

การหาระยะทางของพื้นผิววัตถุแบบสามมิติด้วยวิธี

EPIPOLAR GEOMETRY

3D OBJECT SURFACE MEASUREMENT USING

EPIPOLAR GEOMETRY METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ศ.ล.
น.ล.ค.ด
ศ.ล.
ศ.ล.

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....

พ.ศ. 2547

เลขทะเบียน **51111**

ISBN 974-9680-07-3

วัน,เดือน,ปี- **2 ก.ค. 2547**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

๒๓/๗/๒๕๔๗

**3D OBJECT SURFACE MEASUREMENT USING
EPIPOLAR GEOMETRY METHOD**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในท้องถิ่นเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

เอกสาร KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาระยะทางของพื้นผิววัตถุแบบสามมิติด้วยวิธี Epipolar Geometry
นักศึกษา	นายธีรวัฒน์ เทพมณี
รหัสประจำตัว	43061446
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. เกษตร์ ศิริสันติสัมฤทธิ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนากระบวนการมองเห็นของหุ่นยนต์ที่สามารถคำนวณหาระยะทางของพื้นผิววัตถุได้ โดยใช้กล้องสองตัวรับภาพวัตถุเข้ามาเพื่อประมวลผลหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุด้วยหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและนิยมใช้กันอย่างมาก ระยะทางดังกล่าวเกิดจากจุดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติที่โปรเจกชันลงบนตำแหน่งที่แตกต่างกันในระบบพิกัดระนาบของภาพทั้งสอง และนำค่าความแตกต่างนี้ไปคำนวณหาระยะทาง แต่วิธีนี้ก็มีข้อเสียคือหากตำแหน่งจุดภาพทั้งสองที่นำมาคำนวณผิดพลาดไป ระยะทางที่คำนวณหาได้ก็จะผิดพลาดตามไปด้วย ดังนั้นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ตำแหน่งของจุดภาพผิดพลาดไปมีอยู่ 2 ประการ คือ การติดตั้งกล้องไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ และตำแหน่งของจุดภาพทั้งสองไม่สอดคล้องกัน ในการติดตั้งกล้องให้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอเรานำเสนอวิธีการสอบเทียบกล้องแบบสเตอริโอร่วมกับ Epipolar rectification เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องที่ประกอบไปด้วยเมตริกซ์การหมุนและเวกเตอร์การย้าย นอกจากนี้การคำนวณหาตำแหน่งของจุดภาพให้สอดคล้องกันได้ใช้ Epipolar geometry ร่วมกับการวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบหลายขั้น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาความผิดพลาดในการนำตำแหน่งของจุดภาพมาคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุลงได้ หลังจากแก้ปัญหาดังกล่าวแล้วการคำนวณหาขนาด พิกัด และพื้นผิวของวัตถุแบบสามมิติได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น

Thesis Title	3D Object Surface Measurement Using Epipolar Geometry Method
Student	Mr. Teerawat Thepmanee
Student ID.	43061446
Degree	Master of Engineering
Programme	Instrumentation Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Kaset Sirisantisamrid

ABSTRACT

This thesis proposes the development of the robot vision system in order to determine the surface of an object. The object's surfaces are captured by two cameras and its three-dimensional distance can be calculated using the widely used method called the passive type of the principle of triangle by projecting a 3D-point world coordinate onto the different positions of the image plane. The disparity is then used to calculate the distance between the camera and the object. The main problem encountered is that the accuracy of the stereo system ideally depends on the set-up of the cameras and the locating of the corresponding points on each image. This problem can be solved by calibrating the camera together with epipolar rectification to adjust the external parameters, which are the rotation matrix and translation vector, according to the stereo system's specification and by using the epipolar geometry and multi layers cross correlation coefficient to precisely locate the corresponding points on each image. The results show that using the epipolar geometry method not only can increase the accuracy of 3D object surface measurement, it can also determine the size and coordinate of the object.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
บทที่ 2 แสงและการมองเห็น.....	6
2.1 องค์ประกอบของการมองเห็น.....	6
2.2 การมองเห็นของมนุษย์.....	7
2.3 การมองเห็นของคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์.....	11
2.4 การประมวลผลภาพ.....	13
บทที่ 3 การคำนวณหาระยะทางด้วยหลักการต่างๆ.....	18
3.1 การหาระยะทางด้วยหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไป.....	18
3.2 การหาระยะทางด้วยหลักการของรูปสามเหลี่ยม.....	22
3.3 การหาระยะทางด้วยหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอกทีฟ.....	23
3.4 การหาระยะทางด้วยหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟ.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การสอบเทียบกล้อง.....	29
4.1 โมเดลกล้อง.....	29
4.2 วิธีการสอบเทียบกล้องแบบ Direct parameters.....	39
4.3 วิธีการสอบเทียบกล้องแบบ Camera projection matrix.....	44
4.4 วิธีการสอบเทียบกล้องในระบบสเตอริโอ.....	47
บทที่ 5 การหาจุดที่สอดคล้องกันในสเตอริโอวิชั่น.....	52
5.1 Rectification transformation	52
5.2 การหาจุดที่สอดคล้องกันโดย Epipolar geometry.....	59
5.3 การหาจุดที่สอดคล้องกันโดยวัดค่าสหสัมพันธ์	66
5.4 ข้อจำกัดในการหาจุดที่สอดคล้องกันในระบบสเตอริโอ.....	74
บทที่ 6 การหาระยะทางพื้นผิวของวัตถุแบบสามมิติ.....	75
6.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	75
6.2 ผลการทดลองการสอบเทียบกล้อง.....	77
6.3 ผลการทดลองการ Rectification transformation.....	82
6.4 ผลการทดลองการหา Epipolar line	84
6.5 ผลการทดลองหาจุดที่สอดคล้องกันโดยวิธี Multi layers cross correlation.....	86
6.6 ผลการทดลองการหาขนาดของวัตถุ.....	89
6.7 ผลการทดลองการหาพิกัดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ.....	97
6.8 ผลการทดลองการสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุแบบสามมิติ.....	101
6.9 สรุปผลการทดลอง.....	106
บทที่ 7 บทสรุปและวิจารณ์ผล.....	113
บรรณานุกรม.....	114
ภาคผนวก.....	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
6.1 ค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องแบบตัวเดียวโดยวิธี Camera projection matrix.....	78
6.2 ค่าพารามิเตอร์ภายในของกล้องแบบตัวเดียวโดยวิธี Camera projection matrix.....	78
6.3 ค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องที่ใช้วิธีการสอบเทียบกล้องสเตอริโอร่วมกับ Epipolar rectification.....	79
6.4 ค่าพารามิเตอร์ภายในของกล้องที่ใช้วิธีการสอบเทียบกล้องสเตอริโอร่วมกับ Epipolar rectification.....	80
6.5 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพของกล้อง 1 และ กล้อง 2	81
6.6 สรุปผลค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการหาขนาดวัตถุ	89
6.7 พิกัดของจุดต่างๆบนระบบพิกัดโลกสามมิติ.....	98
6.8 ขนาดของวัตถุแต่ละด้านที่คำนวณได้จากวัตถุ A	99
6.9 ขนาดของวัตถุแต่ละด้านที่คำนวณได้จากวัตถุ B	99
6.10 ขนาดของวัตถุแต่ละด้านที่คำนวณได้จากวัตถุ C.....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 หุ่นยนต์ในงานอุตสาหกรรม.....	1
1.2 การพัฒนาวิธีการมองเห็นโดยการเลียนแบบการมองเห็นของมนุษย์.....	2
1.3 แนวความคิดที่นำระบบพิกัดสามมิติและเวกเตอร์มาหาขนาดของวัตถุ.....	2
1.4 การหาระยะทางแบบสามมิติแบบสเตอริโอ.....	3
2.1 องค์ประกอบของการมองเห็น.....	6
2.2 ภาพตัดตามยาวของลูกตา.....	7
2.3 เซลล์ประสาทชนิดต่างๆ เรียงตัวกันอยู่เป็นชั้นๆ ใน Retina.....	9
2.4 Neural pathway จาก Retina ทั้งสองข้างไปยัง Visual cortex.....	10
2.5 การนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในงานตรวจสอบและคัดแยกในงานอุตสาหกรรม.....	11
2.6 การประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ในการหยิบจับวัตถุ.....	12
2.7 วิธีการเก็บภาพดิจิตอล.....	13
2.8 วิธีการเก็บภาพจากกล้องวิดีโอเข้าสู่คอมพิวเตอร์.....	14
2.9 การประมวลผลที่ละจุดภาพ.....	16
2.10 การประมวลผลที่ละกลุ่ม.....	16
3.1 การวัดระยะทางโดยใช้หลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไป.....	18
3.2 การวัดระยะทางโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	19
3.3 การวัดระยะทางโดยใช้คลื่นแสง.....	20
3.4 การวัดระยะทางโดยใช้คลื่นเสียง.....	21
3.5 การวัดระยะทางโดยหลักการของรูปสามเหลี่ยม.....	22
3.6 การวัดระยะทางโดยใช้หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบจุด.....	23
3.7 การวัดระยะทางโดยใช้หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบลายเส้นเดี่ยว.....	24
3.8 การวัดระยะทางโดยใช้วิธีการฉายแสงผ่านรหัสไบนารีหรือผ่านรหัสเกรย์.....	24
3.9 การวัดระยะทางโดยใช้หลักการรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟ.....	25
3.10 การวัดระยะทางในระบบสเตอริโอ.....	25
3.11 ภาพถ่ายสเตอริโอที่ได้จากกล้องซ้ายและขวา.....	27
3.12 ภาพความแตกต่างของกล้องทั้งสองเมื่อนำมารวมกัน.....	27
3.13 ตัวอย่างการคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุ.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1 หลักการของกล้องถ่ายรูป.....	29
4.2 หลักการของเลนส์.....	30
4.3 Pinhole camera model.....	31
4.4 จุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพจากความผิดเพี้ยนของเลนส์.....	32
4.5 ความผิดเพี้ยนของเลนส์.....	32
4.6 การโปรเจกชันจุดของวัตถุจากระบบพิกัดกล้องลงบนระนาบพิกัดระนาบของภาพ.....	35
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพกับระบบพิกัดระนาบของภาพ.....	36
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติกับระบบพิกัดระนาบของภาพ.....	37
4.9 ภาพที่ใช้ในการสอบเทียบ.....	38
4.10 ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติกับระบบพิกัดกล้องแบบสเตริโอ.....	47
4.11 ตัวอย่างภาพที่ใช้ในการสอบเทียบแบบระนาบตั้งฉาก.....	49
5.1 การย้ายจุดภาพบนระนาบพิกัดระนาบของภาพตามข้อกำหนดของระบบสเตริโอ.....	52
5.2 ตัวอย่างการทำ Rectification Transformation.....	59
5.3 ความสัมพันธ์ของจุดที่สอดคล้องกันทางเรขาคณิต.....	60
5.4 Epipolar Geometry.....	61
5.5 ลักษณะของกล้องทั้งสองที่เบนเข้าหากัน.....	62
5.6 การเคลื่อนที่ในทางขนานของระบบพิกัดระนาบของภาพในกรณีพิเศษ.....	63
5.7 Epipolar Geometry ที่มีความสัมพันธ์กับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ.....	63
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดที่สอดคล้องกันโดยการส่งผ่านระนาบ π	65
5.9 การหาจุดที่สอดคล้องกันโดยวัดค่าสหสัมพันธ์.....	67
5.10 ตัวอย่างการหาจุดที่สอดคล้องกันโดยวิธีสหสัมพันธ์.....	68
5.11 กรณีตัวอย่างการหาจุดสอดคล้องกันทำได้ยากเนื่องจากภาพมีรูปแบบคล้ายกัน.....	69
5.12 กรณีตัวอย่างการหาจุดสอดคล้องกันทำได้ยากเนื่องจากภาพมีพื้นผิวเดียวกัน.....	70
5.13 ตัวอย่างที่ 1 การวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบหลายๆขั้น.....	71
5.14 ตัวอย่างที่ 2 การวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบหลายๆขั้น.....	72
5.15 ตัวอย่างที่ 3 การวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบหลายๆขั้น.....	72
5.16 ตัวอย่างที่ 4 การวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบหลายๆขั้น.....	73
5.17 ตัวอย่างการหาจุดที่สอดคล้องกันบนพื้นผิวของวัตถุ.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.18 กรณีตัวอย่างที่ไม่สามารถหาจุดที่สอดคล้องกันได้ในระบบสเตริโอ.....	74
6.1 ขั้นตอนการหาระยะทางพื้นผิวของวัตถุแบบสามมิติ.....	75
6.2 การติดตั้งกล้องที่จะทำการสอบเทียบ.....	77
6.3 จำลองตำแหน่งและทิศทางของระบบพิกัดกล้องที่อ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ...80	
6.4 กราฟค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพของกล้องที่ 1 และกล้องที่ 2.....	81
6.5 ตัวอย่างที่ 1 การย้ายจุดภาพวัตถุให้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตริโอ.....	82
6.6 ตัวอย่างที่ 2 การย้ายจุดภาพวัตถุให้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตริโอ.....	83
6.7 ตัวอย่างที่ 1 การหา Epipolar line.....	84
6.8 ตัวอย่างที่ 2 การหา Epipolar line.....	85
6.9 การหาจุดสอดคล้องกันโดยวิธีสหสัมพันธ์แบบหลายๆชั้นจากโมเดลแบบ Polygon.....	86
6.10 การหาจุดสอดคล้องกันโดยวิธีสหสัมพันธ์แบบหลายๆชั้นจากโมเดลแบบ Non geometry	87
6.11 ตัวอย่างที่ 1 ผลการทดลองการหาขนาดวัตถุ.....	90
6.12 ตัวอย่างที่ 2 ผลการทดลองการหาขนาดวัตถุ.....	91
6.13 ภาพตัวอย่างการคำนวณการหาขนาดของวัตถุ.....	92
6.14 ภาพจำลองพิกัดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ.....	97
6.15 กราฟค่าความผิดพลาดการหาขนาดวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ.....	100
6.16 ตัวอย่างที่ 1 การสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุจากโมเดลที่เป็นแบบ polygon.....	102
6.17 ตัวอย่างที่ 2 การสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุจากโมเดลที่เป็นแบบ polygon.....	103
6.18 ตัวอย่างที่ 3 การสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุจากโมเดลที่เป็นแบบ Non geometry.....	104
6.19 ตัวอย่างที่ 4 การสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุจากโมเดลที่เป็นแบบ Non geometry.....	105
6.20 การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด A และ B.....	107
6.21 การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด A และ B ในกรณีการหาจุดที่สอดคล้องกันผิดพลาดไป +/- 1 pixel	108
6.22 การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด A และ B.....	109
6.23 การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด A และ B ในกรณีการหาจุดที่สอดคล้องกันผิดพลาดไป +/- 1 pixel.....	110
6.24 กราฟค่าความผิดพลาดในการหาขนาดของวัตถุเทียบกับระยะทางที่เปลี่ยนไป.....	112

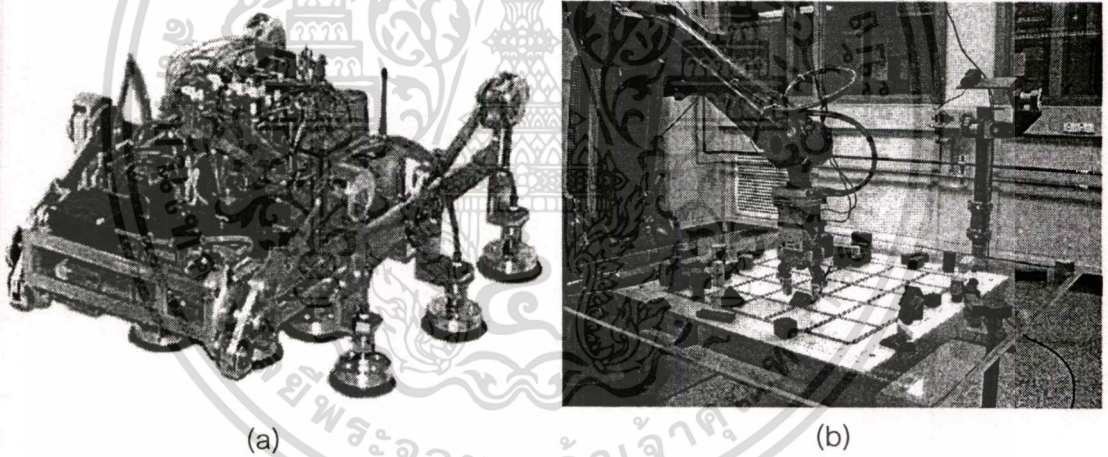
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในงานทางด้านอุตสาหกรรม เราได้แบ่งออกเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ คือหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ในภาพที่ 1.1(a) และหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไม่ได้ในภาพที่ 1.1(b) เหตุผลที่ต้องใช้หุ่นยนต์คือในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้ในการหยิบจับชิ้นงาน การเคลื่อนย้ายวัตถุดิบจากตำแหน่งหนึ่งไปตำแหน่งหนึ่ง การเชื่อมต่อในกระบวนการผลิต หรือการทำงานในสถานที่เสี่ยงต่ออันตราย ซึ่งงานดังกล่าวหุ่นยนต์สามารถทำงานได้รวดเร็ว มีคุณภาพแน่นอน สามารถทำงานที่ซ้ำๆ กันเป็นเวลานานๆ ได้ เพียงแต่กำหนดตำแหน่งให้กับหุ่นยนต์หรือโปรแกรมก็สามารถทำงานได้ตลอดเวลา ถ้าหากมนุษย์ทำงานดังกล่าวจะเกิดความอ่อนล้า ทำงานได้ช้าลง และอาจเกิดความผิดพลาดตามมาได้

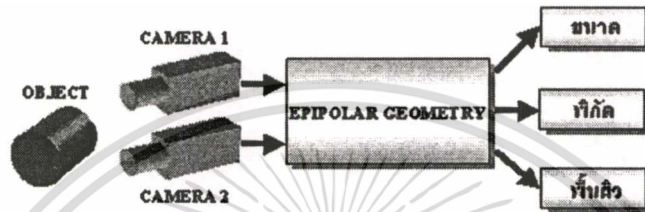


ภาพที่ 1.1 หุ่นยนต์ในงานอุตสาหกรรม (a) หุ่นยนต์สำรวจที่เคลื่อนที่ได้ (b) หุ่นยนต์ที่ใช้ในการหยิบจับวัตถุเป็นหุ่นยนต์ที่อยู่กับที่

การกำหนดตำแหน่งหรือโปรแกรมให้กับหุ่นยนต์จากตัวอย่างการหยิบจับวัตถุในภาพที่ 1.1 (b) ถ้าหากวัตถุไม่ได้อยู่ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ผลที่ตามมาก็คืออาจทำให้การหยิบจับนั้นผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาให้หุ่นยนต์นั้นมีประสิทธิภาพ มีความยืดหยุ่น และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นโดยการเพิ่มความสามารถในการมองเห็นเหมือนมนุษย์ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยในระบบการมองเห็น เช่น กล้องถ่ายภาพ สแกนเนอร์ เครื่องเอกซเรย์ เครื่องเอกซเรย์ CT-scan เป็นต้น านไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

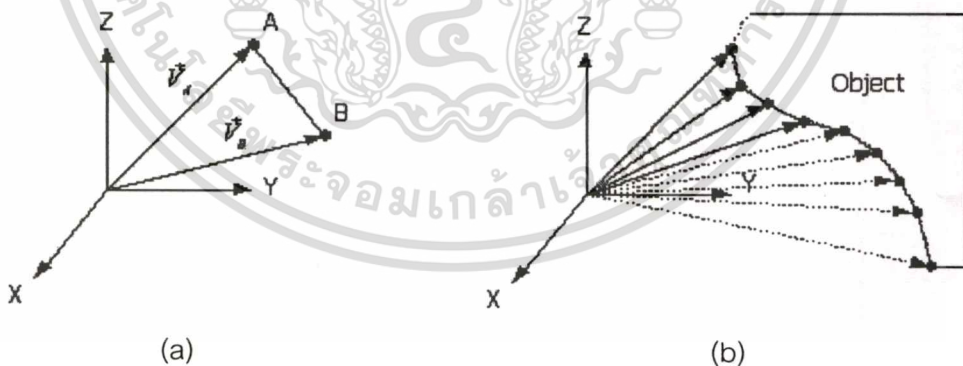
พัฒนาวิธีการมองเห็นให้กับหุ่นยนต์โดยเลียนแบบการมองเห็นของมนุษย์ ซึ่งสามารถมองเห็น ขนาด พิกัด และพื้นผิวของวัตถุได้ เพื่อนำวิธีดังกล่าวไปใช้ในงานอุตสาหกรรมได้ในอนาคต ดังภาพที่ 1.2 วิธีการมองเห็นที่เราจะนำเสนอคือวิธีการมองเห็นโดยใช้อุปกรณ์ที่เป็นกล้องสองตัวรับภาพวัตถุเข้ามาประมวลผลด้วยวิธี Epipolar geometry คำนวณหาขนาด พิกัดและพื้นผิววัตถุแบบสามมิติได้อย่างถูกต้อง



ภาพที่ 1.2 การพัฒนาวิธีการมองเห็นโดยการเลียนแบบการมองเห็นของมนุษย์

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การที่จะทำให้หุ่นยนต์สามารถมองเห็น ขนาด พิกัด และพื้นผิวของวัตถุได้นั้นจะเริ่มจากแนวความคิดที่เกี่ยวข้องกับคณิตศาสตร์ในเรื่องของระบบพิกัดและเวกเตอร์เบื้องต้นดังภาพที่ 1.3



ภาพที่ 1.3 แนวความคิดที่นำระบบพิกัดสามมิติและเวกเตอร์มาหาขนาดของวัตถุ

ภาพที่ 1.3 (a) ระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ XYZ กำหนดให้ จุด A และ B เป็นจุดของวัตถุ ถ้าเรารู้ขนาดเวกเตอร์ \vec{V}_A และเวกเตอร์ \vec{V}_B เราก็สามารถที่จะหาระยะทางระหว่างจุด A และจุด B ได้ ดังนั้นในภาพที่ 1.3(b) ถ้าเราสามารถหาขนาดของเวกเตอร์ต่างๆบนพื้นผิวของวัตถุทุกๆจุดได้

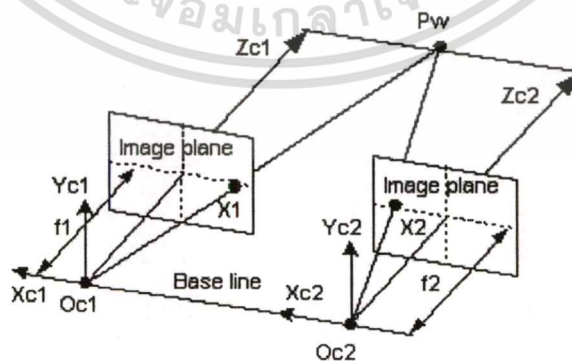
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราก็สามารถที่จะนำขนาดเหล่านั้นมาสร้างเป็นข้อมูลภาพแบบสามมิติที่อ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติได้ และอาจจะมีคำถามต่อมาว่าเราจะหาขนาดของเวกเตอร์ในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติกับจุดของวัตถุได้อย่างไร ?

จากหลักการดังกล่าวข้างต้นสิ่งเริ่มต้นที่เราจะต้องทราบเป็นอันดับแรกในการหาขนาดของวัตถุก็คือเราจะต้องหาระยะทางระหว่างระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติกับจุดของวัตถุให้ได้เสียก่อน (\vec{V}_A และ \vec{V}_B) ซึ่งได้มีผู้นำเสนอวิธีการมากมายที่จะทำการวัดระยะทางแบบไม่สัมผัสพื้นผิวของวัตถุ เช่น การใช้คลื่น แสง หรือ เสียง การใช้เลเซอร์นำทาง การฉายรูปแบบต่างๆลงไปบนผิวของวัตถุ (รายละเอียดจะกล่าวในบทที่ 3) ในงานวิจัยนี้เราได้เลือกวิธีการหาระยะทางแบบสามมิติโดยหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟและหลังจากเราได้ข้อมูลระยะทางแล้วขั้นตอนต่อไปเราจะนำข้อมูลระยะทางที่ได้ไปสู่กระบวนการสร้างเป็นภาพสามมิติเพื่อแสดงถึงขนาดและรูปร่างเพื่อให้หุ่นยนต์เข้าใจภาพที่ได้จากการมองเห็น เพื่อนำไปตัดสินใจในการที่จะหยิบจับวัตถุต่อไป

1.4 ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย

เราได้นำหลักการของสเตอริโอวิชันมาหาระยะทางโดยอาศัยหลักของรูปสามเหลี่ยมในภาพที่ 1.4 กำหนดให้จุด $Oc1$ และ $Oc2$ เป็นจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของกล้องมีแกน Xc, Yc, Zc เป็นแกนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันของทั้งสองกล้อง ระยะทางระหว่างตำแหน่งของวัตถุกับระบบพิกัดกล้องสเตอริโอคือ $Zc1$ และ $Zc2$ (วิธีการหาระยะทางจะแสดงในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4 การหาระยะทางด้วยหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟ) ระยะทางที่หาได้จะเกิดจากความแตกต่างของจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพทั้งสอง วิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากและได้มีการพัฒนานำไปสู่การมองเห็นของหุ่นยนต์ได้อีกด้วย



ภาพที่ 1.4 การหาระยะทางแบบสามมิติแบบสเตอริโอ

การหาระยะทางพื้นผิวของวัตถุแบบสามมิติจากหลักการของสเตอริโอวิชัน เราจะนำข้อมูลจากภาพที่ได้จากกล้องทั้งสอง (Stereo images) นำมาหา ขนาด พิกัด และพื้นผิวของวัตถุแบบมิตินี้มีปัญหาหลักที่สำคัญที่เรานำมาศึกษาและทำวิจัยคือ

1. การติดตั้งกล้องไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ
2. การหาจุดที่สอดคล้องกันในระบบสเตอริโอไม่ถูกต้อง

จากข้อกำหนดของระบบสเตอริโอที่กล่าวไว้ว่าการหาระยะทางแบบสามมิติได้อย่างถูกต้องนั้นโฟกัสเพลน (Focal plane) ตามแนวแกน x จะต้องขนานกับเส้นตรงที่แสดงถึงระยะทางระหว่างกล้องทั้งสองคือ Base line และแนวแกน z ของระบบพิกัดกล้องทั้งสองจะต้องขนานกัน ข้อกำหนดดังกล่าวเราสามารถที่จะดูได้จากพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องที่ได้จากการสอบเทียบซึ่งในทางปฏิบัติแล้วเราไม่สามารถที่ติดตั้งกล้องให้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบได้ทั้งหมดเนื่องจากข้อจำกัดของการวางกล้อง การยึดติดตัวกล้องตัวกล้องเข้ากับขาตั้งกล้อง การปรับตำแหน่งของมุมกล้องให้ขนานกัน เป็นต้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอวิธีการสอบเทียบกล้องในระบบสเตอริโอและทำการปรับพารามิเตอร์ภายนอกซึ่งประกอบไปด้วย เมตริกซ์การหมุน (Rotation matrix) และเวกเตอร์การย้าย (Translation vector) ให้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบในขั้นตอนการสอบเทียบเพียงขั้นตอนเดียว โดยวิธีที่เรียกว่า "Epipolar rectification" วิธีนี้เป็นแนวความคิดที่จะทำการหาจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพใหม่โดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบ ดังนั้นหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสอบเทียบเราสามารถที่จะคำนวณหาระยะทางแบบสามมิติได้โดยทันที (รายละเอียดอยู่ในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.4)

การหาจุดที่สอดคล้องกันเราได้นำหลักการ Epipolar geometry มาช่วยในการหาจุดที่สอดคล้องกันทางเรขาคณิตของกล้องในระบบสเตอริโอ กระบวนการหาจุดที่สอดคล้องกันจะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบกล้องซึ่งจะช่วยให้การหาจุดที่สอดคล้องมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น (รายละเอียดอยู่ในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.3 และ 5.4)

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นที่จะทำการสอบเทียบกล้องให้เป็นไปตามข้อกำหนดและการหาจุดที่สอดคล้องกันได้ถูกต้องโดยใช้ Epipolar geometry เข้ามาช่วย หลังจากกระบวนการสอบเทียบเสร็จสิ้นเราสามารถที่จะนำไปหาระยะทางพื้นผิวของวัตถุได้ทันที

ดังนั้นถ้าเราทำการสอบเทียบกล้องและหาจุดที่สอดคล้องกันตามวิธีการที่นำเสนอ การหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุก็มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นและสามารถที่จะนำมาหาขนาดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัด และพื้นผิวแบบสามมิติได้ เราได้ยกกรณีศึกษาการสร้างภาพพื้นผิวแบบสามมิติมาเป็นตัวอย่างในผลการทดลอง วัตถุที่เรานำมาใช้ทดลองในการสร้างภาพแบบสามมิติมีสองแบบคือ วัตถุจากโมเดลแบบ Polygon และวัตถุจากโมเดลแบบ Non geometry มาเป็นกรณีศึกษา

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและแนวคิดในการทำวิจัย
2. ศึกษาเรื่องการมองเห็น องค์ประกอบของการมองเห็นของมนุษย์ การมองเห็นของคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์ การประมวลผลภาพเบื้องต้น
3. ศึกษาเรื่องการหาระยะทางระหว่างเครื่องมือหรืออุปกรณ์กับพื้นผิวของวัตถุแบบไม่สัมผัส ด้วยหลักการต่างๆ เช่น การหาระยะทางด้วยหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไป การหาระยะทางด้วยหลักการของรูปสามเหลี่ยม การหาระยะทางด้วยหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอกทีฟ และการหาระยะทางด้วยหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟ
4. ศึกษาเรื่องการสอบเทียบกล้อง โดยเริ่มจากศึกษาโมเดลกล้อง การสอบเทียบกล้องโดยวิธี Direct parameters และ Camera projection matrix และนำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการสอบเทียบกล้องในระบบสเตอริโอ
5. ศึกษาเรื่องการหาจุดที่สอดคล้องกันในระบบสเตอริโอวิชัน การนำหลักการ Epipolar geometry เข้ามาช่วยแก้ปัญหาการหาจุดที่สอดคล้องกันทางเรขาคณิตระหว่างกล้อง การแปลงจุดภาพให้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ และการหาจุดที่สอดคล้องกันจากค่าสหสัมพันธ์
6. แสดงผลการทดลองจากขั้นตอนในการหาระยะทางพื้นผิวของวัตถุแบบสามมิติ การทดสอบความถูกต้องในการหาจุดที่สอดคล้องกัน การสร้างภาพแบบสามมิติในลักษณะ Wire frame และ Normal vector ที่แสดงถึงทิศทางพื้นผิวของวัตถุ
7. สรุปผลการวิจัย ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

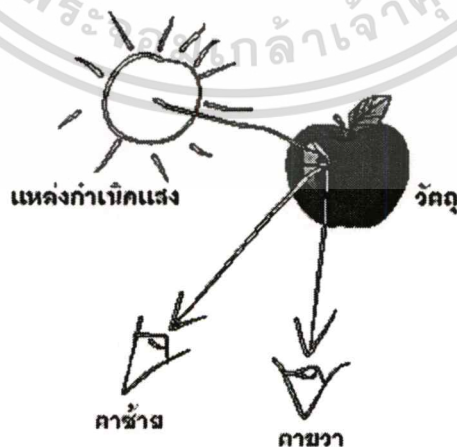
บทที่ 2

แสงและการมองเห็น

การที่ร่างกายจะดำรงชีวิตอยู่ได้จะต้องมีระบบรับความรู้สึก ซึ่งประกอบด้วยอวัยวะรับความรู้สึกภายในเพื่อรักษาหรือปรับสภาพแวดล้อมภายในร่างกายให้คงที่อยู่เสมอ และอวัยวะรับความรู้สึกภายนอกสำหรับให้ร่างกายได้รับรู้การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของสิ่งแวดล้อมภายนอกและมีการตอบสนองที่เหมาะสม อวัยวะรับความรู้สึกจากภายนอกร่างกายส่วนใหญ่ก็คือปลายประสาทรับความรู้สึกต่างๆ ไป ตามผิวหนังหรือรวมกลุ่มอยู่เฉพาะที่ เช่น ต่อมรับรสบนลิ้นและเซลล์รับกลิ่นบนเยื่อหูช่องจมูก หรือประกอบเป็นระบบอวัยวะที่ซับซ้อนเช่น หูและตา เป็นต้น การที่เราสามารถที่มองเห็นหรือรับความรู้สึกเกี่ยวกับแสงสีและรูปร่างลักษณะของสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ก็เนื่องมาจากการทำงานของระบบรับภาพ (Visual system) ซึ่งนับเป็น Sensory system ที่สำคัญที่สุดของมนุษย์ ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงระบบการมองเห็นของมนุษย์ การมองเห็นของคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์ และการเก็บภาพเข้ามาเพื่อประมวลผล

2.1 องค์ประกอบของการมองเห็น

กระบวนการรับรู้สิ่งต่างๆ ของมนุษย์ที่เกิดขึ้นทางกายภาพนั้นเช่น การได้ยิน การสัมผัส การได้กลิ่น และการมองเห็นนั้นมีองค์ประกอบต่างๆ ที่สลับซับซ้อนมากในร่างกายของมนุษย์แต่มีสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งคือการมองเห็นซึ่งทำให้มนุษย์นั้นเข้าใจอะไรต่างๆ ได้อีกมากมาย เช่น รูปร่าง ขนาด สี ของวัตถุ สิ่งต่างๆ เหล่านี้ช่วยให้มนุษย์นำไปประมวลผลและทำการตัดสินใจอย่างหนึ่งอย่างใดได้ ดังนั้นกระบวนการมองเห็นวัตถุมีองค์ประกอบของการมองเห็นดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบของการมองเห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

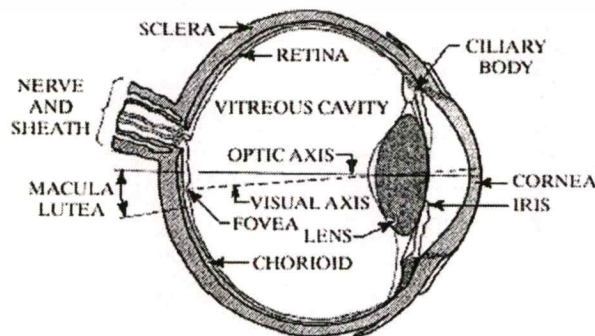
ภาพที่ 2.1 การมองเห็นวัตถุได้นั้นจะต้องมีแสงสว่างจากดวงอาทิตย์หรือแสงจากแหล่งอื่นๆเช่น โคมไฟเป็นต้น แสงนั้นจะเดินทางเป็นเส้นตรงและแสงจากดวงอาทิตย์เรียกว่าแสงขาว เพราะเมื่อตกกระทบกับฉากสีขาวจะเห็นฉากเป็นสีขาว แสงขาวเป็นแสงประกอบ (Compound light) หมายความว่า เป็นแสงที่ประกอบด้วยแสงสีต่างๆกันมากมาย ถ้าผ่านแสงขาวเข้าไปในปริซึมมันจะถูกแยกมาเป็นแสง 7 สี (ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และ แดง) ซึ่งเป็นปรากฏการที่เรียกว่า การกระจายแสง และเมื่อแสงตกกระทบกับวัตถุและสะท้อนกลับไป วัตถุจะสะท้อนแสงสีออกมาจึงทำให้มนุษย์นั้นมองเห็นวัตถุได้ ในหัวข้อต่อไปจะอธิบายการมองเห็นและการเกิดภาพที่ทำให้มนุษย์ได้รับรู้สิ่งต่างๆที่ได้จากการมองเห็น

2.2 การมองเห็นของมนุษย์

โครงสร้างและหน้าที่ของตา(Function Anatomy of eye) [20][21]

ลูกตา (Eyeball) ตั้งอยู่ในกระบอกตามีหนังตา (Eyelid) ทำหน้าที่ป้องกันอันตรายซึ่งมาจากด้านหน้า เช่นในขณะที่มีแสงจ้าเข้าตาหนังตาจะปิดทันทีโดยปฏิกิริยา Reflex ส่วนน้ำตา (Lacrimal fluid) จะช่วยหล่อเลี้ยงให้ดวงตาชุ่มชื้นและรักษาแก้วตาให้สะอาดอยู่เสมอ เพราะน้ำตามีส่วนประกอบของ Lysozyme ซึ่งมีฤทธิ์ทำลาย Bacteria ลูกตาจะสามารถเคลื่อนไหวไปมาได้ในช่องกระบอกตาโดยการทำงานของกล้ามเนื้อตา (Eye muscle) ตามีองค์ประกอบที่สำคัญสามส่วนคือ

1. ระบบเลนส์ (Lens system) ประกอบด้วยกระจกตา (Cornea) และเลนส์ (Lens) ทำหน้าที่หักเหและรวบรวมแสงให้ตกลงบนจอรับภาพ (Retina)
2. เซลล์รับแสง (Receptor cell) และเซลล์ประสาทอื่นๆ ซึ่งเรียงตัวกันอยู่เป็นชั้นๆ ในส่วนของ Retina ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็น Nerve impulse
3. ระบบเส้นประสาท (Nerve system) สำหรับส่ง Nerve impulse จาก Retina cortex



ภาพที่ 2.2 ภาพตัดตามยาวของลูกตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.2 แสดงโครงสร้างตัดตามยาวของลูกตา (Horizontal section) จะเห็นได้ว่าลูกตามีลักษณะเป็นทรงกลมภายในบรรจุอยู่ด้วยของเหลวทั้งด้านหน้าและด้านหลังเลนส์และผนังลูกตาแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้นคือ Sclera, Choroid และ Retina

1. Sclera (หรือ Protective layer) เป็น Fibrous tissue จึงมีลักษณะเหนียวแข็งแรงทำหน้าที่ป้องกันอันตรายให้แก่โครงสร้างที่ละเอียดอ่อนภายใน ผนังลูกตาชั้นนี้ส่วนใหญ่จะมองเห็นเป็นสีขาวและทึบแสง ยกเว้นด้านหน้า ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปจนมีลักษณะใสโปร่งแสง (Transparent) เรียกกระจกตา

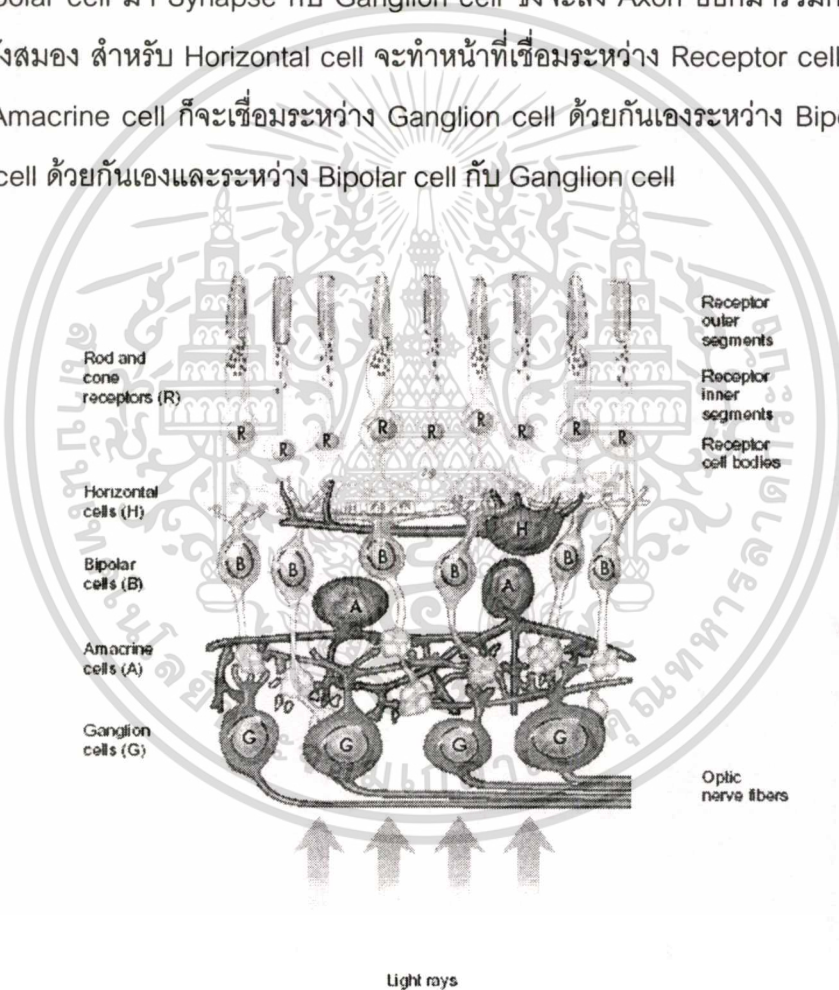
2. Choroid (Pigmented layer) ประกอบด้วยเส้นเลือดที่มาเลี้ยงลูกตาจำนวนมากและยังมีชั้นรงควัตถุ (Pigmented coat) ซึ่งจะทำหน้าที่ดูดแสงที่ผ่านมาจาก Retina เอาไว้เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของแสงเข้าไปใน Retina อีก ซึ่งจะทำให้ภาพพร่ามัว (Blur)

Choroid ส่วนที่อยู่ด้านหน้าจะหนาตัวขึ้นเรียกว่า Ciliary body ทำหน้าที่ผลิตของเหลวที่เรียก Aqueous humor เข้าไปอยู่ในช่องว่างของลูกตาด้านหน้าเลนส์ (Anterior chamber) ของเหลวนี้ปกติจะถูกดูดซึมกลับเข้าเส้นเลือดดำของตาโดยผ่านทาง Canal of schlemm ดังนั้นถ้ามีการอุดตันของท่อนี้เกิดขึ้น จะทำให้ความดันของเหลวในลูกตาสูงขึ้นและเป็นสาเหตุของการเกิดต้อหิน (Glaucoma) บริเวณด้านหน้าของเลนส์จะมีแผ่นกั้นเนื้อเรียก Iris diaphragm ยื่นออกมาบังส่วนขอบของเลนส์ไว้ เหลือบริเวณตรงกลางให้แสงผ่านเข้าไปสู่เลนส์ได้เรียกว่า รูม่านตา (Pupil) Iris จะมี Choroid membrane คลุมอยู่ด้านบนจึงมีลักษณะทึบแสง (Opaque) ถ้า Choroid membrane มีรงควัตถุมากจะทำให้ตามีสีเข้ม (Dark eye) และถ้ามีน้อยตาก็จะมีสีอ่อน เช่นตาสีฟ้า เป็นต้น การมีรงควัตถุมากหรือน้อยเป็นลักษณะที่ควบคุมโดยพันธุกรรม (ตาสีอ่อนเป็นลักษณะด้อย) Iris ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณแสงที่จะเข้าสู่ตา ประกอบด้วยกล้ามเนื้อ 2 ชุดคือ

1. Circular muscle หรือ Sphincter pupillae ควบคุมโดยประสาท Parasympathetic ซึ่งเมื่อกระตุ้นจะทำให้รูม่านตาหดแคบลง (Miosis) หรือปริมาณแสงที่จะเข้าตาลดลง
2. Radial muscle หรือ Dilator pupillae ควบคุมโดยประสาท Sympathetic ซึ่งเมื่อกระตุ้นจะทำให้รูม่านตาขยายกว้างขึ้น (Mydriasis) หรือปริมาณแสงที่จะเข้าสู่ตาเพิ่มขึ้น การหุบและการขยายรูม่านตานี้จะเป็นปฏิกิริยาอัตโนมัติ นอกจากจะทำหน้าที่ควบคุมปริมาณแสงที่จะเข้าสู่ตาแล้ว ยังช่วยกันแสงจากทางด้านข้างไม่ให้เข้าสู่ตาผ่านบริเวณขอบ ๆ เลนส์ ซึ่งจะทำให้ได้ภาพที่ไม่ชัดเจนอันเกิดจากการเกิด Spherical และ Chromatic aberration ด้วย

3. Retina (หรือ Light sensitive layer) อยู่ด้านในสุดของลูกตาเริ่มจาก Ciliary body มาจนถึงบริเวณทางออกของ Optic nerve จากตาไปยังสมอง Retina ประกอบด้วย Photo receptor cell 2 ชนิดคือ Rod และ Cone และ Nerve cell อื่นๆ เรียงตัวกันเป็นชั้นๆ ดังภาพที่ 2.3 ชั้นนอกสุดของ Retina อยู่ติดกับของเหลวใสลักษณะคล้ายวุ้นในช่องว่างของลูกตาด้านหลังเลนส์ (Posterior chamber) ของเหลวนี้เรียกว่า Vitreous humor ทำหน้าที่ช่วยให้ลูกตาคงรูปร่างอยู่ได้

จากภาพที่ 2.3 จะเห็นว่า Retina ประกอบด้วยเซลล์ประสาทหลายชนิดคือ Receptor cell (Rod และ Cone) , Bipolar cell, Ganglion cell, Horizontal cell และ Amacrine cell เรียงตัวอยู่เป็นชั้นๆ โดย Receptor cell ซึ่งอยู่ชั้นในสุดหลายๆ เซลล์จะมา Synapse กับ Bipolar cell และหลายๆ Bipolar cell มา Synapse กับ Ganglion cell ซึ่งจะส่ง Axon ออกมารวมกันเป็น Optic nerve ไปยังสมอง สำหรับ Horizontal cell จะทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง Receptor cell กับ Bipolar cell ส่วน Amacrine cell ก็จะทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง Ganglion cell ด้วยกันเองระหว่าง Bipolar cell กับ Ganglion cell ด้วยกันเองและระหว่าง Bipolar cell กับ Ganglion cell



ภาพที่ 2.3 เซลล์ประสาทชนิดต่าง ๆ เรียงตัวกันอยู่เป็นชั้นๆ ใน Retina

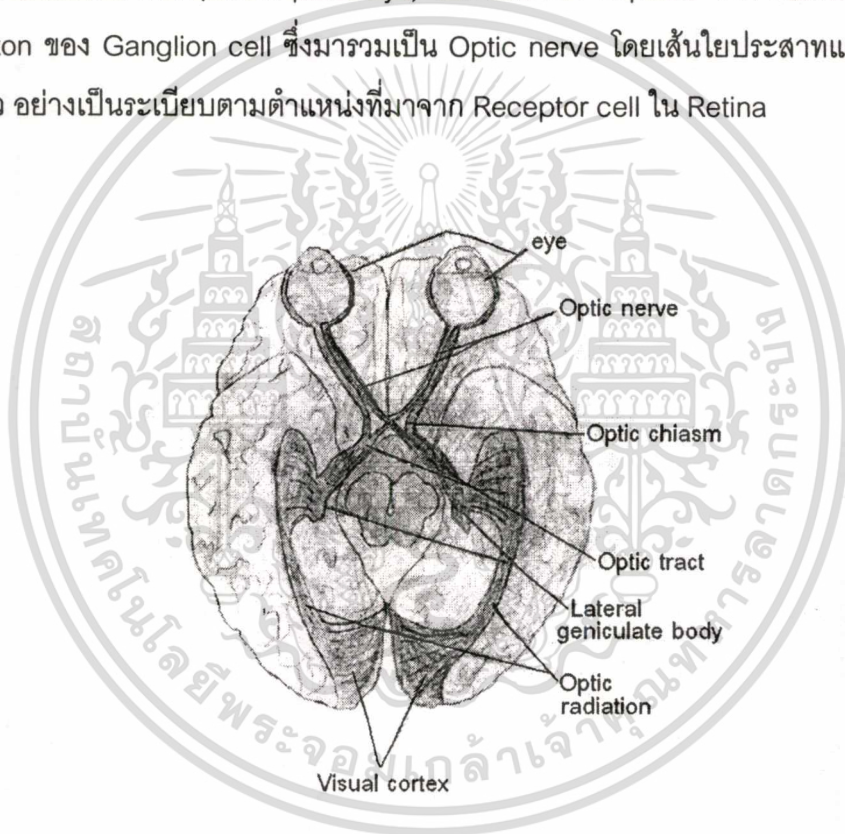
เนื่องจาก Rod และ Cone เรียงตัวอยู่ด้านในสุดติดกับ Choroid ลำแสงต้องเดินทางผ่านชั้นต่างๆ ของ Retina เข้ามาก่อนที่จะมาถึง Rod และ Cone ซึ่ง Sensitive ต่อแสง ดังนั้นในสัตว์ชั้นสูง(เฉพาะ Primates) จึงมีวิวัฒนาการโดยมีบริเวณหนึ่งของ Retina เรียก Fovia centralis (อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาใบเซอร์ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้ Posterior pole) ที่มีเฉพาะ Cone (ซึ่งไวต่อแสงเข้ม) เรียงตัวกันอยู่จำนวนมากเซลล์ต่างๆ ที่อยู่ก่อนถึง Cone รวมทั้งเส้นเลือดจะมีจำนวนน้อยลง หรือหลบไปอยู่ด้านข้างทำให้ Retina บางลง และแสงสามารถผ่านเข้ามาถึง Cone ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้นนอกจากนี้อัตราส่วนของ Cone : Bipolar : Ganglion cell ในบริเวณนี้ยังมีค่าเท่ากับ 1:1:1 Fovea centralis จึงเป็นบริเวณที่ให้ภาพชัดไวและมีความคมชัดที่สุดในเวลากลางวันหรือในขณะที่มีแสงเข้ม

สำหรับบริเวณ Optic disc ซึ่งเป็นทางออกของ Optic nerve ไปยังสมองจะไม่มี Receptor cell (ทั้ง Rod และ Cone) อยู่เลยดังนั้นเราจึงไม่สามารถมองเห็นภาพที่มาจากบริเวณนี้ได้เรียกบริเวณนี้ว่า Blind spot

ทางเดินประสาทตา(Visual pathways) ในภาพที่ 2.4 Impulse จาก Retinal cell จะถูกส่งผ่าน Axon ของ Ganglion cell ซึ่งมารวมเป็น Optic nerve โดยเส้นใยประสาทแต่ละเส้นจะมีการเรียงตัว อย่างเป็นระเบียบตามตำแหน่งที่มาจาก Receptor cell ใน Retina



ภาพที่ 2.4 Neural pathway จาก Retina ทั้งสองข้างไปยัง Visual cortex

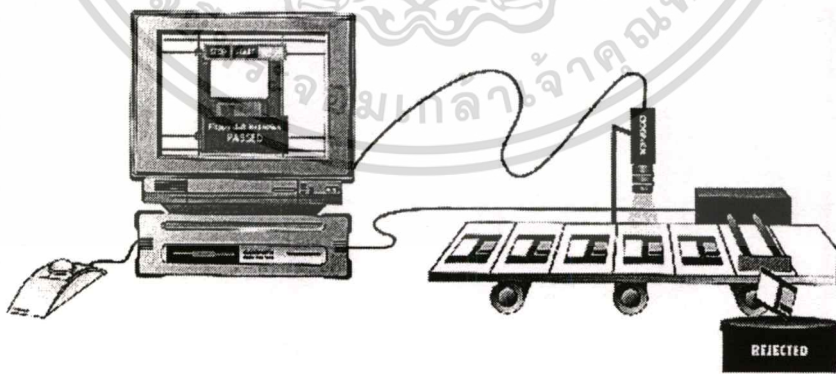
เมื่อมาถึง Optic chiasm ใยประสาทที่มาจาก Retina ด้านข้างจะมีการข้ามไปอยู่ใน Optic tract ด้านตรงข้าม Optic tract จะนำไปสู่ Lateral geniculate body ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ Hypothalamus เพื่อ Synapse กับ Neuron ตัวใหม่ จากนั้น Impulse จะถูกส่งผ่าน Geniculo calcarine tract ไปสมองส่วน Visual cortex ซึ่งทำหน้าที่รับผิดชอบเกี่ยวกับการมองเห็นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่สำคัญส่วนแรกเป็น Primary visual area ทำหน้าที่ในการรับรู้และการบอกให้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทราบถึงรูปร่างและความคมชัดของวัตถุถ้าส่วนนี้เสียไปจะทำให้ตาบอด ส่วนที่สองเป็น Visual association area ทำหน้าที่ในการแปลผลถ้าส่วนนี้เสียไปทำให้ความสามารถในการบอกรูปร่างขนาดและชนิดของวัตถุเสียไปเกิด Alexia คือ มองเห็นแต่ไม่สามารถอธิบายภาพที่เห็นได้

2.3 การมองเห็นของคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์

จากการศึกษากระบวนการความสามารถในการมองเห็นได้ของมนุษย์และกระบวนการของการเกิดภาพ ทำให้เกิดแนวทางที่จะพัฒนาการมองเห็นได้ของคอมพิวเตอร์และการสร้างประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ให้รับรู้สถานะทางฟิสิกส์ได้มากขึ้น

ระบบการมองเห็นโดยทั่วไปในที่นี่จะกล่าวถึงระบบการมองเห็นของมนุษย์เบื้องต้น ซึ่งในหลายปีที่ผ่านมาในงานอุตสาหกรรมจะใช้การมองของมนุษย์ในการควบคุมคุณภาพ เช่นการตรวจสอบความชำรุด สี รอยดำหนิและลวดลายของชิ้นงานหรือวัตถุใดๆ ก็ตาม แต่เนื่องจากระบบการมองเห็นของมนุษย์มีความไม่แน่นอน เช่นการมองวัตถุชนิดเดียวกันที่มีความเข้มของสีต่างกันเพียงเล็กน้อย ทำให้มนุษย์ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างดังกล่าวได้และยังคงเห็นวัตถุเป็นสีเดียวกันอยู่ การตรวจสอบวัตถุที่กระทำซ้ำๆ กันเป็นเวลานานๆ เป็นผลให้เกิดความอ่อนล้าขึ้นที่ดวงตาและตัวมนุษย์เอง ซึ่งทำให้คุณภาพที่ออกมาไม่มีความถูกต้องไม่สม่ำเสมอ การตัดสินใจของแต่ละบุคคลที่ไม่เหมือนกันเป็นต้น สิ่งเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแยกแยะของดวงตารวมถึงเชาว์ปัญญา (Intelligent) ของแต่ละบุคคลด้วย โดยเชาว์ปัญญานั้นสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายทางเช่นการเรียนรู้จากประสบการณ์การแลกเปลี่ยนความคิดเห็น การสังเกตเห็นความรู้สึกที่รับรู้ได้เองเป็นต้น แต่เป็นเพียงส่วนน้อยที่เชาว์ปัญญาจะเกิดขึ้นได้เอง

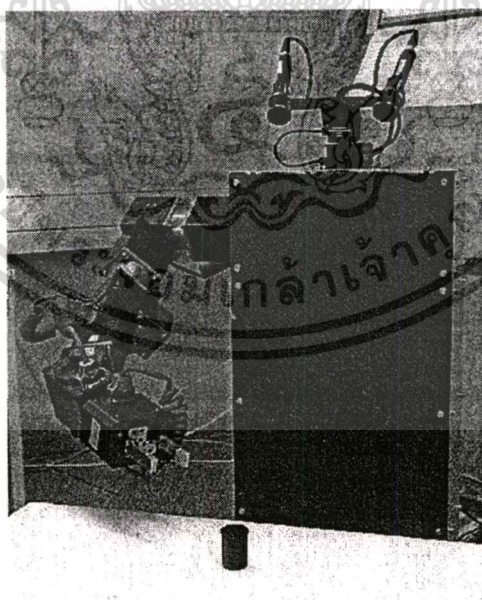


ภาพที่ 2.5 การนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในงานตรวจสอบและคัดแยกในงานอุตสาหกรรม

ในระบบการมองเห็นของคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์มีลักษณะตายตัวจะสร้างขึ้นมาจาก ฮาร์ดแวร์ (Hardware) และซอฟต์แวร์ (Software) ซึ่งตัวตรวจจับ (Sensor) ที่นิยมใช้งานมีอยู่หลายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดแต่เราได้เลือกเอากล้องวิดีโอนำมาใช้เป็นอุปกรณ์หลัก โดยกล้องวิดีโอสามารถมองเห็นภาพได้ใกล้เคียงกับตามนุษย์มากที่สุด ภาพที่ 2.5 เป็นระบบการมองเห็นของคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์สามารถมองเห็นหรือตรวจสอบวัตถุที่กระทำซ้ำๆ กันเป็นเวลานานๆ และมีประสิทธิภาพสูงกว่ามนุษย์มาก แต่เนื่องจากในระบบการตรวจสอบนั้นจะออกแบบเป็นอัลกอริทึมเพียงครั้งเดียวเพื่อใช้ในการตรวจสอบเฉพาะงานใดงานหนึ่งเท่านั้น ซึ่งเป็นข้อเสียของวิธีนี้ แต่จะทำให้ผลที่ได้มีความถูกต้องและความเชื่อถือได้เป็นอย่างดี เช่น เมื่อออกแบบอัลกอริทึมเฉพาะใช้ในการตรวจสอบสีของชิ้นงาน จะไม่สามารถนำอัลกอริทึมดังกล่าวไปตรวจสอบชิ้นงานได้จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขอัลกอริทึมขึ้นใหม่เสียก่อน แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้เริ่มมีการออกแบบพัฒนาระบบและฟังก์ชันในการตรวจสอบให้มีความสามารถใช้งานได้ทั่วไป โดยขึ้นอยู่กับผู้ใช้ว่าจะนำไปประยุกต์ใช้ในงานประเภทใดไม่ว่าจะเป็นการแยกประเภทตำแหน่งขนาด ลวดลาย สี และชนิดของวัตถุใดๆก็ตาม

หุ่นยนต์ที่นิยมนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมได้แบ่งออกเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ คือ หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ได้ (Mobile robot) และหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ไม่ได้ (Stationary robot) เหตุผลที่ต้องใช้หุ่นยนต์ก็เพราะว่าทำงานได้รวดเร็ว มีคุณภาพที่แน่นอน และสามารถทำงานที่เสี่ยงอันตรายแทนมนุษย์ได้ ในปัจจุบันอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมนำหุ่นยนต์ไปใช้ในงานต่างๆ เช่น ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน ใช้แขนกลในการหยิบจับชิ้นงานและนำไปวางในตำแหน่งที่ต้องการ ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ในการหยิบจับวัตถุ

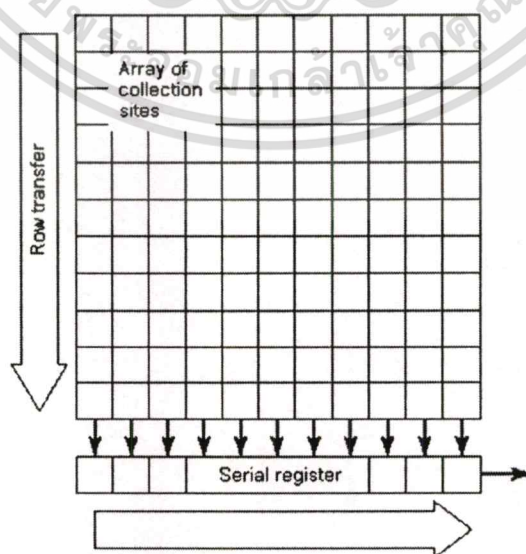
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การประมวลผลภาพ (Image processing)

2.4.1 วิธีการเก็บภาพ ในการเก็บภาพของวัตถุจะอาศัยอุปกรณ์สำหรับเก็บภาพคือกล้อง CCD เพื่อทำการแปลงระดับความสว่างในแต่ละตำแหน่งของภาพให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้าแบบอนาล็อก จากนั้นจะมีอุปกรณ์สำหรับแปลงสัญญาณภาพดังกล่าวให้เป็นสัญญาณดิจิทัลโดยทั่วไปจะใช้การดิจิตัลไคเซอร์ที่ประกอบด้วยวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เป็นส่วนประกอบที่สำคัญและจะมีการจัดเรียงสัญญาณดิจิทัลนี้ลงสู่หน่วยความจำ (Video memory) ซึ่งจะแทนค่าความสว่างของภาพในแต่ละจุดให้เกิดเป็นภาพเรียกว่าภาพดิจิทัล (Digital image)

ในภาพที่ 2.7 ภาพหนึ่งๆจะถูกแบ่งออกเป็นจุดย่อยๆจำนวนมากเรียกว่าส่วนประกอบภาพ (Picture element) หรือจุดภาพ (Pixel) จำนวนของจุดภาพยิ่งมากยิ่งจะทำให้ภาพมีความละเอียดคมชัดมากยิ่งขึ้น จากนั้นจึงแทนภาพของแต่ละจุดภาพด้วยสัญญาณดิจิทัลหรือแทนด้วยสถานะลอจิก "0" และ "1" การใช้สัญญาณดิจิทัลมีข้อดีคือ การนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้สามารถทำได้ง่ายสิ่งที่สำคัญในการเก็บภาพคือกระบวนการดิจิตัลไคเซอร์และหน่วยความจำภาพ

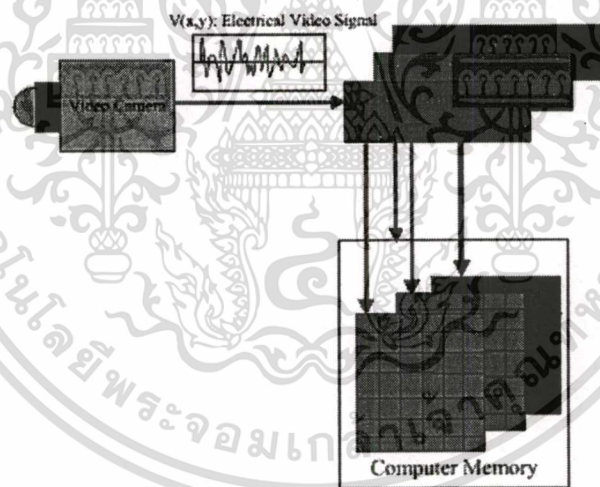
กระบวนการดิจิตัลไคเซอร์ (Digitization) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสัญญาณภาพจากสัญญาณอนาล็อกให้เป็นข้อมูลทางดิจิทัลแล้วนำไปจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำการเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital conversion หรือ A/D) ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ 1. การสุ่มตัวอย่างสัญญาณอนาล็อก (Sampling) และ 2. การจัดระดับของสัญญาณที่สุ่มมา (Quantizing) แต่ละระดับแทนด้วยรหัสดิจิทัลขนาด 8 บิต แทนระดับสัญญาณได้ 256 ระดับ ซึ่งพอเพียงสำหรับรายละเอียดภาพ



ภาพที่ 2.7 วิธีการเก็บภาพดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณภาพประกอบด้วยสัญญาณหลายชนิดปะปนกันมา ในการแปลงสัญญาณจะทำการแปลงส่วนข้อมูลภาพจริงๆเท่านั้นในส่วนของสัญญาณอื่นๆเช่น สัญญาณแบล็กกิ้งไม่ได้ถูกแปลงด้วย แต่จะใช้ในการควบคุมการแปลงสัญญาณและการเขียนข้อมูลที่ถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้วลงหน่วยความจำ เนื่องจากสัญญาณภาพมีการเปลี่ยนแปลงที่เร็วมาก การจะเก็บรายละเอียดของสัญญาณภาพให้ครบ A/D ต้องทำงานที่ความถี่สูง และต้องใช้รหัสดิจิทัลขนาด 8 บิตเป็นอย่างน้อยโดยส่วนมาก A/D ที่ใช้เป็นประเภทแฟลช (Flash A/D) ซึ่ง แฟลช A/D นี้สามารถเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกให้เป็นค่าดิจิทัลได้เสร็จภายใน 1 นาโนวินาที สัญญาณนาฬิกาสำหรับภาพขาวดำสัญญาณ Y หรือ ลูมิแนนซ์เท่านั้นที่ถูกนำมาแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลเพราะเป็นส่วนข้อมูลภาพสำหรับภาพสีใช้แต่สัญญาณ Y เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายความหมายของสีได้จึงจำเป็นต้องใช้ 3 สัญญาณ Y, R-Y และ B-Y มาทำการแปลงสัญญาณจะทำให้ต้องใช้ A/D และหน่วยความจำเพิ่มถึง 3 ชุด ถ้าไม่ใช้สัญญาณดังกล่าวสามารถใช้สัญญาณสี RGB ก็ได้โดยการนำสัญญาณภาพไปเข้าวงจรถอดรหัส (Decoder) เพื่อแยกเอาสัญญาณสี RGB ออกจากสัญญาณภาพแล้วจึงนำไปแปลงสัญญาณต่อไป



ภาพที่ 2.8 วิธีการเก็บภาพจากกล้องวิดีโอเข้าสู่คอมพิวเตอร์

ในภาพที่ 2.8 สัญญาณอนาล็อกจากกล้องวิดีโอสามารถแสดงความละเอียดและจำนวนสีของภาพอาจเรียกว่าไม่จำกัด เนื่องจากความต่อเนื่องของสัญญาณ แต่เมื่อสัญญาณภาพอนาล็อกถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัลความละเอียดและจำนวนสีของภาพถูกจำกัดด้วยความเร็วของ A/D จำนวนบิตที่ใช้ในการแปลงสัญญาณและขนาดของหน่วยความจำ ในภาพระดับเกรย์สเกลแต่ละจุดภาพสามารถแสดงระดับสัญญาณได้ 256 ระดับนั่นคือ 1 จุดภาพเอกสจะต้องสร้างจากข้อมูลจำนวน 8 บิตแต่ถ้าเป็นภาพสี 1 จุดภาพจะประกอบด้วยสัญญาณสี RGB มากกว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

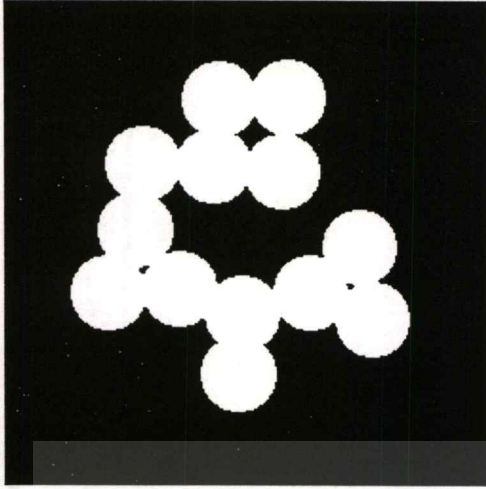
จะต้องสร้างจากข้อมูลจำนวน 8 บิต แต่ถ้าเป็นภาพสี 1 จุดภาพจะประกอบด้วยสัญญาณสี RGB ดังนั้นในแต่ละจุดภาพจึงต้องใช้จำนวนบิตที่เท่ากับ 24 บิต เพื่อให้สามารถเห็นระดับความแตกต่างของสีได้อย่างเพียงพอ ซึ่งสามารถแสดงสีที่แตกต่างกันได้ 16,777,216 สี

หน่วยความจำ (Video memory) สัญญาณภาพอนาล็อกเมื่อถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลแล้วจะทำให้เกิดข้อมูลเป็นจำนวนมากจึงจำเป็นต้องใช้หน่วยความจำในการเก็บข้อมูลไว้ชั่วคราวก่อนที่นำไปใช้งาน หน่วยความจำที่ใช้เป็นประเภทอ่านและเขียนข้อมูลใหม่ได้หรือเรียกว่า RAM (Random Access Memory) บางครั้งหน่วยความจำภาพถูกเรียกว่า วิดีโอแรม (Video ram) คุณสมบัติของวิดีโอแรมที่ใช้ในการเก็บภาพที่สำคัญคือ ต้องใช้เวลาในการเข้าถึงข้อมูล (Access time) ที่ต่ำมาก ๆ นั่นคือความเร็วในการเขียนและอ่านข้อมูลต้องมากเพียงพอ ขนาดของหน่วยความจำที่ใช้ขึ้นขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลดิจิทัลที่ต้องการจัดเก็บ ส่วนข้อมูลจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความละเอียดของภาพ

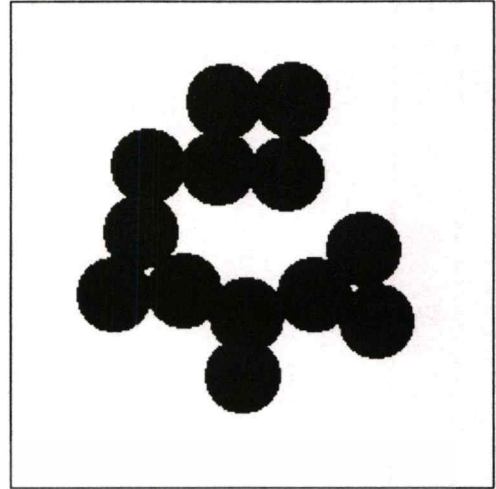
2.4.2 การประมวลผลภาพ ข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์ (Hardware) ที่ใช้ในการเก็บภาพในกระบวนการดิจิทัลเซชันคือไม่สามารถแยกแยะหรือกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้นกับภาพนั้นได้ ยิ่งไปกว่านั้นข้อมูลภาพบางตำแหน่งยังปกปิดข้อมูลที่เราสงสัย ซึ่งหากมองด้วยตาเปล่าแล้วไม่สามารถจะมองเห็นได้จึงได้มีการนำภาพดังกล่าวนั้นไปดำเนินการด้วยวิธีการที่เรียกว่า "การประมวลผลภาพ" ซึ่งจะทำการสร้างภาพใหม่ขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงข้อมูลตัวเลขคือในบริเวณที่เราสงสัยจะถูกกระทำการปรับปรุงรายละเอียดของภาพ (Enhancement) และยังเป็นผลให้สัญญาณรบกวนลดลงหรือถูกกำจัดทิ้งไป ตัวอย่างของการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital image processing) ที่นิยมใช้ทั่วไปได้แก่การกำจัดสัญญาณรบกวน การหาขอบภาพ (Edge detection) การฟิลเตอร์ภาพ (Filtering) และการปรับปรุงระดับเกรย์สเกล เป็นต้น

การประมวลผลภาพหรือการเปลี่ยนแปลงข้อมูลภาพแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีคือ

1. วิธีประมวลผลทีละจุดใน 1 ภาพ (Point by point) โดยแต่ละจุดภาพของภาพต้นแบบ (Original image) จะถูกแปลงไปเป็นภาพใหม่ซึ่งค่าของแต่ละจุดภาพในภาพใหม่จะสัมพันธ์กับค่าของจุดภาพที่ตำแหน่งเดียวกันกับภาพต้นแบบ ตัวอย่างเช่นการเปลี่ยนภาพไบนารี (Binary image) จุดภาพที่มีระดับเป็น "0" ในภาพต้นแบบจะถูกเปลี่ยนไปเป็นระดับ "1" ในภาพใหม่และจุดภาพที่มีระดับเป็น "1" ในภาพต้นแบบจะถูกเปลี่ยนไปเป็น "0" ในภาพใหม่ในภาพที่ 2.9
2. วิธีประมวลผลโดยใช้จุดภาพที่สอดคล้องกัน (Corresponding point) จากภาพตั้งแต่ 2 ภาพขึ้นไป วิธีนี้จะสร้างภาพใหม่โดยใช้วิธีสหสัมพันธ์ (Correlation) ของแต่ละจุดภาพเพื่อหาค่าของจุดภาพที่เหมือนกันหรือสอดคล้องกันจากภาพ 2 ภาพหรือตั้งแต่ 2 ภาพขึ้นไป



(a)



(b)

ภาพที่ 2.9 การประมวลผลที่ละจุดภาพ (a) ภาพก่อนการประมวลผลที่ละจุดภาพ (b) ภาพหลังการประมวลผลที่ละจุดภาพ

ค่าของจุดภาพดังกล่าวสามารถนำมารวมกันด้วยวิธีการต่างเช่นค่าของจุดภาพจากภาพ 2 ภาพของเมืองๆหนึ่งที่เก็บเวลาต่างกันสามารถนำมาลบกันเพื่อคำนวณหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ต่างกัน นอกจากนี้ยังสามารถใช้ข้อมูลรวมข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดต่างๆ จำนวนหนึ่ง เพื่อแปลงไปเป็นข้อมูลภาพที่มีความสมบูรณ์หรือมีรายละเอียดของภาพที่สามารถแสดงให้เห็นได้ง่ายยิ่งขึ้น ซึ่งตัวตรวจวัดอาจจะเป็นกล้องถ่ายภาพดาวเทียมโดยเก็บภาพของสเปกตรัมต่างๆกันเช่นรังสีอินฟราเรด รังสีอัลตราไวโอเล็ต และรังสีที่สามารถมองเห็นได้เป็นต้น



(a)



(b)

ภาพที่ 2.10 การประมวลผลที่ละกลุ่ม (a) ภาพก่อนการประมวลผล (b) ภาพหลังการประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.10 (a) แสดงภาพต้นแบบจะเห็นว่ามีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นบนภาพแต่เมื่อนำมาประมวลผลโดยการเฉลี่ยทีละกลุ่มแล้วจะได้ ภาพที่ 2.10 (b) จะเห็นว่าสัญญาณรบกวนจะลดลงมาก

3. วิธีประมวลผลทีละกลุ่มใน 1 ภาพ (Regional points) ในการคำนวณจะใช้ค่าของจุดภาพที่อยู่รอบๆจุดภาพหลักนำมาสร้างภาพใหม่ด้วยวิธีการต่างๆเช่น การเฉลี่ยข้อมูลจากจุดภาพที่อยู่รอบๆจุดภาพหลัก ซึ่งจะช่วยลดข้อมูลที่มีความผิดพลาดให้ลดลง ดังนั้นค่าของจุดภาพในภาพใหม่นี้จะเท่ากับค่าเฉลี่ยของจุดภาพ 9 จุดที่ติดกัน (จุดภาพหลักหนึ่งจุดและรอบๆจุดภาพหลักอีก 8 จุด)



บทที่ 3

การคำนวณหาระยะทางด้วยหลักการต่างๆ

ในการหาระยะทางของวัตถุจะใช้ตัวตรวจจับชนิดต่างๆ ซึ่งของมูลที่ได้จากตัวตรวจจับยังไม่ใช้เป็นระยะทางจริงจะต้องนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการคำนวณใหม่เสียก่อน เราเรียกข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจจับนี้ว่า ข้อมูลระยะทาง (Range data) ดังนั้นข้อมูลระยะทางจึงมีประโยชน์มาก ซึ่งจะทำให้หุ่นยนต์นำข้อมูลระยะทางดังกล่าวไปคำนวณหาระยะทางจริง เพื่อให้สามารถรับรู้ระยะทางที่จะทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนไหวไปยังตำแหน่งที่ต้องการหรือหยิบจับวัตถุที่ต้องการได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณหาระยะทางแบบต่างๆ และที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

3.1 การหาระยะทางด้วยหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไป (Time of flight)

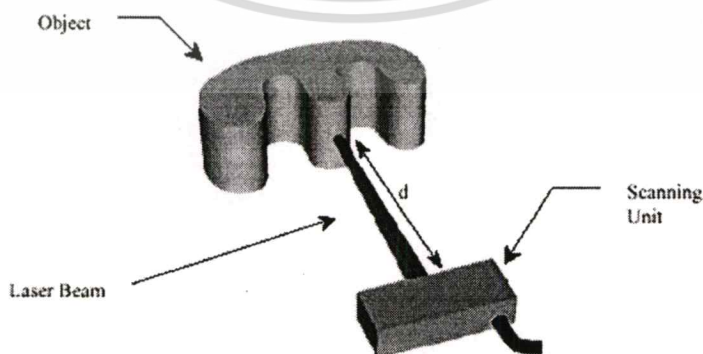
การวัดระยะทางวิธีนี้จะใช้การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปยังวัตถุที่ต้องการเมื่อสัญญาณนี้กระทบกับวัตถุมันก็จะสะท้อนกลับมาที่ตัวรับในภาพที่ 3.1 รูปแบบของสัญญาณมีอยู่หลายชนิดด้วยกันและระยะทางหาได้จากผลคูณระหว่างความเร็วกับเวลาหรือเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$d = \frac{vt}{2} \quad (3.1)$$

เมื่อ d คือระยะทางจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปยังวัตถุ(เมตร)

v คือความเร็วขึ้นอยู่กับชนิดของสัญญาณที่ใช้(เมตร/วินาที)

t คือเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปและสะท้อนกลับมา(วินาที)



ภาพที่ 3.1 การวัดระยะทางโดยใช้หลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

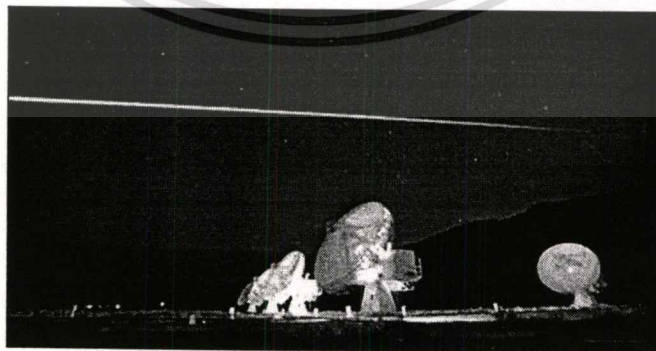
คุณสมบัติของสัญญาณโดยทั่วไปที่ต้องคำนึงถึงแบ่งได้เป็นสองลักษณะคือ

1. มุมเบี่ยงเบนของสัญญาณถ้าหากสัญญาณที่ส่งออกไปมีมุมกว้างแต่วัตถุมีขนาดเล็กจะทำให้ระยะทางที่คำนวณได้มีความแม่นยำลดลงเพราะสัญญาณจะครอบคลุมบริเวณได้กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่มีมุมแคบกว่าซึ่งทำให้มีความแม่นยำมากขึ้น

2. ความเร็วของสัญญาณสัญญาณที่ส่งไปและสะท้อนกลับมาจากวัตถุที่เร็วกว่าจะทำให้การคำนวณหาระยะทางยุ่งยากกว่าเช่นคลื่นเสียงเดินทางที่ความเร็ว 1,100 ฟุต/วินาที ขณะที่คลื่นแสงเดินทางที่ความเร็ว 982,080,000 ฟุต/วินาที ซึ่งจะใช้ตัวเลขดังกล่าวในการคำนวณหาระยะทางร่วมกับเวลาที่สูญเสียไปสมมุติที่ระยะทาง 1 ฟุตคลื่นเสียงจะใช้เวลา 1.8 มิลลิวินาทีเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นแสงจะใช้เวลาประมาณ 1 นาโนวินาที จะเห็นว่าคลื่นแสงจะใช้เวลาน้อยกว่ามากแต่ในระบบการมองเห็นของหุ่นยนต์เพียงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ธรรมดาไม่สามารถที่จะตรวจได้ทันหรือถ้าหาวัตถุได้ก็ไม่เกิดประโยชน์เท่าใดนักเพราะในระบบการมองเห็นของหุ่นยนต์นิยมใช้วัดระยะทางสั้น ๆ เท่านั้น

โดยทั่วไปมีสัญญาณอยู่สามชนิดที่ใช้หลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปซึ่งได้แก่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแสงและคลื่นเสียงทั้งสามวิธีการคำนวณหาระยะทางจะมีลักษณะเหมือนกันอย่างไรก็ตามสัญญาณแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวของมันเองและจะมีผลต่อความแม่นยำของระยะทางที่คำนวณได้

3.1.1 วิธีใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ในการวัดระยะทางในวิธีนี้จะใช้คลื่นความถี่วิทยุที่นิยมเรียกว่า เรดาร์ (Radar) เรดาร์นิยมใช้ในด้านทางทหารและพลเรือน แนวความคิดมีอยู่ว่าเมื่อส่งคลื่นวิทยุไปในชั้นบรรยากาศถ้าหากพบหรือชนกับวัตถุคลื่นจะสะท้อนกลับมาและระยะทางคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของเวลาดังภาพที่ 3.2

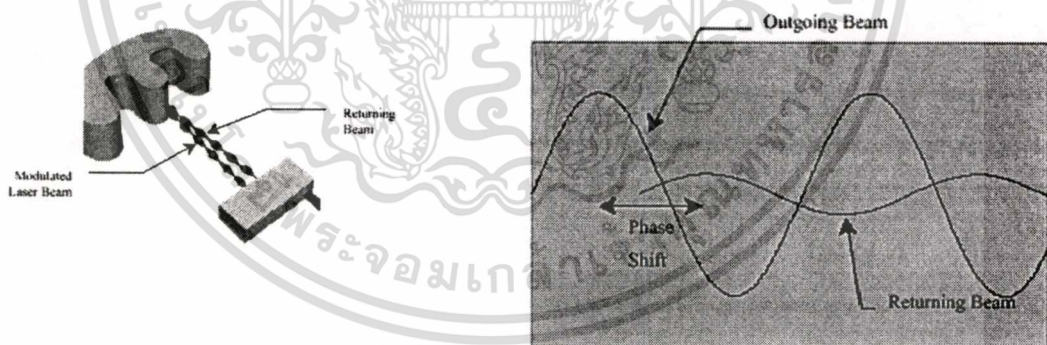


ภาพที่ 3.2 การวัดระยะทางโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรดาร์นิยมใช้ในการวัดระยะทางกับวัตถุที่เป็นโลหะและอยู่ไกลๆ และสิ่งหนึ่งที่ควรรู้ไว้ก็คือ คลื่นวิทยุจะต้องมีกำลังมากพอที่จะกำเนิดสัญญาณที่มีมุมเบี่ยงเบนแคบๆ ซึ่งมุมนี้จะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีขนาดใหญ่จะทำให้ส่งคลื่นวิทยุที่มีมุมเบี่ยงเบนได้แคบ นอกจากนั้นคลื่นวิทยุความถี่สูงจะเดินทางได้เร็วเกือบเท่ากับความเร็วแสง ดังนั้นในการวัดความลึกจึงมีความยุ่งยากสำหรับในการวัดระยะทางสั้นๆ สิ่งสำคัญอีกอย่างก็คือวัตถุที่ไม่ใช่โลหะส่วนใหญ่จะดูดซับวิทยุความถี่สูงเพื่อให้อัตราสะท้อนกลับต่ำได้ สัญญาณดังกล่าวจะต้องมีกำลังมากพอ จึงเป็นผลทำให้ต้องใช้เครื่องมือที่มีกำลังสูงๆ ดังนั้นเรดาร์จึงไม่เป็นที่นิยมในระบบการมองเห็นของหุ่นยนต์ในการหาระยะทาง

3.1.2 วิธีใช้คลื่นแสง (Light) วิธีนี้ถูกเรียกว่า LIDAR (Light Detection And Ranging) ซึ่งจะกำเนิดคลื่นแสงสั้นๆ ออกไปและรอคลื่นสะท้อนกลับมานำเวลาที่สูญเสียไปมาคำนวณหาระยะทางในวิธีนี้จะนิยมใช้แสงเลเซอร์ (Laser) เพราะว่ามีมุมเบี่ยงเบนของคลื่นจะแคบมากเป็นผลให้ระยะทางที่คำนวณได้มีความถูกต้องสูงซึ่งจะดีกว่าคลื่นแสงทั่วไป นอกเหนือจากเวลาที่นำไปคำนวณแล้วความเข้มของแสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับสามารถนำมาเปลี่ยนเป็นความเข้มในระดับเกรย์ได้อีกด้วย ความเข้มแสงที่สะท้อนกลับจะเปลี่ยนไปตามสัดส่วนกับจำนวนของแสงที่ถูกดูดซับด้วยวัตถุที่แตกต่างกัน ดังนั้นนอกจากจะรู้ระยะทางแล้วความเข้มแสงที่ได้รับมาในแต่ละจุดสามารถนำมาแสดงรวมกันได้เป็นภาพสามมิติอีกด้วยดังภาพที่ 3.3

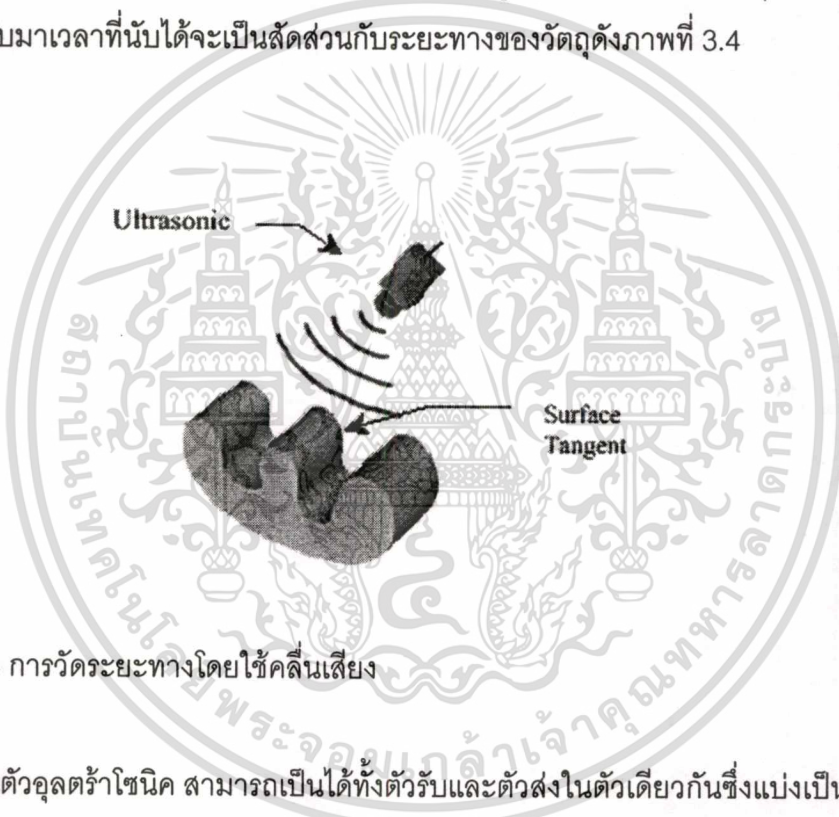


ภาพที่ 3.3 การวัดระยะทางโดยใช้คลื่นแสง

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวิธีนี้มีอยู่ว่าถ้านำไปวัดกับระยะทางที่น้อยกว่าหนึ่งฟุตซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 นาโนวินาทีจะไม่สามารถตรวจวัดได้ทัน วิธีแก้คือเปลี่ยนไปวัดเฟสของคลื่นที่สะท้อนกลับมาแทนโดยใช้แสงเลเซอร์ที่มอดูเลต (Modulate) แบบ A.M. (Amplitude Modulation) แล้วจึงส่งออกไปดังภาพที่ 3.3 เมื่อแสงไปกระทบวัตถุและสะท้อนกลับมาก็จะมีเฟสต่างกับคลื่นที่ส่งออกไป

ปริมาณของความต่างเฟสจะเป็นสัดส่วนกับระยะทางของวัตถุนอกจากนี้ยังสามารถวัดระยะทางที่ 1 เซนติเมตรได้อีกด้วย ดังนั้นวิธีนี้สามารถนำไปวัดระยะทางในระบบการมองเห็นของหุ่นยนต์ได้

3.1.3 วิธีใช้คลื่นเสียง (Sound) คลื่นเสียงหรืออัลตราโซนิก (Ultrasonic) สามารถวัดระยะทางที่ไกลๆได้อย่างแม่นยำเพราะคลื่นเดินทางที่ความเร็วต่ำ อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะส่งคลื่นให้ได้มุมเบี่ยงเบนที่แคบๆเพื่อให้สามารถรู้ลักษณะของวัตถุแบบสามมิติได้ คลื่นอัลตราโซนิกส่วนมากใช้วัดระยะทางตั้งแต่ 1-50 ฟุตมีความผิดพลาดประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ โดยเครื่องส่งจะส่งคลื่นเสียงความถี่สูงออกไปเป็นช่วงสั้นๆและใช้ฮาร์ดแวร์หรือซอฟต์แวร์ง่ายในการนับเวลาที่สูญเสียงไปโดยเครื่องนับจะเริ่มนับเมื่อคลื่นถูกส่งออกไปและจะหยุดนับเมื่อคลื่นเสียงสะท้อนกลับมาเวลาที่นับได้จะเป็นสัดส่วนกับระยะทางของวัตถุดังภาพที่ 3.4



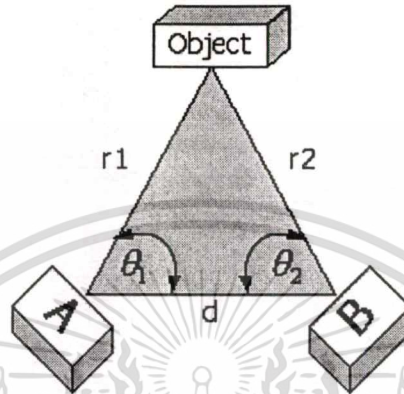
ภาพที่ 3.4 การวัดระยะทางโดยใช้คลื่นเสียง

ในตัวอัลตราโซนิก สามารถเป็นได้ทั้งตัวรับและตัวส่งในตัวเดียวกันซึ่งแบ่งเป็นสองชนิดคือ Piezoelectric transducer และ Electrostatic transducer เมื่อใช้ทรานสดิวเซอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นตัวมันเองจะทำหน้าที่คล้ายกับลำโพงจะกำเนิดคลื่นเสียงสั้นๆประมาณ 5-20 ไมโครวินาที แต่จะมีความถี่สูงกว่าความถี่เสียงโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 30-50 kHz เสียงที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการใช้แรงดันไฟกระแสสลับไปกระตุ้นที่ตัวทรานสดิวเซอร์ ถ้าเป็น Piezoelectric transducer จะทำให้ตัวคริสตอลสั้นที่มีความถี่เรโซแนนซ์ ถ้าเป็น Electrostatic transducer เมื่อมีสัญญาณมากกระตุ้นเข้าที่แผ่นโลหะจะทำให้แผ่นโลหะเกิดการสั้นไปมาและเกิดเป็นคลื่นความถี่สูงขึ้นมา และเมื่อใช้ทรานสดิวเซอร์เป็นตัวรับคลื่นมันจะทำหน้าที่คล้ายกับไมโครโฟนเมื่อมีสัญญาณเข้ามาก็จะเกิดการสั้นขึ้นที่ตัวทรานสดิวเซอร์ผลที่ได้ก็นำไปแปลงเป็นสัญญาณที่สามารถใช้หยุดเครื่องนับเวลาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การหาระยะทางด้วยหลักการของรูปสามเหลี่ยม

เราอาจจะคุ้นเคยกับแนวความคิดของการนำหลักการของรูปสามเหลี่ยมมาวัดระยะทาง สมมติว่ามีเครื่องมืออยู่สองตัวซึ่งวางห่างกันเป็นระยะทางที่แน่นอน (d) เครื่องมือ A และ B จะเก็บตำแหน่งบนวัตถุที่ตำแหน่งเดียวกันดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 การวัดระยะทางโดยหลักการของรูปสามเหลี่ยม

จะเห็นว่าเครื่องมือทั้งสอง (A และ B) และวัตถุวางในลักษณะรูปสามเหลี่ยม มีด้านหนึ่ง ด้านและมุมสองมุมที่เราทราบอยู่ก่อนแล้วคือด้าน d กำหนดให้มุมที่เกิดขึ้นระหว่าง d และ r_1 คือมุม θ_1 d และ r_2 คือมุม θ_2 ส่วนมุมที่สามหาได้โดยใช้มุมสองมุมที่เราทราบลบออกจาก 180 องศา ซึ่งระยะทางระหว่างเครื่องมือแต่ละตัวไปยังวัตถุสามารถได้โดยใช้กฎของซายน์

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

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

ในการวัดระยะทางโดยใช้หลักการรูปสามเหลี่ยมแบ่งออกเป็น 2 วิธีซึ่งวิธีแรกเรียกว่าแอคทีฟ (Active) จะใช้เครื่องมือเก็บภาพ 1 ตัวร่วมกับเครื่องกำเนิดแสงอีก 1 ตัว อีกวิธีเรียกว่าพาสซีฟ (Passive) จะใช้เครื่องมือเก็บภาพ 2 ตัวเช่นกล้องวิดีโอ เป็นต้น

3.3 การหาระยะทางด้วยหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอกทีฟ

หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอกทีฟจะใช้เครื่องกำเนิดแสงร่วมกับกล้องวิดีโอโดยเครื่องกำเนิดแสงจะเป็นแบบจุดหรือสายเดี่ยวก็ได้ซึ่งภาพที่ได้เราจะนำจุดภาพที่ถูกแสงมาคำนวณหาระยะทางได้ดังนี้

3.3.1 วิธีแบบจุด (Spot sensing) สมมติว่าเราฉายลำแสงไปบนวัตถุดังภาพที่ 3.6 ลำแสงดังกล่าวจะสร้างจุดแสงบนวัตถุและจะสะท้อนไปยังกล้องวิดีโอโดยเรารู้ระยะห่างระหว่างกล้องวิดีโอกับเครื่องกำเนิดแสง จะเห็นว่าเกิดเป็นรูปสามเหลี่ยมขึ้นระหว่างเครื่องกำเนิดแสง วัตถุ และกล้องวิดีโอ ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาระยะทางจากกล้องวิดีโอไปยังจุดบนวัตถุได้

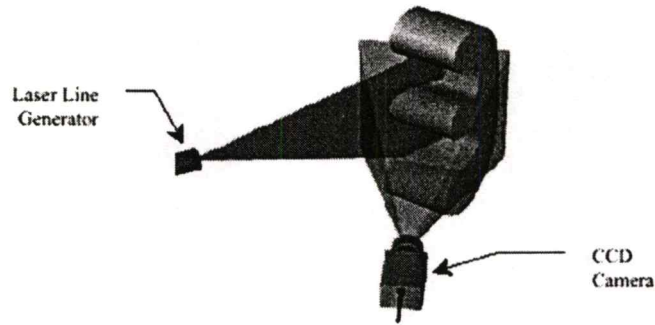


ภาพที่ 3.6 การวัดระยะทางโดยใช้หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบจุด

ในวิธีนี้เมื่อต้องการหาระยะทางที่จุดอื่นๆบนวัตถุจะต้องเลื่อนจุดแสงไปทั่วตลอดภาพซึ่งต้องใช้เวลาอย่างมากส่วนแสงชนิดอื่นๆเช่นแสงอินฟราเรดหรือแสงเลเซอร์ สามารถใช้ได้เช่นกันและไม่จำเป็นต้องใช้เฉพาะที่มีด ห้องที่มีระดับแสงปกติก็ใช้ได้แต่ควรติดตั้งตัวกรองแสงไว้ที่ด้านหน้าของกล้องด้วยเพื่อลดปริมาณแสงบริเวณห้องนั้น แสงเลเซอร์เป็นแสงที่ดีที่สุดเพราะให้จุดแสงที่ชัดเจนและมีขนาดเล็กมากเป็นผลให้สามารถใช้ในระยะทางที่ไกลได้

3.3.2 วิธีแบบสายเดี่ยว (Light stripe sensing) เป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีแบบจุด โดยสายแสงจะได้จากการฉายแสงผ่านร่องแสงไปยังวัตถุและใช้กล้องเก็บสายแสงที่เกิดขึ้นบนวัตถุดังภาพที่ 3.7 โดยสายแสงจะถูกแบ่งออกเป็นจุดภาพย่อยๆและระยะทางจะคำนวณที่แต่ละจุดตามสายแสงส่วนวิธีการคำนวณหาระยะทางจะเหมือนกับวิธีแบบจุดทุกประการ

ข้อดีของวิธีแบบสายเดี่ยวคือง่ายและเร็วกว่าวิธีแบบจุดนอกจากนั้นขอบเขตและพื้นที่ของวัตถุสามารถหาได้โดยการต่อที่จุดปลายของแต่ละสายแสงเข้าด้วยกัน ดังนั้นวิธีแบบสายเดี่ยวนี้สามารถใช้ในการแบ่งภาพวัตถุหรือที่เรียกว่า Image segmentation ได้อีกด้วย



ภาพที่ 3.7 การวัดระยะทางโดยใช้หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบคล้ายเส้นเดียว

3.3.3 วิธีการฉายแสงผ่านรหัสไบนารี (Binary code pattern) หรือผ่านรหัสเกรย์ (Gray code pattern) ในภาพที่ 3.8 วิธีการนี้จะใช้เครื่องกำเนิดแสงฉายผ่านรหัสดังกล่าวและใช้กล้องวิดีโอเก็บภาพวัตถุซึ่งเป็นภาพข้อมูลระยะทางที่ทุกตำแหน่งบนวัตถุจะถูกเข้ารหัสไว้และนำรหัสดังกล่าวไปคำนวณหาระยะทางบนวัตถุการฉายแสงผ่านรหัสไบนารีนั้นจะเกิดปัญหาขึ้นที่ความเหลื่อมล้ำของแสงระหว่างร่องแสงข้างเคียงที่ติดกันซึ่งเป็นผลให้ระยะทางบางตำแหน่งผิดไปมาก จึงได้มีการพัฒนาการฉายแสงจากรหัสเกรย์เป็นรหัสเกรย์ซึ่งช่วยลดปัญหาความเหลื่อมล้ำของแสงระหว่างร่องแสงได้

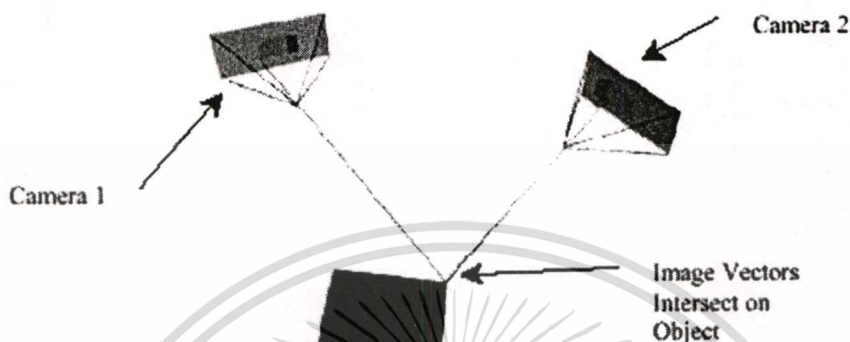


ภาพที่ 3.8 การวัดระยะทางโดยใช้วิธีการฉายแสงผ่านรหัสไบนารี (Binary code pattern) หรือผ่านรหัสเกรย์ (Gray code pattern)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

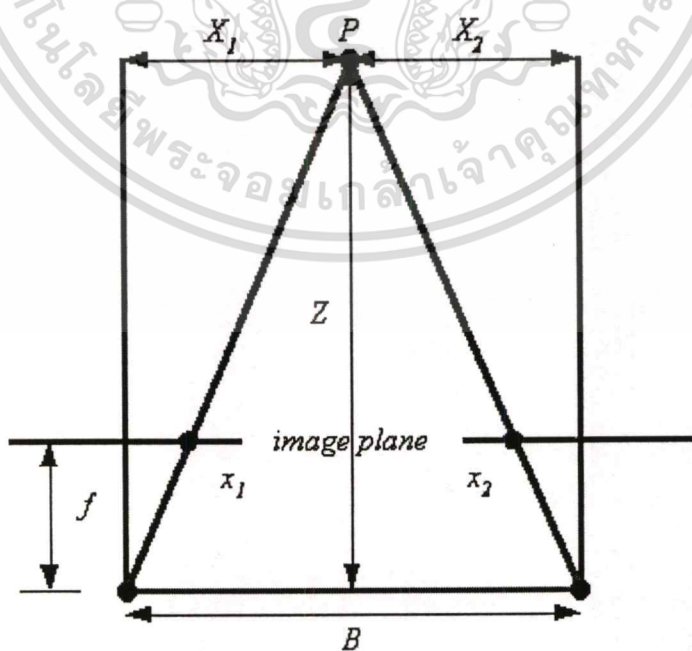
3.4 การหาระยะทางด้วยหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟ

วิธีนี้บางครั้งถูกเรียกว่าสเตอริโอวิชัน (Stereo vision) หรืออธิบายได้เหมือนกับการใช้ตาทั้งสองของมนุษย์ในการวัดระยะทาง ในวิธีพาสซีฟนี้จะใช้กล้องวิดีโอแอนะล็อกที่จับภาพโดยใช้กล้องวิดีโอทั้งสองตัววางห่างกันในระยะทางที่แน่นอนดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 การวัดระยะทางโดยใช้หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟ

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟในการหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุโดยอาศัยความแตกต่าง (Disparity) ของจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพของทั้งสองกล้องซึ่งในการคำนวณหาระยะทางโดยวิธีนี้สามารถอธิบายได้ในภาพที่ 3.10



เอกสารภาพที่ 3.10 การวัดระยะทางในระบบสเตอริโอการศึกษานี้ ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.10 นั้นนำมาเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกล่องทั้งสองได้โดยกำหนดให้ P เป็นจุดของวัตถุในระบบพิกัดกล่องและ X_1 และ X_2 เป็นขนาดของวัตถุเมื่อเทียบกับแนวแกน Z ของระบบพิกัดกล่อง และ x_1, x_2 เป็นขนาดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพดังนั้น

กล่องที่ 1

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

กล่องที่ 2

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

และ

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

นำสมการที่ 3.6 แทนลงในสมการที่ 3.5 เขียนใหม่ได้เป็น

$$B + X_1 = \frac{Zx_2}{f} \quad (3.7)$$

นำสมการที่ 3.7 ลบสมการที่ 3.4 ดังนั้นระยะทาง Z จะหาได้ดังสมการที่ 3.8

$$Z = \frac{Bf}{x_2 - x_1} \quad (3.8)$$

กำหนดให้

Z คือระยะทางระหว่างกล่องถึงวัตถุ P

B คือระยะทางระหว่างกล่องทั้งสอง

f คือความยาวโฟกัสของกล่องทั้งสอง

x_1, x_2 คือระยะจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

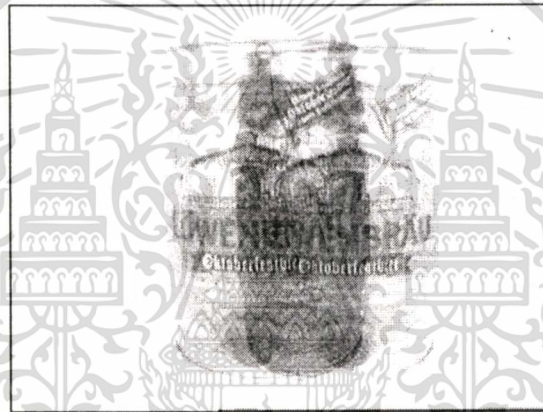


ภาพจากกล้องซ้าย



ภาพจากกล้องขวา

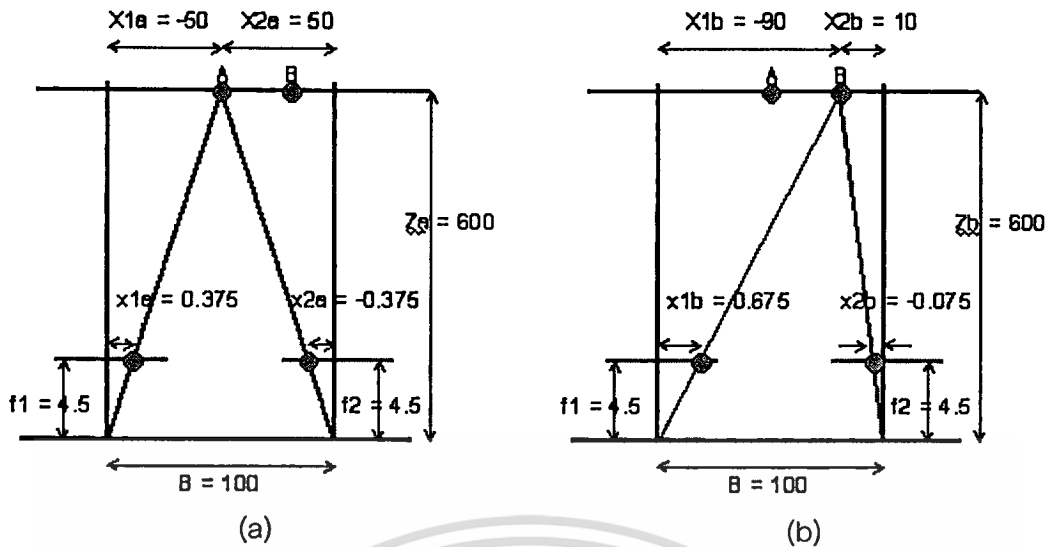
ภาพที่ 3.11 ภาพถ่ายสเตอริโอที่ได้จากกล้องซ้ายและขวา



ภาพที่ 3.12 ภาพความแตกต่างของกล้องทั้งสองเมื่อนำมารวมกัน

ภาพที่ 3.11 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากกล้องซ้ายและกล้องขวา ถ้าเรานำภาพจากทั้งสองกล้องมาซ้อนกันดังภาพที่ 3.12 จะเห็นความแตกต่างของวัตถุที่อยู่ในภาพได้ ภาพที่ 3.12 อาจจะเรียกว่าเป็นภาพความแตกต่างหรือภาพสเตอริโอ (Stereo image) ซึ่งค่าความแตกต่างของตำแหน่งจุดภาพเราจะนำมาคำนวณหาระยะทางแบบสามมิติที่จะแสดงดังต่อไปนี้

ตัวอย่าง การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ กำหนดให้กล้องทั้งสองมีความยาวโฟกัส(f) 4.5 มม. มีระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสอง(B) 100 มม. CCD มีขนาด 4.8x3.6 มม. ขนาดภาพ 384x244 pixel (1 pixel = 0.0125 มม.)



ภาพที่ 3.13 ตัวอย่างการคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุ

การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุที่จุด A ในภาพที่ 3.13 (a) กำหนดให้ $x_{a1} = 30 \text{ pixel} = 0.375 \text{ มม.}$ เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องซ้าย และ $x_{a2} = -30 \text{ pixel} = -0.375 \text{ มม.}$ (เกิดขึ้นทางด้านลบ) เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องขวาดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ระยะทาง } Z_a &= B \cdot f_1 / (x_{a2} - x_{a1}) \\ &= 100 \cdot (-4.5) / (-0.375 - 0.375) \\ &= 600 \text{ มม.} \end{aligned}$$

การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุที่จุด B ในภาพที่ 3.13 (b) กำหนดให้ $x_{b1} = 54 \text{ pixel} = 0.675 \text{ มม.}$ เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องซ้าย และ $x_{b2} = 6 \text{ pixel} = -0.075 \text{ มม.}$ (เกิดขึ้นทางด้านลบ) เป็นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพที่ถ่ายจากกล้องขวาดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ระยะทาง } Z_b &= B \cdot f_1 / (x_{b2} - x_{b1}) \\ &= 100 \cdot (-4.5) / (-0.075 - 0.675) \\ &= 600 \text{ มม.} \end{aligned}$$

จากหลักการวัดระยะทางโดยใช้หลักการรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีฟนั้นเป็นหัวใจหลักในงานวิจัยที่จะนำมาคำนวณระยะทางจากสมการที่ 3.8 มาประยุกต์ใช้ในการหาระยะทางพื้นผิวของวัตถุแบบสามมิติ ในรายละเอียดและขั้นตอนต่างๆ ต่อไปจะกล่าวถึงเรื่องของกล้องและการสอบเทียบกล้องในบทที่ 4 ซึ่งเป็นส่วนสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในงานวิจัย

บทที่ 4

การสอบเทียบกล้อง

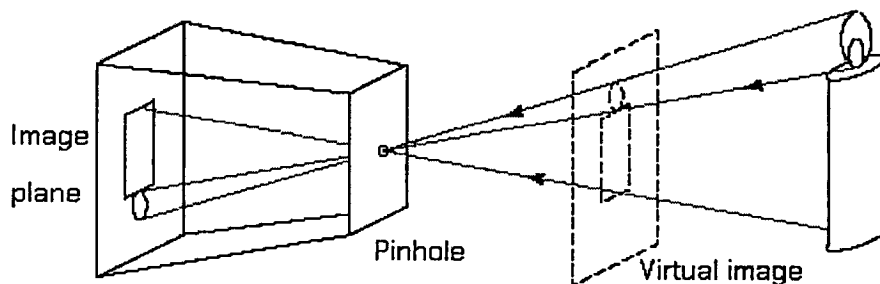
การหาระยะทางพื้นผิวของวัตถุแบบสามมิติจากหลักการของสเตอริโอวิชัน เราจะนำข้อมูลจากภาพที่ได้จากกล้องทั้งสองนำมาหา ขนาด พิกัด และพื้นผิวของวัตถุแบบมิติมีปัญหาลักษณะที่สำคัญที่เรานำมาศึกษาและวิจัยคือ การติดตั้งกล้องไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ ข้อกำหนดดังกล่าวเราสามารถที่จะดูได้จากพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องที่ได้จากการสอบเทียบ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วเราไม่สามารถที่ติดตั้งกล้องให้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบได้ทั้งหมด เนื่องจากข้อจำกัดของการวางกล้อง การยึดติดตัวกล้องตัวกล้องเข้ากับขาตั้งกล้อง การปรับตำแหน่งของมุมกล้องให้ขนานกัน เป็นต้น หัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการสอบเทียบกล้อง โดยเริ่มจากการศึกษาโมเดลของกล้องและศึกษาวิธีการสอบเทียบกล้องแบบต่าง ๆ หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสอบเทียบเราสามารถที่จะคำนวณหาระยะทางแบบสามมิติได้โดยทันที

4.1 โมเดลกล้อง

การศึกษาโมเดลกล้องประกอบไปด้วย หลักการของ Pinhole camera model ความผิดเพี้ยนของเลนส์ ระบบพิกัดและการแปลงระบบพิกัด และวิธีการสอบเทียบกล้องแบบต่างๆ

4.1.1 Pinhole Camera Model

ภาพของวัตถุที่ผ่านจุดโฟกัสของเลนส์ตกลงบนอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensing element) โดยทั่วไปมักจะใช้กล้องถ่ายรูป (Photographic camera) ความแตกต่างระหว่างกล้องถ่ายรูปและระบบการมองเห็นของคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์ (Computer and robot vision) คือกล้องถ่ายรูปจะใช้ฟิล์มในขณะที่ระบบการมองเห็นของคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์จะใช้ CCD (Charge Capture Device) เพื่อที่จะจับภาพ



ภาพที่ 4.1 หลักการของกล้องถ่ายรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตัวเซ็นเซอร์จะเปลี่ยนภาพที่มองเห็นไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrical signal) กล้องที่ใช้ในระบบการมองเห็นของคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์โดยปกติมีรายละเอียดแตกต่างจากระบบการมองเห็นของมนุษย์ ขณะเดียวกันความสามารถและความต้องการต่างๆของกล้องก็ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

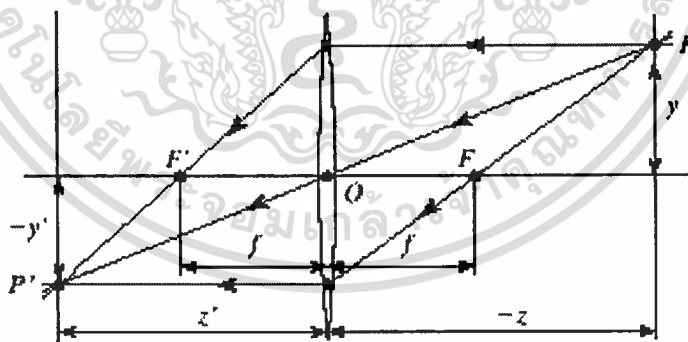
ภาพที่ 4.1 คือหลักการของกล้องถ่ายรูปที่อาศัยหลักการของ Pinhole camera model โดยที่ภาพที่ปรากฏบนฉากรับภาพจะมีลักษณะที่กลับหัวซึ่งเกิดจากการหักเหของแสง การหักเหของแสงเป็นผลมาจากคลื่นแสง (Light wave) ที่มีความเร็วในการเดินทางในอากาศ กระทบทวัตถุโปร่งใสเช่น แก้วหรือวัสดุพวกออปติคอล (Optical) แสงจะเดินทางเข้าไปในวัตถุนั้นแล้วหักเหไปจากแนว ในกรณีที่ผิวทั้งสองข้างของเลนส์เป็นผิวโค้งลำแสงที่ผ่านไปยังเลนส์จะเปลี่ยนเป็นจุดซึ่งรู้จักในนามจุดโฟกัสซึ่งตำแหน่งของจุดโฟกัสสามารถหาได้จากสมการของเลนส์ที่ใช้เกี่ยวกับการเกิดภาพคือ

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4.1)$$

f คือ ระยะโฟกัส

R_1 คือ รัศมีส่วนโค้งหน้าผิวเลนส์

R_2 คือ รัศมีส่วนโค้งหลังผิวเลนส์



ภาพที่ 4.2 หลักการของเลนส์

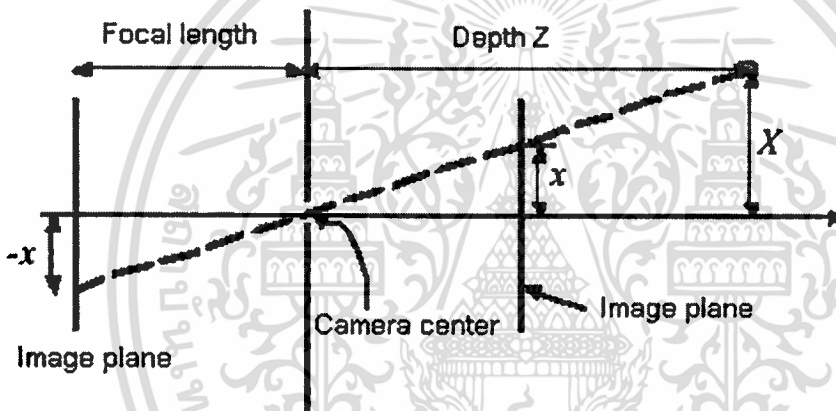
ภาพที่ 4.2 หลักการของเลนส์อัตราขยาย (Magnification) คือการวัดความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของภาพที่มองเห็นของวัตถุในภาพจริง P (คือส่วนสูงของวัตถุ) ต่อขนาดของภาพบนตำแหน่งตัวเซ็นเซอร์ที่ตัวตรวจจับในตัวกล้อง P' (คือส่วนสูงของวัตถุที่ผ่านเลนส์) ค่าของอัตราขยายจะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งในกรณีที่ประยุกต์การใช้งานในอุตสาหกรรมเพราะขนาดตัวตรวจจับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีขนาดเล็กกว่าวัตถุที่เรามองเห็นและค่าอัตราขยายจะมีค่ามากกว่าหนึ่งในกรณีของกล้องจุลทรรศน์

ดังนั้นการเกิดภาพจากหลักการของ Pinhole camera model ความสูงของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบของภาพเป็นฟังก์ชันของระยะทางระหว่างเลนส์และตำแหน่งของระนาบของภาพในตัวกล้องถ้าจุดสูงสุดของวัตถุในภาพถูกกำหนดให้เป็น X และจุดสูงสุดที่เกิดขึ้นบนระนาบของภาพเป็น x และอัตราส่วนของด้านจะเท่ากับอัตราขยายดังสมการที่ 4.2 หรือจะถูกเรียกว่า Perspective projection ที่แสดงในภาพที่ 4.3

$$\frac{X}{Z} = \frac{x}{f} \quad (4.2)$$



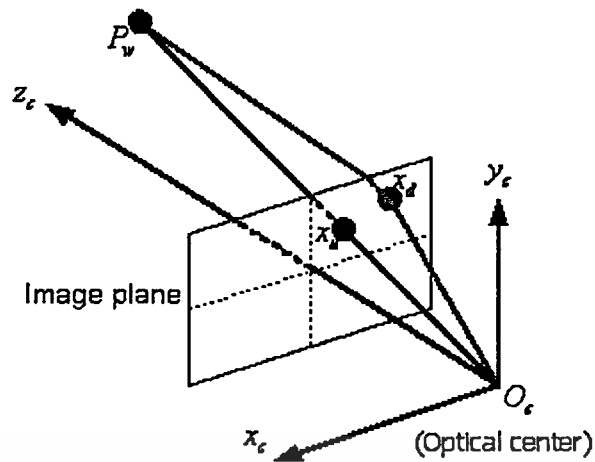
ภาพที่ 4.3 Pinhole camera model

4.1.2 ความผิดเพี้ยนของเลนส์ (Lens distortion)

ภาพที่ 4.4 ถ้าเลนส์เป็นไปตามทฤษฎี Pinhole camera model แล้วพิกัดที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพจะได้พิกัดเป็น (x_u, y_u) แต่เนื่องจากเลนส์นั้นมีความผิดเพี้ยนจึงทำให้เกิดพิกัดภาพใหม่คือ (x_d, y_d) จากหลักการของ Pinhole camera model สมการที่ 4.2 จะถูกเขียนได้ใหม่คือ

$$x_d + d_x = f \frac{X}{Z} \quad (4.3)$$

$$y_d + d_y = f \frac{Y}{Z} \quad (4.4)$$



ภาพที่ 4.4 จุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพจากความผิดเพี้ยนของเลนส์

J.Weng [4] ได้อธิบายว่าความผิดเพี้ยนของเลนส์เกิดจากการ Misalignment ของตัวเซ็นเซอร์กับศูนย์กลางของเลนส์และความผิดเพี้ยนของตัวเลนส์เองในขั้นตอนการผลิตและการประกอบกล้อง นอกจากนี้ได้จำแนกชนิดของความผิดเพี้ยนของเลนส์ออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

1. ความผิดเพี้ยนในแนวรัศมี (Radial distortion) เกิดจากความบกพร่องของเลนส์ทำให้จุดภาพมีการเคลื่อนที่เข้า (a. Negative distortion) หรือออกข้างนอก (b. Positive distortion) จากตำแหน่งที่ถูกต้องดังภาพที่ 4.5 (a) ความผิดเพี้ยนดังกล่าวแสดงด้วยสมการ 4.5 และ 4.6 ดังนี้



ภาพที่ 4.5 ความผิดเพี้ยนของเลนส์

$$x_{rd} = k_{1x} x_d \rho^2 \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y_{rd} = k_{1y} y_d \rho^2 \quad (4.6)$$

$$\rho = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \quad (4.7)$$

โดยที่

x_{rd}, y_{rd} คือความผิดเพี้ยนในแนวรัศมีตามแนวแกน x และ y

k_{1x}, k_{1y} คือสัมประสิทธิ์ความผิดเพี้ยนในแนวรัศมี

x_d, y_d คือพิกัดของจุดภาพบนระนาบภาพ

2. ความผิดเพี้ยนไม่ตรงศูนย์กลาง (Decentering distortion) เกิดจากศูนย์กลางทางเดินแสงไม่ได้อยู่ที่จุดเดียวกันในภาพที่ 4.5(b) แสดงด้วยสมการ 4.8 และ 4.9

$$x_{dd} = k_{2x} (3x_d^2 + y_d^2) + 2k_{3x} x_d y_d \quad (4.8)$$

$$y_{dd} = 2k_{2y} x_d y_d + k_{3y} (x_d^2 + 3y_d^2) \quad (4.9)$$

x_{dd}, y_{dd} คือความผิดเพี้ยนไม่ตรงศูนย์กลางในแนวแกน x และ y

$k_{2x}, k_{2y}, k_{3x}, k_{3y}$ คือสัมประสิทธิ์ความผิดเพี้ยนไม่ตรงศูนย์กลาง

3. ความผิดเพี้ยนจากความหนาของเลนส์ (Thin prism distortion) อาจเกิดจากชั้นตอนในกระบวนการผลิตเลนส์ อธิบายได้ตามสมการที่ 4.10 และ 4.11

$$x_{pd} = k_{4x} \rho^2 \quad (4.10)$$

$$y_{pd} = k_{4y} \rho^2 \quad (4.11)$$

x_{pd}, y_{pd} คือความผิดเพี้ยนจากความหนาของเลนส์

k_{4x}, k_{4y} คือสัมประสิทธิ์ความผิดเพี้ยนจากความหนาของเลนส์

ดังนั้นผลรวมของความผิดเพี้ยนของเลนส์ทั้งสามชนิดจะหาได้ตามสมการที่ 4.12 และ 4.13

$$d_x = x_{rd} + x_{dd} + x_{pd} \quad (4.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d_y = y_{rd} + y_{dd} + y_{pd} \quad (4.13)$$

จากสมการที่ 4.3 และ 4.4 การหาจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพได้อย่างถูกต้องตามหลักการของ Pinhole camera model เราจะต้องคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความผิดเพี้ยนของเลนส์ตามสมการที่ 4.12 และ 4.13 ก่อน ซึ่งสามารถที่จะทำได้โดยวิธีการสอบเทียบกล้องตามวิธีการของ J.Wens หรือในภาคผนวก[1][2] ได้เป็นต้น

4.1.3 ระบบพิกัด (Coordinate system) และการแปลง (Transformation)

คำจำกัดความของระบบพิกัดต่างๆในวิทยานิพนธ์ประกอบไปด้วย

1. ระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ (3D World coordinate system) หมายถึงระบบพิกัดที่ใช้อ้างอิงสำหรับจุดของวัตถุและโดยทั่วไประบบดังกล่าวยังมีไว้อ้างอิงตำแหน่งและทิศทาง (Position and orientation) ให้กับระบบของการมองเห็น (Vision system) และแขนกลของหุ่นยนต์ (Robot arm system) ระบบพิกัดนี้จะอยู่ในรูปของ (x_w, y_w, z_w)
2. ระบบพิกัดกล้อง (Camera coordinate system) หมายถึงระบบที่แทนโครงสร้างของกล้องในรูปแบบของ Pinhole camera model ในภาพที่ 4.6 ที่มีจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของวัตถุที่ลงบนระนาบภาพ (Image plane) อยู่ที่ O_c ระบบพิกัดนี้จะอยู่ในรูปของ (x_c, y_c, z_c) ในการโปรเจกชันดังกล่าวระนาบภาพจะต้องตั้งฉากกับ Optical axis และจะต้องสัมพันธ์กับระยะทางกับความยาวของจุดโฟกัส (Focal length) ของกล้องจากจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชัน
3. ระบบพิกัดระนาบของภาพ (Image plane coordinate system) หมายถึงระบบพิกัดสองมิติที่เกิดจากจุดของวัตถุที่โปรเจกชันจากระบบพิกัดกล้องลงบนระนาบของภาพ (Image plane หรือ Retina plane) ระบบพิกัดนี้จะอยู่ในรูปของ (x_i, y_i) และมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร
4. ระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพ (Pixel coordinate system) หมายถึงระบบที่มีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบพิกัดระนาบของภาพโดยที่ตำแหน่งของจุดภาพจะอ้างอิงกับ Frame memory ของคอมพิวเตอร์ในการแสดงผลทางจอภาพระบบพิกัดนี้จะอยู่ในรูปของ (x_p, y_p) และมีหน่วยเป็น Pixel

กำหนดให้

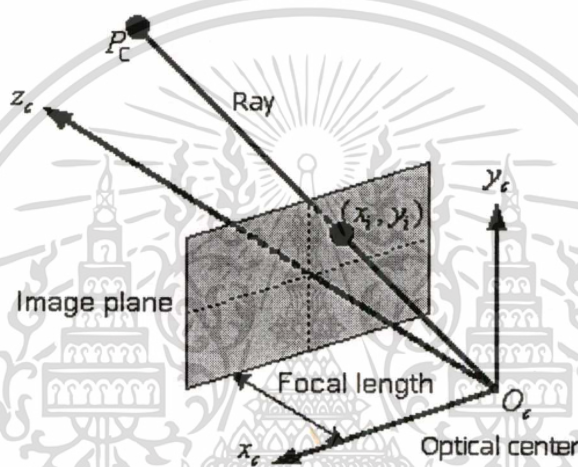
P_w หมายถึงจุดของวัตถุที่อ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติในรูปของเวกเตอร์สามมิติคือ (x_w, y_w, z_w)

P_c หมายถึงจุดของวัตถุที่อ้างอิงกับระบบพิกัดกล้องในรูปของเวกเตอร์สามมิติคือ (x_c, y_c, z_c)

P_i หมายถึงจุดของวัตถุที่อ้างอิงกับระบบพิกัดระนาบของภาพในรูปของเวกเตอร์สองมิติ คือ (x_i, y_i)

P_p หมายถึงจุดของวัตถุที่อ้างอิงกับระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพในรูปของเวกเตอร์สองมิติคือ (x_p, y_p)

รูปแบบของ Pinhole camera model ที่มีจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของวัตถุที่ลงบนระบบพิกัดระนาบของภาพอยู่ที่ O_c ระบบพิกัดนี้จะอยู่ในรูปของ (x_c, y_c, z_c) สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 การโปรเจกชันจุดของวัตถุจากระบบพิกัดกล้องลงบนระบบพิกัดระนาบของภาพ

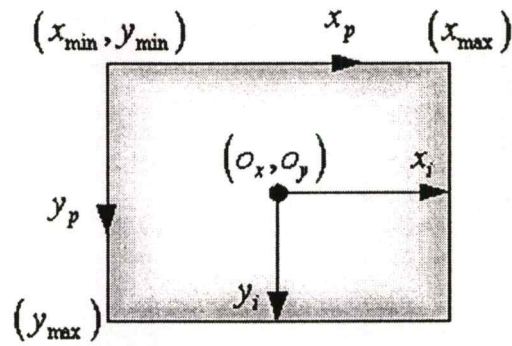
ภาพที่ 4.6 จุดของวัตถุ P_c ในระบบพิกัดกล้องที่โปรเจกชันลงบนระนาบของภาพสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$x_i = f \frac{x_c}{z_c} \quad (4.14)$$

และ

$$y_i = f \frac{y_c}{z_c} \quad (4.15)$$

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพกับระบบพิกัดระนาบของภาพในภาพที่ 4.7 สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4.16



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพกับระบบพิกัดระนาบของภาพ

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & x_0 \\ 0 & s_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$C = \begin{bmatrix} s_x & 0 & x_0 \\ 0 & s_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

C เป็นเมตริกซ์ที่ทำการแปลงจุดภาพระหว่างระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพกับพิกัดระนาบของภาพ กำหนดให้ x_0, y_0 คือตำแหน่งจุดศูนย์กลางในระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพบน Frame memory ของคอมพิวเตอร์จะมีค่าเท่ากับ $x_0 = x_{\max} / 2$ และ $y_0 = y_{\max} / 2$ และ s_x, s_y คือระยะของจุดภาพในหน่วย Pixel/length(mm)

ในการแปลงจุดของวัตถุจากระบบพิกัดกล้องเป็นระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพสามารถเขียนได้อยู่ในรูปของสมการที่ 4.18

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & c_x \\ 0 & \alpha_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & c_x \\ 0 & \alpha_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\alpha_x = -f_x s_x$, $\alpha_y = -f_y s_y$, $c_x = s_x o_x + x_0$ และ $c_y = s_y o_y + y_0$ พารามิเตอร์ดังกล่าวจะหมายถึง

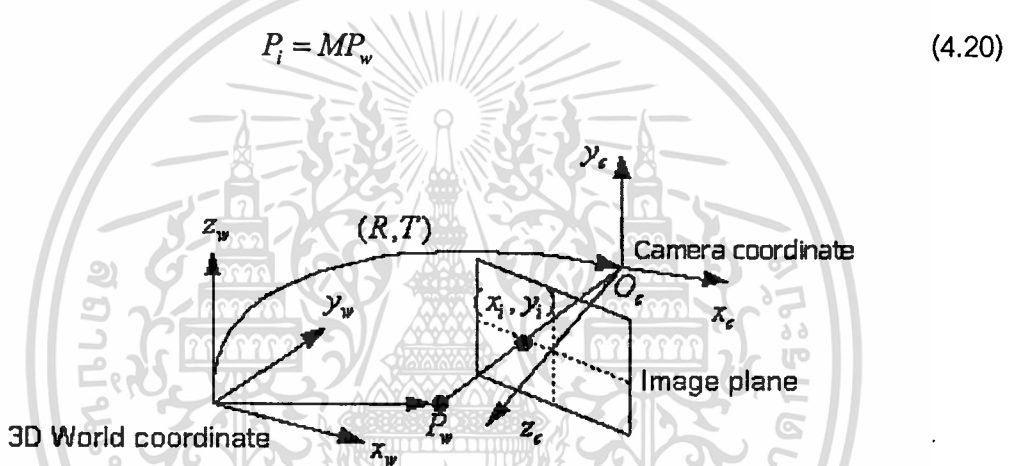
α_x, α_y คือ Scaling ในแนวแกน x และ y

c_x, c_y คือตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันบนระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพ (Pixel)

o_x, o_y คือตำแหน่งจุดศูนย์กลางบนระบบพิกัดระนาบของภาพ (mm)

f_x, f_y คือความยาวโฟกัสในแนวแกน x และ y

ดังนั้นจุดของวัตถุที่อยู่ในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติที่โปรเจกชันบนระบบพิกัดระนาบของภาพ ดังภาพที่ 4.8 สามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 4.20



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติกับระบบพิกัดระนาบของภาพ

$M = M_i M_e$ คือ Camera projection matrix ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ภายในและภายนอกของกล้อง พารามิเตอร์ภายใน (Intrinsic parameters) ของกล้องจะประกอบด้วยความยาวโฟกัส (f_x, f_y) และจุดศูนย์กลางบนระบบพิกัดระนาบของภาพ (o_x, o_y) ดังสมการที่ 4.21

$$M_i = \begin{bmatrix} -f_x & 0 & o_x \\ 0 & -f_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

ส่วนพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องอธิบายถึงตำแหน่งและทิศทาง (Position and orientation) ของกล้องจะประกอบไปด้วยเมตริกซ์การหมุนและเวกเตอร์การย้ายที่อ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติดังสมการ 4.22

$$M_e = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

r_{ij} ($i=1,2,3$ และ $j=1,2,3$) คือเมตริกซ์การหมุน และ T_x, T_y, T_z คือเวกเตอร์การย้าย

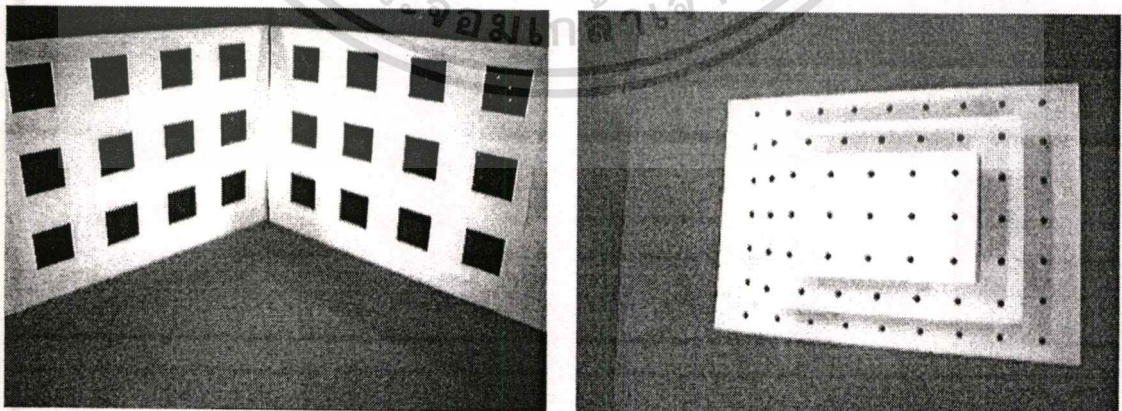
จุดของวัตถุที่อยู่ในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติที่โปรเจกชันลงในระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 4.23

$$P_p = KM_e P_w \quad (4.23)$$

การแปลงจุดของวัตถุที่อ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติที่โปรเจกชันลงในระบบพิกัดระนาบของภาพหรือลงในระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพ ในสมการที่ 4.20 และ 4.23 ตามลำดับนั้นจะถูกนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆโดยวิธีการสอบเทียบกล้องที่จะอธิบายในหัวข้อต่อไป

4.1.4 การสอบเทียบกล้อง (Camera calibration)

คือขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ภายนอกและภายในของกล้องได้จากความสัมพันธ์ระหว่างจุดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ $P_w(x_w, y_w, z_w)$ ที่โปรเจกชันลงในระบบพิกัดระนาบของภาพ $P_i(x_i, y_i)$ การคำนวณหาพารามิเตอร์จะต้องอาศัยภาพที่ใช้ในการสอบเทียบ (Calibration pattern) ในปริภูมิสามมิติ เราจึงสามารถที่จะคำนวณหาพารามิเตอร์ดังกล่าวได้ ภาพที่ใช้ในการสอบเทียบยังแบ่งได้เป็นแบบระนาบตั้งฉาก (Orthogonal plane) และแบบหลายระนาบ (Multi plane) ที่แสดงในภาพที่ 4.9



(a)

(b)

ภาพที่ 4.9 ภาพที่ใช้ในการสอบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.9 (a) ภาพที่ใช้ในการสอบเทียบแบบระนาบตั้งฉากจะนำมุมของสี่เหลี่ยมสีดำที่วางอยู่บนพื้นสีขาวมาเป็นจุดสอบเทียบ และภาพที่ 4.9 (b) ภาพที่ใช้ในการสอบเทียบแบบหลายระนาบ จุดสีดำที่วางอยู่แต่ละระนาบจะถูกนำมาใช้เป็นจุดสอบเทียบ

จุดสอบเทียบบนภาพที่ใช้ในการสอบเทียบจะเป็นจุดที่รู้ค่าและอ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติในซึ่งจะสอดคล้องกับจุดที่เกิดขึ้นบนพิกัดระนาบของภาพ ในการสอบเทียบกล้องได้มีผู้นำเสนอวิธีการหลักอยู่ 2 วิธี ซึ่งวิธีแรกเรียกว่า Direct parameters วิธีนี้มีผู้นำเสนอที่เป็นที่รู้จักกันดีคือ R.Y.Tsai [1] [3] วิธีนี้จะเป็นการหาพารามิเตอร์แบบดั้งเดิมซึ่งจะมีขั้นตอนในการหาพารามิเตอร์อยู่สองขั้นตอนหลักๆ อีกวิธีเรียกว่า Camera projection matrix[2][5][6] เป็นการหาพารามิเตอร์ภายนอกและภายในได้ในขั้นตอนเดียวและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย วิธีการทั้งสองนั้นได้มาจากหลักการของโมเดลกล้องในหัวข้อ 4.1 ในหัวข้อ 4.2 ,4.3 และ 4.4 จะกล่าวถึงวิธีการสอบเทียบกล้องแบบต่าง ๆ

4.2 วิธีการสอบเทียบกล้องแบบ Direct parameters

เมื่อกำหนดให้จุดของภาพที่ใช้ในการสอบเทียบเป็นสิ่งที่รู้ค่าในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ และในระบบพิกัดระนาบของภาพ ดังนั้นการแปลงจุดของวัตถุจากระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติเป็นระบบพิกัดกล้องจะมีรูปแบบคือ

$$P_c = RP_w + T \quad (4.24)$$

เมื่อ R คือเมตริกซ์การหมุน และ T คือเวกเตอร์การย้าย ดังนั้นในสมการที่ 4.24 เขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ตามสมการที่ 4.25

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

การแปลงจุดของวัตถุในระบบพิกัดกล้องที่โปรเจกชันลงบนระบบพิกัดระนาบของภาพตามสมการที่ 4.14 และ 4.15 นั้น สมการที่ 4.25 นำมาเขียนใหม่ได้ตามสมการที่ 4.26 และ 4.27

$$x_i = f \frac{r_{11}x_w + r_{12}y_w + r_{13}z_w + T_x}{r_{31}x_w + r_{32}y_w + r_{33}z_w + T_z} \quad (4.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y_i = f \frac{r_{21}x_w + r_{22}y_w + r_{23}z_w + T_y}{r_{31}x_w + r_{32}y_w + r_{33}z_w + T_z} \quad (4.27)$$

สมการที่ 4.26 และ 4.27 เราจะนำมาหาพารามิเตอร์ภายนอกที่ประกอบด้วยเมตริกซ์การหมุนและเวกเตอร์การย้าย พารามิเตอร์ภายในคือความยาวโฟกัส ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างจุดของวัตถุเป็นสิ่งที่รู้ค่าในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติและในระบบพิกัดระนาบของภาพ โดยอาศัยภาพที่ใช้ในการสอบเทียบแบบระนาบตั้งฉากหรือแบบหลายระนาบก็ได้ ดังนั้นการหาพารามิเตอร์ของกล้องโดยวิธี Direct parameters ทำได้สองขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การหาเมตริกซ์การหมุนและเวกเตอร์การย้ายบางตัว นำสมการที่ 4.26 และ 4.27 จัดรูปใหม่ได้ดังนี้คือ (ภาคผนวก [1])

$$x_i x_w v_1 + x_i y_w v_2 + x_i z_w v_3 + x_i v_4 - y_i x_w v_5 - y_i y_w v_6 - y_i z_w v_7 - y_i v_8 = 0 \quad (4.28)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} v_1 &= r_{21} & v_5 &= \alpha r_{11} \\ v_2 &= r_{22} & v_6 &= \alpha r_{12} \\ v_3 &= r_{23} & v_7 &= \alpha r_{13} \\ v_4 &= T_y & v_8 &= \alpha T_x \end{aligned}$$

สมการที่ 4.28 เป็นระบบสมการเอกพันธ์ (Homogeneous system) โดยให้ $Av = 0$ เมื่อจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพและระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติเป็นสิ่งที่รู้ค่า และมีตัวไม่รู้ค่า 8 ตัว ดังนั้น

$$A = \begin{bmatrix} x_{i1}x_{w1} & x_{i1}y_{w1} & x_{i1}z_{w1} & x_{i1} & -y_{i1}x_{w1} & -y_{i1}y_{w1} & -y_{i1}z_{w1} & -y_{i1} \\ x_{i2}x_{w2} & x_{i2}y_{w2} & x_{i2}z_{w2} & x_{i2} & -y_{i2}x_{w2} & -y_{i2}y_{w2} & -y_{i2}z_{w2} & -y_{i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{in}x_{wn} & x_{in}y_{wn} & x_{in}z_{wn} & x_{in} & -y_{in}x_{wn} & -y_{in}y_{wn} & -y_{in}z_{wn} & -y_{in} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$\text{และ } v = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ v_5 \ v_6 \ v_7 \ v_8]^T$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n คือจำนวนจุดสอบเทียบที่สอดคล้องกันระหว่างจุดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติและในระบบพิกัดระนาบของภาพการแก้ระบบสมการจะต้องมีจุดสอบเทียบอย่างน้อย $n \geq 8$ จุดขึ้นไป

ดังนั้นคำตอบของระบบสมการเอกพันธ์จะเป็นค่าอื่นที่ไม่เป็นศูนย์หรือไม่สามารถหาค่าที่แน่นอนได้ (Nontrivial solution) ซึ่งเราสามารถแยกส่วนประกอบของเมตริกซ์ $A = UDV^T$ วิธีนี้เป็นที่รู้จักกันดีคือ Singular Value Decomposition หรือ SVD ของเมตริกซ์ A ดังนั้นคำตอบของระบบสมการจะเป็นสัมพันธ์กับหลักสุดท้ายของเมตริกซ์ (V) ที่ได้มาจากค่า SVD ของเมตริกซ์ A [15][16] กำหนดให้ $v = k\bar{v}$ (k คือ Scale factor) หรือ $\bar{v} = \gamma v$ ($\gamma = 1/k$)

เมื่อ $\bar{v} = \gamma v$ ดังนั้นองค์ประกอบของเวกเตอร์ \bar{v} และ v คือ

$$(\bar{v}_1, \bar{v}_2, \bar{v}_3, \bar{v}_4, \bar{v}_5, \bar{v}_6, \bar{v}_7, \bar{v}_8) = \gamma(r_{21}, r_{22}, r_{23}, T_y, \alpha r_{11}, \alpha r_{12}, \alpha r_{13}, \alpha T_x) \quad (4.30)$$

หา α และ γ ได้จาก

$$\sqrt{\bar{v}_1^2 + \bar{v}_2^2 + \bar{v}_3^2} = \sqrt{\gamma^2(r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2)} = |\gamma| \quad (4.31)$$

โดยที่ $(r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2) = 1$

$$\sqrt{\bar{v}_5^2 + \bar{v}_6^2 + \bar{v}_7^2} = \sqrt{\gamma^2 \alpha^2 (r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2)} = \alpha |\gamma| \quad (4.32)$$

โดยที่ $(r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2) = 1$; $\alpha > 0$ คำนวณหา $(r_{21}, r_{22}, r_{23}, T_y, r_{11}, r_{12}, r_{13}, T_x)$ ได้จาก

$$\begin{aligned} r_{21} &= \frac{\bar{v}_1}{|\gamma|} & r_{11} &= \frac{\bar{v}_5}{\alpha |\gamma|} \\ r_{22} &= \frac{\bar{v}_2}{|\gamma|} & r_{12} &= \frac{\bar{v}_6}{\alpha |\gamma|} \\ r_{23} &= \frac{\bar{v}_3}{|\gamma|} & r_{13} &= \frac{\bar{v}_7}{\alpha |\gamma|} \\ T_y &= \frac{\bar{v}_4}{|\gamma|} & T_x &= \frac{\bar{v}_8}{\alpha |\gamma|} \end{aligned} \quad \text{และ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเมตริกซ์การหมุนเป็นเมตริกซ์ตั้งฉากหรือเมตริกซ์ออร์โธโกนอล [22] (Orthogonal matrix) การคำนวณหา $R_3 = (r_{31}, r_{32}, r_{33})$ จะได้จากการ Cross product ของ $R_1 = (r_{11}, r_{12}, r_{13})$ และ $R_2 = (r_{21}, r_{22}, r_{23})$ ตามสมการที่ 4.33

$$R_3 = R_1 \times R_2 \quad (4.33)$$

ขั้นตอนที่ 2 การหา T_z และ ความยาวโฟกัส (f) จากสมการที่ 4.26 และ 4.27 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของ f และ T_z ได้ดังนี้

$$x_i (r_{31}x_w + r_{32}y_w + r_{33}z_w + T_z) = -f (r_{11}x_w + r_{12}y_w + r_{13}z_w + T_x) \quad (4.34)$$

เราสามารถหา T_z และ f จากสมการที่ 4.34 โดยจัดให้อยู่ในรูปของระบบสมการเชิงเส้น คือ $Au = b$ หรือนำมาเขียนใหม่ได้ตามสมการที่ 4.35

$$\begin{bmatrix} x_{i1} & r_{31}x_{w1} + r_{32}y_{w1} + r_{33}z_{w1} + T_x \\ x_{i2} & r_{31}x_{w2} + r_{32}y_{w2} + r_{33}z_{w2} + T_x \\ \vdots & \vdots \\ x_{in} & r_{31}x_{wn} + r_{32}y_{wn} + r_{33}z_{wn} + T_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_z \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_{i1} (r_{11}x_{w1} + r_{12}y_{w1} + r_{13}z_{w1}) \\ -x_{i2} (r_{11}x_{w2} + r_{12}y_{w2} + r_{13}z_{w2}) \\ \vdots \\ -x_{in} (r_{11}x_{wn} + r_{12}y_{wn} + r_{13}z_{wn}) \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

การหาคำตอบของระบบสมการเชิงเส้นจะต้องมีจำนวน $n \geq 2$ จุดขึ้นไปและเนื่องจาก A ไม่ได้เป็นเมตริกซ์จัตุรัสการแก้ระบบสมการ $Au = b$ สามารถทำได้โดย $A^T Au = A^T b$ คำตอบของระบบสมการที่ได้คือ $u = (A^T A)^{-1} A^T b$ หรือเขียนได้ใหม่ตามสมการที่ 4.36

$$\begin{bmatrix} T_z \\ f \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4.36)$$

การสอบเทียบวิธี Direct parameters เป็นการหาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากภาพที่ใช้ในการสอบเทียบที่มีความสัมพันธ์กันระหว่างจุดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติและระบบพิกัดระนาบของภาพ วิธีการนี้ได้มีผู้ที่นำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ในการสอบเทียบอีกมากมายเช่น การสอบเทียบในกรณีที่เป็นแบบ Coplanar plane และ Noncoplanar plane เป็นต้น

ตัวอย่าง การระบบสมการเอกพันธ์ กำหนดให้ $Av = 0$

$$\text{เมื่อ } A = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 \\ -2 & 6 & 2 \\ 3 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

แยกส่วนประกอบของเมตริกซ์ $A = UDV^T$ จะได้ดังต่อไปนี้

$$U = \begin{bmatrix} -0.6465 & 0.4987 & -0.5774 \\ -0.7551 & -0.3105 & 0.5774 \\ 0.1087 & 0.8092 & 0.5774 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 8.6340 & 0 & 0 \\ 0 & 3.9311 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} 0.1378 & 0.9024 & 0.4082 \\ -0.9117 & -0.0455 & 0.4082 \\ -0.3870 & 0.4285 & -0.8165 \end{bmatrix}$$

คำตอบของระบบสมการจะเป็นสัมพันธ์กับหลักสุดท้ายของเมตริกซ์ (V) ที่ได้มาจากค่า SVD ของเมตริกซ์ A คือ

$$v = [0.4082 \quad 0.4082 \quad -0.8165]^T$$

แทนค่าคำตอบลงในสมการ $Av = 0$ ดังนี้

$$UDV^T v = 10^{-15} * [0.4452 \quad 0.4145 \quad 0.2572]^T$$

4.3 วิธีการสอบเทียบกล้องแบบ Camera projection matrix

จุดของวัตถุที่อยู่ในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติที่โปรเจกชันลงบนระนาบพิกัดระนาบของภาพ สามารถอธิบายได้โดย $P_i = MP_w$ และนำมาเขียนใหม่ได้ตามสมการที่ 4.37

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

เมื่อ $M = M_i M_e$ ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ภายในและภายนอกของกล้องดังนั้น

$$M = \begin{bmatrix} -f_x r_{11} + o_x r_{31} & -f_x r_{12} + o_x r_{32} & -f_x r_{13} + o_x r_{33} & -f_x T_x + o_x T_z \\ -f_y r_{21} + o_y r_{31} & -f_y r_{22} + o_y r_{32} & -f_y r_{23} + o_y r_{33} & -f_y T_y + o_y T_z \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

การแปลงจุดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติที่โปรเจกชันลงบนระนาบพิกัดระนาบของภาพตามสมการที่ 4.37 นำมาเขียนใหม่ได้ตามสมการที่ 4.39 และ 4.40

$$x_i = \frac{m_{11}x_w + m_{12}y_w + m_{13}z_w + m_{14}}{m_{31}x_w + m_{32}y_w + m_{33}z_w + m_{34}} \quad (4.39)$$

$$y_i = \frac{m_{21}x_w + m_{22}y_w + m_{23}z_w + m_{24}}{m_{31}x_w + m_{32}y_w + m_{33}z_w + m_{34}} \quad (4.40)$$

สมการที่ 4.39 และ 4.40 เราจะนำมาหาพารามิเตอร์ภายนอกและพารามิเตอร์ภายใน จากความสัมพันธ์ระหว่างจุดของวัตถุเป็นสิ่งที่รู้ค่าในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติและในระบบพิกัดระนาบของภาพ โดยอาศัยภาพที่ใช้ในการสอบเทียบแบบระนาบตั้งฉากหรือแบบหลายระนาบก็ได้ ดังนั้นการหาพารามิเตอร์ของกล้องโดยวิธี Camera projection matrix ทำได้ดังต่อไปนี้

สมการที่ 4.39 และ 4.40 นำมาเขียนใหม่เป็นระบบสมการโฮโมจีเนียสคือ $Am = 0$ เมื่อจุดของวัตถุในระบบพิกัดระนาบของภาพและระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติเป็นสิ่งที่รู้ค่าและมีตัวไม่รู้ค่า 12 ตัวดังนั้น

$$A = \begin{bmatrix} x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{i1}x_{w1} & -x_{i1}y_{w1} & -x_{i1}z_{w1} & -x_{i1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & -y_{i1}x_{w1} & -y_{i1}y_{w1} & -y_{i1}z_{w1} & -y_{i1} \\ x_{w2} & y_{w2} & z_{w2} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{i2}x_{w2} & -x_{i2}y_{w2} & -x_{i2}z_{w2} & -x_{i2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{w2} & y_{w2} & z_{w2} & 1 & -y_{i2}x_{w2} & -y_{i2}y_{w2} & -y_{i2}z_{w2} & -y_{i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{wn} & y_{wn} & z_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{in}x_{wn} & -x_{in}y_{wn} & -x_{in}z_{wn} & -x_{in} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{wn} & y_{wn} & z_{wn} & 1 & -y_{in}x_{wn} & -y_{in}y_{wn} & -y_{in}z_{wn} & -y_{in} \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

$$\text{และ } m = [m_{11} \ m_{12} \ m_{13} \ m_{14} \ m_{21} \ m_{22} \ m_{23} \ m_{24} \ m_{31} \ m_{32} \ m_{33} \ m_{34}]^T$$

คือองค์ประกอบของเมตริกซ์ M ในสมการที่ 4.37

n คือจำนวนจุดสอบเทียบที่สอดคล้องกันระหว่างจุดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติและในระบบพิกัดระนาบของภาพ การแก้ระบบสมการจะต้องมีจุดสอบเทียบอย่างน้อย $n \geq 6$ จุดขึ้นไป

ดังนั้นคำตอบของระบบสมการเอกพันธ์จะเป็นค่าอื่นที่ไม่เป็นศูนย์หรือไม่สามารถหาค่าที่แน่นอนได้ ซึ่งเราสามารถแยกส่วนประกอบของเมตริกซ์ $A = UDV^T$ วิธีนี้เป็นที่รู้จักกันดีคือ Singular Value Decomposition หรือ SVD ของเมตริกซ์ A ดังนั้นคำตอบของระบบสมการจะเป็นสัมพันธ์กับหลักสุดท้ายของเมตริกซ์ (V) ที่ได้มาจากค่า SVD ของเมตริกซ์ A [15][16]

คำนวณหาพารามิเตอร์ภายในและภายนอกได้จาก Matrix (M) ที่ประกอบไปด้วย m_{ij} และกำหนดให้ $s = \text{sign}(m_{34})$ (sign =เครื่องหมายของส่วนประกอบเมตริกซ์ M ในแถวที่ 3 และหลักที่ 4 ของเมตริกซ์) และ กำหนดให้

$$q_1 = [m_{11} \ m_{12} \ m_{13}]^T \quad (4.42)$$

$$q_2 = [m_{21} \ m_{22} \ m_{23}]^T \quad (4.43)$$

$$q_3 = [m_{31} \ m_{32} \ m_{33}]^T \quad (4.44)$$

$$q_4 = [m_{14} \ m_{24} \ m_{34}] \quad (4.45)$$

พารามิเตอร์ภายในจะหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $o_x = q_1^T q_3$ ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (4.46) คำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$o_y = q_2^T q_3 \quad (4.47)$$

$$f_x = \sqrt{q_1^T q_1 - o_x^2} \quad (4.48)$$

$$f_y = \sqrt{q_2^T q_2 - o_y^2} \quad (4.49)$$

และ พารามิเตอร์ภายนอกจะหาได้จาก

$$r_{1i} = s(o_x m_{3i} - m_{1i}) / f_x \quad (4.50)$$

$$r_{2i} = s(o_y m_{3i} - m_{2i}) / f_y \quad (4.51)$$

$$r_{3i} = s m_{3i} \quad (4.52)$$

$$T_x = s(o_x m_{34} - m_{14}) / f_x \quad (4.53)$$

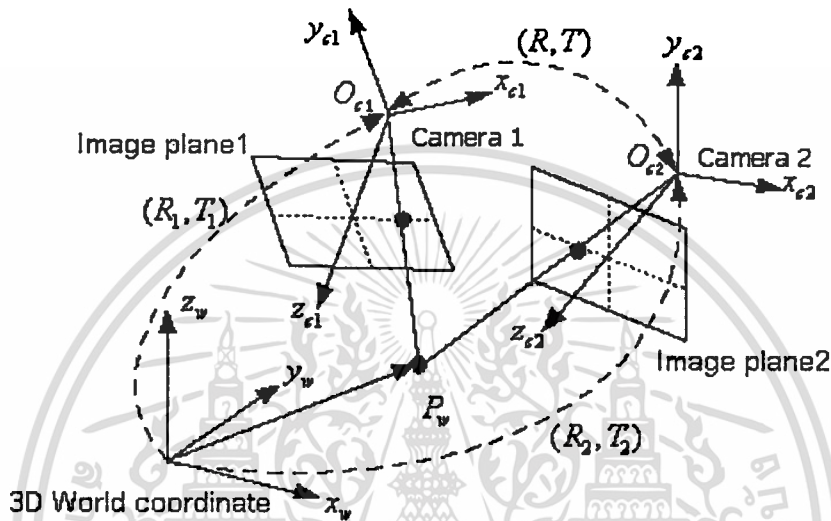
$$T_y = s(o_y m_{34} - m_{24}) / f_y \quad (4.54)$$

$$T_z = s m_{34} \quad (4.55)$$

ในการสอบเทียบโดยวิธี Camera projection matrix เป็นที่นิยมกันมากเนื่องจากสามารถที่จะหาพารามิเตอร์ภายในและภายนอกได้ในขั้นตอนเดียว ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำหลักการสอบเทียบดังกล่าวมาใช้ในการสอบเทียบกล้องในระบบสเตอริโอเพื่อที่จะหาพารามิเตอร์และความสัมพันธ์ของระบบสเตอริโอ ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวจะนำมาคำนวณในขั้นตอนการหาระยะทางพื้นผิวของวัตถุด้วย

4.4 วิธีการสอบเทียบกล้องในระบบสเตอริโอ

การสอบเทียบกล้องในระบบสเตอริโอนั้นสามารถทำได้โดยใช้วิธีการสอบเทียบแบบ Camera projection matrix ในหัวข้อที่ 4.3 แต่ยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกล้องทั้งสองตัวคือ เมตริกซ์การหมุน และเวกเตอร์การย้ายของกล้อง ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติกับระบบพิกัดกล้องแบบสเตอริโอ

ความสัมพันธ์ระหว่างกล้องทั้งสองเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ถูกนำมาใช้ในการหา ระยะทางแบบสามมิติ เนื่องจากเราจะต้องรู้ระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสองที่แน่นอนโดยส่วนใหญ่ แล้วเราสามารถที่จะวัดระยะของกล้องได้ในขณะที่ติดตั้งกล้องแต่ก็อาจทำให้เกิดความผิดพลาดตามมาได้ ดังนั้นเราสามารถหาความสัมพันธ์ของระบบพิกัดกล้องทั้งสองได้จากสมการที่ 4.24 และนำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P_{c1} = R_1 P_w + T_1 \quad (4.56)$$

$$P_{c2} = R_2 P_w + T_2 \quad (4.57)$$

เมื่อ R_1 คือเมตริกซ์การหมุน และ T_1 คือเวกเตอร์การย้ายของกล้อง 1 และ R_2 คือเมตริกซ์การหมุน และ T_2 คือเวกเตอร์การย้ายของกล้อง 2 ส่วน P_{c1} และ P_{c2} คือจุดของวัตถุที่อ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติและแปลงให้อยู่ในระบบพิกัดกล้องที่ 1 และ 2

จากสมการที่ 4.56 และ 4.57 เราจะได้

$$P_{c1} = R_1 P_w + T_1 = R_1 [R_2^{-1} (P_{c2} - T_2)] + T_1 = R_1 R_2^{-1} P_{c2} - R_1 R_2^{-1} T_2 + T_1 \quad (4.58)$$

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่าง P_{c1} และ P_{c2} เราสามารถเขียนในรูปของ

$$P_{c1} = R P_{c2} + T \quad (4.59)$$

เมื่อ R คือเมตริกซ์การหมุน และ T คือเวกเตอร์การย้ายระหว่างกล้องทั้งสอง ดังนั้นความสัมพันธ์ของเมตริกซ์การหมุนระหว่างกล้องทั้งสองคือ

$$R = R_1 R_2^{-1} = R_1 R_2^T \quad (4.60)$$

และความสัมพันธ์ของเวกเตอร์การย้ายระหว่างกล้องทั้งสองคือ

$$T = T_1 - R_1 R_2^T T_2 = T_1 - R^T T_2 \quad (4.61)$$

ในการสอบเทียบกล้องในระบบสเตอริโอ นั้นจะใช้วิธีการสอบเทียบแบบ Camera projection matrix โดยจะสอบเทียบกล้องทีละตัวและนำพารามิเตอร์ภายนอกมาหาความสัมพันธ์ระหว่างกล้องทั้งสองตามสมการที่ 4.60 และ 4.61

วิธีการสอบเทียบกล้องแบบ Camera projection matrix ในหัวข้อที่ 4.3 เป็นวิธีการสอบเทียบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้และนำมาใช้ในการสอบเทียบกล้องแบบสเตอริโอ ในหัวข้อที่ 4.4 ที่ผ่านมา เราขอยกตัวอย่างวิธีการสอบเทียบกล้องดังกล่าวดังต่อไปนี้

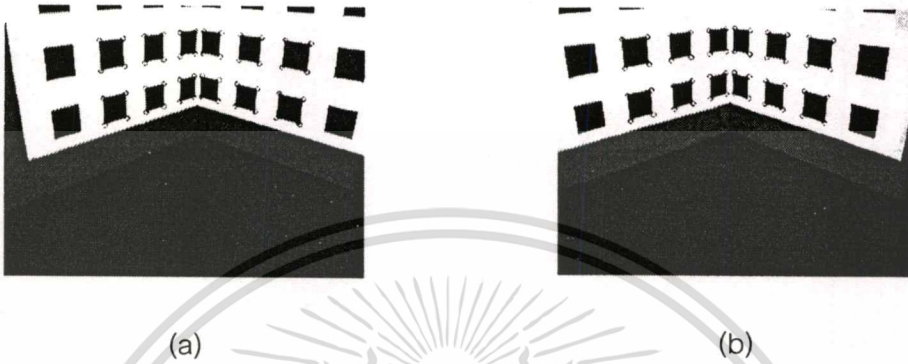
ตัวอย่าง การสอบเทียบกล้องแบบสเตอริโอกำหนดให้จุดสอบเทียบในระบบพิกัดระนาบของภาพที่จะทำการสอบเทียบ จุดสอบเทียบจะอาศัยภาพที่ใช้ในการสอบเทียบแบบระนาบตั้งฉากในภาพที่ 4.11(a) ภาพจากกล้อง 1 และ (b) ภาพจากกล้อง 2 โดยเลือกจากจุดมุมของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาอย่างน้อย 6 จุดทั้งกล้อง 1 และกล้อง 2 หลังจากนั้นกำหนดจุดที่อ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ ดังต่อไปนี้ จุดที่นำมาสอบเทียบในระบบพิกัดระนาบของภาพจากกล้อง 1 คือ

$$P_{i1} = \begin{bmatrix} x_{i(1\dots n)} \\ y_{i(1\dots n)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.1554 & -0.8435 & -0.5494 & -0.3177 & -0.0593 & 0.1367 \\ -1.3158 & -1.3425 & -1.3871 & -1.4049 & -1.4405 & -1.4583 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดที่นำมาสอบเทียบในระบบพิกัดระนาบของภาพจากกล้อง 2

$$P_{i2} = \begin{bmatrix} x_{i(1...n)} \\ y_{i(1...n)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.5475 & -1.2088 & -0.8880 & -0.6385 & -0.3534 & 0.1306 \\ -1.3514 & -1.3960 & -1.4316 & -1.4673 & -1.5029 & -1.5296 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$



ภาพที่ 4.11 ตัวอย่างภาพที่ใช้ในการสอบเทียบแบบระนาบตั้งฉาก

จุดของวัตถุที่อ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ

$$P_w = \begin{bmatrix} x_{w(1...n)} \\ y_{w(1...n)} \\ z_{w(1...n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 240 & 195 & 150 & 105 & 60 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 220 & 220 & 220 & 220 & 220 & 220 \end{bmatrix}$$

แทนค่าจุดที่นำมาสอบเทียบในระบบพิกัดระนาบของภาพและระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ โดยแทนค่าที่ละกล้อง การคำนวณการหาคำตอบของระบบสมการโฮโมจีเนียสที่ $Am = 0$ โดยวิธีการแยกส่วนประกอบของเมตริกซ์ $A = UDV^T$ โดยวิธี Singular Value Decomposition

$$A = \begin{bmatrix} x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{i1}x_{w1} & -x_{i1}y_{w1} & -x_{i1}z_{w1} & -x_{i1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & -y_{i1}x_{w1} & -y_{i1}y_{w1} & -y_{i1}z_{w1} & -y_{i1} \\ x_{w2} & y_{w2} & z_{w2} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{i2}x_{w2} & -x_{i2}y_{w2} & -x_{i2}z_{w2} & -x_{i2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{w2} & y_{w2} & z_{w2} & 1 & -y_{i2}x_{w2} & -y_{i2}y_{w2} & -y_{i2}z_{w2} & -y_{i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{wn} & y_{wn} & z_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{in}x_{wn} & -x_{in}y_{wn} & -x_{in}z_{wn} & -x_{in} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{wn} & y_{wn} & z_{wn} & 1 & -y_{in}x_{wn} & -y_{in}y_{wn} & -y_{in}z_{wn} & -y_{in} \end{bmatrix}$$

$$m = [m_{11} \ m_{12} \ m_{13} \ m_{14} \ m_{21} \ m_{22} \ m_{23} \ m_{24} \ m_{31} \ m_{32} \ m_{33} \ m_{34}]^T$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นคำตอบของสมการแต่ละกล่องจะหาได้จากหลักสุดท้ายของเมตริกซ์ (V) ที่ได้มาจากค่า SVD ของเมตริกซ์ A คือ

$$m1 = \begin{bmatrix} 0.0039 \\ -0.0042 \\ -0.0000 \\ -0.1580 \\ -0.0017 \\ -0.0017 \\ 0.0053 \\ 0.1151 \\ 0.0009 \\ 0.0009 \\ 0.0004 \\ -0.9807 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad m2 = \begin{bmatrix} -0.0041 \\ 0.0040 \\ -0.0000 \\ -0.0584 \\ 0.0018 \\ 0.0019 \\ -0.0054 \\ -0.1724 \\ -0.0009 \\ -0.0009 \\ -0.0005 \\ 0.9833 \end{bmatrix}$$

คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล่องที่ 1 กำหนดให้

$$q_1 = [m_{11} \quad m_{12} \quad m_{13}]^T = [0.0039 \quad -0.0042 \quad -0.0000]^T$$

$$q_2 = [m_{21} \quad m_{22} \quad m_{23}]^T = [-0.0017 \quad -0.0017 \quad 0.0053]^T$$

$$q_3 = [m_{31} \quad m_{32} \quad m_{33}]^T = [0.0009 \quad 0.0009 \quad 0.0004]^T$$

$$q_4 = [m_{14} \quad m_{24} \quad m_{34}] = [-0.1580 \quad 0.1151 \quad -0.9807]$$

พารามิเตอร์ภายในจะหาได้จาก

$$o_x = q_1^T q_3 = 0.0193$$

$$o_y = q_2^T q_3 = -0.4226$$

$$f_x = \sqrt{q_1^T q_1 - o_x^2} = 4.2343$$

$$f_y = \sqrt{q_2^T q_2 - o_y^2} = 4.3692$$

พารามิเตอร์ภายนอกจะหาได้จาก

$$r_{1i} = s(o_x m_{3i} - m_{1i}) / f_x = [0.6763 \quad -0.7366 \quad -0.0116]$$

$$r_{2i} = s(o_y m_{3i} - m_{2i}) / f_y = [-0.2342 \quad -0.2290 \quad 0.9446]$$

$$r_{3i} = s m_{3i} = [-0.6984 \quad -0.6361 \quad -0.3280]$$

$$T_x = s(o_x m_{34} - m_{14}) / f_x = -24.491$$

$$T_y = s(o_y m_{34} - m_{24}) / f_y = -51.078$$

$$T_z = s m_{34} = 731.221$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ภายในและภายนอกของกล่องที่ 1 คือ

$$M_{i1} = \begin{bmatrix} -4.2343 & 0 & 0.0193 \\ 0 & -4.3692 & -0.4226 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{e1} = \begin{bmatrix} 0.6763 & -0.7366 & -0.0116 & -24.491 \\ -0.2342 & -0.2290 & 0.9446 & -51.078 \\ -0.6984 & -0.6361 & -0.3280 & 731.221 \end{bmatrix}$$

คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล่องที่ 2 กำหนดให้

$$q_1 = [m_{11} \quad m_{12} \quad m_{13}]^T = [-0.0041 \quad 0.0040 \quad -0.0000]^T$$

$$q_2 = [m_{21} \quad m_{22} \quad m_{23}]^T = [0.0018 \quad 0.0019 \quad -0.0054]^T$$

$$q_3 = [m_{31} \quad m_{32} \quad m_{33}]^T = [-0.0009 \quad -0.0009 \quad -0.0005]^T$$

$$q_4 = [m_{14} \quad m_{24} \quad m_{34}] = [-0.0584 \quad -0.1724 \quad 0.9833]$$

พารามิเตอร์ภายในจะหาได้จาก

$$o_x = q_1^T q_3 = -0.0867$$

$$o_y = q_2^T q_3 = -0.4722$$

$$f_x = \sqrt{q_1^T q_1 - o_x^2} = 4.2492$$

$$f_y = \sqrt{q_2^T q_2 - o_y^2} = 4.3957$$

พารามิเตอร์ภายนอกจะหาได้จาก

$$r_{1i} = s(o_x m_{3i} - m_{1i}) / f_x = [0.7311 \quad -0.6822 \quad 0.0062]$$

$$r_{2i} = s(o_y m_{3i} - m_{2i}) / f_y = [-0.2328 \quad -0.2410 \quad 0.9422]$$

$$r_{3i} = s m_{3i} = [-0.6413 \quad -0.6903 \quad -0.3350]$$

$$T_x = s(o_x m_{34} - m_{14}) / f_x = -4.695$$

$$T_y = s(o_y m_{34} - m_{24}) / f_y = -51.373$$

$$T_z = s m_{34} = 731.139$$

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ภายในและภายนอกของกล่องที่ 2 คือ

$$M_{i2} = \begin{bmatrix} -4.2492 & 0 & -0.0867 \\ 0 & -4.3657 & -0.4722 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{e2} = \begin{bmatrix} 0.7311 & -0.6822 & 0.0062 & -4.695 \\ -0.2328 & -0.2410 & 0.9422 & -49.373 \\ -0.6413 & -0.6903 & -0.3350 & 731.139 \end{bmatrix}$$

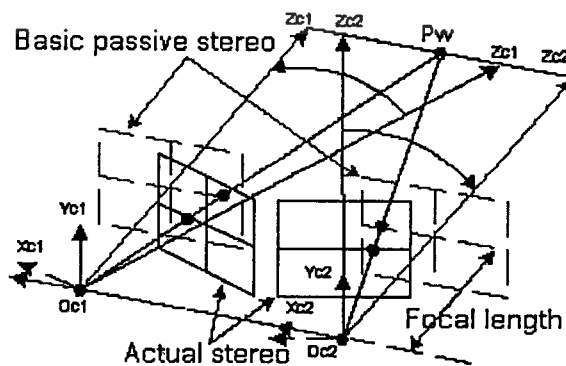
บทที่ 5

การหาจุดที่สอดคล้องกันในสเตอริโอวิชัน

ปัญหาหลักที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการหาระยะทางพื้นผิวแบบสามมิตินอกจากการติดตั้งกล้องให้เป็นไปตามข้อกำหนดคือความแม่นยำในระบบสเตอริโอ ในทางอุดมคติจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดภาพที่ตรงกันหรือสอดคล้องกันบนระนาบพิกัดระนาบของภาพทั้งสอง แต่ในความเป็นจริงเราไม่สามารถที่จะรับประกันได้ว่าจุดภาพทั้งสองจะสอดคล้องกันจึงมีผลทำให้ข้อมูลระยะทางนั้นมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ปัญหาดังกล่าวเราจะนำเสนอวิธี Epipolar geometry ร่วมกับการวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้ามาช่วยคำนวณหาตำแหน่งของจุดภาพทั้งสองให้สอดคล้องกันมากยิ่งขึ้น และหลังจากการสอบเทียบกล้องผ่านไปแล้ว เราจะต้องทำการย้ายจุดภาพของวัตถุไปอยู่บนพิกัดระนาบของภาพใหม่ก่อนที่จะนำภาพของวัตถุไปหาระยะทางแบบสามมิติ ในขั้นตอนที่เรียกว่า "Rectification transformation" จึงสามารถที่จะนำไปหาจุดสอดคล้องกันได้อย่างถูกต้อง

5.1 Rectification transformation

การ Rectification transformation เป็นแนวความคิดที่จะทำการหาจุดภาพใหม่ที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ โดยมีแนวความคิดที่คล้ายๆกับการหมุนกล้องไปรอบๆจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันจนกระทั่ง Base line ขนานกับแนวแกน x ของทั้งสองกล้อง และแนวแกน z ของระบบพิกัดกล้องทั้งสองขนานกัน ซึ่งเราสามารถดูได้จากพารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง แต่ในความเป็นจริงแล้วเราไม่ได้ทำการหมุนตัวกล้องทั้งสองแต่อย่างใด จะใช้วิธีการย้ายจุดภาพเดิมไปอยู่ในระบบพิกัดระนาบของภาพใหม่โดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบ ดังนั้นวิธีการ ย้ายจุดภาพจะต้องรักษาตำแหน่งของกล้องไว้ที่เดิมและจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ภายในของกล้องด้วย



ภาพที่ 5.1 การย้ายจุดบนระบบพิกัดระนาบของภาพตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขของนโยบายด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 5.1 ในทางปฏิบัติแล้วเราไม่สามารถที่ติดตั้งกล้องให้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอได้ทั้งหมด พารามิเตอร์ภายนอกของกล้องจึงไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ ดังนั้นถ้าจุดที่เกิดขึ้นบนระนาบพิกัดระนาบของภาพไปคำนวณหาระยะทางแบบสามมิติ จะทำให้ระยะทางที่หาได้นั้นมีความผิดพลาดเกิดขึ้น จึงต้องทำการย้ายจุดภาพไปอยู่บนระนาบภาพใหม่เพื่อให้จุดภาพได้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบหรืออยู่ในรูปของ Basic passive stereo

ในการที่จะพิสูจน์ว่าพารามิเตอร์ภายนอกที่ได้จากการสอบเทียบเป็นไปตามข้อกำหนดของระบบหรือไม่สามารถทำได้ดังนี้ กำหนดให้ M_{e1} และ M_{e2} เป็นพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องทั้งสองตามลำดับ

$$M_{e1} = \begin{bmatrix} a_{1i} & | & a_{14} \\ a_{2i} & | & a_{24} \\ a_{3i} & | & a_{34} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$M_{e2} = \begin{bmatrix} b_{1i} & | & b_{14} \\ b_{2i} & | & b_{24} \\ b_{3i} & | & b_{34} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

เมื่อ a_{1i}, a_{2i}, a_{3i} และ b_{1i}, b_{2i}, b_{3i} แทนเมตริกซ์การหมุน ($i = (1, 2, 3)$) ของทั้งสองกล้อง
 a_{14}, a_{24}, a_{34} และ b_{14}, b_{24}, b_{34} แทนเวกเตอร์การย้าย ของทั้งสองกล้อง

ข้อกำหนดของระบบข้อแรกคือโฟคัลเฟลนตามแนวแกน x ของทั้งสองกล้องจะต้องขนานกับ Base line ดังนั้นพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องทั้งสองจะต้องเป็นไปตามสมการที่ 5.3

$$\begin{aligned} a_{3i} &= b_{3i} \\ a_{34} &= b_{34} \end{aligned} \quad (5.3)$$

และข้อกำหนดที่สองของระบบคือแนวแกน z ของระบบพิกัดกล้องทั้งสองจะต้องขนานกัน ดังนั้นพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องทั้งสองจะต้องเป็นไปตามสมการที่ 5.4

$$\begin{aligned} a_{2i} &= b_{2i} \\ a_{24} &= b_{24} \\ a_{1i} &= b_{1i} \end{aligned} \quad (5.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพารามิเตอร์ภายนอกที่ได้จากการสอบเทียบเป็นไปตามสมการที่ 5.3 และ 5.4 แสดงว่าจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพเป็นไปตามข้อกำหนดของระบบ แต่ถ้าพารามิเตอร์ภายนอกไม่เป็นไปตามสมการทั้งสอง ดังนั้นจึงต้องมีการ Rectification transformation ต่อไป

เมื่อกำลังผ่านกระบวนการสอบเทียบเราจะกำหนดให้พารามิเตอร์ภายนอกของกล้องทั้งสองคือ $M_{e(oldd1)}$ และ $M_{e(oldd2)}$ และพารามิเตอร์ภายนอกใหม่คือ $M_{e(new1)}$ และ $M_{e(new2)}$ สาเหตุที่จะต้องทำการหาพารามิเตอร์ภายนอกใหม่อีกครั้งเนื่องจากการสอบเทียบกล้องในระบบสเตอริโอ นั้นยังไม่ได้อยู่ในรูปแบบของ Basic stereo ในทันที ดังนั้นเราจึงต้องทำการปรับพารามิเตอร์ภายนอกบางตัวให้เป็นไปตามข้อกำหนดและสามารถที่จะทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ในการคำนวณหาแนวแกน x ใหม่เราจะหาจากระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสอง ซึ่งก็คือระยะห่างของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของทั้งสองกล้อง

$$V1 = (Oc_1 - Oc_2) \quad (5.5)$$

สมการที่ 5.5 ($V1$) คือทิศทางของแนวแกน x ใหม่ที่เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบที่ว่าโฟคัลเพลนตามแนวแกน x ของทั้งสองกล้องจะต้องขนานกับ Base line จากนั้นหาทิศทางของแนวแกน y ใหม่ ($V2$) ได้จากการ Cross product ระหว่างแนวแกน x ใหม่ ($V1$) กับแนวแกน z เดิมตามสมการที่ 5.6 และหาทิศทางของแนวแกน z ใหม่ ($V3$) ได้จากการ Cross product ระหว่างทิศทางของแนวแกน x ใหม่ ($V1$) กับแนวแกน y ใหม่ ($V2$) ตามสมการที่ 5.7

$$V2 = r_{3i}^T \times V1 \quad (5.6)$$

$$V3 = V1 \times V2 \quad (5.7)$$

คำนวณหาเมตริกซ์การหมุนใหม่ (R_{new}) และเวกเตอร์การย้ายใหม่ (T_{new}) ตามข้อกำหนดของระบบคือ

$$R_{new} = \begin{bmatrix} V1^T / \text{norm}(V1) \\ V2^T / \text{norm}(V2) \\ V3^T / \text{norm}(V3) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$T_{new1} = R_{new} Oc_1 \quad (5.9)$$

$$T_{new2} = R_{new} Oc_2 \quad (5.10)$$

ดังนั้นพารามิเตอร์ภายนอกอันใหม่ที่ได้จากการ Rectification หาได้ตามสมการที่ 5.11 และ 5.12 จะเห็นได้ว่าเมตริกซ์การหมุนของกล้องทั้งสองจะเท่ากันเนื่องจากมีทิศทางไปในทางเดียวกันและเป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ

$$Me_{new1} = [R_{new} | T_{new1}] \quad (5.11)$$

$$Me_{new2} = [R_{new} | T_{new2}] \quad (5.12)$$

ตัวอย่าง จากค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องที่ได้จากการสอบเทียบในตัวอย่างในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.4 พารามิเตอร์ของกล้องทั้งสองไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอจะต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องให้เป็นไปตามข้อกำหนดได้ตามขั้นตอนดังนี้

ค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง 1 ที่ได้จากการสอบเทียบคือ

$$M_{e(oid1)} = \begin{bmatrix} 0.6763 & -0.7366 & -0.0116 & -24.491 \\ -0.2342 & -0.2290 & 0.9446 & -51.078 \\ -0.6984 & -0.6361 & -0.3280 & 731.221 \end{bmatrix}$$

ค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง 2 ที่ได้จากการสอบเทียบคือ

$$M_{e(oid2)} = \begin{bmatrix} 0.7311 & -0.6822 & 0.0062 & -4.695 \\ -0.2328 & -0.2410 & 0.9422 & -49.373 \\ -0.6413 & -0.6903 & -0.3350 & 731.139 \end{bmatrix}$$

คำนวณหาแนวแกน x ใหม่เราจะหาจากระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสอง ซึ่งก็คือระยะห่างของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของทั้งสองกล้อง ดังนั้นจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของกล้องทั้งสองหาได้จาก

$$Oc_1 = -R_1^{-1} T_1 = [515.3061 \quad 435.3618 \quad 287.7743]^T$$

$$Oc_2 = -R_2^{-1} T_2 = [460.8117 \quad 489.5997 \quad 291.4950]^T$$

คำนวณหาทิศทางของแนวแกน x ใหม่ ($V1$)

$$V1 = (Oc_1 - Oc_2) = [54.4944 \quad -54.2379 \quad -3.7208]$$

คำนวณหาทิศทางของแนวแกน y ใหม่ ($V2$)

$$V2 = r_{3i}^T \times V1 = [-15.4207 \quad -20.4703 \quad 72.5461]$$

คำนวณหาทิศทางของแนวแกน z ใหม่ ($V3$)

$$V3 = V1 \times V2 = [-4.0109 \quad -3.8960 \quad -1.9519]$$

คำนวณหาเมตริกซ์การหมุนใหม่ (R_{new}) และเวกเตอร์การย้ายใหม่ (T_{new}) ตามข้อกำหนดของระบบได้คือ

$$R_{new} = \begin{bmatrix} V1^T / \text{norm}(V1) \\ V2^T / \text{norm}(V2) \\ V3^T / \text{norm}(V3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7079 & -0.7046 & -0.0483 \\ -0.2004 & -0.2661 & 0.9429 \\ -0.6772 & -0.6878 & -0.3296 \end{bmatrix}$$

$$T_{new1} = R_{new} Oc_1 = [-44.1365 \quad -52.2290 \quad 730.2180]$$

$$T_{new2} = R_{new} Oc_2 = [32.8391 \quad -52.2290 \quad 730.2180]$$

หลังจากการสอบเทียบกล้องแบบสเตอริโอเสร็จสิ้นและการปรับพารามิเตอร์ภายนอกแล้ว ดังนั้นพารามิเตอร์ภายนอกใหม่ของกล้องที่เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอคือ

$$M_{e(new1)} = \begin{bmatrix} 0.7079 & -0.7046 & -0.0483 & -44.1365 \\ -0.2004 & -0.2661 & 0.9429 & -52.2290 \\ -0.6772 & -0.6578 & -0.3296 & 730.2180 \end{bmatrix}$$

$$M_{e(new2)} = \begin{bmatrix} 0.7079 & -0.7046 & -0.0483 & 32.8391 \\ -0.2004 & -0.2661 & 0.9429 & -52.2290 \\ -0.6772 & -0.6578 & -0.3296 & 730.2180 \end{bmatrix}$$

ค่าพารามิเตอร์ภายนอกที่ได้จากการสอบเทียบกล้องในระบบสเตริโอ ก่อนที่จะนำไปหา ระยะทางแบบสามมิติได้นั้นจะต้องผ่านขั้นตอนการย้ายจุดภาพจากระบบพิกัดระนาบของภาพเดิม ไปอยู่ระบบพิกัดระนาบของภาพใหม่ เพื่อให้จุดภาพนั้นเป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตริโอ ขั้นตอนการย้ายจุดภาพทำได้ดังนี้ จุดของวัตถุที่อยู่ในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติที่ โปรเจกชันบนระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพจะอยู่ในรูปของ

$$P_p = KM_e P_w \quad (5.13)$$

$$M_e = [R \mid T] \quad (5.14)$$

M_e คือพารามิเตอร์ภายนอกประกอบไปด้วยเมตริกซ์การหมุนมีขนาดเท่ากับ 3×3 และ เวกเตอร์การย้ายมีขนาดเท่ากับ 3×1 และกำหนดให้

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & c_x \\ 0 & \alpha_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

โดยที่

$$KM_e = \begin{bmatrix} q_{1i} & | & q_{14} \\ q_{2i} & | & q_{24} \\ q_{3i} & | & q_{34} \end{bmatrix} = [Q \mid q] \quad (5.16)$$

จุดศูนย์กลางของการโปรเจกชัน (O_c) ของกล้องหาได้ตามสมการที่ 5.17 และสมการที่ 5.16 เขียนให้อยู่ในรูปใหม่ได้ตามสมการที่ 5.18

$$O_c = -Q^{-1}q \quad (5.17)$$

$$KM_e = [Q \mid -QO_c] \quad (5.18)$$

จากสมการที่ 5.13 นำมาเขียนใหม่ในรูปของ

$$P_w = O_c + Q^{-1}P_p \quad (5.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 5.19 ทำให้เกิดแนวความคิดในการที่จะหาจุดภาพใหม่ที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพอันใหม่ จากการสมมุติว่าระบบพิกัดระนาบของภาพได้หมุนไปรอบๆ จุดศูนย์กลางของการโปรเจกชัน จนกระทั่งเป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ โดยไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันแต่อย่างใด ดังนั้นเมื่อจุดของวัตถุ P_w นั้นยังอยู่ที่เดิมจึงทำให้จุดภาพใหม่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพคือ $P_{p(new)}$ เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ ดังนั้นจากสมการที่ 5.19 นำมาเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ 5.20 และ 5.21

$$P_w = Oc + Q_{old}^{-1} P_{p(old)} \quad (5.20)$$

$$P_w = Oc + Q_{new}^{-1} P_{p(new)} \quad (5.21)$$

ดังนั้นจุดภาพใหม่ที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพอันใหม่ตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอหาได้ตามสมการที่ 5.22

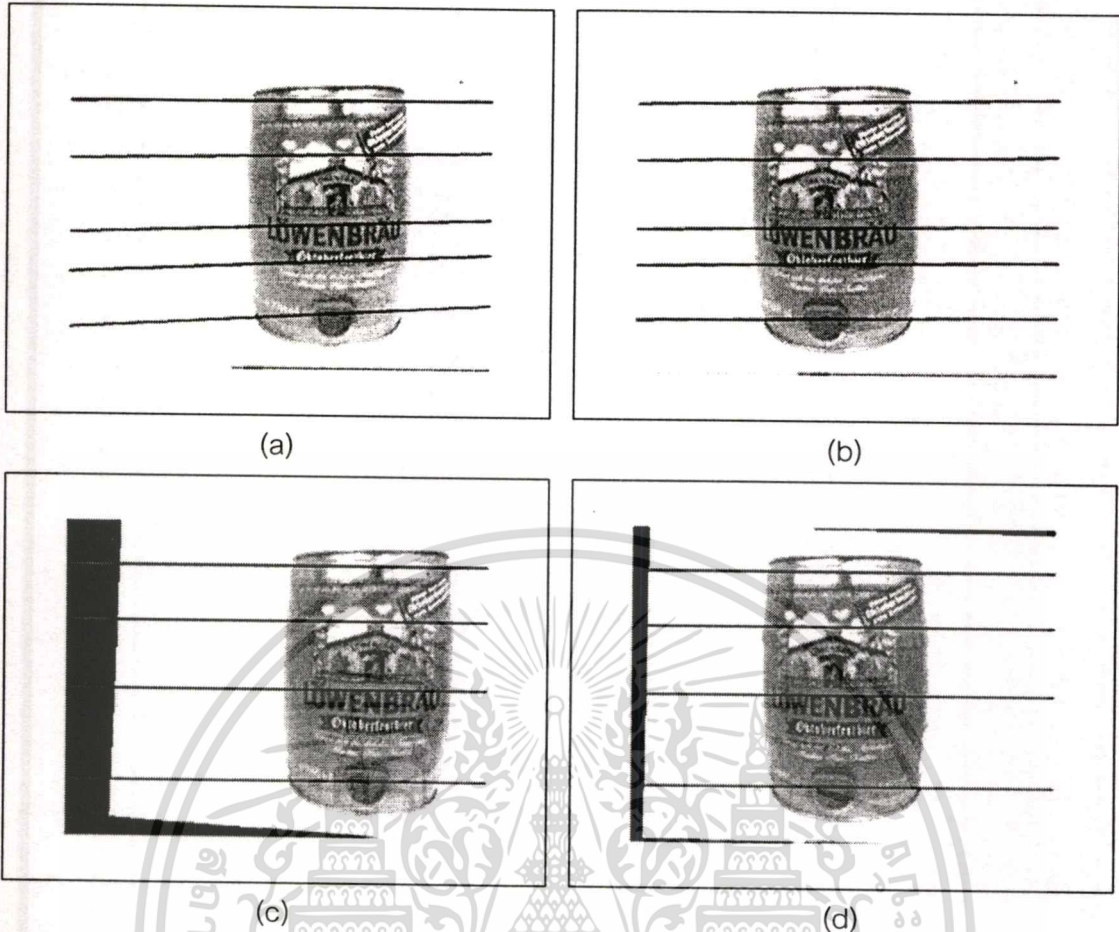
$$P_{p(new)} = Q_{new} Q_{old}^{-1} P_{p(old)} \quad (5.22)$$

โดยที่

$$KM_{e(new)} = [Q_{new} \mid -Q_{new} Oc] \quad (5.23)$$

หลังจากทำการย้ายจุดภาพไปอยู่ในระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพใหม่ตามสมการที่ 5.22 การวัดผลการย้ายจุดภาพบนระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพใหม่ว่าถูกต้องหรือเป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอหรือไม่ เราจะใช้หลักการของ Epipolar geometry คือถ้าโฟกัสเพนของกล้องขนานกับระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสองจะทำให้ Epipolar line ที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพทุกๆ เส้นขนานกันในแนวแกน x ดังนั้นจุดภาพบนระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพใหม่ที่เกิดขึ้นจะถูกต้องและเป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ

ภาพที่ 5.2 Epipolar line ก่อนการ Rectification transformation จะมีแนวที่ไม่ขนานกับระบบพิกัดระนาบของภาพตามแนวแกน x ภาพที่ 5.2 (a) และ (b) และหลังจากผ่านขั้นตอน Rectification transformation ในภาพที่ 5.2 (c) และ (d) Epipolar line ตามแนวแกน x ของทั้งสองกล้องจะขนานกัน



ภาพที่ 5.2 ตัวอย่างการทำ Rectification transformation

5.2 การหาจุดที่สอดคล้องกันโดย Epipolar geometry

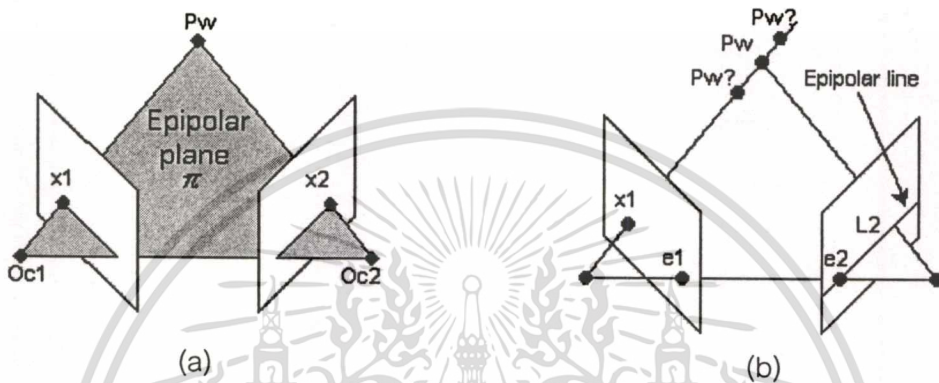
Epipolar geometry เป็นเรขาคณิตที่เกี่ยวข้องกับการโปรเจกชันระหว่างกล้องสองกล้อง ซึ่งไม่ได้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบพิกัดระนาบของภาพ แต่จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ภายในของกล้องทั้งสอง

Fundamental เมตริกซ์ F เป็นเรขาคณิตภายในที่มีขนาด 3×3 มี rank เท่ากับ 2 ถ้าจุดในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพ x_1 ในระบบพิกัดระนาบของภาพที่หนึ่งและ x_2 ในระบบพิกัดระนาบของภาพที่สอง ดังนั้นจุดของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้ $x_2^T F x_1 = 0$

ในหัวข้อต่อไปเราจะอธิบาย Epipolar geometry และคุณสมบัติของ Fundamental matrix ที่จำเป็นที่จะต้องใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

5.3.1 Epipolar geometry

Epipolar geometry เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการมองของสองมุมของกล้อง ซึ่งจำเป็นของเรขาคณิตคือเส้นที่ตัดกันของบนระบบพิกัดระนาบของภาพและมี Base line เป็นเส้นตรงที่มีจุดปลายเป็นจุดร่วมและเป็นจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของกล้องทั้งสอง โดยปกติเรขาคณิตดังกล่าวจะนำไปหาจุดที่สอดคล้องกันในระบบสแตริโอและเราสามารถที่จะนำไปหาจุดสอดคล้องดังกล่าวได้ดังนี้



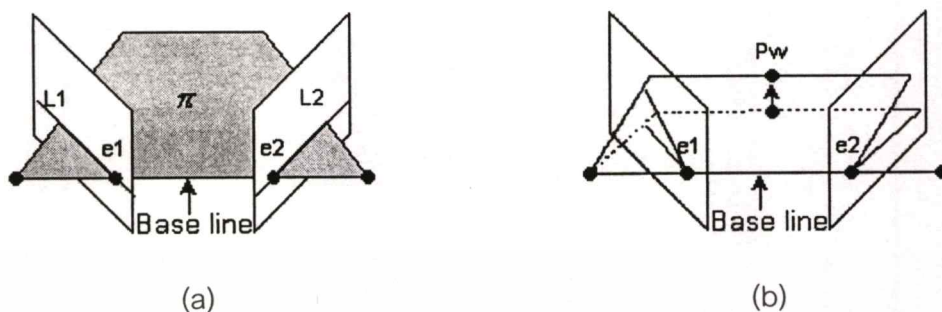
ภาพที่ 5.3 ความสัมพันธ์ของจุดที่สอดคล้องกันทางเรขาคณิต

ภาพที่ 5.3 (a) กล้องทั้งสองจะแสดงด้วยจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชัน $Oc1$ และ $Oc2$ และระบบพิกัดระนาบของภาพ จุดของวัตถุ Pw ในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติในระนาบ π และโปรเจกชันลงบนระบบพิกัดระนาบของภาพทั้งสอง คือ $x1$ และ $x2$

ภาพที่ 5.3 (b) จุดของวัตถุ $x1$ จะโปรเจกชันกลับไปสู่ระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ ซึ่งกำหนดโดยจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของกล้องแรกคือ $Oc1$ และ $x1$ ในทางเดินของแสง ในระบบพิกัดระนาบของภาพที่สองจะเกิดเส้นตรงขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพคือเส้นตรง $L2$ และจุดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ Pw ที่โปรเจกชันจาก $x1$ จะต้องวางอยู่บนแนวทางเดินของแสงที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพที่สองหรือตามแนวเส้นตรง $L2$

สมมติว่าจุดของวัตถุ Pw ในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติที่โปรเจกชันลงบนระบบพิกัดระนาบของภาพทั้งสอง ให้ $x1$ คือจุดที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพที่หนึ่งและให้ $x2$ คือจุดที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพที่สอง ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นดูได้จากภาพที่ 5.3 (a) จุดบนระบบพิกัดระนาบของภาพ ($x1, x2$) จุดของวัตถุ Pw และจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชัน ($Oc1, Oc2$) จะอยู่ในระนาบเดียวกัน ให้ π แสดงถึง Coplanar plane (ระนาบที่อยู่บนระนาบ

เดียว) ทั้งหมดนี้เป็นการโปรเจกชันกลับของจุดภาพ (Back projection) จากจุด x_1 ไปยังจุด x_2 คุณสมบัติดังกล่าวจำเป็นอย่างยิ่งที่จะนำไปหาจุดที่สอดคล้องกันต่อไป



ภาพที่ 5.4 Epipolar geometry

ภาพที่ 5.4 (a) กล้องแต่ละตัวจะมี Baseline ตัดกับระบับพิกัดระนาบของภาพของแต่ละกล้องและผ่านจุด Epipole (e_1, e_2) และจะตัดกับ Epipolar line (L_1, L_2) บน Epipolar plane (b) ในตำแหน่งจุดของวัตถุ P_w ในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติจะเกิดความแตกต่างของ Epipolar plane เมื่อเราแยก Epipolar plane โดยมีจุดหมุนที่มีเส้น Base line เดียวกัน ระนาบนี้เป็นที่รู้จักกันดีคือ Epipolar pencil และ Epipolar line ทุกเส้นจะต้องตัดกับ Epipole ด้วย

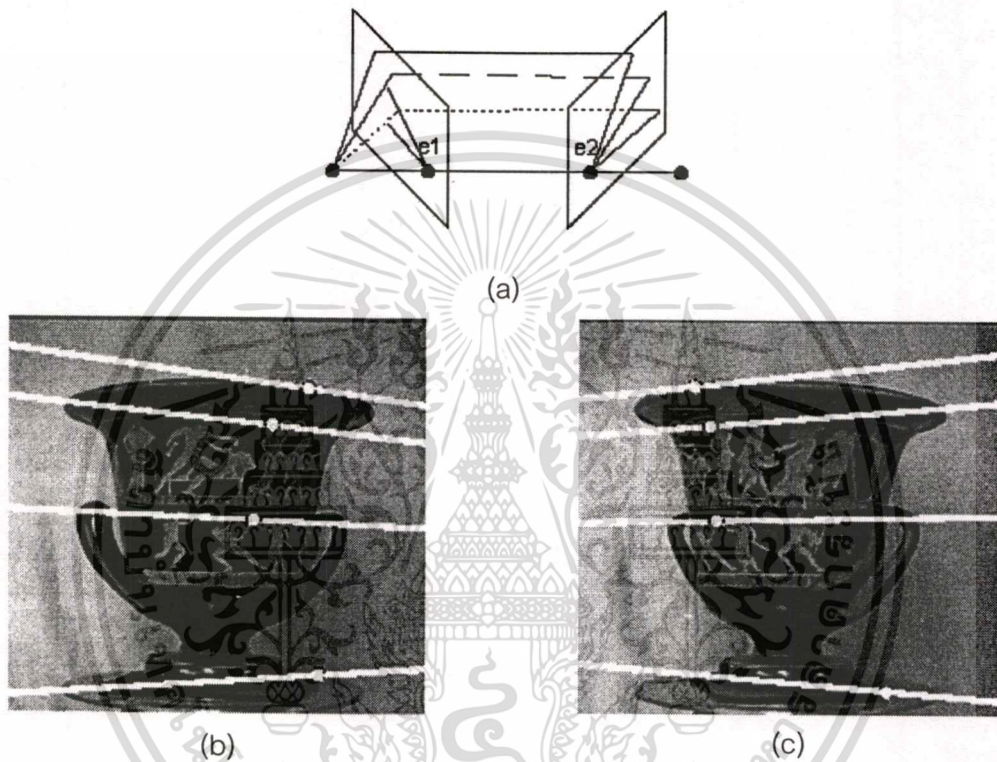
สมมุติว่าตอนนี้เรารู้จุดภาพ x_1 เพียงอย่างเดียวเราอาจจะถามว่าจะหาจุด x_2 ที่สอดคล้องกันได้อย่างไร ในระนาบของ π จะถูกหาได้จาก Base line และทางเดินของแสงที่กำหนดจาก x_1 จากที่กล่าวมาเราจะรู้ได้ว่าทางเดินของแสงจะสอดคล้องกันบนระนาบของ π ดังนั้นจุด x_2 จะเกิดขึ้นบนเส้นตรงที่ตัดกันบนระบบพิกัดระนาบของภาพที่สอง เส้นตรงที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพที่สองนี้เกิดขึ้นจากการโปรเจกชันกลับของจุดภาพที่หนึ่ง ในการหาจุดที่สอดคล้องกันในระบบสแตริโอจะใช้วิธีการค้นหาหาจุดภาพบนเส้นตรงในระบบพิกัดระนาบของภาพที่สองโดยวิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น

เรขาคณิตของ Epipolar มีคำจำกัดความที่เกี่ยวข้องที่แสดงในภาพที่ 5.4 ดังนี้

Epipole คือ จุดที่เกิดขึ้นบนเส้นตรงระหว่างกล้องทั้งสอง สิ่งที่มีความเหมือนกันคือ Epipole บนระบบพิกัดระนาบของภาพ ของกล้องแรกจะเกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพของกล้องที่สองด้วย และมันเป็นจุดมาบรรจบกันบนแนวเส้นตรงระหว่างกล้อง

Epipolar plane คือระนาบที่เกิดจากแนวทางเดินของแสงของทั้งสองกล้องประกอบร่วมกับ Base line มีลักษณะคล้ายกับปลายดินสอหรืออาจจะเรียกว่า (Epipolar pencil) ถ้ามีหลายระนาบจะเรียกว่า (Family pencil) ก็ได้

Epipolar line คือเส้นตรงที่ตัดกับ Epipolar plane บนระบบพิกัดระนาบของภาพ Epipolar line ทุกเส้นจะมีจุดร่วมกันที่ Epipole และ Epipolar plane ที่ตัดกับ Epipolar line บนระบบพิกัดระนาบของภาพทั้งสองเราจะกำหนดให้เป็นจุดที่สอดคล้องกัน

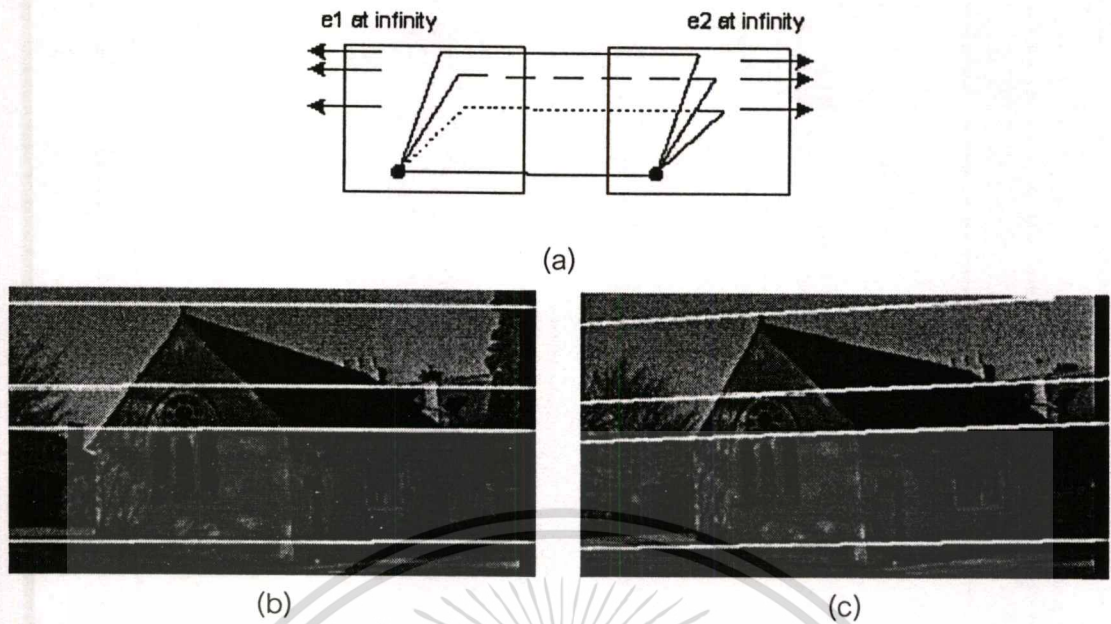


ภาพที่ 5.5 ลักษณะของกล้องทั้งสองที่เบนเข้าหากัน

ภาพที่ 5.5 (a) Epipolar geometry ของกล้องที่เบนเข้าหากัน ภาพที่ 5.5 (b) และ(c) คือภาพของสเตอริโอและเส้นสีขาวที่เกิดขึ้นในภาพทั้งสองคือ Epipolar line จุดที่สอดคล้องกันบน Epipolar line แต่ละเส้นแสดงด้วยจุดสีขาว

ภาพที่ 5.6 เป็นการย้ายระนาบภาพแบบขนานและการหมุนภาพจะต้องตั้งฉากกับระบบพิกัดระนาบของภาพจนตัดกับ Base line จนกระทั่งระบบพิกัดระนาบของภาพเข้าสู่ค่าอนันต์ในทำนองเดียวกัน Epipole ก็จะมีค่าเป็นอนันต์และ Epipolar line จะขนานกันในแนวนอน ภาพที่ 5.6 (a) Epipolar geometry สำหรับการเคลื่อนย้ายระบบพิกัดระนาบของภาพในแนวแกนขนานในภาพที่ 5.6 (b) และภาพที่ 5.6 (c) ภาพสเตอริโอที่เคลื่อนย้ายมุมมองในการถ่ายภาพในแนวแกน x ซึ่งไม่มีการหมุนกล้องเส้นตรงสีขาวที่เห็นในภาพแสดงถึง Epipolar line ที่เกิดขึ้นใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณหาจุดที่สอดคล้องกัน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

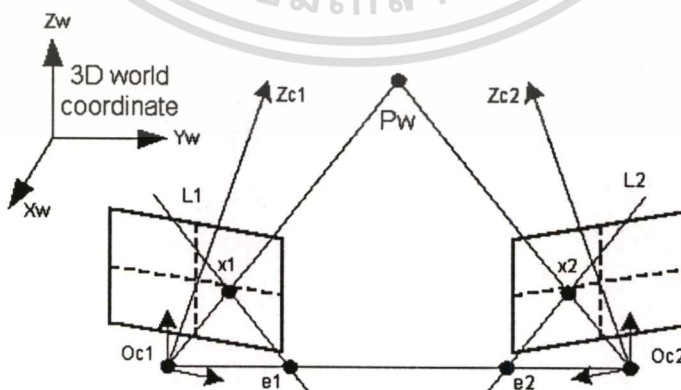


ภาพที่ 5.6 การเคลื่อนที่ในทางขนานของระบบพิกัดระนาบของภาพในกรณีพิเศษ

ตัวอย่างของ Epipolar geometry แสดงในภาพที่ 5.5 และ 5.6 จริงๆแล้วจากตัวอย่างการคำนวณหา Epipolar line ในระบบสแตริโอถูกคำนวณได้จาก Fundamental matrix ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

5.3.2 Fundamental matrix

Fundamental matrix เกี่ยวข้องกับพีชคณิตที่นำมาหา Epipolar geometry ต่อไปนี้เราจะหา Fundamental matrix โดยวิธีการหาจากพารามิเตอร์ของกล้องที่ได้จากการสอบเทียบ



ภาพที่ 5.7 Epipolar geometry ที่มีความสัมพันธ์กับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Epipolar geometry เป็นความสัมพันธ์ระหว่างระบบของกล้องสเตอริโอในรูปแบบของ Pinhole camera ในภาพที่ 5.7 กำหนดให้ Oc1 และ Oc2 เป็นจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของกล้องซ้ายและกล้องขวาตามลำดับ จุดของวัตถุ Pw ในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติโปรเจกชันลงบนระบบพิกัดระนาบของภาพทั้งสอง คือ x_1 และ x_2 จุด x_1 ที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับ Epipolar line(L2) บนระบบพิกัดระนาบของภาพของกล้องขวาและจุด x_2 ที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับ Epipolar line(L1) บนระบบพิกัดระนาบของภาพของกล้องซ้ายด้วย ดังนั้นทุกๆจุดที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพของกล้องขวาจะตรงกับจุด x_1 ได้โดยจะต้องอยู่บน Epipolar line (L2) และทุก Epipolar line ของทั้งสองกล้องจะต้องผ่านจุดร่วม e_1 และ e_2

ความสัมพันธ์ระหว่างกล้องและจุดทั้งสองจะสอดคล้องที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพจะต้องเป็นไปตามสมการที่ 5.24 คือ

$$x_2^T F x_1 = 0 \quad (5.24)$$

เมื่อ F คือ Fundamental matrix สามารถหาได้จากพารามิเตอร์ภายในของกล้องที่ได้จากการสอบเทียบตามสมการที่ 5.25

$$F = M_{i2}^{-T} E M_{i1} \quad (5.25)$$

M_{i1} และ M_{i2} เป็นพารามิเตอร์ภายในของกล้องทั้งสองที่ได้จากการสอบเทียบ และ $E = RS$ คือ Essential matrix เป็นความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ภายนอกระหว่างกล้องทั้งสองที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งและทิศทางของกล้องที่อ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ

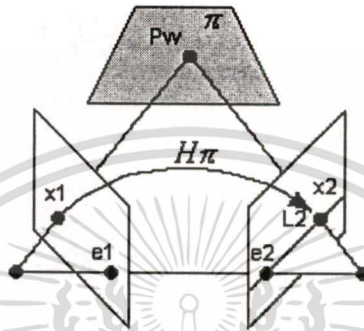
$$R = [R_1 R_2^T]^T \quad (5.26)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -T_z & T_y \\ T_z & 0 & -T_x \\ -T_y & T_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

เมื่อ R คือเมตริกซ์การหมุนระหว่างกล้องทั้งสองที่เกิดจาก R_1 และ R_2

S คือความสัมพันธ์ของเวกเตอร์การย้ายระหว่างกล้องทั้งสอง

ภาพที่ 5.8 จุด x_1 ที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพแรกจะถูกส่งผ่านมาทางระนาบ π มาตรงกับจุด x_2 ในระบบพิกัดระนาบของภาพที่สอง Epipolar line ที่ผ่านจุด x_2 ได้มาจากจุดร่วมกันที่ Epipole(e_2) จากภาพดังกล่าวสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างจุดที่สอดคล้องกันโดยการส่งผ่านระนาบ π คือ $x_2 = H_\pi x_1$ และ $L_2 = [e_2] \times x_2 = [e_2] \times H_\pi x_1 = Fx_1$ โดยที่ $F = [e_2] \times H_\pi$



ภาพที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดที่สอดคล้องกันโดยการส่งผ่านระนาบ π

เงื่อนไขของจุดที่สอดคล้องกันจะขึ้นอยู่กับจุดที่เรานำมาพิจารณา ระหว่าง x_1 กับเส้นตรง L_2 และกำหนดโดย F ดังนั้นจุดที่สอดคล้องกันระหว่างจุดสองจุด x_1 และ x_2 ในระบบพิกัดระนาบของภาพทั้งสองจึงจะต้องเป็นไปตามสมการที่ 5.1 เพราะว่าถ้าจุด x_1 และ x_2 สอดคล้องกัน ดังนั้น x_2 จะเกิดขึ้นบน Epipolar line $L_2 = Fx_1$ ก็จะต้องสอดคล้องกับจุด x_2 ด้วย Fundamental matrix จึงเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นในการหาจุดที่สอดคล้องกันในระบบสเตอริโอ

คุณสมบัติของ Fundamental matrix

1. F จะต้อง มี rank เท่ากับ 2
2. จุดที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพทั้งสองจะสอดคล้องกันได้เมื่อ $x_2^T F x_1 = 0$
3. Epipolar line $L_2 = Fx_1$ และ $L_1 = F^T x_2$
4. Epipole $F e_1 = 0$ และ $F^T e_2 = 0$
5. Fundamental ที่หาได้จากพารามิเตอร์ของกล้องคือ $F = M_2^{-T} E M_1$

5.3 การหาจุดที่สอดคล้องกันโดยวัดค่าสหสัมพันธ์

ปัญหาหลักที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบสเตอริโอคือการหาจุดของวัตถุที่สอดคล้องกันหรือตรงกันที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพของกล้องทั้งสอง ในงานวิจัยฉบับนี้เราได้นำเสนอวิธีการหาจุดภาพที่สอดคล้องกัน โดยอาศัยหลักการ Epipolar geometry ร่วมกับการวัดสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination) ในหลักการดังกล่าวมีวิธีวัดผลแตกต่างกันเช่น เทคนิคการวัดบนพื้นฐานสหสัมพันธ์ (Correlation based measurement techniques) ของระดับสีของภาพวิธีการที่กล่าวมาได้มีผู้นำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้กันอีกมากมาย [11] และ ในงานวิจัยเราได้นำหลักการวัดสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มาหาจุดที่สอดคล้องกันบน Epipolar line มาพัฒนาให้การหาจุดสอดคล้องกันมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

Correlation base measurement techniques

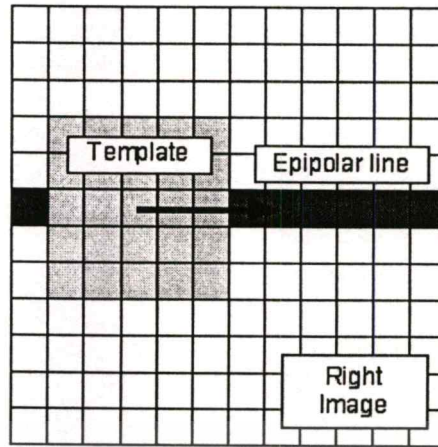
สหสัมพันธ์เป็นการแสดงถึงองศาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวหรือมากกว่า ว่ามีความสัมพันธ์มากน้อยแค่ไหน หากความสัมพันธ์นั้นมีเพียง 2 ตัวแปรก็เป็นสหสัมพันธ์อย่างง่ายถ้าหากความสัมพันธ์นั้นมีตัวแปรตั้งแต่สามตัวขึ้นไปก็เป็นสหสัมพันธ์เชิงซ้อน [19] ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวแต่สหสัมพันธ์อย่างง่ายและเป็นเชิงเส้นเท่านั้น นักสถิติจะใช้สัญลักษณ์ r แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวอย่างและค่า ρ (rho) เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของประชากร

ในการศึกษาสหสัมพันธ์อย่างง่ายเราใช้ค่า r อนุมานค่า ρ เพราะในทางปฏิบัติเราไม่สามารถเอาค่าสังเกตทั้งหมดจากประชากรได้ r จึงเป็นค่าแสดงองศาแห่งความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสองชุด r จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 กับ $+1$ ($-1 < r < +1$) หาก r มีค่าเท่ากับ $+1$ แสดงว่าข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ในทิศทางเดียวกันนั่นคือ ข้อมูล X เปลี่ยนไปข้อมูล Y จะเปลี่ยนตามไปในทางเดียวกันกล่าวคือ X เพิ่ม Y เพิ่ม X ลด Y ก็ลดตาม แต่ถ้า r มีค่าเท่ากับ -1 แสดงว่าข้อมูล X กับ Y มีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ในทิศทางตรงกันข้าม นั่นคือข้อมูล X เพิ่มขึ้นจะมีผลให้อีกข้อมูล Y ลดลงหรือข้อมูล X ลดลงจะมีผลให้อีกข้อมูล Y เพิ่มขึ้น

จากหลักการข้างต้นเรานำมาประยุกต์ใช้กับการหาจุดภาพที่สอดคล้องกันโดยวัดผลของสหสัมพันธ์ข้าม (Cross correlation) ภาพทั้งสองโดยใช้ Template matching ไปบน Epipolar line เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficients) จากความแปรปรวนร่วมกันของเมตริกซ์ (Covariance matrix) ระหว่าง Template ในภาพซ้ายและภาพขวาบน Epipolar line

ภาพที่ 5.9 กำหนดให้จุดภาพที่เราสนใจในภาพด้านซ้ายที่มีค่าระดับสีเทาที่พิกัดที่ $I_L(i, j)$ เป็น Template มีขนาด $m \times n$ และตำแหน่งของ Epipolar line ของภาพด้านขวาคือ $I_R(x, y)$ เราสามารถหาความแปรปรวน [18][19] ของพื้นที่ $I_L(i, j)$ และ $I_R(x, y)$ ได้ตามสมการที่ 5.28 และ 5.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.9 การหาจุดที่สอดคล้องกันโดยวิธีวัดค่าสหสัมพันธ์

$$\sigma_L^2 = \sum_{i-u}^{i+u} \sum_{j-v}^{j+v} \frac{(I_L(i, j) - \mu_L)^2}{m \times n} \quad (5.28)$$

$$\sigma_R^2 = \sum_{y+v}^{y-v} \sum_{x-u}^{x+u} \frac{(I_R(x, y) - \mu_R)^2}{(x+u) \times (y-v)} \quad (5.29)$$

σ_L^2 คือค่าความแปรปรวนของ Template ของภาพซ้าย

σ_R^2 คือค่าความแปรปรวนของ Epipolar line ในภาพขวา

μ_L เป็นค่าเฉลี่ยระดับสีเทาใน Template ของภาพซ้าย

μ_R เป็นค่าเฉลี่ยระดับสีเทาในภาพขวาที่อยู่บน Epipolar line

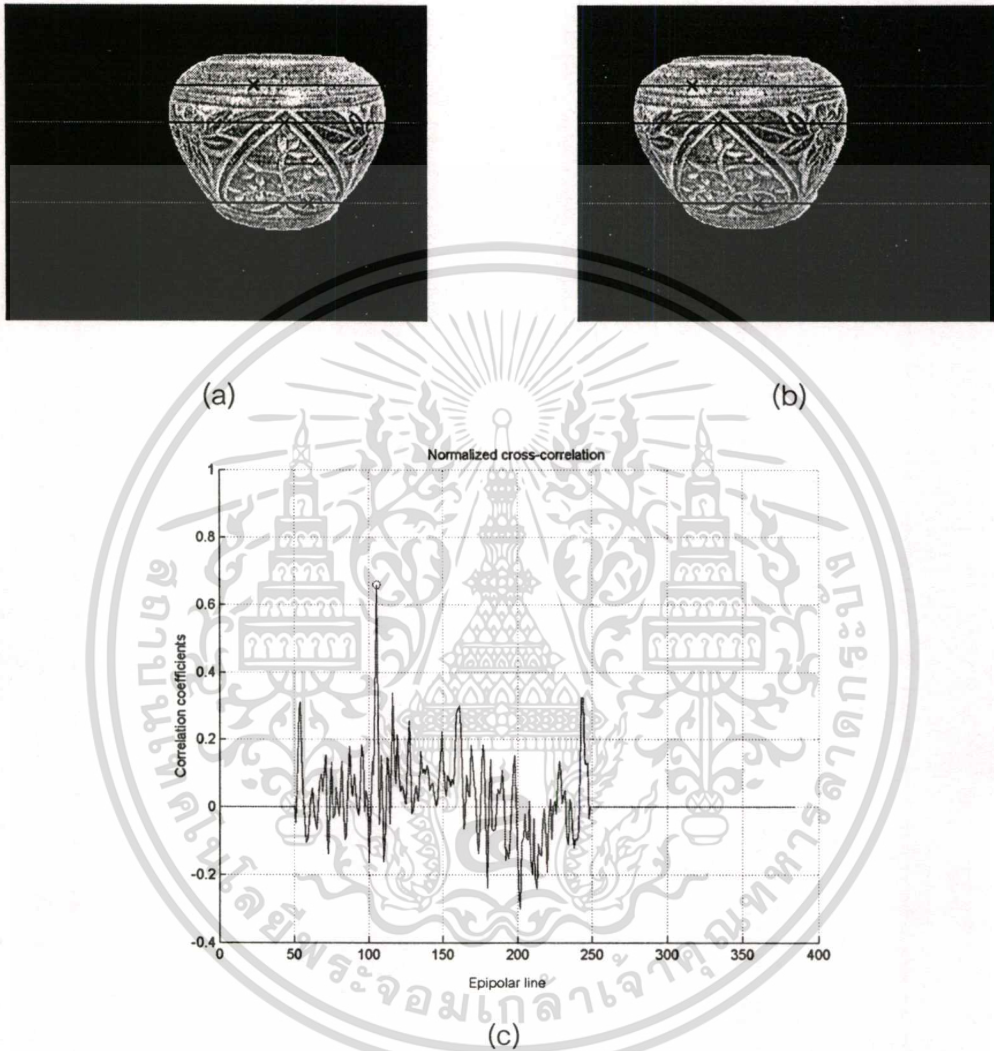
โดยที่ $u = (m-1)/2$ และ $v = (n-1)/2$ และค่าความแปรปรวนรวมทั้งสองหาได้โดยสมการที่ 5.30

$$\sigma_{LR}^2 = \sigma_L \sigma_R \quad (5.30)$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เป็นตัวชี้วัดหาจุดที่ตรงกันจะหาได้ตามสมการที่ 5.31

$$C = \frac{\sigma_{LR}^2}{\sqrt{\sigma_L^2 \sigma_R^2}} \quad (5.31)$$

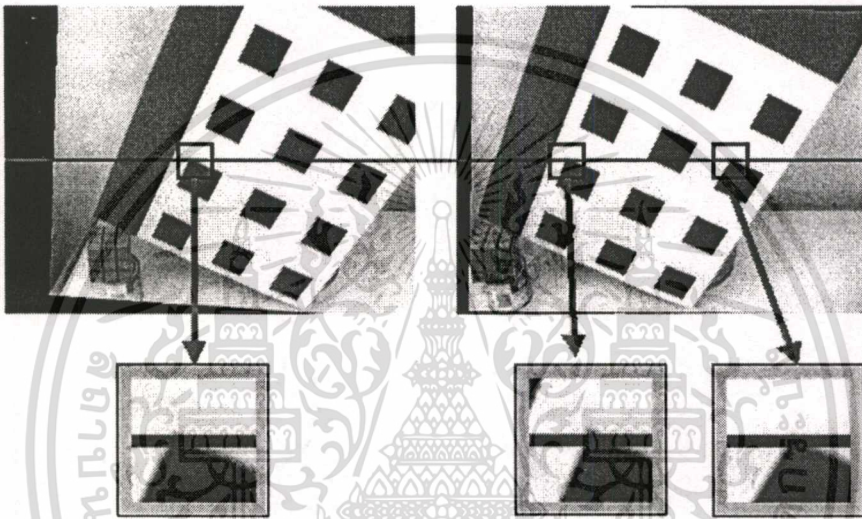
C เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีค่าข้อมูลอยู่ในช่วงของ -1 ถึง 1 ตามแนว Epipolar line โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดจะเป็นจุดที่ถูกเลือกเป็นจุดที่ตรงกันจากตัวอย่างในภาพที่ 5.10



ภาพที่ 5.10 ตัวอย่างการหาจุดที่สอดคล้องกันโดยวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ภาพที่ 5.10 (a) ภาพจากกล้องซ้ายจุดภาพที่เกิดขึ้นคือจุดที่เลือกมาทดสอบ ภาพที่ 5.10 (b) ภาพจากกล้องขวาเป็นจุดสอดคล้องกันที่หาได้บน Epipolar line โดยดูจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในภาพที่ 5.10 (c) จุดที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดจะเลือกเป็นจุดที่สอดคล้องกัน

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะขึ้นอยู่กับการที่เราเลือกขนาด Template ให้เหมาะสมและขึ้นอยู่กับรูปแบบของวัตถุและองค์ประกอบของภาพ เนื่องจากภาพบางภาพเราไม่สามารถใช้การตัดสินได้จากค่าระดับสีเทาที่เกิดขึ้นจากความสว่าง(Brightness) หรือความเข้มของแสง (Contrast) เพียงอย่างเดียวได้ ในกรณีที่ภาพมีข้อมูลคล้ายกันมาก (พื้นผิวเดียวกัน) หรือเป็นรูปแบบที่เหมือนกัน (Pattern, texture) จึงทำให้ยากที่จะตัดสิน ดังนั้นการเลือกขนาดของ Template ที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้การหาจุดที่สอดคล้องกันทำได้ยากเช่นในกรณีที่ ภาพที่มีรูปแบบคล้ายกันหรือภาพมีพื้นผิวเดียวกัน ดังตัวอย่างในภาพที่ 5.11 และ 5.12



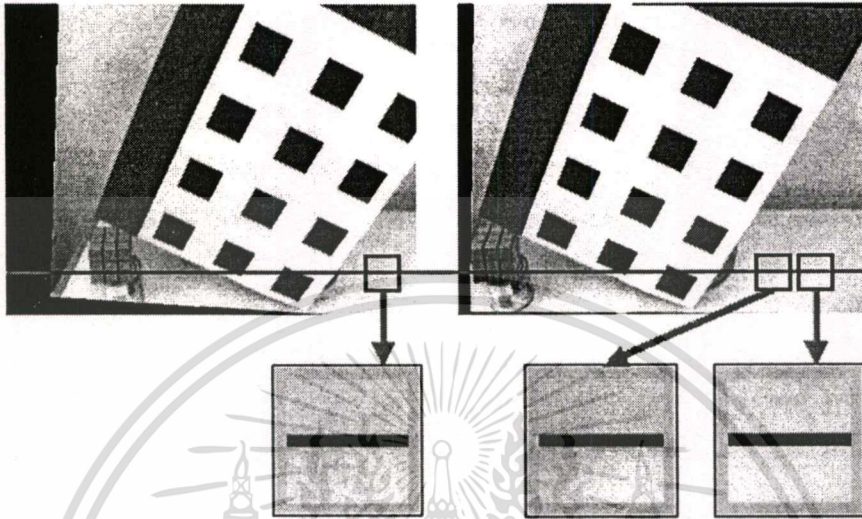
ภาพที่ 5.11 กรณีตัวอย่างการหาจุดสอดคล้องกันทำได้ยากเนื่องจากภาพมีรูปแบบคล้ายกัน

ภาพที่ 5.11 กรณีตัวอย่างการหาจุดสอดคล้องกันทำได้ยากเนื่องจากภาพมีรูปแบบคล้ายกัน จากภาพจะเห็นได้ว่า Template ของภาพซ้ายเมื่อนำไปคำนวณหาจุดที่สอดคล้องกันบน Epipolar line ในภาพขวาอาจจะหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีค่าใกล้เคียงกันได้สองจุด เนื่องจากมีจุดที่มีความคล้ายๆ กันอยู่ในแนว Epipolar line เดียวกัน

ในบางกรณีเราจึงจำเป็นต้องใช้ลักษณะเด่น (Feature) ของภาพหรือองค์ประกอบรอบๆ จุดภาพมาร่วมพิจารณาด้วย ดังนั้นจึงได้พัฒนาวิธีการหาจุดที่สอดคล้องกันโดยใช้ค่าสหสัมพันธ์แบบหลายๆชั้น (Multi layer cross correlation) วิธีการนี้จะช่วยในการตัดสินในเลือกว่าจุดใดเป็นจุดที่สอดคล้องกันได้อย่างถูกต้องมากขึ้น จากเดิมการเลือกจุดภาพจะใช้หน้าต่างที่มีขนาดเดียวมาหาจุดที่สอดคล้องกันบน Epipolar line แต่เราไม่สามารถที่จะกำหนดได้ชัดเจนว่าหน้าต่างขนาดเท่าใดจึงจะมีค่าที่เหมาะสมกับภาพนั้น ในวิธีการใช้ค่าสหสัมพันธ์แบบหลายๆชั้นจะเลือกหน้าต่างหลายๆขนาดค้นหาจุดที่สอดคล้องกันบน Epipolar line หลายๆครั้ง จึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สหสัมพันธ์หลายค่าที่เป็นขั้นๆทับกันอยู่ ซึ่งจะพิจารณาค่าฐานนิยมหรือจุดที่ซ้ำกันมากที่สุดเป็นจุดที่สอดคล้องกัน ดังตัวอย่างในภาพที่ 5.13 จุดที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดจะเกิดขึ้นซ้ำๆกันจะถูกเลือกเป็นจุดที่สอดคล้องกัน



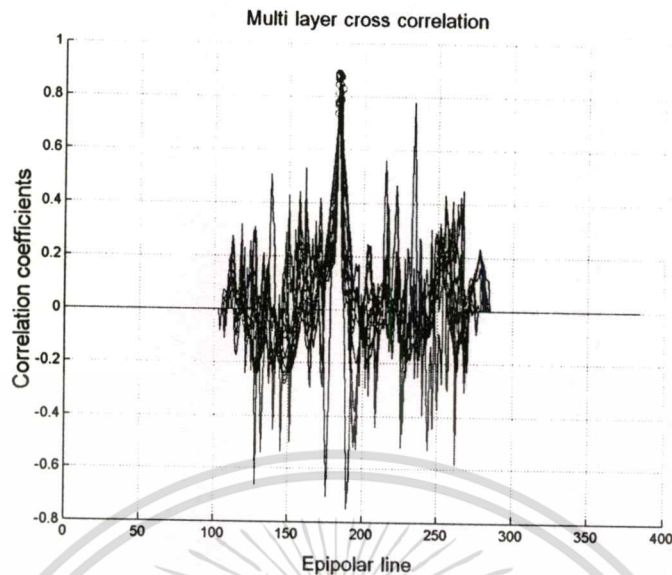
ภาพที่ 5.12 กรณีตัวอย่างการหาจุดสอดคล้องกันทำได้ยากเนื่องจากภาพมีพื้นผิวเดียวกัน

ภาพที่ 5.12 กรณีตัวอย่างการหาจุดสอดคล้องกันทำได้ยากเนื่องจากภาพมีพื้นผิวเหมือนกัน จากภาพจะเห็นได้ว่า Template ของภาพซ้ายถ้ามีพื้นผิวเหมือนกัน สมการที่ 5.28 จะใช้ไม่ได้ เนื่องจากค่าความแปรปรวนจะมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ ถ้ามีพื้นผิวคล้ายๆกัน การหาจุดที่สอดคล้องกันในภาพขาว ก็ยากที่จะทำให้การตัดสินใจเลือกที่จะเป็นจุดที่สอดคล้องกันหรือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อาจจะมีค่าที่ต่ำมากและมีค่าใกล้เคียงกันจนยากที่จะตัดสินใจ

ตัวอย่างในภาพที่ 5.13 จุดที่สอดคล้องกันจะมีตำแหน่งบน Epipolar line ที่ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากจุดที่นำมาพิจารณาอาจจะมีลักษณะที่เด่นมากจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าสูงและใกล้เคียงกัน แต่มีบางกรณีอาจจะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในตำแหน่งที่ต่างจากบน Epipolar line ในภาพที่ 5.14, 5.15 และ 5.16 ดังนั้นการพิจารณาค่าฐานนิยมอาจไม่เพียงพอ ดังนั้นเราจึงเลือกพิจารณาโดยดูจากค่ามัธยฐาน (Median) ของตำแหน่งที่มีค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นบน Epipolar line (ในการทดลองได้ใช้ขนาดหน้าต่าง 15 ขนาดเริ่มตั้งแต่ 3x3 จนถึง 31x31)

ค่ามัธยฐานคือข้อมูลตัวกลางเมื่อเอาข้อมูลที่มีอยู่มาเรียงจากน้อยไปหามาก ถ้าข้อมูลทั้งหมดเป็นเลขคู่ข้อมูลตัวกลางก็คือค่ามัธยฐาน ถ้าข้อมูลเป็นเลขคู่ค่ามัธยฐานจะหาได้จากค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อมูลตรงกลางสองจำนวน [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.13 ตัวอย่างที่ 1 การวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบหลายชั้น

ตัวอย่าง จำนวนข้อมูลเป็นเลขคี่ 5 ข้อมูล คือ 2,5,8,10 และ 12 ค่ามัธยฐาน = 8

ตัวอย่าง จำนวนข้อมูลเป็นเลขคู่ 6 ข้อมูล คือ 3,6,8,10,12 และ 20 ค่ามัธยฐาน = $(8+10) / 2 = 9$

ข้อกำหนดในการตัดสินใจเลือกจุดที่สอดคล้องกันคือ

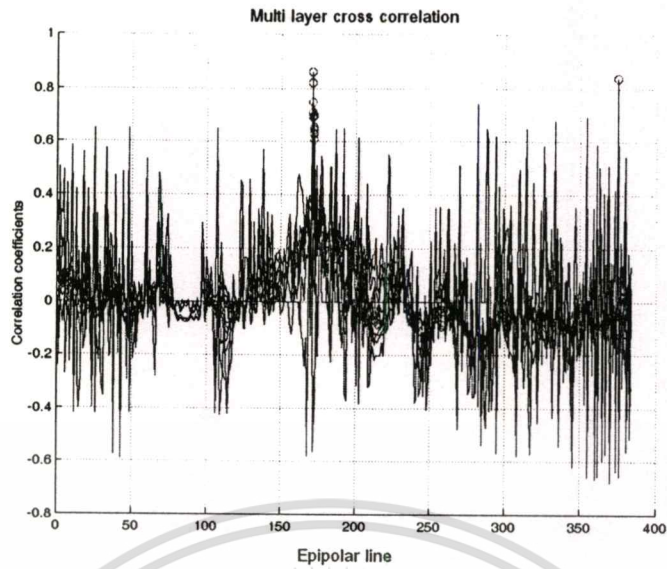
1. จัดกลุ่มที่มีฐานนิยมเดียวกันหรือใกล้เคียงกันไม่เกิน ± 1 pixel ว่ามีกี่กลุ่ม กำหนดให้เป็น G (G คือจำนวนกลุ่มของค่าฐานนิยม 1,2,3...,15)
2. ในกลุ่มที่มีฐานนิยมมากที่สุดมีกี่ข้อมูล กำหนดให้เป็น N
3. ถ้า $N > G$ จะนำจำนวนข้อมูลทั้งหมดมาหาค่ามัธยฐาน และเลือกเป็นจุดที่สอดคล้องกัน

ภาพที่ 5.14 ตัวอย่างที่ 2 การหาจุดสอดคล้องกัน ในกรณีที่มีจุดสอดคล้องเกิดขึ้นหลายๆ ตำแหน่งบน Epipolar line ในภาพจะเห็นได้ว่ามีตำแหน่งที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกันและมีค่าที่ซ้ำๆ กัน อยู่คือ (171, 171, 171, 171, 171, 171, 172, 172, 172, 172, 172, 172, 172, 172, 375) ดังนั้น ($G = 2$ และ $N = 14$) ตำแหน่งที่จะเลือกเป็นจุดที่สอดคล้องกันคือ 172 อยู่ในกลุ่มของข้อมูลที่มีค่าฐานนิยมและเป็นค่ามัธยฐานของกลุ่ม

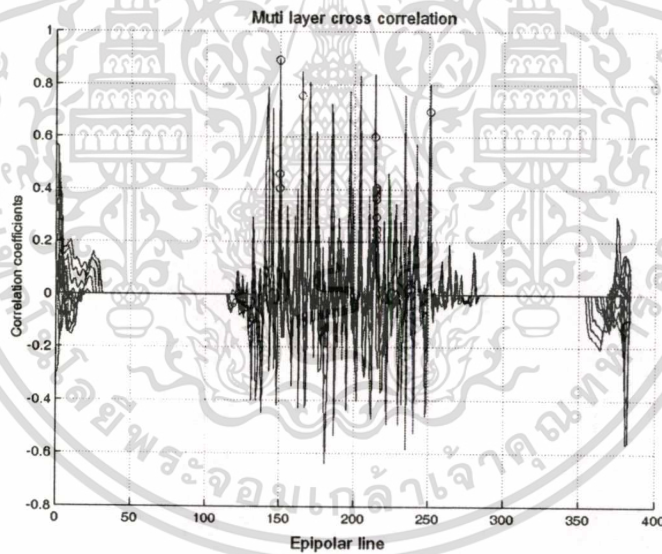
ภาพที่ 5.15 ตัวอย่างที่ 3 การหาจุดสอดคล้องกัน ในกรณีที่มีจุดสอดคล้องเกิดขึ้นหลายๆ ตำแหน่งบน Epipolar line จุดที่สอดคล้องกันในภาพคือ (150, 150, 150, 165, 214, 215, 215, 215, 215, 215, 215, 215, 215, 251) ดังนั้น ($G = 4$ และ $N = 10$) ตำแหน่งที่จะเลือกเป็นจุดที่สอดคล้องกันคือ 215 อยู่ในกลุ่มของข้อมูลที่มีค่าฐานนิยมและเป็นค่ามัธยฐานของกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



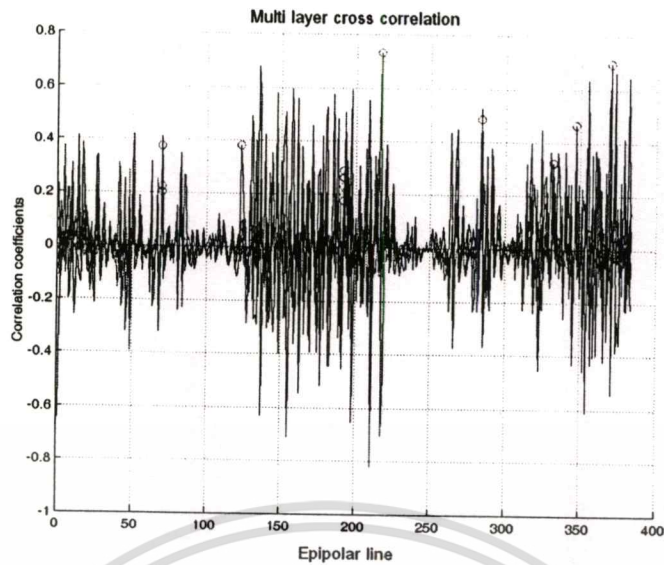
ภาพที่ 5.14 ตัวอย่างที่ 2 การวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบหลายชั้น



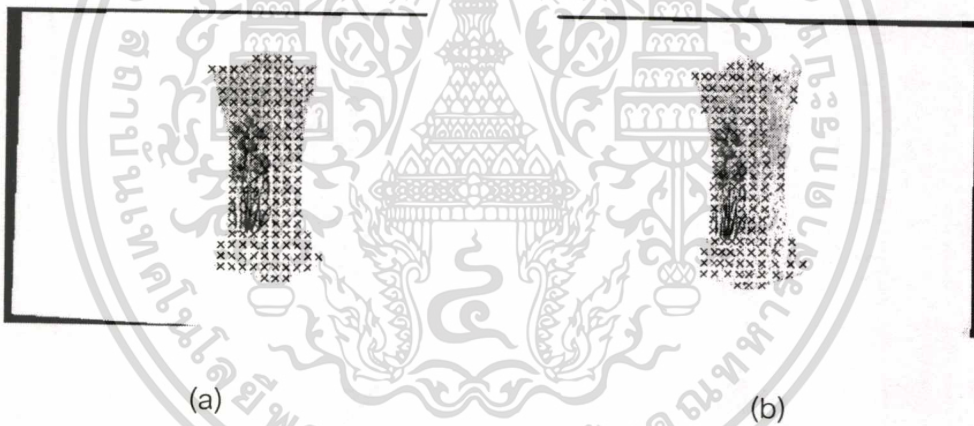
ภาพที่ 5.15 ตัวอย่างที่ 3 การวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบหลายชั้น

ภาพที่ 5.16 เป็นตัวอย่างที่ 4 ในการหาจุดที่สอดคล้องกันจากกราฟในภาพจะเห็นได้ว่ามีตำแหน่งของจุดที่สอดคล้องกันกระจายอยู่มากและมีค่าฐานนิยมอยู่หลายกลุ่มคือ (70, 70, 70, 123, 192, 192, 192, 192, 192, 192, 192, 217, 284, 332, 347, 370) ($G=8$ และ $N=6$) ดังนั้นจากกราฟในภาพเราจึงไม่สามารถเลือกตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งเป็นจุดที่สอดคล้องกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.16 ตัวอย่างที่ 4 การวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบหลายชั้น

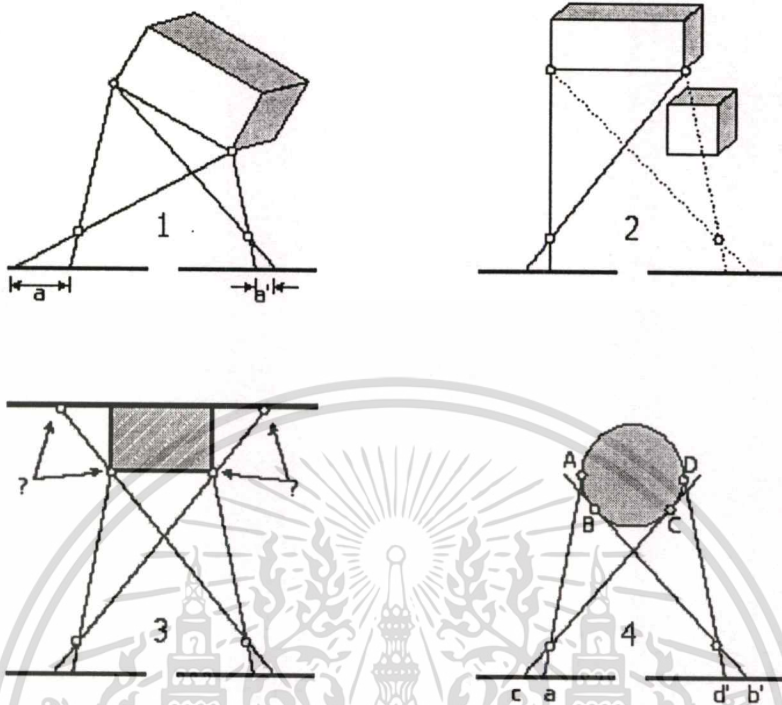


ภาพที่ 5.17 ตัวอย่างการหาจุดที่สอดคล้องกันบนผิวของวัตถุ

ภาพที่ 5.17 การหาจุดที่สอดคล้องกันบนผิวของวัตถุในภาพ (a) เป็นภาพจากกล้องถ่ายภาพที่กากบาทไว้คือจุดที่เป็น Template ที่จะนำไปหาจุดที่สอดคล้องกันในภาพขวา ภาพที่ 5.17 (b) ผลการหาจุดที่สอดคล้องกัน จะเห็นได้ว่าบางตำแหน่งของผิววัตถุเราไม่สามารถหาจุดที่สอดคล้องกันได้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่ากระจายกันอยู่มากบน Epipolar line ตามตัวอย่างในภาพที่ 5.16 ดังนั้นถ้าเรานำจุดภาพทั้งสองไปหาระยะทางแบบสามมิติและนำไปสร้างภาพแบบสามมิติ บริเวณที่เราไม่สามารถหาจุดที่สอดคล้องกันได้เราอาจจะต้องใช้วิธีการ Bilinear interpolation ซึ่งอาจจะทำให้พื้นผิวบางส่วนผิดรูปร่างไปบ้างเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ข้อจำกัดในการหาจุดสอดคล้องกันในระบบสเตอริโอ



ภาพที่ 5.18 กรณีตัวอย่างที่ไม่สามารถหาจุดที่สอดคล้องกันได้ในระบบสเตอริโอ

กรณีที่ 1 ขนาดของวัตถุที่ตกบนระนาบภาพมีขนาดที่แตกต่างกันมาก เช่น a มากกว่า a' ดังนั้นจะส่งผลให้การกำหนดขนาดของหน้าตาในการหาจุดสอดคล้องกันมีรายละเอียดของภาพไม่เพียงพอเมื่อทำการค้นหามุม Epipolar line จึงทำให้ไม่สามารถที่จะหาจุดที่ตรงกันได้

กรณีที่ 2 วัตถุที่ถูกบดบังในกรณีนี้ไม่สามารถที่จะนำมาหาระยะทางแบบสามมิติได้เลย

กรณีที่ 3 ปัญหาเนื่องจากความลึกจากภาพเราไม่สามารถที่จะบอกได้ชัดเจนว่าจุดใดเป็นจุดของวัตถุจริงในพิภพโลกสามมิติ

กรณีที่ 4 ปัญหาเรื่องความโค้งของพื้นผิว จากตัวอย่างภาพวงกลมขอบของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพซ้ายคือจุด c และ a ขอบของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพขวาคือ d' และ b' ซึ่งในความเป็นจริงแล้วขอบของวัตถุของแต่ละกล้องไม่ใช่เป็นจุดเดียวกันดังนั้นในการหาระยะทางแบบสามมิติของวัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวโค้งจึงทำได้ยากเนื่องจากแต่ละกล้องไม่สามารถที่จะมองเห็นรายละเอียดของอีกด้านได้จึงเป็นปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการที่จะสร้างภาพกลับคืน

ขั้นตอนการทดลองประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอนหลักดังนี้

ขั้นตอนการสอบเทียบกล้องเป็นขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ภายในและภายนอกของกล้อง เพื่อนำพารามิเตอร์ของกล้องมาคำนวณหาความสัมพันธ์ของระบบพิกัดต่างๆ และเป็นตัวกำหนดการหาจุดที่สอดคล้องกันทางด้านเรขาคณิตของกล้อง ส่วนพารามิเตอร์ภายในของกล้อง โดยปกติแล้วกล้องจะบอกคุณสมบัติมาในคู่มือของกล้องเองแต่เนื่องจากถ้าเราใช้งานไปนานๆ อาจจะทำให้พารามิเตอร์ภายในของกล้องเปลี่ยนไป ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการสอบเทียบกล้องก่อนที่จะทำการหาระยะทางพื้นผิวของวัตถุ

วิธีการสอบเทียบกล้องตามที่ได้นำเสนอมาเราได้เลือกวิธีการสอบเทียบโดยวิธี CPM (Camera projection matrix) สาเหตุที่เลือกวิธีการดังกล่าวเพราะว่าเป็นวิธีการที่ง่ายในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และเป็นที่ยอมรับเนื่องจากสามารถทำเพียงขั้นตอนเดียว อีกทั้งยังใช้จุดสอบเทียบจำนวนน้อยกว่าและสามารถประยุกต์ใช้ได้ง่ายดังเช่น ในบทความที่ได้นำเสนอเรื่อง "การสอบเทียบกล้องสเตอริโอร่วมกับ Epipolar rectification " เป็นต้น

ขั้นตอนที่สองการ Rectification transformation เป็นขั้นตอนการย้ายจุดภาพจุดเดิมไปอยู่ในระบบพิกัดระนาบของภาพใหม่สาเหตุที่ต้องย้ายจุดภาพใหม่เนื่องจากการหาระยะทางแบบสามมิติถ้ากล้องไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบจะทำให้ระยะทางที่หาได้จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น การย้ายจุดภาพจะเป็นการย้ายจุดทางเรขาคณิตของกล้องตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอไว้หลังจากย้ายจุดภาพแล้วเราสามารถที่จะนำมาหาระยะทางแบบสามมิติได้ทันที

ขั้นตอนที่สามเป็นขั้นตอนการหา Epipolar line ซึ่งเป็นการหาจุดภาพที่มีความสอดคล้องกันทางเรขาคณิตของกล้อง และยังเป็นการวัดผลการย้ายจุดภาพบนระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพใหม่ว่าถูกต้องหรือเป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอหรือไม่

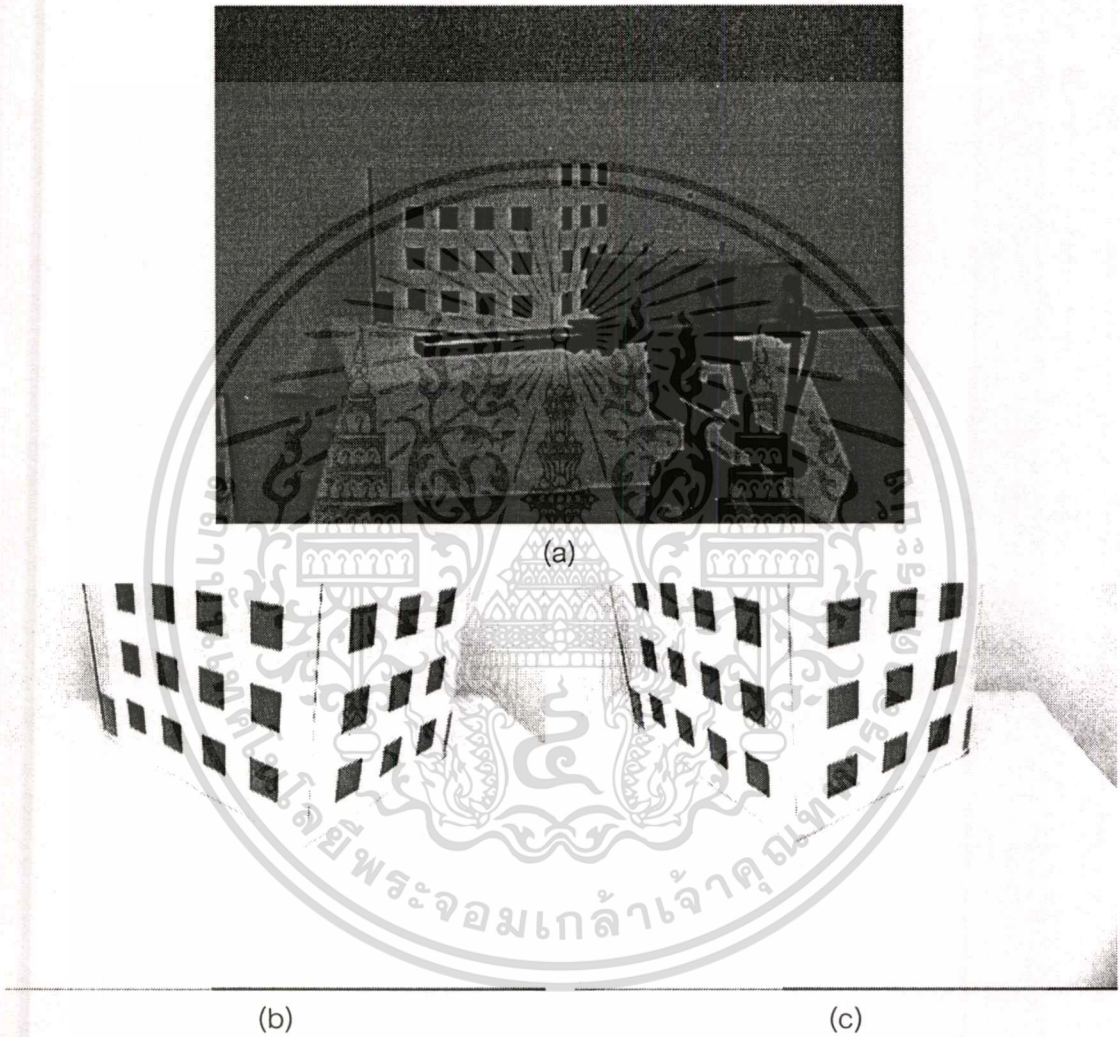
ขั้นตอนที่สี่เป็นขั้นตอนเป็นการหาจุดภาพที่สอดคล้องกันที่เกิดขึ้นบน Epipolar line ร่วมกับการวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบหลายชั้น (Multi layer cross correlation) วิธีการนี้จะช่วยในการตัดสินใจเลือกจุดใดเป็นจุดที่สอดคล้องกันได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ขั้นตอนที่ห้าหลังจากเราสามารถหาจุดที่สอดคล้องกันได้แล้วต่อจากนั้นเราจะนำจุดที่สอดคล้องกันมาคำนวณหาระยะทางแบบสามมิติโดยคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุ และนำระยะทางที่คำนวณได้มาคำนวณหาพิคตของวัตถุในระบบพิกัดกล้องอีกครั้งหนึ่ง

ขั้นตอนสุดท้ายหลังจากเรารู้พิกัดของวัตถุในระบบพิกัดกล้องเราสามารถที่จะนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุได้ อีกทั้งยังสามารถที่จะคำนวณหาขนาด และพิกัดของวัตถุ โดยสร้างเป็นภาพจำลองที่อ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติได้อีกด้วย

6.2 ผลการทดลองการสอบเทียบกล้อง

ในขั้นตอนการสอบเทียบกล้องเราจะทำการติดตั้งกล้องและทำการถ่ายภาพ Calibration pattern ในภาพที่ 6.2 จากนั้นคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ภายนอกและภายในของกล้อง ผลการทดลองเราสอบเทียบกล้องแบบตัวเดียวและการสอบเทียบกล้องแบบสเตอริโอโดยวิธี Camera projection matrix ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบจะแสดงอยู่ในตารางที่ 6.1 - 6.4



ภาพที่ 6.2 การติดตั้งกล้องที่จะทำการสอบเทียบ (a) ภาพการติดตั้งกล้อง (b) และ(c) ภาพที่ใช้ในการสอบเทียบแบบระนาบตั้งฉากถ่ายจากกล้องซ้ายและขวา

ภาพที่ 6.2 จะเป็นภาพที่ใช้ในการสอบเทียบแบบระนาบตั้งฉาก ในภาพจะมีรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสสีดำมีขนาด 45 มม.วางอยู่บนพื้นสีขาวมีระนาบที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันและกันจุดที่นำมาสอบเทียบจะเป็นมุมทั้งสี่ของรูปสี่เหลี่ยมและเรากำหนดเป็นจุดของระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องแบบตัวเดียวโดยวิธี Camera projection matrix

พารามิเตอร์ภายนอก	กล้อง 1	กล้อง 2
r_{11}	0.6763	0.7311
r_{12}	-0.7366	-0.6822
r_{13}	-0.0116	0.0062
r_{21}	-0.2342	-0.2328
r_{22}	-0.229	-0.2410
r_{23}	0.9446	0.9422
r_{31}	-0.6984	-0.6413
r_{32}	-0.6361	-0.6903
r_{33}	-0.3280	-0.3350
T_x	-24.491	-4.695
T_y	-51.078	-49.373
T_z	731.221	731.139

ตารางที่ 6.1 ผลการทดลองการสอบเทียบกล้องโดยวิธี Camera projection matrix ในตารางจะประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องทั้งสองและในตารางที่ 6.2 เป็นตารางที่แสดงค่าพารามิเตอร์ภายในของกล้องทั้งสองที่ได้จากการสอบเทียบโดยวิธีเดียวกัน

ตารางที่ 6.2 ค่าพารามิเตอร์ภายในของกล้องแบบตัวเดียวโดยวิธี Camera projection matrix

พารามิเตอร์ภายใน	กล้อง 1		กล้อง 2	
	สอบเทียบ (มม.)	คู่มือกล้อง (มม.)	สอบเทียบ (มม.)	คู่มือกล้อง (มม.)
ความยาวโฟกัสแนวแกน (x)	4.2343	4.5	4.2492	4.5
ความยาวโฟกัสแนวแกน (y)	4.3692	4.5	4.3957	4.5
จุดศูนย์กลางบนระนาบภาพ ตามแนวแกน x	0.0193	0	-0.0867	0
จุดศูนย์กลางบนระนาบภาพ ตามแนวแกน y	-0.4226	0	-0.4722	0

ระยะห่างระหว่างกล้อง(Base line) = 76.9756 มม.

ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของกล้องที่ 1 = [515.3061 435.3618 287.7743]^T

ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของกล้องที่ 2 = [460.8117 489.5997 291.4950]^T

หลังจากการสอบเทียบกล้องและได้ค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องตามตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่ากล้องไม่ได้ถูกติดตั้งตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ ดังนั้นต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ภายนอกให้เป็นไปตามข้อกำหนด ผลที่ได้หลังจากปรับพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องแสดงในตารางที่ 6.3 ส่วนในตารางที่ 6.4 ค่าพารามิเตอร์ภายในของกล้องจะไม่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 6.3 ค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องที่ใช้วิธีการสอบเทียบกล้องสเตอริโอร่วมกับ

Epipolar rectification

พารามิเตอร์ภายนอก	กล้อง 1	กล้อง 2
r_{11}	0.7079	0.7079
r_{12}	-0.7046	-0.7046
r_{13}	-0.0483	-0.0483
r_{21}	-0.2029	-0.2029
r_{22}	-0.2685	-0.2685
r_{23}	0.9417	0.9417
r_{31}	-0.6765	-0.6765
r_{32}	-0.6568	-0.6568
r_{33}	-0.3331	-0.3331
T_x	-44.136	32.839
T_y	-49.523	-49.523
T_z	730.406	730.406

ระยะห่างระหว่างกล้อง(Base line) = 76.9756 มม.

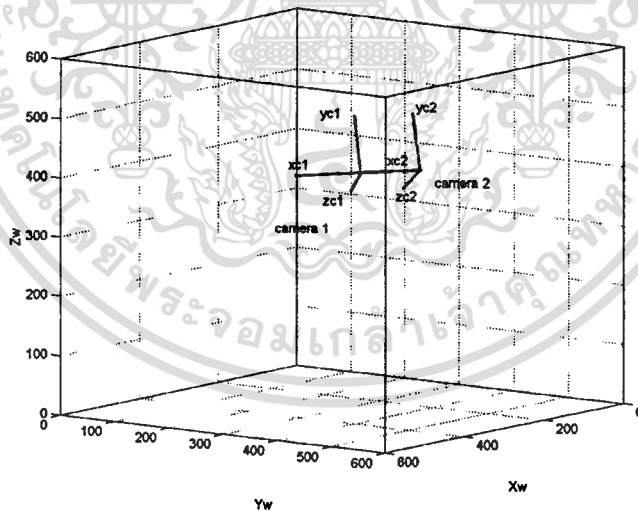
ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของกล้องที่ 1 = [515.3061 435.3618 287.7743]^T

ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของกล้องที่ 2 = [460.8117 489.5997 291.4950]^T

ตารางที่ 6.4 ค่าพารามิเตอร์ภายในของกล้องที่ใช้วิธีการสอบเทียบกล้องสเตอริโอร่วมกับ Epipolar rectification

พารามิเตอร์ภายใน	กล้อง 1 (มม.)		กล้อง 2 (มม.)	
	สอบเทียบ	คู่มือกล้อง	สอบเทียบ	คู่มือกล้อง
ความยาวโฟกัสแนวแกน (x)	4.2343	4.5	4.2492	4.5
ความยาวโฟกัสแนวแกน (y)	4.3692	4.5	4.3957	4.5
จุดศูนย์กลางบนระนาบภาพตามแนวแกน x	0.0193	0	-0.0867	0
จุดศูนย์กลางบนระนาบภาพตามแนวแกน y	-0.4226	0	-0.4722	0

หลังจากการสอบเทียบกล้องสเตอริโอร่วมกับ Epipolar rectification เราสามารถสร้างแบบจำลองตำแหน่งและทิศทางของกล้องจากค่าพารามิเตอร์ภายนอกที่อ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติได้ดังภาพที่ 6.3

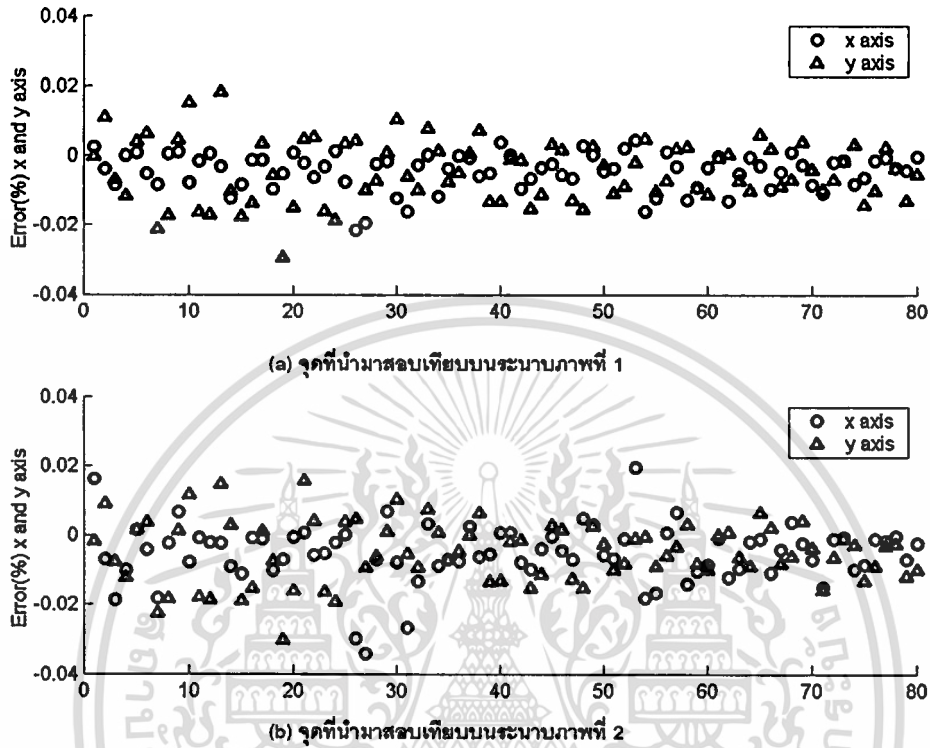


ภาพที่ 6.3 จำลองตำแหน่งและทิศทางระบบพิกัดกล้องที่อ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ

หลังจากผ่านกระบวนการสอบเทียบหาค่าพารามิเตอร์ภายนอกและภายในเราสามารถที่จะทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวถูกต้องหรือไม่ได้โดยแทนค่าพารามิเตอร์ตามสมการ $P_p = KM_e P_w$ เพื่อตรวจสอบว่าจุดของวัตถุในปริภูมิสามมิติที่โปรเจกชันลงบนพิกัดตำแหน่งของ

จุดภาพผิดพลาดไปจากตำแหน่งที่นำไปสอบเทียบเพียงใด ซึ่งแสดงเป็นกราฟค่าความผิดพลาดที่
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นในภาพที่ 6.4 (a) และ (b) กราฟค่าความผิดพลาดแนวแกน x และ y บนระนาบภาพของ กล้อง 1 และกล้อง 2 โดยมีจำนวนจุดที่ได้นำมาทดสอบจำนวน 80 จุด



ภาพที่ 6.4 กราฟค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพของกล้อง 1 และกล้อง 2

ตารางที่ 6.5 ตารางสรุปผล ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ต่างๆ จากกราฟในภาพที่ 6.4 ผลจากตารางที่ 6.5 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีเพียงเล็กน้อยและสามารถที่จะนำค่าพารามิเตอร์ของกล้องไปคำนวณหาระยะทางแบบสามมิติได้ต่อไป

ตารางที่ 6.5 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพของกล้อง 1 และกล้อง 2

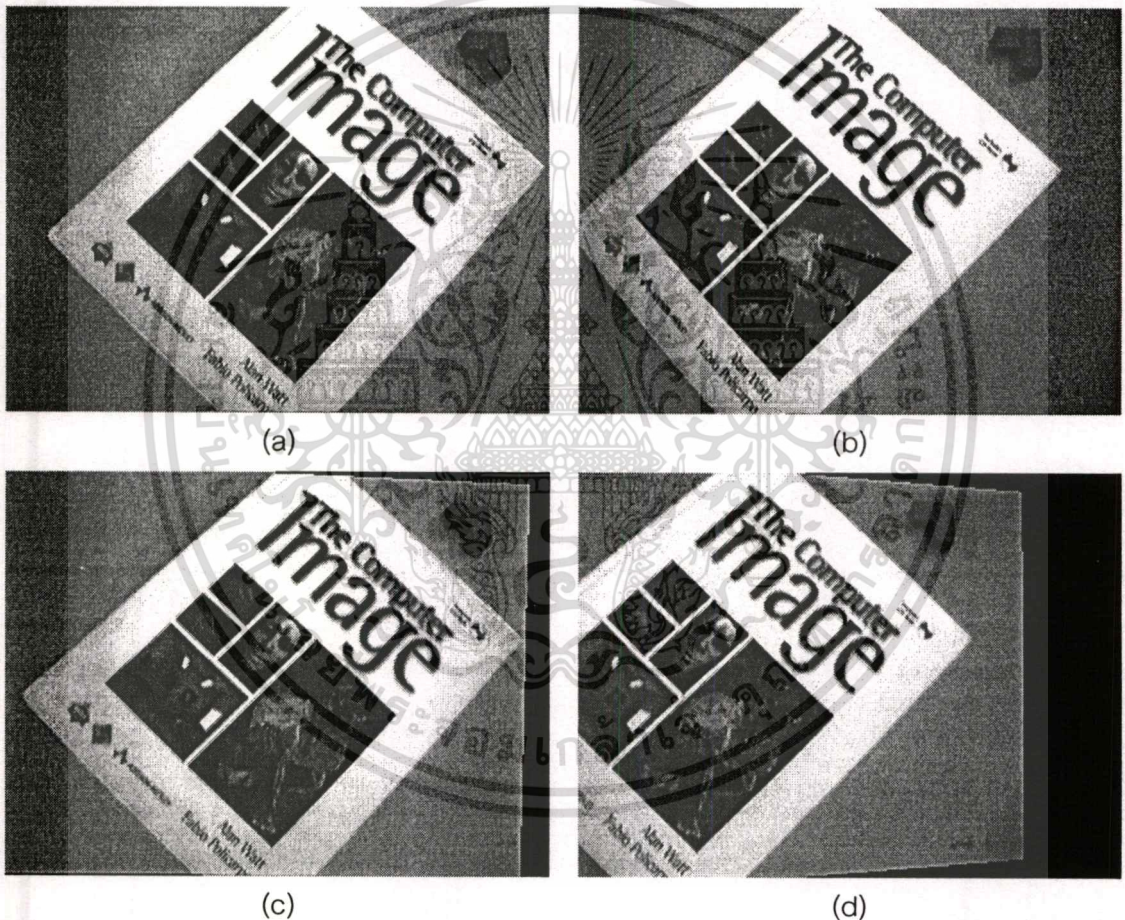
สรุปค่าความผิดพลาด(%)	ระนาบภาพที่ 1		ระนาบภาพที่ 2	
	แนวแกน x	แนวแกน y	แนวแกน x	แนวแกน y
Minimum	-0.0214	-0.0294	-0.0340	-0.0303
Maximum	0.0043	0.0182	0.0194	0.0156
Mean	-0.0044	-0.0046	-0.0052	-0.0050
Standard Div.	-0.0052	-0.0089	0.0083	0.0088

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ผลการทดลองการ Rectification transformation

การ Rectification transformation เป็นแนวความคิดที่จะทำการหาจุดภาพใหม่ที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพตามข้อกำหนดของระบบ โดยมีแนวความคิดที่คล้ายๆกับการหมุนกล้องไปรอบๆจุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันจนกระทั่ง Base line ขนานกับแนวแกน x ของทั้งสองกล้องและแนวแกน z ของระบบพิกัดกล้องทั้งสองขนานกัน ในความเป็นจริงแล้วเราไม่ได้ทำการหมุนตัวกล้องทั้งสองแต่อย่างใด แต่ใช้วิธีการย้ายจุดภาพเดิมไปอยู่ในระบบพิกัดระนาบของภาพใหม่โดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบกล้องสเตอริโอ ดังตัวอย่างในภาพที่ 6.5 และ 6.6

ตัวอย่างที่ 1

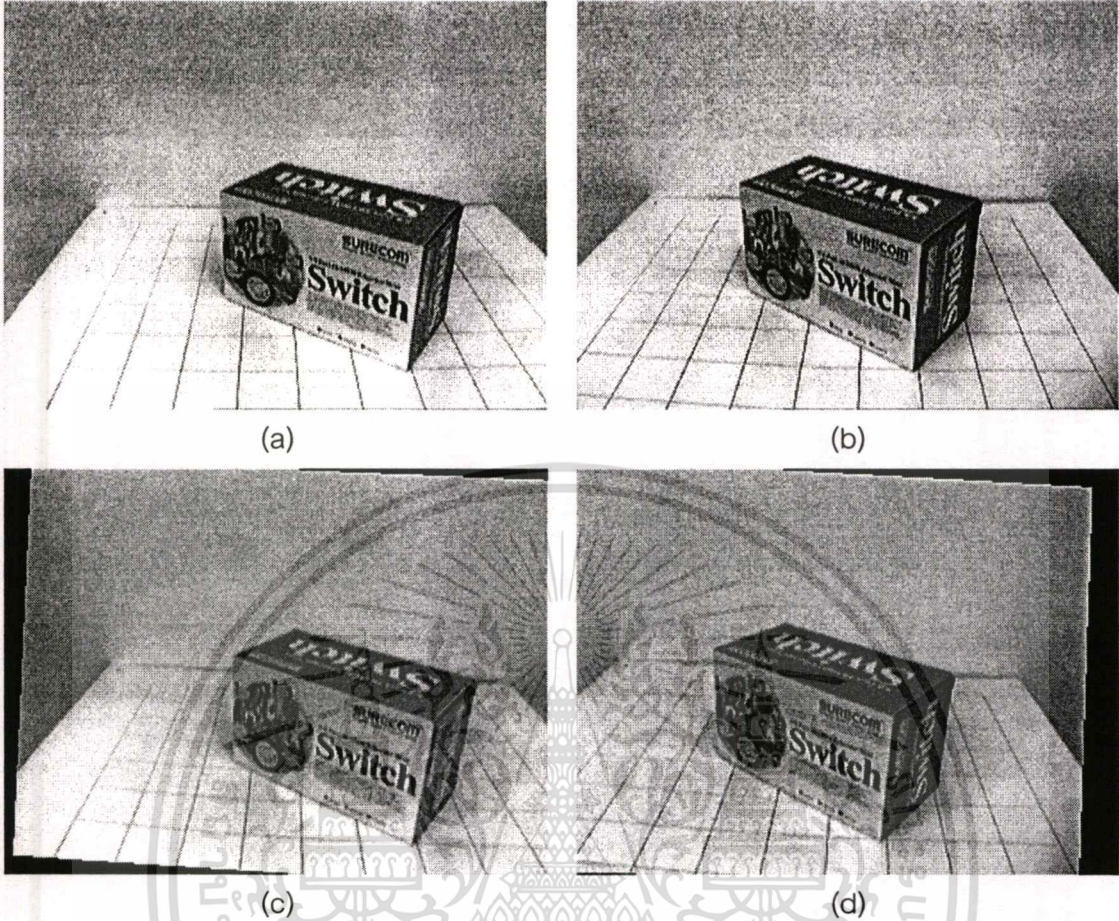


ภาพที่ 6.5 ตัวอย่างที่ 1 การย้ายจุดภาพวัตถุให้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ

ภาพที่ 6.5 (a) และ (b) เป็นภาพของกล้องด้านซ้ายและกล้องด้านขวาก่อนการย้ายจุดภาพวัตถุไปอยู่บนระบบพิกัดระนาบของภาพใหม่ ภาพที่ 6.5 (c) และ (d) ผลการย้ายจุดภาพบนระบบพิกัดระนาบของภาพใหม่ตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ 6.6 ตัวอย่างที่ 2 การย้ายจุดภาพวัตถุให้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ

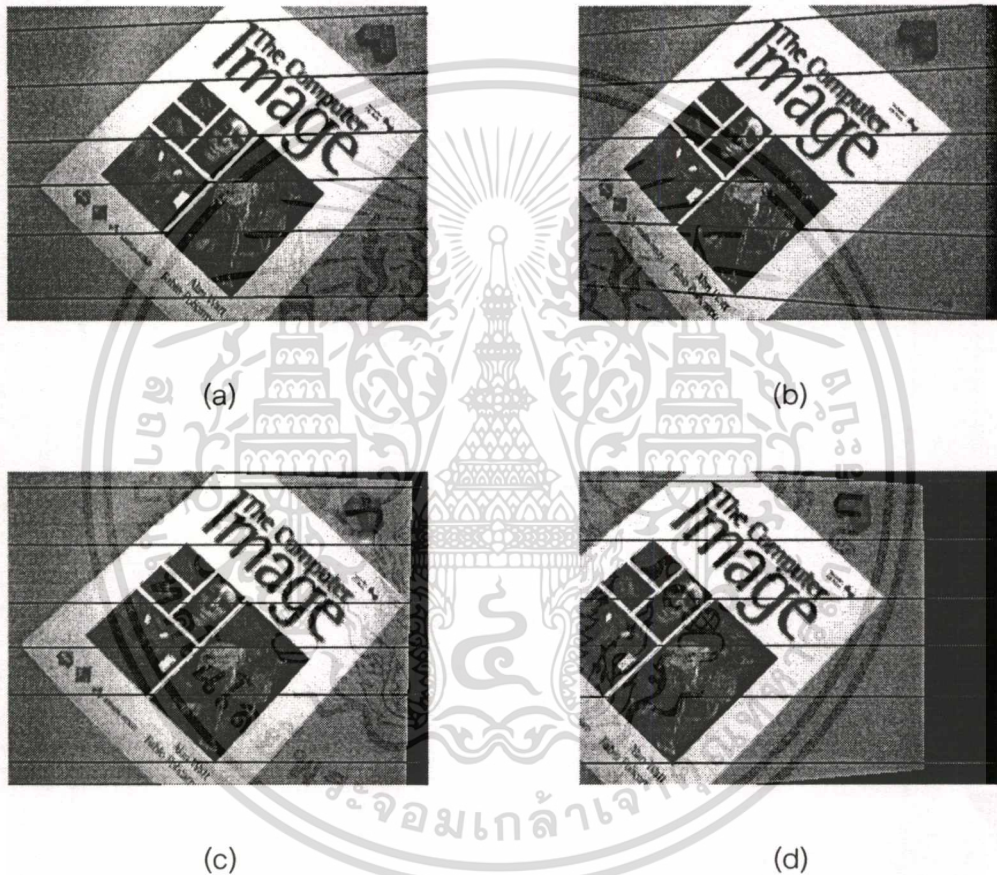
ภาพที่ 6.6 (a) และ (b) เป็นภาพของกล่องด้านซ้ายและกล่องด้านขวาก่อนการย้ายจุดภาพวัตถุไปอยู่บนระบบพิกัดระนาบของภาพใหม่ ภาพที่ 6.6 (c) และ (d) ผลการย้ายจุดภาพบนระบบพิกัดระนาบของภาพใหม่ตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ

การตรวจสอบผลการย้ายจุดภาพไปอยู่บนระบบพิกัดระนาบของภาพใหม่ว่าถูกต้องหรือไม่ทำได้โดยใช้หลักการของ Epipolar geometry ที่กล่าวไว้ว่าถ้ากล่องถูกติดตั้งเป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอ Epipolar line ที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพจะขนานกันไปใช้แนวนอน ผลการทดลองการหา Epipolar line แสดงในหัวข้อที่ 6.4

6.4 ผลการทดลองการหา Epipolar line

การทดลองการหา Epipolar line เป็นการค้นหาจุดภาพทางเรขาคณิตระหว่างกล้องสองกล้อง ในการทดลองเราสามารถที่จะหา Epipolar line ได้ทั้งก่อนและหลักการ Rectification Transformation แต่ในการที่จะนำจุดภาพไปใช้ในการหาระยะทางแบบสามมิติเราจะทำการหา Epipolar line หลังจากการ Rectification transformation แล้ว

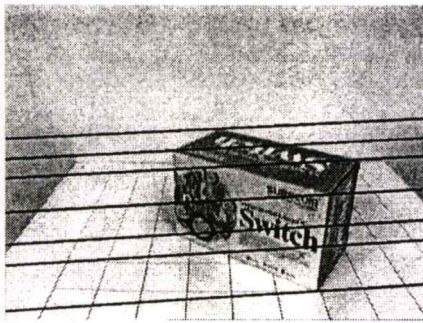
ตัวอย่างที่ 1



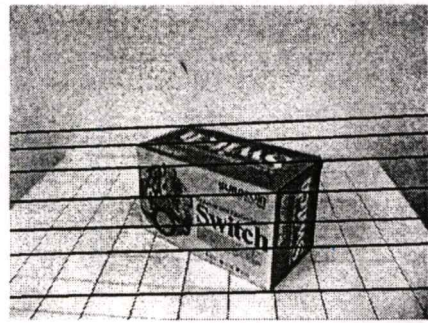
ภาพที่ 6.7 ตัวอย่างที่ 1 การหา Epipolar line

ภาพที่ 6.7 (a) และ (b) เป็นภาพของกล้องด้านซ้ายและกล้องด้านขวา ก่อนการ Rectification transformation (c) และ (d) เป็นภาพของกล้องด้านซ้ายและกล้องด้านขวา หลังการ Rectification transformation และจะเห็นได้ว่า Epipolar line จะขนานกับระบบพิกัดระนาบของภาพในแนวนอน

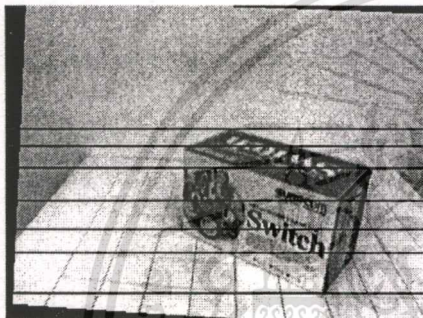
ตัวอย่างที่ 2



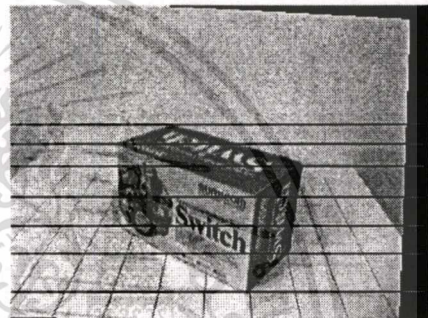
(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพที่ 6.8 ตัวอย่างที่ 2 การหา Epipolar line

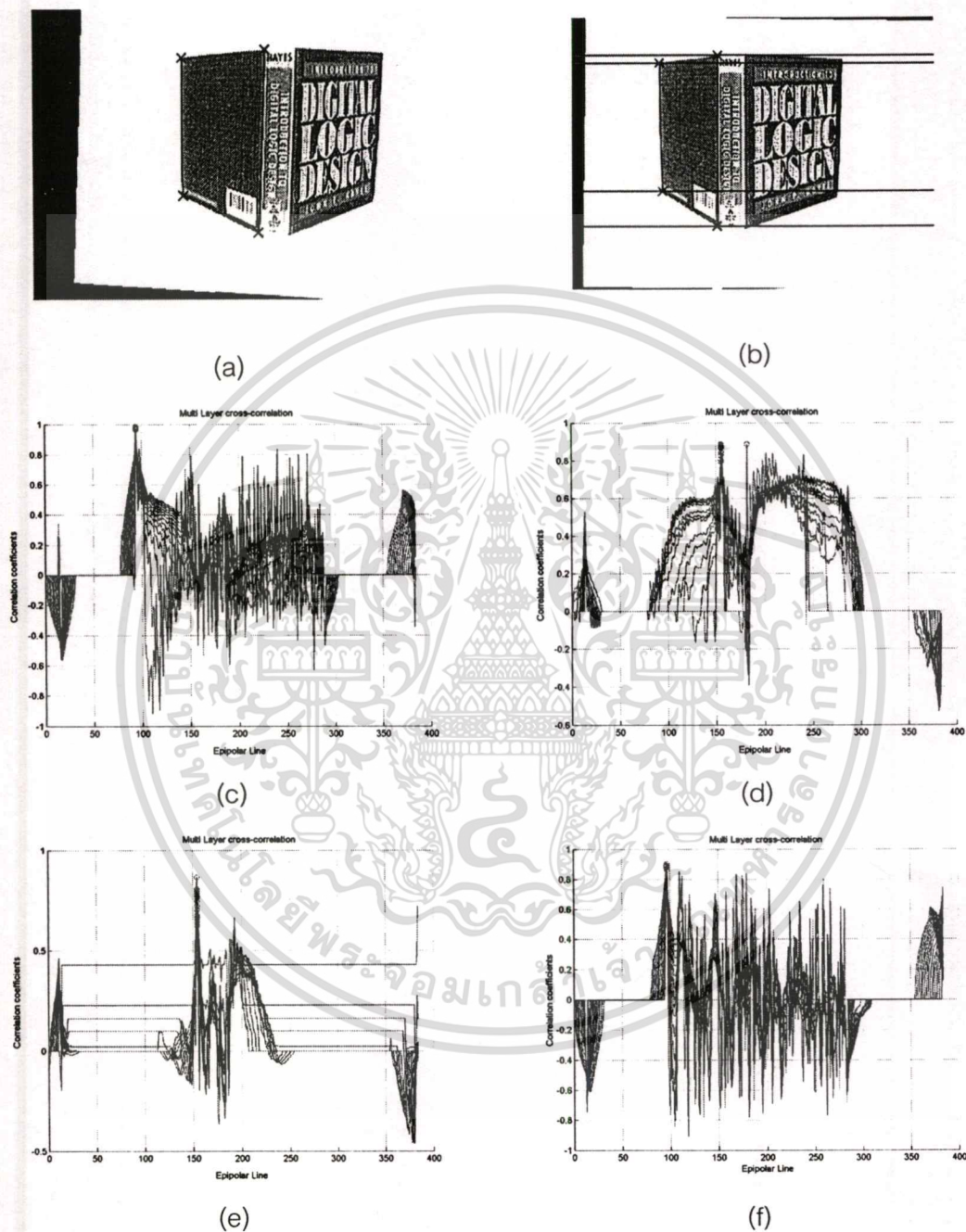
ภาพที่ 6.8 (a) และ (b) เป็นภาพของกล่องด้านซ้ายและกล่องด้านขวาก่อนการ Rectification transformation (c) และ (d) เป็นภาพของกล่องด้านซ้ายและกล่องด้านขวาหลังการ Rectification transformation และจะเห็นได้ว่า Epipolar line จะขนานกับระบบพิกัดระนาบของภาพในแนวนอน

Epipolar line นอกจากที่จะนำมาหาจุดที่สอดคล้องกันแล้วยังสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือทดสอบในขั้นตอนการสอบเทียบกล้องในระบบสเตอริโอได้ นอกจากการดูที่ค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องหลังกระบวนการสอบเทียบโดยนำหลักการของ Epipolar geometry มาใช้ พิสูจน์ว่าถ้า Epipolar line ทุกๆเส้นที่เกิดขึ้นบนระบบพิกัดระนาบของภาพในแนวนอนทั้งสองนั้นขนานกัน แสดงว่ากล้องทั้งสองเป็นไปตามข้อกำหนดของระบบ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถที่จะติดตั้งกล้องให้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบได้ จึงต้องมีการสอบเทียบกล้อง และการย้ายจุดภาพก่อนที่จะนำจุดภาพวัตถุเหล่านั้นไปคำนวณหาระยะทางแบบสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5 ผลการทดลองหาจุดที่สอดคล้องกันโดยวิธี Multi layers cross correlation

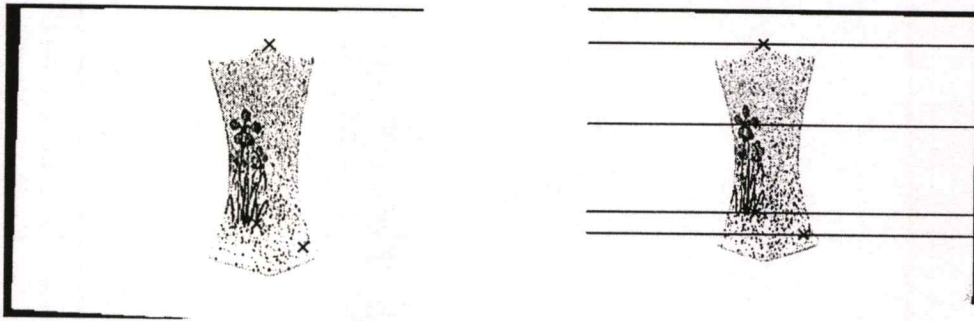
ตัวอย่างที่ 1



ภาพที่ 6.9 การหาจุดสอดคล้องกันโดยวิธีสหสัมพันธ์แบบหลายๆชั้นจากโมเดลรูปทรงแบบ Polygon

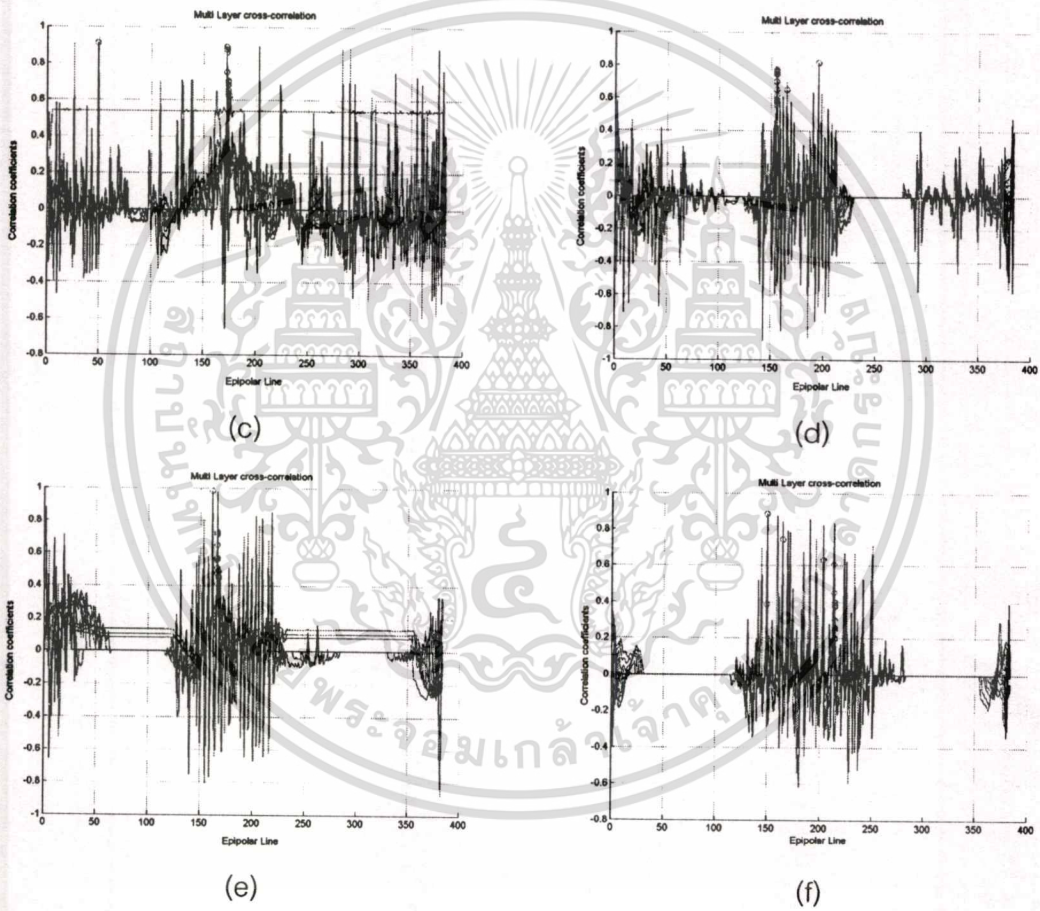
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 2



(a)

(b)



(c)

(d)

(e)

(f)

ภาพที่ 6.10 การหาจุดสอดคล้องกันโดยวิธีหสัมพันธ์แบบหลายชั้นจากโมเดลรูปทรงแบบ Non geometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 6.9 และ 6.10 เป็นการหาจุดที่สอดคล้องกันโดยวิธี Multi layers cross correlation บน Epipolar line ในแต่ละรูปจะเป็นภาพถ่ายตรีโองจากกล้องซ้ายและกล้องขวาที่ผ่านกระบวนการย้ายจุดภาพแล้ว

ภาพ (a) เป็นจุดภาพที่เราเลือกในภาพซ้ายแสดงด้วยเครื่องหมายกากบาทและภาพ (b) เป็นจุดที่สอดคล้องกันที่เราหาได้บน Epipolar line จะแสดงด้วยเครื่องหมายกากบาทเช่นเดียวกัน

ภาพ (c),(d),(e) และ (f) เป็นกราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เราคำนวณหาได้บน Epipolar line แต่ละเส้น (เริ่มจากเส้นบนสุดเป็นกราฟ (c) และไล่ลงมาล่างสุดเป็นกราฟ(f) ตามลำดับ) แบบ Multi layer cross correlation จุดที่มีค่ามากที่สุดและมีฐานนิยมมากที่สุดเราจะเลือกเป็นจุดที่สอดคล้องกัน

จากกราฟที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละโมเดลนั้น โมเดลของวัตถุที่มีรูปร่างแบบ Polygon จุดที่เรานำมาหาจุดที่สอดคล้องกันจะเป็นจุดเด่นของรูป Polygon คือจะเป็นส่วนของมุมหรือขอบจะมีจุดเด่นที่ชัดเจน ดังนั้นค่าฐานนิยมจะมีค่ามากและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ก็จะสูงตามด้วยเช่นกัน

ส่วนโมเดลที่ไม่มีรูปทรงเราได้ทดลองหาจุดที่สอดคล้องกันบนเนื้อผิวของวัตถุก็สามารถที่จะหาจุดที่สอดคล้องกันได้ แต่จากกราฟเราจะเห็นได้จะเห็นว่าบางตำแหน่งของผิววัตถุเราไม่สามารถหาจุดที่สอดคล้องกันได้โดยดูจากค่าฐานนิยมเพียงอย่างเดียว เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่ากระจายกันอยู่มากบน Epipolar line ดังนั้นการพิจารณาค่าฐานนิยมอาจไม่เพียงพอ เราจึงเลือกพิจารณาโดยดูจากค่ามัธยฐานของตำแหน่งที่มีค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นบน Epipolar line ร่วมด้วย

6.6 ผลการทดลองการหาขนาดของวัตถุ

การทดลองการหาขนาดของวัตถุเป็นการทดลองเพื่อวัดผลความถูกต้องในวิธีการหาจุดที่สอดคล้องกันตามที่ได้นำเสนอไว้โดยใช้หลักการของสเตริโอวิชัน วัตถุที่นำมาทดลองจะเป็นแบบระนาบแบนมีพื้นเป็นสีขาวและมีสีเหลี่ยมจัตุรัสสีดำเป็นวัตถุที่เราจะทำการหาขนาด รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสสีดำแต่ละรูปจะมีขนาดของแต่ละด้านเท่ากับ 45 มม. เราจะนำด้านทั้งสี่ของรูปสี่เหลี่ยมทุกรูปมาหาขนาดเปรียบเทียบกับของจริง

วิธีทดลองหลังจากนำกล้องที่ได้ผ่านการสอบเทียบถ่ายภาพวัตถุแบบระนาบแบนในภาพที่ 6.11 และ 6.12 จากนั้นทำการหาขอบของรูปสี่เหลี่ยมโดยวิธี Edge detection ดังแสดงในภาพสาเหตุที่ต้องทำการหาขอบของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสก็เนื่องจากการหาขนาดของแต่ละด้านจะสังเกตได้ว่าในภาพระดับสีเทาเราไม่สามารถที่จะกำหนดได้ชัดเจนว่าที่ตำแหน่งใดเป็นขอบหรือมุมของรูปสี่เหลี่ยมดังนั้นการทำภาพเป็นขอบของวัตถุจะทำให้การหาขนาดแต่ละด้านนั้นทำได้ง่ายขึ้น

ในผลการหาขนาดของรูปสี่เหลี่ยมแต่ละด้านจะเปรียบเทียบวิธีการหาขนาดจากภาพที่เป็นระดับสีเทากับภาพขอบของวัตถุ ค่าความผิดพลาดในการทดลองดูได้จากกราฟในภาพที่ 6.11(e),(f) และ 6.12(e),(f) หรือ ในตารางที่ 6.6

ในภาพที่ 6.11(e),(f) และ 6.12(e),(f) เป็นกราฟแสดงค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์และค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดจริง (45 มม.) สัญลักษณ์ที่เป็นเครื่องหมายสี่เหลี่ยมจะเป็นค่าความผิดพลาดจากการหาภาพที่เป็นขอบของวัตถุและวงกลมจะเป็นค่าความผิดพลาดจากภาพระดับสีเทา ในแนวแกนนอนของกราฟจะเป็นจำนวนด้านของรูปสี่เหลี่ยมในภาพ

ตารางที่ 6.6 ตารางสรุปผลความผิดพลาดสัมพัทธ์ของการหาขนาดวัตถุ

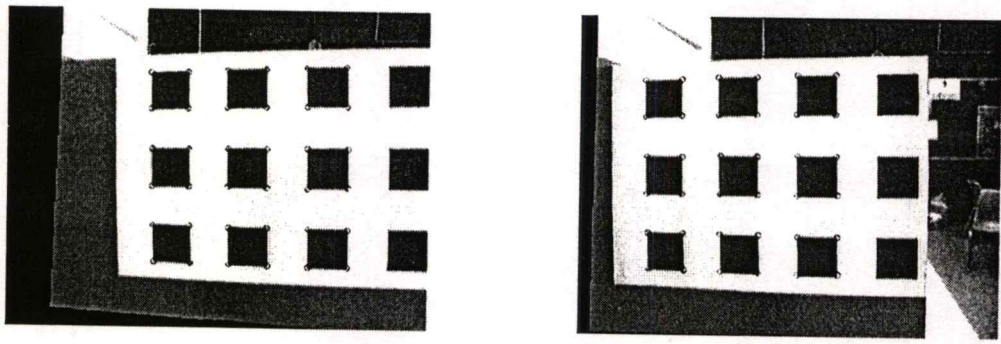
Relative Error	จากกราฟในภาพที่ 6.11 (e)		จากกราฟในภาพที่ 6.12(e)	
	Gray level	Edge Detection	Gray level	Edge Detection
Min	-0.0537	-0.0342	0.0025	0.0014
Max	0.0452	0.0521	0.1778	0.1588
Mean	-0.0104	0.0049	0.0432	0.0381
Std.	0.0256	0.0223	0.0416	0.0363

วิธีการคำนวณการหาค่าความผิดพลาด

ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์(Absolute Error) = ค่าที่วัดได้-ค่าจริง

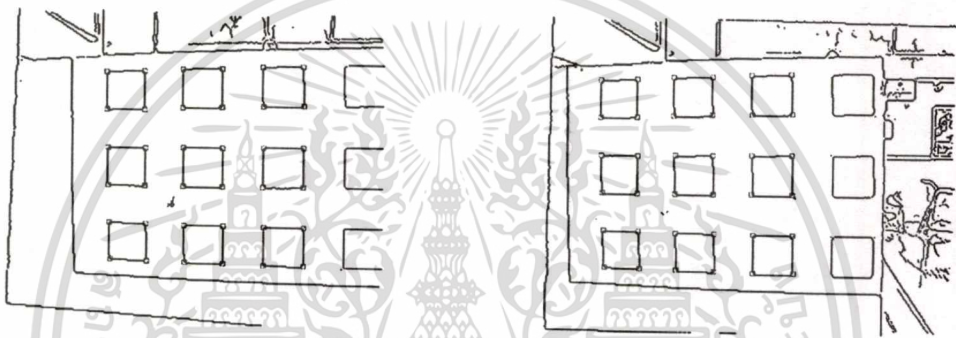
ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์(Relative Error) = (ค่าที่วัดได้-ค่าจริง) / ค่าจริง

ตัวอย่างที่ 1



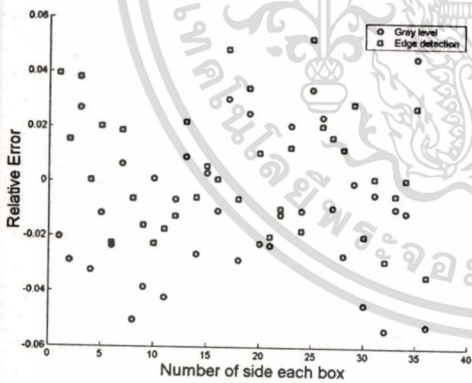
(a)

(b)

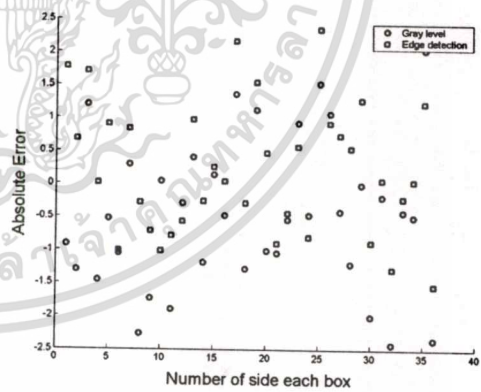


(c)

(d)



(e)



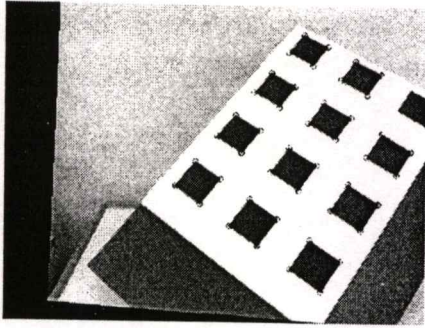
(f)

ภาพที่ 6.11 ตัวอย่างที่ 1 ผลการทดลองการหาขนาดวัตถุ

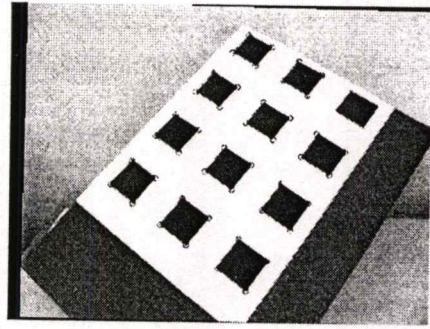
ภาพที่ 6.11 (a) และ (b) ภาพวัตถุที่นำมาหาขนาดเป็นภาพระดับสีเทาและภาพขอบของวัตถุที่หาโดย Edge detection ในภาพ (c) และ (d) ส่วนภาพ (e) และ (f) เป็นกราฟค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์และค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เปรียบเทียบระหว่างภาพระดับสีเทาและภาพขอบของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 2



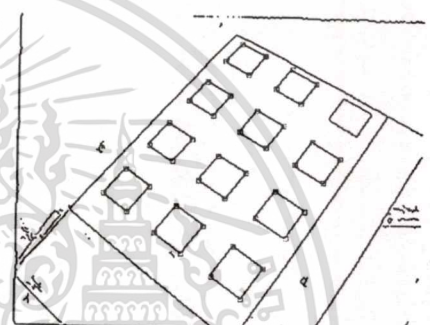
(a)



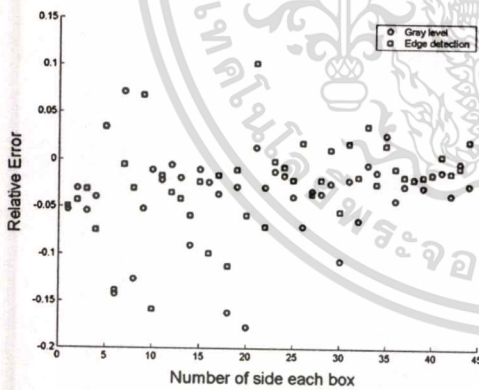
(b)



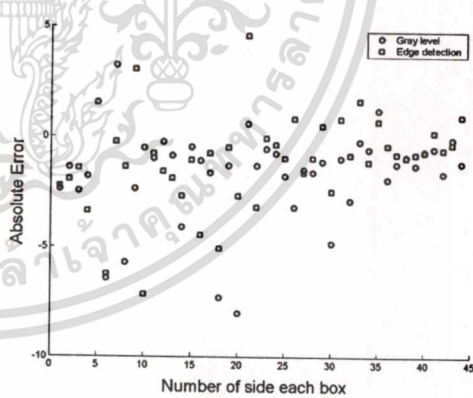
(c)



(d)



(e)

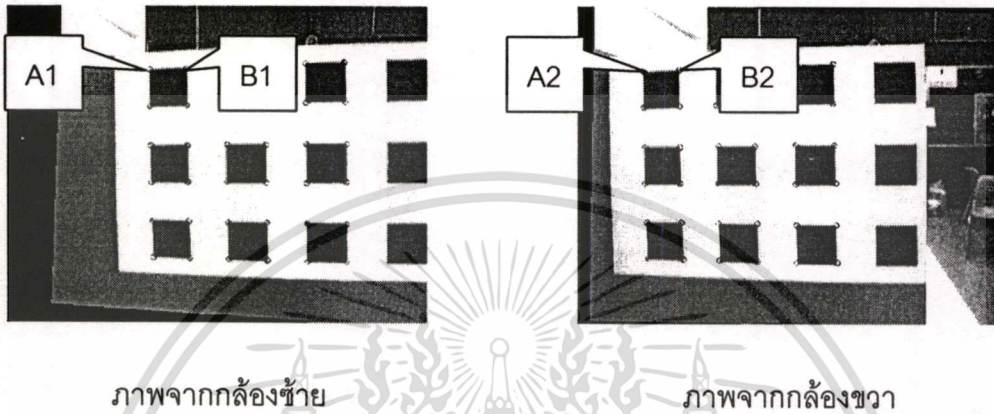


(f)

ภาพที่ 6.12 ตัวอย่างที่ 2 ผลการทดลองการหาขนาดวัตถุ

ภาพที่ 6.12 (a) และ (b) ภาพวัตถุที่นำมาหาขนาดเป็นภาพระดับสีเทาและภาพขอบของวัตถุที่หาโดย Edge detection ในภาพ (c) และ (d) ส่วนภาพ (e) และ (f) เป็นกราฟค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์และค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์เปรียบเทียบระหว่างภาพระดับสีเทาและภาพขอบของวัตถุ เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง การคำนวณการหาขนาดวัตถุจากภาพในตัวอย่างที่ 1 ภาพที่ 6.12 (a) และ (b) เราจะหาขนาดในด้านระหว่าง A1 ถึง B1 ในภาพด้านซ้ายหรือ A2 ถึง B2 ในภาพด้านขวา โดยกำหนดให้จุดต่างๆของวัตถุแสดงในภาพ (ผลการสอบเทียบที่ได้จะเป็นอีกตัวอย่าง ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะไม่เท่ากับในผลการสอบเทียบในหัวข้อ 6.2)



ภาพที่ 6.13 ภาพตัวอย่างการคำนวณการหาขนาดของวัตถุ

ภาพที่ 6.13 จุดของวัตถุจะถูกเลือกจากการใช้เมาส์เลือกทั้งจุด A1 และ B1 ในภาพจากกล้องซ้าย ส่วนจุด A2 และ B2 ในภาพจากกล้องขวาจะคำนวณหาโดยวิธีการหาจุดสอดคล้องโดยวิธี Epipolar geometry ร่วมกับ Multi layers cross correlation จุดดังกล่าวจะมีพิกัดในระบบพิกัดตำแหน่งของจุดภาพ (P_p) คือ

$$P_{p(A1)} = [130.4173 \quad 58.4854 \quad 1]^T \quad P_{p(B1)} = [163.5657 \quad 57.5900 \quad 1]^T$$

$$P_{p(A2)} = [60.0000 \quad 58.7553 \quad 1]^T \quad P_{p(B2)} = [93.0000 \quad 57.8628 \quad 1]^T$$

พารามิเตอร์ภายในที่ได้จากการสอบเทียบกล้องทั้งสองคือ

$$M_{i1} = \begin{bmatrix} -4.2343 & 0 & 0.0193 \\ 0 & -4.3692 & -0.4226 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad M_{i2} = \begin{bmatrix} -4.2492 & 0 & -0.0867 \\ 0 & -4.3957 & -0.4722 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

พารามิเตอร์ภายนอกที่ได้จากการสอบเทียบกล้องทั้งสองคือ

$$M_{e1} = \begin{bmatrix} 0.7079 & -0.7046 & -0.0483 & -44.136 \\ -0.2029 & -0.2685 & 0.9417 & -49.523 \\ -0.6765 & -0.6568 & -0.3331 & 730.406 \end{bmatrix}$$

$$M_{e2} = \begin{bmatrix} 0.7079 & -0.7046 & -0.0483 & 32.839 \\ -0.2029 & -0.2685 & 0.9417 & -49.523 \\ -0.6765 & -0.6568 & -0.3331 & 730.406 \end{bmatrix}$$

จุดศูนย์กลางของการโปรเจกชันของกล้องทั้งสองหาได้จากสมการ $Oc = -R^{-1}T$ ดังนั้น

$$Oc_1 = - \begin{bmatrix} 0.7079 & -0.7046 & -0.0483 \\ -0.2029 & -0.2685 & 0.9417 \\ -0.6765 & -0.6568 & -0.3331 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -44.136 \\ -49.523 \\ 730.406 \end{bmatrix}$$

$$Oc_1 = [515.3061 \quad 435.3618 \quad 287.7743]^T$$

$$Oc_2 = - \begin{bmatrix} 0.7079 & -0.7046 & -0.0483 \\ -0.2029 & -0.2685 & 0.9417 \\ -0.6765 & -0.6568 & -0.3331 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 32.839 \\ -49.523 \\ 730.406 \end{bmatrix}$$

$$Oc_2 = [460.8117 \quad 489.5997 \quad 291.4950]^T$$

ระยะห่างระหว่างกล้อง $B = \|Oc_1 - Oc_2\|$

$$B = 76.9756 \text{ มม.}$$

แปลงระบบพิกัดจุดภาพอยู่ในระบบพิกัดภาพจะได้ $P_i = C^{-1}P_p$

$$C = \begin{bmatrix} s_x & 0 & x_0 \\ 0 & s_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เมื่อ C เป็นเมตริกซ์ที่ทำการแปลงจุดภาพระหว่าง Pixel coordinates กับ Image coordinate กำหนดให้ CCD ของกล้องมีขนาด 4.8x3.6 มม. และเก็บภาพที่มีขนาด 384x288 pixel ดังนั้น

$$s_x = 384/4.8 = 80 \text{ pixel/มม. และ } s_y = 288/3.6 = 80 \text{ pixel/มม.}$$

$$x_0 = 384/2 = 192 \text{ และ } y_0 = 288/2 = 144$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \begin{bmatrix} 80 & 0 & 192 \\ 0 & 80 & 144 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจุดภาพ A1 ,B1, A2 และ B2 จะมีพิกัดอยู่ที่

$$P_{i(A1)} = [-0.7698 \quad -1.0689 \quad 1]^T \quad P_{i(B1)} = [-0.3554 \quad -1.0801 \quad 1]^T$$

$$P_{i(A2)} = [-1.6500 \quad -1.0656 \quad 1]^T \quad P_{i(B2)} = [-1.2375 \quad -1.0767 \quad 1]^T$$

การหาระยะทางสามมิติแบบสเตรโอิทราได้จากสมการ $z_c = \frac{Bf}{x_2 - x_1}$

ระยะทางที่ จุด A และ B จะมีระยะทางเท่ากับ

$$z_{c(A)} = \frac{92.8320 * (-4.8877)}{-1.6500 - (-0.7698)} = 518.0443 \text{ มม.}$$

$$z_{c(B)} = \frac{92.8320 * (-4.8877)}{-1.2375 - (-0.3554)} = 516.3101 \text{ มม.}$$

ดังนั้นพิกัดของวัตถุที่จุด A และ B ที่อ้างอิงกับระบบพิกัดกล้องจะหาได้จาก $P_c = (K^{-1} * P_p) * z_c$
กล้องตัวที่ 1

$$K_1 = C * M_{ii} = \begin{bmatrix} -391.0195 & 0 & 192.0000 \\ 0 & -391.8201 & 144.0000 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_{c(A1)} = \left(\begin{bmatrix} -391.0195 & 0 & 192.0000 \\ 0 & -391.8201 & 144.0000 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 130.4173 \\ 58.4854 \\ 1 \end{bmatrix} \right) * 518.0443$$

$$\text{พิกัดของวัตถุที่จุด A1 } P_{c(A1)} = [81.5882 \quad 113.0630 \quad 518.0443]^T$$

$$P_{c(B1)} = \left(\begin{bmatrix} -391.0195 & 0 & 192.0000 \\ 0 & -391.8201 & 144.0000 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 163.5657 \\ 57.5900 \\ 1 \end{bmatrix} \right) * 516.3101$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{พิกัดของวัตถุที่จุด B1 } P_{c(B1)} = [37.5452 \quad 113.8644 \quad 516.3101]^T$$

กล่องตัวที่ 2

$$K_2 = C * M_{i2} = \begin{bmatrix} -392.0522 & 0 & 192.0000 \\ 0 & -390.5834 & 144.0000 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_{c(A2)} = \left(\begin{bmatrix} -392.0522 & 0 & 192.0000 \\ 0 & -390.5834 & 144.0000 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 60.0000 \\ 58.7533 \\ 1 \end{bmatrix} \right) * 518.0443$$

$$\text{พิกัดของวัตถุที่จุด A2 } P_{c(A2)} = [174.4203 \quad 113.0630 \quad 518.0443]^T$$

$$P_{c(B2)} = \left(\begin{bmatrix} -392.0522 & 0 & 192.0000 \\ 0 & -390.5834 & 144.0000 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 93.0000 \\ 57.8628 \\ 1 \end{bmatrix} \right) * 516.3101$$

$$\text{พิกัดของวัตถุที่จุด B2 } P_{c(B2)} = [130.3773 \quad 113.8644 \quad 516.3101]^T$$

ดังนั้นพิกัดของวัตถุที่จุด A และ B ที่อ้างอิงกับระบบพิกัดโลกสามมิติจะหาได้โดย

$$\text{จากกล่องตัวที่ 1 } P_{w(A1)} = R_1^{-1} (P_{c(A1)} - T_1) \quad \text{และ} \quad P_{w(B1)} = R_1^{-1} (P_{c(B1)} - T_1)$$

$$P_{w(A1)} = \begin{bmatrix} 0.7079 & -0.7046 & -0.0483 \\ -0.2029 & -0.2685 & 0.9417 \\ -0.6765 & -0.6568 & -0.3331 \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} 81.5882 \\ 113.0630 \\ 518.0443 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -44.136 \\ -49.523 \\ 730.406 \end{bmatrix} \right)$$

$$\text{พิกัดของวัตถุที่จุด A1 } P_{w(A1)} = [281.5511 \quad 47.2432 \quad 317.5642]^T$$

$$P_{w(B1)} = - \begin{bmatrix} 0.7079 & -0.7046 & -0.0483 \\ -0.2029 & -0.2685 & 0.9417 \\ -0.6765 & -0.6568 & -0.3331 \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} 37.5452 \\ 113.8644 \\ 516.3101 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -44.136 \\ -49.523 \\ 730.406 \end{bmatrix} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดของวัตถุที่จุด B1 $P_{w(B1)} = [247.3914 \quad 75.0707 \quad 319.0402]^T$

ขนาดของวัตถุจุด A1 ถึง จุด B1 จะมีขนาด

$$size_{(A1 \rightarrow B1)} = \|P_{w(A1)} - P_{w(B1)}\| = \underline{44.0844 \text{ มม.}}$$

จากกล้องตัวที่ 2 $P_{w(A2)} = R_2^{-1}(P_{c(A2)} - T_2)$ และ $P_{w(B2)} = R_2^{-1}(P_{c(B2)} - T_2)$

$$P_{w(A2)} = \begin{bmatrix} 0.7079 & -0.7046 & -0.0483 \\ -0.2029 & -0.2685 & 0.9417 \\ -0.6765 & -0.6568 & -0.3331 \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} 174.4203 \\ 113.0630 \\ 518.0443 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 32.839 \\ -49.523 \\ 730.406 \end{bmatrix} \right)$$

พิกัดของวัตถุที่จุด A2 $P_{w(A2)} = [281.5511 \quad 47.2432 \quad 317.5642]^T$

$$P_{w(B2)} = \begin{bmatrix} 0.7079 & -0.7046 & -0.0483 \\ -0.2029 & -0.2685 & 0.9417 \\ -0.6765 & -0.6568 & -0.3331 \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} 130.3773 \\ 113.8644 \\ 516.3101 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 32.839 \\ -49.523 \\ 730.406 \end{bmatrix} \right)$$

พิกัดของวัตถุที่จุด B2 $P_{w(B2)} = [247.3914 \quad 75.0707 \quad 319.0402]^T$

ขนาดของวัตถุจุด A2 ถึง จุด B2 จะมีขนาด

$$size_{(A2 \rightarrow B2)} = \|P_{w(A2)} - P_{w(B2)}\| = \underline{44.0844 \text{ มม.}}$$

ขนาดจริงของระยะระหว่างจุด A ถึง B เท่ากับ 45 มม. ดังนั้น ค่าความผิดพลาดจะหาได้โดย

ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์(Absolute Error) = ค่าที่วัดได้-ค่าจริง

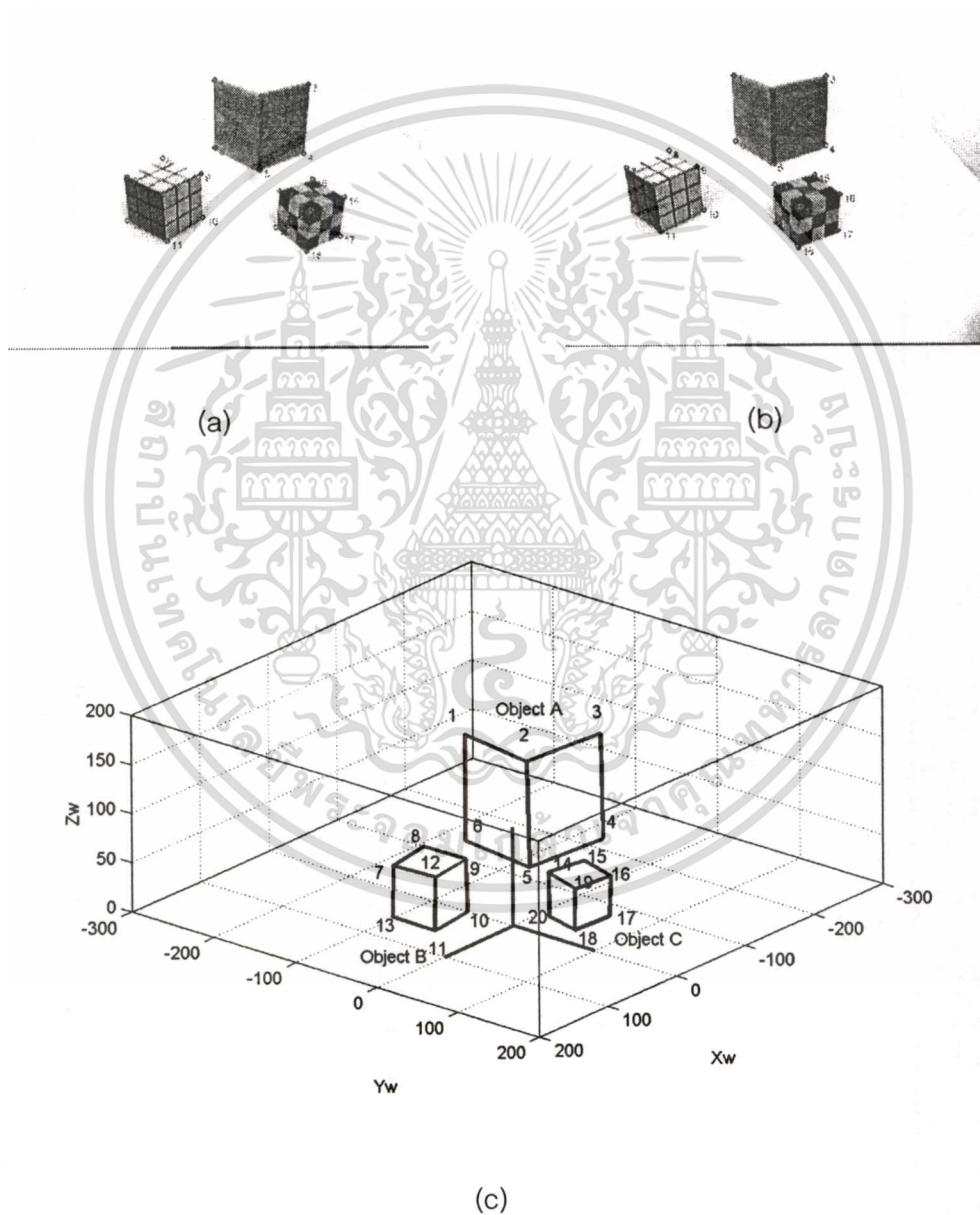
$$= 44.0844 - 45 = \underline{-0.9156 \text{ มม.}}$$

ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์(Relative Error) = (ค่าที่วัดได้-ค่าจริง) / ค่าจริง

$$= (44.0844 - 45)/45 = \underline{-0.0203}$$

6.7 ผลการทดลองการหาพิกัดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ

การหาพิกัดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติเป็นอีกขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับการมองเห็นของหุ่นยนต์เนื่องจากระบบการอ้างอิงของหุ่นยนต์ก็ใช้ระบบเดียวกับระบบพิกัดกล้อง ดังนั้นเราสามารถที่จะแปลงวัตถุในระบบพิกัดกล้องให้มาอยู่ในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติได้ เพื่อให้หุ่นยนต์นั้นหยิบจับวัตถุได้ถูกต้อง โดยเราสามารถสร้างเป็นภาพจำลองของพิกัดต่างๆในภาพที่ 6.14



ภาพที่ 6.14 ภาพจำลองพิกัดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 6.14 (a) และ (b) เป็นภาพสตรีโอจากกล้องซ้ายและขวา ภาพ (c) เป็นภาพจำลองที่เกิดจากการนำจุดของภาพสตรีโอมาคำนวณหาระยะทางและแปลงให้อยู่ในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ พิกัดต่างๆ แสดงในตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 พิกัดของจุดต่างๆบนระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ

จุดที่	Xw (mm)	Yw (mm)	Zw (mm)
1	-139.3390	-177.1477	105.5590
2	-131.5064	-89.1816	103.7164
3	-222.3449	-79.5353	106.6368
4	-218.7846	-70.1060	-0.9727
5	-130.2127	-84.7914	-2.5693
6	-138.4927	-172.2911	0.0369
7	54.4039	-103.4762	52.7161
8	15.4470	-97.4272	60.6605
9	0.2169	-56.8329	51.3229
10	-0.5458	-54.1596	-0.9059
11	48.2596	-53.6574	-3.9309
12	48.6008	-53.5124	50.4658
13	57.0619	-102.5098	-1.8093
14	-38.8386	11.6354	44.1915
15	-74.2763	27.0534	49.0337
16	-71.5466	61.9652	42.7948
17	-65.1757	64.2036	5.5590
18	-30.8635	49.2582	-0.0294
19	-36.9787	45.7323	38.4645
20	-37.8497	11.6284	1.3952

พิกัดของวัตถุแต่ละจุดที่อ้างอิงกับระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติเราสามารถที่จะหาระยะทางระหว่างจุดต่างๆ ได้ โดยการลบกันทางเวกเตอร์ แสดงไว้ในตารางที่ 6.8, 6.9 และ 6.10 ของวัตถุในรูป A, B และ C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตารางที่ 6.8 6.9 และ 6.10 การหาขนาดของวัตถุจะเปรียบเทียบกับขนาดจริงและแสดงเป็นค่าความผิดพลาดซึ่งค่าความผิดพลาดสามารถคำนวณหาได้จาก

วิธีการคำนวณการหาค่าความผิดพลาด

ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์(Absolute Error) = ค่าที่วัดได้-ค่าจริง

ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์(Relative Error) = (ค่าที่วัดได้-ค่าจริง) / ค่าจริง

ตารางที่ 6.8 ขนาดของวัตถุแต่ละด้านที่คำนวณได้จากวัตถุ A

ระหว่างจุด	ขนาดจริง (มม.)	ขนาดที่คำนวณได้ (มม.)	ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (มม.)	ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์
1-2	92.00	87.8664	-4.1663	-0.0449
1-6	105.00	105.8089	0.8089	0.0077
2-3	92.00	88.3524	-3.6476	-0.0396
2-5	105.00	103.7171	-1.2829	-0.0122
3-4	105.00	105.4043	0.4043	0.0039
4-5	92.00	92.0594	0.0594	0.0006
5-6	92.00	88.5582	-3.4418	-0.0374

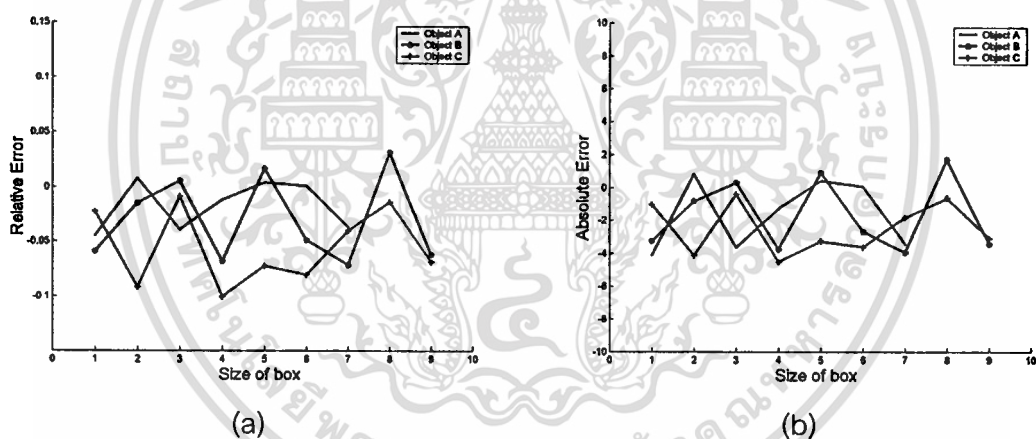
ตารางที่ 6.9 ขนาดของวัตถุแต่ละด้านที่คำนวณได้จากวัตถุ B

ระหว่างจุด	ขนาดจริง (มม.)	ขนาดที่คำนวณได้ (มม.)	ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (มม.)	ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์
7-8	55.00	51.7406	-3.2594	-0.0593
7-12	55.00	54.1733	-0.8267	-0.0150
7-13	55.00	55.2922	0.2922	0.0053
8-9	55.00	51.2398	-3.7602	-0.0684
9-10	55.00	55.8987	0.8987	0.0163
9-12	55.00	52.2996	-2.7004	-0.0491
10-11	55.00	51.0447	-3.9553	-0.0719
11-12	55.00	56.7034	1.7034	0.0310
12-13	55.00	51.5718	-3.4282	-0.0623

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.10 ขนาดของวัตถุแต่ละด้านที่คำนวณได้จากวัตถุ C

ระหว่างจุด	ขนาดจริง (มม.)	ขนาดที่คำนวณได้ (มม.)	ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (มม.)	ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์
14-15	45.00	43.9740	-1.0260	-0.0228
14-19	45.00	40.8569	-4.1431	-0.0921
14-20	45.00	44.5968	-0.4032	-0.0090
15-16	45.00	40.4711	-4.5289	-0.1006
16-17	45.00	41.7248	-3.2752	-0.0728
16-19	45.00	41.3713	-3.6287	0.0806
17-18	45.00	43.1686	-1.8314	-0.0407
18-19	45.00	44.3643	-0.6357	-0.0141
18-20	45.00	41.8944	-3.1056	-0.0690



ภาพที่ 6.15 กราฟค่าความผิดพลาดการหาขนาดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติ

ในภาพที่ 6.15 กราฟค่าความผิดพลาดการหาขนาดของวัตถุในระบบพิกัดในปริภูมิสามมิติเปรียบเทียบกับขนาดจริงของวัตถุในภาพที่ 6.15 (a) กราฟค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ และภาพที่ 6.16 (b) ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์

6.8 ผลการทดลองการสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุแบบสามมิติ

การประยุกต์ใช้งานหลังจากที่เราสามารถที่หาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุได้และหาจุดที่สอดคล้องกันตรงกันได้อย่างถูกต้อง เรานำวิธีการดังกล่าวมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวแบบสามมิติซึ่งจะทำให้เราสามารถเห็นรายละเอียดและลักษณะเด่นที่สำคัญของวัตถุ โดยจะแสดงเป็นภาพพื้นผิวลักษณะเป็นตาข่าย(Wire frame) ภาพพื้นผิวที่แสดงถึงระดับความสูงแทนด้วยระดับสีเทา และภาพเวกเตอร์ตั้งฉากกับผิวของวัตถุ (Normal vector)

วัตถุที่เรานำมาใช้ทดลองในการสร้างภาพแบบสามมิติมีสองแบบคือ วัตถุจากโมเดลแบบ Polygon และวัตถุจากโมเดลแบบ Non geometry

การสร้างภาพพื้นผิวแบบสามมิติจากวัตถุที่มีรูปทรงหรือโครงสร้างที่เป็นแบบ Polygons (รูปทรงที่มีหลายด้าน) ลักษณะของรูปทรงดังกล่าวจะมีลักษณะเด่นที่สามารถนำมาหาจุดที่สอดคล้องกันได้ง่ายและจุดเด่นของรูปแบบ Polygon เช่น มุม ขอบของวัตถุแต่ละจุดจะเชื่อมต่อกันในลักษณะแบนราบ ทำให้การสร้างภาพพื้นผิวทำได้ง่ายขึ้นตามตัวอย่างที่ 1 และ 2 ดังภาพที่ 6.16 และ 6.17 ตามลำดับ

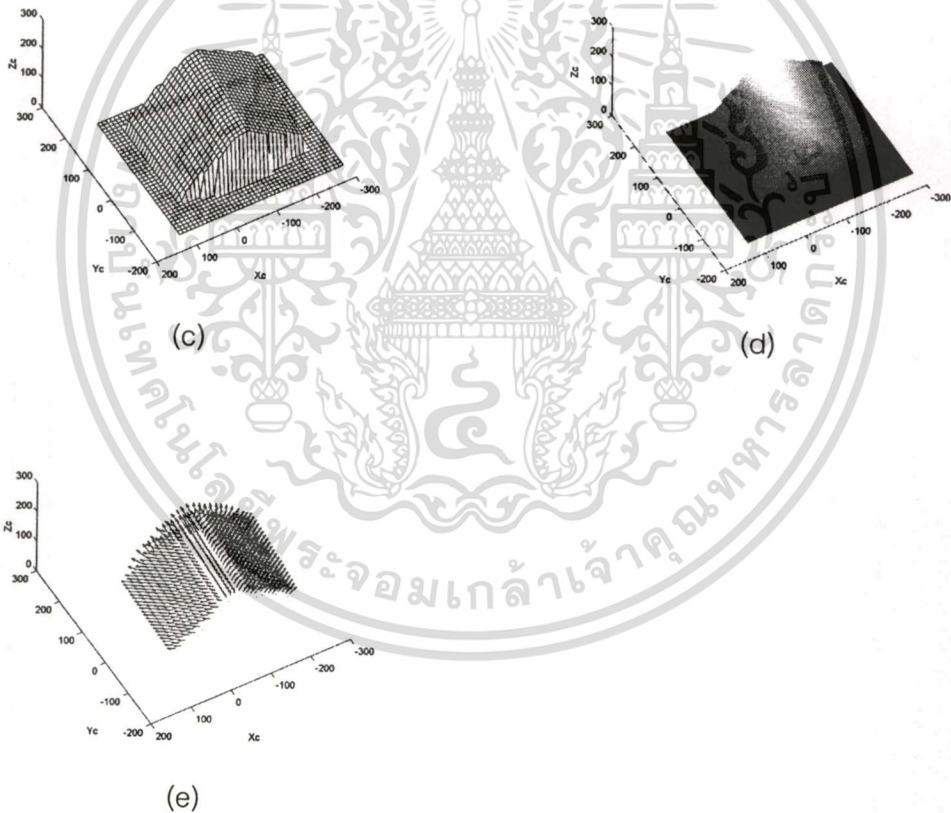
การสร้างภาพพื้นผิวแบบสามมิติจากโมเดลแบบ Non geometry โมเดลดังกล่าวจะแตกต่างจากโมเดลที่เป็นแบบ polygon คือเป็นโมเดลที่ไม่ได้มีรูปทรงทางเรขาคณิตดังนั้นในการสร้างภาพ ดังนั้นเราจึงต้องนำพื้นผิวของวัตถุมาเป็นจุดเด่นในการคำนวณหาระยะทาง ซึ่งโมเดลที่เป็น Non geometry ที่เราเลือกมาจะมีจุดเด่นหรือรูปแบบบนพื้นผิวของวัตถุอยู่บ้าง จากผลการทดลองในตัวอย่างที่ 3 และ 4 แต่จะมีบางจุดที่ไม่สามารถหาจุดที่สอดคล้องกันได้จึงทำให้รายละเอียดบางอย่างของภาพนั้นขาดหายไปแต่ก็เพียงพอที่จะนำมาแสดงเป็นภาพพื้นผิวแบบสามมิติได้ดังภาพที่ 6.18 และ 6.19 ตามลำดับ

ตัวอย่างที่ 1 ภาพพื้นผิวของวัตถุจากโมเดลที่เป็นแบบ Polygon



(a)

(b)



(c)

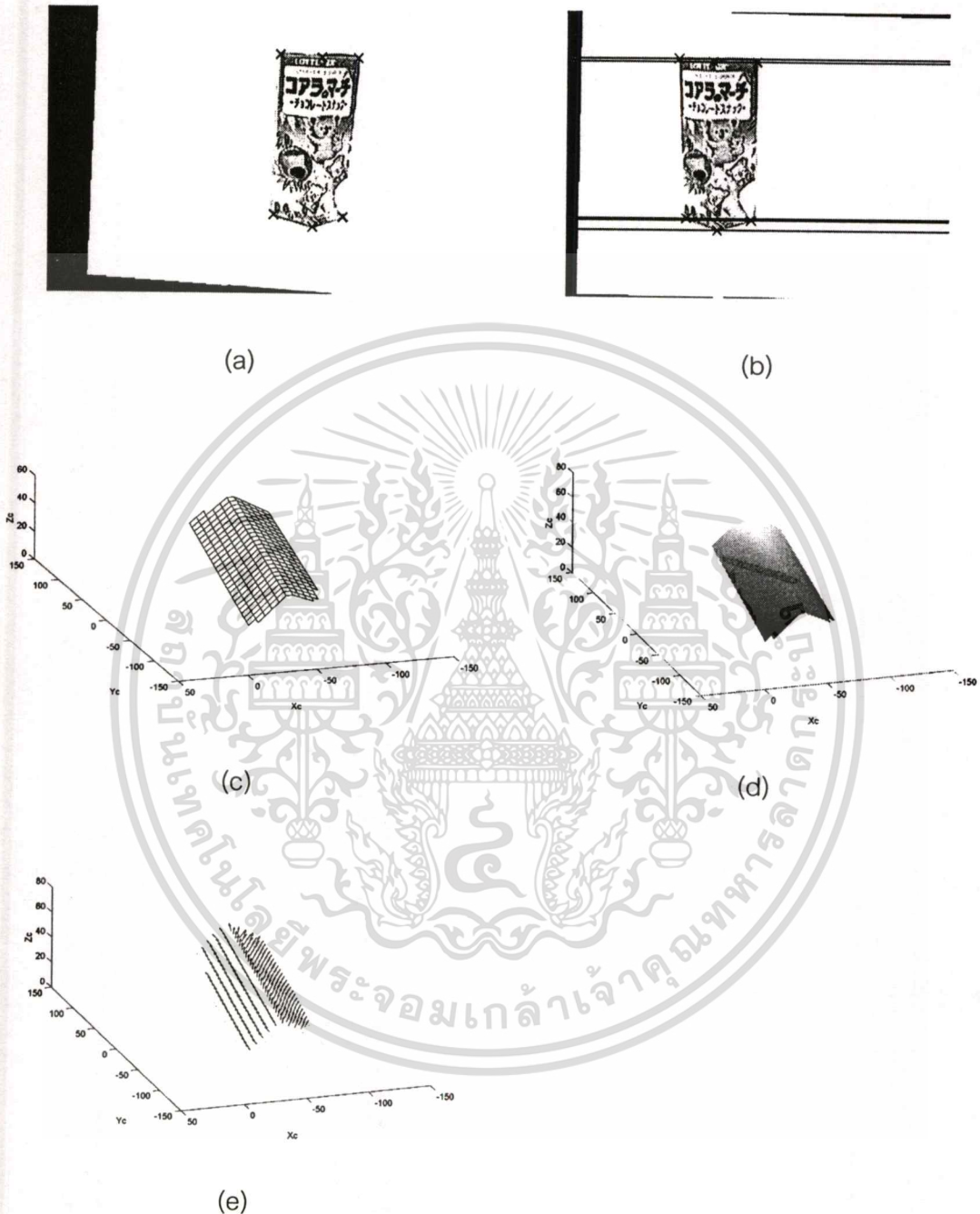
(d)

(e)

ภาพที่ 6.16 ตัวอย่างที่ 1 การสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุจากโมเดลที่เป็นแบบ Polygon (a)และ(b) เป็นภาพถ่ายจากกล้องสเตอริโอด้านซ้ายและขวา (c) ภาพพื้นผิวแบบตาข่าย (d) ภาพพื้นผิวระดับสีเทา และ (e) เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

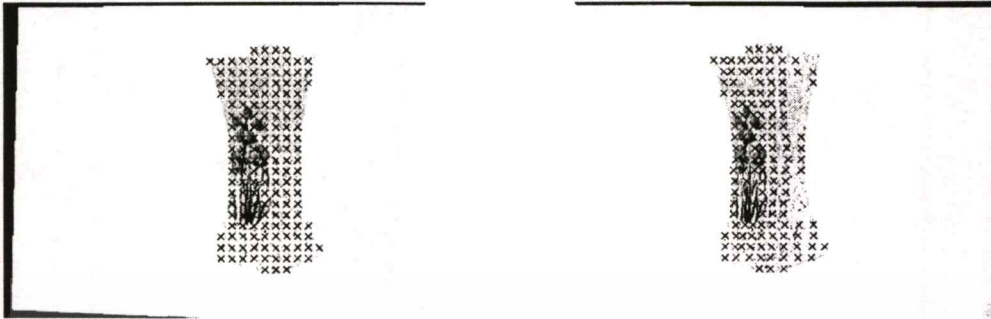
ตัวอย่างที่ 2 ภาพพื้นผิวของวัตถุจากโมเดลที่เป็นแบบ Polygon



ภาพที่ 6.17 ตัวอย่างที่ 2 การสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุจากโมเดลที่เป็นแบบ Polygon (a)และ(b) เป็นภาพถ่ายจากกล้องสตรีโอด้านซ้ายและขวา (c) ภาพพื้นผิวแบบตาข่าย (d) ภาพพื้นผิวระดับสีเทา และ (e) เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิว

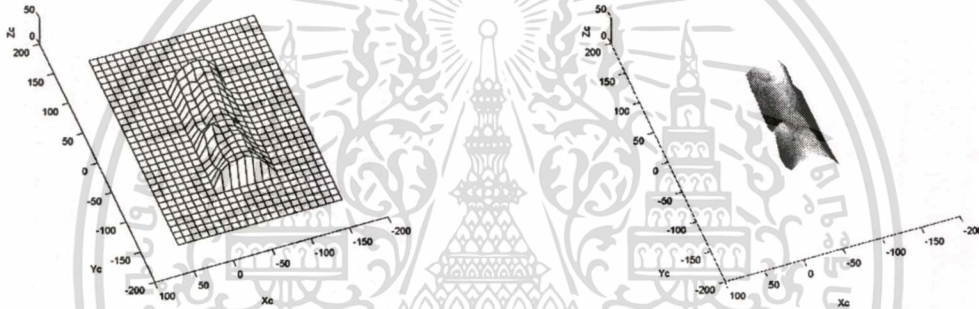
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 3 ภาพพื้นผิวของวัตถุจากโมเดลที่เป็นแบบ Non geometry



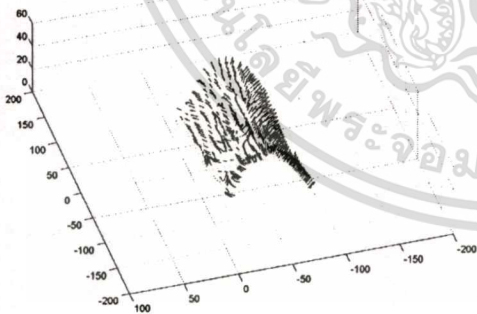
(a)

(b)



(c)

(d)

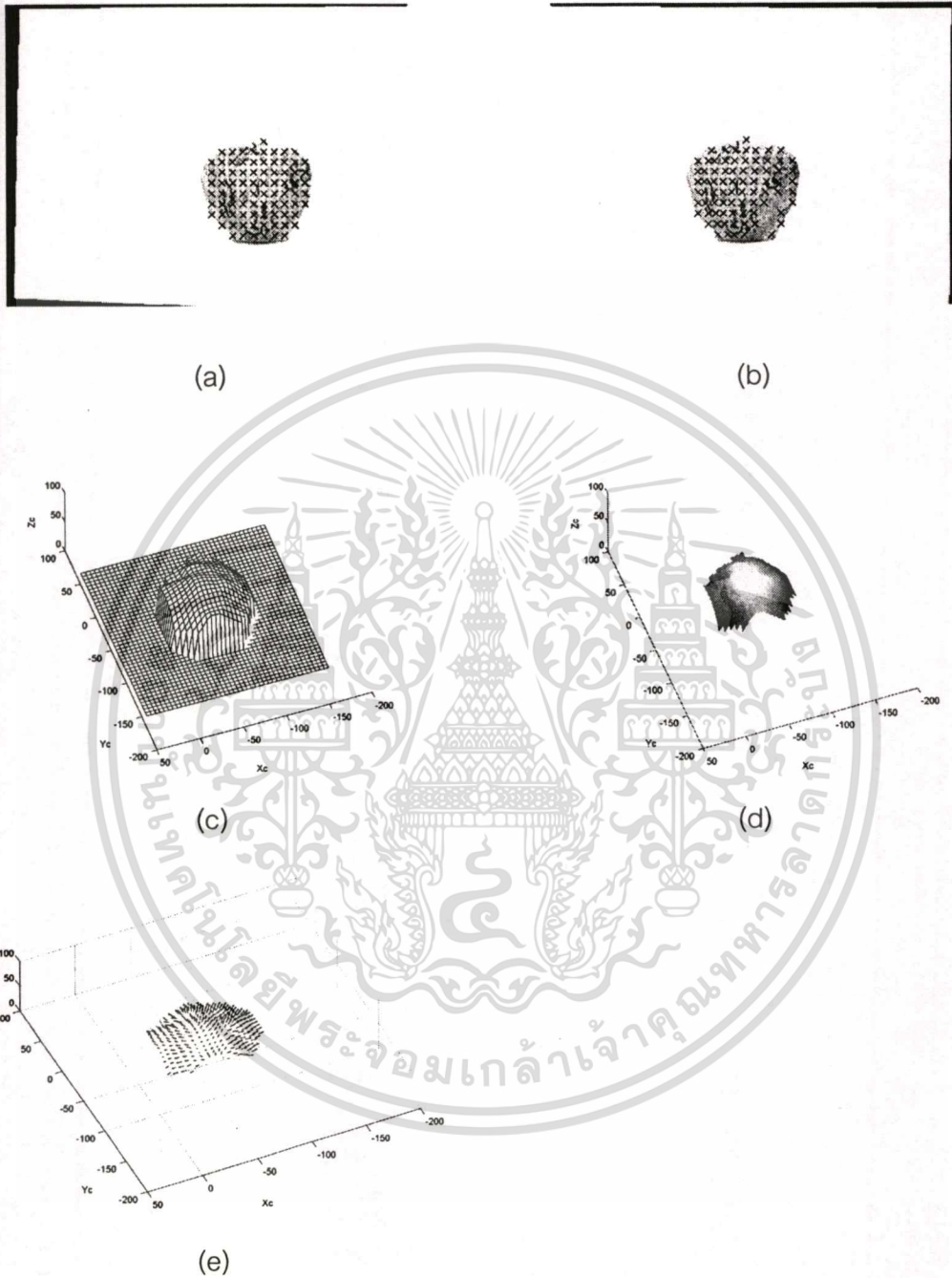


(e)

ภาพที่ 6.18 ตัวอย่างที่ 3 การสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุจากโมเดลที่เป็นแบบ Non geometry (a) และ(b) เป็นภาพถ่ายจากกล้องสเตอริโอด้านซ้ายและขวา (c) ภาพพื้นผิวแบบตาข่าย (d) ภาพพื้นผิวระดับสีเทา และ (e) เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 4 ภาพพื้นผิวของวัตถุจากโมเดลที่เป็นแบบ Non geometry



ภาพที่ 6.19 ตัวอย่างที่ 4 การสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุจากโมเดลที่เป็นแบบ Non geometry (a) และ (b) เป็นภาพถ่ายจากกล้องสเตอริโอด้านซ้ายและขวา (c) ภาพพื้นผิวแบบตาข่าย (d) ภาพพื้นผิวระดับสีเทา และ (e) เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิว

6.9 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองในการหาขนาด พิกัด และพื้นผิวของวัตถุ สามารถสรุปแหล่งที่มาของค่าความผิดพลาดได้ดังนี้

1. จากการสอบเทียบกล้อง
2. จากความถูกต้องในการหาจุดที่สอดคล้องกัน

ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการสอบเทียบกล้องเกิดจากการย้ายจุดภาพไปอยู่บนระบบพิกัดระนาบของภาพใหม่ เนื่องจากตำแหน่งของจุดภาพก่อนที่จะทำการย้ายจะเป็นจำนวนเต็ม (Integer) หลังจากการคำนวณการย้ายไปอยู่บนระบบพิกัดระนาบของภาพใหม่ตำแหน่งที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นจำนวนเต็ม (Non-integer) จึงต้องมีการ Interpolation เพื่อให้จุดภาพนั้นเป็นจำนวนเต็ม วิธีการที่เลือกใช้คือ Bilinear interpolation ดังนั้นหลังจากการ Interpolation จะทำให้ตำแหน่งของจุดภาพผิดพลาดไปจากการคำนวณประมาณ 1 pixel ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีผลต่อการหาระยะทางแบบสามมิติ

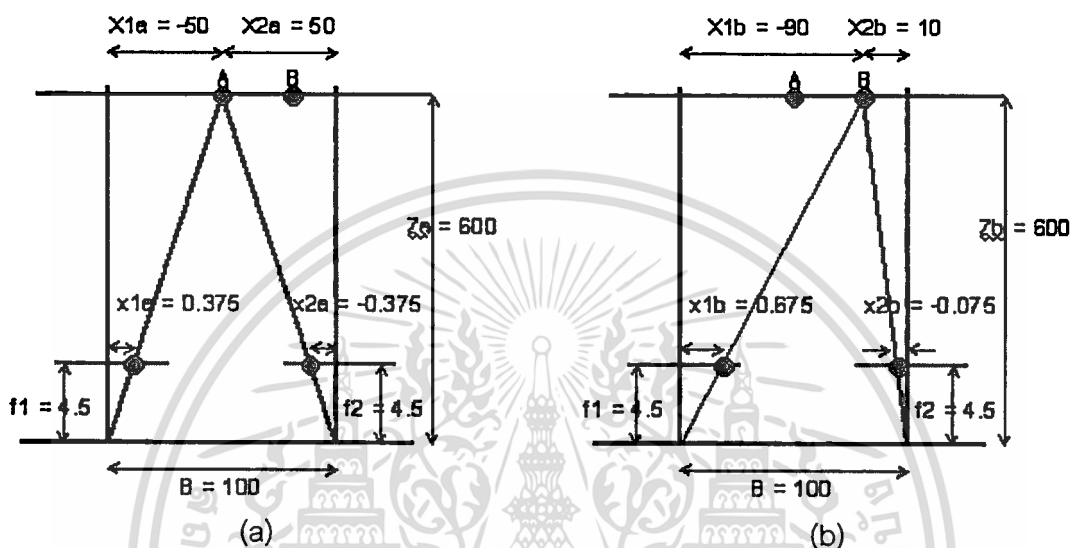
ในการหาจุดที่สอดคล้องกันถึงแม้ว่าเราจะใช้วิธี Multi layers cross correlation ในการหาจุดที่สอดคล้องกันโดยพิจารณาจากการเกิดขึ้นซ้ำๆกันของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ แต่จุดที่เกิดขึ้นซ้ำๆกันอาจจะไม่ใช่จุดเดียวกันทั้งหมดอาจจะมียจุดที่มีค่าใกล้เคียงกันเกิดขึ้นซ้ำๆกันด้วย ดังนั้นในการพิจารณาเลือกจุดที่สอดคล้องกันจะใช้วิธีการหาค่ามัธยฐาน หรือค่ากลางของกลุ่มที่เกิดขึ้นซ้ำๆกันมาพิจารณาและเลือกเป็นจุดที่สอดคล้องกัน จึงมีผลทำให้เกิดค่าความผิดพลาดขึ้นได้ประมาณ 1-2 Pixels

จากปัญหาของแหล่งที่มาของค่าความผิดพลาดดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อการหาระยะทางแบบสามมิติ ซึ่งจากตัวอย่างการคำนวณการหาขนาดของวัตถุในหัวข้อที่ 6.6 และ 6.7 ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ที่เกิดขึ้นสูงสุดประมาณ 4 มม. ซึ่งเกิดจากการนำตำแหน่งจุดภาพที่ผิดพลาดจากที่เกิดขึ้นทั้ง 2 กรณีดังกล่าวมาคำนวณหาระยะทางแบบสามมิติ

ดังนั้นจะแสดงวิธีการคำนวณตัวอย่างผลของการนำตำแหน่งของจุดภาพที่ผิดพลาดไป 1 Pixel มาคำนวณหาขนาดของวัตถุเพื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.6 และ 6.7

ตัวอย่าง การคำนวณหาค่าความผิดพลาด กำหนดให้กล้องทั้งสองมีความยาวโฟกัส 4.5 มม. มีระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสอง 100 มม. ช่วงการใช้งาน(ระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุ) 600 ถึง 1000 มม. CCD มีขนาด 4.8x3.6 มม. ขนาดภาพ 384x244 pixel

ที่ระยะทาง 600 มม.



ภาพที่ 6.20 การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด A และจุด B

ภาพที่ 6.20 (a) ภาพการคำนวณการหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด A และ (b) ภาพการคำนวณการหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด B

การคำนวณหาระยะทางและขนาดของวัตถุที่จุด A กำหนดให้ $x_{a1} = 30 \text{ pixel} = 0.375 \text{ mm}$ และ $x_{a2} = 30 \text{ pixel} = 0.375 \text{ mm}$.

ระยะทาง $Z_a = B \cdot f_1 / (x_{2a} - x_{1a}) = 100 \cdot (-4.5) / (-0.375 - 0.375) = 600 \text{ mm}$.

ขนาดของจุด $X_{1a} = Z_a \cdot x_{1a} / f_1 = 600 \cdot 0.375 / (-4.5) = -50 \text{ mm}$.

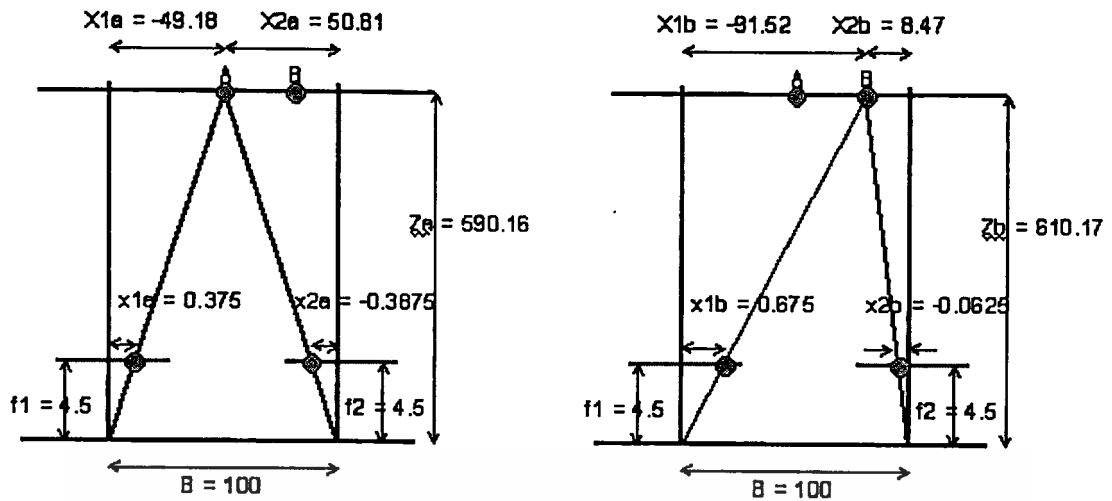
ขนาดของจุด $X_{2a} = Z_a \cdot x_{2a} / f_2 = 600 \cdot (-0.375) / (-4.5) = 50 \text{ mm}$.

การคำนวณหาระยะทางและขนาดของวัตถุที่จุด B กำหนดให้ $x_{b1} = 54 \text{ pixel} = 0.675 \text{ mm}$ และ $x_{b2} = 6 \text{ pixel} = 0.075 \text{ mm}$.

ระยะทาง $Z_b = B \cdot f_1 / (x_{2b} - x_{1b}) = 100 \cdot (-4.5) / (-0.075 - 0.675) = 600 \text{ mm}$.

ขนาดของจุด $X_{1b} = Z_b \cdot x_{1b} / f_1 = 600 \cdot 0.675 / (-4.5) = -90 \text{ mm}$.

ขนาดของจุด $X_{2b} = Z_b \cdot x_{2b} / f_2 = 600 \cdot (-0.075) / (-4.5) = 10 \text{ mm}$.



ภาพที่ 6.21 การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด A และที่จุด B ในกรณีการหาจุดที่สอดคล้องกันผิดพลาดไป +/- 1 pixel

ภาพที่ 6.21 (a) ภาพการคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด A และ (b) ภาพการคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด B

การคำนวณหาระยะทางและขนาดของวัตถุที่จุด A กำหนดให้ $x_{a1} = 30$ pixel = 0.375 mm และการหาจุดที่สอดคล้องกันผิดพลาดไป +1 pixel ดังนั้น $x_{a2} = 30 + 1$ pixel = 0.3875 mm. ระยะทาง $Z_a = B \cdot f_1 / (x_{2a} - x_{1a}) = 100 \cdot (-4.5) / (-0.3875 - 0.375) = 590.16$ mm.

ขนาดของจุด $X_{1a} = Z_a \cdot x_{1a} / f_1 = 590.16 \cdot 0.375 / (-4.5) = -49.18$ mm.

ขนาดของจุด $X_{2a} = Z_a \cdot x_{2a} / f_2 = 590.16 \cdot (-0.3875) / (-4.5) = 50.81$ mm.

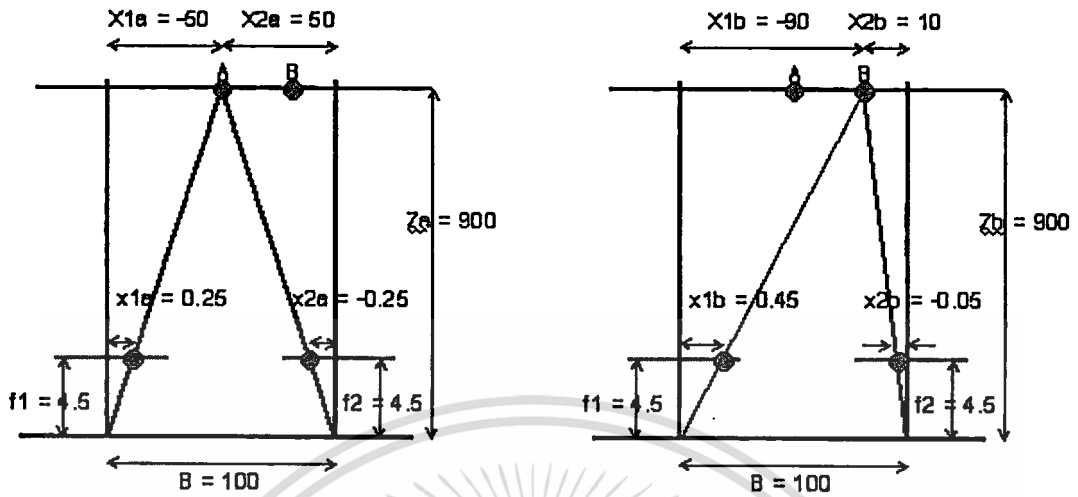
การคำนวณหาระยะทางและขนาดของวัตถุที่จุด B กำหนดให้ $x_{b1} = 54$ pixel = 0.675 mm และการหาจุดที่สอดคล้องกันผิดพลาดไป -1 pixel ดังนั้น $x_{b2} = 54 - 1$ pixel = 0.0625 mm.

ระยะทาง $Z_b = B \cdot f_1 / (x_{2b} - x_{1b}) = 100 \cdot (-4.5) / (-0.0625 - 0.675) = 610.17$ mm.

ขนาดของจุด $X_{1b} = Z_b \cdot x_{1b} / f_1 = 610.17 \cdot 0.675 / (-4.5) = -91.52$ mm.

ขนาดของจุด $X_{2b} = Z_b \cdot x_{2b} / f_2 = 610.17 \cdot (-0.0625) / (-4.5) = 8.47$ mm.

ที่ระยะทาง 900 มม.



ภาพที่ 6.22 การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด A และจุด B

ภาพที่ 6.22 (a) ภาพการคำนวณการหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด A และ (b) ภาพการคำนวณการหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด B

การคำนวณหาระยะทางและขนาดของวัตถุที่จุด A กำหนดให้ $x_{a1} = 20 \text{ pixel} = 0.25 \text{ mm}$ และ $x_{a2} = 20 \text{ pixel} = 0.25 \text{ mm}$.

ระยะทาง $Z_a = B \cdot f_1 / (x_{2a} - x_{1a}) = 100 \cdot (-4.5) / (-0.25 - 0.25) = 900 \text{ mm}$.

ขนาดของจุด $X_{1a} = Z_a \cdot x_{1a} / f_1 = 900 \cdot 0.25 / (-4.5) = -50 \text{ mm}$.

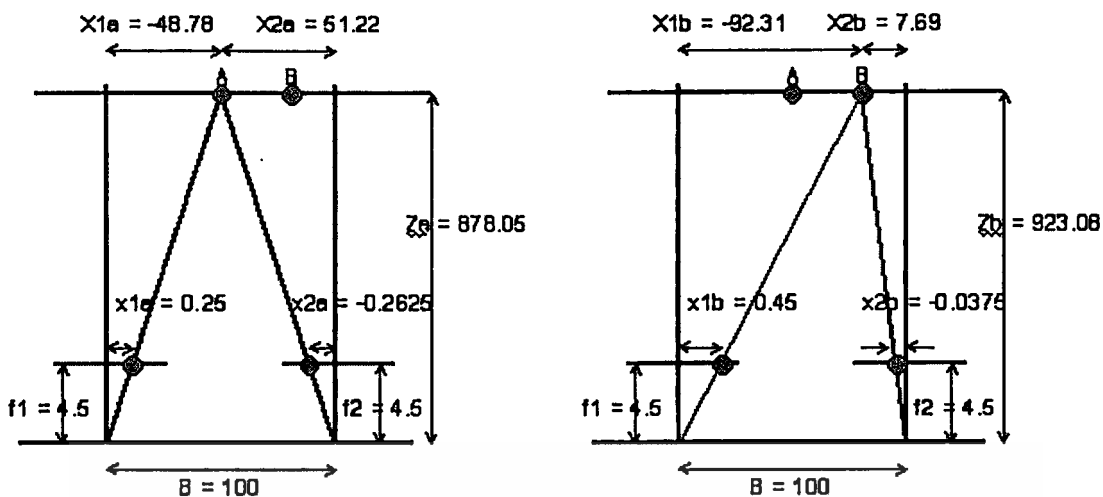
ขนาดของจุด $X_{2a} = Z_a \cdot x_{2a} / f_2 = 900 \cdot (-0.25) / (-4.5) = 50 \text{ mm}$.

การคำนวณหาระยะทางและขนาดของวัตถุที่จุด B กำหนดให้ $x_{b1} = 36 \text{ pixel} = 0.45 \text{ mm}$ และ $x_{b2} = 4 \text{ pixel} = 0.05 \text{ mm}$.

ระยะทาง $Z_b = B \cdot f_1 / (x_{2b} - x_{1b}) = 100 \cdot (-4.5) / (-0.05 - 0.45) = 900 \text{ mm}$.

ขนาดของจุด $X_{1b} = Z_b \cdot x_{1b} / f_1 = 900 \cdot 0.45 / (-4.5) = -90 \text{ mm}$.

ขนาดของจุด $X_{2b} = Z_b \cdot x_{2b} / f_2 = 900 \cdot (-0.05) / (-4.5) = 10 \text{ mm}$.



ภาพที่ 6.23 การคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด A และที่จุด B ในกรณีการหาจุดที่สอดคล้องกันผิดพลาดไป +/- 1 pixel

ภาพที่ 6.23 (a) ภาพการคำนวณการหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด A และ (b) ภาพการคำนวณการหาระยะทางระหว่างกล้องถึงวัตถุและขนาดของวัตถุที่จุด B

การคำนวณหาระยะทางและขนาดของวัตถุที่จุด A กำหนดให้ $x_{a1} = 20 \text{ pixel} = 0.25 \text{ mm}$ และการหาจุดที่สอดคล้องกันผิดพลาดไป +1 pixel ดังนั้น $x_{a2} = 20+1 \text{ pixel} = 0.2625 \text{ mm}$.

ระยะทาง $Z_a = B \cdot f_1 / (x_{2a} - x_{1a}) = 100 \cdot (-4.5) / (-0.2625 - 0.25) = 878.05 \text{ mm}$.

ขนาดของจุด $X_{1a} = Z_a \cdot x_{1a} / f_1 = 878.05 \cdot 0.25 / (-4.5) = -48.78 \text{ mm}$.

ขนาดของจุด $X_{2a} = Z_a \cdot x_{2a} / f_2 = 878.05 \cdot (-0.2625) / (-4.5) = 51.22 \text{ mm}$.

การคำนวณหาระยะทางและขนาดของวัตถุที่จุด B กำหนดให้ $x_{b1} = 36 \text{ pixel} = 0.45 \text{ mm}$ และการหาจุดที่สอดคล้องกันผิดพลาดไป -1 pixel ดังนั้น $x_{b2} = 36-1 \text{ pixel} = 0.0375 \text{ mm}$.

ระยะทาง $Z_b = B \cdot f_1 / (x_{2b} - x_{1b}) = 100 \cdot (-4.5) / (-0.0375 - 0.45) = 923.08 \text{ mm}$.

ขนาดของจุด $X_{1b} = Z_b \cdot x_{1b} / f_1 = 923.08 \cdot 0.45 / (-4.5) = -92.31 \text{ mm}$.

ขนาดของจุด $X_{2b} = Z_b \cdot x_{2b} / f_2 = 923.08 \cdot (-0.0375) / (-4.5) = 7.69 \text{ mm}$.

ที่ระยะทาง 600 มม. ดังนั้นระยะระหว่างจุด A และ B หาได้จาก
กล้องที่ 1

$$X1a-X1b = -49.18-(-91.52) = -42.34 \text{ มม.}$$

กล้องที่ 2

$$X2a-X2b = -50.81-(-8.47) = -42.34 \text{ มม.}$$

ระยะระหว่างจุด A และ B จริงเท่ากับ 40 มม. ดังนั้น

$$\text{ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์} = 42.34-40 = 2.34 \text{ มม.}$$

$$\text{ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์} = (42.34-40)/40 = 0.0585 \text{ มม.}$$

ที่ระยะทาง 900 มม. ดังนั้นระยะระหว่างจุด A และ B หาได้จาก
กล้องที่ 1

$$X1a-X1b = -48.78-(-92.31) = -43.53 \text{ มม.}$$

กล้องที่ 2

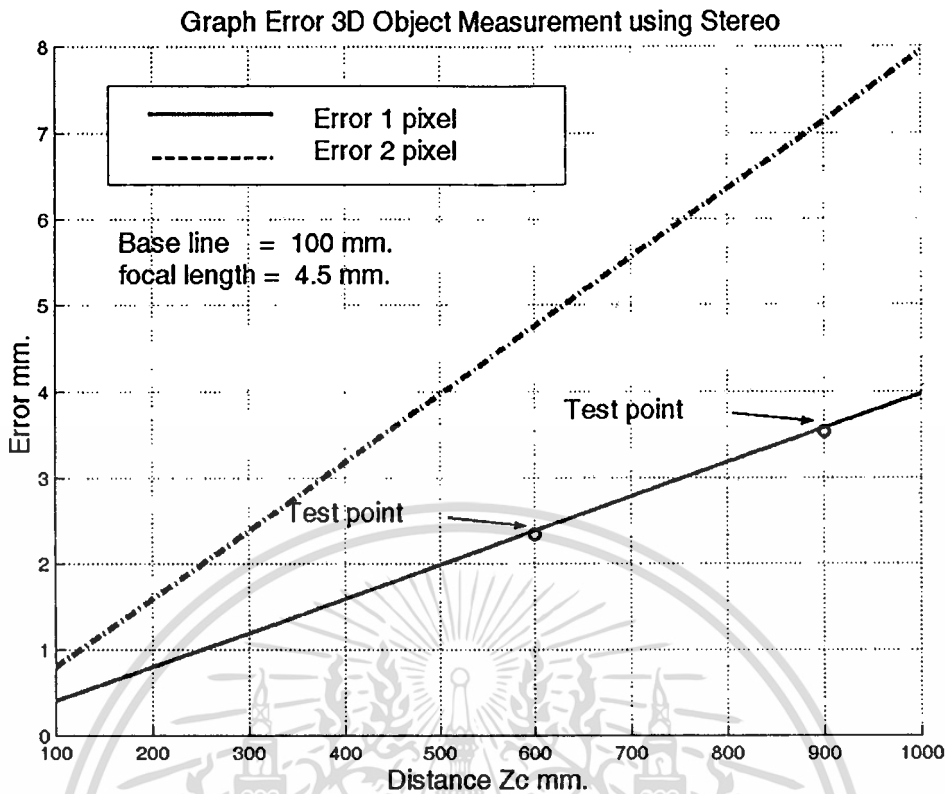
$$X2a-X2b = -51.22-(-7.69) = -43.53 \text{ มม.}$$

ระยะระหว่างจุด A และ B จริงเท่ากับ 40 มม. ดังนั้น

$$\text{ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์} = 43.53-40 = 3.53 \text{ มม.}$$

$$\text{ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์} = (43.53-40)/40 = 0.08825 \text{ มม.}$$

ดังนั้นค่าความผิดพลาดจะมีค่าเท่ากับ 5.85 % ถ้าการคำนวณหาจุดที่สอดคล้องกัน
ผิดพลาดไป +/- 1 Pixel ที่ระยะทางจริงเท่ากับ 600 มม. และค่าความผิดพลาดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น
8.82 % ถ้าการคำนวณหาจุดที่สอดคล้องกันผิดพลาดไป +/- 1 Pixel ที่ระยะทางจริงเท่ากับ 900
มม. สามารถสรุปเป็นกราฟแสดงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการวัดขนาดของวัตถุที่ระยะทาง
ต่างๆในกรณีที่เกิดการหาจุดที่สอดคล้องกันผิดพลาดไป 1 ถึง 2 Pixel ในภาพที่ 6.24



ภาพที่ 6.24 กราฟค่าความผิดพลาดในการหาขนาดของวัตถุเทียบกับระยะทางที่เปลี่ยนไป

สรุปได้ว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดลองในหัวข้อที่ 6.6 และ 6.7 นั้นจะเกิดขึ้นจากการนำตำแหน่งของจุดภาพที่ผิดพลาดไปมาคำนวณหาระยะทางแบบสามมิติ ความเป็นจริงแล้วอาจจะมากกว่า 1-2 Pixel ก็เป็นไปได้ ค่าความผิดพลาดดังกล่าวอาจจะเรียกได้ว่าเป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากระบบของการวัด (System error) จึงมีผลทำให้ความผิดพลาดในการหาขนาดของวัตถุมีความผิดพลาดไปประมาณ 4 - 5 มม. ผลการคำนวณหาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างและการทดลองการหาขนาดวัตถุในหัวข้อที่ 6.6 และ 6.7 จะเห็นได้ว่ามีค่าความผิดพลาดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นการนำกล้องแบบสเตอริโอมาหาขนาด พิกัด และพื้นผิวของวัตถุแบบสามมิติ จึงยอมรับได้เนื่องจากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น

บทที่ 7

บทสรุปและวิจารณ์ผล

การหาระยะทางของพื้นผิววัตถุแบบสามมิติด้วยวิธี Epipolar geometry เป็นการนำเสนอวิธีการมองเห็นของหุ่นยนต์ให้สามารถมองเห็น ขนาด พิกัดและพื้นผิวของวัตถุแบบสามมิติได้โดยใช้กล้องสองตัวรับภาพเข้ามาประมวลผลในการหาระยะทางแบบสามมิติ ปัญหาหลักที่เรานำมาทำการวิจัยและพัฒนา ก็คือการติดตั้งกล้องให้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบสเตอริโอและการหาจุดที่สอดคล้องกัน จากปัญหาดังกล่าวเราได้นำเสนอวิธีการสอบเทียบกล้องสเตอริโอร่วมกับ Epipolar rectification และการหาจุดที่สอดคล้องกันเราได้นำหลักการ Epipolar geometry ร่วมกับการวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มาช่วยในการหาจุดที่สอดคล้องกันทางเรขาคณิตของกล้องในระบบสเตอริโอ ซึ่งจะช่วยให้การหาจุดที่สอดคล้องมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

หลังจากการสอบเทียบเสร็จสิ้นพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องเป็นไปตามข้อกำหนดของระบบทั้งหมดและสามารถที่จะนำไปหาระยะทางแบบสามมิติได้ จากนั้นทำการทดลองการหา Epipolar line ที่ผ่านจุดสอดคล้องกันทางเรขาคณิตสามารถหาจุดที่ตรงกันได้ถูกต้อง ผลการทดลองการหาขนาดของวัตถุเป็นการทดลองเพื่อวัดความถูกต้องในการหาจุดที่สอดคล้องกันโดยทำการเปรียบเทียบกับขนาดจริงของวัตถุผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ ผลการทดลองการสร้างภาพแบบสามมิติเป็นการทดลองเพื่อนำวิธีการหาระยะทางแบบสเตอริโอมาประยุกต์ใช้ในการมองเห็น ขนาด พิกัดและพื้นผิวของวัตถุแบบสามมิติ ผลที่ได้เราสามารถที่จะสร้างภาพพื้นผิวแบบตาข่าย และแสดงเวกเตอร์ตั้งฉากกับผิววัตถุได้

ปัญหาในการสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุที่เกิดจากข้อจำกัดของระบบสเตอริโอก็คือบางกรณีไม่สามารถที่หาจุดสอดคล้องกันได้ เช่น มุมมองของวัตถุที่แตกต่างกันมากมีผลทำให้ขนาดที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพทั้งสองแตกต่างกันมากทำให้การหาจุดสอดคล้องทำได้ยาก หรือวัตถุที่ถูกบดบังบางส่วนก็ไม่สามารถหาจุดที่สอดคล้องกันได้ อีกทั้งปัญหาพื้นผิวที่มีลักษณะโค้งทำให้ตำแหน่งของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพทั้งสองเป็นตำแหน่งที่แตกต่างกันจึงทำให้เกิดความผิดพลาดในการหาระยะทางอย่างมาก

ดังนั้นวิธีการที่ได้นำเสนอมาเป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับการมองเห็นวัตถุที่มีรูปร่างแบบ Polygon ได้ดีเนื่องจากข้อจำกัดของระบบสเตอริโอดังกล่าว ในการติดตั้งกล้องก็ควรจะติดตั้งให้มุมมองของกล้องทั้งสองสามารถเห็นรายละเอียดของวัตถุได้ทั้งหมด จึงสามารถที่จะนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุแบบสามมิติได้ดี

บรรณานุกรม

- [1] R.Y. Tsai "Aversatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using off-the-shelf TV Cameras and Lenses" IEEE Journal of Robot and Automation ,Vol. 3 ,No. 4, August 1987
- [2] Zhengyou Zhang,"Flexible New Technique for Camera Calibration", Technical Report, Microsoft Research Microsoft Corporation December 2,1998
- [3] R.K. Lenz and R.Y. Tsai , "Calibration a Cartesian Robot with Eye-on-Hand Configuration Independent of Eye-to-Hand Relationship" IEEE Trans.Pattern Anal. Machine Intell., vol. 11,1989, pp916-928.
- [4] Juyang Weng , Paul Cohen and Marc Herniou, "'Camera Calibration with Distortion Model and Accuracy Evaluation", IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol. 1992, pp.965-980.
- [5] W.Faig, "Calibration of Close-Range Photogrammetric System Mathematical Formulation " Photogrammetric Eng. Remote Sensing., May 1966, pp.444-462.
- [6] H. Takahashi and F. Tomita, "Self-calibration of Stereo cameras", Second International Conference on Computer Vision, pp.123-128,Dec.1988
- [7] R.I. Hartley, "Theory and Practice rectification", International Journal of computer Vision, vol.35 no.2, pp.1-16 , November 1999
- [8] D.V. Papadimitriou and T.J. Dennis., "Epipolar line estimation and rectification for stereo image pairs" , IEEE Transaction on Image Processing, vol.5,no.4, pp.672-676, April 1996.
- [9] D. Liebowitz and A. Zisserman."Metric rectification fo perspective image of plane" , In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,pp. 482-488. , Santana Barbara, California , june 1998.
- [10] เสริมพงศ์ คงวิริยะวิทยา , "การวัดระยะทางของพื้นผิววัตถุแบบสามมิติด้วยรหัสเกรย์" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ,สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2539
- [11] ยิ่งยศ ศรีบุญเรือง , "การหาพิกัดพื้นผิววัตถุสามมิติจากภาพถ่ายสเตอริโอ" วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ,สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2545

- [12] Manual of Photogrammetry Amer.Soc of Protogrammetry 1980.4th Edition.
- [13] Hoffman,J.D. "Numerical Methods for Engineers and Scientists", MaGraw-Hill ,New York 1993
- [14] R.Hartley and A.Zisserman, "Multiple View Geometry in Computer Vision" , Press,2000.
- [15] E. Trucco and A. Verri, "Introductory Techniques for 3D Computer Vision" Prentice-Hall, 1998.
- [16] B.N. Datta, "Numerical Linear Algebra and Applications" , Northern Illinois University, Brook/cole Publishing Company, 1995.
- [17] R.C. Gonzalez, P.Wintz. , "Digital Image Processing", Addison-Wesley Publishing Company, 1987
- [18] ศันสนีย์ สุภาภา "ความน่าจะเป็นและสถิติประยุกต์สำหรับวิศวกร" , ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [19] สุทธิชัย ไ้วศิริ "หลักสถิติ" ภาควิชาสถิติและคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
- [20] บัรรอง ลิวเฉลิมวงศ์ "สถิติวิทยา" ภาควิชาสถิติวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
- [21] Susan F. Wilson "Health assessment for nursing practice" Texas Christian University , Mosby , second edition ,2002
- [22] อภิรัฐ ศิริธราวัตร "คณิตศาสตร์วิศวกรรมไฟฟ้า" ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับตีพิมพ์

- [1] เกษตร์ ศิริสันติสัมฤทธิ์ ธีรวัดณ์ เทพมณี ศศิ ศรีสัตนบุตร ธีรชาติ แสนชัย และ เดชาพัฒน์ ประสิทธิ์ชัย "การสอบเทียบกล้อง" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 , 23-24 พฤษภาคม 2543 , มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [2] เกษตร์ ศิริสันติสัมฤทธิ์ ธีรวัดณ์ เทพมณี บรรพต สุวรรณาวุธ "การสอบเทียบกล้องโดยใช้โมเดลหลายระนาบ" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24 , 22-23 พฤษภาคม 2544 , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] ธีรวัดณ์ เทพมณี เกษตร์ ศิริสันติสัมฤทธิ์ , "การสอบเทียบกล้องสเตอริโอร่วมกับ Epipolar Rectification" , วิศวกรรมสารลาดกระบังปีที่ 20 ฉบับที่ 2
- [4] Pipat Chaewieang, Teerawat Thepmanee, Sart Kummool, Anuchit Jaruvanawat and Kaset Sirisantisamrid , "Stereo cameras calibration bases on Epipolar Rectification and its Application " International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2003), October 22-25 , 2003 , Gyeongju TEMF Hotel , Gyeongju , KOREA

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายธีรวัฒน์ เทพมณี
 เกิดวันที่ 27 เมษายน 2518 ที่จังหวัดสระบุรี
 การศึกษา ปีการศึกษา 2533-2536 ระดับ ปวช. สาขาไฟฟ้า
 วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี
 ปีการศึกษา 2536-2538 ระดับ ปวส. สาขาไฟฟ้ากำลัง
 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือนครราชสีมา
 ปีการศึกษา 2538-2540 ระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมการวัดคุม
 ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
 เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการทำงาน

11 ก.พ.41-11 ก.ค. 41 : สถาบันส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
 เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือวัด
 25 ก.ย. 41-ปัจจุบัน : ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ตำแหน่งนายช่างอิเล็กทรอนิกส์