวิดีโอ

ซึ่ง x สามารถเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับว่าจุดภาพที่ถูกแสงนั้นอยู่ด้านขวา (เป็นบวก) หรืออยู่ด้านซ้าย (เป็นลบ) ของจุดศูนย์กลางของเลนส์กล้อง มุม θ_1 เป็นมุมเอียงของเครื่องกำเนิดแสง ดังนั้นระยะทาง r สามารถคำนวณได้โดยใช้กฎของซายน์ดังต่อไปนี้

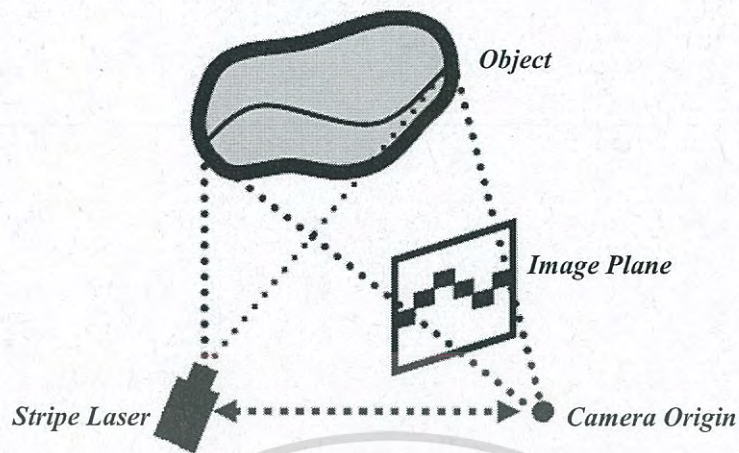
$$\frac{r}{\sin \theta_2} = \frac{D}{\sin(180^\circ - (\theta_1 + \theta_2))} \quad (2.13)$$

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

ในวิธีนี้เมื่อต้องการหาระยะทางที่จุดอื่นๆ บนวัตถุจะต้องเลื่อนจุดแสงไปทั่วตลอดภาพ ซึ่งต้องใช้เวลาานานมาก ส่วนเครื่องกำเนิดแสงที่นิยมใช้ได้แก่ แสงอินฟราเรดและแสงเลเซอร์ โดยสามารถใช้ได้ดีและไม่จำเป็นต้องใช้เฉพาะที่มืด ห้องที่มีระดับแสงปกติก็สามารถใช้ได้แต่ควรติดตั้งตัวกรองแสง (Filter) ไว้ที่ด้านหน้าของกล้องด้วยเพื่อลดปริมาณแสงบริเวณห้องนั้น แสงเลเซอร์เป็นแสงที่ดีที่สุดเพราะให้จุดแสงที่ชัดเจนและมีขนาดเล็กมากและการกระจายของแสงน้อยเป็นผลให้สามารถใช้ในระยะทางที่ไกลๆ ได้ดี

2.6 วิธีฉายแสงแบบลายเส้น (Light Stripe Triangulation)

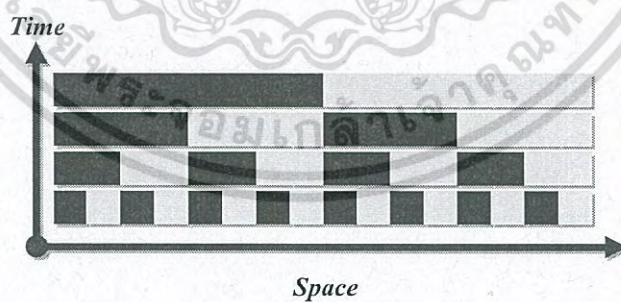
หลักการฉายแสงแบบลายเส้นเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีฉายแสงแบบจุด โดยลายเส้นของแสงจะได้จากการฉายแสงผ่านร่องแสงหรือจากเครื่องกำเนิดแสงแบบจุดผ่านเลนส์ที่มีลักษณะกลมซึ่งทำให้แสงที่ได้กลายเป็นเส้นแสง โดยทำการฉายแสงที่ได้นี้ไปยังวัตถุและใช้กล้องเก็บลายเส้นที่เกิดขึ้นบนวัตถุ ดังรูปที่ 2.12 โดยลายเส้นจะถูกแบ่งออกเป็นจุดภาพย่อยๆ และระยะทางจะคำนวณที่แต่ละจุดตามลายเส้น ส่วนวิธีการคำนวณหาระยะทางจะเหมือนกับวิธีการฉายแสงแบบจุดทุกประการรวมทั้งการวางและติดตั้งอุปกรณ์ก็มีความเหมือนกัน ข้อดีของวิธีการฉายแสงแบบลายเส้นเดี่ยวคือง่ายและรวดเร็วกว่าวิธีการฉายแสงแบบจุด นอกจากนั้นขอบเขตและพื้นที่ของวัตถุ สามารถหาได้โดยการต่อที่จุดปลายของแต่ละลายเส้นเข้าด้วยกัน ดังนั้นวิธีการใช้แสงแบบลายเส้นนี้สามารถใช้ในการแบ่งย่านภาพวัตถุที่เรียกว่า Image segmentation ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.11 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบเส้น

2.7 เทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสไบนารี (Binary code pattern)

วิธีนี้จะใช้เครื่องกำเนิดแสงร่วมกับกล้องวิดีโอ ซึ่งส่วนมากนิยมใช้โปรเจกเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการฉายแสง โดยแสงที่ฉายไปยังวัตถุจะเป็นรหัสไบนารี (Binary code) [16] และใช้กล้องวิดีโอเก็บภาพแสงที่กระทบกับวัตถุ ซึ่งข้อมูลภาพที่ได้จะเป็นข้อมูลของระยะทางบนตำแหน่งของวัตถุซึ่งจะถูกเข้ารหัสเป็นระดับความสว่างและความมืดของแสง โดยจุดของภาพที่มีความสว่างจะเป็น “1” และจุดของภาพที่มีความสว่างน้อยหรือมืดจะเป็น “0” จึงจำเป็นต้องนำรหัสบนจุดภาพดังกล่าวไปถอดรหัสและคำนวณเพื่อทำการหาระยะทางจริงบนวัตถุ

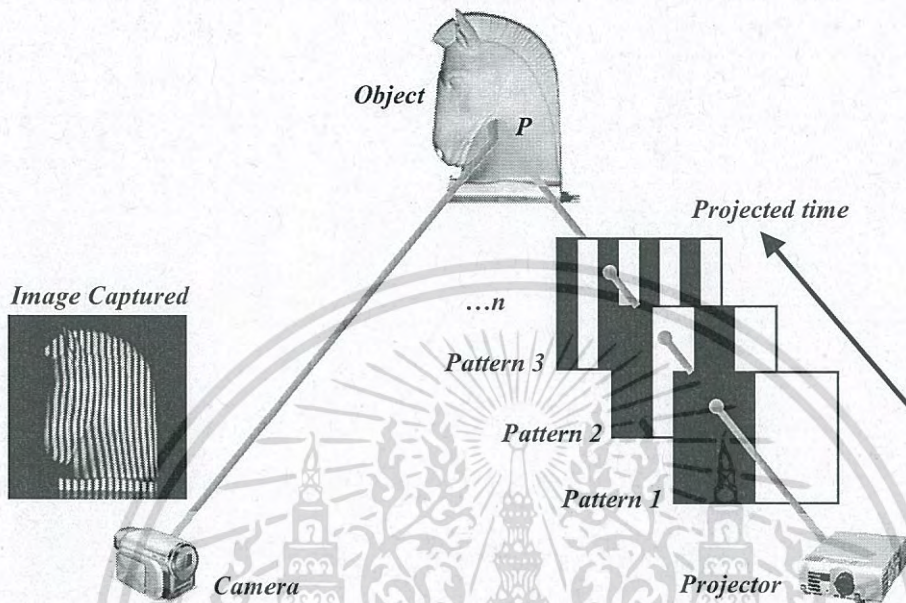


รูปที่ 2.12 ฉากรหัสไบนารี (Binary code pattern)

ในรูปที่ 2.13 สมมติใช้ฉากจำนวน 3 ฉาก จุด P ซึ่งอยู่บนผิวของวัตถุจะถูกเข้ารหัสเป็นระดับมืดหรือ “0” โดยฉากที่ 1 บิตนี้ถูกกำหนดเป็น MSB (Most Significant Bit) เมื่อเปลี่ยนฉากเป็นฉากที่ 2 จะถูกเข้ารหัสใหม่เป็นระดับสว่างหรือ “1” และในฉากที่ 3 จะถูกเข้ารหัสใหม่เป็นระดับมืดหรือ “0” ซึ่งในบิตนี้ถูกกำหนดเป็น LSB (Least Significant Bit) เมื่อนำข้อมูลในแต่ละฉากที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มาอนุกรมกันดังนั้นจุด P จะถูกเข้ารหัสเป็น “101” ดังนั้นถ้าหากใช้ฉากจำนวน n ฉากก็จะสามารถเข้ารหัสได้เป็น 2^n ถ้าสมมุติว่าใช้ฉากจำนวน 7 ฉากก็จะเข้ารหัสให้มีความละเอียดได้เป็น 2^7 หรือ 128 รหัส



รูปที่ 2.13 เทคนิคการฉายแสงผ่านรหัสไบนารี (Binary code pattern)



(ก) (ข) (ค) (ง)

รูปที่ 2.14 ภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารี

การเปลี่ยนภาพรหัสไบนารีไปเป็นข้อมูลระยะทางนั้น จะนำภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารีไปเปรียบเทียบกับภาพวัตถุที่ระดับแสงปกติ โดยเปรียบเทียบทีละจุดภาพแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าเบี่ยงเบน (Deviation) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง เพื่อเป็นการแยกภาพที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารีให้ได้เป็นภาพ 2 ระดับ (Binary Image) จากนั้นนำข้อมูลแต่ละจุดของภาพมาอนุกรมกันจะได้ข้อมูลไบนารีขนาด 7 บิต ซึ่งก็คือข้อมูลระยะทางของแต่ละจุดบนภาพนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณิตใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

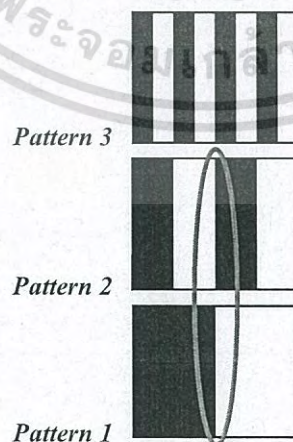
จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 127 ถ้าหากใช้จำนวนฉากเท่ากับ 7 ฉาก โดยระยะทางจริงจะได้จากการแปลงข้อมูลไบนารีเป็นตัวเลขฐานสิบซึ่งสามารถแปลงได้โดย

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

เมื่อ n เป็นจำนวนฉากและ B เป็นตำแหน่งแต่ละจุดของภาพไบนารีของภาพทั้งหมด 7 ภาพ ($n = 7$) ซึ่งจะต้องกระทำการแปลงทุกจุดของภาพ ตัวอย่าง เช่น ที่จุดภาพ B ที่ตำแหน่ง $x = 120, y = 80$ ภาพแรกที่เป็น LSB มีค่า $B_{(0)} = 1$, ภาพที่สอง $B_{(1)} = 0$, ภาพที่สาม $B_{(2)} = 1$, ภาพที่สี่ $B_{(3)} = 0$, ภาพที่ห้า $B_{(4)} = 1$, ภาพที่หก $B_{(5)} = 1$ และภาพที่เจ็ดซึ่งเป็น MSB มีค่า $B_{(6)} = 0$ เมื่อนำมาอนุกรมกันจะได้ $B_{(120,80)} = (0110101)_B$ ซึ่งแปลงเป็นระยะทางได้โดย

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

การฉายแสงผ่านรหัสไบนารี (Binary code pattern) นั้นจะเกิดปัญหาขึ้นที่ความเหลื่อมล้ำของแสงระหว่างร่องแสงข้างเคียงที่อยู่ติดกัน ซึ่งเป็นผลให้ระยะทางบางตำแหน่งที่ได้ผิดไปมาก เช่น ถ้าหากในฉากที่ 1 มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น การเข้ารหัสอาจผิดพลาดจาก “011” หรือ 3 ไปเป็น “111” หรือ 7 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดไปถึง 4 ตำแหน่งและอาจเกิดขึ้นได้ในทุกๆ ฉาก

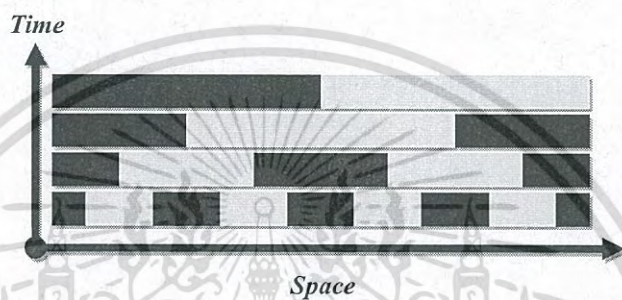


รูปที่ 2.15 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสไบนารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 เทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสเกรย์ (Gray code pattern)

เนื่องจากเทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสไบนารีจะมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นที่บางตำแหน่งบนวัตถุ โดยเฉพาะบริเวณร่องแสงที่ติดกัน เพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าวจึงเปลี่ยนการเข้ารหัสระยะจากการใช้รหัสไบนารีด้วยการใช้รหัสเกรย์ เนื่องจากทั้งรหัสไบนารีและรหัสเกรย์ต่างก็เป็นเลขฐานสองจึงสามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้ ลักษณะการฉายแสงและการวางตำแหน่งของอุปกรณ์สามารถใช้วิธีการเดียวกับการใช้รหัสไบนารี เพียงแต่รหัสเกรย์มีขั้นตอนในการแปลงข้อมูลที่ซับซ้อนกว่า ส่วนในการคำนวณหาระยะทางจะเหมือนกันทุกประการ



รูปที่ 2.16 ฉากรหัสเกรย์ (Gray code pattern)

การเปลี่ยนภาพรหัสเกรย์เป็นข้อมูลระยะทางจะเหมือนกับการเปลี่ยนของภาพรหัสไบนารี ซึ่งจะนำจุดภาพที่ตำแหน่งเดียวกันของทุกภาพที่ได้จากการฉายฉากรหัสเกรย์ มาทำการอนุกรมกันจะได้เป็นข้อมูลรหัสเกรย์แล้วเปลี่ยนเป็นข้อมูลรหัสไบนารีโดยบิตที่เป็น MSB

$$B_{(n-1)} = G_{(n-1)} \quad (2.16)$$

ซึ่ง B คือ ตำแหน่งบิตของจุดภาพรหัสไบนารี G คือตำแหน่งบิตของจุดภาพรหัสเกรย์ และบิตที่เหลือจนถึงบิตที่เป็น 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

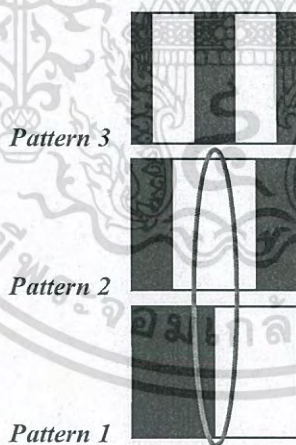
$$\text{ข้อมูลระยะทาง} = \sum_{i=0}^{n-1} (B_i \times 2^i) \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เมื่อเปลี่ยนมาใช้ฉากรหัสเกรย์ในการเข้ารหัสระยะทางแทนฉากไบนารี หากมีความเหลื่อมล้ำของแสงระหว่างร่องแสงข้างเคียง ความผิดพลาดจากการใช้ฉากรหัสเกรย์จะลดลง เนื่องจากความเหลื่อมล้ำของสองตำแหน่งที่อยู่ติดกันจะมีค่าผิดพลาดไปได้แค่ 1 ค่า ตัวอย่างเช่น ถ้าหากในฉากที่ 1 มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น การเข้ารหัสเกรย์อาจผิดพลาดจาก “010” ไปเป็น “110” หรือ เมื่อแปลงเป็นระยะทางแล้วคือมีค่าความผิดพลาด “3” ไปเป็น “4” มีค่าความผิดพลาดไปเพียง 1 ตำแหน่งเท่านั้น



รูปที่ 2.17 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสเกรย์

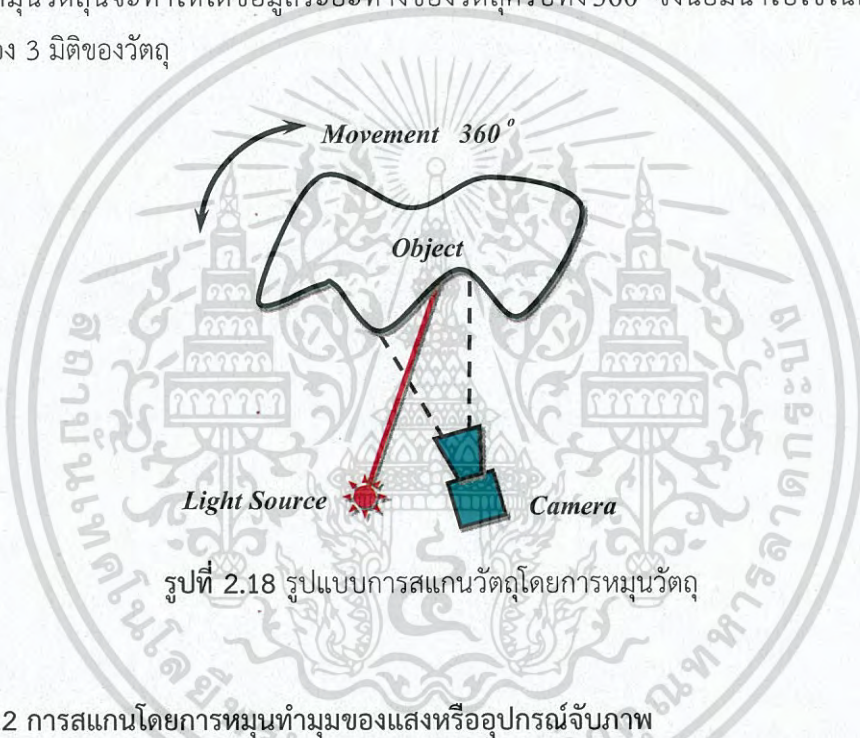
2.9 รูปแบบการสแกนวัตถุ (Scanning Patterns)

การสแกนวัตถุเป็นรูปแบบในการเก็บข้อมูลสามมิติของวัตถุต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่สามารถแบ่งลักษณะของการสแกนวัตถุได้เป็น 3 แบบ คือ การสแกนโดยการหมุนวัตถุ (360°) การสแกนโดยการหมุนท่ามุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ และการสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1 การสแกนโดยการหมุนวัตถุ

วิธีการสแกนโดยการหมุนวัตถุจะทำการวางวัตถุที่ต้องการเก็บข้อมูลระยะทางลงบนแท่นหมุน โดยทำการหมุนวัตถุเพื่อเก็บข้อมูลระยะทางของวัตถุทั้ง 360° ลักษณะการสแกนโดยการหมุนวัตถุส่วนใหญ่จะใช้ร่วมกับหลักการเก็บข้อมูลระยะทางด้วยหลักการสามเหลี่ยมแบบแอดคทีฟด้วยลำแสงแบบเส้น (Light Stripe Triangulation) เมื่อทำการฉายแสงลงไปในวัตถุแล้วทำการเก็บข้อมูลโดยกล้องวิดีโอ ก็จะสามารถนำมาคำนวณหาข้อมูลระยะทางของวัตถุตัวอย่างได้ ถ้าทำการหมุนวัตถุเคลื่อนที่ไปเป็นมุมต่างๆ ก็จะทำให้ได้ข้อมูลระยะทางในมุมอื่นๆของวัตถุ หากทำการหมุนไปเรื่อยๆจนครบ 360° ก็จะทำให้ได้ข้อมูลระยะทางของวัตถุครบทุกๆ ส่วนของวัตถุ ดังนั้นการสแกนด้วยการหมุนวัตถุนี้จะทำให้ได้ข้อมูลระยะทางของวัตถุครบทั้ง 360° จึงนิยมนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุ

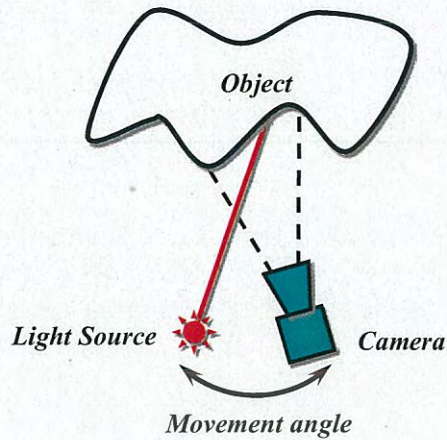


รูปที่ 2.18 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนวัตถุ

2.9.2 การสแกนโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ

การสแกนโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพจะกำหนดให้วัตถุที่ต้องการเก็บข้อมูลระยะทางวางอยู่กับที่ ส่วนที่เคลื่อนที่จะเป็นส่วนของแหล่งกำเนิดแสงเพียงอย่างเดียว ซึ่งในกรณีนี้จะใช้ร่วมกับหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญหายไปโดยการใช้แสง (LIDAR : Light Detection And Ranging) หรือส่วนเคลื่อนที่จะเป็นส่วนของแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์ตรวจจับภาพ ในกรณีนี้จะใช้ร่วมกับการเก็บข้อมูลระยะทางด้วยหลักการสามเหลี่ยมแอดคทีฟโดยการใช้แสงแบบจุด (Light Spot Triangulation) อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการควบคุมการหมุนหรือเปลี่ยนมุมของแสงคือ MEMS (Micro Electro Mechanical System) ซึ่งเป็นอุปกรณ์นี้ประกอบด้วยกระจกขนาดเล็กและส่วนควบคุมการเอียงของกระจก การสแกนโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพจะนิยมใช้ในงานการสร้างแผนที่สามมิติ หรือการเก็บข้อมูลของวัตถุขนาดเล็กเพราะจะใช้เวลาในการสแกนมาก

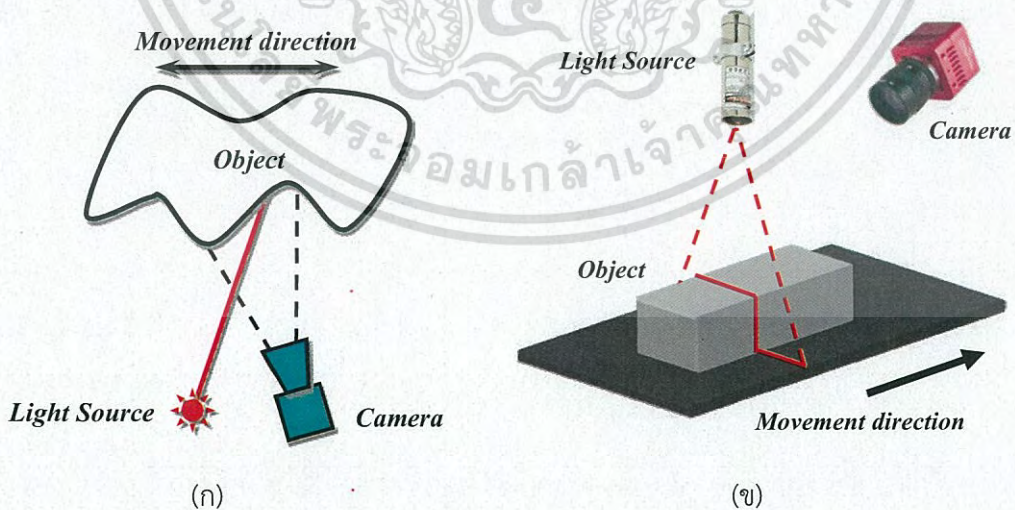
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนท่ามุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ

2.9.3 การสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุ

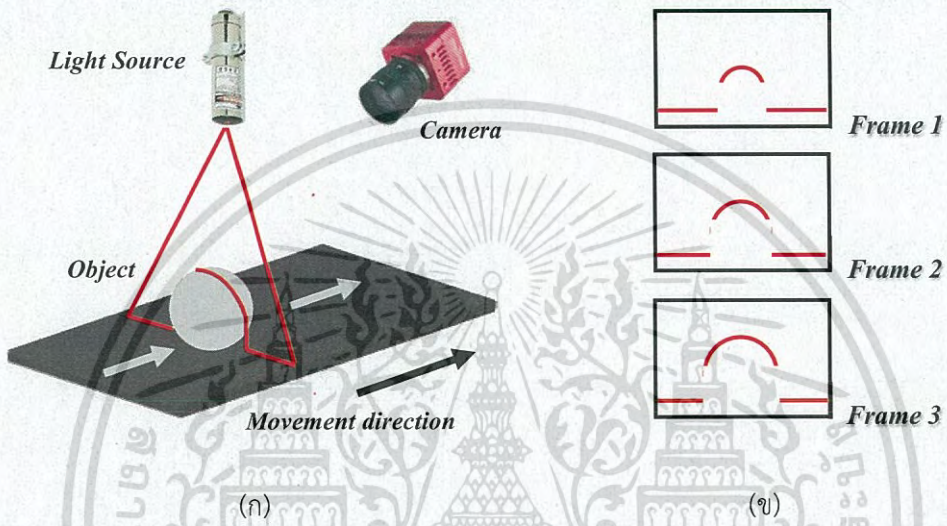
การสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือเรียกว่า การสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนของวัตถุ (Light-Sectioning) เป็นเทคนิคการวัดรูปทรงแบบตัดขวางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในขบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งการสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนของวัตถุเป็นส่วนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งวิธีนี้เปรียบเสมือนจะเป็นการแบ่งวัตถุ 3 มิติออกเป็นส่วนย่อยๆ (2 มิติ) ตามแนวความยาวของวัตถุ โดยการฉาย (Projection) แสงลงบนพื้นผิววัตถุเพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิว (Surface Feature) ของวัตถุที่แสงตกกระทบ ซึ่งส่วนมากแล้วแหล่งกำเนิดแสงจะใช้เส้นเลเซอร์สีแดง เนื่องจากการนำมาวิเคราะห์และประมวลผลทำได้ง่าย นอกจากนั้นยังช่วยลดขั้นตอนในการแบ่งส่วนวัตถุหรือภาพ (Image segmentation)



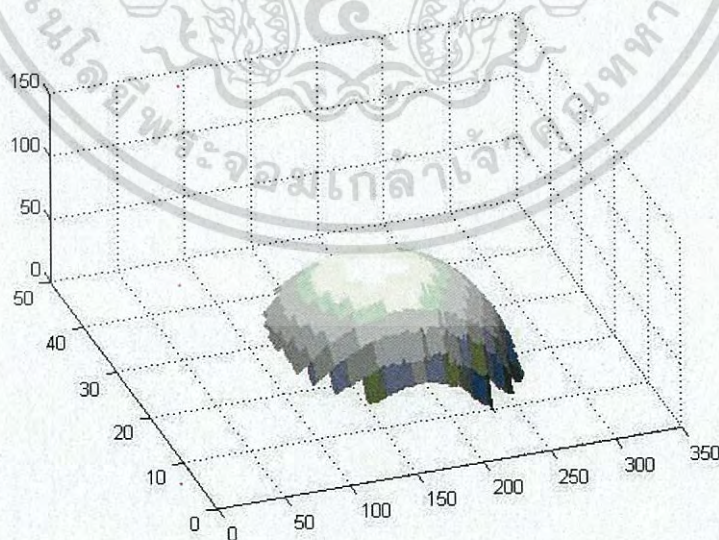
รูปที่ 2.20 การสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแสงที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพและบันทึกไว้ด้วยกล้องที่วางทำมุมเอียงกับแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งข้อมูลของภาพที่ได้มาจะเปรียบเสมือนเป็นข้อมูลความหนาและความกว้างในแต่ละจุดบนพื้นผิววัตถุ เมื่อทำการเคลื่อนที่วัตถุก็จะได้ข้อมูลในส่วนต่อไปของวัตถุในลักษณะของภาพตัดขวางของแต่ละส่วน และนำภาพตัดขวางแบบ 2 มิติแต่ละส่วนของวัตถุมารวมกันเพื่อสร้างเป็นภาพตัดขวาง 3 มิติ ที่เป็นตัวบอกได้ถึงถึงความกว้าง ความสูง และความยาวของวัตถุนั้นๆ



รูปที่ 2.21 (ก) การเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านเส้นแสง (ข) ภาพที่ได้ในเฟรมต่างๆ เมื่อมีวัตถุตัดผ่าน



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างการนำภาพตัดขวางแต่ละส่วนมารวมเพื่อสร้างภาพตัดขวาง 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.21 (ข) แสดงภาพที่ได้จากกล้องในเฟรมต่างๆ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่านทำให้เส้นแสงเลเซอร์เปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามพื้นผิวของวัตถุ โดยรูปร่างของเส้นแสงที่ได้จะบอกถึงคุณลักษณะของวัตถุสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติ 2 มิติในเชิงระยะพิกัดหรือขนาดของวัตถุที่จะบอกถึงความกว้างและความสูง นอกจากนั้นเมื่อให้วัตถุเคลื่อนที่โดยความเร็วที่สอดคล้องกับความเร็วในการเก็บภาพของกล้อง (Frame per Second) แล้วทำการเก็บข้อมูลภาพอย่างต่อเนื่อง เมื่อนำข้อมูลภาพที่ได้ในแต่ละส่วนที่เป็น 2 มิติของวัตถุมาต่อกันจะทำให้เกิดคุณลักษณะของวัตถุใน 3 มิติ ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติที่เป็นขนาดของวัตถุทั้ง ความกว้าง ความยาว และความหนาของวัตถุ รวมทั้งพื้นที่โดยรวมของวัตถุซึ่งปกตินิยมใช้หลักการของรูปสามเหลี่ยมมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีข้อจำกัดคือถ้าการติดตั้งไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของหลักการรูปสามเหลี่ยมเช่น ระยะห่างระหว่างกล้องกับแหล่งกำเนิดแสงรวมทั้งการทำมุมของกล้องหรือแหล่งกำเนิดแสงมีการคลาดเคลื่อนจากการติดตั้ง นอกจากนั้นหลักการของรูปสามเหลี่ยมมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดของวัตถุไม่สามารถทำการขยายย่อในการตรวจวัดได้ สำหรับเนื้อหาในบทที่ 3 จะเป็นกล่าวถึงการวัดเชิงเรขาคณิตด้วยทฤษฎีการประมวลผลภาพ และ หลักการหาค่าโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์เพื่อใช้ในการแปลงระหว่างพิกัดภาพและพิกัดจริงตามหลักการของระบบสมการเชิงเส้นด้วยการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุด



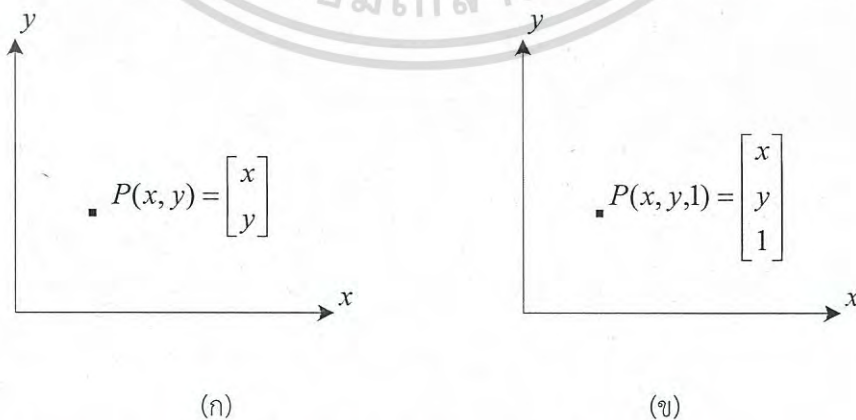
บทที่ 3

การวัดเชิงเรขาคณิตด้วยการประมวลผลภาพ

ในบทนี้นำเสนอรายละเอียดและวิธีการเกี่ยวกับทฤษฎีทางด้านการประมวลผลภาพ สำหรับรายละเอียดที่นำเสนอในบทนี้ จะเริ่มต้นอธิบายถึงการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพแบบจำลองของกล้องดิจิตอลและทฤษฎีของโฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์ม และสุดท้ายจะอธิบายหลักการของการหาค่าของโฮโมกราฟฟิเมทริกซ์จากระหว่างบนพิกัดภาพและพิกัดจริงโดยอ้างอิงถึงระบบสมการเชิงเส้นด้วยการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุด

3.1 การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric Transformation)

ในงานทางด้านการประมวลผลรูปภาพบางครั้งจำเป็นต้องมีการเคลื่อนย้ายภาพไปยังตำแหน่งใหม่ ย่อขยายภาพ หรือมีการหมุนภาพให้อยู่ในมุมมองที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทำได้โดยการแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric Transformation) การพิจารณการแปลงนั้นเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายจึงมักจะเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ สำหรับการแปลงเชิงเรขาคณิตโดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วยแปลงหลายๆชนิดประกอบกันและเนื่องจากเป็นการคำนวณในรูปแบบของเมทริกซ์ จึงทำให้ยากในการคำนวณเมทริกซ์ที่แตกต่างกัน จึงได้มีการนำระบบพิกัดโฮโมจีเนียส (Homogeneous Coordinate) เข้ามาใช้เพื่อแก้ปัญหานี้ โดยทำการจัดรูปแบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate) จาก (x, y) เพื่อให้อยู่ในแบบของระบบพิกัดโฮโมจีเนียส คือ (xw, yw, w) โดยจะมี w เป็นค่าเฟกเตอร์การสเกลที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ จุด (xw, yw, w) จะถูกนอร์มอลไลซ์ (Normalize) โดยทั่วไปเราสามารถเลือกค่า w เป็นจำนวนจริงบวกใดๆ ก็ได้แต่เพื่อความสะดวกในการหาผลลัพธ์ในทางคณิตศาสตร์มักจะกำหนดให้ค่าของ $w = 1$ ดังนั้นพิกัดโฮโมจีเนียสก็คือ $(x, y, 1)$



รูปที่ 3.1 แสดงระบบพิกัด (ก) Cartesian coordinate (ข) Homogeneous coordinate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การเลื่อนภาพ (Translation)

การเลื่อนภาพเป็นการเลื่อนตำแหน่งของภาพตามระยะการขจัดทางแนวแกน $x(Tx)$ และตามแนวแกน $y(Ty)$ เมื่อกำหนดให้พิกัดเดิมคือ (x, y) และพิกัดใหม่คือ (x', y') จะได้สมการของการเลื่อนภาพดังนี้คือ

$$x' = x + Tx \tag{3.1}$$

$$y' = y + Ty \tag{3.2}$$

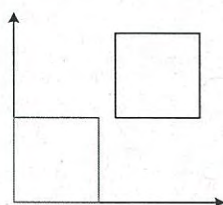
ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ มีลักษณะดังนี้คือ $P' = P + T$ เมื่อ

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad T = \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

ดังนั้นการเลื่อนสามารถจัดอยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสเมทริกซ์จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & Tx \\ 0 & 1 & Ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

การเลื่อนเป็นการแปลงที่มีประโยชน์มากในการประมวลผลภาพตัวอย่างเช่น การเลื่อนพิกัดของภาพมายังจุดกำเนิด $(0,0,0)$



รูปที่ 3.2 การเลื่อนพิกัดของภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การย่อขยายภาพ (Scaling)

การย่อและการขยายภาพสามารถทำได้โดยใช้สเกลแฟกเตอร์ (Scaling factor) ได้แก่ S_x และ S_y ซึ่งใช้สำหรับการย่อและการขยายภาพในทางแกน x และ y ตามลำดับ โดยถ้า $(0 < S_x, S_y < 1)$ แสดงว่าเป็นการย่อภาพและ $(S_x, S_y > 1)$ แสดงว่าเป็นการขยายภาพ โดยสมการของการสเกลจะมีลักษณะดังนี้

$$x' = x \cdot S_x \tag{3.5}$$

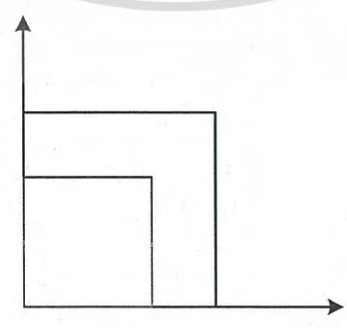
$$y' = y \cdot S_y \tag{3.6}$$

ย่อและขยายภาพโดยใช้เมทริกซ์จะมีลักษณะดังนี้คือ $P' = S \cdot P$ เมื่อ

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad S = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

ดังนั้นการย่อและขยายภาพจัดสามารถอยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

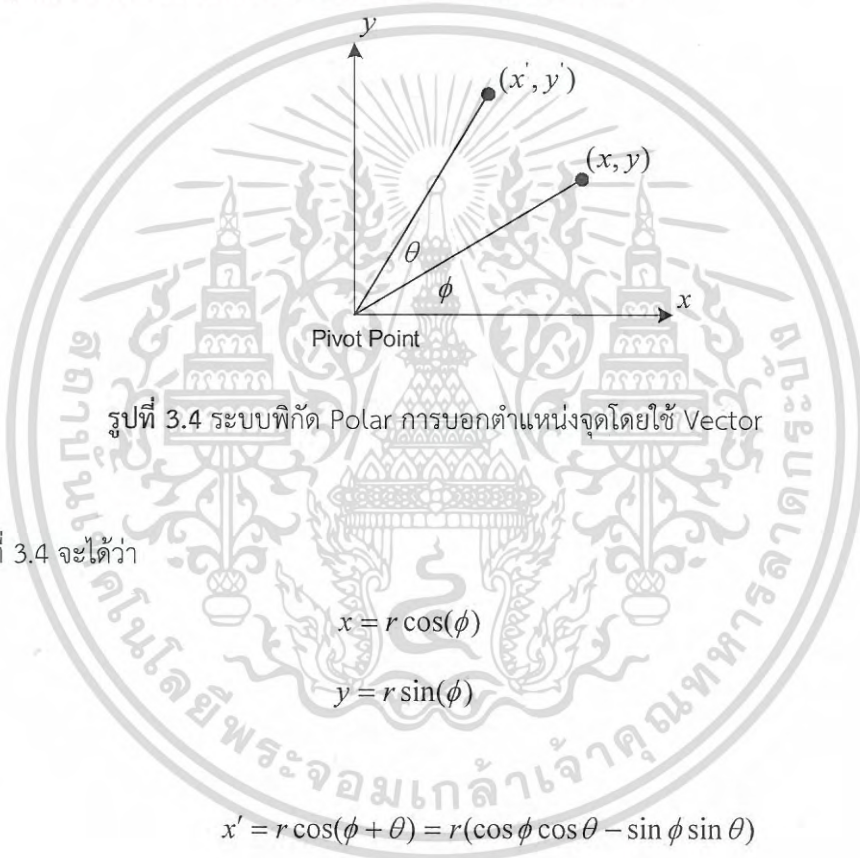


รูปที่ 3.3 การขยายขนาดของภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การหมุน (Rotation)

การหมุนภาพเป็นการแปลงรูปแบบของภาพที่จะต้องกำหนดว่าจุดใดจุดหนึ่งเป็นจุดหมุน (Pivot point) เสมอ หลังจากหมุนภาพไปแล้วระยะห่างระหว่างจุดหมุนกับภาพจะยังคงมีค่าเท่าเดิม รูปร่างและลักษณะของภาพก็ยังคงเดิมแต่ภาพจะมีการจัดวางที่ต่างไปจากเดิม เนื่องมาจากการหมุนนั่นเอง การหมุนภาพอาจจะหมุนที่หลายๆ ภาพก็ได้จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา (ค่ามุมเป็นบวก) หรือ หมุนตามเข็มนาฬิกาก็ได้ (ค่ามุมเป็นลบ) และจุดหมุนที่ใช้ อาจจะอยู่ภายในหรือภายนอกภาพก็ได้ การอ้างถึงจุดพิกัด (x, y) นั้น นอกจากจะใช้ระบบพิกัดฉากแล้ว อาจจะใช้ระบบพิกัดโพล่า (การบอกตำแหน่งจุดโดยใช้ Vector) ก็ได้ ซึ่งทั้งสองระบบมีความสัมพันธ์กันดังนี้



รูปที่ 3.4 ระบบพิกัด Polar การบอกตำแหน่งจุดโดยใช้ Vector

จากรูปที่ 3.4 จะได้ว่า

$$x = r \cos(\phi) \quad (3.9)$$

$$y = r \sin(\phi) \quad (3.10)$$

และ

$$x' = r \cos(\phi + \theta) = r(\cos \phi \cos \theta - \sin \phi \sin \theta) \quad (3.11)$$

$$y' = r \sin(\phi + \theta) = r(\sin \phi \cos \theta + \cos \phi \sin \theta) \quad (3.12)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (3.11) และ (3.12) จะได้สมการของการหมุนรอบจุด Pivot Point ดังนี้คือ

$$x' = x \cos(\theta) - y \sin \theta \quad (3.13)$$

$$y' = x \sin(\theta) + y \cos \theta \quad (3.14)$$

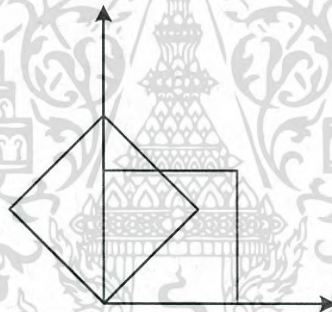
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ มีลักษณะดังนี้คือ $P' = R \cdot P$ เมื่อ

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

ดังนั้นการหมุนสามารถจัดอยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสเมทริกซ์จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$



รูปที่ 3.5 การหมุนของภาพ

3.1.4 การบิดภาพ (Shearing)

การบิดภาพจะทำให้บางส่วนของภาพหรือภาพทั้งหมดเกิดการบิดเบือนขึ้น ในที่นี้เราจะพิจารณาเพียง 2 แบบคือ การบิดภาพทางแกน x และการบิดภาพทางแกน y การบิดภาพทางแกน y จะทำให้เกิดการย้ายจุด (x, y) ไปยังจุด (x', y') โดยที่

$$x' = x \quad , \quad y' = y + x \cdot shY \quad (3.17)$$

การบิดภาพทางแกน y จะทำให้จุดต่างๆ ในแกน y เลื่อนขึ้นหรือลงขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ Shy factor จากสมการการบิดภาพดังกล่าว สามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสเมทริกซ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

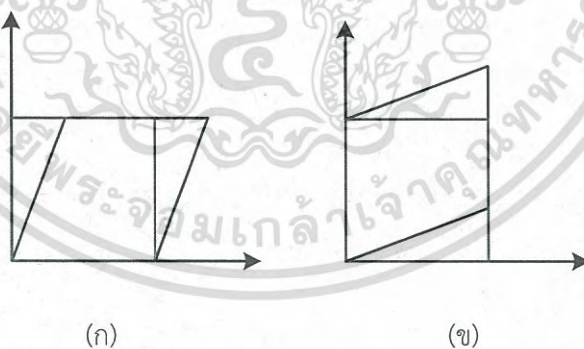
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & shY & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

สำหรับการบิดภาพทางแกน x จะให้ผลตรงกันข้ามกับการบิดภาพทางแกน y กล่าวคือ จุด (x, y) ของภาพจะถูกแปลงไปเป็นจุด (x', y') โดยที่

$$y' = y, \quad x' = x + y \cdot shX \quad (3.19)$$

การบิดภาพทางแกน x จะทำให้จุดต่างๆ ในแกน x เลื่อนขึ้นหรือลงขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ Shy factor จากสมการการบิดภาพดังกล่าว สามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเทริกซ์ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ shX & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$



รูปที่ 3.6 การบิดของภาพ (ก) การบิดภาพทางแกน x (ข) การบิดภาพทางแกน y

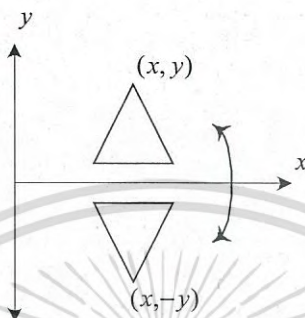
3.1.5 การสะท้อน (Reflection)

การสะท้อนเป็นการแปลงที่จะสร้างภาพของวัตถุในลักษณะของกระจก โดยจะทำการหมุนภาพต้นแบบไป 180 องศา รอบแกนการสะท้อน ซึ่งในที่นี้เราจะพิจารณาการสะท้อนอยู่ 3 แบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5.1 การสะท้อนตามแกน x

การสะท้อนกับแกน x สามารถทำได้โดยการคูณจุดทุกจุดที่ใช้นิยามภาพกับเมทริกซ์การแปลงสำหรับการสะท้อนกับแกน x จะทำให้จุด (x, y) กลายเป็นจุด (x', y') ดังนี้



รูปที่ 3.7 การสะท้อนตามแกน x

การสะท้อนกับแกน x สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$x' = x \tag{3.21}$$

$$y' = -y \tag{3.22}$$

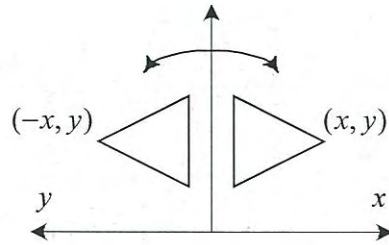
และสามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.23}$$

3.1.5.2 การสะท้อนตามแกน y

การสะท้อนกับแกน y สามารถทำได้โดยการคูณจุดทุกจุดที่ใช้นิยามภาพกับเมทริกซ์การแปลงสำหรับการสะท้อนกับแกน y จะทำให้จุด (x, y) กลายเป็นจุด (x', y') ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 การสะท้อนตามแกน y

การสะท้อนกับแกน y สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$x' = -x \quad (3.24)$$

$$y' = y \quad (3.25)$$

และสามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

3.1.5.3 การสะท้อนรอบเส้นตรงใด ๆ

สำหรับการสะท้อนรอบแกนใดๆ สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งแกน $y = x$ หรือ $y = -x$ ก็ได้ กรณีที่เป็นการสะท้อนรอบแกน $y = x$

รูปที่ 3.8 การสะท้อนรอบเส้นตรง $y = x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการสะท้อนกับเส้นตรง $y = x$ จะทำให้จุด (x, y) กลายเป็นจุด (x', y') สามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

กรณีที่เป็นการสะท้อนรอบแกน $y = -x$ การสะท้อนกับเส้นตรง $y = -x$ จะทำให้จุด (x, y) กลายเป็นจุด (x', y') สามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

จากการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบพื้นฐานได้กล่าวถึงไปแล้ว โดยทั่วไปการประมวลผลภาพในเรื่องการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพจะเป็นการแปลงหลายๆ ชนิดร่วมกัน หรือเรียกว่าการแปลงแบบผสม (Multiple Transformations) ตัวอย่างเช่นในระบบ 3 มิติการหมุนในสองแกนก็สามารถหาเมทริกซ์การแปลงของการหมุนได้โดยการนำเมทริกซ์การแปลงของการหมุนรอบแกนในแต่ละแกนมาคูณกัน แต่มีข้อควรระวังว่าการคูณของเมทริกซ์นั้นจะไม่มีคุณสมบัติของการสลับที่ หากมีการสลับตำแหน่งของการคูณกันแล้วจะให้ผลลัพธ์ที่ไม่เท่ากัน

ส่วนในกรณีที่มีการหมุนและการเคลื่อนย้ายพิกัดด้วย ก็สามารถหาเมทริกซ์การแปลงได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้กรณี 2 มิติ โดยมีลำดับการแปลงคือเคลื่อนย้ายจุดก่อนแล้วจึงหมุนตามลำดับ จะได้เป็นดังนี้

$$M = [T][R] \quad (3.29)$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & Tx \\ 0 & 1 & Ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบอื่นๆ ที่มีร่วมกันของการแปลงแบบต่างๆ ก็สามารถที่จะหาเมทริกซ์ของการแปลงได้ในทำนองเดียวกันนี้

3.2 การโปรเจกชัน (Projections)

โดยทั่วไปการโปรเจกชันจะเป็นการแปลงจาก n มิติไปเป็น $n-1$ มิติ เมื่อสมมุติให้มีวัตถุสามมิติที่จะถูกโปรเจก (Projected) ลงบนระนาบของการโปรเจก (Projection Plane) โดยมีผู้สังเกตลักษณะการโปรเจกของวัตถุ และเพื่อให้สามารถมองลักษณะการโปรเจกชันได้จึงต้องกำหนดให้วัตถุและผู้สังเกตอยู่คนละข้างกันของระนาบการโปรเจก



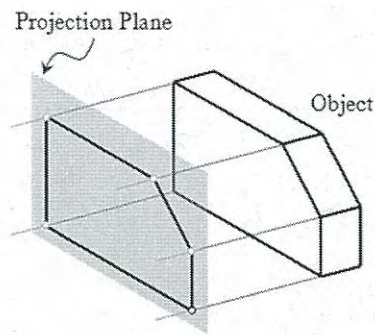
รูปที่ 3.9.1 หลักการของการโปรเจกชัน

การโปรเจกชันสามารถแบ่งได้เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Projections) และแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Projections) โดยที่ในส่วนของการโปรเจกชันแบบเชิงเส้นจะประกอบด้วย 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ การโปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections) และ การโปรเจกชันแบบเพอสเปกทิฟ (Perspective Projections)

3.2.1 การโปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections)

หลักการของการโปรเจกชันแบบขนานคือ ฉายไปตามทิศทางที่กำหนดไว้ขึ้นไปปรากฏเป็นจุดใหม่บนระนาบการโปรเจกซึ่งเป็น 2 มิติ โดยที่แสงและเงาของวัตถุที่ฉายจะพุ่งขนานกันไปกระทบกับระนาบของการโปรเจกและขนาดของรูปที่ได้จากการโปรเจกแบบนี้จะมีขนาดเท่ากับขนาดของวัตถุ ส่วนใหญ่การโปรเจกชันแบบขนานนี้ถูกใช้ในการวาดภาพทางวิศวกรรม

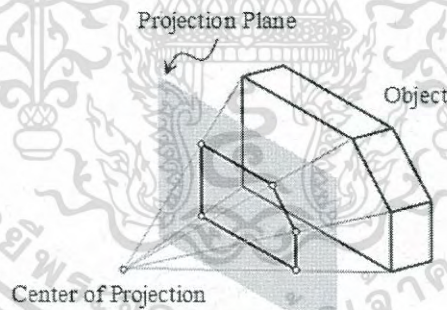
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



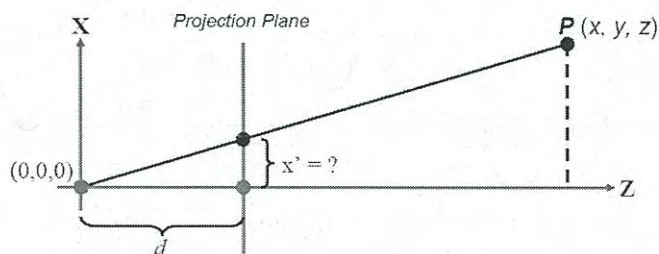
รูปที่ 3.10 การโปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections)

3.2.2 การโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projections)

การโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projections) เป็นการมองเห็นวัตถุในลักษณะเดียวกับโลกของความจริงเหมือนที่ตามนุษย์มองเห็น การโปรเจกชันแบบนี้มีจุดศูนย์กลางของการโปรเจก (Center of Projection) อยู่ที่จุดๆ หนึ่ง แนวลำแสงและเงาของวัตถุที่ฉายจะพุ่งเข้าไปยังจุดศูนย์กลางของการโปรเจกมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมคือ ผู้สังเกตจะเห็นวัตถุที่อยู่ไกลมีขนาดเล็กกว่าความเป็นจริง เนื่องจากของวัตถุเปลี่ยนแปลงไปโดยมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับระยะห่างระหว่างวัตถุกับจุดศูนย์กลางของการโปรเจก



รูปที่ 3.11 การโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projections)



รูปที่ 3.12 คุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายจากการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 3.13 เป็นคุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายจากการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟที่ทำการโปรเจกภาพจากจุด $P(x, y, z)$ ไปยังจุดบนระนาบของการโปรเจก โดยมีระยะห่างระหว่างระนาบของการโปรเจกกับจุดศูนย์กลางของการโปรเจกเป็นระยะเท่ากับ d และจากคุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ว่า

$$\frac{x'}{d} = \frac{x}{z} \quad (3.31)$$

$$\frac{y'}{d} = \frac{y}{z} \quad (3.32)$$

จากสมการที่ (3.31) และ (3.32) นำ d คูณตลอดจะได้เป็น

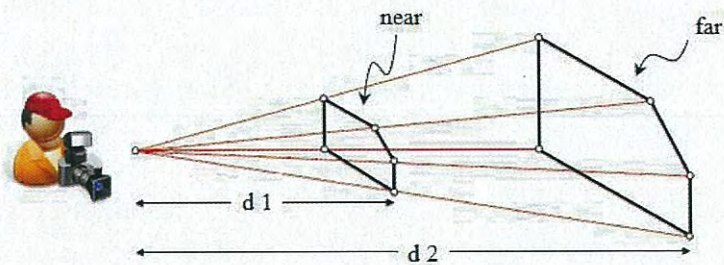
$$x' = \frac{d \cdot x}{z} \quad (3.33)$$

$$y' = \frac{d \cdot y}{z} \quad (3.34)$$

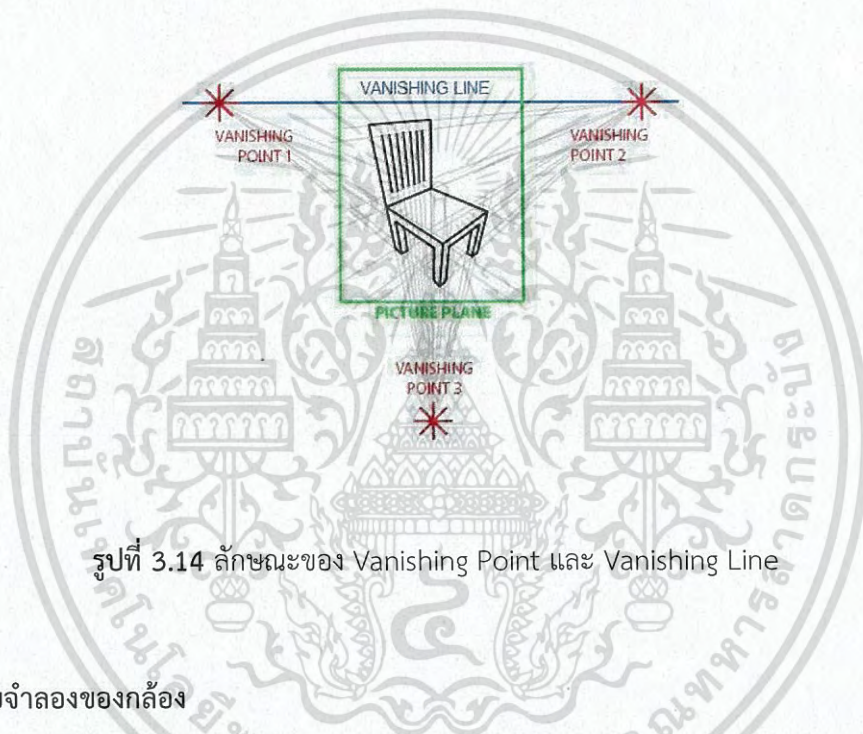
ดังนั้นการโปรเจกภาพจากจุด $P(x, y, z)$ ไปยังจุดบนระนาบของการโปรเจก $P'(x', y', z')$ จะได้เป็น

$$P' = \left(\frac{d \cdot x}{z}, \frac{d \cdot y}{z}, d \right) \quad (3.35)$$

นอกจากความสัมพันธ์แบบผกผันกับระยะห่างระหว่างวัตถุกับจุดศูนย์กลางของการโปรเจกแล้วยังคุณสมบัติอีกอย่างของการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟคือ ทุกๆ เส้นขนานจากวัตถุที่ขนานกับสายตาของผู้สังเกตจะลู่เข้าหาจุดที่บรรจบกันของเส้นขนาน (Vanishing Point) และจากจุดที่บรรจบกันของเส้นขนานในแต่ละด้านทางแนวขวางของวัตถุ และเส้นที่ลากตัดผ่านจุดสองจุดนี้เรียกว่า เส้นของจุดบรรจบกันของเส้นขนาน (Vanishing Line) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระยะทางระหว่างผู้สังเกตกับวัตถุของการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ



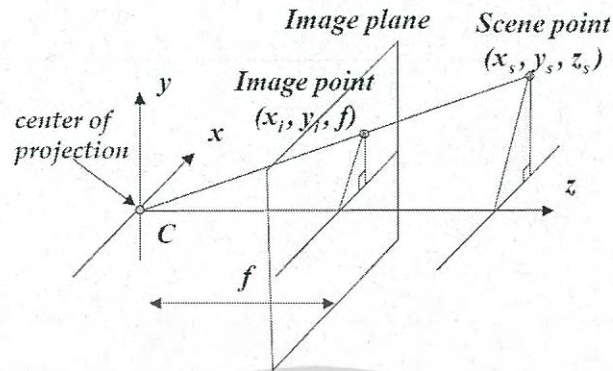
รูปที่ 3.14 ลักษณะของ Vanishing Point และ Vanishing Line

3.3 แบบจำลองของกล้อง

3.3.1 การเกิดภาพของกล้อง

ภาพ 2 มิติส่วนใหญ่ได้มาจากการมองวัตถุ 3 มิติผ่านเลนส์ของตาหรือเลนส์ของกล้อง ขบวนการเกิดภาพสามารถถูกจำลองได้เป็นการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projection) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 เป็นการแสดงแบบจำลองง่ายๆของระบบสร้างภาพ แทนแทนระบบพิกัดโลก (World Coordinate System) ด้วยตัวอักษรตัวใหญ่ (X, Y, Z) และแทนแทนของระบบพิกัดของกล้องด้วยตัวอักษรตัวเล็ก (x, y, z) ซึ่งในกรณีนี้สมมติให้พิกัดของโลกซ้อนทับกับระบบพิกัดของกล้อง แสงจากวัตถุที่เป็น 3 มิติส่องผ่านศูนย์ของการโปรเจกชันแล้วโปรเจกต์ลงบนระนาบของภาพ (Image Plane) ที่เป็น 2 มิติ โดยให้จุด (x_s, y_s, z_s) แทนจุดบนพิกัดของวัตถุ 3 มิติและให้ (x_i, y_i) แทนจุดของวัตถุที่ถูกฉายลงในระนาบของภาพ โดยระนาบของภาพจะอยู่ห่างไปทางขวาของจุดกำเนิดของพิกัดของกล้องเป็นระยะเท่ากับ f ซึ่ง f ก็คือความยาวโฟกัสที่เกิดจากผลของเลนส์กล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แบบจำลองของระบบสร้างภาพของกล้อง

จากรูปที่ 3.15 โดยการใช้กฎสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ว่า

$$\frac{x_i}{f} = \frac{x_s}{z_s} \quad (3.36)$$

$$\frac{y_i}{f} = \frac{y_s}{z_s} \quad (3.37)$$

นำค่า f คูณในสมการที่ 3.36 และ 3.37 จะได้เป็น

$$x_i = \frac{fx_s}{z_s} \quad (3.38)$$

$$y_i = \frac{fy_s}{z_s} \quad (3.39)$$

ดังนั้นจุดที่ถูกโปรเจกต์ลงบนระนาบภาพ (x_i, y_i) จะมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นกับจุดของวัตถุ 3 มิติ (x_s, y_s, z_s) จากความสัมพันธ์นี้สามารถทำให้มองเห็นได้ง่ายโดยใช้ระบบพิกัดแบบโฮโมจีเนียส (Homogeneous Coordinate) โดยกำหนดให้

$$v = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยจุดพิกัดของวัตถุ โดยที่เวกเตอร์ในระบบพิกัดแบบโฮโมจีเนียส \tilde{v} ของ v คือ

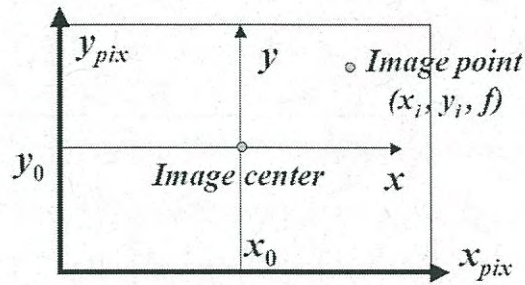
$$\tilde{v} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

จากสมการ (3.40) และ (3.41) พิจารณาเป็นเมทริกซ์ของการแปลงแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Transformation) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดโลกกับระบบพิกัดของกล้องได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/z_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f/z_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

3.3.2 พารามิเตอร์ภายใน (Internal Parameter) ของกล้อง

การแปลงหน่วยความยาวเป็นพิกเซลจะเริ่มจากการกำหนดให้พิกัดของภาพมีจุดกำเนิดอยู่ที่มุมล่างซ้าย การแปลงจากความยาวเป็นพิกเซลจำเป็นต้องรู้ค่าการปรับสเกล (Aspect Ratio) ของแต่ละแกนของระบบพิกัดภาพ ค่าการปรับสเกลเป็นค่าที่ระบุจำนวนพิกเซลต่อหนึ่งหน่วยความยาว นอกจากนั้นยังจำเป็นต้องรู้จุดหลัก (Principal Point) $u_0 = (x_0, y_0)$ บางครั้งถูกเรียกว่าจุดกึ่งกลางของภาพ ดังนั้นพิกัดของจุดในหน่วยพิกเซลของภาพ (x_i, y_i, f) หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 3.16 พิกัดบนระนาบของภาพ

จะได้

$$x_{pix} = k_x x_i + x_0 \quad (3.43)$$

$$y_{pix} = k_y y_i + y_0 \quad (3.44)$$

จากสมการ (3.38) และ (3.39) จะได้

$$x_{pix} = k_x f \frac{x_s}{z_s} + x_0 \quad (3.45)$$

$$y_{pix} = k_y f \frac{y_s}{z_s} + y_0 \quad (3.46)$$

โดยที่ k_x คือค่าการปรับสเกลในทิศทางแกน x , k_y คือค่าการปรับสเกลในทิศทางแกน y และ r แทนค่าพารามิเตอร์ของการเอียง จากสมการ (3.45) และ (3.46) สามารถทำให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

โดยที่ $\alpha_x = k_x f$ ซึ่งเป็นค่าความยาวโฟกัสในทิศทางแกน x ในหน่วยของพิกเซลและ $\alpha_y = k_y f$ ซึ่งเป็นค่าความยาวโฟกัสในทิศทางแกน y ในหน่วยของพิกเซล จากสมการ (3.47) สามารถจัดรูปแบบใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = K [I_3 | O_3] \quad (3.48)$$

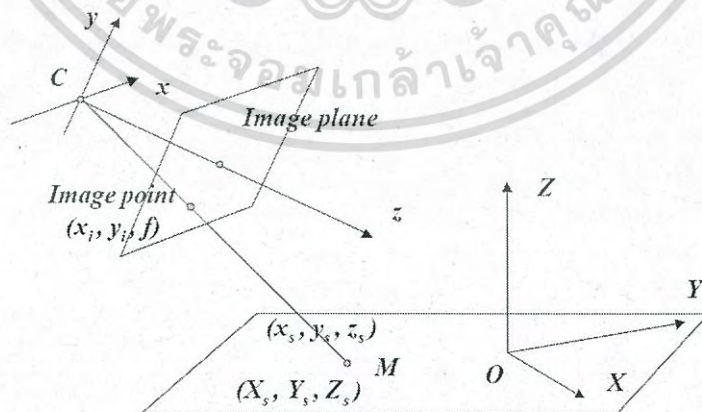
โดยเมทริกซ์ K มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมข้างบน (Upper Triangle) ขนาด 3×3 เรียกว่า เมทริกซ์การปรับเทียบ (Calibration Matrix) เป็นเมทริกซ์ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ภายใน (Internal Parameter or Intrinsic Parameter) ที่สำคัญของกล้อง

3.3.3 พารามิเตอร์ภายนอก (External Parameter) ของกล้อง

การหาพิกัดของภาพที่เกิดกรณีจุดกึ่งกลางของการโปรเจกชันของกล้องถูกวางไว้ที่จุดกึ่งกลางของระบบพิกัดอ้างอิงของโลก ไม่มีการส่ายหรือเอียงท่ามุมกับแกนอ้างอิง ในกรณีนี้แบบจำลองการเกิดภาพ (Imaging Model) คือ

$$x = M_i X \quad (3.49)$$

โดยที่ x คือเวกเตอร์ของจุดบนวัตถุในระบบพิกัดโฮโมจีเนียส X คือเวกเตอร์ของจุดบนระนาบภาพในระบบพิกัดโฮโมจีเนียส และ M_i คือ เมทริกซ์การโปรเจกชันของกล้องที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ภายในของกล้อง



รูปที่ 3.17 แบบจำลองการสร้างภาพกรณีพิกัดของโลกไม่ซ้อนทับกับพิกัดของกล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในกรณีที่ขบวนการเกิดภาพที่มีจุดกึ่งกลางของการโปรเจกชันของกล้องไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดกึ่งกลางของระบบพิกัดอ้างอิงของโลก กล่าวคือระบบพิกัดโลกสามารถเกิดมุมสาย (Pan) และเอียง (Tilt) รวมทั้งระยะห่างของระนาบของกล้องและระนาบของพิกัดโลก ดังนั้นจึงทำให้เกิดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการหมุนและการย้ายจุดอ้างอิง โดยพารามิเตอร์นี้จะเป็นพารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง (External Parameter or Extrinsic Parameter) ที่ประกอบด้วยเมทริกซ์การหมุนและเวกเตอร์การย้ายที่อ้างอิงกับระบบพิกัด คือ

$$M_e = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

ดังนั้นแบบจำลองการเกิดภาพ (Imaging Model) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$x = PX \quad (3.51)$$

โดย $P = M_i M_e$ คือ Camera Projection Matrix ที่รวมทั้งพารามิเตอร์ภายในและภายนอกของกล้องซึ่งเมทริกซ์ M สามารถกระจายได้ดังนี้

$$P = K[I_3 | O_3] \begin{bmatrix} R & -T \\ O_3^T & I \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

เมื่อ R คือ Rotation Matrix

T คือ Translation Vector

นำ สมการ (3.52) แทนในสมการ (3.51) จะได้ว่า

$$x = K[I_3 | O_3] \begin{bmatrix} R & -T \\ O_3^T & I \end{bmatrix} X \quad (3.53)$$

จัดให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์โฮโมจีเนียสได้เป็น

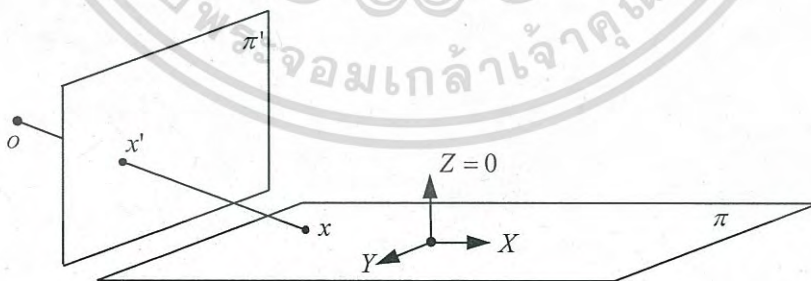
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

ซึ่งเมทริกซ์ P เป็นเมทริกซ์การแปลงของกล้องมีขนาด 3×4 ที่รวมทั้งพารามิเตอร์ภายในและพารามิเตอร์ภายนอกเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นการแปลงภาพของวัตถุต่างๆจากระนาบ 3 มิติมายังระนาบของกล้องที่เป็นระนาบ 2 มิติ ($3D \rightarrow 2D$) ดังนั้นหากเป็นการแปลงจากระนาบ 2 มิติมายังระนาบของกล้อง 2 มิติ ($2D \rightarrow 2D$) ซึ่งก็คือ $Z = 0$ และจากเมทริกซ์การแปลงของกล้องมีขนาด 3×4 สามารถเขียนได้ใหม่เป็นเมทริกซ์การแปลงขนาด 3×3

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

โดยจะเป็นการแปลงแบบโปรเจกทีฟของระนาบ (Plane Projective Transformations) หรือเป็นการแปลงแบบโฮโมกราฟี (Homography Transformations) ซึ่งในรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

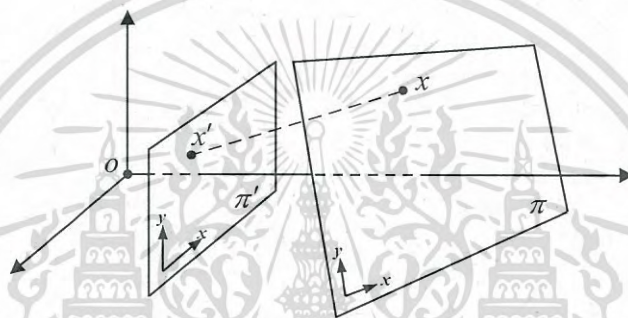


รูปที่ 3.18 การแปลงแบบโปรเจกทีฟของระนาบ 2 มิติของกล้อง
(Plane Projective Transformations)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การแปลงโฮโมกราฟฟี (Homography Transformation)

โฮโมกราฟฟีเป็นการแปลงในลักษณะการโปรเจกชันของจุดหรือเส้นที่อยู่บนระนาบ (π) โดยสามารถเรียกได้หลายชื่อเช่น Collineation, Projectivity และ Projective Transformation ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการแปลงระหว่างพิกัดจริงกับระนาบของภาพที่เป็นผลมาจากการรับภาพของกล้องที่เป็นลักษณะการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ ($2D \rightarrow 2D$)



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์และการโปรเจกชันของจุดที่อยู่บนระนาบ

โดย Hartley และ Zisserman[21] ได้ให้คำนิยามของโฮโมกราฟฟีว่าเป็นการแปลงระนาบ π ที่เกิดในลักษณะของการโปรเจกชันนั่นเอง ดังนั้นถ้ามีเส้นตรงจากจุด x ที่อยู่บนระนาบ π ไปยังจุดศูนย์กลางของการฉาย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระนาบ π ไปยังระนาบ π' ดังนั้นจุด x บนระนาบ π จะถูกย้ายไปยัง x' บนระนาบ π' ซึ่งจุด x' จะมีตำแหน่งอยู่บนเส้นตรงที่ลากจาก x ไปยังจุดศูนย์กลางโปรเจกชัน จากความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของระนาบ $\pi \rightarrow \pi'$ ที่เป็นลักษณะการโปรเจกชันสามารถแทนได้ด้วยเมทริกซ์ 3×3 ที่เป็น non-singular matrix และจุดใดๆบนระนาบ π แทนด้วยเวกเตอร์ x หากมีการเปลี่ยนแปลงระนาบ $\pi \rightarrow \pi'$ ดังนั้นตำแหน่งของจุด x นั้นจะถูกแปลงไปโดยมีค่าเท่ากับ Hx

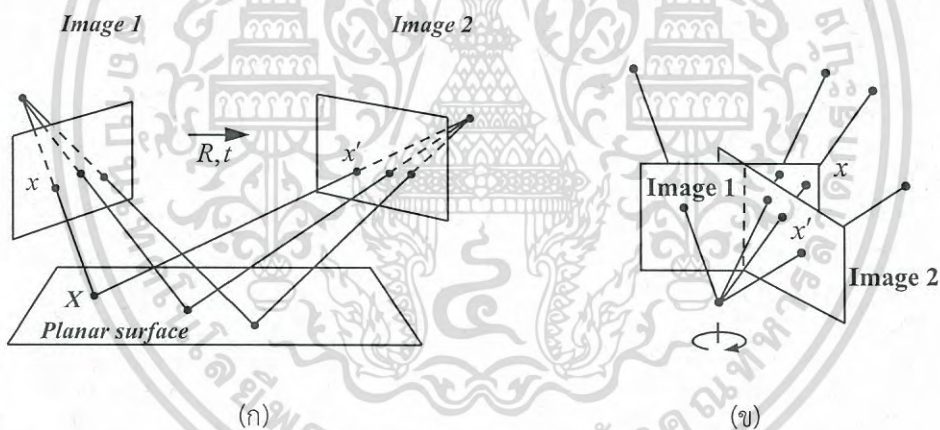
$$x' = Hx \quad (3.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 3×3 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} wx' \\ wy' \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

เมทริกซ์ H (Homography Matrix) สามารถเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆ ทั้ง 9 ตัว โดยการคูณกับเฟกเตอร์การสเกล (Scale Factor) ใดๆ ที่ไม่เท่ากับ 0 โดยจะไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการแปลงเชิงการโปรเจกชันของเมทริกซ์ H หรือสรุปได้ว่าเมทริกซ์ H เป็นเมทริกซ์โฮโมจีเนียสนั่นเองและจะมีเพียง 8 degree of freedom (8 dof) จากจำนวนองค์ประกอบทั้งหมด 9 ตัวในเมทริกซ์ H



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างลักษณะของการแปลงในเชิงการโปรเจกชันแบบต่างๆ

ความสัมพันธ์ของโฮโมกราฟฟีกับการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบอื่นๆ การเปรียบเทียบโฮโมกราฟฟีกับการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพแบบอื่นๆ จะช่วยให้เข้าใจถึงโฮโมกราฟฟีมากยิ่งขึ้น ซึ่งในการแปลงของภาพส่วนใหญ่จะเป็นการแปลงที่รวมการแปลงเชิงเรขาคณิตพื้นฐานเข้าด้วยกัน เช่น การหมุน การสเกล การย้ายตำแหน่ง รวมทั้งการแปลงเชิงการฉายภาพเข้าด้วยกัน โดยสามารถที่แบ่งการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพต่างๆ ออกเป็นกลุ่มๆ ได้ดังนี้

3.5 การแปลงยูคลีเดียน (Euclidian Transformation)

การแปลงแบบ Euclidian เป็นการแปลงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดภาพ ซึ่งหมายความว่าระยะห่างระหว่าง 2 จุดบนภาพจะคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง แต่จะมีการหมุนและการเอียงเอียงนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย้ายตำแหน่งของภาพไปจากเดิม โดยการแปลงแบบ Euclidian จะมีเพียง 3 degree of freedom (3 dof) ซึ่งการแปลงแบบ Euclidian สามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปแบบของโฮโมจีเนียสเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & tx \\ \sin\theta & \cos\theta & ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

หรือเขียนสมการในรูปแบบง่ายได้เป็น

$$x' = H_E x = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} x \quad (3.59)$$

เมื่อ H_E คือ เมทริกซ์ของการแปลง Euclidian

x คือ เมทริกซ์การหมุนที่มีขนาด 2×2

t คือ เวกเตอร์การย้ายตำแหน่ง

0^T คือ ค่า 0 ในแต่ละหลักของ H_E

3.6 การแปลงแบบคล้าย (Similarity Transformation)

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

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s\cos\theta & -s\sin\theta & tx \\ s\sin\theta & s\cos\theta & ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

และสามารถเขียนสมการในรูปแบบง่ายได้เป็น

$$x' = H_s x = \begin{bmatrix} sR & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} x \quad (3.61)$$

เมื่อ S คือ ค่าของการสเกลที่เพิ่มขึ้นในพจน์ที่เหลือจะเหมือนกับการแปลงแบบ Euclidian

3.7 การแปลงแบบแอฟไฟน์ (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 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & tx \\ a_{21} & a_{22} & ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

และสามารถเขียนสมการในรูปแบบง่ายได้เป็น

$$x' = H_A x = \begin{bmatrix} A & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} x \quad (3.63)$$

เมื่อ A คือ เมทริกซ์ Non-Singular ขนาด 2×2 ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบออกได้เป็น

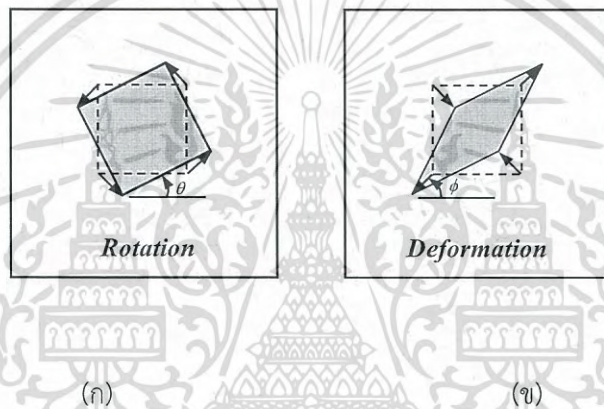
$$A = R_\theta R_{(-\phi)} D R_{(\phi)} \quad (3.64)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

โดย λ_1 เป็นการสเกลในทิศทางแกน x และ λ_2 เป็นการสเกลในทิศทางแกน y



รูปที่ 3.21 การบิดเบือนของระนาบซึ่งเป็นผลของการแปลงแบบ Affine (ก) การหมุนของระนาบโดย $R_{(\theta)}$ (ข) การผิดรูปไปของระนาบซึ่งเป็นผลจาก $R_{(-\phi)}DR_{(\phi)}$

3.8 การแปลงโปรเจกทีฟ (Projective Transformation)

การแปลงแบบ Projective หรือ Homography เป็นการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นของระบบพิกัดโฮโมจีเนียส การแปลงแบบ Projective จะมี 8 dof ซึ่งมากกว่าการแปลงแบบ Affine ที่จะมีเพียง 6 dof โดยการแปลงแบบ Projective จะมีส่วนประกอบอยู่ 9 ตัวที่เป็นอัตราส่วนกัน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการใช้งานและสามารถเขียนในรูปแบบโฮโมจีเนียสมทริกซ์ได้ดังในสมการที่ 3.54 หรือเขียนใหม่ในรูปแบบง่ายได้เป็น

$$x' = Hx = \begin{bmatrix} A & t \\ V^T & v \end{bmatrix} x \quad (3.66)$$

เมื่อ $V = (V_1 \ V_2)^T$ และ v เป็นค่าสเกลเพกเตอร์ใดๆที่ไม่กับ 0 ซึ่งจะตัวที่เป็นอัตราส่วนกับองค์ประกอบอื่นๆ ที่เหลืออีก 8 ตัว ภายในเมทริกซ์ของการแปลงแบบ Projective เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างการแปลงแบบ Projective และการแปลงแบบ Affine คือ เวกเตอร์ V ซึ่งจะเป็น 0 ในการแปลง Affine โดยเวกเตอร์ V นี้จะเป็นส่วนที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องมาจากผลของการโปรเจกชัน ในการแปลงแบบอื่นๆ ที่ได้กล่าวมา อัตราส่วนของการสเกลจะเท่ากันในทุกๆ จุดของภาพ แต่ในการแปลงแบบ Projective ในแต่ละตำแหน่งของภาพอัตราส่วนของการสเกลจะไม่เท่ากัน การแปลงแบบ Projective หรือ Homography สามารถแยกองค์ประกอบออกเป็นกลุ่มของการแปลงแบบต่างๆ ได้เป็น

$$H = H_A H_P = \begin{bmatrix} A & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ v^T & v \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

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

$$\eta H = T R_{\theta} R_{-\phi} D R_{\phi} P \quad (3.68)$$

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

T คือ เมทริกซ์การย้ายตำแหน่ง (Translation)

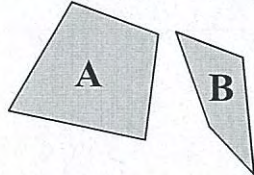
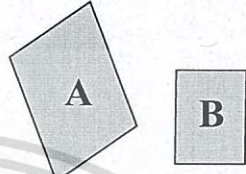
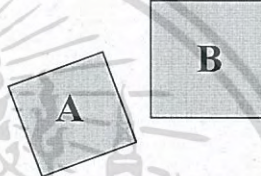

P คือ เมทริกซ์การโปรเจกทีฟ (Projective)

R_{θ} คือ เมทริกซ์ของการหมุน (Rotation)

S คือ เมทริกซ์ของการสเกล (Scaling)

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

ซึ่งรายละเอียดและขั้นตอนการแยกส่วนประกอบต่างๆ ของ Homography สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก ซึ่งได้อธิบายและแสดงการแยกส่วนประกอบของ Homography โดยการใช้วิธีการแยกค่าเดียว (SVD)

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

รูปที่ 3.22 คุณสมบัติและลักษณะของการแปลงภาพแบบต่างๆ

เมื่อ ภาพ A เป็นภาพเดิมที่เริ่มต้น และ ภาพ B เป็นภาพหลังการประมวลผล ของแต่ละชนิด

3.9 การคำนวณและประมาณค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์

วิธีการหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ (Homography Matrix) ที่เป็นการแปลงระหว่าง พิกัดจริง (Real World Coordinate) กับพิกัดรูปภาพ (Image Coordinate System) ส่วนมาก นิยมใช้ความสัมพันธ์ของจุดที่อยู่บนพิกัดจริงกับพิกัดรูปภาพที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน และเป็นจุดพิกัด ที่ทราบค่าเป็นตัวช่วยในการประมาณหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ (H) ซึ่งจะเรียกหลักการของ การนำความสัมพันธ์ระหว่าง 2 จุดคือ $P \leftrightarrow P'$ ที่อยู่บนระนาบพิกัดจริงกับระนาบพิกัดของภาพมาใช้ เพื่อประมาณค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ว่า Direct Linear Transformation (DLT) [20],[24] ดังนั้นจากสมการที่ 3.51 สามารถนำมาเขียนได้ใหม่เป็น

$$p' = Hp \quad (3.69)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

และ

$$p' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

และ H เป็นโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ (Homography Matrix) ซึ่งเป็นเมทริกซ์โฮโมจีเนียสขนาด 3×3 โดยเมทริกซ์ H จะประกอบด้วยพารามิเตอร์อยู่ทั้งหมด 9 ตัวคือ

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.69) จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

นำ H คูณกับ p จะได้สมการใหม่ 3 สมการ คือ

$$x' = h_{11}x + h_{12}y + h_{13}w \quad (3.74)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y' = h_{21}x + h_{22}y + h_{23}w \quad (3.75)$$

$$w' = h_{31}x + h_{32}y + h_{33}w \quad (3.76)$$

เมื่อต้องการทำให้อยู่ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (x, y) นำสมการที่ (3.76) ทหารสมการที่ (3.74) และสมการที่ (3.75) จะได้

$$\frac{x'}{w'} = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}w}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}w} \quad (3.77)$$

$$\frac{y'}{w'} = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}w}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}w} \quad (3.78)$$

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

$$x' = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad (3.79)$$

$$y' = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad (3.80)$$

จัดสมการใหม่ให้เป็นสมการโฮโมจีเนียส (Homogeneous Equations)

$$h_{11}x + h_{12}y + h_{13} - h_{31}x x' + h_{32}y x' - h_{33}x' = 0 \quad (3.81)$$

$$h_{21}x + h_{22}y + h_{23} - h_{31}x y' + h_{32}y y' - h_{33}y' = 0 \quad (3.82)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.81) และสมการที่ (3.82) จัดรูปแบบใหม่เป็น

$$Ah = 0 \quad (3.83)$$

โดยกำหนดให้ $A = []_{2 \times 9}$

$$A = \begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'x & -x'y & -x' \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -y'x & -y'y & -y' \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

และกำหนดให้ $h = []_{9 \times 1}$

$$h = (h_{11} \ h_{12} \ h_{13} \ h_{21} \ h_{22} \ h_{23} \ h_{31} \ h_{32} \ h_{33})^T \quad (3.85)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 3.81 จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'x & -x'y & -x' \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -y'x & -y'y & -y' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

จากสมการที่ (3.86) จะเห็นว่าแต่ละจุด p และ p' ที่สัมพันธ์กันบนระนาบทั้งสองจะให้สมการ 2 สมการ เนื่องจากโฮโมกราฟพีเมทริกซ์ H จะมี 8 dof (8 degrees of freedom) และมีเพกเตอร์การสเกล ($h_{33} = \text{non-zero scale factor}$) ซึ่งสามารถที่จะกำหนดให้เป็นค่าใดๆ โดยส่วนมากเท่ากับ 1 (Homogeneous Matrix) จากตัวแปร h_{ij} ที่ไม่ทราบค่าทั้งหมด 9 ตัว ดังนั้นจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลือตัวแปร h ที่ไม่ทราบค่าอยู่ 8 ตัว ซึ่งในการแก้สมการต้องใช้จุดที่ทราบค่าเท่ากับ 4 จุดเพื่อให้ได้สมการทั้งหมด 8 สมการจึงจะสามารถแก้ปัญหาหาค่า H ถ้าในกรณีที่ใช้จุดที่ทราบค่ามากกว่า 4 จุด ซึ่งจะเรียกว่าเป็น over-determined solution ที่สามารถแก้ปัญหาหาค่า H ได้เช่นกัน ดังนั้นในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าของเมทริกซ์ H ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ h_{ij} จำเป็นต้องใช้จุดบนทั้งสองระนาบที่สัมพันธ์กันอย่างน้อย 4 จุดหรือ $n \geq 4$ เพื่อคำนวณหาโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1x_1 & -x'_1y_1 & -x'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_nx_n & -x'_ny_n & -x'_n \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -y'_1x_1 & -y'_1y_1 & -y'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -y'_nx_n & -y'_ny_n & -y'_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

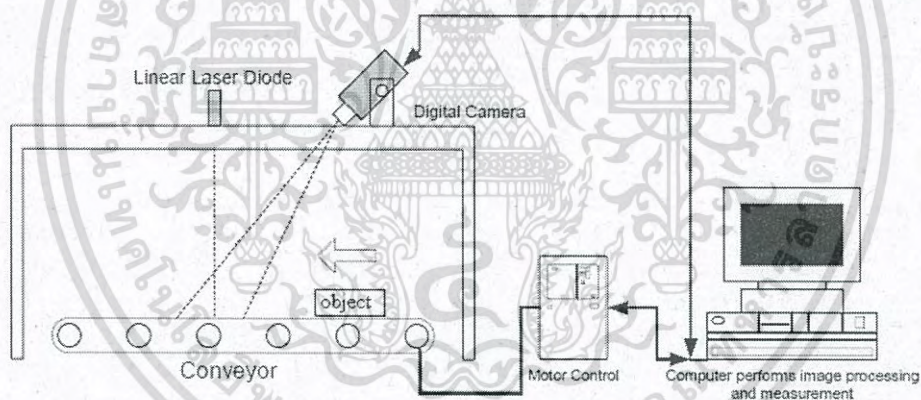
ในการคำนวณหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ (Homography Matrix) สามารถที่จะหาคำตอบออกมาได้ โดยใช้การแก้ปัญหาของระบบสมการเชิงเส้นด้วยการประมาณค่าแบบ Least-Squares (LS) หรือใช้การแยกส่วนประกอบของเมทริกซ์ $A = UDV^T$ ซึ่งเป็นการหา Singular value decomposition (SVD) ของเมทริกซ์ A โดยค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ที่เป็นคำตอบของสมการจะได้จากหลักสุดท้ายของเมทริกซ์ V ที่ได้จากค่า SVD ของเมทริกซ์ A

สำหรับในบทที่ 4 จะเป็นการกล่าวถึง ส่วนประกอบหลักของระบบสแกนแบบ 3 มิติ การลดสัญญาณรบกวนลำแสงเลเซอร์โดยการทำคอนโวลูชัน และการหาเส้นทางเดินของแสงสีแดงเพื่อให้ได้ความคมชัดมากที่สุด จากนั้นทำการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมรีดแผ่นทองแดง และอุตสาหกรรมเหล็ก ซึ่งเป็นการตรวจวัดเชิงคุณภาพแบบประมาณการเพื่อคัดแยกของดีและเสีย นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ในการตรวจวัดหาปริมาตรของรูปทรงเรขาคณิตแบบสมมาตรซึ่งเป็นการวัดเชิงปริมาณ สามารถคำนวณให้เห็นเป็นตัวเลขเปรียบเทียบได้กับหน่วยวัดมาตรฐาน และสุดท้ายเป็นการประยุกต์การคัดแยกการชันสกรูจากสายการผลิตในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการตรวจสอบอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ (Hard Disk Drive)

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้ลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนในงานอุตสาหกรรม

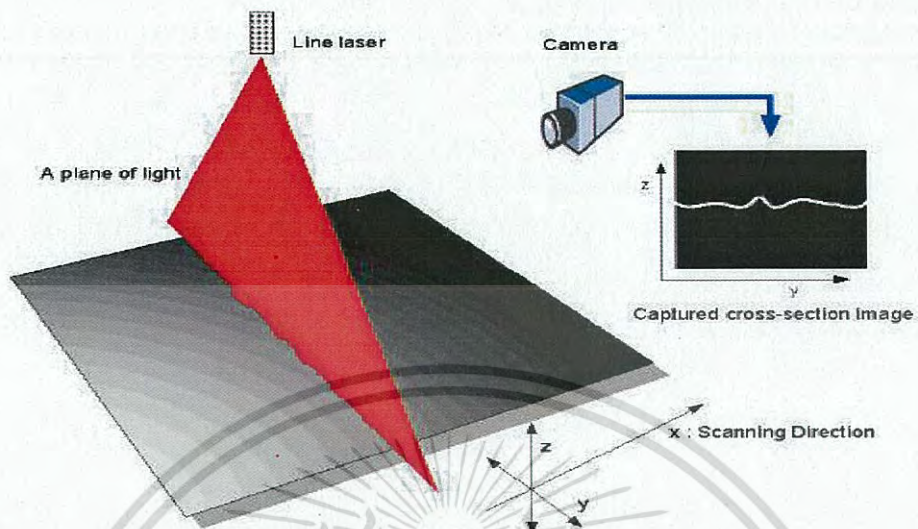
การตรวจสอบพื้นผิวแบบสามมิติ (3D Surface Inspection) เป็นการตรวจสอบวัตถุหรือผลิตภัณฑ์แบบ 3 มิติ ประกอบด้วยเลเซอร์เส้นสีแดงให้แสงที่มีโครงสร้างแบบสามเหลี่ยมฉายไปที่พื้นที่ผิวของวัตถุหรือผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ผ่านบนสายพานลำเลียง โดยมีกล้องรับภาพ ทำการอ่านข้อมูลภาพจากแสงเลเซอร์ตัดผ่านที่ตกกระทบกับวัตถุมีลักษณะของแสงที่แตกต่างกันตามรูปร่างวัตถุ โดยนำข้อมูลในแต่ละเฟรมหรือแต่ละชั้นมาทำการวิเคราะห์ และแปลงให้เป็นระยะวัตถุจริง จากนั้นนำมาทำการผสมผสานกันเพื่อจัดเรียงต่อเข้าด้วยกันจนเป็นข้อมูลแบบ 3 มิติ ที่สามารถให้ขนาดได้ทั้ง ความกว้าง ความยาว และ ความสูงของที่สำคัญข้อมูลวัตถุตรวจสอบดังกล่าวจะมีพิกัดเป็นแบบพิกัดฉาก (Rectangular Coordinate) จึงสามารถนำข้อมูลนี้ไปวิเคราะห์ต่อยอดให้กับกระบวนการอื่น ๆ ได้ต่อไป จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ กระบวนการตรวจสอบภาพแบบ 2 มิติไม่สามารถทำได้



รูปที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบหลักของชุดสแกน 3 มิติ

จากรูปที่ 4.1 เลเซอร์เส้นสีแดงความยาวคลื่น 650 nm ขนาด 16 mW (Roithner laser technik, Austria) ให้แสงที่มีโครงสร้างพร้อมวัตถุตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่านบนสายพานลำเลียง กล้องแม่โทรวิชั่นของ Basler ที่ใช้งานเป็นแบบ SCA 1000 (1000x750 พิกเซลสี) ติดตั้งแสงเลเซอร์โดยให้เส้นแสงเลเซอร์ฉายไปในทิศทางตัดขวางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแสงเลเซอร์ตามลักษณะพื้นผิวของวัตถุ เคลื่อนที่บนสายพานลำเลียงและขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แรงดัน 24VDC และมีวงจรการควบคุมความเร็วสายพานลำเลียง ที่พัฒนาด้วย DS-PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิต และในกรณีที่น่าชุดสแกนมิติ นี้มาใช้ในการตรวจสอบพื้นผิว ภาพของลำแสงที่ตัดขวางจะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปตามความราบเรียบของพื้นผิวดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การนำชุด 3D สแกนเพื่อการตรวจสอบพื้นผิว

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาในการประยุกต์ใช้งานลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนในงานอุตสาหกรรมออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกคือการใช้งานกับการตรวจสอบพื้นผิวเพื่อดูความผิดปกติของพื้นผิวตลอดจนการปรับปรุงสภาพของพื้นผิวโดยใช้การสร้างแบบจำลองพื้นผิวด้วยวิธี Polynomial moment ทำให้สามารถอ่านตัวเลขที่ประทับรอยบนโลหะแผ่นได้ ส่วนที่สองเป็นการประยุกต์ใช้ลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนสำหรับการวัดขนาดของวัตถุ เช่น ความกว้าง ความยาว ความหนา ปริมาตร ในหน่วยการวัดมาตรฐานสากล ซึ่งสามารถนำไปปรับใช้ในการคัดขนาดของวัตถุนิตต่างๆ ได้โดยเฉพาะวัตถุที่มีรูปทรงสมมาตร ส่วนสุดท้ายนำเสนอการใช้งานลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุกับกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ ซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายของการปิดฝาครอบอุปกรณ์พบว่ามีปัญหาจากการยึดสกรูด้วยหุ่นยนต์ บางครั้งการขันสกรูเพื่อยึดแน่นตัวเรือนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความไม่สมบูรณ์ เช่น ขันไม่แน่น หรือขาดไปบางจุด กรณีนี้ไม่สามารถตรวจสอบได้จากภาพมุมบนแบบ 2 มิติ โดยการออกแบบและทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการนำระบบสแกนสามมิติไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหรืองานวิจัยอื่นได้อย่างหลากหลาย

4.1 การเก็บภาพสามมิติของพื้นผิวโลหะเพื่อการตรวจสอบและการอ่านตัวอักษร

โรงงานผลิตเหล็กส่วนใหญ่ผลิตเหล็กที่มีคุณภาพแตกต่างกันตามความจำเป็นในการใช้งาน สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญ เช่น โลหะที่ใช้กับแท่งชุดเจาะน้ำมันเป็นเหล็กหล่อที่จำเป็นต้องติดตามกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง ในแต่ละผลิตภัณฑ์จึงประกอบด้วยโลหะผสมชนิดต่างๆ ตามความเหมาะสมในการใช้งาน ในการติดตามตรวจสอบอย่างต่อเนื่องเพื่อจะทำได้มั่นใจได้ในคุณภาพของวัสดุจำเป็นต้องมีการทำเครื่องหมายลงบนเหล็กนั้นเพื่อให้ทราบข้อมูลและสถานะในการผลิต แต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโลหะที่จะมีการทำเครื่องหมายต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงถึง $1,100 \pm C$ ไม่สามารถใช้วิธีการติดตามได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูง กระบวนการในการผลิตนั้นต้องสัมผัสกับการพ่นน้ำความดันสูงถึง 2000 บาร์ และต้องเกิดความร้อนจากความร้อนในระหว่างกระบวนการความร้อนที่ทำให้พื้นผิวของโลหะมีลักษณะขรุขระ ปัจจุบันวิธีการแก้ปัญหาเหล่านี้คือการประทับรอยนูนรหัสเป็นโครงสร้าง 3 มิติเข้าไปในพื้นที่ผิวของวัสดุซึ่งมีความทนทาน และเป็นที่ยอมรับใช้ในกระบวนการผลิตเหล็กในปัจจุบัน

การทำรหัสแบบจุดนูน หรือ รหัสแถบแบบนูนเป็นวิธีที่เคยใช้ แต่ปัญหาเหล่านี้คือมนุษย์ไม่สามารถอ่านหรือเข้าใจรหัสนี้ได้ จึงเป็นเรื่องยากในการติดตามและตรวจสอบคุณภาพ ในปัจจุบันจึงมีการประทับรอยนูนที่เป็นทั้งตัวเลขและรหัสแถบที่สามารถทำให้มนุษย์และเครื่องอ่านสามารถเข้าใจได้ โดยทั่วไปการรู้จำตัวอักษรหรือ OCR : *Optical Character Recognition* จะได้จากการใช้กล้องจับภาพหรือเครื่องสแกนเนอร์ โดยปรับภาพของตัวอักษรที่ได้มาให้เป็นภาพไบนารีที่ก่อนเข้าสู่กระบวนการรู้จำตัวอักษร การใช้กล้องในการจับภาพได้โดยตรงจากพื้นผิวโลหะนั้นเป็นเรื่องที่ยากมาก เพราะภาพของพื้นผิวโลหะในงานนี้เป็นสีดำและมีพื้นผิวที่ขรุขระทั่วไปจึงไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะจับภาพการประทับตัวอักษรนูนบนพื้นผิวโลหะโดยวิธีที่ธรรมดา

หัวข้อนี้นำเสนอการดำเนินงานในเวลาจริงของเก็บภาพข้อมูลระยะทาง 3 มิติสำหรับการอ่านข้อความและการตรวจสอบพื้นผิวโลหะโดยการประมวลผลภาพลำแสงเลเซอร์ด้วยกล้อง CMOS เพื่อค้นหาข้อบกพร่องที่พื้นผิวของโลหะ วิธีการใหม่เพื่อการจำกัดพื้นที่อัตโนมัติ และการรู้จำของตัวเลขที่ประทับบนพื้นผิวโลหะที่มีพื้นผิวขรุขระ โดยแนวคิดนี้เป็นการผสมผสานกันระหว่าง Periodic moment (ได้แก่ FFT, DCT) และ Polynomial moment (ได้แก่ Tchebichef moment) ซึ่งสามารถกำจัดปัญหาบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ Gibbs การแยกองค์ประกอบ QR ได้รับการนำมาใช้เพื่อสร้างให้เป็น Unitary basis ทำให้สามารถกระในการคำนวณเชิงเลขสำหรับการสร้างแบบจำลองพื้นผิวลงได้ วิธีการ Combine moment นี้ใช้ในการสร้างแบบจำลองพื้นผิวที่ถูกทำให้เรียบ (Smoothed global model) จากโครงสร้างของพื้นผิวเดิม ผลของการวัดและการทดสอบบนแผ่นทองแดงที่จะนำเสนอให้เห็นถึงการตรวจสอบพื้นผิว ในสภาพแวดล้อมการผลิตอุตสาหกรรม ผลก็คือการแสดงให้เห็นตัวอักษรที่อ่านได้บนพื้นผิวโลหะพื้นผิวหลังจากการประมวลผลที่นำเสนอระบบต้นแบบของเครื่องเลเซอร์สแกนที่สามารถนำมาใช้ในสายการผลิตได้เป็นอย่างดี

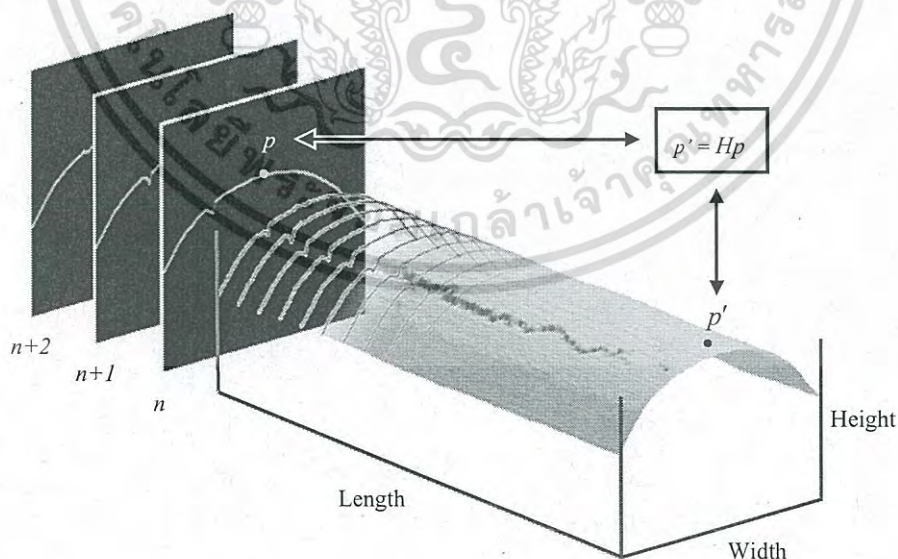
โดยทั่วไปการตรวจสอบพื้นผิวของวัสดุแบบอัตโนมัติจะดำเนินการโดยการใช้กล้องรับภาพของแสงกระจายจากพื้นผิว [42] คุณสมบัติที่แยกออกจากภาพความเข้มของแสง (Intensity image) ถูกนำมาใช้ในการจำแนกผลที่ได้จากการตรวจสอบ วิธีการดังกล่าวใช้งานได้ดีสำหรับพื้นผิวที่มีคุณภาพสูงและมีตำหนิที่สามารถแยกได้ว่าเป็นข้อบกพร่องชัดเจน การตรวจสอบข้อบกพร่องอาจจะเป็นงานง่ายถ้าลักษณะของพื้นผิวการตรวจสอบเป็นผิวนระนาบหรือโค้งมน และโครงสร้างของพื้นผิว

เป็นไปอย่างราบเรียบและไม่มีความขรุขระ อย่างไรก็ตามในกรณีส่วนใหญ่โลหะประเภทเหล็กมักจะมีความขรุขระที่ไม่เรียบ ดังนั้นการจำแนกจึงกลายเป็นโจทย์ยากในการแก้ปัญหา [43],[44]

ในทางปฏิบัติมีหลายงานที่การตรวจสอบรอยขีดบนพื้นผิวก็เพียงพอที่จะบอกถึงความผิดปกติได้ เช่น ในการตรวจสอบความผิดปกติของรางรถไฟแบบอัตโนมัติใช้วิธี โฟโตเมตริกสเตอริโอ [4] วิธีนี้สามารถกำหนดพื้นผิวเวกเตอร์ปกติ (surface normal vectors) รวมทั้งพื้นผิวอัลเบโด (surface albedo) วิธีนี้สามารถสร้างพิกัดข้อมูลภาพได้ (range image) ดังนั้นข้อมูลที่ปรากฏจะเป็นพิกัดพื้นผิวตามรูปทรงเรขาคณิต และยังไม่ใช่ข้อมูลที่เป็นขนาดทางเรขาคณิต นอกจากนี้ระบบนี้มีความไวต่อการเปลี่ยนสีของพื้นผิว (decolorizing) ซึ่งอาจตีความได้ว่าเป็นการเปลี่ยนรูปแบบเรขาคณิต

เทคนิคการเก็บข้อมูลภาพสำหรับการตรวจสอบภาพอัตโนมัติของพื้นผิวโลหะได้ถูกรวบรวมไว้ใน [46],[47] อย่างไรก็ตามประเด็นที่เกี่ยวข้องกับการทำงานในแบบเวลาจริง ยังไม่ได้กล่าวไว้ในงานของ Pernkopf และคณะส่วนใหญ่จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ของพื้นผิวจากภาพพิกัดข้อมูล และใช้วิธีการประมาณค่าช่วงแบบ spline interpolation เพื่อหาแผ่นที่ความลึกเฉพาะบริเวณเท่านั้น เนื่องจากภาพของพื้นผิวโลหะที่ทำการตรวจสอบมีสีดำมืดทึบ และมีลักษณะที่เป็นคลื่นลอนขรุขระ การใช้กล้องและแหล่งกำเนิดแสงจับภาพพื้นผิวด้วยวิธีอย่างง่าย เพื่อตรวจสอบหาความผิดปกติจึงไม่สามารถทำได้

4.1.1 หลักการทำงานพื้นฐาน



รูปที่ 4.3 การสร้างภาพข้อมูลระยะจากภาพ 2 มิติที่ถูกแบ่งส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงระบบที่ใช้สำหรับการเก็บภาพข้อมูลระยะแบบเวลาจริง โดยนำข้อมูลจากภาพ 2 มิติจากการตัดแบ่งส่วนของลำแสงเลเซอร์มาสร้างใหม่ ให้เป็นภาพข้อมูลระยะของพื้นผิวแบบสามมิติ โดยการนำข้อมูลภาคตัดขวางแต่ละส่วนรวมกันดังรูปที่ 4.3 การฉายแสงเลเซอร์แบบเส้นบนวัตถุนอกจากแบ่งวัตถุเป็นส่วนๆ แล้วยังทำให้ได้คุณลักษณะของวัตถุตามพื้นผิวของวัตถุด้วย ซึ่งสิ่งที่ได้จากแสงที่ฉายบนพื้นผิววัตถุจะบอกถึงความกว้างและความหนาของวัตถุ เมื่อจับภาพด้วยกล้องวีดีโอรูปภาพของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จะบอกถึงขนาดของวัตถุในหน่วยของพิกเซลที่เกิดขึ้นบนตัวเซนเซอร์ (CCD) ดังนั้นในการแปลงขนาดของวัตถุที่อยู่ในหน่วยพิกเซลของภาพไปเป็นขนาดที่เป็นพิกัดจริงในหน่วยของหน่วยของหน่วยวัดมาตรฐาน (Metric system) เช่น มิลลิเมตร เซนติเมตร จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพมาช่วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอและใช้ทฤษฎีของโฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์ม จากที่ได้อธิบายไว้ในบทที่แล้วโฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์มจะเป็นการแปลงพิกัดของจุดระหว่างระนาบ 2 มิติใดๆ ในงานวิจัยนี้จะทำการแปลงพิกัดของจุดบนระนาบของภาพ (Image Plane) ให้เป็นพิกัดจริง (Real World Coordinate) เพื่อคำนวณออกมาเป็นความกว้างและความหนาของวัตถุในหน่วยวัดมาตรฐาน ส่วนความยาวของวัตถุนั้นได้จากการทำการเลื่อนวัตถุแล้วใช้กล้องวีดีโอจับภาพในเฟรมตัดไปจนครบทั้งวัตถุ เมื่อนำภาพแต่ละเฟรมมารวมกันได้เป็นความยาวของวัตถุนั้นๆ ซึ่งความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุจะต้องสัมพันธ์กับความเร็วในการจับภาพของกล้องวีดีโอ เช่น กล้องสามารถจับภาพด้วยความเร็ว 30 fps ดังนั้นความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 30 mm/Sec เพื่อจะให้ได้ความละเอียดในด้านความยาวของวัตถุ 1 mm/Frame หรือถ้าต้องการความละเอียดในการวัดความยาวของวัตถุที่ 0.5 mm/Frame ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุต้องมีค่าเท่ากับ 15 mm/Sec

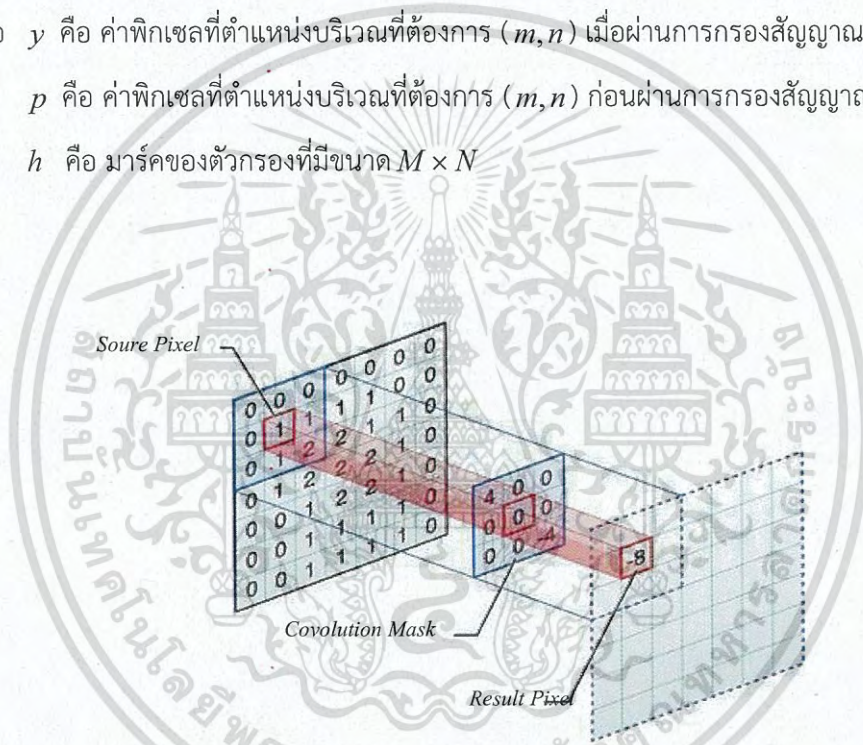
4.1.2 การประมวลผลภาพที่ได้จากเส้นแสงเลเซอร์

เมื่อทำการเก็บข้อมูลภาพของวัตถุแล้วขั้นตอนต่อไปก็จะทำภาพในแต่ละเฟรมที่ได้มาประมวลผลเพื่อแยกบริเวณที่เป็นแสงเลเซอร์กับภาพพื้นหลัง ซึ่งเส้นแสงเลเซอร์นี้จะเป็นคุณสมบัติเกี่ยวกับรูปทรงของวัตถุ การประมวลผลภาพจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ การประมวลผลภาพเบื้องต้น การหาพิกัดของแสงเลเซอร์บนภาพ และการปรับแต่งข้อมูลจุดพิกัดของแสงเลเซอร์ ในขั้นตอนนี้จะเป็นการปรับแต่งภาพที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาพของวัตถุให้ดีขึ้นก่อนจะไปประมวลผลเพื่อหาบริเวณเส้นแสงเลเซอร์ จากข้อมูลที่ได้วัตถุจะถูกเก็บไว้เป็นไฟล์วีดีโอ (AVI) ในขั้นตอนการประมวลผลจะดึงข้อมูลมาประมวลผลที่มาจากเฟรมภาพ โดยข้อมูลต้นฉบับจะเป็นภาพสี (RGB) และนำค่าความสว่างในแถบสีแดงมาประมวลผล การปรับปรุงคุณภาพของภาพจะลดสัญญาณรบกวนโดยการใช้ตัวกรองเพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกจากภาพ โดยอาศัยหลักการทำการเฉลี่ยค่าความเข้มแสงเฉพาะบริเวณหรือการกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filtering) ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ของภาพที่ได้จะมีความราบเรียบ (Smooth) แต่จะทำให้ภาพเกิดการพรั่มัว (Blur) หรือมีความคมชัดน้อยลง ในงานวิจัยนี้จะใช้การกรองสัญญาณรบกวนแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดแบบ 2 มิติ (2D Finite Impulse Response: 2D FIR) [25] FIR จะเป็นการลดสัญญาณรบกวนแบบเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงเส้น (Linear Filtering) ที่ใช้หลักการของการคอนโวลูชันหรือการกรองสัญญาณภาพแบบเชิงเส้น ในสเปเชียลโดเมน (Spatial linear filtering) โดยการคูณทุกๆ ตำแหน่งพิกเซลในมาสก์ (Mask) ที่อยู่ในบริเวณเดียวกันและบวกรวมกันทุกๆ ตัว หรืออาจกล่าวได้ว่าการคำนวณหาค่าผลรวมของผลคูณ (Sum of Product) ซึ่งแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$y_{(m,n)} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} h(i,j) p(m-i, n-j) \quad (4.1)$$

เมื่อ y คือ ค่าพิกเซลที่ตำแหน่งบริเวณที่ต้องการ (m,n) เมื่อผ่านการกรองสัญญาณรบกวน
 p คือ ค่าพิกเซลที่ตำแหน่งบริเวณที่ต้องการ (m,n) ก่อนผ่านการกรองสัญญาณรบกวน
 h คือ มาร์คของตัวกรองที่มีขนาด $M \times N$



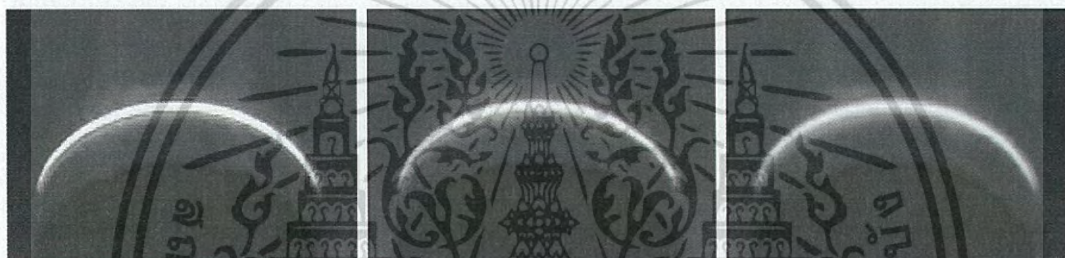
รูปที่ 4.4 การลดสัญญาณรบกวนแบบเป็นเชิงเส้นโดยใช้หลักการของการคอนโวลูชัน

โดยมาร์คที่ใช้ในการทำภาพให้เรียบและสามารถขจัดสัญญาณรบกวนจะมีลักษณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองทุกตำแหน่งจะมีค่าเป็นบวก ซึ่งในการออกแบบจะเลือกใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ย (Averaging Operator) ตัวกรองความถี่แบบค่าเฉลี่ยคือตัวกรองความถี่ต่ำผ่านชนิดหนึ่ง ซึ่งผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์จะมีค่าเป็นหนึ่ง มาร์คของตัวกรองความถี่แบบค่าเฉลี่ยจะมีได้หลายขนาดเช่น 3×3 , 5×5 และ 7×7 เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างของตัวกรองขนาด 3×3 และ 5×5 ได้แสดงในสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ การเพิ่มขนาดของมาร์คจะช่วยลดสัญญาณรบกวนได้มากขึ้น แต่มีข้อเสียคือจะทำให้ลักษณะภาพเกิดการพร่ามัวยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Average Mask } 3 \times 3 = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\text{Average Mask } 5 \times 5 = \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวนโดยการใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ย

(ก) แสดงภาพต้นฉบับ (ข) แสดงภาพที่ได้หลังจากการลดสัญญาณรบกวนโดยการใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยที่มีขนาดมาร์ค 3×3 (ค) แสดงภาพที่ได้หลังจากการลดสัญญาณรบกวนโดยการใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยที่มีขนาดมาร์ค 5×5

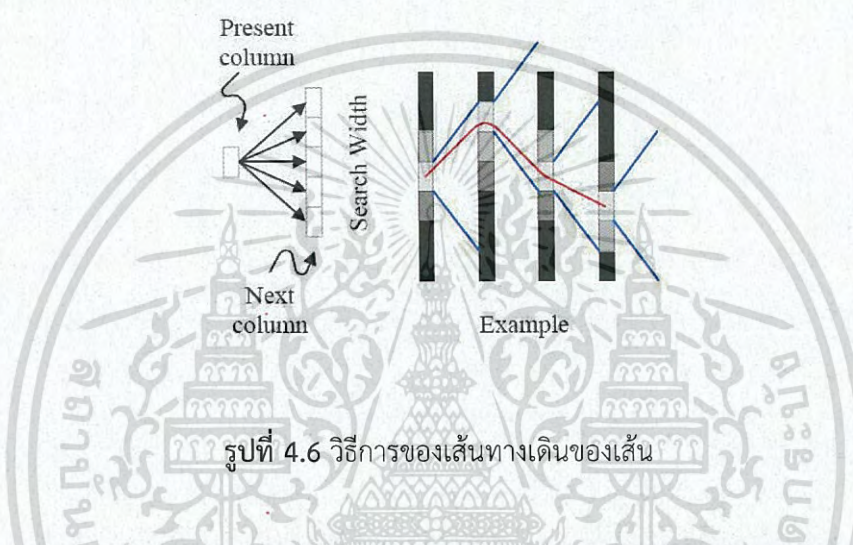
4.1.3 การหาพิกัดของแสงเลเซอร์บนภาพ

การหาพิกัดของเส้นแสงเลเซอร์จะเป็นการตรวจหาระดับความสว่างที่เกิดขึ้นในภาพหลังจากทำการลดสัญญาณรบกวนแล้ว โดยหลักการของการหาบริเวณที่เป็นส่วนของแสงเลเซอร์จะใช้การเปรียบเทียบจุดพิกเซลของภาพกับค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) เพื่อเป็นการแยกบริเวณแสงเลเซอร์ (Laser Feature) ออกจากพื้นหลัง (Background) ของภาพ ซึ่งค่าเทรชโฮลด์จะเป็นค่าที่กำหนดขึ้นเพื่อแบ่งระดับความสว่างที่เป็นเลเซอร์กับระดับความสว่างที่เป็นพื้นหลัง ถ้าจุดพิกเซลใดๆในภาพที่มีความสว่างมากกว่าค่าเทรชโฮลด์แล้วจะกำหนดให้จุดนั้นเป็นจุดของเส้นแสงเลเซอร์ โดยมีหลักการดังนี้คือถ้า $I(x, y) > T$ แสดงว่าจุดพิกเซลนั้นเป็นจุดของแสงเลเซอร์และถ้า $I(x, y) \leq T$ แสดงว่าจุดพิกเซลนั้นเป็นจุดบริเวณพื้นหลังของภาพ

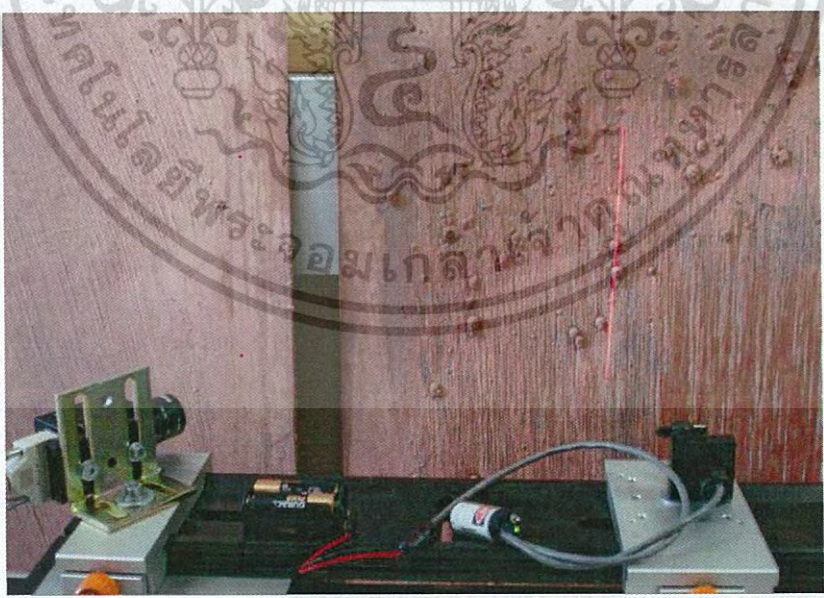
ในการค้นหาระดับของเส้นแสงเลเซอร์ภายในภาพจะใช้วิธีการของเส้นทางเดินของเส้น (Line Walking Algorithm) [26] หลักการคือการหาระดับความสว่างเทียบกับค่าเทรชโฮลด์ในแต่ละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลัก (Column) ของภาพ โดยเริ่มที่จุดพิกเซลในหลักแรก (n_1) ในทุกแถวตั้งแต่แถวแรกถึงแถวสุดท้าย $m_1 : m_{end}$ เพื่อจะทำการหาจุดพิกเซลในแต่ละแถวของจุดพิกเซลที่มีระดับความสว่างที่มีค่ามากกว่าค่าเทรชโฮลด์ ซึ่งจะกำหนดให้จุดพิกเซลนี้เป็นจุดพิกัดของเส้นเลเซอร์จุดที่ 1 $L_1(x_i, y_i)$ การหาจุดในหลักถัดไปจะทำการหาจุดพิกเซลตั้งแต่แถวที่ $m_{i-k} : m_{i+k}$ เมื่อ k คือจำนวนแถวของพิกเซลในภาพที่ต้องการหาเส้นแสงเลเซอร์ (Search Width) โดยไม่จำเป็นต้องทำการหาทุกๆ แถวของภาพจึงเพิ่มความเร็วให้การหาจุดพิกเซลที่เป็นเส้นแสงเลเซอร์ภายในภาพ



รูปที่ 4.6 วิธีการของเส้นทางเดินของเส้น



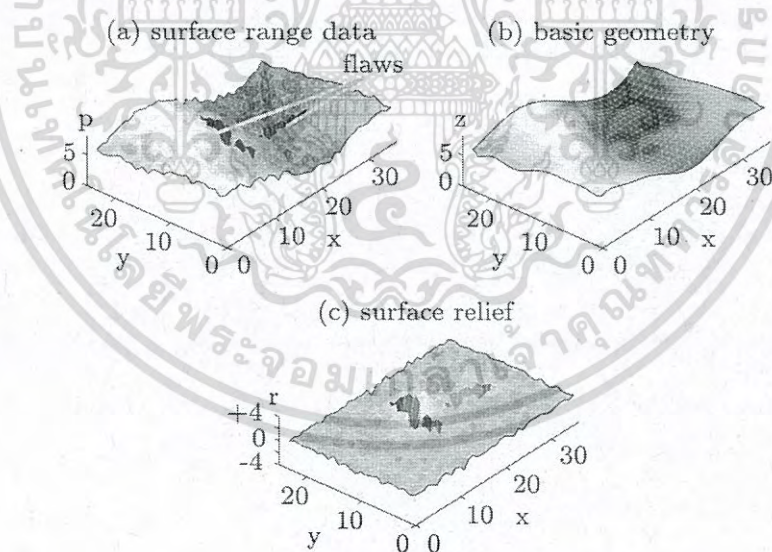
รูปที่ 4.7 การตรวจสอบพื้นผิวบนแผ่นทองแดงด้วยแสงเลเซอร์แบ่งส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการของการตรวจสอบพื้นผิวรูปทรงเรขาคณิตที่แสดงในรูปที่ 4.7 ระบุว่าของลำแสงจากเลเซอร์กวาดบนพื้นผิวของแผ่นทองแดง และกล้องที่ติดตั้งบนฐานที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมมอเตอร์ที่เคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้นตรง สำหรับเก็บภาพข้อมูลระยะ

4.1.4 การปรับปรุงภาพพื้นผิวด้วยวิธี Surface relief

กริดของข้อมูลที่ได้จากวิธีการเก็บภาพข้อมูลพิกัดภาพของพื้นผิว (surface range image) ด้วยวิธีลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุหน่วย ผลที่ได้คือตารางคาร์ทีเซียน 2 มิติ คงที่ใน X และ Y ที่ประกอบด้วยข้อมูลที่มีค่าในแกน Z ซึ่งเป็นระดับความสูงต่ำของแต่ละจุดบนพื้นผิว ซึ่งจากตัวอย่างในรูปที่ 4.8 (a) พบว่ารอยแตกหรือตำหนิได้ซ่อนตัวอยู่บนพื้นผิววัตถุ จากข้อมูลของพื้นผิวนี้สามารถนำมาสร้างแบบจำลองพื้นผิว เพื่อสร้างเป็นฐานของพื้นผิวเชิงภูมิศาสตร์ (basic geometry) ดังรูปที่ 4.8 (b) ในขั้นตอนนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทำราบเรียบ (Smooth) ด้วย Spline interpolation หรือ การสร้างแบบจำลองด้วย polynomial moment (ซึ่งนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้) จากนั้นนำ Surface range image มาลบออกจาก Basic geometry image ผลที่ได้คือภาพพื้นผิวที่ถูกยกขึ้นมา (Surface relief) ดังรูปที่ 4.8 (c) หรือกล่าวได้ว่าเป็นการปรับปรุงภาพพื้นผิวทำให้สามารถมองเห็นความผิดปกติบนพื้นผิวได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.8 กระบวนการปรับปรุงภาพพื้นผิวด้วยวิธี Surface relief (จาก Ingo Reindl)

4.1.5 การสร้างแบบจำลองพื้นผิวจาก Polynomial moments

ค่าฐานที่เป็นปัจเจก unitary polynomial P คือผลรวมของ monomials สามารถสังเคราะห์ได้ในช่วง $[-1, 1]$ จากการหาความสัมพันธ์ recurrence relationship ได้โดยตรงดังสมการต่อไปนี้

$$P_n = \alpha p_1 \circ p_{n-1} + \beta p_{n-2} \quad (4.4)$$

เมื่อ

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{p_i^T p_i - (p_i^T p_{n-2})^2}} \quad (4.5)$$

และ

$$\beta = \alpha p_i^T p_{n-2} \quad (4.6)$$

กำหนดให้

$$p_0 = \frac{1}{\sqrt{N}}, \text{ and } p_1 = \sqrt{\frac{3(N-1)}{N(N+1)}} x. \quad (4.7)$$

Column vectors P_i ในแต่ละส่วนถูกนำมาวางรวมกันเพื่อจัดรูปแบบที่สมบูรณ์ของฐาน Polynomial ของดีกรี n เช่น $P = [P_0 \dots P_n]$ ฐาน polynomial basis สร้างจากระบบของ Tchebychev system โดยฐานจะเป็น unitary คือ $P^T P = I$ ที่ค่าดีกรีต่ำของ polynomial moments สามารถสร้างเป็นแกรเดียนท์และสับฮาร์โมนิกส์ของข้อมูลได้ และสามารถใช่วิธีแยกค่าองค์ประกอบแบบ QR decomposition ได้ใน real matrix ใดๆ ดังเช่น

$$P = QR \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Q คือเมตริกแบบ unitary และ R คือเมตริกสามเหลี่ยมบน ดังนั้นสำหรับการประมาณค่าที่เหมาะสมของ QR คือ $Q^T Q = I + E$, โดยที่ $\|E\|_2 \approx u$ ความละเอียดในการคำนวณของคอมพิวเตอร์

นอกจากนี้

$$PP^+ = QQ^T \quad (4.9)$$

ฐานที่เป็น orthogonal ที่แยกจากกันได้ถูกใช้สร้างเป็นแบบจำลองพื้นผิวสามมิติ Eden et al. 1986 [48] ได้แสดงการคำนวณไว้ดังนี้

$$\hat{Z} = YMX^T \quad (4.10)$$

เมื่อทำการประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square approximation) โดย \hat{Z} ของ Z เมื่อ X และ Y คือฐานที่ใช้ในทิศทางตามแนวแกน X และ Y ตามลำดับ

ในกรณีของ unitary polynomial basis $P^+ = P^T$ ดังนั้นกระบวนการสร้างกลับจะได้เป็น

$$\hat{Z} = YY^T Z (XX^T)^T \quad (4.11)$$

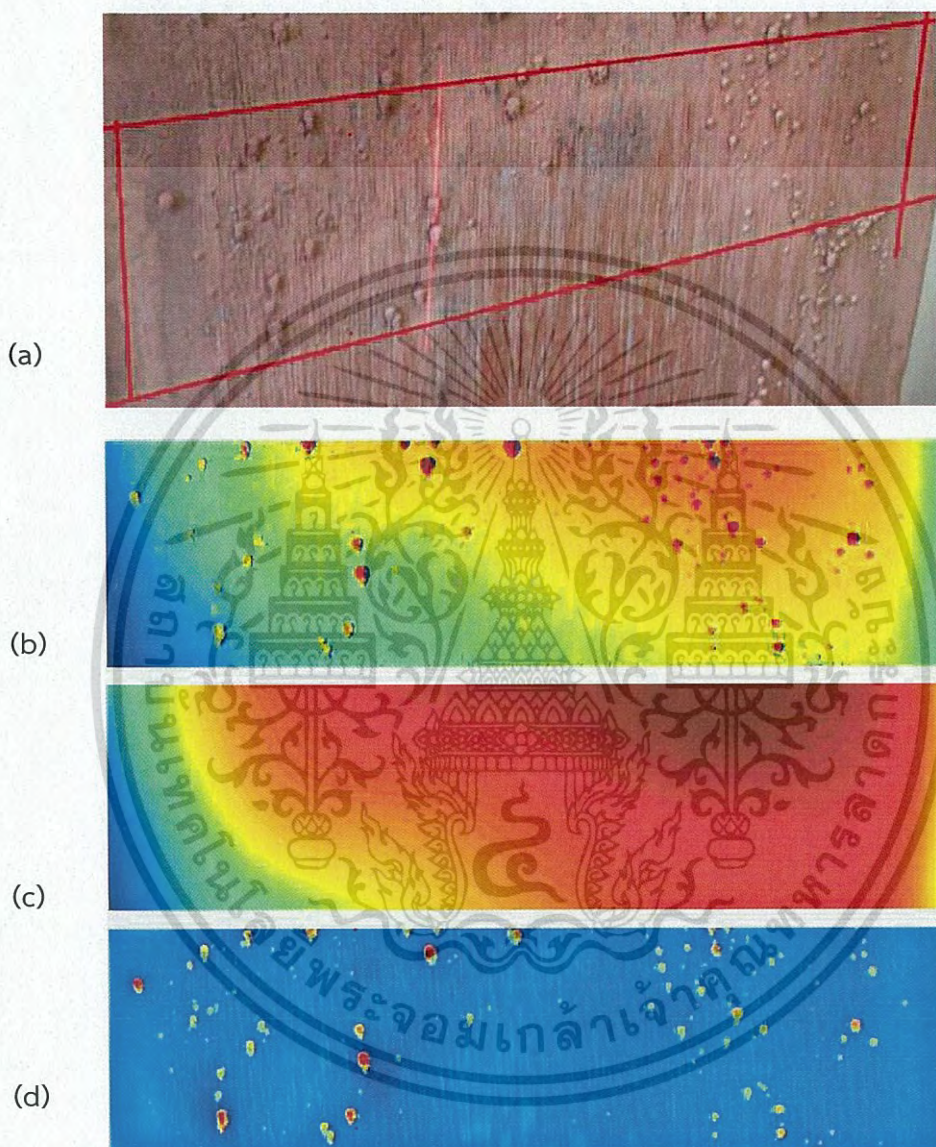
และพื้นผิว Relief จากการสร้างแบบจำลองพื้นผิวจะได้เป็น

$$R = Z - YY^T Z (XX^T)^T \quad (4.12)$$

4.1.6 ผลการตรวจสอบพื้นผิวแผ่นทองแดงด้วยวิธีที่นำเสนอ

จากรูปที่ 4.9 (a) คือแผ่นทองแดงที่มีตำหนิจากฟองอากาศขณะหลอมขึ้นรูป จากนั้นนำตัวอย่างที่จะทำการทดลองนี้มาเก็บภาพข้อมูลระยะ (ดูรูปที่ 4.8) ซึ่งจะได้ข้อมูลภาพดังรูปที่ 4.9 (b) และนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองพื้นผิวด้วยวิธี Polynomial moment ในหัวข้อที่ 4.1.6 ซึ่งจะได้ basic geometry โดยใช้สมการที่ 4.10 ได้ข้อมูลภาพเป็นดังรูปที่ 4.9 (c) ในขั้นตอนสุดท้ายคือ

การสร้างกลับตามสมการที่ 4.11 ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.9 (d) หรือ Surface relief สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าภาพของฟองอากาศบนแผ่นทองแดงสามารถแยกระดับความแตกต่างได้อย่างชัดเจน



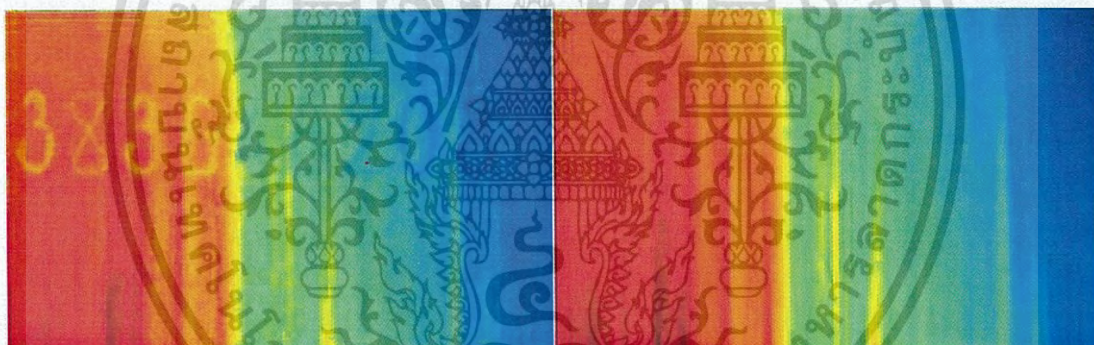
รูปที่ 4.9 ผลการปรับปรุงภาพข้อมูลระยะของพื้นผิวแผ่นทองแดง

จากรูปที่ 4.10 คือตัวอย่างแผ่นเหล็กที่ประทับตัวเลขรอยนูนบนพื้นผิวที่ไม่เรียบและมีสีทึบดำ จากนั้นนำตัวอย่างที่จะทำการทดลองนี้มาเก็บภาพข้อมูลระยะ ซึ่งจะได้อิมเมจดังรูปที่ 4.11 (a) และนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองพื้นผิวด้วยวิธี Polynomial moment ในหัวข้อที่ 4.1.6 ซึ่งจะได้ basic geometry โดยใช้สมการที่ 4.10 ได้ข้อมูลภาพเป็นดังรูปที่ 4.11 (b) ในขั้นตอนสุดท้ายคือการสร้างกลับตามสมการที่ 4.11 ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.11 (c) หรือ Surface relief สังเกตเห็นได้ว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเลขมองเห็นได้ชัดเจนมากขึ้น สามารถแยกระดับความแตกต่างได้อย่างชัดเจนโดยแปลงภาพเป็นไบนารีดังรูปที่ 4.11 (d)



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างแผ่นเหล็กที่ประทับตัวเลขรอยนูนบนพื้นผิวที่ไม่เรียบ



(a)

(b)



(c)

(d)

รูปที่ 4.11 ผลการปรับปรุงภาพพื้นผิวโลหะเพื่ออ่านตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การประมาณค่าปริมาตรของวัตถุสมมาตรด้วยวิธีแสงเลเซอร์แบ่งส่วน

หัวข้อนี้นำเสนอวิธีการประมาณการหาปริมาตรจากคุณสมบัติในระบบ 3 มิติของวัตถุที่มีรูปทรงสมมาตรด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นโดยวิธีใช้ลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ ระบบวิชั่นจะทำการเก็บภาพเส้นแสงเลเซอร์ซึ่งปรากฏบนตัววัตถุที่เคลื่อนที่บนสายพานลำเลียง ข้อมูลแบบภาพตัดขวางที่ได้นี้จะสามารถนำประมาณการเป็นความกว้าง ความสูงในแต่ละตำแหน่ง และสามารถนำมาคำนวณหาโดยการรวมเข้าด้วยกันให้เป็นปริมาตรของวัตถุได้อย่างถูกต้อง จากรูปลักษณะของลำแสงเลเซอร์ที่ถูกฉายไปบนพื้นผิวของวัตถุจะนำไปคำนวณหาจุดศูนย์กลางของน้ำหนักรวมของแต่ละส่วนภาพที่สัมพันธ์กันเป็นค่าพิกัด แล้วทำการแปลงข้อมูลนี้ โดยอาศัยวิธีการของ Homography Transformation ทำการแปลงให้เป็นค่าระยะจริง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) ในการทดสอบชิ้นงานจะนำเอาวัตถุรูปทรงสมมาตร (สี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือทรงกลม) ที่ทราบขนาดจากการวัดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์เปรียบเทียบกับการวัดที่ได้จากการคำนวณ ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยเป็นที่ยอมรับได้เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้เพื่อคัดเลือกรุ่นขนาดชิ้นงานอัตโนมัติบนสายพานลำเลียงได้เป็นอย่างดี

โดยปกติการวัดขนาดในหลายอุตสาหกรรมการผลิตไม่ว่าจะเป็น กระบวนการผลิตอาหาร ผลไม้ และ ผัก ส่วนมากแล้วเป็นการหาน้ำหนัก เพื่อกำหนด มูลค่า และราคาชิ้นของผลิตภัณฑ์ สำหรับบางอุตสาหกรรมมีความจำเป็นต้องคัดแยกขนาด ในลักษณะปริมาตรตามรูปทรงทางเรขาคณิต [9] วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ จะเป็นการประมาณการขนาดของวัตถุที่สมมาตร เพื่อประยุกต์ใช้ในการคัดเลือกผลิตภัณฑ์อัตโนมัติบนสายพานลำเลียง ซึ่งเป็นการตรวจวัดแบบไม่ทำลาย โดยใช้เทคโนโลยีการมองเห็นของเครื่องจักร สามารถใช้ในการประเมินขนาดผลิตภัณฑ์ด้วยกล้องในระบบการตรวจสอบและการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ ความหมายของขนาดที่ใช้ในที่นี้เป็นความกว้าง ความสูง ความยาว และ ปริมาตร

ปกติส่วนมากเทคนิคการคัดขนาดด้วยระบบกล้องจะทำการฉายลงไปยังพื้นที่แบบสองมิติเพื่อประเมินปริมาตรผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นการประมาณการที่ไม่มีข้อมูลของความหนาเข้ามาพิจารณาด้วย ดังนั้นผลการวัดที่ได้จึงไม่ถูกต้องวิธีการวัดด้วยแสงเลเซอร์ตัดขวาง เป็นการผสมผสานเทคนิคเลเซอร์กับการวัดแบบมิติสองเข้าด้วยกัน โดยการสร้างพื้นที่ผิวลักษณะสามมิติ เพื่อให้ได้ความสูงของผลิตภัณฑ์ในการวัดปริมาตร การประยุกต์ใช้งานเช่น พื้นผิวที่มีการกลับมาสร้างใหม่ [30] การสร้างแบบจำลองพื้นผิว และ การตรวจสอบ [31],[32],[34] การวัด รูปทรงเรขาคณิต [9],[37] ภาพที่เกิดจากการควบคุมด้วยกลไก บนฐานแบบสามมิติ ถูกนำมาใช้ในหุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ได้เพื่อใช้ในระบบนำร่อง [33] ทาทิศทางการเคลื่อนที่ได้

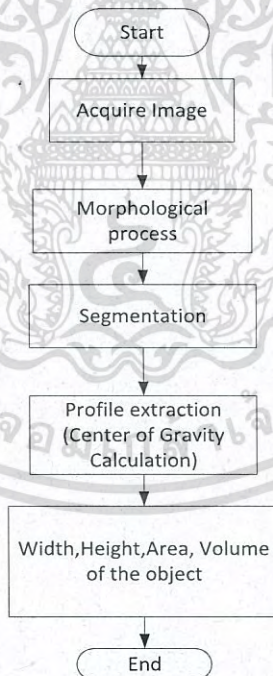
แสงเลเซอร์แบบโครงสร้างจะใช้เพื่อกำหนดจุดฉายลงบนวัตถุ ในการวัดตามมาตรวิทยา ภาพถ่าย ระยะห่างระหว่างระนาบสองระนาบ ถูกนำไปประยุกต์เพื่อใช้หาความกว้างและความสูงของกลุ่มตัวอย่าง เทคนิคการวัดทางเรขาคณิตโดยใช้การมองเห็นของ ที่เรียกว่า Metric Vision [36] เราสามารถสังเกต เห็นว่าพื้นที่ ที่คำนวณหาปริมาณของวัตถุ โดยการรวมพื้นที่ตัดขวางของแต่ละส่วนเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกัน งานวิจัยของเรานำเสนอการตรวจวัดวัตถุสามมิติจากกล้องเป็นแบบเวลาจริง ในที่นี้ตัวอย่าง การหาปริมาณของรูปทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลมแบบสมมาตรของวัตถุ ที่ประมาณการด้วยระบบ แมตริกโดยเฉลี่ยค่าของแสงเลเซอร์ตัดขวาง ในการทดลองใช้กล้องรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและชิ้นส่วน ทุรูปทรงกลม มาทำการวัดแบบพื้นฐานโดยใช้เวอร์เนียบคาลิเปอร์เปรียบเทียบกับ การคำนวณหา ด้วยเทคนิคของคอมพิวเตอร์วิชั่น

4.2.1 การประมวลผลภาพของลำแสงเลเซอร์

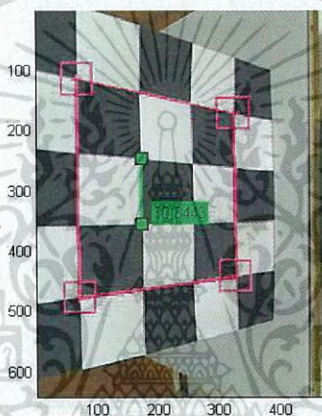
การประมวลผลภาพที่ได้รับการดำเนินการโดยใช้โปรแกรม MATLAB ผ่านโดร์ฟเวอร์ BCAM ของภาพที่ได้มาจากกล้อง Baster กระบวนการ Morphology ถูกนำมาใช้เพื่อเสริมสร้างภาพ ก่อนโดยการแบ่งส่วนภาพเพื่อกำหนด เทสโซลด์ ของภาพ และทำขอบเขตที่ชัดเจน แยก รายละเอียดที่มีการคำนวณตามหลักการของศูนย์กลางแรงโน้มถ่วงหรือแรงช่วงแรก [9] จุดสูงสุดคือ บริเวณส่วนสูงหรือความหนาของวัตถุและความกว้างอยู่ในระยะของปลายทั้งสองด้านซ้ายและขวา ของวัตถุ ผลการจากวัดที่ได้จากกล้องจะต้องนำมาสอบเทียบกับขนาดวัตถุที่วัดจากเครื่องมือวัดเพื่อให้ ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง



รูปที่ 4.12 แผนผังการประมวลผลภาพของการประมาณค่าปริมาตรวัตถุ

4.2.2 การสอบเทียบระยะของวัตถุจากกล้อง

วิธีการ Metric Vision คือการวัดทางเรขาคณิตบนระนาบ [35],[36] ซึ่งนำมาใช้เพื่อแปลงระยะทางในพิกัดบนรูปภาพเป็นค่าระยะทางจริงโดยเทียบกับพิกัดอ้างอิงแสดงในรูปที่ 4.13 (กริดสอบเทียบวัตถุ) ในระบบสองมิติ Homography Matrix จะเป็นตัวแปลงระหว่าง Homogeneous Point และ Homogeneous Coordinate การแก้ปัญหของ Homography Matrix จะถูกกำหนดโดยระบบสมการเชิงเส้น Singular value decomposition (SVD) เป็นการประมาณค่าแบบ Least Squares (LS) ซึ่งเมื่อทราบค่าของ H ก็จะสามารถที่จะนำไปคำนวณหาค่าจริงของตำแหน่งบนรูปภาพโดยการคูณกันระหว่าง H และ p



รูปที่ 4.13 การสอบเทียบโดยการวัดกริด

4.2.3 การประมาณค่าปริมาตรของวัตถุสมมาตร

รูปทรงที่สมมาตรสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน เป็นรูปทรงที่ทางเรขาคณิตที่แน่นอนและมีขนาดที่เท่ากัน ดังนั้นเราสามารถหาพื้นที่ทั้งหมดจากการคำนวณเพียงครึ่งหนึ่งของพื้นที่ตรวจสอบของวัตถุ ปริมาตรของวัตถุเหล่านี้จะสามารถคำนวณการได้โดยการอินทิเกรตพื้นที่ของภาพตัดขวาง (ดูสมการที่ 4.12 สมการที่ 4.13 และสม 4.14) ไปตามความยาวของวัตถุ การคำนวณหาจะต้องพิจารณาความเร็วสายพานลำเลียงด้วย (ดูสมการ 4.15)

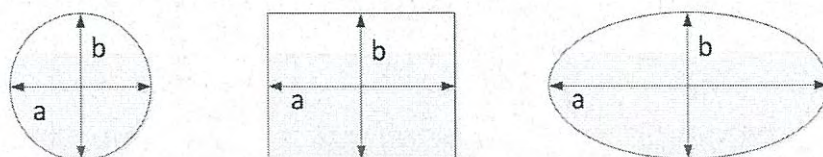
$$\text{Area of rectangle} = ab \quad (4.13)$$

$$\text{Area of circle} = \pi \frac{a^2}{4} \quad \text{หรือ} \quad \pi \frac{b^2}{4} \quad (4.14)$$

$$\text{Area of ellipse} = \pi \frac{ab}{4} \quad (4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Volume = \sum_{n=1}^L Area_n \quad (4.16)$$



รูปที่ 4.14 รูปทรงวัตถุสมมาตร

4.2.4 ผลการทดลองประมาณค่าปริมาตรของวัตถุสมมาตร

ในการทดลองทั้งสามชิ้นส่วนของกล่องถูกนำมาใช้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสามชิ้นส่วนของท่อถูกนำมาใช้เป็นรูปทรงกลม ตัวอย่างของวัตถุทรงรีได้รับการนำเสนอในการทำงานก่อนหน้า [37] วัตถุขนาดง่ายโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ถูกใช้ในการเปรียบเทียบกับเทคนิคของเรา

ตารางที่ 4.1 ผลการประมาณการหาค่าความสูง

Object No.	Metric vision Height (mm)	Vernier caliper Height (mm)	Error (%)
1	40.7	41.4	1.67
2	58.8	60.4	2.51
3	80.1	80.5	0.43
4	34.1	34.1	0.05
5	47.1	48.4	2.71
6	58.2	59.5	2.12
		Maximum Error	2.71
		Minimum Error	0.05
		Average Error	1.58
		STD Error	1.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการประมาณการหาค่าความกว้าง

Object No.	Metric vision Width (mm)	Vernier caliper Width (mm)	Error (%)
1	40.5	40.1	0.86
2	61.7	60.5	1.95
3	79.7	80.1	0.42
4	33.9	34.1	0.6
5	47.2	48.35	2.42
6	58.4	59.45	1.84
		Maximum Error	2.42
		Minimum Error	0.42
		Average Error	1.35
		STD Error	0.82

ตารางที่ 4.3 ผลการประมาณการหาค่าความยาว

Object No.	Metric vision Length (mm)	Vernier caliper Length (mm)	Error (%)
1	42	41.5	1.19
2	60	60.8	1.33
3	83	80.8	2.71
4	156	154.4	1.03
5	156	152.6	2.18
6	155	153.1	1.26
		Maximum Error	2.71
		Minimum Error	1.02
		Average Error	1.62
		STD Error	0.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการประมาณการหาค่าปริมาตร

Object No.	Metric vision Volume (mm ³)	Vernier caliper Volume (mm ³)	Error (%)
1	69.18	68.89	0.42
2	217.93	222.73	2.20
3	497.05	523.59	5.34
4	128.69	140.94	9.52
5	244.51	260.04	6.35
6	375.33	424.63	13.13
	Maximum Error		13.13
	Minimum Error		0.42
	Average Error		6.16
	STD Error		4.67

ตามตารางที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 วิเคราะห์ถึงความผิดพลาดของผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าร้อยละความผิดพลาดสูงสุดของความสูง ความกว้างและความยาวเป็น 2.71%, 2.42% และ 2.71% ตามลำดับ ร้อยละของความผิดพลาดขั้นต่ำสุดของความสูง ความกว้างและความยาวที่มี 0.05%, 0.42% และ 1.03% ประมาณข้อผิดพลาดเฉลี่ยของความสูงความกว้างและความยาวที่มี 1.58%, 1.35% และ 1.62% ตามลำดับ และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 1.11%, 0.82% และ 0.67%ตามลำดับ ผลการทดลองของความสูงและความกว้างสำหรับการคำนวณพื้นที่หน้าตัดส่วนที่สามารถเป็นที่ยอมรับ ร้อยละของความผิดพลาดสูงสุดของปริมาตรเป็น 13.13% และค่าเฉลี่ยของข้อผิดพลาดปริมาตรคือ 6.16% แต่ความถูกต้องของการประมาณการปริมาตรอยู่ในระดับต่ำเนื่องจากข้อผิดพลาดการสะสมจากส่วนพื้นที่หน้าตัดที่กำหนดปริมาตรวัตถุซึ่งวางขนานอยู่บนสายพานลำเลียง

เทคนิคนี้ใช้ในการตรวจจับภาพแสงเลเซอร์โครงสร้างของวัตถุในมุมมองเพียงมุมเดียวด้วยกล้อง Machine Vision และจากการประมวลผลด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาอยู่ในซอฟต์แวร์ MATLAB หลักการของการประมวลผลภาพ และ วิธี Metric vision ถูกนำไปใช้ในการคำนวณความกว้าง ความสูง ความยาวรวมถึงปริมาตรของวัตถุ ที่วางขนานไปบนสายพานลำเลียง ความสูง ความกว้างและส่วนพื้นที่หน้าตัดสอดคล้องกับขนาดของวัตถุ นอกจากนี้แต่ละส่วนพื้นที่ตัดขวางที่ทอดไปตามความยาวของวัตถุ สามารถคำนวณหาปริมาตรโดยที่ความเร็วของสายพานลำเลียงต้องมีความสม่ำเสมอ และการคำนวณ การอ่านค่าจากคอมพิวเตอร์เพื่อการวัดจะต้องรวดเร็วพอให้สอดคล้องกับความเร็วสายพานลำเลียง ระบบนี้จะมีประโยชน์เพื่อใช้ในการออกแบบการควบคุมแบบลำดับของเครื่องอัตโนมัติและเป็นการวัดปริมาณเพื่อหาค่าแบบไม่ทำลายที่มีความสำคัญสำหรับอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การตรวจสอบแบบสามมิติในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ด้วยวิธีแสงเลเซอร์แบ่งส่วน

งานวิจัยนี้นำเสนอการตรวจสอบกล้องสามมิติแบบอัตโนมัติ ของกระบวนการขึ้นสกรู ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยระบบการมองเห็นโดยใช้วิธีลำแสงเลเซอร์ตัดผ่านวัตถุ กล้องสามารถจับลักษณะ รูปร่าง จำนวนสกรูและคุณสมบัติของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ด้วยลำแสงเลเซอร์ในทิศทางตั้งฉากกับสายพานลำเลียงเมื่อเห็นแถบแสงเลเซอร์ผ่านตัวกรองความยาวคลื่นเฉพาะย่าน (650 นาโนเมตร) ที่บริเวณด้านหน้าของเลนส์ เพื่อทำการกรองโดยตัดความยาวคลื่นที่ไม่พึงประสงค์ออกไป หลังจากการประมวลผลภาพก่อนหน้านี้ โปรไฟล์ของภาพที่ได้จากแสงเลเซอร์จะถูกนำมาคำนวณเพื่อหาศูนย์กลางของพิกัดภาพเพื่อนำออกไปเป็นโคออดิเนตภาพนั่นเอง โปรไฟล์แถบเลเซอร์นี้สามารถนำไปใช้ได้ ในบริเวณวงกว้างของพื้นที่ทำให้ได้ข้อมูล 3 มิติ ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่กำลังพิจารณาหรือให้ความสนใจอยู่ การคำนวณ homography ถูกใช้ในการแปลง จากโคออดิเนตภาพให้เป็นระยะจริง (ในระบบเมตริก) งานวิจัยนี้สามารถใช้ในการตรวจสอบความสมบูรณ์ของกระบวนการขึ้นสกรูของ HDD ซึ่งการตรวจสอบภาพแบบ 2 มิติ ไม่สามารถเห็นความแตกต่างได้ในกรณีที่มีองศาจากด้านบน

อุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญและมีความต้องการสูง เพื่อใช้ในการจัดเก็บข้อมูลของผลิตภัณฑ์ ในรูปแบบข้อมูลทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เครื่อง Lab top และ อุปกรณ์เครื่องมือประเภทอื่นๆ ที่ค่านึงถึงค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บข้อมูลขนาดใหญ่ และมีปริมาณมาก ดังนั้นกระบวนการตรวจสอบคุณภาพการผลิตจึงมีความสำคัญอย่างมากกับอุตสาหกรรมการผลิต ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดข้อผิดพลาดและล้มเหลว ในขั้นตอนตรวจสอบคุณภาพ และ ในขั้นตอนสุดท้าย มีฟังก์ชัน การใช้งานไม่ได้ตามที่ต้องการก็จะอยู่ในสถานะ tear down state ชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่ไม่ผ่านการตรวจสอบจะต้องถูกนำมาทดสอบซ้ำอีกครั้ง จนแน่ใจว่าไม่สามารถนำมาปรับปรุงแก้ไขได้อีกแล้วก็จะถูกนำไปทำลาย หรือย่อยให้เป็นเศษชิ้นเล็กๆ (Scraping) [37]

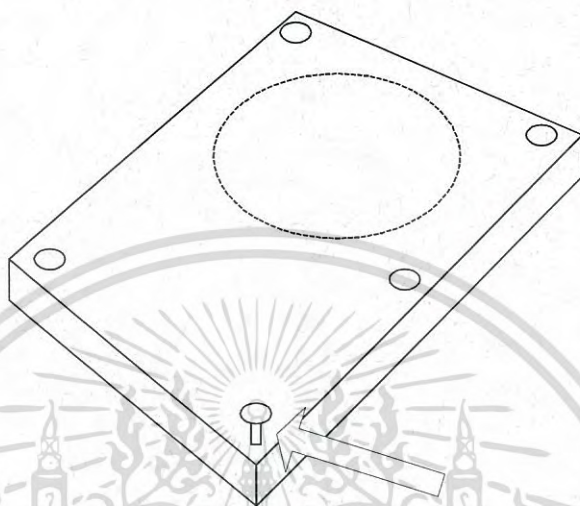
เรื่องของคุณภาพการตรวจสอบในหลายๆ งานวิจัย จะมุ่งเน้นไปที่การตรวจสอบคุณภาพที่พื้นผิวของวัสดุที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูล [37],[38],[39] อย่างไรก็ตามกระบวนการประกอบชิ้นส่วนในขั้นตอนสุดท้ายของการตรวจสอบ ซึ่งถือว่ามีความสำคัญกับการผลิตของอุตสาหกรรมทาง HDD ในปริมาณมาก ตัวอย่างเช่น ขั้นตอนการขึ้นน็อต หรือ สกรูเพื่อยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกันกับฝาครอบ หรือ เฮาส์ซิง (Housing) ในปัจจุบันยังมีการตรวจสอบด้วยกล้องแบบกึ่ง Manual สำหรับอุตสาหกรรมการประกอบชิ้นส่วนที่ทันสมัยแล้ว จะมีกระบวนการแก้ปัญหาต่างๆ ตามที่นำเสนอ

4.3.1 ลักษณะของปัญหาที่พบ

1. สกรูที่ใส่โดย Robot บนฝาครอบเฮาส์ซิงของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นไม่ได้ใส่ (Missing) โดย Robot ข้อบกพร่องนี้สามารถตรวจสอบได้ด้วยระบบกล้องแบบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สกรูที่ใส่บนตัวเฮาส์ซิงของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แล้ว แต่ปรากฏว่าไม่สมบูรณ์ ดังรูปที่ 4.15 ข้อพกพร่องนี้ไม่สามารถตรวจพบด้วยระบบวิชันอัตโนมัติแบบ 2 มิติ ได้ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบด้วยระบบกล้องวิชันแบบ 3 มิติ อัตโนมัติ จึงสามารถคัดแยกได้



รูปที่ 4.15 ลักษณะของปัญหาจากการขันสกรูลงบนฝาครอบของตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบกล้องวิชันสำหรับการตรวจสอบความสมบูรณ์ของการขันสกรูให้กับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ บนพื้นฐานของการตรวจสอบด้วยระบบกล้องวิชันแบบ 3 มิติ โดยอาศัยแสงเลเซอร์ฉายตัดขวางบริเวณด้านบนวัตถุ หรือ ชิ้นงาน ที่ระบบกล้องวิชันแบบ 2 มิติ ไม่สามารถกระทำได้ สำคัญของงานวิจัยจะเป็นการปรับปรุงความเที่ยงตรงของการวัด เช่น ขนาดความกว้าง ความยาว และตรวจสอบการขันประกอบของตัวสกรูของตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในสายการผลิตหรือประกอบชิ้นส่วนด้วยระบบกล้องวิชันตามหลักการของ เมทริกวิชัน ในรูปแบบเวลาจริง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบตรวจสอบอัตโนมัติ สำหรับอุตสาหกรรมการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ให้มีคุณภาพมากขึ้น สามารถประยุกต์ใช้ได้กับอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้เช่นเดียวกัน

ในการประยุกต์ที่หลากหลาย จึงมีความจำเป็นต้องมีระบบเฝ้ามองติดตามและทำการวัดแบบ 3 มิติเพื่อให้ได้ทั้งขนาด ความกว้าง ความยาว และความสูงตามที่ได้นำเสนอ วิธีการวัดขนาดของผลไม้และผัก ที่มีรูปร่างสมมาตร Symmetrical [9] ระยะเวลาไม่นานนี้เป็นงานวิจัยที่วัดขนาดของปลา [37] และขนาดของวัตถุสมมาตร [41] โดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดผ่านช่วยในการพัฒนา งานวิจัยเหล่านี้

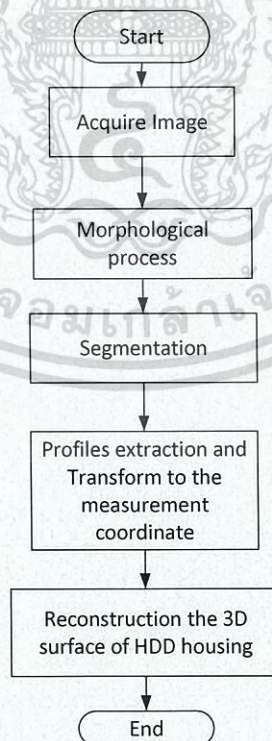
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 เส้นแสงเลเซอร์สีแดงบนตัวเรือนของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

4.3.2 การประมวลผลภาพ (Image processing)

ภาพที่จับได้จากแสงเลเซอร์สีแดงตามโครงร่างจะถูกแปลงเป็นโคออร์ดิเนตของภาพตัดขวางของแต่ละเฟรม จากนั้นอาศัยหลักการของ โฮโมกราฟีทรานส์ฟอร์ม (Homography Transformation) แปลงโคออร์ดิเนตของภาพเป็นออดิเนตของระยะจริงตามหน่วยวัดระบบหน่วย SI แล้วนำโครงร่างภาพตัดขวางทั้งหมดมารวมเข้าด้วยกันก็จะเป็นภาพ 3 มิติ ที่มีจุดความสูง-ความต่ำบนฝาของเฮาส์ซึ่งฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟทำให้สามารถแยกแยะชิ้นงานที่ไม่ได้ขึ้นรูป หรือ ชิ้นไม่สุดเกลียวออกได้



รูปที่ 4.17 แผนผังการประมวลผลภาพ

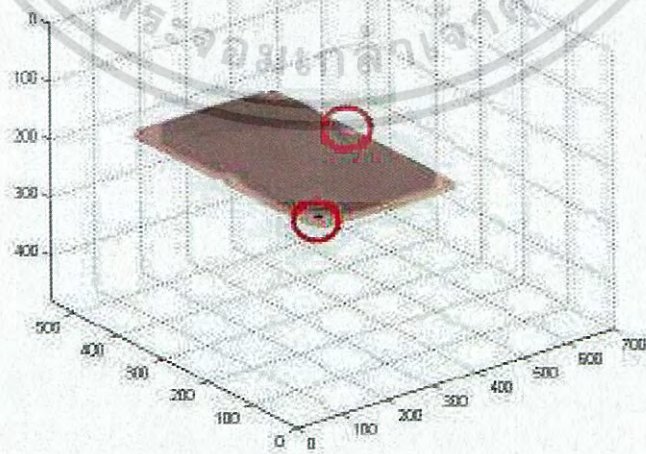
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการทดลองการตรวจสอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ

พื้นที่ผิวของภาพ 3 มิติสามารถอ่านได้จากลำแสงเลเซอร์ตัดผ่านสามารถใช้ในการแยกแยะขนาดของHDD ขนาด 3.5 นิ้วและ 5.5 นิ้วและความผิดพลาดของการชั้นสกรูจาก Robot สามารถตรวจสอบได้จากค่าความสูง ของสกรูที่ถูกขันลงไป ผลของการทดลองในงานวิจัยฉบับนี้ แสดงถึงความสามารถที่ทำการทดสอบให้ห้องปฏิบัติการ สำหรับ ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ขนาด 3.5 นิ้วและ 5.5 นิ้ว ของทางบริษัท Hitachi Global Storage Company ทำการถอดสกรูออกจากด้านบนของตัวฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ซึ่งเป็นการจำลองให้เป็นชิ้นงานตัวอย่างที่เสียเพื่อทำการคัดแยก



รูปที่ 4.18 ผลลัพธ์ภาพ 3 มิติของชิ้นงาน HDD ที่คัดแยกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ดี



รูปที่ 4.19 ผลลัพธ์ภาพ 3 มิติของชิ้นงานฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ ที่คัดแยกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ ภาพ 3 มิติ ตามรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามรูปที่ 4.18 แสดง ถึงภาพพื้นผิว 3 มิติ ที่สมบูรณ์ไม่สามารถตรวจพบความผิดพลาด แสดงให้เห็นว่าไม่มีสกรูในตำแหน่งมุมของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใน รูปที่ 4.19

งานวิจัยนี้นำเสนอการวัด และตรวจสอบวัตถุ 3 มิติจากกล้องที่เรียกว่า Metric Vision โดยอาศัยเทคนิคพื้นฐานของลำแสงเลเซอร์ตัดผ่านสามารถนำมาประยุกต์เพื่อทำการวัดขนาดและปริมาตรของวัตถุใดๆ โดยการเก็บเป็นข้อมูลภาพ จากนั้นแปลงข้อมูลภาพเหล่านี้ให้เป็นระบบ Three Dimensional Coordinate System บนพื้นฐานทฤษฎีของ Planar Metrology เพื่อทำการหา ระยะทางระหว่างสองระนาบเพื่อแปลงให้เป็นขนาดตามความยาวและความสูง ของวัตถุ อย่างไรก็ตามการดำเนินงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบตรวจสอบอัตโนมัติสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ให้ได้มาตรฐาน เช่นอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้ลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนเพื่อการตรวจสอบพื้นผิวและการวัดเชิงเรขาคณิตสำหรับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เทคนิคที่นำเสนอนี้อาศัยการประมวลผลภาพของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบลงบนวัตถุ วิธีการวัดขนาดด้วยภาพบนระนาบ 2 มิติ ถูกนำมาใช้เพื่อหาระยะทาง พื้นที่หน้าตัด ซึ่งวัตถุที่ทำการตรวจวัดต้องมีการเคลื่อนผ่านลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบตั้งฉากเมื่อรวมแต่ละส่วนของภาพเข้าด้วยกันจะทำให้ได้ข้อมูลภาพเชิงระยะแบบ 3 มิติ ข้อมูลที่ได้นี้ ซึ่งระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดขนาดของวัตถุที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น ซึ่งมีความสามารถวัดขนาดวัตถุได้ทั้ง 3 มิติ (ความกว้าง ความยาวและความสูง) โดยให้ผลลัพธ์ของการวัดในหน่วยของหน่วยวัดสากลและสามารถปรับเปลี่ยนสเกลของการวัดได้ง่ายด้วยการสอบเทียบ นอกจากนี้ระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่นำเสนอใช้จำนวนอุปกรณ์ไม่มาก ง่ายในการออกแบบและติดตั้ง และอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานราคาไม่สูงมากนัก แต่ให้ความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ดี สามารถนำมาคำนวณหาขนาดเชิงเรขาคณิต การสร้างแบบจำลองพื้นผิวเพื่อปรับพื้นผิวที่ไม่เรียบของวัตถุให้สามารถมองเห็นรายละเอียดพื้นผิวได้ โดยพื้นผิววัสดุที่ใช้เป็นกรณีศึกษาได้แก่ การตรวจสอบคุณภาพของพื้นผิวแผ่นทองแดง การอ่านรอยนูนของตัวเลขที่ประทับลงบนพื้นผิวโลหะที่ไม่เรียบ รวมไปถึงการวัดขนาดวัตถุรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะสมมาตร เช่น ทรงกระบอก และรูปทรงสี่เหลี่ยม ในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากล และการประยุกต์ใช้ในกระบวนการประกอบโครงสร้างการผลิตฮาร์ดดิสก์

จากการทดสอบระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ และมีความแม่นยำสูงในการวัดความกว้าง ความยาวและความสูงของวัตถุจริง เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในการตรวจสอบชิ้นงานหรือชิ้นส่วนในกระบวนการผลิตต่างๆ ที่ต้องการความแม่นยำสูง นอกจากนั้นสามารถตรวจวัดพื้นที่หน้าตัดและพื้นที่รวมเชิงปริมาตรของวัตถุได้อีกด้วย ดังนั้นระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายด้าน และสามารถนำไปเป็นพื้นฐานในการพัฒนาหรือปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นวิธีการตรวจสอบขนาดแบบไม่ทำลาย และทำงานได้แบบเวลาจริง มีความถูกต้องแม่นยำอยู่ในระดับที่ยอมรับได้จึงสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในระดับอุตสาหกรรมได้

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

จากการวิจัยพบปัญหาเรื่องการประมวลผลภาพลำแสงเลเซอร์ยังไม่เร็วเพียงพอ เนื่องจากความเร็วของกล้องที่นำมาใช้ ในปัจจุบันมีกล้องชนิดพิเศษที่สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อให้กล้องประมวลผลเบื้องต้นในตัวเองและส่งค่าพิกัดของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบ ในการควบคุมแสงจากภายนอกส่งผลให้การวัดขนาดของวัตถุในบางกรณีมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งอาจสามารถแก้ไขโดยการติดตั้งกรองแสงที่ตัวกล้องเพื่อลดแสงรบกวนจากภายนอก โดยตัวกรองแสงจะทำหน้าที่ในการกรองใช้เฉพาะแสงของแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 650 nm เท่านั้นผ่านไปยังเซนเซอร์รับภาพของกล้องจึงช่วยลดผลกระทบของแสงรบกวนได้นำจะทำให้ระบบมีความแม่นยำในการวัดยิ่งขึ้น จากวิธีการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุและทฤษฎีของโฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์มยังสามารถนำไปพัฒนาเป็นระบบตรวจสอบพื้นผิววัตถุ ระบบการสร้างภาพวัตถุสามมิติและระบบการมองเห็นของหุ่นยนต์ได้อีกด้วย

ในการอ่านตัวเลขที่ประทับบนโลหะด้วยวิธีการนำเสนอนี้ สามารถนำฟังก์ชันของ OCR ที่พัฒนาในท้องตลาดมาประยุกต์ใช้ได้ และสามารถใช้อธิบายกับการอ่านข้อมูลอื่นๆ ได้ เช่น ตัวอักษรบนยางรถยนต์ หรือเครื่องจักรในการผลิตอุตสาหกรรม

นอกจากนี้จากการวิจัยยังพบข้อจำกัดเรื่องของรูปทรงของวัตถุที่สามารถใช้ได้กับระบบการตรวจวัดขนาดวัตถุโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่นำเสนอ ซึ่งต้องเป็นวัตถุรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานเท่านั้น หากพัฒนาต่อให้สามารถใช้ได้กับการตรวจวัดขนาดวัตถุรูปทรงอื่นๆ คิดว่าจะเป็นประโยชน์มากในการนำไปใช้งานในงานด้านอื่นๆ อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Balaban, M.O., Yeralan, S., and Bergmann “Machine Vision Quality Attributes of white shrimp” , Journal of Food Science, Volume 62 (1997) pages 113-118, Elsevier.
- [2] Nazrul I. Shaikh, Vittal Prabhu “Vision system for model based control of cryogenic tunnel freezers”, Computer in industry, Volume 56 (2005) page 777–786, Elsevier.
- [3] B. Zion, A.Shklyar and I.Karplus “Sorting fish by computer vision”, Computers and Electronics in Agriculture , Volume 23 (1999) page 175–187, Elsevier
- [4] D.J. White, C.Svellingen, N.J.C. Strachan “Automated measurement of species and length of fish by computer vision”, Fisheries Research, Volume 80 (2006) page 203–210, Elsevier
- [5] D.Wulfsohn, H.J.G. Gundersen, E.B. Vedel Jensen “Volume estimation from projections”, Journal of Microscopy, Volume 215 (2004) page 111–120, Elsevier
- [6] E.Guerra, J.R. Villalobos “A three-dimensional automated visual inspection system for SMT assembly”, Computers and Industrial Engineering, Volume 40 (2001) page 175–190, Elsevier
- [7] 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
- [8] Frank Storbeck, Berent Daan “Fish species recognition using computer vision and a neural network”, Fisheries Research, Volume 51 (2001) pages 11-15, Elsevier.
- [9] N.Nunak and T.Suesut, “Measuring geometric mean diameter of fruit and vegetable using computer vision”, PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE-2007.
- [10] Yaowarat Sirisathitkul, Naphasorn Thumpen and Weerayut Puangtong, “Automated Chokun Orange Maturity Sorting by Color Grading”, Walailak J Sci & Tech 2006; 3(2): 195-205.
- [11] Watcharin Kaewapichai, Pakorn Kaewtrakulpong and Asa Prateepasen, “A Real-Time Automatic Inspection System for Pattavia Pineapples”, Engineering Materials Vol. 321-323 (2006) pp 1186-1191
- [12] นางสาวสิมิลัน อาศัยพานิชย์, ดร.รัฐติวรณ ศรีนาค, “Automatic Fish Measurement and Classification System using Video Image Analysis”, ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [13] F. Omar, C.W. de Silva, “High-speed model-based weight sensing of complex objects with application in industrial processes”, Measurement, Vol. 33 Issue 1, (2003) page 23–33, Elsevier
- [14] D.Wulfsohn, H.J.G. Gundersen, E.B. Vedel Jensen, “Volume estimation from projections”, Journal of Microscopy, Vol. 215 (2004) page 111–120, Elsevier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] 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
- [16] Posdamer, J.L. and Altscholer, M.D. ,“Surface measurement by Space-encoded Projected beam system”, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 18, 1982
- [17] 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
- [18] K. Sato and S. Inokuchi ,“Three-dimensional surface measurement by space encoding range imaging,” Journal of Robotic Systems, vol. 2, pp. 27–39, 1985.
- [19] Beverly D. Bradley, Adrian D.C. Chan, M. John D. Hayes ,“A Simple, Low Cost, 3D Scanning System Using the Laser Light-Sectioning Method”, I²MTC 2008 – IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Victoria, Canada, May 12–15, 2008
- [20] 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
- [21] R. Hartley and A. Zisserman “Multiple View Geometry in Computer Vision”, Cambridge University Press, second edition, 2003.
- [22] 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
- [23] Elan Dubrofsky, “Homography Estimation”, The Faculty of Graduate Studies (Computer Science), University of British Columbia, March 2009
- [24] C. Harris and M.J. Stephens, “A combined corner and edge detector”, In Alvey Vision Conference, pages 147–152, 1988.
- [25] JUN MO JUNG and JONG-WHA CHONG, “A Low Power FIR Filter Design for Image Processing”, VLSI DESIGN, 2001, Vol. 12, No. 3, pp. 391-397
- [26] Ronald Ofner, Paul O’Leary, Markus Leitner, “A Collection of Algorithms for The Determination of Construction Points in The Measurement of 3D Geometries via Light-Sectioning”, Institute for Automation, University of Leoben
- [27] Rorres, Chris and Howard Anton, “Applications of Linear Algebra 3ed.”, 1984 New York: John Wiley and Sons.
- [28] “Spline Toolbox™ User’s Guide”, COPYRIGHT 1990–2010 by The MathWorks, Inc., webpage www.mathworks.com
- [29] อธิวัฒน์ เทพมณี, “การหาระยะทางของพื้นผิววัตถุแบบสามมิติด้วยวิธี Epipolar Geometry” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมการวัดคุม, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] B.D. Bradley, M.J.D. Hayes, & A.D.C. Chan, A simple low cost 3D scanning system using the laser light-sectioning method, *IEEE conference on Instrumentation and Measurement Technology (I2MTC), 2008*, British Columbia, Canada, 2008
- [31] F.Pernkopf & P.O’Leary, Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces, *NDT&E International*, Vol.36, 2003, 609–617.
- [32] Y. Zhongdong, W. Peng, L. Xiaohui & S. Changu, 3D laser scanner system using high dynamic range imaging, *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 2014, 31-41.
- [33] G.Fu, A.Menciassia & P. Darioa, Development of a low-cost active 3D triangulation laser scanner for indoor navigation of miniature mobile robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 60, 2012, 1317–1326
- [34] S. Ozan & S. Gümüstekin, Calibration of double stripe 3D laser scanner systems using planarity and orthogonality constraints *Digital Signal Processing*, Article in press, 2014.
- [35] A.Criminisi, I.Reid & A.Zisserman, Single View Metrology, *International Journal of Computer vision*, 40(2), 2000, 123 – 148.
- [36] P.O’Leary, M.Harker, & P.Zsombor-Murray, Direct least-squares fitting of coupled geometric object, *IEE Proceeding Vision, Image and Signal Processing*, Vol.152, 2005, 687-694.
- [37] N.Nunak & T.Suesut, Fish Size Measurement by Computer Vision using Laser Light Sectioning , *The 10th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering*, Thailand, 2009.
- [38] Zhi Sheng Chow, Melanie Po-Leen Ooi , Ye Chow Kuang, and Serge Demidenko “Automated Visual Inspection System for Mass Production of Hard Disk Drive Media”, *Procedia Engineering*, Volume 41, Pages 450–457, 2012.
- [39] L. Hepplewhite, T.J. Stonham, and R.J. Glover, “Automated Visual Inspection of Magnetic Disk Media,” in *ICECS ’96*, Rodos, Greece, pp. 732-735, 1996
- [40] T. Shimakura , Y. Takahashi, M. Sugaya, T. Ohnishi, M. Hasegawa, and H. Ohta “Mirror electron microscope for inspecting nanometer-sized defects in magnetic media”, *Microelectronic Engineering*, Vol. 85 pp 1811–1814, 2008.
- [41] Suphan Gulphanich, Maethinee Songthai and Taweepol Suesut, “ Volume Estimation of Symmetrical object using Laser Light Sectioning”, *IASTED conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2014)*, Austria 2014.
- [42] H.-D. Lin, “Computer-aided visual inspection of surface defects in ceramic capacitor chips,” *Materials Processing Technology*, vol. 189, pp. 19–25, 2007.
- [43] G. Fricout, D. Jeulin, P.-J. Krauth, and T. Jacquot, “Automatic on-line inspection of non-smooth surface,” *Wear*, 2007, doi:10.1016/j.wear.2006.08.034.
- [44] P. Caleb-Solly and J. E. Smith, “Adaptive surface inspection via interactive evolution,” *Image and Vision Computing*, vol. 25, no. 7, pp.1058–1072, 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [45] Joanneum-Research. (2000) Rail inspection system for the VOESTALPINE. [Online]. Available: dib.joanneum.ac.at
- [46] F. Pernkopf, "3D surface acquisition and reconstruction for inspection of raw steel products," *Computers in Industry*, vol. 56, no. 8-9, pp. 876–885, 2005.
- [47] Paul O'Leary and M. Harker(2009) Discrete polynomial moments for real-time geometric surface inspection. *Journal of Electronic Imaging*, vol.18, pp. 1–38.
- [48] M. Eden, M. Unser, and R. Leonardi, "Polynomial representation of pictures," *Signal Processing*, vol. 10, pp. 385–393, 1986.
- [49] Taweepol Suesut, Peter Schalk, Paul O'Leary, Ewald Fauster, Matthew Harker (2007) Real-time Geometric surface Inspection. *International Conference on Engineering, Applied Science and Technology*, Thailand
- [50] Paul O'Leary, Matthew Harker, Taweepol Suesut (2008) Combined Polynomial and Periodic Moments for the Analysis of Measured 3D surfaces. *I2MTC 2008 International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Victoria, Canada



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sun with rays, flanked by two traditional Thai stupas. Below the sun is a large Thai character '๕'. The entire emblem is surrounded by a decorative border with Thai text. The text at the top reads 'มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์' and the text at the bottom reads 'พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง'.

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Modern Materials and Technologies
of Industrial Production**

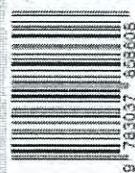
Edited by
Zhang Jun
Honghua Tan

TTP TRANS TECH PUBLICATIONS

**Modern Materials and Technologies
of Industrial Production**

Zhang Jun and Honghua Tan

TTP



9 783037 653605

ISBN-13: 978-3-03785-860-8
Advanced Materials Research Vol. 811
Electronically available at <http://www.scientific.net>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3D Metallic Surface Acquisition for Inspection and Reading Character

T. Suesut¹ S. Gulphanich¹ and K.Roonprasang²

¹Department of Instrumentation and Control Engineering

²Department of Food Engineering Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang Bangkok 10520, Thailand

E-mail: kstaweeep@kmitl.ac.th, kgsuphan@kmitl.ac.th, krkiatti@kmitl.ac.th

Keywords: Laser light sectioning, 3D surface modeling, OCR

Abstract. This paper presents a real-time implementation of 3D acquisition for reading text and inspection the metallic surface based on light sectioning. A measurement is achieved with a standard low cost CMOS camera. Surface defects are modeled as deviations in the local relief from a smooth approximation of the surface. Discrete orthogonal bases are used to generate a smoothed global model of the surface structure. Modified discrete Tchebychev polynomials are used as orthogonal basis functions to perform least square approximations of the geometry. QR decomposition is used to obtain a unitary basis, minimizing the numerical effort when modeling surfaces. The result of test measurements on copper sheets in a production environment is presented to demonstrate the surface inspection. Another result is shown the readable character on the textured metallic surface after the proposed processing. A prototype system of the laser scanning instrument can be implemented in a production line as well.

Introduction

Traditionally, automatic in-line surface inspection of materials has been performed using a camera to acquire an image of the light scattered from the surface [1]. Features are extracted from the intensity image, which are then used to classify the result. Such methods function well for high quality surfaces, where every blemish can be regarded as a defect. Defect detection may be an easy task if the appearance of the inspected surface is a plane or relative simple rounded, and the structure of the surface is smooth and non-textured. However, in the majority of cases, raw milled steel blocks exhibit a relative complex surface-structure embedded in a distinctive three dimensional general geometry: for such rough surfaces, classification can become a difficult problem [2, 3].

In fact, for many applications it is questionable if scattering alone is sufficient to characterize the defects. Photo-metric stereo has been applied to the automatic inspection of rails [4]. This method offers the possibility of determining the surface normal vectors; in addition to the surface albedo. This gives some information on surface geometry, but no metric information on the size of the geometric features. Furthermore, the system implemented is sensitive to decolorizing of the surface, which may be interpreted as geometric variations.

A survey of image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces can be found in [5,6]. There the concept of range imaging is introduced: however, the issues involved in implementing a real-time inline system are not addressed. Pernkopf addressed some of the issues involved in real-time reconstruction and analysis of surfaces from perturbed range data; it was proposed to use spline interpolation to recover a local depth map.

Most metal production plants produce steels of different qualities containing various alloys. Consequently, for critical products, such as oil drilling rods, it is essential to track the metal from the continuous caster to its use in an individual product. Only in this manner can the quality of the material be ensured. The difficulties associated with material tracking in steel production are: the material needs to be marked at temperatures of up to $1100\pm C$, which precludes the use of classical labels; there is significant growth of scale, particularly for high carbon steels. As a result the

marking must be robust enough to withstand later rescaling commonly performed with water jets at 2000 Bar; thermal stress during cooling may lead to significant deformation of the product; the ends of the bars are cut using autogenic-burners, which leaves a characteristic rough surface.

Presently the solution to these problems is to emboss a code as a 3D structure into the surface of the material. There has also been a migration of the types of embossed codes used: originally, embossed dot or bar codes were used. These codes are not human readable which proved to be a major disadvantage. It is very difficult to maintain tracking of steel bars which are removed from the plant during unplanned disruption of the production. Later the bars were embossed with both human-readable and machine readable codes.

In general, character recognition or optical character recognition (OCR), sub-field of pattern recognition, is applied with a binary image acquired by scanner or digital camera. Using a camera to directly capture images from metallic surface is very difficult to perform image segmentation and classification. Because of the image of metallic surface in this work is dark and contains a periodic texture, global deformations, and local anomalies characteristics. It is not easy to classify the number stamped on the metallic surface by a simple technique.

This paper presents a real-time implementation of 3D acquisition for reading the number stamped on the metallic surface and inspection flaws on metallic surface based on light sectioning. Discrete orthogonal bases are used to generate a smoothed global model of the surface structure. After performing the surface relief, the image of surface is manipulated by a variety of methods that perform operations such as filter for noise removal, image enhancement and segmentation. This stage ensures that the resultant image is made suitable for further processing.

Principle of operation

This paper presents a comprehensive system for the real-time acquisition of range data; the reconstruction of the 2D cross sections from the images; the construction of a 3D surface from the individual cross sections and separation of global geometry from local variations.

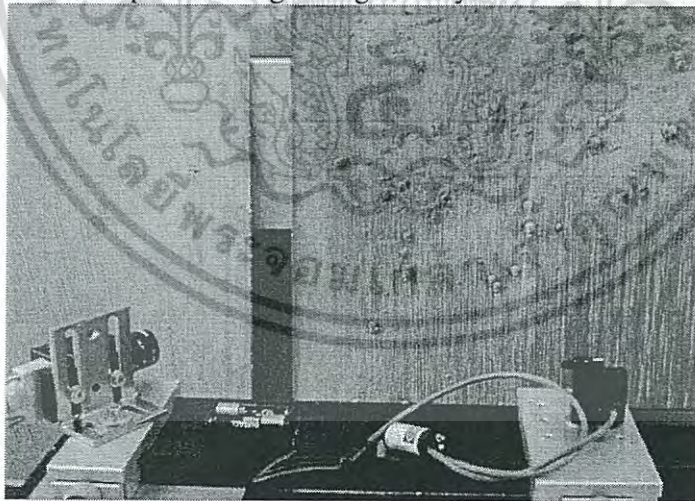


Fig.1 3D surface data acquisition using laser light sectioning

The laser light sectioning system consists of a red line laser module wave length of 650 nm 16 mW 3VDC (Roithner laser technik, Austria) provides a structured light along the inspected sample. The machine vision camera from Basler model SCA 1000(color 1000x750 pixels) was used to capture the image of projected laser on the sample. The principle of geometric surface inspection is shown in Fig.1 a plane of light projected from a laser illuminates a section on the surface of the material; images of the laser light on the surface are acquired in real-time. The rectified data correspond to a local 2D section of the surface being inspected. One or more light sectioning heads are used to acquire sufficient regions of the surface. The shift between the individual cross-sections is generated by: utilizing the linear motion of the material implicit in many production processes, or, by traversing the measurement head past the surface on a linear motion stage.

The grid of data acquired by the light sectioning units will in general contain holes. These are detected and filled using bilinear interpolation to the points on the edge of the hole. The result is a 2D invariant Cartesian grid in x and y , where the data is the z value. The information of interest lies in the local surface relief, which can be regarded as the sum of relative small irregularities embedded in a relatively simple or 'smooth' desired basic geometry. In the ideal case these irregularities only consist of the deviations with respect to the basic geometry.

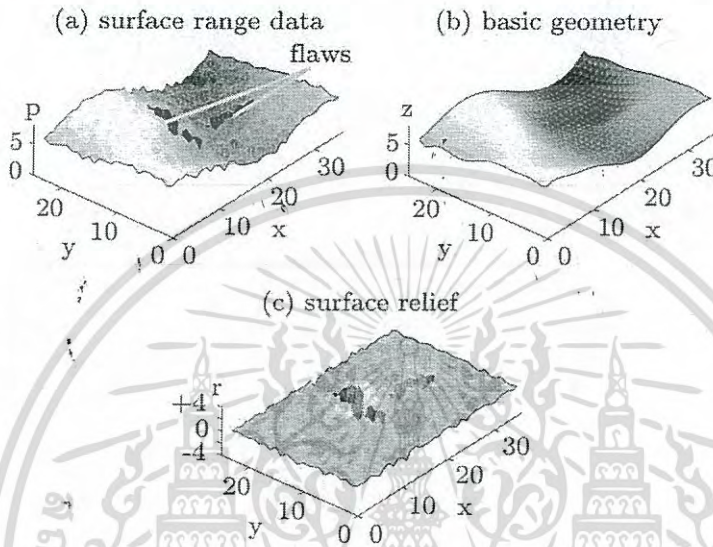


Fig.2 Illustration of the surface relief: (a) Range data of a rough surface patch with embedded flaws (Block size: 32x24 data points), (b) The basic geometry as an approximation to the surface, (c) Surface relief as the residual of the approximation (courtesy of Ingo Reindl).

Polynomial moments for surface modeling

It has been proved that there is one and only one discrete unitary polynomial basis [7].

The unique unitary polynomial basis P , a sum of monomials, can be synthesized in the range $[-1, 1]$ directly from the recurrence relationship,

$$P_n = \alpha p_1 \circ p_{n-1} + \beta p_{n-2} \quad (1)$$

whereby,

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{p_i^T p_i - (p_i^T p_{n-2})^2}} \quad (2)$$

and

$$\beta = \alpha p_i^T p_{n-2}, \quad (3)$$

Given

$$p_0 = \frac{1}{\sqrt{N}}, \text{ and } p_1 = \sqrt{\frac{3(N-1)}{N(N+1)}} x. \quad (4)$$

The individual column vectors p_i are concatenated to form the complete polynomial basis of degree n , i.e. $P = [p_0 \dots p_n]$. This polynomial basis forms a Tchebychev system, the basis is unitary $P^T P = I$. Low degree polynomial moments can model the gradients and sub-harmonic components of data well. It can be proved that a QR decomposition exists for any real matrix, such that,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

$$P = QR \quad (5)$$

where Q is a unitary matrix and R is an upper triangular matrix. Note: for an appropriate QR algorithm $Q^T Q = I + E$, with $\|E\|_2 \approx u$ the numerical resolution of the computer.

Furthermore,

$$PP^+ = QQ^T \quad (6)$$

In further computations Q is used as the orthogonal basis.

Extension to 3D data

Separable orthogonal bases are used to model 3D surfaces. Eden et al. 1986 [8] showed that the computation

$$\hat{Z} = YMX^T, \quad (7)$$

performs a least square approximation \hat{Z} of Z , whereby X and Y are the bases used in the x and y directions respectively. The bases in x and y may and commonly are different.

In the case of a unitary polynomial basis $P^+ = P^T$ the reconstruction process becomes,

$$\hat{Z} = YY^T Z (XX^T)^T. \quad (8)$$

In the application tested here the residual surface is computed as,

$$R = Z - YY^T Z (XX^T)^T. \quad (9)$$

Results and discussion

The concept of real-time geometric surface inspection has been tested with a copper plate (see Fig.1). The copper plates move past the inspection head, the linear motion is part of the normal production process. It is desired to determine the general curvature of the plates and to identify buds, i.e. almost spherical protrusions on the surface.

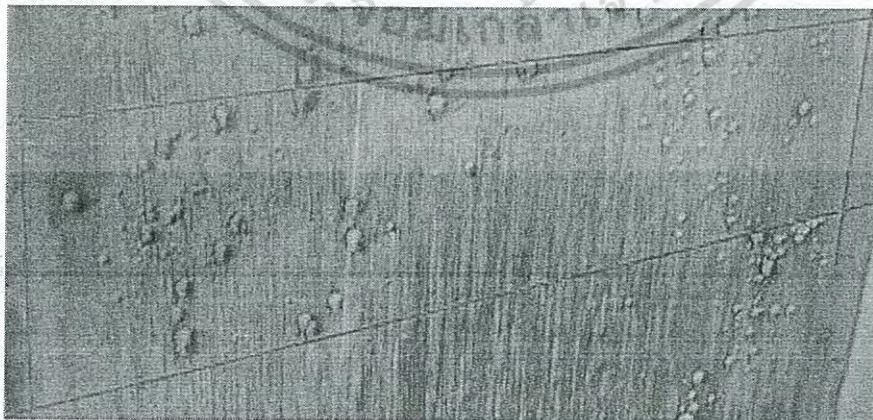


Fig.3 The approximate region which was measured is marked on the photograph of the copper plate. One copper plate and the corresponding measurement results are shown in Fig.4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

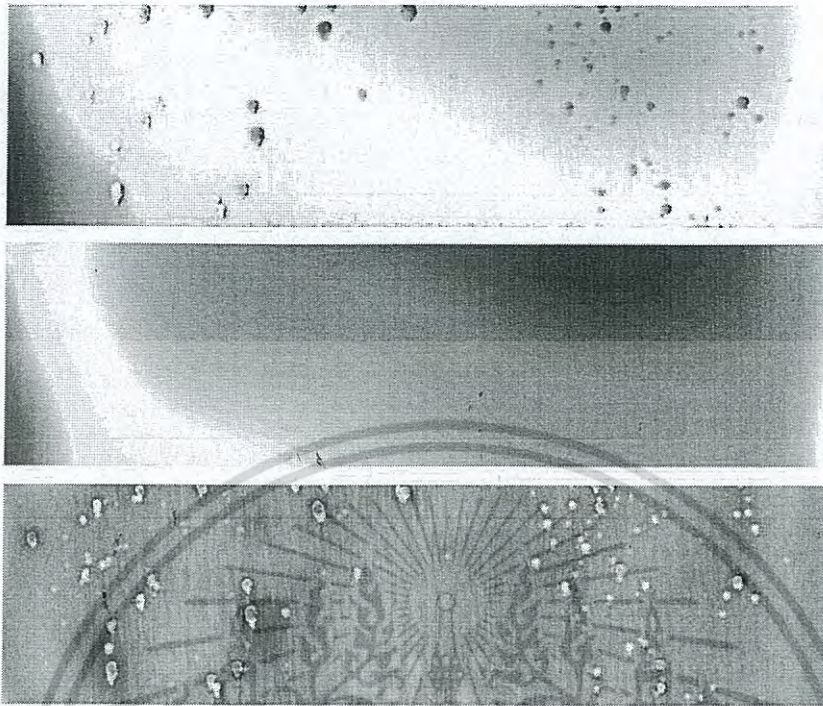


Fig.4 Top: Raw data as coming from the light-sectioning computation; middle: the polynomial moments approximation to the surface, i.e. the smooth model for the surface; bottom: the local relief, i.e. difference between raw data and smooth surface model.



Fig. 5 a) An example of embossed natural digits on metallic surface b) An example of raw surface data acquired laser light sectioning.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 (a) (b)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

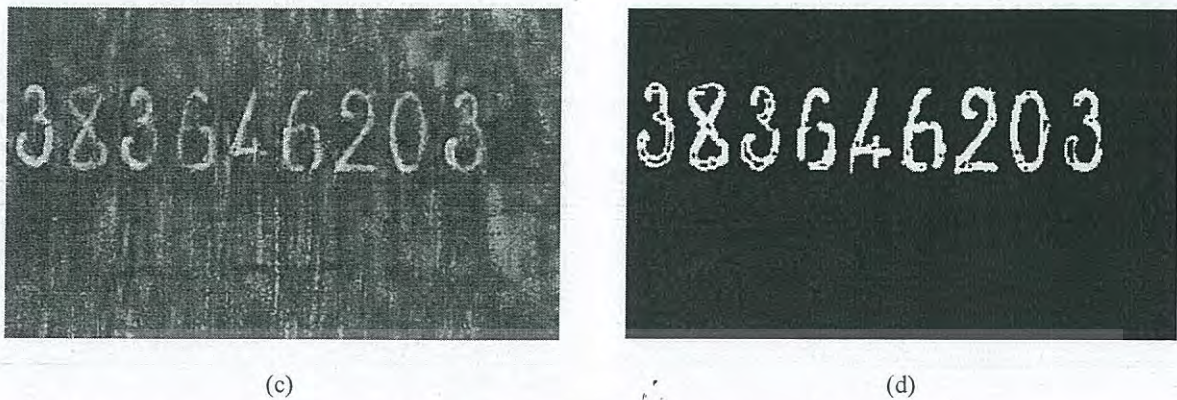


Fig.6 a) The original data. b) The global surface model. c) The local anomalies, i.e. the difference between the original data and the global surface model. d) The binary image with edge detection./

There are two parts of experimental results. The first part is inspection of flaws on copper plate. The quality of copper plate depends on the amount of buds. It is difficult to count buds directly by a simple machine vision system. Therefore, the light sectioning has been proposed to get the range image. Surface relief was obtained as the residual of the approximation and raw range data. This manner making the flaws is clear as shown in fig.4. Afterward, the classification of defect can be done by the simple image analysis such as particle counting. The second part of the experiment is reading the stamped number on the metallic surface. Using the same technique, the embossed digits were readable as shown in fig.6. After surface of the steel block was acquired by the light sectioning instrument, surface approximation to surface relief was done. Subsequently, images of surface were performed image processing (i.e. noise removal, segmentation, edge detection). The recognition of the number could be well done for the further step.

Conclusion

This paper has focused on the inspection flaws on metallic surface and geometric modeling to enable a robust extraction of the digits from the structured and rough surface based on light sectioning[9][10]. Discrete orthogonal bases are used to generate a smoothed global model of the surface structure. Modified discrete Tchebychev polynomials are used as orthogonal basis functions to perform least square approximations of the geometry. QR decomposition is used to obtain a unitary basis, minimizing the numerical effort when modeling surfaces. The result of test measurements on copper sheets is presented to demonstrate the surface inspection. Another result is shown the readable character on the textured metallic surface after the proposed processing. A prototype system of the laser scanning instrument can be implemented in a production line as well.

References

- [1] H.-D. Lin, "Computer-aided visual inspection of surface defects in ceramic capacitor chips," *Materials Processing Technology*, vol. 189, pp. 19–25, 2007.
- [2] G. Fricout, D. Jeulin, P.-J. Krauth, and T. Jacquot, "Automatic on-line inspection of non-smooth surface," *Wear*, 2007, doi:10.1016/j.wear.2006.08.034.
- [3] P. Caleb-Solly and J. E. Smith, "Adaptive surface inspection via interactive evolution," *Image and Vision Computing*, vol. 25, no. 7, pp.1058–1072, 2007.
- [4] Joanneum-Research. (2000) Rail inspection system for the VOESTALPINE. [Online]. Available: dib.joanneum.ac.at
- [5] F. Pernkopf and P. O'Leary, "Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces," *NDTE International*, vol. 236, pp. 609–617, 2003.

- [6] F. Pernkopf, "3D surface acquisition and reconstruction for inspection of raw steel products," *Computers in Industry*, vol. 56, no. 8-9, pp. 876–885, 2005.
- [7] Paul O'Leary and M. Harker(2009) Discrete polynomial moments for real-time geometric surface inspection. *Journal of Electronic Imaging*, vol.18, pp. 1–38.
- [8] M. Eden, M. Unser, and R. Leonardi, "Polynomial representation of pictures," *Signal Processing*, vol. 10, pp. 385–393, 1986.
- [9] Taweepol Suesut, Peter Schalk, Paul O'Leary, Ewald Fauster, Matthew Harker (2007) Real-time Geometric surface Inspection. *International Conference on Engineering, Applied Science and Technology*, Thailand
- [10] Paul O'Leary, Matthew Harker, Taweepol Suesut (2008) Combined Polynomial and Periodic Moments for the Analysis of Measured 3D surfaces. *I2MTC 2008 International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Victoria, Canada. /



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Modern Materials and Technologies of Industrial Production

10.4028/www.scientific.net/AMR.811

3D Metallic Surface Acquisition for Inspection and Reading Character

10.4028/www.scientific.net/AMR.811.394



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



A Publication of the International Association
of Science and Technology for Development

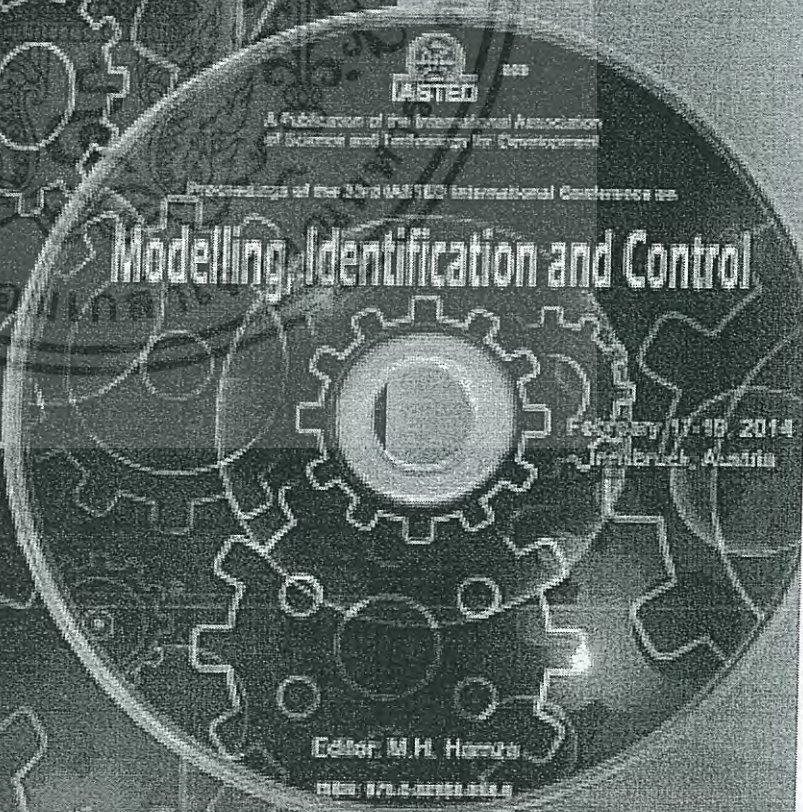
Proceedings of the 33rd IASTED International Conference on

Modelling, Identification and Control

Editor: M.H. HANUS

February 17-19
Innsbruck,

ISBN: 978-0-89618-963-5



February 17-19, 2014
Innsbruck, Austria

Editor: M.H. Hanus

ISBN: 978-0-89618-963-5

VOLUME ESTIMATION OF SYMMETRICAL OBJECT USING LASER LIGHT SECTIONING

Suphan Gulphanich, Maethinee Songthai and Taweepol Suesut
Department of Instrumentation and Control Engineering

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520
Email: kstaweep@kmitl.ac.th

ABSTRACT

This paper presents a method to estimate volume from three-dimensional characteristics of symmetrical objects by computer vision system using laser light sectioning. The camera captures the image of laser line projected on the object moving on a conveyor. The captured images can be estimated the widths and heights at various locations along the object. The area of cross section can be integrated to be volume of the object. The image data is extracted from the structured laser light projecting on the surface. After image pre-processing, the laser profile is calculated the center of gravity in order to extract the image coordinate. The homography transformation is used to transform the extracted coordinate to the real world distance (in metric system). A metric vision based on light sectioning for estimating the volume of symmetrical shapes (rectangular shape and circular shape) of the object were tested. The accuracy of estimation can apply in the automatic size grading on the conveyor as well.

KEY WORDS

Laser light sectioning, Machine vision, Metric Vision.

1. Introduction

Normally, the size measurement of various industries such as food processing, fruit and vegetable etc can be determined by weight. Value or price is depended on the size of product. However, some products need to classify size by volume and geometric dimension [1]. The aim of this research is to estimate size of symmetrical objects for applying in the automatic size grading on the conveyor. The non-destructive measurement using machine vision technology can use to estimate the product size optically for on-line inspection and grading systems. The definition of size used here are width, height, length and volume.

Normally, most optical grading techniques use a two-dimensional area projection to estimate the product volume. These methods are subject to measurement volume without thickness data. Therefore, the measurement results are inaccurate. The laser light sectioning method which combines laser triangulation technique with two-dimensional measurement to reconstruct a three-dimensional surface for volume measurement is introduced in this paper. The 3D laser scanner has been implemented in many applications such

as surface reconstruction [2], surface modeling and inspections [3][4][6] and geometry measurement [1][9]. The visual servoing based 3D laser triangulation has been used in mobile robot for the navigation system [5].

The structured laser light is used to determine the projective points on the object. The planar metrology and the distance between two planes were applied to determine the widths and the heights of the samples. The technique to measure the geometry using machine vision is called metric vision [8]. Consequently, we can obtain the area and also calculate the volume of the object by integrating the area of cross section. Our scheme presents the measurement of 3-D object from the camera that can be improved to apply in real-time inspecting system.

In this paper, the volume of symmetrical shape samples (rectangular shape and circular shape) of the object was estimated in metric system by mean of laser light sectioning. In the experiment, boxes were used as the rectangular shape and the parts of pipe were used as the circular shape. The simple measurement of dimension using vernier caliper was used to compare with our technique.

2. Principle of operations

2.1 Laser light sectioning system

A red line laser module wave length of 650 nm 16 mW 3VDC (Roithner laser technik, Austria) provides a structured light along the sample through a conveyor system.

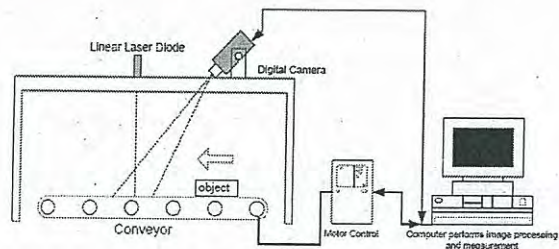


Figure 1. The measurement system

The machine vision camera from Basler model SCA 1000 (color 1000x750 pixels) is used to capture the image

of projected laser on the sample. The conveyor system consists of 24VDC motor and control circuit. This circuit is developed by DS-PIC 16-bit microcontroller for control the speed and direction of DC motor. The measurement system is shown in Figure 1.

2.2 Image processing

The image processing was performed using MATLAB and BCAM driver to acquired image from Basler machine vision camera. The morphological process is used to enhance the image before segmentation process such as image threshold and clear border. The profile extraction is calculated by the principle of center of gravity or first moment [1]. The highest point is the height or the thickness of object and the width of object is distance of the end of part from left or right side. The real world measurement of object must be calibrated from the known dimension object.

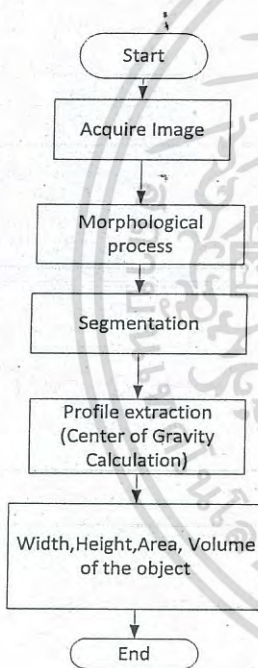


Figure 2. The image processing flow chart

2.3 Metric vision

The planar metrology is the metric vision method to measure the geometry on plane [7][8]. We must know the real world data being the reference coordinate as shown in figure 3 (the measuring calibration grids).

In two dimensions, the homography matrix maps the homogeneous point from the homogeneous coordinate as follows. A point in the plane is defined in homogeneous coordinates as

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (1)$$

In two dimensions, the homography projection H of p to a point p' on another plane can be formulated as

$$p' = Hp \quad (2)$$

$$p' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} \quad (3)$$

where p' and p are the homogeneous coordinates of the corresponding points p (pixel coordinates) and p' (real-world), and H is a homography matrix as,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (4)$$

One of the nine parameters with in H can be interpreted as scaling. The remaining eight entries can be determined by using 4 points given in the two planes. A linear algorithm can be derived by expanding equation (4) for a given point correspondence and normalizing with respect to the homogeneous component to yield,

$$x_i = \frac{h_{11}x_i + h_{12}y_i + h_{13}}{h_{31}x_i + h_{32}y_i + h_{33}}, y_i = \frac{h_{21}x_i + h_{22}y_i + h_{23}}{h_{31}x_i + h_{32}y_i + h_{33}} \quad (5)$$

In this case, the point correspondences are assumed to be image coordinates, hence homogeneous component $w_i = w'_i = 1$ then the homography matrix can be rewritten as follows:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & x'_1 & x'_1 y_1 & x'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & x'_4 & x'_4 y_4 & x'_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & y'_1 x_1 & y'_1 y_1 & y'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & y'_4 x_4 & y'_4 y_4 & y'_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

The solution of the homography matrix can be determined by a linear equation system. Singular value decomposition (SVD) is a least square estimation that can be applied on this matrix to find the non trivial solutions of the homography. Then the real world coordinate can be calculated using the multiplication of matrix H and p .

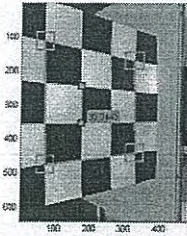


Figure 3. Measuring calibration grids

2.4 Volume estimation of symmetrical object

A symmetrical shape is shapes, which can be divided in two parts with exact the same size (see figure 6). Therefore, we can calculate the half-area to determine all area of the object. The laser profile on rectangular object and circular object are shown in figure 4 and figure 5, respectively. The volume of them can be determined by integrating the area of cross section (see equation 7, equation 8, and equation 9) along the length of object. The calculation has to be concerned with the conveyer speed. (See equation 10)

$$\text{Area of rectangle} = ab \quad (7)$$

$$\text{Area of circle} = \pi \frac{a^2}{4} \text{ or } \pi \frac{b^2}{4} \quad (8)$$

$$\text{Area of ellipse} = \pi \frac{ab}{4} \quad (9)$$

$$\text{Volume} = \sum_{n=1}^L \text{Area}_n \quad (10)$$

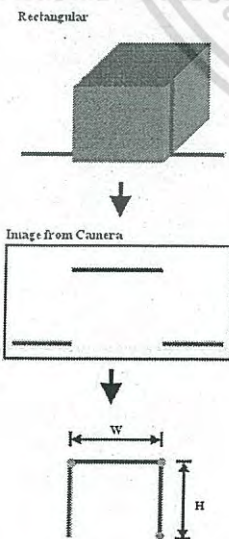


Figure 4. The laser profile on rectangular object

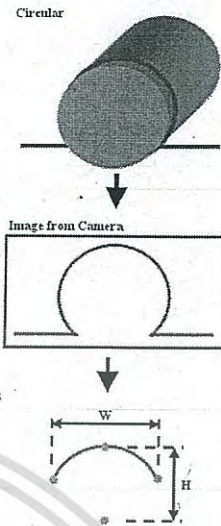


Figure 5. The laser profile on circular object

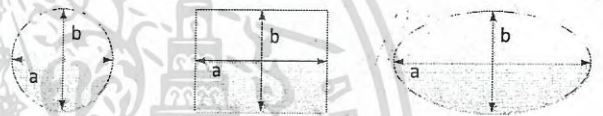


Figure 6. The symmetrical object

3. Experimental results

In the experiment, the three pieces of box were used as the rectangular shape and the three pieces of pipe were used as the circular shape. The example of ellipsoid object has been presented in the previous work [9]. The simple dimension measurement using vernier caliper was used to compare with our technique.

Table 1 The height estimation results

Object No.	Metric vision Height (mm)	Vernier caliper Height (mm)	Error (%)
1	40.7	41.4	1.67
2	58.8	60.4	2.51
3	80.1	80.5	0.43
4	34.1	34.1	0.05
5	47.1	48.4	2.71
6	58.2	59.5	2.12
		Maximum Error	2.71
		Minimum Error	0.05
		Average Error	1.58
		STD Error	1.11

Table 2 The width estimation results

Object No.	Metric vision Width (mm)	Vernier caliper Width (mm)	Error (%)
1	40.5	40.1	0.86
2	61.7	60.5	1.95
3	79.7	80.1	0.42
4	33.9	34.1	0.6
5	47.2	48.35	2.42
6	58.4	59.45	1.84
		Maximum Error	2.42
		Minimum Error	0.42
		Average Error	1.35
		STD Error	0.82

Table 3 The length estimation results

Object No.	Metric vision Length (mm)	Vernier caliper Length (mm)	Error (%)
1	42	41.5	1.19
2	60	60.8	1.33
3	83	80.8	2.71
4	156	154.4	1.03
5	156	152.6	2.18
6	155	153.1	1.26
		Maximum Error	2.71
		Minimum Error	1.02
		Average Error	1.62
		STD Error	0.67

Table 4 The volume estimation results

Object No.	Metric vision Volume (mm ³)	Vernier caliper Volume (mm ³)	Error (%)
1	69.18	68.89	0.42
2	217.93	222.73	2.20
3	497.05	523.59	5.34
4	128.69	140.94	9.52
5	244.51	260.04	6.35
6	375.33	424.63	13.13
		Maximum Error	13.13
		Minimum Error	0.42
		Average Error	6.16
		STD Error	4.67

According to table 1, 2, 3 and 4, the error analysis of experiment results is demonstrated that the percentage of maximum error of height, width and length are 2.72%, 2.42% and 2.71%, respectively. The percentage of minimum error of height, width and length are 0.05%, 0.42% and 1.03%, approximately. The average error of height, width and length are 1.59%, 1.35% and 1.62%, respectively and the standard deviation are 1.11%, 0.82% and 0.67%, respectively. The experimental results of

height and width for calculating the area cross-section can be acceptable. The percentage of maximum error of volume is 13.13% and the average of volume error is 6.16%. However, accuracy of volume estimation is low because of the accumulation error from area cross section to formulate the volume along to conveyer.

4. Conclusion

This technique is capturing a structured laser light of object in a single view with a machine vision camera, and then processed with a self developed program in MATLAB software. The principle of image processing and metric vision method is applied to calculate width, height, length as well as the volume of the object along the conveyer. The height, width and area cross section are corresponding to the size of object. Moreover, each of area cross section along the object can be calculated to the volume. However, the speed of conveyer must be stable and the measurement computation must be fast enough corresponding to the conveyer speed. This system could be benefit to design the automatic grading machine and non destructive measurement in the future.

References

- [1] N.Nunak & T.Suesut, Measuring geometric mean diameter of fruit and vegetable using computer vision, *PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE-2007*, Thailand, 2007
- [2] B.D. Bradley, M.J.D. Hayes, & A.D.C. Chan, A simple low cost 3D scanning system using the laser light-sectioning method, *IEEE conference on Instrumentation and Measurement Technology (I2MTC)*, 2008, British Columbia, Canada, 2008
- [3] F.Pernkopf & P.O'Leary, Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces, *NDT&E International*, Vol.36, 2003, 609-617.
- [4] Y. Zhongdong, W. Peng, L. Xiaohui & S. Chang, 3D laser scanner system using high dynamic range imaging, *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 2014, 31-41.
- [5] G.Fu, A.Menciassia & P. Dario, Development of a low-cost active 3D triangulation laser scanner for indoor navigation of miniature mobile robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 60, 2012, 1317-1326
- [6] S. Ozan & S. Gümüstekin, Calibration of double stripe 3D laser scanner systems using planarity and orthogonality constraints *Digital Signal Processing*, Article in press, 2014.
- [7] A.Criminisi, I.Reid & A.Zisserman, Single View Metrology, *International Journal of Computer vision*, 40(2), 2000, 123 - 148.
- [8] P.O'Leary, M.Harker, & P.Zsombor-Murray, Direct least-squares fitting of coupled geometric object, *IEE Proceeding Vision, Image and Signal Processing*, Vol.152, 2005, 687-694.
- [9] N.Nunak & T.Suesut, Fish Size Measurement by Computer Vision using Laser Light Sectioning, *The 10th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering*, Thailand, 2009.

International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015

CS 2015



Hong Kong, 18-20 March, 2015

Conferences Publications Membership About IAENG FAQ Contact Us

The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015 will take place in Hong Kong, 18-20 March, 2015.

The IMECS 2015 is organized by the International Association of Engineers (IAENG), a non-profit international association for the engineers and the computer scientists. The conference has the focus on the frontier topics in the theoretical and applied engineering and computer science subjects. The IMECS conferences serve as good platforms for our members and the entire engineering community to meet with each other and to exchange ideas. Our IMECS committees have been formed with over three hundred conference committee members who are mainly research center heads, faculty deans, department heads, professors and research scientists from over 30 countries. The last IAENG conference has attracted more than eight hundred participants from over 50 countries.

All submitted papers will be under peer review and accepted papers will be published in the conference proceeding (ISBN: 978-988-19253-2-9). The abstracts will be indexed and available at major academic databases. The accepted papers will also be considered for publication in the special issues of the Journal Engineering Letters, in IAENG Journals and in edited books.

IMECS 2016: 16-18 March, 2016

The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2016 will take place in Hong Kong, 16-18 March, 2016. The details are available at:

<http://www.iaeng.org/IMECS2016>

IMECS 2016 Important Dates:

Draft Manuscript Submission Deadline: 8 December, 2015
Camera-Ready Papers Due & Registration Deadline: 10 January, 2016

IMECS 2015 Important Dates:

Draft Manuscript Submission Deadline (extended): 8 January, 2016
Camera-Ready Papers Due & Registration Deadline: 10 January, 2016

IMECS 2015: 18-20 March, 2015

The summary of submissions, and a Total number of submissions received, Total number of papers that have been accepted to attend the conference.

The titles and contact authors of all IMECS 2015 are listed here:

[Titles A-C](#), [Titles D-N](#), [Titles O-Z](#)

[IMECS 2015 Program Schedule](#)

[The Best Paper Awards and Best Student Paper Awards](#)

The IMECS 2015 is composed of the following:

ICAI'15
The 2015 IAENG International Conference on Artificial Intelligence
Hong Kong, 18-20 March, 2015

ICB'15
The 2015 IAENG International Conference on Biomedical Engineering
Hong Kong, 18-20 March, 2015



IMECS 2015

International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015

Hong Kong
18-20 March, 2015

Proceedings Books
ISBN (Vol I & II)
978-988-19253-2-9
978-988-19253-3-6

ISSN
1548-3657 (Print)
1548-3665 (Online)

S. F. Au
Oscar Castillo
Craig Douglas
David Dagan Feng
Kong-Mee Lee (Eds.)

IAENG
International Association of Engineers

Copyright © 2015
All Rights Reserved

3D Inspection for HDD Production Process using Laser Light Sectioning

S.Gulphanich, N. Nunak, and T.Suesut

Abstract— This research proposes the automatic visual inspection from three-dimensional characteristics of Hard Disk Drive case tightening process by machine vision system using laser light sectioning. The machine vision camera captures a number of features of HDD perpendicular to a conveyor belt as seen by a laser strip light. The narrow band pass filter (650 nm.) was mouthed in front of lens in order to cut off the unwanted wavelength. After image pre-processing, the laser profiles were calculated the center of gravity to extract the image coordinate. The features used here are the laser strip profile at various locations along the HDD formulating the 3D data. The homography computation was used to transform the image coordinate to the real world distance (in metric system). This scheme can be used to inspect the completeness of screwing process of the HDD which the 2D visual inspection cannot perform on the top view.

Index Terms— Hard disk drive, Metric Vision, 3D inspection

I. INTRODUCTION

HARD disk drives (HDDs) are highly demanded consumer information technology products, e.g. personal computers, laptop and other data storage equipment for cost-effectively storing large-scale information. The inspection process is very important for quality control of HDDs production. HDDs that have failed the final quality and functional testing are sent to a tear down stage. The HDD components that have failed the re-tested process will be sent for scrapping [1]. Many researches in HDD inspection process have been mostly focused on the HDD media surface inspection [1],[2],[3]. However, the final assembly of HDD process is also essential for the mass production such as the screws fastening of HDD housing. Nowadays, manual visual inspection is currently used in the modern Hard Disk assembly process to solve the following problems.

A. Problem statements

1. The screw putting on the HDD housing by the robot is missing. This defect can be checked by 2D automatic visual inspection.

Manuscript received December 29, 2014; revised January 18, 2015. This work was supported in part by Dept. of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

S. Gulphanich is with department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520 (corresponding author e-mail: kgsuphan@kmitl.ac.th).

N. Nunak is with the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Faculty of Engineering, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand (e-mail: kbnavaph@kmitl.ac.th).

T.Suesut is with department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520 (e-mail: kstaweep@kmitl.ac.th).

2. The screw has already put on the HDD housing but it is not complete as shown in figure 1. This defect needs to check the tighten screw on HDD assembly by 3D inspection.

This paper shows a feasible design to automate the visual inspection for the completeness of the HDD screwing process based on: 3D inspection using Laser Light Sectioning which the 2D visual inspection cannot perform on the top view.

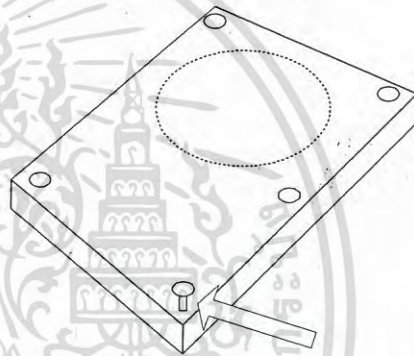


Fig. 1. The incomplete screwing process on the HDD housing

The aim of this paper is to improve the accuracy of measuring the size of the hard drive, such as width, length and checking the tighten screw on HDD assembly by vision system (Metric Vision) in real-time. Moreover, this work can be guided to development of an automated inspection system for the HDD manufacturing as well as other industries.

II. RELATED WORKS

Two-dimensional (2D) computer vision has been dedicated to the development of automated visual inspection systems. However, these systems have had limited success primarily due to the variability in the appearance of the components and their surroundings. The electronic components usually have varying colors, textures, and shapes, which may result in low contrast gray-scale imaging. They have been many techniques developed to enhance certain features of the components being inspected. Even though many component types may be imaged and detected with these techniques, intensity image information obtained from a 2D sensor is not always sufficient to correctly determine the actual condition of the components under inspection; this is particularly true for real-time quality monitoring processes. Therefore, more sophisticated methods or a tool that provides an additional dimension of measurement should be seriously considered.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

E. Guerra *et al.*, [4] have designed a monitoring system for three-dimensional integrated circuit manufacturing process on the surface (Surface Mount Technology) to check the original two-dimensional system can be good for validation to the number of text and code on the device. The two-dimensional system cannot distinguish disorders dimensional height. Their research aims to design a 3D scanning laser beam to capture the height dimension. The conversion of images from three dimensions to two dimensions by the intensity of the two-dimensional image has been performed using a histocompatibility cate to distinguish abnormal circuits. This study did not measure up in any unit of measurement.

Peter Schalk and Paul O'Leary [5] bring a laser beam to cut through to the measurement and analysis of cross-sectional diameter steel pipe manufacturing process to determine the quality of production by moving through the process of hot-rolled steel pipes. The problem is that the diameter of the pipe is not a pipe-shaped, not round and does not meet this metric to measure the radius of the cylinder from the estimation of the circumference and validity of the pipe from the deviation of the center. Resolution of the measurement is 1 mm. estimation using least squares method of splitting a single value (Singular Value Decomposition) and calibrated using actual size by the homography transformation.

In various applications, the need to monitor and measure in three dimensions (length, width, height) presented a method for measuring the size of the fruits and vegetables that are symmetrical shapes [6]. The previous work for measuring the size of fish [7] and the symmetrical objects [8] using the laser light sectioning technique were developed.

III. PRINCIPLE OF THE OPERATION

A. Laser light sectioning system

The prototype 3D inspection system consists of a red line laser module 650 nm of wavelength 16 mW 3VDC providing a structured light along the sample perpendicular to the conveyor.

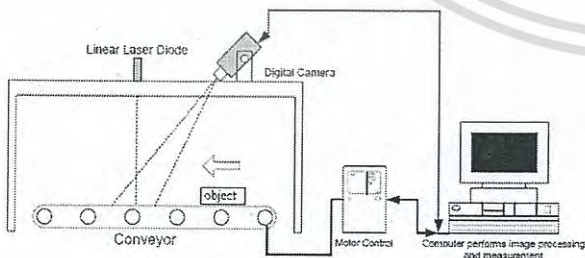


Fig. 2. The prototype of 3D inspection system

The machine vision camera from Basler model SCA 1000 (color 1000x750 pixels) was used to capture the image of projected laser on the HDD housing. The conveyor system consists of 24VDC motor with the belt speed controller. The prototype inspection system has shown in Figure 2. The idea of laser light sectioning can be explained

by Figure 3. and the real experiment with the HDD housing shows in Figure 4.

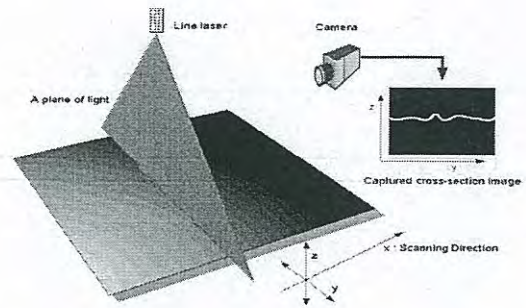


Fig. 3: The laser light sectioning technique

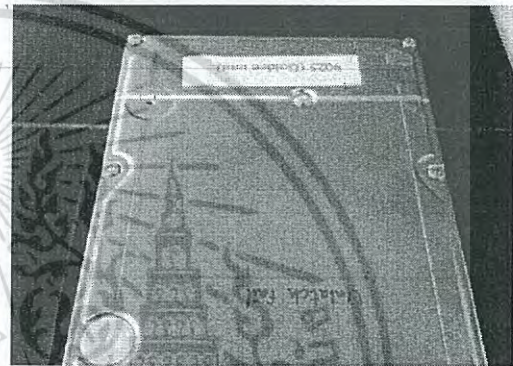


Fig. 4. The red line laser light on HDD housing

B. Image processing

The image processing was performed using MATLAB and BCAM driver to acquired image from Basler machine vision camera.

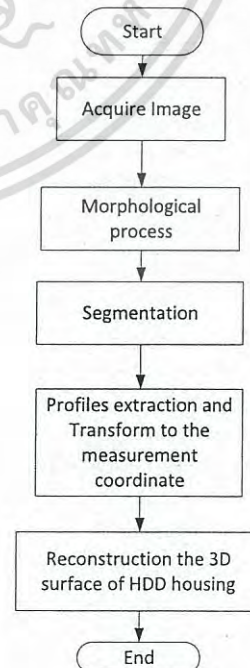


Fig. 5. The image processing flow chart

The morphological process was used to enhance the image before segmentation process such as image threshold and clear border. The profile extraction was calculated by the principle of center of gravity or first moment [5]. The captured images of laser profiles were transformed to the cross section coordinate for each image frame. The homography transformation can be transformed the image coordinate (a number of pixel) to the measuring coordinate (SI unit). All of cross section profiles will be combined to reconstruct the three dimension image. The highest point and the lowest point on the top of HDD housing can be identified the defect of screw fastening.

follows:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & x'_1 x_1 & x'_1 y_1 & x'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & x'_4 x_4 & x'_4 y_4 & x'_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & y'_1 x_1 & y'_1 y_1 & y'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & y'_4 x_4 & y'_4 y_4 & y'_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

C. Metric vision

The planar metrology is the metric vision method to measure the geometry on plane [5]. We must know the real world data being the reference coordinate. In two dimensions, the homography matrix maps the homogeneous point from the homogeneous coordinate as follows. A point in the plane is defined in homogeneous coordinates as

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (1)$$

In two dimensions, the homography projection H of p to a point p' on another plane can be formulated as

$$p' = Hp \quad (2)$$

$$p' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} \quad (3)$$

where p' and p are the homogeneous coordinates of the corresponding points p (pixel coordinates) and p' (real-world), and H is a homography matrix as,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (4)$$

One of the nine parameters with in H can be interpreted as scaling. The remaining eight entries can be determined by using 4 points given in the two planes. A linear algorithm can be derived by expanding equation (4) for a given point correspondence and normalizing with respect to the homogeneous component to yield,

$$x'_i = \frac{h_{11}x_i + h_{12}y_i + h_{13}}{h_{31}x_i + h_{32}y_i + h_{33}}, y'_i = \frac{h_{21}x_i + h_{22}y_i + h_{23}}{h_{31}x_i + h_{32}y_i + h_{33}} \quad (5)$$

In this case, the point correspondences are assumed to be image coordinates, hence homogeneous component $w_i = w'_i = 1$, then the homography matrix can be rewritten as

The solution of the homography matrix can be determined by a linear equation system. Singular value decomposition (SVD) is a least square estimation that can be applied on this matrix to find the non-trivial solutions of the homography. Then the real world coordinate can be calculated using the multiplication of matrix H and p .

IV. EXPERIMENT RESULTS

The area of 3D surface getting from the cross section can be used to classify size of the hard drive (3.5-inch or 5.5-inch). The error from the screwing robot can be checked by measuring the height of screw. The experiment results in this paper were performed in the laboratory. The HDD size 3.5-inch and 5.5-inch from Hitachi Global Storage Company were done by removing the screw on the top of HDD in order to simulate the defect sample.

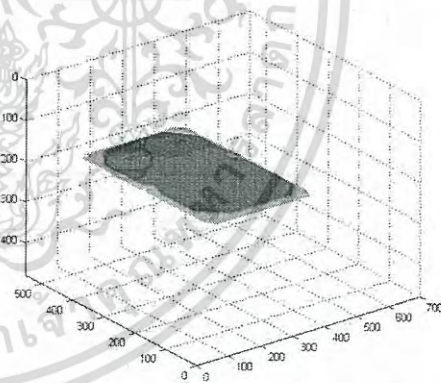


Fig. 6. The 3D image result of HDD housing without defect

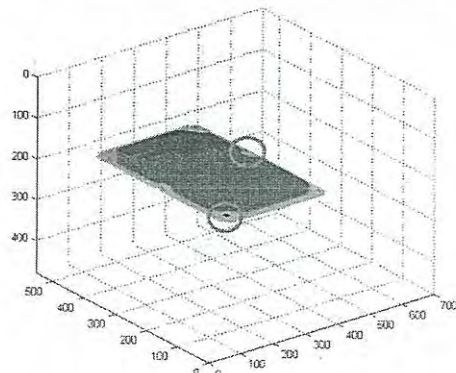


Fig. 7. The 3D image result of HDD housing with defect

The 3D image results are illustrated in figure 6, and 7. According to figure 6, the 3D surface image is complete. There is not found the error or the missing part of the screw. In figure 7, the screw on the corner of HDD is missing.

V. CONCLUSION

This paper presents a 3D object measurement and inspection from the camera which is called Metric Vision. This technique based on laser light sectioning can be applied to measure the size and volume of the object. And converting the image data into three-dimensional coordinate system based on the Planar Metrology and theory to find the distance between two planes adapted to the size, width, length and height of the object. The aim of this paper is to improve the accuracy of measuring the size of the hard drive, such as width, length and checking the tighten screw on HDD assembly by vision system in real-time. Moreover, this work can be guided to development of an automated inspection system for the HDD manufacturing as well as other industries.

REFERENCES

- [1] Zhi Sheng Chow, Melanie Po-Leen Ooi, Ye Chow Kuang, and Serge Demidenko "Automated Visual Inspection System for Mass Production of Hard Disk Drive Media", *Procedia Engineering*, Volume 41, Pages 450-457, 2012.
- [2] L. Hepplewhite, T.J. Stonham, and R.J. Glover, "Automated Visual Inspection of Magnetic Disk Media," in *ICECS '96*, Rodos, Greece, pp. 732-735, 1996
- [3] T. Shimakura, Y. Takahashi, M. Sugaya, T. Ohnishi, M. Hasegawa, and H. Ohta "Mirror electron microscope for inspecting nanometer-sized defects in magnetic media", *Microelectronic Engineering*, Vol. 85 pp 1811-1814, 2008.
- [4] E.Guerra, J.R. Villalobos "A three-dimensional automated visual inspection system for SMT assembly", *Computers and Industrial Engineering*, Volume 40, page 175-190, 2001.
- [5] Peter Schalk, Paul O'Leary, Ronald Ofner and Anton Gferrer "Measuring and Analyzing Cross-Sectional Profiles of Rotating Objects Using Light Sectioning", *IEEE Transaction on instrumentation and Measurement*, Volume 57 No. 10 page 2329-2338, 2008
- [6] N.Nunak and T.Suesut, "Measuring geometric mean diameter of fruit and vegetable using computer vision", *PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE-2007*, 2007
- [7] N.Nunak and T.Suesut, "Fish Size Measurement by Computer Vision using Laser Light Sectioning", *The 10th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, Thailand*, 2009.
- [8] Suphan Gulphanich, Maethinee Songthai and Taweepol Suesut, "Volume Estimation of Symmetrical object using Laser Light Sectioning", *IASTED conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2014)*, Austria 2014.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล
ที่อยู่ นายสุพรรณ กุลพาณิชย์
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา 2528 อดุสาหกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2531 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2532 ตำแหน่ง อาจารย์ ประจำภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

พ.ศ.2538 ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุม
ทางอุตสาหกรรม

พ.ศ.2545 ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุม
ทางอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้