

เฟรมเวิร์กวิทัศน์จักรกลที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสำหรับ
การประมาณปริมาตรด้วยการสร้างเงา

A SIMPLE AND EFFICIENT MACHINE VISION FRAMEWORK FOR
VOLUME ESTIMATION BY SHADOWING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2568

KMITL-2025-EN-D-018-052

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟรมเวิร์กวิทัศน์จักรกลที่เรียบง่ายและมีประสิทธิภาพสำหรับ
การประมาณค่าปริมาตรด้วยเงาที่ทอดลงมา

A SIMPLE AND EFFICIENT MACHINE VISION FRAMEWORK FOR
VOLUME ESTIMATION BY SHADOWING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2568

KMITL-2025-EN-D-018-052

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A SIMPLE AND EFFICIENT MACHINE VISION FRAMEWORK FOR
VOLUME ESTIMATION BY SHADOWING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2025

KMITL-2025-EN-D-018-052

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2025

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
แบบรับรองความถูกต้องของวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เพรมเวิร์ควิทัศน์จักรกลที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสำหรับการประมาณปริมาตรด้วยการสร้างเงา

THESIS TITLE A SIMPLE AND EFFICIENT MACHINE VISION FRAMEWORK FOR VOLUME ESTIMATION USING SHADOWING

นักศึกษา นายศิวกร สุขประเสริฐชัย

รหัสประจำตัว 63601020

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2025-EN-D-018-052

ข้าพเจ้าในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ขอรับรองความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ตาม
ข้อบังคับสถาบันว่าด้วย การศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ปี พ.ศ. ๒๕๖๕


(รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

วันที่ 23 เดือน ม.ค. พ.ศ. ๒๕๖๘

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คำสั่งคณะวิศวกรรมศาสตร์

ที่ e ๑๑๐/๒๕๖๘

เรื่อง แต่งตั้งกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ นายศิวกร สุขประเสริฐชัย

ตามที่ นายศิวกร สุขประเสริฐชัย รหัสประจำตัว 63601020 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ขอสอบวิทยานิพนธ์ เรื่อง "เฟรมเวิร์ควิทัศน์จักรกลที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสำหรับการประมาณปริมาตรด้วยการสร้างเงา (A SIMPLE AND EFFICIENT MACHINE VISION FRAMEWORK FOR VOLUME ESTIMATION USING SHADOWING)" โดยมี รศ.ดร.ทวิพล ชื่อสัตย์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ทั้งนี้ตามที่ประชุมคณะกรรมการประจำส่วนงานวิชาการโดยผ่านการเวียนตามบันทึกข้อความที่ อว 7002(4)/e 0504 ในวันที่ 21 พฤษภาคม 2568 มีมติแต่งตั้งกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดังนี้

- | | | |
|-------------------|--------------|---|
| 1. รศ.ดร.ฟูศักดิ์ | ชีวิสุทธิ | ประธานกรรมการ (ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกสถาบัน) |
| 2. รศ.ดร.อรพิน | ชาญนำสิน | กรรมการ (ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกสถาบัน) |
| 3. ศ.ดร.วรวงศ์ | ตั้งศรีรัตน์ | กรรมการ |
| 4. รศ.ดร.นวกัทร | หนูนา | กรรมการ |
| 5. รศ.ดร.ทวิพล | ชื่อสัตย์ | กรรมการและเลขานุการ |

ทั้งนี้ ให้ดำเนินการจัดสอบในวันจันทร์ที่ 16 มิถุนายน พ.ศ. 2568 เวลา 10.00 - 12.00 น. ณ อาคารวิศวกรรมกรรมวัดคุม (แบบ onsite และ Video Call)

สั่ง ณ วันที่ ๒๖ พฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๖๘

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

๒๖ พ.ค. ๖๘ เวลา ๐๕:๑๘:๓๖ Non-PKI Server Sign-LN

Signature Code : QQAwA-DcAQg-BGAEU-ANABC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เฟรมเวิร์ควิทซ์นักรกกลที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสำหรับการ ประมาณปริมาตรด้วยการสร้างเงา
นักศึกษา	นายศิวกร สุขประเสริฐชัย
รหัสประจำตัว	63601020
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ทวีพล ชี้อัสตัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการประมาณค่าปริมาตรของวัตถุแบบเชิงสมมาตรจากภาพสามมิติด้วยเงาที่ทอดลงจากวัตถุ วิธีการที่นำเสนอนี้อาศัยการประมวลผลภาพวัตถุและเงา ภาพสามมิติถูกสร้างจากภาพตัดขวางของวัตถุที่สร้างขึ้นจากขอบของวัตถุและส่วนของความสูงที่คำนวณมาจากความยาวของเงา โดยทั้งหมดถูกคำนวณและประมวลผลบนระนาบ 2 มิติ ดังนั้นจึงสามารถแปลงโฮโมกราฟฟีได้ทำให้ลดความยุ่งยากในการสอบเทียบกล้อง ทำให้สามารถประมาณค่าปริมาตรของวัตถุได้ภายในภาพเดียว ลูกบอลโลหะทรงกลม 3 ลูก ที่มีขนาดแตกต่างกัน จากการทดลองโดยทำการวัดทั้ง 30 ครั้ง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวเท่ากับ 0.88% 0.65% และ 1.09% ตามลำดับ แสดงถึงความเที่ยงตรงของระบบที่พัฒนาขึ้น นอกจากนี้ยังทดลองกับมะม่วงที่เป็นวัตถุเชิงไม่สมมาตร จำนวน 50 ลูก เปรียบเทียบกับการวัดด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันมีค่าเท่ากับ 0.983 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงแนวโน้มที่ดีกับการวัดด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำที่เป็นค่าอ้างอิง ส่วนผลการทดสอบแบบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพบว่ามีค่า $t=6.09$ โดยมีค่า $p < 0.001$ แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 โดยมีแนวโน้มสูงกว่าค่าจริงเฉลี่ย 22.14cm^3 และสอดคล้องกับผลการประเมินการสอดคล้องด้วยวิธี Bland-Altman ทั้งนี้ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถประมวลผลได้ภายในระยะเวลา 0.3-0.75 วินาที ที่ขนาดปริมาตรในช่วง $180\text{-}480\text{cm}^3$ โดยสามารถสร้างจุดพอยคลาวด์ได้ประมาณ 28000-40000จุด ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถประมาณค่าปริมาตรของวัตถุได้ประมาณ 3 ชั้นต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	A Simple and Efficient Machine Vision Framework for Volume Estimation using Shadowing.
Student	Mr. Siwakorn Sukprasertchai
Student ID.	63601020
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2025
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Taweepol Suesut

ABSTRACT

This thesis presents a method for approximating the volume of asymmetric objects using 3D image reconstruction from shadow cast. The proposed approach is based on the object and its shadow processing. The 3D image reconstruction by cross-sectional image generated from the object's edges, while the height is computed from the shadow length. The computations are performed on a 2D plane, and the complexity of camera calibration is reduced by applied homography transform. This method is a single shot 3D image reconstruction. Precision was evaluated using three metal spheres of different sizes, each measured 30 times. The coefficients of variation were 0.88%, 0.65%, and 1.09%, respectively, demonstrating high precision. Furthermore, the developed system was also tested with 50 mangoes, which are considered as asymmetric objects, and compared with water displacement method as reference value. The Pearson correlation coefficient (r) was 0.983, indicating strong correlation with the reference method. A paired t-test yielded a statistically significant difference ($t = 6.09$, $p < 0.001$) at the 95% confidence level, with an average error of 22.14 cm^3 . These results are consistent with the Bland–Altman agreement analysis. The developed system can measure volume within 0.3–0.75 seconds within range of $180\text{--}480 \text{ cm}^3$, generating approximately 28,000–40,000 point cloud. This allows the system to estimate the volume of approximately 1–3 objects per second.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ทวีพล ชี้อสัตย์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า และ รศ.ดร.นวกัทธา หนูนาค ที่ให้คำอนุเคราะห์ให้คำแนะนำความรู้ในเรื่องทฤษฎีทางสถิติ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษาเสมอมา อีกทั้งขอบคุณเพื่อนที่ๆน้องๆที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล ที่คอยช่วยเหลือต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา พี่สาว ภรรยาและลูกชายที่น่ารัก ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุนช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนช่วยเหลือในทุกๆด้านจนมาถึงวันนี้ได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ภรรยา ลูกชาย ตลอดจนครูอาจารย์ รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ศิวกร สุขประเสริฐชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	9
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	9
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	12
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	12
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	13
1.5 รายละเอียดวิทยานิพนธ์.....	13
บทที่ 2 แบบจำลองกล้องและการแปลงโฮโมกราฟฟี.....	14
2.1 แบบจำลองของกล้อง (Camera model).....	14
2.1.1 ระบบพิกัดแบบโฮโมจีเนียส (Homogeneous Coordinate).....	15
2.1.2 พารามิเตอร์ภายในของกล้อง (Intrinsic parameters).....	16
2.1.3 พารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง (Extrinsic parameters).....	17
2.2 การแปลงโฮโมกราฟฟี (Homography Transformation).....	19
2.3 การคำนวณและประมาณค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์.....	20
2.4 สรุป.....	22
บทที่ 3 การเก็บภาพข้อมูลระยะทางสามมิติ.....	24
3.1 ประเภทแบบพาสซีฟ (Passive method).....	24
3.2 ประเภทแบบแอคทีฟ (Active method).....	27
3.2.1 วิธีฉายแสงแบบจุด (Light Spot Triangulation).....	27
3.2.2 วิธีฉายแสงแบบลายเส้น (Light Stripe Triangulation).....	28
3.2.3 วิธีการฉายแสงแบบต่อเนื่อง (Multi shots).....	29
3.2.4 การเข้ารหัสแบบเฟรมเดียว (Single shot).....	33
3.2.5 วิธีการการเดินทางของเวลา (Time of Flight).....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นาเปไซบระเเยชนดานการค้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สรุป.....	35
บทที่ 4 การสร้างภาพสามมิติจากเงาของวัตถุ.....	36
4.1 เรขาคณิตของเงา.....	36
4.2 การสอบเทียบหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง	38
4.3 การสร้างภาพภาคตัดขวาง (Virtual Slicing).....	41
4.3.1 การหาโครงสร้างแกนกลางของวัตถุ (Skeleton).....	42
4.3.2 การสร้างจุดพอยต์คลาวด์โดยการประมาณค่าในช่วงเชิงฟังก์ชันเสมือนพหุนาม กำลังสาม (cubic spline interpolation)	43
4.4 การประมาณค่าปริมาตรจากการสร้างภาพสามมิติจากภาพตัดขวาง.....	47
4.5 สรุป.....	48
บทที่ 5 การประยุกต์นำวิธีการสร้างภาพสามมิติจากเงาไปใช้ ในงานวัดปริมาตร	49
5.1 ภาพรวมของระบบสร้างภาพสามมิติจากเงาที่ทอดลงมาจากวัตถุ.....	49
5.2 แอปพลิเคชัน RayVol.....	51
5.3 การประมวลผลเพื่อสร้างภาพ 3 มิติและประมาณค่าปริมาตรของวัตถุ	53
5.3.1 การประมวลผลภาพเบื้องต้น (Preprocessing)	54
5.3.2 การสร้างภาพสามมิติด้วยวิธีการจากเงาของวัตถุ	61
5.4 การทดลองประมาณค่าปริมาตรของวัตถุสมมาตรแบบสมบูรณ์	64
5.5 การทดลองประมาณค่าปริมาตรของวัตถุที่มีลักษณะเชิงสมมาตร	67
5.6 เวลาที่ใช้ในการประมวลผล	73
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	74
6.1 สรุปผลการทดลอง	74
6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ	74
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์	81
ประวัติผู้เขียน.....	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตาราง 5.1 ผลการประมาณการหาค่าปริมาตรของลูกบอลทั้ง ทั้ง 3 ขนาด จำนวน 50 ตัวอย่าง.....	65
ตาราง 5.2 ผลการประมาณการหาค่าปริมาตรของมะม่วงจำนวน 50 ตัวอย่าง	68
ตาราง 5.3 Pair Samples T-Test.....	70
ตาราง 5.4 Bland-Altman Analysis	70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แบบจำลองกล้องรูเข็ม (Pinhole camera model)	14
รูปที่ 2.2 แบบจำลองของระบบสร้างภาพของกล้อง	15
รูปที่ 2.3 ระบบพิกัด (ก) ระนาบภาพ (ข) ระนาบเซนเซอร์ภาพ	16
รูปที่ 2.4 การฉายเวกเตอร์จากพิกัดของกล้องไปยังพิกัดโลกจริง.....	17
รูปที่ 2.5 การโปรเจกชันของจุดที่อยู่ในระนาบพิกัดโลกจริงและระนาบภาพ.....	19
รูปที่ 3.1 หลักการของระบบสเตอริโอวิชั่น (Stereo vision)	24
รูปที่ 3.2 การวัดระยะทางในระบบสเตอริโอวิชั่นโดยใช้หลักการเรขาคณิตสามเหลี่ยม.....	25
รูปที่ 3.3 จุดภาพที่เกิดแตกต่างกันบนระนาบภาพ.....	26
รูปที่ 3.4 หลักการวัดระยะโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบจุด.....	28
รูปที่ 3.5 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบเส้น	29
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างรหัสแบบไบนารีทั้งแบบสแกนในแนวตั้งและแนวนอน.....	29
รูปที่ 3.7 เทคนิคการฉายแสงผ่านรหัสไบนารี (Binary code pattern)	30
รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบระหว่างการเข้ารหัสแบบเกรย์และการเข้ารหัสแบบไบนารี.....	31
รูปที่ 3.9 (ก) การเลื่อนของรหัสสัญญาณแบบโคซายน์ (ข) รหัสความเข้มแสง.....	32
รูปที่ 3.10 วิธีการระบุตำแหน่งรหัสแสงโดยวิธีการจำแนกสี.....	33
รูปที่ 3.11 รหัสสีที่ได้จากวิธีการ Continuous varying color ที่เกิดจากการรวมกันของสามสีแบบ Sawtooth	34
รูปที่ 3.12 หลักการวัดระยะทางโดยใช้หลักการเวลาที่สูญเสียไป	35
รูปที่ 4.1 แนวคิดหลักการสร้างภาพสามมิติจากเงาของวัตถุ	37
รูปที่ 4.2 แนวคิดการหาความสูงด้วยเรขาคณิตจากการเกิดเงาของวัตถุ.....	38
รูปที่ 4.3 การวางวัตถุแท่งสี่เหลี่ยมสำหรับการสอบเทียบพิกัดแหล่งกำเนิดแสง	39
รูปที่ 4.4 เส้นรังสีที่ย้อนกลับและจุดตัด O ที่เป็นจุดพิกัดตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง	39
รูปที่ 4.5 การตัดกันของเส้นรังสีระหว่างเส้นรังสี R_1 และ R_2	41
รูปที่ 4.6 การเกิดสามเหลี่ยมเรขาคณิตจากแกนกลางของวัตถุกับความยาวของเงา จากรูปที่ 4.2 ...	42
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งจุดที่พิจารณา.....	42
รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางสมบูรณจากจุดยอดคาลาวด์ที่สร้างจากการประมาณโดยวิธีการพหุนามกำลังสาม โดยสีแดงแสดงถึงส่วนซ้ายที่ประมาณจากจุด P_a, P_b และ P_d ส่วนสีน้ำเงินเป็นส่วนขวาที่ประมาณจากจุด P_b, P_c และ P_d	47
รูปที่ 5.1 องค์ประกอบหลักของชุดสแกน 3 มิติโดยใช้วิธีการเงา.....	49
รูปที่ 5.2 ภาพของวัตถุและเงาที่ได้จากกล้อง.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.3 ภาพหน้าต่างติดต่อผู้ใช้งานของแอปพลิเคชัน RayVol	51
รูปที่ 5.4 โครงสร้างรายละเอียดของระบบ	52
รูปที่ 5.5 รายละเอียดของการจัดการข้อมูลระหว่างระหว่างหลังบ้านและหน้าบ้าน	53
รูปที่ 5.6 ภาพรวมของกระบวนการประมวลผลภาพเพื่อสร้างภาพ 3 มิติและประมาณค่าปริมาตรของวัตถุ.....	54
รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการประมวลผลภาพเบื้องต้น.....	55
รูปที่ 5.8 การลบภาพพื้นหลังโดยใช้ภาพพื้นหลังอ้างอิง	56
รูปที่ 5.9 ภาพผลลัพธ์ที่ได้หลังจากผ่านการดำเนินการแบบเปิด (Opening).....	57
รูปที่ 5.10 ภาพผลลัพธ์ที่ได้หลังจากผ่านการดำเนินการแบบบูลีน AND	58
รูปที่ 5.11 แบบจำลองสีแบบ HSV (ที่มา: wikipedia.com).....	58
รูปที่ 5.12 แบบจำลองสีแบบ HSV.....	59
รูปที่ 5.13 ภาพของวัตถุที่แยกออกจากเงา.....	59
รูปที่ 5.14 ภาพของเงาที่ถูกแยกออกมา.....	60
รูปที่ 5.15 ภาพเส้นกึ่งกลางของวัตถุจากรูปที่ 5.13	61
รูปที่ 5.16 แผนผังขั้นตอนการประมวลผลการสร้างภาพสามมิติ.....	63
รูปที่ 5.17 ภาพภาคตัดขวางที่สร้างขึ้น	64
รูปที่ 5.18 ภาพตัวอย่างสามมิติที่สร้างขึ้น.....	64
รูปที่ 5.19 ลูกบอลโลหะเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 38.10mm 49.91mm และ 79.91mm.....	65
รูปที่ 5.20 วิธีการสำหรับการวัดปริมาตรด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ.....	68
รูปที่ 5.21 ค่าความแตกต่างระหว่างค่าปริมาตรที่วัดด้วยวิธีแทนที่ด้วยน้ำ (WDM) และวิธีการสร้างภาพสามมิติด้วยเงา โดยแกนตั้งแสดงค่าความแตกต่างส่วนแกนนอนคือค่าเฉลี่ยของทั้งสองวิธี	71
รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรที่วัดได้จากการแทนที่ด้วยน้ำและปริมาตรที่วัดได้จากวิธีการสร้างภาพสามมิติจากเงา จากมะม่วง 50 ตัวอย่าง เส้นตรงแสดงการถดถอยเชิงเส้น โดยมีค่า $r = 0.983$	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

การวัดขนาดในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เกษตรมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการจัดการคุณภาพและมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายในตลาด การที่ผลผลิตทางการเกษตรจะถูกยอมรับและขายได้ในราคาที่เหมาะสมต้องขึ้นอยู่กับความถูกต้องและสม่ำเสมอของขนาด ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความสมบูรณ์และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถนำไปคัดแยกและจัดกลุ่มผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการคัดเลือกมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นสิ่งที่ตลาดและผู้บริโภคคาดหวัง โดยเฉพาะในการค้าขายผลผลิตสด เช่น ผลไม้ และผัก นอกจากนี้การวัดขนาดยังช่วยในกระบวนการบรรจุภัณฑ์และการขนส่ง ช่วยให้การจัดการสินค้าทำได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดสม่ำเสมอทำให้สามารถออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม ส่งผลให้ลดการสูญเสียและความเสียหายในระหว่างการขนส่ง รวมทั้งยังสามารถช่วยในการคำนวณมูลค่าในการขนส่งได้อย่างแม่นยำ การวัดขนาดที่แม่นยำช่วยให้เกษตรกรและผู้ประกอบการสามารถประเมินมูลค่าของสินค้าที่จะขายได้ถูกต้อง ซึ่งส่งผลต่อรายได้และความสามารถในการแข่งขันในตลาด นอกจากนี้การวัดขนาดยังสามารถช่วยในการประเมินสภาพแวดล้อมของการเพาะปลูกว่ามีผลต่อการเจริญเติบโตอย่างไร จะเห็นได้ว่าการวัดขนาดสามารถนำไปใช้เป็นตัวชี้วัดเพื่อตรวจสอบคุณภาพทั้งในส่วนของก่อนและหลังกระบวนการได้ [4-6]

การตรวจสอบขนาดผลิตภัณฑ์สามารถทำได้โดยใช้หลักการวัดน้ำหนัก โดยใช้เครื่องชั่งซึ่งใช้กลไกเชิงกลทำการแปลงแรงจากความสัมพันธ์ระหว่างมวลและแรงดึงดูด หรือใช้เซนเซอร์แบบโหลดเซลล์ (Load cell) ซึ่งเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ช่วยให้การวัดสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ และสะดวกมากขึ้น สามารถนำไปใช้ตรวจวัดได้ในสายพานลำเลียงหรือที่เรียกว่าการวัดแบบไดนามิก (Dynamic Weighing) โดยทำการติดตั้งเข้ากับสายพานลำเลียง (Conveyer belt) เพื่อทำการวัดในแบบเวลาจริง อย่างไรก็ตามวิธีการวัดนี้มีความซับซ้อนของระบบค่อนข้างสูง เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ทำให้มีผลต่อความแม่นยำในการวัด เช่น การสั่นสะเทือน การกระจายน้ำหนัก ความเร็วของวัตถุบนสายพาน ดังนั้นระบบที่มีความแม่นยำสูงต้องใช้ออกแบบที่ซับซ้อนซึ่งอาจส่งผลทำให้ระบบมีค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ยังต้องมีการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องเพื่อไม่ให้ค่าความแม่นยำในการวัด

ผิดพลาด [7-8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการใช้หลักการวัดน้ำหนัก การใช้วิธีการวัดโดยอ้อม เช่น การตรวจสอบโดยใช้หลักวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความกว้างหรือความยาว เฉพาะตำแหน่งที่เป็นลักษณะเฉพาะ หรือใช้อัตราส่วน (Geometric Mean Diameter) โดยส่วนมากจะใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างสมส่วนหรือมีลักษณะคล้ายกันเช่น (Regular shape) ผลไม้ อย่างไรก็ตามการวัดขนาดด้วยวิธีนี้เป็นการใช้วิธีสัมผัส เช่น การใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์หรือไมโครมิเตอร์ ซึ่งมีข้อจำกัดคือความเร็วในการวัด โดยเฉพาะเมื่อใช้กับกระบวนการผลิตที่มีความต่อเนื่องและมีความแม่นยำต่ำหากใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อน อีกวิธีก็คือการใช้คือการวัดด้วยปริมาตรโดยการแทนที่ด้วยของเหลว (Archimedes' principle) เช่น น้ำ หรือแก๊ส โดยอาศัยหลักการของการแทนที่ปริมาตรของของเหลวเพื่อคำนวณปริมาตรของผลิตภัณฑ์ที่ถูกแทนที่ วิธีการนี้ให้ความแม่นยำในการวัดสูงและสามารถวัดผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ (Irregular shape) แต่วิธีนี้ก็ยังมีข้อจำกัดเช่นเดียวกันก็คือไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานกับสายการผลิตที่มีความต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามวิธีที่กล่าวมานี้เป็นวิธีการวัดแบบสัมผัสและเป็นการวัดที่ไม่สามารถทำได้อนสายพานการผลิต (offline) [9-10]

อีกตัวเลือกคือการใช้ปริมาตรซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัตถุในระนาบสามมิติ ดังนั้นการวัดจึงต้องมาจากข้อมูลที่ได้มาจากระนาบสามมิติ ซึ่งกล้องที่เป็นอุปกรณ์สำหรับเก็บภาพโดยทั่วไปนั้นจะรับข้อมูลได้เพียงแค่ว่าในระนาบสองมิติเท่านั้น (ข้อมูลในแนวแกน x และ y) ส่วนข้อมูลความสูงหรือความลึกซึ่งเป็นข้อมูลในแนวแกน z นั้นไม่สามารถรับข้อมูลได้โดยตรง แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถรับข้อมูลในระนาบสามมิติ เรียกว่า เครื่องสแกนระยะ (Range scanner) หรือ ระบบสแกนเนอร์แบบสามมิติ (3D scanner system) สามารถแบ่งออกได้เป็นสองวิธีหลัก คือแบบ แอคทีฟ (active) และแบบ (passive) สำหรับแบบแรกที่เป็นวิธีแบบแอคทีฟนั้นจะอยู่บนหลักการที่เรียกว่า สามเหลี่ยม (Triangulation) โดยวิธีการแบบง่ายที่สุดคือ ลำแสงแบ่งส่วน (Laser Light Sectioning) อาศัยการยิงแสงเลเซอร์แบบเส้นลงไปยังวัตถุ แสงที่ฉายลงไปนี้จะบิดเบี้ยวตามรูปร่างหรือพื้นผิวของวัตถุหากมองทำมุมกับมุมตกกระทบ ภาพแสงที่บิดเบี้ยวนี้จะถูกเก็บภาพด้วยกล้อง เพื่อนำไปประมวลผลเป็นข้อมูลความสูงหรือความลึก (ข้อมูลแนวแกน z) ได้ จากนั้นจึงเคลื่อนวัตถุและทำการเก็บภาพ ภาพที่ได้แต่ละภาพจะสามารถนำมาต่อกันเพื่อสร้างเป็นภาพสามมิติของวัตถุได้ วิธีการนี้ใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างสูงเนื่องจากต้องใช้ภาพหลายภาพเพื่อมาสร้างภาพสามมิติและจะต้องมีชุดวงจรเพิ่มเติมเพื่อติดตั้งกับสายพานลำเลียงสำหรับส่งสัญญาณเพื่อกระตุ้นชุดเตอร์ของกล้องเพื่อให้สามารถประสานกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ [11-14] ต่อมาได้มีการพัฒนาโดยใช้โปรเจคเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อฉายแสงที่มีรูปแบบโครงสร้าง (Structure Light) แทน วิธีการนี้สามารถสร้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพสามมิติได้โดยใช้เพียงแค่ภาพเดียวทำให้ใช้เวลาคำนวณน้อย [15, 16] แบบที่สองคือวิธีการใช้การปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสงไปยังวัตถุแล้ววัดระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางไปและกลับ เรียกว่ากล้องแบบ TOF (Time of Flight Camera) ซึ่งใช้น้อยมากในการสร้างภาพสามมิติ เช่นเดียวกับกับวิธีการแสงแบบโครงสร้าง ระบบสร้างภาพสามมิติเหล่านี้ในเชิงพาณิชย์เรียกว่ากล้องแบบ RGB-D (RGB-Depth Camera) มีจำหน่ายหลายชื่อด้วยกัน เช่น PrimeSense Camine 1.09 หรือ Microsoft Kinect ซึ่งได้ถูกนำไปใช้ดังเช่นงานวิจัยเหล่านี้ [11-16] อย่างไรก็ตามวิธีแบบแอคทีฟนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติมนอกเหนือจากกล้อง ทำให้ระบบฮาร์ดแวร์มีความซับซ้อนและส่งผลให้มีราคาสูง สำหรับแบบพาสซีฟที่เป็นแบบที่สองนั้นจะใช้กล้องเพียงอย่างเดียว แต่จะใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์หรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยประมาณค่าเพื่อให้ได้ข้อมูลครบทั้งสามมิติ เช่นงานวิจัยเหล่านี้ [17-23] ที่ใช้เพียงแค่ภาพมุมมองด้านบน (Top-view) ร่วมกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเมินค่าปริมาตรทั้งวัตถุในภาพเดียว นอกจากนี้ยังร่วมกับการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์หรือวิธีการแบบดิสก์ (Disk method) เพื่อให้ได้ค่าความถูกต้องสูงขึ้นเช่นในงานวิจัย [24-27] เช่น [28] ได้พัฒนาระบบประมาณค่าปริมาตรของมะเขือเทศ โดยใช้แบบจำลองรูปทรงเรขาคณิตทรงกลมเพื่อใช้ประมาณค่าความสูงจากข้อมูลความกว้างและความยาวจากการพิจารณาว่ามะเขือเทศมีรูปทรงเป็นทรงกลม อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้เป็นการประมาณที่ไม่ได้ใช้ข้อมูลความสูงที่แท้จริงอาจทำให้ค่าความถูกต้องผิดเพี้ยนได้โดยเฉพาะหากวัตถุมีรูปทรงที่ไม่แน่นอน (irregular shape) เนื่องจากไม่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมได้ [29] เพื่อให้ได้ข้อมูลความสูงที่แท้จริงโดยใช้กล้องเพียงตัวเดียว ได้มีการใช้อุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อให้สามารถรับภาพมุมมองอื่นเพิ่มเติมได้ เช่นใน [30] ได้พัฒนาระบบประมาณค่าปริมาตรของสตรอเบอร์รี่โดยใช้แทนหมุนเพื่อให้สามารถเก็บภาพได้หลายมุม ภาพจำนวน 50 ที่มุมแตกต่างกันนำมาสร้างเป็นภาพสามมิติเพื่อประเมินค่าปริมาตร วิธีการนี้ใช้เวลาในการเก็บภาพค่อนข้างสูง แต่ใน [31] ได้พัฒนาระบบคัดแยกมะม่วงโดยใช้กระจกติดตั้งเพิ่มเพื่อให้กล้องสามารถมองภาพด้านข้าง (side view) ของวัตถุ เพื่อให้สามารถเก็บภาพด้านบนและด้านข้างของวัตถุได้ในเวลาเดียวกันแล้วนำไปประมวลผลโดยใช้วิธีการแบบดิสก์ ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสายพานลำเลียงได้ วิธีการแบบพาสซีฟนี้สามารถลดความซับซ้อนของฮาร์ดแวร์ลงไปได้โดยเน้นไปที่วิธีการทางซอฟต์แวร์ที่เป็นการคำนวณแทน โดยใช้วิธีการประมาณทางคณิตศาสตร์แทนการตรวจรู้ค่าที่แท้จริงจึงทำให้อาจขาดความถูกต้องของการวัด โดยเฉพาะหากเป็นวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อน สำหรับวิธีการแบบมุมมองหลากหลายนั้นสามารถชดเชยความถูกต้องของการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดได้แต่มีข้อเสียคือใช้เวลาในการเก็บภาพรวมถึงคำนวณมากเนื่องจากไม่สามารถคำนวณได้จากภาพเดียว

จากข้อจำกัดสำหรับการวัดปริมาตรโดยใช้วิธีทัศนจักรกลทั้งแบบแอคทีฟและแบบพาสซีฟ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดประยุกต์เทคนิคการสร้างภาพสามมิติจากเงาของวัตถุที่ทอดลงมา ซึ่งเป็นเทคนิคที่เคยได้มีการเสนอแนวคิดนี้มาตั้งแต่ยุค 1980 [32-35] โดยในงานวิจัยเหล่านี้ได้นำเสนอข้อมูลในส่วน of หลักการและนำไปวัดกับวัตถุที่มีรูปทรงแบบง่ายและมุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้สำหรับการสร้างภาพสามมิติเท่านั้น ในงานวิจัยนี้นั้นมีจุดประสงค์ในนำเสนอการพัฒนาเฟรมเวิร์คสำหรับการประมาณปริมาตรด้วยวิธีการสร้างเงา ซึ่งเป็นการใช้กล้องเพียงตัวเดียว ควบคู่กับใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบ LED ที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบเรียบง่ายเพื่อสร้างเงาของวัตถุ โดยภาพสามมิติจะถูกสร้างขึ้นจากความยาวของเงาในแนวระนาบ ทำให้สามารถใช้หลักการการแปลงแบบโฮโมกราฟี (Homography Transform) ที่เป็นการแปลงแบบระนาบเพื่อแปลงพิกัดของวัตถุและเงาที่เป็นพิกัดของภาพ 2 มิติ ให้เป็นพิกัดจริงของวัตถุทำให้สามารถคำนวณปริมาตรของวัตถุได้ โดยเฟรมเวิร์คนี้สามารถลดความต้องการฮาร์ดแวร์ที่ซับซ้อน มีความเร็วสูง สามารถประมวลผลได้ภายในภาพเดียวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการใช้งานบนสายพานลำเลียงได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนารอบงานวิสัยทัศน์ให้สามารถวัดปริมาตรของวัตถุที่มีรูปทรงเชิงสมมาตรหรือไม่สมมาตรได้อย่างเรียบง่ายจากการภาพสามมิติที่สร้างด้วยวิธีการเงา
2. เพื่อพัฒนาให้รอบงานวิสัยทัศน์ให้สามารถคำนวณหาปริมาตรได้แบบไม่ต้องสอบเทียบกล้องโดยใช้เทคนิคโฮโมกราฟี
3. เพื่อพัฒนาซอฟต์แวร์การวัดปริมาตรด้วยวิธีการเงาที่ทอดลงมาของวัตถุ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. พัฒนารอบงานวิสัยทัศน์ให้สามารถวัดปริมาตรของวัตถุที่มีรูปทรงเชิงสมมาตรแบบในภาพเดียวด้วยวิธีการเงาที่ทอดลงมาของวัตถุ
2. ทดสอบประสิทธิภาพของกรอบวิสัยทัศน์ในการวัดค่าปริมาตรของวัตถุโดยใช้ลูกบอลโลหะและมะม่วงเป็นวัตถุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการสร้างภาพสามมิติทั้งแบบแอคทีฟและพาสซีฟที่มีอยู่ในปัจจุบันที่นำไปประยุกต์ใช้งานในการวัดปริมาตร และหาข้อบกพร่องเพื่อปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
2. พัฒนาเฟรมเวิร์คสำหรับการวัดปริมาตรด้วยวิธีการเงาบนพื้นฐานของโอเพ่นซอร์ส
3. พัฒนาซอฟต์แวร์แบบเว็บแอปพลิเคชันโดยใช้เฟรมเวิร์คที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้วัดปริมาตร
4. ทดสอบประสิทธิภาพการวัดปริมาตรกับลูกบอลโลหะทรงกลม โดยใช้การคำนวณเป็นค่าอ้างอิง
5. ทดสอบประสิทธิภาพการวัดปริมาตรกับมะม่วง โดยใช้เทคนิคการทดแทนด้วยของเหลวเป็นค่าอ้างอิง

1.5 รายละเอียดวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 6 บทด้วยกัน โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองของกล้องและการแปลงโฮโมกราฟฟี ได้แก่ แบบจำลองของกล้องแบบรูเข็ม ทฤษฎีการแปลงโฮโมกราฟฟี และการคำนวณหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับวิธีการสร้างภาพสามมิติด้วยเครื่องสแกนสามมิติ ได้แก่ การเก็บภาพระยะด้วยวิธีการต่างๆ ทั้งแบบแอคทีฟและแบบพาสซีฟ

บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของการสร้างภาพสามมิติด้วยเงาที่ทอดลงมา ได้แก่ เรขาคณิตของการเกิดเงากับวัตถุ การสอบเทียบตำแหน่งแสง การสร้างภาพตัดขวาง การประมาณค่าปริมาตรจากภาพสามมิติ

บทที่ 5 เป็นผลการทดลอง การทดลองหาค่าความเที่ยงตรง การหาค่าความแม่นยำ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นกับวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะและแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

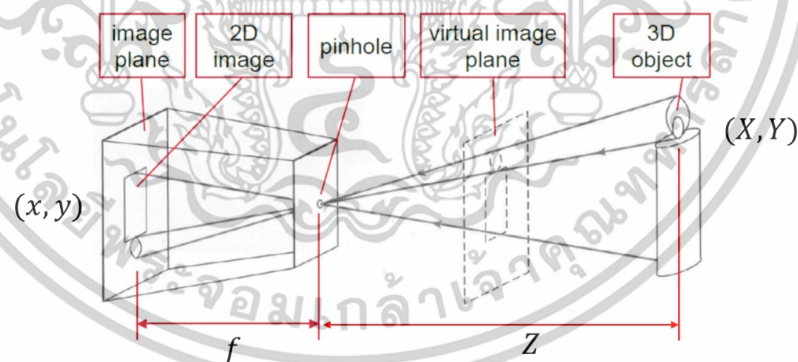
บทที่ 2

แบบจำลองกล้องและการแปลงโฮโมกราฟฟี

การเข้าใจถึงแบบจำลองกล้องถือพื้นฐานที่สำคัญในงานทางด้านคอมพิวเตอร์วิทัศน์ โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้งานสำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ซึ่งจำเป็นต้องทำการแปลงหน่วยระหว่างจากระบบพิกัดกล้อง (Camera coordinate system) กับหน่วยในระบบพิกัดโลกจริง (Real-world coordinate system) โดยในบทนี้จะนำเสนอรายละเอียดและวิธีการเกี่ยวกับทฤษฎีเกี่ยวกับแบบจำลองของกล้องและการแปลงพิกัดภาพด้วยเทคนิคโฮโมกราฟฟี

2.1 แบบจำลองของกล้อง (Camera model)

การเกิดภาพของกล้องสามารถจำลองโดยใช้แบบกล้องรูเข็มได้ การเกิดภาพ 2 มิติเกิดจากภาพสามมิติผ่านเลนส์ของตาหรือเลนส์ของกล้องที่เป็นลักษณะรูเล็กๆ ทำให้สามารถใช้แบบจำลองกล้องแบบกล้องรูเข็มซึ่งเป็นแบบจำลองพื้นฐานได้ตามรูปที่ 2.1 โดยแสงทั้งหมดที่ตกลงบนระนาบของฉากภาพ จะเป็นแสงที่ผ่านมาจากรูขนาดเล็กที่อยู่บนระนาบโฟกัส (focal plane) ซึ่งลักษณะการฉายแสงผ่านรูขนาดเล็กนี้เรียกว่าการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projection)

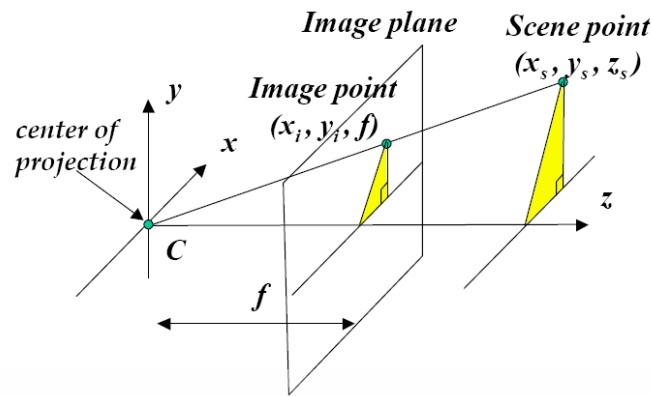


รูปที่ 2.1 แบบจำลองกล้องรูเข็ม (Pinhole camera model)

จะเห็นว่าจุดของภาพที่ปรากฏอยู่บนระนาบภาพ (image plane) ซึ่งอยู่ในระบบพิกัด 2 มิตินั้นสัมพันธ์กับจุดที่อยู่ในโลกจริงที่อยู่ในระบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ 2.1 โดยอาศัยหลักการสามเหลี่ยมคล้าย [1, 2]

$$x = -f \frac{X}{Z}, \quad y = -f \frac{Y}{Z} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แบบจำลองของระบบสร้างภาพของกล้อง

และเพื่อความง่ายในการวิเคราะห์ เราสามารถเขียนใหม่ได้ดังรูปที่ 2.2 โดยในทางปฏิบัติจึงสมมติให้ระนาบภาพ นั้นอยู่ด้านหน้าระนาบของจุดกำเนิดโดยเรียกว่าระนาบภาพเสมือน (Virtual image plan) เพื่อให้เครื่องหมายลบของระยะโฟกัส f ในสมการที่ 2.1 เป็นบวก และสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$x_i = \frac{fx_s}{z_s} \quad (2.2)$$

$$y_i = \frac{fy_s}{z_s} \quad (2.3)$$

จุดที่ถูกโปรเจกต์ลงบนระนาบภาพ (x_i, y_i) กับจุดของวัตถุ 3 มิติ (x_s, y_s, z_s) นั้นสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ทำให้สามารถเขียนสมการเวกเตอร์ได้เป็น

$$v = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.1.1 ระบบพิกัดแบบโฮโมจีเนียส (Homogeneous Coordinate)

พิจารณา $P = (x, y)$ บนระนาบ K ที่อยู่ในปริภูมิแบบยูคลิด \mathbb{R}^n (Euclidean space) โดยใช้ระบบอ้างอิงพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate) (x, y, z) ซึ่งระบบพิกัดนี้ส่งผลให้เกิดความยุ่งยากในการวิเคราะห์และดำเนินการทางเมทริกซ์เวลาทำการแปลง (Translation) หรือทำการฉาย (Projection) ระนาบ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความง่ายในดำเนินการจึงทำการเพิ่มอีกมิติ w ขึ้นมา xw, yw, w เรียก w นี้ว่า projective space \mathbb{P}^n และเรียกระบบพิกัดแบบนี้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Homogeneous coordinate โดยในทางปฏิบัติจะกำหนดให้ w มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสมการที่ 2.4 จะสามารถเขียนได้เป็น

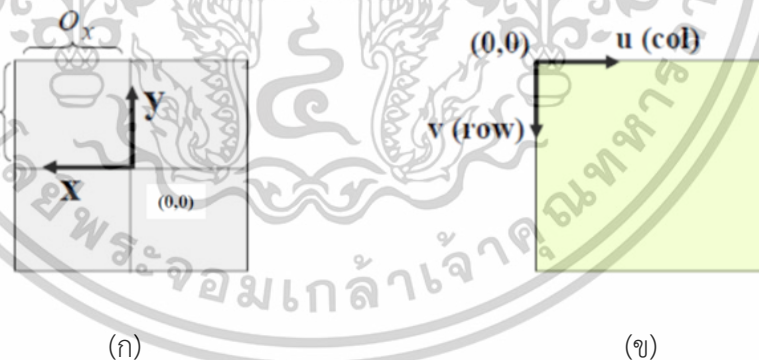
$$\tilde{v} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.2 กับ 2.3 และ 2.5 จะสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ในพิกัดโฮโมจีเนียสได้เป็นสมการที่ 2.6 โดยเรียกว่าการแปลงแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Transform) [1, 2]

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/z_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f/z_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.1.2 พารามิเตอร์ภายในของกล้อง (Intrinsic parameters)

เนื่องจากในระบบของเซนเซอร์ภาพเป็นอุปกรณ์แบบราสเตอร์ (Raster Device) นั้นจะอ้างอิงแบบรูปที่ 2.3 (ข) โดยมีจุดเริ่มต้น $(0,0)$ ที่มุมซ้ายบน แต่ในระนาบของภาพนั้นจุดเริ่มต้น $(0,0)$ ที่กึ่งกลาง (Principal Point) $u_0 = (x_0, y_0)$



รูปที่ 2.3 ระบบพิกัด (ก) ระนาบภาพ (ข) ระนาบเซนเซอร์ภาพ

ดังนั้นการแปลงจากระนาบภาพไปยังระนาบเซนเซอร์จะหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} u &= k_x x_s + u_c = f k_x \frac{X_s + Z_s u_c}{Z_s} \\ v &= k_y y_s + v_c = f k_y \frac{Y_s + Z_s v_c}{Z_s} \end{aligned} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$CM = CO + OM, \quad CO = T \quad (2.10)$$

$$x_s i + y_s j + z_s k = T_x i + T_y j + T_z k + X_s I + Y_s J + Z_s K \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I \cdot i & J \cdot i & K \cdot i \\ I \cdot j & J \cdot j & K \cdot i \\ I \cdot k & J \cdot k & K \cdot k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

เมื่อพิจารณาในระบบพิกัดแบบโฮโมจีเนียส

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \cdot i & J \cdot i & K \cdot i & T_x \\ I \cdot j & J \cdot j & K \cdot i & T_y \\ I \cdot k & J \cdot k & K \cdot k & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -T \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

โดยที่ R และ T คือเมทริกซ์ของการหมุน (Rotation Matrix) และเมทริกซ์ของการย้ายจุดอ้างอิง (Translation Matrix) เมื่อนำไปรวมกับสมการที่ 2.9 พารามิเตอร์ภายในของกล้องจะสามารถเขียนสมการการเกิดภาพบนระนาบเซนเซอร์ภาพได้ดังสมการที่ 2.15 [1, 2]

$$x = K [I_3 \mid 0_3] \begin{bmatrix} R & -T \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix} X \quad (2.15)$$

หรือ

$$x = PX \quad (2.16)$$

โดยที่

$$P = K [I_3 \mid 0_3] \begin{bmatrix} R & -T \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การแปลงโฮโมกราฟฟี (Homography Transformation)

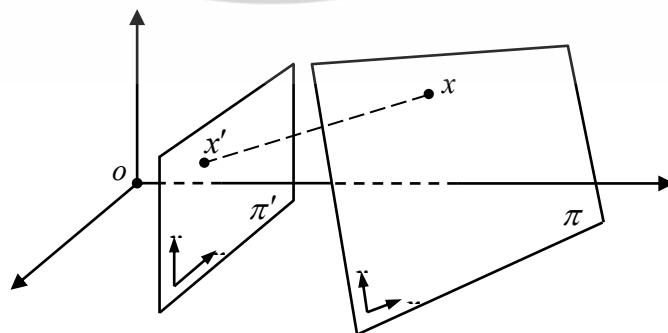
พิจารณาสมการที่ 2.16 ที่เป็นการแปลงจากระนาบ 3 มิติมายังระนาบกล้องที่เป็นระนาบ 2 มิติ ($3D \rightarrow 2D$) หากว่าเขียนในรูปของเมทริกซ์โฮโมจีเนียส โดยให้เมทริกซ์ P มีขนาด 3×4 ซึ่งเป็นเมทริกซ์การแปลงของกล้อง จะสามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 2.18

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

ดังนั้นหากมองว่าระนาบพิกัดในโลกจริงที่เป็น 3 มิตินั้นมีลักษณะเป็น 2 มิติ โดยให้ $Z = 0$ จะทำให้สามารถพิจารณาได้เป็นการแปลงจากระนาบโลกจริง 2 มิติมายังระนาบของกล้อง 2 มิติได้ โดยทำให้เมทริกซ์ P ที่มีขนาด 3×4 สามารถลดรูปเหลือ 3×3 และสามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.19

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

การแปลงในลักษณะนี้เรียกว่าการแปลงแบบโปรเจกทีฟของระนาบ (Plane Projective Transformations) หรือเป็นการแปลงแบบโฮโมกราฟฟี (Homography Transformations) ซึ่งสามารถแสดงลักษณะการแปลงได้ในรูปที่ 2.5 โดยระนาบ π ในระนาบพิกัดในโลกจริง และ π' ที่เป็นระนาบภาพ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของระนาบ $\pi \rightarrow \pi'$ ที่เป็นลักษณะการโปรเจกชันสามารถแทนได้ด้วยเมทริกซ์ 3×3 ที่เป็น non-singular matrix ดังนั้นตำแหน่งของจุดใน world coordinate (x, y) นั้นจะถูกแปลงไปโดยมีค่าเท่ากับ Hx หรือเขียนเป็นสมการที่ 2.20 ได้



รูปที่ 2.5 การโปรเจกชันของจุดที่อยู่ในระนาบพิกัดโลกจริงและระนาบภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x' = Hx \quad (2.20)$$

เมื่อ x คือ จุดใดๆ บนระนาบ 2 มิติ, x' คือ จุด x ที่ถูกแปลงไปตามลักษณะการโปรเจกชัน, H คือ เมทริกซ์การแปลงแบบโปรเจกชันของระนาบ (Homography Matrix) เป็น non-singular ขนาด 3×3 ดังนั้น [1, 2]

$$\begin{bmatrix} wx' \\ wy' \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

2.3 การคำนวณและประมาณค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์

สำหรับการหาค่าโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์นั้นเริ่มต้นโดยใช้จุดพิกัดที่ทราบค่า กล่าวคือมีความสัมพันธ์ระหว่าง 2 จุด $P \leftrightarrow P'$ โดยที่ P คือระนาบพิกัดโลกจริงและ P' คือพิกัดระนาบภาพดังนั้นสมการที่ 2.20 จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$p' = Hp \quad (2.22)$$

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

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix}, \quad p' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

โดยที่ H เป็นโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ (Homography Matrix) บนพิกัดโฮโมจีเนียส ขนาด 3×3 ประกอบด้วยพารามิเตอร์อยู่ทั้งหมด 9 ตัวคือ

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

เขียนรวมได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

เขียนในรูปสมการเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}x' &= h_{11}x + h_{12}y + h_{13}w \\y' &= h_{21}x + h_{22}y + h_{23}w \\w' &= h_{31}x + h_{32}y + h_{33}w\end{aligned}\quad (2.26)$$

เขียนให้อยู่ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (x, y) ได้

$$\frac{x'}{w'} = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}w}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}w} \quad (2.27)$$

$$\frac{y'}{w'} = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}w}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}w} \quad (2.28)$$

ซึ่ง $w = w' = 1$ ดังนั้น

$$x' = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad (2.29)$$

$$y' = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad (2.30)$$

เขียนอยู่ในรูปแบบยูคลิดได้ดังนี้

$$x'(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}) - h_{11}x - h_{12}y - h_{13} = 0 \quad (2.31)$$

$$y'(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}) - h_{21}x - h_{22}y - h_{23} = 0 \quad (2.32)$$

หรือ

$$Ah = 0 \quad (2.33)$$

เขียนในรูปเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix}x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'x & -x'y & -x' \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -y'x & -y'y & -y'\end{bmatrix} \begin{bmatrix}h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 \\ 0\end{bmatrix} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าเมทริกซ์ H เป็นเมทริกซ์ที่ไม่ทราบค่า โดยมีจำนวนทั้งหมด 9 ตัว (9 DOF) แต่เนื่องจากพิจารณาในระบบพิกัดโฮโมจีเนียสที่มีแฟกเตอร์สเกล (Scale Factor) ซึ่งไม่เท่ากับ 0 ดังนั้นทุกๆจุดระหว่างระนาบคือจุดเดียวกัน ดังนั้นมิติสเกลจึงถือว่าไม่มีผล ทำให้เมทริกซ์ H มีเพียง 8 DOF เท่านั้น กล่าวคือให้เมทริกซ์ H เหลือตัวแปรไม่ทราบค่า 8 ตัว หากต้องการแก้สมการหาค่า H อย่างน้อยต้องใช้ 4 จุดถึงจะสามารถแก้สมการได้ [1, 2]

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1x_1 & -x'_1y_1 & -x'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_nx_n & -x'_ny_n & -x'_n \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -y'_1x_1 & -y'_1y_1 & -y'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -y'_nx_n & -y'_ny_n & -y'_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

เนื่องจากสมการ ที่ 2.33 เป็นปัญหาสมการระบบเชิงเส้น สำหรับการแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยใช้การประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุด (Least-Squares estimation)

$$\min_h \|A \cdot h\|^2 \text{ subject to } \|h\| = 1 \quad (2.36)$$

โดยค่าเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะที่ทำให้ $A^T A$ มีค่าน้อยที่สุดคือค่า h ที่เป็นคำตอบ หรือใช้วิธีการแยกค่าเอกฐาน (Singular Value Decomposition, SVD) โดยการแยกเมทริกซ์ A ออกเป็นเมทริกซ์ 3 ตัวตามสมการที่ 2.36

$$A = U \Sigma V^T \quad (2.37)$$

โดยที่ U และ V เป็นเมทริกซ์ที่มีคอลัมน์เป็นเวกเตอร์เฉพาะ (orthonormal) และ Σ เป็นเมทริกซ์แนวทแยงที่มีค่าเฉพาะ (singular values) โดยคำตอบ h ที่ทำให้สมการที่ 2.33 เป็น 0 คือเวกเตอร์คอลัมน์สุดท้ายของ V

2.4 สรุป

แบบจำลองของกล้องถือเป็นพื้นฐานหลักในการประมวลผลภาพเชิงเรขาคณิต โดยเฉพาะงานที่ต้องวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยใช้แบบจำลองกล้องรูเข็มเพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างระนาบ

ภาพกับระนาบในพิกัดโลกจริง นอกจากนี้ยังได้นำเสนอเกี่ยวกับระบบพิกัดแบบโฮโมจีเนียสเพื่อแก้ไขเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาเชิงสเกล ทำให้สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ภายในกล่องและภายนอกกล่อง นอกจากนี้ยังนำเสนอวิธีการแปลงแบบไฮโมจีเนียสที่เป็นการแปลงแบบเพอสเปคทีฟรวมถึงการหาค่าเมทริกซ์ไฮโมกราฟฟี h ด้วยวิธีการแยกค่าเอกฐาน (Singular Value Decomposition, SVD)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

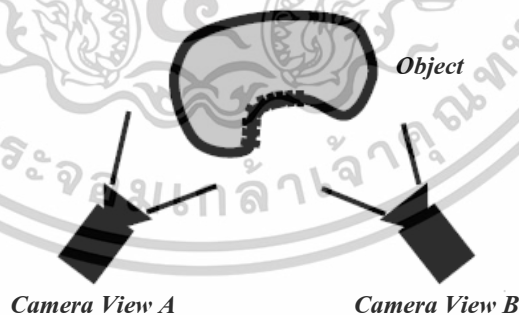
บทที่ 3

การเก็บภาพข้อมูลระยะทางสามมิติ

การได้มาของข้อมูลในแนวมิติโดยเฉพาะแกนลึกหรือสูงด้วยแมชชีนวิชันนั้นมีหลากหลายวิธีด้วยกัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบประเภทพาสซีฟและแบบประเภทแอคทีฟ ข้อมูลที่ได้มานั้นจะเรียกว่าข้อมูลระยะ (Range data) ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่าเครื่องสแกน 3 มิติ โดยมีหลายชนิดด้วยกันขึ้นอยู่กับวิธีการในการเก็บข้อมูลระยะ โดยข้อมูลระยะนี้มีประโยชน์อย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้ เช่น การสร้างภาพ 3 มิติ ระบบการมองเห็นของหุ่นยนต์ การวินิจฉัยโรคในด้านการแพทย์ การวัดขนาดของวัตถุ เป็นต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิธีการเก็บข้อมูลสามมิติในแบบต่างๆ

3.1 ประเภทแบบพาสซีฟ (Passive method)

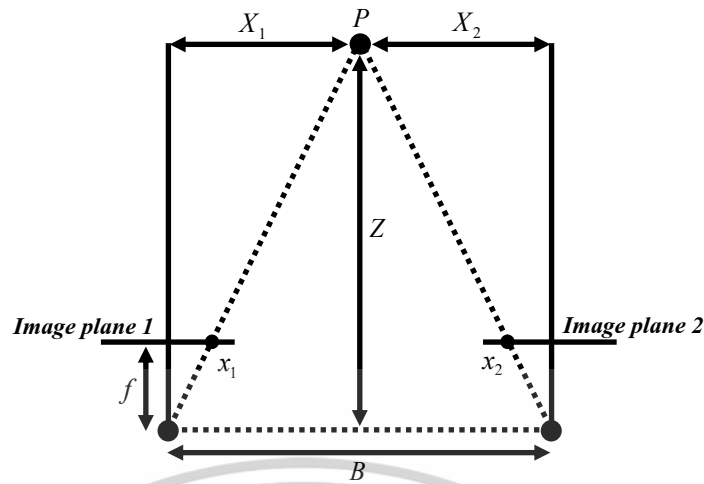
วิธีการแบบพาสซีฟจะไม่มีการยิงคลื่นหรือแหล่งกำเนิดแสงออกไป แต่จะใช้ประโยชน์จากแสงที่ไม่สามารถควบคุมได้จากสิ่งแวดล้อมรอบข้างแทน วิธีนี้บางครั้งถูกเรียกว่าสเตอริโอวิชัน (Stereo vision) อธิบายได้เหมือนกับการใช้ตาทั้งสองของมนุษย์ในการวัดระยะทาง เป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อะไรมากเพียงแค่อุปกรณ์ดิจิทัลธรรมดา โดยทั่วไปจะใช้กล้องสองตัววางห่างกันในระยะห่างที่แน่นอนดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หลักการของระบบสเตอริโอวิชัน (Stereo vision)

หลักการของสเตอริโอวิชันหรือสามารถใช้หลักการวิเคราะห์เรขาคณิตสามเหลี่ยมได้ตามรูปที่ 3.2 โดยความแตกต่าง (Disparity) ของจุดภาพที่เกิดขึ้นจากระนาบภาพของกล้องทั้งสอง จะสามารถคำนวณหาระยะทางได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การวัดระยะทางในระบบเตอริโอวิชัฒโดยใช้หลักการเรขาคณิตสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 3.2 จะสามารถนำมาเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกล้องทั้งสองได้โดยกำหนดให้ P เป็นจุดของวัตถุในระบบพิกัดกล้อง โดย X_1 และ X_2 เป็นตำแหน่งของวัตถุเมื่อเปรียบเทียบกับแนวแกน Z ของระบบพิกัดกล้อง และ x_1, x_2 เป็นตำแหน่งของวัตถุที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพดังนั้น

กล้องที่ 1

$$\frac{x_1}{f} = \frac{X_1}{Z} \quad (3.1)$$

กล้องที่ 2

$$\frac{x_2}{f} = \frac{X_2}{Z} \quad (3.2)$$

และ

$$X_2 = X_1 + B \quad (3.3)$$

นำสมการที่ 3.3 แทนลงในสมการที่ 3.2 เขียนใหม่ได้เป็น

$$B + X_1 = \frac{Z \cdot x_2}{f} \quad (3.4)$$

นำสมการที่ 3.4 ลบสมการที่ 3.1 ดั่งนั้นระยะทาง Z จะหาได้ดังสมการที่ 3.5

$$Z = \frac{B \cdot f}{x_2 - x_1} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้ Z คือ ระยะทางระหว่างกล้องกับวัตถุ P

B คือ ระยะทางระหว่างกล้องทั้งสองตัว

f คือ ความยาวโฟกัสของกล้องทั้งสองตัว

x_1, x_2 คือ ระยะจุดภาพที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพ

จุดของภาพทั้งสอง x_1 และ x_2 จะอยู่ที่ตำแหน่งต่างกันของแต่ละระนาบภาพ ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.3 ซึ่งจะทำให้ได้ระยะห่างระหว่างจุด โดยเรียกว่าค่าความแตกต่าง (Disparity) ทำให้ระยะทาง Z จากระนาบกล้องไปยังจุดบนวัตถุจะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าความแตกต่างระหว่าง x_1 และ x_2 เช่นถ้าค่าความแตกต่างเข้าใกล้ศูนย์ระยะทาง Z จะมีค่าได้ไม่สิ้นสุด (Infinite) ซึ่งจะไม่เกิดระยะทางขึ้นระหว่างจุดภาพทั้งสองที่สอดคล้องกัน ในทางกลับกันถ้าระยะทาง Z ลดลงค่าความแตกต่างก็จะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.3 จุดภาพที่เกิดแตกต่างกันบนระนาบภาพ

โดยความแม่นยำระบบแบบสเตอริโอจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดภาพที่ตรงกันหรือสอดคล้องกันของภาพที่ได้จากระนาบของกล้องทั้งสองตัว และตำแหน่งของจุดภาพที่เกิดขึ้นบน 2 ระนาบภาพจะต้องสอดคล้องเป็นจุดเดียวกัน โดยปัญหานี้เป็นปัญหาหลักของระบบสเตอริโอโดยเรียกว่า “Correspondence Problem” โดยในทางปฏิบัติสามารถทำได้ยากหรือมีข้อจำกัดมาก เนื่องจากภาพวัตถุที่เกิดขึ้นในภาพทั้งสองหากมีลักษณะรูปร่างไม่เหมือนกัน นอกจากนี้อาจจะมีปัญหาในส่วนของความเข้มแสงที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ภาพ โดยสามารถลดระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสองเพื่อเป็น

การแก้ไข ช่วยลดปัญหา Correspondence Problem แต่ในการลดระยะห่างนี้จะเป็นผลทำให้ความแม่นยำของระบบลดลงตามไปด้วย

3.2 ประเภทแบบแอคทีฟ (Active method)

เพื่อแก้ไขปัญหของ Correspondence Problem จึงแทนที่กล้องที่เป็นอุปกรณ์เก็บภาพออกไป 1 ตัวโดยการแทนด้วยเครื่องกำเนิดแสงและเรียกวิธีนี้ว่าหลักการของรูปสามเหลี่ยมแบบแอคทีฟ (Active Triangulation) โดยทำการฉายแสงลงไปยังวัตถุรูปแบบของแสงที่สะท้อนบนพื้นผิวของวัตถุจะสัมพันธ์กับรูปร่างพื้นผิวของวัตถุ แล้วทำการเก็บภาพของจุดหรือแสงที่ได้ แล้วนำข้อมูลภาพที่ได้มาประมวลผลเพื่อสร้างภาพสามมิติหรือคำนวณเพื่อหาค่าระยะของวัตถุ โดยรูปแบบการฉายแสงสามารถแบ่งออกได้หลากหลายรูปแบบ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงรูปแบบที่สนใจเท่านั้น

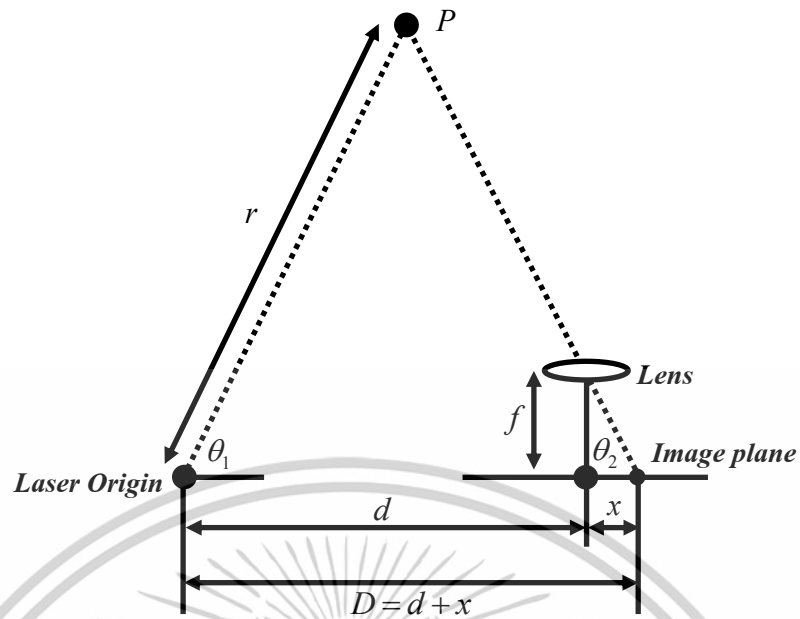
3.2.1 วิธีฉายแสงแบบจุด (Light Spot Triangulation)

สมมุติว่าเราฉายลำแสงไปยังวัตถุดังรูปที่ 3.4 ลำแสงดังกล่าวจะสร้างจุดแสงบนวัตถุและจะสะท้อนไปยังกล้อง โดยระยะห่างระหว่างกล้องกับแหล่งกำเนิดแสงคือระยะ d จะเห็นได้ว่าเกิดเป็นรูปสามเหลี่ยมขึ้นระหว่างแกนของแสงที่ตกกระทบกับกล้อง ทำให้สามารถคำนวณหาระยะทาง r จากกล้องไปยังจุดบนวัตถุได้ หากต้องการหาระยะทางที่จุดอื่นๆบนวัตถุจะต้องเลื่อนจุดแสงไปทั่วตลอดภาพซึ่งทำให้ใช้เวลาในการประมวลผล ส่วนแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้ได้แก่ แสงเลเซอร์ มีความเข้มแสงสูง มีความยาวคลื่นที่แคบ และมีการกระจายของแสงน้อยให้จุดแสงที่ชัดเจน สามารถใช้ได้กับสภาพแวดล้อมที่มีแสงปกติทั่วไปและสามารถใช้ตัวกรองแสง (Filter) กับกล้องได้เพื่อกรองความยาวคลื่นแสงในย่านที่ไม่ต้องการ

ในการคำนวณหาระยะทาง r นั้นสามารถคำนวณหาได้จากมุม θ_1, θ_2 และระยะทาง d ซึ่งมุม θ_2 คำนวณได้จากความยาวโฟกัสของกล้องวิดีโอ f ซึ่งมีค่าคงที่กับระยะห่างจากศูนย์กลางเลนส์กล้องกับจุดภาพ x ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4 ดังนั้นมุม θ_2 สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{f}{x}\right) \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 หลักการวัดระยะโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบจุด

โดยที่ระยะทางระหว่างเครื่องกำเนิดแสงและจุดภาพนั้นสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$D = d + x \tag{3.7}$$

เมื่อ

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

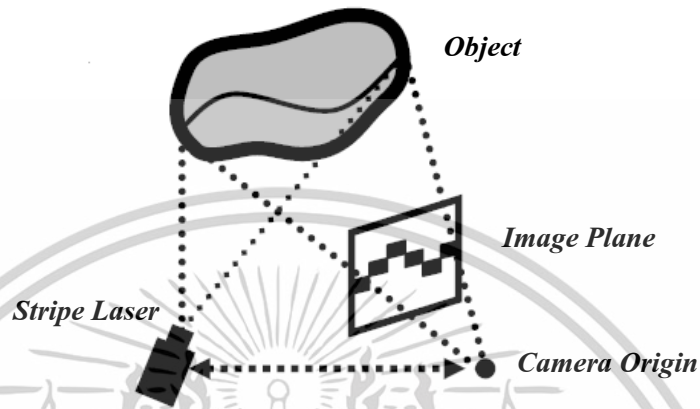
ซึ่ง x สามารถเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับว่าจุดภาพที่ถูกแสงนั้นอยู่ด้านขวา (เป็นบวก) หรืออยู่ด้านซ้าย (เป็นลบ) ของจุดศูนย์กลางของเลนส์กล้อง มุม θ_1 เป็นมุมเอียงของเครื่องกำเนิดแสง ดังนั้นระยะทาง r สามารถคำนวณได้โดยใช้กฎของซายน์ดังต่อไปนี้ [36]

$$r = \frac{D \cdot \sin \theta_2}{\sin 180^\circ - (\theta_1 + \theta_2)} \tag{3.8}$$

3.2.2 วิธีฉายแสงแบบลายเส้น (Light Stripe Triangulation)

หลักการฉายแสงแบบลายเส้นเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีฉายแสงแบบจุด โดยลายเส้นของแสงจะได้จากการฉายแสงผ่านร่องแสงหรือจากเครื่องกำเนิดแสงที่มีชุดเลนส์เฉพาะทำให้แสงที่ได้กลายเป็นเส้นแสง โดยทำการฉายแสงที่ได้นี้ไปยังวัตถุและใช้กล้องเก็บลายเส้นที่เกิดขึ้นบนวัตถุ ดังรูปที่ 3.5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

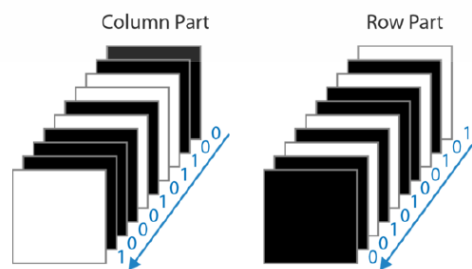
ส่วนวิธีการคำนวณหาระยะทางจะเหมือนกับวิธีการฉายแสงแบบจุดทุกประการรวมทั้งการวางและติดตั้งอุปกรณ์ก็มีความเหมือนกัน ข้อดีของวิธีการฉายแสงแบบลายเส้นเดี่ยวประมวลผลได้เร็วกว่าวิธีการฉายแสงแบบจุด



รูปที่ 3.5 หลักการวัดระยะทางโดยวิธีรูปสามเหลี่ยมร่วมกับแสงเลเซอร์แบบเส้น

3.2.3 วิธีการฉายแสงแบบต่อเนื่อง (Multi shots)

วิธีการเข้ารหัสแบบนี้ทำการฉายแสงโดยนิยามโปรเจคเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง ใช้แสงที่มีรูปแบบในแบบริ้วขาวสลับดำลงไปยังบนวัตถุเป็นลำดับ ซึ่งเป็นวิธีการระบุตำแหน่งพิกเซลแบบเชิงเวลา อาศัยความแตกต่างของความเข้มแสงขาวและแสงดำ แตกต่างกันในแต่ละเฟรมเพื่อระบุตำแหน่งพิกเซล ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 3.6 ที่แสดงตัวอย่างความแตกต่างของความเข้มแสงที่ตำแหน่งพิกเซลใดๆ ด้วยจำนวน 10 ลำดับเฟรม (10 รูปแบบ) [36] โดยที่ความต่างนี้จะทำให้เกิดเป็นรหัสแบบไบนารีขึ้นซึ่งจะทำให้ระบุตำแหน่งนี้ได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังมีด้วยกันอีกหลายวิธีในการเข้ารหัสดังที่จะอธิบายต่อไปดังนี้

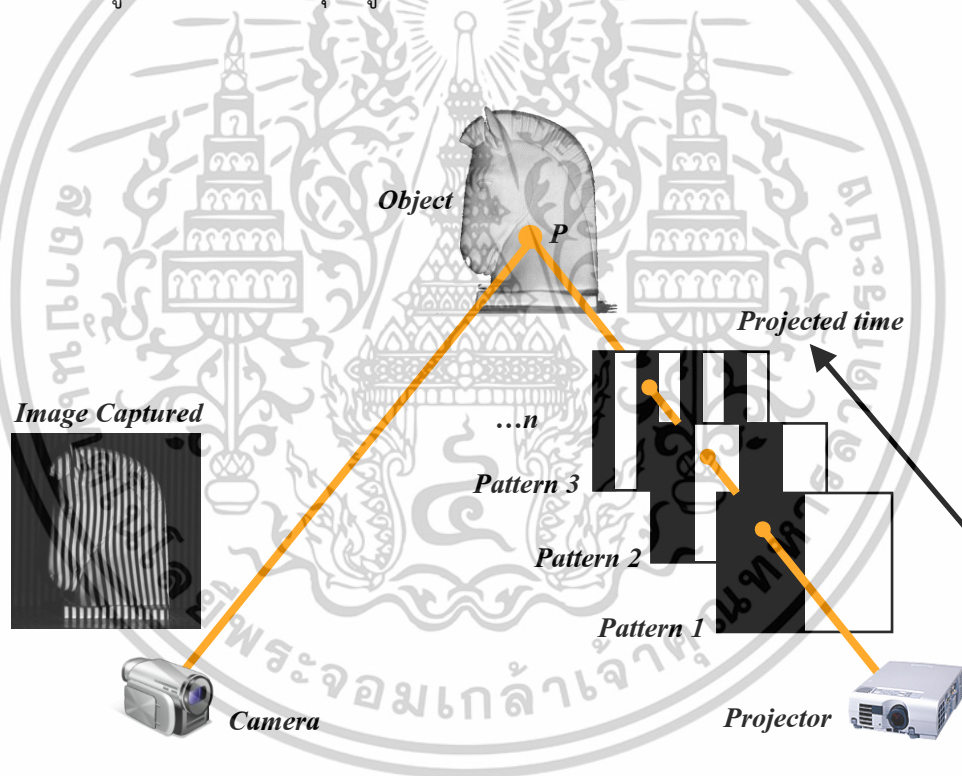


รูปที่ 3.6 ตัวอย่างรหัสแบบไบนารีทั้งแบบสแกนในแนวตั้งและแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.1 การเข้ารหัสแบบไบนารี (Binary code)

วิธีการนี้จะทำการฉายแสงที่มีรูปแบบขาวลักษณะแถบเส้นขาวสลับดำแบบรหัสไบนารี (Binary code) โดยที่มีจำนวนรหัสสูงสุดเท่ากับ 2^n และมีจำนวนลำดับของรูปแบบเป็นไปตามจำนวน N พิจารณารูปที่ 3.7 ที่มีรูปจำนวน $N=3$ จุด ซึ่งอยู่บนผิวของวัตถุจะถูกเข้ารหัสเป็นระดับมืดหรือ “0” โดยฉากที่ 1 บิทนี้ถูกกำหนดเป็น MSB (Most Significant Bit) เมื่อเปลี่ยนฉากเป็นฉากที่ 2 จะถูกเข้ารหัสใหม่เป็นระดับสว่างหรือ “1” และในฉากที่ 3 จะถูกเข้ารหัสใหม่เป็นระดับมืดหรือ “0” ซึ่งในบิทนี้ถูกกำหนดเป็น LSB (Least Significant Bit) เมื่อนำข้อมูลในแต่ละฉากที่ได้มาอนุกรมกันตั้งนั้นจุด จะถูกเข้ารหัสเป็น “101” วิธีการแบบนี้มีข้อดีคือให้ความถูกต้องแม่นยำในการระบุตำแหน่งพิกเซลสูง เนื่องจากไม่ค่อยมีปัญหาเกี่ยวกับผลกระทบจากสีของวัตถุ จึงส่งผลทำให้มีความละเอียดสูง จึงเหมาะกับวัตถุที่อยู่นิ่ง เนื่องจากต้องใช้จำนวนลำดับเฟรมในการสแกน



รูปที่ 3.7 เทคนิคการฉายแสงผ่านรหัสไบนารี (Binary code pattern)

3.2.3.2 การเข้ารหัสแบบเกรย์ (Gray code)

วิธีการของรหัสเกรย์จะมีลักษณะคล้ายกันกับวิธีการของไบนารีที่มีจำนวนลำดับของเฟรมเท่ากันแต่จะแตกต่างกันที่ลักษณะของเส้นแถบ โดยวิธีการของรหัสแบบเกรย์นั้นถูกพิจารณาว่าเป็นวิธีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ดีกว่าการเข้ารหัสแบบไบนารี ซึ่งถ้าพิจารณารูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด (LSB Bit) ระหว่างการเข้ารหัสแบบเกรย์และแบบไบนารีนั้นแตกต่างกัน โดยที่การเข้ารหัสแบบเกรย์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเมื่อผ่านไปแล้วสองลำดับเฟรมส่วนแบบไบนารีนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงทุกลำดับเฟรม ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนค่าแบบเกรย์นี้จะช่วยลดปัญหาความเข้มแสงเพี้ยนที่เกิดการสะท้อนของแสงที่เกิดจากพิกเซลใกล้เคียง [37]

Decimal Value	Gray-code	Binary code
0	000	000
1	001	001
2	011	010
3	010	011
4	110	100
5	111	101
6	101	110
7	100	111

รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบระหว่างการเข้ารหัสแบบเกรย์และการเข้ารหัสแบบไบนารี

3.2.3.3 การเข้ารหัสแบบการเลื่อนเฟส (Phase shift)

ถึงแม้ว่าการเข้ารหัสแบบไบนารีหรือแบบรหัสเกรย์จะมีข้อดีที่สามารถระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ รวมถึงผลกระทบต่อสัญญาณที่น้อยลง แต่มีข้อจำกัดคือใช้จำนวนภาพหลายเฟรม โดยวิธีการแบบเลื่อนเฟสนี้จะลดข้อจำกัดนี้ลงไปได้ โดยใช้หลักการฉายแสงที่มีรูปแบบที่เป็นฟังก์ชันของคลื่นแบบโคไซน์ (cosine wave) จำนวน 3 รูปคลื่นที่มุมเฟสแตกต่างกัน θ ดังได้ในรูปที่ 3.9

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= I_0(x, y) + I_{\text{mod}}(x, y) \cos(\phi(x, y) - \theta) \\
 I_2(x, y) &= I_0(x, y) + I_{\text{mod}}(x, y) \cos(\phi(x, y)) \\
 I_3(x, y) &= I_0(x, y) + I_{\text{mod}}(x, y) \cos(\phi(x, y) + \theta)
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

โดยที่ $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$ และ $I_3(x, y)$ คือ ความเข้มแสงในรูปแบบฟังก์ชันโคไซน์ของริ้วแถบมืดและสว่างของทั้ง 3 แถบ ส่วน $I_0(x, y)$ คือความเข้มพื้นหลังหรือความเข้มอ้างอิง $I_{\text{mod}}(x, y)$ คือ ขนาดของสัญญาณก่้า (Modulation) และ $\phi(x, y)$ คือเฟสของสัญญาณ

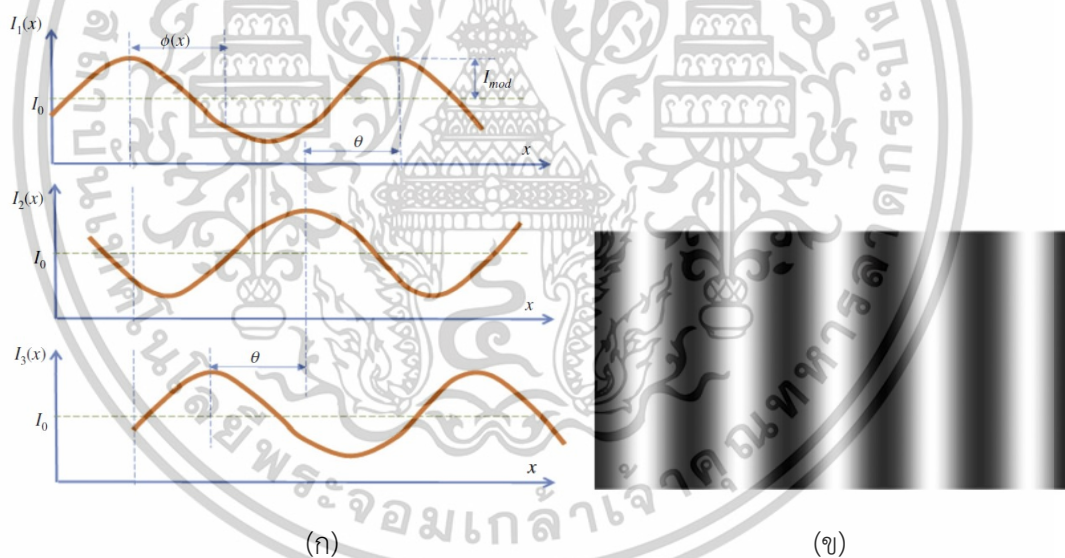
ดังนั้นวิธีการแบบเลื่อนเฟสนี้จะใช้เพียงแค่ 3 ลำดับเฟรมเท่านั้นในการสแกน โดยทำการฉายริ้วของแสง $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$ และ $I_3(x, y)$ ลงไปที่วัตถุแล้วทำการเก็บภาพของริ้วแต่ละเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกล้อง กระจบบนการนี้เรียกว่า phase wrapping โดยทั้ง 3 ภาพที่ได้นี้จะต้องนำมาเข้า กระจบบนการย้อนกลับเพื่อระบุตำแหน่งที่เรียกว่า phase unwrapping ซึ่งเฟสของสัญญาณ $\phi(x, y)$ จากร็วของแสงทั้ง 3 ร็วที่มาจากภาพคนละเฟรมนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 3.10

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\sqrt{3} \left(\frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{2I_2(x, y) - I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right) \right] \quad (3.10)$$

โดยข้อดีของวิธีนี้นั้นคือการลดจำนวนของลำดับเฟรมลงไปอย่างมาก โดยใช้เพียงแค่ 3 เฟรม แต่อาจมีปัญหาเนื่องจากร็วของความเข้มแสงเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง ซึ่งถ้าพื้นผิวของวัตถุเป็นสีหรือมี ลักษณะที่ทำให้การสะท้อนของแสงมีการผิดเพี้ยน จะส่งผลต่อกระจบบนการ phase unwrapping ที่เป็นกระจบบนการระบุตำแหน่งพิกเซลนั้นอาจจะมีปัญหาหรือทำไม่ได้ นอกจากวิธีที่กล่าวไว้แล้วยังมีวิธี แบบการแบบอื่น ๆ อีก เช่น วิธีการแบบไล่ระดับความเข้มของระดับเกรย์ หรือวิธีการแบบผสมที่นำ วิธีการเข้าแบบเกรย์มาผสมกับวิธีการแบบเลื่อนเฟส



รูปที่ 3.9 (ก) การเลื่อนของร็วสัญญาณแบบโคไซน์ (ข) ร็วความเข้มแสง จากฟังก์ชันโคไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การเข้ารหัสแบบเฟรมเดียว (Single shot)

เพื่อลดข้อจำกัดในการใช้ระยะเวลาในการสแกนสำหรับงานที่ต้องการความเร็วสูง เช่น วัตถุที่มีการเคลื่อนไหวหรืองานประเภทที่ต้องการการสแกนในแบบเวลาจริง (Real-time) ซึ่งวิธีการเข้ารหัสแบบต่อเนื่องกันนั้นที่เป็นการระบุตำแหน่งพิกเซลเชิงเวลานั้นไม่สามารถทำได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการระบุตำแหน่งพิกเซลแบบเชิงพื้นที่ที่สามารถระบุตำแหน่งพิกเซลได้โดยใช้เพียงแค่เฟรมเดียว

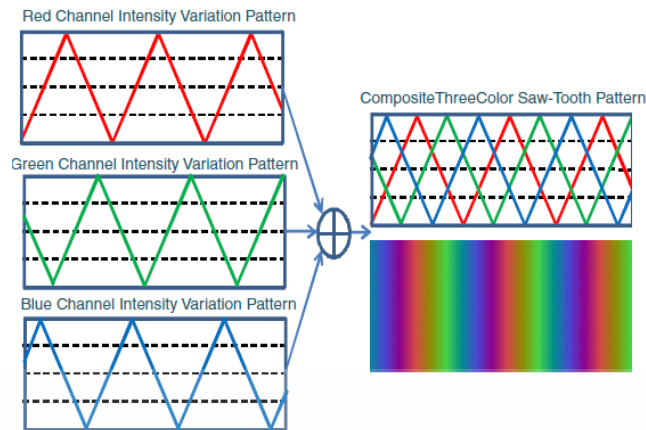
กล้องสีนั้นโดยทั่วไปจะมี Bayer pattern เป็นตัวกรองแสงซึ่งเคลือบอยู่ที่ผิวหน้าของเซนเซอร์กล้อง ทำหน้าที่เป็นตัวกรองความยาวคลื่นแสง คือ ช่วงแสงสีแดง ช่วงแสงสีเขียว และช่วงแสงสีน้ำเงิน (RGB) ซึ่งก็คือช่องสัญญาณสีนั่นเอง โดยแต่ละช่องสัญญาณจะมีความละเอียด (bit depth) ขึ้นอยู่กับความละเอียดของตัวแปลงสัญญาณจากสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัลจากเซนเซอร์ ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ 8 บิตในแต่ละช่องสัญญาณ ซึ่งวิธีการระบุตำแหน่งของเส้นริ้วจะใช้ประโยชน์จากหลักการนี้ โดยทำการฉายริ้วแสงที่มีสีแตกต่างกันลงไปยังวัตถุ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งจะทำให้เกิดกลุ่มของสีที่สลับกันไป เช่น RGBRGBRGB ทำให้ช่วยระบุตำแหน่งของริ้วได้ในภาพเฟรมเดียวกันได้



รูปที่ 3.10 วิธีการระบุตำแหน่งริ้วแสงโดยวิธีการจำแนกสี

นอกจากนี้ด้วยการที่สีที่เกิดจากทั้ง 3 ช่องสัญญาณนั้นสามารถทำให้เกิดสีแตกต่างกันได้ถึง 224 สี ทำให้สามารถสร้างริ้วแสงที่มีสีแตกต่างกันนอกเหนือจาก 3 สีหลักได้อีก โดยมีเทคนิคในการผสมสีเพื่อสร้างริ้วที่มีลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ดังนี้ โดยรูปที่ 3.11 คือวิธีการสร้างริ้วสีแบบที่เรียกว่า Continuous varying color coding

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 วิธีที่ได้จากวิธีการ Continuous varying color ที่เกิดจากการรวมกันของสามสีแบบ Sawtooth

3.2.5 วิธีการการเดินทางของเวลา (Time of Flight)

อาศัยหลักการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการเดินทางของสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณส่งออกไปยังวัตถุและสะท้อนกลับมาที่ตัวรับ แสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ 3.11 โดยรูปแบบของสัญญาณมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (3.11)$$

เมื่อ d คือ ระยะทางจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปยังวัตถุ (เมตร)

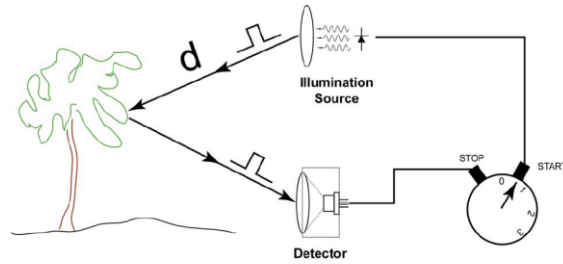
v คือ ความเร็วขึ้นอยู่กับชนิดของสัญญาณที่ใช้ (เมตร/วินาที)

t คือ เวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไปและสะท้อนกลับมา (วินาที)

ซึ่งทั่วไปแล้วมีสัญญาณอยู่ 2 ชนิดที่นำมาใช้ในหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปซึ่งได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่นเสียง ซึ่งวิธีในการคำนวณหาระยะทางจะมีลักษณะเหมือนกัน อย่างไรก็ตามสัญญาณแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัว ได้ ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะสัญญาณที่เป็นคลื่นแสงเท่านั้น โดยการใช้คลื่นแสงมาใช้ในหลักการเกี่ยวกับเวลาที่สูญเสียไปวิธีนี้ถูกเรียกว่า LIDAR (Light Detection and Ranging) ซึ่งจะกำเนิดคลื่นแสงสั้นๆออกไปและรอคลื่นสะท้อนกลับมานำเวลาที่สูญเสียไปมาคำนวณหาระยะทาง สามารถแสดงหลักการได้ในรูปที่ 3.12

วิธีการนี้มีความซับซ้อนสูงเนื่องจากแสงมีความเร็วสูงมาก ต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูงในการออกแบบวงจรประมวลผล หรือระบบทางแสง เช่น เลนส์ แหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 หลักการวัดระยะทางโดยใช้หลักการเวลาที่สูญเสียไป

3.3 สรุป

การเก็บข้อมูลระยะทางสามมิติ หรือที่เรียกว่าข้อมูลระยะ (Range data) เป็นหลักการพื้นฐานสำหรับการสร้างภาพสามมิติ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ แบบพาสซีฟ และแบบแอคทีฟ โดยวิธีการแบบพาสซีฟนั้นจะไม่มีแหล่งกำเนิดแสง แต่จะอาศัยแสงจากสภาพแวดล้อมมมแทน โดยอาศัยกล้องมากกว่า 1 ตัวขึ้นไป โดยทั่วไปคือ 2 ตัวซึ่งเรียกว่าระบบแบบสเตอริโอ เป็นวิธีการที่ระบบฮาร์ดแวร์ไม่ซับซ้อน ส่วนระบบแบบแอคทีฟนั้นจำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดแสง เช่น แสงเลเซอร์หรือโปรเจคเตอร์

นอกจากนี้วิธีการแบบแอคทีฟสามารถแบ่งวิธีการออกตามลักษณะการฉายได้อีก คือ แบบสามเหลี่ยม (Triangulation) การฉายแสงเข้ารหัสแบบต่อเนื่อง (Multi shots) และการฉายแสงเข้ารหัสแบบเฟรมเดียว (Single shot) ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน โดยแบบสามเหลี่ยมและแบบการเข้ารหัสแบบต่อเนื่องนั้นมีข้อดีคือมีความละเอียดสูง สามารถใช้วัตถุที่มีได้ แต่ใช้เวลาในประมวลผลสูง ในทางกลับกันการฉายแสงเข้ารหัสแบบเฟรมเดียวใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่า แต่มีข้อเสียคืออาจให้ความละเอียดน้อยกว่าและอาจมีข้อจำกัดโดยไม่สามารถใช้วัตถุที่มีได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสร้างภาพสามมิติจากเงาของวัตถุ

นอกเหนือจากข้อมูลความแตกต่างกันของภาพที่เกิดจากคู่สเตอริโอ ระยะเวลาที่คลื่นแสงใช้ในการเดินทาง หรือความแตกต่างกันของเฟส วิธีการเหล่านี้ที่สามารถนำมาใช้สร้างภาพสามมิติได้เงาที่เกิดจากวัตถุก็สามารถนำมาใช้สร้างภาพสามมิติได้เช่นกัน และมีข้อดีที่สำคัญคือ แหล่งกำเนิดแสงที่นำมาใช้นั้นมีความเรียบง่าย มีต้นทุนไม่สูง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างภาพรูปทรงสามมิติจากข้อมูลเงานั้นที่ผ่านมามุ่งเน้นไปที่ความสมบูรณ์ในการสร้างภาพสามมิติของพื้นผิว การแก้ไขปัญหาเรื่องการตรวจจับขอบของเงา ซึ่งไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการวัดในเชิงเรขาคณิต [38-43]

จากข้อจำกัดบางประการของระบบสแกนสามมิติรูปแบบแอคทีฟ เช่น ระบบแหล่งกำเนิดแสงที่ซับซ้อนที่ทำให้ระบบมีราคาสูง มีเงื่อนไขในการติดตั้ง เช่น ต้องทำการสอบเทียบทั้งกล้องและโปรเจคเตอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของกล้องตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ส่วนข้อจำกัดของรูปแบบแบบพาสซีฟนั้นต้องการการคำนวณที่ซับซ้อนโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการประมาณค่า เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้วัตถุที่มีรูปทรงที่เรียบง่าย เช่น ทรงกลม ทรงรี เป็นต้น แต่หากนำไปประยุกต์ใช้กับวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนมากกว่านี้อาจทำให้ค่าความถูกต้องในการวัดผิดพลาดได้ นอกจากนี้ยังต้องมีการสอบเทียบกล้องเพื่อหาค่าพารามิเตอร์กล้องด้วยเช่นกัน

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการพัฒนาวิธีการสร้างภาพสามมิติให้มีความเรียบง่าย ให้มีความซับซ้อนน้อยทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยใช้วิธีการนำข้อมูลเงาที่เกิดจากวัตถุนี้ร่วมกับการวัดเชิงเรขาคณิตด้วยการประมวลผลภาพมาใช้ในการประมาณค่าปริมาตรของวัตถุ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของระบบสแกนแบบสามมิติทั้งแบบแอคทีฟและแบบพาสซีฟที่กล่าวไว้ข้างต้น เพื่อประยุกต์ใช้ในงานตรวจสอบแบบไม่สัมผัส ลดขั้นตอนในการการสอบเทียบกล้อง มีเพียงแค่การสอบเทียบเพื่อหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง ทำให้วิธีการที่นำเสนอนี้มีความเรียบง่าย

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แนวคิดหลักการในการใช้เงาเพื่อสร้างภาพสามมิติสำหรับการประมาณค่าปริมาตรของวัตถุแบบ เรขาคณิตของเงา การหาความสูงของวัตถุ วิธีการสอบเทียบหาพิกัดแหล่งกำเนิดแสง

4.1 เรขาคณิตของเงา

พิจารณาหากมีแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดฉายลงไปยังวัตถุตามรูปที่ 4.1 โดยกำหนดให้แหล่งกำเนิดแสงแบบจุดเป็นจุด C จะทำให้เกิดเงาทอดลงมาทำให้เกิดลักษณะเรขาคณิตแบบรูปเอกสารถี่เป็นเอกสารถี่สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามเหลี่ยมตามรูปที่ 4.2 ตามกฎของโคไซน์ (Law of cosine) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมและขนาดจะเขียนได้ตามสมการที่ 4.1

$$\begin{aligned}\cos \theta_a &= \frac{u^2 + w^2 - v^2}{2uw} \\ \cos \theta_b &= \frac{v^2 + w^2 - u^2}{2vw} \\ \cos \theta_c &= \frac{u^2 + v^2 - w^2}{2vu}\end{aligned}\quad (4.1)$$

เมื่อ u คือ ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดแสง C กับขอบของเงาที่จุด A

v คือ ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดแสง C กับจุดกึ่งกลางของวัตถุที่จุด B

w คือ ระยะระหว่างจุดกึ่งกลางของวัตถุ B กับขอบของเงาที่จุด A



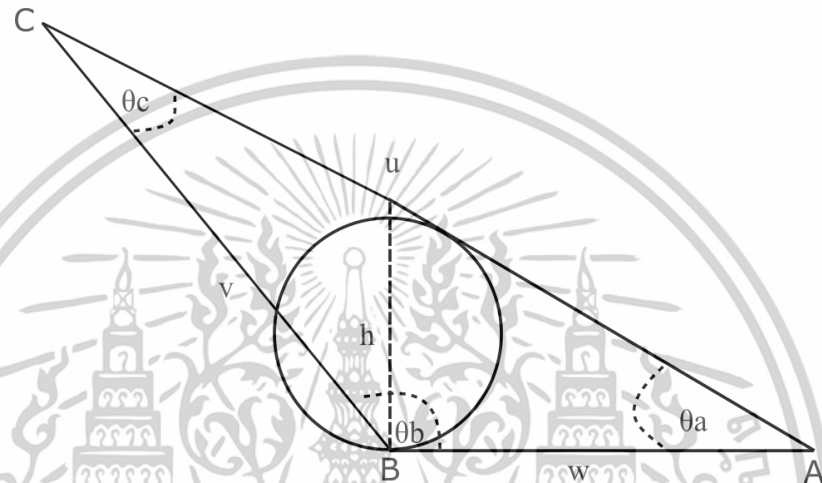
รูปที่ 4.1 แนวคิดหลักการสร้างภาพสามมิติจากเงาของวัตถุ

ดังนั้นหากรู้มุม θ_a กับความยาวของเงา w โดยวัดจากจุดกึ่งกลางของวัตถุ จะสามารถคำนวณหาความสูง h ได้ จึงทำให้วิธีการนี้ต้องการเพียงแค่ภาพมุมมองด้านบนเท่านั้นหากรู้ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง โดยความสูงของวัตถุ h จะหาได้จากสมการที่ 4.23 ซึ่งวิธีการนี้ความละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้างภาพสามมิติจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของภาพที่ได้จากกล้อง และเนื่องจากวิธีการนี้เป็น การวัดระยะเพียงแคในแนวระนาบเดียว ทำให้สามารถนำหลักการการวัดเชิงเรขาคณิตมาประยุกต์ใช้ ได้ โดยการใช้การแปลงแบบโฮโมกราฟฟีที่เป็นการแปลงแบบ projective ทำให้ลดขั้นตอนในส่วนของการ สอบเทียบกล้องลงไปได้

$$h = w \tan \theta_a \quad (4.2)$$

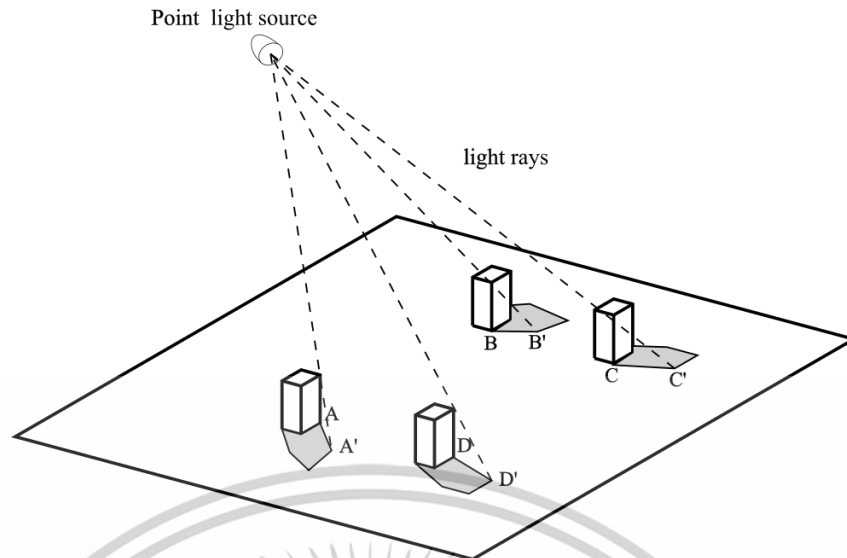


รูปที่ 4.2 แนวคิดการหาความสูงด้วยเรขาคณิตจากการเกิดเงาของวัตถุ

4.2 การสอบเทียบหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง

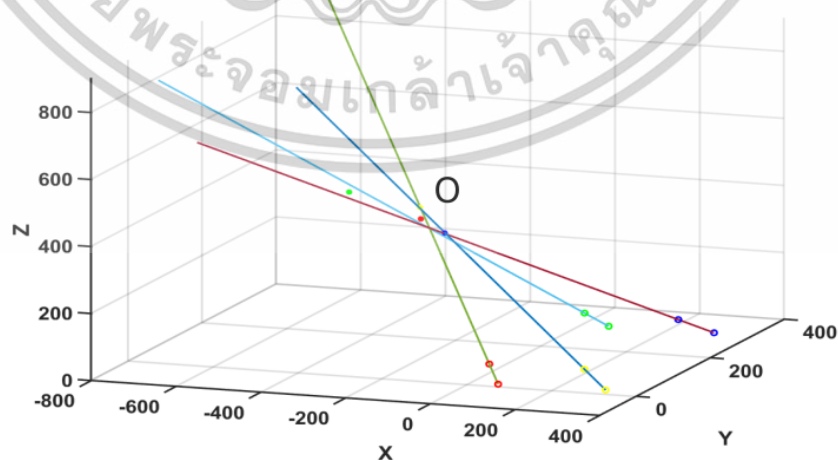
เนื่องจากการคำนวณหาความสูงจำเป็นต้องคำนวณโดยอ้างอิงถึงพิกัดของตำแหน่งของ แหล่งกำเนิดแสง ดังนั้นการสอบเทียบเพื่อหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงจึงเป็นพารามิเตอร์สำคัญ อันดับแรก โดยในการสอบเทียบเพื่อหาพิกัดของแหล่งกำเนิดแสงนั้นสามารถทำได้โดยการใช้วัตถุที่มี ลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมให้เป็นความสูงอ้างอิง h เพื่อสร้างเงาที่มีความยาว v ทำให้สามารถ คำนวณหามุม θ_a เพื่อสร้างเส้นรังสี u ที่เป็นรังสีย้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิดแสงได้ โดยในงานวิจัยนี้ ใช้แท่งสี่เหลี่ยมที่ทำจากอะคริลิกที่มีขนาด $20 \times 20 \times 50$ มม จำนวน 4 แท่งด้วยกัน โดยทุกแท่งวัตถุวัด ขนาดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ จากนั้นทำการวางในลักษณะรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามรูปที่ 4.3 โดย ในพื้นที่ของสี่เหลี่ยมจัตุรัสนี้ จะเป็นพื้นที่สำหรับใช้ในการวัดด้วย เนื่องจากการจุดมุมของ A B C และ D เป็นจุดอ้างอิงที่ถูกนำไปคำนวณหาเมทริกซ์โฮโมกราฟฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การวางวัตถุแท่งสี่เหลี่ยมสำหรับการสอบเทียบพิกัดแหล่งกำเนิดแสง

ความยาวของเงาที่เกิดจากแท่งอะครีลิกทั้ง 4 แท่ง $\overline{AA'}$, $\overline{BB'}$, $\overline{CC'}$ และ $\overline{DD'}$ ถูกกำหนดและลากโดยใช้เมาส์ผ่านจุดเฟรมเวิร์คที่พัฒนาขึ้น จากนั้นใช้วิธีการแปลงโดยใช้โฮโมกราฟฟีเมทริกซ์เพื่อให้ได้หน่วยวัดโลกจริง (หน่วย มม.) ด้วยความสูงของแท่งอะครีลิก และใช้สมการที่ 4.1 เพื่อหา θ_a จะทำให้สามารถคำนวณหาเส้นรังสีย้อนกลับ u ที่ชี้ไปยังตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงได้ เมื่อหาได้ครบทั้ง 4 เส้น จะทำให้สามารถประมาณค่าจุดพิกัดของแหล่งกำเนิดแสงได้ตามรูปที่ 4.4 โดยจุด O ที่เป็นจุดตัดของเส้นรังสีทั้ง 4 เส้นคือจุดพิกัดแหล่งกำเนิดแสง



รูปที่ 4.4 เส้นรังสีที่ย้อนกลับและจุดตัด O ที่เป็นจุดพิกัดตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากมุม θ ขึ้นอยู่กับความยาวของเงา โดยกระบวนการหาเส้นอ้างอิงนี้ทำโดยใช้วิธีการลากเมาส์ ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลื่อนไหวได้และอาจทำให้เส้นรังสีไม่ตัดกัน ดังนั้นต้องอาศัยการประมาณของจุดตัดของเส้นรังสีทั้ง 4 โดยหาจากการประมาณหาจุดตัดทีละคู่ของเส้นรังสี จากนั้นจึงนำจุดตัดของทั้ง 2 มาหาจุดกึ่งกลาง

พิจารณารูปที่ 4.5 เส้นรังสี R_1 และ R_2 อยู่ในปริภูมิสามมิติมีจุดกำเนิดที่ O_1 และ O_2 โดยมีเวกเตอร์หนึ่งหน่วย u และ v เป็นเวกเตอร์บอกทิศทางตามลำดับ กำหนดให้จุด a และ b เป็นจุดที่ใกล้ที่สุดโดยมีเส้น \overline{ab} เป็นเส้นเชื่อม [36]

$$R_1 = o_1 + s\vec{u} \quad (4.3)$$

$$R_2 = o_2 + t\vec{v} \quad (4.4)$$

ส่วนของเส้น \overline{ab} นั้นตั้งฉากอยู่กับเส้นรังสี R_1 และ R_2 ดังนั้นผลคูณจุด (dot product) จึงมีค่าเท่ากับ 0

$$(R_1 - R_2) \cdot \vec{u} = 0, \quad (R_1 - R_2) \cdot \vec{v} = 0 \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.3 4.4 และ 4.5 และกำหนดให้ $\vec{w} = O_1 - O_2$ จะได้

$$\vec{w} \cdot \vec{u} + s\vec{u} \cdot \vec{u} - t\vec{v} \cdot \vec{u} = 0 \quad (4.6)$$

$$\vec{w} \cdot \vec{v} + s\vec{v} \cdot \vec{u} - t\vec{v} \cdot \vec{v} = 0 \quad (4.7)$$

โดยสเกลาร์ s, t จากสมการที่ 4.6 และ 4.7 จะหาได้จาก

$$s = \frac{(\vec{w} \cdot \vec{u})(\vec{v} \cdot \vec{v}) - (\vec{v} \cdot \vec{u})(\vec{w} \cdot \vec{v})}{(\vec{v} \cdot \vec{u})(\vec{v} \cdot \vec{u}) - (\vec{v} \cdot \vec{v})(\vec{u} \cdot \vec{u})} \quad (4.8)$$

$$t = \frac{(\vec{v} \cdot \vec{u})(\vec{w} \cdot \vec{u}) - (\vec{u} \cdot \vec{u})(\vec{w} \cdot \vec{v})}{(\vec{v} \cdot \vec{u})(\vec{v} \cdot \vec{u}) - (\vec{v} \cdot \vec{v})(\vec{u} \cdot \vec{u})}$$

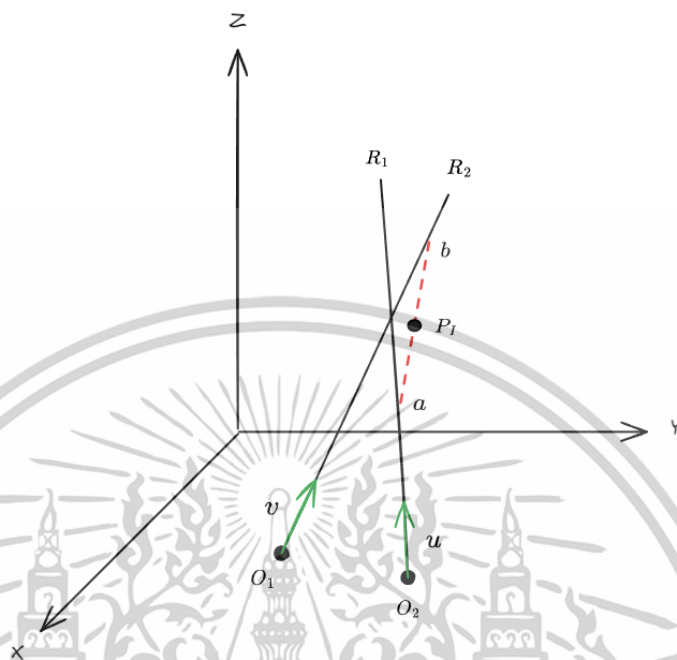
ดังนั้นจุดกึ่งกลาง P_1 จะประมาณได้จาก

$$P_1 = \frac{(O_1 + s\vec{u}) + (O_2 + t\vec{v})}{2} \quad (4.9)$$

โดยจุด P_1 นี้คือจุดประมาณว่าเป็นจุดกึ่งกลางของทั้งสองเส้นรังสี ซึ่งจะต้องหาจุดกึ่งกลางอีกคู่หนึ่ง โดยสมมติว่ากำหนดให้เป็น P_1 ดังนั้นจุดตัดกันของเส้นรังสีทั้ง 4 เส้นที่เป็นจุด O ตามรูปที่ 4.4 จะประมาณได้จากสมการที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$O = \frac{P_I + P_J}{2} \quad (4.10)$$



รูปที่ 4.5 การตัดกันของเส้นรังสีระหว่างเส้นรังสี R_1 และ R_2

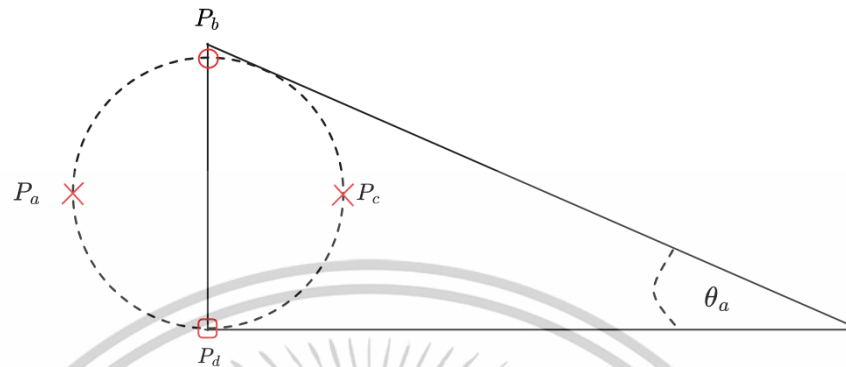
4.3 การสร้างภาพภาคตัดขวาง (Virtual Slicing)

หนึ่งในวิธีการที่นำมาใช้ในการสร้างภาพสามมิติคือการนำภาพภาคตัดขวางที่เป็นภาพ 2 มิติ มาเรียงต่อกันเพื่อประกอบขึ้นมาเป็นภาพสามมิติ โดยที่มาเริ่มต้นของวิธีการนี้มาจากการได้มาของ ข้อมูลที่เกิดจากเครื่องเอกซเรย์ (X-ray) หรือเครื่องตรวจสอบที่ใช้สนามแม่เหล็กความถี่จำเพาะ (Magnetic Resonance Imaging) ที่สามารถเลือกสแกนที่ความลึกแตกต่างกันได้ โดยข้อมูลแต่ละ ความลึกในแต่ละชั้นจะถูกนำมาสร้างเป็นภาพภาคตัดขวางที่เป็นภาพ 2 มิติ เช่นเดียวกับกับวิธีการ ลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ [44, 45]

จากหลักการการเกิดเรขาคณิตของเงาในรูปที่ 4.2 จะสามารถแบ่งภาคตัดขวาง S_i ได้ด้วย ขนาดของพิกเซลภาพในแนวแกน x โดย $S_i \in \{x_0, \dots, x_n\}$ ซึ่ง x_0 และ x_n คือตำแหน่งของหัวและ ท้ายวัตถุในแนวแกน x รูปที่ 4.6 แสดงถึงภาคตัดขวาง S_i โดยแต่ละภาคตัดขวางจะมี 4 จุดที่เป็นจุด หลัก โดยจุด P_b จะหาได้จากหลักการเรขาคณิตสามเหลี่ยมจากสมการที่ 4.2 ส่วนจุด P_a กับ P_c จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาได้จากขอบของวัตถุในแนวแกน y จากขอบบนและขอบล่างตามลำดับ และจุด P_d ก็คือจุดเดียวกันกับ P_b แต่ $z = 0$



รูปที่ 4.6 การเกิดสามเหลี่ยมเรขาคณิตจากแกนกลางของวัตถุกับความยาวของเงา
จากรูปที่ 4.2

4.3.1 การหาโครงสร้างแกนกลางของวัตถุ (Skeleton)

การหาโครงสร้างหลักของวัตถุ สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการที่เรียกว่าการแปลงวัตถุในภาพไบนารีให้กลายเป็นเส้นแสดงการกลางของวัตถุ (Skeletonization) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคของการประมวลผลภาพเชิงรูปร่างหรือโครงสร้าง (Morphological process) หนึ่งในอัลกอริทึมที่นิยมนั้นคือวิธีการของ Lee [46] เป็นการอาศัยการทำซ้ำของการของการลบพิกเซลที่ไม่จำเป็นออกจากขอบของวัตถุ

P_1	P_2	P_3
P_8	$P(x, y)$	P_4
P_7	P_6	P_5

รูปที่ 4.7 ตำแหน่งจุดที่พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 4.7 จุดพิกเซล $P(x, y)$ มีจุดรอบข้าง 8 จุดซึ่งมีค่าเท่าไม่เท่ากับ 0 โดยเงื่อนไขสำหรับการลบพิกเซลนั้นคือ

$$(a) \quad 2 \leq N(P) \leq 6$$

$$(b) \quad P(x, y) = 1$$

$$(c) \quad P_2 \times P_4 \times P_6 = 0$$

$$(d) \quad P_4 \times P_6 \times P_8 = 0$$

โดย $N(P)$ คือผลรวมของค่าพิกเซลเพื่อให้แน่ใจว่ายังคงความเชื่อมต่อของ skeleton

$$N(P) = \sum_{i=1}^8 P_i \quad (4.11)$$

4.3.2 การสร้างจุดพอยต์คลาวด์โดยการประมาณค่าในช่วงเชิงฟังก์ชันเสมือนพหุนามกำลังสาม (cubic spline interpolation)

ภาพภาคตัดขวางที่สมบูรณ์ที่ประกอบไปด้วยพอยต์คลาวด์ (Point cloud) จำนวนมาก เพื่อสามารถนำไปสร้างภาพสามมิติที่มีความละเอียดสูงได้ หากพิจารณาจากโครงสร้างทั้ง 4 จุดที่ได้มาจากระบวนการประมวลผลจากวิธีการเงาจากรูปที่ 4.6 เราจะสามารถประมาณจุดที่เหลือได้จากจุดหลักเหล่านี้ โดยใช้วิธีการประมาณค่าในช่วง (interpolation) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การประมาณค่าในช่วงเชิงฟังก์ชันเสมือนพหุนามกำลังสาม (cubic spline interpolation) เนื่องจากเป็นการประมาณโพลีโนเมียลเพียงแค่ช่วงบนช่วง ไม่ใช่ทั้งโดเมน การประมาณจุดพอยต์คลาวด์จะประมาณโดยแบ่งทีละครึ่งส่วนของวัตถุ พิจารณา P_a, P_b และ P_d เป็นจุดหลักของส่วนซ้าย หากว่าฟังก์ชัน $S(x)$ เป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่องเป็นช่วงๆ (piecewise function)

ภาพภาคตัดขวางที่สมบูรณ์ที่ประกอบไปด้วยพอยต์คลาวด์ (Point cloud) จำนวนมาก เพื่อสามารถนำไปสร้างภาพสามมิติที่มีความละเอียดสูงได้ หากพิจารณาจากโครงสร้างทั้ง 4 จุด P_a, P_b, P_c และ P_d ที่ได้มาจากระบวนการประมวลผลจากวิธีการเงาจากรูปที่ 4.6 เราจะสามารถประมาณจุดที่เหลือได้จากจุดหลักเหล่านี้ โดยใช้วิธีการประมาณค่าในช่วง (interpolation) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การประมาณค่าในช่วงเชิงฟังก์ชันเสมือนพหุนามกำลังสาม (cubic spline interpolation) เนื่องจากเป็นการประมาณโพลีโนเมียลเพียงแค่ช่วงบนช่วงไม่ใช่ทั้งโดเมน การประมาณจุดพอยต์คลาวด์จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณโดยแบ่งทีละครึ่งส่วนของวัตถุ พิจารณา P_a, P_b และ P_d เป็นจุดหลักของส่วนซ้าย หากว่า ฟังก์ชัน $S(x)$ เป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่องเป็นช่วงๆ (piecewise function) [3]

$$S(x) \begin{cases} s_1(x) & \text{if } x_1 < x < x_2 \\ s_2(x) & \text{if } x_2 < x < x_3 \\ \vdots & \\ s_{n-1}(x) & \text{if } x_{n-1} < x < x_n \end{cases} \quad (4.12)$$

โดยที่ S_i คือฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสาม

$$s_i(x) = a_i(x-x_i)^3 + b_i(x-x_i)^2 + c_i(x-x_i) + d_i \quad (4.13)$$

ซึ่งอนุพันธ์อันดับ 1 และอนุพันธ์อันดับ 2 ของฟังก์ชัน S_i คือ

$$s'_i(x) = 3a_i(x-x_i)^2 + 2b_i(x-x_i) + c_i \quad (4.15)$$

$$s''_i(x) = 6a_i(x-x_i) + 2b_i \quad (4.16)$$

โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n-1$

และเนื่องจากฟังก์ชัน $S(x_i)$ จะประมาณค่าทุกจุดของของข้อมูลตั้งนั้น

$$S(x_i) = y_i \quad (4.17)$$

เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n-1$ โดยที่ $x_i \in [x_i, x_{i+1}]$, $S(x_i) = s_i(x_i)$ จากสมการที่ 4.13 จะได้

$$\begin{aligned} y_i &= s_i(x_i) \\ y_i &= a_i(x-x_i)^3 + b_i(x-x_i)^2 + c_i(x-x_i) + d_i \\ y_i &= d_i \end{aligned} \quad (4.18)$$

เนื่องจากเส้นโค้ง $S(x_i)$ นั้นจะต้องผ่านผ่านทุกจุดอย่างต่อเนื่องทั้งหมดในช่วง ดังนั้นในแต่ละฟังก์ชันย่อยก็ต้องเชื่อมอยู่กับจุดข้อมูลด้วย

$$s_i(x_i) = s_{i-1}(x_i) \quad (4.19)$$

สำหรับ $i = 2, 3, \dots, n-2$

จากสมการที่ 4.13

$$s_i(x_i) = d_i \text{ และ } s_{i-1}(x_i) = a_{i-1}(x-x_i)^3 + b_{i-1}(x-x_{i-1})^2 + c_{i-1}(x-x_{i-1}) + d_{i-1} \quad (4.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ $i = 2, 3, \dots, n-2$

เพื่อที่จะให้เส้นโค้งผ่านทั้งช่วง อนุพันธ์จะต้องมีค่าเท่ากับจุดข้อมูล ดังนั้น

$$s'_i(x_i) = s'_{i-1}(x_i) \quad (4.21)$$

จากสมการที่ 4.14 จะได้ว่า

$$s'_i(x) = c_i \quad \text{และ} \quad s'_{i-1}(x) = 3a_{i-1}(x - x_{i-1})^2 + 2b_{i-1}(x - x_{i-1}) + c_{i-1}$$

ดังนั้น

$$c_i = 3a_{i-1}(x - x_{i-1})^2 + 2b_{i-1}(x - x_{i-1}) + c_{i-1} \quad (4.22)$$

สำหรับ $i = 2, 3, \dots, n-2$

จากสมการที่ 4.15 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} s''_i(x) &= 6a_i(x - x_i) + 2b_i \\ s''_i(x_i) &= 6a_i(x_i - x_i) + 2b_i \\ s''_i(x_i) &= 2b_i \end{aligned} \quad (4.23)$$

สำหรับ $i = 2, 3, \dots, n-2$

และเนื่องจาก $s''_i(x)$ จะต้องผ่านแต่ละช่วงอย่างต่อเนื่อง $s''_i(x) = s''_{i+1}(x)$ สำหรับ $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$ จากเงื่อนไขและสมการที่ 4.23 จะได้ว่า

$$s''_i(x_{i+1}) = 6a_i(x_{i+1} - x_i) + 2b_i \quad (4.24)$$

$$s''_{i+1}(x_{i+1}) = 6a_{i+1}(x_{i+1} - x_i) + 2b_{i+1} \quad (4.25)$$

และกำหนดให้ $h = x_{i+1} - x$ ดังนั้นจากสมการที่ 4.23 และ 4.25 จะได้ว่า

$$2b_{i+1} = 6a_i h + 2b_i \quad (4.26)$$

เพื่อทำให้สามารถพิจารณาได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจากสมการที่ 4.23 จะสามารถกำหนดให้ $s''_i = M_i$ ได้

$$\begin{aligned} s''_i(x_i) &= 2b_i \\ M_i &= 2b_i \\ b_i &= \frac{M_i}{2} \end{aligned} \quad (4.27)$$

นอกจากนี้ d_i สามารถพิจารณาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d_i = y_i \quad (4.28)$$

เช่นเดียวกันกับการใช้สมการ a_i จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} 2b_{i+1} &= 6a_i h + 2b_i \\ 6a_i h &= 2b_{i+1} - 2b_i \\ a_i &= \frac{2b_{i+1} - 2b_i}{6h} \\ a_i &= \frac{2\left(\frac{M_{i+1}}{2}\right) - 2\left(\frac{M_i}{2}\right)}{6h} \\ a_i &= \frac{M_{i+1} - M_i}{6h} \end{aligned} \quad (4.29)$$

ส่วน c_i จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} d_{i+1} &= a_i h^3 + b_i h^2 + c_i h + d_i \\ c_i h &= -a_i h^3 - b_i h^2 - d_i + d_{i+1} \\ c_i &= \frac{-a_i h^3 - b_i h^2 - d_i + d_{i+1}}{h} \\ c_i &= \frac{-a_i h^3 - b_i h^2}{h} + \frac{-d_i + d_{i+1}}{h} \\ c_i &= (-a_i h^2 - b_i h) - \frac{d_i - d_{i+1}}{h} \\ c_i &= -\left(\frac{M_{i+1} - M_i}{6h} h^2 + \frac{M_i}{2} h\right) - \frac{y_i - y_{i+1}}{h} \\ c_i &= \frac{y_{i+1} - y_i}{h} - \left(\frac{M_{i+1} - M_i}{6} h + \frac{3M_i}{6} h\right) \\ c_i &= \frac{y_{i+1} - y_i}{h} - \left(\frac{M_{i+1} - M_i + 3M_i}{6}\right) h \\ c_i &= \frac{y_{i+1} - y_i}{h} - \left(\frac{M_{i+1} + 2M_i}{6}\right) h \end{aligned} \quad (4.30)$$

สรุปแล้วจะได้สมการสำหรับหาสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{M_{i+1} - M_i}{6h} \\ b_i &= \frac{M_i}{2} \\ c_i &= \frac{y_{i+1} - y_i}{h} - \left(\frac{M_{i+1} + 2M_i}{6}\right) h \\ d_i &= y_i \end{aligned} \quad (4.31)$$

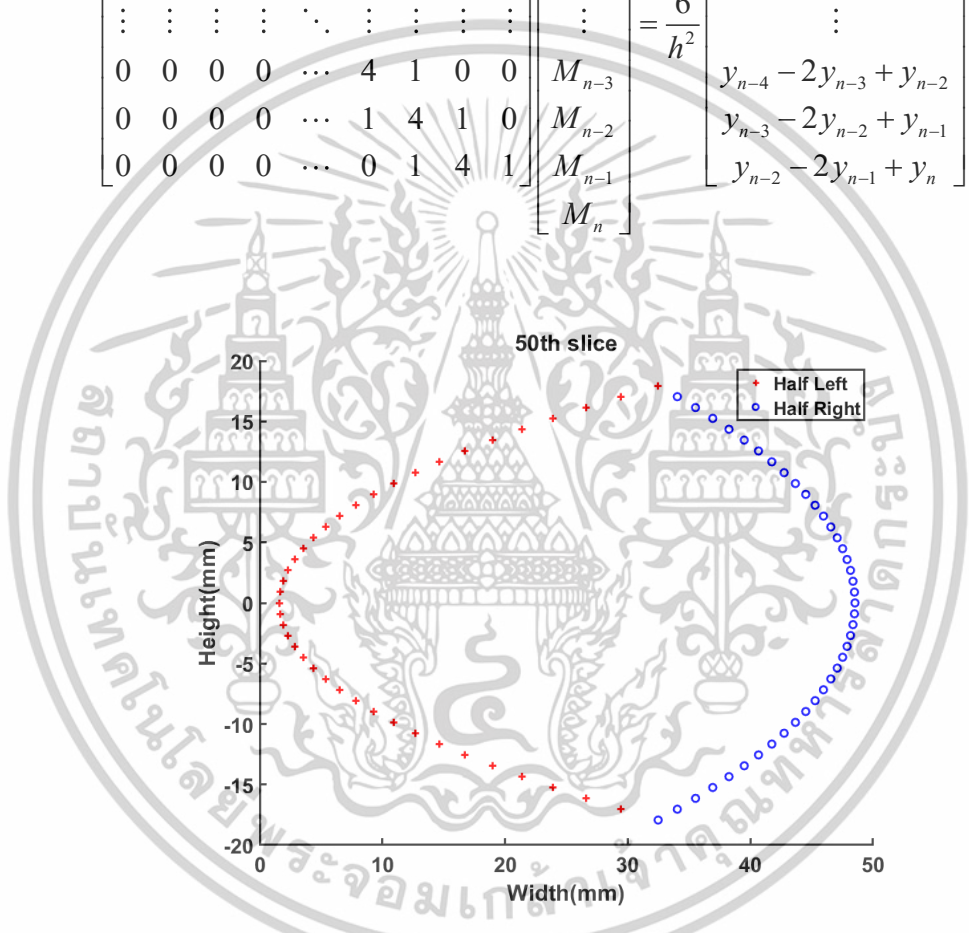
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$$c_{i+1} = 3a_i h^2 + 2b_i h + c_i \tag{4.32}$$

จากทั้งหมดนี้เราสามารถจัดให้อยู่ในระบบเมทริกซ์ได้โดยแทนค่าสมการที่ 4.31 ในสมการที่ 4.32

$$\begin{bmatrix}
 1 & 4 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 4 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 4 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 4 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 4 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 4 & 1 \\
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 M_1 \\
 M_2 \\
 M_3 \\
 M_4 \\
 \vdots \\
 M_{n-3} \\
 M_{n-2} \\
 M_{n-1} \\
 M_n
 \end{bmatrix}
 = \frac{6}{h^2}
 \begin{bmatrix}
 y_1 - 2y_2 + y_3 \\
 y_2 - 2y_3 + y_4 \\
 y_3 - 2y_4 + y_5 \\
 \vdots \\
 y_{n-4} - 2y_{n-3} + y_{n-2} \\
 y_{n-3} - 2y_{n-2} + y_{n-1} \\
 y_{n-2} - 2y_{n-1} + y_n
 \end{bmatrix}
 \tag{4.33}$$



รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางสมบูรณจากจุกอยัดคัลลาวัตที่สร้างจากการประมาณโดยวิธีการพหุนามกำลังสาม โดยสีแดงแสดงถึงส่วนซ้ายที่ประมาณจากจุด P_a, P_b และ P_d ส่วนสีน้ำเงินเป็นส่วนขวาที่ประมาณจากจุด P_b, P_c และ P_d

4.4 การประมาณค่าปริมาตรจากการสร้างภาพสามมิติจากภาพตัดขวาง

การสร้างภาพสามมิติจากการประกอบภาพตัดขวางที่นำมาต่อกันนั้นเป็นหนึ่งในวิธีการสร้าง

ภาพสามมิติที่ใช้กันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในทางการแพทย์ ซึ่งภาพตัดขวางที่ได้จะได้อาจมาจากข้อมูลเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโครงสร้างภายในโดยตรง จากการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอำนาจทะลุวงได้ เช่น ใช้รังสีเอกซ์ (X-Ray) หรือ การสแกนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Resonance Imaging: MRI) โดยเมื่อนำภาพตัดขวางมารวมกันจะทำให้ได้ภาพ 3 มิติที่สมบูรณ์ที่ไม่เพียงแค่มียข้อมูลที่เป็นเพียงคุณลักษณะภายนอกแต่มีรายละเอียดต่างๆของคุณลักษณะภายในด้วย อีกทั้งยังสามารถคำนวณหาปริมาตรได้ง่ายจากผลรวมของพื้นที่ของแต่ละภาคตัดขวาง ตามสมการที่ 4.34

$$V = \sum_{i=1}^n A(x_i) \Delta x \quad (4.34)$$

โดยที่ Δx คือระยะห่างระหว่างภาพตัดขวาง $A(x_i)$ คือพื้นที่ของภาพตัดขวางซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัลกอริทึมต่างๆ เช่น วิธีการสามเหลี่ยม [47] วิธีการนंबरกริด[48] วิธีการมอนเตแครโล [49] ทฤษฎีบทของกรีนหรือวิธีการแบบ Shoelace [50] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการแบบ Shoelace เนื่องจากรู้จุดพิกัดที่นำมาใช้คำนวณแน่นอนและเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน การหาพื้นที่ปิดของโพลีกอนที่มีจำนวนจุดยอด n ในระนาบยูคลิดจะหาได้จาก

$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} + x_n y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i + x_1 y_n \right| \quad (4.35)$$

โดยที่ A คือขนาดพื้นที่ของโพลีกอน และ x, y คือจุดยอดโดยเรียงลำดับแบบหมุนทวนเข็มนาฬิกาตามลำดับ

4.5 สรุป

วิธีการสร้างภาพสามมิติจากเงาที่ถอดลงมา เป็นวิธีการสร้างภาพสามมิติที่อาศัยการเกิดเรขาคณิตจากเงาที่ทอดลงมาจากวัตถุเมื่อมีการฉายแสง ซึ่งมีความเรียบง่าย มีความซับซ้อนน้อย สามารถลดข้อจำกัดของระบบแอคทีฟได้และพาสซีฟได้ เช่น ไม่ต้องทำการสอบเทียบกล้องหรือโปรเจคเตอร์ เนื่องจากความสูงของวัตถุสัมพันธ์กับความยาวของเงาซึ่งเป็นการวัดบนระนาบจึงสามารถใช้การแปลงแบบโฮโมกราฟฟีที่เป็นการแปลงเชิงระนาบได้ แต่ยังจำเป็นต้องอาศัยการสอบเทียบหาแหล่งกำเนิดแสงโดยได้กล่าวถึงไว้ในบทนี้ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้การประมาณค่าในช่วงเชิงฟังก์ชันเสมือนพหุนามกำลังสาม นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการสร้างภาพสามมิติจากภาพตัดขวางรวมถึงการคำนวณหาปริมาตร

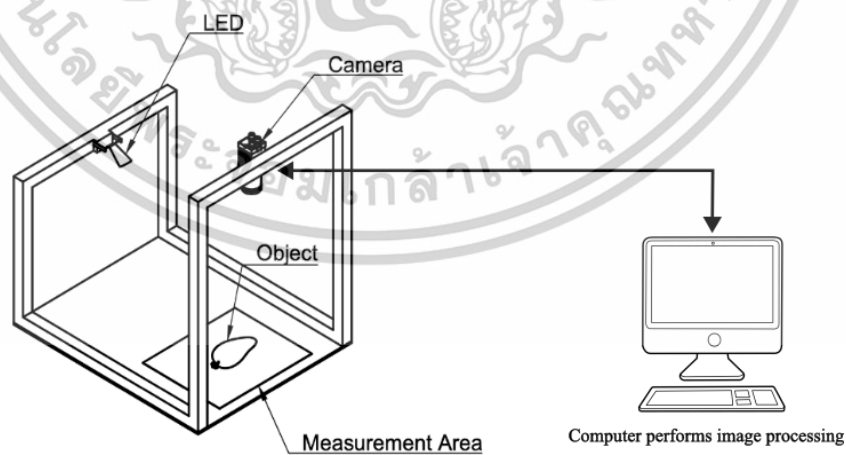
บทที่ 5

การประยุกต์นำวิธีการสร้างภาพสามมิติจากเงาไปใช้ ในงานวัดปริมาตร

การวัดปริมาตรด้วยวิธีการแมชชีนวิชันนั้น หนึ่งในวิธีการที่เหมาะสมที่สุดคือวิธีการตรวจสอบแบบ 3 มิติเนื่องจากปริมาตรเป็นคุณสมบัติในระนาบ 3 มิติ ทำให้สามารถวัดได้แบบโดยตรง สำหรับการตรวจสอบแบบ 3 มิติจากเงาของวัตถุที่ทอดลงมา เป็นวิธีการสร้างภาพ 3 มิติที่มีความซับซ้อนน้อย ระบบประกอบด้วยเพียงแค่หลอดไฟ LED สีขาวฉายลงไปยังที่วัตถุหรือผลิตภัณฑ์ที่อยู่บนพื้นหรืออยู่บนสายพานลำเลียง โดยมีกล้องรับภาพทำการอ่านข้อมูลภาพเพื่อมาทำการวิเคราะห์แยกภาพวัตถุกับเงาตามวิธีการที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 4

5.1 ภาพรวมของระบบสร้างภาพสามมิติจากเงาที่ทอดลงมาจากรวัตถุ

จากรูปที่ 5.1 แสงจากหลอดไฟ LED แบบจุดเดี่ยวขนาด 12V 10W ฉายลงไปยังวัตถุที่อยู่บนพื้นหรือบนสายพานลำเลียง โดยทำมุมกับวัตถุให้เกิดเงาทอดลงมา ส่วนกล้องรับภาพจะติดตั้งในทิศทางตั้งฉากกับวัตถุ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้กล้องแบบ USB ความละเอียด 5 megapixels พร้อมเลนส์ 5-50mm (ELP-USB500W05G-MFV, China) โดยภาพที่ได้จะได้ภาพวัตถุพร้อมกับเงาดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 องค์ประกอบหลักของชุดสแกน 3 มิติโดยใช้วิธีการเงา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพ 2 มิติที่ได้จะถูกนำไปประมวลผลบนซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาในลักษณะเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อแสดงสร้างภาพ 3 มิติและแสดงค่าปริมาตรของวัตถุแบบเวลาจริง โดยการนำความยาวของเงาที่ทอดจากวัตถุคำนวณกลับไปเป็นความสูงของวัตถุ อาศัยทฤษฎีเกี่ยวกับการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพเพื่อแปลงภาพจากระนาบในหน่วยพิกเซลไปเป็นระนาบของพิกัดจริงในหน่วยของหน่วยวัดมาตรฐาน (Metric) โดยใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำหลักการของโฮโมกราฟฟิทรานส์ฟอร์ม ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 นอกจากนี้การประมาณหาความสูงโดยใช้หลักเรขาคณิตที่เกิดจากการเกิดเงาตามที่อธิบายไว้ในบทที่ 4 นั้นก็อาศัยหลักการทางเรขาคณิตด้วยเช่นกันพร้อมด้วยการประมาณค่าในช่วงเชิงฟังก์ชันเสมือนพหุนามกำลังสาม เพื่อสร้างภาพตัดขวาง ส่วนความยาวของวัตถุนั้นได้จากการเลื่อนขยับการประมวลผลในแนวแกน เมื่อนำภาพตัดขวางที่สร้างได้ในแต่ละแกน มารวมกันจะสามารถนำมาสร้างเป็นภาพ 3 มิติที่มีทั้งความกว้าง ยาว สูงได้ ซึ่งทำให้สามารถนำมาประมาณหาค่าปริมาตรได้ [54]



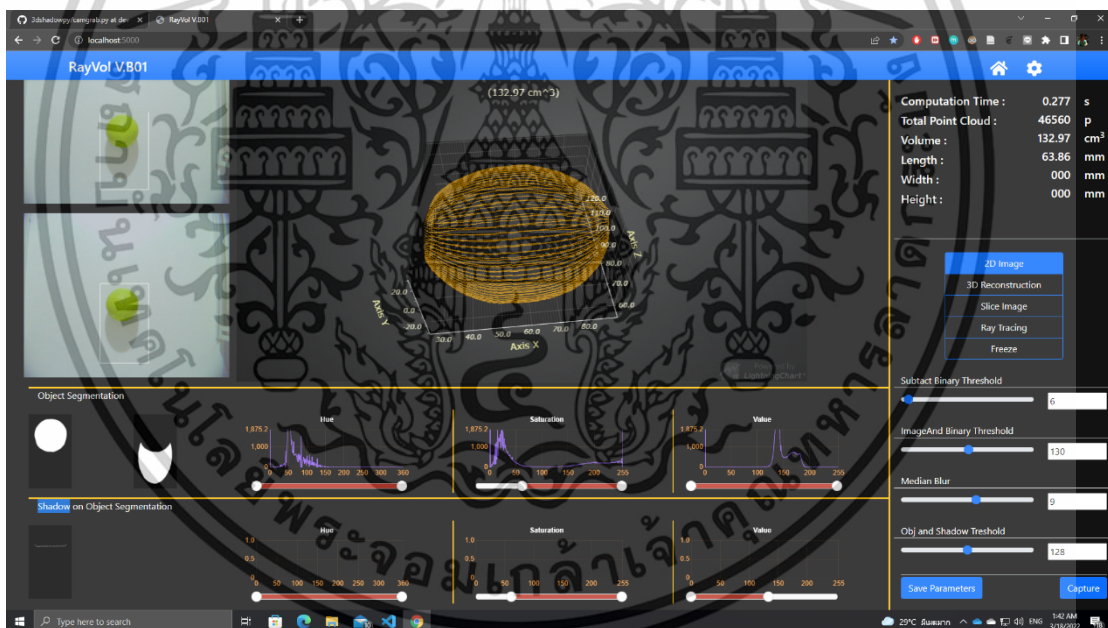
รูปที่ 5.2 ภาพของวัตถุและเงาที่ได้จากกล้อง

ในปัจจุบันอุปกรณ์ประเภทอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่ง (Internet of Things) หรือ IoT มีความนิยมสูง ทำให้แนวทางการพัฒนาซอฟต์แวร์อุปกรณ์ต่างๆอยู่บนพื้นฐานของเว็บแอปพลิเคชัน มีโครงสร้างการพัฒนาในลักษณะแบ่งเป็นส่วนระบบหลังบ้าน (backend) และระบบหน้าบ้าน (frontend) โดยมีชุดซอฟต์แวร์ไลบรารีสำเร็จรูป (software stack) แบบ opensource ให้เลือกนำมาใช้พัฒนาได้เป็นจำนวนมาก เช่น Microsoft .NET C# NodeJs หรือ Flask เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาใช้และลดระยะเวลาในการพัฒนาได้มาก ทำให้ผู้วิจัยสามารถมุ่งไปพัฒนาเฉพาะอัลกอริทึม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณความสูงจากเงาที่ทอดลงมาของวัตถุ การสร้างภาพตัดขวาง และการประมาณค่าปริมาตร นอกจากนี้ยังสามารถทำงานข้ามระบบปฏิบัติการได้ (cross platform) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาบนระบบปฏิบัติการ Ubuntu เวอร์ชัน 18.04.2 ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการแบบ opensource

5.2 แอปพลิเคชัน RayVol

จุดมุ่งหมายของแอปพลิเคชันคือประมวลผลภาพ 2 มิติในภาพเดียวโดยใช้วิธีการจากเงาที่ทอดลงของวัตถุเพื่อให้ได้ภาพสาม มิติและสามารถประมาณค่าปริมาตรในแบบเวลาจริง โดยมีหน้าต่างติดต่อผู้ใช้งานเพื่อแสดงค่าปริมาตร ผลลัพธ์ของภาพในขั้นตอนต่างๆที่ประมวลผล เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับขั้นตอนการประมวลผลได้ เช่นค่าเทรชโฮลด์ ค่าความสว่างของกล้อง ค่ารับแสงของกล้อง เป็นต้น เพื่อความง่ายในการใช้งาน

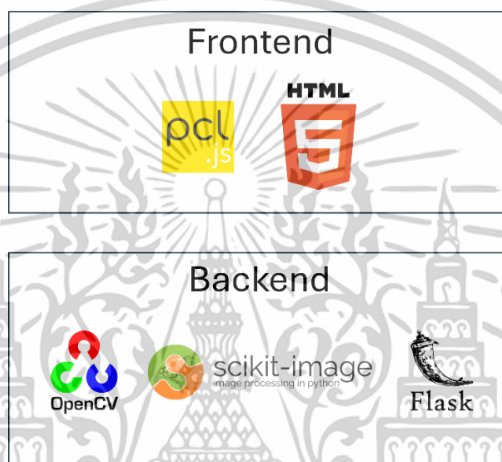


รูปที่ 5.3 ภาพหน้าต่างติดต่อผู้ใช้งานของแอปพลิเคชัน RayVol

โดยภาพรวมของโครงสร้างซอฟต์แวร์ (Software stack) ที่ใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันในงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.4 โดยแบ่งออกเป็นส่วนของหลังบ้าน (Backend) และส่วนของหน้าบ้าน (Frontend) โดยระบบหลังบ้านจะใช้แพลตฟอร์ม Flask เป็น web framework เนื่องจากใช้ภาษา Python ในการพัฒนา สามารถพัฒนาเข้ากันได้ง่ายกับไลบรารีประมวลผลภาพ OpenCV และ Scikit-image ที่เป็นไลบรารีสำหรับการประมวลผลภาพ โดยใช้ภาษา Python ในการพัฒนาได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

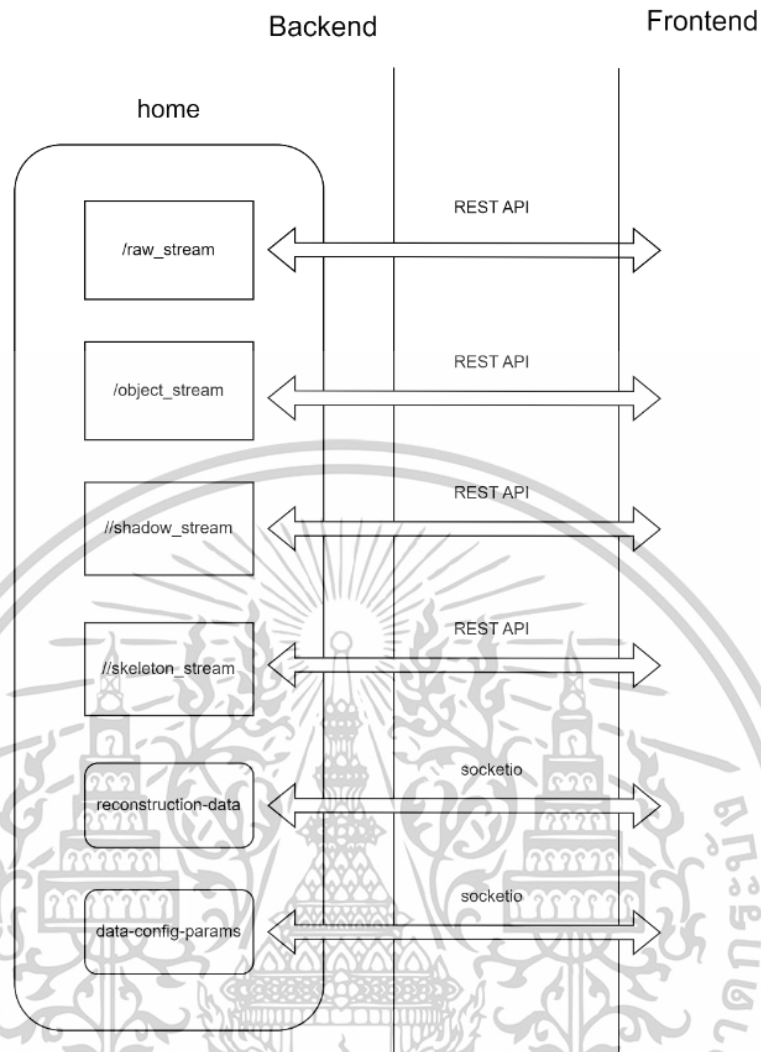
เช่นเดียวกัน ระบบหลังบ้านนี้มีหน้าที่หลักในการประมวลผลภาพ คำนวณหาความสูงของวัตถุโดยใช้วิธีการเงาที่ทอดของวัตถุ คำนวณเพื่อสร้างภาพตัดขวาง คำนวณหาปริมาตร และจัดการควบคุมกล้อง โดยข้อมูลในส่วนของภาพจะถูกจัดการส่งผ่านไปยังหน้าบ้านผ่าน REST API ในรูปแบบของการเข้าข้อมูลภาพแบบ jpg สำหรับข้อมูลภาพ 3 มิติและข้อมูลของกล้องนั้นจะส่งผ่านโปรโตคอลแบบ socket.io ตามที่แสดงในรูปที่ 5.5

Application Tech Stack



รูปที่ 5.4 โครงสร้างรายละเอียดของระบบ

สำหรับระบบหน้าบ้านนั้นใช้ `html5` ซึ่งเป็นภาษามาตรฐานสำหรับพัฒนาหน้าเว็บไซต์และใช้ `bootstrap framework` เป็นหลัก ซึ่งเป็นเฟรมเวิร์คที่มีความนิยมสูง มีส่วนประกอบสวยงาม ใช้งานง่าย และใช้ `pcl.js` ซึ่งเป็นไลบรารีสำหรับแสดงภาพพอยต์คลาวด์สำหรับบนเว็บไซต์ โดยระบบหน้าบ้านนี้มีหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน แสดงภาพจากกล้อง แสดงภาพ 3 มิติที่ถูกสร้างขึ้น เป็นต้น



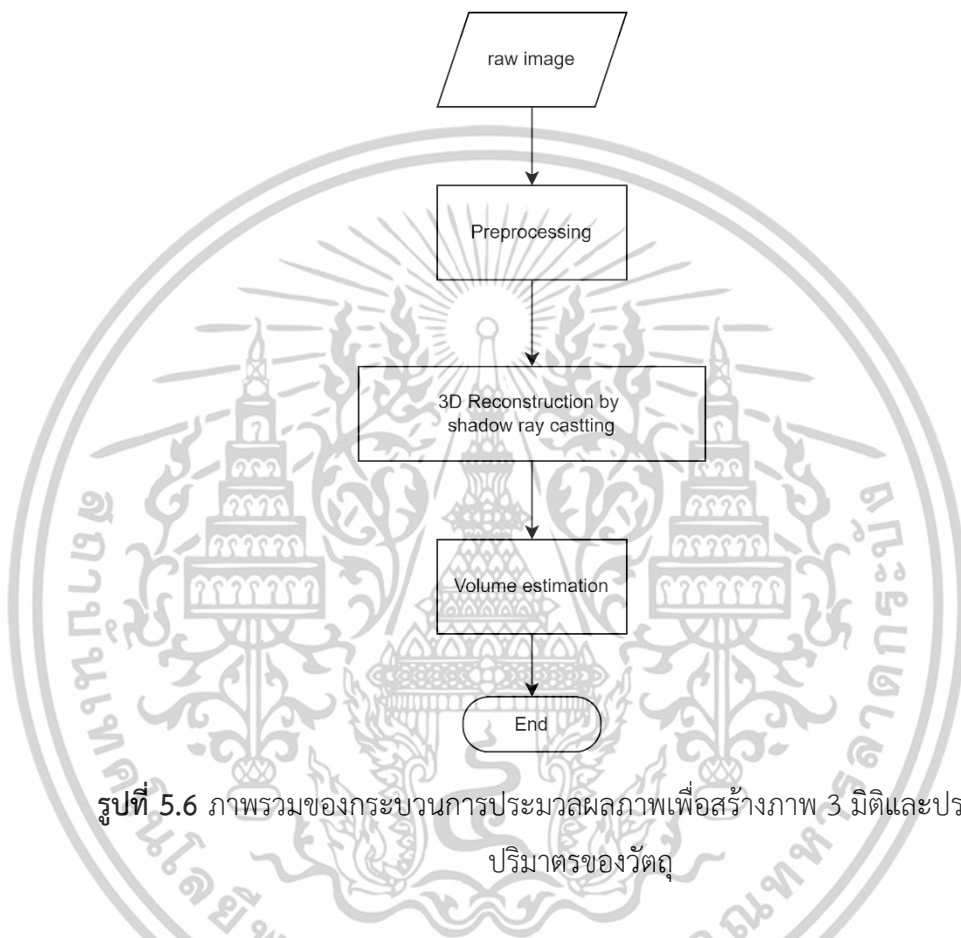
รูปที่ 5.5 รายละเอียดของการจัดการข้อมูลระหว่างระหว่างหลังบ้านและหน้าบ้าน

5.3 การประมวลผลเพื่อสร้างภาพ 3 มิติและประมาณค่าปริมาตรของวัตถุ

การประมวลผลภาพเพื่อสร้างภาพ 3 มิติจากภาพ 2 มิติโดยใช้เงาทอดจากวัตถุนั้น การประมวลผลจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักด้วยกัน คือ การประมวลผลภาพเบื้องต้น (Preprocessing) การประมวลผลเพื่อสร้างภาพ 3 มิติ และการประมาณค่าปริมาตรของวัตถุ การประมวลผลภาพเบื้องต้นนั้นเป็นขั้นตอนแรกสุดโดยมีภาพขาเข้าเป็นภาพ 2 มิติของวัตถุพร้อมด้วยเงาแสดงในรูปที่ 5.2 จากนั้นจะทำประมวลผลเพื่อแยกวัตถุและเงาออกจากภาพพื้นหลังและแยกบริเวณที่สนใจ (ROI) จากนั้นจึงแยกภาพวัตถุกับเงาออกจากกัน เพื่อนำไปประมวลผลหาพิกัดของขอบวัตถุเพื่อนำไปใช้เป็นจุดหลักตามในรูปที่ 4.6 และพิกัดขอบของเงาเพื่อนำไปคำนวณหาความสูงตามวิธีการคำนวณหาความ

สูงของวัตถุจากเงาจากวิธีการที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 การประมวลผลภาพเบื้องต้นนี้จะใช้ไลบรารีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

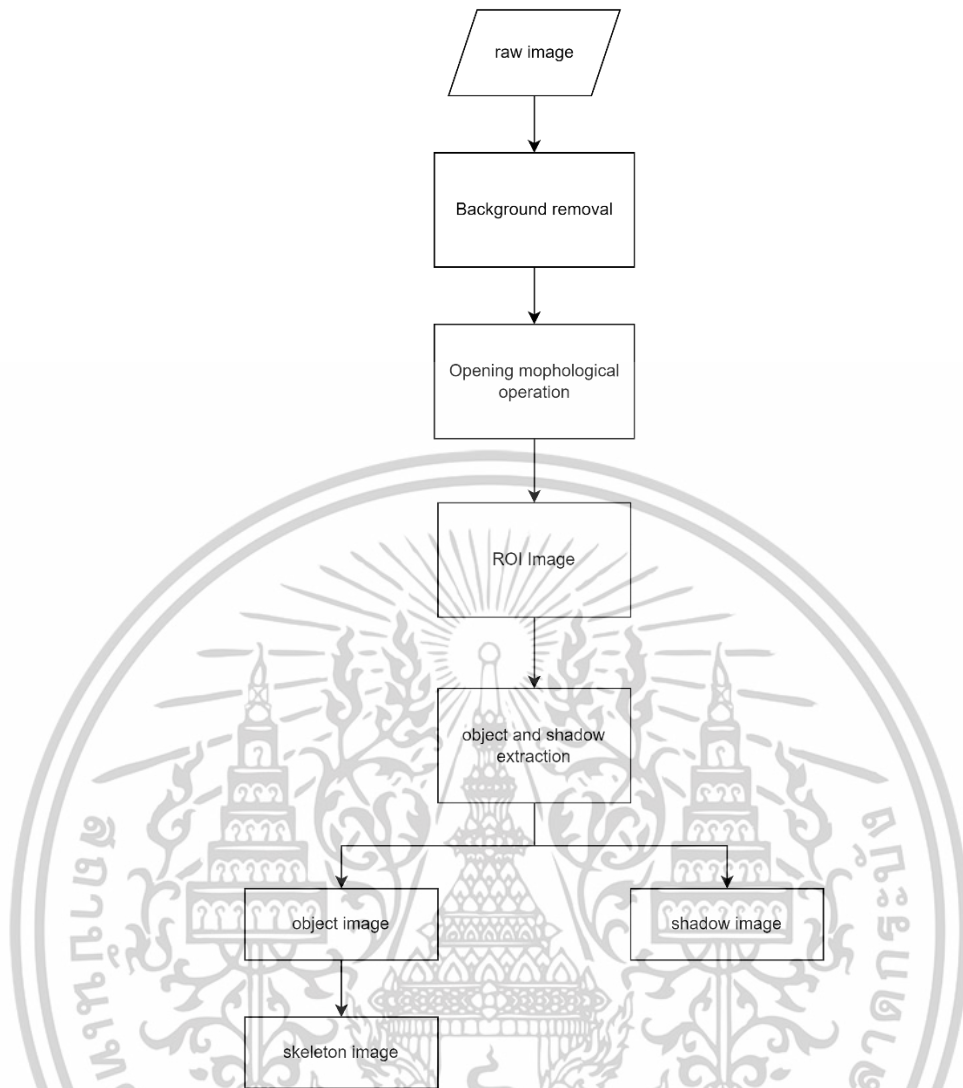
โอเพ่นซอร์ส OpenCV ช่วยในการดำเนินการพื้นฐาน เช่น การขจัดเซยภาพ การลบภาพพื้นหลัง การเทรซโฮลต์ หรือการดำเนินการทางคณิตศาสตร์เป็นต้น เมื่อได้พิกัดขอบของวัตถุและความสูงแล้วจึงเข้าสู่กระบวนการสร้างภาพตัดขวาง การสร้างพอยต์คลาว การสร้างภาพ 3 มิติจากภาพตัดขวาง และคำนวณหาค่าปริมาตร โดยภาพรวมของการประมวลผลทั้งหมดนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ภาพรวมของกระบวนการประมวลผลภาพเพื่อสร้างภาพ 3 มิติและประมาณค่าปริมาตรของวัตถุ

5.3.1 การประมวลผลภาพเบื้องต้น (Preprocessing)

รูปที่ 5.7 แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพเบื้องต้น โดยเป็นการนำภาพขาเข้าที่เป็นภาพสี 2 มิติดังแสดงในรูปที่ 5.2 มาประมวลผลเพื่อให้ได้ภาพที่เหมาะสมเพื่อเตรียมนำไปใช้ประมวลผลสำหรับสร้างภาพสามมิติจากเงา



รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการประมวลผลภาพเบื้องต้น

โดยการลบภาพพื้นหลังเป็นขั้นตอนแรกสุดของการประมวลผลเบื้องต้นเพื่อให้ได้เฉพาะภาพวัตถุและเงาเท่านั้น โดยการนำค่าความเข้ม $I(x, y)$ แต่ละของพิกเซลของภาพล่าสุด (current frame) ที่ได้มาลบกับค่าความเข้ม $B(x, y)$ ของภาพพื้นหลังอ้างอิง (background reference) โดยสามารถเรียกใช้ฟังก์ชันใน Opencv ที่ชื่อว่า `cv2.absdiff` ได้ โดยค่าความต่างสัมบูรณ์สามารถหาได้จากสมการที่ 5.1

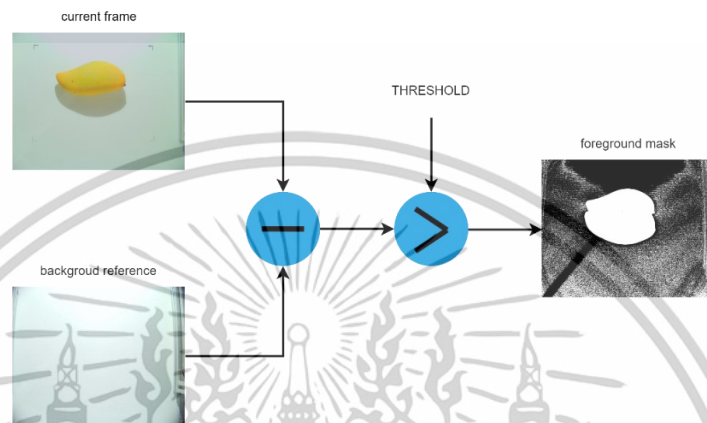
$$D(x, y) = |I(x, y) - B(x, y)| \quad (5.1)$$

ซึ่งภาพผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นภาพระดับเทา (gray scale) จึงต้องใช้กระบวนการเทรชโฮลด์ (Thresholding) ตามสมการที่ 5.2 เพื่อแปลงระดับเทาให้เป็นภาพแบบไบนารีเพื่อความสะดวกกับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปเข้าสู่กระบวนการดำเนินการแบบรูปร่างหรือรูปทรง (image morphological) โดยขั้นตอนการประมวลผลนั้นสามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.8

$$M(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } D(x, y) > \tau \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.2)$$



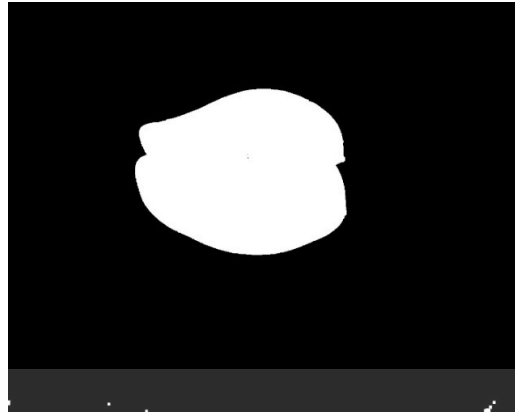
รูปที่ 5.8 การลบภาพพื้นหลังโดยใช้ภาพพื้นหลังอ้างอิง

เมื่อได้ภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการลบภาพพื้นหลังออกแล้ว จะเข้าสู่การดำเนินการแบบ Morphological นั้นเป็นการดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างหรือรูปทรงและจะดำเนินการกับรูปภาพแบบไบนารี กับองค์ประกอบโครงสร้าง (structure element) หรือเรียกได้อีกชื่อหนึ่ง คือ เคอร์เนล (kernel) ที่เป็นตัวกำหนดผลลัพธ์ การดำเนินการแบบ Morphological มีตัวดำเนินการพื้นฐานคือ การกัดเซาะ (Erosion) และการขยาย (Dilation) นอกจากนี้ยังมีตัวดำเนินการที่พัฒนาต่อยอดจากตัวพื้นฐานอีก เช่น การเปิด (opening) การปิด (closing) การไล่ระดับ (Gradient) และอื่นๆ

ตัวดำเนินการแบบเปิดเป็นตัวดำเนินการเป็นการนำเอาตัวดำเนินการกัดเซาะกับการขยายมาประยุกต์ใช้ โดยทำการกัดเซาะก่อนเพื่อลดหรือกำจัดพิกเซลสีขาวที่มีขนาดเล็กจากนั้นจึงทำการขยายเพื่อคืนขนาดของพิกเซลสีขาวของวัตถุที่มีขนาดใหญ่กลับมา สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ตามสมการที่ 5.1 โดยที่ I เป็นภาพอินพุต S คือเคอร์เนล \ominus การกัดเซาะ และ \oplus คือการขยาย โดยในงานวิจัยนี้ใช้เคอร์เนลขนาด 5×5

$$I \circ S = (I \ominus S) \oplus S \quad (5.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 ภาพผลลัพธ์ที่ได้หลังจากผ่านการดำเนินการแบบเปิด (Opening)

เนื่องจากภาพของวัตถุที่สนใจนั้นมีขนาดเล็กกว่าภาพทั้งหมด เพื่อลดการประมวลผลลงในส่วนที่พื้นหลังที่ไม่จำเป็น ทำให้ลดภาระในการคำนวณ จึงจำเป็นต้องตัดเลือกเฉพาะส่วนของวัตถุที่สนใจออกมา โดยการตีกรอบเฉพาะวัตถุที่สนใจ (ROI) จากภาพไบนารี $B(x, y) \in \{0, 1\}$ เมื่อกำหนดโดเมนของภาพเป็น $\Omega \subset \mathbb{Z}^2$ กระบวนการตรวจจับขอบจะระบุบริเวณที่ต่อเนื่องกัน $R_i \subset \Omega$

$$\bigcup_i R_i = \{(x, y) \in \Omega \mid B(x, y) = 1\} \quad (5.4)$$

โดยที่เส้นขอบแต่ละเส้นของ C_i คือขอบเขตของ ∂C_i ของบริเวณ R_i และเมื่อได้เส้นขอบแล้วจะสามารถกำหนดกรอบสี่เหลี่ยมล้อมรอบได้โดย

$$\begin{aligned} (x_{\min}, y_{\min}) &= \min_{(x, y) \in C_i} (x, y) \\ (x_{\max}, y_{\max}) &= \max_{(x, y) \in C_i} (x, y) \end{aligned} \quad (5.5)$$

ดังนั้นกรอบ ROI ที่ได้คือ

$$R_i = \{(x, y) \in \Omega \mid x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y \leq y_{\max}\} \quad (5.6)$$

นอกจากนี้เพื่อให้สะดวกสำหรับการนำไปประมวลผลขั้นถัดไปนั้น จะต้องคืนสีในส่วนของวัตถุและเงากลับไปลงยังภาพไบนารี ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้กลับไปเป็นภาพสีเหมือนเดิมแต่มีสีแค่เฉพาะวัตถุและเงาเท่านั้นโดยมีพื้นหลังเป็นสีดำล้วน โดยใช้กระบวนการพื้นฐานซึ่งก็คือการดำเนินการเชิงบูลีน (Bitwise Operations) แบบ AND ตามสมการที่ 5.6 โดยที่ $A(x, y)$ คือภาพสีขาเข้าตามรูปที่ 5.2 และ $B(x, y)$ คือภาพที่ได้จากกระบวนการดำเนินการแบบเปิดตามรูปที่ 5.8 โดยผลลัพธ์ที่ได้คือภาพที่ 5.9

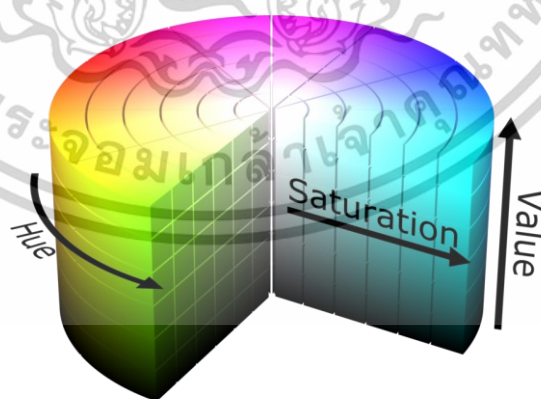
$$R(x, y) = A(x, y) \wedge B(x, y) \quad (5.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ภาพผลลัพธ์ที่ได้หลังจากผ่านการดำเนินการแบบบูลีน AND

สำหรับขั้นตอนถัดไปจะเป็นขั้นตอนสำหรับการแยกวัตถุกับเงาออกจากกัน โดยใช้กระบวนการเทรซโฮลด์ โดยใช้แบบจำลองสีแบบ HSV (Hue, Saturation, Value) ดังรูปที่ 5.11 โดยมีมิติของ Hue (H) คือแทนเฉดสีมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 360° ส่วนมิติของ Saturation (S) นั้นแทนความอิ่มตัวของสี และมิติของ Value (V) แทนความสว่างของสี ทำให้การประมวลผลแบบจำลองสีแบบ HSV แทนการประมวลผลแบบจำลองสีแบบ RGB นั้นสามารถทำได้ง่ายกว่าวัตถุกับเงาเนื่องจากเนื่องจากค่า Saturation (S) ของวัตถุมักจะสูงกว่าเงาอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถดูได้จากรูปที่ 5.12 ทำให้สามารถเขียนโปรแกรมให้ปรับค่าเทรซโฮลด์ตามสภาพแสงของของแต่ละภาพได้โดยอัตโนมัติ (Adaptive Threshold)



รูปที่ 5.11 แบบจำลองสีแบบ HSV

(ที่มา: wikipedia.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ $I_{HSV}(x,y) = (H(x,y), S(x,y), V(x,y))$ เป็นค่าของพิกเซลที่ตำแหน่ง (x,y) เมื่อแปลงจาก RGB เป็น HSV ดังนั้นการแยกวัตถุสามารถทำได้โดย

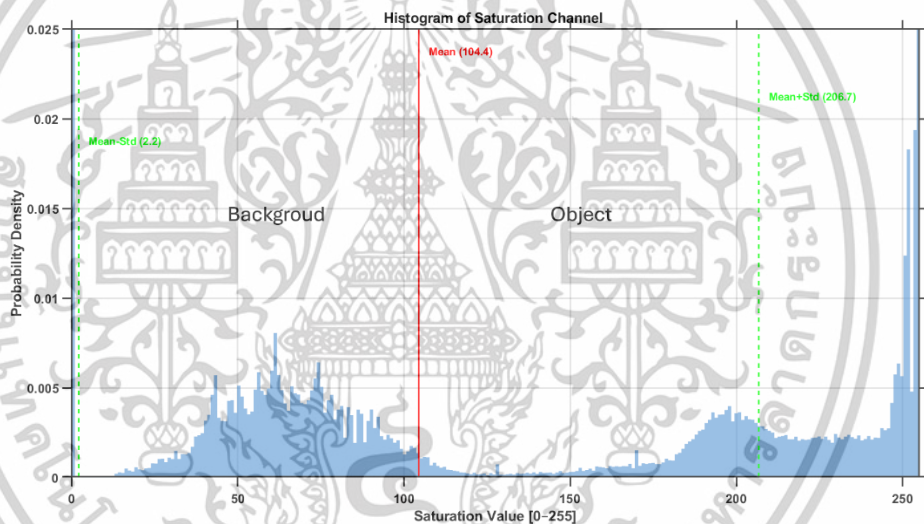
$$M(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } S(x,y) \geq \tau \\ 0, & \text{if } S(x,y) < \tau \end{cases} \quad (5.7)$$

โดยที่ τ คือค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) ซึ่งได้จากการคำนวณค่าเฉลี่ยของค่า Saturation ทั้งภาพ

$$\tau = \frac{1}{N} \sum_{(x,y) \in \Omega} S(x,y) \quad (5.8)$$

เมื่อ Ω คือ เซตของพิกเซลทั้งหมดในภาพ

$N = |\Omega|$ คือ จำนวนพิกเซลทั้งหมด



รูปที่ 5.12 แบบจำลองสีแบบ HSV



รูปที่ 5.13 ภาพของวัตถุที่แยกออกจากเงา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในส่วนของเงานั้นจะใช้การดำเนินการแบบบูลีนได้ โดยใช้ตัวดำเนินการแบบ XOR โดยให้ $A(x, y)$ คือภาพขาเข้าแบบรูปที่ 5.8 ส่วน $B(x, y)$ คือภาพวัตถุที่ถูกแยกออกจากเงาซึ่งก็คือรูปที่ 5.13 โดยภาพผลลัพธ์ที่ได้คือภาพเงาดังรูปที่ 5.13

$$R(x, y) = A(x, y) \wedge B(x, y) \quad (5.9)$$



รูปที่ 5.14 ภาพของเงาที่ถูกแยกออกมา

สำหรับขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการหาเส้นกึ่งกลางของวัตถุ (medial) ซึ่งเอาไว้ใช้เป็นตัวแทนของส่วนสูงของวัตถุ โดยใช้วิธีการลดรูปในภาพให้เหลือเส้นบางที่สุดที่ยังคงโครงสร้างทางเรขาคณิตของวัตถุเดิมไว้ได้ (skeleton) การทำงานจะเริ่มต้นโดยการกัดเซาะ (Erosion) ตามด้วยการขยาย (Dilation) แบบวนซ้ำ โดยใช้เคอร์เนลขนาด 1×3 สามารถแสดงขั้นตอนการทำงานได้ตามอัลกอริทึมที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 5.15

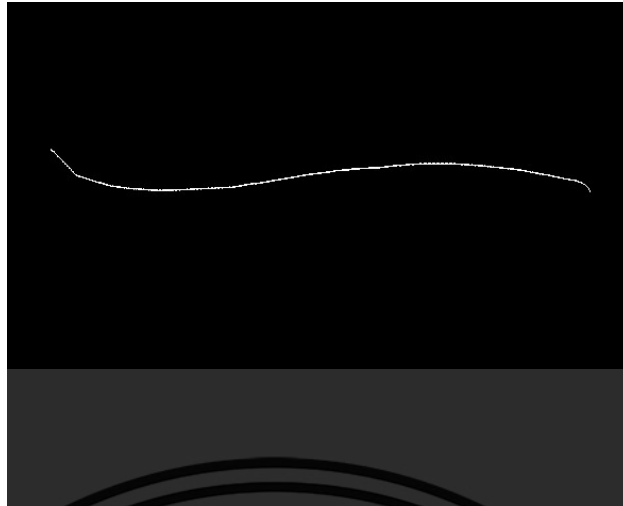
Algorithm 1 Morphological Skeletonization of a Binary Image

Require: I : Binary image, SE : Structuring element

Ensure: S : Skeletonized image

- 1: $S \leftarrow 0$ ▷ Initialize skeleton image
 - 2: $I_{curr} \leftarrow I$
 - 3: **while** $\text{countNonZero}(I_{curr}) > 0$ **do**
 - 4: $E \leftarrow \text{Erode}(I_{curr}, SE)$
 - 5: $D \leftarrow \text{Dilate}(E, SE)$
 - 6: $T \leftarrow I_{curr} - D$
 - 7: $S \leftarrow S \cup T$ ▷ Accumulate skeleton layers
 - 8: $I_{curr} \leftarrow E$
 - 9: **end while**
 - 10: **return** S
-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 ภาพเส้นกึ่งกลางของวัตถุจากรูปที่ 5.13

5.3.2 การสร้างภาพสามมิติด้วยวิธีการจากเงาของวัตถุ

เมื่อได้ภาพวัตถุ ภาพเงา และภาพเส้นกึ่งกลางของวัตถุจากระบวนการที่ 5.3.1 การสร้างภาพสามมิติเริ่มโดยการสร้างภาพภาคตัดขวาง รูปที่ 5.16 แสดงแผนผังกระบวนการจุดหลักสำหรับสร้างภาพภาคตัดขวาง เริ่มต้นด้วยการค้นหาขอบของวัตถุในภาพวัตถุในพิกัดระนาบของภาพ (Image coordinate) ด้วยการสแกนแต่ละคอลัมน์ตามแนวแกน x เพื่อหาขอบโดยให้ขอบบนของวัตถุเป็นจุดด้านซ้ายที่เป็นจุด P_a ของภาคตัดขวางตามรูปที่ 4.6 แล้วทำการแปลงไปเป็นระนาบพิกัดจริง (Real world coordinate) เฉพาะ x, y โดยให้ $z=0$ แล้วทำการเก็บไว้ในตัวแปร `ptCloudSectionLeft` จากนั้นทำการสแกนภาพของเส้นกึ่งกลางวัตถุต่อโดยเริ่มจากตำแหน่ง y ในระนาบพิกัดภาพล่าสุดที่ได้จากการหาขอบบน โดยที่ตำแหน่งเส้นกึ่งกลางนี้ก็คือจุด P_b ของภาคตัดขวางตามรูปที่ 4.6 จะถูกแปลงจากระนาบพิกัดภาพไปเป็นระนาบพิกัดจริงเฉพาะ x, y แล้วเก็บไว้ในตัวแปร `ptCloudObjHeightUpper` โดยที่ z จะถูกคำนวณที่หลังจากหลักการเรขาคณิตของเงาตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 สำหรับขอบล่างของวัตถุที่เป็นจุด P_c ของภาคตัดขวางตามรูปที่ 4.6 นั้นเมื่อทำการแปลงไปเป็นพิกัดจริงจะถูกเก็บไว้ในตัวแปร `ptCloudSectionRight`

สำหรับการคำนวณหาความยาวของเงาที่เป็นความยาวระหว่างจุดกึ่งกลางของวัตถุซึ่งในที่นี้คือภาพเส้นแกนกลางกับจุดที่ขอบของเงาที่ถ่ายทอดออกซึ่งก็คือขอบล่างสุดของภาพเงานั้นสามารถหาได้โดยใช้เส้นรังสีตามสมการที่ 5.10

$$R = o + s\hat{d} \quad (5.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ o คือจุดเริ่มต้น (origin)

\hat{d} คือเวกเตอร์ทิศทาง (direction vector)

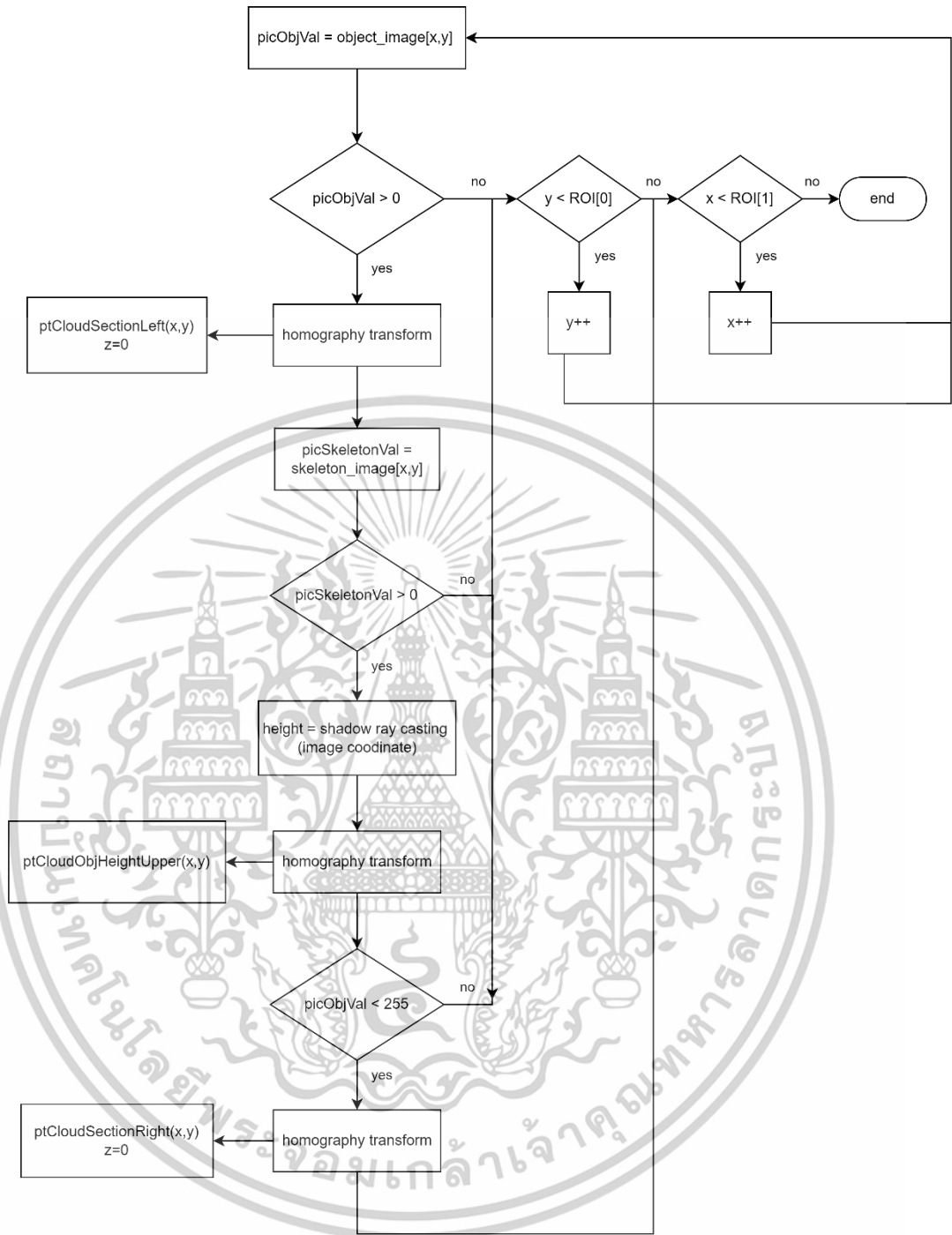
s คือสเกลาร์ระยะทาง

ดังนั้นต้องหาเวกเตอร์ทิศทางก่อนซึ่งหาได้จากเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่เกิดจากการถ่ายมาจากแหล่งกำเนิดแสงในราบ (x, y) โดยหาได้จากสมการที่ 5.11

$$\hat{d}(x, y) = \left(\frac{x-u}{\sqrt{(x-u)^2}}, \frac{y-v}{\sqrt{(x-v)^2}} \right) \quad (5.11)$$

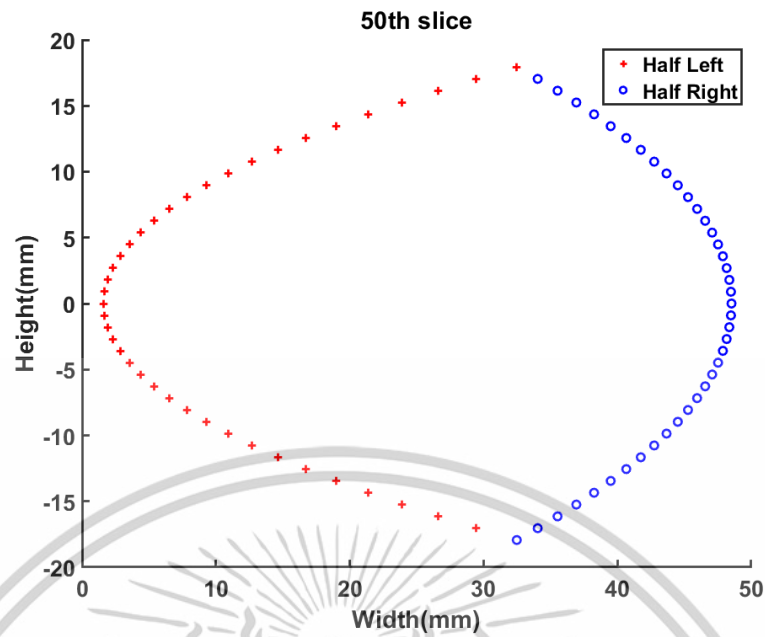
โดยที่ (x, y) คือจุดกึ่งกลางของเส้นแกนกลางวัตถุ และ (u, v) คือจุดกำเนิดแหล่งกำเนิดแสง

จากนั้นให้ทำการเพิ่มค่า s จนกระทั่งเจอขอบล่างของภาพเงาโดยค่าความสูงจะถูกคำนวณจากสมการที่ 4.2 ซึ่งต้องการมุม θ_a จะหาได้จากสมการที่ 4.1 ในส่วนของ $\cos \theta_a$ โดยที่ w ในสมการคือสเกลาร์ s ที่ได้จากกระบวนการนี้ และเมื่อได้ค่า h แล้วจึงนำกลับเข้าไปแทนค่าในตัวแปร `ptCloudObjHeightUpper` โดยที่ $z = z/2$ และให้ตัวแปร `ptCloudObjHeightLower` มีค่าเท่ากับ `ptCloudObjHeightUpper` แต่ให้ $z = -z$ เมื่อได้จุดหลักทั้ง 4 จุดครบจะสามารถสร้างจุดพอยคลาวด์ที่เหลือได้โดยใช้การประมาณค่าในช่วงเชิงฟังก์ชันเสมือนพหุนามกำลังสาม ภาพภาคตัดขวางที่สมบูรณ์สามารถได้ตามรูปที่ 5.17 และเมื่อนำภาพภาคตัดขวางมาต่อกันจะทำให้ได้ภาพสามมิติที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 5.18 โดยในระหว่างนำภาพภาคตัดขวางมาต่อกันเป็นภาพสามมิตินั้นก็ทำการคำนวณหาปริมาตรได้จากสมการที่ 4.34

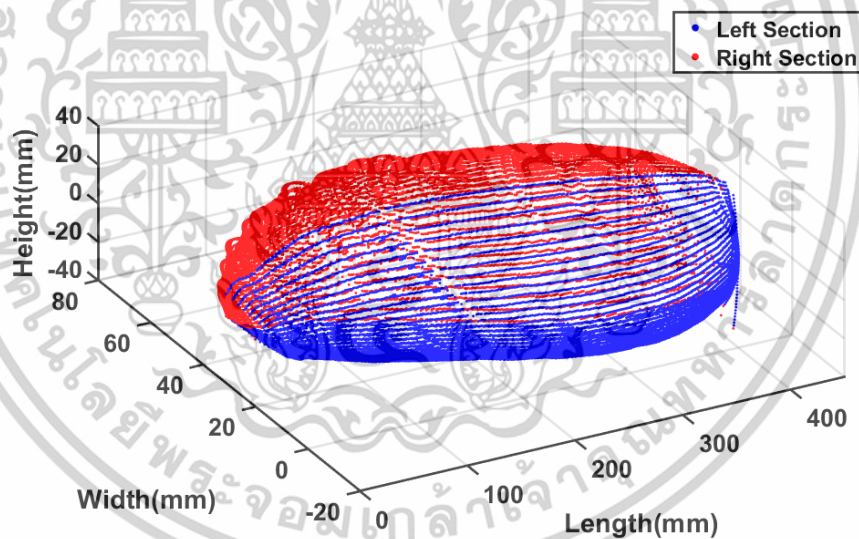


รูปที่ 5.16 แผนผังขั้นตอนการประมวลผลการสร้างภาพสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 ภาพภาคตัดขวางที่สร้างขึ้น



รูปที่ 5.18 ภาพตัวอย่างสามมิติที่สร้างขึ้น

5.4 การทดลองประมาณค่าปริมาตรของวัตถุสมมาตรแบบสมบูรณ์

สำหรับการทดลองนี้จะใช้ลูกบอลทรงกลมซึ่งเป็นวัตถุสมมาตรแบบสมบูรณ์ (Perfect symmetry shape) ลูกบอลโลหะทรงกลมสี่เหลี่ยมจำนวนทั้งหมด 3 ลูกที่มีขนาดแตกต่างกันตามรูปที่ 5.19 เพื่อทดสอบหาค่าความเที่ยงตรงหรือการทำซ้ำ (Precision) และค่าความแม่นยำ (Accuracy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปริมาตรของลูกบอลโลหะสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการพื้นฐานที่ 5.11 ลูกบอลขนาดแตกต่างกันสามลูก โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ (TOTAL รุ่น TMT321501) มีความละเอียด 0.01mm และมีช่วงการวัดสูงสุดที่ 0-150mm ทำการวัดขนาดเพื่อหาค่ารัศมี r โดยลูกบอลทั้ง 3 ลูกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้เฉลี่ยคือ 38.10mm 49.91mm และ 79.91mm โดยค่าปริมาตรอ้างอิงที่ได้จากลูกบอลทั้งสามขนาดเรียงตามลำดับจากขนาดเล็กไปหาขนาดใหญ่คือ 28.96cm³ 65.25cm³ และ 266.70cm³

$$v = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (5.11)$$

ลูกบอลแต่ละลูกถูกทดลองวัดจากระบบ RayVol ที่พัฒนาขึ้นโดยทำการวัดทั้งหมด 30 ครั้ง ที่ตำแหน่งเดียวกัน ค่าการทำซ้ำจะประเมินจากค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Coefficient of Variation: CV) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 5.12

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad (5.12)$$

รูปที่ 5.19 ลูกบอลโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.10mm 49.91mm และ 79.91mm

ตาราง 5.1 ผลการประมาณค่าปริมาตรของลูกบอลทั้ง 3 ขนาด จำนวน 50 ตัวอย่าง (หน่วย cm³)

No	38mm	50mm	80mm
1	25.69	59.35	244.36
2	25.75	58.99	236.61
3	25.93	58.96	240.32
4	25.64	59.15	233.28
5	25.77	59.12	228.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6	26.01	58.80	245.33
7	25.64	59.26	228.3
8	25.90	59.07	239.51
9	25.74	59.14	237.59
10	25.94	59.07	214.00
11	25.53	58.89	225.82
12	25.52	59.23	215.28
13	25.08	59.11	217.74
14	25.08	58.77	228.99
15	25.55	59.28	241.42
16	25.12	59.31	241.05
17	25.87	58.88	218.10
18	25.21	59.16	218.71
19	25.21	59.28	218.18
20	25.28	58.75	238.58
21	25.63	59.09	237.42
22	25.93	59.30	235.71
23	25.58	58.97	237.95
24	25.27	58.88	222.47
25	25.63	58.80	224.73
26	25.60	59.13	227.02
27	25.49	59.18	231.07
28	25.65	58.78	240.76
29	25.88	59.10	219.50
30	25.55	58.88	225.30
Mean (μ)	30.14	67.68	272.92
S.D. (σ)	0.27	0.43	3.33
CV (%)	0.88	0.65	1.09

จากผลการทดลองตามตารางที่ 5.1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวเท่ากับ 0.88% 0.65% และ 1.09% เรียงตามลำดับขนาดของลูกบอลโลหะ ส่วนการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

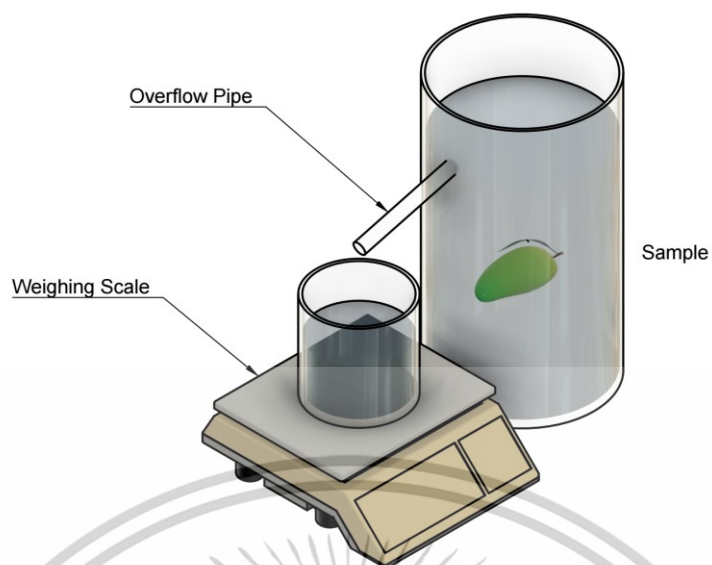
เชิงปริมาตรนั้นพบว่าค่าร้อยละความผิดพลาดเฉลี่ยของการวัดปริมาตรเมื่อเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 5.11 คือ 4.07% 3.72% และ 2.33% เรียงตามลำดับขนาดของลูกบอล

จากการทดลองโดยใช้ลูกบอลโลหะทรงกลมทั้ง 3 ขนาด ที่พิจารณาได้ว่าเป็นวัตถุรูปทรงแบบสมมาตรสมบูรณ์ ที่มีความกว้าง ความยาว และความสูงสมมาตรเท่ากัน โดยใช้ระบบ RayVol ที่พัฒนาขึ้นพบว่ามีความเที่ยงตรงประมาณ 1% ส่วนค่าร้อยละความผิดพลาดอยู่ที่ประมาณไม่เกิน 5% จะเห็นได้ว่าความถูกต้องของการวัดอยู่ที่ระดับต่ำแต่จะสูงมากขึ้นหากวัตถุมีขนาดใหญ่มากขึ้น เนื่องจากวิธีการวัดนี้ใช้หลักการเรขาคณิตจากการเกิดเงาความสูงของแหล่งกำเนิดแสงมีผลต่อตำแหน่งของการเกิดเงาบนวัตถุ ซึ่งคำนวณความสูงจากตำแหน่งของภาพเส้นกึ่งกลางวัตถุจากรูปที่ 5.15 ดังนั้นหากตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงสูงและวัตถุที่ทำการวัดมีขนาดเล็กตำแหน่งของเงาอาจจะไม่ตกลงไม่ตรงกันกับตำแหน่งของเส้นกึ่งกลางวัตถุทำให้การคำนวณความสูงคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นควรต้องมีการปรับความสูงของแหล่งกำเนิดแสงให้เหมาะสมกับความสูงของชนิดวัตถุที่ทำการวัด

5.5 การทดลองประมาณค่าปริมาตรของวัตถุที่มีลักษณะเชิงสมมาตร

สำหรับการทดสอบกับจะใช้มะม่วงซึ่งพิจารณาได้ว่าเป็นวัตถุที่มีลักษณะไม่สมมาตร (Irregular shape) แต่สามารถประมาณได้ว่าเป็นสมมาตรซ้ายขวาหรือแบบสมมาตรรอบแกน [51-53] เพื่อประเมินความประสิทธิภาพของระบบ RayVol ที่พัฒนาขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบค่าที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นกับค่าจริงที่ได้จากการวัดด้วยวิธีแทนที่ด้วยน้ำ (Water Displacement Method: WDM) [54] ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.20 ประกอบไปด้วยถังน้ำสำหรับใส่ตัวอย่างโดยเติมน้ำให้ได้ระดับพอดีกับท่อน้ำล้น จากนั้นทำใส่ตัวอย่างลงไปโดยกดให้ให้ตัวอย่างจมลงไปในน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยปริมาตรของตัวอย่างจะล้นลงไปยังภาชนะรองรับที่มีตาชั่งวัดน้ำหนัก (Mettler-Toledo รุ่น ME3002) โดยมีความละเอียด 0.01g และมีพิกัดน้ำหนักสูงสุดที่ 3.2kg อยู่ด้านล่างถังรับน้ำเพื่อชั่งน้ำหนักน้ำที่ล้น จากนั้นนำน้ำหนักที่วัดได้คำนวณกลับเป็นปริมาตรจากความสัมพันธ์ $V = m / \rho$ โดยที่ $\rho \approx 1g/cm^3$ โดยที่แต่ละตัวอย่างจะถูกวัดจำนวน 3 ครั้งแล้วใช้ค่าเฉลี่ย จำนวนทั้งหมด 50 ตัวอย่างที่มีขนาดแตกต่างกัน จากนั้นมะม่วงทั้ง 50 ตัวอย่าง ถูกนำมาวัดด้วยวิธีการสร้างภาพสามมิติจากเงาที่ได้พัฒนาขึ้นซึ่งทำการวัดตัวอย่างละ 3 ครั้ง เช่นเดียวกัน โดยผลลัพธ์ที่ได้แสดงได้ในตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 วิธีการสำหรับการวัดปริมาตรด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ

ตาราง 5.2 ผลการประมาณการหาค่าปริมาตรของมะม่วงจำนวน 50 ตัวอย่าง

No	WDM (cm ³)	RayVol (cm ³)	Percentage Error (%)
1	543.57	526.20	3.18
2	493.76	499.00	1.07
3	606.69	636.80	4.97
4	368.58	380.59	3.28
5	531.33	582.30	9.59
6	572.92	585.58	2.21
7	445.67	504.78	13.27
8	605.13	613.71	1.42
9	447.11	502.01	12.2
10	409.19	447.22	9.31
11	506.37	519.57	2.62
12	599.22	612.03	2.14
13	474.16	493.53	4.09
14	483.39	417.16	13.68
15	675.80	661.93	2.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16	777.38	801.15	3.06
17	392.73	416.43	6.04
18	556.61	600.34	7.85
19	638.52	675.23	5.83
20	347.44	376.62	8.41
21	577.31	546.86	5.27
22	644.95	733.17	13.68
23	354.20	398.20	12.42
24	559.93	630.07	12.53
25	433.82	434.69	0.20
26	403.26	453.37	12.44
27	323.34	341.88	5.74
28	388.71	400.49	3.21
29	568.90	568.71	0.12
30	529.88	538.23	1.59
31	333.89	350.66	5.04
32	286.93	300.82	4.85
33	405.10	443.55	9.51
34	246.17	266.62	8.33
35	501.14	523.41	4.45
36	481.90	487.89	1.24
37	430.48	440.03	2.23
38	593.76	618.53	4.18
39	498.42	479.91	3.70
40	307.15	355.59	15.78
41	322.40	351.12	9.03
42	197.77	226.34	14.48
43	312.68	346.92	10.97
44	312.72	345.83	10.59
45	185.69	200.38	7.95
46	166.35	207.65	24.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

47	610.41	652.68	6.90
48	370.20	397.59	7.39
49	215.73	222.45	3.12
50	277.76	302.98	9.10
Maximum Error (%)			24.85
Minimum Error (%)			0.12
Average Error (%)			6.81
S.D.			4.99

ตาราง 5.3 Pair Samples T-Test

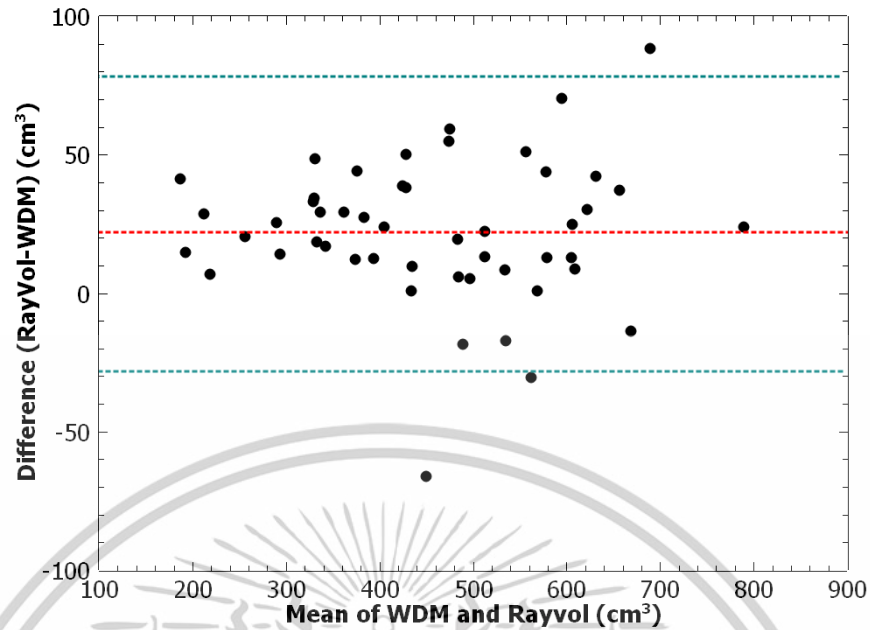
		t	df	p	Mean difference	SE difference
RayVol	WDM	6.09	49.0	<0.001	22.1	3.63

หมายเหตุ: $H_0: \mu_{RayVol} - \mu_{WDM} = 0$

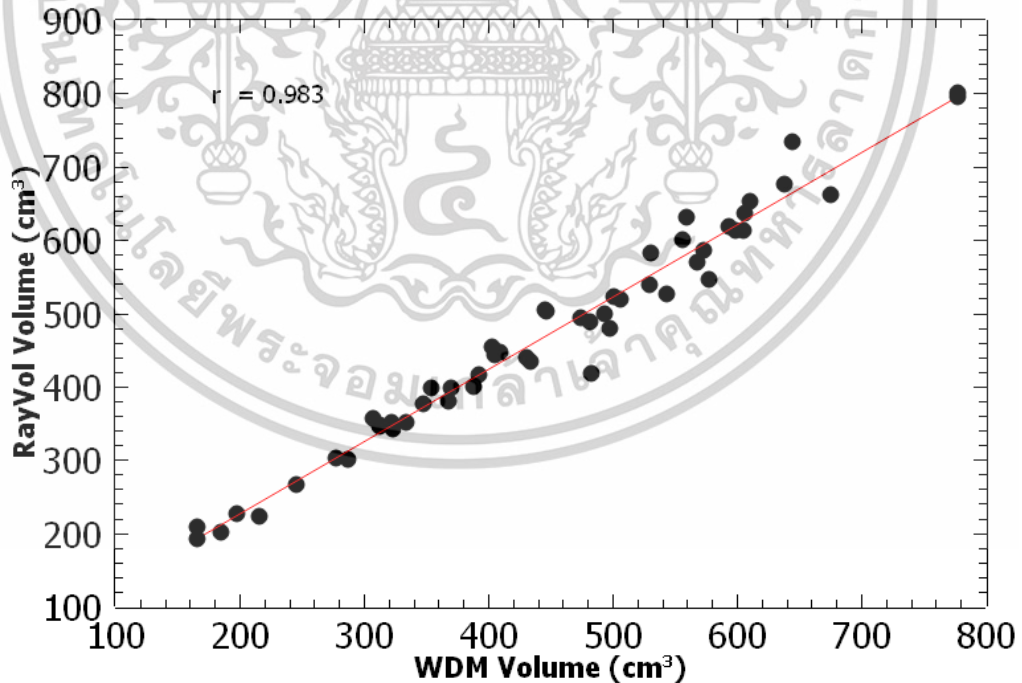
ตาราง 5.4 Bland-Altman Analysis

	Estimate	95% confidence Interval	
		Lower	Upper
Bias (n=50)	22.1	14.8	29.4
Lower limit of agreement	-28.2	-40.8	-15.7
Upper limit of agreement	72.5	59.9	85.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 ค่าความแตกต่างระหว่างค่าปริมาตรที่วัดด้วยวิธีแทนที่ด้วยน้ำ (WDM) และวิธีกาสร้างภาพสามมิติด้วยเงา โดยแกนตั้งแสดงค่าความแตกต่างส่วนเกินคือค่าเฉลี่ยของทั้งสองวิธี



รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรที่วัดได้จากการแทนที่ด้วยน้ำและปริมาตรที่วัดได้จากวิธีการสร้างภาพสามมิติจากเงา จากมะม่วง 50 ตัวอย่าง เส้นตรงแสดงการถดถอยเชิงเส้น โดยมีค่า $r = 0.983$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.22 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's correlation coefficient: r) มีค่าเท่ากับ 0.983 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ในระดับที่สูง แสดงให้เห็นถึงวิธีการที่พัฒนาขึ้นมีความสัมพันธ์เชิงแนวโน้มที่ดีกับวิธีการแทนที่ด้วยน้ำที่เป็นค่าอ้างอิง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าระบบมีความสัมพันธ์ที่ดี แต่การทดสอบแบบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย (Pair T-Test) จากตารางที่ 5.3 พบว่าค่าความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างค่าปริมาตรจาก RayVol กับ WDM เท่ากับ 22.14 cm^3 และค่า t ที่ได้เท่ากับ 6.09 โดยมีค่า $p < 0.001$ แสดงว่าค่าทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทำให้ค่าปริมาตรที่วัดได้จากระบบที่พัฒนาขึ้น RayVol มีแนวโน้มสูงกว่าค่าจริงเฉลี่ย 22.14 cm^3 โดยมี S.E. เท่ากับ 3.63 ซึ่งมีค่าอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งสะท้อนถึงอคติในเชิงระบบ (systematic bias)

นอกจากนี้ผลของการประเมินระดับความสอดคล้อง (agreement) ของทั้งสองวิธี โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Bland-Altman รูปที่ 5.22 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลของความต่างระหว่างการวัดจาก RayVol และการแทนที่ด้วยน้ำเกือบทั้งหมดตกอยู่ในช่วงขอบเขตความสอดคล้อง (Limits of Agreement) ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง -144.02 ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง -14.02 cm^3 ถึง 59.90 cm^3 บ่งชี้ว่าค่าที่วัดได้จาก RayVol อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในเชิงสถิติ อย่างไรก็ตามแนวโน้มของค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนไปทิศทางบวก บ่งชี้ว่าระบบมีแนวโน้มให้ค่าปริมาตรสูงกว่าวิธีการวัดแทนที่ด้วยน้ำ

และเมื่อทำการประเมินค่าความผิดพลาดเชิงสัมพัทธ์ (percentage error) พบว่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.12% ไปจนถึง 24.85% โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.81% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 5.03 แสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดบางอย่างที่ทำให้ค่าความผิดพลาดสูงกว่าค่าเฉลี่ยอย่างชัดเจน

จากผลการทดสอบโดยใช้มะม่วงเป็นตัวอย่างที่พิจารณาได้ว่าเป็นวัตถุที่มีลักษณะไม่สมมาตร จำนวน 50 ตัวอย่างที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยใช้ระบบ RayVol ที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถวัดค่าปริมาตรมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์เชิงสถิติแสดงให้เห็นว่าระบบยังมีอคติเชิงระบบ โดยให้ค่าปริมาตรสูงกว่าวิธีการวัดแบบ WDM เฉลี่ย 22.14 cm^3 ซึ่งสอดคล้องกับการประเมินค่าความผิดพลาดเชิงสัมพัทธ์ที่พบว่ามีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเชิงสัมพัทธ์เฉลี่ย 6.95% ซึ่งมีลักษณะผลลัพธ์สอดคล้องกับการทดลองที่ 5.4 ที่พบว่าลูกบอลโลหะขนาดเล็กกว่าให้ค่าปริมาตรสูงกว่าความเป็นจริง ส่วนลูกบอลขนาดใหญ่ค่าปริมาตรที่ได้ให้ค่าผิดพลาดน้อย

กว่า ซึ่งเกิดจากตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงมีความสูงมากเกินไปจนทำให้ตำแหน่งของเงาไม่ตกลงบนเส้นกึ่งกลางของมะม่วง ทำให้ความสูงที่คำนวณจากสมการที่ 4.2 ให้ผลลัพธ์สูงกว่าความเป็นจริง

นอกจากนี้ยังพบว่าระบบยังให้ค่าความผิดพลาดเชิงสัมพัทธ์สูงสุดที่ 24.85% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 5.03 โดยค่าที่ค่อนข้างสูงนี้เกิดจากคุณภาพของกล้องที่ใช้มีขนาดเซนเซอร์เล็ก แต่การประมวลผลภาพโดยวิธีที่นำเสนอนี้เป็นการวิเคราะห์ภาพภายใต้ภาวะแสงน้อย ทำให้การประมวลผลภาพที่ได้ผิดเพี้ยนจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการใช้ความไวของ ISO ที่ค่าสูง ทำให้ภาพวัตถุรวมถึงภาพเงามีขอบของภาพที่ผิดเพี้ยนส่งผลทำให้ขนาดของความกว้างผิดเพี้ยน ซึ่งรวมถึงไปถึงความยาวของวัตถุและความยาวของเงาด้วย ดังนั้นหากเปลี่ยนไปใช้กล้องที่มีขนาดเซนเซอร์ใหญ่กว่านี้ มีประสิทธิภาพในการรับแสงสูงกว่านี้ จะทำให้สามารถลดค่าความผิดพลาดเชิงสัมพัทธ์ลงได้

5.6 เวลาที่ใช้ในการประมวลผล

การทดลองทั้งหมดถูกประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยใช้หน่วยประมวลผล AMD Ryzen 7 5700 ความถี่นาฬิกา 3.8 GHz โปรแกรมหลังบ้านพัฒนาด้วยภาษาไพธอนส่วนโปรแกรมหน้าบ้านทำงานบน Google Chrome ทั้งหมดถูกทดสอบบนระบบปฏิบัติการ Ubuntu เวอร์ชัน 16.04 จากผลการทดลองพบว่าการประมวลผลอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.75 วินาที ของปริมาตรวัตถุตั้งแต่ 180 ถึง 480cm³ สามารถสร้างพอยคลาวด์ได้ประมาณ 28000-40000จุด ทำให้ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถประมาณค่าปริมาตรของวัตถุได้ประมาณ 1-3 ขึ้นต่อวินาที

จะเห็นได้ว่าเวลาในการประมวลผลจะขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ กล่าวคือปริมาณของพอยคลาวด์ที่สร้างขึ้น ขึ้นอยู่กับขนาดของภาพหรือความละเอียดของกล้อง หากต้องการลดระยะเวลาในการประมวล อาจพิจารณาลดความละเอียดภาพลง ซึ่งอาจส่งผลถึงความถูกต้องในการประมาณค่าปริมาตรได้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการประมาณปริมาตรด้วยภาพสามมิติจากเงาที่ทอดลงมาที่วัตถุเชิงสมมาตร เทคนิคการวัดนี้อาศัยการหาความยาวของเงาด้วยภาพบนระนาบ 2 มิติแล้วคำนวณกลับเป็นความสูง จึงใช้การแปลงโฮโมกราฟฟีเป็นเครื่องมือลดความยุ่งยากจากการสอบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์กล้องหรือโปรเจกเตอร์ อีกทั้งวิธีการนี้ยังเป็นการสร้างภาพสามมิติแบบประมวลผลภายในเฟรมเดียว ภาพสามมิติถูกสร้างขึ้นจากภาพภาคตัดขวางของวัตถุที่นำมาเรียงต่อกัน โดยภาพภาคตัดขวางถูกสร้างขึ้นจากการประมาณค่าพิกัดสามที่ประมาณจากจุดหลักที่สร้างขึ้นจากวิธีการหาขอบภาพและความยาวของเงาบนระนาบ 2 มิติ สุดท้ายปริมาตรถูกประมาณจากการรวมกันของภาพภาคตัดขวาง นอกจากนี้ยังแสดงการนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาค้นคว้าที่เป็นวัตถุที่พิจารณาได้ว่าเป็นวัตถุเชิงสมมาตร นอกจากนี้ยังเสนอหลักการของการสร้างภาพสามมิติด้วยเงาแล้วรายละเอียดการพัฒนาแอปพลิเคชันถูกนำเสนอขึ้นด้วย โดยวิธีการที่นำเสนอขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่าใช้อุปกรณ์พื้นฐาน ไม่ซับซ้อน ง่ายในการออกแบบและติดตั้ง และมีต้นทุนต่ำ นอกจากนี้วิธีการคำนวณต่างๆอยู่บนพื้นฐานการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนจึงไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยประมวลผลในระดับสูง

จากผลการทดสอบในการประมาณค่าปริมาตรจากระบบที่พัฒนาขึ้นพบว่าสามารถให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ มีความแม่นยำในการวัดปริมาตร มีความเร็วสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานคัดแยกขนาดได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ตรวจวัดพื้นที่หน้าตัดได้อีกด้วย และสามารถพัฒนาต่อยอดในระดับอุตสาหกรรมได้

6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

จากการวิจัยพบปัญหาเกี่ยวกับการประมวลผลขอบของเงา เนื่องจากความคมชัดของกล้องที่นำมาใช้ สามารถแก้ไขได้โดยใช้กล้องที่มีความคมชัดสูงในภาวะแสงน้อย นอกจากนี้ระดับความสูงของแหล่งกำเนิดแสงส่งผลถึงความถูกต้องในการวัด เนื่องจากขอบเงาที่ตกลงบนวัตถุไม่ตกลงตรงกลางวัตถุพอดีทำให้การคำนวณความสูงพลาดได้ วิธีการแก้ไขอาจจะต้องปรับแหล่งกำเนิดแสงให้พอเหมาะ กับช่วงขนาดของวัตถุที่ทำการวัด หรือพัฒนาปรับปรุงวิธีการตรวจจับเงาบนวัตถุแทนการใช้วิธีการหาภาพโครง (skeleton)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. R. Davies, "Computer and Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities," 4th ed., Academic Press, 2012.
- [2] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, "Digital Image Processing," 3rd ed., Prentice Hall, 2008.
- [3] R. Szeliski, "Computer Vision: Algorithms and Applications," Springer, 2010.
- [4] A. Teixeira, J. Silva, and L. Dias, "Non-destructive Quality Evaluation of Fruits by Computer Vision Systems," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 4, pp. 2291-2302, Oct. 2019.
- [5] G. Leemans and M. Destain, "On-line Fruit Grading According to Their External Quality Using Machine Vision," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 43, no. 2, pp. 237-241, Apr. 1996.
- [6] X. Blasco, M. Martinez, J. Herrero, and J. Sanchis, "Optimizing Non-Destructive Testing of Agricultural Products Using Soft Computing Techniques," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 13, no. 3, pp. 293-308, Jun. 2005.
- [7] C. S. Egan, D. P. Huynh, and J. D. Smith, "Dynamic Weighing: An Overview of Industrial Practices," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 4, pp. 947-956, Apr. 2009.
- [8] A. Tan, L. Wang, and Y. Chen, "Challenges in Dynamic Weighing Systems: Accuracy and Reliability," in Proc. 2018 IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, pp. 225-230.
- [9] A. Teixeira, J. Silva, and L. Dias, "Non-destructive Quality Evaluation of Fruits by Computer Vision Systems," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 4, pp. 2291-2302, Oct. 2019.
- [10] G. Leemans and M. Destain, "On-line Fruit Grading According to Their External Quality Using Machine Vision," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 43, no. 2, pp. 237-241, Apr. 1996.
- [11] B. Zhang, N. Guo, J. Huang, B. Gu, and J. Zhou, "Computer Vision Estimation of the Volume and Weight of Apples by Using 3D Reconstruction and Noncontact Measuring Methods," Journal of Sensors, pp. 1-12, Nov. 2020.
- [12] Anders, Andrzej, Dariusz Choszcz, Piotr Markowski, Adam Józef Lipiński, Zdzisław Kaliniewicz, and Elwira Ślesicka. "Numerical Modeling of the Shape of Agricultural

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Products on the Example of Cucumber Fruits,” *Sustainability* 11, no. 10: 2798, 2019.
- [13] V. Riffo and R. Hidalgo, “Active inspection of objects to detect possible damage and measure their volume using 3D reconstruction,” *Measurement*, vol. 199, p. 111541, Aug. 2022
- [14] Z. Cai, C. Jin, J. Xu, and T. Yang, “Measurement of Potato Volume with Laser Triangulation and Three-Dimensional Reconstruction,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 176565–176574, 2020
- [15] Q. Su, N. Kondo, M. Li, H. Sun, D. F. Al Riza, and H. Habaragamuwa, “Potato quality grading based on machine vision and 3D shape analysis,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 152, pp. 261–268, Sep. 2018.
- [16] Q. Su, N. Kondo, M. Li, H. Sun, and D. F. Al Riza, “Potato feature prediction based on machine vision and 3D model rebuilding,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 137, pp. 41–51, May 2017.
- [17] G. Vivek Venkatesh, S. Md. Iqbal, A. Gopal, and D. Ganesan, “Estimation of Volume and Mass of Axi-Symmetric Fruits Using Image Processing Technique,” *International Journal of Food Properties*, vol. 18, no. 3, pp. 608–626, Mar. 2015.
- [18] F. S. A. Sa’ad, M. F. Ibrahim, A. Y. Md. Shakaff, A. Zakaria, and M. Z. Abdullah, “Shape and weight grading of mangoes using visible imaging,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 115, pp. 51–56, Jul. 2015.
- [19] L. Wang, P. Shi, L. Chen, J. Gielis, and K. J. Niklas, “Evidence that Chinese white olive (*Canarium album* (Lour.) DC.) fruits are solids of revolution,” *Botany Letters*, pp. 1–7, Jul. 2023
- [20] L. Wang, P. Shi, L. Chen, J. Gielis, and K. J. Niklas, “Evidence that Chinese white olive (*Canarium album* (Lour.) DC.) fruits are solids of revolution,” *Botany Letters*, pp. 1–7, Jul. 2023
- [21] Soleimanipour, A., Chegini, G.R., 2019. “Three-dimensional reconstruction of cucumbers using a 2D computer vision system,” *Food Measure* 13, 2019, pp 571–578.
- [22] W. Spreer and J. Müller, “Estimating the mass of mango fruit (*Mangifera indica*, cv. Chok Anan) from its geometric dimensions by optical measurement,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 75, no. 1, pp. 125–131, Jan. 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] W. Aung, T. T. Thu, H. T. D. Aye, P. P. Htun, and N. Z. Aung, "Weight Estimation of Mango from Single Visible Fruit Surface using Computer Vision," in 2020 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), Sep. 2020, pp. 366–371.
- [24] J. Siswanto and E. Asmawati, "A new framework for measuring volume of axisymmetric food products using computer vision system based on cubic spline interpolation," in 2016 2nd International Conference on Science in Information Technology (ICSITech), Balikpapan, Indonesia, 2016, pp. 74-78.
- [25] H. M. Tran, K. T. Pham, T. M. Vo, T.-H. Le, T. T. M. Huynh, and S. V. T. Dao, "A New Approach for Estimation of Physical Properties of Irregular Shape Fruit," IEEE Access, vol. 11, pp. 46550–46560, 2023.
- [26] T. T. M. Huynh, L. TonThat, and S. V. T. Dao, "A vision-based method to estimate volume and mass of fruit/vegetable: Case study of sweet potato," International Journal of Food Properties, vol. 25, no. 1, pp. 717–732, Dec. 2022, doi: 10.1080/10942912.2022.2057528.
- [27] T. Mon and N. ZarAung, "Vision based volume estimation method for automatic mango grading system," Biosystems Engineering, vol. 198, pp. 338–349, Oct. 2020.
- [28] S. Uluisik, F. Yildiz, and A. T. Ozdemir, "Image processing based machine vision system for tomato volume estimation," in 2018 Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting (EBBT), Istanbul, Apr. 2018, pp. 1–4.
- [29] H. Yin, W. Yi, and D. Hu, "Computer vision and machine learning applied in the mushroom industry: A critical review," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 198, p. 107015, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.compag.2022.107015.
- [30] B. Li et al., "Defining strawberry shape uniformity using 3D imaging and genetic mapping," Horticulture Research, vol. 7, no. 1, p. 115, Dec. 2020.
- [31] S. Uluisik, F. Yildiz, and A. T. Ozdemir, "Image processing based machine vision system for tomato volume estimation," in 2018 Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting (EBBT), Istanbul, Apr. 2018, pp. 1–4.
- [32] M. Adjouadi and J.T. Tou, "Shadow Analysis in Scene Interpretation," Image Analysis. Proceedings of the 4th Scandinavian Conference, Trondheim, Norway, Vol. 2, June 17 - 20, 1985, pp 821 - 829.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [33] John R. Kender and Earl M. Smith, "Shape from darkness: deriving surface information from dynamic shadows," In Proceedings of the Fifth AAAI National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'86). AAAI Press, 1986, pp 664–667.
- [34] L. Cavanagh, Patrick Yvan G., "Shape From Shadows," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1989.
- [35] Toh Peng Seng, Goh Wee Leng, and Chan Kap Luk, "Shape reconstruction from shadow and shading," in Proceedings of IECON '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Maui, HI, USA, 1993, pp. 1639–1644.
- [36] Jason Geng. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics* 3, pp128-160, 2011.
- [37] Daniel Moreno and Gabriel Taubin. Simple Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration. Second International Conference on 3D Imaging, Modelling, Processing, Visualization & Transmission. 2012. Zurich. Switzerland..
- [38] Toh Peng Seng, Goh Wee Leng, and Chan Kap Luk, "Shape reconstruction from shadow and shading," in *Proceedings of IECON '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Maui, HI, USA, 1993, pp. 1639–1644.
- [39] Kender, John R. and Earl Smith. "Shape from Darkness: Deriving Surface Information from Dynamic Shadows." AAAI Conference on Artificial Intelligence (1986).
- [40] Raviv, Daniel et al. "Reconstruction of three-dimensional surfaces from two-dimensional binary images." *IEEE Trans. Robotics Autom.* 5 (1989): 701-710.
- [41] Ruo Zhang, Ping-Sing Tsai, J. E. Cryer, and M. Shah, "Shape-from-shading: a survey," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 21, no. 8, pp. 690–706, Aug. 1999, doi: 10.1109/34.784284.
- [42] Savarese, Silvio et al. "3D Reconstruction by Shadow Carving: Theory and Practical Evaluation." *International Journal of Computer Vision* 71 (2007): 305-336.
- [43] Y. Yamashita, F. Sakaue, and J. Sato, "Recovering 3D Shape and Light Source Positions from Non-planar Shadows," in 2010 20th International Conference on Pattern Recognition, Istanbul, Turkey: IEEE, Aug. 2010, pp. 1775–1778. doi: 10.1109/ICPR.2010.1153.

- [44] Nunak, Navaphattra and Taweepol Suesut. “Measuring Geometric Mean Diameter of fruits and vegetables using Light Sectioning Method.” *Songklanakarin Journal of Science and Technology* 31, 2009, pp 629-633.
- [45] S. Gulphanich, N. Nunak, and T. Suesut, “3D Inspection for HDD Production Process using Laser Light Sectioning,” in *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, Hong Kong, 2015.
- [46] T. Y. Zhang and C. Y. Suen. 1984. *A fast parallel algorithm for thinning digital patterns*. Commun. ACM 27, 3 (March 1984), 236–239. <https://doi.org/10.1145/357994.358023>
- [47] De Berg, Mark. *Computational geometry: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media, 2000.
- [48] Sunday, D. (2002). Fast Polygon Area and Newell Normal Computation. *Journal of Graphics Tools*, 7(2), 9–13.
- [49] Strawderman, Robert. (2001). *Monte Carlo Methods in Statistical Physics* by M. E. J. Newman; G. T. Barkema. *Journal of the American Statistical Association*. 96. 10.2307/2670314.
- [50] Marhaban, Mohammad Hamiruce & Mahmud, Rozi & Saripan, M Iqbal. (2013). *Cross-sectional area calculation for arbitrary shape in the image using star algorithm with Green's theorem*. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering. 8. 10.1002/tee.21886.
- [51] W. Spreer and J. Müller, “Estimating the mass of mango fruit (*Mangifera indica*, cv. Chok Anan) from its geometric dimensions by optical measurement,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 75, no. 1, pp. 125–131, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.compag.2010.10.007.
- [52] W. Aung, T. T. Thu, H. T. D. Aye, P. P. Htun, and N. Z. Aung, “Weight Estimation of Mango from Single Visible Fruit Surface using Computer Vision,” in 2020 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), Sep. 2020, pp. 366–371. doi: 10.23919/SICE48898.2020.9240422.
- [53] M. F. Ibrahim, F. S. Ahmad Sa’ad, A. Zakaria, and A. Y. Md Shakaff, “In-Line Sorting of Harumanis Mango Based on External Quality Using Visible Imaging,” *Sensors*, vol. 16, no. 11, Art. no. 11, Nov. 2016, doi: 10.3390/s16111753.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

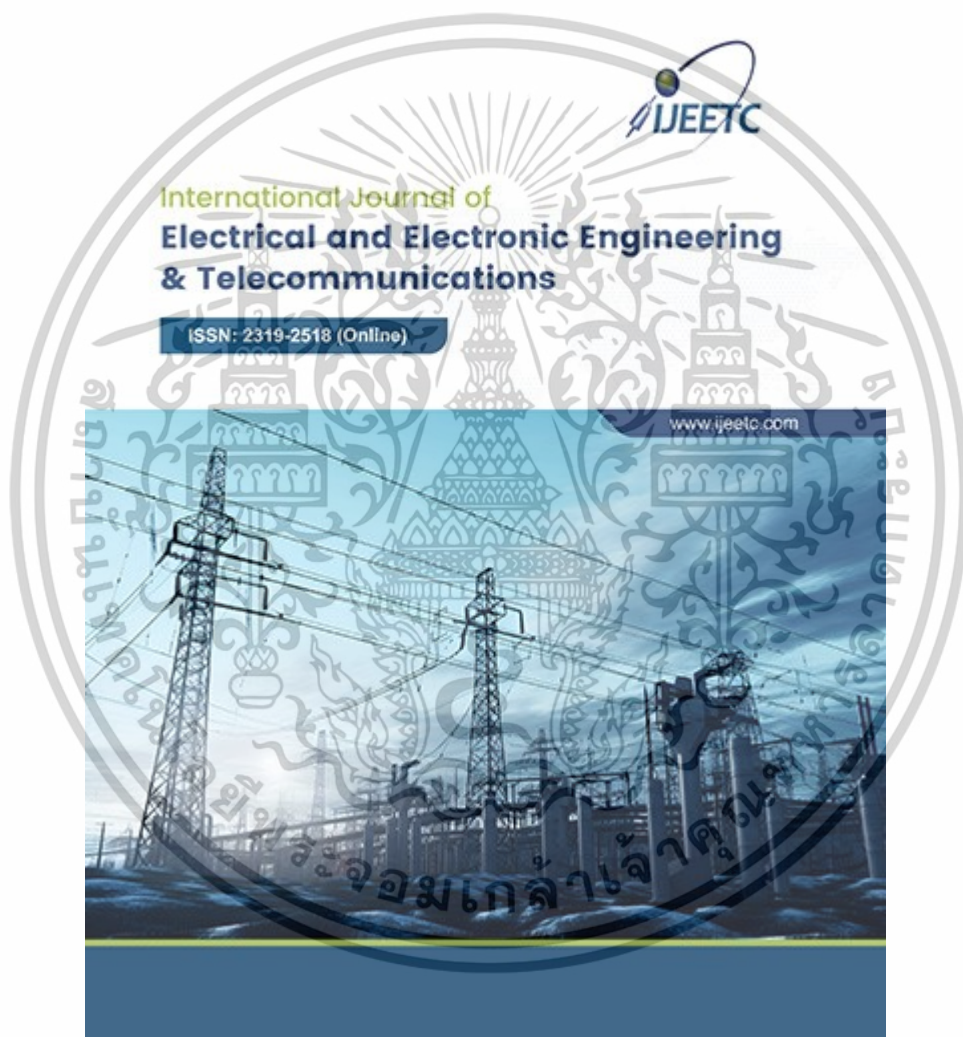
- [54] S. A. Rush, T. Maddox, A. T. Fisk, M. S. Woodrey, and R. J. Cooper, “A precise water displacement method for estimating egg volume,” *Journal of Field Ornithology*, vol. 80, no. 2, pp. 193–197, Jun. 2009, doi: 10.1111/j.1557-9263.2009.00222.x.
- [55] S. Sukprasertchai, T. Suesut, and N. Nunak, “A Fast and Simple Machine Vision Framework for Approximating the Volume of Axi-Symmetric Objects Using Shadow Ray Casting”.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Fast and Simple Machine Vision Framework for Approximating the Volume of Axi-Symmetric Objects Using Shadow Ray Casting

Siwakorn Sukprasertchai, Taweepol Suesut*, and Navaphattra Nunak

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
Email: siwakorn.su@ku.th (S.S.), taweepol.su@kmitl.ac.th (T.S.), navaphattra.nu@kmitl.ac.th (N.N.)

Abstract—The volume measurement using machine vision system is contactless techniques that play an important role in industries now a day. Basically, three-dimensional reconstruction is required to determine a depth using a special lighting system or multiple cameras. This increases the complexity of the measurement system. A fast and simple machine vision framework called RayVol for estimating the volume of axisymmetric objects in near real-time using a single camera and simple illumination is presented. The RayVol framework employs a shadow casting method to reconstruct the 3D shape of the object by tracing rays from the object's shadow pixels to the light source location. The result of this technique shows a significant accuracy improvement from the area-projection method. A virtual slice representing the cross-section of an object is reconstructed using a cubic spline approximation from baseline points derived from the boundary pixels of the object image and a shadow casting method. The volume estimation was calculated by restricted integration using the Riemann sum estimation algorithm, and the closed area of the virtual slices was calculated using the shoestring algorithm. Mangoes were used as a case study of the RayVol framework. The volume estimation provides the correlation coefficient of 0.9849 between the developed system and the water replacement method.

Index Terms—3D reconstruction, non-contact volume approximation, shadow casting

I. INTRODUCTION

Currently, the development of industrial production processes has been emphasized on both qualitative and quantitative aspects. Size inspection is an important process for various industries such as fruit and vegetable grading by evaluating volume, length, and weight. Completeness inspection, sizing and grading are considered important steps in production to produce products that meet the needs of customers. Today, inspection and classification using machine vision systems is widely used due to being able to work accurately and quickly, it is also a non-destructive and non-contact inspection. This greatly reduces cross-contamination into the product. Especially food and

agricultural products that need to be hygienic production process.

Physical attributes such as volume, mass, surface area, and geometric mean diameter (GMD) are commonly used for sorting, grading, packaging, pesticide applications, and more especially fresh fruits [1]. Among these attributes, mass and volume are the most frequently used for size classification. Sizing by weight is typically achieved by converting gravitational force from mechanical mechanisms to measurable data using a force transducer, such as a load cell, integrated with conveyor belts, and performed as in-motion or dynamic weighing. Such systems are capable of measuring weight at around a hundred per minute. However, due to the electro-mechanical structure of these systems, several factors such as vibration, dust, temperature fluctuations, electrical noise, and corrosion can affect their accuracy. Additionally, recalibration or zero resets are required after a certain period of usage to maintain precision [2].

Since mass and volume are related to density, it might be possible to determine the weight from volume by using a pre-determined density [3]. Volume is determined by the spatial size of an object in three dimensions, and estimating this requires three-dimensional information. One of the most straightforward, simple, and accurate methods of estimating volume is based on Archimedes' Principle, which determines the amount of fluid medium displaced by an object [4]. An alternative technique based on medium change is the use of an acoustic method, whereby a known-size closed chamber with a speaker is excited by an oscillating signal. The amplitude of sound generated from the speaker varies due to a change in the air volume inside the chamber [5–8]. However, such processes must be done with offline process, and manually taking a sample has led to a risk of damaging a sample. Furthermore, when dealing with in-line conveyor belts, the measuring time is a major key issue, making this method unsuitable for use in an in-line process.

An alternative approach is machine vision, a non-contact, rapid, and non-destructive measuring technique. In recent years, this approach has gained dominance in many agricultural processing systems [9]. As mentioned earlier, three-dimensional information is required to estimate the volume. Such a system is called a range imaging system or 3D scanner system.

Manuscript received September 13, 2023; revised October 29, 2023; accepted November 7, 2023.

*Corresponding author

doi: 10.18178/ijeetc.13.2.176-183

176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 3D scanner method requires an energy-emitting source as an additional component to project energy onto an inspected object. The most common implementations are based on time-of-flight (TOF) and triangulation principles; such systems have gained a lot of traction in recent decades. The simple active system is laser triangulation [10–13], a light source such as laser strip line is utilized, projecting onto an object, the reflected laser strip line is detected by a camera frame by frame, in sync with the conveyor belt position while it is still moving. During this process, an analysis of the distortions of the laser strip line is performed to obtain the depth information, and then 3D information of the object is reconstructed. This technique requires many frames to be fully completed in 3D reconstruction, which is time-consuming. The triangulation principle with a simultaneously reconstructed capability by using an RGB-D computer vision system to reconstruct the 3D shape for volume estimation was published by [14, 15]. They used PrimeSense Camine 1.09, an RGB-D commercial camera system (RGB-D stands for an RGB camera with a depth acquisition system) for an acquisition system. The projected light pattern is then distorted by the spatial object profile and detected by the camera. This system has the capability of simultaneously reconstructing 3D information in a single frame. A fully completed 3D model is used to estimate the volume by integrating pixel values along the length axis. Another technique has been simultaneous 3D reconstruction capability using the TOF principle [16], which has a more complex system compared to triangulation based. There are some publications that used TOF camera [1, 17], the Microsoft Kinect V2.0, a commercial low-cost RGB-D camera system. This TOF camera used a pulsed light method, simultaneously rebuilding the 3-D model which was analyzed and extracted. These publications have demonstrated that the active principle returns high accuracy with robustness and real-time capability.

From a deterministic point of view, rapid measuring with simple techniques while still being cost-effective is a challenging task. Since most fresh products presumably have axis-symmetric shapes and might be fitted to the common 3D mathematical shapes: ellipsoid, spheroid, paraboloid, and more. From this assumption, there are many techniques developed by researchers that are related by mathematical models and numerical analysis. There are many published [18–24], using only top view image which acquired from single 2D computer vision to extract maximum width and height of object to estimate whole volume from mathematic model. Some researchers used disk methods to improve the accuracy, by slicing the material as virtual slices. The object volume is estimated by the integration of the area of each slice, where area is computed from mathematical model or interpolation that derived from width and height from top-view image [25–28]. However, predictions based on 2D information lack actual surface depth distribution [29], and there are also some fresh products that have an irregular or imperfectly axisymmetric shape, which decreases accuracy. To account this issue, many

researchers proposed the multiple views method. The classification system for Harum Manis Mango by utilizing additional mirror is developed [3], both top-view and side-view images are used to estimate the volume by the disk method, enabling in-line processing ability. In [30] assumed that the tomato has an ellipsoid and axisymmetric shape, and the volume is computed using the disk method which modeled by conical frustum, their acquisition system consisted of 5 cameras. Also, in [31], a turntable was used to rotate the strawberry while capturing, a total of 50 captured images in different views are used to reconstruct the 3D shape. However, additional equipment caused even more system complexity, and increased computational time expenses.

In contrast to all the above schemes, we investigated the feasibility of retrieving 3D shapes from shadow, a concept that was introduced in the late 1980s [32–35]. These publications provide information for the reconstruction method and evaluate by measuring simple polygon objects. However, they have only focused on the validity and accuracy of shape recovery.

Our approach focuses on enhancing the speed and accuracy of volume estimation by utilizing simple 2D machine vision while maintaining feasibility within the in-line application process. We present an approach for volume estimation from a single top-view 2D image of the fruit with its shadow. In this research, we used the mango as the test material, which is considered an irregular or axisymmetric shape [3, 23, 24].

This paper is organized into several sections. Section II provides the design of the framework and the light source position calibration method. In Section III, the image processing method and procedure are explained, as well as the 3D reconstruction method. Section IV is an evaluation and discussion of the performance of the developed framework using spherical objects and mangoes. Finally, a conclusion has been provided in Section V.

II. FRAMEWORK DESIGN AND LIGHT SOURCE CALIBRATION

A. Hardware Setup

A simple vision system was designed to capture top-view images of objects, along with their shadows. Fig. 1 illustrates the vision system hardware components. A 5-megapixel USB camera, equipped with a 5–50 mm lens (ELP-USB500W05G-MFV) was mounted on top of the aluminum frame, perpendicular to the fruit being inspected. A typical white color LED SMD (surface mount) type was mounted opposite the camera, projecting light rays to create object shadows at a fixed distance. The angle of the light source was initially adjusted to ensure no shadow fell out of the frame.

B. Software Implementation

The software was implemented as a web application. Fig. 2 shows the graphical user interface (GUI) operated on Google Chrome. The front end of the application was developed using JavaScript, HTML5, and CSS. The backend was developed by micro web framework Flask,

along with the image processing libraries OpenCV and Scikit-Image.

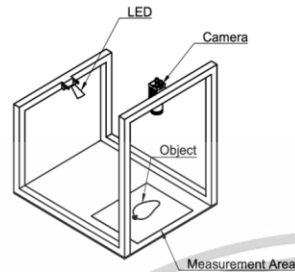


Fig. 1. System hardware component and arrangement.

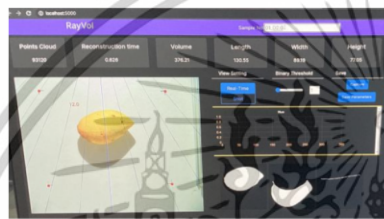


Fig. 2. Graphical user interface of RayVol application.

C. Lightsource Position Calibration

Typically, transformation between image coordinates and world coordinates requires extrinsic and intrinsic matrices, which are derived by performing a calibration. The process usually involves manual labor and taking multiple (10–20) photos of a checkerboard from different angles. Since the shadow and object lie on the same planar surface, a projective transformation called a homography method [36, 37] was used to simplify the process. The relationship between the image plane with pixel data $p(x', y', w')$ and world coordinates $p(x, y, w)$ can be given as (1).

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

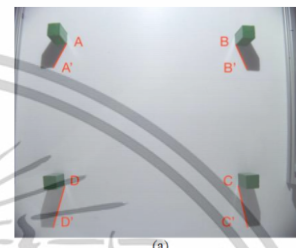
where \mathbf{H} is the homography matrix. All feature points are considered in homogeneous coordinates, thus, $w = w' = 1$. At least four feature points are required to calculate the \mathbf{H} matrix by the least square method, which is defined from the corners of the measuring area.

The light source position was determined by the intersection of four rays, traced inversely from the shadows cast by the four cuboids of known dimensions, which were arranged in a square formation within the measurement region. Each of cuboid shadow vector AA' , BB' , CC' , and DD' as shown in Fig. 3(a) was used to compute the elevation angle θ as expressed in Eq. (2)

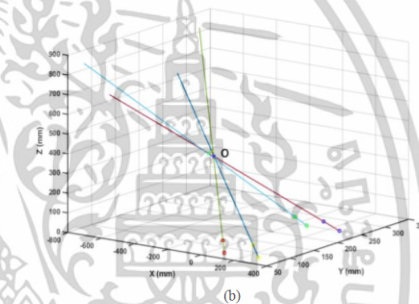
to create a ray vector that point to LED light source position,

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{cuboid height}}{AA'} \right) \quad (2)$$

Thus, these rays will intersect at a distant point O , which represents the position of the light source. However, since these rays were defined manually, there may be inaccuracies. To account for this, point O is determined from the average of the closest points of intersection of the four rays, as illustrated in Fig. 3(b).



(a)



(b)

Fig. 3. Light source calibration process: (a) fixed height cuboid and its shadow cast with originated vector point (A' , B' , C' and D') and lines (AA' , BB' , CC' , DD'). (b) light source position at point O (blue dot) from the nearest average of the closest traced rays.

III. METHODS

In this section, the proposed method for 3D volumetric reconstruction from a set of 2D cross-sections (virtual slices) is described. Fig. 4 shows an overview of the processing pipeline. The first step is extracting only the mango and its shadow information from the real-time captured image. To accomplish this, a reference background image obtained during the calibration process is used to perform a simple background subtraction. The resulting image is then subjected to an opening morphological operation to enhance the image and remove any residual noise. Finally, the contouring process is applied to filter out small objects except the largest object, which represents the mango and its shadow. This image results, allowing us to proceed to the next process steps: mango and shadow separation as well as skeleton extraction.

After obtaining the image result, the mango and its shadow were separated by thresholding. This is done by taking advantage of the fact that shadows are in dark areas, while mangoes are colored in bright areas. The Hue-Saturation-Value (HSV) color model was used to separate the brightness contrast by thresholding, where the value channel represents the brightness level. Two binary images of mango and shadow as shown in Fig. 4, served as the inputs for the reconstruction process. Furthermore, during the separation process, the skeleton of the object was also extracted. With the known position of the light source in three-dimensional space, the pixel length between the skeleton image and the bottom edges of shadow image which projected from the light source position was used to determine the object's height data.

Cubic spline interpolation was used to generate the point cloud to reconstruct the virtual slice. Finally, the 3D shape was recovered by integration of the virtual slices.

Additionally, a sub-application was also developed in the settings page of the RayVol application, which allows users to manually adjust the Hue-Saturation-Value (HSV) in real-time. This sub-application provides users with an independent threshold for each channel, allowing them to fine-tune to achieve the desired value in real-time and save it as a JSON configuration file, which can be used as a preset for main processing tasks. This feature enhances the system's flexibility and efficiency by enabling users to customize the image processing settings according to their specific needs.

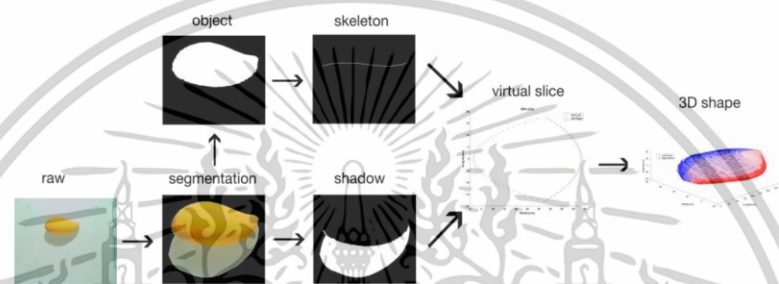


Fig. 4. Overview of the proposed 3D reconstruction pipeline.

A. Virtual Slicing

Reconstructing 3D shapes from a set of 2D cross-sectional slices is widely used in various fields, such as medical imaging, where internal specimen data is obtained using penetration waves generated by techniques such as X-rays or Magnetic Resonance Imaging (MRI). However, these methods can be time-consuming and can contaminate the sample.

In certain applications, particularly for agricultural products, generating 2D cross-sectional profiles must be done non-destructively and as fast as possible. A recent study by [22] introduced a method for producing virtual slices of cucumber from 2D photographs. This was achieved by circulating around the object's midline if the cucumber's shape closely resembles that of a simple cylinder.

Our proposed methodology employs cubic spline interpolation to create point clouds from boundary object information which extracted from 2D images, in combination with height data obtained through shadow casting. This approach enables the precise and dependable two-dimensional cross-sectional slices reconstruction for both regular and irregular shapes of agricultural material, which enhances the quality of reconstructions.

The process of generating the virtual slicing involves dividing the object into two halves. Each of the halves is then constructed using three points as basis points, which

are illustrated in Fig. 5(b) and Fig. 5(c). The first basis point is located at the boundary of the object image and constructed at zero on the z -axis (height axis). The second basis point is obtained through the shadow casting method, at the positive z -axis, which derived from the height data using Eq. (3). The obtained height h data must be divided in half to generate the third point in the subsequent process.

$$h = \frac{s \tan(\theta)}{2} \quad (3)$$

The length of the resulting shadow s is determined by the displacement of the object's medial information and the bottom boundary of the shadow image which relative to the position of the light source, as illustrated in Fig. 5(a) and Fig. 5(b).

The object's medial information is obtained by performing skeletonization of the object image. To determine the θ angle, the inverse trigonometry Eq. (4) is utilized.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{w}{v} \right) \quad (4)$$

where w and v are displacements from B to C and A to C respectively. The third point in the negative z -axis is generated by applying a mirroring transformation from the second point in the positive z -axis. This methodology assumes that most agricultural objects have an axi-

symmetric configuration, despite any inherent irregularities. Finally, this set of three points is used

construct new points through cubic spline interpolation as shown in Fig. 5(d).

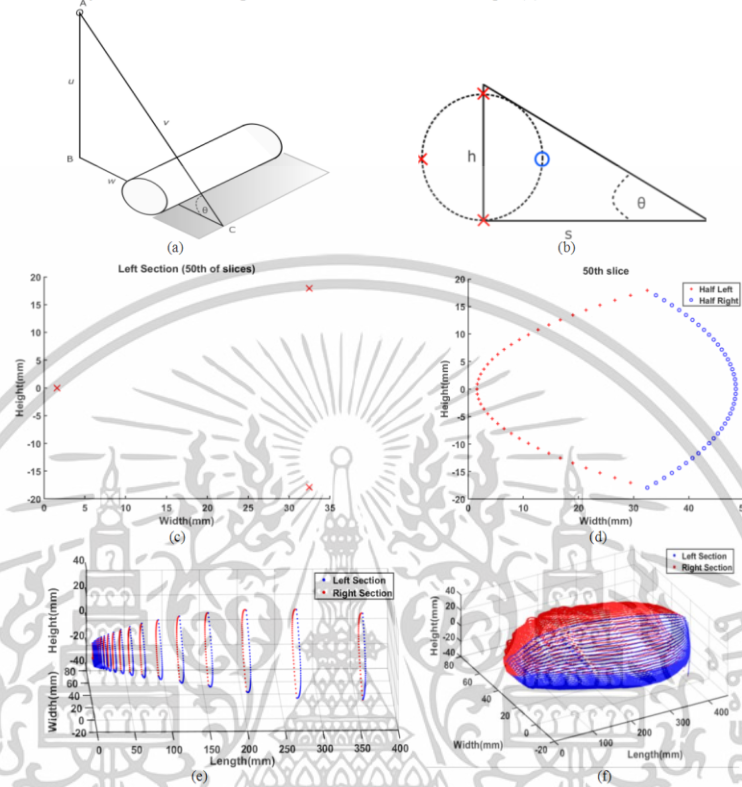


Fig. 5. 3D reconstruction process: (a) and (b) visualizing the geometry structure relationship of shadow casting in 3D and 2D, respectively; (c) obtaining an example of the left half of the virtual slice through the shadow casting method, as indicated by the symbol "x" in (b); (d) the completed virtual slice by combining the left and right halves; (e) Visualizing of the virtual slice stacking along x-axis; and (f) Fully 3D reconstruction.

B. Volumetric Rendering

To reconstruct a 3D volume image, the reconstructed slices are stacked sequentially along the x-axis as shown in Fig. 5(e), with a pixel length distance of one, which is transformed to real-world information by performing a homography transform. Fig. 5 (f) illustrates the completed 3D reconstruction obtained from a stack of virtual slices. To estimate the volume, the finite sum approximation of an integral is utilized, expressed as

$$V = \sum_{i=1}^n A(x_i) \Delta x \quad (5)$$

where Δx is stack distance in world coordinate and $A(x_i)$ represents the area of the closed polygon of the individual full slice, which is approximated by the Shoelace method.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

A. Repeatability

The repeatability of the proposed system was evaluated using three metal spheres of different sizes. The volume of each individual sphere was computed using the sphere volume formula:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (6)$$

where r is radius of the sphere. The volumes for the three spheres were calculated to be 28.73 cm³, 65.45 cm³, and 268.1 cm³, respectively.

Thirty measurements were taken for each sphere at the same location in the measurement area using the proposed system. The precision of the system for volume estimation was evaluated by determining the coefficient

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of variation [38] which is calculated from Eq. (7) for the estimated volume using the proposed system was 0.88%, 0.65%, and 0.82% for the three different-sized spheres, respectively as shown in Table I. Our volume estimation method demonstrated high repeatability; the CV is less than 1% for all samples.

$$CV = (\sigma / \mu) \times 100\% \quad (7)$$

TABLE I: VARIATION ANALYSIS OF THE VOLUME OF A SPHERE METAL BALLS MEASURED BY RAYVOL

Size (mm)	n	Mean (μ)	S.D. (σ)	CV (%)
38	30	30.14	0.267	0.88
50	30	67.68	0.43	0.65
80	30	273.13	2.23	0.82

B. Accuracy

The comparison was performed between the results measured by the proposed machine vision system and the water displacement method based on Archimedes' principle. The thirty mangoes were used as samples, randomly selected from a local farm. The sample was positioned in the measurement area, similarly to the repeatability evaluation procedure. The results obtained from the proposed method were compared with the water displacement method. The deviation is shown in Fig. 6(a), indicating that almost all the errors from the proposed method fell within the 95% limit of agreement.

Fig. 6(b) shows the comparison data, revealing a significant linear correlation between the volume estimated from RayVol framework and the volume measured by Water Displacement Method (WDM). The squared correlation coefficient (R^2) between the water displacement method and the RayVol measurement was 0.9849. This value signifies the proportion of the variance in the RayVol measurements that can be explained by the variance in the actual measurements. A higher R^2 value implies a closer correspondence between the RayVol measurements and the actual measurements, thereby indicating the greater accuracy and reliability of the proposed machine vision system.

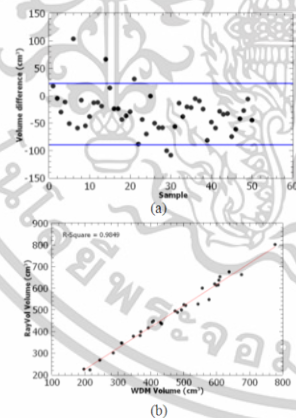


Fig. 6. The deviation and accuracy performance between water displacement method and RayVol framework: (a) 1.96- σ plot for volume difference; (b) R^2 and correlation.

C. Mango Size Classification Experiment

In this study, the proposed framework was utilized for mango size classification. A total of thirty mangoes were selected and categorized based on the assigned codes, as shown in Table II. The classification results were visually represented through box plots, as shown in Fig. 7. Each box plot contained the dataset, where the center of the box represented the median, the box edges represented the 25th and 75th quartiles, the whiskers illustrated the 5th and 95th quartiles, and the minimum and maximum values were presented as outliers.

TABLE II: VARIATION ANALYSIS OF THE VOLUME OF A SPHERE METAL BALLS MEASURED BY RAYVOL

Type	Code	Volume (cm ³)
Small	S	180-234
Medium	M	235-315
Large	L	316-450

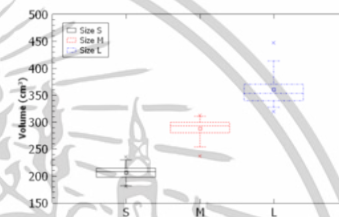


Fig. 7. Box plot representation of mango classification by volume. Showing the quartiles, the 5th and 95th percentiles (whiskers) and extreme values to the minimum and maximum.

D. Computation Expense

The PC computer with an AMD Ryzen 7, 5700 (3.8 GHz) was used as the computational device for this research. The Python backend software and web application were operated on Ubuntu 16.04. The computational time of all experiments ranged from 0.3 to 0.75 s, generating 28,000-40,000 points clouds. The setup was able to estimate the object volume for 1-3 objects per second with an object volume ranging from 180-480 cm³ and a resolution of 28,000-40,000 points cloud.

The computation time varied depending on the size of the image and the size of the object being processed. To improve the computation time, the camera resolution could be reduced. However, reducing the camera resolution would also affect the quantity of the point cloud, which might impact the resolution of the volume estimation. Therefore, it is essential to consider the trade-off between computation time and volume estimation resolution when selecting the camera resolution.

V. CONCLUSION

A simple and non-contact framework for measuring the volume of axi-symmetrical objects based on shadow casting is presented. A cost-effective machine vision framework based on this method was designed and built specifically for measuring agricultural materials. The

reconstruction of a 3D model and estimation of volume is fast with a single captured image, making it suitable for an inline process.

The precision of the proposed method was demonstrated with the Coefficient of Variation (CV) which was less than 1% for all of three spheres, whereas the accuracy was determined by the coefficient of determination (R^2) between the Water Displacement Method (WDM) and proposed method which was 0.9849. Furthermore, the computation time varied between 0.3 to 0.75 s with generating 28,000-40,000 points clouds per object.

The results of the performance analysis have shown that the proposed framework is accurate, precise with non-destructive for measuring the volume of axis-symmetrical objects, particularly in the case of agricultural materials. However, the resolution of volume measurements is dependent on the size of the region of interest in the image, which is also related to the size of the object being measured, and this may affect computation time. Furthermore, the angle of the light source also has an impact on accuracy. The setting up of the light source must be carefully done. Nevertheless, the proposed system provides sufficient accuracy and precision to make it competitive in this research area and in industrial applications.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

S.S. and T.S.: methodology, S.S.: software, S.S. and T.S.: validation, T.S. and N.N.: formal analysis, S.S. and T.S.: investigation, S.S. and T.S.: resources, S.S. and T.S.: writing-original draft preparation, N.N.: writing-review and editing, S.S. and T.S.: visualization, T.S. and N.N.: supervision.

REFERENCES

- [1] Y. Wang and Y. Chen, "Fruit morphological measurement based on three-dimensional reconstruction," *Agronomy*, vol. 10, no. 4, #455, Mar. 2020.
- [2] T. Huynh, L. Tran, and S. Dao, "Real-time size and mass estimation of slender axis-symmetric fruit/vegetable using a single top view image," *Sensors*, vol. 20, no. 18, #5306, Sep. 2020.
- [3] M. F. Ibrahim, F. S. Ahmad Sa'ad, A. Zakaria, and A. Y. Md Shakaff, "In-line sorting of Harumanis mango based on external quality using visible imaging," *Sensors*, vol. 16, no. 11, #1753, Nov. 2016.
- [4] N. K. Mahanti et al., "Emerging non-destructive imaging techniques for fruit damage detection: Image processing and analysis," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 120, pp. 418-438, Feb. 2022.
- [5] I. Torigo and Y. Ishii, "Acoustic bridge volumeter," *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol. 30, no. 11, pp. 1303-1309, 1994.
- [6] T. Kobata, M. Ueki, A. Ooiwa, and Y. Ishii, "Measurement of the volume of weights using an acoustic volumeter and the reliability of such measurement," *Metrologia*, vol. 41, no. 2, pp. S75-S83, Apr. 2004.
- [7] M. Ueki, T. Kobata, K. Ueda, and A. Ooiwa, "Measurements of the volume of weights from 1 g to 50 g using an acoustic volumeter," in *Proc. SICE Annual Conference 2005 in Okayama, Japan, 2005*, pp. 1742-1744.
- [8] V. A. Sydoruk, J. Kochs, D. Dusschoten, G. Huber, and S. Jahnke, "Precise volumetric measurements of any shaped objects with a novel acoustic volumeter," *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 3, #760, Jan. 2020.
- [9] D.-W. Sun, *Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation (Second Edition)*, Academic Press, 2016.
- [10] B. Zhang, N. Guo, J. Huang, B. Gu, and J. Zhou, "Computer vision estimation of the volume and weight of apples by using 3D reconstruction and noncontact measuring methods," *Journal of Sensors*, vol. 2020, #5053407, Nov. 2020.
- [11] A. Anders, D. Choszcz, P. Markowski et al., "Numerical modeling of the shape of agricultural products on the example of cucumber fruits," *Sustainability*, vol. 11, no. 10, #2798, 2019.
- [12] V. Riffo and R. Hidalgo, "Active inspection of objects to detect possible damage and measure their volume using 3D reconstruction," *Measurement*, vol. 199, #111541, Aug. 2022.
- [13] Z. Cai, C. Jin, J. Xu, and T. Yang, "Measurement of potato volume with laser triangulation and three-dimensional reconstruction," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 176565-176574, 2020.
- [14] Q. Su, N. Kondo, M. Li, H. Sun, D. F. Al Riza, and H. Habaragamuwa, "Potato quality grading based on machine vision and 3D shape analysis," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 152, pp. 261-268, Sep. 2018.
- [15] Q. Su, N. Kondo, M. Li, H. Sun, and D. F. Al Riza, "Potato feature prediction based on machine vision and 3D model rebuilding," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 137, pp. 41-51, May 2017.
- [16] F. Alkhawaja, M. Jaradat, and L. Romdhane, "Techniques of indoor positioning systems (IPS): A survey," presented at 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, Dubai, United Arab Emirates, Mar. 2019.
- [17] I. Nyalala, C. Okinda, L. Nyalala et al., "Tomato volume and mass estimation using computer vision and machine learning algorithms: Cherry tomato model," *Journal of Food Engineering*, vol. 263, pp. 288-298, Dec. 2019.
- [18] G. Vivek Venkatesh, S. Md. Iqbal, A. Gopal, and D. Ganesan, "Estimation of volume and mass of axis-symmetric fruits using image processing technique," *International Journal of Food Properties*, vol. 18, no. 3, pp. 608-626, Mar. 2015.
- [19] F. S. A. Sa'ad, M. F. Ibrahim, A. Y. Md. Shakaff, A. Zakaria, and M. Z. Abdullah, "Shape and weight grading of mangoes using visible imaging," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 115, pp. 51-56, Jul. 2015.
- [20] L. Wang, P. Shi, L. Chen, J. Gielis, and K. J. Niklas, "Evidence that Chinese white olive (*Canarium album* (Lour.) DC.) fruits are solids of revolution," *Botany Letters*, Jul. 2023. doi: 10.1080/23818107.2023.2238020
- [21] N. Nunak and T. Suesut, "Measuring geometric mean diameter of fruits and vegetables using light sectioning method," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 31, no. 6, pp. 629-633, 2009.
- [22] A. Soleimanipour and G. R. Chegini, "Three-dimensional reconstruction of cucumbers using a 2D computer vision system," *Food Measure*, vol. 13, pp. 571-578, Mar. 2019.
- [23] W. Spreer and J. Müller, "Estimating the mass of mango fruit (*Mangifera indica*, cv. Chok Anan) from its geometric dimensions by optical measurement," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 75, no. 1, pp. 125-131, Jan. 2011.
- [24] W. Aung, T. T. Thu, H. T. D. Aye, P. P. Htun, and N. Z. Aung, "Weight estimation of mango from single visible fruit surface using computer vision," in *Proc. 2020 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, Sep. 2020, pp. 366-371.
- [25] J. Siswanto and E. Asmawati, "A new framework for measuring volume of axisymmetric food products using computer vision system based on cubic spline interpolation," in *Proc. 2016 2nd Int. Conf. on Science in Information Technology*, Balikpapan, Indonesia, 2016, pp. 74-78.
- [26] H. M. Tran, K. T. Pham, T. M. Vo, T.-H. Le, T. T. M. Huynh, and S. V. T. Dao, "A new approach for estimation of physical properties of irregular shape fruit," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 46550-46560, 2023.
- [27] T. T. M. Huynh, L. TonThat, and S. V. T. Dao, "A vision-based method to estimate volume and mass of fruit/vegetable: Case study of sweet potato," *International Journal of Food Properties*, vol. 25, no. 1, pp. 717-732, Dec. 2022.

- [28] T. Mon and N. ZarAung, "Vision based volume estimation method for automatic mango grading system," *Biosystems Engineering*, vol. 198, pp. 338–349, Oct. 2020
- [29] H. Yin, W. Yi, and D. Hu, "Computer vision and machine learning applied in the mushroom industry: A critical review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 198, #107015, Jul. 2022.
- [30] S. Uhisik, F. Yildiz, and A. T. Ozdemir, "Image processing based machine vision system for tomato volume estimation," in *Proc. 2018 Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineering Meeting*, Istanbul, Apr. 2018, pp. 1–4.
- [31] B. Li, H. M. Cockerton, A. W. Johnson *et al.*, "Defining strawberry shape uniformity using 3D imaging and genetic mapping," *Hortic Res*, vol. 7, no. 1, #115, Dec. 2020
- [32] M. Adjouadi and J. T. Tou, "Shadow analysis in scene interpretation," in *Proc. the 4th Scandinavian Conference*, Trondheim, Norway, 1985, pp. 821–829.
- [33] John R. Kender and Earl M. Smith, "Shape from darkness: deriving surface information from dynamic shadows," in *Proc. the Fifth AAAI National Conference on Artificial Intelligence*, 1986, pp. 664–667.
- [34] L. Cavanagh and Y. G. Leclerc, "Shape from shadows," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 15, no. 1, pp. 3–27, 1989.
- [35] T. P. Seng, G. W. Leng, and C. K. Luk, "Shape reconstruction from shadow and shading," in *Proc. IECQN '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Maui, HI, USA, 1993, pp. 1639–1644.
- [36] S. Gulphanich, N. Nunak, and T. Suesut, "3D inspection for HDD production process using laser light sectioning," presented at the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong, 2015.
- [37] S. Sukprasertchai, S. Wangthong and P. Tamraksa, "Navigation and maneuvering investigation system based on infrared camera," presented at the International Offshore and Polar Engineering Conference, Sapporo, 2018.
- [38] L. Dah-lye, X. Xu, J. Eifert, and P. Zhan, "Area and volume measurements of objects with irregular shapes using multiple silhouettes," *Optical Engineering*, vol. 45, Feb. 2006. doi: 10.1117/1.2166847

Copyright © 2024 by the authors. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY-

NC-ND 4.0), which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided that the article is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.



Siwakorn Sukprasertchai received the B.S. degree in applied physics and M.Eng. in instrumentation engineering from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. He is pursuing his doctoral degree in electrical engineering at school of engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. His current research interests include computer vision, 3D reconstruction, and metric vision.



Taweepol Suesut received the B.Eng. degree in instrumentation engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and the M.Eng. degree in electrical engineering from the same university and Ph.D. degree in automation engineering from University of Leoben, Austria. He is an associate professor in the Department of Instrumentation and Control engineering. His area of interest is instrumentation system design and automation in food factories, especially machine vision for measurement and inspection as well as infrared-thermography.



Navaphattra Nunak received the B.Eng. degree in Food engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and the M.Eng. degree in Post-Harvest and Food Process Engineering from Asian Institute of Technology and Dr. degree at University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria. She is an associate professor in the Department of Food Engineering. Her area of interest is measurement and instruments in food processing, hygienic engineering and Infrared thermography.

Lecture Notes in Engineering and Computer Science

IMECS 2016

International MultiConference of
**Engineers and Computer
 Scientists 2016**

Volume I

Hong Kong
16-18 March, 2016

S. I. Ao
 Oscar Castillo
 Craig Douglas
 David Dagan Feng
 A. M. Korsunsky (Eds.)

IA ENG

International Association of Engineers

ISBN: 978-988-19253-8-1

ISSN: 2078-0958

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Real-time Surface Acquisition of Tire Sidewall for Reading Embossed Information

S. Sukprasertchai and T. Suesut

Abstract— This paper proposes the method for modelling the tire sidewall surface to extract the embossed character in real-time. The information on tire sidewall can be read easily after the reconstruction process. The surface based model is reconstructed by the base-line correction. Orthogonal polynomial approximation is employed to create the base-line correction and then the statistical technique is used to generate the residual data to relief the embossed surface. The complete embossed relief surfaces with a variety of degree orthogonal polynomial are compared for selecting the suitable degree. A prototype system of the laser-scanning for tire sidewall is implemented. The testing results have shown better images of tire surface. This method can be developed to the optical character recognition system for 3D range data of tire sidewall as well.

Index Terms— Orthogonal polynomial, 3D surface modeling, Embossed segmentation.

I. INTRODUCTION

LABELS are designed to facilitate the storage, distribution of goods or products, and information to identify them. Furthermore, these can be ensured of the quality by tracking their progress through the supply chain. The critical product such as tire manufacturing process that is essential to track the process from vulcanization until its use on the road in order to control of the quality. The marking must be durable enough to withstand the volatiles from daily use. The classical solution is the embossed label code into the surface of the tire sidewall. The code on tire sidewall contains information of the manufacturer, including the tire identification number (TIN) and any labeling code requires by law.

According to the transportation regulation of the United States of America (49 CFR 571.109), the DOT code appears as an alphanumeric 4-digit date code placed on all new tires [1] as shown in Fig. 1a.

Manuscript received December 8, 2015; revised January 18, 2016. This work was supported in part by Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

S. Sukprasertchai is with department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520 (corresponding author e-mail: siwakom.ictul@gmail.com).

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

Optical character recognition or pattern recognition is the process of converting images text, into machine readable data; basically, there is based on pattern recognition, which was processed on a binary image that was acquired by scanner or digital camera (Bar code, QR code). However this technique is problematic to perform image segmentation and classification, which were based on edge detection algorithm. The machine vision using digital camera acquired image directly is not suitable because the image of tire sidewall surface is dark and the surface of tire has a curvature form [2][3][4]. The solution to these problems is acquired the 3D tire sidewall surface image by utilizing the 3D scanner.

Edges on 3D surface image are caused of discontinuing depth (see Fig. 1b) on a tire cross section image acquired by laser light sectioning method. Peaks on curve are anomalies of surface, which are included the stamped character that are uniform in curvature data. Normally, edges in images provide low-level cues in image segmentation processing that can be several causes such as depth, textures, and lighting [5]. Practically, segmentation can be performed by digitization of image [6],[7] thresholding algorithms is the simplest method, which are not appropriated to utilized to arbitrary surface.

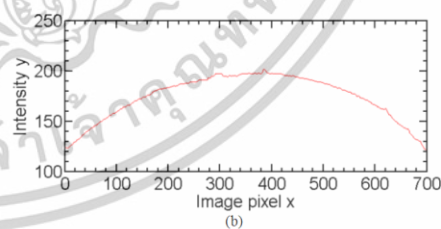


Fig. 1. a) example of the embossed code on tire sidewall b) the cross section image of tire sidewall, which was acquired by laser light sectioning method.

A tire sidewall cross section image (Fig. 2) can be considered as a wave form signal. Peaks of wave signal are added by background signals or noise providing the base-line. In analytical instrument, the base-line correction is the common problem for many algorithms utilized to removal baseline, such as derivative methods and frequency analysis, which are not appropriate for real-time applications. Recently, an iterative method based on curve fitting for estimation of base-line was proposed [8], [9].

This paper presents a solution to automatic extraction of characters and digits which are embossed on tire sidewall surface in real-time by utilizing the base-line correction to perform the surface relief to ensure that the achieved image is suitable for further processing.

II. METHOD

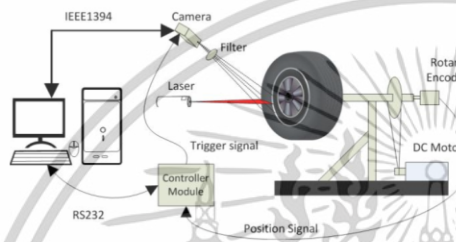


Fig. 2. Tire sidewall surface acquisition system.

A. Laser light sectioning scanner system.

The laser light sectioning method is a non-contact solution for acquiring the surface image by reconstructing 2D images of laser sheet that is projected onto tire surface from one-point perspective view. In this work, the system consists of a motorized rotary stage and a set of slim line laser light source which projected in perpendicular with tire sidewall, the area camera is used to capture the projected laser light on surface during rotation (see Fig. 2) [2]. The cross section images are acquired synchronously by using a rotary encoder. The raw 3D geometry of the surface contained the embossed character can be generated by reconstructing the 2D cross section images in real-time.

B. Orthogonal polynomial base-line correction.

The algorithm is based on base-line estimation, which achieved by fitting a polynomial function $f(x)$ from an original signal $y(x)$, which can be expressed in concise matrix form as

$$y = Xa + e \quad (1)$$

The vector e must be follows to the least square method by making e to minimum [9]. The fitting coefficient a can be solved by pre-multiplying the transpose X^T which can be expressed as

$$X^T y = X^T X a \quad (2)$$

and, the fitting coefficient is

$$a = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (3)$$

then, the fitting function is

$$Z = X(X^T X)^{-1} X^T y \quad (4)$$

the residual surface becomes,

$$R = Z - X(X^T X)^{-1} X^T y \quad (5)$$

where by, T is transposing matrix and -1 is matrix inversion, respectively. However, to calculate the matrix inversion $(X^T X)^{-1}$, is needed much more time for computation [8],[9]. In real-time applications, the computations time should be reduced to minimal as much as possible, which can be solved by using orthogonal polynomials property that are yielded diagonal normal matrices $(X^T X)$. Consequently, the matrix term $(X^T X)^{-1}$ can be computed easily by the equations

$$X_0 x = 1, \quad (5)$$

$$X_1 x = x - \bar{x}$$

$$X_n(x) = x^n + k_{n,n-1} X_{n-1}(x) + k_{n,n-2} X_{n-2}(x) + \dots$$

$$+ k_{n,0} X_0(x)$$

$$k_{n,j} = -\sum_{i=1}^m x_i^n X_j(x_i) / \sum_{i=1}^m X_j^2(x_i), \quad (6)$$

$$j = n-1, n-2, \dots, 1, 0,$$

where, \bar{x} is average of x . All algorithms were implemented by C++ using OpenCV library by Intel in real-time with 1.70GHz Intel Core I5-3317U.

C. Embossed relief procedure

After a cross section image of surface, the embossed relief can be done as follows: first, converting a cross section image to data as a vector matrix; second, modelling the base-line vector by utilizing orthogonal polynomial approximation; third, the residual vector is computed by using (4); fourth, after performing the residual relief is done and the result is shown in Fig. 3a. The trend of residual data is inclined from the base-line to perform the thresholding correctly. The trend of residual data must be related to horizontal base-line by utilized linear approximation technique.

Normally the embossed characters is higher peak than the tire pattern, this means that the embossed data can be easily extracts by calculating the standard deviation of the residual vector as shown in Fig. 3b. The residual data after removal unwanted signal by standard deviation is shown in Fig. 3c. This technique can be used to reconstruct the 3D surface lifting the embossed characters apparently.

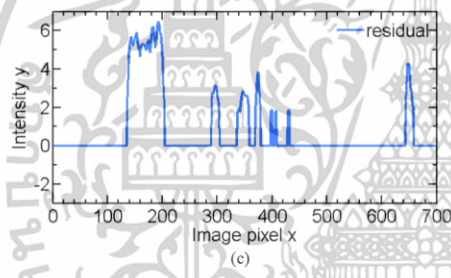
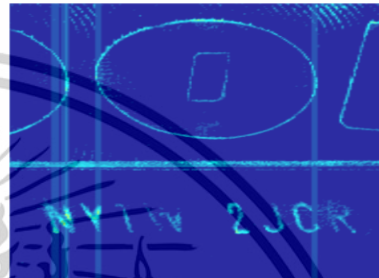
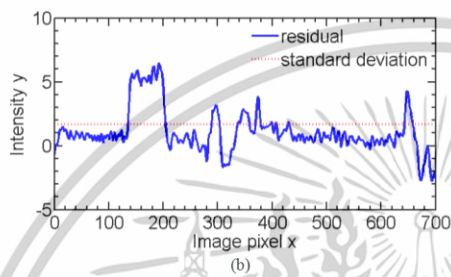
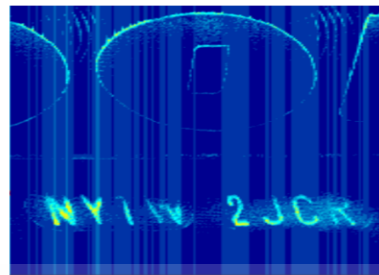
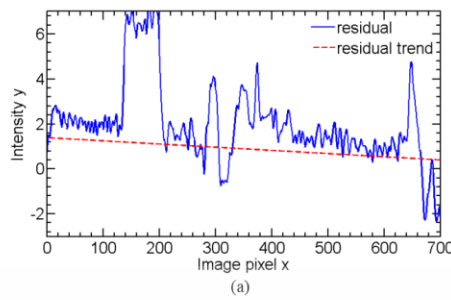


Fig. 3. a) residual data with trend data b) the standard deviation of residual data. c) residual embossed character edges after removed by standard deviation.

Fig. 5. the 3D surface at DOT code region with different degree of orthogonal polynomials a) degree of 5. b) degree of 10. c) degree of 15.

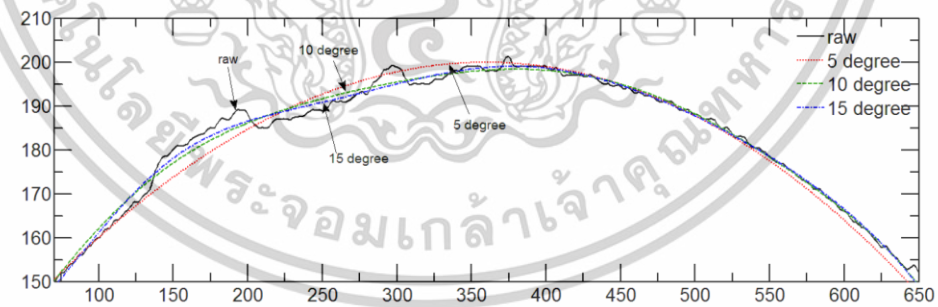


Fig. 4. raw range data curve and 3 varying of power of orthogonal polynomial.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

III. RESULTS

This section shows results of embossed character relief edges corresponding to the embossed relief procedure. After cross section images were acquired by light sectioning system. The range data were converted from cross section image, which was manipulated by computing the centroid and patching the line by Bresenham's algorithm. The complete surface modelling was done by utilizing orthogonal polynomial approximation. Only parameter in the procedure is the degree of orthogonal polynomial that should be set appropriately.

Fig. 4 shows the original signal with base-lines estimation with power of the orthogonal polynomial degree of 5, 10, and 15 respectively. The residual data was done by subtracting the reconstructed the 2D base-line modeled, which was approximated from orthogonal polynomials and regulated by linear approximation. A complete 3D raw surface and embossed relief image have shown in Fig. 6a and Fig. 6b respectively.

Fig. 5 shows results of the reconstructed tire sidewall surface removed by base-line with various power of orthogonal polynomial. The embossed characters with the fifth order was become apparent sufficient to perform the recognition process.

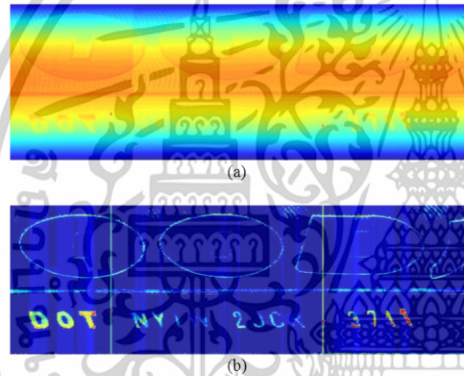


Fig. 6. a) 3D Original surface. b) 3D embossed relief surface.

IV. CONCLUSION

In this work, we focus on the geometric modelling to extract the embossed characters from curvature surface in real-time. The orthogonal polynomials can be used for curve fitting to reduce computation time. The trend of residual data was regulated by linear approximation to perform the standard deviation in order to provide a suitable threshold value for extracting the embossed characters on tire sidewall surface. The testing results have shown that the low power orthogonal polynomial is sufficient to model the base-line data, and the statistical method can be used to enhance the embossed characters on surface image in real-time for further processing.

REFERENCES

- [1] A.M. Best Company, "Tire Manufacturing" in *Best's Underwriting Guide*, 2015.
- [2] S.Sukprasertchai and T. Suesut, "Tire sidewall 3D surface acquisition using Laser light sectioning," International Conference on Engineering, Applied Science and Technology (ICEAST), Bangkok, Thailand 2013.
- [3] I. Ardpairin and T. Suesut, "Inspection depth of grooves on tire using 3D computer vision system," Proceedings of 50th Kasetsart University Annual Conference: Architecture and Engineering, Bangkok, Thailand 2012.
- [4] I. Frosio, N. Alberto Borghese, P. Tirelli, G. Venturino and G. Rotondo, "Flexible and low Cost Laser Scanner for Automatic Tyre Inspection," Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2011.
- [5] M. Kolomenkin, I. Shimshoni and A.Tal, "On Edge Detection On Surfaces," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2009.
- [6] P.K. Charles, V. Harish, M.Swathi and CH. Deepthi, "A Review on the Various Techniques used for Optical Character Recognition," *IJERA International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 2, pp. 659-662, Feb. 2012.
- [7] M.R. Gupta, N.P. Jacobson and E.K. Garcia, "OCR binarization and image pre-processing for searching historical documents," *The Journal of The Pattern Recognition Society*, pp. 389-397, Feb. 2006.
- [8] Z. Wang, M.Zhang, and P.B. Harrington, "Comparison of Three Algorithms for the Baseline Correction of Hyphenated Data Objects," *Analytical Chemistry*, vol. 86, no. 18, pp. 9050-9057, Aug. 2014.
- [9] T. Lan, Y. Fang, W. Xiong and C. Kong, "Automatic baseline correction of infrared spectra," *Chinese Optics Letter*, vol. 5, no. 10, pp. 613-616, Oct. 2007.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Influence of Measuring Location on Volume Estimation by Shadow Casting Method

Taweepol Suesut
School of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
taweepol.su@kmitl.ac.th

Siwakorn Sukprasertchai*
School of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
siwakorn.su@ku.th

Abstract—Non-contact inspection has dominated various industries for many years, particularly in the field of food and agricultural processes. Volume estimation can be achieved by volumetric imagery or 3D reconstruction. The casting of shadows or shape by shading is an active technique that can be utilized to generate volumetric imagery. By evaluating the length of shadows, the object height data can be achieved, and the transformation of image coordinates to world coordinates is facilitated by means of homography transformation. The width, length, and height of object edges along the entirety of its length are employed to reconstruct virtual slices. The integration of these virtual slices enables the estimation of the object's volume. This research studied the variation of the measuring locations, three different diameters spherical balls 38mm, 50mm, and 80mm are used as test materials. The percentage of errors in volume obtained from all sections by shadow casting were compared to computation volume of sphere formula is approximately -1.67%, -1.13%, and -6.60%, respectively, depending on the size of the object. Furthermore, a visualization-based analysis is presented which has no significant difference. From this studied, it can be concluded that this method is valuable in estimating the volume of axially symmetrical objects.

Index Terms—3D reconstruction, non-contact inspection, volume approximation, shadow casting, homography

I. INTRODUCTION

Currently, inspection with machine vision technique is widely prevalent and immensely in the agricultural industry. Particularly in quality control, external physicals information such as shape, size, and color, was employed as an indicator and classification that is linked to the quality perceived by consumers. Volume is one of the characteristics that researchers have been focusing on, as it can be utilized for indirect weight determination. Numerous investigations [1-9] have reported the correlation of mass and volume.

3D reconstruction is one of the techniques which is employed to estimate object volume. Such a system is mostly based on active methods that require energy sources or light sources, to obtain all the three-dimensional data.

The structured light is the principally technique, by the deformed of the reflected light patterned from projected by light source [10-12]. Some researchers employed time-of-flight methods to obtain height information [13]. However, this method is considered a complex system due to the additional specific light source which influenced the system cost.

Single-view 3D reconstruction using mono camera is considered as a cost-effective system, without any additional light source or another camera. For agriculture applications, such as fruit, mostly has unsophisticated shape, which can be modeled by its geometrical shape. The geometric mean diameter (GMD) is an example [11]. However, some fruits have slightly altered shapes, which impact measuring accuracy. Several researchers applied basic mathematical model shape with width and height data to performed 3D reconstruction then the volume was estimated by utilizing numerical analysis [14-16]. Nonetheless, by lacking height information the measuring accuracy might be issued.

Shape by shading has been introduced since 80's [17-19], by geometrical relationships the height data can be retrieved from its shadow. These publications provide reconstruction methods including evaluated by measuring simple shape. In [20] has been developed a platform for estimating the volume of asymmetrical objects by employed shape from shading or shadow casting. They employed mango as test material to evaluate the system performance. This approach, height data is computed based on the location of light source. Consequently, the computed result might be impacted from perspective view. Due to practical applications such as in-line inspection, the object being measured is placed randomly on conveyer belt. The accuracy might be influenced by the different measuring location.

This paper investigated the variation of volume estimation from different measuring sections by utilizing shadow casting method, which organized into several sections. Section II presenting the principle of shadow casting method. Section III the material and method of studied is described.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Section IV is an evaluation and discussion of variation of different measuring sections by employing different diameters of sphere ball as test materials. Finally, a conclusion is provided in Section V.

II. THEORY

A. Height determination by shadow casting method

Fig. 1 illustrate the shadow ray casting method for determining height data based on geometrical relationships, the illumination of point light source is projected to an object and its shadow was created. Fig. 2 shown the geometric relationship of light source position, object and shadow, which object height h can be computed using length of the shadow s as (1). For elevation angle (θ) , the inverse trigonometry is utilized by (2): where w is the length of the light source location and shadow edge; where v is the length of the light source location and shadow edge.

$$h = s \tan(\theta), \quad \text{where } \theta = \cos^{-1} \frac{w}{v} \quad (1)$$

B. Planar metrology by projective transform

Since the object being measured is place on planar plane, a point of image plane $p(x', y', w')$ can be transform to world coordinate $p(x, y, w)$ as in (2).

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

where H is the homography matrix. All points are considered in homogeneous coordinates, thus, $w = w' = 1$. Since h_{33} is scaling parameters which also equal 1. Thus, the H matrix can be calculated by the least square method which required at least four points, where defined from the corners of measuring area. Then the real-world coordinate can be computed by the multiplication of matrix H and p [21], [22].



Fig. 1. Illustrate of shadow casting method.

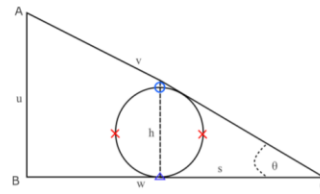


Fig. 2. Virtual slice with geometry relationship between light source position A and shadow edge C and basis points.

C. Light source calibration

The process of determining height through shadow casting relies on the calculation of geometric properties. Consequently, it is essential to accurately locate the light source. Fig. 3 shown a point light source that was used to project light rays to an object for casting shadow. The light source location is identified by inverse ray tracing from shadow location of an object with known height such as cuboid object which placed in square formation. Then, the intersection of four rays is identified as the location of light source.

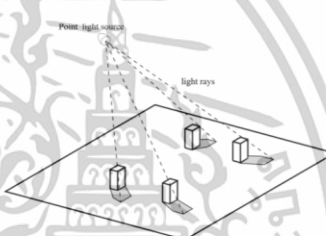


Fig. 3. Light source calibration by inverse ray tracing.

D. Volumetric image reconstruction

A three-dimensional image is reconstructed by a set of virtual slices along the length of object. To approximate the volume, a Riemann sum (3) is utilized, where $A(x_i)$ is the area of virtual slice which is estimated by Shoelace method. In Fig. 2 shown a reconstructed virtual slice, where A is a light source location, BC is the length between light source and shadow edge, v is the rays vector from light source and shadow edge, and s is the shadow length from object medial.

$$V = \sum_{i=1}^n A(x_i) \Delta x \quad (3)$$

A virtual slice is generated by utilized cubic spline interpolation based on basis points which shown as symbols in Fig. 2: cross, circle and triangle. All of basis points were transformed to real-world coordinate by homography transform, the cross symbols are derived from the object's

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

edges of top-view image. The circle symbol is height data which obtained by utilizing shadow casting method as in (1), where shadow length is displacement from object medial data which extracted by skeleton algorithm and shadow edge data. Finally, the triangle symbol is achieved by mirroring the circle symbol data, by assuming that object has axi-symmetry shape property.

III. MATERIAL AND METHOD

Experiments were performed on three different size sphere balls which has diameter 38mm, 50mm and 80mm. The reference volume was computed by using the sphere volume formula (4), where r is radius of the sphere balls. The calculated volumes for the three spheres were 28.73cm³, 65.45cm³, and 268.1cm³, respectively.

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \tag{4}$$

The shadow casting method is used to measure the volume of three different size spherical objects at different sections A, B, C, D and E as shown in Fig. 3. A total of thirty measurements were carried out for each location. A software platform was developed based on Python language with open sources libraries, OpenCV and Scikit-Image. A 5-megapixel USB camera, equipped with a 5-50mm lens (ELP-USB500W05G-MFV) is used to capture top-view images.



Fig. 4. Difference sections for experimentation.

IV. RESULT AND DISCUSSION

Table. I presents the mean \bar{X} , standard deviation (σ), percentage of error and coefficient of variation (C.V.) of three spherical balls, which were measured from five sections (A, B, C, D and E) using shadow casting method. The average volume that is measured from shadow casting of all sections are about 28.25cm³, 64.71cm³ and

250.39cm³, which have average percentage of error of -1.67%, -1.13% and -6.60% respectively, when compared with computed volume. It can be observed that this method can be employed for classification applications such as fruit grading or size determination.

The repeatability of all sections was evaluated using coefficient of variation (C.V.) as shown in Table. I. For spherical balls which have a diameter of 38mm and 50mm, the C.V. is approximately 0.82%–1.06%, demonstrating high repeatability. For the 80mm diameter, the C.V. is about 3.30%, indicating a C.V. slightly increased. It is due to shading on object, the large object caused shaded shifted from object medial which extracted from skeleton algorithms. Consequently, the length s in (1) introduces an error.

Fig. 5. visualized the differences in volume compared with computed volume for each position of the three different diameter balls using a box plot. The median volume difference of position E was consistently close to zero for all three ball diameters, whereas the position of A, B, and C have more difference, and position D shows the highest. According to Table. I, section D had the highest percentage error due to a minor error in the object skeletonization process, which was induced by threshold process. For single light source, the closest location to the light source has strong light intensity, while the furthest location has lowest intensity. As a result, the variation in light intensity may have affected the threshold method and distorted the object's medial line. Another issue is the light reflection from the black acrylic sheet as light blocker which was installed around the measuring area. This issues affected to accuracy error. However by examining all the volume differences, it can be observed that the location significantly impacts the measurement accuracy, which have consistent pattern.

V. CONCLUSION

The method for generating a 3D volumetric imagery of an object using only a single view with the assist of a simple light source is presented. The software has been self-developed using open-source library written in Python language. The planar transformation method was applied to calculated width, length, and height of the object. The height of the object was estimated by utilizing the shadow casting method. Then, the virtual slice is reconstructed by

TABLE I
COMPARING OF VOLUME ESTIMATED FROM THREE SPHERE BALL OF DIFFERENT SIZES WITH SHADOW CASTING METHOD AND COMPUTATION

Sections	38mm				50mm				80mm			
	Mean \bar{X}	Error (%)	S.D. (σ)	C.V. (%)	Mean \bar{X}	Error (%)	S.D. (σ)	C.V. (%)	Mean \bar{X}	Error (%)	S.D. (σ)	C.V. (%)
A	27.56	-4.08	0.285	1.035	63.04	-3.67	0.207	0.328	250.79	-6.45	6.495	2.589
B	30.45	5.99	0.251	0.824	69.70	6.49	0.543	0.778	252.26	-5.90	10.766	4.267
C	27.52	-4.22	0.288	1.048	64.05	-2.13	0.246	0.384	243.96	-9.00	8.077	3.310
D	25.59	-10.94	0.271	1.061	59.05	-9.77	0.182	0.308	230.46	-14.03	9.501	4.122
E	30.15	4.91	0.267	0.888	67.68	3.42	0.438	0.646	274.49	2.38	6.059	2.207

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

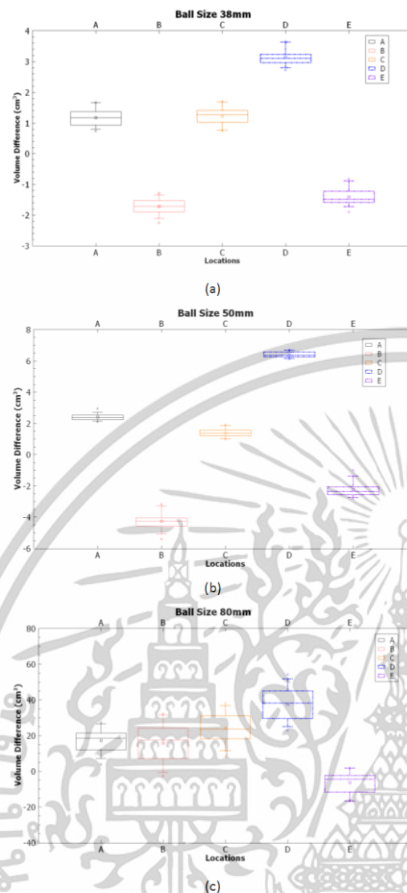


Fig. 5. Visualization by box plot of volume difference of three sizes sphere balls from five sections, showing the quartiles, the 5th and 95th percentiles (whiskers) and extreme values to the minimum and maximum: (a)38mm, (b)50mm, and (c)80mm, respectively

cubic spline interpolation from basis points (width, length and height). Finally, the 3D image was reconstructed easily by integration of virtual slices. It can be performed in an in-line process, with simple components, simple computation, and most importantly it is a non-contact inspection method. The three sizes of sphere ball were used as test material, volume measurements from shadow casting method were compared to computed volume using simple sphere formula. The measuring area was separated into five sections, thirty measurements were done to exhibit the performance.

The variation analysis from difference sections was demonstrated using three different sizes of sphere ball. The testing section was separated into five sections, thirty replicates were done in each test. The coefficient of variation (C.V.) result of each section has shown that this method has precision. Furthermore, the accuracy variation of three sphere balls from five sections were visualized by box plots, exhibited that the volume difference of five sections have minor percentage error when compared to computed value which caused by the variation of light intensity. Lighting control and light source setup must be carefully done. Nevertheless, this simple metric vision system demonstrates sufficient performance for classification application, such as agricultural materials.

ACKNOWLEDGMENT

This work was fully supported by School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

REFERENCES

- [1] J. A. Fracarolli, F. F. A. Pavarin, W. Castro, and J. Blasco, "Computer vision applied to food and agricultural products," *REVISTA CIENCIA AGRONÓMICA*, vol. 51, no. 5, 2020, doi: 10.5935/1806-6690.20200087.
- [2] T. T. M. Huynh, L. TonThat, and S. V. T. Dao, "A vision-based method to estimate volume and mass of fruit/vegetable: Case study of sweet potato," *International Journal of Food Properties*, vol. 25, no. 1, pp. 717-732, Dec. 2022, doi: 10.1080/10942912.2022.2057528.
- [3] T. Men and N. ZärAung, "Vision based volume estimation method for automatic mango grading system," *Biosystems Engineering*, vol. 198, pp. 338-349, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.08.021.
- [4] T. Huynh, L. Tran, and S. Dao, "Real-time size and mass estimation of slender axis-symmetric fruit/vegetable using a single top view image," *Sensors*, vol. 20, no. 18, p. 5406, Sep. 2020, doi: 10.3390/s20185406.
- [5] W. Spreer and J. Müller, "Estimating the mass of mango fruit (*Mangifera indica*, cv. Chok Anan) from its geometric dimensions by optical measurement," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 75, no. 1, pp. 125-131, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.compag.2010.10.007.
- [6] L. Dah-Jye, X. Xu, J. Eifert, and P. Zhan, "Area and volume measurements of objects with irregular shapes using multiple silhouettes," *Optical Engineering - OPT ENG*, vol. 45, Feb. 2006, doi: 10.1117/1.2166847.
- [7] B. Zhang, N. Guo, J. Huang, B. Gu, and J. Zhou, "Computer vision estimation of the volume and weight of apples by using 3D reconstruction and noncontact measuring methods," *Journal of Sensors*, pp. 1-12, Nov. 2020, doi: 10.1155/2020/5053407.
- [8] A. Concha-Meyer, J. Eifert, H. Wang, and G. Sanglay, "Volume estimation of strawberries, mushrooms, and tomatoes with a machine vision system," *International Journal of Food Properties*, vol. 21, no. 1, pp. 1867-1874, Jan. 2018, doi: 10.1080/10942912.2018.1508156.
- [9] W. Aung, T. T. Thu, H. T. D. Aye, P. P. Htun, and N. Z. Aung, "Weight estimation of mango from single visible fruit surface using computer vision," in 2020 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), Sep. 2020, pp. 366-371, doi: 10.23919/SICE48898.2020.9240422.
- [10] Q. Su, N. Kondo, M. Li, H. Sun, D. F. Al Riza, and H. Habaragamuwa, "Potato quality grading based on machine vision and 3D shape analysis," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 152, pp. 261-268, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.compag.2018.07.012.
- [11] N. Nunak and T. Suesut, "Measuring Geometric Mean Diameter of fruits and vegetables using Light Sectioning Method," p. 5, 2009.
- [12] R. Méndez Perez, F. A. Cheein, and J. R. Rosell-Polo, "Flexible system of multiple RGB-D sensors for measuring and classifying fruits in agri-food industry," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 139, pp. 231-242, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.05.014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] I. Nyalala et al., "Tomato volume and mass estimation using computer vision and machine learning algorithms: Cherry tomato model," *Journal of Food Engineering*, vol. 263, pp. 288–298, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.07.012.
- [14] L. M. Oo and N. Z. Aung, "A simple and efficient method for automatic strawberry shape and size estimation and classification," *Biosystems Engineering*, vol. 170, pp. 96–107, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.04.004.
- [15] S. Uluisik, F. Yildiz, and A. T. Ozdemir, "Image processing based machine vision system for tomato volume estimation," in *2018 Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineering's Meeting (EBBT)*, Istanbul: IEEE, Apr. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/EBBT.2018.8391460.
- [16] M. G. Kamble, A. Singh, V. Mishra, M. Meghwal, and P. K. Prabhakar, "Mass and surface modelling of green plantain banana fruit based on physical characteristics," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 186, p. 106194, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.compag.2021.106194.
- [17] John R. Kender and Earl M. Smith, "Shape from darkness: deriving surface information from dynamic shadows," in *Proceedings of the Fifth AAAI National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'86)*. AAAI Press, 1986, pp. 664–667.
- [18] L. Cavanagh, Patrick Yvan G., "Shape From Shadows," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1989.
- [19] Toh Peng Seng, Goh Wee Leng, and Chan Kap Luk, "Shape reconstruction from shadow and shading," in *Proceedings of IECON '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Maui, HI, USA, 1993, pp. 1639–1644.
- [20] S. Sukprasertchai, T. Suesut, and N. Nunak, "A fast and simple machine vision framework for approximating the volume of axisymmetric objects using shadow ray casting," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, to be published.
- [21] S. Gulphanich, N. Nunak, and T. Suesut, "3D inspection for HDD production process using laser light sectioning," in *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, Hong Kong, 2015.
- [22] S. Sukprasertchai, S. Wangthong and P. Iamraksa, "Navigation and maneuvering investigation system based on infrared camera," in *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, Sapporo, 2018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายศิวกร สุขประเสริฐชัย
วัน เดือน ปีเกิด	16 มกราคม 2531 ที่จังหวัดพิษณุโลก
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 99/193 ม.1 ต.คลองหลวงแพ่ง อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา
ประวัติการศึกษา:	
2554	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2557	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย:	
2554-2557	ตำแหน่ง R&D Engineer บริษัท Intelligent Control จำกัด
2556-2557	วิทยากรพิเศษ บรรยายวิชา Microcontroller and Electronics, RFID and Applications สถาบันเทคโนโลยีเยอรมัน
2559	ตำแหน่ง อาจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมทางทะเล คณะพาณิชยศาสตร์ นานาชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
2567	ตำแหน่ง ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายวิจัยและนวัตกรรม คณะพาณิชยศาสตร์ นานาชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้