การประมวลผลภาพตามเวลาจริงสำหรับการตรวจวัดปริมาตร ของวัตถุรูปทรงสมมาตร

REAL TIME IMAGE PROCESSING FOR SYMMETRICAL OBJECT VOLUME MEASUREMENT

รัชพล ภิวัฒภัคพล
RATCHAPOL PIWATPAKAPOL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-060-043

การประมวลผลภาพตามเวลาจริงสำหรับการตรวจวัดปริมาตร
ของวัตถุรูปทรงสมมาตร

REAL TIME IMAGE PROCESSING FOR SYMMETRICAL OBJECT VOLUME MEASUREMENT

รัชพล ภิวัฒภัคพล
RATCHAPOL PIWATPAKAPOL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-060-043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REAL TIME IMAGE PROCESSING FOR SYMMETRICAL OBJECT VOLUME MEASUREMENT

RATCHAPOL PIWATPAKAPOL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTFOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERINGIN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

KMITL-2015-EN-M-060-043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประมวลผลภาพตามเวลาจริงสำหรับการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร
Thesis Title Real Time Image Processing for Symmetrical Object Volume Measurement
นักศึกษา นายรัชพล ภิวัฒภัคพล
รหัสประจำตัว 56601356
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ทวีพล ซื่อสัตย์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-060-043

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.วิริยะ	กองรัตน์	
ดร.ยุทธพงศ์	ทัพผดุง	
รศ.สุพรรณ	กุลพาณิชย์	
รศ.ดร.ทวีพล	ซื่อสัตย์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประมวลผลภาพตามเวลาจริงสำหรับการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร
นักศึกษา	นายรัชพล ภิวัฒภัคพล
รหัสประจำตัว	56601356
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ทวีพล ซื่อสัตย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการประมวลผลภาพตามเวลาจริงสำหรับการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรบนสายพานลำเลียง และทำการทดลองตรวจวัดปริมาตรของผักและผลไม้ต่าง ๆ ระบบต้นแบบประกอบด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลภาพของลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์และชุดสายพานลำเลียง ชุดกล้องพร้อมกับเลนส์และตัวกรองแสงความยาวคลื่นย่านแคบที่ 650 nm เพื่อตัดแสงรบกวนจากภายนอก ใช้การปรับปรุงภาพด้วย Bresenham’s Line Algorithm และ Savitzky-Golay Filter เพื่อให้ได้โครงร่างของแสงเลเซอร์ที่สมบูรณ์ ก่อนนำมาคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ การคำนวณอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลของภาพให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) ในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ พื้นที่หน้าตัดจะถูกคำนวณและนำมารวมกันเป็นปริมาตรของวัตถุ ในการทดลองได้ทำการทดสอบความถูกต้องของระบบการวัดด้วยการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงเรขาคณิตที่รู้ค่าปริมาตร นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองกับผลิตภัณฑ์พืชผลทางการเกษตรที่มีรูปทรงสมมาตร โดยทำการทดลองวัดปริมาตรเพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างวิธีที่นำเสนอและวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ สำหรับการคัดแยกขนาดผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Real Time Image Processing For Symmetrical Object Volume Measurement
Student	Mr. Ratchapol Piwatpakapol
Student ID.	56601356
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Taweepol Suesut

ABSTRACT

This thesis presents the Real Time Image Processing for Symmetrical Object Volume Measurement on the conveyor belt and measured the volume of the fruits and vegetable. The prototype system consists of the computer for laser image processing, conveyor and motor control system, machine vision camera set with 650 nm narrow band pass filter in order to cut off the ambient light. The image was improved by Bresenham's Line Algorithm and Savitzky-Golay Filter to obtain a complete laser beam profile. The principle calculation is the conversion of amount of pixel to be a unit of area (Square millimeters) while the object moved prior to calculate the cross section area of the object. The cross section was calculated and combined together to be the volume of the object. Working on typical, the measurement accuracy was calibrated by the known symmetrical object. Working on symmetrical agricultural products, compared between the proposed method with the water displacement method. As a result, the error is in the acceptable range for sizing of the agricultural products.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีพล ซื่อสัตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่คอยช่วยเหลือแนะนำ ตลอดจนให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ในการศึกษา เจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมและของบัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุก ๆ ท่าน

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้อง รวมทั้งเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านทั้งเรื่องการเรียน การเงินและเรื่องส่วนตัวจนทำให้ผู้เขียนผ่านทุก ๆ อย่างจนมาถึงทุกวันนี้ได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า และขอให้ทุก ๆ ท่านจงมีแต่ความสุขตลอดไป

รัชพล ภิวัฒภัคพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VI

สารบัญรูป VII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย 3

1.4 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ 3

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 ระบบการวัดปริมาตรของผลไม้โดยวัดพื้นที่ช่องว่างระหว่างวัตถุกับโครงวงแหวน (Optical Ring Sensor) 6

2.2 ระบบการวัดปริมาตรของผลไม้ด้วยค่าประจุไฟฟ้า (Electrical Capacitance) 7

2.3 ระบบวิทัศน์จักรกลแบบ 2 มิติ (2-D Machine Vision) 8

2.4 ระบบวิทัศน์จักรกลแบบ 3 มิติ (Active Triangulation) 9

2.5 ระบบวิทัศน์จักรกลแบบ 3 มิติ (Stereovision) 10

2.6 ระบบการรวมปริมาตร (Volume Intersection Method) 11

2.7 ระบบการวัดขนาดของผลไม้ด้วยอัลตราโซนิก 12

2.8 ระบบ Air Pycnometers 13

2.9 ระบบ Optoelectronic คัดแยกขนาดโดยใช้หลักการพื้นฐานการปิดกั้นแสง .. 14

2.10 ระบบวิทัศน์จักรกลจอประสาทตาเทียม 15

2.11 สรุปวิธีการตรวจวัดของผลผลิตต่าง ๆ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	18
3.1 การเก็บข้อมูลสามมิติ (3D Range Acquisition)	18
3.2 รูปแบบการสแกนวัตถุ (Scanning Patterns)	32
3.3 วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central of Gravity: COG)	36
3.4 อัลกอริทึมเส้นตรง (Bresenham's Line Algorithm)	38
3.5 ตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ (Savitzky-Golay Filter)	40
3.6 การวัดปริมาตรวัตถุโดยวิธีชั่งวัตถุแทนที่ในน้ำ (Hydrostatic)	43
บทที่ 4 การออกแบบระบบการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร โดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ	46
4.1 หลักการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร	46
4.2 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร	51
4.3 ขั้นตอนการประมวลผลภาพและการทำงานของระบบการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร	54
บทที่ 5 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	64
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	64
5.2 วัตถุที่ใช้ในการทดสอบ	66
5.3 การสอบเทียบความยาวและปริมาตร	67
5.4 ผลการทดลองและวิจารณ์	68
5.5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	75
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
6.1 สรุปผลการวิจัย	76
6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ	76
เอกสารอ้างอิง	77
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์	80
ประวัติผู้เขียน	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ขนาดและปริมาตรของส้มจากเทคนิคการวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วน 2
2.1 สรุปวิธีการตรวจวัดของผลผลิตทางการเกษตรต่าง ๆ 17
4.1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของหลักการหาพื้นที่ในหนึ่งหน้าตัด 47
5.1 แสดงการสอบเทียบค่าความผิดพลาดของความยาวและปริมาตร 67
5.2 แสดงค่าที่ได้จากการวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม -30° 68
5.3 แสดงค่าที่ได้จากการวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม -15° 68
5.4 แสดงค่าที่ได้จากการวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม 0° 69
5.5 แสดงค่าที่ได้จากการวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม +15° 69
5.6 แสดงค่าที่ได้จากการวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม +30° 69
5.7 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของความยาวเมื่อวางวัตถุในองศาต่าง ๆ 70
5.8 แสดงค่าที่ได้จากการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม -30° 71
5.9 แสดงค่าที่ได้จากการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม -15° 71
5.10 แสดงค่าที่ได้จากการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม 0° 72
5.11 แสดงค่าที่ได้จากการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม +15° 72
5.12 แสดงค่าที่ได้จากการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม +30° 72
5.13 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของปริมาตรเมื่อวางวัตถุในองศาต่าง ๆ 73
5.14 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในการวัดปริมาตรด้วยวิธี Laser Light Sectioning กับวิธี Water Displacement 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	รูปสามเหลี่ยมและส่วนของวงกลมทำให้เกิดพื้นที่ระหว่างรูปร่างของวัตถุกับโครงวงแหวนเซ็นเซอร์ออปติคอล	6
2.2	การติดตั้งระบบประจุไฟฟ้าสำหรับการวัดปริมาตรของแตงโม (วาดโดย Kato 1997)	7
2.3	รูปแบบโครงสร้างที่มีความเรียบง่ายที่ประกอบด้วยเลเซอร์สามเส้นฉายลงบนชิ้นส่วนของอาหาร (Lee et al., 2003) © 2003 SPIE	9
2.4	หลักการของวิธีการรวมปริมาตร	12
2.5	แผนผังของระบบขาตั้งกล้องคว่ำสำหรับการกำหนดขนาดของผลไม้ โดย TOF ของคลื่นอัลตราโซนิก	13
2.6	แสดงระบบ Optoelectronic คัดแยกขนาดสามประเภท โดยใช้หลักการพื้นฐานการปิดกั้นแสง (Iwamoto และ Chuma, 1981)	14
2.7	โครงร่างของระบบวิทัศน์จักรกลจอประสาทตาเทียม (วาดโดย Kanali และคณะ 1998) หมายเลขอ้างอิง: 1 หลอดฮาโลเจนทังสเตน 2 เลนส์ Fresnel 3 ตัวปรับลำแสง 4 จอประสาทตาเทียม 5 ผลไม้ที่ใช้ในการตรวจสอบ 6 เซ็นเซอร์ภาพ 7 หน่วยการถ่ายโอนข้อมูล 8 A/D Converter และ 9 คอมพิวเตอร์	16
3.1	หลักการวัดระยะทางโดยใช้คลื่นแสง	19
3.2	ความต่างของมุมเฟสที่สะท้อนกลับมาเมื่อกระทบวัตถุ	19
3.3	การวัดระยะทางโดยหลักการของรูปสามเหลี่ยม	20
3.4	หลักการของระบบสเตอริโอวิชั่น (Stereo Vision)	21
3.5	การวัดระยะทางในระบบสเตอริโอวิชั่น	21
3.6	ภาพถ่ายสเตอริโอที่ได้จากกล้องซ้ายและกล้องขวา	23
3.7	ภาพความแตกต่างของกล้องทั้งสองเมื่อนำมารวมกัน	23
3.8	ตัวอย่างการคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ	24
3.9	หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบจุด.	26
3.10	การวิเคราะห์ระยะทางของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีพ	26
3.11	หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบเส้น	28
3.12	ฉากรหัสไบนารี่ (Binary Code Pattern)	28
3.13	เทคนิคการฉายแสงผ่านรหัสไบนารี่ (Binary Code Pattern)	29
3.14	ภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารี่	29
3.15	ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสไบนารี่	30
3.16	ฉากรหัสเกรย์ (Gray Code Pattern)	31
3.17	ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสเกรย์	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.18 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนวัตถุ 33

3.19 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ 34

3.20 การสแกนโดยการใช้แสงแบ่งส่วนวัตถุ (Light-Sectioning) 34

3.21 (ก) การเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านเส้นแสง
(ข) ภาพที่ได้ในเฟรมต่าง ๆ เมื่อมีวัตถุตัดผ่าน 35

3.22 ตัวอย่างการนำภาพตัดขวางแต่ละส่วนมารวมกันเพื่อสร้างภาพตัดขวาง 3 มิติ 35

3.23 เมทริกซ์ขนาด 4x5 37

3.24 แสดงการสร้างเส้นตรงบนจอภาพ 38

3.25 อัลกอริทึมในการวาดเส้นตรงของ Bresenham 39

3.26 แสดงผลการทดสอบการใช้ตัวกรอง ภาพบน: สัญญาณอินพุตที่ถูกเพิ่มสัญญาณรบกวน (เส้นประคือสัญญาณหลัก) ภาพกลาง: ตัวกรองเฉลี่ยเลื่อนหน้าต่างแบบธรรม (Simple Moving Window Average) ภาพล่าง: ตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ โดยใช้ค่าพหุนาม M = 4 42

3.27 การวัดปริมาตรวัตถุโดยวิธีชั่งวัตถุแทนที่ในน้ำ 43

3.28 การเปรียบเทียบน้ำหนักของวัตถุ เมื่อชั่งในน้ำกับชั่งในอากาศ 45

4.1 การสอบเทียบระบบด้วยวัตถุรูปทรงสมมาตรที่รู้ค่าความกว้าง ความยาว ความสูง และปริมาตร 47

4.2 แสดงเส้นแสงเลเซอร์ตัดขวางที่ตกกระทบกับพื้นผิวของวัตถุตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 49

4.3 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุ 51

4.4 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดแบบเส้นที่ใช้ในงานวิจัย 51

4.5 กล้อง Basler รุ่น SCA1000-30fc 52

4.6 เลนซ์ SV-1214V 52

4.7 ตัวกรองคลื่นแสงย่านสีแดง Sharp Cut Filters R64-27 M27x0.5 52

4.8 อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ 53

4.9 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลภาพตามเวลาจริง (Real Time) 54

4.10 ขั้นตอนการประมวลผลภาพ 55

4.11 Extract Color Planes (RGB – Red Plane 8 Bit Image) 56

4.12 Extract Color Planes Code ของโปรแกรม 56

4.13 Threshold Setup and Lookup Table 57

4.14 Threshold Setup and Lookup Table Code ของโปรแกรม 57

4.15 Profile Extraction (Center of Gravity Calculation) 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.16	Profile Extraction (Center of Gravity Calculation) Code ของโปรแกรม	58
4.17	Bresenham's Line Algorithm	59
4.18	Bresenham's Line Algorithm MathScript Node Code ของโปรแกรม	59
4.19	Savitzky-Golay Filter Process	60
4.20	Savitzky-Golay Filter Code ของโปรแกรม	60
4.21	Cross Section Image Process	61
4.22	Cross Section Image Process Code ของโปรแกรม	61
4.23	Volume Calculation	62
4.24	ตารางการสอบเทียบขนาด 10 x 10 mm ที่ใช้ในการสอบเทียบกล้อง	63
5.1	กล้อง Basler รุ่น SCA1000-30fc	64
5.2	เลนซ์ SV-1214V	65
5.3	ตัวกรองคลื่นแสงย่านสีแดง Sharp Cut Filters R64-27 M27x0.5	65
5.4	ระบบตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรตามเวลาจริง (Real Time)	65
5.5	วัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ	66
5.6	ผลไม้ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ	66
5.7	แสดงกราฟค่าความผิดพลาดของความยาวเมื่อวางวัตถุในองศาต่าง ๆ	70
5.8	แสดงกราฟค่าความผิดพลาดของปริมาตรเมื่อวางวัตถุในองศาต่าง ๆ	73
5.9	แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในการวัดปริมาตรด้วยวิธี Laser Light Sectioning กับวิธี Water Displacement	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวของผลไม้และผักสดสามารถเปลี่ยนแปลงได้เนื่องมาจากความต้องการส่วนใหญ่ของผู้บริโภคที่เพิ่มมากขึ้นสำหรับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Aleixoset al., 2002) สิ่งนี้พร้อมกับความจริงที่ว่าเครื่องจักรกลมีความเหมาะสมมากกว่ามนุษย์ (Deck et al, 1995; Njoroge, et al, 2002; Aleixos et al., 2002) ความขาดแคลนของแรงงานในการพัฒนาประเทศ (Walsh, 2005) และโอกาสที่จะลดค่าใช้จ่ายทางด้านแรงงาน (Bato et al., 2000) ได้นำไปสู่การใช้เครื่องจักรกลที่น่าทึ่งและระบบอัตโนมัติในโรงงานบรรจุภัณฑ์ ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา ในอดีตที่ผ่านมาไม่กี่ปี ได้มีนักเขียนหลายคนได้ตีพิมพ์ความก้าวหน้าที่สำคัญในเรื่องนี้ Studman (2001) ตีพิมพ์การดำเนินงานทางด้านอุตสาหกรรมหลังการเก็บเกี่ยวที่คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์ได้มีอิทธิพลอย่างมาก Brosnan และ Sun (2004) เปรียบเทียบความแตกต่างของระบบคอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพจากกล้องสำหรับการตรวจสอบสิ่งบกพร่องและโรคของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร (García-Ramos et al., 2005) ตีพิมพ์หลักการตรวจสอบความหนาแน่นของเนื้อผลไม้แบบไม่ทำลาย (Butz et al., (2005) และ (Nicolaiet et al., (2006) เปรียบเทียบความแตกต่างของเทคโนโลยีที่แสดงลักษณะคุณภาพภายใน (IQ) ของผักและผลไม้ แม้ว่ามันจะเป็นที่ยอมรับในขณะนี้ว่าการประเมิน IQ มีบทบาทสำคัญในขั้นตอนหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ รูปลักษณ์ภายนอกของผลิตผลที่สดจะยังคงเป็นปัจจัยที่สำคัญและที่สำคัญที่สุดของรูปลักษณ์ภายนอกคือขนาดของผลไม้

โดยทั่วไปการวัดปริมาณของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร เช่น ผลไม้และ พืชผัก เนื้อปลาเนื้อสัตว์ อื่น ๆ กำหนดด้วยน้ำหนัก โดยมูลค่าหรือราคาขึ้นอยู่กับน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ แต่สำหรับสินค้าอุตสาหกรรมบางอย่าง จำเป็นต้องกำหนดขนาดโดย มิติเชิงเรขาคณิต [1] เช่น ความกว้าง ความยาว ความสูง พื้นที่หน้าตัด ปริมาตร เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการกำหนดคุณภาพและปริมาณ โดยปกตินิยมใช้เทคนิคการประมวลผลภาพแบบสองมิติเพื่อหาขนาดของผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจมีข้อจำกัดด้านการวัดที่ไม่มีข้อมูลความหนา ทำให้ผลการวัดที่ได้ไม่ถูกต้อง วิธีการลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง ซึ่งใช้การจับภาพของลำแสงเลเซอร์ที่กระทบลงพื้นผิวของวัตถุ โดยเป็นการวัดแบบสองมิติ เพื่อนำมาสร้างเป็นพื้นที่หน้าตัดและปริมาตร

เครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์สามมิติได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานหลายอย่าง เช่น การสร้างพื้นผิว [2] การสร้างแบบจำลองพื้นผิวและการตรวจสอบชิ้นงาน [3] [4] [6] และการวัดมิติเชิงเรขาคณิต [1] [8] [9] การติดตามตำแหน่งจากภาพเลเซอร์ในมุมมอง 3 มิติ ในระบบนำทางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ [5] และการหาปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรโดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง [10] ซึ่งใช้วิธีการแบบเดียวกันแต่ใช้วิธีการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดจากสูตรทางเรขาคณิต และมีข้อจำกัดในการวางวัตถุ ซึ่งต้องวางวัตถุในแนวเส้นตรงเท่านั้น ไม่มีการศึกษาผลกระทบจากการวางวัตถุเอียงในมุมต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอระบบที่มีความสามารถในการประมวลผลภาพตามเวลาจริง สำหรับการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มีความสะดวกในการใช้งานและการติดตั้ง รวมทั้งมีความเร็วในการประมวลและสามารถบอกได้ถึงปริมาตรของวัตถุตัวอย่างเป็นหน่วยวัดมาตรฐานสากล เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่น ๆ ได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการค้นคว้าและพัฒนาวิธีการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการวางวัตถุเอียงในมุมต่าง ๆ โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นประมวลผลภาพตามเวลาจริง และใช้เทคนิควิธีการวัดขนาดด้วยภาพบนระนาบภาพ 2 มิติ [7] มาประยุกต์ร่วมกับเทคนิคที่ใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุและทำการปรับปรุงภาพ เพื่อให้ได้โครงร่างของแสงเลเซอร์ที่สมบูรณ์ ก่อนนำมาคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ การคำนวณอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลของภาพให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) ในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านไปบนสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง พื้นที่หน้าตัดที่ถูกคำนวณ จะถูกนำมารวมกันเป็นพื้นที่โดยรวมเชิงปริมาตร ในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากล การออกแบบระบบที่นำเสนอ คำนึงถึงความง่ายในการออกแบบและติดตั้ง มีความเร็วในการทำงาน และมีความถูกต้องแม่นยำ ที่มีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ มกอช. 14-2550 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเรื่องขนาดของส้มเปลือกล่อนที่ยอมให้มีได้ในแต่ละภาชนะบรรจุ ได้ไม่เกิน 5% [26]

1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากการศึกษาถึงปัญหาต่าง ๆ จึงมีแนวความคิดในการออกแบบระบบการวัดขนาดและตรวจสอบวัตถุ ในลักษณะการสแกนบนสายพานลำเลียงซึ่งอยู่ในกระบวนการผลิตโดยทั่วไป และนำเสนอเทคนิคการใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ (Laser Light Sectioning) ที่เป็นเทคนิคการวัดรูปทรงแบบตัดขวางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายในการออกแบบ โดยวิธีนี้เป็นการฉายแหล่งกำเนิดแสงลงบนพื้นผิววัตถุ เพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงตกกระทบ และภาพของลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุที่รับได้จากกล้องจะถูกประมวลผลด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ โดยวัตถุจะเคลื่อนที่ไปบนสายพานลำเลียง ภาพของลำแสงเลเซอร์สีแดงที่ได้ผ่านตัวกรองแสงความยาวคลื่นย่านแคบที่ 650 nm เพื่อตัดแสงรบกวนจากภายนอกและทำการปรับปรุงภาพด้วย Bresenham’s Line Algorithm และ Savitzky-Golay Filter เพื่อให้ได้โครงร่างของแสงเลเซอร์ที่สมบูรณ์ ก่อนนำมาคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ การคำนวณอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลของภาพให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) ในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ พื้นที่หน้าตัดจะถูกคำนวณและนำมารวมกันเป็นปริมาตรของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการวางวัตถุเอียงในมุมต่าง ๆ โดยการใช้เทคนิคแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุร่วมกับการประมวลผลภาพตามเวลาจริง แล้วทำการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด โดยอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลของภาพที่ได้ให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) โดยใช้โปรแกรมประมวลผลภาพในการพัฒนาและออกแบบให้สามารถวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ ในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากล โดยให้ความถูกต้องแม่นยำและมีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 6 บทด้วยกัน โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรแบบต่าง ๆ ที่มีมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การเก็บข้อมูลสามมิติ รูปแบบการสแกนวัตถุ วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง การวาดเส้นด้วยอัลกอริทึมแบบ Bresenham ทฤษฎีตัวกรองแบบ สาวิทซกี-โกเลย์ (Savitzky-Golay Filter) และการวัดปริมาตรวัตถุโดยวิธีชั่งวัตถุแทนที่ในน้ำ

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบระบบการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ เช่น รูปทรงสามเหลี่ยม รูปทรงสี่เหลี่ยม และรูปทรงหกเหลี่ยม รูปทรงกระบอก โดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ ขั้นตอนการประมวลผลภาพและการทำงานของระบบการตรวจวัดปริมาตร

บทที่ 5 กล่าวถึงขั้นตอนของการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง การตรวจวัดปริมาตรและความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ เช่น รูปทรงสามเหลี่ยม รูปทรงสี่เหลี่ยม และรูปทรงหกเหลี่ยม รูปทรงกระบอกและการตรวจวัดปริมาตรของผลไม้ชนิดต่าง ๆ เช่น แอปเปิ้ล ฝรั่ง แครอท และฟัก

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะและแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรแบบต่าง ๆ ที่มีมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ส่วนใหญ่การใช้เครื่องจักรในการคัดแยกขนาดของวัตถุนั้น สามารถที่จะช่วยในการลดต้นทุนในการผลิต โดยอาศัยการเพิ่มผลผลิตจากการวัดปริมาตรของวัตถุแบบอัตโนมัติ และการลดแรงงาน รวมไปถึงการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการวัดในสายการผลิต

วิธีการที่แตกต่างกันสำหรับการวัดขนาดของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรแบบไม่ทำลาย โดยมุ่งเน้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสามารถวัดปริมาตรของผลไม้ ประโยชน์ของการประมาณค่าขนาดของผลิตภัณฑ์คือการคัดขนาดและระบบการขัดแยกประเภทที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง การวิเคราะห์ระบบที่แตกต่างกันได้ถูกนำมาเปรียบเทียบในเงื่อนไขของความสามารถ ความแม่นยำ และปริมาณงานที่ทำในช่วงเวลาหนึ่ง มีข้อตกลงทั่วไปในการพิจารณาคือการวัดแกน เส้นรอบวงและพื้นที่ ได้รับความสำเร็จในขณะนี้ อย่างไรก็ตามการกำหนดปริมาตรอย่างรวดเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำของผลิตภัณฑ์ที่ขรุขระเป็นสิ่งที่จำเป็น ในการแยกประเภทความหนาแน่นได้กลายเป็นอดีตที่ผ่านมาไม่กี่ปี การกำหนดปริมาตรที่มีความแม่นยำกลายเป็นสิ่งสำคัญ ทางเลือกที่ดีสำหรับการสร้างพื้นผิวสามมิติของผลไม้ ซึ่งปริมาตรและพื้นผิวสามารถคำนวณได้คือการรวมกันของโครงร่าง แต่หนึ่งในเทคโนโลยีที่มีความหวังมากที่สุดในด้านนี้นั้นคือ การสแกนแบบ 3 มิติ ซึ่งทำการรวมข้อมูลภาพแล้วสร้างพื้นผิวสามมิติขึ้นมา

ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมาระบบเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความแตกต่างกัน ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับวัดปริมาตรของพืชผลทางการเกษตรแบบไม่ทำลายวัตถุมากมายหลายวิธีที่แตกต่างกันไปดังนี้ [23]

1 ระบบการวัดปริมาตรของผลไม้โดยวัดพื้นที่ช่องว่างระหว่างวัตถุกับโครงวงแหวน (Optical Ring Sensor)

2 ระบบการวัดปริมาตรของผลไม้ด้วยค่าความประจุไฟฟ้า (Electrical Capacitance)

3 ระบบวิทัศน์จักรกลแบบ 2 มิติ (2-D Machine Vision)

4 ระบบวิทัศน์จักรกลแบบ 3 มิติ (Active Triangulation)

5 ระบบวิทัศน์จักรกลแบบ 3 มิติ (Stereovision)

6 ระบบการรวมปริมาตร (Volume Intersection Method)

7 ระบบการวัดขนาดของผลไม้ด้วยอัลตราโซนิก

8 ระบบ Air Pycnometer

9 ระบบ Optoelectronic คัดแยกขนาดโดยใช้หลักการพื้นฐานการปิดกั้นแสง

10 ระบบวิทัศน์จักรกลจอประสาทตาเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 ระบบการวัดปริมาตรของผลไม้โดยวัดพื้นที่ช่องว่างระหว่างวัตถุกับโครงวงแหวน (Optical Ring Sensor)

ระบบนี้เป็นระบบเซ็นเซอร์ออปติคอลแบบวงแหวนที่พัฒนาขึ้นโดย Gall (1997) หลักการพื้นฐานของระบบคือการปิดกั้นแสง โดยตัวส่งและตัวรับแสงอินฟราเรดจำนวนมากถูกติดตั้งตามโครงวงแหวน ซึ่งตัวส่งและตัวรับจะถูกจัดเรียงสลับกันตามรูปที่ 2.1 ตัวส่งแสงอินฟราเรดจะถูกเปิดเป็นลำดับรอบวงแหวง ด้วยแสงที่ปล่อยออกมาจะแทนเป็น Chord (ส่วนของเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างจุดสองจุดใด ๆ บนเส้นรอบวงหรือเส้นโค้ง) เงาที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับการรับส่งแสงอินฟราเรด จะได้พื้นที่ที่ใกล้เคียงกับรูปร่างของวัตถุ การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดดังรูปที่ 2.1 จะคำนวณเป็นความแตกต่างระหว่างพื้นที่หน้าตัดของวงกลมกับผลรวมของพื้นที่รูปสามเหลี่ยมและส่วนของวงกลมที่เป็นช่องว่างระหว่างรูปร่างของวัตถุกับวงแหวน ดังสมการที่ 2.1

$$A_f = \pi r^2 - \sum(A_T + A_C) \qquad (2.1)$$

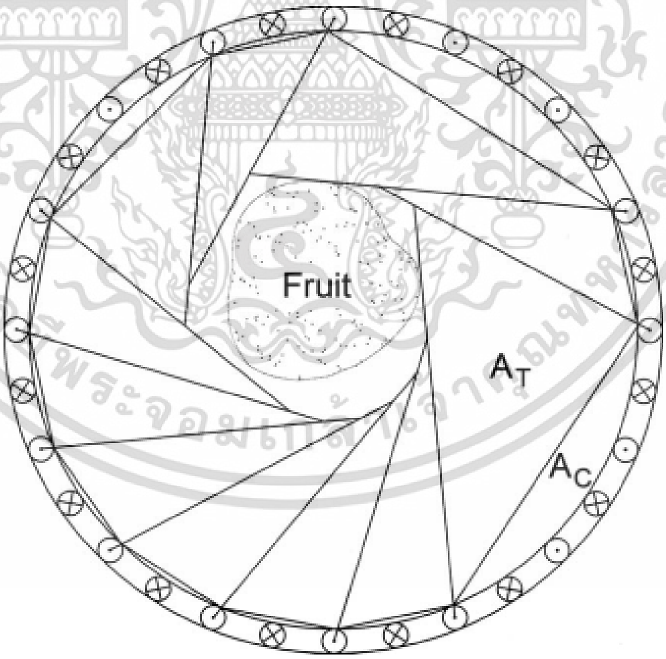
เมื่อ

A_f คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ

r คือ รัศมีของวงแหวน

A_T คือ พื้นที่รูปสามเหลี่ยม

A_C คือ พื้นที่ส่วนของวงกลม

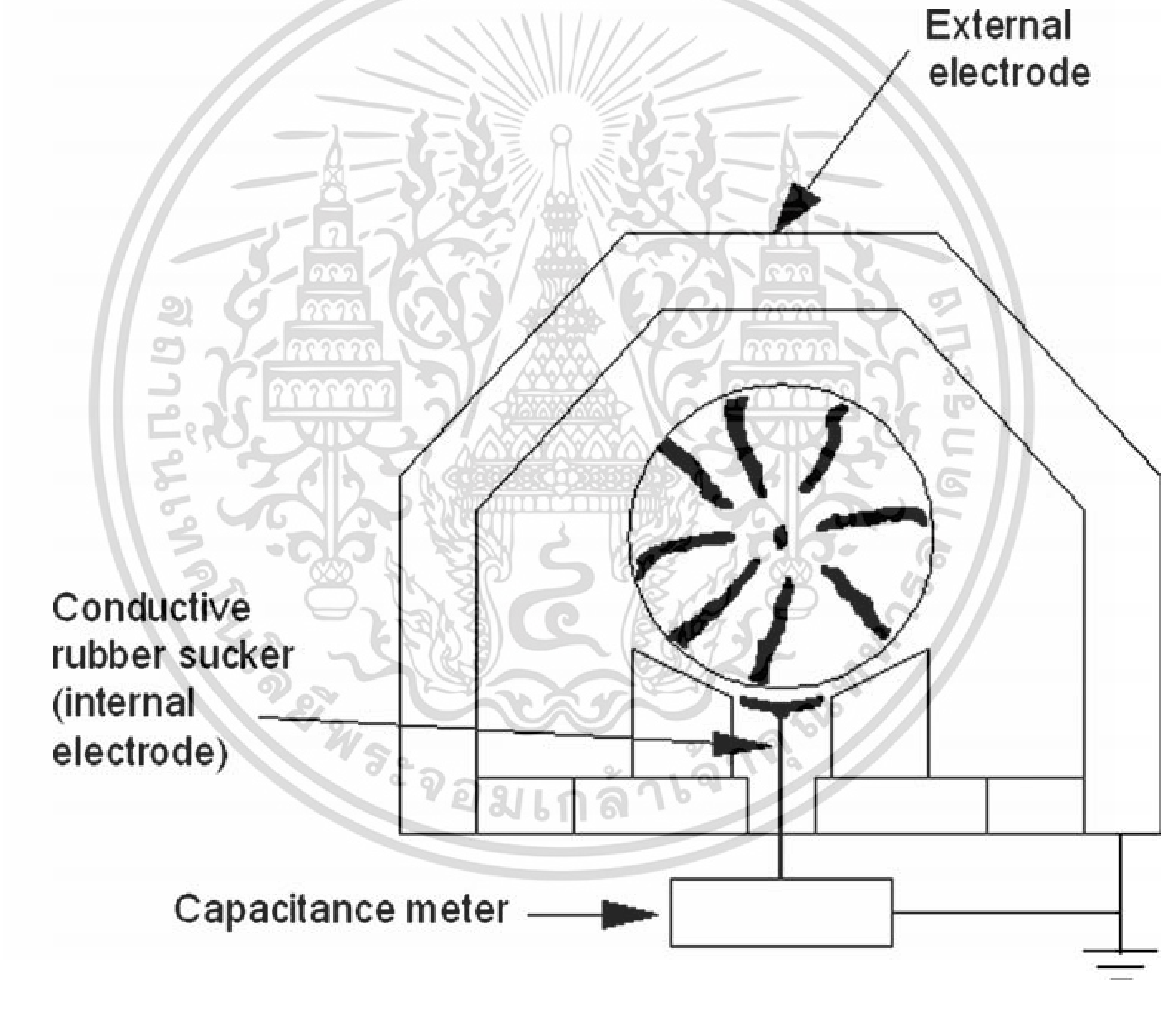


รูปที่ 2.1 รูปสามเหลี่ยมและส่วนของวงกลมทำให้เกิดพื้นที่ระหว่างรูปร่างของวัตถุกับโครงวงแหวนเซ็นเซอร์ออปติคอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ระบบการวัดปริมาตรของผลไม้ด้วยค่าประจุไฟฟ้า (Electrical Capacitance)

Kato (1997) คิดค้นวิธีการทางไฟฟ้าสำหรับการวัดปริมาตรของแตงโม ที่ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างความสามารถในการประจุกระแสไฟฟ้าของทรงกลมสองด้านและรัศมีภายในของทรงกลม ในการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติของเครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำวัดค่าความจุกระแสไฟฟ้าระหว่างทรงกลมภายในที่สร้างขึ้น อุโมงค์หลายเหลี่ยมเป็นขั้วไฟฟ้าด้านนอกต่อลงดินดังรูปที่ 2.2 ขั้วไฟฟ้าด้านในประกอบด้วยยางที่นำกระแสไฟฟ้าได้ซึ่งจะเหนี่ยวนำกับแตงโมที่ถูกนำมาวาง ปริมาตรของแตงโมที่ถูกวัดเช่นเดียวกับผลไม้ที่ผ่านอุโมงค์ที่ความเร็ว 0.22 m/s ซึ่งเท่ากับ 0.4 fruits/s วิธีการนี้จะส่งผลให้ค่า RMSE 26 ml และ RMSPE 0.4% ซึ่งค่าทั้งสองค่อนข้างมีค่าน้อย แต่ก็มีข้อเสียของการที่ต้องวางทิศทางของแตงโมให้ถูกต้อง วิธีของ Kato อุโมงค์หลายเหลี่ยมเป็นโครงด้านนอกในขณะที่ปริมาตรของผลไม้ถูกวัดจากประจุไฟฟ้าของช่องว่าง



รูปที่ 2.2 การติดตั้งระบบประจุไฟฟ้าสำหรับการวัดปริมาตรของแตงโม (วาดโดย Kato 1997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ระบบวิทัศน์จักรกลแบบ 2 มิติ (2-D Machine Vision)

ระบบนี้จะใช้กล้องวิดีโอแบบเซ็นเซอร์ CCD หรือ CMOS รับภาพของผลไม้ ฮาร์ดแวร์คอมพิวเตอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นพิเศษและซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพเหล่านี้จะประมวลผลภาพที่รับได้จากกล้องเช่นเส้นผ่าศูนย์กลาง เส้นรอบวงของวัตถุหรือพื้นที่ที่ถูกฉายแสงของผลไม้ในลักษณะของภาพตัดขวาง 2 มิติ นอกเหนือจากกล้องวิดีโอแล้ว ส่วนประกอบฮาร์ดแวร์หลักคืออุปกรณ์ที่ให้แสงสว่างกับวัตถุ ซอฟต์แวร์จะทำการแปลงภาพให้อยู่ในรูปแบบตัวเลข (Brosnan และ Sun 2004) ซอฟต์แวร์จะทำการปรับปรุงภาพก่อนการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด เช่น Segmentation และ Profile Extraction ปัจจุบัน โรงงานบรรจุส่วนใหญ่จะใช้เทคโนโลยีวิทัศน์จักรกลแบบ 2 มิติ ในการคัดแยกขนาดด้วยแสง ตัวอย่างเช่น ผลไม้บนสายพานลำเลียงถูกตรวจโดยกล้อง Zenithal จากข้างบนที่มีหนึ่งตัวหรือมากกว่า บางครั้งติดตั้งกระจกด้านข้างเพื่อเพิ่มจำนวนของมุมมองในการตรวจสอบ Miller (1987) ได้รายงานว่า สำหรับการวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของผลไม้ สามารถใช้แสงที่ส่องจากด้านหลังของวัตถุเพื่อใช้ในการตรวจสอบได้ แต่โดยปกติจะใช้แสงที่ส่องจากด้านหน้ามากกว่าเพราะมันเป็นเรื่องง่ายที่จะสะท้อนข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการตรวจสอบวัตถุเช่น สีและตำหนิหรือความไม่สมบูรณ์ต่าง ๆ

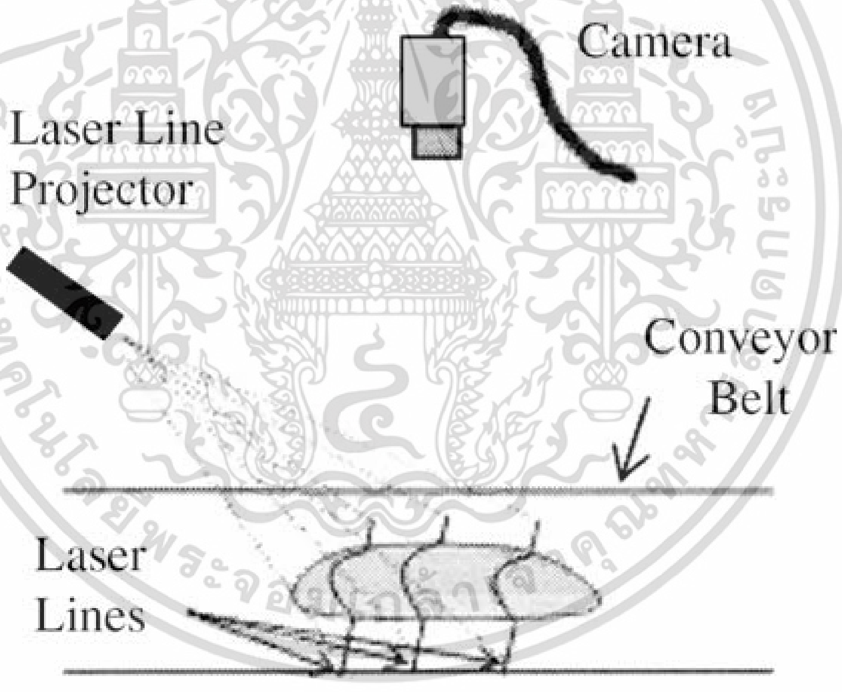
Forbes และ Tattersfield (1999b) ได้พัฒนาอัลกอริทึมของเครื่องวิทัศน์จักรกลวัดปริมาตรของผลไม้จากภาพดิจิตอล 2 มิติ วิธีการของพวกเขาเป็นการหมุนวัตถุให้มีค่าความเร็วคงที่ค่าหนึ่งและไม่ได้ใช้กลไกการลำเลียงสำหรับจัดเรียงผลไม้ให้เป็นแถว พวกเขาใช้ลูกแพร์ทำการทดลอง พวกเขารายงาน RMSPE 3% เมื่อทำการวิเคราะห์ภาพเดียวและ 1.9% เมื่อทำการวัดปริมาตรจากชุดภาพทั้งหมดสี่ภาพ Forbes (2000) รายงาน RMSPEs 1.6% 1.3% และ 5.3% สำหรับมะนาว ส้มและมันฝรั่งตามลำดับ เมื่อทำการวัดปริมาตรจากชุดภาพทั้งหมดสี่ภาพ

Aleixos (1999) และ Aleixos และคณะ (2002) ใช้เครื่องวิทัศน์จักรกลในการวัดปริมาตรของพืชตระกูลส้ม โดยกำหนดขอบเขตของภาพผลไม้และคำนวณพิกัดจุดศูนย์กลางจากนั้นพวกเขาคำนวณระยะห่างจากขอบของแต่ละพิกเซลไปยังจุดศูนย์กลาง แกนหลักตั้งอยู่ในทิศทางของระยะห่างสูงสุดในขณะที่แกนรองถูกกำหนดเป็นแนวตั้งฉากกับแกนหลักและผ่านจุดศูนย์กลาง อัลกอริทึมของพวกเขามีข้อได้เปรียบของความเป็นอิสระของการวางแนวผลไม้ที่ถูกนำไปใช้กับรูปภาพอินฟราเรดที่ต่อเนื่องกันเจ็ดรูปภาพของแต่ละผล ผลไม้จะถูกส่งโดยสายพานลำเลียงผ่านกล้องที่ความเร็ว 10 fruits/s สำหรับการคำนวณขนาดของส้ม โดยอ้างอิงเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำสุด สูงสุดและค่าเฉลี่ยของแกนหลักเจ็ดแกนและถูกวัดโดยเครื่องวิทัศน์จักรกล วิธีการคำนวณของเส้นผ่าศูนย์กลางมะนาวที่เกี่ยวข้องใช้ขั้นตอนเดียวกัน แต่แกนรองเจ็ดแกน เนื่องจากในมะนาวเส้นผ่าศูนย์กลางมีขนาดเล็กกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางทางด้านขั้ว ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเป็นค่า RMSE 1.98 mm สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยของแกนหลักขณะที่ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับมะนาวเป็นค่า RMSE 0.99 mm มีความแม่นยำมากขึ้นในการวัดขนาดของมะนาวเมื่อเทียบกับส้มเป็นเพราะรูปร่างด้านยาวของมะนาวที่มีผลในการหมุนรอบแกนเดียว ตรงกันข้ามส้มไม่มีแกนเดียวที่ตายตัวซึ่งทำให้มีความแปรปรวนของการวัดเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ระบบวิทัศน์จักรกลแบบ 3 มิติ (Active Triangulation)

ระบบนี้ใช้เทคนิคมากมายในการประมวลผลภาพ ซึ่งในอนาคตอาจจะแทนที่ระบบวิทัศน์จักรกล 2 มิติ ในการใช้งานที่หลากหลายเพราะกระบวนการตรวจสอบแบบอัตโนมัติมีความต้องการข้อมูล 3 มิติ มากขึ้นเพื่อปรับปรุงลักษณะของรูปทรงเรขาคณิตของผลิตภัณฑ์ที่ถูกตรวจสอบ (Poussart และ Laurendeau 1989 Hall-Holt และ Rusinkiewicz 2001 Jain 2003 Hardin 2006) Chen และคณะ (1989) ระบุว่าความสามารถของระบบ 2 มิติ อาจถูกจำกัด โดยข้อมูลที่ไม่เพียงพอที่ได้จากภาพ ข้อจำกัดที่ชัดเจนที่สุดของภาพ 2 มิติ คือการขาดข้อมูลเกี่ยวกับขนาดความสูงหรือความลึกและความเกี่ยวข้องกันต่าง ๆ ของขนาด ซึ่งนอกเหนือจากรูปทรงผลไม้และการสร้างโครงร่างของพื้นผิวมีบทบาทสำคัญในการประมาณค่าปริมาตรที่ถูกต้องและพื้นที่ของพื้นผิว ดังนั้น Miller และคณะ (1988) ที่ทำงานเกี่ยวกับผลไม้ตระกูลส้มระบุสองปัจจัยที่เป็นสาเหตุในการวัดปริมาตรไม่ถูกต้อง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการเพิ่มระบบการวัด 2 มิติสำหรับการประมาณค่า Lee และคณะ (2001) พบว่าด้วยความช่วยเหลือของระบบ 3 มิติ ทำให้ข้อผิดพลาดในการวัดค่าปริมาตรของหอยนางรมลดลง 41% RMSE ของระบบ 3 มิติ เป็น 0.7 ml เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการฉายแสงในระบบ 2 มิติ ที่เป็นแบบเดิม



รูปที่ 2.3 รูปแบบโครงสร้างที่มีความเรียบง่ายที่ประกอบด้วยเลเซอร์สามเส้นฉายลงบนชิ้นส่วนของอาหาร (Lee et al., 2003) © 2003 SPIE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ระบบวิทัศน์จักรกลแบบ 3 มิติ (Stereovision)

ระบบ Stereovision สามารถรับข้อมูล 3 มิติ จากภาพที่ถ่ายจากสองมุมมองที่แตกต่างกัน การแยกกันของทั้งสองมุมมองที่แสดงให้เห็นถึงความสมดุลระหว่างความต้องการความแม่นยำในการวัดค่าความลึกและความต้องการที่ว่าภาพสองภาพมีความคล้ายกันเพียงพอเพื่อให้สามารถใช้จุดที่ตรงกันบนวัตถุที่ถูกระบุไว้ในภาพทั้งสอง ดังนั้นความยากลำบากในการหาจุดที่ตรงกันระหว่าง Stereopair ของภาพที่เป็นหนึ่งในความท้าทายหลักสำหรับการประยุกต์ใช้งาน Stereovision ด้านการตรวจสอบการผลิตทางชีวภาพ Hryniewicz และคณะ (2005) ใช้ Stereovision สำหรับการสร้างแบบจำลองรูปทรง 3 มิติ ของแครอทและผลิตผลพืชสวนอื่น ๆ ด้วยการตัดขวางเป็นรูปวงกลม โดยการติดตั้งระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งประกอบด้วยกล้องเว็บแคมสองกล้องเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต และเครื่องฉายสไลด์เป็นแหล่งกำเนิดแสง การสร้างพื้นผิวของผลไม้ขึ้นมาใหม่นั้นอยู่บนพื้นฐานของ Extruding การตัดขวางที่เป็นรูปวงกลมต้องตัดตั้งฉากกับเส้นโค้ง 3 มิติ วิธีการคำนวณ Stereovision ศูนย์กลางและรัศมีของการตัดขวางที่เป็นรูปวงกลมที่แตกต่างกัน ในการทดลองได้ดำเนินการกับแอปเปิ้ลและมะเขือเทศ เส้นผ่าศูนย์กลางของผลไม้ที่ถูกวัดมีความถูกต้อง 5% ถึงแม้ว่าผู้เขียนไม่ได้ระบุว่าค่านี้สอดคล้องกับ RMSPE หรือพารามิเตอร์ทางสถิติอื่น ๆ พวกเขาสรุปว่าผลที่ได้สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นต่อได้ โดยได้รับภาพ Stereopair จากสถานที่หรือมุมมองที่แตกต่างกัน เป็นที่น่าสนใจการติดตั้งของรูปแบบหลังถูกใช้โดย Wu และคณะ (2004) เพื่อให้ได้รูปทรง 3 มิติ ของสุกรที่มีชีวิต ระบบการถ่ายภาพสเตอริโอประกอบด้วยกล้องหกกล้องกำหนดให้จับภาพมุมมองด้านข้าง ด้านบนและด้านหลังของหมูแต่ละตัว แต่ละชุดของ Stereoview ได้รับการประมวลผลภาพเพื่อสร้างภาพของสุกรแต่ละตัว ภาพสามมุมมองจะถูกรวมกันเพื่อสร้างรูปทรง 3 มิติ ที่สมบูรณ์

Sun และคณะ (2007) ได้พัฒนาระบบ Stereovision สำหรับการวัดความหนาของเมล็ดข้าวสาลีที่วางไว้บนถาด ภาพของ Stereopair ได้รับจากกล้องดิจิตอลหนึ่งกล้อง หลังจากที่รับภาพแรกแล้วนั้นกล้องจะย้ายจากมุมมองแรกไปตามรางและไปยังตำแหน่งที่สอง ดังนั้นการวัดที่เกิดขึ้นไม่ได้ดำเนินการตามเวลาจริง ขนาดพิกเซลของภาพสเตอริโอมีขนาดประมาณ 0.05 mm ความหนาของเมล็ดข้าวส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 1 mm และ 3 mm ใช้ค่าเฉลี่ยที่ 95% ของการวัดความหนา ผู้เขียนรายงาน RMSE ของการวัดสเตอริโอแบบอัตโนมัติของความหนาของเมล็ดข้าวเปรียบเทียบกับการวัดด้วยมือ 0.12 mm สำหรับกลุ่มเมล็ดข้าวขนาดใหญ่และ 0.17 mm สำหรับกลุ่มเมล็ดข้าวขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

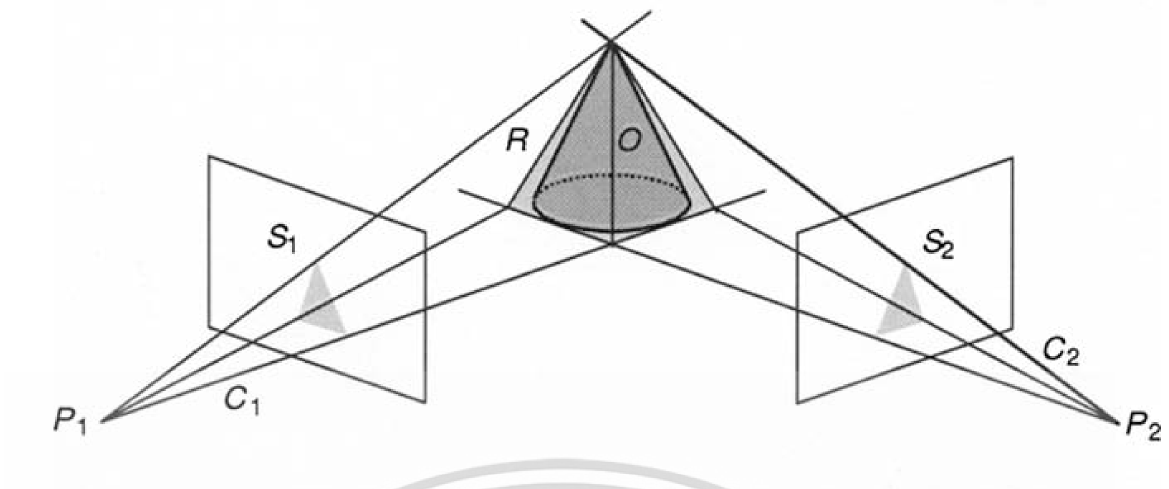
2.6 ระบบการรวมปริมาตร (Volume Intersection Method)

ด้วยวิธีการของระบบวิทัศน์จักรกล 3 มิติ วัตถุถูกสร้างขึ้นมาจากโครงร่าง 2 มิติหลาย ๆ โครงร่างที่ได้จากการฉายแสงจากมุมมองที่สอดคล้องกันและผลลัพธ์คือภาพกรวยตัดที่เป็นรูปตัน การแยกโครงร่างจากภาพและการรวมกันกับโครงร่างที่นำมาจากมุมมองต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน ข้อดีของระบบวิทัศน์จักรกลเปรียบเทียบกับ Stereovision คือเวลาในการคำนวณลดลงเพราะมันไม่จำเป็นที่จะหาจุดที่ตรงกันระหว่างภาพ ข้อดีอื่น ๆ คือสามารถสร้างโครงร่างขึ้นได้ง่ายและเทคนิคการประมวลผลภาพที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าได้มีการควบคุมพื้นหลังของภาพ ดังรูปที่ 2.4 แสดงโครงร่างสองโครงร่างแบบ 2 มิติ ภาพ S1 และ S2 ได้จากการถ่ายภาพของวัตถุ O จากสองมุมมองที่แตกต่างกัน P1 และ P2 ซึ่งสอดคล้องกับจุดหลักของกล้อง โครงร่างและมุมมองจากรูปกรวย C1 และ C2 โครงร่างคลายรูปกรวยหรือการฉายแสงแบบ Perspective ของวัตถุที่มองจากมุมมองที่จุดหลัก จุดตัดของกรวยจะแสดงเป็น R วัตถุเป็น O ในรูปเป็นรูปกรวยที่ล้อมรอบด้วยพื้นที่ R ถ้าเราประมวลผลกับโครงร่างหลาย ๆ โครงร่าง โครงร่างที่ได้จากมุมมองที่แตกต่างกันคือพื้นที่ R และจะใกล้เคียงกับรูปทรง O

Imou และคณะ (2006) ใช้วิธีการระบบวิทัศน์จักรกลที่ง่ายเพื่อสร้างรูปทรง 3 มิติของสตรอเบอร์รี่ วิธีการที่ง่ายของพวกเขาเกี่ยวกับการสร้างภาพฉายโครงร่างของสตรอเบอร์รี่ ภาพฉายโครงร่างสอดคล้องเหมือนกันมากกว่าภาพฉายกรวยและเข้าใจง่ายมีประโยชน์เมื่อวัตถุที่ถูกตรวจสอบมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางของวัตถุจากกล้องเช่นในกรณีของสตรอเบอร์รี่ ผู้เขียนใช้เก้าโครงร่างที่ได้จากกล้องหนึ่งกล้องและกระจกเก้าแผ่น ความแตกต่างระหว่างโครงร่างที่ได้รับจากระบบวิทัศน์จักรกลแบบเลเซอร์สแกนเนอร์ 98.3% สำหรับผลไม้ RMSEs ของรูปร่างที่ถูกสร้างขึ้นมาใหม่อยู่ระหว่าง 0.5 mm และ 2 mm และไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสตรอเบอร์รี่และ RMSEs

Lee และคณะ (2006) ใช้วิธีการระบบวิทัศน์จักรกลแต่พวกเขาไม่ได้ใช้วิธีที่แตกต่างกันกับ Imou และคณะ (2006) หรือใช้กล้องหลาย ๆ กล้องโดย Chalidabhongse และคณะ (2006) แต่พวกเขาวางวัตถุที่ตรวจสอบบนจานหมุน โดยการหมุนของจานมีมุมคงที่ ติดตั้งกล้องคงที่สร้างชุดของโครงร่างจากจากทิศทางที่แตกต่างกัน ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพวกเขาแต่ละภาพโครงร่างถูกทำเป็นภาพตัดขวางของวัตถุที่ถ่ายในตำแหน่งมุมที่กำหนดไว้ ระบบได้รับการพัฒนาในการวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรของผลไม้ เพื่อประเมินความแม่นยำในการวัดปริมาตรของระบบวิทัศน์จักรกลของพวกเขา ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่ใช้ในการอ้างอิงอยู่บนพื้นฐานของหลักการของ Archimedes ในแคนตาลูป สตรอเบอร์รี่ แอปเปิ้ลและมะเขือเทศ สำหรับแอปเปิ้ลพวกเขาได้ค่า RMSE 6 ml และ RMSPE 1.9% พวกเขาสรุปว่าความแม่นยำของวิธีการของพวกเขาขึ้นอยู่กับช่วงเวลาเชิงมุมของระบบการถ่ายภาพ กล่าวคือตำแหน่งของมุมมองเช่นเดียวกันกับผิวหน้าที่เว้าของวัตถุที่ตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

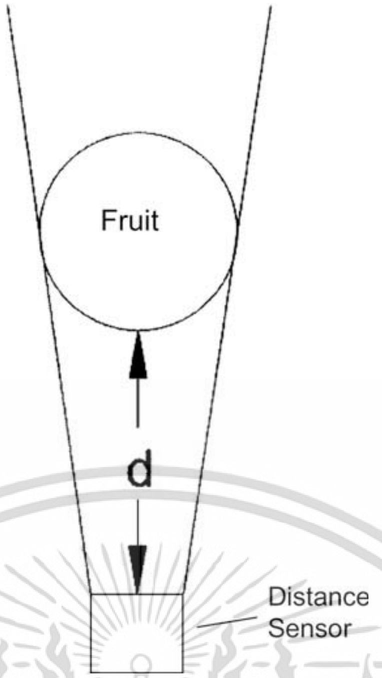


รูปที่ 2.4 หลักการของวิธีการรวมปริมาตร

2.7 ระบบการวัดขนาดของผลไม้ด้วยอัลตราโซนิก

ระบบนี้เป็นระบบอัลตราโซนิกที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Laing และคณะ (1995) ซึ่งประกอบด้วยขาตั้งกล้องคว่ำขึ้นสามขาดังรูปที่ 2.5 แต่แตกต่างจากขาตั้งกล้องถ่ายภาพธรรมดา โดยขาตั้งนี้ได้รับการแก้ไขให้มุมที่เกิดขึ้นจากขาทั้งสามขาคงที่ และสามารถวัดขนาดของผลไม้ที่มีกิ่งก้านของต้นไม้ติดอยู่ได้ เมื่อใส่ผลไม้เข้าไปในขาตั้งกล้องที่คว่ำ ผลไม้ก็จะเลื่อนลงไปจนมันติดอยู่ที่จุดที่มีขนาดเท่ากับขนาดของผลไม้ ผลไม้ที่มีขนาดใหญ่จะติดไกลจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก ในขณะที่ผลไม้ขนาดเล็กจะลื่นลงไปและติดอยู่ใกล้กับเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก หลักการวัดอาศัยการกระจายหรือการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงไปกระทบกับพื้นผิวของวัตถุ คลื่นความถี่สูงนี้จะสะท้อนกลับ โดยช่วงเวลาของการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่างระหว่างวัตถุกับเซนเซอร์ หรือ Time of Flight (TOF) ได้ทำการทดลองวัดขนาดของมะนาวกับอุปกรณ์ชุดนี้ และใช้เวอร์เนียวัดความหนาเพื่อเป็นการสอบเทียบ ค่าที่ได้ RMSE 1.1 mm และ RMSPE 2.0% ใช้เวลาในการวัด 10 s/fruit เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกได้ถูกนำมาใช้สำหรับการวัดขนาดผลไม้ในสายการบรรจุ ยกตัวอย่างเช่น Miller (1993) ทำการเปรียบเทียบเซ็นเซอร์กล้องวิดีโอกับเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกซึ่งทั้งสองมีความเร็วในการทำงานที่ 5 cups/s lane ระบบอัลตราโซนิกวัดได้เฉพาะเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของผลไม้ แต่เซ็นเซอร์ทั้งสองมีความแม่นยำในการวัดขนาดที่สูงมาก เมื่อทำการทดสอบกับชุดของส้มโอเทียม เมื่อเปรียบเทียบกับการวัดความหนาของเส้นผ่าศูนย์กลางผลไม้ ด้วยเวอร์เนีย (ความผิดพลาด 1.7% สำหรับระบบกล้องและ 1.8% สำหรับระบบอัลตราซาวนด์) ค่าที่ได้การทดลองซ้ำของทั้งสองระบบก็ยังมีค่าที่สูง (CVs 0.46% และ 0.48% สำหรับกล้องและระบบอัลตราซาวนด์ตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผนผังของระบบขาตั้งกล้องคว่ำสำหรับการกำหนดขนาดของผลไม้ โดย TOF ของคลื่นอัลตราโซนิก

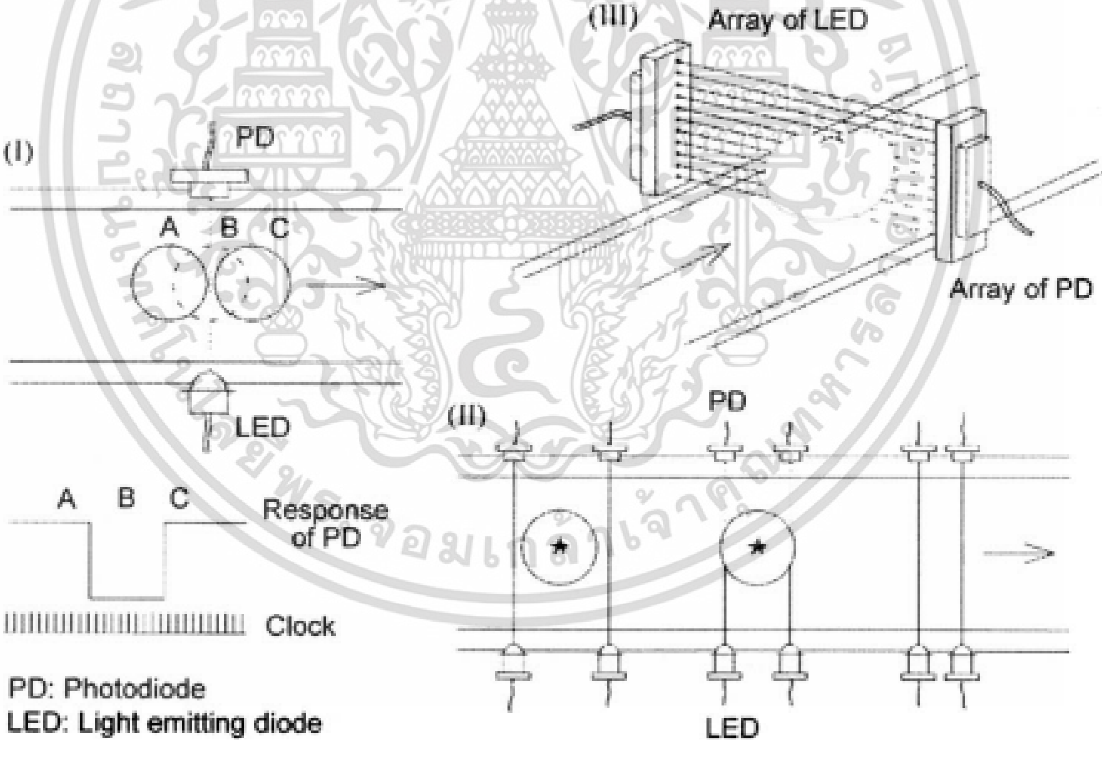
2.8 ระบบ Air Pycnometers

ในสถานการณ์ของผลไม้ที่มีการเติบโตอย่างต่อเนื่องจะดีกว่าที่จะประเมินปริมาตรของผลไม้ด้วยการเคลื่อนที่ของอากาศโดยใช้ Air Pycnometer เพราะว่าการจุ่มผลไม้ลงไปในน้ำสามารถทำเกิดเชื้อราตามมา Air Pycnometer จะขึ้นอยู่กับกฎของแก๊สทางอุดมคติ (Boyle-Mariotte) ข้อเสียหลักของเครื่องมือนี้คือใช้เวลาในการวัดนาน Yraguen และคณะ (2006) ได้การออกแบบ Air Pycnometer แบบพกพาที่จะวัดปริมาตรของกลุ่มองุ่นที่มีเถาติดมาด้วยได้ ใช้เทคนิคการสอบเทียบการถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรแทนการวิเคราะห์ทางกฎของแก๊สทางอุดมคติที่มีค่าใกล้เคียงกันและอ้างอิงปริมาตรจากวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ อุปกรณ์ของพวกเขาส่งผลให้ค่า RMSE 19.3 ml และ RMSE 3.8% หนึ่งรอบการวัดที่สมบูรณ์แบบสำหรับหนึ่งพวง ใช้เวลาประมาณ 45 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ระบบ Optoelectronic คัดแยกขนาดโดยใช้หลักการพื้นฐานการปิดกั้นแสง

Iwamoto และ Chuma (1981) อธิบายระบบ Optoelectronic คัดแยกขนาดโดยใช้หลักการพื้นฐานการปิดกั้นแสงดังนี้ ประเภทที่หนึ่ง รูปที่ 2.6 วัดความกว้างทางด้านแนวนอนของผลไม้ในทิศทางของการเคลื่อนที่ ระบบประกอบด้วยตัวส่งและตัวรับแสง วางไว้ที่ด้านตรงข้ามของสายพานลำเลียง มีให้ช่องว่างระหว่างตัวส่งและรับแสง เมื่อไม่มีวัตถุปิดกั้นแสง ๆ ที่ปล่อยออกจากตัวส่ง เมื่อผลไม้เคลื่อนที่ผ่านแสง ๆ จะถูกปิดกั้น สำหรับความเร็วในการลำเลียงผลไม้ที่ใช้คัดแยกขนาดของผลไม้ มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาของการปิดกั้นแสง ประเภทที่สอง สามารถวัดค่าความกว้างทางด้านแนวนอนของผลไม้ในทิศทางของการเคลื่อนที่ ระบบประกอบไปด้วยตัวส่งกับตัวรับแสง ที่ตรงกันอยู่ที่ด้านตรงข้ามของสายพานลำเลียง ตัวส่งกับตัวรับแสงจะถูกจัดเรียงเป็นคู่ระยะห่างภายในคู่จะลดลงในทิศทางไปข้างหน้า ระยะจะถูกกำหนดตามขนาดของผลไม้เชิงพาณิชย์สำหรับการผลิต เมื่อผลไม้อยู่บนสายพานลำเลียงและถึงคู่ตัวส่งกับตัวรับแสง ตัวส่งกับตัวรับทั้งสองจะถูกปิดกั้นพร้อมกัน ผลไม้ที่ได้จากการคัดแยกขนาดจะตรงกับระยะห่างภายในคู่ตัวส่งกับตัวรับแสง ประเภทที่สาม วัดความกว้างทางด้านแนวตั้งหรือความสูงของผลไม้ในขณะที่มันผ่านม่านแสง (Arrays of Optical Transducers) แถวด้านหนึ่งเป็นอุปกรณ์ LED และอีกด้านหนึ่งเป็น โฟโตไดโอด ทำหน้าที่รับแสงจาก LED



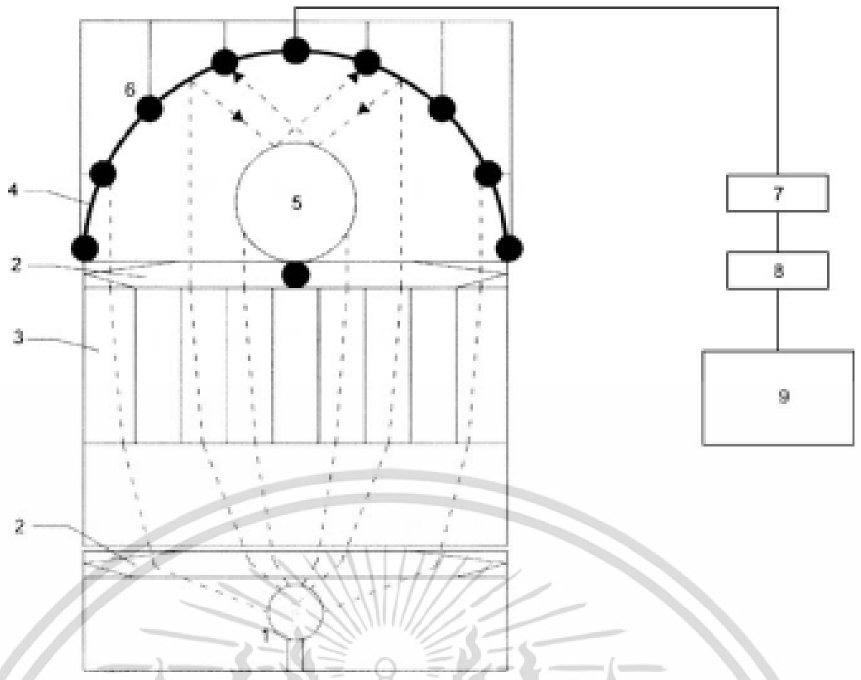
รูปที่ 2.6 แสดงระบบ Optoelectronic คัดแยกขนาดสามประเภท โดยใช้หลักการพื้นฐานการปิดกั้นแสง (Iwamoto และ Chuma, 1981)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 ระบบวิทัศน์จักรกลจอประสาทตาเทียม

Kanali และคณะ (1998) ได้พัฒนาเครื่องต้นแบบระบบวิทัศน์จักรกลจอประสาทตาเทียม ในการวิเคราะห์ภาพดิจิตอลแบบเทคนิคทั่ว ๆ ไปสำหรับการตรวจสอบผลผลิตทางการเกษตร ภาพของผลผลิตจะถูกบันทึกไว้เป็นภาพแรกโดยกล้องวิดีโอแล้วสัญญาณวิดีโอจะถูกแปลงเป็นดิจิทัลและถูกวิเคราะห์ในที่สุด แต่ด้วยระบบจอประสาทตาเทียมข้อมูลที่ได้รับมาถูกส่งโดยตรงไปยังขั้นตอนการประมวลผล ที่สามารถยกตัวอย่างได้เช่นวิธี Charge Simulation Method (CSM) ถึงแม้ว่าส่วนใหญ่วิธีของเครื่อง 3 มิติ จะขึ้นอยู่กับการวิเคราะห์ภาพ ซึ่งมักจะมีการทำงานที่เกี่ยวข้องกันก่อนการประมวลผลเช่นการลดสัญญาณรบกวน การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานเช่นการตรวจหาขอบของวัตถุ กระบวนการดึงโครงร่างของแสงที่ต้องการออกจากภาพและการเปรียบเทียบรูปทรงที่เหมือนกัน การใช้งานของจอประสาทตาเทียม ซึ่ง CSM ไม่จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ภาพดิจิตอล สิ่งนี้เป็นประโยชน์มากเพราะการวิเคราะห์ภาพดิจิตอลมักจะต้องใช้ซอฟต์แวร์พิเศษและมีราคาแพงในการประมวลผลภาพให้สำเร็จ ประโยชน์จากแนวคิดของจอประสาทตาเทียมก็คือ Photosensors ที่ใช้ในอุปกรณ์นี้มีราคาถูกกว่า CCD หรือ CMOS เซ็นเซอร์ของกล้องวิดีโอ ข้อเสียของแนวคิดจอประสาทตาเทียมก็คือว่ามันไม่สามารถคำนวณขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของผลไม้ได้เท่านั้น (Gall et al., 1998) ต้นแบบระบบวิทัศน์จักรกลจอประสาทตาเทียม พัฒนาโดย Kanali และคณะ (1998) การถ่ายโอนข้อมูลที่ได้เป็นรูปแบบเรตินาซึ่งก็เหมือนกับฮาร์ดแวร์ต้นแบบ ต้นแบบนี้ถูกประกอบด้วยห้องครึ่งวงกลม (เรตินาเทียม) พร้อมกับ Photosensors จำนวนมากหรือเซลล์ประสาทสัมผัสหนึ่งในองค์ประกอบเหล่านี้ตั้งอยู่ที่ศูนย์กลางของ Fresnel Lens วางที่ฐานของซีกครึ่งทรงกลมและวางอยู่ที่เสาของซีกครึ่งทรงกลมดังรูปที่ 2.7 และส่วนที่เหลือมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอบนเส้นรอบวงหลายเส้นบนพื้นผิวของซีกครึ่งทรงกลม ที่ความสูงที่แตกต่างกันจากฐาน Photosensors วัดการกระจายของความเข้มของแสงขึ้นอยู่กับภาพที่สร้างขึ้น โดยขนาดที่แตกต่างกันของวัตถุ 3 มิติที่วางอยู่ในจอประสาทตา การทำงานของเซลล์ประสาทสัมผัสคือการได้รับข้อมูลรูปร่างหลักซึ่งนั้นก็จะถูกบีบอัดโดยใช้ CSM เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบของพวกเขา Kanali และคณะ (1998) ดำเนินการทดสอบในส้มและมะเขือ พวกเขาได้รับอัตราการจำแนกขนาดโดยรวม 99% และ 74% สำหรับส้มและมะเขือตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 โครงร่างของระบบวิทัศน์จักรกลจอประสาทตาเทียม (วาดโดย Kanali และคณะ 1998) หมายเลขอ้างอิง: 1 หลอดฮาโลเจนทังสเตน 2 เลนส์ Fresnel 3 ตัวปรับลำแสง 4 จอประสาทตาเทียม 5 ผลไม้ที่ใช้ในการตรวจสอบ 6 เซ็นเซอร์ภาพ 7 หน่วยการถ่ายโอนข้อมูล 8 A/D Converter และ 9 คอมพิวเตอร์

2.11 เปรียบเทียบระบบต่าง ๆ

ตอนนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการตรวจวัดปริมาตรที่แตกต่างกัน เพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจ ได้สรุปคุณสมบัติหลักบางส่วนของเทคนิคต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งค่า RMSE ได้รวมอยู่ในตารางที่ 2.1 ทุกระบบที่อธิบายไว้ข้างต้น ระบบวิทัศน์จักรกล 2 มิติ ใช้อย่างแพร่หลายมากที่สุด เพราะนอกเหนือไปจากขนาดและรูปร่าง ยังใช้ในแยกประเภทผลผลิตตามสีของพื้นผิวและข้อบกพร่องภายนอกต่าง ๆ โดยทั่วไปเทคโนโลยีวิทัศน์จักรกล 2 มิติ และเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเหมาะสมกับผลผลิตใด ๆ เครื่องขัดแยกผลผลิตแบบวิสัยทัศน์จักรกลมีความรุนแรงมากกว่าเครื่องขัดแยกน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์ ตั้งแต่การหมุนผลไม้เพื่อการตรวจสอบทุกพื้นผิวของผลไม้ ซึ่งสามารถทำให้เกิดความเสียหายจากการขัดถูกับผิวของผลไม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วสูง ในทางตรงกันข้าม การหมุนผลไม้เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการดูผิวของผลไม้ทั้งหมดและคัดแยกตามสีหรือตามจำนวนและขนาดของสิ่งบกพร่องต่าง ๆ ภายนอก ข้อจำกัดในการใช้ของเครื่องวิสัยทัศน์จักรกลในการตรวจสอบผลผลิตทางการเกษตรคือการสะท้อนของแสง ผลผลิตทางการเกษตรมีแนวโน้มที่จะเปียก เซ็นเซอร์ CCD และ CMOS ของกล้องวีดิโอมักจะใช้ตัวกรองแสงสะท้อน (เช่นการตรวจสอบของส้ม แอปเปิ้ลและผลไม้เคลือบมันอื่น ๆ) โดยการติดตั้งเลนส์กรองแสงที่กล้องวิดีโอ อีกตัวเลือกหนึ่งคือใช้กล้องที่ใช้เซ็นเซอร์แบบ Charge Injection Device (CID) จะกรองแสงสะท้อนได้อย่างง่ายดายกว่ากล้องที่ใช้เซ็นเซอร์แบบ CCD หรือ CMOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเครื่องขัดแยกแบบอื่น ๆ เช่นอัลตราซาวนด์ดูเหมือนจะประสบความสำเร็จเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเครื่องมืออัลตราโซนิกแบบพกพาที่พัฒนาโดย Laing และคณะ (1995) ดูเหมือนว่าเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการตรวจวัดแบบไม่ทำลาย มีประโยชน์ในเรื่องความเร็วที่สูงกว่าระบบ Air Pycnometer ที่พัฒนาโดย Iraguen และคณะ (2006) อย่างไรก็ตามทั้งสองระบบเป็นแบบพกพา Laing และคณะ (1995) และ Iraguen และคณะ (2006) แต่ไม่อาจเทียบเท่าอย่างเต็มที่ได้เพราะพวกเขาออกแบบใช้กับผลผลิตที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 สรุปวิธีการตรวจวัดของผลผลิตทางการเกษตรต่าง ๆ

Technology	Video-camera based	No. dimensions	Commodity	RMSE[a]	RMSPE[b] (%)	On-line throughput (fruits/s lane)	Reference	Cost of equipment
Optical ring sensor	No	3D	Zucchini	26 ml	5.8	8	Moreda (2004)	Low
			Kiwifruit[c]	6.9 ml	5.6	13		
			Kiwifruit[d]	1.8 mm	2.9	13		
Electrical capacitance	No	3D	Watermelon[d]	26 ml	0.4	0.4	Kato (1997)	Low
2-D machine vision	Yes	2D	Pear	4.1 ml	1.9	Value not available	Forbes (2000)	Medium
2-D machine vision	Yes	2D	Tangerine	2.0 mm	Value not available	10	Aleixos et al. (2002)	Medium
			Lemon	1 mm		10		
Active triangulation	Yes	3D	Oyster meat	0.7 ml	Value not available	5[e]	Lee et al. (2003)	Medium
Stereovision	Yes	3D	Wheat grain	0.1 mm	Value not available	Currently off-line	Sun et al. (2007)	Low
Volume intersection method	Yes	3D	Apple	6 ml	1.9	Currently off-line	Lee et al. (2006)	Low
Volume intersection method	Yes	3D	Strawberry	0.5–2 mm	2.5	Currently off-line	Imou et al. (2006)	Low
Ultrasound (inverted tripod)	No	3D	Lemon[d]	1.1 mm	2.0	Off-line (portable, 10 s/fruit)	Laing et al. (1995)	Low
Air pycnometer	No	3D	Grape cluster	19.3 ml	3.8	Off-line (portable, 45 s/cluster)	Iraguen et al. (2006)	Low

a คือ ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Squared Error, RMSE)

ค่า mm หมายถึงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแกนของผลไม้มีหน่อยเป็นมิลลิเมตร

ค่า ml หมายถึงปริมาตรของผลไม้มีหน่อยเป็นมิลลิลิตร

b คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ของค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Squared Percentage Error, RMSPE)

c คือ ไม่มีการเคลื่อนที่แกว่งไปมาขณะที่ผลไม้เคลื่อนที่ตัดกับเซ็นเซอร์วงแหวน

d คือ จำเป็นต้องกำหนดการวางผลไม้ในการตรวจวัด

e คือ หน่วยที่สอดคล้องกับการวัด ต้องมีความเข้มงวดคือ (ชิ้นส่วนของเนื้อหอยนางรม)/s lane แทนด้วย fruits/s lane การอ้างอิงนี้ใช้ในผลิตภัณฑ์สัตว์ที่ถูกรวมไว้สำหรับการเปรียบเทียบเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ประเภทของเทคโนโลยีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตเครื่องคัดขนาด

Technology	References
SBMVGBFOC[a]: Optical ring sensor	Gall (1997), Gall et al. (1998), Moreda (2004), Moreda et al. (2007)
SBMVGBFOC: Electrical capacitance	Kato (1997)
SBMVGBFOC: Helmholtz resonator	Nishizu et al. (2001)
Blocking of light[b]	Iwamoto and Chuma (1981), Fon et al. (1990), Chen et al. (1992), Hahn (2002)
Ultrasound TOF[c]	Miller (1993), Laing et al. (1995)
2D machine vision	Sarkar and Wolfe (1985), Marchant et al. (1989), Marchant (1990), Miller (1990), Aleixos (1999), Forbes and Tattersfield (1999b), Bato et al. (2000), Forbes (2000), Aleixos et al. (2002), Sabliov et al. (2002), Blasco et al. (2003), etc.
3D machine vision: Passive stereovision	Hryniewicz et al. (2005), Sun et al. (2007)
3D machine vision: Volume intersection method (Shape from silhouettes)	Chalidabhongse et al. (2006), Imou et al. (2006), Lee et al. (2006)
3D machine vision: Active triangulation	Chen et al. (1989), Sakai and Yonekawa (1992), Thomson and Pomeranz (1991), Hatou et al. (1996), Lee et al. (2001), Lee et al. (2003)
Computed tomography (CT)	Maisl et al. (2006)
Magnetic resonance imaging (MRI)	Andaur et al. (2004)
Artificial retina	Kanali et al. (1998)
Microwave	De Waal et al. (1988)

a คือ SBMVGBFOC: Systems based on measuring the volume of the gap between the fruit and an outer casing.

b คือ The optical ring sensor also belongs to this category.

c คือ TOF: Time of flight.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การเก็บข้อมูลสามมิติ (3D Range Acquisition)

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

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

3.1.1 หลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไป (Time of Flight)

การวัดระยะทางวิธีนี้จะใช้การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปยังวัตถุที่ต้องการ เมื่อสัญญาณนี้กระทบกับวัตถุมันก็จะสะท้อนกลับมาที่ตัวรับ ซึ่งรูปแบบของสัญญาณมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน และระยะทางหาได้จากผลคูณระหว่างความเร็วกับเวลา โดยสามารถที่จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \tag{3.1}$$

เมื่อ

d คือ ระยะทางจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปยังวัตถุ (เมตร)

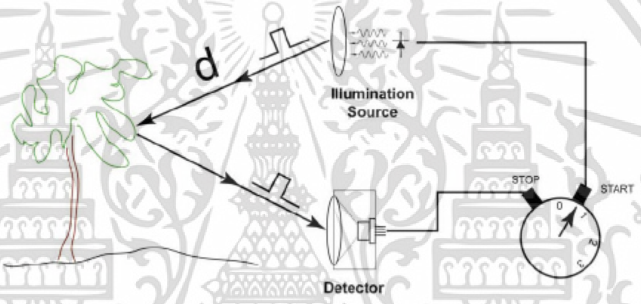
v คือ ความเร็วขึ้นอยู่กับชนิดของสัญญาณที่ใช้ (เมตร/วินาที)

t คือ เวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปและสะท้อนกลับมา (วินาที)

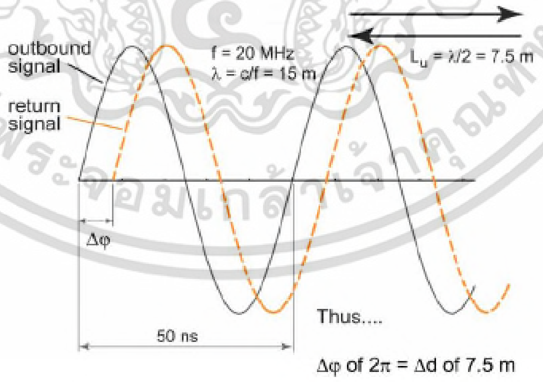
โดยคุณสมบัติของสัญญาณโดยทั่วไปที่ต้องคำนึงถึงที่นำมาใช้ในหลักการของเวลาที่สูญเสียไปนี้แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ มุมเบี่ยงเบนของสัญญาณ และความเร็วของสัญญาณซึ่งมุมเบี่ยงเบนของสัญญาณที่ส่งออกไปมีมุมกว้างแต่วัตถุมีขนาดเล็ก จะทำให้ระยะทางที่คำนวณได้มีความแม่นยำลดลงเพราะสัญญาณจะครอบคลุมบริเวณได้กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่มีมุมแคบกว่า ซึ่งทำให้มีความแม่นยำมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 3.1 หลักการวัดระยะทางโดยใช้คลื่นแสง



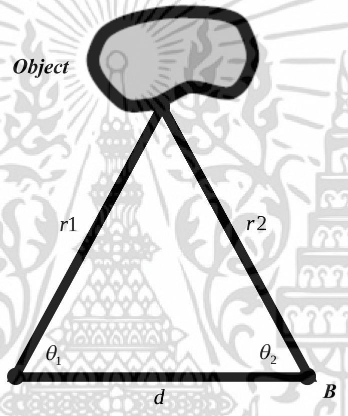
รูปที่ 3.2 ความต่างของมุมเฟสที่สะท้อนกลับมาเมื่อกระทบวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3.1.2 หลักการของรูปสามเหลี่ยม (Triangulation)

เราอาจจะคุ้นเคยกับแนวความคิดของการนำหลักการของรูปสามเหลี่ยมมาวัดระยะทาง สมมุติว่ามีเครื่องมืออยู่สองตัวซึ่งวางห่างกันเป็นระยะทางที่แน่นอน (d) อุปกรณ์ A และ B จะเก็บตำแหน่งบนวัตถุที่ตำแหน่งเดียวกันดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การวัดระยะทางโดยหลักการของรูปสามเหลี่ยม

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

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

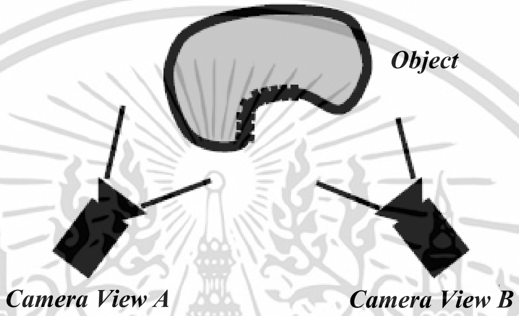
$$r_2 = \frac{d\sin\theta_1}{\sin\left(180^\circ - (\theta_1 + \theta_2)\right)} \tag{3.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดระยะทางโดยใช้หลักการรูปสามเหลี่ยมจะเป็นพื้นฐานในการวัดระยะทางแบบต่าง ๆ ซึ่งหลักการรูปสามเหลี่ยมจะแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ซึ่งวิธีแรกเรียกว่าแบบแอคทีพ (Active) จะใช้เครื่องมือเก็บภาพ 1 ตัวร่วมกับเครื่องกำเนิดแสงอีก 1 ตัว อีกวิธีเรียกว่าแบบพาสซีพ (Passive) จะใช้เครื่องมือเก็บภาพ 2 ตัว เช่นกล้องวีดีโอเป็นต้น

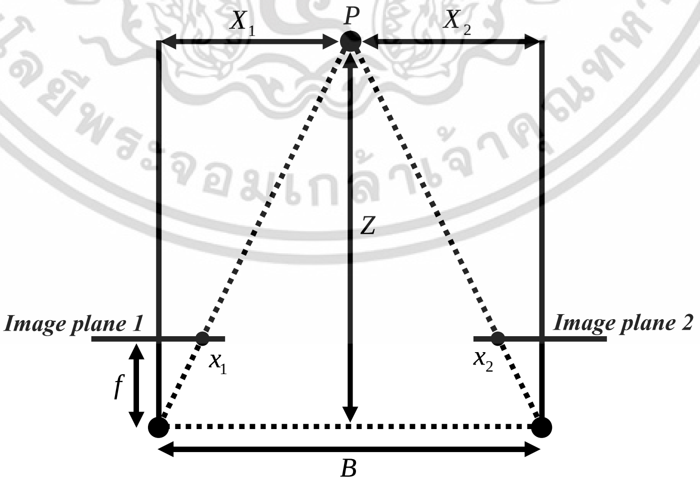
3.1.3 หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีพ (Passive Triangulation)

วิธีนี้บางครั้งถูกเรียกว่าสเตอริโอวิชั่น (Stereo Vision) อธิบายได้เหมือนกับการใช้ตาทั้งสองของมนุษย์ในการวัดระยะทาง ในวิธีนี้ใช้กล้องวีดีโอเป็นเครื่องมือที่ใช้เก็บภาพ โดยใช้กล้องวีดีโอทั้งสองตัววางห่างกันในระยะทางที่แน่นอนดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 หลักการของระบบสเตอริโอวิชั่น (Stereo Vision)

หลักการของสเตอริโอวิชั่นหรือรูปสามเหลี่ยมแบบพาสซีพเป็นการหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ โดยอาศัยความแตกต่าง (Disparity) ของจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพของกล้องทั้งสอง ซึ่งในการคำนวณหาระยะทางโดยวิธีนี้สามารถอธิบายได้ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การวัดระยะทางในระบบสเตอริโอวิชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

กล้องที่ 1

$$\frac{x_1}{f} = \frac{X_1}{Z} \tag{3.4}$$

กล้องที่ 2

$$\frac{x_2}{f} = \frac{X_2}{Z} \tag{3.5}$$

และ

$$X_2 = X_1 + B \tag{3.6}$$

นำสมการที่ 2.6 แทนลงในสมการที่ 2.5 เขียนใหม่ได้เป็น

$$B + X_1 = \frac{Z \cdot x_2}{f} \tag{3.7}$$

นำสมการที่ 2.7 ลบสมการที่ 2.4 ดังนั้นระยะทาง Z จะหาได้ดังสมการที่ 2.8

$$Z = \frac{B \cdot f}{x_2 - x_1} \tag{3.8}$$

โดยกำหนดให้

Z คือ ระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ P

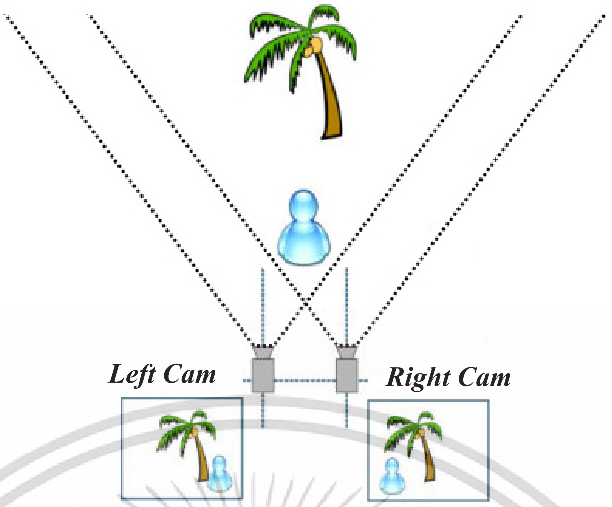
B คือ ระยะทางระหว่างกล้องทั้งสองตัว

f คือ ความยาวโฟกัสของกล้องทั้งสองตัว

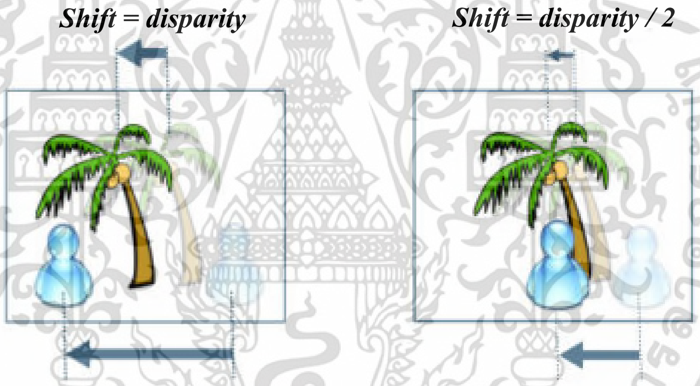
x_1, x_2 คือ ระยะจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



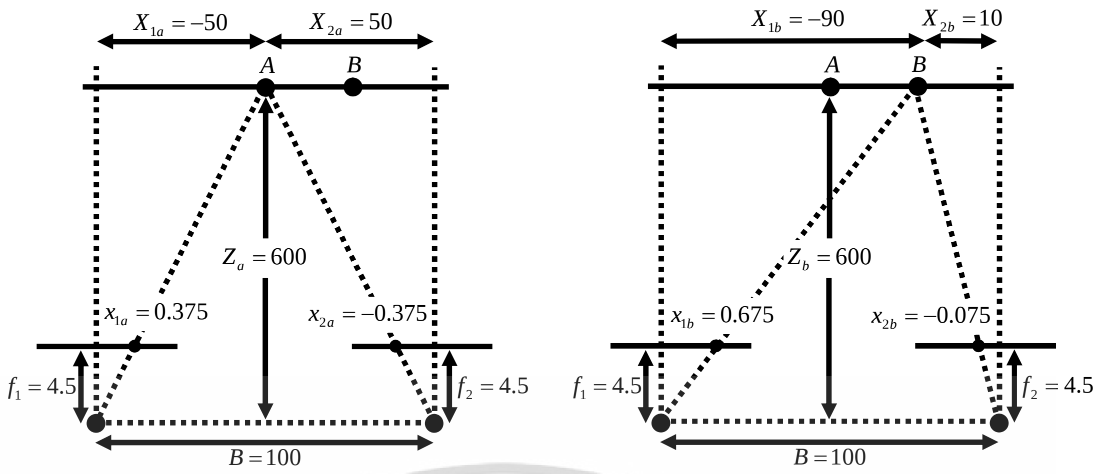
รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายสเตอริโอที่ได้จากกล้องซ้ายและกล้องขวา



รูปที่ 3.7 ภาพความแตกต่างของกล้องทั้งสองเมื่อนำมารวมกัน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ระยะทางที่จุด *A* (ข) ระยะทางที่จุด *B*

รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ

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

$$Z_a = \frac{B \cdot f_1}{x_{2a} - x_{1a}} \qquad (3.9)$$

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

$$= 600 \text{ มม.}$$

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

$$Z_a = \frac{B \cdot f_1}{x_{2a} - x_{1a}} \qquad (3.10)$$

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

$$= 600 \text{ มม.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าในระบบสเตอริโอนั้นความแม่นยำของการหาระยะทางจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดภาพที่ตรงกันหรือสอดคล้องกันของภาพที่ได้จากระนาบของกล้องทั้งสองตัว และตำแหน่งของสองจุดภาพนี้จะต้องคำนวณให้ถูกต้องด้วย ซึ่งกลายเป็นปัญหาหลักที่เกิดขึ้นเสมอกับวิธีนี้ และปัญหาดังกล่าวนี้ได้ถูกเรียกว่า ปัญหาการหาจุดสอดคล้องกันของกล้องทั้งสองตัว (Correspondence Problem) ในทางอุดมคติมันเป็นไปได้ในการหาจุดภาพจากกล้องตัวที่หนึ่งซึ่งสอดคล้องกับจุดภาพจากกล้องตัวที่สอง แต่ในความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถรับประกันได้ว่า สองจุดภาพซึ่งมีค่าระดับสีหรือระดับเกรย์ที่เหมือนกันจะเป็นจุดภาพบนวัตถุจุดเดียวกัน ในการหาจุดภาพจุดเดียวกันของภาพ 2 ภาพจากกล้องทั้งสองไม่ยากนัก ถ้าหากภาพวัตถุที่เกิดขึ้นในภาพทั้งสองมีรูปร่างเหมือนกัน อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยสำหรับวิธีนี้ก็คือ ภาพวัตถุที่เกิดขึ้นในภาพทั้งสองมีลักษณะรูปร่างไม่เหมือนกัน ยิ่งไปกว่านั้นวัตถุในภาพแรกอาจจะดูมืดมัวไม่ชัดเจนหรือไม่ปรากฏรูปร่างวัตถุขึ้นในภาพที่สอง ในการแก้ไขเราสามารถลดระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสอง เพื่อช่วยลดปัญหาการหาจุดสอดคล้องกันของกล้องทั้งสองตัว แต่ในการลดระยะห่างนี้จะเป็นผลทำให้ความแม่นยำของระบบลดลงตามไปด้วย

ปัญหาการหาจุดสอดคล้องกันของกล้องทั้งสองตัวที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไข และทำให้ลดลงได้ด้วยการตัดอุปกรณ์เก็บภาพออกไป 1 ตัว ซึ่งมันจะไม่ถูกเรียกว่าวิธีสเตอริโอวิชั่นอีกต่อไป อย่างไรก็ตามหลักการของรูปสามเหลี่ยมยังคงนำมาใช้กับวิธีนี้ได้ โดยการแทนกล้องตัวที่ตัดออกไปด้วยเครื่องกำเนิดแสงและเรียกวิธีนี้ว่าหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีพ ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป

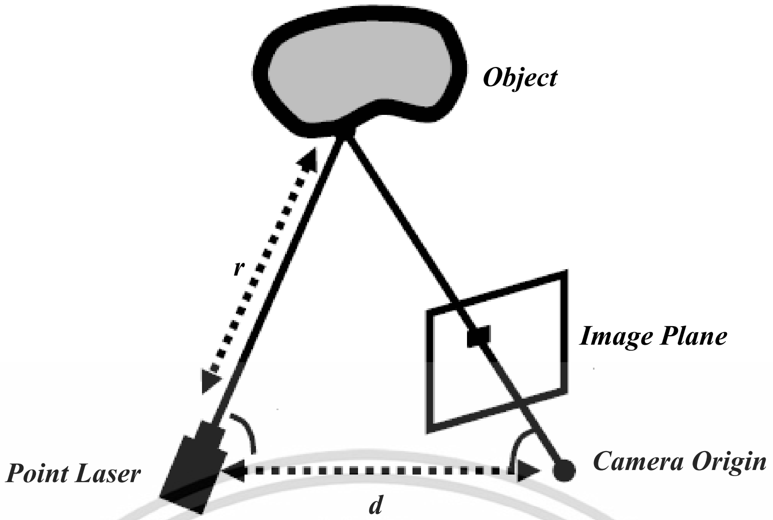
3.1.4 หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีพ (Active Triangulation)

หลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีพจะแตกต่างกับวิธีแบบพาสซีพ คือการใช้เครื่องกำเนิดแสงร่วมกับกล้องวีดีโอเพียง 1 ตัว โดยเครื่องกำเนิดแสงจะเป็นแบบจุด แบบลายเส้น ซึ่งภาพที่ได้เราจะนำจุดภาพที่ถูกแสงกระทบหรือถูกฉายมาคำนวณหาระยะทาง

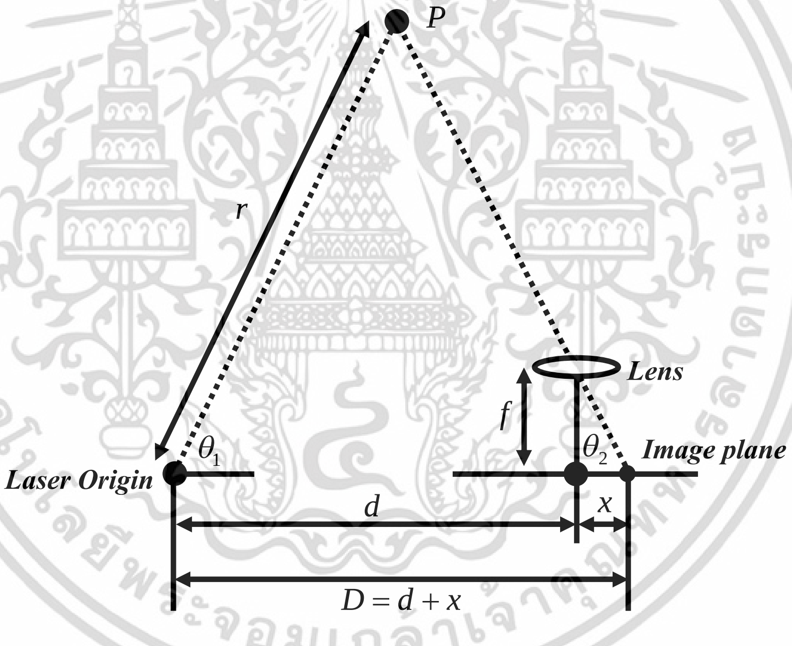
3.1.4.1 วิธีฉายแสงแบบจุด (Light Spot Triangulation)

สมมุติว่าเราฉายลำแสงไปบนวัตถุดังรูปที่ 3.9 ลำแสงดังกล่าวจะสร้างจุดแสงบนวัตถุและจะสะท้อนไปยังกล้องวีดีโอ โดยระยะห่างระหว่างกล้องวีดีโอกับเครื่องกำเนิดแสงเป็นระยะ d จะเห็นว่าเกิดเป็นรูปสามเหลี่ยมขึ้นระหว่างเครื่องกำเนิดแสง วัตถุและกล้องวีดีโอ ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาระยะทาง r จากกล้องวีดีโอไปยังจุดบนวัตถุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบจุด



รูปที่ 3.10 การวิเคราะห์ระยะทางของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีพ

จุดแสงที่สะท้อนไปยังกล้องวิดีโอจะเกิดเป็นจุดภาพขึ้น จุดภาพนี้พบได้ง่ายซึ่งมันจะเป็นจุดที่มีความสว่างมากที่สุด ในการคำนวณหาระยะทาง r นั้นสามารถคำนวณหาได้จากมุม θ_1, θ_2 และระยะทาง d ซึ่งมุม θ_2 คำนวณได้จากความยาวโฟกัสของกล้องวิดีโอ (f) ซึ่งมีค่าคงที่กับระยะห่างจากศูนย์กลางเลนส์กล้องกับจุดภาพ (x) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.10 ดังนั้นมุม θ_2 สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และระยะทางระหว่างเครื่องกำเนิดแสงและจุดภาพนั้นสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$D = d + x \tag{3.12}$$

เมื่อ

f คือ ความยาวโฟกัสของกล้องวิดีโอ

x คือ ระยะห่างจากศูนย์กลางของเลนส์กล้องกับจุดภาพที่ได้

d คือ ระยะห่างคงที่ระหว่างเครื่องกำเนิดแสงกับกล้องวิดีโอ

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

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

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

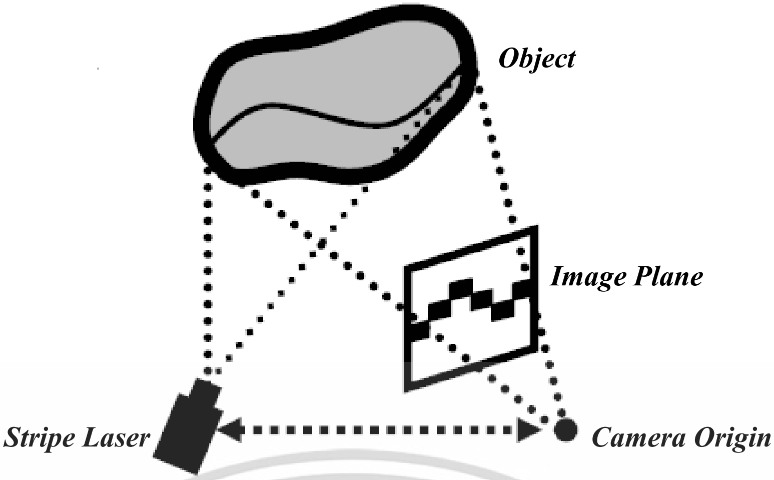
ในวิธีนี้เมื่อต้องการหาระยะทางที่จุดอื่น ๆ บนวัตถุจะต้องเลื่อนจุดแสงไปทั่วตลอดภาพ ซึ่งต้องใช้เวลานานมาก ส่วนเครื่องกำเนิดแสงที่นิยมใช้ได้แก่ แสงอินฟาเรดและแสงเลเซอร์ โดยสามารถใช้ได้ดีและไม่จำเป็นต้องใช้เฉพาะที่มืด ห้องที่มีระดับแสงปกติก็สามารถใช้ได้แต่ควรติดตั้งตัวกรองแสง (Filter) ไว้ที่ด้านหน้าของกล้องด้วยเพื่อลดปริมาณแสงบริเวณห้องนั้น แสงเลเซอร์เป็นแสงที่ดีที่สุดเพราะให้จุดแสงที่ชัดเจนและมีขนาดเล็กมากและการกระจายของแสงน้อยเป็นผลให้สามารถใช้ในระยะทางที่ไกล ๆ ได้ดี

3.1.4.2 วิธีฉายแสงแบบลายเส้น (Light Stripe Triangulation)

หลักการฉายแสงแบบลายเส้นเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีฉายแสงแบบจุด โดยลายเส้นของแสงจะได้จากการฉายแสงผ่านร่องแสงหรือจากเครื่องกำเนิดแสงแบบจุดผ่านเลนส์ที่มีลักษณะกลมซึ่งทำให้แสงที่ได้กลายเป็นเส้นแสง โดยทำการฉายแสงที่ได้นี้ไปยังวัตถุและใช้กล้องเก็บลายเส้นที่เกิดขึ้นบนวัตถุ ดังรูปที่ 3.11 โดยลายเส้นจะถูกแบ่งออกเป็นจุดภาพย่อย ๆ และระยะทางจะคำนวณที่แต่ละจุดตามลายเส้น ส่วนวิธีการคำนวณหาระยะทางจะเหมือนกับวิธีการฉายแสงแบบจุดทุกประการรวมทั้งการวางและติดตั้งอุปกรณ์ก็มีความเหมือนกัน

ข้อดีของวิธีการฉายแสงแบบลายเส้นเดี่ยวคือง่ายและรวดเร็วกว่าวิธีการฉายแสงแบบจุด นอกจากนั้นขอบเขตและพื้นที่ของวัตถุ สามารถหาได้โดยการต่อที่จุดปลายของแต่ละลายเส้นเข้าด้วยกัน ดังนั้นวิธีการใช้แสงแบบลายเส้นนี้สามารถใช้ในการแบ่งย่านภาพวัตถุ (Image Segmentation) ได้อีกด้วย

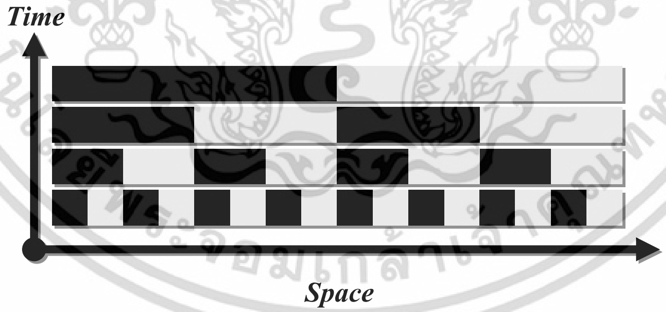
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบเส้น

3.1.5 เทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสไบนารี่ (Binary Code Pattern)

วิธีนี้จะใช้เครื่องกำเนิดแสงร่วมกับกล้องวิดีโอ ซึ่งส่วนมากนิยมใช้โปรเจคเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการฉายแสง โดยแสงที่ฉายไปยังวัตถุจะเป็นรหัสไบนารี่ (Binary Code) [15] และใช้กล้องวีดีโอเก็บภาพแสงที่กระทบกับวัตถุ ซึ่งข้อมูลภาพที่ได้นี้จะเป็นข้อมูลของระยะทางบนตำแหน่งของวัตถุซึ่งจะถูกเข้ารหัสเป็นระดับความสว่างและความมืดของแสง โดยจุดของภาพที่มีความสว่างจะเป็น “1” และจุดของภาพที่มีความสว่างน้อยหรือมืดจะเป็น “0” จึงจำเป็นต้องนำรหัสบนจุดภาพดังกล่าวไปถอดรหัสและคำนวณเพื่อทำการหาระยะทางจริงบนวัตถุ

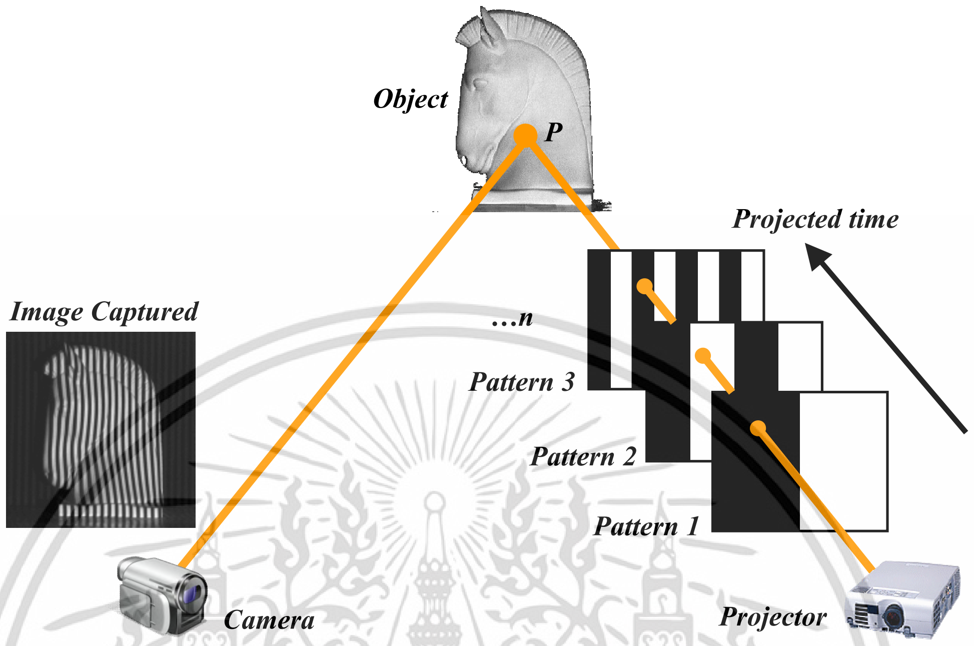


รูปที่ 3.12 ฉากรหัสไบนารี่ (Binary Code Pattern) [15]

ในรูปที่ 3.13 สมมุติใช้ฉากจำนวน 3 ฉาก จุด P ซึ่งอยู่บนผิวของวัตถุจะถูกเข้ารหัสเป็นระดับมืดหรือ “0” โดยฉากที่ 1 บิตนี้ถูกกำหนดเป็นบิตที่อยู่ซ้ายมือสุดเป็นบิตที่มีค่าประจำหลักมากที่สุด (Most Significant Bit: MSB) เมื่อเปลี่ยนฉากเป็นฉากที่ 2 จะถูกเข้ารหัสใหม่เป็นระดับสว่างหรือ “1” และในฉากที่ 3 จะถูกเข้ารหัสใหม่เป็นระดับมืดหรือ “0” ซึ่งในบิตนี้ถูกกำหนดเป็นบิตที่อยู่ขวามือสุดเป็นบิตที่มีค่าประจำหลักน้อยที่สุด (Least Significant Bit: LSB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำข้อมูลในแต่ละฉากที่ได้มาอนุกรมกันดังนั้นจุด P จะถูกเข้ารหัสเป็น “101” ดังนั้นถ้าหากใช้ฉากจำนวน n ฉากก็จะสามารถรหัสได้เป็น 2^n ถ้าสมมุติว่าใช้ฉากจำนวน 7 ฉากก็จะเข้ารหัสให้มีความละเอียดได้เป็น 2^7 หรือ 128 รหัส



รูปที่ 3.13 เทคนิคการฉายแสงผ่านรหัสไบนารี่ (Binary Code Pattern)

(ก) (ข) (ค) (ง)

รูปที่ 3.14 ภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารี่

การเปลี่ยนภาพรหัสไบนารี่ไปเป็นข้อมูลระยะทางนั้น จะนำภาพวัตถุที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารี่ไปเปรียบเทียบกับภาพวัตถุที่ระดับแสงปกติ โดยเปรียบเทียบทีละจุดภาพแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าเบี่ยงเบน (Deviation) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง เพื่อเป็นการแยกภาพที่ได้จากการฉายแสงผ่านฉากไบนารี่ให้ได้เป็นภาพ 2 ระดับ (Binary Image) จากนั้นนำข้อมูลแต่ละจุดของภาพมาอนุกรมกันจะได้ข้อมูลไบนารี่ขนาด 7 บิต ซึ่งก็คือข้อมูลระยะทางของแต่ละจุดบนภาพนั่นเองจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 127 ถ้าหากใช้จำนวนฉากเท่ากับ 7 ฉาก โดยระยะทางจริงจะได้จากการแปลงข้อมูลไบนารี่เป็นตัวเลขฐานสิบซึ่งสามารถแปลงได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

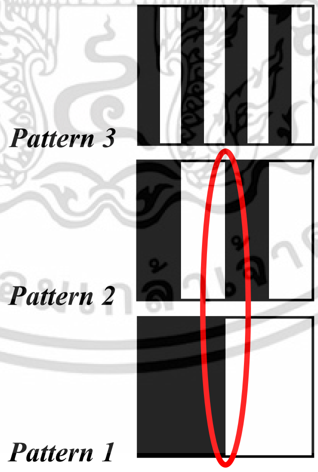
$$d = \sum_{i=0}^{n-1} \left(B_{(i)} \times 2^i \right) \quad (3.15)$$

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

ข้อมูลระยะทางที่ $B_{(120,80)} = \left(B_{(0)} \times 2^0\right) + \left(B_{(1)} \times 2^1\right) + \left(B_{(2)} \times 2^2\right) + \ldots + \left(B_{(6)} \times 2^6\right)$

$$= (1 \times 1) + (0 \times 2) + (1 \times 4) + \ldots (0 \times 64) \quad = 53$$

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

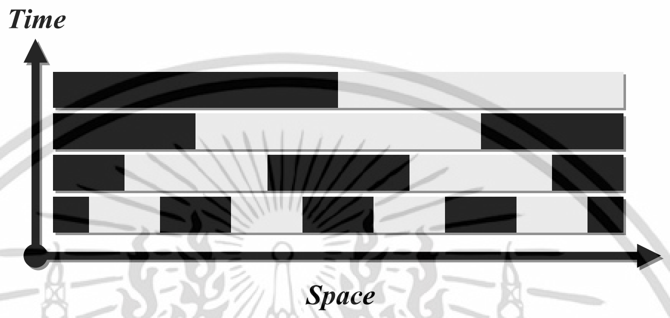


รูปที่ 3.15 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสไบนารี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 เทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสเกรย์ (Gray Code Pattern)

เนื่องจากเทคนิคการฉายแสงด้วยรหัสไบนารี่จะมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นที่บางตำแหน่งบนวัตถุ โดยเฉพาะบริเวณร่องแสงที่ติดกัน เพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าวจึงเปลี่ยนการเข้ารหัสระยะจากการใช้รหัสไบนารี่ด้วยการใช้รหัสเกรย์ [15] [16] [17] เนื่องจากทั้งรหัสไบนารี่ และรหัสเกรย์ต่างก็เป็นเลขฐานสองจึงสามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้ ลักษณะการฉายแสงและการวางตำแหน่งของอุปกรณ์สามารถใช้วิธีการเดียวกับการใช้รหัสไบนารี่ เพียงแต่รหัสเกรย์มีขั้นตอนในการแปลงข้อมูลที่ซับซ้อนกว่า ส่วนในการคำนวณหาระยะทางจะเหมือนกันทุกประการ



รูปที่ 3.16 ฉากรหัสเกรย์ (Gray Code Pattern)

การเปลี่ยนภาพรหัสเกรย์เป็นข้อมูลระยะทางจะเหมือนกับการเปลี่ยนของภาพรหัสไบนารี่ ซึ่งจะนำจุดภาพที่ตำแหน่งเดียวกันของทุกภาพที่ได้จากการฉายฉากรหัสเกรย์ มาทำการอนุกรมกันจะได้เป็นข้อมูลรหัสเกรย์แล้วเปลี่ยนเป็นข้อมูลรหัสไบนารี่โดยบิตที่เป็นบิตที่อยู่ซ้านมือสุด (MSB)

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

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

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

จากนั้นทำการเปลี่ยนข้อมูลรหัสไบนารี่ที่ได้ให้เป็นข้อมูลระยะทางอีกครั้งโดยที่

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

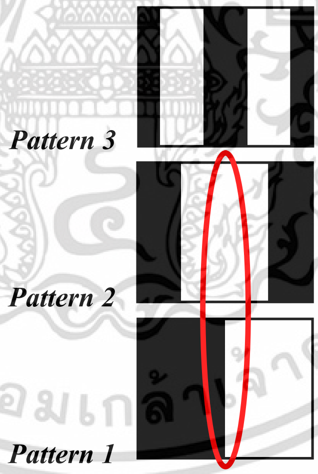
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$d_{(120,80)} = \left(B_{(0)} \times 2^0\right) + \left(B_{(1)} \times 2^1\right) + \left(B_{(2)} \times 2^2\right) + \ldots + \left(B_{(6)} \times 2^6\right)$$

$$= (1 \times 1) + (0 \times 2) + (1 \times 4) + \ldots (0 \times 64) = 53$$

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



รูปที่ 3.17 ความผิดพลาดจากความเหลื่อมล้ำของร่องแสงที่อยู่ติดกันในฉากรหัสเกรย์

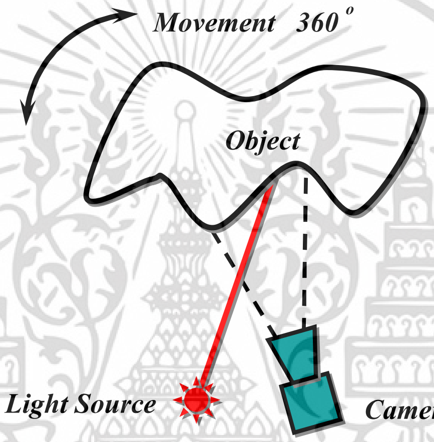
3.2 รูปแบบการสแกนวัตถุ (Scanning Patterns)

การสแกนวัตถุเป็นรูปแบบในการเก็บข้อมูลสามมิติของวัตถุต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่สามารถแบ่งลักษณะของการสแกนวัตถุได้เป็น 3 แบบ คือ การสแกนโดยการหมุนวัตถุ 360 องศา การสแกนโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ และการสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การสแกนโดยการหมุนวัตถุ

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

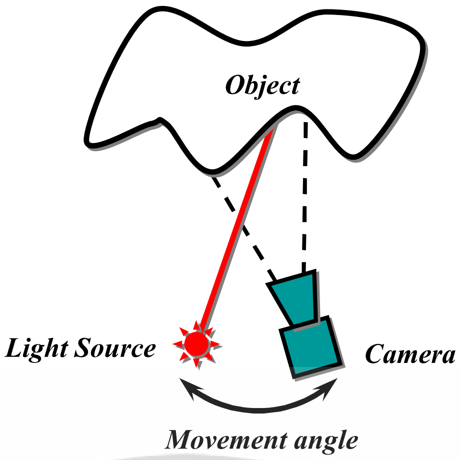


รูปที่ 3.18 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนวัตถุ

3.2.2 การสแกนโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ

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

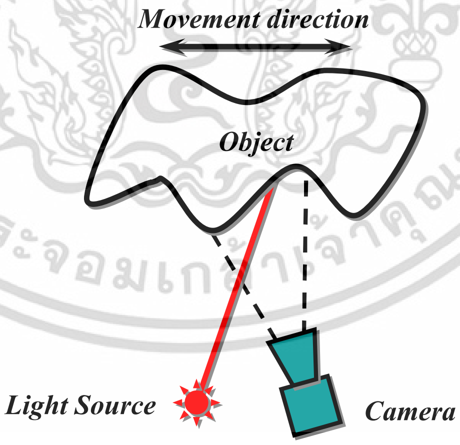
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 รูปแบบการสแกนวัตถุโดยการหมุนทำมุมของแสงหรืออุปกรณ์จับภาพ

3.2.3 การสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุ

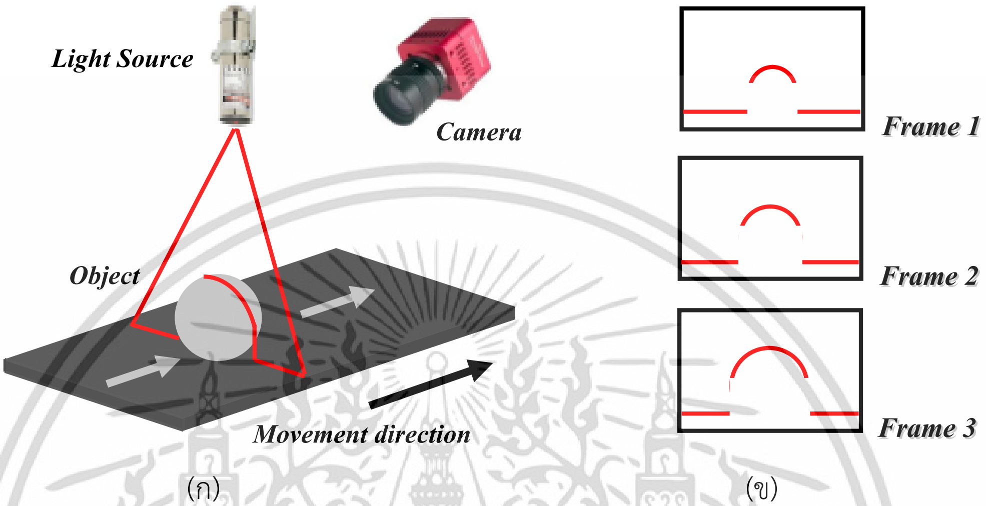
การสแกนโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือเรียกว่า การสแกนโดยการใช้แสงแบ่งส่วนของวัตถุ (Light-Sectioning) เป็นเทคนิคการวัดรูปทรงแบบตัดขวางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในขบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ [14] [15] ซึ่งการสแกนโดยการใช้แสงแบ่งส่วนของวัตถุเป็นส่วนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย ซึ่งวิธีนี้เปรียบเสมือนจะเป็นการแบ่งวัตถุ 3 มิติออกเป็นส่วนย่อย ๆ (2 มิติ) ตามแนวความยาวของวัตถุ โดยการฉายแหล่งกำเนิดแสงลงบนพื้นผิววัตถุเพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงตกกระทบ ซึ่งส่วนมากแล้วแหล่งกำเนิดแสงจะใช้เส้นเลเซอร์สีแดง เนื่องจากการนำมาวิเคราะห์และประมวลผลทำได้ง่าย นอกจากนั้นยังช่วยลดขั้นตอนในการแบ่งส่วนวัตถุกับภาพพื้นหลัง



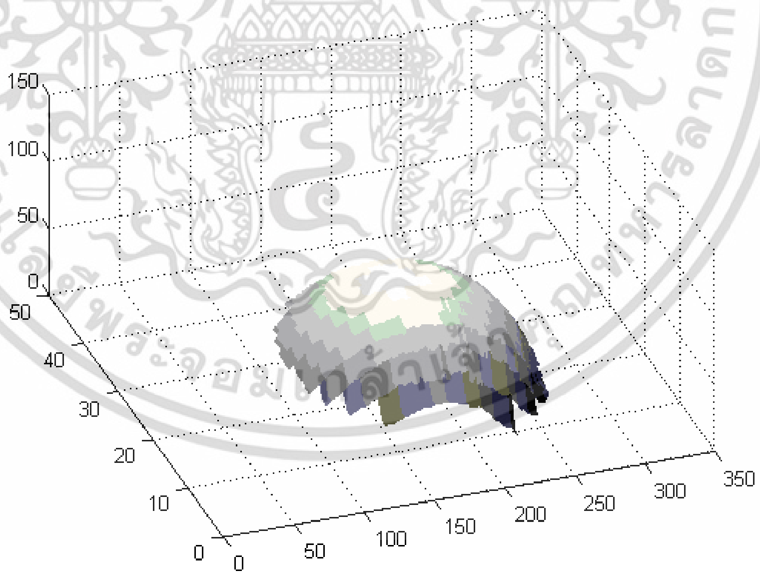
รูปที่ 3.20 การสแกนโดยการใช้แสงแบ่งส่วนวัตถุ (Light-Sectioning)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแสงที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพและบันทึกไว้ด้วยกล้องที่วางทำมุมเอียงกับแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งข้อมูลของภาพที่ได้มาจะเปรียบเสมือนเป็นข้อมูลความหนาและความกว้างในแต่ละจุดบนพื้นผิววัตถุ เมื่อทำการเคลื่อนที่วัตถุก็จะได้ข้อมูลในส่วนต่อไปของวัตถุในลักษณะของภาพตัดขวางของแต่ส่วน และนำภาพตัดขวางแบบ 2 มิติแต่ละส่วนของวัตถุมารวมกันเพื่อสร้างเป็นภาพตัดขวาง 3 มิติที่เป็นตัวบอกได้ถึงความกว้าง ความสูง และความยาวของวัตถุนั้น ๆ [12]



รูปที่ 3.21 (ก) การเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านเส้นแสง (ข) ภาพที่ได้ในเฟรมต่าง ๆ เมื่อมีวัตถุตัดผ่าน



รูปที่ 3.22 ตัวอย่างการนำภาพตัดขวางแต่ละส่วนมารวมกันเพื่อสร้างภาพตัดขวาง 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.21 (ข) แสดงภาพที่ได้จากกล้องในเฟรมต่าง ๆ [12] เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่านทำให้เส้นแสงเลเซอร์เปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามพื้นผิวของวัตถุ โดยรูปร่างของเส้นแสงที่ได้จะบอกถึงคุณลักษณะของวัตถุสามารถที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติ 2 มิติในเชิงระยะพิกัดหรือขนาดของวัตถุที่จะบอกถึงความกว้างและความสูง นอกจากนั้นเมื่อให้วัตถุเคลื่อนที่โดยความเร็วที่สอดคล้องกับความเร็วในการเก็บภาพของกล้อง (Frame per Second) แล้วทำการเก็บข้อมูลภาพอย่างต่อเนื่อง เมื่อนำข้อมูลภาพที่ได้ในแต่ละส่วนที่เป็น 2 มิติของวัตถุมาต่อ ๆ กันจะทำให้เกิดคุณลักษณะของวัตถุใน 3 มิติ ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติที่เป็นขนาดของวัตถุทั้ง ความกว้าง ความยาว และความหนาของวัตถุ รวมทั้งพื้นที่โดยรวมของวัตถุซึ่งปกตินิยมใช้หลักการของรูปสามเหลี่ยมมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีข้อจำกัดคือถ้าการติดตั้งไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของหลักการรูปสามเหลี่ยมเช่น ระยะห่างระหว่างกล้องกับแหล่งกำเนิดแสงรวมทั้งการทำมุมของกล้องหรือแหล่งกำเนิดแสงมีการคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งนอกจากนั้นหลักการของรูปสามเหลี่ยมมีข้อจำกัดในเรื่องขนาดของวัตถุไม่สามารถทำการขยายย่านในการตรวจวัด (Non Scale-Up)

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

3.3 วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central of Gravity: COG)

วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central of Gravity: COG) คือการหาค่าเฉลี่ยของพิกัดของภาพจากแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนวัตถุ เนื่องจากแสงเลเซอร์มีความกว้างและความเข้มแสงที่ไม่เท่ากันทุกจุด การหา COG คือการหาค่าถ่วงน้ำหนัก ในแต่ละคอลัมน์ของภาพ เพื่อทำการแยกพิกัดที่สอดคล้อง (Profile Extraction) กับวัตถุมากที่สุด จากตัวอย่างการหา COG คือการหาจุดในแต่ละคอลัมน์ที่สัมพันธ์กับแสงเลเซอร์เพื่อให้เข้าใจง่ายจึงยกตัวอย่างการคำนวณ COG จากสมการที่ 2.19 เป็นการคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Center of gravity)

$$COG = \frac{\sum y.I(y,x)}{\sum I(y,x)} = \frac{Wm}{m} \qquad (3.19)$$

เมื่อ $I(y,x) >$ Threshold

เมื่อ กำหนดค่า Threshold = 30

$I(y,x)$ คือ ความเข้มของระดับสีเทา

y คือ แถวในแนวแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

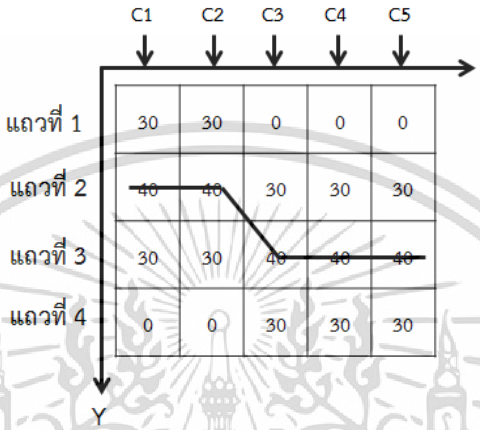
ตัวอย่างการคำนวณมีดังนี้

มีขนาดเมทริกซ์ 4x5 พิกเซลค่าภายในเมทริกซ์คือค่าความเข้มของระดับสีเทา (Intensity) ใช้ค่าเทรสโฮล์ 30 ในการคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Center of Gravity) ของเมทริกซ์ 4x5 พิกเซล

กำหนดให้ [11]

Wm = ผลรวมของค่าความเข้มของระดับสีเทาคูณกับค่าตำแหน่งของแถว y

m = ผลรวมของค่าความเข้มระดับสีเทา



รูปที่ 3.23 เมทริกซ์ขนาด 4x5

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

$$(C1)\ COG\ (X=1)\ =\frac{Wm}{m}=\frac{(1x30)+(2x40)+(3x30)+(4x0)}{30+40+30+0}=2 \tag{3.20}$$

$$(C2)\ COG\ (X=2)\ =\frac{Wm}{m}=\frac{(1x30)+(2x40)+(3x30)+(4x0)}{30+40+30+0}=2 \tag{3.21}$$

$$(C3)\ COG\ (X=3)\ =\frac{Wm}{m}=\frac{(1x0)+(2x30)+(3x40)+(4x30)}{0+30+40+30}=3 \tag{3.22}$$

$$(C4)\ COG\ (X=4)\ =\frac{Wm}{m}=\frac{(1x0)+(2x30)+(3x40)+(4x30)}{0+30+40+30}=3 \tag{3.23}$$

$$(C5)\ COG\ (X=5)\ =\frac{Wm}{m}=\frac{(1x0)+(2x30)+(3x40)+(4x30)}{0+30+40+30}=3 \tag{3.24}$$

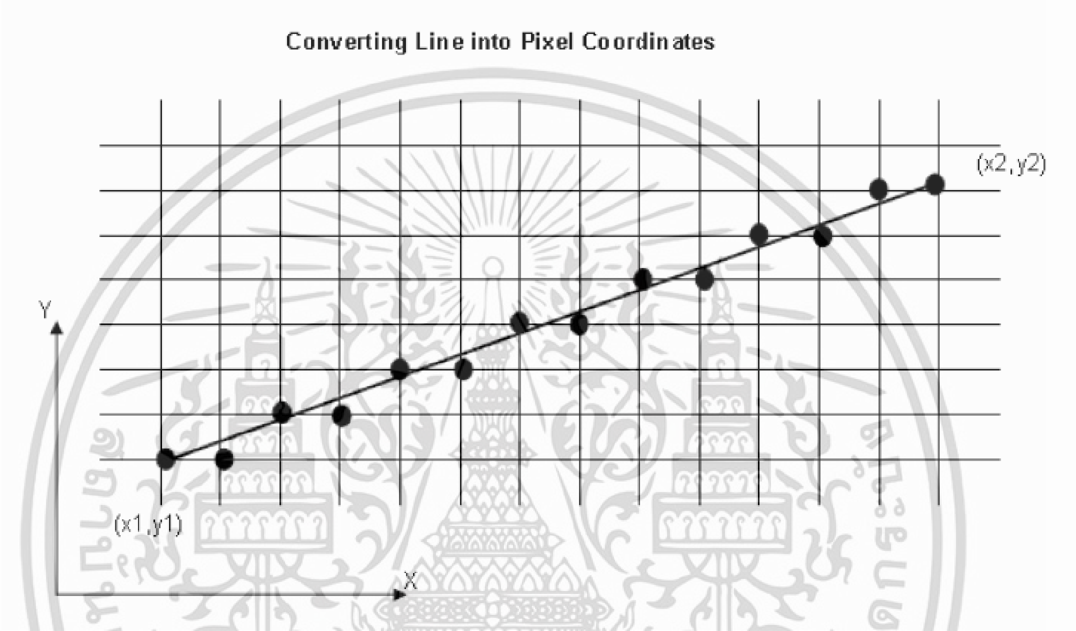
ผลลัพธ์ที่ได้คือ ค่าพิกัด X และ Y โดยที่ X เป็นคอลัมน์ที่ 1, 2, 3 … n สัมพันธ์กับค่าของ Y เป็นค่าแถวที่ 1, 2, 3 … n

ดังนั้นคำตอบที่ได้คือ (X, Y) = {(1, 2), (2, 2), (3, 3), (4, 3), (5, 3)}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 อัลกอริทึมเส้นตรง (Bresenham's Line Algorithm)

ในการแสดงพิกัดของภาพดิจิตอลปกติจะบอกในลักษณะของจุดภาพ (พิกเซล) ซึ่งอาจเรียกอีกชื่อว่าอุปกรณ์ราสเตอร์ (Raster Devices) เช่น จอภาพหรือเครื่องพิมพ์ ในการวาดเส้นตรงลงบนอุปกรณ์ประเภทนี้ จะใช้การเชื่อมจุดระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของเส้นตรง ดังนั้นถ้าอุปกรณ์มีความละเอียดสูง จะทำให้ได้รูปเส้นตรงที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าจอภาพที่มีความละเอียดต่ำ ในรูปที่ 3.24 แสดงกระบวนการวาดเส้นตรงบนอุปกรณ์ประเภทราสเตอร์โดยการตัดกันของเส้นแสดงถึงตัวแทนของจุดภาพ และเส้นตรงแสดงถึงเส้นตรงที่ต้องการวาด



รูปที่ 3.24 แสดงการสร้างเส้นตรงบนจอภาพ

ในแต่ละตำแหน่งบนแกน X ของจอภาพ จะต้องคำนวณหาเลขจำนวนเต็มที่จะใช้แทนค่า y เนื่องจากการอ้างอิงจุดภาพจะเป็นจำนวนเต็มเสมอ โดยต้องเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่า y ที่แท้จริงมากที่สุด โดยวิธีที่ง่ายที่สุดคือการใช้สมการเส้นตรง

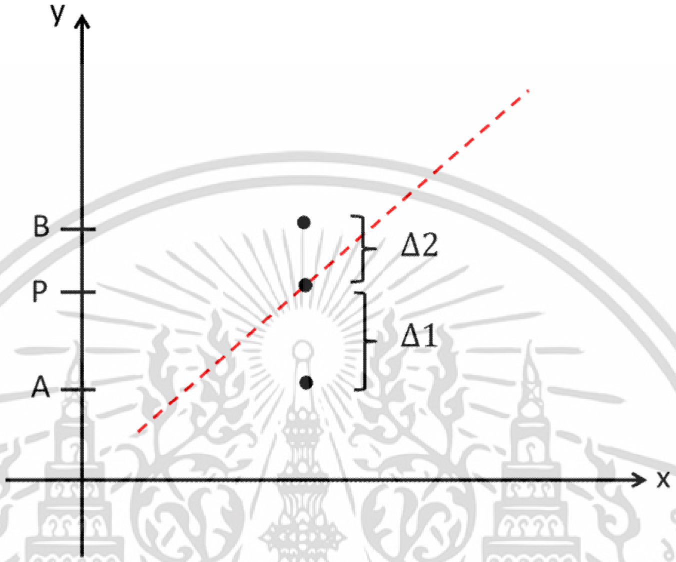
$$y = mx + c \tag{3.25}$$

ตัวแปร m คือค่าความชันของเส้นตรง ซึ่งจะสามารถหาค่าความชันได้จาก

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{3.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 3.25 อัลกอริทึมในการวาดเส้นตรงของ Bresenham

จากรูปที่ 3.25 จะเป็นการแสดงวิธีการคำนวณของ Bresenham เพื่อสร้างเส้นตรง ถ้าจุด (P) คือจุดที่เส้นตรงพาดผ่านบริเวณจุดภาพ A และ B โดยแนวคิดของ Bresenham นั้น จะทำการหาค่า $\Delta 2$ และ $\Delta 1$ แล้วทำการเปรียบเทียบค่ากัน โดยความแตกต่างของระยะทั้งสอง จะหาได้จากสมการที่ 2.27

$$\Delta_2 - \Delta_1 = 2m(x+1) - 2A + 2c - 1 \tag{3.27}$$

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

$$P = \Delta x(d_1 - d_2) \tag{3.28}$$

$$P = 2\Delta y \cdot x - 2\Delta x \cdot A + c \tag{3.29}$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ (Savitzky-Golay Filter)

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

จุดประสงค์หลัก ๆ ของการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิตอล คือ การวัด การกรอง การบีบอัดข้อมูลสัญญาณแบบต่อเนื่อง (Analog Signal) ซึ่งไม่สามารถกระทำได้โดยตรง การได้มาของข้อมูลสัญญาณแบบดิจิตอลนั้น จะต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (Digital-to-Analog Converter) หนึ่งในเทคนิคสำคัญของการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิตอลคือ ตัวกรองสัญญาณ (Filter) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่ไม่ต้องการออกจากสัญญาณหลัก ตัวกรองที่พิจารณานำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ ตัวกรองแบบแบบสาวิทซกี-โกเลย์ โดยในปี 1964 Abraham Savitzky และ Marcel J. E. Golay ได้ตีพิมพ์งานวิจัย “Smoothing and differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures.” ลงในวารสาร Analytical Chemistry [19] โดยงานวิจัยฉบับนี้ถูกอ้างอิงเป็นอย่างมาก เช่น งานวิจัยของ Nakajima, Juzoji, Zhao, และ Hamamoto (2003) [20] ได้เสนอวิธีการใช้ตัวกรองชนิดสาวิทซกี-โกเลย์ ในการกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องตรวจวัดและบันทึกคลื่นไฟฟ้าของหัวใจ (ECG) ซึ่งสามารถกรองสัญญาณรบกวนได้ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติ (Gaussian Noise) และอุปกรณ์ต่าง ๆ (Impulse Noise) และได้มีงานวิจัยของ Paul O’Leary, Matthew Harker และ Richard Neumayr (2010) [21] ได้นำวิธีการตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ไปประยุกต์ใช้ในการกรองข้อมูลรูปทรงของวัตถุ

3.5.1 หลักการทำงานของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์

ตัวกรองแบบสาวิทซกี-โกเลย์ (Savitzky-Golay Filter) ใช้หลักการของการประมาณพหุนามเป็นช่วง ๆ และการหาค่าเฉลี่ย โดยการเลื่อนหน้าต่าง (Window) แบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอันดับของพหุนามที่มีค่าสูงจะให้ผลการกรองที่ดี โดยไม่เกิดการลดขนาดของสัญญาณเดิม โดยค่าเอาต์พุตของตัวกรองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.30 [22]

$$g_i = \sum_{n=-n_L}^{n_R} c_n f_{i+n} \qquad ; i = \ldots,-2,-1,0,1,2,\ldots \tag{3.30}$$

เมื่อ

f_{i+n} คือ สัญญาณอินพุต

g_i คือ สัญญาณเอาต์พุต

n_L คือ จำนวนของจุดข้อมูลฝั่งทางซ้ายของข้อมูลตำแหน่งที่ i

n_R คือ จำนวนของจุดข้อมูลฝั่งทางขวาของข้อมูลตำแหน่งที่ i

c_n คือ สัมประสิทธิ์ของตัวกรอง (Filter Coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวคิดของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ คือการหาสัมประสิทธ์ตัวกรอง c_n ที่โดยปกติจะเป็นค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูล i แต่แนวคิดของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์คือ สัมประสิทธิ์ตัวกรอง c_n จะต้องไม่ใช่ค่าคงที่ แต่สามารถปรับค่าได้ตามค่าของข้อมูลที่ได้มาจากการเลื่อนของหน้าต่าง ถ้าสัมประสิทธิ์ c_n ถูกแทนที่ด้วยพหุนามอันดับ M ที่อยู่ในรูป $a_0 + a_1 i + ... + a_M i^M$ จะแสดงเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ a ได้ดังสมการที่ 2.31 และ 2.32

$$A \cdot a = f \quad ; a = (a_0 a_1 ... a_M)^T \tag{3.31}$$

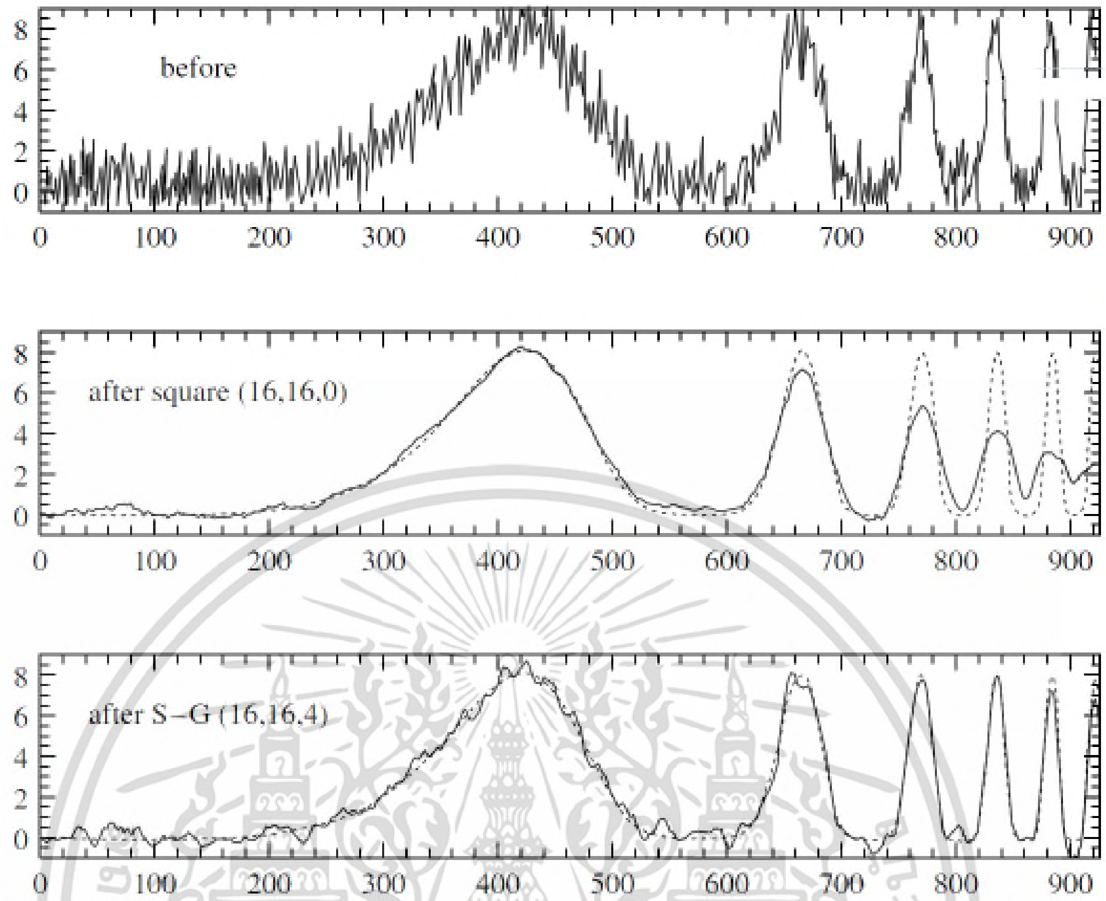
$$(A^T \cdot A) \cdot a = A^T \cdot f \quad \text{และ} \quad a = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot f \tag{3.32}$$

เนื่องจากเป็นการประมาณแบบกำลังสองน้อยที่สุด จะทำให้ข้อมูลเป็นเชิงเส้น ดังนั้น f ในสมการที่ 3.32 สามารถแทนด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector) e_n ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์จะหาได้จากสมการที่ 3.33

$$c_n = \left\{ (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot e_n) \right\}_0 = \sum_{m=0}^{M} \left\{ (A^T \cdot A)^{-1} \right\}_{0m} n^m \tag{3.33}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 แสดงผลการทดสอบการใช้ตัวกรอง ภาพบน: สัญญาณอินพุตที่ถูกเพิ่มสัญญาณรบกวน (เส้นประคือสัญญาณหลัก) ภาพกลาง: ตัวกรองเฉลี่ยเลื่อนหน้าต่างแบบธรรมดา (Simple Moving Window Average) ภาพล่าง: ตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ โดยใช้ค่าพหุนาม $M = 4$ [22]

จากสมการที่ 3.33 จะเห็นว่ามีค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ คือ M และ n รูปที่ 3.26 แสดงผลการทดสอบตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ โดยใช้ความกว้างของหน้าต่างมีค่าเท่ากับ 33 จุด นั่นคือ $n_L = n_R = 16$ โดยภาพบนคือฟังก์ชันคลื่นสัญญาณที่ใช้ทดสอบที่เพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไป (สัญญาณหลักคือเส้นประ) ภาพตรงกลางแสดงถึงผลลัพธ์จากการปรับสัญญาณให้เรียบโดยใช้วิธีการเฉลี่ยแบบเลื่อนหน้าต่าง (Moving Average) จะเห็นได้ว่าขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณถูกลดทอนไปด้วยเป็นอย่างมาก กลับกันที่ภาพล่างเป็นการใช้ตัวกรองแบบสาวิทซกี-โกเลย์ โดยใช้พหุนามอันดับที่ $M = 4$ ซึ่งผลลัพธ์ที่เห็นได้ว่าขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณมีความใกล้เคียงกับสัญญาณจริงมาก [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การวัดปริมาตรวัตถุโดยวิธีชั่งวัตถุแทนที่ในน้ำ (Hydrostatic)

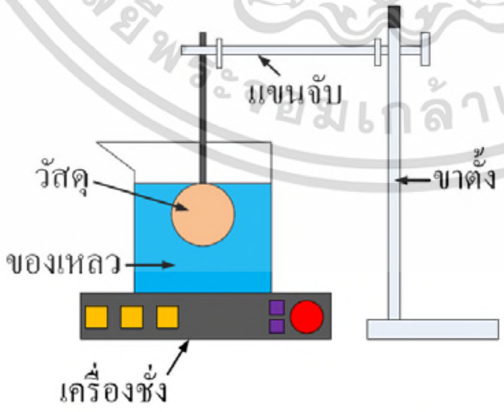
การหาปริมาตรของวัตถุ โดยวิธีชั่งวัตถุแทนในน้ำ (Hydrostatic) เป็นวิธีที่ให้ผลการวัดถูกต้องเที่ยงตรงสูงใช้ได้กับวัตถุไม่จำกัดรูปทรง [18] ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของอาหารและผลิตภัณฑ์เกษตรมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่องานวิศวกรรมเกษตรและอาหาร ยกตัวอย่างเช่น การทำแห้งและการจัดเก็บหญ้าแห้ง การออกแบบไซโลและถังเก็บ การคัดแยกเมล็ดพันธุ์ การประเมินความแก่ของผลไม้ การประมาณพื้นที่อากาศในเนื้อเยื่อพืช การประเมินความแก่ของมันฝรั่งเป็นต้น (Mohsenin, 1996) สำหรับผลิตภัณฑ์เกษตรที่มีรูปร่างแน่นอน การหาปริมาตรทำได้โดยการวัดโดยตรง แต่สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน เช่น มีขนาดเล็กเรียว การหาปริมาตรทำได้โดยการแทนที่ของน้ำ

เทคนิคการแทนที่ของน้ำเป็นเทคนิคการวัดปริมาตรที่ทำได้ง่าย อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบไปด้วยเครื่องชั่ง ภาชนะใส่ตัวอย่างหรือบีกเกอร์ แท่นจับยึดก้านเหล็ก และก้านจุ่มเพื่อจับยึดวัตถุที่จะวัดปริมาตร รูปที่ 3.27 แสดงการวัดปริมาตรโดยการแทนที่น้ำของผักหรือผลไม้ วิธีการเริ่มโดยการชั่งน้ำหนักของผลไม้ทั้งลูกในอากาศ จากนั้นชั่งน้ำหนักของผลไม้โดยใช้ก้านจุ่มกดผลไม้ให้จมในน้ำปริ่มพอดีในบีกเกอร์ซึ่งวางอยู่บนเครื่องชั่ง นำน้ำหนักของบีกเกอร์เปล่าที่ได้ไปลบออกจากน้ำหนักที่อ่านได้ขณะกดผลไม้ลงในน้ำที่จมปริ่ม (ที่มา: http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning47/ea341/lesson2/ch02_4.pdf บทที่ 2 การวัดคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐาน)

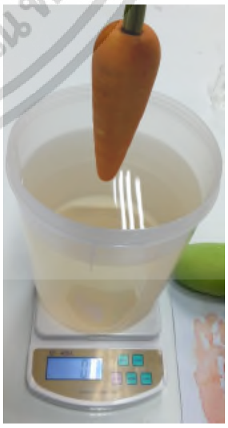
เนื่องจากวัตถุทางการเกษตรและอาหารบางชนิดมักจะมีรูพรุนหรือดูดซับของเหลวโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำได้ดี การหาปริมาตรโดยวิธีเหล่านี้อาจมีข้อผิดพลาดได้มาก จึงมีการเลือกใช้ของเหลวให้เหมาะสมกับวัตถุที่จะหาปริมาตรและคำนึงถึงปริมาตรภายนอก และปริมาตรที่แท้จริงดังสมการ (3.34) และ (3.35) ตามลำดับ

$$\text{ปริมาตรภายนอก} = \text{ปริมาตรของเหลวที่ถูกแทนที่} + \text{ปริมาตรของของเหลวที่ซึมเข้าไปในวัตถุ} \quad (3.34)$$

$$\text{ปริมาตรที่แท้จริง} = \text{ปริมาตรของเหลวที่ถูกแทนที่} \quad (3.35)$$



(ก) แสดงอุปกรณ์ในการชั่ง [24]



(ข) แสดงภาพตัวอย่างในการชั่ง

รูปที่ 3.27 การวัดปริมาตรวัตถุโดยวิธีชั่งวัตถุแทนที่ในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 ความหนาแน่นของวัตถุ (Density)

ความหนาแน่นของวัตถุ (Density) เป็นสมบัติทางกายภาพของสสาร ความหนาแน่นคือมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ยิ่งวัตถุมีความหนาแน่นมาก มวลต่อหน่วยปริมาตรก็ยิ่งมากขึ้นกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือวัตถุที่มีความหนาแน่นสูง (เช่น เหล็ก) จะมีปริมาตรน้อยกว่าวัตถุความหนาแน่นต่ำ (เช่น น้ำ) ที่มีมวลเท่ากัน หน่วยเอสไอของความหนาแน่นคือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) ดังสมาการ 3.36 (ที่มา: http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM103%2850%29/CM103-16%2850%29.pdf ศูนย์สื่อการสอนทางอิเล็กทรอนิกส์ e-Learning มหาวิทยาลัยรามคำแหง)

$$D = \frac{M}{V} \tag{3.36}$$

ดังนั้นปริมาตรของผลไม้สามารถคำนวณได้จาก ดังสมการ 3.37

$$V = \frac{M}{D} \tag{3.37}$$

โดยที่

D คือ ความหนาแน่นของวัตถุ หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) หรือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

M คือ ค่ามวลของของเหลวที่ถูกแทนที่ด้วยน้ำ หน่วย กรัม (g) หรือ กิโลกรัม (kg)

V คือ ปริมาตรรวมของวัตถุ หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3) หรือ ลูกบาศก์เมตร (m^3)

3.6.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่น (Density) ของวัตถุต่อความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ความถ่วงจำเพาะไม่มีหน่วย และเป็นสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ของวัสดุ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1 วัตถุที่มีความถ่วงจำเพาะ มากกว่าน้ำ (>1) จะจมน้ำ ส่วนวัตถุที่มีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1 หรือน้อยกว่าน้ำ จะลอยน้ำได้ เมื่อทราบน้ำหนักชั่งในอากาศ และปริมาตรจากการแทนที่น้ำ ความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) สามารถหาได้จากอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตร นอกจากนี้ยังสามารถหาความถ่วงจำเพาะของผลไม้ได้จาก (ที่มา: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0966/specific-gravity-ความถ่วงจำเพาะ)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.)} = \frac{\text{น้ำหนักชั่งในอากาศ} \times \text{ถ.พ. ของน้ำ}}{\text{น้ำหนักชั่งในน้ำ}} \tag{3.38}$$

เมื่อ

ความถ่วงจำเพาะของสารใด ๆ คือ อัตราส่วนความหนาแน่นของสารนั้นต่อความหนาแน่นของน้ำที่ 4°C น้ำมีความหนาแน่นเท่ากับ 1,000 kg/m^3 หรือ 1 g/cm^3

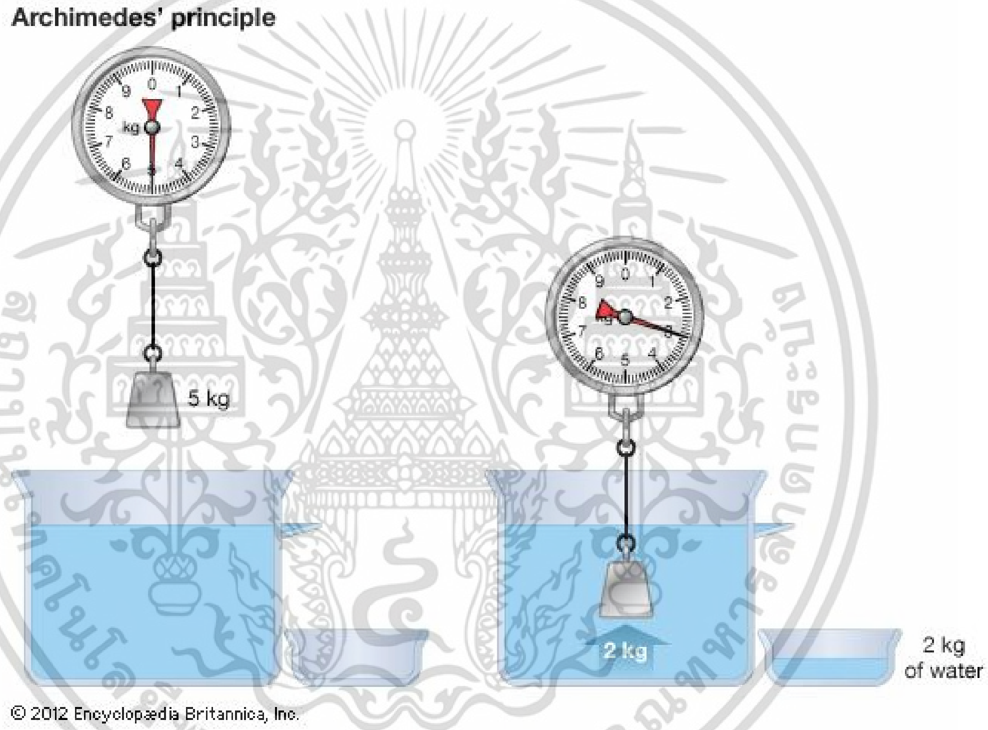
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 แรงพยุง หรือ แรงลอยตัว (Buoyant Force, FB)

แรงพยุง หรือ แรงลอยตัวหมายถึง แรงลัพธ์ของแรงที่ของเหลวกระทำกับวัตถุส่วนที่จมอยู่ในของเหลว มีขนาดเท่ากับ น้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุส่วนที่จม ถ้าวัตถุอยู่นิ่งในน้ำ แรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน จะได้ว่า

แรงพยุง (นิวตัน N) = น้ำหนักของวัตถุที่ชั่งในอากาศ – น้ำหนักวัตถุที่ชั่งในของเหลว (3.39)

ดังนั้น เมื่อเราชั่งน้ำหนักของวัตถุในของเหลวจะน้อยกว่าเมื่อชั่งในอากาศ ดังรูปที่ 3.28 เนื่องจากของแข็งเมื่ออยู่ในของเหลวจะเกิดแรงดันจากของเหลวกระทำกับวัตถุส่วนที่จม ซึ่งก็คือแรงพยุงนั่นเอง [25]



(ก) ชั่งวัตถุในอากาศ (ข) ชั่งวัตถุในน้ำ

รูปที่ 3.28 การเปรียบเทียบน้ำหนักของวัตถุ เมื่อชั่งในน้ำกับชั่งในอากาศ

ที่มา: http://global.britannica.com/EBchecked/topic/32827/Archimedes-principle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบระบบการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร โดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการศึกษาวิจัยและขั้นตอนการออกแบบการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ ระบบต้นแบบประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพจากกล้องที่รับภาพของลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ โดยวัตถุจะเคลื่อนที่ไปบนสายพานลำเลียง ภาพของลำแสงเลเซอร์สีแดงที่ได้ผ่านตัวกรองแสงความยาวคลื่นย่านแคบที่ 650 nm เพื่อตัดแสงรบกวนจากภายนอกและทำการปรับปรุงภาพด้วยโดยใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล เช่น Extract Color Threshold Setup Lookup Table การหาจุดศูนย์ถ่วง (Central of Gravity: COG) การวาดเส้นด้วยอัลกอริทึมแบบ Bresenham ตัวกรองแบบสาวิทซกี-โกเลย์ (Savitzky-Golay Filter) เติมพื้นที่ของ Cross Section ด้วยพิกเซลสีขาวให้เต็มในแนวแกน Y เพื่อให้ได้โครงร่างของแสงเลเซอร์ที่สมบูรณ์ ก่อนนำมาคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ การคำนวณอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลของภาพให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) ในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ พื้นที่หน้าตัดจะถูกคำนวณและนำมารวมกันเป็นปริมาตรของวัตถุ ซึ่งได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วน คือ หลักการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร และขั้นตอนการประมวลผลภาพและการทำงานของระบบการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร

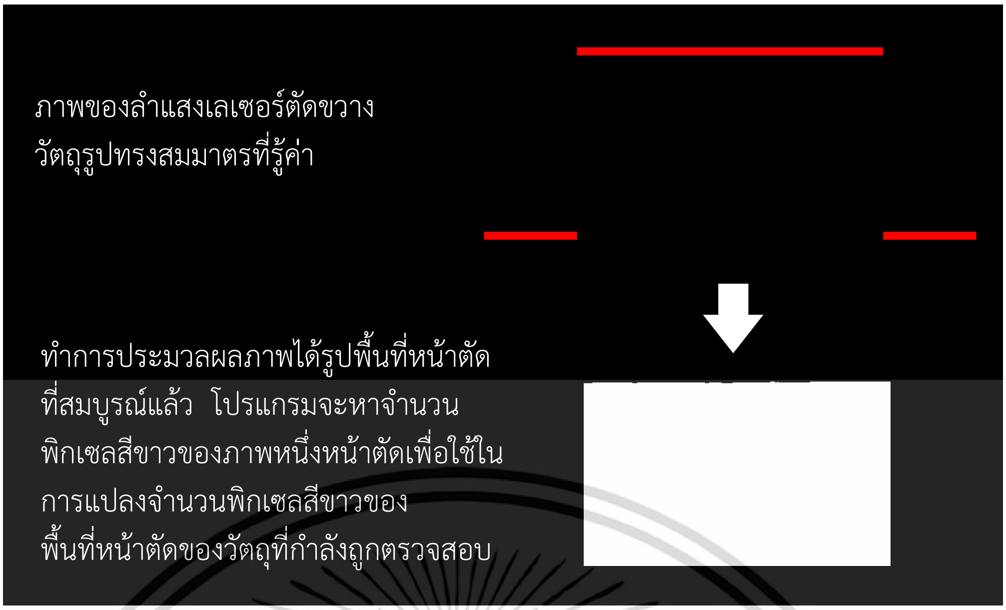
4.1 หลักการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงหลักการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ คือ รูปทรงกระบอก รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยมและรูปทรงหกเหลี่ยม

4.1.1 การแปลงจำนวนพิกเซลของภาพให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร)

ก่อนทำการตรวจวัดวัตถุต้องทำการสอบเทียบระบบทุกครั้ง โดยใช้วัตถุรูปทรงสมมาตรที่รู้ค่าความกว้าง ความยาว ความสูง เพื่อคำนวณหาพื้นที่ในหนึ่งหน้าตัดและปริมาตร และใช้โปรแกรมหาจำนวนพิกเซลสีขาวของภาพหนึ่งหน้าตัด ดังนั้นจะได้ค่าในการสอบเทียบที่ได้จากการคำนวณพื้นที่หนึ่งหน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร) และจำนวนของพิกเซลสีขาวในหนึ่งหน้าตัดจากโปรแกรม ขณะที่ทำการตรวจวัดวัตถุ กล้องรับภาพของลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุในหนึ่งหน้าตัดและทำการประมวลผลภาพได้รูปพื้นที่หน้าตัดที่สมบูรณ์ที่ถูกเติมพื้นที่หน้าตัดด้วยพิกเซลสีขาวให้เต็มในแนวแกน Y และได้จำนวนพิกเซลสีขาว โปรแกรมจะทำการแปลงจำนวนพิกเซลสีขาวของพื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่กำลังถูกตรวจสอบให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) และในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ พื้นที่หน้าตัดถัดไปจะถูกแปลงจนหมดตามความยาวของวัตถุ ค่าของพื้นที่แต่ละหน้าตัดจะถูกนำมารวมกันเป็นปริมาตรของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

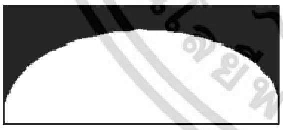
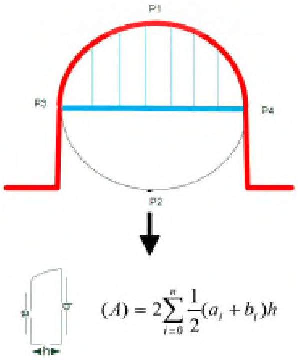


รูปที่ 4.1 การสอบเทียบระบบด้วยวัตถุรูปทรงสมมาตรที่รู้ค่าความกว้าง ความยาว ความสูง และปริมาตร

4.1.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของหลักการหาพื้นที่ในหนึ่งหน้าตัด

ตามตารางที่ 4.1 ทำการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างหลักการแปลงจำนวนพิกเซลสีขาวในหนึ่งหน้าตัดให้เป็นพื้นที่กับการคำนวณพื้นที่ย่อย ๆ รวมเป็นพื้นที่ในหนึ่งหน้าตัด

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของหลักการหาพื้นที่ในหนึ่งหน้าตัด

หลักการ	ข้อดี	ข้อเสีย
การแปลงจำนวนพิกเซลสีขาวในหนึ่งหน้าตัดให้เป็นพื้นที่ 	1 มีความเร็วในการหาพื้นที่หน้าตัด 2 มีความแม่นยำในการหาพื้นที่ในหนึ่งหน้าตัด 3 ง่ายในการแปลง ไม่มีความซับซ้อนในการพัฒนาโปรแกรม	1 กระบวนการในการเติมพื้นที่ในหนึ่งหน้าตัดด้วยพิกเซลสีขาวให้เต็มในแนวแกน Y ในหนึ่งวัตถุต้องใช้เวลามาก ยิ่งถ้าวัตถุมีขนาดที่ใหญ่ ต้องใช้เวลามากยิ่งขึ้น
การคำนวณพื้นที่ย่อย ๆ รวมเป็นพื้นที่ในหนึ่งหน้าตัด  ที่มา: [24]	1 มีความแม่นยำในการหาพื้นที่ในหนึ่งหน้าตัด	1 มีความซับซ้อนในการพัฒนาโปรแกรม สูตรที่ใช้ในการคำนวณจะเปลี่ยนตามรูปทรงของพื้นที่หน้าตัดหรือวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ความละเอียดในการตรวจวัด

การฉายแสงเลเซอร์แบบเส้นบนพื้นผิวของวัตถุนอกจากแบ่งวัตถุออกเป็นส่วน ๆ แล้วยังทำให้ได้คุณลักษณะของวัตถุตามพื้นผิวของวัตถุด้วย ซึ่งสิ่งที่ได้จากแสงที่ฉายบนพื้นผิวของวัตถุจะบอกถึงความกว้างและความหนาของวัตถุ เมื่อจับภาพด้วยกล้องวีดีโอ รูปภาพของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จะบอกถึงขนาดของวัตถุในหน่วยของพิกเซลที่เกิดขึ้นบนตัวเซนเซอร์ (CCD) ของกล้อง ดังนั้นในการแปลงพิกัดขนาดของวัตถุที่อยู่ในหน่วยพิกเซลของภาพ ให้เป็นขนาดพิกัดจริงในหน่วยวัดมาตรฐาน (Metric System) เช่น มิลลิเมตร เซนติเมตร จำเป็นต้องใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการสอบเทียบในงานวิจัยนี้ จะทำการแปลงพิกัดของจุดบนระนาบของภาพ (Image Plane) ให้เป็นพิกัดจริง (Real World Coordinate) เพื่อทำการคำนวณหาปริมาตรของวัตถุจากจำนวนพิกเซลของภาพ ที่ได้จากการแปลงพิกัดของวัตถุในหน่วยวัดมาตรฐาน ส่วนความยาวของวัตถุนั้นหาได้จากสมการที่ 4.1 ซึ่งความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุจะต้องสัมพันธ์กับความเร็วในการจับภาพของกล้องวีดีโอ เช่น กล้องสามารถจับภาพด้วยความเร็ว 30 fps ดังนั้นความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 30 mm/s เพื่อที่จะให้ได้ความละเอียดในด้านของความยาวของวัตถุ 1 mm/Frame หรือถ้าหากมีความต้องการความละเอียดในการวัดความยาวของวัตถุที่ 0.5 mm/Frame ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุต้องมีค่าเท่ากับ 15 mm/s

$$L = \frac{Os}{Cs} \tag{4.1}$$

เมื่อ

L คือ ค่าความละเอียดในการตรวจวัดความยาววัตถุ (mm/Frame)

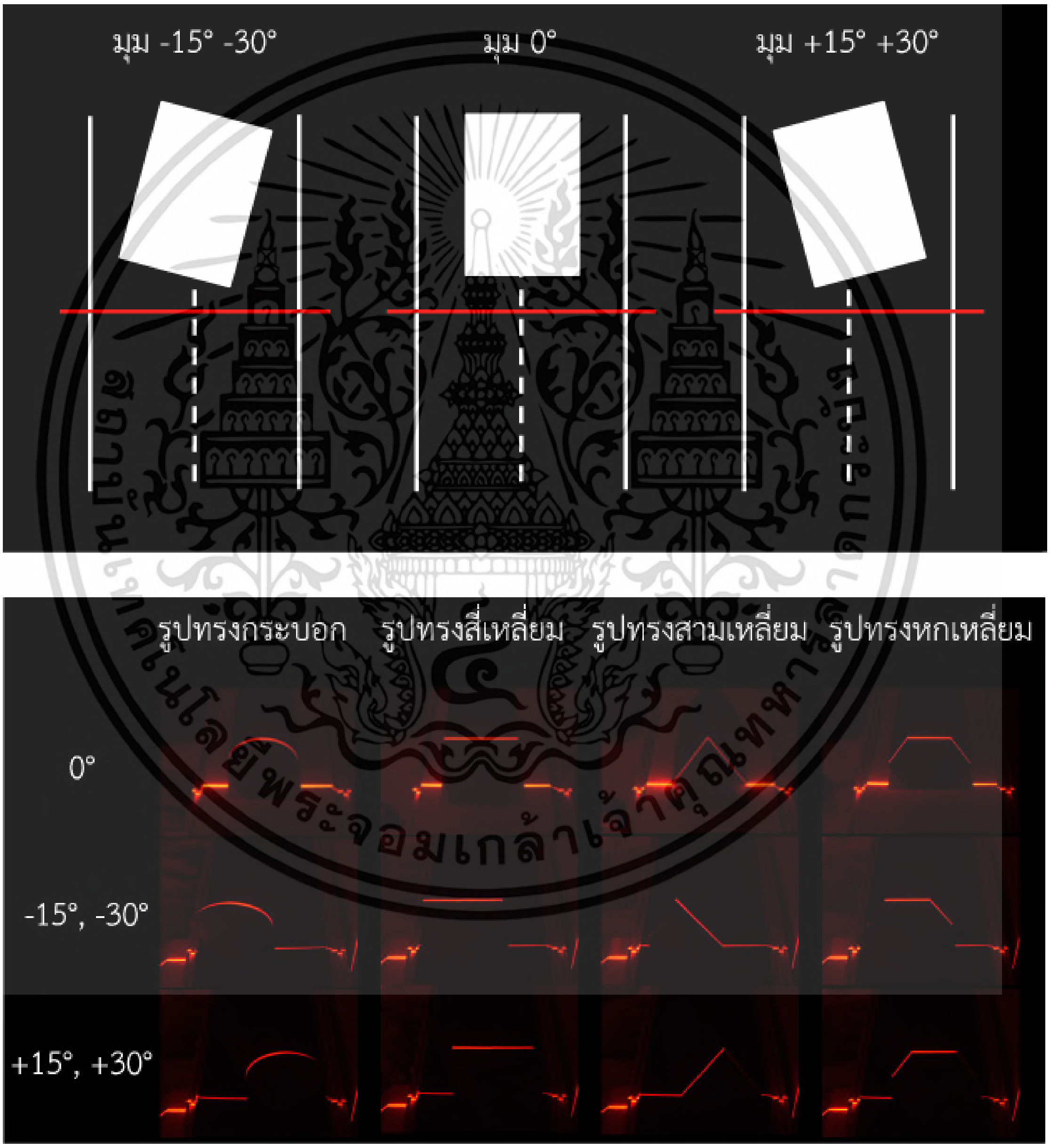
Os คือ ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ (mm/s)

Cs คือ ค่าความสามารถจับภาพด้วยความเร็วของกล้อง (Frame/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การวิเคราะห์ปริมาตรของวัตถุจากเส้นแสงเลเซอร์

เมื่อทำการฉายแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของวัตถุจะทำให้เส้นแสงเลเซอร์เปลี่ยนแปลงไปตามพื้นผิวของวัตถุนั้น ๆ ซึ่งสามารถนำแสงเลเซอร์ที่ได้จากการมองด้วยกล้องซีซีดี มาวิเคราะห์ถึงรูปทรงของวัตถุได้ โดยงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบการวัดปริมาตรจากวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ คือ รูปทรงกระบอก รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยมและรูปทรงหกเหลี่ยม ทำการวางวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ ในมุมเอียงที่แตกต่างกัน คือ ทำมุมกับสายพานลำเลียง -30° -15° 0° +15° +30° เพื่อศึกษาผลกระทบจากการวางวัตถุเอียง โดยลักษณะของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้ เมื่อฉายลงบนพื้นผิวของวัตถุได้แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงเส้นแสงเลเซอร์ตัดขวางที่ตกกระทบกับพื้นผิวของวัตถุตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาปริมาตรของวัตถุจำเป็นต้องแปลงพิกัดภาพให้อยู่บนพิกัดจริงเสียก่อน โดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการสอบเทียบในการแปลงจุดพิกัดเหล่านี้ จากนั้นก็แปลงจำนวนพิกเซลสีขาวของภาพในแต่ละหน้าตัดให้เป็นพื้นที่ในหน่วยวัดมาตรฐาน ดังนั้น เมื่อนำพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนมารวมกัน ก็จะได้เป็นพื้นที่โดยรวมหรือปริมาตรของวัตถุ ซึ่งสามารถหาได้โดย

การคำนวณหาความยาวของวัตถุ ใช้สมการความเร็วเส้นตรงคือความเร็วไปหน้าหรือถอยหลัง วัดเป็นแนวตรง ดังสมการข้างล่าง

$$V = \frac{s}{t} \tag{4.2}$$

ดังนั้นความยาวของวัตถุ

$$s = V.t \tag{4.3}$$

เมื่อ

V คือ ความเร็วของสายพานลำเลียง (มิลลิเมตร/วินาที)

s คือ ความยาวของวัตถุ (มิลลิเมตร)

t คือ เวลาที่วัตถุตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์ (วินาที)

ดังนั้นสามารถหาปริมาตรของวัตถุได้จากสมการข้างล่าง

$$V = \sum_{n=1}^{L} A_n \tag{4.4}$$

เมื่อ

V คือ ปริมาตรหรือพื้นที่รวมของวัตถุ

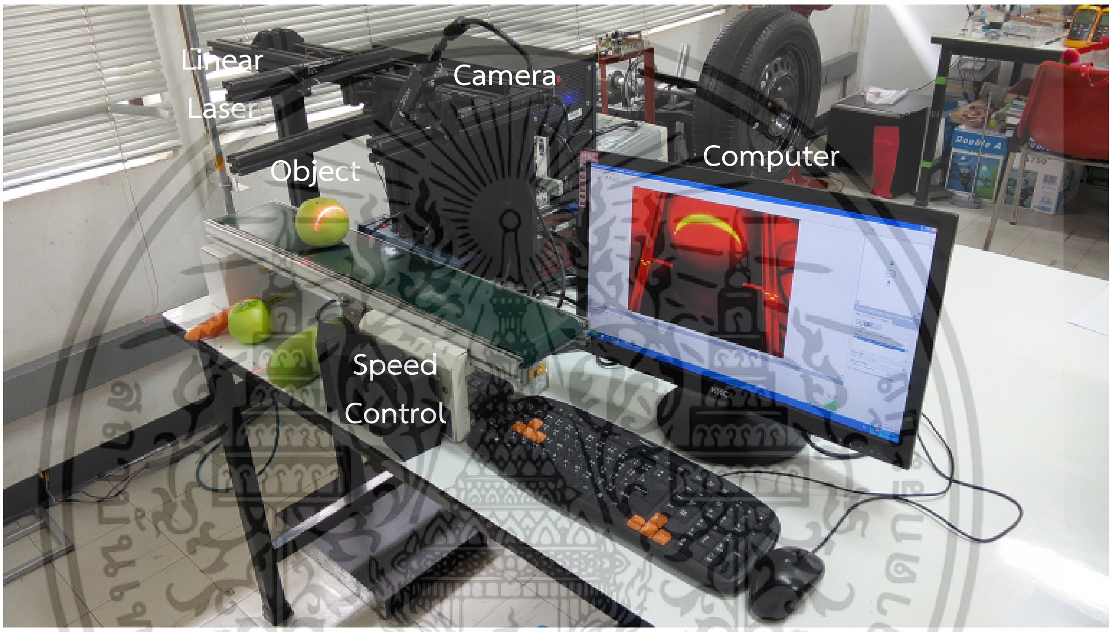
A คือ พื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุ

L คือ จำนวนเฟรมที่มีวัตถุตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์หรือความยาวของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการออกแบบระบบการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุ การวัดปริมาตรของวัตถุที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะใช้ลักษณะการสแกนวัตถุโดยใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ ดังนั้นอุปกรณ์ที่สำคัญสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ ๆ คือ แหล่งกำเนิดแสงซึ่งจะให้แสงเลเซอร์สีแดงแบบเส้น อุปกรณ์การตรวจจับภาพใช้กล้องซีซีดี อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ และคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการประมวลผลภาพ โดยระบบการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุ

4.2.1 อุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)

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

รูปที่ 4.4 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดแบบเส้นที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 อุปกรณ์รับภาพกล้องซีซีดี (CCD Camera)

ในการทดลองอุปกรณ์ตรวจจับลำแสงเลเซอร์ที่ถูกฉายลงบนพื้นผิวของวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ จะใช้อุปกรณ์จับภาพซึ่งถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของระบบ เนื่องจากต้องคำนึงถึงความละเอียดของกล้อง (Resolution) และความเร็วในการจับภาพ ซึ่งความเร็วในการจับภาพของกล้องจะมีผลต่อความเร็วในการประมวลผลของระบบ ซึ่งปัจจุบันความเร็วในการจับภาพของกล้องมีตั้งแต่ 1-1000 เฟรมต่อวินาทีหรือมากกว่า แต่กล้องยิ่งมีความเร็วสูงมากก็จะมีราคาแพงขึ้นตามมาด้วย ซึ่งกล้องที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้กล้องซีซีดี ของบริษัท Basler รุ่น SCA1000-30fc ที่มีความละเอียด 1032x778 พิกเซล มีความเร็วในการจับภาพที่ 30 เฟรมต่อวินาที สามารถควบคุมการจับภาพได้จากสัญญาณภายนอก และใช้การเชื่อมต่อแบบ IEEE1394b ในการติดตั้งกล้องจะต้องคำนึงถึงทิศทางในการตรวจจับด้วย ดังนั้นจึงควรติดตั้งให้กล้องทำมุมกับระนาบของเลเซอร์ที่ระหว่าง 30 ถึง 60 องศา โดยกล้องได้ทำการติดตั้งตัวกรองคลื่นแสงย่านสีแดง (620-650 Narrow Band Pass Filter) ไว้ด้วย เพื่อช่วยในการป้องกันแสงรบกวนจากคลื่นแสงย่านความถี่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่ความถี่ของคลื่นแสงสีแดงที่ต้องการตรวจจับ ที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดแบบเส้นที่ใช้ในงานวิจัย ที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 630 ถึง 650 นาโนเมตร (สีแดง) ดังรูปที่ 4.7

รูปที่ 4.5 กล้อง Basler รุ่น SCA1000-30fc

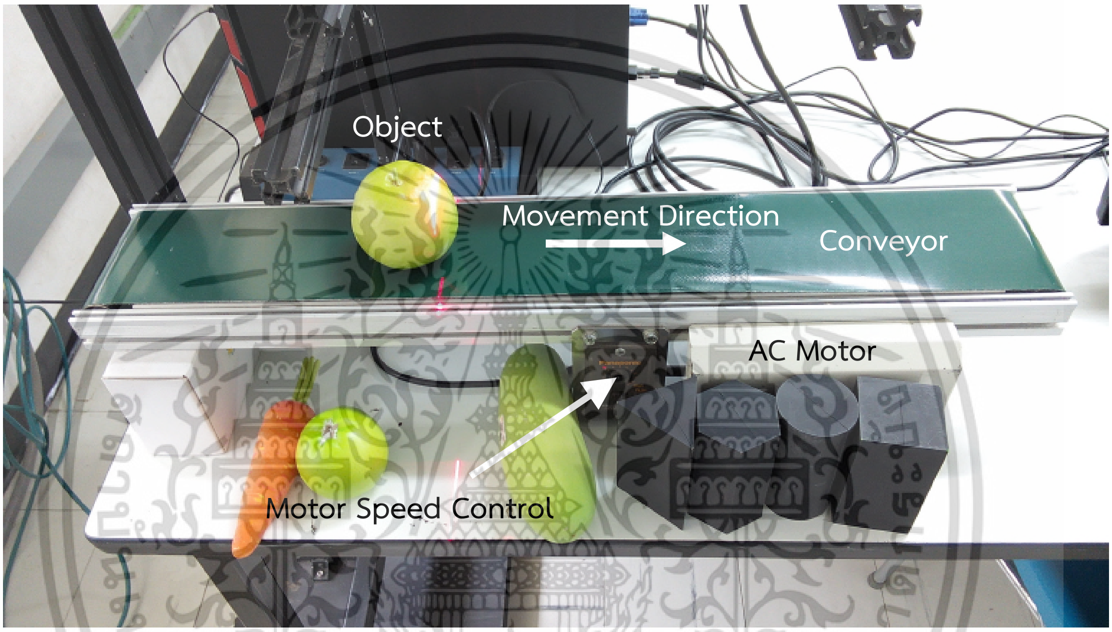
รูปที่ 4.6 เลนซ์ SV-1214V

รูปที่ 4.7 ตัวกรองคลื่นแสงย่านสีแดง Sharp Cut Filters R64-27 M27x0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 อุปกรณ์การควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ (Speed Controller)

การเคลื่อนที่ของวัตถุจำเป็นต้องสอดคล้องกับความเร็วในการถ่ายภาพของกล้อง ในการออกแบบ ใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับหนึ่งเฟสที่ขับเพลาของสายพานลำเลียง โดยควบคุมความเร็วของสายพานลำเลียงไว้ที่ 30 mm/Sec เพื่อให้ได้ความละเอียดในการตรวจวัดความยาววัตถุที่ 1 mm/frame โดยหาจากสมการที่ 4.1 งานวิจัยนี้จะใช้ตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์ซึ่งใช้ขับเคลื่อนสายพาน ยี่ห้อพานาโซนิค รุ่น DVUS825Y ซึ่งสามารถที่จะปรับความเร็วของมอเตอร์ ทำให้สามารถที่จะควบคุมความเร็วของสายพานตามที่ต้องการทดลองได้ การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุได้แสดงดังรูปที่ 4.8

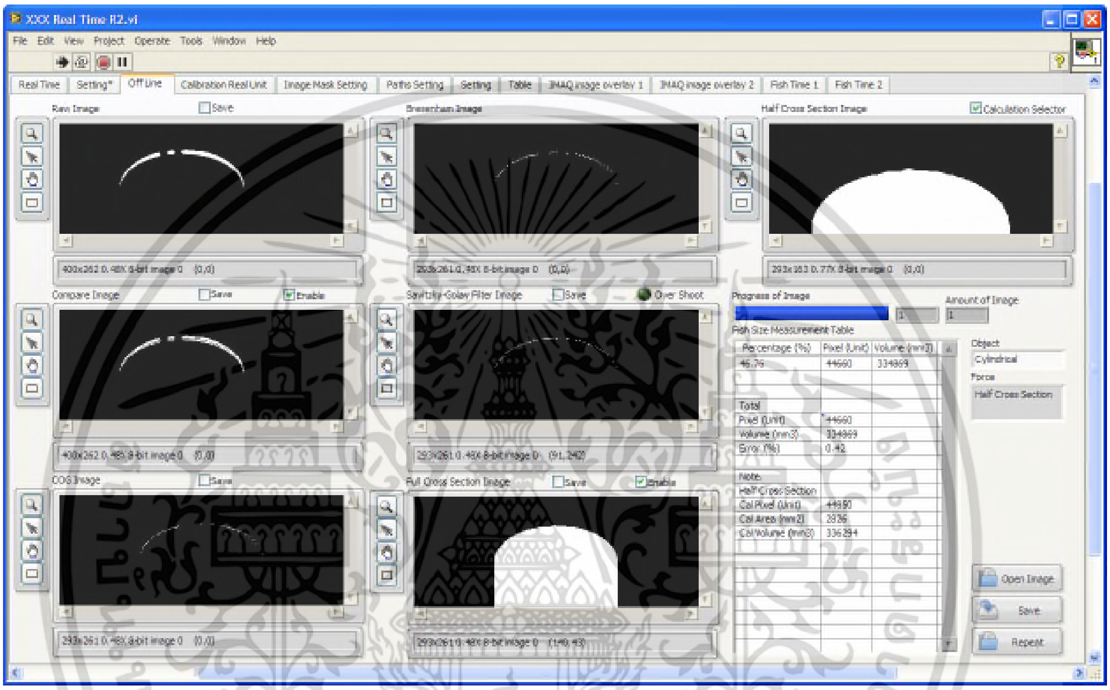


รูปที่ 4.8 อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลภาพ

การประมวลผลภาพที่ได้จากกล้องเพื่อทำการหาปริมาตรของวัตถุนั้นจะใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผล โดยใช้โปรแกรมประมวลผลภาพที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น ในการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุ เนื่องจากโปรแกรมประมวลผลภาพที่เลือกใช้ มีฟังก์ชั่นที่เกี่ยวกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์และประมวลผลภาพให้เลือกมากมายจึงช่วยลดเวลาที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมลงมาก จากรูปที่ 4.9 แสดงโปรแกรมประมวลผลภาพที่ใช้ในการประมวลผลภาพตามเวลาจริง (Real Time) ที่รับภาพสีจากกล้องซีซีดี



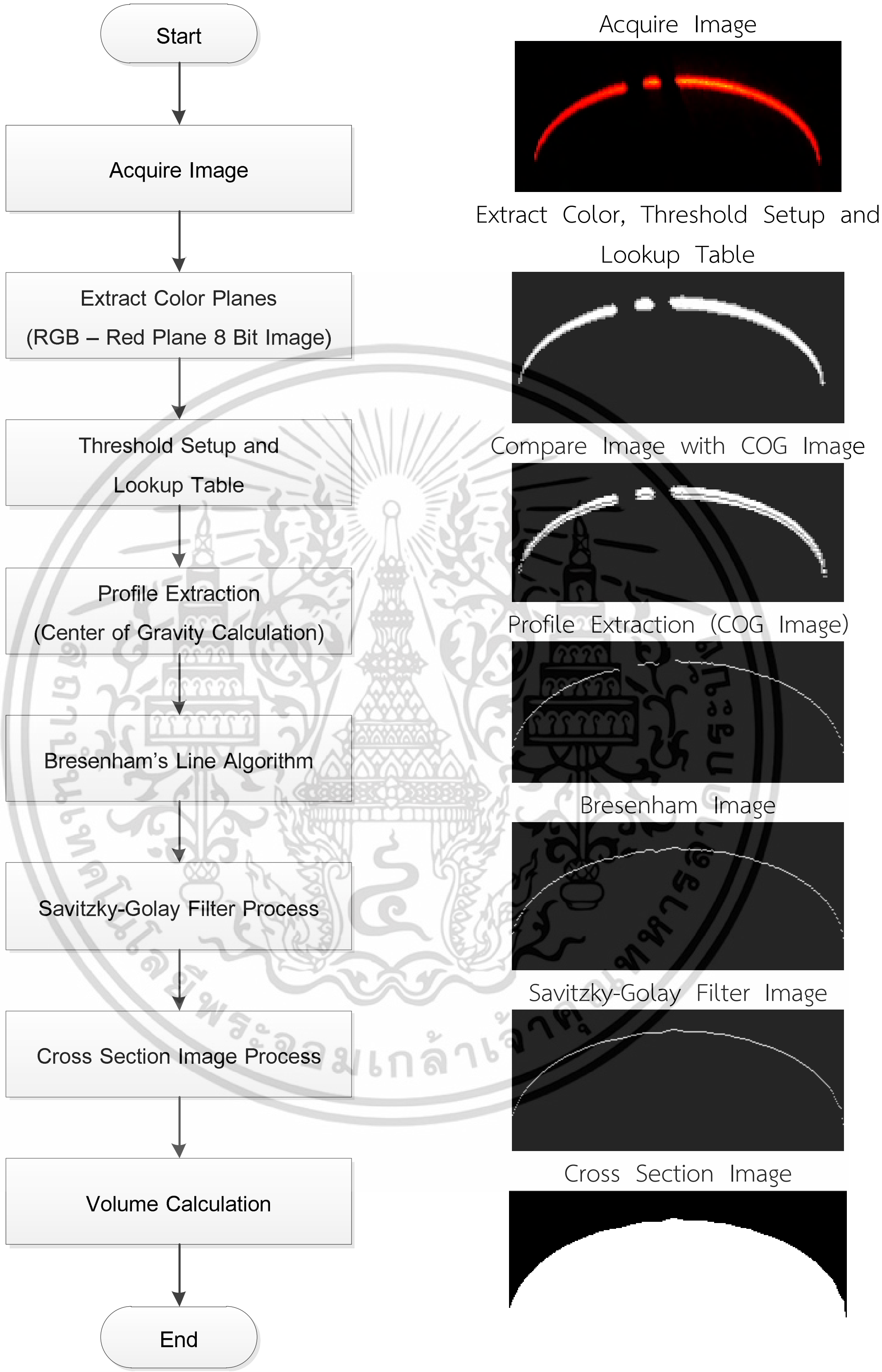
รูปที่ 4.9 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลภาพตามเวลาจริง (Real Time)

4.3 ขั้นตอนการประมวลผลภาพและการทำงานของระบบการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เพื่อใช้ในการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุ ซึ่งการทำงานจะแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนได้ดังนี้คือ การสอบเทียบ การเก็บข้อมูลภาพของวัตถุที่ถูกตรวจวัด การประมวลผลภาพ การวิเคราะห์ภาพเพื่อคำนวณหาพื้นที่และปริมาตรโดยรวมของวัตถุ ขั้นตอนและลำดับการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุแสดงดังรูปที่ 4.10

จากรูปที่ 4.10 (ก) แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ และ (ข) แสดงภาพที่ได้จากขั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งถูกดำเนินการโดยโปรแกรมประมวลผลภาพและรับภาพมาจากกล้อง Basler ทำการปรับปรุงภาพก่อนการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด โดยแต่ละกระบวนการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ

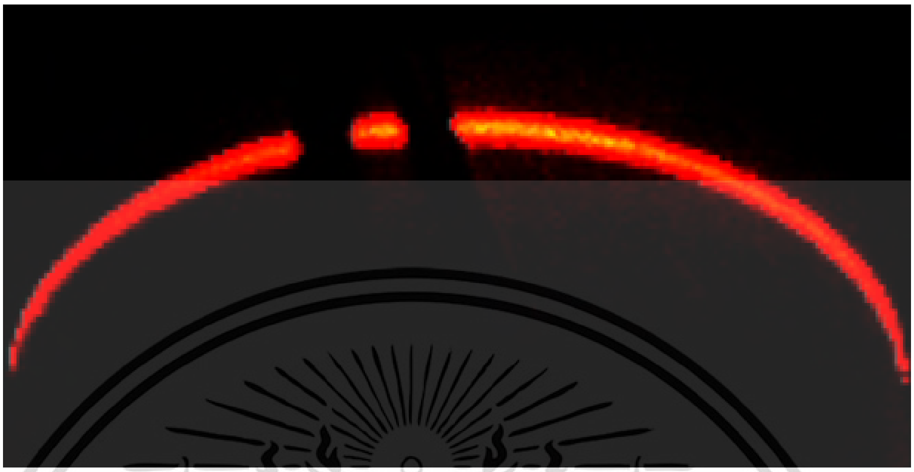
(ข) แสดงภาพที่ได้จากขั้นตอนต่าง ๆ

รูปที่ 4.10 ขั้นตอนการประมวลผลภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

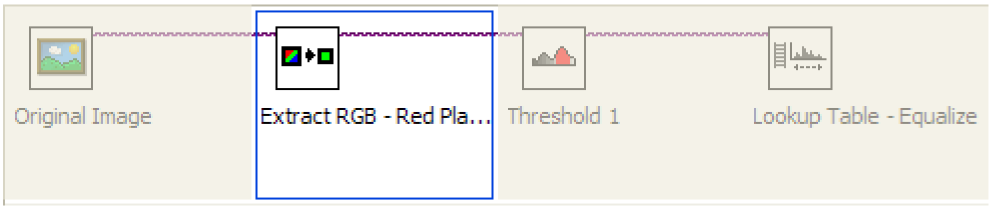
เป็นกระบวนการดึงโครงร่างของแสงเลเซอร์สีแดงที่ต้องการออกจากภาพ ภาพที่ได้เป็นภาพ 8-Bit Grayscale



(ก) ภาพลำแสงเลเซอร์สีแดงตัดขวางวัตถุ

(ข) ภาพ Extract Color Planes

รูปที่ 4.11 Extract Color Planes (RGB – Red Plane 8 Bit Image)



รูปที่ 4.12 Extract Color Planes Code ของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

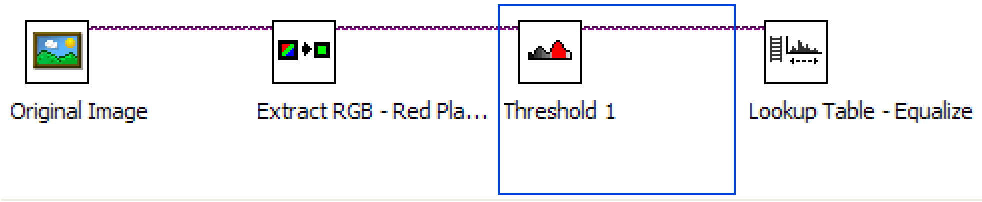
4.3.2 Threshold Setup and Lookup Table

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

(ก) ภาพ Threshold Setup

(ข) ภาพ Lookup Table

รูปที่ 4.13 Threshold Setup and Lookup Table



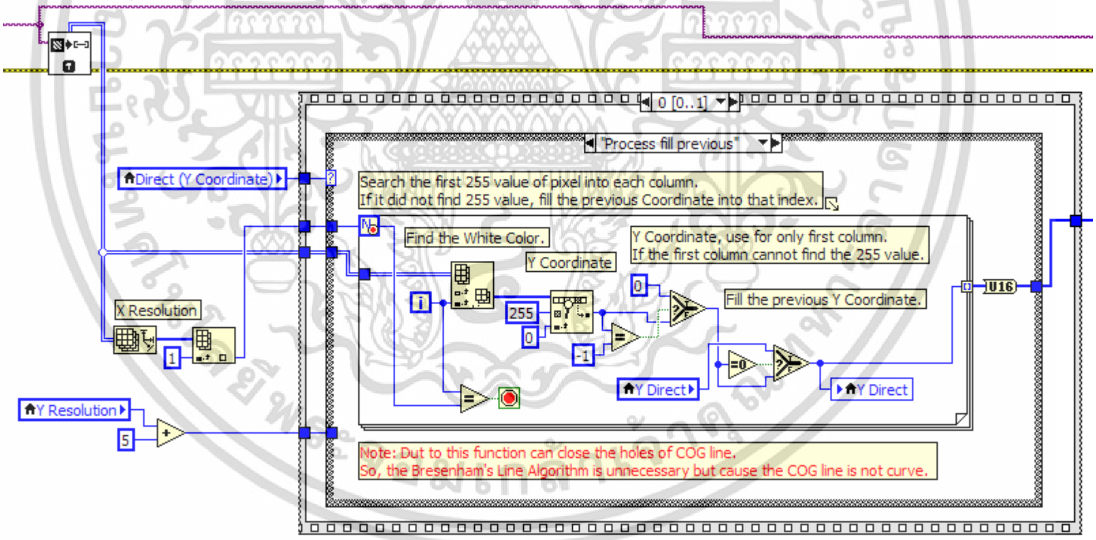
รูปที่ 4.14 Threshold Setup and Lookup Table Code ของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 Profile Extraction (Center of Gravity Calculation) หรือ COG

เป็นกระบวนการหาค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละคอลัมน์ของภาพ เมื่อหาครบทุกคอลัมน์ จะได้เส้นโครงร่างของแสงเลเซอร์หรือวัตถุ

รูปที่ 4.15 Profile Extraction (Center of Gravity Calculation)

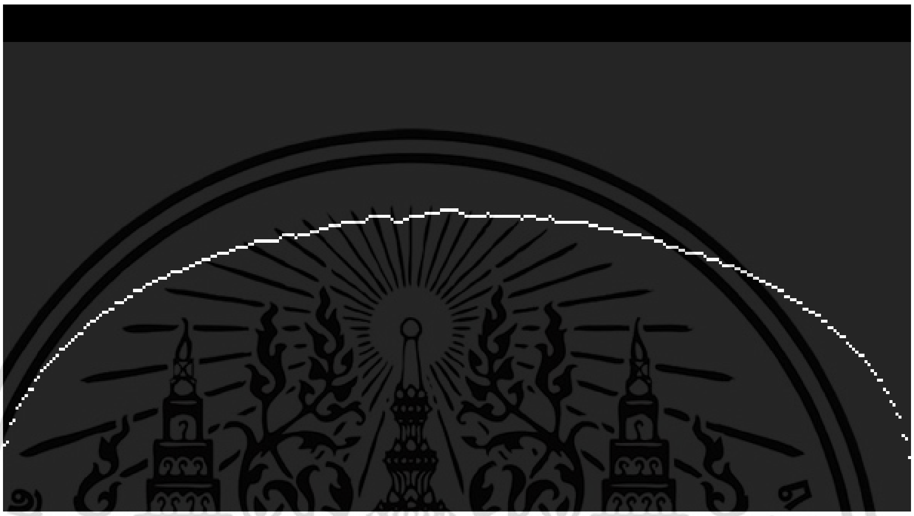


รูปที่ 4.16 Profile Extraction (Center of Gravity Calculation) Code ของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 Bresenham’s Line Algorithm

จากการทดสอบหลังจากที่ได้เส้นแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุแล้วจะเห็นได้ว่าภาพของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบ ที่รับเข้ามาประมวลผล มีบางภาพเส้นขาดหายไป เป็นผลอันเนื่องมาจากพื้นผิวของวัตถุเกิดการสะท้อนแสงเลเซอร์ จึงทำให้กล้องจับภาพเส้นของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบขาดไปในบางขณะ จึงได้นำเอาหลักการของอัลกอริทึมเส้นตรงของ Bresenham เข้ามาช่วยเติมพิกเซลที่ขาดของเส้น COG ซึ่งทำให้สมบูรณ์ใกล้เคียงกับโครงร่างจริงของวัตถุ



รูปที่ 4.17 Bresenham’s Line Algorithm

```
point = [x0 y0 x1 y1];

%if (abs(point(4)-point(2)) > abs(point(3)-point(1)))      % If the line is steep
   x0 = point(1);y0 = point(2); x1 = point(3);y1=point(4);
%else
%   x0 = point(2);y0 = point(1); x1 = point(4);y1=point(3);% then it would be converted to
%end
if(x0 >x1)
   temp1 = x0; x0 = x1; x1 = temp1;
   temp2 = y0; y0 = y1; y1 = temp2;
end
dx = abs(x1 - x0) ;                    % Distance to travel in x-direction
dy = abs(y1 - y0);                     % Distance to travel in y-direction
sx = sign(x1 - x0);                    % sx indicates direction of travel in X-dir
sy = sign(y1 - y0);                    % Ensures positive slope line
x = x0; y = y0;                        % Initialization of line
param = 2*dy - dx ;                      % Initialization of error parameter
for i = 0:dx-1                         % FOR loop to travel along X
   x_coord(i+1) = x;                   % Saving in matrix form for plot
   y_coord(i+1) = y;
   param = param + 2*dy;                   % parameter value is modified
   if (param >0)                       % if parameter value is exceeded
      y = y +1*sy;                     % then y coordinate is increased
      param = param - 2*(dx );             % and parameter value is decreased
   end
   x = x + 1*sx;                       % X-coordinate is increased for next point
end
```

x0 y0 x1 y1 → x_coord y_coord

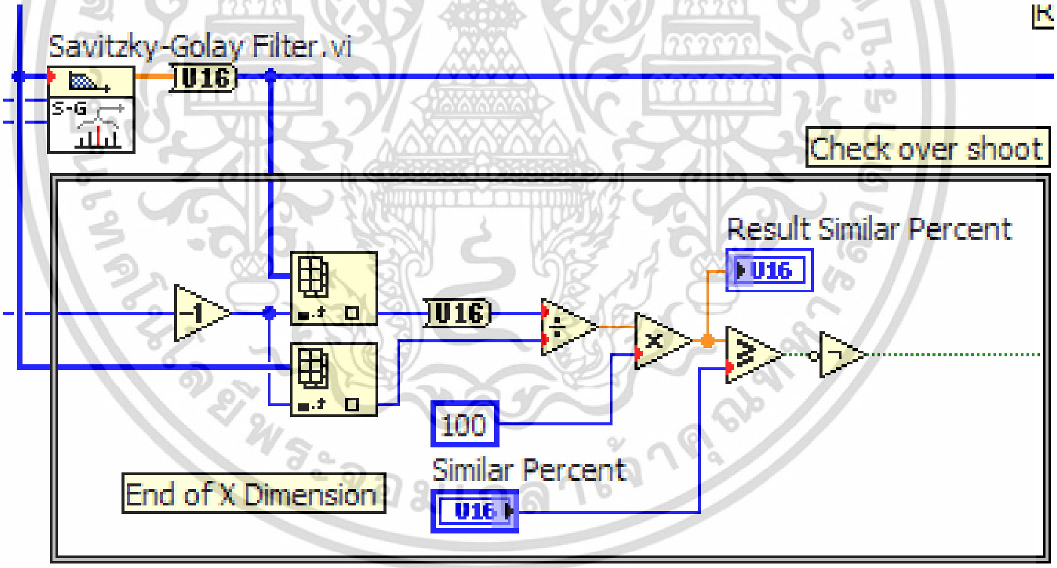
รูปที่ 4.18 Bresenham’s Line Algorithm MathScript Node Code ของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 Savitzky-Golay Filter Process

เป็นกระบวนการทำให้เส้น COG ราบเรียบขึ้น สมบูรณ์ใกล้เคียงกับโครงร่างจริงของวัตถุมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 4.19 Savitzky-Golay Filter Process



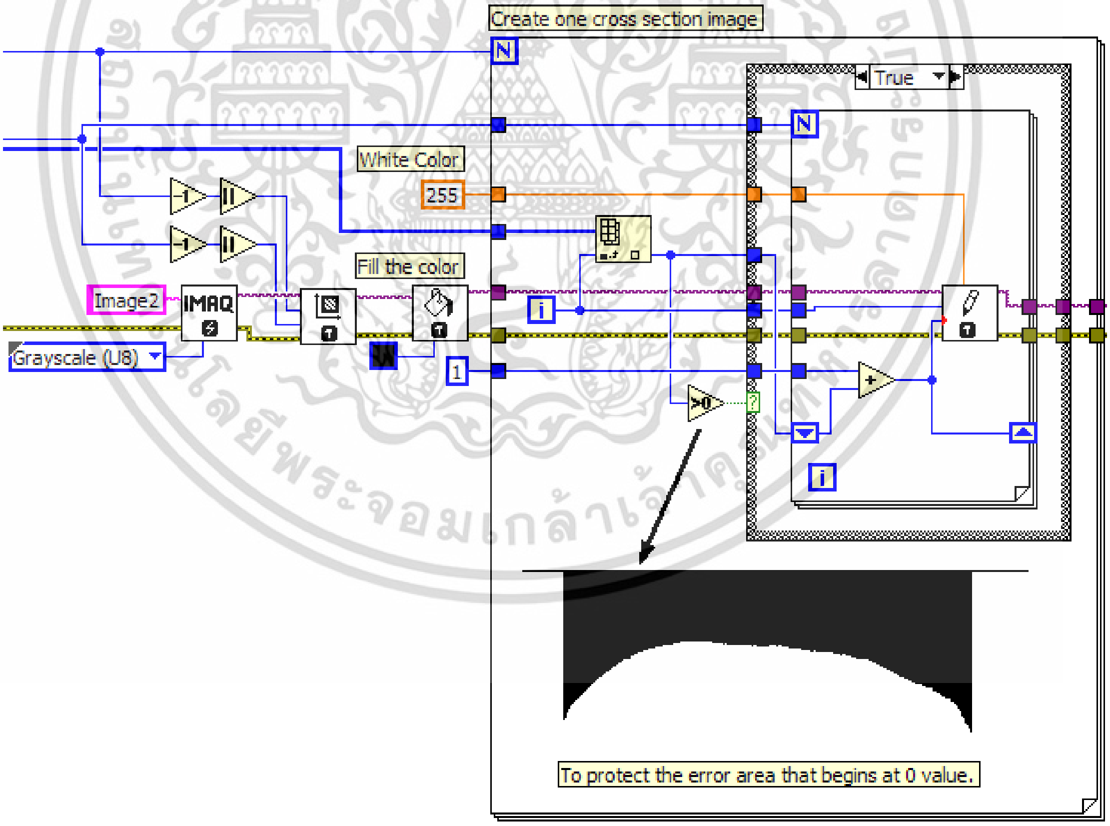
รูปที่ 4.20 Savitzky-Golay Filter Code ของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 Cross Section Image Process

เป็นกระบวนการเติมพื้นที่ของหน้าตัดด้วยพิกเซลสีขาวให้เต็มในแนวแกน Y

รูปที่ 4.21 Cross Section Image Process



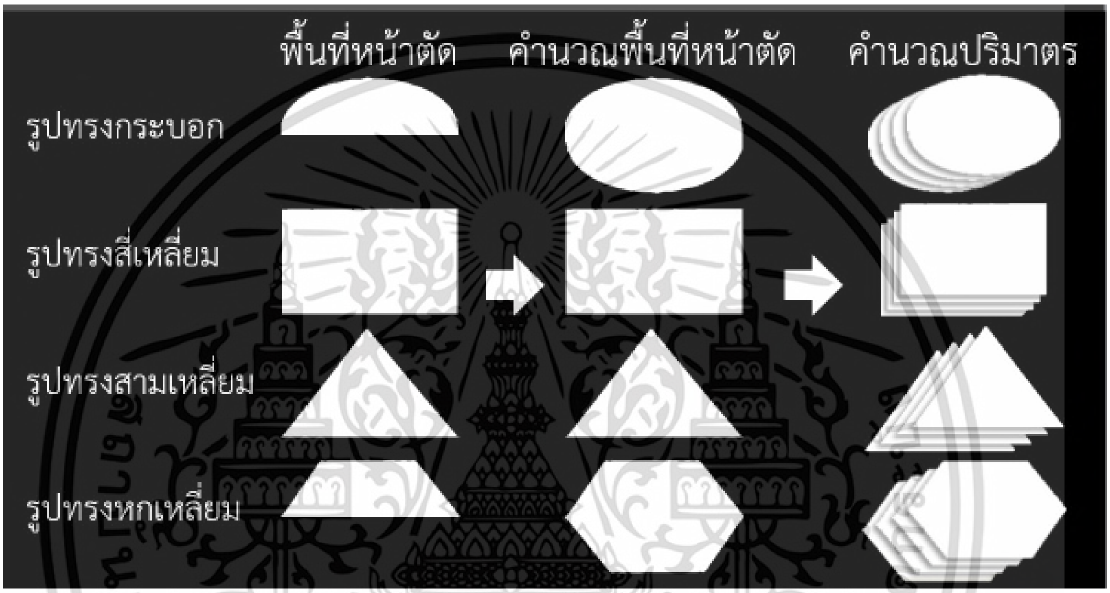
รูปที่ 4.22 Cross Section Image Process Code ของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.7 Volume Calculation

เป็นกระบวนการแปลงจำนวนพิกเซลสีขาวของภาพในแต่ละหน้าตัดให้เป็นพื้นที่และทำการรวมพื้นที่ของแต่ละหน้าตัดให้เป็นปริมาตร จากรูปที่ 4.23 ก่อนคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด ต้องคำนวณหาจำนวนพิกเซลสีขาวในแต่ละหน้าตัดดังนี้

จำนวนพิกเซลสีขาวของรูปทรงกระบอก = จำนวนพิกเซลสีขาวที่นับได้ x 2
จำนวนพิกเซลสีขาวของรูปทรงสี่เหลี่ยม = จำนวนพิกเซลสีขาวที่นับได้
จำนวนพิกเซลสีขาวของรูปทรงสามเหลี่ยม = จำนวนพิกเซลสีขาวที่นับได้
จำนวนพิกเซลสีขาวของรูปทรงหกเหลี่ยม = จำนวนพิกเซลสีขาวที่นับได้ x 2



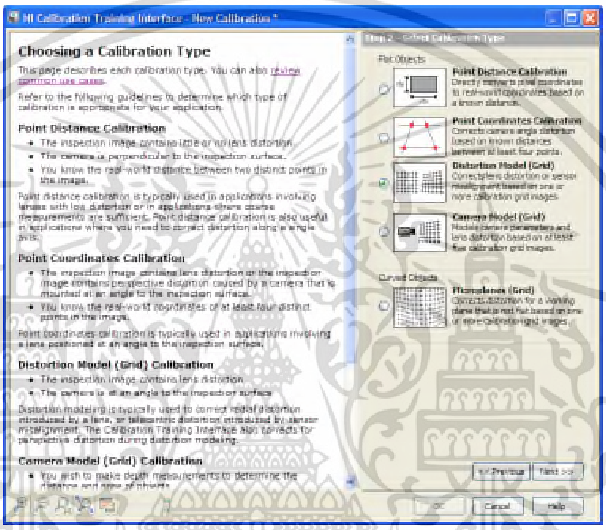
รูปที่ 4.23 Volume Calculation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

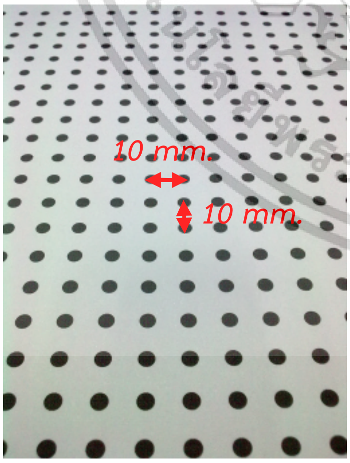
4.3.8 การสอบเทียบ

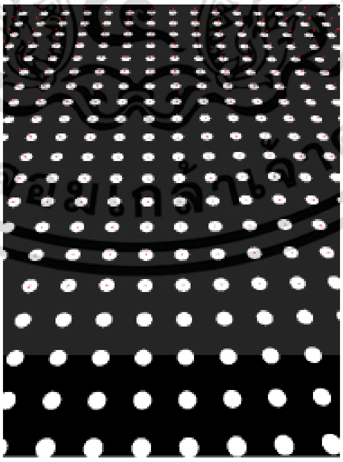
การสอบเทียบเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งในการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุเพราะจะมีผลกับความผิดพลาดในการตรวจวัด การสอบเทียบนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการสอบเทียบ เป็นการแปลงจุดพิกัดภาพเป็นพิกัดจริง ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงใช้ตารางการสอบเทียบขนาด 10 x 10 mm ในการสอบเทียบ ซึ่งในแต่ละช่องของตารางจะมีความกว้างและความยาวเท่ากับ 10 มิลลิเมตร

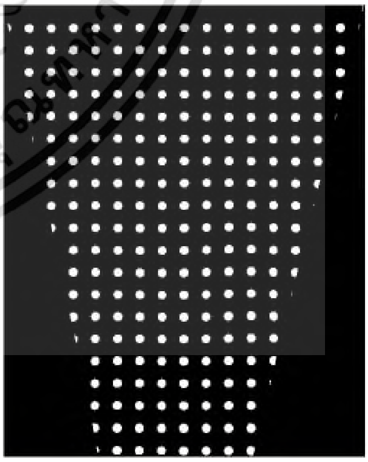
ในการสอบเทียบจะต้องวางตำแหน่งของแผ่นตารางการสอบเทียบให้อยู่ระนาบเดียวกับระนาบของเส้นแสงเลเซอร์ที่จะฉายลงบนวัตถุ จากนั้นก็จะทำการบันทึกภาพโดยกล้องที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุ ซึ่งจะทำมุมเดียวกับระนาบของแสงเลเซอร์ เมื่อได้ภาพของแผ่นตารางที่ใช้ในการสอบเทียบแล้วเลือกรูปแบบ Distortion Model (Grid) Calibration ในการสอบเทียบ



(ก) เลือกรูปแบบ Distortion Model (Grid) Calibration ในการสอบเทียบ







(ข) Grid Image (ค) Point Distortion Overlay (ง) Corrected Image

รูปที่ 4.24 ตารางการสอบเทียบขนาด 10 x 10 mm ที่ใช้ในการสอบเทียบกล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองการตรวจวัดปริมาตรและความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ และการตรวจวัดปริมาตรของผลไม้ต่าง ๆ

โดยทำการทดลองวางวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ ในมุมเอียงที่แตกต่างกัน คือ ทำมุมกับสายพานลำเลียง -30° -15° 0° +15° +30° เพื่อศึกษาผลกระทบจากการวางวัตถุเอียง และทำการทดลองตรวจวัดปริมาตรของผลไม้ต่าง ๆ โดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอมาทำการทดสอบ

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองใช้โปรแกรมที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพในการตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรตามเวลาจริง (Real Time) ในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากล และใช้กล้องซีซีดี (CCD Camera) ของบริษัท Basler รุ่น SCA1000-30fc ซึ่งมีความละเอียด 1032x778 พิกเซล มีความเร็วในการจับภาพที่ 30 เฟรมต่อวินาที สามารถควบคุมการจับภาพได้จากสัญญาณภายนอก และใช้การเชื่อมต่อแบบ IEEE1394b ในการติดตั้งกล้องจะต้องคำนึงถึงการบดบังด้วย ดังนั้นจึงควรติดตั้งโดยที่กล้องทำมุมกับระนาบของเลเซอร์ที่ระหว่าง 30 ถึง 60 องศา โดยกล้องได้ทำการติดตั้งตัวกรองคลื่นแสงย่านสีแดง (620-650 Narrow Band Pass Filter) เพื่อช่วยในการป้องกันแสงรบกวนจากคลื่นแสงย่านความถี่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่ความถี่ในของคลื่นแสงย่านของสีแดงที่ต้องการตรวจจับจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ ใช้แสงเลเซอร์แบบเส้นความยาวคลื่น 650 nm ส่วนอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุเป็นสายพานลำเลียงใช้มอเตอร์กระแสสลับเป็นตัวขับเคลื่อน ใช้แผ่นตารางในการสอบเทียบระบบโดยซึ่งแต่ละจุดของตารางมีขนาด 10 x 10 mm.

รูปที่ 5.1 กล้อง Basler รุ่น SCA1000-30fc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.2 เลนซ์ SV-1214V

รูปที่ 5.3 ตัวกรองคลื่นแสงย่านสีแดง Sharp Cut Filters R64-27 M27x0.5

รูปที่ 5.4 ระบบตรวจวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรตามเวลาจริง (Real Time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 วัตถุที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ใช้เวอเนียร์ทำการวัดขนาดความกว้าง ความยาวและความสูงของวัตถุรูปทรงกระบอก รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยมและรูปทรงหกเหลี่ยม เพื่อทำการสอบเทียบค่าที่ได้จากวิธีการที่ได้นำเสนอกับค่าที่ได้จากการคำนวณและทำการเปรียบเทียบค่าปริมาตรของผลไม้ แอปเปิ้ล ฝรั่ง แครอท และฟัก ด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอกับค่าที่ได้จากวิธีการหาปริมาตรโดยการชั่งน้ำหนักในน้ำ เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวัดความยาวของวัตถุและปริมาตร

(1) รูปทรงสามเหลี่ยม (2) รูปทรงสี่เหลี่ยม (3) รูปทรงหกเหลี่ยม (4) รูปทรงกระบอก

รูปที่ 5.5 วัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

(1) แอปเปิ้ล (2) ฝรั่ง (3) แครอท (4) ฟัก

รูปที่ 5.6 ผลไม้ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การสอบเทียบความยาวและปริมาตร

ในการทดลอง ได้ทำการสอบเทียบความถูกต้องของระบบการวัดด้วยการสอบเทียบค่าความยาวและปริมาตรที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอกับวัตถุรูปทรงเรขาคณิตที่รู้ค่าความยาวและปริมาตร จากตารางที่ 5.1 แสดงการสอบเทียบค่าความผิดพลาดของความยาวและปริมาตร พบว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่าความผิดพลาดจากการสอบเทียบค่าความยาวและปริมาตรอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ มกอช. 14-2550 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเรื่องขนาดของส้มเปลือกล่อนที่ยอมให้มีได้ในแต่ละภาชนะบรรจุ ได้ไม่เกิน 5% [26]

ตารางที่ 5.1 แสดงการสอบเทียบค่าความผิดพลาดของความยาวและปริมาตร

รูปทรง	ความยาว (mm)	ปริมาตร (mm^3)	ความยาวที่วัดได้ (mm)	ความผิดพลาดความยาวที่วัดได้ (%)	ปริมาตรที่วัดได้ (mm^3)	ความผิดพลาดปริมาตรที่วัดได้ (%)
รูปทรงกระบอก	119	336294	120.83	1.54	351100	4.40
รูปทรงสี่เหลี่ยม	119	428400	120.72	1.45	443800	3.59
รูปทรงสามเหลี่ยม	119	238261	120.59	1.34	248600	4.34
รูปทรงหกเหลี่ยม	119	378723	120.55	1.31	392900	3.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลการทดลองและวิจารณ์

ตารางที่ 5.2 – 5.6 แสดงค่าที่ได้จากการวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตร เมื่อวางวัตถุ 5 มุม คือ มุม -30° -15° 0° +15° +30° โดยควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ 30 mm/sec

จากเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดในการวัดความยาวของวัตถุเมื่อวางวัตถุ 5 มุม คือ มุม -30° -15° 0° +15° +30° โดยควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ 30 mm/sec ตามตารางที่ 5.7 และ รูปที่ 5.7 วัตถุรูปทรงกระบอก รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยมและรูปทรงหกเหลี่ยมมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุด 1.54% 1.48% 1.35% และ 1.31% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำสุด 1.46% 1.38% 1.32% และ 1.25% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ย 1.49% 1.43% 1.34% และ 1.27% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.03% 0.04% 0.01% และ 0.02% ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าที่ได้จากการวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม -30°

การวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตร (mm)					
องศา	ครั้งที่	รูปทรงกระบอก	รูปทรงสี่เหลี่ยม	รูปทรงสามเหลี่ยม	รูปทรงหกเหลี่ยม
-30	1	125.81	125.84	124.98	125.53
	2	125.65	125.54	125.78	124.97
	3	125.92	125.84	125.94	125.51
	4	125.81	125.74	125.88	125.52
	5	125.93	125.61	125.63	125.60
	6	125.82	125.79	125.73	125.56
	7	125.94	125.77	125.60	125.47
	8	125.73	125.78	125.58	125.97
	9	125.85	125.71	125.87	125.59
	10	125.83	125.74	125.78	125.95
Mean		125.83	125.74	125.68	125.57

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าที่ได้จากการวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม -15°

การวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตร (mm)					
องศา	ครั้งที่	รูปทรงกระบอก	รูปทรงสี่เหลี่ยม	รูปทรงสามเหลี่ยม	รูปทรงหกเหลี่ยม
-15	1	122.82	123.00	122.86	122.67
	2	122.75	122.71	122.79	122.54
	3	122.88	122.82	122.50	122.51
	4	122.99	122.73	122.64	122.22
	5	122.87	122.69	122.19	122.57
	6	122.91	122.78	122.60	122.77
	7	122.52	122.74	122.87	122.57
	8	122.67	122.69	122.66	122.43
	9	122.83	122.99	122.33	122.50
	10	122.81	122.75	122.56	122.88
Mean		122.81	122.79	122.60	122.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าที่ได้จากการวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม 0°

การวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตร (mm)					
องศา	ครั้งที่	รูปทรงกระบอก	รูปทรงสี่เหลี่ยม	รูปทรงสามเหลี่ยม	รูปทรงหกเหลี่ยม
0	1	120.81	120.62	120.69	120.68
	2	120.88	120.76	120.38	120.45
	3	120.73	120.63	120.79	120.55
	4	120.66	120.86	120.59	120.32
	5	120.83	120.61	120.54	120.17
	6	120.84	120.72	120.55	120.55
	7	120.87	120.92	120.59	120.85
	8	120.91	120.75	120.52	120.89
	9	120.95	120.62	120.59	120.55
	10	120.83	120.75	120.65	120.52
Mean		120.83	120.72	120.59	120.55

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าที่ได้จากการวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม +15°

การวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตร (mm)					
องศา	ครั้งที่	รูปทรงกระบอก	รูปทรงสี่เหลี่ยม	รูปทรงสามเหลี่ยม	รูปทรงหกเหลี่ยม
+15	1	122.81	122.83	122.62	122.59
	2	122.88	122.75	122.89	122.13
	3	122.82	122.91	122.61	122.43
	4	122.74	122.42	122.34	122.51
	5	122.82	122.92	122.52	122.53
	6	122.89	122.45	122.62	122.74
	7	122.82	122.81	122.62	122.59
	8	122.93	122.75	122.57	122.76
	9	122.81	122.93	122.62	122.53
	10	122.71	122.75	122.79	122.44
Mean		122.82	122.75	122.62	122.53

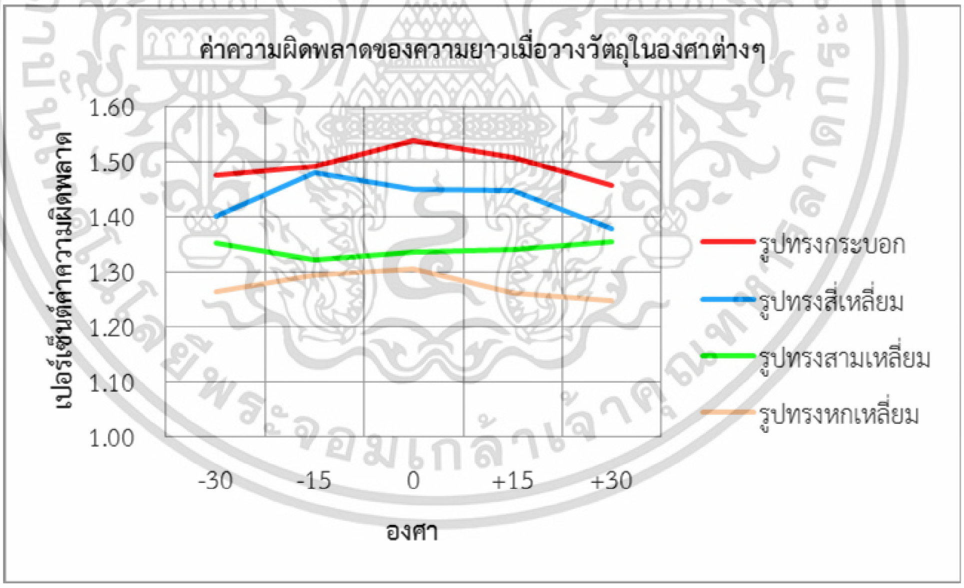
ตารางที่ 5.6 แสดงค่าที่ได้จากการวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม +30°

การวัดความยาวของวัตถุรูปทรงสมมาตร (mm)					
องศา	ครั้งที่	รูปทรงกระบอก	รูปทรงสี่เหลี่ยม	รูปทรงสามเหลี่ยม	รูปทรงหกเหลี่ยม
+30	1	125.82	125.72	125.58	125.35
	2	125.44	125.68	125.63	125.59
	3	125.78	125.71	125.68	125.48
	4	125.83	125.86	125.78	125.58
	5	125.94	125.75	125.68	125.66
	6	125.82	125.62	125.43	125.44
	7	125.98	125.53	125.88	125.55
	8	125.75	125.71	125.88	125.59
	9	125.89	125.89	125.57	125.66
	10	125.81	125.61	125.68	125.55
Mean		125.81	125.71	125.68	125.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของความยาวเมื่อวางวัตถุในองศาต่าง ๆ

เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของความยาวเมื่อวางวัตถุในองศาต่างๆ				
องศา	วัตถุ			
	รูปทรงกระบอก ความผิดพลาด (%)	รูปทรงสี่เหลี่ยม ความผิดพลาด (%)	รูปทรงสามเหลี่ยม ความผิดพลาด (%)	รูปทรงหกเหลี่ยม ความผิดพลาด (%)
-30	1.47	1.40	1.35	1.26
-15	1.49	1.48	1.32	1.29
0	1.54	1.45	1.34	1.31
+15	1.51	1.45	1.34	1.26
+30	1.46	1.38	1.35	1.25
Mean Error	1.49	1.43	1.34	1.27
Std Dev Error	0.03	0.04	0.01	0.02
Minimum Error	1.46	1.38	1.32	1.25
Maximum Error	1.54	1.48	1.35	1.31



รูปที่ 5.7 แสดงกราฟค่าความผิดพลาดของความยาวเมื่อวางวัตถุในองศาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 – 5.12 แสดงค่าที่ได้จากการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร เมื่อวางวัตถุ 5 มุม คือ มุม -30° -15° 0° +15° +30° โดยควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ 30 mm/sec

จากเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดในการวัดปริมาตรของวัตถุเมื่อวางวัตถุ 5 มุม คือ -30° -15° 0° +15° +30° โดยควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ 30 mm/sec ตามตารางที่ 5.13 และ รูปที่ 5.8 วัตถุรูปทรงกระบอก รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยมและรูปทรงหกเหลี่ยมมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุด 4.61% 3.59% 4.34% และ 3.96% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำสุด 4.40% 3.43% 4.17% และ 3.74% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ย 4.50% 3.52% 4.26% และ 3.85% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.08% 0.06% 0.06% และ 0.08% ตามลำดับ

ตารางที่ 5.8 แสดงค่าที่ได้จากการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม -30°

การวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร (mm^3)					
องศา	ครั้งที่	รูปทรงกระบอก	รูปทรงสี่เหลี่ยม	รูปทรงสามเหลี่ยม	รูปทรงหกเหลี่ยม
-30	1	360000	451200	239200	392107
	2	341800	438000	258100	383005
	3	322500	444300	249300	395303
	4	381100	431200	227100	394500
	5	351300	441300	268400	393303
	6	342200	463800	237300	389101
	7	330900	446700	248200	396400
	8	362000	423900	267100	393203
	9	350800	446200	238100	399108
	10	371400	448400	249200	396004
Mean		351400	443500	248200	393203

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าที่ได้จากการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม -15°

การวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร (mm^3)					
องศา	ครั้งที่	รูปทรงกระบอก	รูปทรงสี่เหลี่ยม	รูปทรงสามเหลี่ยม	รูปทรงหกเหลี่ยม
-15	1	350600	453400	243200	388923
	2	362700	443500	247500	398923
	3	351500	432700	252100	387923
	4	332600	454600	236300	399723
	5	351400	433600	245600	378923
	6	341700	442300	256500	399623
	7	342500	452800	249200	388723
	8	351700	426500	248600	396923
	9	374500	454800	255400	399823
	10	358800	441800	249600	397723
Mean		351800	443600	248400	393723

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าที่ได้จากการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม 0°

การวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร (mm³)					
องศา	ครั้งที่	รูปทรงกระบอก	รูปทรงสี่เหลี่ยม	รูปทรงสามเหลี่ยม	รูปทรงหกเหลี่ยม
0	1	348100	445500	248700	399500
	2	352100	439500	257600	391900
	3	344200	443700	247500	393900
	4	352000	451800	247200	397500
	5	351100	442700	248200	387900
	6	361100	439800	243600	388700
	7	341100	443900	250000	393000
	8	357100	449700	249500	385900
	9	350600	433600	249600	392800
	10	353600	447800	244100	397900
Mean		351100	443800	248600	392900

ตารางที่ 5.11 แสดงค่าที่ได้จากการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม +15°

การวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร (mm³)					
องศา	ครั้งที่	รูปทรงกระบอก	รูปทรงสี่เหลี่ยม	รูปทรงสามเหลี่ยม	รูปทรงหกเหลี่ยม
+15	1	351400	442300	249200	393100
	2	348800	451300	248100	393000
	3	359500	440100	248300	394300
	4	359900	443100	251200	393500
	5	341300	451000	248400	392330
	6	350200	443800	251300	393102
	7	350000	450000	248200	393400
	8	349800	441900	243500	393201
	9	350100	440200	245200	393101
	10	352000	430300	250210	393200
Mean		351300	443400	248361	393223

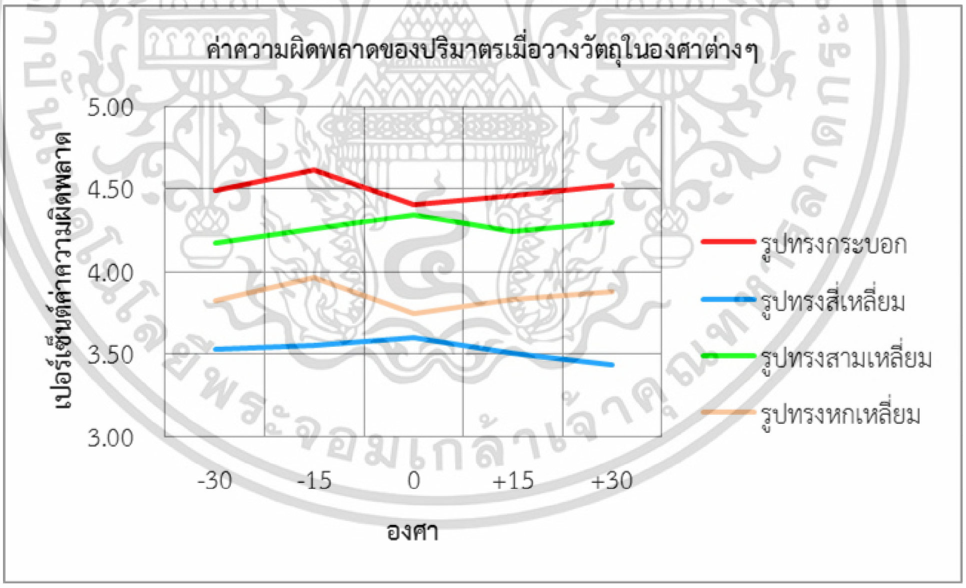
ตารางที่ 5.12 แสดงค่าที่ได้จากการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรที่มุม +30°

การวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร (mm³)					
องศา	ครั้งที่	รูปทรงกระบอก	รูปทรงสี่เหลี่ยม	รูปทรงสามเหลี่ยม	รูปทรงหกเหลี่ยม
+30	1	351000	443200	249400	392800
	2	351600	440500	258100	393000
	3	361500	450300	248300	393500
	4	341100	443600	239600	388800
	5	352300	433400	247400	397300
	6	350100	443800	258300	389900
	7	352900	453700	248900	393400
	8	351300	440900	238900	393203
	9	351800	441200	248100	393100
	10	351400	440400	248000	399000
Mean		351500	443100	248500	393400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของปริมาตรเมื่อวางวัตถุในองศาต่าง ๆ

เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของปริมาตรเมื่อวางวัตถุในองศาต่างๆ				
องศา	วัตถุ			
	รูปทรงกระบอก ความผิดพลาด (%)	รูปทรงสี่เหลี่ยม ความผิดพลาด (%)	รูปทรงสามเหลี่ยม ความผิดพลาด (%)	รูปทรงหกเหลี่ยม ความผิดพลาด (%)
-30	4.49	3.52	4.17	3.82
-15	4.61	3.55	4.26	3.96
0	4.40	3.59	4.34	3.74
+15	4.46	3.50	4.24	3.83
+30	4.52	3.43	4.30	3.88
Mean Error	4.50	3.52	4.26	3.85
Std Dev Error	0.08	0.06	0.06	0.08
Minimum Error	4.40	3.43	4.17	3.74
Maximum Error	4.61	3.59	4.34	3.96



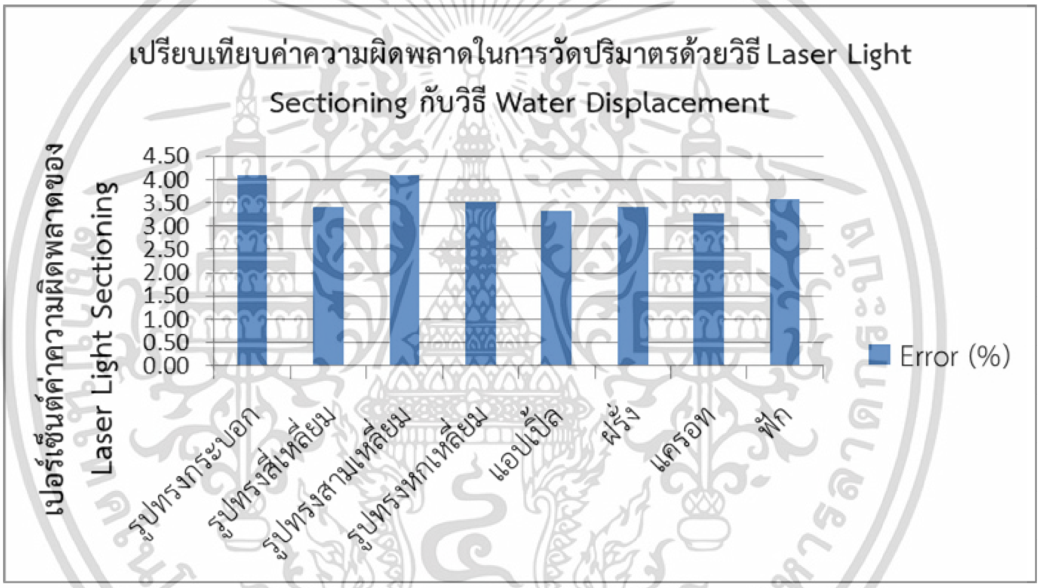
รูปที่ 5.8 แสดงกราฟค่าความผิดพลาดของปริมาตรเมื่อวางวัตถุในองศาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดในการวัดปริมาตรของผลไม้ชนิดต่าง ๆ โดยควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ 30 mm/sec ตามตารางที่ 5.14 และ รูปที่ 5.9 วัตถุรูปทรงกระบอก รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยม รูปทรงหกเหลี่ยม แอปเปิ้ล ฝรั่ง แครอทและฟัก มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 4.11% 3.41% 4.09% 3.51% 3.33% 3.39% 3.28% และ 3.56% ตามลำดับ

ตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในการวัดปริมาตรด้วยวิธี Laser Light Sectioning กับวิธี Water Displacement

เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในการวัดปริมาตรด้วยวิธี Laser Light Sectioning กับวิธี Water Displacement								
วิธี	รูปทรงกระบอก	รูปทรงสี่เหลี่ยม	รูปทรงสามเหลี่ยม	รูปทรงหกเหลี่ยม	แอปเปิ้ล	ฝรั่ง	แครอท	ฟัก
Laser Light Sectioning Error (%)	4.11	3.41	4.09	3.51	3.33	3.39	3.28	3.56



รูปที่ 5.9 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในการวัดปริมาตรด้วยวิธี Laser Light Sectioning กับวิธี Water Displacement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของความยาวและปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตร และค่าความผิดพลาดของปริมาตรของผลไม้ชนิดต่าง ๆ จากการทดลองวางวัตถุรูปทรงสมมาตรในองศาต่าง ๆ และการทดลองหาปริมาตรของผลไม้ชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับการหาปริมาตรโดยการชั่งวัตถุแทนที่ในน้ำ พบว่าค่าที่ได้จากวิธีการที่ได้นำเสนอกับค่าที่ได้จากการคำนวณปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรและการหาปริมาตรโดยการชั่งวัตถุแทนที่ในน้ำของผลไม้ชนิดต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน มีความแม่นยำอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้และแสดงให้เห็นว่าเครื่องวัดที่นำเสนอนี้สามารถวัดความยาวและปริมาตรในมุมใดก็ได้ ไม่จำเป็นต้องอยู่ในมุม 0 องศา เพียงอย่างเดียวแต่วัตถุต้องอยู่ในเฟรมของกล้อง ตลอดช่วงเวลาในการตรวจวัด

ค่าความผิดพลาดที่ไม่เท่ากันที่เกิดขึ้นจากการวัดความยาวของวัตถุ เมื่อวางวัตถุเอียงที่มุม -30° เปรียบเทียบกับ +30° และที่มุม -15° เปรียบเทียบกับ +15° เกิดมาจากความเร็วของสายพานลำเลียงที่ไม่คงที่ในบางช่วงขณะ ทำให้ค่าของเวลาที่วัตถุตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์มีค่าไม่เท่ากัน เมื่อนำค่าเวลานี้มาคำนวณหาความยาวของวัตถุ ค่าความผิดพลาดที่ได้จึงไม่เท่ากัน

ค่าความผิดพลาดที่ไม่เท่ากันที่เกิดขึ้นจากการวัดปริมาตรของวัตถุ เมื่อวางวัตถุเอียงที่มุม -30° เปรียบเทียบกับ +30° และที่มุม -15° เปรียบเทียบกับ +15° เกิดมาจากวิธีการที่ใช้ในการหาเนื่องจากเป็นการรวมพื้นที่หน้าตัดของแต่ละส่วนของวัตถุเข้าด้วยกัน หากค่าความยาวของวัตถุที่คำนวณได้มีความผิดพลาดที่เกิดมาจากความเร็วของสายพานลำเลียงที่ไม่คงที่ในบางช่วงขณะและการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดมีความผิดพลาดอยู่แล้ว เมื่อนำค่าทั้งสองมาคำนวณเป็นปริมาตร ก็จะยิ่งเพิ่มค่าความผิดพลาดให้เพิ่มขึ้นมากตามไปด้วย

วิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ให้ผลลัพธ์ในการวัดความยาวและปริมาตรของวัตถุที่มีความแม่นยำสูงและมีค่าเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดค่อนข้างต่ำ และจะมีความผิดพลาดอยู่บ้างพอสมควรในการวัดปริมาตร แต่ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการคัดขนาดหรือตรวจสอบวัตถุที่ไม่ได้ต้องการความแม่นยำสูงมากนัก หรือนำไปประยุกต์ใช้วัดขนาดและตรวจสอบวัตถุที่มีลักษณะรูปทรงที่สมมาตรและเป็นรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานต่าง ๆ ได้แก่ รูปทรงกระบอก รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยม รูปทรงหกเหลี่ยม รูปทรงกลม รูปทรงวงรี ผักและผลไม้ เป็นต้น

นอกจากนั้นวิธีการที่ได้นำเสนอนี้อาจเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปให้เพิ่มความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ระบบขัดแยกและตรวจสอบขนาดวัตถุดิบแบบ Real Time ระบบขัดแยกและตรวจสอบขนาดชิ้นส่วนแบบ Real Time ระบบขัดแยกและตรวจสอบขนาดผลผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตรและอาหารแบบ Real Time เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรตามเวลาจริงบนสายพานลำเลียง โดยทำการทดลองวางวัตถุในมุมเอียงที่แตกต่างกัน คือ ทำมุมกับสายพานลำเลียง -30° -15° 0° +15° +30° เพื่อศึกษาผลกระทบจากการวางวัตถุเอียงเป็นกรณีศึกษา และทำการทดลองตรวจวัดปริมาตรของผลไม้ต่าง ๆ โดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุที่ได้นำเสนอมาทำการทดสอบ

ระบบต้นแบบประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพจากกล้องที่รับภาพของลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ โดยที่วัตถุจะเคลื่อนที่ไปบนสายพานลำเลียง ภาพลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุสีแดงที่ได้ ผ่านตัวกรองแสงความยาวคลื่นย่าน 650 nm เพื่อตัดแสงรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอกออกไปและทำการปรับปรุงภาพด้วย Threshold Setup Lookup Table การวาดเส้นด้วยอัลกอริทึมแบบ Bresenham’s Line Algorithm และ ตัวกรองแบบ Savitzky-Golay Filter เพื่อให้ได้โครงร่างของแสงเลเซอร์ที่สมบูรณ์ ก่อนนำมาคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ การคำนวณอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลของภาพให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) ในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ พื้นที่หน้าตัดจะถูกคำนวณและนำมารวมกันเป็นปริมาตรของวัตถุ ในการทดลองได้ทำการทดสอบความถูกต้องของระบบการวัดด้วยการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรเรขาคณิตที่รู้ค่าความกว้าง ความยาว ความสูง และปริมาตร ค่าผิดพลาดจากการทดลองอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ วิธีการที่นำเสนอนี้ จัดเป็นวิธีการวัดแบบไม่ทำลายวัตถุและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องคัดขนาดแบบอัตโนมัติ เช่น ปลา พืชผลทางการเกษตรและอื่น ๆ ที่มีลักษณะรูปทรงสมมาตรได้เป็นอย่างดี

6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

จากการวิจัยพบปัญหาในการควบคุมความเร็วของสายพานลำเลียงส่งผลให้การวัดปริมาตรของวัตถุในบางขณะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งอาจสามารถแก้ไขได้โดยการติดตั้ง Sensor วัดความเร็วของสายพานลำเลียง เมื่อค่าความเร็วมีการเปลี่ยนแปลง โปรแกรมจะคำนวณหาค่าปริมาตรได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น จึงจะสามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากความเร็วของสายพานลำเลียงในบางช่วงขณะเวลาที่ไม่สม่ำเสมอได้ ระบบการวัดจึงมีความถูกต้อง และมีความแม่นยำในการวัดมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Nunak, N. and Suesut, T. “Measuring Geometric Mean Diameter of Fruit and Vegetable Using Computer Vision.” **PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE-2007, Thailand.** 2007.

[2] Bradley, B.D. Hayes, M.J.D. and Chan, A.D.C. “A Simple Low Cost 3D Scanning System Using The Laser Light-Sectioning Method.” **IEEE Conference on Instrumentation and Measurement Technology (I2MTC).** 2008. British Columnbia, Canada

[3] Pernkopf, F. and O’Leary, P. “Image Acquisition Techniques for Automatic Visual Inspection of Metallic Surfaces.” **NDT&E International.** 2003. Vol.36. 609–617.

[4] Zhongdong, Y. Peng, W. Xiaohui, L. and Changu, S. “3D Laser Scanner System Using High Dynamic Range Imaging.” **Optics and Lasers in Engineering**. 2014. 54. 31-41.

[5] Fu, G. Menciassia, A. and Darioa, P. “Development of A Low-Cost Active 3D Triangulation Laser Scanner for Indoor Navigation of Miniature Mobile Robots.” **Robotics and Autonomous Systems.** 2012. 60. 1317–1326.

[6] Ozan, S. and Gümüstekin, S. “Calibration of Double Stripe 3D Laser Scanner Systems Using Planarity and Orthogonality Constraints.” **Digital Signal Processing.** January 2014. Volume 24. Pages 231-243.

[7] Criminisi, A. Reid, I. and Zisserman, A. “Single View Metrology.” **International Journal of Computer Vision**. 2000. 123–148.

[8] O’Leary, P. Harker, M. and Zsombor-Murray, P. “Direct Lease-Squares Fitting of Coupled Geometric Object.” **IEE Proceeding Vision, Image and Signal Processing.** Vol.152. 2005. 687-694.

[9] Nunak, N. and Suesut, T. “Fish Size Measurement by Computer Vision Using Laser Light Sectioning.” **The 10th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering Thailand.** 2009.

[10] Gulphanich, S. Songthai, M. and Suesut, T. “Volume Estimation of Symmetrical Object Using Laser Light Sectioning.” **Proceedings of The IASTED International Conference Modelling, Identification and Control (MIC 2014).** Innsbruck, Austria February 17–19, 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[11] พงศ์เทพ ศรีสกุลเตียว. **"ระบบวิทัศน์จักรกลสำหรับวัดปริมาตรและคัดแยกปลาแบบต่อเนื่อง."** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.

[12] ศรายุทธ อินทุเศรษฐ. **"การวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ."** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.

[13] Stone, W. C. Juberts, M. and Dagalakis, N. "Performance Analysis of Next-Generation LADAR for Manufacturing, Construction, and Mobility." **United States Department of Commerce Technology Administration National Institute of Standards and Technology**. NISTIR 7117 May 2004.

[14] Schalk, P. O'Leary, P. Ofner, R. and Gfrerrer, A. "Measuring and Analyzing Cross-Sectional Profiles of Rotating Objects Using Light Sectioning." **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement.** Volume 57 No. 10. 2008. page 2329–2338.

[15] Beverly D. Bradley, Adrian D.C. Chan, M. John D. Hayes. "Calibration of A Simple, Low Cost, 3D Laser Light-Sectioning Scanner System for Biomedical Purposes." **Systems and Computer Engineering, Carleton University**

[16] Hartley, R. and Zisserman, A. "Multiple View Geomerty in ComputerVision." **Cambridge University Press, Second Edition**. 2003.

[17] Wong, T. Kovesi, P. and Datta, A. "Projective Transformations for Image Transition Animations." **The University of Western Australia, School of Computer Science & Software Engineering**. 35 Stirling Highway, Crawley, W.A. 6009, Australia

[18] Sukhon, R. Tulasombut, V. Laopornpichayanuwat, W. Pangviwat, T. and Mitaree, M. "Measurement of The Volume and Density of Weight by Hydrostatic Weighing Method." **National Institute of Metrology Thailand (NIMT), Mechanical Metrology Department.** 3/4-5 Moo 3, Klong 5, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand

[19] Savitzky, A. and Golay, M. J.E. "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures." **Journal of Analytical Chemistry**. Vol.36. Issue.8 1964. pp.1627-1638.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[20] Nakajima, I. Juzoji, H. Zhao, Y. and Hamamoto, N. “DSP Technology in Wearable Satellite Terminals for ETS-VII <Savitzky-Golay smoothing filter>.” **Seventh International Workshop on Digital Signal Processing Techniques for Space Communications**. 2001. pp. 131-136.

[21] O’Leary, P. Harker, M. and Neumayr, R. “Savitzky-Golay Smoothing for Multivariate Cyclic Measurement Data.” **I2MTC**. May 2010. pp. 1585-1590.

[22] Press, W. H. Flannery, B. P. Teukolsky, S. A. and Verrerling, W. .T. “Numerical Recipes The Art of Scientific Computing 2nd ED.” **Press Syndicate of The University of Cambridge, Inc**. 1997.

[23] G.P. Moreda, J. Ortiz-Cañavate, F.J. García-Ramos, M. Ruiz-Altisent. **Non-Destructive Technologies for Fruit and Vegetable Size Determination**. A review

[24] นพรัตน์ สุขเกษม. **“การวัดปริมาตรผักและผลไม้ด้วยวิธีลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง.”** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.

[25] นิตยา วงศ์หลวง. **ชุดกิจกรรมวิทยาศาสตร์ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3.** บทที่ 1 แรงและการเคลื่อนที่ ชุดที่ 3 เรื่อง แรงพยุง โรงเรียนไกรภักดีวิทยาคม อำเภอเมืองศรีสะเกษ จังหวัดศรีสะเกษ สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษา เขต 28

[26] สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2551. มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ มกอช. 14-2550 ส้มเปลือกล่อน. ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศและงานทั่วไป เล่ม 125 ตอนพิเศษ 3 ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ME NETT 28

KHON KAEN UNIVERSITY

The 28th Conference of
Mechanical Engineering Network of Thailand

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28

วันที่ 15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

"Driving ME
Research
Education
and Innovation
Towards Creative
Economy"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบวิทัศน์จักรกลสำหรับวัดปริมาตรแบบต่อเนื่อง

Machine Vision System for Continuous Volume Measurement

รัชพล ภิวัฒภัคพล และ รศ.ดร. ทวีพล ซื่อสัตย์*

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
*ติดต่อ: ratchapol99@gmail.com และ kstaweep@kmitl.co.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรแบบต่อเนื่องบนสายพานลำเลียง ระบบต้นแบบประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพจากกล้องที่รับภาพของลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยวัตถุจะเคลื่อนที่ไปบนสายพานลำเลียง ภาพของลำแสงเลเซอร์สีแดงที่ได้ผ่านตัวกรองแสงความยาวคลื่นย่านแคบที่ 650 nm เพื่อตัดแสงรบกวนจากภายนอกและทำการปรับปรุงภาพด้วย Bresenham's Line Algorithm และ Savitzky-Golay Filter เพื่อให้ได้โครงร่างของแสงเลเซอร์ที่สมบูรณ์ ก่อนนำมาคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ การคำนวณอาศัยการแปลงจำนวนพิกเซลล์ของภาพให้เป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) ในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ พื้นที่หน้าตัดจะถูกคำนวณและนำมารวมกันเป็นปริมาตรของวัตถุ ในการทดลองได้ทำการทดสอบความถูกต้องของระบบการวัดด้วยการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงเรขาคณิตที่รู้ค่าปริมาตร ค่าผิดพลาดจากการทดลองอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ วิธีการที่นำเสนอนี้ จัดเป็นวิธีการวัดแบบไม่ทำลายวัตถุ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องคัดขนาดแบบอัตโนมัติ เช่น ปลา พืชผลทางการเกษตรและอื่น ๆ ที่มีลักษณะรูปทรงสมมาตรได้เป็นอย่างดี

คำหลัก: การวัดปริมาตร; วิทัศน์จักรกล; ลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง

Abstract

This paper presents the 3-D continuous volume measurement on the conveyor for a symmetrical shape object. The prototype system consists of a computer image processing with the machine vision camera getting images of red laser line projected on the object using LabVIEW vision, the samples moved along the conveyor belt and the narrow band pass filler of a wavelength of 650 nm for eliminating the light from the environment. The image processing algorithms were applied to enhance the laser line image quality before computation the cross-sectional area of the object such as Bresenham's Line Algorithm and Savitzky-Golay. The pixels under the laser line were converted to the unit of area (sq.mm.). During the object moving on the conveyor, all area cross sections were integrated to the volume of the object. In the experiment, the accuracy of the measurement system is acceptable. Our scheme is a non-destructive method for measuring objects that can be applied to automate sizing machine such as fish, agricultural product and other symmetrical shapes as well.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST-42

***Keywords**: Volume Measurement; Machine Vision; Laser Light Sectioning.*

1. บทนำ

โดยทั่วไปการวัดปริมาณของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร เช่น ผลไม้ และ พืชผัก เนื้อปลาเนื้อสัตว์ อื่น ๆ กำหนดด้วยน้ำหนัก โดยมูลค่าหรือราคาขึ้นอยู่กับน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ แต่สำหรับสินค้าอุตสาหกรรมบางอย่าง จำเป็นต้องกำหนดขนาดโดย มิติเชิงเรขาคณิต [1] เช่น ความกว้าง ความยาว ความสูง พื้นที่หน้าตัด ปริมาตร เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการกำหนดคุณภาพและปริมาณ

จุดมุ่งหมายของการวิจัยนี้คือการประมาณค่าของขนาดวัตถุ สำหรับการใช้ในการคัดแยกขนาดแบบอัตโนมัติบนสายพานลำเลียง โดยทำการวัดต่อเนื่องแบบไม่ทำลายวัตถุ เทคโนโลยีเครื่องจักรกลวิทัศน์ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินขนาดของผลิตภัณฑ์ สำหรับการตรวจสอบนี้ใช้วัดขนาดเป็นพื้นที่หน้าตัด และปริมาตรของวัตถุโดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวัดขนาดวัตถุที่มีรูปทรงสมมาตร

โดยปกตินิยมใช้เทคนิคการประมวลผลภาพแบบสองมิติเพื่อหาขนาดของผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจมีข้อจำกัดด้านการวัดที่ไม่มีข้อมูลความหนา ทำให้ผลการวัดที่ได้ไม่ถูกต้อง วิธีการลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง ซึ่งใช้การจับภาพของลำแสงเลเซอร์ที่กระทบลงพื้นผิวของวัตถุ โดยเป็นการวัดแบบสองมิติ [7] เพื่อนำมาสร้างเป็นพื้นที่หน้าตัดและปริมาตร

เครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์สามมิติได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานหลายอย่าง เช่น การสร้างพื้นผิว [2] การสร้างแบบจำลองพื้นผิวและการตรวจสอบชิ้นงาน [3] [4] [6] และการวัดมิติเชิงเรขาคณิต [1] [8] [9] การติดตามตำแหน่งจากภาพเลเซอร์ในมุมมอง 3 มิติ ในระบบนำทางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ [5] และการหาปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรโดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง [10] ซึ่งใช้วิธีการแบบเดียวกัน แต่ใช้วิธีการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดจากสูตรทางเรขาคณิต และมีข้อจำกัดในการวางวัตถุ ซึ่งต้องวางวัตถุในแนวเส้นตรง สำหรับวิธีการที่ได้นำเสนอนี้ สามารถหาปริมาตรของวัตถุได้ใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวณ เมื่อวางวัตถุในมุมเอียงต่าง ๆ

ในบทความนี้นำเสนอการวัดปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ เช่น รูปทรงกระบอก รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยมและรูปทรงหกเหลี่ยม ใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์วัดขนาดของวัตถุและคำนวณเป็นปริมาตร นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับเทคนิคการวัดปริมาตรจากภาพโครงร่างของแสงเลเซอร์ โดยทำการทดลองวางวัตถุในมุมเอียงที่แตกต่างกัน คือ ทำมุมกับสายพานลำเลียง -30° -15° 0° +15° +30° เพื่อศึกษาผลกระทบจากการวางวัตถุเอียง ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

วิธีที่ได้นำเสนอนี้จัดเป็นวิธีการวัดแบบไม่ทำลายวัตถุสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการคัดขนาดของปลาและพืชผลทางการเกษตรอื่น ๆ ที่มีลักษณะรูปทรงสมมาตรได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

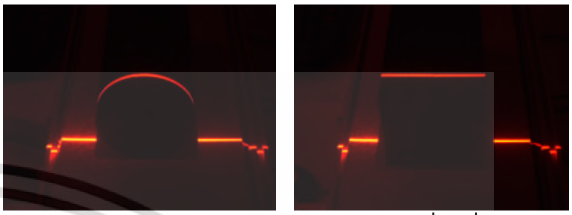
2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ระบบการวัดโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ

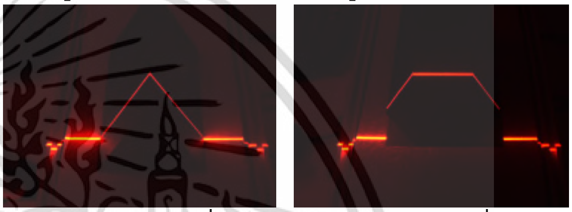
รูปที่ 1 แสดงระบบแสงเลเซอร์ตัดขวางสำหรับวัดปริมาตรของวัตถุ ซึ่งวัตถุตัวอย่างจะถูกวางบนสายพานลำเลียงที่สามารถปรับระดับความเร็วได้ โดยติดตั้งแสงเลเซอร์ให้เส้นของแสงเลเซอร์ฉายไปในทิศทางขวางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแสงเลเซอร์ตามลักษณะพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งเลเซอร์ที่ใช้เป็นเลเซอร์แบบเส้นสีแดงมีความยาวคลื่น 650 nm ขนาด 16 mW (Roithner Laser Technik, Austria) และทำการเก็บข้อมูลรูปภาพโดยใช้กล้องรุ่น Basler Scout SCA1000-30FC FireWire-b ความละเอียดในการรับภาพ 1032 Pixels x 778 Pixels และอัตราความเร็วในการรับภาพ 30 เฟรมต่อวินาที

รูปที่ 1 ระบบการวัดโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ

หลักการใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางเป็นเทคนิคการวัดรูปทรงที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายในการออกแบบ โดยวิธีนี้เป็นการฉายแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของวัตถุ เพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงเลเซอร์ตกกระทบ ซึ่งส่วนมากแล้วแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์นี้จะใช้เส้นแสงเลเซอร์สีแดง เนื่องจากนำมาวิเคราะห์และประมวลผลได้ง่ายและช่วยลดขั้นตอนในการปรับแต่งรูปภาพ แสงที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพและบันทึกไว้ด้วยกล้องที่วางทำมุมเอียงกับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ โดยข้อมูลรูปภาพที่ได้มาจะเปรียบเสมือนเป็นข้อมูลความสูงและความกว้างของแต่ละจุดบนพื้นผิวของวัตถุ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ก็จะได้ข้อมูลในส่วนถัดไปของวัตถุในลักษณะของภาพตัดขวางของแต่ละส่วนดังรูปที่ 2 และนำมารวมกันเพื่อสร้างเป็นระบบพิกัดสามมิติที่เป็นตัวบอกได้ถึงความกว้าง ความยาวและความสูงของวัตถุนั้น ๆ



รูปทรงกระบอก รูปทรงสี่เหลี่ยม



รูปทรงสามเหลี่ยม รูปทรงหกเหลี่ยม

รูปที่ 2 แสดงภาพแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุรูปทรงสมมาตรต่าง ๆ

2.2 วัตถุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ใช้เวอเนียร์ทำการวัดขนาดความกว้าง ความยาวและความสูงของวัตถุรูปทรงกระบอก รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยมและรูปทรงหกเหลี่ยม เพื่อทำการสอบเทียบค่าที่ได้จากวิธีการที่ได้นำเสนอกับค่าที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวัดความยาวของวัตถุและปริมาตร

(1) รูปทรงสามเหลี่ยม (2) รูปทรงสี่เหลี่ยม
(3) รูปทรงหกเหลี่ยม (4) รูปทรงกระบอก
รูปที่ 3 วัตถุรูปทรงสมมาตรที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การประมวลผลภาพ

จากรูปที่ 4 แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ และรูปที่ 5 แสดงภาพที่ได้จากขั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งถูกดำเนินการโดยใช้โปรแกรม LabVIEW 2013 และรับภาพมาจากกล้อง Basler ทำการปรับปรุงภาพก่อนการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด โดยแต่ละกระบวนการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Extract Color Planes (RGB – Red Plane 8 Bit Image)
  เป็นกระบวนการดึงโครงร่างของแสงเลเซอร์สีแดงที่ต้องการออกจากภาพ ภาพที่ได้เป็นภาพ 8-bit grayscale
- Threshold Setup and Lookup Table
  เป็นกระบวนการแยกโครงร่างของแสงเลเซอร์ที่มีค่าความเข้มของแสงอยู่ใน Range ตามที่ต้องการออกจากภาพและเปลี่ยนภาพให้เป็น Full Grayscale [0, 255] หรือมีเฉพาะสีดำกับสีขาว
- Profile Extraction (Center of Gravity Calculation) หรือ COG
  เป็นกระบวนการหาค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละคอลัมน์ของภาพ เมื่อหาครบทุกคอลัมน์ จะได้เส้นโครงร่างของแสงเลเซอร์หรือวัตถุ
- Bresenham's Line Algorithm
  เป็นกระบวนการเติม Pixel ที่ขาดของเส้น COG ทำให้สมบูรณ์ใกล้เคียงกับโครงร่างจริงของวัตถุ
- Savitzky-Golay Filter Process
  เป็นกระบวนการทำให้เส้น COG ราบเรียบขึ้น สมบูรณ์ใกล้เคียงกับโครงร่างจริงของวัตถุมากยิ่งขึ้น
- Cross Section Image Process
  เป็นกระบวนการเติมพื้นที่ของ Cross Section ด้วย Pixel สีขาวให้เต็มในแนวแกน Y
- Volume Calculation
  เป็นกระบวนการแปลงจำนวน Pixel สีขาวของภาพในแต่ละ Cross Section ให้เป็นพื้นที่และทำการรวมพื้นที่ของแต่ละส่วนให้เป็นปริมาตร

2.4 การคำนวณหาเส้น COG

วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central of Gravity) คือการหาค่าเฉลี่ยของพิกัดของภาพ จากแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนวัตถุ เนื่องจากแสงเลเซอร์มีความกว้างและความเข้มแสงที่ไม่เท่ากันทุกจุด การหา COG คือการหาค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละคอลัมน์ของภาพ ดังสมการข้างล่าง

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

$I(y,x)$ คือความเข้มของระดับสีเทาและมีค่าน้อยกว่า Threshold

y คือแถวในแนวแกน y

W_m คือผลรวมของค่าความเข้มของระดับสีเทาคูณกับค่าตำแหน่งของแถว y

m ผลรวมของค่าความเข้มระดับสีเทา

2.5 การคำนวณหาความยาวของวัตถุ

การคำนวณหาความยาวของวัตถุ ใช้สมการความเร็วเส้นตรงคือความเร็วไปหน้าหรือถอยหลัง วัดเป็นแนวตรง ดังสมการข้างล่าง

$$V = \frac{s}{t} \tag{2}$$

ดังนั้นความยาวของวัตถุ

$$s = V.t \tag{3}$$

V ความเร็วของสายพานลำเลียง (มิลลิเมตร/วินาที)

s ความยาวของวัตถุ (มิลลิเมตร)

t เวลาที่วัตถุตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์ (วินาที)

2.6 การคำนวณหาปริมาตร

นำพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนที่ได้จากการแปลงจำนวน Pixel ของภาพให้เป็นพื้นที่ (ตารางมิลลิเมตร) มารวมกันให้เป็นปริมาตร (ลูกบาศก์มิลลิเมตร) ดังสมการข้างล่าง

$$V = \sum_{j=1}^{L} A_j \tag{4}$$

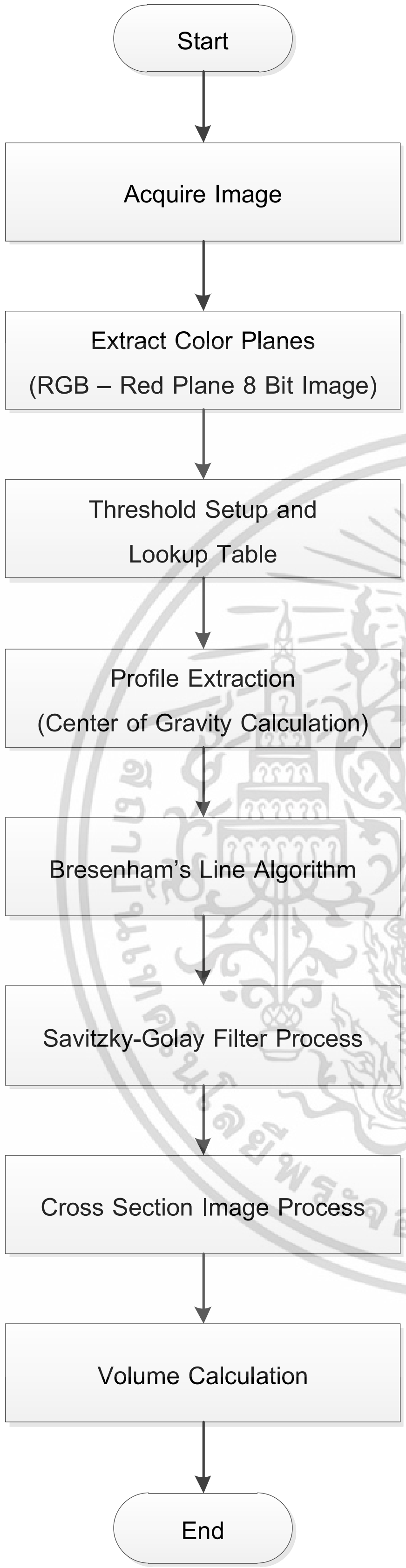
V คือปริมาตรหรือพื้นที่รวมของวัตถุ

A คือพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุ

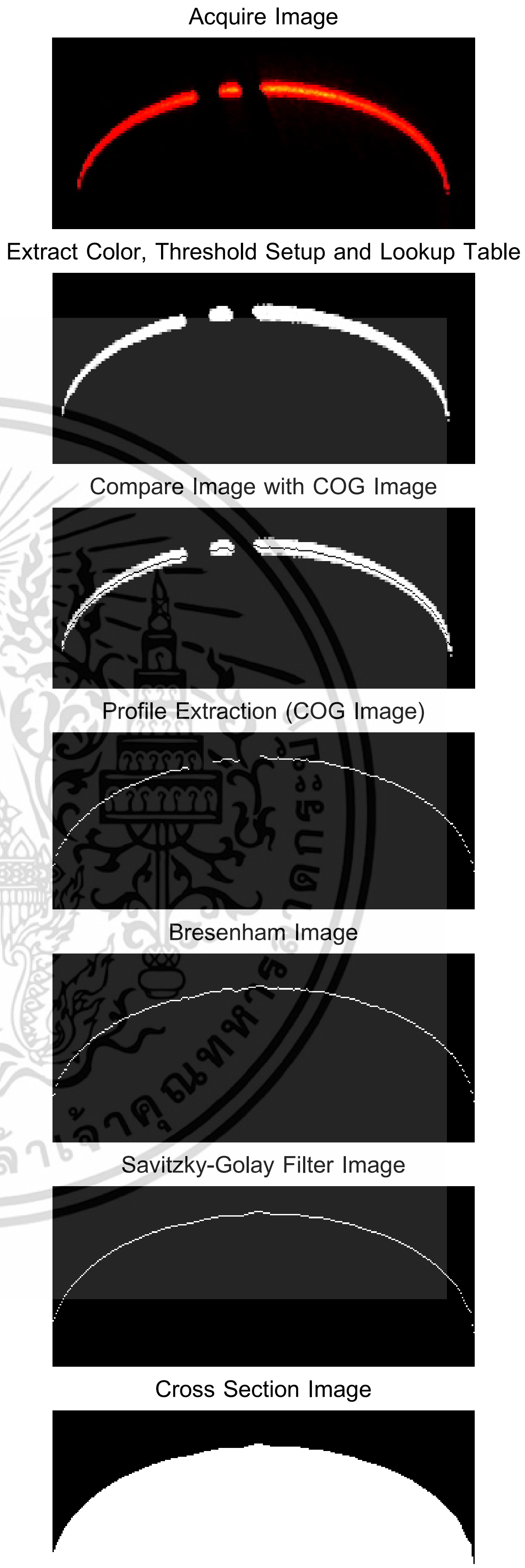
L คือจำนวนเฟรมที่มีวัตถุตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์หรือความยาวของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST-42



รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ

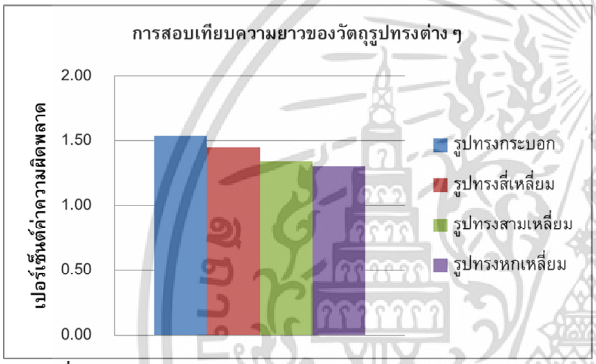


รูปที่ 5 แสดงภาพที่ได้จากขั้นตอนต่าง ๆ

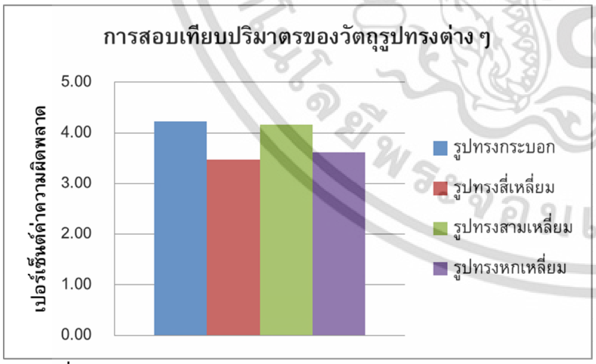
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การสอบเทียบความยาวและปริมาตร

ในการทดลอง ได้ทำการสอบเทียบความถูกต้องของระบบการวัดด้วยการสอบเทียบค่าความยาวและปริมาตรที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอกับวัตถุรูปทรงเรขาคณิตที่รู้ค่าความยาวและปริมาตร จากรูปที่ 6 แสดงกราฟการสอบเทียบค่าความผิดพลาดของความยาว พบว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 7 แสดงกราฟการสอบเทียบค่าความผิดพลาดของปริมาตร พบว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่าความผิดพลาดจากการสอบเทียบค่าความยาวและปริมาตรอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับ



รูปที่ 6 แสดงกราฟการสอบเทียบค่าความผิดพลาดของความยาว



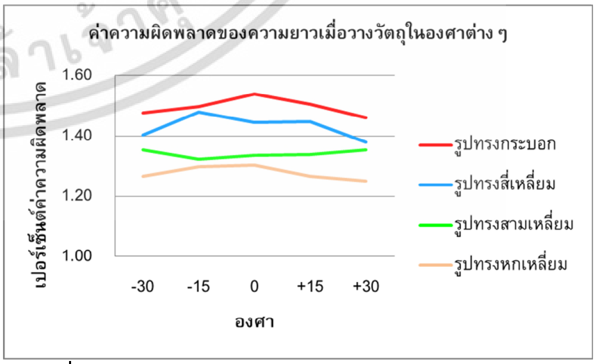
รูปที่ 7 แสดงกราฟการสอบเทียบค่าความผิดพลาดของปริมาตร

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดในการวัดความยาวของวัตถุเมื่อวางวัตถุ -30° -15° 0° +15° +30° ตามตารางที่ 1 และ รูปที่ 8 วัตถุรูปทรงกระบอก รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยมและรูปทรงหกเหลี่ยมมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุด 1.54% 1.48% 1.35% และ 1.30% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำสุด 1.46% 1.38% 1.32% และ 1.25% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ย 1.49% 1.43% 1.34% และ 1.28% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.03% 0.04% 0.01% และ 0.02% ตามลำดับ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของความยาวเมื่อวางวัตถุในองศาต่างๆ

เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของความยาวเมื่อวางวัตถุในองศาต่างๆ				
องศา	วัตถุ			
	รูปทรงกระบอก ความผิดพลาด (%)	รูปทรงสี่เหลี่ยม ความผิดพลาด (%)	รูปทรงสามเหลี่ยม ความผิดพลาด (%)	รูปทรงหกเหลี่ยม ความผิดพลาด (%)
-30	1.48	1.40	1.35	1.27
-15	1.50	1.48	1.32	1.30
0	1.54	1.45	1.34	1.30
+15	1.50	1.45	1.34	1.26
+30	1.46	1.38	1.35	1.25
Mean Error	1.49	1.43	1.34	1.28
Std Dev Error	0.03	0.04	0.01	0.02
Minimum Error	1.46	1.38	1.32	1.25
Maximum Error	1.54	1.48	1.35	1.30



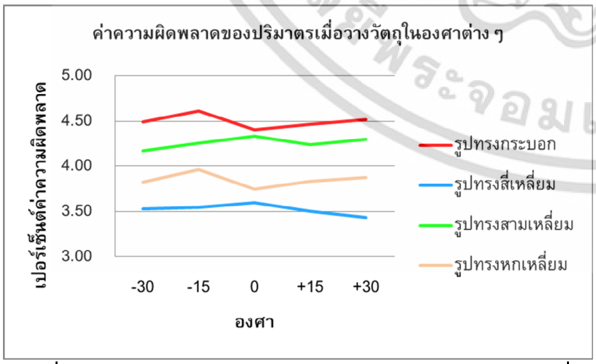
รูปที่ 8 แสดงกราฟค่าความผิดพลาดของความยาวเมื่อวางวัตถุในองศาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดในการวัดปริมาตรของวัตถุเมื่อวางวัตถุ -30° -15° 0° +15° +30° ตามตารางที่ 2 และ รูปที่ 9 วัตถุรูปทรงกระบอก รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยมและรูปทรงหกเหลี่ยมมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุด 4.61% 3.59% 4.34% และ 3.96% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำสุด 4.40% 3.43% 4.17% และ 3.74% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ย 4.50% 3.52% 4.26% และ 3.85% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.08% 0.06% 0.06% และ 0.08% ตามลำดับ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของปริมาตรเมื่อวางวัตถุในองศาต่างๆ

เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของปริมาตรเมื่อวางวัตถุในองศาต่างๆ				
องศา	วัตถุ			
	รูปทรงกระบอก ความผิดพลาด (%)	รูปทรงสี่เหลี่ยม ความผิดพลาด (%)	รูปทรงสามเหลี่ยม ความผิดพลาด (%)	รูปทรงหกเหลี่ยม ความผิดพลาด (%)
-30	4.49	3.52	4.17	3.82
-15	4.61	3.55	4.26	3.96
0	4.40	3.59	4.34	3.74
+15	4.46	3.50	4.24	3.83
+30	4.52	3.43	4.30	3.88
Mean Error	4.50	3.52	4.26	3.85
Std Dev Error	0.08	0.06	0.06	0.08
Minimum Error	4.40	3.43	4.17	3.74
Maximum Error	4.61	3.59	4.34	3.96



รูปที่ 9 แสดงกราฟค่าความผิดพลาดของปริมาตรเมื่อวางวัตถุในองศาต่าง ๆ

ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของความยาวและปริมาตร จากการทดลองวางวัตถุในองศาต่าง ๆ พบว่าค่าที่ได้จากวิธีการที่ได้นำเสนอกับค่าที่ได้จากการคำนวณ มีค่าใกล้เคียงกัน มีความแม่นยำอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้

ค่าความผิดพลาดโดยรวมที่เกิดขึ้นของความยาวและปริมาตร เกิดมาจากวิธีการที่ใช้ในการหาเนื่องจากเป็นการรวมพื้นที่หน้าตัดของแต่ละส่วนของวัตถุเข้าด้วยกัน หากค่าความยาวและพื้นที่หน้าตัดมีความผิดพลาดอยู่แล้วเมื่อนำมาคำนวณเป็นปริมาตร ก็จะยิ่งเพิ่มค่าความผิดพลาดให้เพิ่มขึ้นมากตามไปด้วย

4. สรุป

วิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้ให้ผลลัพธ์ในการวัดความยาวและปริมาตรของวัตถุที่มีความแม่นยำสูงและมีค่าเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดค่อนข้างต่ำ และจะมีความผิดพลาดอยู่บ้างพอสมควรในการวัดปริมาตรแต่ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการคัดขนาดหรือตรวจสอบวัตถุที่ไม่ได้ต้องการความแม่นยำสูงมาก หรือนำไปประยุกต์ใช้วัดขนาดและตรวจสอบวัตถุที่มีลักษณะรูปทรงที่สมมาตรและเป็นรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานต่าง ๆ ได้แก่ รูปทรงกระบอก รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยม รูปทรงหกเหลี่ยม รูปทรงกลม รูปทรงวงรี ผักและผลไม้

นอกจากนั้นวิธีการที่ได้นำเสนอนี้อาจเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปเป็นระบบอัตโนมัติแบบ Real-Time และพัฒนาให้เพิ่มความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ระบบขัดแยกและตรวจสอบขนาดวัตถุดิบ ระบบขัดแยกและตรวจสอบขนาดชิ้นส่วน ระบบขัดแยกและตรวจสอบขนาดผลผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตรและอาหารเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เอกสารอ้างอิง

[1] N.Nunak & T.Suesut, Measuring geometric mean diameter of fruit and vegetable using computer vision, PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE-2007, Thailand, 2007

[2] B.D. Bradley, M.J.D. Hayes, & A.D.C. Chan, A simple low cost 3D scanning system using the laser light-sectioning method, IEEE conference on Instrumentation and Measurement Technology (I2MTC), 2008, British Columnbia, Canada, 2008

[3] F.Pernkopf & P.O'Leary, Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces, NDT&E International, Vol.36, 2003, 609–617.

[4] Y. Zhongdong, W. Peng, L. Xiaohui & S. Changu, 3D laser scanner system using high dynamic range imaging, Optics and Lasers in Engineering, 54, 2014, 31-41.

[5] G.Fu, A.Menciassia & P. Darioa, Development of a low-cost active 3D triangulation laser scanner for indoor navigation of miniature mobile robots, Robotics and Autonomous Systems, 60, 2012, 1317–1326

[6] S. Ozan & S. Gümüstekin, Calibration of double stripe 3D laser scanner systems using planarity and orthogonality constraints Digital Signal Processing, Article in press, 2014.

[7] A.Criminisi, I.Reid & A.Zisserman, Single View Metrology, International Journal of Computer vision, 40(2), 2000, 123 – 148.

[8] P.O'Leary, M.Harker, & P.Zsombor-Murray, Direct lease-squares fitting of coupled geometric object, IEE Proceeding Vision, Image and Signal Processing, Vol.152, 2005, 687-694.

[9] N.Nunak & T.Suesut, Fish Size Measurement by Computer Vision using Laser Light Sectioning , The 10th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, Thailand, 2009.

[10] S.Gulphanich, M.Songthai & T.Suesut, Volume Estimation of Symmetrical Object Using Laser Light Sectioning, Proceedings of the IASTED International Conference Modelling, Identification and Control (MIC 2014) February 17 - 19, 2014 Innsbruck, Austria

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล รัชพล ภิวัฒภัคพล

วัน เดือน ปีเกิด 14 มิถุนายน 2518

ที่อยู่ 172 ซ.ริมน้ำ ถ.พานิชเจริญ ต.ท่าราบ อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000

ประวัติการศึกษา

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สาขางานอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี ในปีการศึกษา 2534 - 2537

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สาขางานอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป วิทยาลัยเทคนิคเพชรบุรี ในปีการศึกษา 2542 - 2544

ระดับปริญญาตรี (วทบ.) หลักสูตรวิทยาศาตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ราชภัฏเพชรบุรี ในปีการศึกษา 2544 - 2546

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2537 - 2542 ตำแหน่งช่างซ่อมบำรุง

พ.ศ. 2546 - 2546 ตำแหน่งวิศวกรวิจัยและพัฒนา บริษัท ETT จำกัด

พ.ศ. 2547 - 2547 ตำแหน่งวิศวกรวิเคราะห์ความล้มเหลว บริษัท แคล-คอมพ์ อีเล็คโทรนิคส์ (ประเทศไทย) จำกัด

พ.ศ. 2548 - 2549 ตำแหน่งวิศวกรวิเคราะห์ความล้มเหลว บริษัท แซนมินา-ไซ ซิสเท็มส์ (ประเทศไทย) จำกัด

พ.ศ. 2549 - ปัจจุบัน ตำแหน่งวิศวกรฝ่ายทดสอบ บริษัท ฟาบริเนท จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้