

การวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ

3-D OBJECT SIZE MEASUREMENT USING
LASER - LIGHT SECTIONING



T110289

ศรายุทธ อินทุเศรษฐ

SARAYUT INTHUSET

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....110289
วัน,เดือน,ปี.....- 1 พ.ย. 2553

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

พ.ศ. 2553

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL 2010-EN-M-060-073

**3-D OBJECT SIZE MEASUREMENT USING
LASER - LIGHT SECTIONING**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL 2010-EN-M-060-073



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ
Thesis Title 3 –D Object Size Measurement using Laser-Light Sectioning
นักศึกษา นายศรายุทธ อินทุเศรษฐ
รหัสประจำตัว 48060810
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ทวิพล ชื้อสัตย์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-060-073

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
ดร.พงษ์ชัย	นิลาศ	
ดร.ยุทธพงษ์	ทัพผดุง	
รศ.อาจินต์	น่วมสำราญ	
รศ.ดร.ทวิพล	ชื้อสัตย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2553 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2553



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากฝ่าฝืนให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ
นักศึกษา	นาย สราวุธ อินทุเศรษฐ
รหัสนักศึกษา	48060810
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการวัดพื้นที่หน้าตัดจากคุณลักษณะสามมิติของวัตถุด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น โดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นจะมองลักษณะของแสงเลเซอร์บนพื้นผิววัตถุบนสายพานลำเลียงขณะเคลื่อนที่ผ่านแสงเลเซอร์ ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ และทำการวัดออกมาเป็นตัวเลข โดยมีสองขั้นตอนหลักในการวัดแบบสามมิติคือ การแยกโครงสร้างสองมิติของแต่ละส่วนจากภาพ และการสร้างพื้นผิวสามมิติจากการรวมแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน ซึ่งคุณลักษณะที่ถูกนำมาใช้คือความกว้าง และความสูงในตามแต่ละตำแหน่งของวัตถุ โดยภาพของแสงเลเซอร์ที่ฉายไปบนพื้นผิววัตถุจะถูกเก็บบันทึกด้วยกล้องในรูปแบบไฟล์วีดีโอ โอโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มจะถูกนำมาใช้เพื่อแปลงภาพเส้นแสงเลเซอร์ให้เป็นระยะทางจริงของวัตถุ (ในหน่วยวัดของระบบเมตริก) วิทยานิพนธ์นี้ใช้วัตถุทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส และทรงกระบอกมาใช้ทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ และแสดงตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดขนาดปลา (ปลานิล) รวมทั้งเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการทดลองกับวิธีการวัดด้วยการใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ ระบบที่นำเสนอนี้เป็นประโยชน์ในการออกแบบเครื่องมือคัดแยกอัตโนมัติ และการทดสอบโดยไม่ทำลายวัตถุ

Thesis Title	3-D Object Size Measurement using Laser-Light Sectioning
Student	Mr. Sarayut Inthuset
Student ID.	48060810
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Taweepol Suesut

ABSTRACT

This thesis presents the method to measure the cross section from 3-D characteristics of the object by computer vision system using laser-light sectioning. The computer vision system measures a number of features of object as seen by a laser profile perpendicular to a conveyor belt. There are two main steps for 3-D measurement i.e. the reconstruction of the 2-D cross sections from the images and the construction of the 3-D surface from the individual cross sections. The feature used here are the width and height at various locations along the object. The images acquired from a digital camera to the video file (AVI) were the structured laser light projecting on the object surface. The homography transformation was used to transform the extracted profile into the real world distance (in metric system). In this work, square box and cylinder were performed to test the measurement system. The fish (*Oreochromis niloticus*) size measurement has been implement for the example application. The experimental results have been compared with the conventional measurement using vernier caliper. This system could be benefit to design the automatic grading machine and non destructive testing.

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์ ผศ.ดร.พงษ์ชัย นิลาศ ผศ.เชื้อ นกอยู่ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม และ ดร.นวกัทร หนูนาถ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ในการศึกษา และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมและของบัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ แม่ และญาติพี่น้อง รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่น่ารักทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนช่วยเหลือในทุกๆด้านทั้งเรื่องการเงิน การเงิน และเรื่องส่วนตัวจนทำให้ผู้เขียนผ่านทุกอย่างอย่างจนมาถึงวันนี้ได้

สุดท้ายนี้คุณประโยชน์ที่พึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และขอให้ทุกท่านจงมีแต่ความสุขตลอดไป

ศรายุทธ อินทุเศรษฐ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 การเก็บข้อมูลสามมิติและรูปแบบการสแกนวัตถุ	4
2.1 การเก็บข้อมูลสามมิติ	4
2.2 รูปแบบการสแกนวัตถุ	18
2.3 สรุป	22
บทที่ 3 การแปลงเชิงเรขาคณิตและทฤษฎีของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม	23
3.1 การแปลงเชิงเรขาคณิต	23
3.2 การโปรเจกชัน	31
3.3 แบบจำลองกล้อง	34
3.4 โฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม	40
3.5 สรุป	49
บทที่ 4 การออกแบบระบบตรวจวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ	50
4.1 หลักการตรวจวัดขนาดของวัตถุที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจวัดขนาดวัตถุ	54
4.3 ขั้นตอนการประมวลผลและการทำงานของระบบตรวจวัดขนาดของวัตถุ	56
บทที่ 5 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	69
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	69
5.2 การทดสอบผลของการสอบเทียบ โดยใช้จุดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุด	69
5.3 การทดสอบวัดขนาด พื้นที่หน้าตัดและพื้นที่รวมเชิงปริมาตรจากวัตถุตัวอย่าง	80
5.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดขนาดของปลา	82
5.5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	85
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	88
6.1 สรุปผลการวิจัย	88
6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ	88
เอกสารอ้างอิง	90
ภาคผนวก	92
ประวัติผู้เขียน	98

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

5.1	ผลลัพธ์และค่าความผิดพลาดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุดจากภาพทดสอบที่ 1	73
5.2	ผลลัพธ์และค่าความผิดพลาดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุดจากภาพทดสอบที่ 2	74
5.3	ผลลัพธ์และค่าความผิดพลาดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุดจากภาพทดสอบที่ 3	75
5.4	ผลลัพธ์และค่าความผิดพลาดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุดจากภาพทดสอบที่ 4	76
5.5	ผลลัพธ์และค่าความผิดพลาดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุดจากภาพทดสอบที่ 5	77
5.6	ผลลัพธ์และค่าความผิดพลาดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุดจากภาพทดสอบที่ 6	78
5.7	ตารางสรุปผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดขนาดของตารางจากจุดทดสอบทั้งหมด	79
5.8	ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดความหนาของวัตถุตัวอย่าง	81
5.9	ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดความกว้างของวัตถุตัวอย่าง	81
5.10	ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดความยาวของวัตถุตัวอย่าง	81
5.11	ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดพื้นที่หน้าตัดของวัตถุตัวอย่าง	81
5.12	ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดพื้นที่รวมเชิงปริมาตรของวัตถุตัวอย่าง	82
5.13	ตารางสรุปผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดขนาดวัตถุตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง	82
5.14	ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการวัดความกว้างของปลานิล	84
5.15	ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการวัดความหนาของปลานิล	84
5.16	ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการคำนวณพื้นที่หน้าตัดของปลานิล	85
5.17	ตารางสรุปผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดขนาดของปลาที่ได้จากการทดลอง	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ VI ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

ภาพที่	หน้า
2.1 หลักการวัดระยะทางโดยใช้คลื่นแสง	5
2.2 ความต่างของมุมเฟสที่สะท้อนกลับมาเมื่อกระทบวัตถุ	5
2.3 การวัดระยะทางโดยหลักการของรูปสามเหลี่ยม	6
2.4 หลักการของระบบสเตอริโอวิชั่น	7
2.5 การวัดระยะทางในระบบสเตอริโอวิชั่น	7
2.6 ภาพถ่ายสเตอริโอที่ได้จากกล้องซ้ายและกล้องขวา	9
2.7 ภาพความแตกต่างของกล้องทั้งสองเมื่อนำมารวมกัน	9
2.8 การคำนวณระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ	10
2.9 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบจุด	12
2.10 การวิเคราะห์ระยะทางของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ	12
2.11 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบเส้น	14
2.12 ฉากรหัสบาร์	14
2.13 เทคนิคการฉายแสงผ่านรหัสบาร์	15
2.14 ภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากบาร์	15
2.15 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสบาร์	16
2.16 ฉากรหัสเกรย์	17
2.17 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสเกรย์	18
2.18 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนวัตถุ	19
2.19 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ	20
2.20 การสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนวัตถุ	20
2.21 การเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านเส้นแสงและภาพที่ได้ในเฟรมต่างๆเมื่อมีวัตถุตัดผ่าน	21
2.22 ตัวอย่างการนำภาพตัดขวางแต่ละส่วนมารวมเพื่อสร้างภาพตัดขวาง 3 มิติ	21
3.1 แสดงระบบพิกัดการที่เขียนและระบบพิกัดโฮโมจีเนียส	23
3.2 การเลื่อนพิกัดของภาพ	24
3.3 การขยายขนาดของภาพ	25
3.4 ระบบพิกัดโพล่าและการบอกตำแหน่งจุดโดยใช้เวกเตอร์	26
3.5 การหมุนของภาพ	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ VII ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.6 การบิดภาพทางแกน x และการบิดภาพทางแกน y	28
3.7 การสะท้อนตามแกน x	28
3.8 การสะท้อนตามแกน y	29
3.9 การสะท้อนรอบเส้นตรง	30
3.10 หลักการของการ โปรเจกชัน	31
3.11 การ โปรเจกชันแบบขนาน	32
3.12 การ โปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ	32
3.13 คุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายจากการ โปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ	33
3.14 ความสัมพันธ์ของระยะทางระหว่างผู้สังเกตกับวัตถุจากการ โปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ ...	34
3.15 แสดงลักษณะของจุดที่บรรจบกันของเส้นขนานและเส้นของจุดบรรจบกันของเส้นขนาน ..	34
3.16 แบบจำลองของระบบสร้างภาพของกล้อง	35
3.17 พิกัดบนระนาบของภาพ	36
3.18 แบบจำลองการสร้างภาพกรณีพิกัดของโลกไม่ซ้อนทับพิกัดของกล้อง	38
3.19 การแปลงแบบ โปรเจกทีฟของระนาบ 2 มิติของกล้อง	39
3.20 ความสัมพันธ์และการ โปรเจกชันของจุดที่อยู่บนระนาบ	40
3.21 ตัวอย่างลักษณะของการแปลงในเชิงการ โปรเจกชันแบบต่างๆ	41
3.22 การบิดเบือนของระนาบซึ่งเป็นผลของการแปลงแบบแอฟฟาย	43
3.23 คุณสมบัติและลักษณะของการแปลงภาพแบบต่างๆ	45
4.1 แนวคิดที่นำมาใช้ในการตรวจวัดขนาดวัตถุ	50
4.2 การวิเคราะห์เรขาคณิตจากภาพเส้นแสงเลเซอร์	52
4.3 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจวัดขนาดวัตถุ	54
4.4 อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ	55
4.5 ขั้นตอนการประมวลผลและการทำงานของระบบตรวจวัดขนาดของวัตถุ	56
4.6 ตารางหมากรุกขนาด 30×30 มิลลิเมตรที่ใช้ในการสอบเทียบ	57
4.7 จุดพิกัดที่เป็นบริเวณมุมของตารางที่ได้จากการใช้ทฤษฎีการหามุมของแฮร์ลิส	58
4.8 ตัวอย่างการสอบเทียบเพื่อหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์	59
4.9 การลดสัญญาณรบกวนแบบเป็นเชิงเส้นโดยใช้หลักการของการคอนโวลูชัน	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ VIII ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.10 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวนโดยใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ย	62
4.11 วิธีการของเส้นทางเดินของเส้นและผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการของเส้นทางเดินของเส้น	63
4.12 แสดงผลลัพธ์ที่ได้ของการประมาณค่าในช่วงแบบสไปลน์โดยใช้พหุนามกำลังสาม และพหุนามกำลังหนึ่งหรือเป็นเชิงเส้น	64
4.13 ผลของการปรับแต่งและลดการกระจายตัวของข้อมูลพิกัดของแสงเลเซอร์	64
4.14 จุดที่เป็นคุณสมบัติของความกว้างและความหนา	66
5.1 การสอบเทียบการ โดยใช้จำนวนจุดในการสอบเทียบ 4 จุดและการสอบเทียบโดยการ ใช้จำนวนจุดในการสอบเทียบ 20 จุด	70
5.2 จุดทดสอบที่จะทำการทดลองวัดขนาดในด้านแต่ละด้านของตารางหมากรุก	71
5.3 ภาพการวัดขนาดในด้านแต่ละด้านของตารางทั้ง 6 ภาพที่นำมาใช้ในการทดลอง	72
5.4 กราฟค่าความผิดพลาดของการใช้จุดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุด	79
5.5 วัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและรูปทรงกระบอกที่ใช้เป็นวัตถุตัวอย่างในการทดลอง	80
5.6 ความกว้างและความหนาสูงสุดที่ใช้คำนวณพื้นที่หน้าตัดของการวัดขนาดของปลานิล	83
5.7 ปลานิลขนาดแตกต่างกัน 13 ขนาดที่นำมาใช้ในการทดสอบ	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) ได้ถูกวิจัยและพัฒนาเรื่อยมาตั้งแต่ปี 1920 จนถึงปัจจุบันและได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานสาขาต่างๆ มากมาย เช่น ด้านการแพทย์ ชีววิทยา ภูมิศาสตร์และการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียม การคัดแยก การตรวจสอบหรือตรวจวัดขนาดของวัตถุดิบหรือชิ้นงานในขบวนการผลิตในงานด้านอุตสาหกรรมการผลิตและอุตสาหกรรมการเกษตร เป็นต้น ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวก ลดระยะเวลาในการดำเนินงาน ให้ความถูกต้องแม่นยำ เพิ่มประสิทธิภาพในขบวนการผลิต และช่วยลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากผู้ปฏิบัติงานเนื่องจากความล้าและมาตรฐานที่แตกต่างกันของแต่ละบุคคล

ในงานวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับระบบคัดแยกหรือตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบที่ผ่านมาที่มีการนำการประมวลผลภาพและระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์มาใช้จะเป็นการตรวจสอบหรือคัดแยกขนาดโดยใช้การวิเคราะห์คุณสมบัติของสี [1][2] ซึ่งบอกได้เพียงคุณสมบัติด้านคุณภาพของวัตถุดิบบางอย่างเท่านั้น เช่น ความสุกของผลไม้หรือความสดของวัตถุดิบ และมีงานวิจัยต่างๆ ที่พัฒนาจากระบบการประมวลผลภาพมาวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติด้านขนาดของวัตถุในลักษณะที่เป็นแบบ 2 มิติคือ ความกว้างหรือความยาวเท่านั้น [3][4] ทำให้ขาดข้อมูลในส่วนความสูงหรือความหนา เมื่อนำระบบ 2 มิตินี้มาพัฒนาเป็นเครื่องคัดขนาด ดังนั้นคุณภาพด้านขนาดและรูปร่างที่ได้จึงไม่สมบูรณ์ดังที่ภาคอุตสาหกรรมต้องการ ซึ่งอุตสาหกรรมหลายประเภทมีความจำเป็นต้องทำการตรวจสอบและวัดขนาดของวัตถุดิบหรือชิ้นงานในขบวนการผลิตในลักษณะ 3 มิติ (ความกว้าง ความยาว และความหนา) จึงมีงานวิจัยและการพัฒนาเพื่อให้สามารถตรวจสอบหรือคัดแยกขนาดได้ทั้ง 3 มิติ [5][6][7] อย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านี้หน่วยของการวัดไม่ได้อยู่ในรูปของหน่วยการวัดสากล เช่น มิลลิเมตร หรือ เซนติเมตร ถ้าหากมีระบบที่มีความสามารถตรวจสอบหรือวัดขนาดได้ในแบบ 3 มิติที่มีความสะดวกในการใช้งานและติดตั้งได้ง่าย รวมทั้งมีความเร็วในการประมวลผลและบอกได้ถึงขนาดของวัตถุที่เป็นหน่วยวัดมาตรฐานสากลจะเกิดประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานมากยิ่งขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการค้นคว้าและพัฒนาวิธีการตรวจวัดขนาดวัตถุทรงเรขาคณิตพื้นฐานที่มีรูปทรงเชิงสมมาตร ซึ่งมีรูปทรงใกล้เคียงกับวัตถุดิบในกระบวนการผลิต พืชผลการเกษตรหรือปลาชนิดต่างๆ เช่น ทรงกระบอก และรูปทรงสี่เหลี่ยมในเชิง 3 มิติ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์จากภาพที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากกล้องและทำการทดลองวัดขนาดวัตถุด้วยระบบประมวลผลภาพแบบ Off-line โดยได้นำเสนอการใช้เทคนิควิธีการวัดขนาดด้วยภาพ (Metric Vision) บนระนาบภาพ 2 มิติมาประยุกต์ร่วมกับเทคนิคที่ใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ (Laser Light Sectioning) เพื่อประยุกต์ใช้วัดขนาดความกว้าง ความยาว ความสูงและพื้นที่โดยรวมเชิงปริมาตรในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากลจากวัตถุตัวอย่าง โดยคำนึงถึงความสะดวกง่ายในการออกแบบติดตั้งรวมทั้งให้ความเร็วในการทำงานและความถูกต้องแม่นยำที่มีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ นอกจากนั้นจะแสดงตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับการวัดขนาดและคัดแยกปลา เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ

1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากการศึกษาถึงปัญหาต่างๆจึงมีแนวความคิดในการออกแบบระบบการวัดขนาดและตรวจสอบวัตถุ ในลักษณะการสแกนบนสายพานลำเลียงซึ่งอยู่ในกระบวนการผลิตโดยทั่วไป และนำเสนอเทคนิคการใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ (Laser Light Sectioning) ที่เป็นเทคนิคการวัดรูปทรงแบบตัดขวางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายในการออกแบบโดยวิธีนี้เป็นการฉายแหล่งกำเนิดแสงลงบนพื้นผิววัตถุเพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงตกกระทบ โดยแสงเลเซอร์ที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพและบันทึกไว้ด้วยกล้องที่วางทำมุมเอียงกับแหล่งกำเนิดแสงร่วมกับการใช้เทคนิควิธีการวัดขนาดด้วยภาพ (Metric Vision) ที่เป็นทฤษฎีเกี่ยวกับการมองเห็นเชิงเรขาคณิตของกล้องตัวเดียว (Single View Geometry) และทฤษฎีของการแปลงแบบโฮโมกราฟี (Homography Transformation) เพื่อใช้แปลงพิกัดของเส้นแสงเลเซอร์ในภาพที่ได้ซึ่งเป็นคุณสมบัติด้านขนาดของวัตถุให้เป็นพิกัดจริงของวัตถุทำให้สามารถคำนวณหาขนาดของวัตถุและพื้นที่ของวัตถุนั้นๆได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการตรวจวัดขนาดวัตถุทรงเรขาคณิตพื้นฐานที่มีรูปทรงเชิงสมมาตร เช่น ทรงกระบอก และรูปทรงสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นวัตถุแบบ 3 มิติ ด้วยการใช้เทคนิคแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุร่วมกับการประมวลผลภาพจากภาพที่ทำการบันทึกเป็นภาพวิดีโอแบบ AVI โดยทำการพัฒนาและออกแบบโปรแกรมบน MATLAB ให้สามารถวัดขนาดของวัตถุตัวอย่างทั้งความกว้าง ความยาว ความสูงและพื้นที่โดยรวมเชิงปริมาตรในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากล โดยให้ความถูกต้องแม่นยำและมีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ รวมทั้งนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับการวัดขนาดของปลานิล เพื่อเป็นการทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของวิธีการวัดขนาดวัตถุ 3 มิติด้วยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุได้นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 6 บทด้วยกัน โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายวัตถุประสงค์ ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการรวมทั้งวิธีการวัดขนาดและระยะทางของวัตถุแบบ 3 มิติแบบต่างๆ รวมทั้งรูปแบบลักษณะการสแกนวัตถุในการตรวจวัดวัตถุแบบ 3 มิติ และอธิบายถึงหลักการของเทคนิคการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับการประมวลผลภาพ เช่น การแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพ หลักการของการ โปรเจกชัน แบบจำลองของกล้อง ทฤษฎีโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มและการคำนวณค่าของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมทริกซ์

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ สำหรับการวัดรูปทรง 3 มิติ การติดตั้งระบบและอุปกรณ์ ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมรวมทั้งลักษณะการทำงานและขั้นตอนในการสอบเทียบ

บทที่ 5 กล่าวถึงขั้นตอนของการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานและการประยุกต์ใช้งานในการวัดขนาดของปลานิลรวมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อรวมทั้งการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

บทที่ 2

การเก็บข้อมูลสามมิติและรูปแบบการสแกนวัตถุ

ในการเก็บข้อมูลสามมิติจะใช้ตัวตรวจจับชนิดต่างๆของข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจจับยังไม่ใช่เป็นระยะทางจริง จะต้องนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการคำนวณใหม่เสียก่อน ซึ่งเรียกข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจจับนี้ว่าข้อมูลระยะทาง (Range data) โดยที่ข้อมูลระยะทางที่ได้จะมีประโยชน์มากในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น ระบบการมองเห็นของหุ่นยนต์ การวินิจฉัยโรคในด้านการแพทย์ กระบวนการผลิตในงานด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเก็บข้อมูลสามมิติแบบต่างๆรวมทั้งการสแกนวัตถุที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

2.1 การเก็บข้อมูลสามมิติ (3D Range Acquisition)

การเก็บข้อมูลสามมิติเป็นการตรวจจับหรือตรวจวัดข้อมูลของวัตถุที่ต้องการ ในลักษณะทั้งความกว้าง ความยาว รวมทั้งความสูงหรือความหนาของวัตถุ การเก็บข้อมูลสามมิติมีหลักการและวิธีการอยู่หลายอย่าง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเก็บข้อมูลสามมิติแบบต่างๆที่น่าสนใจ

2.1.1 หลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไป (Time of Flight)

การวัดระยะทางวิธีนี้จะใช้การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปยังวัตถุที่ต้องการ เมื่อสัญญาณนี้กระทบกับวัตถุก็จะสะท้อนกลับมาที่ตัวรับ ซึ่งรูปแบบของสัญญาณมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ซึ่งระยะทางของวัตถุสามารถหาได้จากผลคูณระหว่างความเร็วการเคลื่อนที่ของสัญญาณกับเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปและสะท้อนกลับมา โดยสามารถที่จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

เมื่อ d คือ ระยะทางจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปยังวัตถุ (เมตร)

v คือ ความเร็วขึ้นอยู่กับชนิดของสัญญาณที่ใช้ (เมตร/วินาที)

t คือ เวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปและสะท้อนกลับมา (วินาที)

โดยคุณสมบัติของสัญญาณโดยทั่วไปที่ต้องคำนึงถึงที่นำมาใช้ในหลักการของเวลาที่สูญเสียไปนี้แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ มุมเบี่ยงเบนของสัญญาณและความเร็วของสัญญาณ ถ้ามุมเบี่ยงเบนของสัญญาณที่ส่งออกไปมีมุมกว้างแล้ววัตถุมีขนาดเล็กจะทำให้ระยะทางที่คำนวณได้มีความแม่นยำ

เอกรัศมีของเอกรัศมีที่ส่งออกไปมีมุมกว้างแล้ววัตถุมีขนาดเล็กจะทำให้ระยะทางที่คำนวณได้มีความแม่นยำ

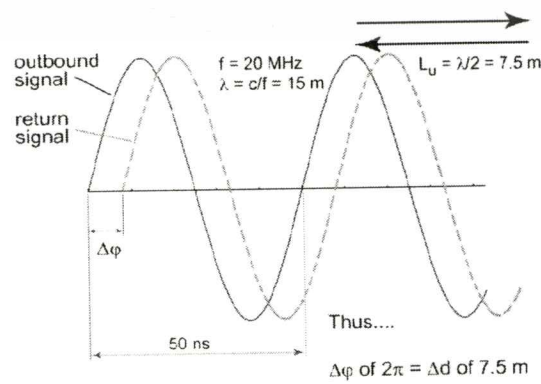
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลงเพราะสัญญาณจะครอบคลุมบริเวณได้กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่มีมุมแคบกว่า ซึ่งทำให้มีความแม่นยำมากกว่า

โดยทั่วไปแล้วมีสัญญาณอยู่ 3 ชนิดที่นำมาใช้ในหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปซึ่งได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแสง และคลื่นเสียง ซึ่งวิธีในการคำนวณหาระยะทางจะมีลักษณะเหมือนกัน อย่างไรก็ตามสัญญาณแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวของมันและจะมีผลต่อความแม่นยำของ ระยะทางที่คำนวณได้ ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะสัญญาณที่เป็นคลื่นแสงเท่านั้น โดยการใช้คลื่นแสง มาใช้ในหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปวิธีนี้ถูกเรียกว่า “LIDAR” (Light Detection and Ranging) ซึ่งจะกำหนดคลื่นแสงสั้นๆออกไปและรอคลื่นสะท้อนกลับมานำเวลาที่สูญเสียไปมาคำนวณหา ระยะทาง ในวิธีนี้จะนิยมใช้แสงเลเซอร์ (Laser) เพราะว่ามีมุมเบี่ยงเบนของคลื่นจะแคบมากเป็นผลให้ ระยะทางที่คำนวณได้มีความถูกต้องสูงซึ่งจะดีกว่าคลื่นแสงทั่วไป นอกเหนือจากเวลาที่นำไปใช้ คำนวณแล้วความเข้มแสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับมาสามารถนำมาเปลี่ยนเป็นความเข้มในระดับเกรย์ ได้อีกด้วย ความเข้มแสงที่สะท้อนกลับมาจะเปลี่ยนไปตามสัดส่วนกับจำนวนแสงที่ถูกดูดซึมด้วย วัตถุที่แตกต่างกัน ดังนั้นนอกจากจะรู้ระยะทางแล้วความเข้มแสงที่ได้รับมาในแต่ละจุดสามารถนำมา แสดงรวมกันได้ภาพสามมิติอีกด้วย



รูปที่ 2.1 หลักการวัดระยะทางโดยใช้คลื่นแสง [8]



เอกสารนี้เป็นเอกสาร **รูปที่ 2.2** ความต่างของมุมเฟสที่สะท้อนกลับมาเมื่อกระทบวัตถุ [8] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวิธีนี้คือถ้านำไปวัดระยะทางที่น้อยกว่าหนึ่งฟุตแสงเลเซอร์จะใช้เวลาการเดินทางและสะท้อนกลับประมาณ 1 นาโนวินาทีที่จะไม่สามารถตรวจวัดได้ทันวิธีแก้ไข คือ นำแสงเลเซอร์มาทำการมอดูเลตเชิงขนาด (Amplitude Modulation: AM) [8] แล้วจึงส่งออกไปเมื่อสัญญาณไปกระทบวัตถุและสะท้อนกลับมาก็จะมีเฟสต่างกับคลื่นที่ส่งออกไปปริมาณความต่างเฟสจะเป็นสัดส่วนกับระยะทางของวัตถุ นอกจากนี้ยังสามารถวัดระยะทางที่ 1 เซนติเมตรได้อีกด้วย ดังนั้นวิธีนี้สามารถนำไปวัดระยะทางในระบบการมองเห็นของหุ่นยนต์ได้

2.1.2 หลักการของรูปสามเหลี่ยม (Triangulation)

เราอาจจะคุ้นเคยกับแนวความคิดของการนำหลักการของรูปสามเหลี่ยมมาวัดระยะทาง สมมุติว่ามีเครื่องมืออยู่สองตัวซึ่งวางห่างกันเป็นระยะทางที่แน่นอน (d) อุปกรณ์ A และ B จะเก็บตำแหน่งบนวัตถุที่ตำแหน่งเดียวกันดังภาพที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การวัดระยะทางโดยหลักการของรูปสามเหลี่ยม

จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ทั้งสอง (A, B) และวัตถุวางในลักษณะรูปสามเหลี่ยมมีด้านหนึ่งด้านและมุมสองมุมที่เราทราบอยู่ก่อนแล้วคือด้าน d กำหนดให้มุมที่เกิดขึ้นระหว่าง d และ r_1 คือมุม θ_1 ส่วนมุมที่เกิดขึ้นระหว่าง d และ r_2 คือมุม θ_2 ส่วนมุมที่สามสามารถหาได้โดยใช้มุมสองมุมที่เราทราบค่าลบออกจาก 180 องศา ซึ่งระยะทางระหว่างอุปกรณ์แต่ละตัวไปยังวัตถุสามารถหาได้โดย

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดระยะทางโดยใช้หลักการรูปสามเหลี่ยมจะเป็นพื้นฐานในการวัดระยะทางแบบต่างๆ โดยหลักการรูปสามเหลี่ยมจะแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ซึ่งวิธีแรกเรียกว่าแบบแอคทีฟ (Active) จะใช้เครื่องมือเก็บภาพ 1 ตัว ร่วมกับการใช้เครื่องกำเนิดแสงอีก 1 ตัว อีกวิธีหนึ่งเรียกว่าแบบพาสซีฟ (Passive) จะใช้เครื่องมือเก็บภาพ 2 ตัว เช่น กล้องวิดีโอเป็นต้น

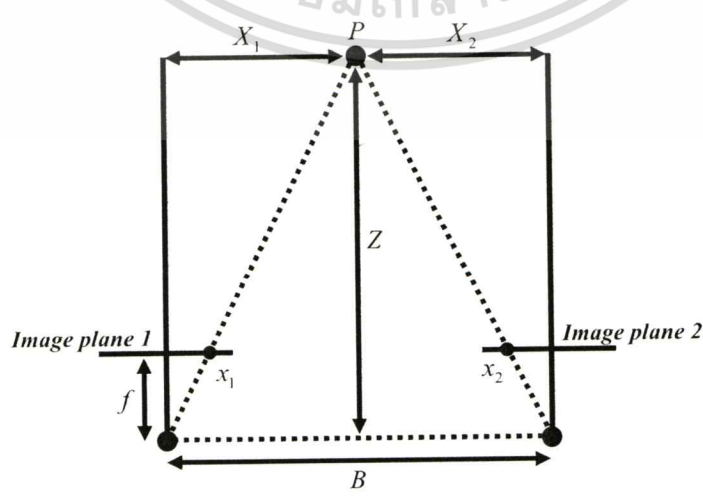
2.1.3 หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟ (Passive Triangulation)

วิธีนี้บางครั้งถูกเรียกว่าสเตอริโอวิชัน (Stereo vision) อธิบายได้เหมือนกับการใช้ตาทั้งสองของมนุษย์ในการวัดระยะทาง ในวิธีนี้ใช้กล้องวิดีโอเป็นเครื่องมือที่ใช้เก็บภาพโดยใช้กล้องวิดีโอทั้งสองตัววางห่างกันในระยะทางที่แน่นอนดังภาพที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หลักการของระบบสเตอริโอวิชัน (Stereo vision)

หลักการของสเตอริโอวิชันหรือรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟเป็นการหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ โดยอาศัยความแตกต่าง (Disparity) ของจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพของกล้องทั้งสอง ซึ่งในการคำนวณหาระยะทางโดยวิธีนี้สามารถอธิบายได้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การวัดระยะทางในระบบสเตอริโอวิชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การบังคับใช้ของกฎหมายว่าด้วยการคุ้มครองสิทธิในข้อมูลข่าวสาร ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 นั้นสามารถนำมาเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกล้องทั้งสองได้ โดยกำหนดให้ P เป็นจุดของวัตถุในระบบพิกัดกล้อง โดย X_1 และ X_2 เป็นขนาดของวัตถุเมื่อเปรียบเทียบกับแนวแกน Z ของระบบพิกัดกล้องและ x_1, x_2 เป็นขนาดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพดังนี้

กล้องตัวที่ 1

$$\frac{x_1}{f} = \frac{X_1}{Z} \tag{2.4}$$

กล้องตัวที่ 2

$$\frac{x_2}{f} = \frac{X_2}{Z} \tag{2.5}$$

และ

$$X_2 = X_1 + B \tag{2.6}$$

นำสมการที่ 2.6 แทนลงในสมการที่ 2.5 เขียนใหม่ได้เป็น

$$B + X_1 = \frac{Z \cdot x_2}{f} \tag{2.7}$$

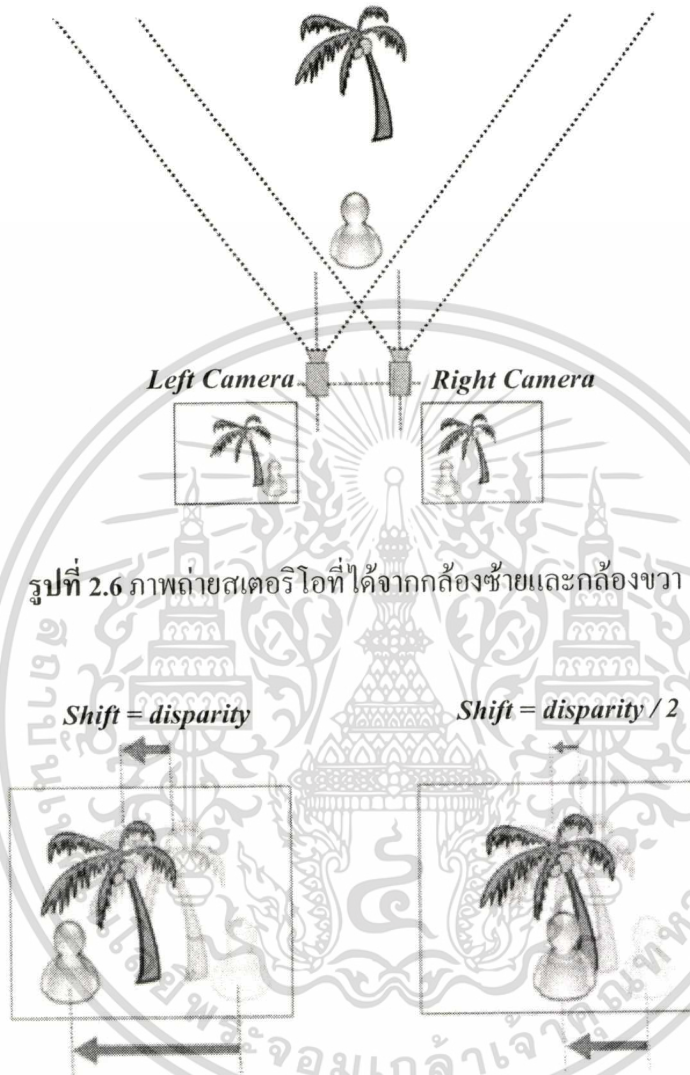
นำสมการที่ 2.7 ลบสมการที่ 2.4 ดังนั้นระยะทาง Z จะหาได้ดังสมการที่ 2.8

$$Z = \frac{B \cdot f}{x_2 - x_1} \tag{2.8}$$

- โดยกำหนดให้
- Z คือ ระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ P
 - B คือ ระยะทางระหว่างกล้องทั้งสองตัว
 - f คือ ความยาวโฟกัสของกล้องทั้งสองตัว
 - x_1, x_2 คือ ระยะจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพ

จุดของภาพทั้งสองคือ x_1 และ x_2 จะไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกันจะได้ระยะห่างระหว่างจุดเรียกว่าค่าความแตกต่าง โดยระยะทาง Z จากกล้องวิดีโอไปยังจุดบนวัตถุจะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าความแตกต่างระหว่าง x_1 และ x_2 เช่น ถ้าค่าความแตกต่างเข้าใกล้ศูนย์ระยะทาง Z จะมีค่าได้ไม่สิ้นสุดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

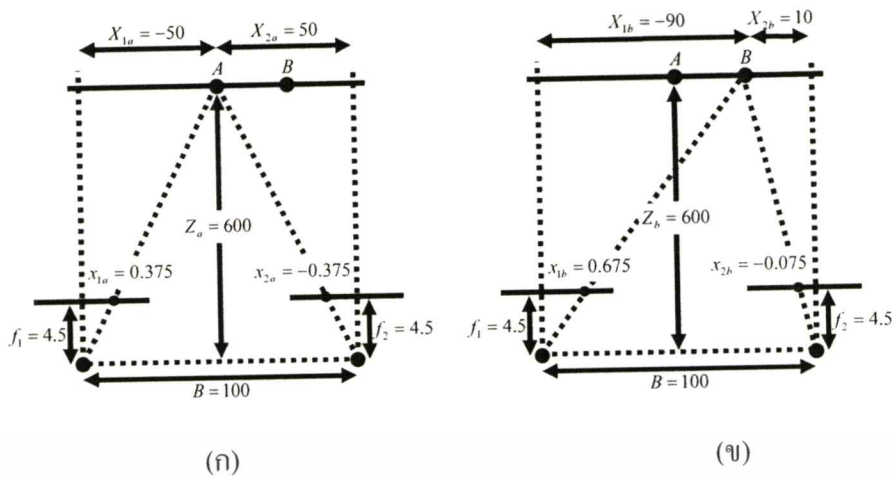
(Infinite) ซึ่งจะไม่เกิดระยะทางขึ้นระหว่างจุดภาพทั้งสองที่สอดคล้องกัน ในทางกลับกันถ้าระยะทาง Z ลดลงค่าความแตกต่างก็จะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.7 ภาพความแตกต่างของกล้องทั้งสองเมื่อนำมารวมกัน

รูปที่ 2.6 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากกล้องซ้ายและขวา ถ้าเรานำภาพทั้งสองกล้องมาซ้อนกันดังรูปที่ 2.7 จะเห็นความแตกต่างของวัตถุที่อยู่ในภาพได้ รูปที่ 2.7 อาจจะเรียกได้ว่าเป็นภาพความแตกต่างหรือภาพสเตอริโอ (Stereo image) ซึ่งค่าความแตกต่างของตำแหน่งจุดภาพสามารถนำมาคำนวณหาระยะทางแบบสามมิติที่จะแสดงให้เห็นในตัวอย่างดังต่อไปนี้ การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุกำหนดให้กล้องทั้งสองมีความยาวโฟกัส (f) เท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร และมีระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสองตัว (B) เท่ากับ 100 มิลลิเมตร เซนเซอร์รับภาพ (CCD) มีขนาด 4.8×3.6 มิลลิเมตร และขนาดของภาพ คือ 384×244 พิกเซล (1 พิกเซล = 0.0125 มิลลิเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การคำนวณระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ (ก) ระยะทางที่จุด A (ข) ระยะทางที่จุด B

การคำนวณระยะทางที่จุด A ในภาพที่ 2.8 (ก) กำหนดให้ $x_{1a} = 30$ พิกเซล = 0.375 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางซ้าย และ $x_{2a} = 30$ พิกเซล = -0.375 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางขวาดังนั้น

$$\begin{aligned} Z_a &= \frac{B \cdot f_1}{x_{2a} - x_{1a}} \\ &= \frac{100 \cdot (-4.5)}{(-0.375 - 0.375)} \\ &= 600 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned} \tag{2.9}$$

การคำนวณระยะทางที่จุด B ในภาพที่ 2.8 (ข) กำหนดให้ $x_{1b} = 54$ พิกเซล = 0.675 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางซ้าย และ $x_{2b} = 6$ พิกเซล = -0.075 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องทางขวาดังนั้น

$$\begin{aligned} Z_b &= \frac{B \cdot f_1}{x_{2b} - x_{1b}} \\ &= \frac{100 \cdot (-4.5)}{(-0.075 - 0.675)} \\ &= 600 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned} \tag{2.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าในระบบสเตอริโอวิชชันนั้นความแม่นยำของการหาระยะทางของวัตถุจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดภาพที่ตรงกันหรือจุดที่สอดคล้องกันของภาพที่ได้จากระนาบของกล้องทั้งสองตัว และตำแหน่งของสองจุดภาพนี้จะต้องคำนวณให้ถูกต้องด้วย ซึ่งกลายเป็นปัญหาหลักที่เกิดขึ้นเสมอกับวิธีนี้ และปัญหาดังกล่าวนี้บางครั้งจะถูกเรียกว่า ปัญหาการหาจุดสอดคล้องกันของกล้องทั้งสองตัว (Correspondence Problem)

ในทางอุดมคติมันเป็นไปได้ในการหาจุดภาพจากกล้องตัวที่หนึ่งซึ่งสอดคล้องกับจุดภาพจากกล้องตัวที่สอง แต่ในความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถรับประกันได้ว่าสองจุดภาพซึ่งมีค่าระดับสีหรือระดับเกรย์ที่เหมือนกันจะเป็นจุดภาพบนวัตถุจุดเดียวกัน ในการหาจุดภาพจุดเดียวกันของภาพทั้งสองภาพจากกล้องทั้งสองไม่ยากนัก ถ้าหากภาพวัตถุที่เกิดขึ้นในภาพทั้งสองมีรูปร่างเหมือนกัน อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยสำหรับวิธีนี้ก็คือ ภาพวัตถุที่เกิดขึ้นในภาพทั้งสองมีลักษณะรูปร่างไม่เหมือนกัน ยิ่งไปกว่านั้นวัตถุในภาพแรกอาจจะคมชัดไม่ชัดเจนหรือไม่ปรากฏรูปร่างวัตถุขึ้นในภาพที่สอง ในการแก้ไขสามารถลดระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสองตัว เพื่อช่วยลดปัญหาการหาจุดสอดคล้องกันของกล้องทั้งสองตัว แต่ในการลดระยะห่างนี้จะเป็นผลทำให้ความแม่นยำของระบบลดลงตามไปด้วย

ปัญหาการหาจุดสอดคล้องกันของกล้องทั้งสองตัวที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขและทำให้ลดลงได้ด้วยการตัดอุปกรณ์ที่ใช้เก็บภาพออกไป 1 ตัว ซึ่งวิธีนี้จะไม่ถูกเรียกว่าวิธีสเตอริโอวิชชันอีกต่อไป อย่างไรก็ตามหลักการของรูปสามเหลี่ยมยังคงนำมาใช้กับวิธีนี้ได้ โดยการแทนกล้องตัวที่ตัดออกไปด้วยเครื่องหมายและเรียกวินี้ว่าหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป

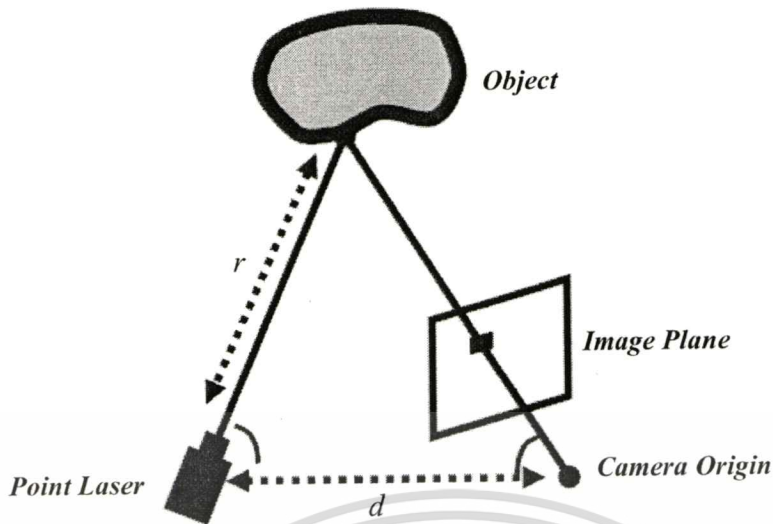
2.1.4 หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ (Active Triangulation)

หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟจะมีความแตกต่างกับวิธีแบบพาสซีฟ คือ การใช้อุปกรณ์กำเนิดแสงร่วมกับกล้องวิดีโอเพียง 1 ตัว โดยอุปกรณ์กำเนิดแสงที่นำมาใช้นั้นจะเป็นแบบจุดหรือแบบเส้นก็ได้ ซึ่งกล้องจะเก็บภาพของจุดหรือเส้นแสงที่ได้ และสามารถนำจุดภาพที่ถูกแสงกระทบหรือถูกฉายมาคำนวณหาระยะทางของวัตถุ

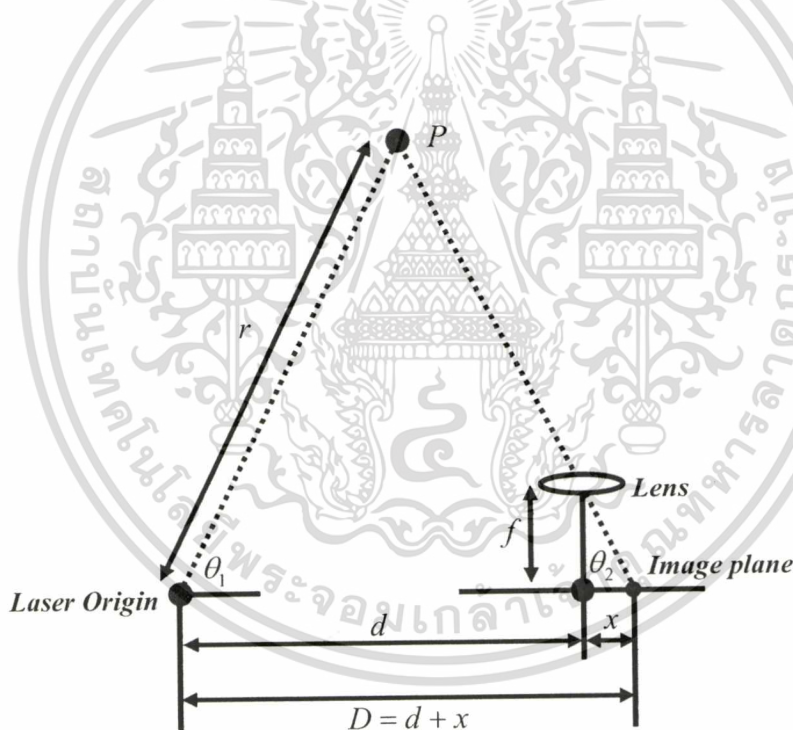
2.1.4.1 วิธีฉายแสงแบบจุด (Light Spot Triangulation)

สมมติว่าเราฉายลำแสงไปบนวัตถุดังรูปที่ 2.9 ลำแสงดังกล่าวจะสร้างจุดแสงบนวัตถุ และจะสะท้อนไปยังกล้องวิดีโอ โดยระยะห่างระหว่างกล้องวิดีโอกับเครื่องกำเนิดแสงเป็นระยะ d จะเห็นว่าการเกิดเป็นรูปสามเหลี่ยมขึ้นระหว่างเครื่องกำเนิดแสง วัตถุ และกล้องวิดีโอ ดังนั้นสามารถคำนวณหาระยะทาง r จากกล้องวิดีโอไปยังจุดบนวัตถุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบจุด



รูปที่ 2.10 การวิเคราะห์ระยะทางของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ

จุดแสงที่สะท้อนไปยังกล้องวิดีโอจะเกิดเป็นจุดภาพขึ้น จุดภาพนี้พบได้ง่ายซึ่งมันจะเป็นจุดที่มีความสว่างมากที่สุด ในการคำนวณหาระยะทาง r นั้นสามารถคำนวณหาได้จากมุม θ_1, θ_2 และระยะทาง d ซึ่งมุม θ_2 คำนวณได้จากความยาวโฟกัสของกล้องวิดีโอ (f) ซึ่งมีค่าคงที่กับระยะห่างจากศูนย์กลางเลนส์กล้องกับจุดภาพ (x) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.10 ดังนั้นมุม θ_2 สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

และระยะทางระหว่างเครื่องกำเนิดแสงและจุดภาพนั้นสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$D = d + x \tag{2.12}$$

- เมื่อ f คือ ความยาวโฟกัสของกล้องวิดีโอ
- x คือ ระยะห่างจากศูนย์กลางของเลนส์กล้องกับจุดภาพที่ได้
- d คือ ระยะห่างคงที่ระหว่างเครื่องกำเนิดแสงกับกล้องวิดีโอ

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

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

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

ในวิธีนี้เมื่อต้องการหาระยะทางที่จุดอื่นๆบนวัตถุจะต้องเลื่อนจุดแสงไปทั่วตลอดภาพ ซึ่งต้องใช้เวลานานมากส่วนเครื่องกำเนิดแสงที่นิยมใช้ ได้แก่ แสงอินฟราเรด และแสงเลเซอร์ โดยสามารถใช้ได้ดี และไม่จำเป็นต้องใช้เฉพาะที่มีดโดยห้องที่มีระดับแสงปกติก็ใช้ได้แต่ควรติดตั้งตัวกรองแสง (Filter) ไว้ที่ด้านหน้าของกล้องด้วยเพื่อลดปริมาณแสงบริเวณห้องนั้น แสงเลเซอร์เป็นแสงที่ดีที่สุดเพราะให้จุดแสงที่ชัดเจน มีขนาดเล็กมาก และการกระจายของแสงน้อยเป็นผลให้สามารถใช้ในระยะทางที่ไกลๆได้ดี

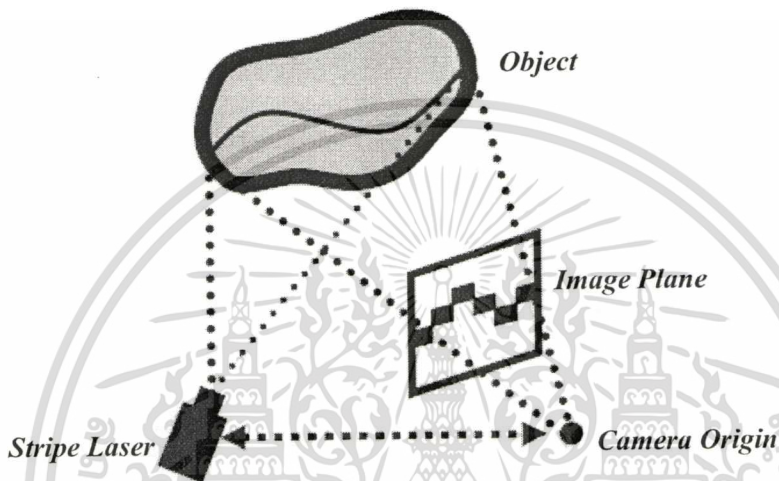
2.1.4.2 วิธีฉายแสงแบบลายเส้น (Light Stripe Triangulation)

หลักการฉายแสงแบบลายเส้นเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีฉายแสงแบบจุด โดยลายเส้นของแสงจะได้จากการฉายแสงผ่านร่องแสงหรือจากเครื่องกำเนิดแสงแบบจุดผ่านเลนส์ที่มีลักษณะกลม ซึ่งทำให้แสงที่ได้กลายเป็นเส้นแสง โดยทำการฉายแสงที่ได้นี้ไปยังวัตถุ และใช้กล้องเก็บลายเส้นที่เกิดขึ้นบนวัตถุดังรูปที่ 2.11 โดยลายเส้นจะถูกแบ่งออกเป็นจุดภาพย่อยๆ และระยะทางจะคำนวณที่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละจุดตามลายเส้น ส่วนวิธีการคำนวณหาระยะทางจะเหมือนกับวิธีการฉายแสงแบบจุดทุกประการรวมทั้งการวาง และติดตั้งอุปกรณ์ก็มีความเหมือนกัน

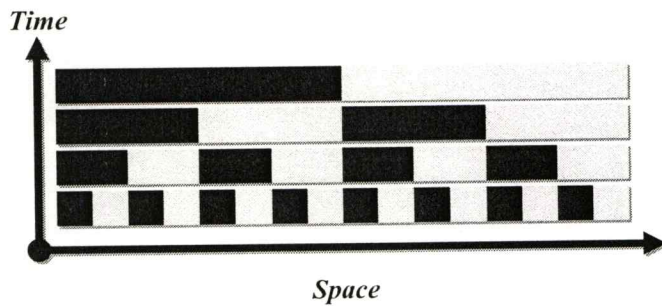
ข้อดีของวิธีการฉายแสงแบบลายเส้นเดียว คือ ง่าย และรวดเร็วกว่าวิธีการฉายแสงแบบจุด นอกจากนั้นขอบเขต และพื้นที่ของวัตถุสามารถหาได้โดยการต่อที่จุดปลายของแต่ละลายเส้นเข้าด้วยกัน ดังนั้นวิธีการใช้แสงแบบลายเส้นสามารถใช้ในการแบ่งย่านภาพวัตถุ (Image segmentation) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.11 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบเส้น

2.1.5 เทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสไบนารี (Binary code pattern)

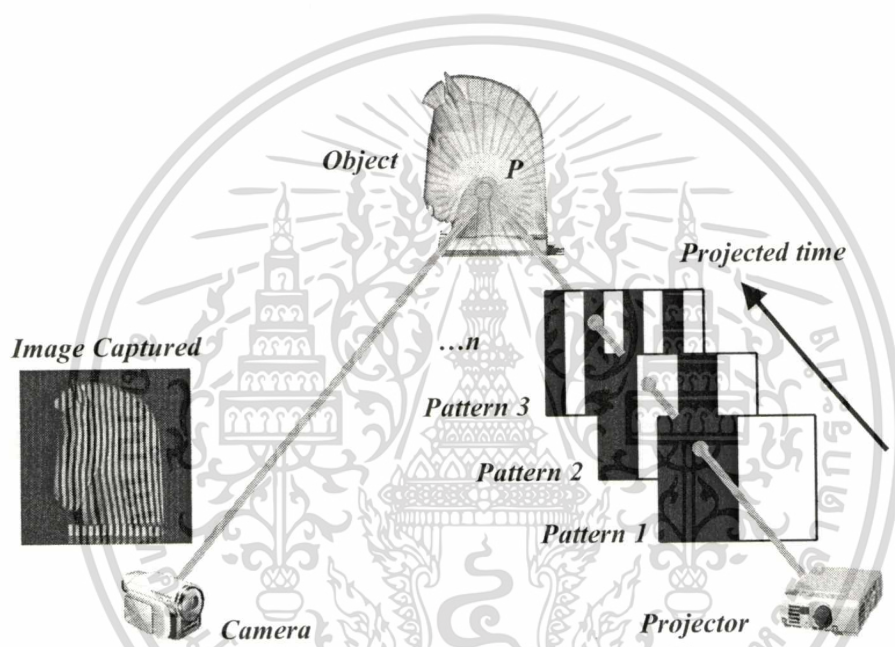
วิธีนี้จะใช้เครื่องกำเนิดแสงร่วมกับกล้องวิดีโอซึ่งส่วนมากนิยมใช้โปรเจกเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการฉายแสง โดยแสงที่ฉายไปยังวัตถุจะเป็นรหัสไบนารี (Binary code) [9] และใช้กล้องวิดีโอเก็บภาพแสงที่กระทบกับวัตถุ ซึ่งข้อมูลภาพที่ได้นี้จะข้อมูลของระยะทางบนตำแหน่งของวัตถุซึ่งจะถูกเข้ารหัสเป็นระดับความสว่าง และความมืดของแสง โดยจุดของภาพที่มีความสว่างจะเป็น “1” และจุดของภาพที่มีความสว่างน้อยหรือมืดจะเป็น “0” จึงจำเป็นต้องนำรหัสบนจุดภาพดังกล่าวไปถอดรหัส และคำนวณเพื่อทำการหาระยะทางจริงบนวัตถุ



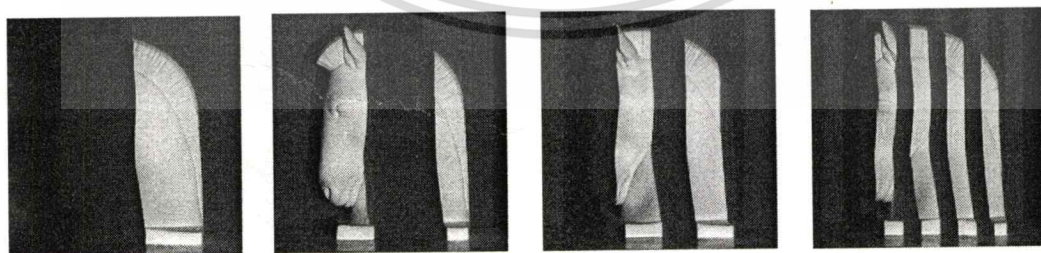
รูปที่ 2.12 นาครหัสไบนารี (Binary code pattern) [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.13 สมมติใช้ฉากจำนวน 3 ฉาก จุด P ซึ่งอยู่บนผิวของวัตถุจะถูกเข้ารหัสเป็นระดับมืดหรือ “0” โดยฉากที่ 1 บิตนี้ถูกกำหนดเป็นบิตที่อยู่ซ้ายมือสุดเป็นบิตที่มีค่าประจำหลักมากที่สุด (Most Significant Bit : MSB) เมื่อเปลี่ยนฉากเป็นฉากที่ 2 จะถูกเข้ารหัสใหม่เป็นระดับสว่างหรือ “1” และในฉากที่ 3 จะถูกเข้ารหัสใหม่เป็นระดับมืดหรือ “0” ซึ่งในบิตนี้ถูกกำหนดเป็นบิตที่อยู่ขวามือสุด ซึ่งเป็นบิตที่มีค่าประจำหลักน้อยที่สุด (Least Significant Bit : LSB) เมื่อนำข้อมูลในแต่ละฉากที่ได้มานุกรมกันดังนั้นจุด P จะถูกเข้ารหัสเป็น “101” ดังนั้นถ้าหากใช้ฉากจำนวน n ฉากก็จะสามารถรหัสได้เป็น 2^n ถ้าสมมติว่าใช้ฉากจำนวน 7 ฉากก็จะเข้ารหัสให้มีความละเอียดได้เป็น 2^7 หรือ 128 รหัส



รูปที่ 2.13 เทคนิคการฉายแสงผ่านรหัสไบนารี (Binary code pattern)



รูปที่ 2.14 ภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารี

การเปลี่ยนภาพรหัสไบนารีไปเป็นข้อมูลระยะทางนั้นจะนำภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารีไปเปรียบเทียบกับภาพวัตถุที่ระดับแสงปกติ โดยเปรียบเทียบทีละจุดภาพแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าเบี่ยงเบน (Deviation) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองเพื่อเป็นการแยกภาพที่ได้จากการคำนวณว่ากรณีใดทั้งสี่ อันที่ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

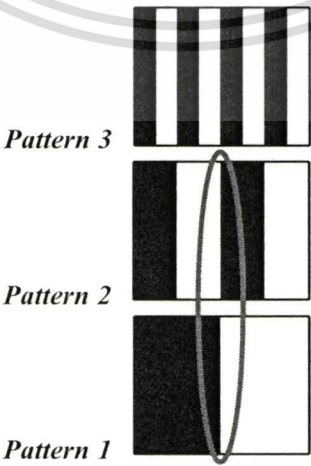
การฉายแสงผ่านฉากรูปนารี่ให้ได้เป็นภาพ 2 ระดับ (Binary Image) จากนั้นนำข้อมูลแต่ละจุดของภาพมาอนุกรมกันจะได้ข้อมูลไบนารี่ขนาด 7 บิต ซึ่งก็คือข้อมูลระยะทางของแต่ละจุดบนภาพนั่นเอง จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 127 ถ้าหากใช้จำนวนฉากเท่ากับ 7 ฉาก โดยระยะทางจริง (d) จะได้จากการแปลงข้อมูลไบนารี่เป็นตัวเลขฐานสิบซึ่งสามารถแปลงได้โดย

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

เมื่อ n เป็นจำนวนฉาก และ B เป็นตำแหน่งแต่ละจุดของภาพไบนารี่ของภาพทั้งหมด 7 ภาพ ($n = 7$) ซึ่งจะต้องทำการแปลงทุกจุดของภาพตัวอย่างเช่น ที่จุดภาพ B ที่ตำแหน่ง $x = 120, y = 80$ ภาพแรกที่เป็นบิตที่อยู่ขวามือสุดมีค่า $B_{(0)} = 1$, ภาพที่สอง $B_{(1)} = 0$, ภาพที่สาม $B_{(2)} = 1$, ภาพที่สี่ $B_{(3)} = 0$, ภาพที่ห้า $B_{(4)} = 1$, ภาพที่หก $B_{(5)} = 1$ ส่วนภาพที่เจ็ดซึ่งจะเป็นบิตที่อยู่ซ้ายมือสุด และมีค่า $B_{(6)} = 0$ เมื่อนำมารวมกันได้ $B_{(120,80)} = (0110101)_B$ แปลงเป็นระยะทางได้โดย

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

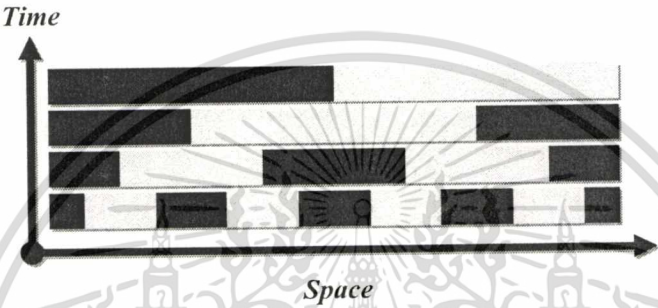
การฉายแสงผ่านรหัสไบนารี่ (Binary code pattern) นั้นจะเกิดปัญหาคือความเหลื่อมล้ำของแสงระหว่างร่องแสงข้างเคียงที่อยู่ติดกัน ซึ่งเป็นผลให้ระยะทางบางตำแหน่งที่ได้ผิดไปมาก เช่น ถ้าหากในฉากที่ 1 มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น การเข้ารหัสอาจผิดพลาดจาก “011” หรือ 3 ไปเป็น “111” หรือ 7 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดไปถึง 4 ตำแหน่งและอาจเกิดขึ้นได้ในทุกๆฉาก



เอกสารรูปที่ 2.15 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสไบนารี่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 เทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสเกรย์ (Gray code pattern)

เนื่องจากเทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสไบนารีจะมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นที่บางตำแหน่งบนวัตถุ โดยเฉพาะบริเวณร่องแสงที่ติดกัน เพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าวจึงเปลี่ยนการเข้ารหัสระยะจากการใช้รหัสไบนารีด้วยการใช้รหัสเกรย์ [9][10][11] เนื่องจากทั้งรหัสไบนารี และรหัสเกรย์ต่างก็เป็นเลขฐานสองจึงสามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้ลักษณะการฉายแสง และการวางตำแหน่งของอุปกรณ์สามารถใช้วิธีการเดียวกับการใช้รหัสไบนารีเพียงแต่รหัสเกรย์มีขั้นตอนในการแปลงข้อมูลที่ซับซ้อนกว่าส่วนในการคำนวณหาระยะทางจะเหมือนกันทุกประการ



รูปที่ 2.16 ฉากรหัสเกรย์ (Gray code pattern) [9]

การเปลี่ยนภาพรหัสเกรย์เป็นข้อมูลระยะทางจะเหมือนกับการเปลี่ยนของภาพรหัสไบนารี ซึ่งจะนำจุดภาพที่ตำแหน่งเดียวกันของทุกภาพที่ได้จากการฉายภาพรหัสเกรย์ มาทำการอนุกรมกัน จะได้เป็นข้อมูลรหัสเกรย์แล้วเปลี่ยนเป็นข้อมูลรหัสไบนารี โดยบิตที่เป็นบิตที่อยู่ซ้ายมือสุด (MSB)

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

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

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

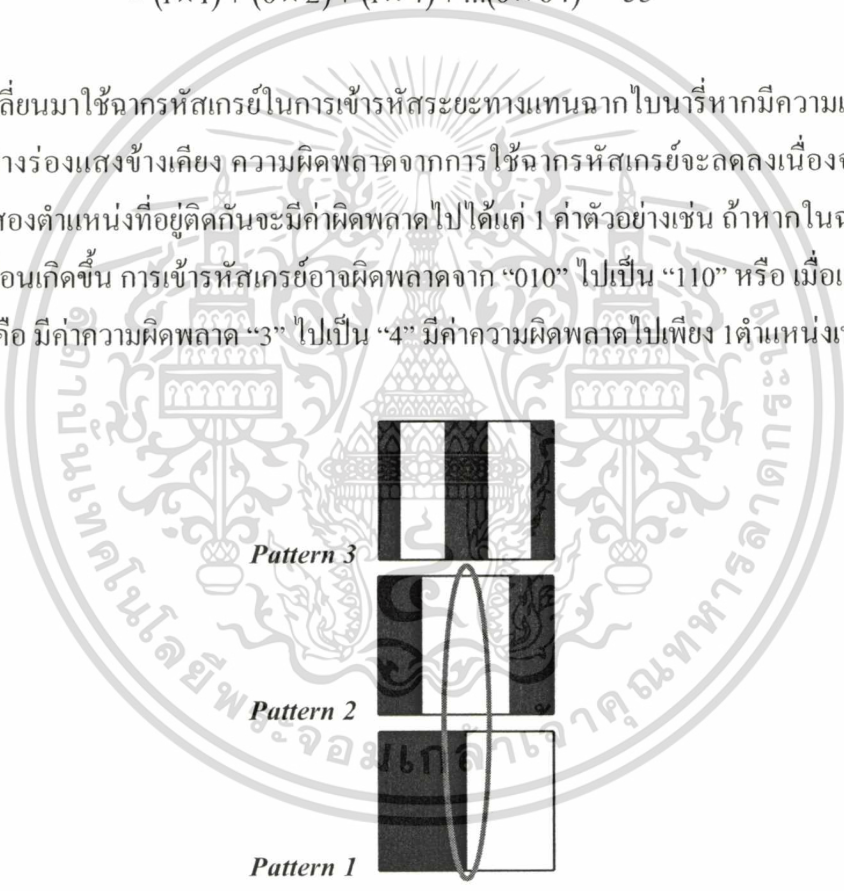
จากนั้นทำการเปลี่ยนข้อมูลรหัสไบนารีที่ได้ให้เป็นข้อมูลระยะทาง (d) อีกครั้งโดยที่

$$d = \sum_{i=0}^{n-1} (B_i \times 2^i) \tag{2.18}$$

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

$$\begin{aligned} d_{B(120.80)} &= (B_{(0)} \times 2^0) + (B_{(1)} \times 2^1) + (B_{(2)} \times 2^2) + \dots + (B_{(6)} \times 2^6) \\ &= (1 \times 1) + (0 \times 2) + (1 \times 4) + \dots + (0 \times 64) = 53 \end{aligned}$$

เมื่อเปลี่ยนมาใช้ฉากรหัสเกรย์ในการเข้ารหัสระยะทางแทนฉากไบนารีหากมีความเหลื่อมล้ำของแสงระหว่างร่องแสงข้างเคียง ความผิดพลาดจากการใช้ฉากรหัสเกรย์จะลดลงเนื่องจากความเหลื่อมล้ำของสองตำแหน่งที่อยู่ติดกันจะมีค่าผิดพลาดไปได้แค่ 1 ค่าตัวอย่างเช่น ถ้าหากในฉากที่ 1 มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น การเข้ารหัสเกรย์อาจผิดพลาดจาก “010” ไปเป็น “110” หรือ เมื่อแปลงเป็นระยะทางแล้ว คือ มีค่าความผิดพลาด “3” ไปเป็น “4” มีค่าความผิดพลาดไปเพียง 1 ตำแหน่งเท่านั้น



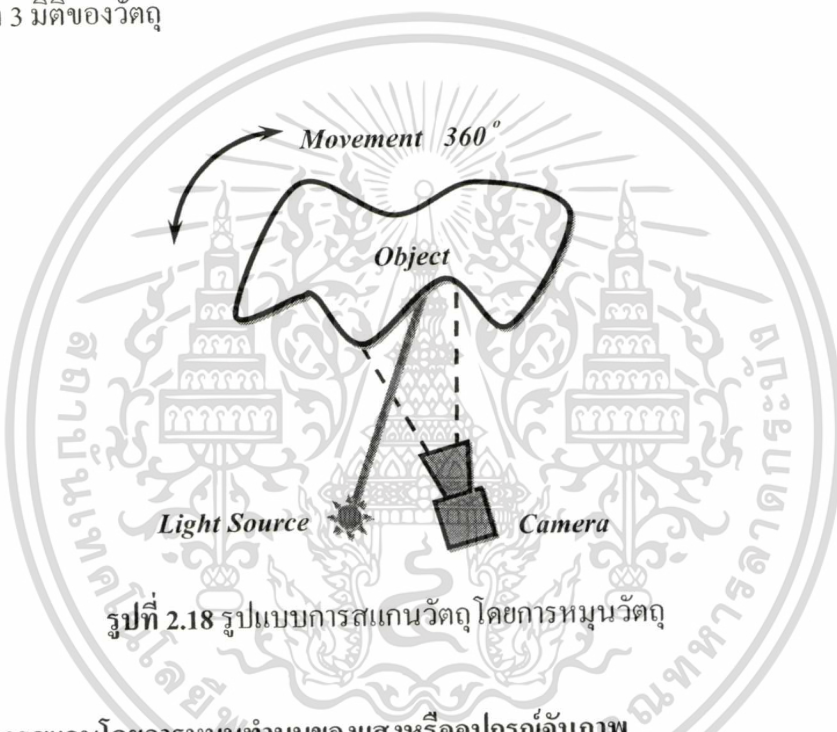
รูปที่ 2.17 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสเกรย์

2.2 รูปแบบการสแกนวัตถุ (Scanning Patterns)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
2.2.1 การสแกนโดยการหมุนวัตถุ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการสแกนโดยการหมุนวัตถุจะทำการวางวัตถุที่ต้องการเก็บข้อมูลระยะทางลงบนแท่นหมุน โดยทำการหมุนวัตถุเพื่อเก็บข้อมูลระยะทางของวัตถุทั้ง 360 องศา ลักษณะการสแกนโดยการหมุนวัตถุส่วนใหญ่จะใช้ร่วมกับหลักการเก็บข้อมูลระยะทางด้วยหลักการสามเหลี่ยมแบบแอททิพด้วยลำแสงแบบเส้น (Light Stripe Triangulation) เมื่อทำการฉายแสงลงไปบนวัตถุแล้วทำการเก็บข้อมูลโดยกล้องวีดีโอก็จะสามารถนำมาคำนวณหาข้อมูลระยะทางของวัตถุตัวอย่างได้ ถ้าทำการหมุนวัตถุเคลื่อนที่ไปเป็นมุมต่างๆก็จะทำให้ได้ข้อมูลระยะทางในมุมอื่นๆของวัตถุ หากทำการหมุนไปเรื่อยๆจนครบ 360 องศา ก็จะทำให้ได้ข้อมูลระยะทางของวัตถุครบทุกส่วนของวัตถุ ดังนั้นการสแกนด้วยการหมุนวัตถุนี้จะทำให้ได้ข้อมูลระยะทางของวัตถุครบทั้ง 360 องศา จึงนิยมใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุ

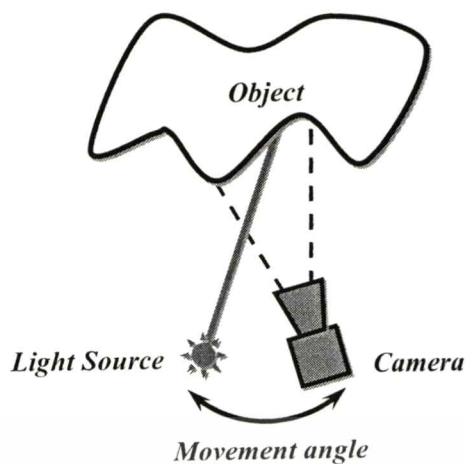


รูปที่ 2.18 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนวัตถุ

2.2.2 การสแกนโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ

การสแกนโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพจะกำหนดให้วัตถุที่ต้องการเก็บข้อมูลระยะทางวางอยู่กับที่ ส่วนที่เคลื่อนที่จะเป็นส่วนของแหล่งกำเนิดแสงเพียงอย่างเดียว ซึ่งในกรณีนี้จะใช้ร่วมกับหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปโดยการใช้แสง หรือส่วนเคลื่อนที่จะเป็นส่วนของแหล่งกำเนิดแสง และอุปกรณ์ตรวจจับภาพในกรณีนี้จะใช้ร่วมกับการเก็บข้อมูลระยะทางด้วยหลักการสามเหลี่ยมแบบแอททิพโดยการใช้แสงแบบจุด อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการควบคุมการหมุนหรือเปลี่ยนมุมของแสง คือ MEMS (Micro Electro Mechanical System) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยกระจกขนาดเล็ก และส่วนควบคุมการเอียงของกระจก การสแกนโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพจะนิยมใช้ในงานการสร้างแผนที่สามมิติ หรือการเก็บข้อมูลของวัตถุขนาดเล็กเพราะจะใช้เวลาในการสแกนมาก

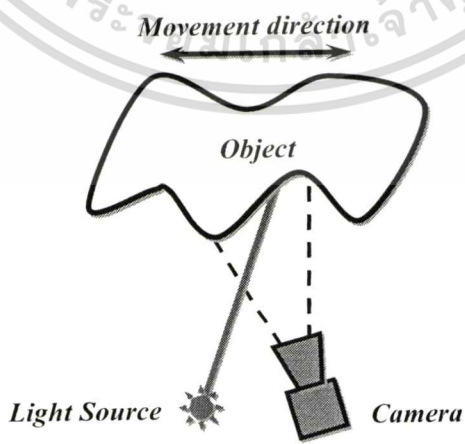
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ

2.2.3 การสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุ

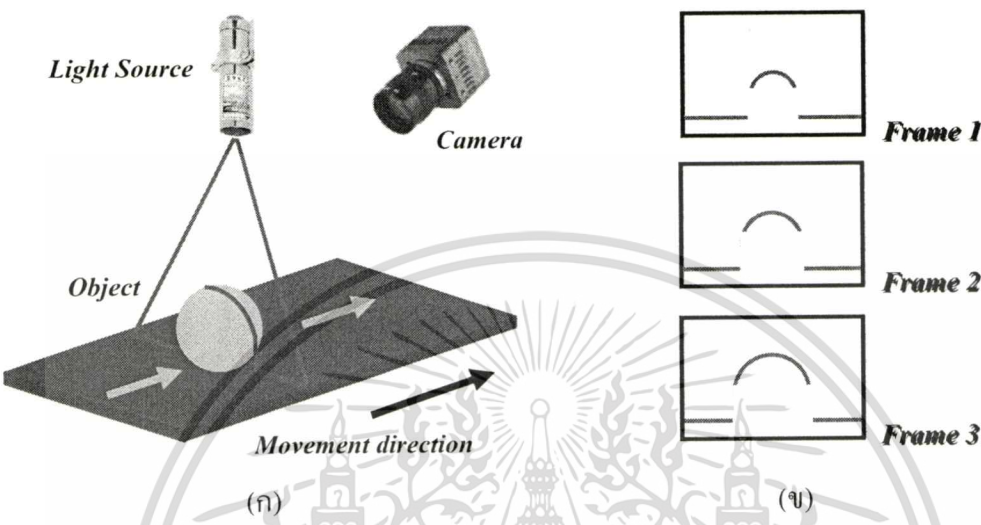
การสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือเรียกว่า การสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนของวัตถุ (Light-Sectioning) ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดรูปทรงแบบตัดขวางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายใน ขบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ [12][13] การสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนของวัตถุเป็นส่วนที่ นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งวิธีนี้เปรียบเสมือนจะเป็นการแบ่งวัตถุ 3 มิติออกเป็นส่วย่อยๆ(2 มิติ) ตามแนวความยาวของวัตถุ โดยการฉายแหล่งกำเนิดแสงลงบนพื้นผิววัตถุเพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตาม พื้นผิวของวัตถุที่แสงตกกระทบ ซึ่งส่วนมากแล้วแหล่งกำเนิดแสงจะใช้เส้นเลเซอร์สีแดงเนื่องจาก การนำมาวิเคราะห์ และประมวลผลทำได้ง่าย นอกจากนั้นยังช่วยลดขั้นตอนในการแบ่งส่วนวัตถุกับ ภาพพื้นหลัง



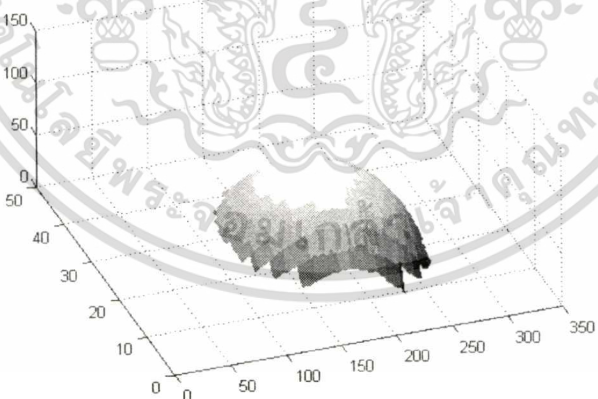
รูปที่ 2.20 การสแกนโดยใช้แสงแบ่งส่วนวัตถุ (Light-Sectioning)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อออกสื่อเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจากรายการได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งข้อมูลของภาพที่ได้มาจะเปรียบเสมือนเป็นข้อมูลความหนา และความกว้าง ในแต่ละจุดบนพื้นผิววัตถุ เมื่อทำการเคลื่อนที่วัตถุก็จะได้ข้อมูลในส่วนต่อไปของวัตถุในลักษณะ ของภาพตัดขวางของแต่ละส่วน และนำภาพตัดขวางแบบ 2 มิติแต่ละส่วนของวัตถุมารวมกันเพื่อสร้าง เป็นภาพตัดขวาง 3 มิติที่เป็นตัวบอกได้ถึงความกว้าง ความสูง และความยาวของวัตถุนั้นๆ



รูปที่ 2.21 (ก) การเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านเส้นแสง (ข) ภาพที่ได้ในเฟรมต่างๆเมื่อมีวัตถุตัดผ่าน



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างการนำภาพตัดขวางแต่ละส่วนมารวมเพื่อสร้างภาพตัดขวาง 3 มิติ

จากรูปที่ 2.21 (ข) แสดงภาพที่ได้จากกล้องในเฟรมต่างๆเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่านทำให้เส้นแสง เลเซอร์เปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามพื้นผิวของวัตถุ โดยรูปร่างของเส้นแสงที่ได้จะบอกถึงคุณลักษณะ ของวัตถุสามารถที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติ 2 มิติในเชิงระยะพิกัด หรือขนาดของวัตถุที่ จะบอกถึงความกว้าง และความสูง นอกจากนั้นเมื่อให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สอดคล้องกับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วในการเก็บภาพของกล้องแล้วทำการเก็บข้อมูลภาพอย่างต่อเนื่อง เมื่อนำข้อมูลภาพที่ได้ในแต่ละส่วนที่เป็น 2 มิติของวัตถุมาต่อกันจะทำให้เกิดคุณลักษณะของวัตถุใน 3 มิติ ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติที่เป็นขนาดของวัตถุทั้ง ความกว้าง ความยาว และความหนาของวัตถุ รวมทั้งพื้นที่โดยรวมของวัตถุซึ่งปกตินิยมใช้หลักการของรูปสามเหลี่ยมมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีข้อจำกัด คือ ถ้าการติดตั้งไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของหลักการรูปสามเหลี่ยม เช่น ระยะห่างระหว่างกล้องกับแหล่งกำเนิดแสง รวมทั้งการทำมุมของกล้องหรือแหล่งกำเนิดแสงมีการคลาดเคลื่อนจากการติดตั้ง นอกจากนั้นหลักการของรูปสามเหลี่ยมมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดของวัตถุไม่สามารถทำการขยายย่อในการตรวจวัด (Non Scale-Up)

2.3 สรุป

การใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนของวัตถุ (Laser Light-Sectioning) เป็นวิธีการที่แบ่งวัตถุสามมิติออกเป็นส่วนๆ ในลักษณะสองมิติจึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำมาใช้วัดขนาดวัตถุในงานวิจัยนี้ แต่จากข้อจำกัดของหลักการของรูปสามเหลี่ยมในการวิเคราะห์ถึงขนาดของวัตถุ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการแปลงแบบโฮโมกราฟฟีซึ่งเป็นการแปลงของภาพ 2 มิติจึงสามารถนำมาใช้ร่วมกับหลักการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนของวัตถุได้โดยตรง การแปลงแบบโฮโมกราฟฟีจะนำมาแปลงภาพของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จากการฉายไปยังวัตถุมาวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของวัตถุ ส่วนทฤษฎี และขั้นตอนจะกล่าวถึงในบทที่ 3 ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

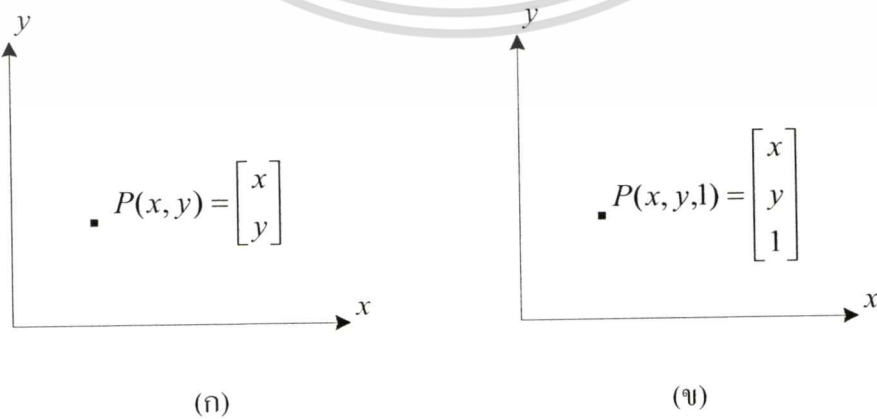
บทที่ 3

การแปลงเชิงเรขาคณิตและทฤษฎีของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม

ในบทนี้จะได้นำเสนอรายละเอียด และวิธีการเกี่ยวกับทฤษฎีทางด้านการประมวลผลภาพ สำหรับรายละเอียดที่นำเสนอในบทนี้ จะเริ่มต้นอธิบายถึงการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพ แบบจำลองของกล้องดิจิตอล และทฤษฎีของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม สุดท้ายจะอธิบายหลักการของการหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์จากจุดบนพิกัดภาพ และพิกัดจริง

3.1 การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric Transformation)

ในงานทางด้านการประมวลผลรูปภาพบางครั้งจำเป็นต้องมีการเคลื่อนย้ายภาพไปยังตำแหน่งใหม่ ย่อขยายภาพ หรือมีการหมุนภาพให้อยู่ในมุมมองที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric Transformation) การพิจารณาการแปลงนั้นเพื่อให้เข้าใจได้ง่าย จึงมักจะเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ สำหรับการแปลงเชิงเรขาคณิตโดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วย การแปลงหลายๆชนิดประกอบกัน และเนื่องจากเป็นการคำนวณในรูปแบบของเมทริกซ์จึงทำให้ยาก ในการคำนวณเมทริกซ์ที่แตกต่างกัน จึงได้มีการนำระบบพิกัดโฮโมจีเนียส (Homogeneous Coordinate) เข้ามาใช้เพื่อแก้ปัญหานี้ โดยทำการจัดรูปแบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate) จาก (x, y) เพื่อให้อยู่ในแบบของระบบพิกัดโฮโมจีเนียส คือ (xw, yw, w) โดย w เป็นค่าเฟกเตอร์ การสเกลที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ จุด (xw, yw, w) จะถูกนอร์มอลไลซ์ โดยทั่วไปเราสามารถเลือกค่า h เป็นจำนวนจริงบวกใดๆก็ได้แต่เพื่อความสะดวกในการหาผลลัพธ์ในทางคณิตศาสตร์มักจะกำหนดให้ค่าของ $w = 1$



รูปที่ 3.1 แสดงระบบพิกัด (ก) ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (ข) ระบบพิกัดโฮโมจีเนียส
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การเลื่อนภาพ (Translation)

การเลื่อนภาพเป็นการเลื่อนตำแหน่งของภาพตามระยะการจัดทางแนวแกน $x(Tx)$ และตามแนวแกน $y(Ty)$ เมื่อกำหนดให้พิกัดเดิม คือ (x, y) และพิกัดใหม่ คือ (x', y') จะได้สมการของการเลื่อนภาพดังนี้คือ

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

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

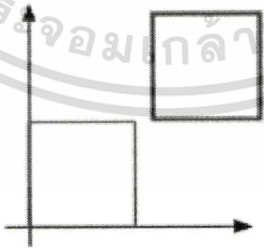
ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้มีลักษณะดังนี้ คือ $P' = P + T$ เมื่อ

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

ดังนั้นการเลื่อนภาพสามารถจัดอยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & Tx \\ 0 & 1 & Ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

การเลื่อนเป็นการแปลงที่มีประโยชน์มากในการประมวลผลภาพตัวอย่าง เช่น การเลื่อนพิกัดของภาพมายังจุดกำเนิด $(0,0,0)$



รูปที่ 3.2 การเลื่อนพิกัดของภาพ

3.1.2 การย่อขยายภาพ (Scaling)

การย่อขยายภาพสามารถทำได้โดยใช้สเกลแฟกเตอร์ (Scaling factor) ได้แก่ S_x และ S_y ซึ่งใช้สำหรับการย่อขยายภาพในทางแกน x และ y ตามลำดับ โดยถ้า $(0 < S_x, S_y < 1)$ แสดงว่าเป็นการย่อภาพ และ $(S_x, S_y > 1)$ แสดงว่าเป็นการขยายภาพเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสมการของการย่อขยายภาพจะมีลักษณะดังนี้

$$x' = x \cdot S_x \tag{3.4}$$

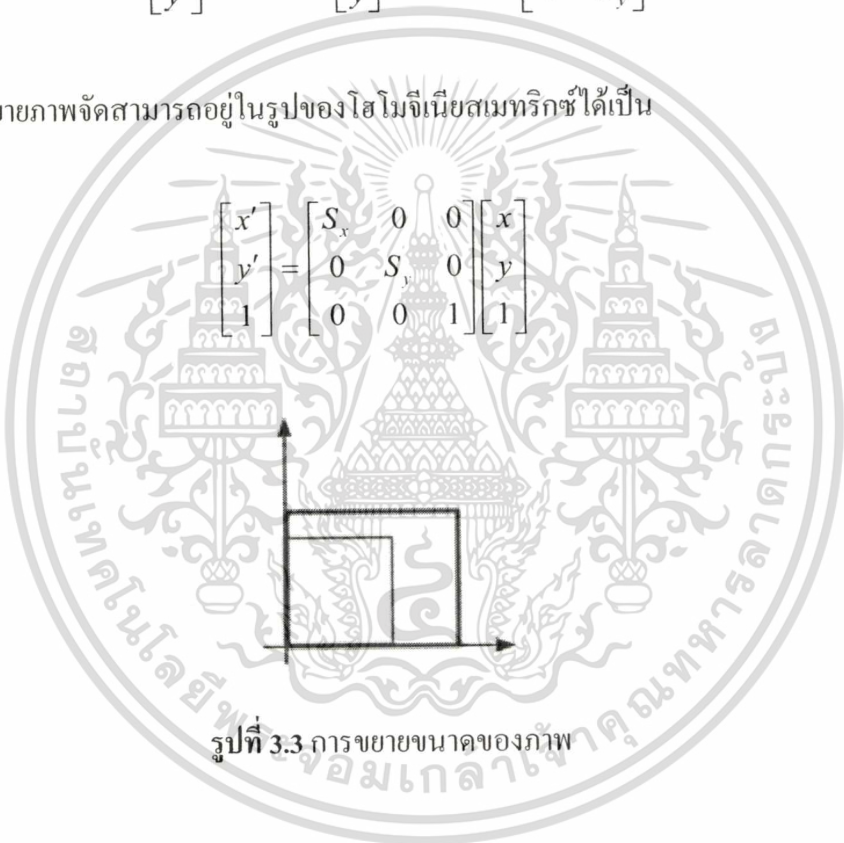
$$y' = y \cdot S_y \tag{3.5}$$

การย่อขยายภาพโดยใช้เมทริกซ์จะมีลักษณะดังนี้ คือ $P' = S \cdot P$ เมื่อ

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad S = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

ดังนั้นการย่อขยายภาพจึงสามารถอยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

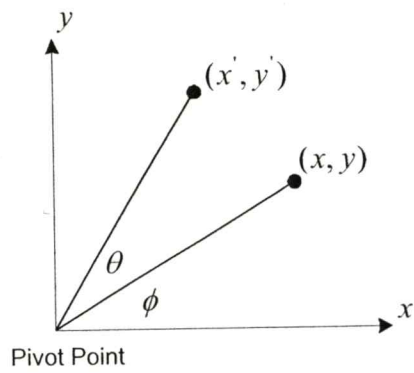


รูปที่ 3.3 การขยายขนาดของภาพ

3.1.3 การหมุนภาพ (Rotation)

การหมุนภาพเป็นการแปลงรูปแบบของภาพที่จะต้องกำหนดว่าจุดใดจุดหนึ่งเป็นจุดหมุน (Pivot point) เสมอ หลังจากหมุนภาพไปแล้วระยะห่างระหว่างจุดหมุนกับภาพจะยังคงมีค่าเท่าเดิม รูปร่าง และลักษณะของภาพก็ยังคงเดิมแต่ภาพจะมีการจัดวางที่ต่างไปจากเดิมเนื่องมาจากการหมุนนั่นเอง การหมุนภาพอาจจะหมุนทีละหลายๆภาพก็ได้จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา (ค่ามุมเป็นบวก) หรือ หมุนตามเข็มนาฬิกาก็ได้ (ค่ามุมเป็นลบ) และจุดหมุนที่ใช้อาจจะอยู่ภายในภาพหรือภายนอกภาพก็ได้

การอ้างถึงจุดพิกัด (x, y) นั้นนอกจากจะใช้ระบบพิกัดฉากแล้วอาจจะใช้ระบบพิกัดโพล่า (การบอกตำแหน่งจุดโดยใช้เวกเตอร์) ก็ได้ซึ่งทั้งสองระบบมีความสัมพันธ์กันดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ระบบพิกัดโพล่าและการบอกตำแหน่งจุดโดยใช้เวกเตอร์

จากรูปที่ 3.4 จะได้ว่า

$$x = r \cos(\phi) \tag{3.8}$$

$$y = r \sin(\phi) \tag{3.9}$$

และ

$$x' = r \cos(\phi + \theta) = r(\cos \phi \cos \theta - \sin \phi \sin \theta) \tag{3.10}$$

$$y' = r \sin(\phi + \theta) = r(\sin \phi \cos \theta + \cos \phi \sin \theta) \tag{3.11}$$

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (3.10) และ (3.11) จะได้สมการของการหมุนรอบจุดหมุนดังนี้ คือ

$$x' = x \cos(\theta) - y \sin \theta \tag{3.11}$$

$$y' = x \sin(\theta) + y \cos \theta \tag{3.12}$$

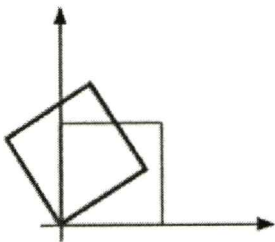
ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้มีลักษณะดังนี้ คือ $P' = R \cdot P$ เมื่อ

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

ดังนั้นการหมุนภาพสามารถจัดอยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การหมุนของภาพ

3.1.4 การบิดภาพ (Shearing)

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

$$x' = x \quad , \quad y' = y + x \cdot shY \tag{3.15}$$

การบิดภาพทางแกน y จะทำให้จุดต่างๆในแกน y เลื่อนขึ้นหรือลงขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของเฟกเตอร์ของการบิด และจากสมการการบิดภาพสามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & shY & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

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

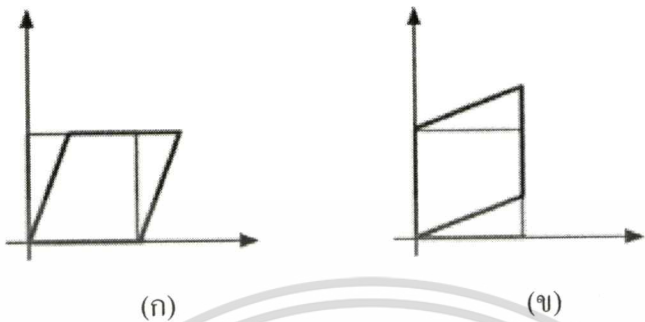
$$y' = y \quad , \quad x' = x + y \cdot shX \tag{3.17}$$

การบิดภาพทางแกน x จะทำให้จุดต่างๆในแกน x เลื่อนขึ้นหรือลงขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของเฟกเตอร์ของการบิด และจากสมการการบิดภาพสามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมทริกซ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ shX & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

(3.18)



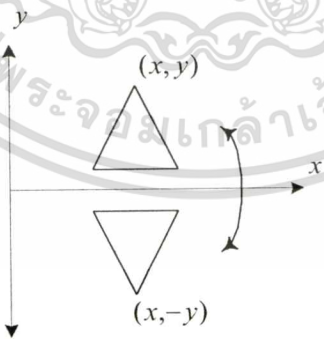
รูปที่ 3.6 การบิดของภาพ (ก) การบิดภาพทางแกน x (ข) การบิดภาพทางแกน y

3.1.5 การสะท้อนภาพ (Reflection)

การสะท้อนเป็นการแปลงที่จะสร้างภาพของวัตถุในลักษณะของกระจก โดยจะทำการหมุนภาพต้นแบบไป 180 องศารอบแกนการสะท้อน ซึ่งในที่นี้เราจะพิจารณาการสะท้อนอยู่ 3 แบบดังนี้

3.1.5.1 การสะท้อนตามแกน x

การสะท้อนกับแกน x สามารถทำได้โดยการคูณจุดทุกจุดบนภาพกับเมทริกซ์การแปลง สำหรับการสะท้อนกับแกน x จะทำให้จุด (x, y) กลายเป็นจุด (x', y') ดังนี้



รูปที่ 3.7 การสะท้อนตามแกน x

การสะท้อนกับแกน x สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$x' = x$$

(3.19)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ร่วมกันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.20) การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้ดังนี้

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

(3.21)

3.1.5.2 การสะท้อนตามแกน y

การสะท้อนกับแกน y สามารถทำได้โดยการคูณจุดทุกจุดบนภาพกับเมทริกซ์การแปลง สำหรับการสะท้อนกับแกน y จะทำให้จุด (x, y) กลายเป็นจุด (x', y') ดังนี้



รูปที่ 3.8 การสะท้อนตามแกน y

การสะท้อนกับแกน y สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$x' = -x$$

(3.22)

$$y' = y$$

(3.23)

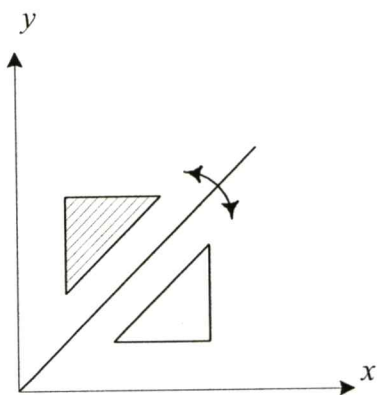
และสามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้ดังนี้

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

(3.24)

3.1.5.3 การสะท้อนรอบเส้นตรงใด ๆ

สำหรับการสะท้อนรอบแกนใดๆสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งแกน y = x หรือ y = -x ก็ได้ กรณีที่เป็นการสะท้อนรอบแกน y = x



รูปที่ 3.9 การสะท้อนรอบเส้นตรง $y = x$

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

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

(3.25)

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

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

(3.26)

จากการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบพื้นฐานได้กล่าวถึงไปแล้ว โดยทั่วไปการประมวลผลภาพในเรื่องการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพจะเป็นการแปลงหลายๆชนิดร่วมกัน หรือเรียกว่าการแปลงแบบผสม (Multiple Transformations) เช่น ในระบบ 3 มิติการหมุนในสองแกนก็สามารถหาเมทริกซ์การแปลงของการหมุนได้โดยการนำเมทริกซ์การแปลงของการหมุนรอบแกนในแต่ละแกนมาคูณกัน แต่มีข้อควรระวังว่าการคูณของเมทริกซ์นั้นจะไม่มีคุณสมบัติของการสลับที่ หากมีการสลับตำแหน่งของการคูณกันแล้วจะให้ผลลัพธ์ที่ไม่เท่ากัน

ส่วนในกรณีที่มีการหมุน และการเคลื่อนย้ายพิคตด้วยก็สามารถหาเมทริกซ์การแปลงได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้ กรณี 2 มิติโดยมีลำดับการแปลง คือ เคลื่อนย้ายจุดก่อนแล้วจึงหมุนตามลำดับจะได้เป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M = [T][R] \tag{3.27}$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & Tx \\ 0 & 1 & Ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

สำหรับการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบอื่นๆที่มีร่วมกันของการแปลงแบบต่างๆก็สามารถที่จะหาเมทริกซ์ของการแปลงได้ในทำนองเดียวกันนี้

3.2 การโปรเจกชัน (Projections)

โดยทั่วไปการโปรเจกชันเป็นการแปลงจาก N มิติไปเป็น N-1 มิติ เมื่อสมมุติให้มีวัตถุ 3 มิติที่ถูกฉาย (Projected) ลงบนระนาบของการโปรเจกชัน (Projection Plane) โดยมีผู้สังเกตลักษณะการโปรเจกชันของวัตถุ เพื่อให้สามารถมองลักษณะการโปรเจกชันได้จึงต้องกำหนดให้วัตถุและผู้สังเกตอยู่คนละข้างกันของระนาบการโปรเจกชัน



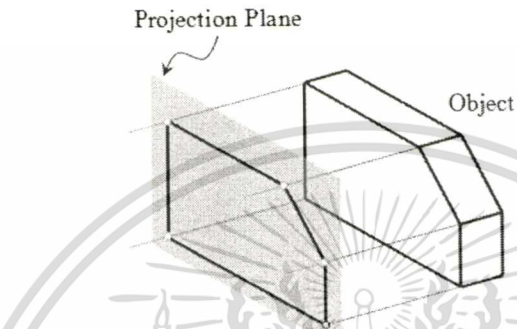
www.plus.maths.org

รูปที่ 3.10 หลักการของการโปรเจกชัน

การโปรเจกชันสามารถแบ่งได้เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Projections) และแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Projections) โดยในส่วนของ การโปรเจกชันแบบเชิงเส้นจะประกอบด้วย 2 ชนิด ใหญ่ๆ คือ การโปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections) และการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projections) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การโปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections)

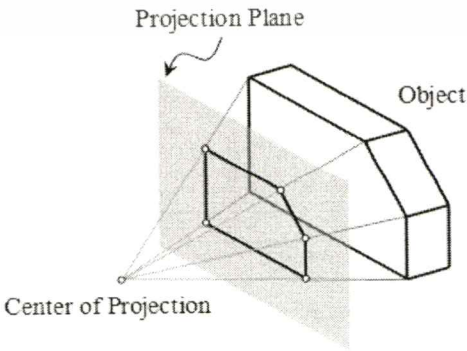
หลักการของการโปรเจกชันแบบขนาน คือ ฉายไปตามทิศทางที่กำหนดไว้ นั้นไปปรากฏเป็นจุดใหม่บนระนาบการโปรเจกชันซึ่งเป็น 2 มิติ โดยที่แสงและเงาของวัตถุที่ฉายจะพุ่งขนานกันไป กระทั่งกับระนาบของการโปรเจกชันและขนาดของรูปที่ได้จากการโปรเจกชันแบบนี้จะมีขนาดเท่ากับขนาดของวัตถุ ส่วนใหญ่การโปรเจกชันแบบขนานถูกใช้ในการวาดภาพทางวิศวกรรม



รูปที่ 3.11 การ โปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections)

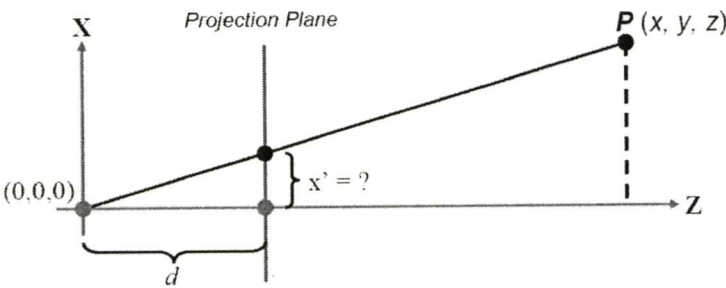
3.2.2 การโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projections)

การโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟเป็นการมองเห็นวัตถุในลักษณะเดียวกับโลกของความจริง เหมือนที่ตามนุษย์มองเห็น การ โปรเจกชันแบบนี้มีจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชัน (Center of Projection) อยู่ที่จุดๆหนึ่ง ซึ่งแนวเส้นแสงและเงาของวัตถุที่ถูกฉายจะพุ่งไปยังจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชัน ลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม คือ ผู้สังเกตจะเห็นวัตถุที่อยู่ไกลมีขนาดเล็กกว่าความเป็นจริง เนื่องจากขนาดวัตถุเปลี่ยนแปลงไปโดยมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับระยะห่างระหว่างวัตถุกับจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชัน



รูปที่ 3.12 การ โปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projections)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 คุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายจากการ โปรเจกชันแบบเพอสเปกทิฟ

รูปที่ 3.13 เป็นคุณสมบัติของรูปสามเหลี่ยมคล้ายจากการ โปรเจกชันแบบเพอสเปกทิฟที่ทำการฉายภาพจากจุด $P(x, y, z)$ ไปยังจุดบนระนาบของการ โปรเจกชัน โดยมีระยะห่างระหว่างระนาบของการ โปรเจกชันกับจุดศูนย์กลางของการ โปรเจกชันเป็นระยะ d และจากกฎของรูปสามเหลี่ยมจะได้ว่า

$$\frac{x'}{d} = \frac{x}{z} \tag{3.29}$$

$$\frac{y'}{d} = \frac{y}{z} \tag{3.30}$$

จากสมการที่ (3.29) และ (3.30) นำ d คูณตลอดจะได้เป็น

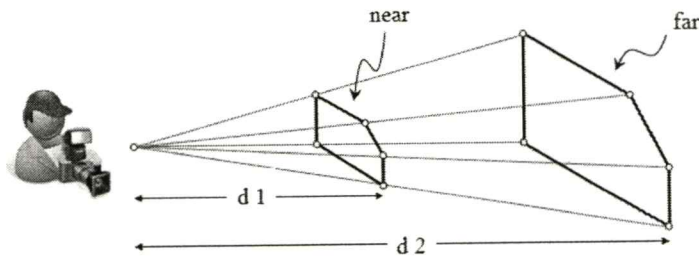
$$x' = \frac{d \cdot x}{z} \tag{3.31}$$

$$y' = \frac{d \cdot y}{z} \tag{3.32}$$

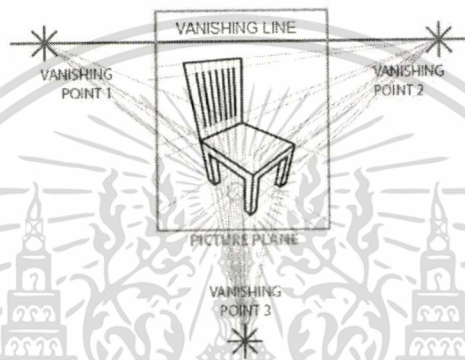
การ โปรเจกชันภาพจากจุด $P(x, y, z)$ ไปยังจุดบนระนาบของการ โปรเจกชัน $P'(x', y', z')$ ได้เป็น

$$P' = \left(\frac{d \cdot x}{z}, \frac{d \cdot y}{z}, d \right) \tag{3.33}$$

นอกจากความสัมพันธ์แบบผกผันของระยะห่างระหว่างวัตถุกับจุดศูนย์กลางของการ โปรเจกชันแล้วยังมีคุณสมบัติอีกอย่างของการ โปรเจกชันแบบเพอสเปกทิฟ คือ ทุกๆเส้นขนานจากวัตถุที่ขนานกับสายตาของผู้สังเกตจะถูกระบุหาจุดที่บรรจบกันของเส้นขนาน (Vanishing Point) และจากจุดที่บรรจบกันของเส้นขนานในแต่ละด้านทางแนวขวางของวัตถุ และเส้นที่ลากตัดผ่านจุดสองจุดนี้เรียกว่า เส้นของจุดบรรจบกันของเส้นขนาน (Vanishing Line) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ของระยะทางระหว่างผู้สังเกตกับวัตถุจากการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ



รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะของจุดที่บรรจบกันของเส้นขนานและเส้นของจุดบรรจบกันของเส้นขนาน

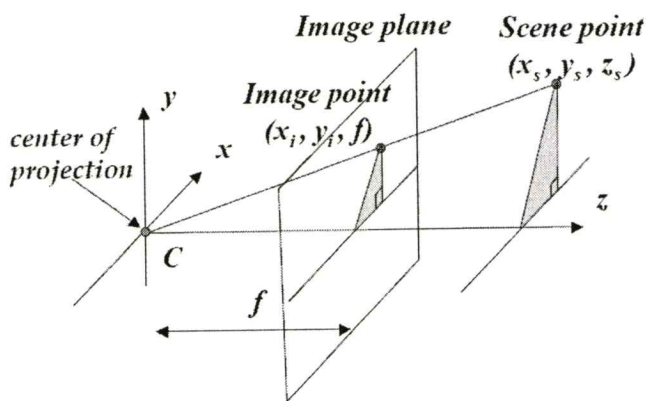
3.3 แบบจำลองของกล้อง

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงขบวนการเกิดภาพของกล้องและอธิบายถึงแบบจำลองกล้อง ซึ่งแบบจำลองกล้องดังกล่าวนี้มีพื้นฐานมาจากหลักการของกล้องรูเข็ม (Pinhole camera model)

3.3.1 การเกิดภาพของกล้อง

รูปภาพ 2 มิติส่วนใหญ่จะได้มาจากการมองวัตถุ 3 มิติผ่านเลนส์ของตาหรือเลนส์ของกล้อง ขบวนการเกิดภาพสามารถถูกจำลองได้เป็นการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 เป็นการแสดงแบบจำลองของระบบสร้างภาพ โดยแทนแกนระบบพิกัดโลก (World Coordinate System) ด้วยตัวอักษรตัวใหญ่ (X, Y, Z) และแทนแกนของระบบพิกัดของกล้องด้วยตัวอักษรตัวเล็ก (x, y, z) ซึ่งในกรณีนี้สมมุติให้พิกัดโลกซ้อนทับกับระบบพิกัดกล้อง แสงจากวัตถุที่เป็น 3 มิติส่องผ่านจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันแล้วฉายบนระนาบของภาพ (Image Plane) ที่เป็น 2 มิติ โดยให้จุด (x_s, y_s, z_s) แทนจุดบนพิกัดของวัตถุ 3 มิติ และให้ (x_i, y_i) แทนจุดของวัตถุที่ถูกฉายลงในระนาบของภาพ โดยระนาบของภาพจะอยู่ห่างไปทางขวาของจุดกำเนิดของพิกัดกล้องเป็นระยะเท่ากับความยาวโฟกัสที่เกิดจากผลของเลนส์กล้อง (f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แบบจำลองของระบบสร้างภาพของกล้อง

จากรูปที่ 3.16 โดยการใช้กฎของรูปสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ว่า

$$\frac{x_i}{f} = \frac{x_s}{z_s} \tag{3.34}$$

$$\frac{y_i}{f} = \frac{y_s}{z_s} \tag{3.35}$$

นำค่า f คูณในสมการที่ 3.34 และ 3.35 จะได้เป็น

$$x_i = \frac{fx_s}{z_s} \tag{3.36}$$

$$y_i = \frac{fy_s}{z_s} \tag{3.37}$$

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

$$v = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \tag{3.38}$$

ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยจุดพิกัดของวัตถุ โดยเวกเตอร์ในระบบพิกัดแบบโฮโมจีเนียส ($\tilde{v}$) ของ v คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

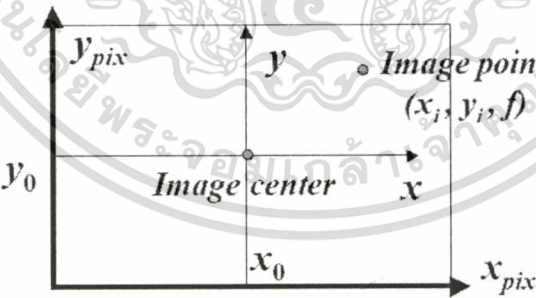
$$\tilde{v} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.39}$$

จากสมการ (3.36) และ (3.37) พิจารณาเป็นเมทริกซ์ของการแปลงแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Transformation) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดโลกกับระบบพิกัดกล้องได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/z_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f/z_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.40}$$

3.3.2 พารามิเตอร์ภายในของกล้อง (Internal Parameter)

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



รูปที่ 3.17 พิกัดบนระนาบของภาพ

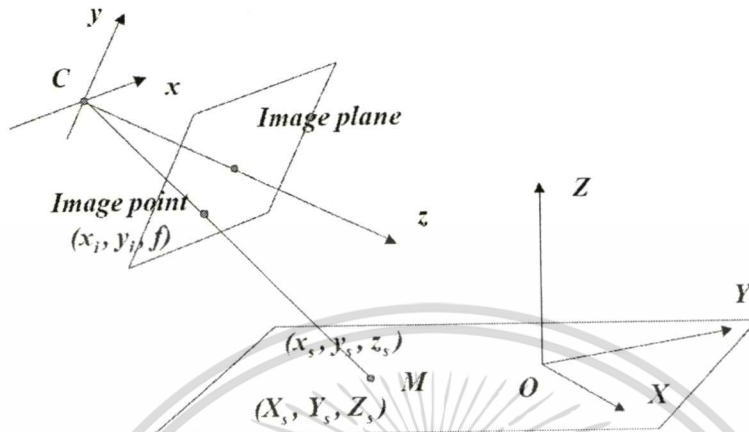
จะได้

$$x_{pix} = k_x x_i + x_0 \tag{3.41}$$

$$y_{pix} = k_y y_i + y_0 \tag{3.42}$$

จากสมการ (3.36) และ (3.37) จะได้การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพในระบบพิกัดโฮโมจีเนียส และ M_i คือ เมทริกซ์การโปรเจกชันของกล้องที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ภายในของกล้อง



รูปที่ 3.18 แบบจำลองการสร้างภาพกรณีพิกัดของโลกไม่ซ้อนทับพิกัดของกล้อง

ส่วนในกรณีที่ขบวนการเกิดภาพที่มีจุดกึ่งกลางของการโปรเจกชันของกล้องไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดกึ่งกลางของระบบพิกัดอ้างอิงของโลก กล่าวคือ ระบบพิกัดโลกสามารถเกิดมุมสาย (Pan) และเอียง (Tilt) รวมทั้งระยะห่างของระนาบกล้อง และระนาบพิกัดโลก ดังนั้นทำให้เกิดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการหมุน และการย้ายจุดอ้างอิง โดยพารามิเตอร์นี้จะเป็นพารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง (External Parameter หรือ Extrinsic Parameter) ที่ประกอบด้วยเมทริกซ์การหมุน และเวกเตอร์การย้ายที่อ้างอิงกับระบบพิกัดโลก คือ

$$M_e = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

ดังนั้นแบบจำลองการเกิดภาพสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$x = PX \quad (3.49)$$

โดย $P = M_i M_e$ คือ เมทริกซ์การแปลงแบบโปรเจกชันของกล้องที่รวมทั้งพารามิเตอร์ภายใน และภายนอกของกล้องซึ่งเมทริกซ์ M สามารถกระจายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = K[I_3 \mid O_3] \begin{bmatrix} R & -T \\ O_3^T & I \end{bmatrix} \tag{3.50}$$

นำสมการ (3.50) แทนในสมการ (3.49) จะได้ว่า

$$x = K[I_3 \mid O_3] \begin{bmatrix} R & -T \\ O_3^T & I \end{bmatrix} X \tag{3.51}$$

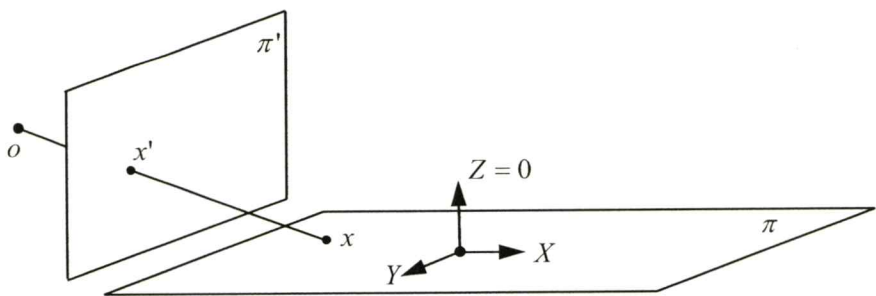
จัดให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์โฮโมจีเนียสได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.52}$$

ซึ่งเมทริกซ์ P เป็นเมทริกซ์การแปลงของกล้องมีขนาด 3×4 ที่รวมทั้งพารามิเตอร์ภายใน และพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นการแปลงภาพของวัตถุต่างๆจากระนาบ 3 มิติมายังระนาบของกล้องที่เป็นระนาบ 2 มิติ ดังนั้นหากเป็นการแปลงจากระนาบ 2 มิติมายังระนาบของกล้อง 2 มิติซึ่งก็คือ $Z = 0$ และจากเมทริกซ์การแปลงของกล้องมีขนาด 3×4 สามารถเขียนได้ใหม่เป็นเมทริกซ์การแปลงขนาด 3×3

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.53}$$

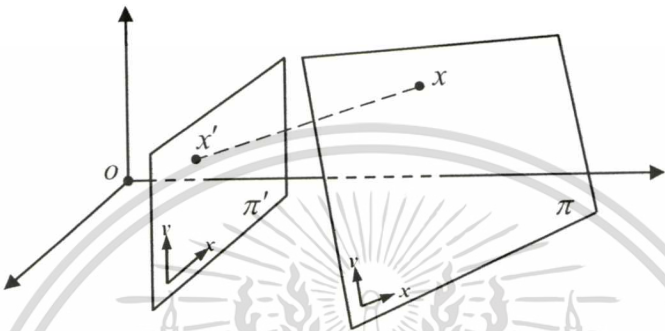
โดยจะกลายเป็นการแปลงแบบโปรเจกทีฟของระนาบ (Plane Projective Transformations) หรือเป็นการแปลงแบบโฮโมกราฟี (Homography Transformations)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.19 การแปลงแบบโปรเจกทีฟของระนาบ 2 มิติของกล้อง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 โฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม

โฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเป็นการแปลงในลักษณะการโปรเจกชันของจุดหรือเส้นที่อยู่บนระนาบ (π) ซึ่งเป็นระนาบ 2 มิติ โดยสามารถเรียกได้หลายชื่อเช่น Collineation, Projectivity และ Projective Transformation ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการแปลงระหว่างพิกัดจริงกับระนาบของภาพที่เป็นผลมาจากการรับภาพของกล้องที่เป็นลักษณะการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์และการโปรเจกชันของจุดที่อยู่บนระนาบ [15]

โดย Hartley และ Zisserman [15] ได้ให้คำนิยามของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มว่าเป็นการแปลงระนาบ π ที่เกิดในลักษณะของการโปรเจกชันนั่นเอง ดังนั้นถ้ามีเส้นตรงจากจุด x ที่อยู่บนระนาบ π ไปยังจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระนาบ π ไปเป็นระนาบ π' ดังนั้นจุด x บนระนาบ π จะถูกย้ายไปยัง x' บนระนาบ π' ซึ่งจุด x' จะมีตำแหน่งอยู่บนเส้นตรงที่ลากจาก x ไปยังจุดศูนย์กลางโปรเจกชัน จากความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของระนาบ $\pi \rightarrow \pi'$ ที่เป็นลักษณะการโปรเจกชันสามารถแทนได้ด้วยเมทริกซ์ 3×3 ที่เป็นเมทริกซ์ไม่เอกฐาน (non-singular matrix) และจุดใดๆบนระนาบ π แทนด้วยเวกเตอร์ x หากมีการเปลี่ยนแปลงระนาบ $\pi \rightarrow \pi'$ ดังนั้นตำแหน่งของจุด x นั้นจะถูกแปลงไปโดยมีค่าเท่ากับ

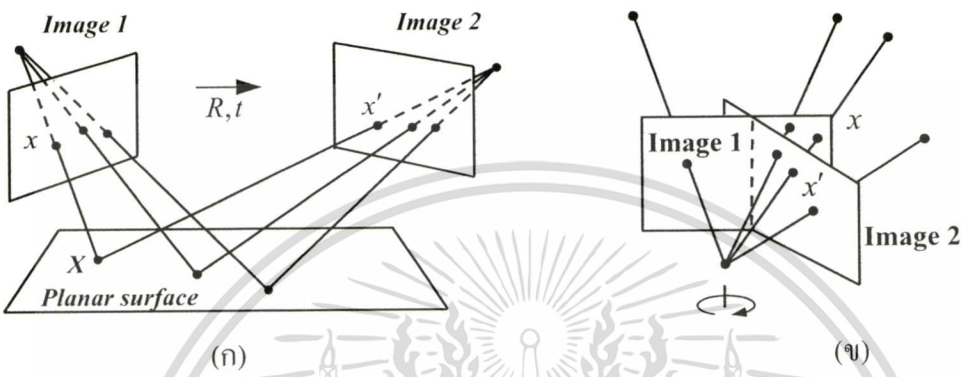
$$x' = Hx \tag{3.54}$$

เมื่อ x คือ จุดใดๆบนระนาบ 2 มิติ และ x' คือ จุด x ที่ถูกแปลงไปตามลักษณะการโปรเจกชัน และ H คือ เมทริกซ์การแปลงแบบโฮโมกราฟฟี (Homography Matrix) โดยสามารถแทนจุด x และ x' ให้อยู่ในลักษณะของโฮโมจีเนียสเวกเตอร์ และแทน H ด้วยเมทริกซ์ขนาด 3×3 ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} wx' \\ wy' \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.55}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษารองานนี้ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฮโมกราฟฟีเมทริกซ์สามารถเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆทั้ง 9 ตัว โดยทำการคูณกับเฟกเตอร์การสเกล (Scale Factor) ใดๆที่ไม่เท่ากับ 0 โดยจะไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการแปลงเชิงการโปรเจกชันของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ หรือสามารถที่จะสรุปได้ว่าโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์เป็นเมทริกซ์แบบโฮโมจีเนียสนั่นเอง และจะมีเพียง 8 ตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการแปลง (degree of freedom: dof) จากจำนวนตัวแปรทั้งหมด 9 ตัวในโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างลักษณะของการแปลงในเชิงการโปรเจกชันแบบต่างๆ [15]

3.4.1 ความสัมพันธ์ของโฮโมกราฟฟีกับการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบอื่นๆ

การเปรียบเทียบโฮโมกราฟฟีกับการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพแบบอื่นๆจะช่วยให้เข้าใจถึงโฮโมกราฟฟีมากยิ่งขึ้น ซึ่งในการแปลงของภาพส่วนใหญ่จะเป็นการแปลงที่รวมการแปลงเชิงเรขาคณิตพื้นฐานเข้าด้วยกัน เช่น การหมุน การสเกล การย้ายตำแหน่ง รวมทั้งการแปลงเชิงการฉายภาพเข้าด้วยกัน โดยสามารถแบ่งการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพต่างๆออกเป็นกลุ่มๆได้ดังนี้

3.4.1.1 การแปลงแบบยูคลิดียน (Euclidian Transformation)

การแปลงแบบยูคลิดียนเป็นการแปลงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดภาพ ซึ่งหมายความว่าระยะห่างระหว่าง 2 จุดบนภาพจะคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่จะมีการหมุนและการย้ายตำแหน่งของภาพไปจากเดิม โดยการแปลงแบบยูคลิดียนจะมีเพียง 3 dof ซึ่งการแปลงแบบยูคลิดียนสามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & tx \\ \sin\theta & \cos\theta & ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.56}$$

หรือเขียนสมการในรูปแบบง่ายได้เป็น
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x' = H_E x = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} x \tag{3.57}$$

- เมื่อ H_E คือ เมทริกซ์ของการแปลงยูซีเดียน
- R คือ เมทริกซ์การหมุน
- t คือ เวกเตอร์การย้ายตำแหน่ง
- 0^T คือ ค่าศูนย์ในแต่ละหลักของเมทริกซ์การแปลงแบบยูซีเดียน

3.4.1.2 การแปลงแบบซิมิลาริตี (Similarity Transformation)

การแปลงแบบซิมิลาริตีจะมีความคล้ายคลึงกับการแปลงแบบยูซีเดียนแต่จะเพิ่มในส่วนของการย่อขยายเข้ามา ทำให้การแปลงแบบซิมิลาริตีจะมีผลในการหมุน การย้ายตำแหน่ง และการย่อขยายเข้าด้วยกัน ในส่วนของการสเกลที่เพิ่มขึ้นมาทำให้มี 4 dof การเพิ่มการสเกลเข้ามาทำให้ระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดบนภาพมีการย่อขยายขึ้น และการสเกลในแกนต่างๆจะมีอัตราส่วนเท่ากันทั้งภาพ โดยเขียนให้อยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้เป็น

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

และสามารถเขียนสมการในรูปแบบง่ายได้เป็น

$$x' = H_s x = \begin{bmatrix} sR & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} x \tag{3.59}$$

เมื่อ s คือ ค่าของการสเกลที่เพิ่มขึ้นในพจน์ที่เหลือจะเหมือนกับการแปลงแบบยูซีเดียน

3.4.1.3 การแปลงแบบแอฟฟาย (Affine Transformation)

การแปลงแบบแอฟฟายมีความคล้ายคลึงกับการแปลงแบบซิมิลาริตี แต่แบบซิมิลาริตีจะมีการหมุนเพียงมุมเดียว และการย่อขยายจะเท่ากันทุกแกน ส่วนการแปลงแบบแอฟฟายจะมีมุมการหมุน 2 มุม และย่อขยายในแต่ละแกนจะไม่เท่ากัน ดังนั้นการแปลงแบบแอฟฟายจะมี 6 dof โดยจะเพิ่มมุมที่ใช้ระบุหรือกำหนดทิศทางของสเกล และอัตราส่วนของการสเกลในแต่ละแกน ซึ่งการแปลงแบบแอฟฟายมีผลทำให้มุมระหว่างเส้นตรงแต่ละแกนของภาพเปลี่ยนแปลงไป แต่เส้นเหล่านี้ยังคงขนานกันอยู่ และเส้นตรงนี้ขนานกันจะมีความยาวของเส้นเท่ากัน นอกจากนั้นพื้นที่ของภาพก่อนถูกเอ็กสแตนด์จะคงเดิมหลังจากการแปลงนี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงไป และหลังจากการถูกแปลงไปแล้วยังคงมีพื้นที่เท่ากัน การแปลงแอฟฟายสามารถจะเขียนให้อยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & tx \\ a_{21} & a_{22} & ty \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.60}$$

และสามารถเขียนสมการในรูปแบบง่ายได้เป็น

$$x' = H_A x = \begin{bmatrix} A & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} x \tag{3.61}$$

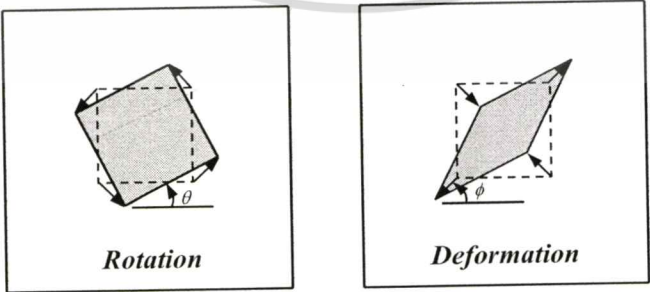
เมื่อ A คือ เมทริกซ์ขนาด 2×2 ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบออกได้เป็น

$$A = R_\theta R_{(-\phi)} D R_{(\phi)} \tag{3.62}$$

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

$$D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \tag{3.63}$$

โดย λ_1 เป็นการสเกลในทิศทางแกน x และ λ_2 เป็นการสเกลในทิศทางแกน y



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.22 การบิดเบือนของระนาบซึ่งเป็นผลของการแปลงแบบแอฟฟาย (ก) การหมุนของระนาบ โดย $R_{(\theta)}$ (ข) การผิดรูปไปของระนาบซึ่งเป็นผลจาก $R_{(-\phi)}DR_{(\phi)}$ [15]
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1.4 การแปลงแบบโฮโมกราฟฟี (Homography Transformation)

การแปลงแบบโฮโมกราฟฟีเป็นการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นของระบบพิกัดโฮโมจีเนียส การแปลงแบบโฮโมกราฟฟีจะมี 8 dof ซึ่งมากกว่าการแปลงแบบแอฟฟายที่จะมีเพียง 6 dof โดยการแปลงแบบโฮโมกราฟฟีจะมีส่วนประกอบอยู่ 9 ตัวที่เป็นอัตราส่วนกัน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการใช้งาน และสามารถเขียนในรูปแบบโฮโมจีเนียสเมทริกซ์ได้ดังในสมการที่ 3.54 หรือเขียนใหม่ในรูปแบบง่ายได้เป็น

$$x' = Hx = \begin{pmatrix} A & t \\ V^T & v \end{pmatrix} x \tag{3.64}$$

เมื่อ $V = (V_1 \ V_2)^T$ และ v เป็นค่าสเกลเฟกเตอร์ใดๆที่ไม่กับศูนย์ ซึ่งจะตัวที่เป็นอัตราส่วนกับองค์ประกอบอื่นๆที่เหลืออีก 8 ตัวภายในเมทริกซ์ของการแปลงแบบโฮโมกราฟฟี

ส่วนที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างการแปลงแบบโฮโมกราฟฟี และการแปลงแบบแอฟฟาย คือ เวกเตอร์ V ซึ่งจะเป็นค่าศูนย์ในการแปลงแอฟฟายโดยเวกเตอร์ V นี้จะเป็นส่วนที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากผลของการโปรเจกชัน ในการแปลงแบบอื่นๆที่ได้กล่าวมาอัตราส่วนของการสเกลจะเท่ากันในทุกๆจุดของภาพ แต่ในการแปลงแบบโฮโมกราฟฟีในแต่ละตำแหน่งของภาพอัตราส่วนของการสเกลจะไม่เท่ากัน การแปลงแบบโฮโมกราฟฟีสามารถแยกองค์ประกอบออกเป็นกลุ่มของการแปลงแบบต่างๆได้เป็น

$$H = H_A H_P = \begin{pmatrix} A & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I & 0 \\ v^T & v \end{pmatrix} \tag{3.65}$$

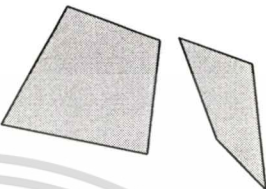
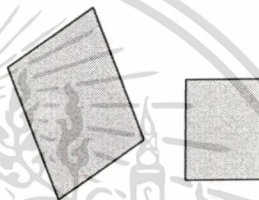
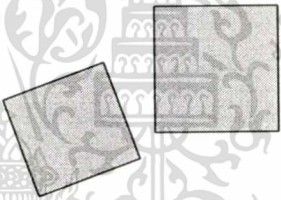
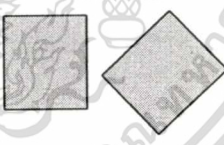
จากสมการที่ 3.62 เมื่อ $A = R_{(\theta)} \ R_{(-\phi)} \ D \ R_{(\phi)}$ ดังนั้นจะได้

$$\eta H = T \ R_\theta \ R_{-\phi} \ D \ R_\phi \ P \tag{3.66}$$

- โดย η คือ $Sign(h_{33}) / \sqrt{h_{31}^2 + h_{32}^2 + h_{33}^2}$
- T คือ เมทริกซ์การย้ายตำแหน่ง
- P คือ เมทริกซ์การโปรเจกตีฟ
- R_θ คือ เมทริกซ์ของการหมุน
- S คือ เมทริกซ์ของการสเกล
- $R_{\pm\phi}$ คือ เมทริกซ์ของการสเกลในแต่ละแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวชนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งรายละเอียด และขั้นตอนการแยกส่วนประกอบต่างๆของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [15][16] ซึ่งได้อธิบายถึงการแยกส่วนประกอบของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ โดยการใช้วิธีการแยกค่าเดียว

Group	Matrix	Distortion
Projective 8 dof	$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$	
Affine 6 dof	$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & t_x \\ a_{21} & a_{22} & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
Similarity 4 dof	$\begin{bmatrix} sr_{11} & sr_{12} & t_x \\ sr_{21} & sr_{22} & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
Euclidean 3 dof	$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	

รูปที่ 3.23 คุณสมบัติและลักษณะของการแปลงภาพแบบต่างๆ

3.4.2 การคำนวณและประมาณค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์

วิธีการหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ (Homography Matrix) ที่ใช้การแปลงระหว่างพิกัดจริงกับพิกัดภาพ ส่วนมากนิยมใช้ความสัมพันธ์ของจุดที่อยู่บนพิกัดจริงกับพิกัดรูปภาพที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน และเป็นจุดพิกัดที่ทราบค่าเป็นตัวช่วยในการประมาณหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ (H) ซึ่งจะเรียกหลักการของการนำความสัมพันธ์ระหว่าง 2 จุด คือ $P \leftrightarrow P'$ ที่อยู่บนระนาบพิกัดจริงกับระนาบพิกัดของภาพมาประมาณค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ว่า “DLT” (Direct Linear Transformation) [14][15] ดังนั้นจากสมการของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p' = Hp \tag{3.67}$$

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

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \tag{3.68}$$

และ

$$p' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} \tag{3.69}$$

และ H เป็นโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ซึ่งเป็นเมทริกซ์โฮโมจีเนียสขนาด 3×3 โดยโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์จะประกอบด้วยพารามิเตอร์อยู่ทั้งหมด 9 ตัวคือ

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \tag{3.70}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.67) จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \tag{3.71}$$

นำ H คูณกับ p จะได้สมการใหม่ 3 สมการ คือ

$$x' = h_{11}x + h_{12}y + h_{13}w \tag{3.72}$$

$$y' = h_{21}x + h_{22}y + h_{23}w \tag{3.73}$$

$$w' = h_{31}x + h_{32}y + h_{33}w \tag{3.74}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อต้องการทำให้อยู่ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (x, y) นำสมการที่ (3.74) หารสมการที่ (3.72) และสมการที่ (3.73) จะได้

$$\frac{x'}{w'} = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}w}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}w} \tag{3.75}$$

$$\frac{y'}{w'} = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}w}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}w} \tag{3.76}$$

เมื่อ w และ w' เป็นจุดสมมุติขึ้นในระบบพิกัดโฮโมจีเนียส และกำหนดให้ $w = w' = 1$ จัดรูปแบบสมการใหม่ได้เป็น

$$x' = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \tag{3.77}$$

$$y' = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \tag{3.78}$$

จัดสมการใหม่ให้เป็นสมการโฮโมจีเนียส (Homogeneous Equations)

$$h_{11}x + h_{12}y + h_{13} - h_{31}x x' + h_{32}y x' - h_{33}x' = 0 \tag{3.79}$$

$$h_{21}x + h_{22}y + h_{23} - h_{31}x y' + h_{32}y y' - h_{33}y' = 0 \tag{3.80}$$

จากสมการที่ (3.79) และสมการที่ (3.80) จัดให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้เป็น

$$Ah = 0 \tag{3.81}$$

โดยกำหนดให้ $A = [\quad]_{2 \times 9}$

$$A = \begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'x & -x'y & -x' \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -y'x & -y'y & -y' \end{bmatrix} \tag{3.82}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกำหนดให้ $h = [\quad]_{9 \times 1}$

$$h = (h_{11} \quad h_{12} \quad h_{13} \quad h_{21} \quad h_{22} \quad h_{23} \quad h_{31} \quad h_{32} \quad h_{33})^T \tag{3.83}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 3.81 จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'x & -x'y & -x' \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -y'x & -y'y & -y' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.84}$$

จากสมการที่ (3.84) จะเห็นว่าแต่ละจุด p และ p' ที่สัมพันธ์กันบนระนาบทั้งสองจะให้สมการ 2 สมการ เนื่องจากโฮโมกราฟฟิเมตริกซ์จะมี 8 dof และมีเฟกเตอร์การสเกล (h_{33} = non-zero scale factor) ซึ่งสามารถที่จะกำหนดให้เป็นค่าใดๆโดยส่วนมากเท่ากับ 1 ดังนั้นจากตัวแปร h_{ij} ที่ไม่ทราบค่าทั้งหมด 9 ตัวจะเหลือตัวแปรที่ไม่ทราบค่าอยู่ 8 ตัว ซึ่งในการแก้สมการต้องใช้จุดที่ทราบค่าเท่ากับ 4 จุดเพื่อให้ได้สมการทั้งหมด 8 สมการจึงสามารถแก้ปัญหาเพื่อหาค่าโฮโมกราฟฟิเมตริกซ์ ซึ่งในกรณีที่ใช้จุดที่ทราบค่ามากกว่า 4 จุดก็จะสามารถแก้ปัญหาค่าโฮโมกราฟฟิเมตริกซ์ได้เช่นกัน ดังนั้นในการแก้ปัญหเพื่อหาค่าของโฮโมกราฟฟิเมตริกซ์ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์อยู่ทั้งหมด 9 ตัว จำเป็นต้องใช้จุดบนทั้งสองระนาบที่สัมพันธ์กันอย่างน้อย 4 จุด หรือ $n \geq 4$ เพื่อใช้ในการคำนวณหาโฮโมกราฟฟิเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1x_1 & -x'_1y_1 & -x'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_nx_n & -x'_ny_n & -x'_n \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -y'_1x_1 & -y'_1y_1 & -y'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -y'_nx_n & -y'_ny_n & -y'_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.85}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์สามารถหาคำตอบออกมาได้ โดยใช้การแก้ปัญหาระบบสมการเชิงเส้นด้วยการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least-Squares) หรือใช้การแยกส่วนประกอบของเมทริกซ์โดยวิธีการแยกค่าเดี่ยว (Singular Value Decomposition: SVD) ของเมทริกซ์ A โดยค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ที่เป็นคำตอบของสมการจะได้จากหลักสุดท้ายของเมทริกซ์ V ที่ได้จากค่า $SVD(A) = UDV^T$ [14][15][17]

3.5 สรุป

การแปลงโฮโมกราฟฟีซึ่งเป็นการแปลงของระนาบ 2 มิติจะถูกนำมาใช้ในการแปลงพิกัดของภาพที่ได้จากกล้อง ซึ่งเป็นภาพวัตถุที่มีลักษณะคล้ายกับถูกแบ่งส่วนออกเป็น 2 มิติจากการใช้หลักการแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ เมื่อทำการแปลงพิกัดของวัตถุในภาพเป็นพิกัดจริงได้โดยการใช้การแปลงแบบโฮโมกราฟฟีก็จะสามารถนำพิกัดเหล่านี้ไปคำนวณหาเป็นขนาด และพื้นที่ของแต่ละส่วนของวัตถุ รวมทั้งพื้นที่โดยรวมเชิงปริมาตรของวัตถุนั้นๆ ได้ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป



บทที่ 4

การออกแบบระบบตรวจวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ

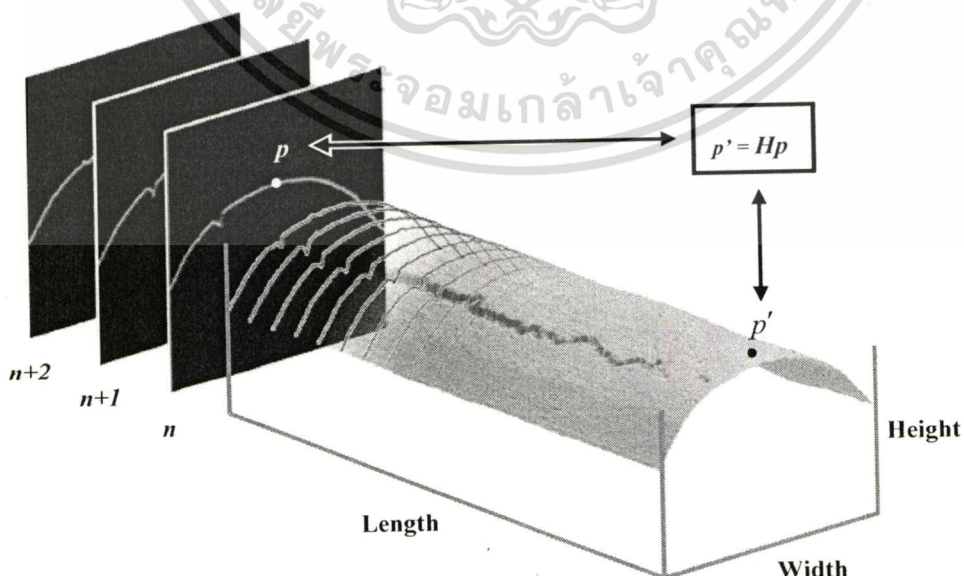
ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการศึกษาวิจัยและขั้นตอนการออกแบบตรวจวัดขนาดวัตถุ โดย การประยุกต์ใช้ทฤษฎีแบบโฮโมกราฟฟีร่วมกับการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ ซึ่งได้แบ่งเนื้อหา ออกเป็น 3 ส่วน คือ หลักการตรวจวัดขนาดของวัตถุที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ การออกแบบและ ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจวัดขนาดวัตถุ และขั้นตอนการประมวลผลและการทำงานของ ระบบตรวจวัดขนาดของวัตถุที่ได้นำเสนอในงานวิจัย

4.1 หลักการตรวจวัดขนาดของวัตถุที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงหลักการในการหลักการตรวจวัดขนาดของวัตถุ ซึ่งสามารถตรวจวัด ขนาดของวัตถุได้ทั้ง ความกว้าง ความหนาและความยาวของวัตถุ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ เพื่อหาพื้นที่โดยรวมของวัตถุได้อีกด้วย

4.1.1 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีโฮโมกราฟฟีและแสงเลเซอร์แบ่งส่วนในการตรวจวัดขนาดวัตถุ

แนวคิดที่ได้นำมาใช้ในการตรวจวัดวัตถุในงานวิจัยนี้คือการนำหลักการของการฉายแสง เลเซอร์บนวัตถุ เพื่อเป็นการแบ่งวัตถุที่เป็น 3 มิติออกเป็นแผ่นบางๆตามระนาบของลำแสงเลเซอร์ที่ ฉายไปบนวัตถุซึ่งเป็นลักษณะระนาบ 2 มิติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 4.1 แนวคิดที่นำมาใช้ในการตรวจวัดขนาดวัตถุ ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

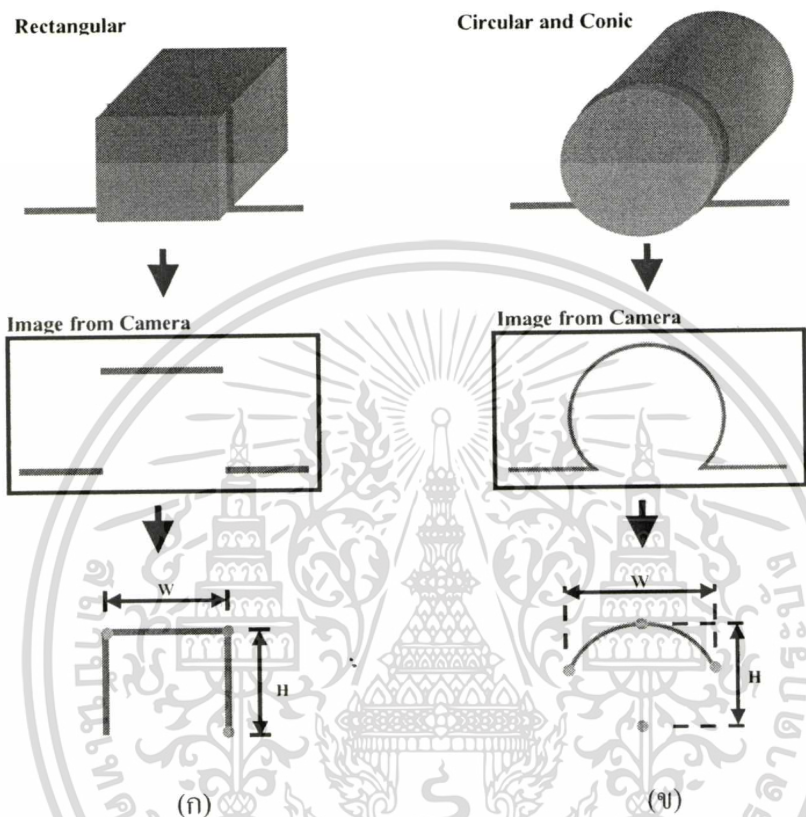
การฉายแสงเลเซอร์แบบเส้นบนวัตถุนอกจากแบ่งวัตถุเป็นส่วนๆแล้วยังทำให้ได้คุณลักษณะของวัตถุตามพื้นผิวของวัตถุด้วย ซึ่งสิ่งที่ได้จากแสงที่ฉายบนพื้นผิววัตถุจะบอกถึงความกว้าง และความหนาของวัตถุ เมื่อจับภาพด้วยกล้องวิดีโอรูปภาพของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จะบอกถึงขนาดของวัตถุในหน่วยของพิกเซลที่เกิดขึ้นบนตัวเซนเซอร์ ดังนั้นในการแปลงขนาดของวัตถุที่อยู่ในหน่วยพิกเซลของภาพไปเป็นขนาดที่เป็นพิกัดจริงในหน่วยของหน่วยวัดมาตรฐาน เช่น มิลลิเมตร เซนติเมตร จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพมาช่วยโดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ทฤษฎีของโฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์มซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่แล้ว โฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์มจะเป็นการแปลงพิกัดของจุดระหว่างระนาบ 2 มิติใดๆ ในงานวิจัยนี้จะทำการแปลงพิกัดของจุดบนระนาบของภาพให้เป็นพิกัดจริงเพื่อคำนวณออกมาเป็นความกว้าง และความหนาของวัตถุในหน่วยวัดมาตรฐาน ส่วนความยาวของวัตถุนั้นได้จากการทำการเลื่อนวัตถุแล้วใช้กล้องวิดีโอจับภาพในเฟรมตัดไปจนครบทั้งวัตถุ เมื่อนำภาพแต่ละเฟรมมารวมกันก็ได้เป็นความยาวของวัตถุนั้นๆ ซึ่งความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุจะต้องสัมพันธ์กับความเร็วในการจับภาพของกล้องวิดีโอ เช่น กล้องสามารถจับภาพด้วยความเร็ว 30 เฟรมต่อวินาที ดังนั้นความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 30 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อให้ได้ความละเอียดในการวัดความยาวของวัตถุเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อเฟรม ถ้าต้องการความละเอียดในการวัดความยาวของวัตถุที่ 0.5 มิลลิเมตรต่อเฟรม ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุต้องมีค่าเท่ากับ 15 มิลลิเมตรต่อวินาที

4.1.2 การวิเคราะห์ทางเรขาคณิตของวัตถุจากเส้นแสงเลเซอร์

เมื่อทำการฉายแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของวัตถุจะทำให้เส้นแสงเลเซอร์เปลี่ยนแปลงไปตามพื้นผิวของวัตถุนั้นๆ ซึ่งสามารถนำแสงเลเซอร์ที่ได้จากการมองด้วยกล้องวิดีโอมาวิเคราะห์ถึงรูปทรงของวัตถุได้ โดยงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบการวัดขนาดจากวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยม และทรงกลม ดังนั้นลักษณะของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จะมี 2 ลักษณะ คือ เป็นเส้นตรง และเส้นโค้งซึ่งเกิดจากวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยม และทรงกลมตามลำดับ โดยลักษณะของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้เมื่อฉายลงบนพื้นผิวของวัตถุได้แสดงในรูปที่ 4.2 (ก) กรณีที่วัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จะเป็นลักษณะเส้นตรงสามารถจะวิเคราะห์หาความกว้างของวัตถุได้จากการหารระยะห่างระหว่างจุดพิกัดของเส้นแสงเลเซอร์ที่อยู่ในตำแหน่งซ้ายสุด และขวาสุด ซึ่งสามารถจะหาความหนาของวัตถุได้จากการหารระยะห่างระหว่างจุดพิกัดของเส้นแสงเลเซอร์จากตำแหน่งซ้ายหรือขวากับตำแหน่งของเส้นอ้างอิง ซึ่งเส้นอ้างอิงจะเป็นเส้นแสงเลเซอร์เมื่อไม่มีวัตถุตัดผ่าน และรูปที่ 4.2 (ข) จะเป็นกรณีของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จากวัตถุทรงกลม การวิเคราะห์เพื่อหาขนาดจะดูจากเส้นผ่านศูนย์กลาง ถ้ากรณีที่เป็นทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวความกว้าง และในแนวความหนาจะมีขนาดเท่ากันแต่ถ้าเป็นวงรีเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวความกว้าง และในแนวความหนาจะไม่เท่ากัน โดยการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวความหนาของรูปทรงกลมสามารถหาได้โดยการหารระยะห่างระหว่างจุดพิกัด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเส้นแสงเลเซอร์ที่อยู่ในตำแหน่งสูงสุดกับตำแหน่งของเส้นอ้างอิง ซึ่งเสมือนความหนาของวัตถุ ในส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวความกว้างก็จะได้จากระยะห่างระหว่างจุดพิกัดของเส้นแสง เลเซอร์ด้านซ้าย และขวาสุดซึ่งเสมือนความกว้างของวัตถุ



รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์เรขาคณิตจากภาพเส้นแสงเลเซอร์ (ก) วัตถุทรงสี่เหลี่ยม (ข) วัตถุทรงกลม

ในการหาระยะห่างจุดพิกัด 2 จุดซึ่งเป็นขนาดของวัตถุจำเป็นต้องแปลงพิกัดจากพิกัดภาพให้เป็นจุดที่อยู่บนพิกัดจริงเสียก่อน โดยการใช้โฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มในการแปลงจุดพิกัดเหล่านี้ เมื่อทำการแปลงแล้วระยะห่างระหว่างจุดพิกัดก็จะเป็นขนาดจริงของวัตถุในหน่วยของหน่วยวัดมาตรฐาน ซึ่งการคำนวณระยะห่างระหว่างจุดนี้ใช้หลักการของการหาระยะทางระหว่างจุด 2 จุด คือ

$$D = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \tag{4.1}$$

- เมื่อ D คือ ระยะห่างระหว่างจุดพิกัด 2 จุด (ขนาดวัตถุ)
- Δx คือ ผลต่างของจุดในแกน x
- Δy คือ ผลต่างของจุดในแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นยังสามารถคำนวณพื้นที่แต่ละส่วนของวัตถุได้จากสูตรการหาพื้นที่ ซึ่งในกรณีวัตถุทรงสี่เหลี่ยมสามารถหาพื้นที่ได้โดย

$$A = W \cdot H$$

(4.2)

- เมื่อ
- A คือ พื้นที่หน้าตัดแต่ละส่วนของวัตถุ

W คือ ความกว้างในแต่ละส่วนของวัตถุ

H คือ ความหนาในแต่ละส่วนของวัตถุ

ในกรณีวัตถุทรงกลมสามารถหาพื้นที่ได้โดย

$$A = \pi r^2$$

(4.3)

- เมื่อ
- A คือ พื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุ

r คือ รัศมีของวัตถุมีค่าเท่ากับ $W / 2 = H / 2$

และในกรณีวัตถุทรงวงรีสามารถหาพื้นที่ได้โดย

$$A = \pi \cdot W / 2 \cdot H / 2$$

(4.4)

- เมื่อ
- A คือ พื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุ

$W / 2$ คือ รัศมีในแนวความกว้างของวัตถุ

$H / 2$ คือ รัศมีในแนวความหนาของวัตถุ

เมื่อนำพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนมารวมกันก็จะได้เป็นพื้นที่โดยรวมหรือปริมาตรของวัตถุ ซึ่งสามารถหาได้โดย

$$V = \sum_{n=1}^L A_n$$

(4.5)

- เมื่อ
- V คือ ปริมาตรหรือพื้นที่รวมของวัตถุ

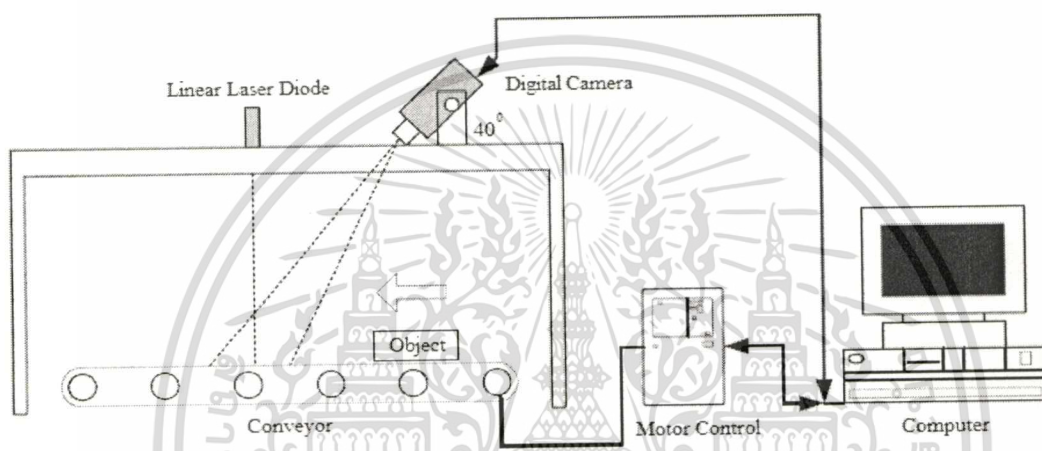
A คือ พื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุ

L คือ จำนวนเฟรมที่มีวัตถุตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์หรือความยาวของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจวัดขนาดวัตถุ

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการออกแบบระบบการตรวจวัดขนาดของวัตถุ การวัดขนาดวัตถุที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะใช้ลักษณะการสแกนวัตถุโดยใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ ดังนั้นอุปกรณ์ที่สำคัญสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ คือ แหล่งกำเนิดแสงซึ่งจะให้แสงเลเซอร์แบบเส้น อุปกรณ์การตรวจจับภาพโดยใช้กล้องวิดีโอ อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ และคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการประมวลผล โดยระบบที่ออกแบบรวมทั้งตำแหน่งการติดตั้งแสดงอยู่ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจวัดขนาดวัตถุ

4.2.1 อุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

ในการออกแบบจะใช้แสงเลเซอร์แบบเส้นสีแดง (Red Laser Line) ในการฉายไปบนวัตถุ เพื่อเป็นการแบ่งวัตถุออกเป็นส่วนๆ ซึ่งการใช้เลเซอร์สีแดงจะช่วยให้การประมวลผลภาพง่ายขึ้น และลดขั้นตอนในการปรับแต่งภาพ โดยสิ่งที่สำคัญ คือ การวางตำแหน่งของหัวเลเซอร์ต้องตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ เพื่อเป็นการแบ่งวัตถุออกเป็นแผ่นบางๆ 2 มิติ ซึ่งมีระนาบเดียวกับระนาบของเส้นแสงเลเซอร์ การเลือกใช้อุปกรณ์เลเซอร์ที่มีความคมของเส้นแสงเลเซอร์จะช่วยให้ระบบมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และช่วยลดปัญหาของผลกระทบจากแสงอื่นๆ อีกด้วย

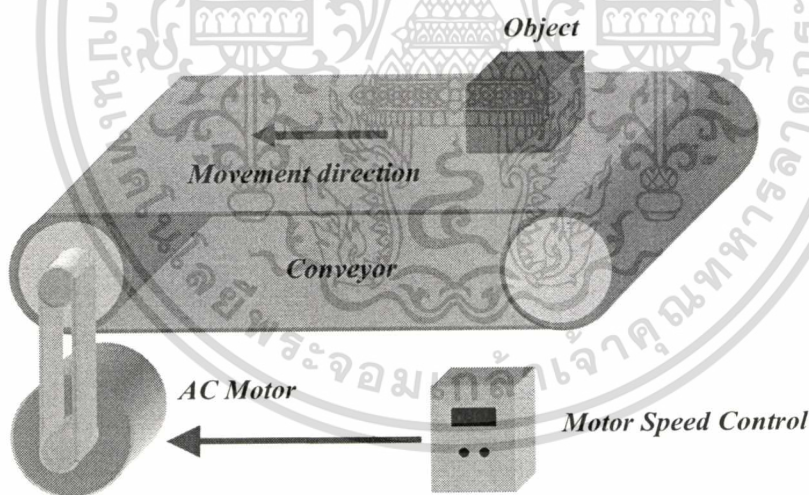
4.2.2 อุปกรณ์จับภาพหรือกล้องวิดีโอ

การเลือกใช้อุปกรณ์จับภาพถือเป็นสิ่งสำคัญอีกอย่างในการออกแบบ เนื่องจากต้องคำนึงถึงความละเอียดของกล้อง (Resolution) และความเร็วในการจับภาพกล้องที่มีความละเอียดสูงจะช่วยเพิ่มความละเอียดในการตรวจวัดขนาดของวัตถุด้วย แต่ยิ่งภาพมีความละเอียดมากก็ทำให้การประมวลผลภาพจะลดลง ส่วนความเร็วในการเก็บภาพของกล้องก็จะมีผลต่อความเร็วในการสแกน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาความยาวของวัตถุ ซึ่งปัจจุบันความเร็วในการเก็บภาพของกล้องมีตั้งแต่ 12-500 เฟรมต่อวินาที แต่ยิ่งมีความเร็วสูงขึ้นก็จะมีราคาแพงขึ้นด้วย กล้องที่นำมาใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้กล้องเว็บแคม ที่มีความละเอียดในการถ่ายภาพนิ่งที่ 8 เมกะพิกเซล และความละเอียดในการถ่ายภาพวิดีโอ 640×480 พิกเซล ความเร็วในการถ่ายภาพวิดีโอ 30 เฟรมต่อวินาที ในการติดตั้งกล้องสามารถติดตั้งทำมุมกับระนาบของเลเซอร์ได้อย่างอิสระเพราะการนำทฤษฎีของไฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์มมาใช้ในการทำมุมกันระหว่างระนาบ (เลเซอร์กับกล้อง) ไม่มีผลต่อการตรวจวัดขนาดของวัตถุ เนื่องจากสามารถใช้สอบเทียบในการปรับแต่งได้ แต่ในการติดตั้งต้องคำนึงถึงการบดบังจากวัตถุด้วย ดังนั้นจึงติดตั้งให้ทำมุมกับระนาบของเส้นแสงเลเซอร์ระหว่าง 30 – 40 องศา

4.2.3 อุปกรณ์การควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ

การเคลื่อนที่ของวัตถุจำเป็นต้องสอดคล้องกับความเร็วในการถ่ายภาพของกล้อง ในการออกแบบจะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับหนึ่งเฟสที่ขับเคลื่อนสายพานลำเลียง โดยควบคุมความเร็วของสายพานลำเลียงไว้ที่ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อให้ได้ความละเอียดในการวัดความยาววัตถุที่ 1 มิลลิเมตรต่อเฟรม การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุได้แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ

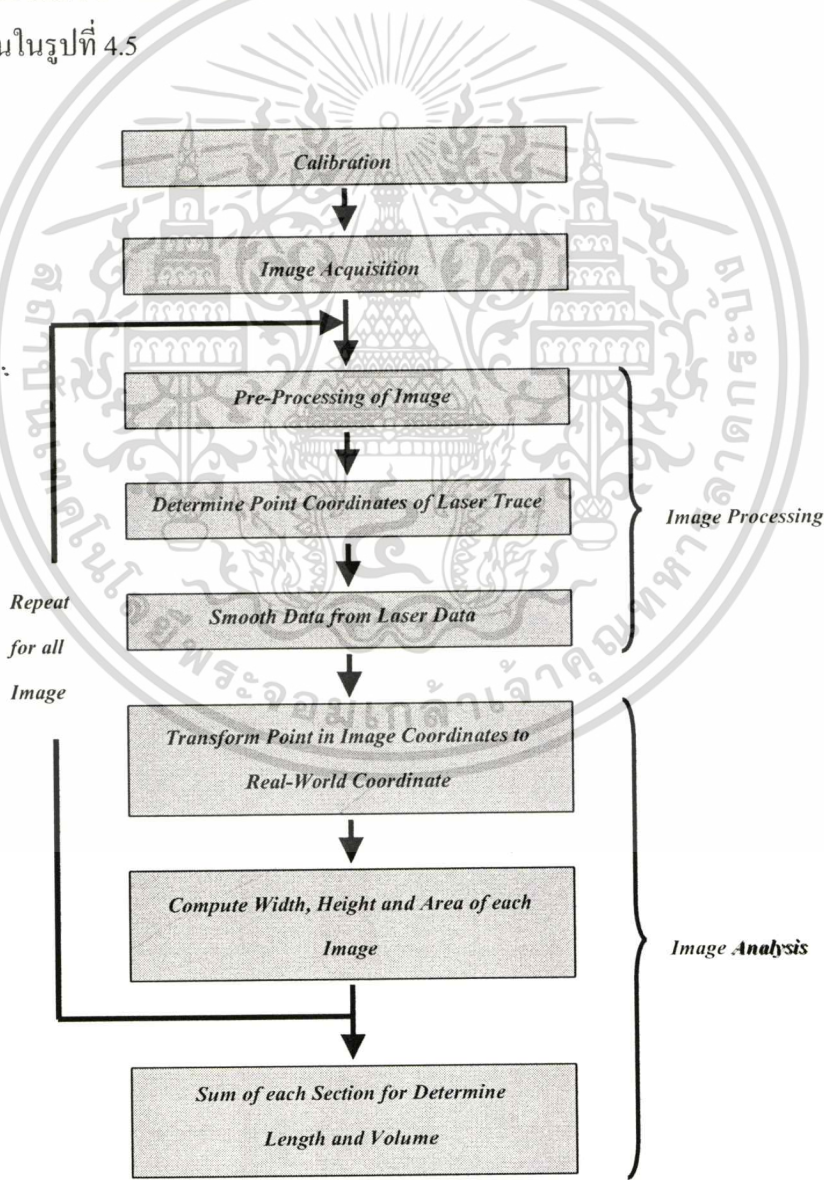
4.2.4 อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

การประมวลผลภาพที่ได้จากกล้องเพื่อทำการหาขนาดของวัตถุนั้นจะใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลโดยผ่านทางโปรแกรมที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Matlab เวอร์ชัน 7.8 ในการเขียนโปรแกรมเพื่อทดสอบ และใช้ในการตรวจวัดขนาดของวัตถุ เนื่องจากโปรแกรม Matlab มีฟังก์ชันที่เกี่ยวกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ และประมวลผลภาพให้เลือกเอกร้านเป็นเอกร้านที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากมายจึงช่วยลดเวลาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมลงมาก นอกจากนั้นยังสามารถทำการวิเคราะห์ผลการทำงาน และประสิทธิภาพในการทำงานของโปรแกรมที่เขียนขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรม

4.3 ขั้นตอนการประมวลผลและการทำงานของระบบตรวจวัดขนาดของวัตถุ

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจวัดขนาดของวัตถุ ซึ่งการทำงานจะแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนได้ดังนี้ คือ การสอบเทียบ การเก็บข้อมูลภาพของวัตถุที่ตรวจวัด การประมวลผลภาพ การวิเคราะห์ภาพเพื่อคำนวณหาขนาด และพื้นที่โดยรวมของวัตถุโดยขั้นตอน และลำดับการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจวัดของวัตถุจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการประมวลผลและการทำงานของระบบตรวจวัดขนาดของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การสอบเทียบ

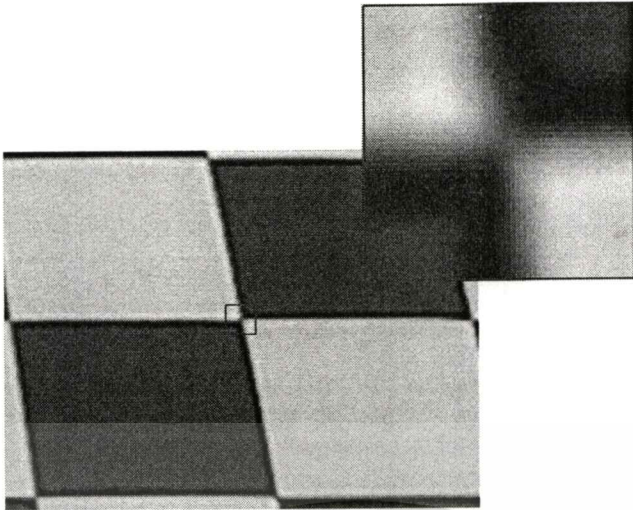
การสอบเทียบเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งในการตรวจวัดขนาดของวัตถุเพราะจะมีผลกับความผิดพลาดในการตรวจวัด การสอบเทียบนี้เป็นการหาค่าของไฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์มซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการแปลงจุดพิกัดภาพเป็นพิกัดจริงจากที่ได้กล่าวถึงการหาค่าของไฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์มไว้ในบทที่ 3 การหาค่าของไฮโมกราฟฟิเมทริกซ์สามารถหาได้โดยการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของจุดบนพิกัดภาพกับตำแหน่งของจุดที่อยู่บนพิกัดจริงที่ทราบค่าตำแหน่งของจุดอย่างน้อย 4 จุดเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าไฮโมกราฟฟิเมทริกซ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ตารางหมากรุกในการสอบเทียบ ซึ่งในแต่ละช่องของตารางหมากรุกจะมีขนาดความกว้าง และความยาวเท่ากับ 30 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.6 ตารางหมากรุกขนาด 30×30 มิลลิเมตร ที่ใช้ในการสอบเทียบ

ในการสอบเทียบจะต้องวางตำแหน่งของแผ่นตารางหมากรุกที่ใช้ในการสอบเทียบที่ระนาบเดียวกับระนาบของเส้นแสงเลเซอร์ที่จะฉายลงบนวัตถุ จากนั้นก็จะทำการบันทึกภาพโดยกล้องที่ใช้ในการตรวจวัดวัตถุซึ่งจะทำมุมเดียวกับระนาบของแสงเลเซอร์ เมื่อได้ภาพของแผ่นตารางที่ใช้ในการสอบเทียบแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดตำแหน่งทั้ง 4 จุดบนจุดภาพที่ได้จากภาพของแผ่นตารางที่ใช้ให้สอดคล้องกับตำแหน่งพิกัดจริงของตารางที่ใช้ ในการกำหนดจุดซึ่งเป็นบริเวณมุมในแต่ละช่องของตารางหากทำการกำหนดเองด้วยสายตาอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้หากจุดที่กำหนดไม่ใช่บริเวณที่เป็นมุมจริงๆของตาราง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำทฤษฎีการหามุมของแฮร์ลิส (Harris Corner Detector) [18] ซึ่งเป็นวิธีการหาจุดพิกัดที่เป็นส่วนของมุมจากบริเวณที่อยู่ใกล้เคียงจากจุดที่เรากำหนดลงไปบนภาพตารางที่เราใช้สอบเทียบ การใช้ทฤษฎีการหามุมของแฮร์ลิสมาช่วยในการกำหนดจุดพิกัดที่เป็นมุมของตารางช่วยให้การสอบเทียบมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 จุดพิกัดที่เป็นบริเวณมุมของตารางที่ได้จากการใช้ทฤษฎีการหามุมของแฮร์ลิส

เมื่อทำการกำหนดตำแหน่งพิกัดแต่ละจุดทั้ง 4 จุด บนภาพแล้ว ในการคำนวณค่าของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมตริกซ์จะต้องใช้ความสัมพันธ์ของจุดพิกัดที่ได้บนระนาบภาพเทียบกับพิกัดจริงของตารางที่ใช้ในการสอบเทียบว่าแต่ละจุดนั้นอยู่ในตำแหน่งพิกัดใดในพิกัดจริง เมื่อทำการกำหนดจุดแต่ละจุดบนตารางสอบเทียบทั้ง 4 จุด คือ $P_1 = (x_1, y_1)$, $P_2 = (x_2, y_2)$, $P_3 = (x_3, y_3)$ และ $P_4 = (x_4, y_4)$ ซึ่งเป็นจุดพิกัดบนภาพ (Image Coordinate) โดยแต่ละจุดนั้นคือจุดในพิกัดจริง (Real World Coordinate) ที่ $P'_1 = (x'_1, y'_1)$, $P'_2 = (x'_2, y'_2)$, $P'_3 = (x'_3, y'_3)$ และ $P'_4 = (x'_4, y'_4)$ เมื่อระบุตำแหน่งของจุดทั้ง 4 จุดว่าอยู่ในตำแหน่งพิกัดใดบนพิกัดภาพเก็บพิกัดจริงได้แล้วก็สามารถคำนวณหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมตริกซ์ได้โดยแทนค่าลงในเมตริกซ์ A จากสมการ

$$Ah = 0$$

(4.6)

เมื่อแทนจุดทั้ง 4 จุดที่เป็นพิกัดภาพ และพิกัดจริงที่ได้ลงในสมการดังนั้นจะได้

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

(4.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเมทริกซ์ $U_{m \times m} D_{m \times n} V_{n \times n}^T$ ดังนั้น โสมิกราฟีทรานส์ฟอร์มเมทริกซ์ซึ่งจะได้จากหลักสุดท้ายของ V และนำมาจัดรูปเป็นเมทริกซ์ขนาด 3×3 คือ

$$H = \begin{bmatrix} -0.000796968 & -0.000073215 & 0.601931930 \\ -0.000082894 & -0.001084710 & 0.798535506 \\ -0.000000019 & -0.000001694 & -0.004144034 \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

โดยโสมิกราฟีทรานส์ฟอร์มเมทริกซ์นี้เป็นผลมาจากระยะห่าง การทำมุมของกล้องกับระนาบของแสงเลเซอร์ และความยาวโฟกัสของกล้อง ดังนั้นหากพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไปจึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบใหม่ทุกครั้งก่อนนำไปใช้ในการตรวจวัดขนาดวัตถุ

4.3.2 การเก็บข้อมูลภาพของวัตถุ

การเก็บข้อมูลภาพของวัตถุในงานวิจัยนี้จะเก็บข้อมูลภาพของวัตถุที่เคลื่อนที่บนสายพานลำเลียงไว้เป็นวิดีโอไฟล์ซึ่งเป็นรูปแบบ AVI มีความละเอียด 640×480 พิกเซล และความเร็วในการเก็บภาพ 30 เฟรมต่อวินาที โดยความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุต้องสัมพันธ์กับความเร็วในการจับภาพของกล้อง ในการประมวลผลจะทำการดึงข้อมูลภาพมาประมวลทีละเฟรมเมื่อประมวลผลในเฟรมแรกเสร็จแล้วก็จะทำการดึงข้อมูลในเฟรมถัดไปจนครบ จำนวนเฟรมทั้งหมดของไฟล์ AVI ซึ่งในแต่ละเฟรมจะเป็นเสมือนภาพนิ่งของวัตถุในแต่ละส่วนที่ทำการเคลื่อนที่ผ่านระนาบของเส้นแสงเลเซอร์ สิ่งสำคัญในการเก็บข้อมูลภาพของวัตถุ คือ การจัดสภาพแวดล้อมของแสงเพื่อลดผลกระทบจากแสงภายนอก

4.3.3 การประมวลผลภาพที่ได้จากเส้นแสงเลเซอร์

เมื่อทำการเก็บข้อมูลภาพของวัตถุแล้วขั้นตอนต่อไปก็จะทำภาพในแต่ละเฟรมที่ได้มาประมวลผลเพื่อแยกบริเวณที่เป็นแสงเลเซอร์กับภาพพื้นหลัง ซึ่งเส้นเลเซอร์นี้จะเป็นคุณสมบัติเกี่ยวกับรูปทรงของวัตถุ การประมวลผลภาพแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การประมวลผลภาพเบื้องต้น การหาพิกัดของแสงเลเซอร์บนภาพ และการปรับแต่งข้อมูลจุดพิกัดของแสงเลเซอร์

4.3.3.1 การประมวลผลภาพเบื้องต้น

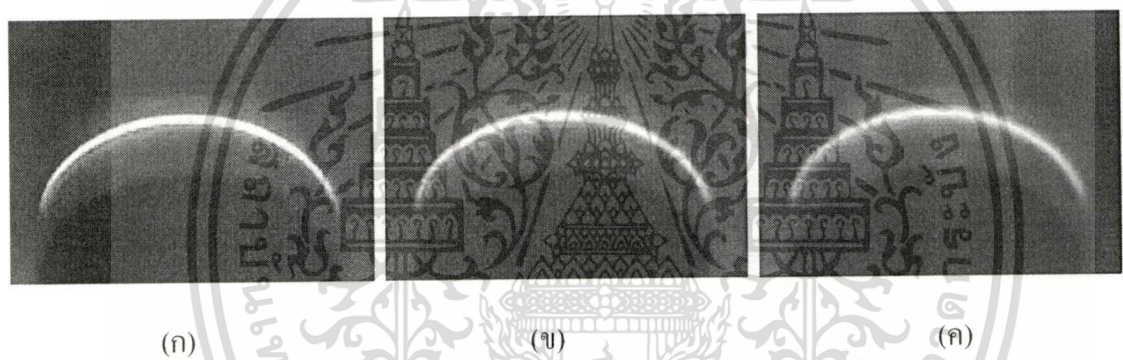
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการปรับแต่งภาพที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาพของวัตถุให้ดีขึ้นก่อนจะนำไปประมวลผลเพื่อหาบริเวณเส้นแสงเลเซอร์ จากข้อมูลที่ได้วัตถุจะถูกเก็บไว้เป็นแบบไฟล์ AVI ในขั้นตอนการประมวลผลจะดึงข้อมูลมาประมวลผลทีมาเฟรมภาพ โดยข้อมูลต้นฉบับจะเป็นภาพสี

RGB และนำค่าความสว่างในแถบสีแดงมาประมวลผล การปรับปรุงคุณภาพของภาพจะลดสัญญาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ การเพิ่มขนาดของมาร์คจะช่วยลดสัญญาณรบกวนได้มากขึ้น แต่มีข้อเสียคือ จะทำให้ลักษณะภาพเกิดการพัวมัวยิ่งขึ้น

$$\text{Average Mask } 3 \times 3 = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

$$\text{Average Mask } 5 \times 5 = \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.13}$$



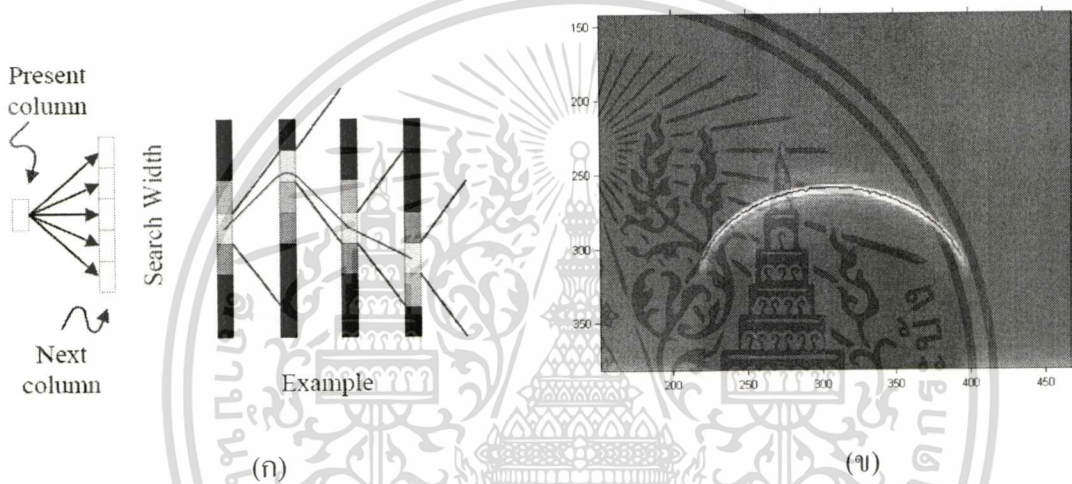
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวนโดยใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ย (ก) แสดงภาพต้นฉบับ (ข) ภาพที่ได้หลังจากการลดสัญญาณรบกวนโดยใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยที่มีขนาดมาร์ค 3×3 (ค) ภาพที่ได้หลังจากการลดสัญญาณรบกวนโดยใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยที่มีขนาดมาร์ค 5×5

4.3.3.2 การหาพิกัดของแสงเลเซอร์บนภาพ

การหาพิกัดของเส้นแสงเลเซอร์จะเป็นการตรวจหาระดับความสว่างที่เกิดขึ้นในภาพ หลังจากทำการลดสัญญาณรบกวนแล้ว โดยหลักการของการหาบริเวณที่เป็นส่วนของแสงเลเซอร์ใช้การเปรียบเทียบจุดพิกเซลของภาพกับค่าเทรสโThreshold) เพื่อเป็นการแยกบริเวณแสงเลเซอร์ออกจากพื้นหลัง (Background) ของภาพ ซึ่งค่าเทรสโThresholdนี้จะเป็นค่าที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้แบ่งระดับความสว่างของเลเซอร์กับระดับความสว่างของภาพพื้นหลัง ถ้าจุดพิกเซลใดๆในภาพที่มีความสว่างมากกว่าค่าเทรสโThresholdแล้วจะกำหนดให้จุดนั้นเป็นจุดของเส้นแสงเลเซอร์ โดยมีหลักการดังนี้คือ ถ้า $I(x,y) > T$ แสดงว่าจุดพิกเซลนั้นเป็นจุดของแสงเลเซอร์ และถ้า $I(x,y) \leq T$ แสดงว่าจุดพิกเซลนั้นเป็นจุดบริเวณพื้นหลังของภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการค้นหาริเวณของเส้นแสงเลเซอร์ภายในภาพจะใช้วิธีการของเส้นทางเดินของเส้น (Line Walking Algorithm) [20] หลักการ คือ การหาระดับความสว่างเทียบกับค่าเทรสโทลด์ในแต่ละหลัก (Column) ของภาพ โดยเริ่มที่จุดพิกเซลในหลักแรก (n_1) ในทุกแถวตั้งแต่แถวแรกถึงแถวสุดท้าย $m_1 : m_{end}$ เพื่อจะทำการหาจุดพิกเซลในแต่ละแถวของจุดพิกเซลที่มีระดับความสว่างที่มีค่ามากกว่าค่าเทรสโทลด์ ซึ่งจะกำหนดให้จุดพิกเซลนี้เป็นจุดพิกัดของเส้นแสงเลเซอร์จุดที่ 1 $L_1(x_i, y_i)$ การหาจุดในหลักถัดไปจะทำการหาจุดพิกเซลตั้งแต่แถวที่ $m_{i-k} : m_{i+k}$ เมื่อ k คือ จำนวนแถวของพิกเซลในภาพที่ต้องการหาเส้นแสงเลเซอร์ (Search Width) โดยไม่จำเป็นต้องทำการหาทุกแถวของภาพจึงเพิ่มความเร็วให้กับการหาจุดพิกเซลที่เป็นเส้นแสงเลเซอร์ภายในภาพ

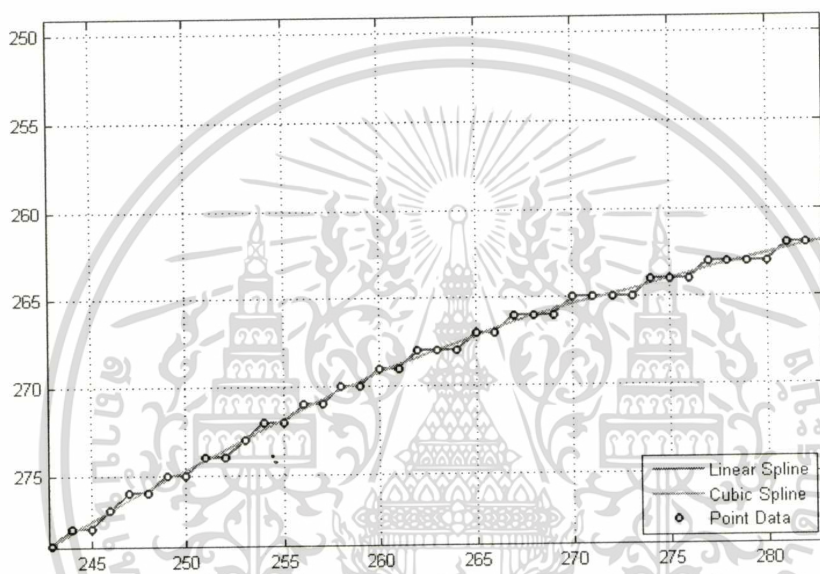


รูปที่ 4.11 (ก) วิธีการของเส้นทางเดินของเส้น (ข) ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการของเส้นทางเดินของเส้น

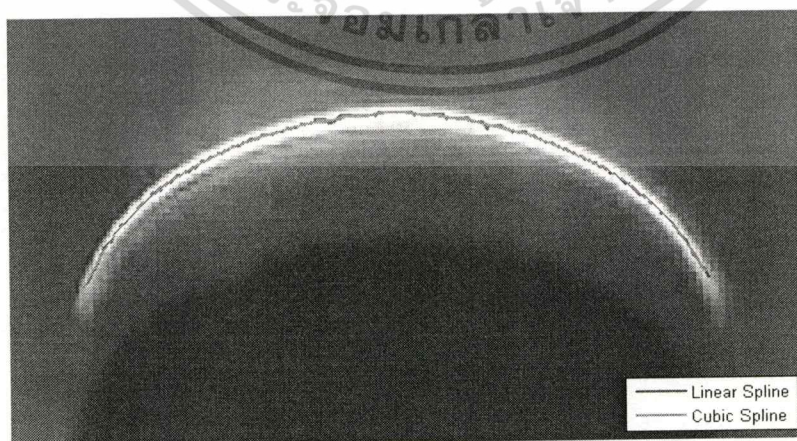
4.3.3.3 การปรับแต่งข้อมูลจุดพิกัดของแสงเลเซอร์

ข้อมูลที่เป็นพิกัดของแสงเลเซอร์ที่ได้มาจะมีการกระจายของจุดข้อมูล จึงจำเป็นต้องทำการปรับแต่งข้อมูลที่เป็นพิกัดของแสงเลเซอร์ให้มีความราบเรียบของข้อมูล เพื่อช่วยลดความผิดพลาดในการนำข้อมูลของรูปทรงวัตถุที่ได้จากแสงเลเซอร์ไปใช้ในการคำนวณหาขนาดของวัตถุ ดังนั้นจึงเปลี่ยนข้อมูลที่มีลักษณะเป็นกลุ่มของจุดข้อมูลออกมาให้เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีความต่อเนื่อง ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้การประมาณค่าในช่วง (Interpolation) [21][22] ซึ่งการประมาณค่าในช่วง คือ การทำข้อมูลที่เป็นข้อมูลเฉพาะจุด (Discrete) ให้เป็นข้อมูลที่ต่อเนื่อง (Continue) โดยการหาฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติคล้ายกับข้อมูลที่มีอยู่ให้มากที่สุด ซึ่งมีด้วยกันมากมายหลายวิธีแต่ที่นิยมจะเป็น การประมาณค่าในช่วงแบบโพลิโนเมียล (Polynomial-Interpolation) และการประมาณค่าในช่วงแบบสไปลน์ (Spline-Interpolation) โดยการประมาณค่าในช่วงแบบโพลิโนเมียล คือ การเชื่อมต่อข้อมูล 2 จุดที่อยู่ติดกันผ่านสมการพหุนาม ซึ่งเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งจะขึ้นอยู่กับที่กำหนดค่าเอ็กสโพเนนเชียล (Polynomial Degree) แต่มีข้อเสียคือ ยิ่งจำนวนของจุดข้อมูลมากเท่าใดค่าสูงสุดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าต่ำสุดที่ได้จากการประมาณค่าในช่วงก็จะสูงขึ้นทำให้มีความผิดพลาดของการประมาณค่าในช่วงสูงตามไปด้วย ในส่วนการประมาณค่าในช่วงแบบสไปน์มีพื้นฐานมาจากการประมาณค่าในช่วงแบบโพลิโนเมียล โดยแทนที่จะใช้พหุนามกำลังสูงๆสำหรับการประมาณค่าในช่วงที่มีจำนวนของจุดข้อมูลมากก็จะใช้วิธีตัดแบ่งข้อมูลออกเป็นหลายส่วน แล้วทำการประมาณค่าในช่วงข้อมูลแต่ละส่วนด้วยพหุนามกำลังต่ำๆ ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความเสถียรมากกว่าการประมาณค่าในช่วงแบบโพลิโนเมียล โดยทั่วไปก็จะใช้พหุนามกำลังสาม (Cubic-Spline-Interpolation) และพหุนามกำลังหนึ่งหรือเป็นเชิงเส้น (Linear-Spline-Interpolation)



รูปที่ 4.12 แสดงผลลัพธ์ที่ได้ของการประมาณค่าในช่วงแบบสไปน์โดยใช้พหุนามกำลังสาม และพหุนามกำลังหนึ่งหรือเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 4.13 ผลของการปรับแต่งและลดการกระจายตัวของข้อมูลพิกัดของแสงเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 การวิเคราะห์ภาพเพื่อหาผลลัพธ์ด้านขนาดและพื้นที่โดยรวมของวัตถุ

เมื่อได้ข้อมูลพิกัดในภาพของเส้นแสงเลเซอร์ที่ทำการประมาณค่าในช่วงแล้ว ในการหาขนาดของวัตถุจำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงรูปทรงทางเรขาคณิตของวัตถุ เพื่อใช้ในการกำหนดจุดที่เป็นคุณสมบัติของความกว้าง และความหนาของวัตถุ แล้วทำการแปลงจุดพิกัดบนภาพนี้ให้เป็นพิกัดจริง ก่อนจะนำจุดพิกัดที่ได้ไปคำนวณหาขนาด และพื้นที่ของวัตถุ ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีการแปลงจุดพิกัดภาพของเส้นเลเซอร์ไปเป็นจุดพิกัดจริงของวัตถุ การคำนวณหาขนาดพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุ รวมทั้งการหาความยาว และพื้นที่รวมเชิงปริมาตรของวัตถุ

4.3.4.1 การแปลงจุดพิกัดภาพของเส้นแสงเลเซอร์เป็นจุดพิกัดจริงของวัตถุ

จากการวิเคราะห์ถึงรูปทรงเรขาคณิตของวัตถุที่นำมาใช้ในการวัดขนาดจะมีจุดพิกัดอยู่ 4 จุดที่จะเป็นจุดที่บอกถึงคุณสมบัติของวัตถุ โดย 2 จุดในแนวนอนที่เป็นขอบซ้ายขวาของจุดพิกัดเส้นแสงที่ได้จะเป็นคุณสมบัติของความกว้างของวัตถุ และ 2 จุดในแนวตั้ง คือ จุดพิกัดของเส้นแสงเลเซอร์ที่มีค่าสูงสุด และจุดเส้นแสงอ้างอิง (จุดพิกัดของแสงเลเซอร์เมื่อไม่มีวัตถุตัดผ่าน) จะเป็นคุณสมบัติของความหนาหรือความสูงของวัตถุ เมื่อได้จุดทั้ง 4 จุดจะต้องทำการทำให้จุดเหล่านี้ใช้เป็นจุดพิกัดจริงของวัตถุโดยการคูณจุดพิกัดที่ได้บนภาพกับโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมตริกซ์ที่ได้จากการสอบเทียบ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการ

$$p' = Hp$$

(4.14)

- เมื่อ
- H คือ โฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมตริกซ์
- p คือ จุดพิกัดของภาพที่จะทำการแปลง
- p' คือ จุดพิกัดที่ได้จากการแปลงซึ่งเป็นพิกัดจริงของวัตถุ

ซึ่งจุดที่ต้องการแปลงจะมี 4 จุด คือจุดคุณสมบัติของความกว้าง (P_1, P_2) และจุดคุณสมบัติความหนา (P_3, P_4) ดังนั้นจะได้

$$p'_i = Hp_i$$

(4.15)

และ

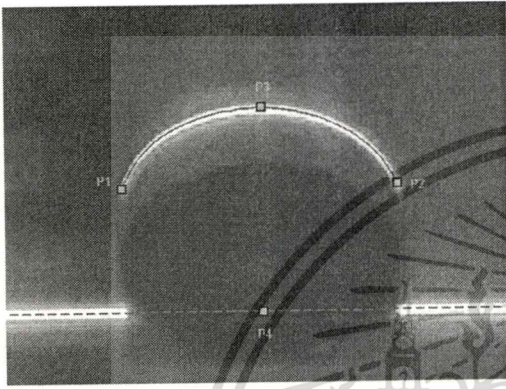
$$\begin{bmatrix} wx'_i \\ wy'_i \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

(4.16)

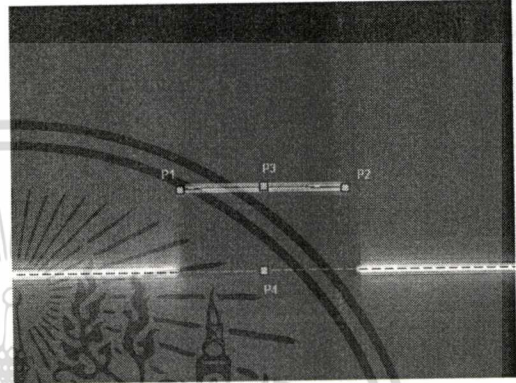
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $i = 1, 2, 3, 4$ คือ พิกัดในแต่ละจุดของเส้นเลเซอร์ภายในระบบพิกัดภาพที่ต้องการแปลงเป็นระบบพิกัดจริง ซึ่งตัวอย่างโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมทริกซ์ที่ได้จากการสอบเทียบ คือ

$$H = \begin{bmatrix} -0.000063693 & -0.006073040 & 0.446057700 \\ -0.005778472 & 0.000800451 & 0.894613317 \\ 0.000000309 & 0.000023299 & -0.025072349 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 จุดที่เป็นคุณสมบัติของความกว้างและความหนา (ก) วัตถุทรงกลม (ข) วัตถุทรงสี่เหลี่ยม

สมมติให้จุดที่ต้องการแปลงพิกัดทั้ง 4 จุดของวัตถุที่เป็นรูปทรงกลมจากรูปที่ 4.14 (ก) คือ $P_{(1)} = (264, 312)$, $P_{(2)} = (442, 305)$, $P_{(3)} = (353, 260)$ และ $P_{(4)} = (353, 387)$ โดยทำการจัดให้อยู่ในรูปแบบพิกัดโฮโมจีเนียส และทำการคูณกับ โฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ซึ่งจะได้

$$\begin{bmatrix} wx'_1 \\ wy'_1 \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.465546 \\ -0.381162 \\ -0.017721 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\begin{bmatrix} wx'_2 \\ wy'_2 \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.434372 \\ -1.415334 \\ -0.017829 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\begin{bmatrix} wx'_3 \\ wy'_3 \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.155416 \\ -0.937070 \\ -0.018905 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} wx'_4 \\ wy'_4 \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.927705 \\ -0.835279 \\ -0.015943 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

ค่าพิกัดในแต่ละจุดที่ได้จากการคูณกับโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์จะยังเป็นพิกัดโฮโมจีเนียสที่มีค่า w หรือสเกลเฟกเตอร์ ดังนั้นจำเป็นต้องทำให้ค่า w เท่ากับ 1 โดยการหารให้ทุกพจน์ใน P'_i ด้วย w จึงจะได้เป็นพิกัดจริงของวัตถุ คือ

$$P_{(1)} = (82.7, 21.5), P_{(2)} = (80.5, 79.4), P_{(3)} = (61.1, 49.6), P_{(4)} = (120.9, 52.4) \quad (4.22)$$

4.3.4.2 การคำนวณหาขนาดและพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุ

เมื่อได้พิกัดจริงของวัตถุจากการแปลงแบบโฮโมกราฟฟีแล้วสามารถที่จะทำการคำนวณหาขนาดความกว้างรวมทั้งความหนาของวัตถุ โดยใช้การหาระยะห่างระหว่างจุด 2 จุด บนระนาบ 2 มิติ ซึ่งแสดงในสมการที่ 4.1 โดยสามารถที่จะหาความกว้าง (W) และความหนา (H) ของวัตถุในแต่ละส่วนโดยนำค่าของจุดพิกัดจริงของวัตถุที่ได้ในสมการที่ 4.22 แทนลงในสมการที่ 4.1 จะได้

$$W = \sqrt{(82.7 - 80.5)^2 + (21.5 - 79.4)^2} = 57.919 \text{ mm} \quad (4.23)$$

$$H = \sqrt{(61.1 - 120.9)^2 + (49.6 - 52.4)^2} = 59.867 \text{ mm} \quad (4.24)$$

จากขนาดความกว้าง และความหนาที่ได้ในวัตถุทรงกลมก็จะเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางในด้านแนวตั้ง และแนวนอนตามลำดับ ซึ่งทั้ง 2 รูปทรงที่ในงานวิจัยนี้ได้นำมาใช้ในการทดสอบ คือ ทรงสี่เหลี่ยม และทรงกลมก็จะสามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุจากสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ จากตัวอย่างที่เป็นวัตถุทรงกลมก็จะสามารถหาพื้นที่ (A) โดย

$$A = \pi \cdot (57.919 / 2) \cdot (59.867 / 2) = 27.21 \text{ cm}^2 \quad (4.25)$$

4.3.4.3 การหาความยาวและพื้นที่รวมเชิงปริมาตรของวัตถุ

ข้อมูลรูปภาพในแต่ละเฟรมจากการเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านแสงเลเซอร์จะสามารถนำมาคำนวณหาค่าความกว้างความหนา และพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุได้โดยนำจำนวนเฟรมที่มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแสงเลเซอร์จากการเคลื่อนที่ของวัตถุมารวมกันจะทำให้ได้เป็นข้อมูลของความยาวของวัตถุนั้นเอง โดยความละเอียดในการหาความยาวของวัตถุจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ และความเร็วในการเก็บภาพของกล้อง ซึ่งสามารถปรับความละเอียดในการวัดขนาดความยาวของวัตถุโดยการปรับความเร็วการเคลื่อนที่ของวัตถุ นอกจากนั้นพื้นที่รวมเชิงปริมาตรของวัตถุก็สามารถคำนวณหาได้โดยรวมพื้นที่หน้าตัดแต่ละส่วนของวัตถุเข้าด้วยกัน ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ 4.5 ซึ่งเป็นการนำข้อมูลพื้นที่หน้าตัดของวัตถุในแต่ละเฟรมภาพมารวมกันก็จะทำให้ได้เป็นพื้นที่รวมเชิงปริมาตรของวัตถุนั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองจากการนำระบบตรวจวัดขนาดวัตถุ โดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอมาทำการทดสอบ เพื่อดูประสิทธิภาพและความแม่นยำของระบบตรวจวัดขนาดวัตถุ โดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ การทดสอบผลของการสอบเทียบโดยการใช้จุดในการสอบเทียบ 4 จุดกับการใช้จุดในการสอบเทียบ 20 จุด การทดสอบวัดขนาดพื้นที่หน้าตัดและพื้นที่รวมเชิงปริมาตรจากวัตถุตัวอย่าง และ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดขนาดของปลาชนิดต่างๆ

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

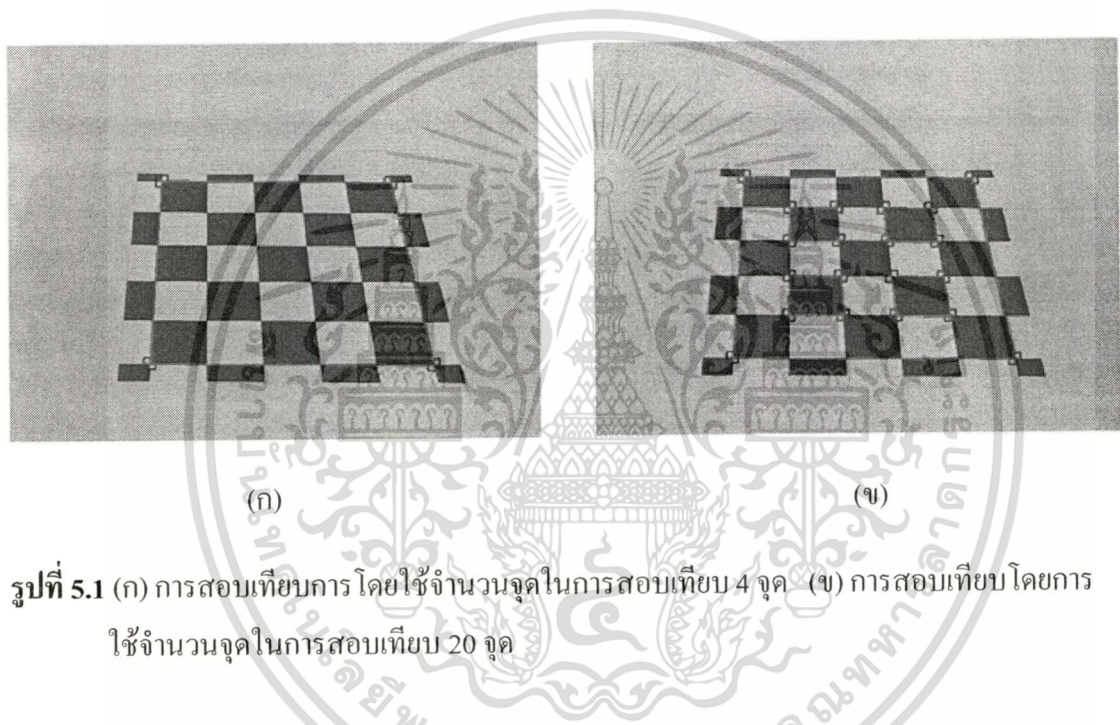
ในการทดลองจะใช้โปรแกรมที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Matlab 7.8 เป็นโปรแกรมที่ใช้ทดสอบและวิเคราะห์ผล โดยการประมวลบนคอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วในการประมวลผล 2.0 GHz ขนาดหน่วยความจำ 2 GB และใช้กล้องเว็บแคมเป็นตัวเก็บข้อมูลภาพซึ่งมีความละเอียดในการถ่ายภาพนิ่งที่ 640×480 พิกเซลถึง 8 เมกะพิกเซล ความละเอียดในการถ่ายภาพวิดีโอที่ 640×480 พิกเซล และความเร็วในการถ่ายภาพวิดีโอ 30 เฟรมต่อวินาที ซึ่งกล้องจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยผ่านพอร์ตยูเอสบี 2.0 และใช้โปรแกรมจากกล้องเว็บแคมในการบันทึกภาพวิดีโอแบบ AVI ไฟล์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้โดยตรงกับโปรแกรมที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นบน Matlab จึงช่วยลดขั้นตอนต่างๆลงไปมาก แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ใช้แสงเลเซอร์แบบเส้นความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ส่วนอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุเป็นสายพานลำเลียงใช้มอเตอร์กระแสสลับหนึ่งเฟสเป็นตัวขับเคลื่อนสายพานลำเลียง และควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยการใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับมอเตอร์หนึ่งเฟสที่ขับเคลื่อนสายพานลำเลียง การสอบเทียบระบบใช้แผ่นตารางหมากรุกขาวดำซึ่งแต่ละช่องของตารางมีขนาด 30×30 มิลลิเมตร

5.2 การทดสอบผลของการสอบเทียบโดยการใช้จุดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุด

การคำนวณเพื่อประมาณค่าของโสมิกราฟีฟิทรานส์ฟอร์มเมตริกซ์ที่กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมาซึ่งใช้ความสัมพันธ์ของจุดที่ร่วมกันในระบบพิกัดจริง และในระบบพิกัดภาพอย่างน้อย 4 จุด (≥ 4) ในการคำนวณค่าของค่าของโสมิกราฟีฟิทรานส์ฟอร์มเมตริกซ์หรือการสอบเทียบนั่นเอง โดยการคำนวณค่าจะเป็นการประมาณค่าจากจุดที่สัมพันธ์กันที่นำไปใช้ในการสอบเทียบ ถ้ายังใช้จุดในการสอบเทียบมากขึ้นการประมาณค่าของโสมิกราฟีฟิทรานส์ฟอร์มเมตริกซ์ก็จะความแม่นยำ

เอ็กสาร์ทเป็นเอ็กสาร์ทสิ่งมีชีวิตที่รักการแข่งในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักวิทยาศาสตร์ได้พบประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิ่งขึ้น ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบความแม่นยำของการวัดที่ได้จากการสอบเทียบโดยใช้จุดในการสอบเทียบจำนวน 4 จุดเปรียบเทียบกับการใช้จุดในการสอบเทียบ 20 จุด ซึ่งการทดลองจะเป็นการวัดขนาดความกว้าง และความยาวของตารางหมากรุกในแต่ละด้านของตารางซึ่งตารางที่นำมาทดสอบจะมีขนาด 30×30 มิลลิเมตรในแต่ละช่องและมีจำนวน 9 ช่องในหนึ่งภาพ โดยจะใช้จำนวนภาพทั้งหมด 6 ภาพ ดังนั้นจุดทดสอบของความกว้าง และความยาวทั้งหมดของตารางจะนำมาทดสอบวัดขนาด คือ 216 จุด ภาพที่ใช้ในการทดสอบวัดขนาด และใช้ในการสอบเทียบจะใช้ภาพที่มีความละเอียดของภาพ 8 เมกะพิกเซล ซึ่งรูปที่ 5.1 แสดงภาพของตารางที่นำมาสอบเทียบ และการกำหนดแต่ละจุดในการสอบเทียบ



รูปที่ 5.1 (ก) การสอบเทียบการ โดยใช้จำนวนจุดในการสอบเทียบ 4 จุด (ข) การสอบเทียบโดยการ ใช้จำนวนจุดในการสอบเทียบ 20 จุด

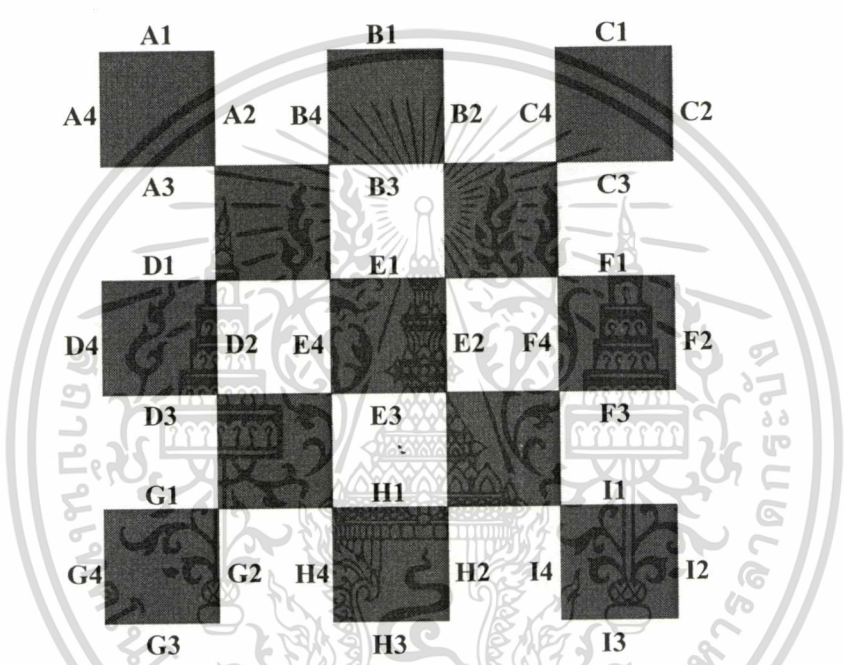
จากการสอบเทียบโดยใช้จุดในการสอบเทียบจำนวน 4 จุด และการใช้จุดในการสอบเทียบ 20 จุดทำให้ได้ค่าของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมตริกซ์ ดังที่แสดงในสมการที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ

$$H_{4Point_Cal.} = \begin{bmatrix} -0.001525766 & -0.000514865 & 0.679666822 \\ -0.000053845 & -0.002297695 & 0.733459316 \\ -0.000000775 & -0.000007050 & -0.009086660 \end{bmatrix} \tag{5.1}$$

$$H_{20Point_Cal.} = \begin{bmatrix} -0.001527036 & -0.000516338 & 0.679556406 \\ -0.000052588 & -0.002300604 & 0.733561387 \\ -0.000000782 & -0.000007053 & -0.009104313 \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ค่าของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมตริกซ์จากการสอบเทียบโดยใช้จุดในการสอบเทียบจำนวน 4 จุด และการใช้จุดในการสอบเทียบ 20 จุด ขั้นตอนต่อไปเป็นการวัดขนาดความกว้าง และความยาวโดยคำนวณหาระยะทางระหว่างจุดสองจุดที่เป็นมุมของตารางแต่ละด้าน ซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดได้ด้วยการใช้สมการที่ 4.1 โดยจะกำหนดจุดแต่ละจุดของบริเวณมุมจากตารางที่ใช้ทดสอบ และใช้หลักการหามุมของแฮร์ลิส (Harris Corner Detector) [18] เพื่อเป็นการกำหนดจุดที่เป็นมุมจริงของตารางในแต่ละช่องของตารางจำนวน 9 ช่องจากภาพทั้งหมด 6 ภาพ โดยกำหนดให้ช่องในแต่ละภาพเป็นตัวอักษร $A_i - I_i$ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 5.2



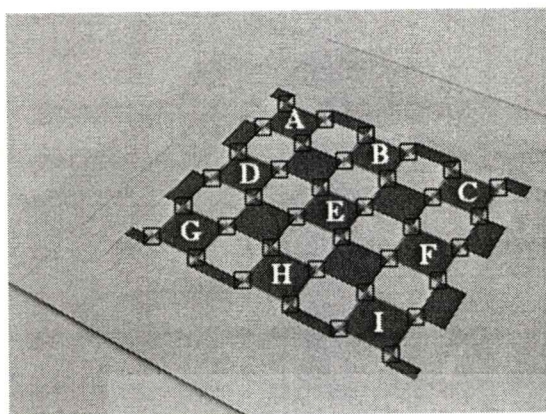
รูปที่ 5.2 จุดทดสอบที่จะทำการทดลองวัดขนาดในด้านแต่ละด้านของตารางหมากรุก

ผลที่ได้จากการวัดขนาดของทั้ง 6 ภาพจะแสดงในตารางที่ 5.1 – 5.6 โดยแสดงค่าที่วัดได้จากการสอบเทียบด้วยจำนวนจุดในการสอบเทียบ 4 จุด และ 20 จุด นอกจากนั้นยังแสดงผลของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Absolute Error) และค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative Error) เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการวัดขนาดของตารางซึ่งค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ และค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์สามารถหาได้โดย

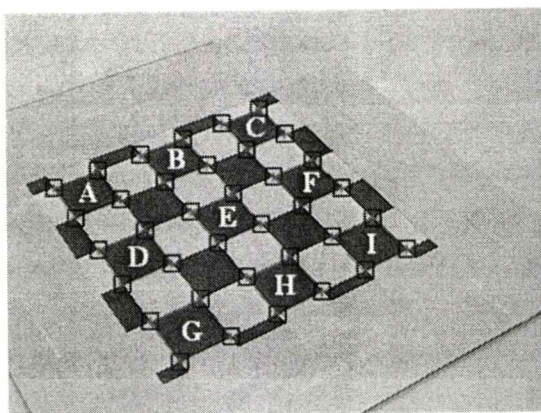
$$\text{ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์} = | \text{ขนาดของตารางที่วัดได้} - \text{ขนาดจริงของตารางจริง} |$$

$$\text{ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์} = (\text{ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์} / \text{ขนาดจริงของตาราง}) \times 100$$

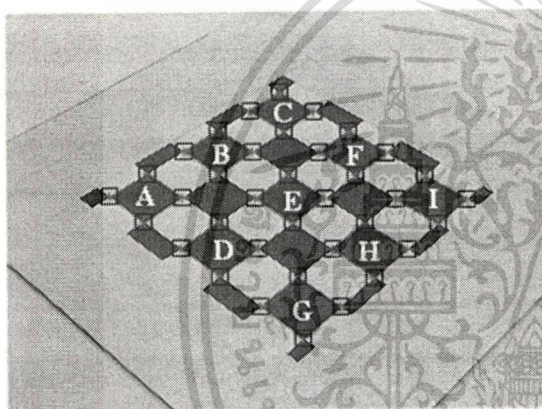
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



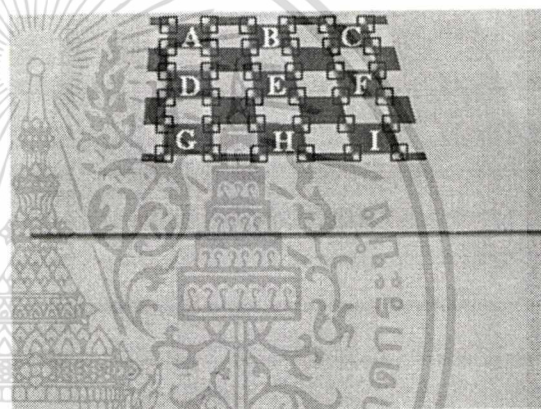
(ก)



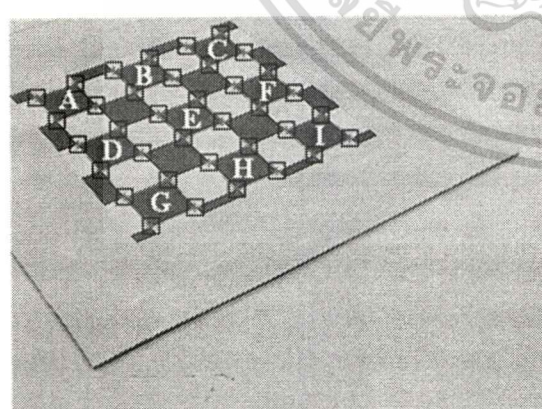
(ข)



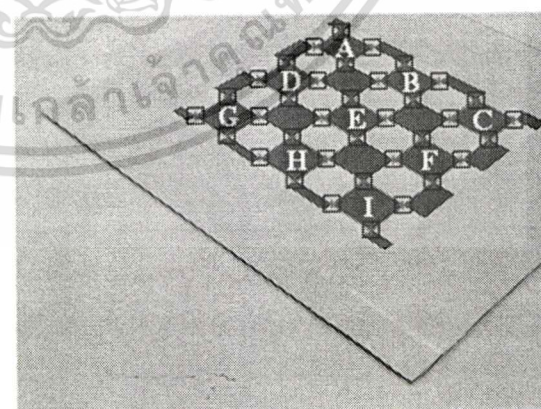
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 5.3 การวัดขนาดในแต่ละด้านของตารางทั้ง 6 ภาพที่นำมาใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ผลลัพธ์และค่าความผิดพลาดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุดจากภาพทดสอบที่ 1

Test Point	4 Point Cal.			20 Point Cal.		
	Measurement	Absolute Error	Relative Error	Measurement	Absolute Error	Relative Error
	(mm.)	(mm.)	(%)	(mm.)	(mm.)	(%)
A1	30.024	0.024	0.07903	30.017	0.017	0.05676
A2	30.208	0.208	0.69192	30.203	0.203	0.67760
A3	29.960	0.040	0.13353	29.956	0.044	0.14506
A4	30.077	0.077	0.25667	30.071	0.071	0.23737
B1	29.951	0.049	0.16344	29.950	0.050	0.16531
B2	30.216	0.216	0.71916	30.214	0.214	0.71479
B3	29.921	0.079	0.26221	29.924	0.076	0.25371
B4	30.249	0.249	0.83140	30.247	0.247	0.82203
C1	30.003	0.003	0.01069	30.009	0.009	0.02928
C2	30.095	0.095	0.31507	30.096	0.096	0.32068
C3	29.933	0.067	0.22352	29.942	0.058	0.19497
C4	30.235	0.235	0.78195	30.235	0.235	0.78276
D1	30.081	0.081	0.27064	30.081	0.081	0.26935
D2	30.152	0.152	0.50772	30.161	0.161	0.53522
D3	29.920	0.080	0.26598	29.923	0.077	0.25687
D4	30.180	0.180	0.59856	30.186	0.186	0.62132
E1	29.913	0.087	0.28914	29.919	0.081	0.26987
E2	30.056	0.056	0.18543	30.067	0.067	0.22325
E3	29.978	0.022	0.07412	29.987	0.013	0.04463
E4	30.155	0.155	0.51701	30.165	0.165	0.54969
F1	29.988	0.012	0.04058	30.000	0.000	0.00082
F2	30.104	0.104	0.34810	30.119	0.119	0.39598
F3	29.888	0.112	0.37241	29.903	0.097	0.32251
F4	30.155	0.155	0.51711	30.168	0.168	0.56028
G1	29.875	0.125	0.41772	29.881	0.119	0.39816
G2	29.769	0.231	0.76980	29.790	0.210	0.70132
G3	29.834	0.166	0.55290	29.843	0.157	0.52404
G4	30.188	0.188	0.62719	30.208	0.208	0.69183
H1	29.847	0.153	0.51051	29.859	0.141	0.47073
H2	30.091	0.091	0.30229	30.115	0.115	0.38232
H3	29.977	0.023	0.07658	29.992	0.008	0.02609
H4	30.059	0.059	0.19702	30.081	0.081	0.27152
I1	29.909	0.091	0.30378	29.927	0.073	0.24340
I2	30.057	0.057	0.18927	30.084	0.084	0.27932
I3	29.975	0.025	0.08322	29.996	0.004	0.01248
I4	30.121	0.121	0.40436	30.147	0.147	0.48927

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ผลลัพธ์และค่าความผิดพลาดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุดจากภาพทดสอบที่ 2

Test Point	4 Point Cal.			20 Point Cal.		
	Measurement	Absolute Error	Relative Error	Measurement	Absolute Error	Relative Error
	(mm.)	(mm.)	(%)	(mm.)	(mm.)	(%)
A1	30.120	0.120	0.40064	30.129	0.129	0.42857
A2	30.232	0.232	0.77334	30.241	0.241	0.80221
A3	30.111	0.111	0.36872	30.122	0.122	0.40558
A4	30.206	0.206	0.68750	30.217	0.217	0.72351
B1	30.043	0.043	0.14216	30.042	0.042	0.14101
B2	30.163	0.163	0.54258	30.167	0.167	0.55689
B3	30.004	0.004	0.01213	30.006	0.006	0.02008
B4	30.234	0.234	0.77847	30.240	0.240	0.79998
C1	29.929	0.071	0.23549	29.920	0.080	0.26553
C2	29.973	0.027	0.09008	29.973	0.027	0.09027
C3	29.994	0.006	0.01978	29.988	0.012	0.04076
C4	30.103	0.103	0.34237	30.105	0.105	0.34951
D1	30.211	0.211	0.70452	30.225	0.225	0.75079
D2	30.093	0.093	0.30952	30.113	0.113	0.37505
D3	30.047	0.047	0.15722	30.064	0.064	0.21253
D4	30.180	0.180	0.59935	30.202	0.202	0.67189
E1	29.854	0.146	0.48678	29.859	0.141	0.46991
E2	30.006	0.006	0.01882	30.021	0.021	0.06938
E3	29.961	0.039	0.13074	29.969	0.031	0.10445
E4	30.152	0.152	0.50525	30.169	0.169	0.56359
F1	29.855	0.145	0.48277	29.852	0.148	0.49486
F2	30.058	0.058	0.19187	30.068	0.068	0.22823
F3	29.903	0.097	0.32435	29.902	0.098	0.32743
F4	30.060	0.060	0.19871	30.073	0.073	0.24239
G1	30.085	0.085	0.28441	30.105	0.105	0.34918
G2	29.978	0.022	0.07390	30.008	0.008	0.02697
G3	30.103	0.103	0.34201	30.125	0.125	0.41625
G4	30.093	0.093	0.31003	30.126	0.126	0.41872
H1	29.884	0.116	0.38505	29.895	0.105	0.35006
H2	30.011	0.011	0.03748	30.037	0.037	0.12416
H3	30.045	0.045	0.14936	30.058	0.058	0.19393
H4	30.130	0.130	0.43465	30.159	0.159	0.52945
I1	30.106	0.106	0.35212	30.107	0.107	0.35815
I2	30.016	0.016	0.05468	30.038	0.038	0.12673
I3	30.185	0.185	0.61737	30.190	0.190	0.63254
I4	30.064	0.064	0.21337	30.088	0.088	0.29299

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ผลลัพธ์และค่าความผิดพลาดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุดจากภาพทดสอบที่ 3

Test Point	4 Point Cal.			20 Point Cal.		
	Measurement	Absolute Error	Relative Error	Measurement	Absolute Error	Relative Error
	(mm.)	(mm.)	(%)	(mm.)	(mm.)	(%)
A1	29.983	0.017	0.05743	29.995	0.005	0.01780
A2	30.182	0.182	0.60737	30.188	0.188	0.62508
A3	29.982	0.018	0.06165	29.996	0.004	0.01474
A4	30.303	0.303	1.01054	30.311	0.311	1.03755
B1	29.958	0.042	0.13985	29.959	0.041	0.13676
B2	30.179	0.179	0.59715	30.179	0.179	0.59646
B3	29.977	0.023	0.07601	29.980	0.020	0.06595
B4	30.149	0.149	0.49556	30.151	0.151	0.50412
C1	30.044	0.044	0.14764	30.034	0.034	0.11384
C2	29.978	0.022	0.07340	29.972	0.028	0.09267
C3	30.202	0.202	0.67430	30.194	0.194	0.64758
C4	30.139	0.139	0.46320	30.136	0.136	0.45334
D1	29.956	0.044	0.14545	29.973	0.027	0.09140
D2	30.096	0.096	0.32085	30.110	0.110	0.36689
D3	30.015	0.015	0.04982	30.033	0.033	0.11108
D4	30.115	0.115	0.38472	30.132	0.132	0.44021
E1	29.954	0.046	0.15267	29.959	0.041	0.13547
E2	30.121	0.121	0.40409	30.130	0.130	0.43186
E3	29.980	0.020	0.06831	29.987	0.013	0.04412
E4	30.091	0.091	0.30418	30.102	0.102	0.34121
F1	30.061	0.061	0.20180	30.055	0.055	0.18208
F2	30.093	0.093	0.31145	30.096	0.096	0.32061
F3	30.159	0.159	0.52962	30.155	0.155	0.51687
F4	30.075	0.075	0.24847	30.080	0.080	0.26708
G1	29.992	0.008	0.02797	30.012	0.012	0.04009
G2	30.139	0.139	0.46195	30.161	0.161	0.53663
G3	29.912	0.088	0.29254	29.935	0.065	0.21751
G4	30.173	0.173	0.57707	30.198	0.198	0.66081
H1	29.904	0.096	0.31941	29.913	0.087	0.28846
H2	30.009	0.009	0.03055	30.026	0.026	0.08637
H3	29.964	0.036	0.12061	29.975	0.025	0.08208
H4	30.168	0.168	0.55874	30.187	0.187	0.62429
I1	30.113	0.113	0.37663	30.111	0.111	0.37114
I2	30.141	0.141	0.46869	30.152	0.152	0.50633
I3	30.103	0.103	0.34251	30.103	0.103	0.34391
I4	30.069	0.069	0.23087	30.083	0.083	0.27767

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ผลลัพธ์และค่าความผิดพลาดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุดจากภาพทดสอบที่ 4

Test Point	4 Point Cal.			20 Point Cal.		
	Measurement	Absolute Error	Relative Error	Measurement	Absolute Error	Relative Error
	(mm.)	(mm.)	(%)	(mm.)	(mm.)	(%)
A1	30.204	0.204	0.68002	30.180	0.180	0.60079
A2	30.179	0.179	0.59706	30.157	0.157	0.52202
A3	30.119	0.119	0.39752	30.099	0.099	0.33011
A4	30.181	0.181	0.60267	30.159	0.159	0.52940
B1	30.272	0.272	0.90607	30.246	0.246	0.81953
B2	30.470	0.470	1.56569	30.446	0.446	1.48635
B3	30.171	0.171	0.56886	30.148	0.148	0.49454
B4	30.059	0.059	0.19596	30.036	0.036	0.11957
C1	30.238	0.238	0.79388	30.210	0.210	0.70030
C2	30.348	0.348	1.15849	30.323	0.323	1.07546
C3	30.098	0.098	0.32769	30.074	0.074	0.24608
C4	30.462	0.462	1.53888	30.437	0.437	1.45770
D1	30.126	0.126	0.42009	30.109	0.109	0.36427
D2	30.191	0.191	0.63771	30.183	0.183	0.60925
D3	30.094	0.094	0.31275	30.081	0.081	0.26863
D4	30.282	0.282	0.93895	30.274	0.274	0.91212
E1	30.033	0.033	0.11031	30.014	0.014	0.04793
E2	30.093	0.093	0.30888	30.083	0.083	0.27714
E3	30.026	0.026	0.08671	30.011	0.011	0.03581
E4	30.283	0.283	0.94467	30.274	0.274	0.91449
F1	30.128	0.128	0.42783	30.107	0.107	0.35806
F2	30.406	0.406	1.35461	30.396	0.396	1.31862
F3	30.042	0.042	0.13905	30.024	0.024	0.08124
F4	30.342	0.342	1.13967	30.332	0.332	1.10573
G1	30.079	0.079	0.26451	30.070	0.070	0.23194
G2	30.152	0.152	0.50743	30.158	0.158	0.52552
G3	30.029	0.029	0.09741	30.023	0.023	0.07639
G4	30.047	0.047	0.15690	30.053	0.053	0.17648
H1	30.139	0.139	0.46230	30.127	0.127	0.42292
H2	29.931	0.069	0.22881	29.936	0.064	0.21436
H3	30.094	0.094	0.31236	30.085	0.085	0.28451
H4	30.198	0.198	0.65896	30.203	0.203	0.67536
I1	30.075	0.075	0.25025	30.061	0.061	0.20400
I2	30.252	0.252	0.83948	30.255	0.255	0.85062
I3	30.122	0.122	0.40546	30.111	0.111	0.37089
I4	30.149	0.149	0.49692	30.153	0.153	0.50973

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ผลลัพธ์และค่าความผิดพลาดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุดจากภาพทดสอบที่ 5

Test Point	4 Point Cal.			20 Point Cal.		
	Measurement	Absolute Error	Relative Error	Measurement	Absolute Error	Relative Error
	(mm.)	(mm.)	(%)	(mm.)	(mm.)	(%)
A1	30.242	0.242	0.80713	30.238	0.238	0.79342
A2	30.508	0.508	1.69345	30.496	0.496	1.65257
A3	30.165	0.165	0.55139	30.164	0.164	0.54647
A4	30.534	0.534	1.78048	30.524	0.524	1.74701
B1	30.087	0.087	0.29052	30.074	0.074	0.24659
B2	30.345	0.345	1.14859	30.328	0.328	1.09251
B3	30.082	0.082	0.27496	30.072	0.072	0.23979
B4	30.322	0.322	1.07403	30.308	0.308	1.02572
C1	29.997	0.003	0.00839	29.975	0.025	0.08299
C2	30.251	0.251	0.83671	30.230	0.230	0.76532
C3	30.270	0.270	0.89993	30.250	0.250	0.83348
C4	30.323	0.323	1.07537	30.303	0.303	1.01165
D1	30.171	0.171	0.57002	30.172	0.172	0.57406
D2	30.228	0.228	0.75946	30.226	0.226	0.75406
D3	30.250	0.250	0.83492	30.254	0.254	0.84829
D4	30.539	0.539	1.79598	30.540	0.540	1.79840
E1	30.211	0.211	0.70299	30.203	0.203	0.67652
E2	30.221	0.221	0.73550	30.214	0.214	0.71500
E3	30.171	0.171	0.56953	30.166	0.166	0.55183
E4	30.234	0.234	0.78052	30.230	0.230	0.76765
F1	30.171	0.171	0.56979	30.154	0.154	0.51244
F2	30.324	0.324	1.07992	30.313	0.313	1.04381
F3	30.348	0.348	1.15995	30.333	0.333	1.11103
F4	30.250	0.250	0.83286	30.241	0.241	0.80471
G1	30.083	0.083	0.27709	30.090	0.090	0.29877
G2	30.160	0.160	0.53177	30.169	0.169	0.56186
G3	30.012	0.012	0.03952	30.021	0.021	0.07032
G4	30.366	0.366	1.22092	30.378	0.378	1.25875
H1	29.863	0.137	0.45752	29.860	0.140	0.46638
H2	30.022	0.022	0.07471	30.027	0.027	0.08914
H3	30.243	0.243	0.81144	30.244	0.244	0.81171
H4	30.279	0.279	0.92975	30.286	0.286	0.95272
I1	30.006	0.006	0.02027	29.994	0.006	0.01930
I2	30.097	0.097	0.32374	30.097	0.097	0.32296
I3	30.265	0.265	0.88337	30.256	0.256	0.85240
I4	30.216	0.216	0.71948	30.218	0.218	0.72678

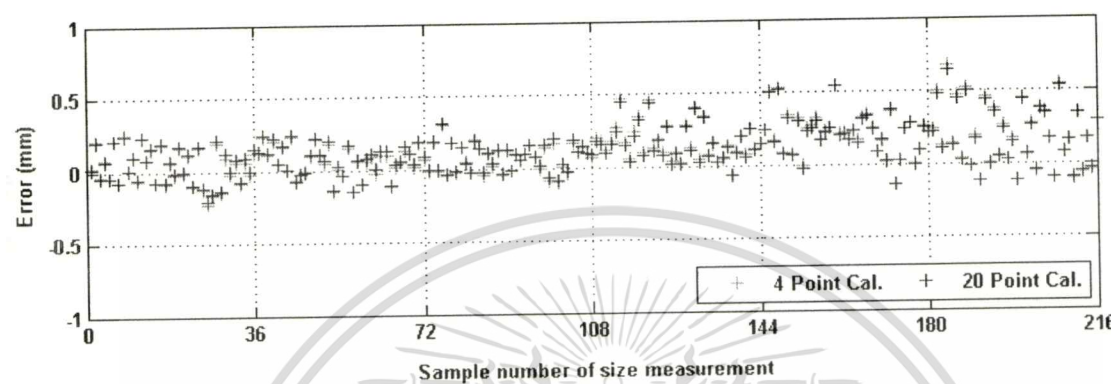
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 ผลลัพธ์และค่าความผิดพลาดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุดจากภาพทดสอบที่ 6

Test Point	4 Point Cal.			20 Point Cal.		
	Measurement	Absolute Error	Relative Error	Measurement	Absolute Error	Relative Error
	(mm.)	(mm.)	(%)	(mm.)	(mm.)	(%)
A1	30.242	0.242	0.80601	30.223	0.223	0.74386
A2	30.504	0.504	1.67911	30.476	0.476	1.58542
A3	30.126	0.126	0.41930	30.110	0.110	0.36680
A4	30.678	0.678	2.25988	30.647	0.647	2.15812
B1	30.143	0.143	0.47646	30.133	0.133	0.44371
B2	30.467	0.467	1.55782	30.444	0.444	1.47892
B3	30.036	0.036	0.12062	30.029	0.029	0.09725
B4	30.525	0.525	1.74871	30.499	0.499	1.66235
C1	29.989	0.011	0.03691	29.988	0.012	0.04064
C2	30.187	0.187	0.62264	30.168	0.168	0.55881
C3	29.879	0.121	0.40181	29.881	0.119	0.39678
C4	30.457	0.457	1.52257	30.435	0.435	1.45109
D1	30.003	0.003	0.01047	29.990	0.010	0.03254
D2	30.372	0.372	1.23965	30.355	0.355	1.18378
D3	30.061	0.061	0.20235	30.051	0.051	0.16857
D4	30.264	0.264	0.87945	30.245	0.245	0.81644
E1	30.030	0.030	0.10017	30.026	0.026	0.08613
E2	30.165	0.165	0.54913	30.152	0.152	0.50794
E3	29.881	0.119	0.39780	29.879	0.121	0.40303
E4	30.453	0.453	1.51129	30.439	0.439	1.46268
F1	30.060	0.060	0.20162	30.065	0.065	0.21630
F2	30.269	0.269	0.89716	30.261	0.261	0.87033
F3	29.942	0.058	0.19268	29.949	0.051	0.16911
F4	30.383	0.383	1.27522	30.372	0.372	1.24126
G1	30.353	0.353	1.17764	30.346	0.346	1.15293
G2	30.175	0.175	0.58196	30.169	0.169	0.56322
G3	29.907	0.093	0.31001	29.902	0.098	0.32555
G4	30.538	0.538	1.79313	30.530	0.530	1.76730
H1	30.080	0.080	0.26602	30.081	0.081	0.27033
H2	30.162	0.162	0.53922	30.161	0.161	0.53504
H3	29.894	0.106	0.35498	29.897	0.103	0.34188
H4	30.348	0.348	1.15917	30.344	0.344	1.14807
I1	29.932	0.068	0.22648	29.942	0.058	0.19335
I2	30.171	0.171	0.56887	30.174	0.174	0.57927
I3	29.952	0.048	0.15925	29.965	0.035	0.11722
I4	30.289	0.289	0.96454	30.290	0.290	0.96767

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.4 เป็นกราฟที่แสดงค่าความผิดพลาดของการวัดขนาดตาราง โดยเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับขนาดจริงของตาราง (30×30 มิลลิเมตร) จากจุดทดสอบทั้งหมดของทั้ง 6 ภาพที่นำมาทดสอบ ซึ่งจุดสีเขียวเป็นค่าความผิดพลาดจากการใช้จุดในการสอบเทียบ 4 จุด และจุดสีน้ำเงินเป็นค่าความผิดพลาดจากการใช้จุดในการสอบเทียบ 20 จุด



รูปที่ 5.4 กราฟค่าความผิดพลาดของการใช้จุดในการสอบเทียบ 4 จุดและ 20 จุด

ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาเป็นสรุปผลของความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดขนาดของตารางได้ในตารางที่ 5.7 ซึ่งประกอบด้วยค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์สูงสุด และต่ำสุด ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง รวมทั้งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เป็นตัวบอกถึงการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ โดยจากตารางที่ 5.7 ผลของการสอบเทียบด้วยการใช้จำนวนจุดในการสอบเทียบ 4 จุด ซึ่งมีค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์สูงสุด และต่ำสุดจะมีค่า 2.260% และ 0.008% ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยมีค่า 0.515% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์มีค่า 0.424% ส่วนการสอบเทียบด้วยการใช้จำนวนจุดในการสอบเทียบ 20 จุด ซึ่งมีค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์สูงสุด และต่ำสุดจะมีค่า 2.158% และ 0.001% ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยมีค่า 0.517% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์มีค่า 0.410%

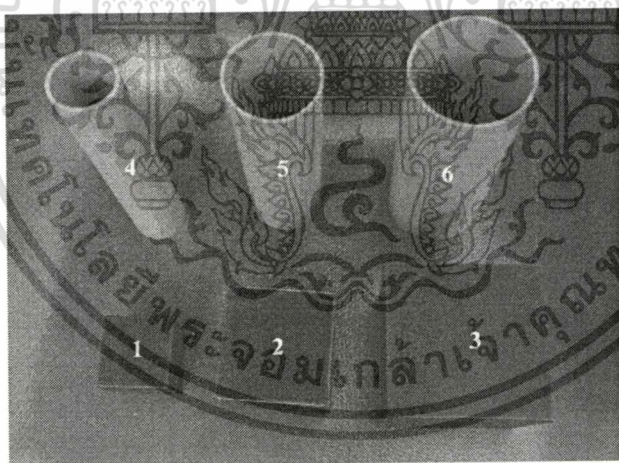
ตารางที่ 5.7 ตารางสรุปผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดขนาดของตารางจากจุดทดสอบทั้งหมด

Relative Error (%)	Calibration using 4 Point	Calibration using 20 Point
Maximum	2.260	2.158
Minimum	0.008	0.001
Average	0.515	0.507
Std. Deviation	0.424	0.410

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทดสอบวัดขนาด พื้นที่หน้าตัดและพื้นที่รวมเชิงปริมาตรจากวัตถุตัวอย่าง

ในการทดลองนี้เป็นการทดสอบเพื่อทำการวัดขนาด พื้นที่หน้าตัด และพื้นที่รวมเชิงปริมาตร ซึ่งจะเป็นการทดสอบวัดขนาดโดยใช้วัตถุตัวอย่าง คือ กล่องรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส และท่อพีวีซีทรงกระบอกซึ่งมีขนาดแตกต่างกันของแต่ละรูปทรง โดยใช้ขนาดในแต่ละรูปทรงที่แตกต่างกันอย่างละ 3 ขนาด และใช้เวอร์เนียร์เป็นตั้วัดขนาดทั้งความกว้างความยาว และความสูงของวัตถุตัวอย่างไว้อ้างอิง และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีการวัดขนาดวัตถุที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ และทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทั้งสองวิธีเพื่อคำนวณหาความผิดพลาด เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งในการทดลองจะทำการวัดขนาดของวัตถุด้วยโปรแกรมที่ออกแบบ และพัฒนาขึ้นโดยประมวลผลจากข้อมูลภาพที่เก็บบันทึกการเคลื่อนที่ของวัตถุขณะตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์ซึ่งเป็นรูปแบบไฟล์วีดีโอ (AVI) ที่มีความละเอียด 640×480 พิกเซล และในการทดลองจะใช้การสอบเทียบโดยใช้จำนวนจุดในการสอบเทียบ 4 จุด ซึ่งกำหนดให้ความละเอียดในการวัดความยาวของวัตถุที่ 1 มิลลิเมตรต่อเฟรม (ความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ 30 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่ความเร็วในการเก็บภาพของกล้อง 30 เฟรมต่อวินาที)



รูปที่ 5.5 วัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและรูปทรงกระบอกที่ใช้เป็นวัตถุตัวอย่างในการทดลอง

ในการทดลองจะทำการวัดขนาดของวัตถุทั้งความกว้างความยาว และความสูงรวมทั้งพื้นที่หน้าตัด และพื้นที่รวมเชิงปริมาตรจากวัตถุ ซึ่งจะทำให้การวัดด้วยเวอร์เนียร์เพื่อเป็นค่าที่ใช้ในการอ้างอิงเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยระบบวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอ ในส่วนของพื้นที่หน้าตัด และพื้นที่รวมเชิงปริมาตรจะเป็นการนำค่าความกว้าง ความยาว และความสูงจากการวัดด้วยเวอร์เนียร์มาทำการคำนวณเปรียบเทียบ โดยใช้ทฤษฎีการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด และปริมาตรของวัตถุที่เป็นรูปทรงเรขาคณิต (รูปทรงสี่เหลี่ยม และรูปทรงกระบอก) แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการวัดขนาด พื้นที่หน้าตัด และพื้นที่รวมเชิงปริมาตรที่ได้จากการทดลองจะแสดงในตารางที่ 5.8 – 5.12 โดยแสดงค่าที่วัดได้จากการใช้เวอร์เนียเปรียบเทียบกับระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอ

ตารางที่ 5.8 ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดความหนาของวัตถุตัวอย่าง

Object No.	Height from CVS (mm)	Height from vernier (mm)	Absolute Error (mm)	Relative Error (%)
1	40.718	41.400	0.682	1.647
2	58.871	60.350	1.479	2.450
3	80.103	80.450	0.347	0.431
4	34.118	34.100	0.018	0.053
5	47.071	48.350	1.279	2.645
6	58.211	59.450	1.239	2.083

ตารางที่ 5.9 ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดความกว้างของวัตถุตัวอย่าง

Object No.	Width from CVS (mm)	Width from vernier (mm)	Absolute Error (mm)	Relative Error (%)
1	40.452	40.100	0.352	0.877
2	61.705	60.500	1.205	1.992
3	79.764	80.100	0.336	0.420
4	33.896	34.100	0.204	0.598
5	47.208	48.350	1.142	2.363
6	58.377	59.450	1.073	1.806

ตารางที่ 5.10 ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดความยาวของวัตถุตัวอย่าง

Object No.	Length from CVS (mm)	Length from vernier (mm)	Absolute Error (mm)	Relative Error (%)
1	42.000	41.500	0.500	1.205
2	60.000	60.800	0.800	1.316
3	83.000	80.750	2.250	2.786
4	156.000	154.400	1.600	1.036
5	156.000	152.600	3.400	2.228
6	155.000	153.050	1.950	1.274

ตารางที่ 5.11 ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดพื้นที่หน้าตัดของวัตถุตัวอย่าง

Object No.	Area from CVS (cm ²)	Area from Calculation (cm ²)	Absolute Error (cm ²)	Relative Error (%)
1	16.474	16.602	0.128	0.774
2	36.322	36.633	0.311	0.850
3	63.297	64.841	1.544	2.381
4	8.356	9.128	0.772	8.453
5	15.981	18.35	2.369	12.909
6	24.531	27.74	3.209	11.566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12 ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดพื้นที่เชิงปริมาตรของวัตถุตัวอย่าง

Object No.	Volume from CVS (cm ³)	Volume from Calculation (cm ³)	Absolute Error (cm ³)	Relative Error (%)
1	69.189	68.896	0.293	0.425
2	217.929	222.727	4.798	2.154
3	497.054	523.591	26.537	5.068
4	128.689	140.940	12.251	8.692
5	244.512	260.040	15.528	5.971
6	375.332	424.626	49.294	11.609

ตารางที่ 5.13 ตารางสรุปผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดขนาดวัตถุตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

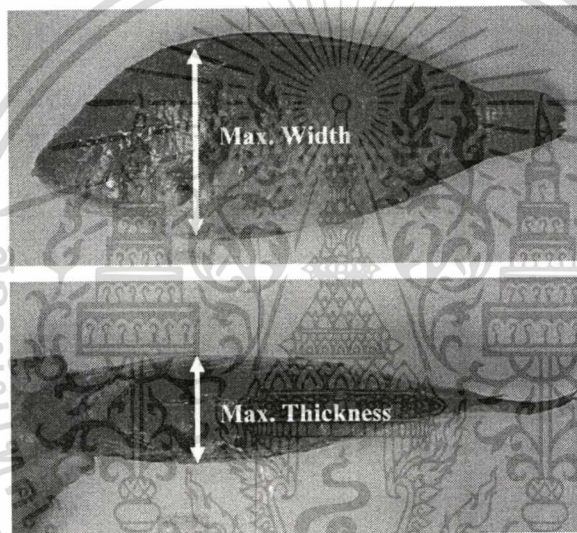
Relative Error (%)	Height	Width	Length	Area	Volume
Maximum	2.645	2.363	2.786	12.909	11.609
Minimum	0.053	0.420	1.036	0.774	0.425
Average	1.552	1.342	1.641	6.156	5.653
STD.	1.077	0.812	0.700	5.505	4.116

ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาเป็นสรุปผลของความผิดพลาดสัมพัทธ์ได้ในตารางที่ 5.13 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีการที่ได้นำเสนอ เมื่อพิจารณาความหนา ความกว้าง และความยาวจะมีค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์สูงสุดประมาณ 2.645%, 2.363% และ 2.786% ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ต่ำสุดประมาณ 0.053%, 0.420% และ 1.036% ตามลำดับ โดยเมื่อนำมาคูณค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยของความหนา ความกว้าง และความยาวมีค่าประมาณ 1.552%, 1.342% และ 1.641% ตามลำดับ ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์มีค่าประมาณ 1.077%, 0.812% และ 0.700% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่หน้าตัด และพื้นที่เชิงปริมาตรจะมีค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์สูงสุดประมาณ 12.909% และ 11.609% ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ต่ำสุดประมาณ 0.774% และ 0.425% ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 6.156% และ 5.653% ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือการกระจายตัวของความผิดพลาดสัมพัทธ์มีค่าประมาณ 5.505% และ 4.116%

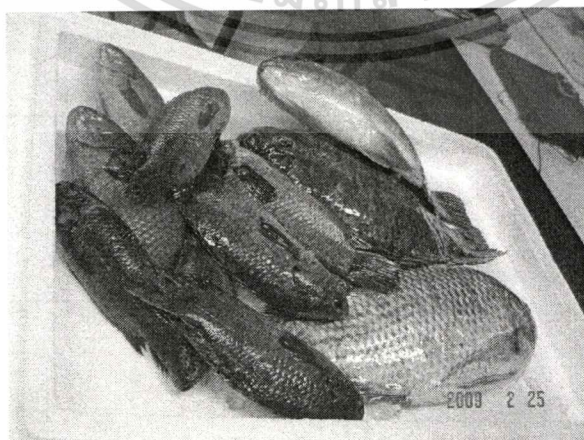
5.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดขนาดของปลานิล

การทดลองนี้เป็นการทดสอบผลของการนำระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอไปประยุกต์ใช้กับการวัดขนาดของปลานิล ซึ่งรูปทรงของปลานิลพื้นที่หน้าตัดจะเป็นลักษณะรูปทรงวงรี ดังนั้นจึงสามารถนำระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่นำเสนอไปประยุกต์กับการคัดแยกขนาดของปลานิลได้ โดยเป็นการวัดความกว้าง และความหนาสูงสุดของปลานิลซึ่งสามารถนำความกว้าง และความหนามาคำนวณเป็นขนาดพื้นที่หน้าตัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสุดของปลานิลเพื่อใช้ในการคัดแยกขนาดของปลานิล ตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นปลานิลซึ่งมีขนาดแตกต่างกัน 13 ขนาด โดยทำการวัดขนาดความกว้างและความหนาของปลานิลที่จะนำมาทดสอบด้วยเวอร์เนียเพื่อใช้เปรียบเทียบกับระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอ และทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทั้งสองวิธีเพื่อคำนวณหาค่าความผิดพลาดเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการนำระบบที่นำเสนอมาประยุกต์ใช้ในการวัดขนาดของปลานิล ซึ่งในการทดลองเป็นการประมวลผลจากข้อมูลภาพที่เก็บบันทึกการเคลื่อนที่ของปลานิลขณะตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์ซึ่งเป็นรูปแบบไฟล์วีดีโอ (AVI) ที่มีความละเอียด 640×480 พิกเซล และในการทดลองจะทำการสอบเทียบโดยใช้จำนวนจุดในการสอบเทียบ 4 จุด โดยควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของปลานิล 30 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.6 ความกว้างและความหนาสูงสุดที่ใช้คำนวณพื้นที่หน้าตัดของการวัดขนาดของปลานิล



รูปที่ 5.7 ปลานิลขนาดแตกต่างกัน 13 ขนาดที่นำมาใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดขนาดความกว้าง และความยาวของปลานิลที่ได้จากการทดลองจะแสดงในตารางที่ 5.14 และตารางที่ 5.15 ตามลำดับ ซึ่งแสดงค่าที่วัดได้จากการวัดโดยใช้เวอร์เนียเปรียบเทียบกับระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอ และในตารางที่ 5.16 เป็นการนำค่าความกว้าง และความยาวของปลานิลจากการวัดโดยใช้เวอร์เนียกับระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุมาคำนวณเป็นขนาดพื้นที่หน้าตัด และเปรียบเทียบให้เห็นผลที่ได้จากทั้งสองวิธี

ตารางที่ 5.14 ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการวัดความกว้างของปลานิล

Fish No.	Width from Vernier (mm)	Width from CVS (mm)	Absolute Error (mm)	Relative Error (%)
1	94.17	110.99	16.82	17.861
2	95.05	105.02	9.97	10.489
3	95.22	108.40	13.18	13.842
4	105.50	116.04	10.54	9.991
5	131.84	113.88	17.96	13.623
6	47.81	47.80	0.01	0.021
7	45.65	45.70	0.05	0.110
8	51.44	44.69	6.75	13.122
9	39.56	45.68	6.12	15.470
10	54.76	47.90	6.86	12.527
11	48.01	49.33	1.32	2.749
12	42.82	48.45	5.63	13.148
13	42.85	47.59	4.74	11.062

ตารางที่ 5.15 ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการวัดความหนาของปลานิล

Fish No.	Thickness from Vernier (mm)	Thickness from CVS (mm)	Absolute Error (mm)	Relative Error (%)
1	41.72	44.52	2.80	6.711
2	44.58	47.82	3.24	7.268
3	40.88	43.89	3.01	7.363
4	45.98	48.81	2.83	6.155
5	50.89	48.27	2.62	5.148
6	28.94	30.96	2.02	6.980
7	26.93	28.88	1.95	7.241
8	32.72	32.98	0.26	0.795
9	22.39	21.49	0.90	4.020
10	32.69	35.46	2.77	8.474
11	28.17	30.46	2.29	8.129
12	27.61	27.40	0.21	0.761
13	23.67	24.78	1.11	4.689

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.16 ตารางแสดงผลความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการคำนวณพื้นที่หน้าตัดของปลานิล

Fish No.	Area from Calculation (cm ²)	Area from CVS (cm ²)	Absolute Error (cm ²)	Relative Error (%)
1	30.84	38.79	7.95	25.771
2	33.26	39.42	6.16	18.519
3	30.56	37.35	6.79	22.224
4	38.08	44.46	6.38	16.760
5	52.67	43.15	9.52	18.070
6	10.86	11.62	0.76	6.958
7	9.65	10.36	0.71	7.358
8	13.21	11.57	1.64	12.432
9	6.95	7.71	0.75	10.829
10	14.05	13.33	0.72	5.115
11	10.62	11.80	1.18	11.102
12	9.28	10.42	1.14	12.287
13	7.96	9.26	1.30	16.270

ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาสรุปผลของค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ได้ในตารางที่ 5.17 ซึ่งแสดงให้เห็นค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีการที่ได้นำเสนอ เมื่อพิจารณาค่าความกว้าง และความหนาจะมีค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์สูงสุดประมาณ 17.861% และ 8.474% ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ต่ำสุดประมาณ 0.021% และ 0.761% ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยของความกว้าง และความหนาประมาณ 10.309% และ 5.672% ตามลำดับ ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์มีค่าประมาณ 5.743% และ 2.528% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่หน้าตัดจะมีค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์สูงสุดประมาณ 25.771% ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ต่ำสุดประมาณ 5.115% ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 14.130% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดสัมพัทธ์มีค่าประมาณ 6.139%

ตารางที่ 5.17 ตารางสรุปผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดขนาดของปลาที่ได้จากการทดลอง

Relative Error (%)	Width	Thickness	Area
Maximum	17.861	8.474	25.771
Minimum	0.021	0.761	5.115
Average	10.309	5.672	14.130
STD.	5.743	2.528	6.139

5.4 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองในหัวข้อต่างๆทั้ง 3 การทดลอง คือ การทดสอบผลของการสอบเทียบโดยการใช้จำนวนจุดในการสอบเทียบ 4 จุดกับการใช้จำนวนจุดในการสอบเทียบ 20 จุด การทดสอบวัดเอกสาร์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด พื้นที่หน้าตัด และพื้นที่รวมเชิงปริมาตรจากวัตถุตัวอย่าง การทดลองสุดท้าย คือ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดขนาดของปลานิลสามารถจะสรุป และวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

จากการทดสอบผลของการสอบเทียบโดยใช้จุดในการสอบเทียบ 4 จุดกับการใช้จุดในการสอบเทียบ 20 จุด การใช้จุดในการสอบเทียบ 20 จุดผลที่ได้เมื่อดูจากค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์สูงสุด และต่ำสุดจะมีความแม่นยำในการวัดขนาดของตารางมากกว่าการใช้จุดในการสอบเทียบ 4 จุด โดยความแตกต่างที่ได้ไม่เกิน 0.1% ซึ่งถือว่าไม่ได้แตกต่างกันมากนัก ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยของการใช้จุดในการสอบเทียบ 4 จุดกับการใช้จุดในการสอบเทียบ 20 จุดความแตกต่างที่ได้ไม่เกิน 0.008% หากพิจารณาถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือการกระจายตัวของความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการใช้จุดในการสอบเทียบ 4 จุดกับการใช้จุดในการสอบเทียบ 20 จุด การใช้จุดในการสอบเทียบ 20 จุด จะมีการกระจายตัวของความผิดพลาดสัมพัทธ์น้อยกว่าการใช้จุดในการสอบเทียบ 4 จุด ซึ่งจะมีความแตกต่างกันประมาณ 0.014% ดังนั้นจากค่าความผิดพลาด และการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดที่กล่าวถึงอาจจะพูดได้ว่าทั้งการใช้จุดในการสอบเทียบ 20 จุดจะให้ความแม่นยำ และความเที่ยงตรงในการวัดดีกว่าการใช้จุดในการสอบเทียบ 4 จุด แต่การใช้จุดในการสอบเทียบมากโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดจากการกำหนดจุดในขั้นตอนของการสอบเทียบก็ยิ่งสูงขึ้นด้วย

ในการทดสอบระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอกับการวัดตัวอย่างที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม และทรงกระบอก ผลที่ได้จากการทดลองการวัดขนาดความกว้าง และความหนาของวัตถุจะมีความแม่นยำในวัดค่อนข้างดี โดยมีค่าความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็นค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์โดยเฉลี่ยของการวัดความกว้าง และความหนาของวัตถุประมาณ 1.342% และ 1.552% ตามลำดับ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือการกระจายตัวของความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการวัดความกว้าง และความหนามีค่าประมาณ 0.812% และ 1.077% ตามลำดับซึ่งจะมีการกระจายตัวของความผิดพลาดสัมพัทธ์น้อย โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัดความกว้าง และความหนาของวัตถุอาจจะเกิดขึ้นได้จากขั้นตอนการสอบเทียบ และการปรับค่าเทรสโทลด์เพื่อแยกบริเวณเส้นแสงเลเซอร์กับพื้นหลัง การปรับค่าเทรสโทลด์ไว้สูงเกินไปจะทำให้การวิเคราะห์หาเส้นแสงเลเซอร์ในบางส่วนที่เป็นบริเวณขอบของวัตถุหายไปทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น ในการวัดความยาวของวัตถุจะมีค่าความผิดพลาดในการวัดสูงสุดที่ประมาณ 3.4 มิลลิเมตร ซึ่งมีความผิดพลาดสูงพอสมควร โดยเกิดขึ้นจากการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุไม่สัมพันธ์กับความเร็วในการเก็บภาพจากกล้อง ซึ่งค่าความยาวที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าความยาวจริงของวัตถุเกือบทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุช้ากว่าความเร็วในการเก็บภาพจากกล้องจึงทำให้ค่าความยาวที่วัดได้มากกว่าที่เป็นจริง จากความผิดพลาดในการวัดความกว้างความหนา และความยาวของวัตถุที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลให้การหาพื้นที่หน้าตัด และพื้นที่รวมเชิงปริมาตรของวัตถุเกิดความผิดพลาดตามไปด้วย เนื่องจากการหาพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุนั้นเป็นการนำความกว้าง และความหนาของวัตถุที่ได้จากการวัดไปคำนวณเป็นพื้นที่หน้าตัด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นเอง นอกจากนั้นการหาพื้นที่รวมเชิงปริมาตรเป็นการรวมพื้นที่หน้าตัดแต่ละส่วนของวัตถุเข้าด้วยกันจึงยังเกิดความผิดพลาดมากขึ้นตามไปด้วย โดยค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยของการวัดพื้นที่หน้าตัด และพื้นที่รวมเชิงปริมาตรมีค่าประมาณ 6.156% และ 5.653% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือการกระจายตัวของความผิดพลาดสัมพัทธ์มีค่าประมาณ 5.505% และ 4.116%

การทดสอบผลของการนำระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอไปประยุกต์ใช้กับการวัดขนาดของปลานิล ซึ่งเป็นการวัดความกว้าง และความหนาสูงสุดของปลานิลมีค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 10.309% และ 5.672% ตามลำดับ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จะมีค่าประมาณ 5.743% และ 2.528% ตามลำดับ โดยในส่วนของความกว้างนั้นจะมีค่าความผิดพลาดมากซึ่งเกิดมาจากผลของครีบบปลานิลที่นำมาตรวจวัดขนาด ในการวัดความกว้างนั้นหากปลานิลที่นำมาทดสอบมีลักษณะของครีบบที่กางออกจากตัวปลาจะทำให้โปรแกรมคำนวณส่วนของครีบบเข้าไปด้วยทำให้การวัดความกว้างของตัวปลาเกิดความผิดพลาดเกิดขึ้น นอกจากนั้นเกร็ด และน้ำเมือกบนผิวของปลาจะมีผลต่อการวัดอย่างมากเพราะทำให้เกิดการสะท้อนของแสงเลเซอร์ ซึ่งทำให้ภาพเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จากกล้องไม่มีความคมชัดเท่าที่ควรจึงทำให้ยากในการปรับค่าเทรสโพลด์ที่เหมาะสม ในการคำนวณพื้นที่หน้าตัดของปลานิลจะมีค่าความผิดพลาดซึ่งเป็นผลตามค่าความกว้าง และความหนาที่ได้โดยตรง โดยค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 14.13% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จะมีค่าประมาณ 6.139% แต่ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในการคัดแยกขนาดปลาในอุตสาหกรรมต่างๆถือว่าค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เนื่องจากการแยกขนาดเป็นกลุ่มๆจริงไม่จำเป็นต้องใช้ระบบที่มีความแม่นยำสูงมากนัก

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการออกแบบ และพัฒนาระบบตรวจวัดขนาดของวัตถุที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น ซึ่งมีความสามารถวัดขนาดวัตถุได้ทั้ง 3 มิติ (ความกว้าง ความยาว และความสูง) โดยให้ผลลัพธ์ของการวัดในหน่วยของหน่วยวัดสากล และสามารถปรับเปลี่ยนสเกลของการวัดได้ง่ายด้วยการสอบเทียบ นอกจากนี้ในระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่นำเสนอใช้จำนวนอุปกรณ์ไม่มาก ง่ายในการออกแบบติดตั้งระบบ และอุปกรณ์มีที่นำมาใช้งานราคาไม่สูงมากนักแต่ให้ความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

จากการทดสอบระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ และมีความแม่นยำในการวัดความกว้าง ความยาว และความสูงของวัตถุจริงเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในการตรวจสอบชิ้นงานหรือชิ้นส่วนในกระบวนการผลิตต่างๆ นอกจากนั้นสามารถวัดพื้นที่หน้าตัด และพื้นที่รวมเชิงปริมาตรของวัตถุได้อีกด้วยซึ่งผลจากการทดสอบในส่วนของการวัดพื้นที่หน้าตัด และพื้นที่รวมเชิงปริมาตรของวัตถุให้ความแม่นยำไม่ดีเท่าที่ควรแต่ก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบการคัดแยกวัตถุดิบหรือระบบการคัดแยกพืชผลการเกษตรต่างๆ

ดังนั้นระบบตรวจวัดขนาดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายด้าน และสามารถนำไปพื้นฐานในการพัฒนาหรือปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

จากการวิจัยพบปัญหาในการควบคุมแสงจากภายนอกส่งผลให้การวัดขนาดของวัตถุในบางกรณีมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งอาจสามารถแก้ไขโดยการติดตั้งกรองแสงที่ตัวกล้องเพื่อลดแสงรบกวนจากภายนอก โดยตัวกรองแสงจะทำหน้าที่ในการกรองใช้เฉพาะแสงของแสงเลเซอร์ที่ความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตรเท่านั้นผ่านไปยังเซนเซอร์รับภาพของกล้องจึงช่วยลดผลกระทบของแสงรบกวนได้น่าจะทำให้ระบบมีความแม่นยำในการวัดยิ่งขึ้น จากการทดสอบความเร็วในการประมวลผลเพื่อวัดขนาดของวัตถุในหนึ่งเฟรมภาพซึ่งมีความละเอียด 640×480 พิกเซลใช้เวลาในการประมวลผลที่ประมาณ 0.2 วินาที ซึ่งโดยใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วการประมวลผล 2.0 GHz ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยความจำ 2 GB ดังนั้นสามารถจะพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการตรวจวัดขนาดวัตถุให้มีความเร็วในการประมวลผลเร็วขึ้น เพื่อสามารถทำการตรวจวัดขนาดของวัตถุแบบเวลาจริง (Real -Time) ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง จากการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ และทฤษฎีของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มยังสามารถนำไปพัฒนาเป็นระบบตรวจสอบพื้นผิววัตถุ ระบบการสร้างภาพวัตถุสามมิติ และระบบการมองเห็นของหุ่นยนต์ได้

นอกจากนี้จากการวิจัยยังพบข้อจำกัดเรื่องของรูปทรงของวัตถุที่สามารถใช้ได้กับระบบการตรวจวัดขนาดวัตถุโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่นำเสนอ คือ ต้องเป็นวัตถุรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานเท่านั้น หากสามารถพัฒนาต่อให้สามารถใช้ได้กับการตรวจวัดขนาดวัตถุรูปทรงอื่นๆคิดว่าจะเป็นประโยชน์มากในการนำไปใช้งานในงานด้านอื่นๆอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yaowarat Sirisathitkul, Naphasorn Thumpen and Weerayut Puangtong, “Automated Chokun Orange Maturity Sorting by Color Grading”, Walailak J Sci & Tech 2006; 3(2): 195-205.
- [2] 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
- [3] นางสาวสิมิลัน อาศัยพานิชย์, ดร.จิตติวรรณ ศรีนาค, “Automatic Fish Measurement and Classification System using Video Image Analysis”, ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [4] B. Zion, A.Shklyar and I.Karplus, “Sorting fish by computer vision”, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 23 (1999) page 175–187, Elsevier
- [5] D.Wulfsohn, H.J.G. Gundersen, E.B. Vedel Jensen, “Volume estimation from projections”, Journal of Microscopy, Vol. 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, Vol. 40 (2001) page 175–190, Elsevier
- [7] Frank Storbeck, Berent Daan, “Fish species recognition using computer vision and a neural network”, Fisheries Research, Vol. 51 (2001) pages 11-15, Elsevier.
- [8] William C. Stone, Maris Juberts, Nick Dagalakakis, “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
- [9] Posdamer, J.L. and Altscholer, M.D., “Surface measurement by Space-encoded Projected beam system”, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 18, 1982
- [10] 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
- [11] K. Sato and S. Inokuchi, “Three-dimensional surface measurement by space encoding range imaging,” Journal of Robotic Systems, vol. 2, pp. 27–39, 1985.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] R. Hartley and A. Zisserman. “Multiple View Geometry in Computer Vision”. Cambridge University Press, second edition, 2003.
- [16] TzuYen Wong, Peter Kovesi, Amitava Datta, “Projective Transformations for Image Transition Animations”, The University of Western Australia, School of Computer Science & Software Engineering, 35 Stirling Highway, Crawley, W.A. 6009, Australia
- [17] Elan Dubrofsky, “Homography Estimation”, The Faculty of Graduate Studies (Computer Science), University of British Columbia, March 2009
- [18] C. Harris and M.J. Stephens, “A combined corner and edge detector”, In Alvey Vision Conference, pages 147–152, 1988.
- [19] 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
- [20] 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
- [21] Rorres, Chris and Howard Anton, “Applications of Linear Algebra 3ed.”, 1984 New York: John Wiley and Sons.
- [22] “Spline Toolbox™ User’s Guide”, COPYRIGHT 1990–2010 by The MathWorks, Inc., webpage www.mathworks.com
- [23] ชีรวัฒน์ เทพมณี, “การหาระยะทางของพื้นผิววัตถุแบบสามมิติด้วยวิธี Epipolar Geometry” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมการวัดคุม, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Navaphattra Nunak, Taweeapol Suesut, Sarayut Inthuset, “Fish Size Measurement by Computer Vision using Laser Light Sectioning”, The 10th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, pp. 14-17, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 1-3 April, 2009.



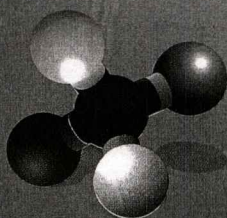
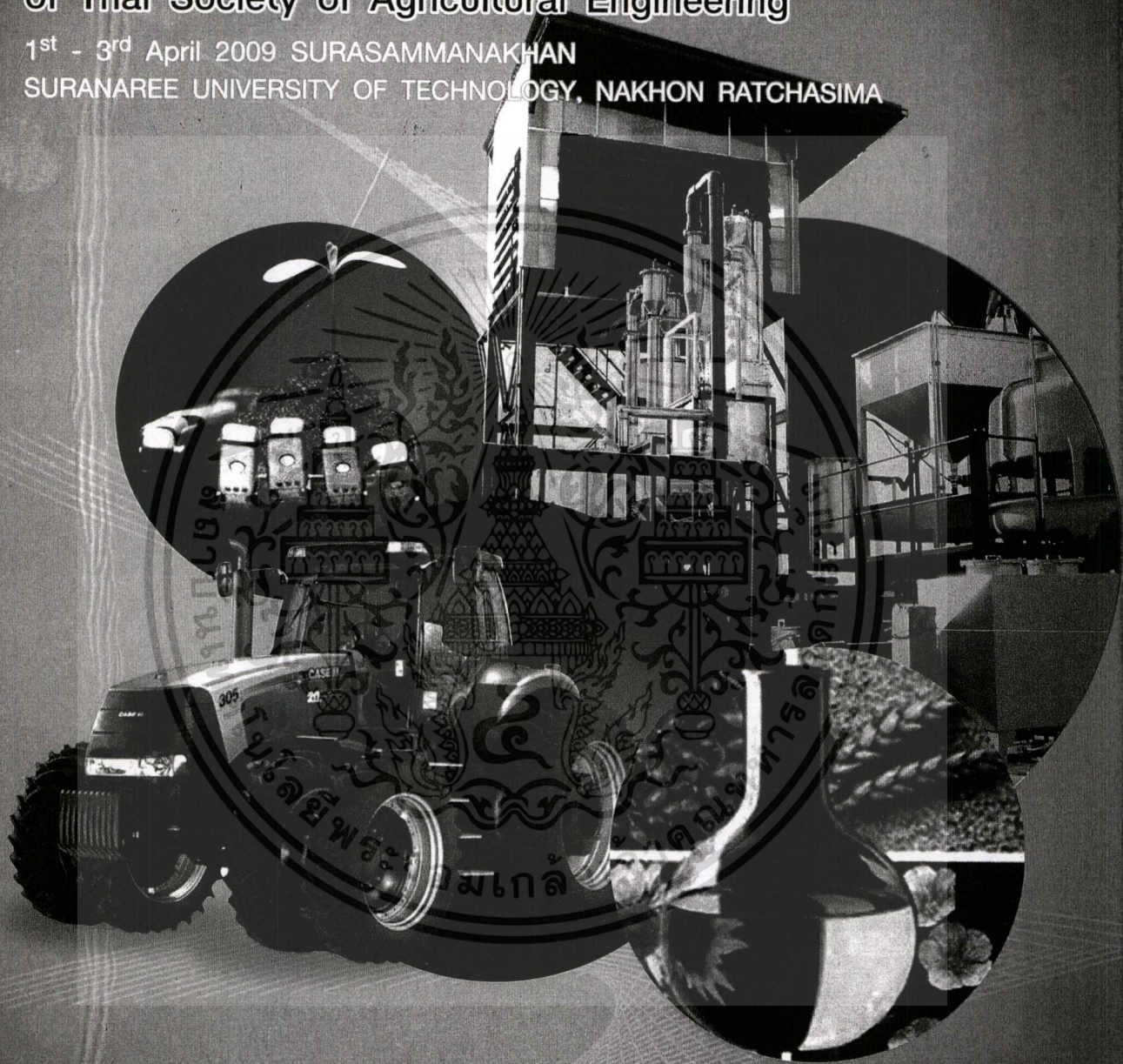
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The 10th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering

1st - 3rd April 2009 SURASAMMANAKHAN

SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, NAKHON RATCHASIMA



INNOVATIONS

in Agricultural, Food and Renewable Energy
Productions for Mankind

Fish Size Measurement by Computer Vision using Laser Light Sectioning

Navaphattra NUNAK¹ Taweepol SUESUT^{*2}, Sarayut INTHUSET²

Abstract

This paper proposes the method to measure the cross section from three-dimensional characteristics of fish (*Oreochromis niloticus*) by computer vision system using laser light sectioning. The computer vision system measures a number of features of fish as seen by a laser profile perpendicular to a conveyor belt. The features used here are the width and height at various locations along the fish. The images acquired from a digital camera were the structured laser light projecting on the fish surface. The homography transformation was used to transform the extracted profile into the real world distance (in metric system). The experimental results have been compared with the conventional measurement using vernier caliper. This system could be benefit to design the automatic grading machine and non destructive testing.

[Keywords] Computer Vision, laser light sectioning, Metric Vision

I Introduction

According to the report of exported fish of Thailand (2006), not only *Oreochromis niloticus* is the most quantity exported but also it is demanded in the country. Therefore, the method of grading and inspection is taken into account. A computer vision system has been researched and developed since 1920s and widely used in many areas. Within a fishery research, a vision system has been developed to estimate the weight of fish on a conveyor belt passing a camera by mean of structured light proposed by Storbeck and Daan in 1991[1]. However, they did not present the measurement of fish size in metric system. In 2001, they also applied the laser light sectioning to identifying of fish species. Farag et.al, (2000)[2] pointed out the necessity of volume measurement in cannery processing of fish. Omar et.al, (2000)[3] proposed the method of fish volume measurement using weight sensing from the fundamental of water replacement method. In this paper, the measurement of fish size in metric system by mean of laser light sectioning is proposed. This technique is called the metric vision [4]. The proposed technique can be improved to apply in real-time inspecting system. [5] Our scheme presents the measurement of 3-D object from the camera. The preliminary experiment performs measurement for the dimension of fish by off-line image processing. 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. Consequently, we can obtain the area from ellipse formulation and also calculate the volume of the object by integrating the area of cross section.

II Materials and Methods

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 fish through a conveyor system. 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 conveyor system consists of 24VDC motor and control circuit. This circuit was developed by DS-PIC 16-bit microcontroller for control the speed and direction of DC motor. The measurement system is shown in Fig.1 and Fig.2. The images processing and measuring were processed using a program with a graphical user interface which was coded and designed using Matlab 7.4 (The Mathworks).

* Corresponding author, Tel.: 0-2739-2407; Fax: 0-2739-2406 E-mail adds: kstaweep@kmitl.ac.th

¹ Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

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

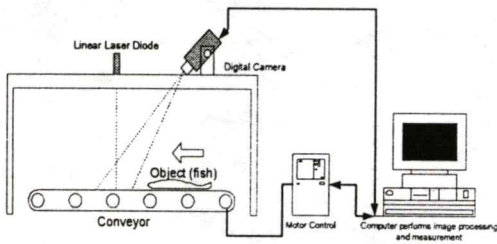


Fig. 1 measurement system

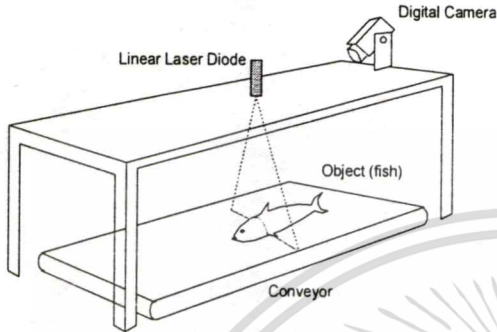


Fig. 2 Laser light sectioning system for fish size measurement

The light sectioning method is a well-known measurement technique for optical determination of object sections. A light plane is projected onto the object from one direction. Most commonly a laser serves as light source. The profile emerging on the scene is viewed from a different direction using a camera. Through the known arrangement of the laser light source and the camera the height information of the object can be determined at each point along the profile. The three-dimensional model is gathered by moving the object in one direction while its cross-section is scanned in a sequential manner. The projected laser line on surface of fish is shown in Fig. 3.

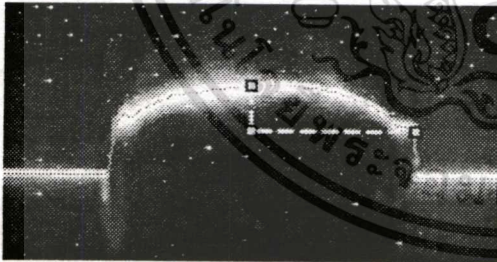


Fig. 3 projected laser line on surface of fish.

2.2 Image processing

The image processing was performed using Matlab 7.4 and BCAM driver to acquired image from Basler machine

vision camera. 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 as illustrated in the red line in Fig. 3. The highest point is the height or the thickness of fish and the width of fish is distance of the end of curve from left or right side. The real world measurement of fish must be calibrated from the known dimension object.

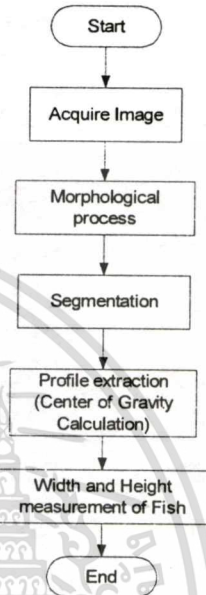


Fig. 4 image processing step

2.3 Metric vision metrology

The planar metrology is the metric vision method to measure the geometry on plane. 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.

$$p' = Hp \quad (1)$$

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,

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ w \end{pmatrix} \quad (2)$$

To estimate the homography matrix must have at least 4 points corresponding to the coordinate. Linear algorithms can be derived by expanding equation (2). In this case, the point correspondences are assumed to be image coordinates, hence the matrix can be computed as follows.

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & x'_1 x_1 & x'_1 y_1 & x'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & x'_4 x_4 & x'_4 y_4 & x'_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & y'_1 x_1 & y'_1 y_1 & y'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & y'_4 x_4 & y'_4 y_4 & y'_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

2.4 Materials

The experimental samples were 13 different sizes of *Oreochromis niloticus* fish. Each sample was measured by a conventional method using vernier calipers for the width, the height or thickness and length. This measurement was used to be a reference value for comparing with the proposed method.

III Results and Discussion

Fig.6 presents the comparison of thickness between the proposed method and conventional method. Fig.7 presents the width of the proposed method comparing with conventional method. Table 1 presents the percentage of error of thickness measured from computer vision, and the percentage of error measured from vernier calipers. Table 2 presents the percentage of error of width. The maximum error of width and thickness are 17.87 % and 8.47%, respectively. The minimum error of width and thickness are 0 % and 0.76 %, respectively. The average error of width and thickness are 5.74 % and 5.66 %, respectively. The standard deviation error of width and thickness are 5.74% and 2.52%, respectively. The error of thickness is very high accuracy. In contrast, the error of width is very low accuracy because of the error from measuring the fin. However, the coefficient of determination of width and thickness are acceptable which provide 0.92 and 0.97 of R^2 , respectively.

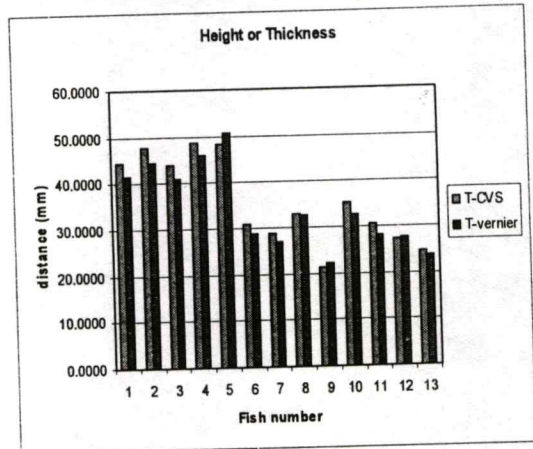


Fig. 6 thickness measurement of fish comparing between computer vision and vernier

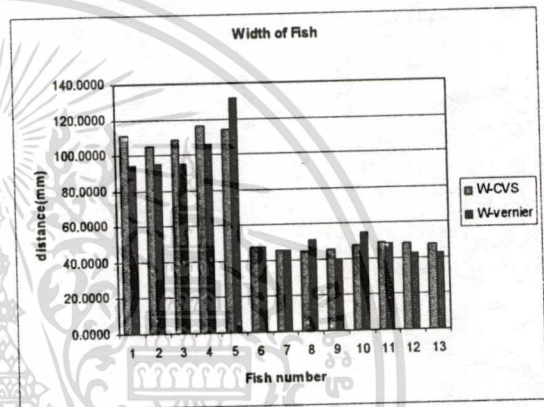


Fig. 7 width measurement of fish comparing between computer vision and vernier

Table 1 Error of thickness

Fish No	Thickness(Vernier)	Thickness(CVS)	Error(%)
1	41.72	44.5152	6.7000
2	44.58	47.8228	7.2741
3	40.88	43.8925	7.3691
4	45.98	48.8136	6.1628
5	50.89	48.2795	5.1298
6	28.94	30.9618	6.9860
7	26.93	28.8779	7.2332
8	32.72	32.9801	0.7951
9	22.39	21.4934	4.0046
10	32.69	35.4595	8.4720
11	28.17	30.4544	8.1092
12	27.61	27.4022	0.7525
13	23.67	24.7836	4.7045
Maximum Error			8.4720
Minimum Error			0.7525
Average Error			5.6687
STD Error			2.5279

Table 2 Error of width

Fish No	Width(Vernier)	Width(CVS)	Error(%)
1	94.17	110.9956	17.8673
2	95.05	105.0226	10.4920
3	95.22	108.4004	13.8420
4	105.5	116.0358	9.9865
5	131.84	113.8830	13.6203
6	47.81	47.8092	0.0018
7	45.65	45.6991	0.1075
8	51.44	44.6878	13.1263
9	39.56	45.6878	15.4899
10	54.76	47.8978	12.5315
11	48.01	49.3260	2.7411
12	42.82	48.4530	13.1551
13	42.85	47.5860	11.0525
Maximum Error			17.8673
Minimum Error			0.0018
Average Error			10.3087
STD Error			5.7494

IV 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 and height of fish.
- The maximum of width and thickness correspond to the size of fish. Moreover, each of area cross section along the fish can be calculated to the volume of fish. However, the speed of conveyor must be stable and the measurement computation must be fast enough corresponding to the conveyor speed.

- This system could be benefit to design the automatic grading machine and non destructive measurement in the future

References

- [1] Frank Storbeck, Berent Daan “Fish species recognition using computer vision and a neural network”, Fisheries Research Volume 51 (2001) pages 11-15, Elsevier.
- [2] Farag K. Omar, Clarence W. de Silva, “Optimal portion control of natural objects with application in automated cannery processing of fish” , Journal of Food Engineering Volume 46 (2000) pages 31-41, Elsevier.
- [3] F. Omar, C.W. de Silva, “High-speed model-based weight sensing of complex objects with application in industrial processes”, Measurement, Volume 33 (2003) page 23–33, Elsevier.
- [4] P.O’Leary, M.Harker, and P.Zsombor-Murray, “Direct least-squares fitting of coupled geometric object”, IEE Proceeding Vision, Image and Signal Processing, In Press, 2005.
- [5] Taweeapol Suesut, Peter Schalk, Paul O’Leary, Ewald Fauster, Matthew Harker, “Real-time Geometric surface Inspection”, International Conference on Engineering, Applied Science and Technology, Bangkok, Thailand, November 2007.

ประวัติผู้เขียน

นายสรายุทธ อินทุเศรษฐ เกิดเมื่อวันที่ 3 กันยายน พ.ศ.2525 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นบุตรคนที่ 2 ในจำนวนพี่น้อง 2 คนของ นายจิรศักดิ์ อินทุเศรษฐ และ นางสาวกร อินทุเศรษฐ ภูมิลำเนาเดิม 25 หมู่ 8 ตำบลปรัก อำเภอสระเค จังหวัดสงขลา

ประวัติการศึกษา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง แผนกวิชาไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ ในปีการศึกษา 2540-2543

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาช่างไฟฟ้า คณะวิทยาลัย เทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปี การศึกษา 2543-2545

ระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2545-2548

ระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548-2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้