

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวัดปริมาตรผักและผลไม้ด้วยวิธีลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง

VOLOME MEASUREMENT OF SELECTED VEGETABLES  
AND FRUIT USING LASER-LIGHT SECTIONING



T117873

นพรัตน์ สุขเกษม

NOPPARAT SUKKASEM

อพ.  
๖/๘๔๗  
๒๕๕๔

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน... 117873

วัน,เดือน,ปี... 2.2...ค.ค... 2554

b. 12350485  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554

KMITL 2011-EN-M-060-066

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**VOLOME MEASUREMENT OF SELECTED VEGETABLES  
AND FRUIT USING LASER-LIGHT SECTIONING**



**NOPPARAT SUKKASEM**

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

**2011**

**KMITL 2011-EN-M-060-066**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2011**

**FACULTY OF ENGINEERING**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG** ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์  
นักศึกษา

การวัดปริมาตรผักและผลไม้ด้วยวิธีลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง  
นาย นพรัตน์ สุขเกษม

รหัสนักศึกษา

52611129

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมการวัดคุม

พ.ศ.

2554

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ. ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการวัดปริมาตรของผักและผลไม้แบบไม่ทำลาย โดยการวัดสมบัติของวัตถุด้วยระบบ 3 มิติในระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น โดยการใช้วิธีลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุที่จะทำการวัดจะถูกลำแสงเลเซอร์แบบเส้นตรงพาดผ่านซึ่งสามารถตรวจจับได้ด้วยกล้องลำแสงเลเซอร์นี้จะตั้งฉากกับสายพานลำเลียง เมื่อผ่านการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลจะทำให้เราทราบมิติที่เป็นความกว้างและยาวที่สามารถนำมาคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ จากนั้นนำพื้นที่หน้าตัดตลอดความยาวมาประกอบกันเพื่อใช้ในการหาปริมาตรรวมของวัตถุและทำการแปลงข้อมูลที่ได้นี้เป็นค่าจริง โดยใช้ทฤษฎีการแปลงพิกัดแบบโฮโมกราฟี (Homography Transformation) จากการทดสอบพบว่าความถูกต้องและแม่นยำของปริมาตรที่ได้จากวิธีดังกล่าวนี้ให้ผลในการวัดความกว้าง ความสูง ความหนา กับวิธีการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบสมมูล (Equivalent Diameter) และเปรียบเทียบการวัดปริมาตรกับวิธีการวัดปริมาตรด้วยน้ำ(WD)ซึ่งให้ผลออกมาใกล้เคียงกัน แต่วิธีการวัดปริมาตรผักและผลไม้ด้วยวิธีลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง(3D-LLS)มีความสะดวกในการวัดมากกว่าและเป็นวิธีการวัดแบบต่อเนื่อง ระบบนี้จะเป็นประโยชน์สามารถนำไปพัฒนาเป็นระบบคัดเลือกและตรวจสอบผักและผลไม้แบบอัตโนมัติได้

<b>Thesis Title</b>	Volume measurement of selected vegetables and fruits using Laser-Light sectioning
<b>Student</b>	Mr. Nopparat Sukkasem
<b>Student ID.</b>	48060810
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Instrumentation Engineering
<b>Year</b>	2011
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Taweepol Suesut

### ABSTRACT

This thesis presents a non-destructive measurement of volume for vegetables and fruits. From the measurement of a 3D objects properties in computer vision system by using a laser beam cross-section; the object is measured by a linear laser beam through a cross-section objects, which detected by the camera. Laser beam is perpendicular with the conveyor belt. Then the image was performed a digital image processing in order to measure the width and the height of object. The integration of small trapezoids was summed to determine the volume of the object and converts to our results by using transformation theory (Homography Transformation). The volume measurement could be processed by cross-sectional area of a moving object on conveyor belt. Our experimental results show width, height, and thickness and method to calculate diameter of an equivalent (Equivalent Diameter) and compare with measurement of volume by water displacement (WD), the results are similar but measurement of volume for vegetables and fruits by using a laser beam cross-section (3D-LLS) is more convenience and continuous measurement. This system would be useful for the empirical design for selection and monitoring instrument vegetables and fruits automatically.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีพล ชื่อสัตย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ผศ.ดร.นวกัทราน หนูนาท อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร นางสาวกนกอร ชูปลอด และ นางสาวชยานันท์ จรุงธนกิจการ ที่คอยช่วยเหลือแนะนำและให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ในการศึกษา และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมและของบัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ ทุกๆท่าน

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ แม่และญาติพี่น้อง รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่น่ารักทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนช่วยเหลือในทุกๆด้านทั้งเรื่องการเรียน การเงินและเรื่องส่วนตัวจนทำให้ผู้เขียนผ่านทุกอย่างจนมาถึงวันนี้ได้

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์อันที่พึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอบอบแด่ผู้มีพระคุณ ทุกๆท่าน และขอให้ทุกๆท่านจงมีแต่ความสุขตลอดไป

นพรัตน์ สุขเกษม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญรูป .....	VI
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	1
1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย .....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ .....	3
บทที่ 2 การวัดปริมาณและรูปแบบการสแกนวัตถุ.....	4
2.1 วิธีการวัดปริมาณ.....	4
2.2 การวัดปริมาณด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น.....	10
2.3 การประมวลผลภาพ.....	11
บทที่ 3 การแปลงเชิงเรขาคณิตและทฤษฎีของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม .....	19
3.1 การแปลงเชิงเรขาคณิต .....	19
3.2 การโปรเจกชัน .....	27
3.3 แบบจำลองกล้อง .....	30
3.4 โฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม .....	36
3.5 สรุป .....	45
บทที่ 4 การออกแบบระบบตรวจวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ .....	46
4.1 หลักการตรวจวัดขนาดของวัตถุที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ IV ารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจวัดขนาดวัตถุ .....	49
4.3 ขั้นตอนการประมวลผลและการทำงานของระบบตรวจวัดขนาดของวัตถุ .....	52
<b>บทที่ 5 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....</b>	<b>64</b>
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	64
5.2 ตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	64
5.3 การประยุกต์ใช้ในการวัดขนาดของผักและผลไม้ชนิดต่างๆ ด้วย 3D-LLS .....	75
5.4 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	76
<b>บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>77</b>
6.1 สรุปผลการวิจัย .....	77
6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ .....	77
<b>เอกสารอ้างอิง .....</b>	<b>78</b>
<b>ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....</b>	<b>81</b>
<b>ประวัติผู้เขียน .....</b>	<b>88</b>

# สารบัญรูป

ภาพที่	หน้า
2-1 การหาปริมาตรโดยการแทนที่ของเหลว .....	5
2-2 การหาปริมาตรโดยการชั่งน้ำหนักในของเหลว.....	5
2-3 ตำแหน่ง a b c ของวิธีการวัดปริมาตรแบบ GMD .....	6
2-4 เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล (Equivalent Diameter).....	7
2-5 การวัดปริมาตรด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้า.....	8
2-6 ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น.....	9
2-7 อุปกรณ์รับและแสดงภาพของระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น.....	11
2-8 ขั้นตอนการวัดปริมาตรโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น.....	12
2-9 การถ่ายภาพในเทคนิคการวิเคราะห์ภาพสองมิติ.....	13
2-10 ส่วนประกอบของเทคนิคไฟหลังและภาพวัตถุที่ถ่ายโดยใช้เทคนิคไฟหลัง.....	13
2-11 ภาพถ่ายสามมิติ .....	14
2-12 การประมาณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเหรียญ 2 ยูโร จากเหรียญ 2 เซนต์.....	15
2-13 อุปกรณ์สำหรับเทคนิคการวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วน.....	16
2-14 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีไฮโมกราฟีในการตรวจวัดขนาดวัตถุ.....	17
2-15 ตารางหมากรุกขนาด 30 x 30 mm ที่ใช้ในการสอบเทียบ.....	17
3-1 แสดงระบบพิกัด Cartesian coordinate และ Homogeneous coordinate .....	19
3-2 การเลื่อนพิกัดของภาพ .....	20
3-3 การขยายขนาดของภาพ .....	21
3-4 ระบบพิกัด Polar การบอกตำแหน่งจุดโดยใช้ Vector .....	22
3-5 การหมุนของภาพ .....	23
3-6 การบิดภาพทางแกน x และการบิดภาพทางแกน y .....	24
3-7 การสะท้อนตามแกน x .....	24
3-8 การสะท้อนตามแกน y .....	25
3-9 การสะท้อนรอบเส้นตรง .....	26
3-10 หลักการของการโปรเจกชัน .....	27
3-11 การโปรเจกชันแบบขนาน .....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ VI ารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-12การโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ .....	28
3-13คุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายจากการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ .....	29
3-14ความสัมพันธ์ระยะทางระหว่างผู้สังเกตกับวัตถุของการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ .....	30
3-15แสดงลักษณะของ Vanishing Point และ Vanishing Line .....	30
3-16แบบจำลองของระบบสร้างภาพของกล้อง .....	31
3-17พิกัดบนระนาบของภาพ .....	32
3-18แบบจำลองการสร้างภาพกรณีพิกัดของโลกไม่ซ้อนทับพิกัดของกล้อง .....	34
3-19การแปลงแบบโปรเจกทีฟของระนาบ 2 มิติของกล้อง .....	35
3-20ความสัมพันธ์และการโปรเจกชันของจุดที่อยู่บนระนาบ .....	36
3-21ตัวอย่างลักษณะของการแปลงในเชิงการโปรเจกชันแบบต่างๆ .....	37
3-22การบิดเบือนของระนาบซึ่งเป็นผลของการแปลงแบบ Affine .....	39
3-23คุณสมบัติและลักษณะของการแปลงภาพแบบต่างๆ.....	41
4-1 แนวคิดที่นำมาใช้ในการตรวจวัดวัตถุ .....	46
4-2 การวิเคราะห์ทางเรขาคณิตของวัตถุจากเส้นแสงเลเซอร์ .....	48
4-3 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจวัดขนาดวัตถุ .....	50
4-4 อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ .....	51
4-5 ขั้นตอนการประมวลผลและการทำงานของระบบตรวจวัดขนาดของวัตถุ .....	52
4-6 ตารางหมากรุกขนาด30x30 mm.ที่ใช้ในการสอบเทียบ .....	53
4-7 จุดพิกัดที่เป็นบริเวณมุมของตารางที่ได้จากการใช้ทฤษฎีการหามุมของแฮร์ลิส .....	54
4-8 ตัวอย่างการสอบเทียบเพื่อหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ .....	55
4-9 การลดสัญญาณรบกวนแบบเป็นเชิงเส้นโดยใช้หลักการของการคอนโวลูชัน .....	57
4-10ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวนโดยการใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ย .....	58
4-11วิธีการของเส้นทางเดินของเส้นและผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการของเส้นทางเดินของเส้น .....	59
4-12จุดที่เป็นคุณสมบัติความสูง( $P_1, P_2$ ) และจุดที่เป็นคุณสมบัติของความกว้าง ( $P_3, P_3$ ).....	61

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น (CVS) ได้ถูกวิจัยและพัฒนาเรื่อยมาตั้งแต่ปี 1920 จนถึงปัจจุบันและได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานสาขาต่างๆมากมาย เช่น ด้านการแพทย์ ชีววิทยา ภูมิศาสตร์และการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียม การคัดแยก การตรวจสอบหรือตรวจวัดขนาดของวัตถุหรือชิ้นงานในกระบวนการผลิตในงานด้านอุตสาหกรรมการผลิตและอุตสาหกรรมเกษตร เป็นต้น ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวก ระยะเวลาในการดำเนินงาน ให้ความถูกต้องแม่นยำ เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต และช่วยลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์ปฏิบัติงานเนื่องจากความล้าและมาตรฐานที่แตกต่างกันของแต่ละบุคคล

ในงานวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับระบบคัดแยกหรือตรวจสอบคุณภาพของวัตถุที่ผ่าน มา โดยส่วนใหญ่ที่มีการนำการประมวลผลภาพและระบบคอมพิวเตอร์มาใช้จะเป็นการตรวจสอบหรือคัดแยกขนาด โดยใช้การวิเคราะห์คุณสมบัติของสี [1][2] ที่บอกได้เพียงคุณสมบัติด้านคุณภาพของวัตถุบางอย่างเท่านั้นเช่น ความสุกของผลไม้หรือความสดของวัตถุดิบ และมีงานวิจัยต่างๆที่พัฒนานำระบบการประมวลผลภาพมาวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติด้านขนาดของวัตถุในลักษณะที่เป็นแบบ 2 มิติคือความกว้างหรือความยาวเท่านั้น [3][4] ทำให้ขาดข้อมูลในส่วนความสูงหรือความหนาเมื่อนำระบบสองมิตินี้มาพัฒนาเป็นเครื่องคัดขนาด คุณภาพด้านขนาดและรูปร่างที่ได้จึงไม่สมบูรณ์ดังที่ภาคอุตสาหกรรมต้องการ ซึ่งในภาคอุตสาหกรรมหลายประเภทมีความจำเป็นต้องทำการตรวจสอบและวัดขนาดของวัตถุหรือชิ้นงานในกระบวนการผลิตลักษณะ 3 มิติ (ความกว้าง ความยาว และความหนา) จึงมีงานวิจัยและการพัฒนาเพื่อให้สามารถตรวจสอบหรือคัดแยกขนาดได้ทั้ง 3 มิติ [5][6][7] อย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านี้หน่วยของการวัดไม่ได้อยู่ในรูปของหน่วยการวัดสากล เช่น มิลลิเมตร หรือ เซนติเมตร ถ้าหากมีระบบที่มีความสามารถตรวจสอบหรือวัดขนาดได้ในแบบ 3 มิติ ที่มีความสะดวกในการใช้งานและติดตั้งได้ รวมทั้งมีความเร็วในการประมวลผลและบอกได้ถึงขนาดของวัตถุที่เป็นหน่วยวัดมาตรฐานสากลจะเกิดประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานมากยิ่งขึ้น

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการค้นคว้าและพัฒนาวิธีการตรวจวัดขนาดวัตถุทรงเรขาคณิตพื้นฐานที่มีรูปทรงเชิงสมมาตร ซึ่งมีรูปทรงใกล้เคียงกับวัตถุดิบในกระบวนการผลิต พืชผลการเกษตรหรือปลาชนิดต่างๆ เช่น ทรงกระบอก และรูปทรงสี่เหลี่ยมในเชิง 3 มิติ ด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นจากภาพเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ได้จากกล้องและทำการทดลองวัดขนาดวัตถุด้วยระบบประมวลผลภาพแบบ Off-line โดยเป็นการนำเสนอการใช้เทคนิควิธีการวัดขนาดด้วยภาพ (Metric Vision) บนระนาบภาพ 2 มิติมาประยุกต์ร่วมกับเทคนิคที่ใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ (Laser Light Sectioning) เพื่อประยุกต์ใช้วัดขนาดความกว้างความยาวและความสูงและพื้นที่โดยรวมเชิงปริมาตรในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากลของวัตถุตัวอย่าง โดยคำนึงถึงความง่ายในการออกแบบติดตั้ง รวมทั้งให้ความเร็วในการทำงานและความถูกต้องแม่นยำ ที่มีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ รวมทั้งนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับการวัดขนาดและคัดแยกปลาชนิดต่างๆ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ

### 1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากการศึกษาถึงปัญหาต่างๆจึงมีแนวความคิดในการออกแบบระบบการวัดขนาดและตรวจสอบวัตถุ ในลักษณะการสแกนบนสายพานลำเลียงซึ่งอยู่ในกระบวนการผลิตโดยทั่วไป และนำเสนอเทคนิคการใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ (Laser Light Sectioning) ที่เป็นเทคนิคการวัดรูปทรงแบบตัดขวางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายในการออกแบบโดยวิธีนี้เป็นการฉายแหล่งกำเนิดแสงลงบนพื้นผิววัตถุเพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงตกกระทบ แสงที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพและบันทึกไว้ด้วยกล้องที่วางทำมุมเอียงกับแหล่งกำเนิดแสง ร่วมกับการใช้เทคนิควิธีการวัดขนาดด้วยภาพ (Metric Vision) ที่ใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับการมองเห็นเชิงเรขาคณิตของกล้องตัวเดียว (Single View Geometry) และทฤษฎีของการแปลงแบบโฮโมกราฟี (Homography Transformation) เพื่อใช้แปลงพิกัดของเส้นแสงเลเซอร์ในภาพที่ได้ซึ่งเป็นคุณสมบัติด้านขนาดของวัตถุให้เป็นพิกัดจริงของวัตถุทำให้สามารถคำนวณหาขนาดของวัตถุและพื้นที่ของวัตถุนั้นๆได้

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการตรวจวัดขนาดวัตถุทรงเรขาคณิตพื้นฐานที่มีรูปทรงเชิงสมมาตร เช่น ทรงกระบอก ทรงกลม และทรงรีซึ่งเป็นวัตถุแบบ 3 มิติ ด้วยการใช้เทคนิคแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ ร่วมกับการประมวลผลภาพจากภาพที่ทำการบันทึกเป็นภาพวีดีโอ (AVI) โดยทำการพัฒนาและออกแบบโปรแกรมบน MATLAB ให้สามารถวัดขนาดของวัตถุตัวอย่างทั้งความกว้าง ความยาว ความสูงและพื้นที่โดยรวมเชิงปริมาตรในหน่วยของการวัดมาตรฐานสากล โดยให้ความถูกต้องแม่นยำและมีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ รวมทั้งนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดขนาดของฝักและผลไม้ชนิดต่างๆ เพื่อเป็นการทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของระบบ ที่ได้นำเสนอ

## 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 6 บทด้วยกัน โดยเนื้อหาแต่ละส่วน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการ วิธีวัดการขนาดและระยะทางของวัตถุแบบ 3 มิติต่างๆ รวมทั้งรูปแบบลักษณะการสแกนวัตถุในการตรวจวัดวัตถุแบบ 3 มิติ และอธิบายถึงหลักการของเทคนิคการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับการประมวลผลภาพ เช่น การแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพ หลักการของการโปรเจกชัน แบบจำลองของกล้อง ทฤษฎีโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มและการคำนวณหาค่าของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมทริกซ์

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบระบบตรวจวัดวัตถุโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ สำหรับการวัดรูปทรงสามมิติ การติดตั้งระบบและอุปกรณ์ ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรม รวมทั้งลักษณะการทำงานและขั้นตอนในการสอบเทียบ

บทที่ 5 เป็นขั้นตอนของการทดลองเพื่อทดสอบการทำงาน และการประยุกต์ใช้งานในการวัดขนาดของฝักและผลไม้ รวมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะและแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### การวัดปริมาตรและรูปแบบการสแกนวัตถุ

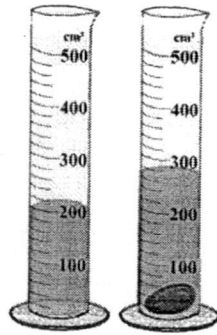
วิธีการวัดปริมาตรผักและผลไม้มีอยู่หลายวิธีเช่น วิธีการแทนที่ด้วยของเหลว [8][13]วิธีการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต [8][14]วิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้า[9]และวิธีการวัดปริมาตรด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชัน [10] เป็นต้น ทั้งนี้วิธีการวัดปริมาตรที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการแทนที่ด้วยของเหลวและวิธีการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต โดยวิธีการแทนที่ด้วยของเหลวเป็นวิธีที่อาจทำให้อาหารเสื่อมคุณภาพได้ เนื่องจากอาหารต้องสัมผัสกับน้ำหรือของเหลวชนิดอื่น ๆ ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ [11] ส่วนวิธีการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตเป็นวิธีที่ผักและผลไม้เสี่ยงต่อการบอบช้ำเนื่องจากการสัมผัสของมนุษย์ [11]วิธีการวัดปริมาตรที่สามารถใช้ในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าและวิธีการวัดปริมาตรด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชัน โดยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าเป็นวิธีที่สามารถวัดปริมาตรผักและผลไม้ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว อย่างไรก็ตามวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้านี้มีข้อจำกัดการใช้งาน คือสามารถวัดได้ถูกต้องแม่นยำเฉพาะผักและผลไม้ที่มีรูปทรงเรขาคณิต เช่น ทรงกลมและทรงรี เป็นต้น นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้ยังมีราคาค่อนข้างสูง[9]วิธีการวัดปริมาตรด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชันเป็นวิธีที่น่าสนใจเนื่องจากมีความสามารถในการวัดขนาด และปริมาตรจากภาพถ่ายที่มีความสะดวกในการใช้งานและติดตั้ง อีกทั้งยังเป็นวิธีที่ไม่ทำลายอาหาร [12]

#### 2.1 วิธีการวัดปริมาตร

ปริมาตรเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ สามารถบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างมวลและความหนาแน่น วิธีการวัดปริมาตรผักและผลไม้มีอยู่ 4 วิธี ดังนี้

##### 2.1.1 วิธีการแทนที่ด้วยของน้ำ

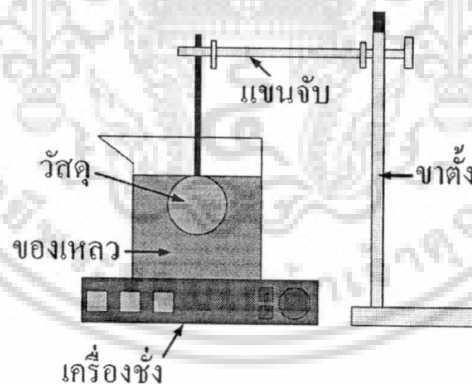
เมื่อวัตถุแทรกตัวลงไปลงในของน้ำทำให้ระบบมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเท่ากับปริมาตรของวัตถุนั้น การแทนที่ของเหลวเป็นวิธีการง่ายๆ สำหรับการหาปริมาตรของวัตถุ วิธีการหาปริมาตร โดยการแทนที่ของเหลวแสดงดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 การหาปริมาตร โดยการแทนที่ของเหลว

นอกจากนี้อาจใช้วิธีชั่งน้ำหนักวัตถุในของเหลวดังแสดงในรูปที่ 2-2 น้ำหนักวัตถุที่ชั่งในของเหลวแสดงถึงน้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่ด้วยวัตถุ นั่นคือแรงพยุงวัตถุของของเหลว นั่นเอง ฉะนั้นปริมาตรของวัตถุคำนวณได้จากสมการ (2.1)

$$\text{ปริมาตร (m}^3\text{)} = \frac{\text{มวลของของเหลวที่ถูกแทนที่ (kg)}}{\text{ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m}^3\text{)}} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2-2 การหาปริมาตร โดยการชั่งน้ำหนักในของเหลว

เนื่องจากวัตถุทางการเกษตรและอาหารบางชนิดมักจะมีรูพรุนหรือดูดซับของเหลวโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำได้ดี การหาปริมาตรโดยวิธีเหล่านี้อาจมีข้อผิดพลาดได้มาก จึงมีการเลือกใช้ของเหลวที่เหมาะสมกับวัตถุที่จะหาปริมาตรและคำนึงถึงปริมาตรภายนอก และปริมาตรที่แท้จริงดังสมการ

(2.2) และ (2.3) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

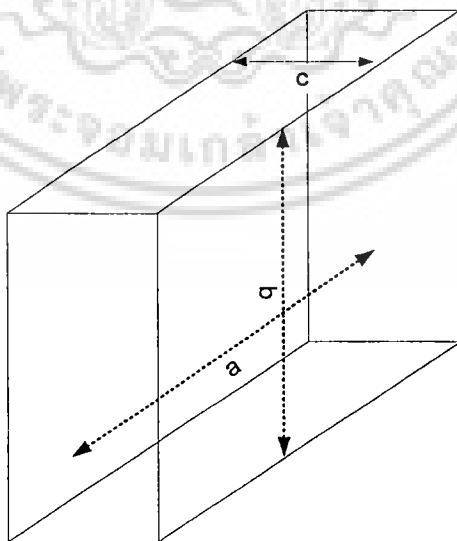
ปริมาตรภายนอก = ปริมาตรของเหลวที่ถูกแทนที่ + ปริมาตรของของเหลวที่ซึมเข้าไปในวัตถุ (2.2)

ปริมาตรที่แท้จริง = ปริมาตรของเหลวที่ถูกแทนที่ (2.3)

การหาปริมาตรที่แท้จริงโดยวิธีการนี้ไม่เหมาะสมเนื่องจากไม่สามารถกำหนดเวลาที่ของเหลวถ่ายเทเข้าไปในช่องว่างของรูพรุนได้ เนื่องจากน้ำเป็นของเหลวที่หาง่ายที่สุด และง่ายต่อการทดลอง จึงมักนิยมใช้น้ำเป็นของเหลวในการทดลอง หากวัตถุไม่ดูดซับน้ำหรืออาจเคลือบวัตถุก่อนด้วยไขมันบางๆ เพื่อป้องกันน้ำซึมเข้าไปก็ได้ ส่วนของเหลวอื่นๆ ที่ใช้ได้แก่ โทลูอีน ซึ่งมีข้อดีคือไม่ค่อยซึมเข้าไปในวัตถุ มีความตึงผิวต่ำ เป็นตัวทำละลายที่ไม่ดีต่อไขมันและน้ำมัน มีจุดเดือดสูง ความถ่วงจำเพาะและความหนืดไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อสัมผัสกับอากาศและมีความถ่วงจำเพาะต่ำ นอกจากนี้ยังมีสารละลายอื่นๆ ได้แก่ เฮกเซนซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 0.66 เป็นต้น [8] [13]

### 2.1.2 การวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometric Mean Diameter)

ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญในการคัดขนาดผักและผลไม้ วิธีการนี้เป็นการประมาณปริมาตรผักและผลไม้ด้วยรูปทรงทางเรขาคณิต หากวัตถุมีรูปร่างเป็นทรงกลมสามารถกำหนดขนาดจากเส้นผ่านศูนย์กลางได้เลย หากมีรูปร่างคล้ายทรงกลมหรือไม่เป็นทรงกลม สามารถกำหนดขนาดจากเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตได้ดังแสดงในสมการ (2.4) เมื่อรู้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตแล้ว จึงสามารถคำนวณปริมาตรได้ดังสมการ (2.5)



รูปที่ 2-3 ตำแหน่ง a b c ของวิธีการวัดปริมาตรแบบ GMD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต } GMD = \sqrt[3]{abc} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $a$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยาวที่สุด

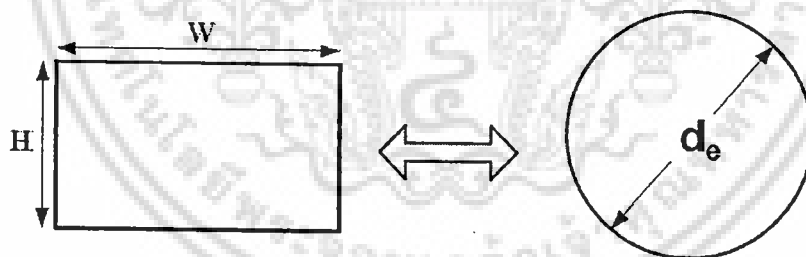
$b$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับ  $a$

$c$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับ  $a$  และ  $b$

$$\text{ปริมาตร } (V) = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{GMD}{2} \right)^3 \quad (2.5)$$

การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ ทำได้โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) หรือ ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) วิธีการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตมีข้อจำกัดอยู่ที่ วิธีการนี้ใช้ได้กับวัตถุที่มีรูปร่างสมมาตร เช่น สัมและมะนาว ถ้าใช้วิธีนี้กับวัตถุที่มีรูปร่างไม่สมมาตรจะทำให้ค่าที่วัดได้ผิดพลาด [8] [14]

เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล (Equivalent diameter) เป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่คล้ายคลึงกับเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงเรขาคณิต และสามารถใช้ในการคำนวณขนาดผักและผลไม้ที่มีลักษณะสมมาตร โดยวิธีการนี้เป็นการประมาณปริมาตรผักและผลไม้ด้วยระนาบสองมิติตั้งรูปที่ 2-4 และสามารถกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลได้ดังสมการ (2.6) เมื่อรู้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลแล้ว จึงสามารถคำนวณปริมาตรได้ดังสมการ (2.7) [8]



รูปที่ 2-4 เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล (Equivalent Diameter)

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล Equivalent Diameter (E.D)} = \sqrt[3]{\text{height} \times \text{width} \times \text{width}} \quad (2.6)$$

$$\text{ปริมาตร Estimated Volume} = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{E.D}{2} \right)^3 \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 วิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้า

วิธีที่ใช้ค่าความจุไฟฟ้าในการวัดปริมาตรแสดงดังรูปที่ 2-5 การดำเนินการของวิธีนี้ทำได้โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าไปยังวัตถุที่ต้องการวัดปริมาตรและ โครงทลสองรูปทรงกระบอก ทำให้เกิดความต่างของค่าความจุไฟฟ้าระหว่างวัตถุทั้งสอง ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าระหว่างวัตถุและกล่องทลสองแสดงดังสมการ (2.8) และการคำนวณหาปริมาตรของวัตถุแสดงดังสมการ (2.9)

$$\text{ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างวัตถุและกล่องทลสอง} \quad C_s = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือความสามารถในการดูดซับในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

$\epsilon_r$  คือ relative permittivity ของช่องว่างระหว่างวัสดุและกล่องทลสอง

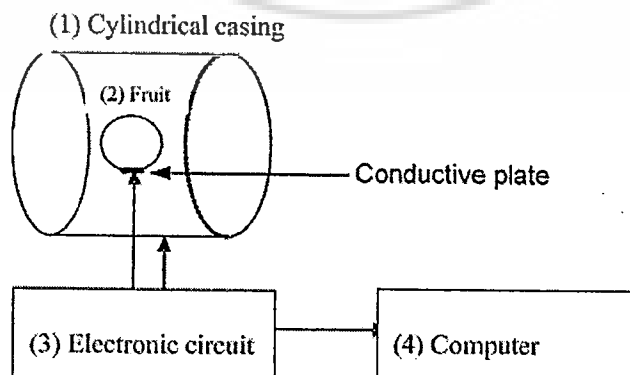
$r_1$  คือรัศมีของวัตถุที่ต้องการวัดปริมาตร

$r_2$  คือรัศมีของกล่องทลสอง

ในความเป็นจริง  $r_2$  มีค่าสูงกว่า  $r_1$  มาก  $r_2 \gg r_1$  ดังนั้น  $\frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \rightarrow r_1$

$$\text{ปริมาตรของวัตถุ} \quad V = \frac{4}{3}\pi r_1^3 = \frac{C_s^3}{48\pi^2 \epsilon_0^3 \epsilon_r^3} \quad (2.9)$$

การวัดปริมาตรด้วยวิธีนี้ใช้ได้กับผลไม้ที่มีรูปร่างทรงกลมและทรงรีซึ่งมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวอยู่ในช่วง 0.86-1.16 และใช้งานได้ดีเมื่อโครงทลสองมีขนาดใหญ่กว่าวัตถุมากๆ ข้อจำกัดของวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าคืออุปกรณ์ที่ใช้มีราคาค่อนข้างสูง ถึงแม้ว่าวิธีการนี้จะสามารถวัดปริมาตรผักและผลไม้ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว [9]



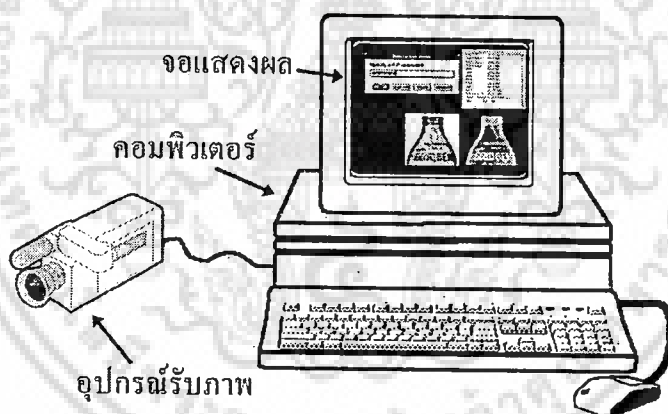
รูปที่ 2-5 การวัดปริมาตรด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ที่มา : [9]

### 2.1.4 ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น

ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นคือ การประมวลผลภาพเพื่อให้คอมพิวเตอร์เข้าใจทัศนียภาพหรือแยกแยะวัตถุ โดยทำให้คอมพิวเตอร์สามารถวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะและแยกแยะวัตถุต่างๆ ได้ การวิจัยและพัฒนาาระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นได้กระทำเรื่อยมาตั้งแต่ปี 1920 จนถึงปัจจุบัน และได้นำเอาระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นมาประยุกต์ใช้ในงานสาขาต่างๆ มากมายอาทิ เช่น ด้านการแพทย์ ภูมิศาสตร์ การวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียม การคัดแยก การตรวจสอบหรือการตรวจวัดขนาดของวัตถุดิบหรือชิ้นงานในงานด้านอุตสาหกรรมการผลิตและอุตสาหกรรมเกษตร เป็นต้น ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวก ลดระยะเวลาในการดำเนินงาน ให้ความถูกต้องแม่นยำ เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตและช่วยลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากผู้ปฏิบัติงานเนื่องจากความล้าและมาตรฐานที่แตกต่างกันของแต่ละบุคคล ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นแสดงดังรูปที่ 2-6 [12]ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นที่สามารถนำมาใช้ในการวัดขนาดและปริมาตรของผักและผลไม้มีอยู่หลายเทคนิคเช่น เทคนิคการสแกนอาหาร 3 มิติ [15]เทคนิคการวิเคราะห์ภาพสองมิติโดยใช้โปรแกรม Visual Basic (VB) [16] เป็นต้น



รูปที่ 2-6 ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น

### 2.1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการวัดปริมาตร

[9]ศึกษาการออกแบบอุปกรณ์วัดปริมาตรผักและผลไม้โดยอาศัยค่าความจุไฟฟ้าและทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ด้วยแดงโม แดงกวา ผรั่ง และฟักเขียว การวัดปริมาตรด้วยวิธีนี้ใช้ได้กับผักและผลไม้ที่มีรูปทรงกลมและทรงรี ซึ่งมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวอยู่ในช่วง 0.86-1.16 และใช้งานได้ดีเมื่อโครงทดลองมีขนาดใหญ่กว่าวัตถุมากๆ ข้อจำกัดของวิธีการวัดปริมาตร โดยอาศัยค่าความจุไฟฟ้าคืออุปกรณ์ที่ใช้มีราคาค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะสามารถวัดปริมาตรผักและผลไม้ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[17] ศึกษาการประมาณค่าพื้นที่ผิว และปริมาตรของแฮมทรงรีโดยใช้ระบบการวิเคราะห์ภาพด้วยคอมพิวเตอร์ วิธีการนี้เป็นการวัดพื้นที่ผิว และปริมาตรแฮมอย่างอัตโนมัติ โดยแบ่งออกเป็นสองเทคนิคดังนี้ เทคนิคที่ 1 แบ่งแฮมออกเป็นส่วนๆ เพื่อทำการวัดปริมาตร เทคนิคที่ 2 คำนวณค่าปริมาตรจากขอบของพื้นที่ภาพฉาย ความคลาดเคลื่อน โดยเฉลี่ยของทั้งสองเทคนิคคือ -1.79% และ -4.96% ตามลำดับ

[15] ทำการศึกษาเครื่องสแกนอาหาร 3 มิติ รูปทรงของผลิตภัณฑ์อาหารเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากอาหารมีรูปทรงแปลกประหลาดมากมาย เครื่องสแกนอาหาร 3 มิตินี้ใช้ในการถ่ายภาพอาหาร 3 มิติ อาทิเช่น ลูกแพร์ สตรอเบอร์รี่ กล้วย แอปเปิ้ล และไข่ มีการบันทึกภาพถ่าย และใช้โปรแกรม Computational fluid dynamics (CFD) ในการคำนวณพื้นที่ผิว และปริมาตรอาหาร วิธีนี้เป็นวิธีที่ประหยัดเวลา และมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1 %

[14] ศึกษาวิธีการวัดค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตของแอปเปิ้ล ส้ม และมะนาว จากนั้นคำนวณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตจากภาพถ่ายสามมิติโดยใช้ระบบการวิเคราะห์ภาพด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งมีการฉายแสงเลเซอร์ไปยังวัตถุต่างๆ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตของวัตถุสามารถคำนวณได้จากภาพถ่ายเพียงภาพเดียว วิธีนี้ใช้ได้กับวัตถุที่มีรูปร่างสมมาตร ตัวอย่างเช่น ส้มและมะนาว แต่เมื่อใช้วิธีนี้กับวัตถุที่มีรูปทรงไม่สมมาตรและไม่เป็นรูปทรงทางเรขาคณิตจะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง วิธีนี้สามารถวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตของแอปเปิ้ล ส้ม และมะนาว โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.03-5.14 %

[16] ศึกษาวิธีการวัดปริมาตรและมวลของมะนาว และส้ม โดยการถ่ายภาพผลไม้แบบ 2 มิติซึ่งใช้กล้อง 2 ตัววางตั้งฉากกับผลไม้ ทำให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เส้นที่ตั้งฉากกัน จากนั้นใช้โปรแกรม Visual Basic (VB) ในการคำนวณปริมาตร จากการศึกษาพบว่า การวัดปริมาตรโดยวิธีนี้มีความแม่นยำสูง สามารถใช้ได้กับผลไม้ที่มีแกนสมมาตรเช่น แครอท แดงควา หัวหอม และมะนาว เป็นต้น

## 2.2 การวัดปริมาตรด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น

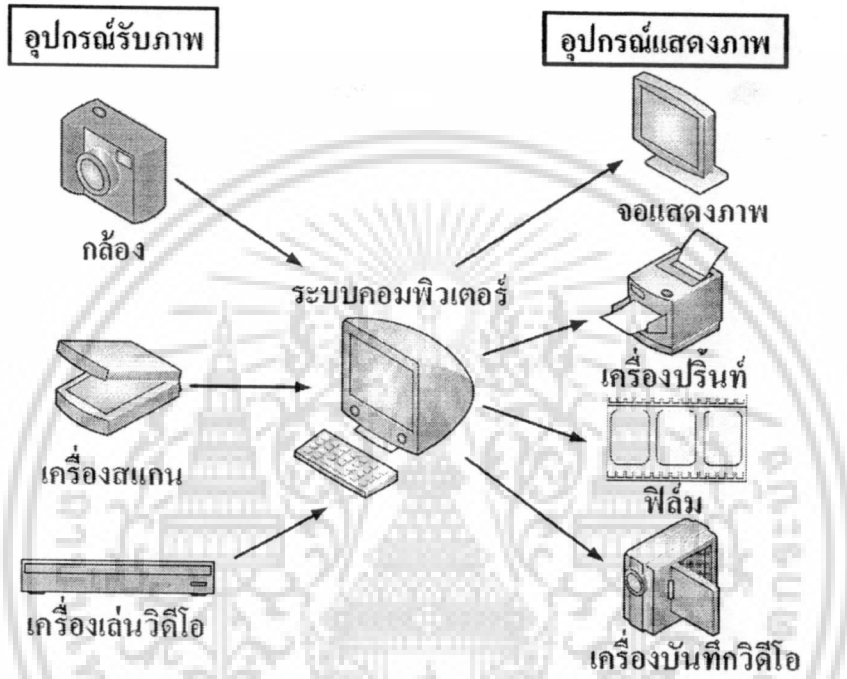
การวัดปริมาตรด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นเป็นการวัดขนาด และปริมาตรจากภาพถ่ายในแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ซึ่งมีความสะดวกในการใช้งานและติดตั้ง รวมทั้งมีความเร็วในการประมวลผลและวิเคราะห์ผล นอกจากนี้ยังช่วยอำนวยความสะดวก ลดระยะเวลาในการดำเนินงาน ให้ความถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่นยำ และช่วยลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากผู้ปฏิบัติงาน ได้อีกด้วย จะเห็นว่าวิธีการวัดปริมาตรด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการผลิตได้เป็นอย่างดี

### 2.2.1 ส่วนประกอบของระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น

อุปกรณ์รับและแสดงภาพของระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นแสดงดังรูปที่ 2-7 โดยคอมพิวเตอร์รับภาพจากกล้อง เครื่องสแกน และเครื่องเล่นวีดีโอ จากนั้นคอมพิวเตอร์จะประมวลผลภาพเหล่านี้ และแสดงผลที่อุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ จอแสดงภาพ เครื่องปริ้นท์ ฟิล์ม และเครื่องบันทึกวีดีโอ [10]



รูปที่ 2-7 อุปกรณ์รับและแสดงภาพของระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น

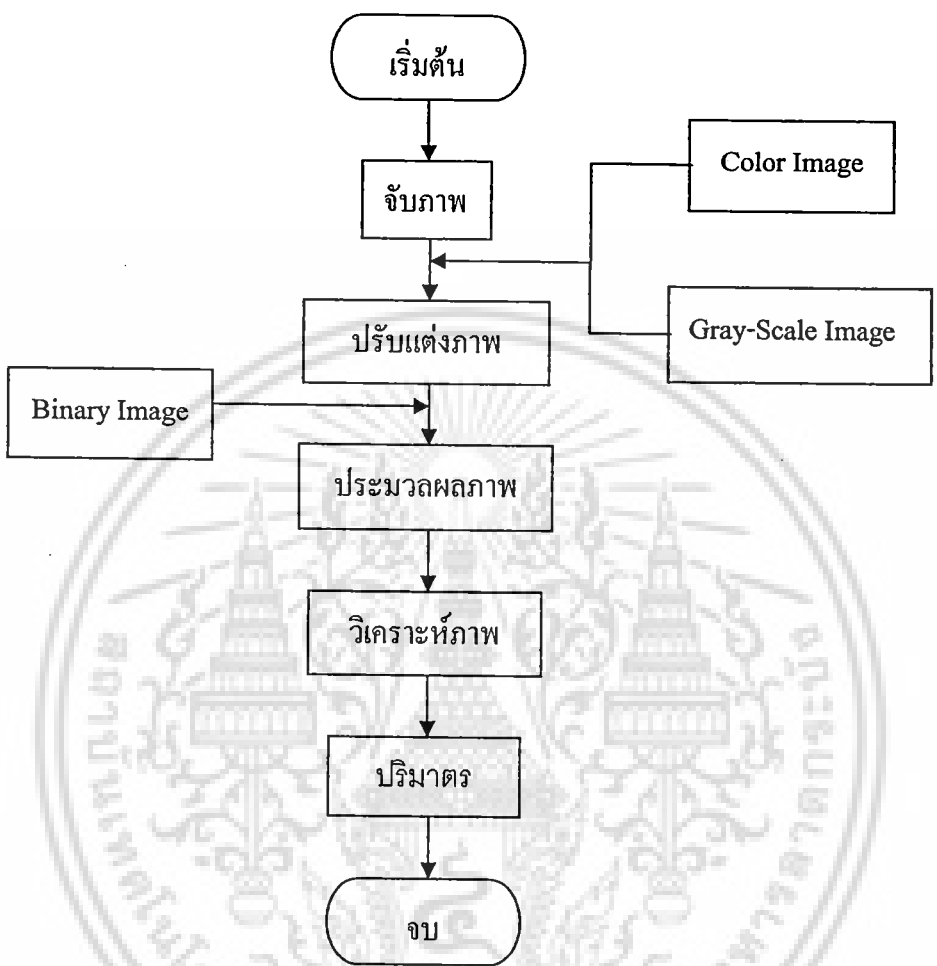
### 2.2.2 ขั้นตอนการวัดปริมาตรด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น

เก็บข้อมูลภาพของวัตถุที่ต้องการทราบปริมาตร โดยใช้อุปกรณ์รับภาพ จะได้ภาพที่เป็นภาพระดับสีเทา (Grey-Scale Image) หรือภาพสี (Color Image) ทำการปรับแต่งภาพได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นภาพฐานสอง (Binary Image) จากนั้นประมวลผลและวิเคราะห์ภาพโดยใช้โปรแกรม MATLAB จนได้ค่าปริมาตรของวัตถุ ขั้นตอนการวัดปริมาตรโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นแสดงดังรูปที่ 2-8

### 2.3 การประมวลผลภาพ

การประมวลผลภาพเป็นการเรียกใช้ขั้นตอนหรือกรรมวิธีใดๆ มากระทำกับภาพ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพให้ได้ภาพใหม่ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ [19] ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมวลผลภาพสำหรับเทคนิคการวิเคราะห์ภาพสองมิติ เทคนิคการวิเคราะห์ภาพสามมิติ และเทคนิคการวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วน ดังนี้



รูปที่ 2-8 ขั้นตอนการวัดปริมาตร โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น ที่มา : [10]

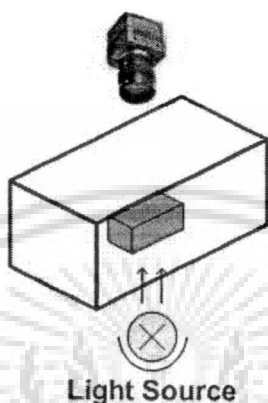
2.3.1 การประมวลผลภาพสำหรับเทคนิคการวิเคราะห์ภาพสองมิติ

เทคนิคการวิเคราะห์ภาพสองมิติเป็นการวัดปริมาตรโดยใช้ภาพถ่ายที่มองเห็นวัตถุในมุมมองสองมิติ คือ แกน x และแกน y การวัดปริมาตรด้วยวิธีนี้ใช้ภาพถ่ายสองมิติสองมุมมอง ภาพถ่ายมุมแรกใช้ในการหาพื้นที่ของวัตถุ และภาพถ่ายมุมที่สองใช้ในการหาความสูงของวัตถุ จากนั้นนำภาพทั้งสองมาคำนวณเป็นปริมาตร การถ่ายภาพในเทคนิคการวิเคราะห์ภาพสองมิติแสดงดังรูปที่ 2-9 ซึ่งได้นำเทคนิค ไฟล์หลัง (Back-lighting) มาใช้ในการถ่ายภาพ [20]

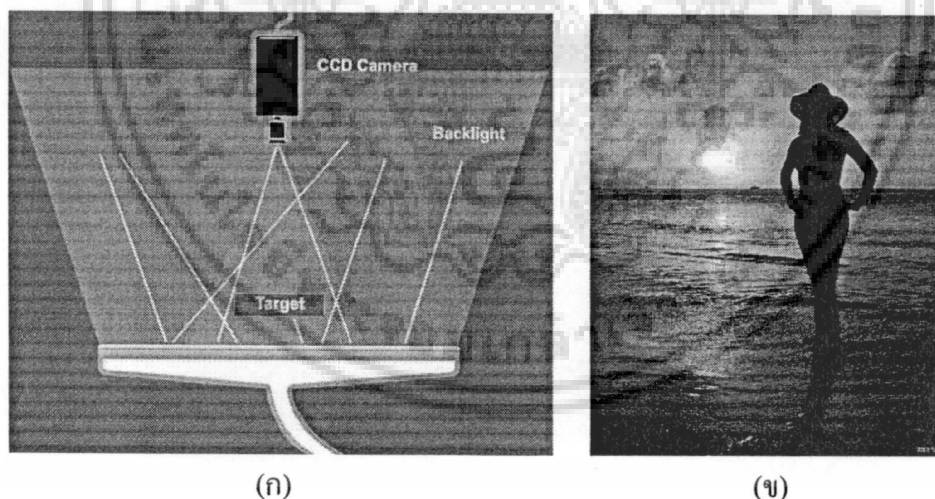
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.1 เทคนิคไฟหลัง

เทคนิคไฟหลัง (Back-lighting) เป็นการส่องไฟมาจากด้านหลังของวัตถุที่จะถ่าย ใช้แหล่งไฟที่มีขนาดย่อม เพื่อช่วยให้วัตถุเกิดความเด่นชัด โดยภาพวัตถุที่ได้จะเป็นภาพเงาคำที่ปรากฏบนพื้นหลังที่สว่างหรืออ่อนกว่าดังแสดงในรูปที่ 2-10 [20]



รูปที่ 2-9 การถ่ายภาพในเทคนิคการวิเคราะห์ภาพสองมิติ

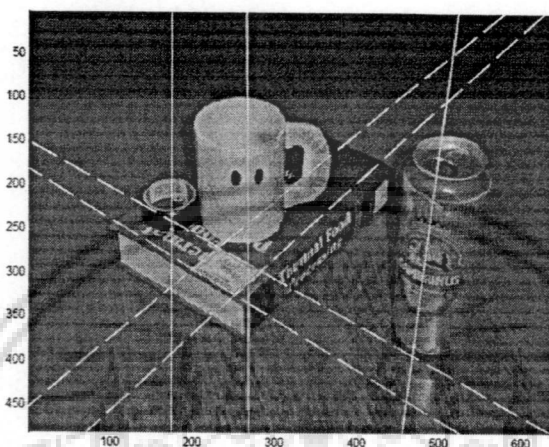


รูปที่ 2-10 (ก) ส่วนประกอบของเทคนิคไฟหลัง (ข) ภาพวัตถุที่ถ่ายโดยใช้เทคนิคไฟหลัง

### 2.3.2 การประมวลผลภาพสำหรับเทคนิคการวิเคราะห์ภาพสามมิติ

เทคนิคการวิเคราะห์ภาพสามมิติเป็นการวัดปริมาตรจากภาพถ่าย 3 มิติ ซึ่งภาพถ่าย 3 มิติ คือภาพที่มีลักษณะเหมือนจริง อยู่ในรูปทรง 3 มิติ ที่มีทั้งแกน x แกน y และแกน z แสดงดังรูปที่ 2-11 การวัดปริมาตรด้วยวิธีนี้ทำได้โดยการสอบเทียบระยะทางของวัตถุที่รู้ระยะทางจริง ซึ่งจะช่วยให้รู้ขนาดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุอื่นๆในทิศทางเดียวกันกับวัตถุที่รู้ระยะทางจริง โดยการสอบเทียบจำนวนพิกเซลกับระยะทางจริง ตัวอย่างเช่นจากรูปที่ 2-11 ถ้ารู้ความสูงจริงของแก้วจะได้ค่าสอบเทียบที่เป็นพิกเซลไปใช้ในการวัดความสูงของวัตถุอื่นๆ จากนั้นนำค่าพิกเซลที่ได้จากการสอบเทียบนี้ไปหาค่าความสูงของหนังสือ ความสูงของกระป๋อง และความสูงของเทปขาว ซึ่งอยู่ในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้การวัดระยะในทิศทางอื่นๆ สามารถทำได้โดยอาศัยหลักการดังกล่าว จากนั้นนำระยะที่ได้ไปคำนวณเป็นค่าปริมาตรต่อไป [21]



รูปที่ 2-11 ภาพถ่ายสามมิติ

ที่มา : [21]

### 2.3.2.1 ทฤษฎีโฮโมกราฟีทรานส์ฟอร์ม

โฮโมกราฟีทรานส์ฟอร์ม (Homography Transform) เป็นการแปลงระหว่างพิกัดจริงกับพิกัดระนาบของภาพที่เป็นผลมาจากการรับภาพของกล้อง ซึ่งเป็นลักษณะการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ การหาค่าโฮโมกราฟีเมทริกซ์ (Homography Matrix) ที่เป็นการแปลงระหว่างพิกัดจริงกับพิกัดของรูปภาพ ส่วนมากนิยมใช้ความสัมพันธ์ของจุดที่อยู่บนพิกัดจริงกับพิกัดรูปภาพที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน และเป็นจุดพิกัดที่ทราบค่าเป็นตัวช่วยในการประมาณค่าโฮโมกราฟีเมทริกซ์ (H) ดังจะเห็นจากสมการ (2.10) [22]

$$p' = Hp \quad (2.28)$$

เมื่อ  $p$  เป็นจุดที่อยู่บนระบบพิกัดของภาพ (Image Coordinate)

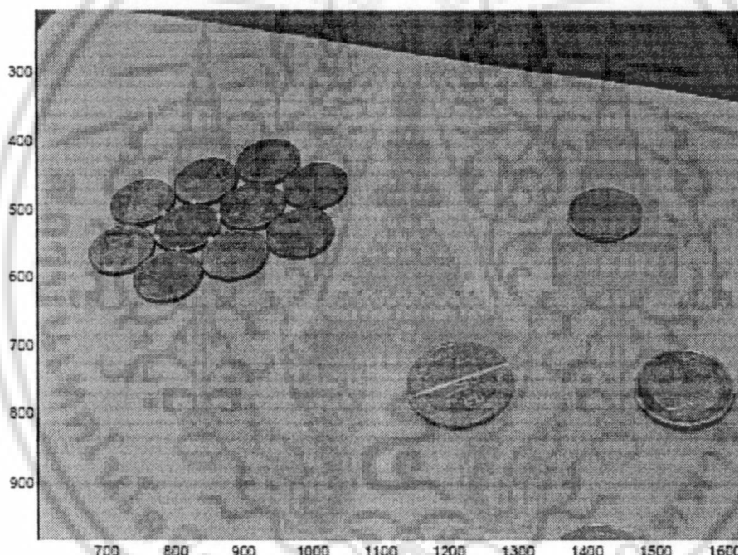
$p'$  เป็นจุดที่อยู่บนระบบพิกัดจริง (Real World Coordinate)

H เป็นโฮโมกราฟีเมทริกซ์ (Homography Matrix)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2. 3.2.2 การหาค่าระยะทางจริงบนระนาบของรูปภาพ

ใช้โฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ในการประมาณระยะทางจากรูปภาพ เมื่อรู้ระยะทางจริงของวัตถุหนึ่งๆ ก็สามารถประมาณระยะทางของวัตถุอื่นๆ ได้ [21] กล่าวคือถ้ารู้เส้นผ่านศูนย์กลางของเหรียญ 2 เซนต์ และค่าโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์แล้ว ก็จะสามารถหาค่าอื่นๆ ที่อยากรู้ได้ดังรูปที่ 2-12 เมื่อรู้ว่าเหรียญ 2 เซนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.3025 มิลลิเมตร ดังนั้นจากการคำนวณ โดยใช้โฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ ก็จะได้ว่าเหรียญ 2 ยูโรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 39.2017 มิลลิเมตร

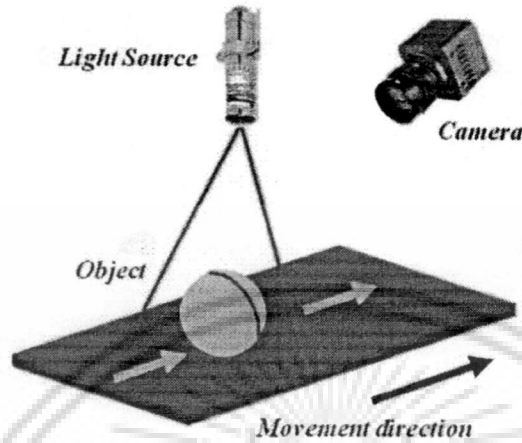


รูปที่ 2-12 การประมาณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเหรียญ 2 ยูโร จากเหรียญ 2 เซนต์  
ที่มา : [21]

### 2. 3.3 การประมวลผลภาพสำหรับการวัดปริมาตรโดยใช้เทคนิคการวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วน

เทคนิคการวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนแสดงดังรูปที่ 2-13 การวัดปริมาตรด้วยวิธีนี้ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นจะมองลักษณะของแสงเลเซอร์สีแดงบนพื้นผิววัตถุขณะเคลื่อนที่ผ่านแสงเลเซอร์สีแดงซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ และทำการวัดออกมาเป็นตัวเลข โดยมีสองขั้นตอนหลักในการวัดแบบสามมิติคือ แยกโครงสร้างสองมิติของแต่ละส่วนจากภาพและสร้างพื้นผิวสามมิติจากการรวมแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน [23] ภาพลักษณะของแสงเลเซอร์ที่เอกลำเป็นเป็นเอกลำที่สองแนวเส้นสำหรับแบ่งในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นไปเซบระไฮชันด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉายไปบนพื้นผิววัตถุจะถูกเก็บบันทึกด้วยกล้องในรูปแบบไฟล์วิดีโอ โฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มจะ ถูกนำมาใช้เพื่อแปลงภาพเส้นแสงเลเซอร์ให้เป็นระยะทางจริงของวัตถุ [24][25]



รูปที่ 2-13 อุปกรณ์สำหรับเทคนิคการวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วน  
ที่มา : [12]

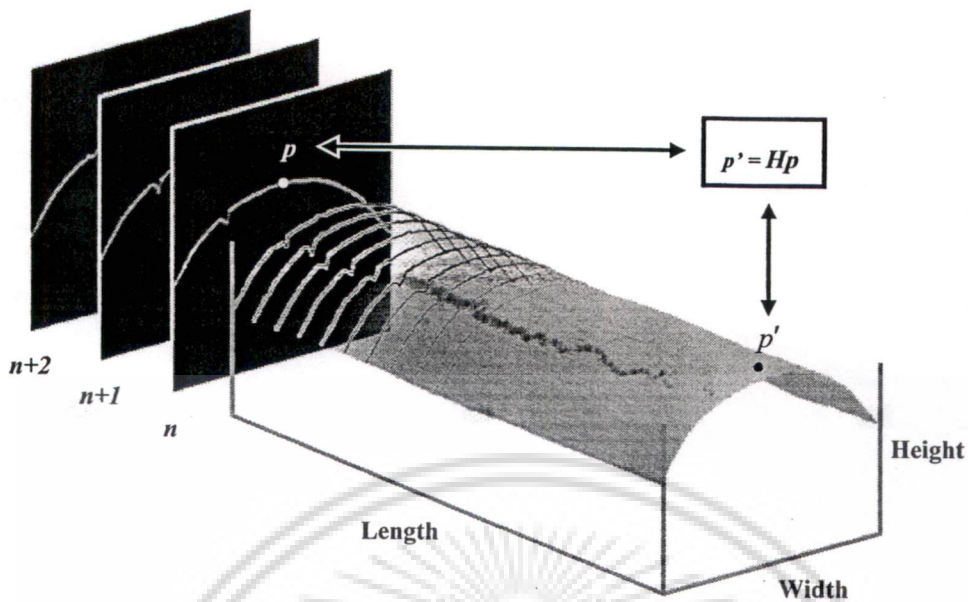
### 2. 3.3.1 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีโฮโมกราฟฟีและแสงเลเซอร์แบ่งส่วนในการตรวจวัดขนาดวัตถุ

ในการแปลงขนาดวัตถุที่อยู่ในหน่วยพิกเซลไปเป็นขนาดที่เป็นพิกัดจริงในหน่วยวัดมาตรฐาน เช่น มิลลิเมตร และเซนติเมตร เป็นต้น จำเป็นต้องนำเอาทฤษฎีโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มมาใช้ในการแปลงขนาดวัตถุ โดยการแปลงพิกัดบนระนาบของภาพให้เป็นพิกัดจริงเพื่อคำนวณออกมาเป็น ความกว้างและความหนาของวัตถุ ส่วนความยาวของวัตถุนั้น ได้จากการเลื่อนวัตถุแล้วใช้กล้อง วิดีโอจับภาพในเฟรมตัดไปจนครบทั้งวัตถุ เมื่อนำภาพแต่ละเฟรมมารวมกันจะได้เป็นความยาวของ วัตถุนั้นๆ ซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุจะต้องสัมพันธ์กับความเร็วในการจับภาพของกล้อง วิดีโอ การประยุกต์ใช้ทฤษฎีโฮโมกราฟฟีในการตรวจวัดขนาดวัตถุแสดงดังรูปที่ 2-14 [12][21]

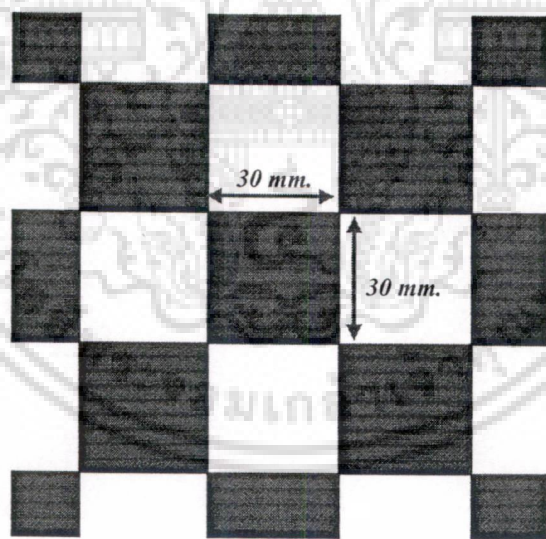
### 2. 3.3.2 การสอบเทียบ

การสอบเทียบเป็นการหาค่าโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการแปลงจุดพิกัด ภาพเป็นพิกัดจริง การหาค่าโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์สามารถหาได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง ของจุดที่อยู่บนพิกัดภาพกับตำแหน่งของจุดที่อยู่บนพิกัดจริงที่ทราบค่าตำแหน่งของจุดอย่างน้อย 4 จุดเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ ดังนั้นจึงใช้ตารางหมากรุกในการสอบเทียบ ซึ่งในแต่ละช่องของตารางหมากรุกจะมีความกว้างและความยาวเท่ากับ 30 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 2-15 [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-14 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีโฮโมกราฟฟีในการตรวจวัดขนาดวัตถุ  
ที่มา : [12]



รูปที่ 2-15 ตารางหมากรุกขนาด 30 x 30 mm ที่ใช้ในการสอบเทียบ  
ที่มา : [12]

2. 3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบคอมพิวเตอร์วิชั่น

Karplus *et al.* (1999)[26]ศึกษาการแยกปลาพันธุ์ต่างๆ ออกจากกัน โดยใช้สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับพื้นที่ภาพฉาย และความยาวของปลา การแยกปลาพันธุ์เกรย์มุลเลข เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกจากปลาพันธุ์อื่นๆ จะแยกโดยใช้ส่วนลำตัว การแยกปลาพันธุ์คาร์พออกจากพันธุ์เซนต์ปีเตอร์ แยกโดยใช้ส่วนหาง สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับพื้นที่ภาพฉายของปลาพันธุ์เกรย์มุลเลท คาร์พ และเซนต์ปีเตอร์คือ 0.954 0.968 และ 0.986 ตามลำดับ ความยาวของปลาสามารถคำนวณได้จากใบนารีอิมเมจ ซึ่งมีสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวที่ได้จากการคำนวณและความยาวจริงเป็น 0.95 0.997 และ 0.983 ตามลำดับ

Alexios *et al.* (2003)[27] ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่องจักรเพื่อประมาณคุณภาพของส้ม ลูกพีช และแอปเปิ้ล การประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคนี้ทำได้โดยการวัดขนาดสี ตำแหน่งก้าน และการตรวจจ็บรอยตำหนิภายนอก ทำการทดสอบเทคนิคนี้โดยใช้แอปเปิ้ลในการตรวจจ็บรอยตำหนิภายนอกและขนาด ประสิทธิภาพของเทคนิคนี้อยู่ที่ 86 และ 93% ตามลำดับ ซึ่งความแม่นยำของระบบนี้เทียบเท่ากับการคัดขนาดโดยใช้คน

Brosnan and Sun (2004)[28] ศึกษาและพัฒนาระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นซึ่งเป็นระบบอัตโนมัติที่ไม่ทำลายผลิตภัณฑ์ และมีประสิทธิภาพสูง สามารถนำมาใช้งานได้จริง ระบบที่ทำการวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์รูปภาพผักและผลไม้ในโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งเน้นไปที่ศักยภาพของการตรวจจ็บและคัดคุณภาพผักและผลไม้ นอกจากนี้ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นยังถูกนำมาปรับใช้สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพของเนื้อวัว ปลา พืชชา ซีส และขนมปัง โดยระบบนี้มีค่าความแม่นยำอยู่ระหว่าง 81 – 99%

Inthuset *et al.* (2009)[29] ศึกษาและพัฒนาวิธีการวัดขนาดและปริมาตรจากคุณลักษณะสามมิติของวัตถุด้วยระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ โดยใช้วัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและทรงกระบอกมาทดสอบประสิทธิภาพของระบบ อีกทั้งยังนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดขนาดปลาชนิด แล้วเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการทดลองกับวิธีการวัดด้วยการใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการวัดค่าความหนาและความกว้าง 5.669 และ 10.309 % ตามลำดับ ระบบนี้เป็นประโยชน์ในการออกแบบเครื่องมือคัดแยกอัตโนมัติและเป็นระบบที่ไม่ทำลายวัตถุ

Nunak and Suesut (2009)[21] ศึกษาวิธีการวัดค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตของแอปเปิ้ล ส้ม และมะนาว จากนั้นคำนวณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตจากภาพถ่ายสามมิติโดยใช้ระบบการวิเคราะห์ภาพด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งมีการฉายแสงเลเซอร์ไปยังวัตถุนั้นๆ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตของวัตถุสามารถคำนวณได้จากภาพถ่ายเพียงภาพเดียว วิธีนี้ใช้ได้ดีกับวัตถุที่มีรูปร่างสมมาตร ตัวอย่างเช่น ส้มและมะนาว แต่เมื่อใช้วิธีนี้กับวัตถุที่มีรูปทรงไม่สมมาตรและไม่เป็นรูปทรงทางเรขาคณิตจะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง วิธีนี้สามารถวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตของแอปเปิ้ล ส้ม และมะนาว โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.03-5.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

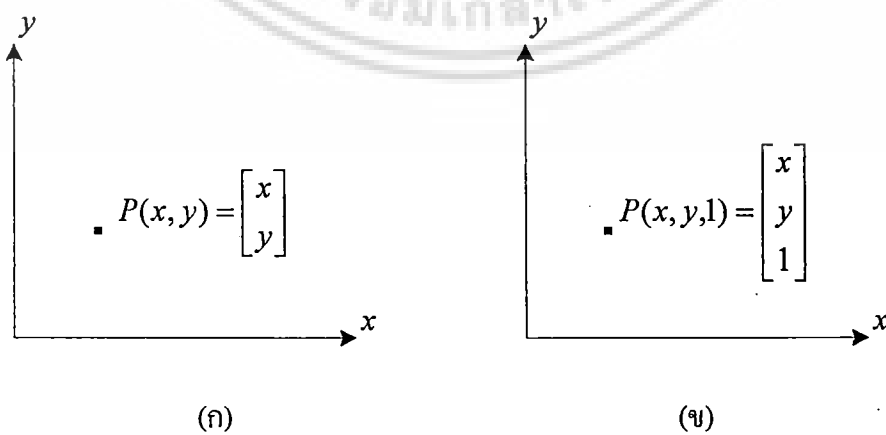
## บทที่ 3

### การแปลงเชิงเรขาคณิตและทฤษฎีของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม

ในบทนี้จะได้นำเสนอรายละเอียดและวิธีการเกี่ยวกับทฤษฎีทางการประมวลผลภาพ สำหรับรายละเอียดที่นำเสนอในบทนี้ จะเริ่มต้นอธิบายถึงการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพแบบจำลองของกล้องคิจิตอลและทฤษฎีของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม และสุดท้ายจะอธิบายหลักการของการหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์จากจุดบนพิกัดภาพและพิกัดจริง

#### 3.1 การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric Transformation)

ในงานทางการประมวลผลรูปภาพ[29]บางครั้งจำเป็นต้องมีการเคลื่อนย้ายภาพไปยังตำแหน่งใหม่ ย่อขยายภาพ หรือมีการหมุนภาพให้อยู่ในมุมมองที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric Transformation) การพิจารณาการแปลงนั้นเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายจึงมักจะเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ สำหรับการแปลงเชิงเรขาคณิตโดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วย การแปลงหลายๆชนิดประกอบกันและเนื่องจากการคำนวณในรูปแบบของเมทริกซ์ จึงทำให้ยากในการคำนวณเมทริกซ์ที่แตกต่างกัน จึงได้มีการนำระบบพิกัดโฮโมจีเนียส (Homogeneous Coordinate) เข้ามาใช้เพื่อแก้ปัญหานี้ โดยทำการจัดรูปแบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate) จาก  $(x, y)$  เพื่อให้อยู่ในแบบของระบบพิกัดโฮโมจีเนียส คือ  $(xw, yw, w)$  โดยจะมี  $w$  เป็นค่าเฟกเตอร์การสเกลที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ จุด  $(xw, yw, w)$  จะถูกนอร์มอลไลซ์ (Normalize) โดยทั่วไปเราสามารถเลือกค่า  $w$  เป็นจำนวนจริงบวกใดๆก็ได้แต่เพื่อความสะดวกในการหาผลลัพธ์ในทางคณิตศาสตร์มักจะกำหนดให้ค่าของ  $w = 1$  ดังนั้นพิกัดโฮโมจีเนียสก็คือ  $(x, y, 1)$



รูปที่ 3-1 แสดงระบบพิกัด (ก) Cartesian coordinate (ข) Homogeneous coordinate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 การเลื่อนภาพ (Translation)

การเลื่อนภาพเป็นการเลื่อนตำแหน่งของภาพตามระยะการขจัดทางแนวแกน  $x$  ( $T_x$ ) และตามแนวแกน  $y$  ( $T_y$ ) เมื่อกำหนดให้พิกัดเดิมคือ  $(x, y)$  และพิกัดใหม่คือ  $(x', y')$  จะได้สมการของการเลื่อนภาพดังนี้คือ

$$x' = x + T_x \quad (3.1)$$

$$y' = y + T_y \quad (3.2)$$

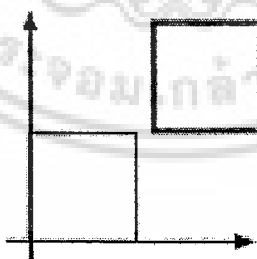
ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ มีลักษณะดังนี้คือ  $P' = P + T$  เมื่อ

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ดังนั้นการเลื่อนสามารถจัดอยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสเมทริกซ์จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

การเลื่อนเป็นการแปลงที่มีประโยชน์มากในการประมวลผลภาพตัวอย่างเช่น การเลื่อนพิกัดของภาพมายังจุดกำเนิด  $(0,0,0)$



รูปที่ 3-2 การเลื่อนพิกัดของภาพ

### 3.1.2 การย่อขยายภาพ (Scaling)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเอกสารเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสมการของการสเกลจะมีลักษณะดังนี้

$$x' = x \cdot S_x \quad (3.4)$$

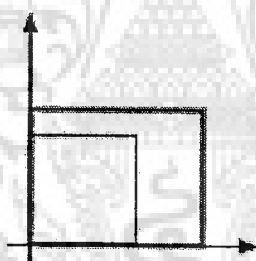
$$y' = y \cdot S_y \quad (3.5)$$

ย่อและขยายภาพโดยใช้เมทริกซ์จะมีลักษณะดังนี้คือ  $P' = S \cdot P$  เมื่อ

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

ดังนั้นการย่อและขยายภาพจัดสามารถอยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสเมทริกซ์จะได้เป็น

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

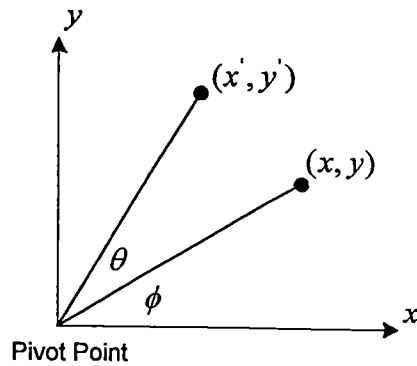


รูปที่ 3-3 การขยายขนาดของภาพ

### 3.1.3 การหมุน (Rotation)

การหมุนภาพเป็นการแปลงรูปแบบของภาพที่จะต้องกำหนดว่าจุดใดจุดหนึ่งเป็นจุดหมุน (Pivot point) เสมอ หลังจากหมุนภาพไปแล้วระยะห่างระหว่างจุดหมุนกับภาพจะยังคงมีค่าเท่าเดิม รูปร่างและลักษณะของภาพก็ยังคงเดิมแต่ภาพจะมีการจัดวางที่ต่างไปจากเดิม เนื่องมาจากการหมุนนั่นเอง การหมุนภาพอาจจะหมุนที่หลายๆภาพก็ได้จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา (ค่ามุมเป็นบวก) หรือ หมุนตามเข็มนาฬิกาก็ได้ (ค่ามุมเป็นลบ) และจุดหมุนที่ใช้ อาจจะอยู่ภายในภาพหรือภายนอกภาพก็ได้

การอ้างถึงจุดพิกัด  $(x, y)$  นั้น นอกจากจะใช้ระบบพิกัดฉากแล้ว อาจจะใช้ระบบพิกัดโพล่า (การบอกตำแหน่งจุดโดยใช้ Vector) ก็ได้ ซึ่งทั้งสองระบบมีความสัมพันธ์กันดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-4 ระบบพิกัด Polar การบอกตำแหน่งจุดโดยใช้ Vector

จากรูปที่ 6.1 จะได้ว่า

$$x = r \cos(\phi) \quad (3.8)$$

$$y = r \sin(\phi) \quad (3.9)$$

และ

$$x' = r \cos(\phi + \theta) = r(\cos \phi \cos \theta - \sin \phi \sin \theta) \quad (3.10)$$

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

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (3.10) และ (3.11) จะได้สมการของการหมุนรอบจุด Pivot Point ดังนี้คือ

$$x' = x \cos(\theta) - y \sin \theta \quad (3.11)$$

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

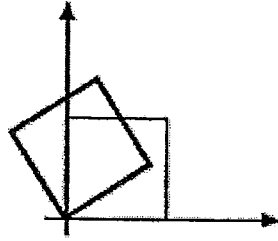
ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ มีลักษณะดังนี้คือ  $P' = R \cdot P$  เมื่อ

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

ดังนั้นการหมุนสามารถจัดอยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์จะได้เป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-5 การหมุนของภาพ

### 3.1.4 การบิดภาพ (Shearing)

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

$$x' = x \quad , \quad y' = y + x \cdot shY \quad (3.15)$$

การบิดภาพทางแกน  $y$  จะทำให้จุดต่างๆในแกน  $y$  เลื่อนขึ้นหรือลงขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ Shy factor จากสมการการบิดภาพดังกล่าว สามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้ดังนี้

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

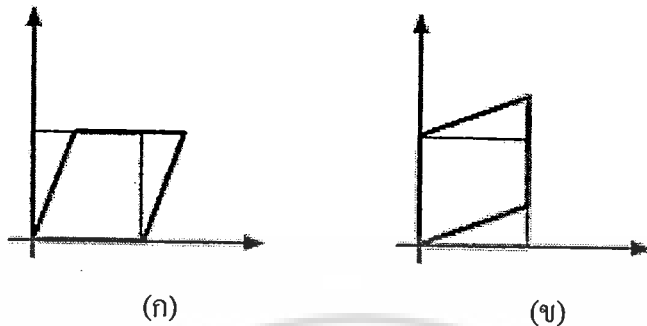
สำหรับการบิดภาพทางแกน  $x$  จะให้ผลตรงกันข้ามกับการบิดภาพทางแกน  $y$  กล่าวคือจุด  $(x, y)$  ของภาพจะถูกแปลงไปเป็นจุด  $(x', y')$  โดยที่

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

การบิดภาพทางแกน  $x$  จะทำให้จุดต่างๆในแกน  $x$  เลื่อนขึ้นหรือลงขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ Shy factor จากสมการการบิดภาพดังกล่าว สามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



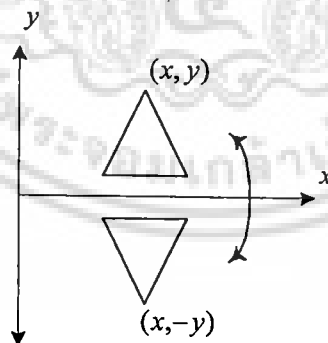
รูปที่ 3-6 การบิดของภาพ (ก) การบิดภาพทางแกน x (ข) การบิดภาพทางแกน y

### 3.1.5 การสะท้อน (Reflection)

การสะท้อนเป็นการแปลงที่จะสร้างภาพของวัตถุในลักษณะของกระจก โดยจะทำการหมุนภาพต้นแบบไป 180 องศา รอบแกนการสะท้อน ซึ่งในที่นี้เราจะพิจารณาการสะท้อนอยู่ 3 แบบดังนี้

#### 3.1.5.1 การสะท้อนตามแกน x

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



รูปที่ 3.7 การสะท้อนตามแกน x

การสะท้อนกับแกน x สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$x' = x \quad (3.19)$$

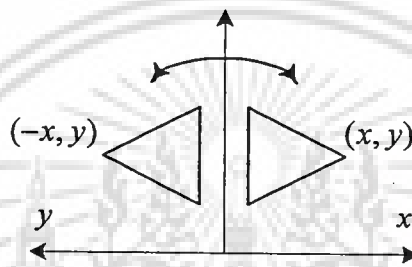
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $y' = -y$  ศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.20) การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

### 3.1.5.2 การสะท้อนตามแกน y

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



รูปที่ 3-8 การสะท้อนตามแกน y

การสะท้อนกับแกน  $y$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$x' = -x \quad (3.22)$$

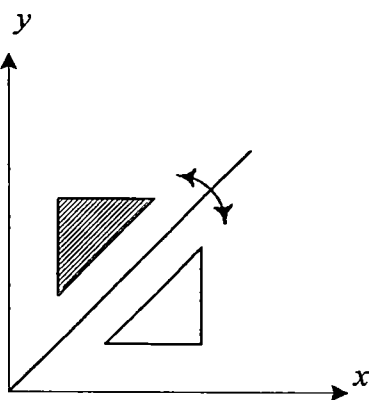
$$y' = y \quad (3.23)$$

และสามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

### 3.1.5.3 การสะท้อนรอบเส้นตรงใด ๆ

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

รูปที่ 3-9 การสะท้อนรอบเส้นตรง  $y = x$ 

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

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

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

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

จากการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบพื้นฐานได้กล่าวถึงไปแล้ว โดยทั่วไปการประมวลผลภาพในเรื่องการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพจะเป็นการแปลงหลายๆชนิดร่วมกัน หรือเรียกว่าการแปลงแบบผสม (Multiple Transformations) ตัวอย่างเช่นในระบบ 3 มิติการหมุนในสองแกนก็สามารถหาเมทริกซ์การแปลงของการหมุนได้โดยการนำเมทริกซ์การแปลงของการหมุนรอบแกนในแต่ละแกนมาคูณกัน แต่มีข้อควรระวังว่าการคูณของเมทริกซ์นั้นจะไม่มีคุณสมบัติของการสลับที่ หากมีการสลับตำแหน่งของการคูณกันแล้วจะให้ผลลัพธ์ที่ไม่เท่ากัน

ส่วนในกรณีที่มีการหมุนและการเคลื่อนย้ายพิคคิ้ว ก็สามารถหาเมทริกซ์การแปลงได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้กรณี 2 มิติ โดยมีลำดับการแปลงคือเคลื่อนย้ายจุดก่อนแล้วจึงหมุนตามลำดับ จะได้เป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

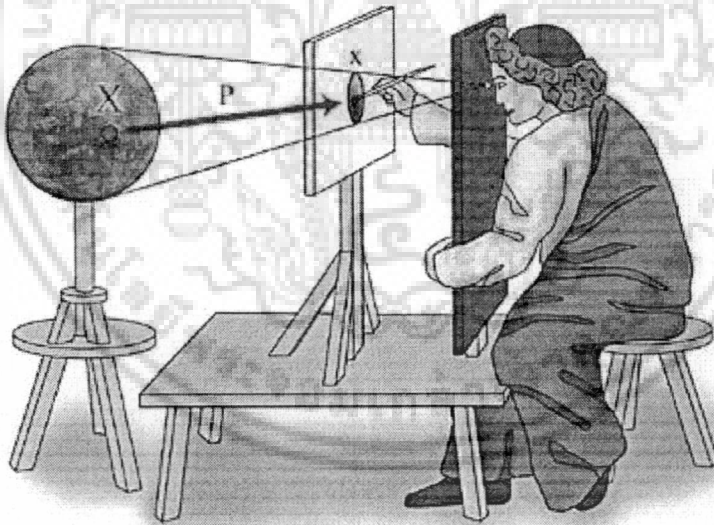
$$M = [T][R] \quad (3.27)$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

สำหรับการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบอื่นๆที่มีรวมกันของการแปลงแบบต่างๆ ก็สามารถที่จะหาเมทริกซ์ของการแปลงได้ในทำนองเดียวกันนี้

### 3.2 การโปรเจกชัน (Projections)

โดยทั่วไปการโปรเจกชันจะเป็นการแปลงจาก  $n$  มิติไปเป็น  $n-1$  มิติ [29] เมื่อสมมุติให้มีวัตถุสามมิติที่จะถูกโปรเจก (Projected) ลงบนระนาบของการโปรเจก (Projection Plane) โดยมีผู้สังเกตลักษณะการโปรเจกของวัตถุ และเพื่อให้สามารถมองลักษณะการโปรเจกชันได้จึงต้องกำหนดให้วัตถุและผู้สังเกตอยู่คนละข้างกันของระนาบการโปรเจก

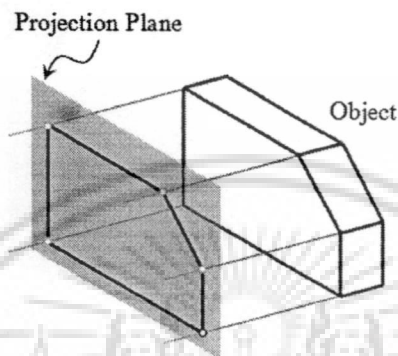


รูปที่ 3.10 หลักการของการโปรเจกชัน

การโปรเจกชันสามารถแบ่งได้เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Projections) และแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Projections) โดยที่ในส่วนของการโปรเจกชันแบบเชิงเส้นจะประกอบด้วย 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ การโปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections) และ การโปรเจกชันแบบเพอสเปกทิฟเอ (Perspective Projections) ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 การโปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections)

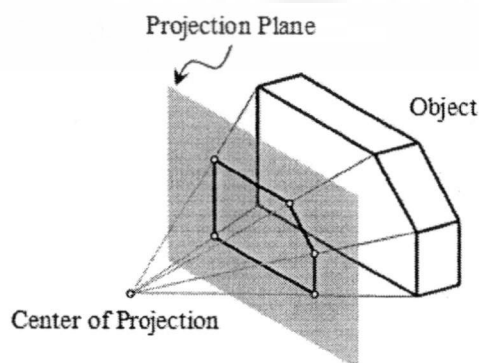
หลักการของการโปรเจกชันแบบขนานคือ ฉายไปตามทิศทางที่กำหนดไว้ขึ้นไปปรากฏเป็นจุดใหม่บนระนาบการโปรเจกซึ่งเป็น 2 มิติ โดยที่แสงและเงาของวัตถุที่ฉายจะพุ่งขนานกันไป กระทบกับระนาบของการโปรเจกและขนาดของรูปที่ได้จากการโปรเจกแบบนี้จะมีขนาดเท่ากับขนาดของวัตถุ ส่วนใหญ่การโปรเจกชันแบบขนานนี้ถูกใช้ในการวาดภาพทางวิศวกรรม



รูปที่ 3-11 การ โปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections)

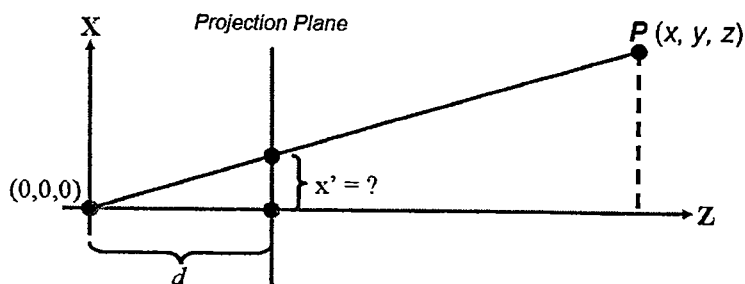
### 3.2.2 การโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projections)

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



รูปที่ 3-12 การ โปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projections)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-13 คุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายจากการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ

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

$$\frac{x'}{d} = \frac{x}{z} \quad (3.29)$$

$$\frac{y'}{d} = \frac{y}{z} \quad (3.30)$$

จากสมการที่ (3.29) และ (3.30) นำ  $d$  คูณตลอดจะได้เป็น

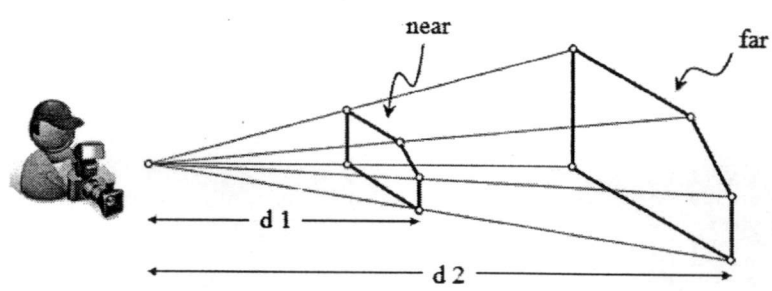
$$x' = \frac{d \cdot x}{z} \quad (3.31)$$

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

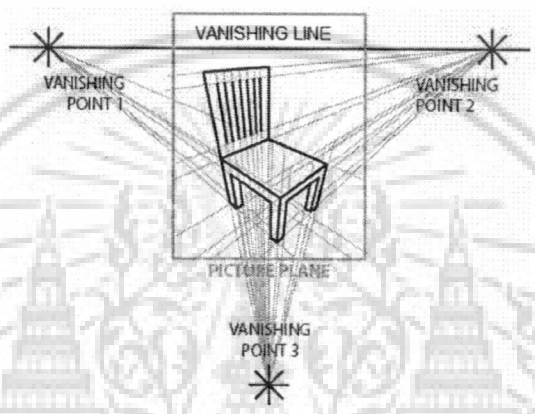
ดังนั้นการโปรเจกภาพจากจุด  $P(x, y, z)$  ไปยังจุดบนระนาบของการโปรเจก  $P'(x', y', z')$  จะได้เป็น

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

นอกจากความสัมพันธ์แบบผกผันกับระยะห่างระหว่างวัตถุกับจุดศูนย์กลางของการโปรเจกแล้วยังคุณสมบัติอีกอย่างของการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟคือ ทุกๆเส้นขนานจากวัตถุที่ขนานกับสายตาของผู้สังเกตจะลู่เข้าหาจุดที่บรรจบกันของเส้นขนาน (Vanishing Point) และจากจุดที่บรรจบกันของเส้นขนานในแต่ละด้านทางแนวขวางของวัตถุ และเส้นที่ลากตัดผ่านจุดสองจุดนี้เรียกว่าเส้นของจุดบรรจบกันของเส้นขนาน (Vanishing Line) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-14 ความสัมพันธ์ระยะทางระหว่างผู้สังเกตกับวัตถุของการ โปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ



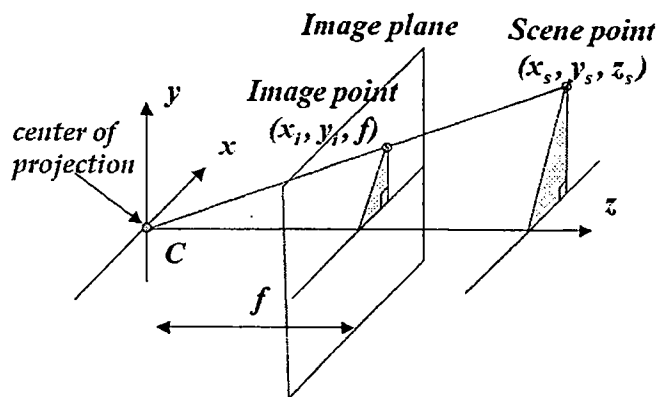
รูปที่ 3-15 แสดงลักษณะของ Vanishing Point และ Vanishing Line

### 3.3 แบบจำลองของกล้อง

#### 3.3.1 การเกิดภาพของกล้อง

ภาพ 2 มิติส่วนใหญ่ได้มาจากการมองวัตถุ 3 มิติ[29]ผ่านเลนส์ของตาหรือเลนส์ของกล้อง ขบวนการเกิดภาพสามารถถูกจำลองได้เป็นการ โปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projection) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 เป็นการแสดงแบบจำลองง่ายๆของระบบสร้างภาพ แทนแทนระบบพิกัดโลก (World Coordinate System) ด้วยตัวอักษรตัวใหญ่ ( $X, Y, Z$ ) และแทนแทนของระบบพิกัดของกล้องด้วยตัวอักษรตัวเล็ก ( $x, y, z$ ) ซึ่งในกรณีนี้สมมุติให้พิกัดของโลกซ้อนทับกับระบบพิกัดของกล้อง แสงจากวัตถุที่เป็น 3 มิติส่องผ่านศูนย์กลางของการ โปรเจกชันแล้วโปรเจกต์ลงบนระนาบของภาพ (Image Plane) ที่เป็น 2 มิติ โดยให้จุด ( $x_s, y_s, z_s$ ) แทนจุดบนพิกัดของวัตถุ 3 มิติ และให้ ( $x_i, y_i$ ) แทนจุดของวัตถุที่ถูกฉายลงในระนาบของภาพ โดยระนาบของภาพจะอยู่ห่างไปทางขวาของจุดกำเนิดของพิกัดของกล้องเป็นระยะเท่ากับ  $f$  ซึ่ง  $f$  ก็คือความยาว โฟกัสที่เกิดจากผลของเลนส์กล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-16 แบบจำลองของระบบสร้างภาพของกล้อง

จากรูปที่ 3.16 โดยการใช้กฎสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ว่า

$$\frac{x_i}{f} = \frac{x_s}{z_s} \quad (3.34)$$

$$\frac{y_i}{f} = \frac{y_s}{z_s} \quad (3.35)$$

นำค่า  $f$  คูณในสมการที่ 3.34 และ 3.35 จะได้เป็น

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

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

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

$$v = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยจุดพิกัดของวัตถุ โดยที่เวกเตอร์ในระบบพิกัดแบบโฮโมจีเนียสของ  $v$  คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

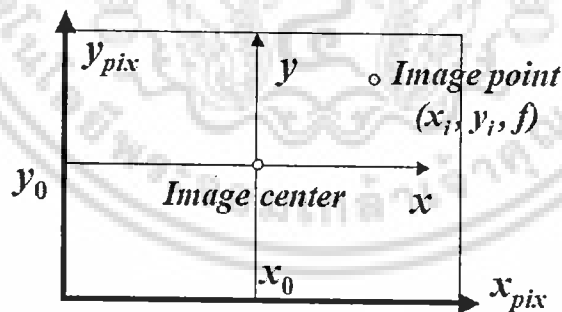
$$\tilde{v} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

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

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

### 3.3.2 พารามิเตอร์ภายใน (Internal Parameter) ของกล้อง

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



รูปที่ 3-17 พิกัดบนระนาบของภาพ

จะได้

$$x_{pix} = k_x x_i + x_0 \quad (3.41)$$

$$y_{pix} = k_y y_i + y_0 \quad (3.42)$$

จากสมการ (3.36) และ (3.37) จะได้การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_{pix} = k_x f \frac{x_s}{z_s} + x_0 \quad (3.43)$$

$$y_{pix} = k_y f \frac{y_s}{z_s} + y_0 \quad (3.44)$$

โดยที่  $k_x$  คือค่าการปรับสเกลในทิศทางแกน  $x$ ,  $k_y$  คือค่าการปรับสเกลในทิศทางแกน  $y$  และ  $s$  แทนค่าพารามิเตอร์ของการเลื่อน จากสมการ (3.43) และ (3.44) สามารถทำให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

โดยที่  $\alpha_x = k_x f$  ซึ่งเป็นค่าความยาวโฟกัสในทิศทางแกน  $x$  ในหน่วยของพิกเซลและ  $\alpha_y = k_y f$  ซึ่งเป็นค่าความยาวโฟกัสในทิศทางแกน  $y$  ในหน่วยของพิกเซล จากสมการ (3.45) สามารถจัดรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = K [I_3 | O_3] \quad (3.46)$$

โดยเมทริกซ์  $K$  มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมข้างบน (Upper Triangle) ขนาด 3x3 เรียกว่า เมทริกซ์การปรับเทียบ (Calibration Matrix) เป็นเมทริกซ์ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ภายใน (Internal Parameter or Intrinsic Parameter) ที่สำคัญของกล้อง

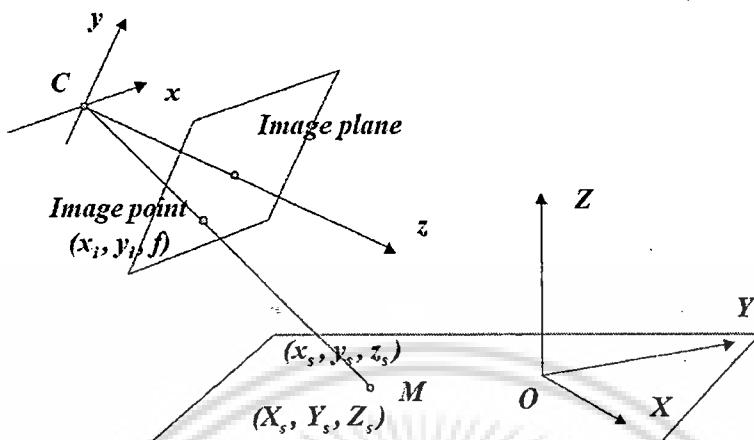
### 3.3.3 พารามิเตอร์ภายนอก (External Parameter) ของกล้อง

การหาพิกัดของภาพที่เกิดกรณีที่จุดกึ่งกลางของการโปรเจกชันของกล้องถูกวางไว้ที่จุดกึ่งกลางของระบบพิกัดอ้างอิงของโลก ไม่มีการส่ายหรือเอียงทำมุมกับแกนอ้างอิง ในกรณีนี้แบบจำลองการเกิดภาพ (Imaging Model) คือ

$$x = M_i X \quad (3.47)$$

โดยที่  $x$  คือเวกเตอร์ของจุดบนวัตถุในระบบพิกัดโฮโมจีเนียส  $X$  คือเวกเตอร์ของจุดบนระนาบการถ่ายภาพ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพในระบบพิกัดโฮโมจีเนียส และ  $M_c$  คือ เมทริกซ์การโปรเจกชันของกล้องที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ภายในของกล้อง



รูปที่ 3-18 แบบจำลองการสร้างภาพกรณีพิกัดของโลกไม่ซ้อนทับกับพิกัดของกล้อง

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

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

ดังนั้นแบบจำลองการเกิดภาพ (Imaging Model) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = K[I_3 | O_3] \begin{bmatrix} R & -T \\ O_3^T & 1 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

นำ สมการ (3.51) แทนในสมการ (3.49) จะได้ว่า

$$x = K[I_3 | O_3] \begin{bmatrix} R & -T \\ O_3^T & 1 \end{bmatrix} X \quad (3.51)$$

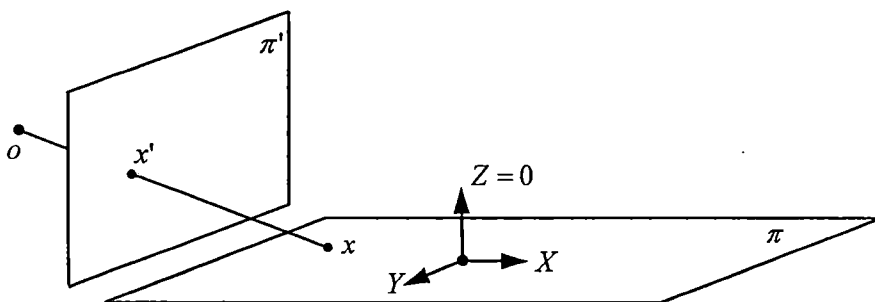
จัดให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์โฮโมจีเนียสได้เป็น

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

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

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

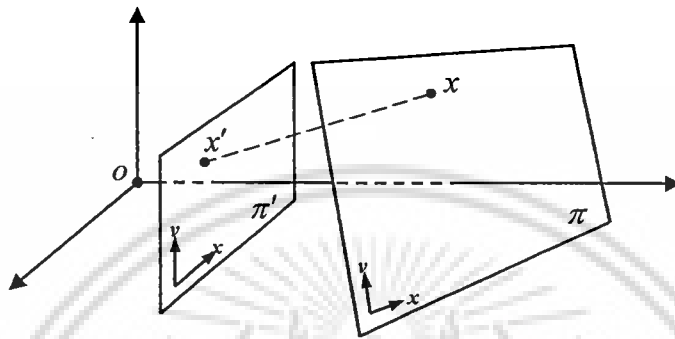
โดยจะเป็นการแปลงแบบโปรเจกทีฟของระนาบ (Plane Projective Transformations) หรือเป็นการแปลงแบบโฮโมกราฟี (Homography Transformations) ซึ่งในรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3-19 การแปลงแบบโปรเจกทีฟของระนาบ 2 มิติของกล้อง (Plane Projective Transformations) การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 โฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม

โฮโมกราฟฟีเป็นการแปลงในลักษณะการโปรเจกชัน[29]ของจุดหรือเส้นที่อยู่บนระนาบ ( $\pi$ ) โดยสามารถเรียกได้หลายชื่อเช่น Collineation, Projectivity และ Projective Transformation ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการแปลงระหว่างพิกัดจริงกับระนาบของภาพที่เป็นผลมาจากการรับภาพของกล้องที่เป็นลักษณะการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทิฟ ( $2D \rightarrow 2D$ )



รูปที่ 3-20 ความสัมพันธ์และการโปรเจกชันของจุดที่อยู่บนระนาบ

โดย Hartley และ Zisserman [15] ได้ให้คำนิยามของโฮโมกราฟฟีว่าเป็นการแปลงระนาบ  $\pi$  ที่เกิดในลักษณะของการโปรเจกชันนั่นเอง ดังนั้นถ้ามีเส้นตรงจากจุด  $x$  ที่อยู่บนระนาบ  $\pi$  ไปยังจุดศูนย์กลางของการฉาย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระนาบ  $\pi$  ไปยังระนาบ  $\pi'$  ดังนั้นจุด  $x$  บนระนาบ  $\pi$  จะถูกย้ายไปยัง  $x'$  บนระนาบ  $\pi'$  ซึ่งจุด  $x'$  จะมีตำแหน่งอยู่บนเส้นตรงที่ลากจาก  $x$  ไปยังจุดศูนย์กลางโปรเจกชัน จากความสัมพันธ์นี้สามารถอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของระนาบ  $\pi \rightarrow \pi'$  ที่เป็นลักษณะการโปรเจกชันสามารถแทนได้ด้วยเมทริกซ์  $3 \times 3$  ที่เป็น non-singular matrix และจุดใดๆบนระนาบ  $\pi$  แทนด้วยเวกเตอร์  $x$  หากมีการเปลี่ยนแปลงระนาบ  $\pi \rightarrow \pi'$  ดังนั้นตำแหน่งของจุด  $x$  นั้นจะถูกแปลงไปโดยมีค่าเท่ากับ  $Hx$

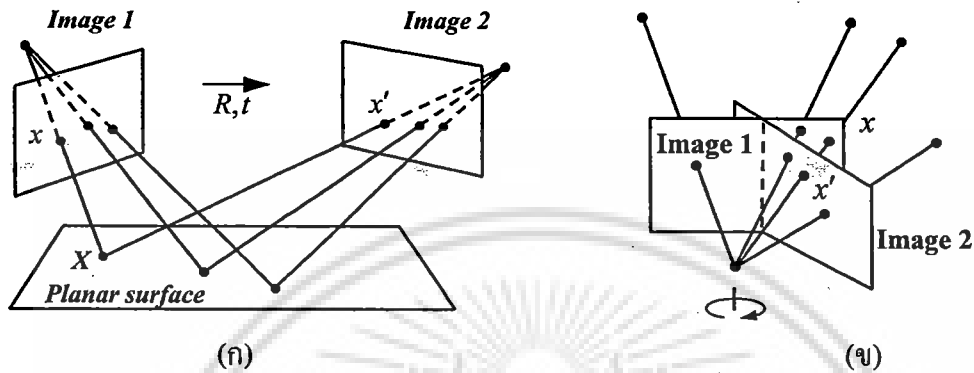
$$x' = Hx \quad (3.54)$$

เมื่อ  $x$  คือ จุดใดๆ บนระนาบ 2 มิติ,  $x'$  คือ จุด  $x$  ที่ถูกแปลงไปตามลักษณะการโปรเจกชัน,  $H$  คือ เมทริกซ์การแปลงแบบโปรเจกชันของระนาบ (Homography Matrix) โดยสามารถแทนจุด  $x$  และ  $x'$  ให้อยู่ในลักษณะของโฮโมจีเนียสเวกเตอร์ และแทน  $H$  ด้วยเมทริกซ์ non-singular ขนาด  $3 \times 3$  ดังนั้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมทริกซ์  $H$  (Homography Matrix) สามารถเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆทั้ง 9 ตัว โดยการคูณกับเฟกเตอร์การสเกล (Scale Factor) ใดๆที่ไม่เท่ากับ 0 โดยจะไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการแปลงเชิงการโปรเจกชันของเมทริกซ์  $H$  หรือสรุปได้ว่าเมทริกซ์  $H$  เป็นเมทริกซ์โฮโมจีเนียสแน่นอนและจะมีเพียง 8 degree of freedom (8 dof) จากจำนวนองค์ประกอบทั้งหมด 9 ตัวในเมทริกซ์  $H$



รูปที่ 3-21 ตัวอย่างลักษณะของการแปลงในเชิงการโปรเจกชันแบบต่างๆ

### 3.4.1 ความสัมพันธ์ของโฮโมกราฟฟีกับการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบอื่นๆ

การเปรียบเทียบโฮโมกราฟฟีกับการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพแบบอื่นๆจะช่วยให้เข้าใจถึงโฮโมกราฟฟีมากยิ่งขึ้น ซึ่งในการแปลงของภาพส่วนใหญ่จะเป็นการแปลงที่รวมการแปลงเชิงเรขาคณิตพื้นฐานเข้าด้วยกัน เช่น การหมุน การสเกล การย้ายตำแหน่ง รวมทั้งการแปลงเชิงการฉายภาพเข้าด้วยกัน โดยสามารถที่แบ่งการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพต่างๆออกเป็นกลุ่มๆได้ดังนี้

#### 3.4.1.1 Euclidian Transformation

การแปลงแบบ Euclidian เป็นการแปลงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดภาพ ซึ่งหมายความว่าระยะห่างระหว่าง 2 จุดบนภาพจะคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะมีการหมุนและการย้ายตำแหน่งของภาพไปจากเดิม โดยการแปลงแบบ Euclidian จะมีเพียง 3 degree of freedom (3 dof) ซึ่งการแปลงแบบ Euclidian สามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปแบบของโฮโมจีเนียสเมทริกซ์ได้เป็น

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

หรือเขียนสมการในรูปแบบง่ายได้เป็น  
 งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

- เมื่อ  $H_E$  คือ เมทริกซ์ของการแปลง Euclidian  
 $x$  คือ เมทริกซ์การหมุนที่มีขนาด  $2 \times 2$   
 $t$  คือ เวกเตอร์การย้ายตำแหน่ง  
 $0^T$  คือ ค่า 0 ในแต่ละหลักของ  $H_E$

### 3.4.1.2 Similarity Transformation

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

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

และสามารถเขียนสมการในรูปแบบง่ายได้เป็น

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

- เมื่อ  $s$  คือ ค่าของการสเกลที่เพิ่มขึ้นในพจน์ที่เหลือจะเหมือนกับการแปลงแบบ Euclidian

### 3.4.1.3 Affine Transformation

การแปลงแบบ Affine มีความคล้ายคลึงกับการแปลงแบบ Similarity แต่ Similarity จะมีการหมุนเพียงมุมเดียวและการย่อขยายจะเท่ากันทุกแกน ส่วนการแปลงแบบ Affine จะมีมุมการหมุน 2 มุมและย่อขยายในแต่ละแกนจะไม่เท่ากัน ดังนั้นการแปลงแบบ Affine จะมี 6 dof โดยจะเพิ่มมุมที่ใช้ระบุหรือกำหนดทิศทางของสเกลและอัตราส่วนของการสเกลในแต่ละแกน ซึ่งการแปลงแบบ Affine มีผลทำให้มุมระหว่างเส้นตรงแต่ละแกนของภาพเปลี่ยนแปลงไป แต่เส้นเหล่านี้ยังคงขนานกันอยู่และเส้นตรงนี้ขนานกันจะมีความยาวของเส้นเท่ากัน นอกจากนั้นพื้นที่ของภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อคุณผู้เห็นได้โปรดอย่าเผยแพร่เอกสารนี้ การค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนถูกแปลงไปและหลังจากการถูกแปลงไปแล้วยังคงมีพื้นที่เท่ากัน การแปลง Affine สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสเมทริกซ์ได้เป็น

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

และสามารถเขียนสมการในรูปแบบง่ายได้เป็น

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

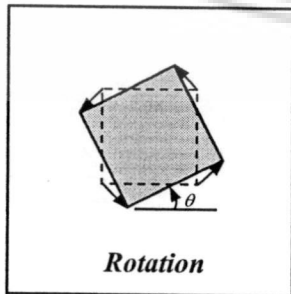
เมื่อ  $A$  คือ เมทริกซ์ Non-Singular ขนาด  $2 \times 2$  ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบออกได้เป็น

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

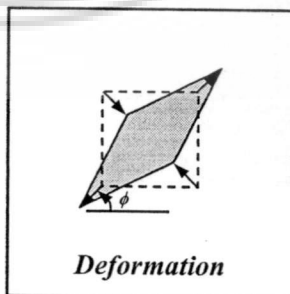
โดยที่  $R_\theta$  และ  $R_\phi$  เป็นเมทริกซ์การหมุนโดยมุม  $\theta$  และ  $\phi$  ตามลำดับ และ  $D$  เป็นเมทริกซ์ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์การสเกล 2 ตัว

$$D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \quad (3.63)$$

โดย  $\lambda_1$  เป็นการสเกลในทิศทางแกน  $x$  และ  $\lambda_2$  เป็นการสเกลในทิศทางแกน  $y$



(ก)



(ข)

**รูปที่ 3.22** การบิดเบือนของระนาบซึ่งเป็นผลของการแปลงแบบ Affine (ก) การหมุนของระนาบ

โดย  $R_\theta$  คือ (ข) การผิดรูปไปของระนาบซึ่งเป็นผลจาก  $R_{(-\phi)} D R_\phi$  ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.4 Homography หรือ Projective Transformation

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

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

เมื่อ  $V = (V_1 \ V_2)^T$  และ  $v$  เป็นค่าสเกลเฟกเตอร์ใดๆที่ไม่กับ 0 ซึ่งจะตัวที่เป็นอัตราส่วนกับองค์ประกอบอื่นๆที่เหลืออีก 8 ตัว ภายในเมทริกซ์ของการแปลงแบบ Projective

ส่วนที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างการแปลงแบบ Projective และการแปลงแบบ Affine คือ เวกเตอร์  $V$  ซึ่งจะเป็ 0 ในการแปลง Affine โดยเวกเตอร์  $V$  นี้จะเป็นส่วนที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องมาจากผลของการโปรเจกชัน ในการแปลงแบบอื่นๆที่ได้กล่าวมา อัตราส่วนของการสเกลจะเท่ากันในทุกๆจุดของภาพ แต่ในการแปลงแบบ Projective ในแต่ละตำแหน่งของภาพอัตราส่วนของการสเกลจะไม่เท่ากัน การแปลงแบบ Projective หรือ Homography สามารถแยกองค์ประกอบออกเป็นกลุ่มของการแปลงแบบต่างๆได้เป็น

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

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

$$\eta H = T R_\theta R_{-\phi} D R_\phi P \quad (3.66)$$

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

$T$  คือ เมทริกซ์การย้ายตำแหน่ง (Translation)

$P$  คือ เมทริกซ์การโปรเจกทีฟ (Projective)

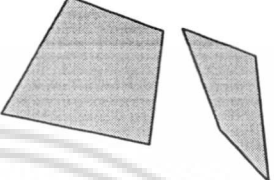
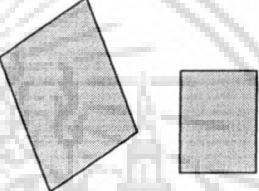
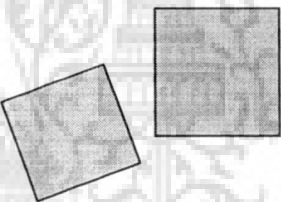
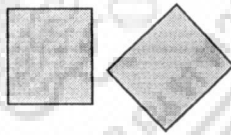
$R_\theta$  คือ เมทริกซ์ของการหมุน (Rotation)

$S$  คือ เมทริกซ์ของการสเกล (Scaling)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งรายละเอียดและขั้นตอนการแยกส่วนประกอบต่างๆของ Homography สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [15][16]ซึ่งได้อธิบายและแสดงการแยกส่วนประกอบของ Homography โดยการใช้วิธีการแยกค่าเดี่ยว (SVD) จากรูป 3.23 จะเป็นการแสดงถึงคุณสมบัติในการแปลงรูปภาพในแบบต่างๆ

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

รูปที่ 3-23 คุณสมบัติและลักษณะของการแปลงภาพแบบต่างๆ

### 3.4.2 การคำนวณและประมาณค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์

วิธีการหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ (Homography Matrix) ที่เป็นการแปลงระหว่างพิกัดจริง (Real World Coordinate) กับพิกัดรูปภาพ (Image Coordinate System) ส่วนมากนิยมใช้ความสัมพันธ์ของจุดที่อยู่บนพิกัดจริงกับพิกัดรูปภาพที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน และเป็นจุดพิกัดที่ทราบค่าเป็นตัวช่วยในการประมาณค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ ( $H$ ) ซึ่งจะเรียกหลักการของการนำความสัมพันธ์ระหว่าง 2 จุดคือ  $P \leftrightarrow P'$  ที่อยู่บนระนาบพิกัดจริงกับระนาบพิกัดของภาพมาใช้เพื่อประมาณค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ ( $H$ ) ว่า Direct Linear Transformation (DLT)[14][15] ดังนั้นจากสมการที่ 3.54 สามารถนำมาเขียนได้ใหม่เป็น  $Ax = b$  ซึ่ง  $A$  และ  $b$  เป็นเมทริกซ์และเวกเตอร์ที่ขึ้นกับพิกัดของจุดที่เลือกมา  $n$  จุดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณอื่นๆ ได้  $n$  ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 4 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

จัดสมการใหม่ให้เป็นสมการโฮโมจีเนียส (Homogeneous Equations)

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

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

จากสมการที่ (3.79) และสมการที่ (3.80) จัดรูปแบบใหม่เป็น

$$Ah = 0 \quad (3.81)$$

โดยกำหนดให้  $A = [ ]_{2 \times 9}$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกำหนดให้  $h = [ \ ]_{9 \times 1}$

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

ดังนั้นจากสมการที่ 3.81 จะได้เป็น

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

จากสมการที่ (3.84) จะเห็นว่าแต่ละจุด  $p$  และ  $p'$  ที่สัมพันธ์กันบนระนาบทั้งสองจะให้สมการ 2 สมการ เนื่องจากโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์  $H$  จะมี 8 dof (8 degrees of freedom) และมีเฟกเตอร์การสเกล ( $h_{33} = \text{non-zero scale factor}$ ) ซึ่งสามารถที่จะกำหนดให้เป็นค่าใดๆ โดยส่วนมากเท่ากับ 1 (Homogeneous Matrix) จากตัวแปร  $h_{ij}$  ที่ไม่ทราบค่าทั้งหมด 9 ตัว ดังนั้นจะเหลือตัวแปร  $h$  ที่ไม่ทราบค่าอยู่ 8 ตัว ซึ่งในการแก้สมการต้องใช้จุดที่ทราบค่าเท่ากับ 4 จุดเพื่อให้ได้สมการทั้งหมด 8 สมการจึงจะสามารถแก้ปัญหาหาค่า  $H$  ถ้าในกรณีที่ใช้จุดที่ทราบค่ามากกว่า 4 จุดซึ่งจะเรียกว่าเป็น over-determined solution ที่สามารถแก้ปัญหาหาค่า  $H$  ได้เช่นกัน ดังนั้นในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าของเมทริกซ์  $H$  ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์  $h_{ij}$  จำเป็นต้องใช้จุดบนทั้งสองระนาบที่สัมพันธ์กันอย่างน้อย 4 จุดหรือ  $n \geq 4$  เพื่อคำนวณหาโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ (Homography Matrix) สามารถที่จะหาคำตอบออกมาได้ โดยใช้การแก้ปัญหของระบบสมการเชิงเส้นด้วยการประมาณค่าแบบ Least-Squares (LS) หรือใช้การแยกส่วนประกอบของเมทริกซ์  $A = UDV^T$  ซึ่งเป็นการหา Singular value decomposition (SVD) ของเมทริกซ์  $A$  โดยค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ที่เป็นคำตอบของสมการจะได้จากหลักสุดท้ายของเมทริกซ์  $V$  ที่ได้จากค่า SVD ของเมทริกซ์  $A$  [14][15][17]

### 3.5 สรุป

การแปลงโฮโมกราฟฟีซึ่งเป็นการแปลงของระนาบ 2 มิติจะถูกนำมาใช้ในการแปลงพิกัดของภาพที่ได้จากกล้อง ซึ่งเป็นภาพวัตถุที่มีลักษณะคล้ายกับถูกแบ่งส่วนออกเป็น 2 มิติจากการใช้หลักการแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ เมื่อทำการแปลงพิกัดของวัตถุในภาพเป็นพิกัดจริงได้โดยการใช้การแปลงแบบโฮโมกราฟฟีก็จะสามารถนำพิกัดเหล่านี้ไปคำนวณหาเป็นขนาดและพื้นที่แต่ละส่วนของวัตถุ รวมทั้งพื้นที่โดยรวมเชิงปริมาตรของวัตถุนั้นๆ ได้ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป



## บทที่ 4

### การออกแบบระบบตรวจวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ

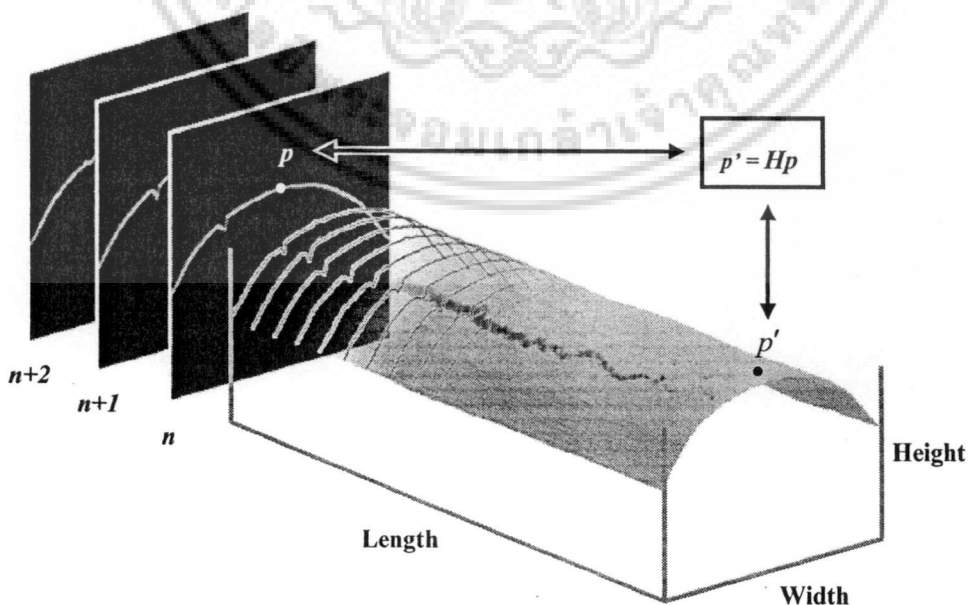
ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการศึกษาวิจัยและขั้นตอนการออกแบบตรวจวัดขนาดวัตถุ โดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีแบบโฮโมกราฟฟีพร้อมกับการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ ซึ่งได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วน คือ หลักการตรวจวัดขนาดของวัตถุที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจวัดขนาดวัตถุ และขั้นตอนการประมวลผลและการทำงานของระบบตรวจวัดขนาดของวัตถุที่ได้นำเสนอในงานวิจัย

#### 4.1 หลักการตรวจวัดขนาดของวัตถุที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงหลักการในการหลักการตรวจวัดขนาดของวัตถุ ซึ่งสามารถตรวจวัดขนาดของวัตถุได้ทั้งความกว้าง ความหนาและความยาวของวัตถุ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์เพื่อหาพื้นที่โดยรวมของวัตถุได้อีกด้วย

##### 4.1.1 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีโฮโมกราฟฟีและแสงเลเซอร์แบ่งส่วนในการตรวจวัดขนาดวัตถุ

แนวคิดที่ได้นำมาใช้ในการตรวจวัดวัตถุในงานวิจัยนี้คือการนำหลักการของการฉายแสงเลเซอร์บนวัตถุ เพื่อเป็นการแบ่งวัตถุที่เป็น 3 มิติออกเป็นแผ่นบางๆตามระนาบของลำแสงเลเซอร์ที่ฉายไปบนวัตถุซึ่งเป็นลักษณะระนาบ 2 มิติ



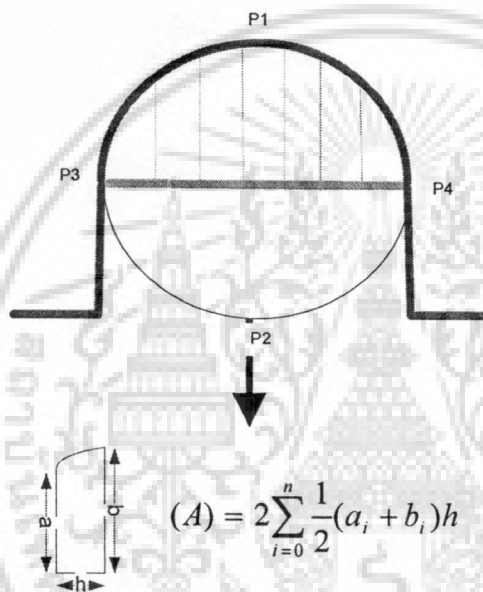
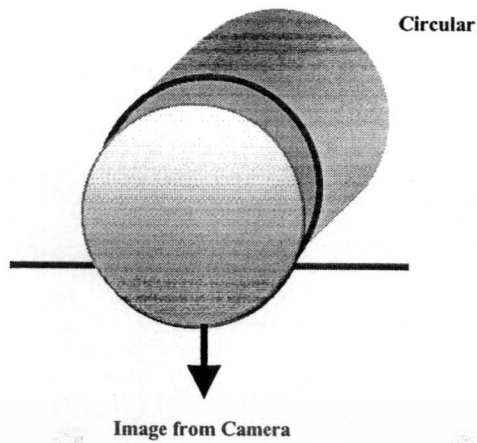
รูปที่ 4-1 แนวคิดที่นำมาใช้ในการตรวจวัดวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานวิจัยนี้ ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การฉายแสงเลเซอร์แบบเส้นบนวัตถุนอกจากแบ่งวัตถุเป็นส่วนๆแล้วยังทำให้ได้คุณลักษณะของวัตถุตามพื้นผิวของวัตถุด้วย ซึ่งสิ่งที่ได้จากแสงที่ฉายบนพื้นผิววัตถุจะบอกถึงความกว้างและความหนาของวัตถุ เมื่อจับภาพด้วยกล้องวีดีโอรูปภาพของเส้นแสงเลเซอร์ที่ได้จะบอกถึงขนาดของวัตถุในหน่วยของพิกเซลที่เกิดขึ้นบนตัวเซนเซอร์ (CCD) ดังนั้นในการแปลงขนาดของวัตถุที่อยู่ในหน่วยพิกเซลของภาพไปเป็นขนาดที่เป็นพิกัดจริงในหน่วยของหน่วยของหน่วยวัดมาตรฐาน (Metric system) เช่น มิลลิเมตร เซนติเมตร จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพมาช่วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอและใช้ทฤษฎีของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์ม จากที่ได้อธิบายไว้ในบทที่แล้วโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มจะเป็นการแปลงพิกัดของจุดระหว่างระนาบ 2 มิติใดๆ ในงานวิจัยนี้จะทำการแปลงพิกัดของจุดบนระนาบของภาพ (Image Plane) ให้เป็นพิกัดจริง (Real World Coordinate) เพื่อคำนวณออกมาเป็นความกว้างและความหนาของวัตถุในหน่วยวัดมาตรฐาน ส่วนความยาวของวัตถุนั้นได้จากการทำการเลื่อนวัตถุแล้วใช้กล้องวีดีโอจับภาพในเฟรมตัดไปจนครบทั้งวัตถุ เมื่อนำภาพแต่ละเฟรมมารวมกันได้เป็นความยาวของวัตถุนั้นๆ ซึ่งความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุจะต้องสัมพันธ์กับความเร็วในการจับภาพของกล้องวีดีโอ เช่น กล้องสามารถจับภาพด้วยความเร็ว 30 fps ดังนั้นความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 30 mm/Sec เพื่อจะให้ได้ความละเอียดในด้านความยาวของวัตถุ 1 mm/Frame หรือถ้าต้องการความละเอียดในการวัดความยาวของวัตถุที่ 0.5 mm/Frame ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุต้องมีค่าเท่ากับ 15 mm/Sec

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ทางเรขาคณิตของวัตถุจากเส้นแสงเลเซอร์

เมื่อทำการฉายแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของวัตถุจะทำให้เส้นแสงเลเซอร์เปลี่ยนแปลงไปตามพื้นผิวของวัตถุนั้นๆ ซึ่งสามารถนำแสงเลเซอร์ที่ได้จากการมองด้วยกล้องวีดีโอมาวิเคราะห์ถึงรูปทรงของวัตถุได้ โดยงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบการวัดขนาดจากผักและผลไม้ที่มีทรงกลมและทรงรี ดังนั้นลักษณะของเส้นแสงเลเซอร์ที่ฉายลงบนพื้นผิวของวัตถุจะแสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อเส้นแสงเลเซอร์สัมผัสวัตถุ ตำแหน่งที่เลเซอร์ตกกระทบจุดบนสุด ( $P_1$ ) จากนั้นจะเทียบจุดที่อยู่ต่ำสุด ( $P_2$ ) จากนั้นการวิเคราะห์เพื่อหาความสูงครึ่งหนึ่งของวัตถุ จากนั้นจะวัดความกว้างโดยการลากเส้นผ่านศูนย์กลาง จากจุดซ้ายสุด ( $P_3$ ) ไปยังจุดขวาสุด ( $P_4$ ) จากนั้นเป็นการซอยเส้นตรงเล็กๆลงไป ในภาพซึ่งในที่นี้กำหนดระยะห่างไว้ที่ 3 pixel ต่อไปจะเป็นการคำนวณ พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู เมื่อเรานำพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละอันมารวมกัน เราจะได้พื้นที่ครึ่งหนึ่ง และเมื่อคูณ 2 จะทำให้ได้พื้นที่รวมทั้งหมดของภาพโดยละเอียด ซึ่งวิธีนี้จะสามารถวัดได้ทุกรูปทรงที่มีความสมมาตร



(4.1)

เมื่อ

- $A$  คือพื้นที่หน้าตัดแต่ละส่วนของวัตถุ  
 $a$  คือความสูงแกนแนวตั้งที่อยู่ด้านซ้าย  
 $b$  คือความสูงแกนแนวตั้งที่อยู่ด้านขวา  
 $h$  คือระยะห่างระหว่างแกนซ้ายและแกนขวา

#### รูปที่ 4-2 การวิเคราะห์ทางเรขาคณิตของวัตถุจากเส้นแสงเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาระยะห่างจุดพิกัด 2 จุดซึ่งเป็นขนาดของวัตถุจำเป็นต้องแปลงพิกัดจากพิกัดภาพให้เป็นจุดที่อยู่บนพิกัดจริงเสียก่อน โดยการใช้โฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มในการแปลงจุดพิกัดเหล่านี้ เมื่อทำการแปลงแล้วระยะห่างระหว่างจุดพิกัดก็จะเป็นขนาดจริงของวัตถุในหน่วยของหน่วยวัดมาตรฐาน ซึ่งการคำนวณระยะห่างระหว่างจุดนี้ก็จะใช้หลักการของการหาระยะทางระหว่างจุด 2 จุดบนระนาบ 2 มิติ คือ

$$D = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $D$  คือระยะห่างระหว่างจุดพิกัด 2 จุด (ขนาดวัตถุ)

$\Delta x$  คือผลต่างของจุดในแกน  $x$

$\Delta y$  คือผลต่างของจุดในแกน  $y$

เมื่อนำพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนมารวมกันก็จะได้เป็นพื้นที่โดยรวมหรือปริมาตรของวัตถุ ซึ่งสามารถหาได้โดย

$$(V) = \sum_{j=1}^L A_j \quad (4.3)$$

เมื่อ  $V$  คือปริมาตรหรือพื้นที่รวมของวัตถุ

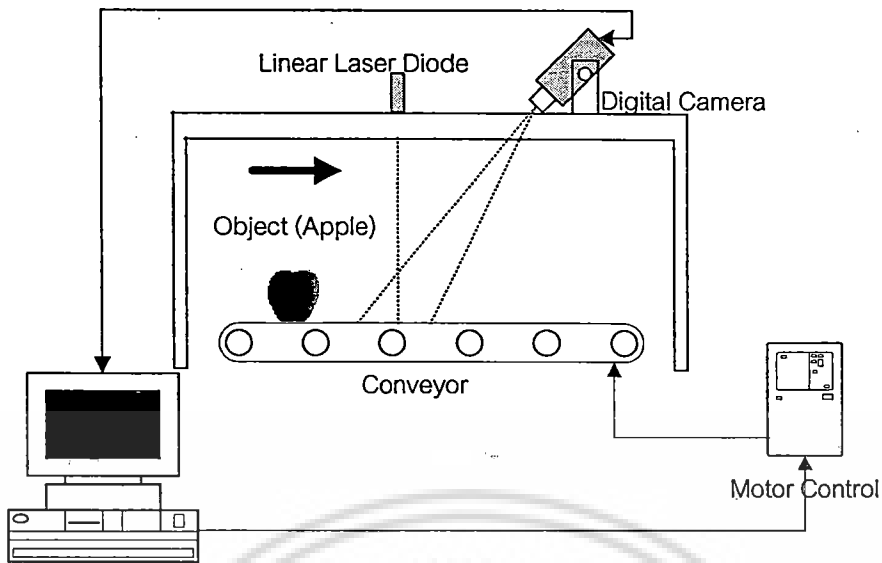
$A$  คือพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุ

$L$  คือจำนวนเฟรมที่มีวัตถุตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์หรือความยาวของวัตถุ

## 4.2 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจวัดขนาดวัตถุ

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการออกแบบระบบการตรวจวัดขนาดของวัตถุ การวัดขนาดวัตถุที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะใช้ลักษณะการสแกนวัตถุโดยใช้หลักการของแสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ ดังนั้นอุปกรณ์ที่สำคัญสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ ๆ คือ แหล่งกำเนิดแสงซึ่งจะให้แสงเลเซอร์แบบเส้น อุปกรณ์การตรวจจับภาพโดยใช้กล้องวีดีโอ อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ และคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการประมวลผล โดยระบบที่ออกแบบรวมทั้งตำแหน่งการติดตั้งแสดงอยู่ในรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Computer performs image processing  
and measurement

รูปที่ 4-3 การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการตรวจวัดขนาดวัตถุ

#### 4.2.1 อุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

ในการออกแบบจะใช้แสงเลเซอร์แบบเส้นสีแดง (Red Laser Line) ในการฉายไปบนวัตถุ เพื่อเป็นการแบ่งวัตถุออกเป็นส่วนๆ ซึ่งการใช้เลเซอร์สีแดงจะช่วยให้การประมวลผลภาพง่ายขึ้น และลดขั้นตอนในการปรับแต่งภาพ สิ่งที่สำคัญก็คือการวางตำแหน่งของหัวเลเซอร์จะต้องตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุเพื่อเป็นการแบ่งวัตถุออกเป็นแผ่นบางๆ 2 มิติ ซึ่งมีขนาดเดียวกับ ระบายของเส้นแสงเลเซอร์ การเลือกใช้อุปกรณ์เลเซอร์ที่มีความคมของเส้นแสงเลเซอร์จะช่วยให้ระบบมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นและช่วยลดปัญหาของผลกระทบจากแสงอื่นๆอีกด้วย

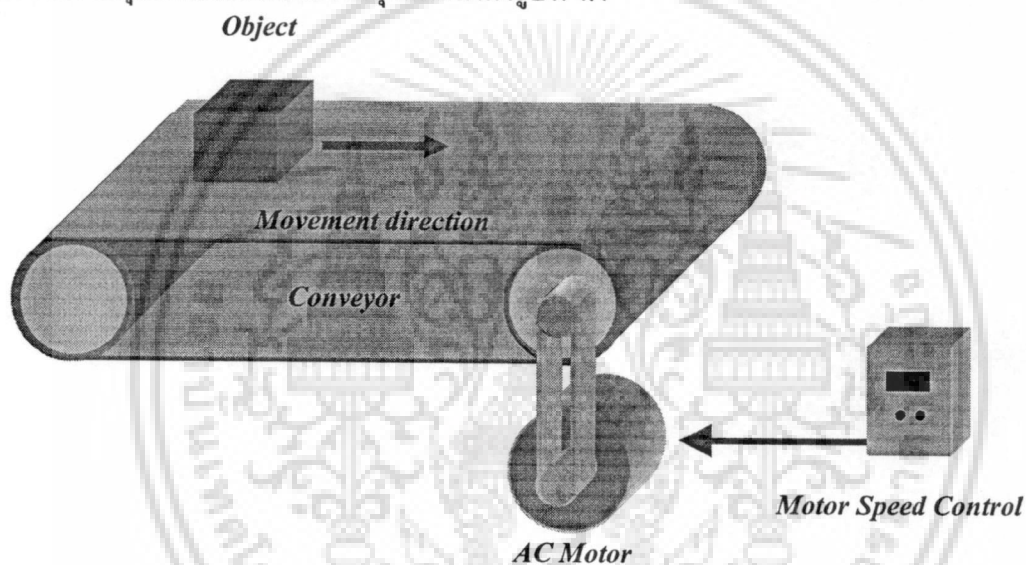
#### 4.2.2 อุปกรณ์จับภาพหรือกล้องวิดีโอ

การเลือกใช้อุปกรณ์จับภาพถือเป็นสิ่งสำคัญอีกอย่างในการออกแบบ เนื่องจากต้องคำนึงถึงความละเอียดของกล้อง (Resolution) และความเร็วในการจับภาพ (Frame/Sec) กล้องที่มีความละเอียดสูงจะช่วยเพิ่มความละเอียดในการตรวจวัดขนาดของวัตถุด้วย แต่ยิ่งภาพมีความละเอียดมากก็จะทำให้การประมวลผลภาพจะลดลง ส่วนความเร็วในการเก็บภาพของกล้องก็จะมีผลต่อความเร็วในการสแกนหาความยาวของวัตถุ ซึ่งปัจจุบันความเร็วในการเก็บภาพของกล้องมีให้เลือกตั้งแต่ 12-500 fps แต่ยิ่งมีความเร็วสูงขึ้นก็จะมีราคาแพงขึ้นด้วย กล้องที่นำมาใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้กล้องเว็บแคม ที่มีความละเอียดในการถ่ายภาพนิ่งที่ 8M พิกเซลและความละเอียดในการถ่ายภาพวิดีโอ 640x480 พิกเซล ความเร็วในการถ่ายภาพวิดีโอ 30 fps ในการติดตั้งกล้องสามารถติดตั้งทำมุมกับระนาบของเลเซอร์ได้อย่างอิสระเพราะการนำที่ฤษฎีของโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาใช้ในการทำมุมกันระหว่างระนาบ (เลเซอร์กับกล้อง) ไม่มีผลต่อการตรวจวัดขนาดของวัตถุ เนื่องจากสามารถใช้สอบเทียบในการปรับแต่งได้ แต่ในการติดตั้งต้องคำนึงถึงการบดบังจากวัตถุด้วย ดังนั้นจึงนิยมติดตั้งให้ทำมุมกับระนาบของเส้นแสงเลเซอร์ระหว่าง  $30^{\circ} - 45^{\circ}$

#### 4.2.3 อุปกรณ์การควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ

การเคลื่อนที่ของวัตถุจำเป็นต้องสอดคล้องกับความเร็วในการถ่ายภาพของกล้อง ในการออกแบบใช้ Motor Control (DS-PIC 16-bit microcontroller) เป็นตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับหนึ่งเฟสที่ขับเพลาของสายพานลำเลียง โดยควบคุมความเร็วของสายพานลำเลียงไว้ที่ 30 mm/Sec เพื่อให้ได้ความละเอียดในการตรวจวัดความยาววัตถุที่ 1 mm/frame การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุได้แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4-4 อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ

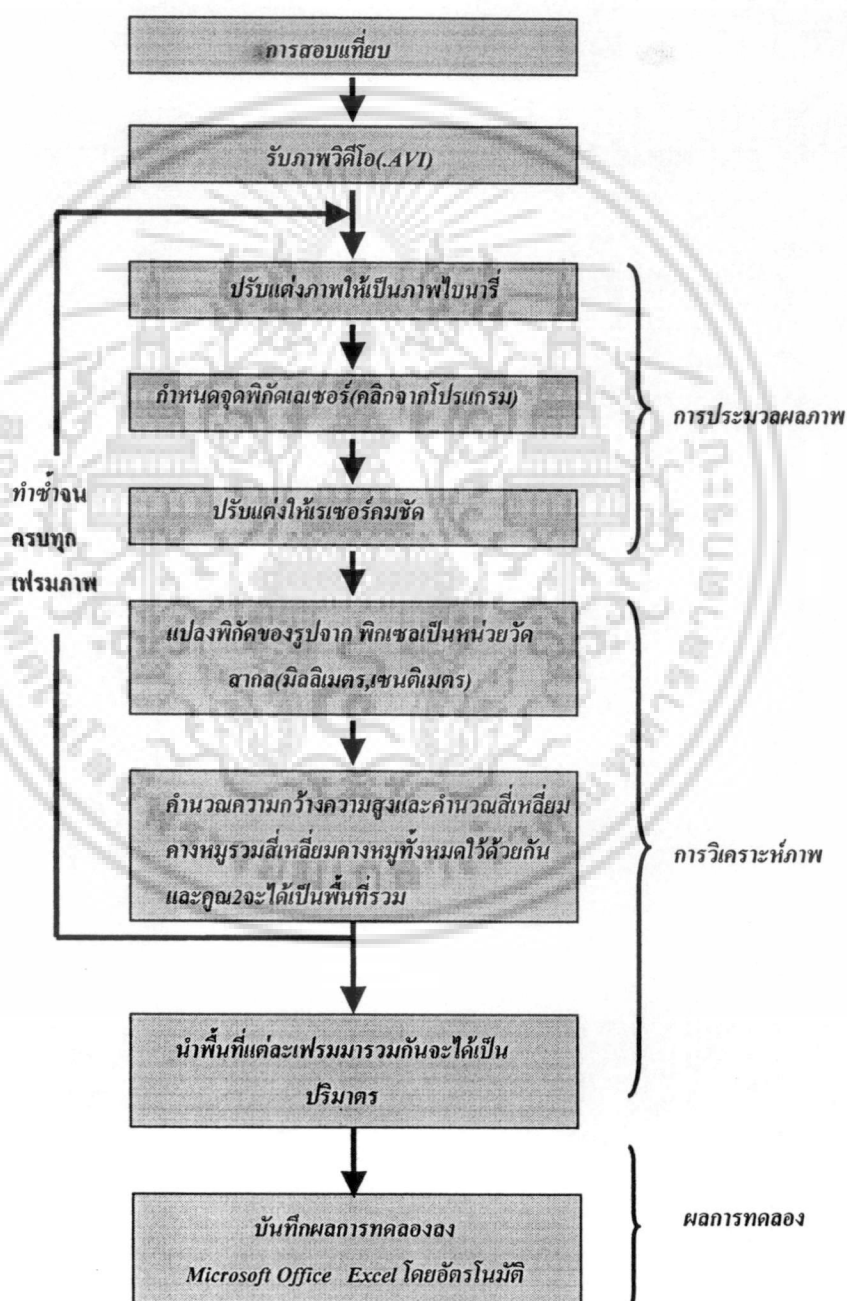
#### 4.2.4 อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

การประมวลผลภาพที่ได้จากกล้องเพื่อทำการหาขนาดของวัตถุนั้นจะใช้คอมพิวเตอร์(แบบ Off line)ในการประมวลผลโดยผ่านทางโปรแกรมที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Matlab เวอร์ชัน 2010a ในการเขียนโปรแกรมเพื่อทดสอบและใช้ในการตรวจวัดขนาดของวัตถุ เนื่องจากโปรแกรม Matlab มีฟังก์ชันที่เกี่ยวกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์และประมวลผลภาพให้เล็กลงมาจึงช่วยลดเวลาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมลงมาก นอกจากนั้นยังสามารถทำการวิเคราะห์ผลการทำางานและประสิทธิภาพในการทำงานของโปรแกรมที่เขียนขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบและพัฒนาโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ขั้นตอนการประมวลผลและการทำงานของระบบตรวจวัดขนาดของวัตถุ

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจวัดขนาดของวัตถุ ซึ่งการทำงานจะแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนได้ดังนี้คือ การสอบเทียบ การเก็บข้อมูลภาพของวัตถุที่ตรวจวัด การประมวลผลภาพ การวิเคราะห์ภาพเพื่อกำหนดหาขนาดและพื้นที่โดยรวมของวัตถุ โดยขั้นตอนและลำดับการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจวัดของวัตถุจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.5



เอกสารรูปที่ 4-5 ขั้นตอนการประมวลผลและการทำงานของระบบตรวจวัดขนาดของวัตถุด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1 การสอบเทียบ

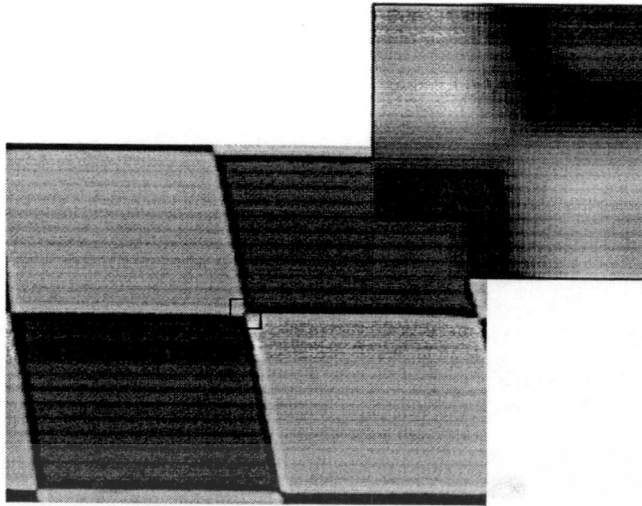
การสอบเทียบเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งในการตรวจวัดขนาดของวัตถุเพราะจะมีผลกับความผิดพลาดในการตรวจวัด การสอบเทียบนี้เป็นการหาค่าของไฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการแปลงจุดพิกัดภาพเป็นพิกัดจริงจากที่ได้กล่าวถึงการหาค่าของไฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มไว้ในบทที่ 3 การหาค่าของไฮโมกราฟฟีเมทริกซ์สามารถหาได้โดยการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของจุดบนพิกัดภาพกับตำแหน่งของจุดที่อยู่บนพิกัดจริงที่ทราบค่าตำแหน่งของจุดอย่างน้อย 4 จุดเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าไฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงใช้ตารางหมากรุกในการสอบเทียบ ซึ่งในแต่ละช่องของตารางหมากรุกจะมีความกว้างและความยาวเท่ากับ 30 มิลลิเมตร



รูปที่ 4-6 ตารางหมากรุกขนาด  $30 \times 30 \text{ mm.}$  ที่ใช้ในการสอบเทียบ

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

เอกรินทร์ บัณฑิตกุล, อธิบายถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-7 จุดพิกัดที่เป็นบริเวณมุมของตารางที่ได้จากการใช้ทฤษฎีการหามุมของแฮร์ลิส

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

$$Ah = 0 \quad (4.4)$$

เมื่อแทนจุดทั้งสี่จุดที่เป็นพิกัดภาพและพิกัดจริงที่ได้ลงในสมการดังนั้นจะได้

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1x_1 & -x'_1y_1 & -x'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_nx_n & -x'_ny_n & -x'_n \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -y'_1x_1 & -y'_1y_1 & -y'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -y'_nx_n & -y'_ny_n & -y'_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

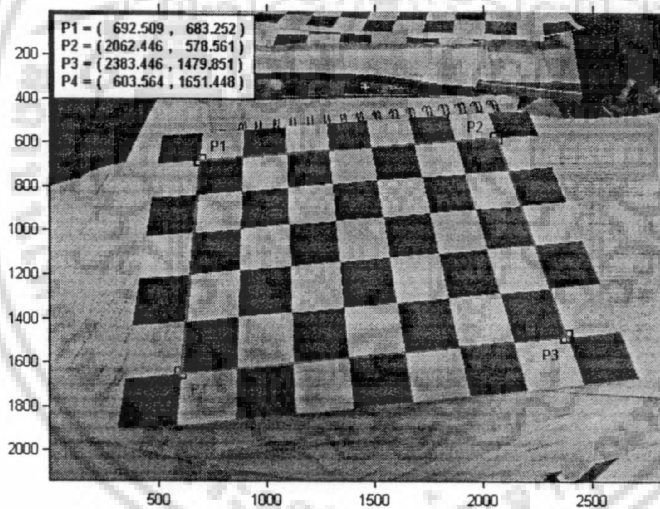
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมทริกซ์สามารถหาได้โดยใช้วิธีการแยกค่าเดียว (Singular Value Decomposition) หรือ SVD [14][15][17] ซึ่งในโปรแกรม Matlab จะมีคำสั่งของ SVD ให้ใช้งาน ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการแยกค่าเดียวของเมทริกซ์  $A$  คือ

$$A_{m \times n} = U_{m \times m} D_{m \times n} V_{n \times n}^T \quad (4.6)$$

ค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์จะอยู่ในหลักสุดท้ายของเมทริกซ์  $V$  ซึ่งเมื่อนำมาจัดรูปให้เป็นเมทริกซ์ขนาด  $3 \times 3$  จะได้

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$



รูปที่ 4-8 ตัวอย่างการสอบเทียบเพื่อหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์

จากรูปที่ 4.8 จะแสดงตัวอย่างการสอบเทียบเพื่อหาค่าของโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ โดยจุดพิกัดบนระนาบของภาพทั้ง 4 จุดที่มีพิกัดดังนี้ จุดที่ 1 มีพิกัดคือ  $P_1 = (692.509, 683.252)$  จุดที่ 2 มีพิกัดคือ  $P_2 = (2062.446, 578.561)$  จุดที่ 3 มีพิกัดคือ  $P_3 = (2383.446, 1479.851)$  และจุดที่ 4 มีพิกัดคือ  $P_4 = (603.564, 1651.448)$  เมื่อจุดบนภาพแต่ละจุดเปรียบเทียบกับจุดพิกัดจริงได้คือจุดที่ 1 ซึ่งจะกำหนดให้เป็นจุดเริ่มต้นบนพิกัดจริงมีพิกัด  $P'_1 = (0, 0)$  จุดที่ 2 มีพิกัด  $P'_2 = (210, 0)$  จุดที่ 3 มีพิกัด  $P'_3 = (210, 150)$  และจุดที่ 4 มีพิกัด  $P'_4 = (0, 150)$  เมื่อนำจุดพิกัดทั้งหมดแทนลงในเมทริกซ์  $A$  ของสมการที่ 4.6 แล้วคำนวณหา SVD ( $A$ ) หรือทำการแยกค่าเดียวของเมทริกซ์  $A$  ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ออกมาเป็นเมทริกซ์  $U_{m \times m} D_{m \times n} V_{n \times n}^T$  ดังนั้นโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมทริกซ์ซึ่งจะได้จากหลักสุดท้ายของ  $V$  และนำมาจัดรูปเป็นเมทริกซ์ขนาด  $3 \times 3$  คือ

$$H = \begin{bmatrix} -0.000796968 & -0.000073215 & 0.601931930 \\ -0.000082894 & -0.001084710 & 0.798535506 \\ -0.000000019 & -0.000001694 & -0.004144034 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

โดยโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมทริกซ์นี้เป็นผลมาจากระยะห่าง การทำมุมของกล้องกับระนาบของแสงเลเซอร์และความยาวโฟกัสของกล้อง ดังนั้นหากพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไปจึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบใหม่ทุกครั้งก่อนนำไปใช้ในการตรวจวัดขนาดวัตถุ

#### 4.3.2 การเก็บข้อมูลภาพของวัตถุ

การเก็บข้อมูลภาพของวัตถุในงานวิจัยนี้จะเก็บข้อมูลภาพของผักและผลไม้ที่เคลื่อนที่บนสายพานลำเลียงไว้เป็นวิดีโอไฟล์ซึ่งเป็นรูปแบบ AVI มีความละเอียด 640x480 พิกเซล และความเร็วในการเก็บภาพ 30 fps โดยความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุต้องสัมพันธ์กับความเร็วในการจับภาพของกล้อง ในการประมวลผลจะทำการดึงข้อมูลภาพมาประมวลที่ละเฟรม เมื่อประมวลผลในเฟรมแรกเสร็จแล้วก็จะทำการดึงข้อมูลในเฟรมถัดไปจนครบ จำนวนเฟรมทั้งหมดของไฟล์ AVI ซึ่งในแต่ละเฟรมจะเป็นเสมือนภาพนิ่งของวัตถุในแต่ละส่วนที่ทำการเคลื่อนที่ผ่านระนาบของเส้นแสงเลเซอร์ สิ่งสำคัญในการเก็บข้อมูลภาพของวัตถุคือการจัดสภาพแวดล้อมของแสงเพื่อลดผลกระทบจากแสงภายนอก

#### 4.3.3 การประมวลผลภาพที่ได้จากเส้นแสงเลเซอร์

เมื่อทำการเก็บข้อมูลภาพของวัตถุแล้วขั้นต่อไปก็จะทำภาพในแต่ละเฟรมที่ได้มาประมวลผลเพื่อแยกบริเวณที่เป็นแสงเลเซอร์กับภาพพื้นหลัง ซึ่งเส้นแสงเลเซอร์นี้จะเป็นคุณสมบัติเกี่ยวกับรูปทรงของวัตถุ การประมวลผลภาพจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ การประมวลผลภาพเบื้องต้น การหาพิกัดของแสงเลเซอร์บนภาพ และการปรับแต่งข้อมูลจุดพิกัดของแสงเลเซอร์

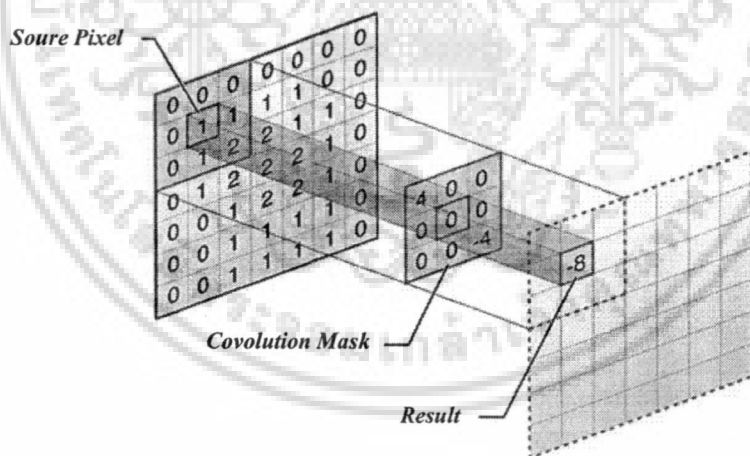
##### 4.3.3.1 การประมวลผลภาพเบื้องต้น

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการปรับแต่งภาพที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาพของวัตถุให้ดีขึ้นก่อนจะไปประมวลผลเพื่อหาบริเวณเส้นแสงเลเซอร์ จากข้อมูลที่ได้วัตถุจะถูกเก็บไว้เป็นไฟล์วิดีโอ (AVI) ในขั้นตอนการประมวลผลจะดึงข้อมูลมาประมวลผลที่มาเฟรมภาพ โดยข้อมูลต้นฉบับจะเป็นภาพสี (RGB) และนำค่าความสว่างในแถบสีแดงมาประมวลผล การปรับปรุงคุณภาพของภาพจะลดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวนโดยการใช้อัตรากรองเพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกจากภาพ โดยอาศัยหลักการทำการเฉลี่ยค่าความเข้มแสงเฉพาะบริเวณหรือการกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filtering) ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ของภาพที่ได้จะมีความราบเรียบ (Smooth) แต่จะทำให้ภาพเกิดการพร่ามัว (Blur) หรือมีความคมชัดน้อยลง ในงานวิจัยนี้จะใช้การกรองสัญญาณรบกวนแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดแบบ 2 มิติ (2D Finite Impulse Response: 2D FIR) [19] FIR จะเป็นการลดสัญญาณรบกวนแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Filtering) ที่ใช้หลักการของการคอนโวลูชันหรือการกรองสัญญาณภาพแบบเชิงเส้นในสเปซเชิงโดเมน (Spatial linear filtering) โดยการคูณทุกๆตำแหน่งพิกเซลในมาสก์ (Mask) ที่อยู่ในบริเวณเดียวกันและบวกรวมกันทุกๆตัว หรืออาจกล่าวได้ว่าการคำนวณหาค่าผลรวมของผลคูณ (Sum of Product) ซึ่งแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$y_{(m,n)} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} h(i, j) p(m-i, n-j) \quad (4.9)$$

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



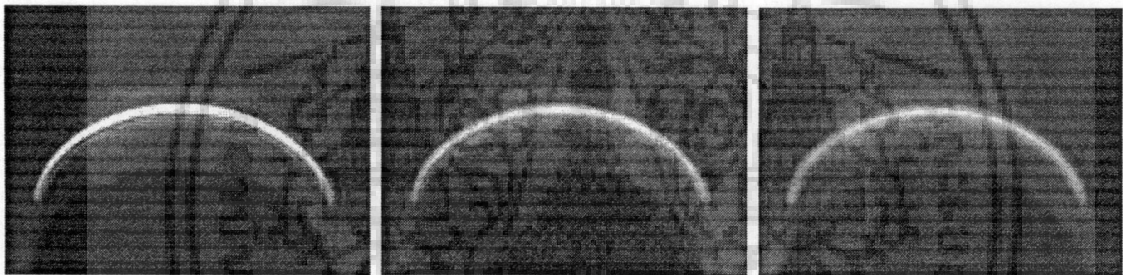
รูปที่ 4-9 การลดสัญญาณรบกวนแบบเป็นเชิงเส้นโดยใช้หลักการของการคอนโวลูชัน

โดยมาร์คที่ใช้ในการทำภาพให้เรียบและสามารถจัดสัญญาณรบกวนจะมีลักษณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองทุกตำแหน่งจะมีค่าเป็นบวก ซึ่งในการออกแบบจะเลือกใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ย (Averaging Operator) ตัวกรองความถี่แบบค่าเฉลี่ยคือตัวกรองความถี่ต่ำผ่านชนิดหนึ่ง ซึ่งผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์จะมีค่าเป็นหนึ่ง มาร์คของตัวกรองความถี่แบบค่าเฉลี่ยจะมีได้หลายขนาดเช่น 3x3, 5x5 และ 7x7 เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างของตัวกรองขนาด 3x3 และ 5x5 ได้แสดงในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 4.11 และ 4.12 คำนวณค่า การเพิ่มขนาดของมาร์คจะช่วยลดสัญญาณรบกวนได้มากขึ้น แต่มีข้อเสียคือจะทำให้ลักษณะภาพเกิดการพรางมัวยิ่งขึ้น

$$\text{Average Mask } 3 \times 3 = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\text{Average Mask } 5 \times 5 = \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4-10 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวนโดยการใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ย (ก) แสดงภาพต้นฉบับ (ข) แสดงภาพที่ได้หลังจากการลดสัญญาณรบกวนโดยการใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยที่มีขนาดมาร์ค  $3 \times 3$  (ค) แสดงภาพที่ได้หลังจากการลดสัญญาณรบกวนโดยการใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยที่มีขนาดมาร์ค  $5 \times 5$

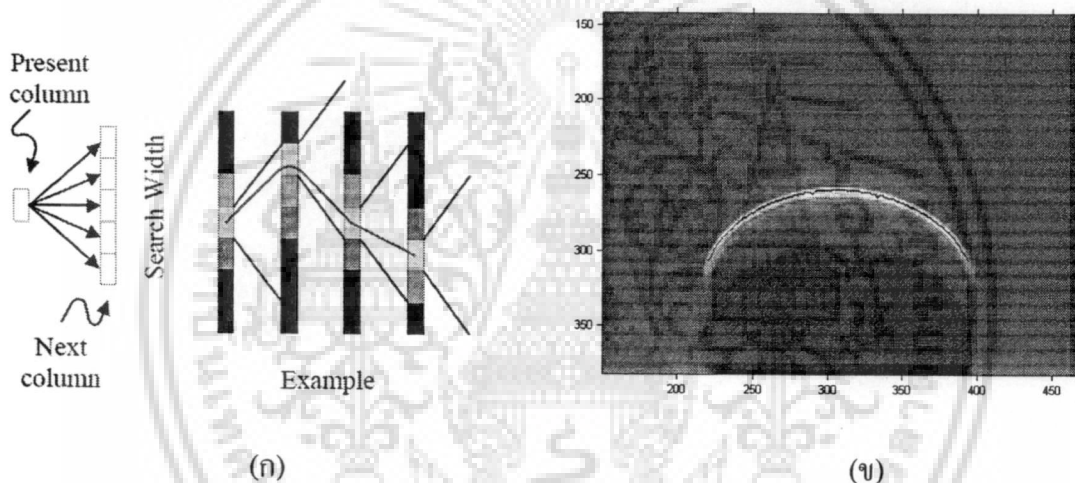
#### 4.3.3.2 การหาพิกัดของแสงเลเซอร์บนภาพ

การหาพิกัดของเส้นแสงเลเซอร์จะเป็นการตรวจหาระดับความสว่างที่เกิดขึ้นในภาพ หลังจากทำการลดสัญญาณรบกวนแล้ว โดยหลักการของการหาบริเวณที่เป็นส่วนของแสงเลเซอร์ จะใช้การเปรียบเทียบจุดพิกเซลของภาพกับค่าเทรชโวลด์ (Threshold) เพื่อเป็นการแยกบริเวณแสงเลเซอร์ (Laser Feature) ออกจากพื้นหลัง (Background) ของภาพ ซึ่งค่าเทรชโวลด์จะเป็นค่าที่กำหนดขึ้นเพื่อแบ่งระดับความสว่างที่เป็นเลเซอร์กับระดับความสว่างที่เป็นพื้นหลัง ถ้าจุดพิกเซลใดๆ ในภาพที่มีความสว่างมากกว่าค่าเทรชโวลด์แล้วจะกำหนดให้จุดนั้นเป็นจุดของเส้นแสงเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลเซอร์ โดยมีหลักการดังนี้คือถ้า  $I(x, y) > T$  แสดงว่าจุดพิกเซลนั้นเป็นจุดของแสงเลเซอร์และถ้า  $I(x, y) \leq T$  แสดงว่าจุดพิกเซลนั้นเป็นจุดบริเวณพื้นหลังของภาพ

ในการค้นหาบริเวณของเส้นแสงเลเซอร์ภายในภาพจะใช้วิธีการของเส้นทางเดินของเส้น (Line Walking Algorithm) [20] หลักการคือการหาระดับความสว่างเทียบกับค่าเทรชโพลด์ในแต่ละหลัก (Column) ของภาพ โดยเริ่มที่จุดพิกเซลในหลักแรก ( $n_1$ ) ในทุกแถวตั้งแต่แถวแรกถึงแถวสุดท้าย  $m_1 : m_{end}$  เพื่อจะทำการหาจุดพิกเซลในแต่ละแถวของจุดพิกเซลที่มีระดับความสว่างที่มีค่ามากกว่าค่าเทรชโพลด์ ซึ่งจะกำหนดให้จุดพิกเซลนี้เป็นจุดพิกัดของเส้นเลเซอร์จุดที่ 1  $L_1(x_i, y_i)$  การหาจุดในหลักถัดไปจะทำการหาจุดพิกเซลตั้งแต่แถวที่  $m_{i-k} : m_{i+k}$  เมื่อ  $k$  คือจำนวนแถวของพิกเซลในภาพที่ต้องการหาเส้นแสงเลเซอร์ (Search Width) โดยไม่จำเป็นต้องทำการหาทุกๆ แถวของภาพจึงเพิ่มความเร็วให้กับการค้นหาจุดพิกเซลที่เป็นเส้นแสงเลเซอร์ภายในภาพ



รูปที่ 4-11 (ก) วิธีการของเส้นทางเดินของเส้น (ข) ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการของเส้นทางเดินของเส้น

#### 4.3.4 การวิเคราะห์ภาพเพื่อหาผลลัพธ์ด้านขนาดและพื้นที่โดยรวมของวัตถุ

เมื่อได้ข้อมูลพิกัดในภาพของเส้นแสงเลเซอร์ที่ทำการ Interpolation แล้ว ในการหาขนาดของวัตถุจำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงรูปทรงทางเรขาคณิตของวัตถุเพื่อใช้ในการกำหนดจุดที่เป็นคุณสมบัติของความกว้างและความหนาของวัตถุ แล้วทำการแปลงจุดพิกัดบนภาพนี้ให้เป็นพิกัดจริงก่อนจะนำจุดพิกัดที่ได้ไปคำนวณหาขนาดและพื้นที่ของวัตถุ ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีการแปลงจุดพิกัดภาพของเส้นเลเซอร์ไปเป็นจุดพิกัดจริงของวัตถุ การคำนวณหาขนาดพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุ รวมทั้งการหาความยาวและพื้นที่รวมเชิงปริมาตรของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4.1 การแปลงจุดพิกัดภาพของเส้นแสงเลเซอร์เป็นจุดพิกัดจริงของวัตถุ

จากการวิเคราะห์ถึงรูปทรงเรขาคณิตของวัตถุที่นำมาใช้ในการวัดขนาดจะมีจุดพิกัดอยู่ 4 จุดที่จะเป็นจุดที่บอกถึงคุณสมบัติของวัตถุ โดยสองจุดในแนวนอนที่เป็นขอบซ้ายขวาของจุดพิกัดเส้นแสงที่ได้จะเป็นคุณสมบัติของความกว้างของวัตถุและสองจุดในแนวตั้งคือจุดพิกัดของเส้นแสงเลเซอร์ที่มีค่าสูงสุดและจุดเส้นแสงอ้างอิง (จุดพิกัดของแสงเลเซอร์เมื่อไม่มีวัตถุตัดผ่าน) จะเป็นคุณสมบัติของความหนาหรือความสูงของวัตถุ เมื่อได้จุดทั้ง 4 จุดจะต้องทำการทำให้จุดเหล่านี้ใช้เป็นจุดพิกัดจริงของวัตถุ (Real Coordinate of Object) ด้วยการแปลงแบบโฮโมกราฟฟี โดยการคูณจุดพิกัดที่ได้บนภาพกับโฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมทริกซ์ที่ได้จากการสอบเทียบ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการ

$$p' = Hp \quad (4.12)$$

เมื่อ  $H$  คือ โฮโมกราฟฟีทรานส์ฟอร์มเมทริกซ์  
 $p$  คือจุดพิกัดของภาพที่จะทำการแปลง  
 $p'$  คือจุดพิกัดที่ได้จากการแปลงซึ่งเป็นพิกัดจริงของวัตถุ

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

$$p'_i = Hp_i \quad (4.13)$$

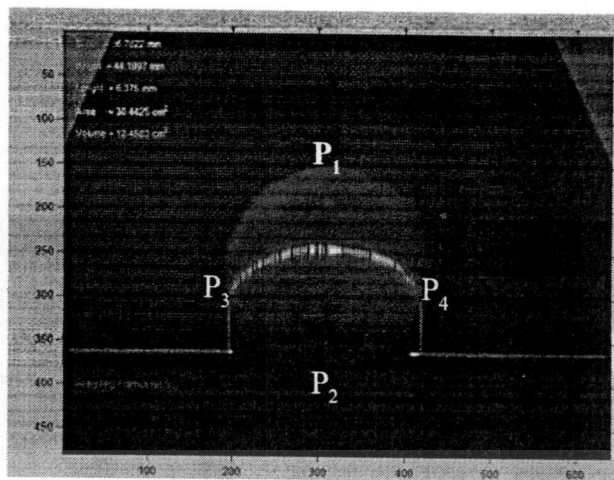
และ

$$\begin{bmatrix} wx'_i \\ wy'_i \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

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

$$H = \begin{bmatrix} -0.000063693 & -0.006073040 & 0.446057700 \\ -0.005778472 & 0.000800451 & 0.894613317 \\ 0.000000309 & 0.000023299 & -0.025072349 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-12 จุดที่เป็นคุณสมบัติความสูง( $P_1, P_2$ ) และจุดที่เป็นคุณสมบัติของความกว้าง ( $P_3, P_4$ )

สมมติให้จุดที่ต้องการแปลงพิกัดทั้ง 4 จุดของวัตถุรูปทรงกลมจากรูปที่ 4.14 คือ  $P_{(1)} = (264, 312)$ ,  $P_{(2)} = (442, 305)$ ,  $P_{(3)} = (353, 260)$  และ  $P_{(4)} = (353, 387)$  และทำการจัดให้อยู่ในรูปแบบพิกัดโฮโมจีเนียส (Homogeneous coordinate) เพื่อทำการคูณกับเมทริกซ์  $H$  ซึ่งจะได้

$$\begin{bmatrix} wx'_1 \\ wy'_1 \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.000063693 & -0.006073040 & 0.446057700 \\ -0.005778472 & 0.000800451 & 0.894613317 \\ 0.000000309 & 0.000023299 & -0.025072349 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 264 \\ 312 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.465546 \\ -0.381162 \\ -0.017721 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} wx'_2 \\ wy'_2 \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.000063693 & -0.006073040 & 0.446057700 \\ -0.005778472 & 0.000800451 & 0.894613317 \\ 0.000000309 & 0.000023299 & -0.025072349 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 442 \\ 305 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.434372 \\ -1.415334 \\ -0.017829 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} wx'_3 \\ wy'_3 \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.000063693 & -0.006073040 & 0.446057700 \\ -0.005778472 & 0.000800451 & 0.894613317 \\ 0.000000309 & 0.000023299 & -0.025072349 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 353 \\ 260 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.155416 \\ -0.937070 \\ -0.018905 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} wx'_4 \\ wy'_4 \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.000063693 & -0.006073040 & 0.446057700 \\ -0.005778472 & 0.000800451 & 0.894613317 \\ 0.000000309 & 0.000023299 & -0.025072349 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 353 \\ 387 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.927705 \\ -0.835279 \\ -0.015943 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพิกัดในแต่ละจุดที่ได้จากการคูณกับโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์จะยังเป็นพิกัดโฮโมจีเนียสที่มีค่า  $w$  หรือสเกลเฟกเตอร์ (Scale Factor) ดังนั้นจำเป็นต้องทำให้ค่า  $w$  เท่ากับ 1 โดยการหารให้ทุกพจน์ใน  $P_i'$  ด้วย  $w$  จึงจะได้เป็นพิกัดจริงของวัตถุคือ

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

#### 4.3.4.2 การคำนวณหาขนาดและพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุ

เมื่อได้พิกัดจริงของวัตถุจากการแปลงแบบโฮโมกราฟฟีแล้ว เราสามารถที่จะทำการคำนวณหาขนาดนี้ในความกว้างและความหนาของวัตถุ โดยใช้การหาระยะห่างระหว่างจุด 2 จุด บนระนาบ 2 มิติ ซึ่งแสดงในสมการที่ (4.1) โดยสามารถที่จะนำมาหาความกว้างและความหนาของวัตถุในแต่ละส่วนโดย

$$\text{ความกว้างของวัตถุ} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (4.16)$$

$$\text{ความหนาของวัตถุ} = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2} \quad (4.17)$$

นำค่าของจุดพิกัดจริงของวัตถุ  $P_{(1)} = (82.7, 21.5)$ ,  $P_{(2)} = (80.5, 79.4)$ ,  $P_{(3)} = (61.1, 49.6)$  และ  $P_{(4)} = (120.9, 52.4)$  แทนลงในสมการที่ (4.15) และ (4.16)

$$\text{ความกว้างของวัตถุ} = \sqrt{(82.7 - 80.5)^2 + (21.5 - 79.4)^2} = 57.919 \text{ mm.} \quad (4.18)$$

$$\text{ความสูงของวัตถุ} = \sqrt{(61.1 - 120.9)^2 + (49.6 - 52.4)^2} = 59.867 \text{ mm.} \quad (4.19)$$

จากขนาดความกว้างและสูงที่ได้ในวัตถุทรงกลมก็จะเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางจากนั้นจะตีเส้นสีน้ำเงินลงไปแนวความกว้างจากจุดที่  $P_{(3)}$  ถึง  $P_{(4)}$  ในระดับความสูงกึ่งกลางจากนั้น จะสามารถชอยเส้นตรงในแนวตั้งลงไป ระหว่างเส้นสีน้ำเงินและเส้นสีแดงได้โดยเราสามารถกำหนดระยะห่างของเส้นตรงที่ชอยลงไปได้ ในที่นี้ผมกำหนดให้เป็น 3 pixel ตัวโปรแกรมจะเปลียบเทียบเองว่า 3 pixel เท่ากับ กี่ มิลลิเมตรหรือ จากนั้นเราจะสามารถคำนวณหาพื้นที่ที่ได้จากสมการที่ (4.1) ซึ่งเป็นการคำนวณหาพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูในแต่ละช่วงแห่งของเส้นตรงที่ชอยลงไป และนำพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละอันมารวมกัน จะได้ค่าครึ่งหนึ่งของพื้นที่รวม จากนั้นนำมาคูณ 2 จะได้เป็นพื้นที่รวมทั้งนี้การวางวัตถุในการวัดควรคำนึงถึงความสมมาตรของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4.3 การหาความยาวและพื้นที่รวมเชิงปริมาตรของวัตถุ

ข้อมูลรูปภาพในแต่ละเฟรมจากการเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านแสงเลเซอร์จะสามารถนำมาคำนวณหาค่าความกว้างความหนาและพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของวัตถุได้ ซึ่งเมื่อนำจำนวนเฟรมที่มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแสงเลเซอร์จากการเคลื่อนที่ของวัตถุมารวมกันจะทำให้ได้เป็นข้อมูลของความยาวของวัตถุนั้นเอง โดยความละเอียดในการหาความยาวของวัตถุจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความเร็วในการเคลื่อนที่และความเร็วในการเก็บภาพของกล้อง ซึ่งสามารถปรับความละเอียดในการวัดขนาดความยาวของวัตถุโดยการปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุสามารถหาได้โดย

ความเร็วการเคลื่อนที่วัตถุ(mm/s) = ความเร็วของกล้อง (fps) × ความละเอียดในการวัด(mm/frame)

ตัวอย่างเช่นต้องการความละเอียดในการวัดขนาดความยาวของวัตถุที่ 0.5 mm ซึ่งกล้องถ่ายภาพที่นำมาใช้มีความเร็วในการจับภาพที่ 30 fps ดังนั้นความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุเพื่อให้ความละเอียดในการวัดขนาดความยาวของวัตถุที่ 0.5 mm คือ

$$\text{ความเร็วการเคลื่อนที่วัตถุ (mm/s)} = 30 \text{ (fps)} \times 0.5 \text{ (mm/frame)} = 15 \text{ mm/s}$$

นอกจากนั้นเป็นการนำข้อมูลพื้นที่หน้าตัดของวัตถุในแต่ละเฟรมภาพมารวมกันก็จะทำให้ได้เป็นพื้นที่รวมเชิงปริมาตรของวัตถุซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ 4.3

## บทที่ 5

### การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองจากการนำระบบตรวจวัดขนาดวัตถุ โดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ(3D-laser light sectioning, 3D-LLS) ที่ได้นำเสนอมาทำการทดสอบ เพื่อดูประสิทธิภาพและความแม่นยำของระบบตรวจวัดขนาดวัตถุ โดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ โดยการทดสอบวัดขนาด พื้นที่หน้าตัดและพื้นที่รวมเชิงปริมาตรจากผักและผลไม้ ได้แก่ แครอท แดงร้าน มะม่วง ฝรั่งและส้ม

#### 5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองจะใช้โปรแกรมที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Matlab 2010a เป็นโปรแกรมที่ใช้ทดสอบและวิเคราะห์ผล โดยการประมวลบนคอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วในการประมวลผล 2.0 GHz ขนาดหน่วยความจำ 2 GB และใช้กล้องเว็บแคมเป็นตัวเก็บข้อมูลภาพและมีความละเอียดในการถ่ายภาพนิ่งที่ 640x480 พิกเซลถึง 8 M พิกเซล ความละเอียดในการถ่ายภาพวิดีโอที่ 640x480 พิกเซลและความเร็วในการถ่ายภาพวิดีโอ 30 fps ซึ่งกล้องจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยผ่านพอร์ตยูเอสบี 2.0 และใช้โปรแกรมจากกล้องเว็บแคมในการบันทึกภาพวิดีโอ AVI ไฟล์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้โดยตรงกับโปรแกรมที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นบน Matlab จึงช่วยลดขั้นตอนต่างๆลงไปมาก แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ใช้แสงเลเซอร์แบบเส้นความยาวคลื่น 650 nm ส่วนอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุเป็นสายพานลำเลียงใช้มอเตอร์กระแสสลับหนึ่งเฟสเป็นตัวขับเคลื่อน และควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยการใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับมอเตอร์หนึ่งเฟสที่ขับเคลื่อนสายพานลำเลียง การสอบเทียบระบบใช้แผ่นตารางหมากรุกขาวดำซึ่งแต่ละช่องของตารางมีขนาด 30x30 mm.

#### 5.2 ตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

โดยตารางที่ 5-1-5-5 เป็นตารางที่แสดงให้เห็นถึงสมบัติทางกายภาพของแครอท แดงร้าน มะม่วง ฝรั่งและส้มตามลำดับ โดยใช้วิธีการวัดแบบ เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลในการวัดความยาวทั้งสามด้าน และใช้วิธีการวัดปริมาตรด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำในการหาปริมาตร

ตารางที่ 5-1 สมบัติทางกายภาพของแครอท

ลูกที่	ขนาดความยาวแกน			เฉลี่ย b และ c	GMD	ปริมาตรเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล(cm <sup>3</sup> )	ปริมาตรแทนที่น้ำ(cm <sup>3</sup> )	ความชื้นพลาด(%)	อัตราส่วนแกน (b,c)/แกน a
	a	b	c						
1	14.875	3.703	3.595	3.649	5.829	103.649	118.497	12.530	0.245
2	16.833	3.605	3.580	3.593	6.012	113.721	121.860	6.679	0.213
3	17.150	3.518	3.395	3.457	5.895	107.210	112.477	4.683	0.202
4	17.167	4.433	4.432	4.433	6.961	176.521	169.413	4.196	0.258
5	17.467	3.458	3.437	3.448	5.921	108.634	133.390	18.559	0.197
6	17.433	4.342	4.150	4.246	6.798	164.409	170.127	3.361	0.244
7	18.767	3.962	3.937	3.949	6.639	153.140	141.420	8.287	0.210
8	18.883	4.745	4.437	4.591	7.353	208.054	200.323	3.859	0.243
9	19.133	4.128	3.963	4.046	6.790	163.829	130.630	25.415	0.211
10	19.033	5.092	5.013	5.053	7.861	254.223	221.963	14.534	0.265
11	19.633	4.360	4.355	4.358	7.197	195.091	183.630	6.241	0.222
12	19.583	4.072	4.058	4.065	6.865	169.318	153.243	10.490	0.208
13	19.533	4.210	4.187	4.198	7.009	180.198	156.010	15.504	0.215
14	19.650	3.848	3.728	3.788	6.557	147.536	137.630	7.198	0.193
15	19.783	4.405	4.342	4.373	7.233	198.033	146.753	34.943	0.221
16	20.300	4.192	4.137	4.164	7.061	184.239	168.493	9.345	0.205
17	20.783	5.135	5.013	5.074	8.118	279.981	250.117	11.940	0.244
18	20.667	4.250	4.250	4.250	7.200	195.335	172.297	13.371	0.206
19	21.000	4.017	3.925	3.971	6.918	173.270	168.593	2.774	0.189
20	21.233	3.852	3.817	3.834	6.783	163.323	175.647	7.016	0.181
21	21.400	3.753	3.667	3.710	6.653	154.111	153.950	0.105	0.173
22	21.283	4.492	4.453	4.473	7.523	222.820	217.660	2.371	0.210
23	21.767	4.677	4.623	4.650	7.778	246.255	200.270	22.962	0.214
24	22.150	4.375	4.293	4.334	7.465	217.706	189.813	14.695	0.196
25	22.333	4.472	4.285	4.378	7.536	223.978	201.547	11.129	0.196
26	22.167	4.872	4.800	4.836	8.033	271.278	254.527	6.581	0.218
27	22.617	4.423	4.357	4.390	7.582	228.104	184.510	23.627	0.194
28	22.733	4.050	3.987	4.018	7.160	192.097	164.900	16.493	0.177
29	22.833	4.443	4.413	4.428	7.650	234.297	207.570	12.876	0.194
30	23.733	3.855	3.828	3.842	7.049	183.301	189.983	3.517	0.162

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-2 สมบัติทางกายภาพของแฉ่งรึ้น

ลูกที่	ขนาดความยาวแกน			เฉลี่ย b และ c	GMD	ปริมาตรเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล(cm <sup>3</sup> )	ปริมาตรแทนที่น้ำ(cm <sup>3</sup> )	ความผิดพลาด(%)	อัตราส่วนแกน (b,c)/แกน a
	a	b	c						
1	8.172	2.717	2.615	2.666	3.872	30.380	36.673	17.160	0.326
2	8.778	3.123	3.117	3.120	4.405	44.732	52.173	14.262	0.355
3	9.222	2.800	2.740	2.770	4.136	37.027	44.123	16.082	0.300
4	9.887	2.875	2.860	2.868	4.332	42.545	53.267	20.129	0.290
5	10.095	3.053	2.967	3.010	4.505	47.848	60.387	20.764	0.298
6	10.220	2.860	2.747	2.803	4.314	42.017	52.807	20.433	0.274
7	10.440	3.062	3.030	3.046	4.592	50.674	62.280	18.635	0.292
8	10.473	2.923	2.883	2.903	4.453	46.210	56.003	17.487	0.277
9	10.545	3.382	3.350	3.366	4.925	62.517	73.530	14.978	0.319
10	10.928	3.067	3.043	3.055	4.672	53.369	71.420	25.274	0.280
11	13.133	3.217	3.207	3.212	5.136	70.902	72.607	2.348	0.245
12	12.042	3.862	3.788	3.825	5.606	92.202	101.243	8.930	0.318
13	12.295	3.937	3.925	3.931	5.749	99.439	105.727	5.947	0.320
14	12.272	3.843	3.835	3.839	5.655	94.641	103.950	8.955	0.313
15	14.808	4.063	3.857	3.960	6.145	121.436	152.300	20.265	0.267
16	15.060	4.140	4.013	4.077	6.301	130.921	156.633	16.415	0.271
17	15.255	4.258	4.246	4.252	6.510	144.386	173.280	16.675	0.279
18	15.787	4.378	4.356	4.367	6.703	157.612	172.227	8.486	0.277
19	16.333	4.080	4.002	4.041	6.437	139.583	183.207	23.811	0.247
20	16.783	4.172	4.162	4.167	6.630	152.518	184.030	17.123	0.248
21	17.917	4.388	4.305	4.347	6.969	177.130	215.473	17.795	0.243
22	18.100	4.332	4.237	4.284	6.926	173.872	198.930	12.596	0.237
23	18.333	4.218	4.200	4.209	6.874	169.985	185.703	8.464	0.230
24	18.600	4.155	4.077	4.116	6.805	164.917	204.513	19.361	0.221
25	19.233	4.022	4.012	4.017	6.770	162.386	191.507	15.206	0.209
26	19.100	4.128	4.042	4.085	6.831	166.815	205.330	18.758	0.214
27	19.083	4.127	4.033	4.080	6.823	166.229	195.717	15.067	0.214
28	19.800	4.162	4.127	4.144	6.980	177.971	222.157	19.890	0.209
29	19.900	4.200	4.143	4.172	7.022	181.203	210.923	14.090	0.210
30	20.183	4.595	4.280	4.438	7.349	207.714	222.133	6.491	0.220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-3สมบัติทางกายภาพของมะม่วง

ลูกที่	ขนาดความยาวแกน			เฉลี่ย b และ c	GMD	ปริมาตรเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล(cm <sup>3</sup> )	ปริมาตรแทนที่น้ำ(cm <sup>3</sup> )	ความผิดปกติ(%)	อัตราส่วนแกน (b,c)/แกน a
	a	b	c						
1	9.320	6.037	5.160	5.598	6.621	151.898	141.677	7.214	0.601
2	10.623	6.395	5.182	5.788	7.061	184.239	171.713	7.295	0.545
3	10.665	6.373	5.670	6.022	7.277	201.669	186.563	8.097	0.565
4	10.903	5.930	5.333	5.632	7.012	180.430	167.627	7.638	0.517
5	11.403	5.735	5.622	5.678	7.164	192.419	173.177	11.111	0.498
6	11.998	7.230	6.175	6.703	8.121	280.292	267.747	4.685	0.559
7	12.130	5.802	5.120	5.461	7.116	188.577	166.590	13.198	0.450
8	12.275	6.105	5.178	5.642	7.294	203.086	182.223	11.449	0.460
9	12.428	5.958	5.348	5.653	7.344	207.291	182.403	13.645	0.455
10	11.998	7.043	5.777	6.410	7.874	255.487	236.513	8.022	0.534
11	12.670	6.015	5.262	5.638	7.374	209.841	188.890	11.092	0.445
12	12.858	6.178	5.373	5.776	7.530	223.443	201.057	11.134	0.449
13	12.843	6.507	5.157	5.832	7.553	225.497	214.513	5.120	0.454
14	12.503	6.413	5.400	5.907	7.565	226.573	200.670	12.908	0.472
15	12.395	6.367	5.388	5.878	7.520	222.554	214.970	3.528	0.474
16	12.840	7.737	5.997	6.867	8.414	311.738	299.280	4.163	0.535
17	12.898	6.462	5.460	5.961	7.692	238.177	223.370	6.629	0.462
18	13.238	6.283	5.475	5.879	7.694	238.363	219.950	8.371	0.444
19	13.047	7.432	6.517	6.974	8.581	330.671	337.463	2.013	0.535
20	12.623	7.425	6.283	6.854	8.382	308.194	298.943	3.095	0.543
21	12.920	7.892	6.047	6.969	8.511	322.644	304.440	5.980	0.539
22	13.632	7.365	6.090	6.728	8.487	319.922	301.767	6.016	0.494
23	13.587	6.727	6.002	6.364	8.186	287.076	252.197	13.830	0.468
24	13.640	6.227	5.592	5.909	7.802	248.542	220.590	12.671	0.433
25	13.498	6.187	5.245	5.716	7.594	229.189	213.433	7.382	0.423
26	13.758	6.228	5.373	5.801	7.722	240.975	221.613	8.737	0.422
27	14.113	6.597	5.740	6.168	8.115	279.671	251.277	11.300	0.437
28	14.252	6.843	5.990	6.417	8.360	305.774	262.980	16.273	0.450
29	14.348	6.718	5.995	6.357	8.329	302.385	269.557	12.179	0.443
30	15.480	7.022	6.120	6.571	8.729	348.077	314.560	10.655	0.424

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-4 สมบัติทางกายภาพของฝรั่ง

ลูกที่	ขนาดความยาวแกน			เฉลี่ย b และ c	GMD	ปริมาตรเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล(cm <sup>3</sup> )	ปริมาตรแทนที่น้ำ(cm <sup>3</sup> )	ความผิดปกติ(%)	อัตราส่วนแกน (b,c)/แกน a
	a	b	c						
1	6.497	6.292	5.268	5.780	5.994	112.702	127.543	11.636	0.890
2	6.620	6.450	5.450	5.950	6.151	121.792	142.660	14.628	0.899
3	6.870	6.757	6.117	6.437	6.573	148.618	161.527	7.992	0.937
4	7.090	7.025	5.467	6.246	6.481	142.465	162.057	12.090	0.881
5	7.440	6.912	6.417	6.664	6.910	172.670	177.843	2.909	0.896
6	7.018	6.880	6.188	6.534	6.685	156.346	174.493	10.400	0.931
7	7.457	7.042	6.243	6.643	6.895	171.548	179.840	4.611	0.891
8	7.377	6.818	6.133	6.476	6.757	161.452	179.407	10.008	0.878
9	7.440	7.360	6.755	7.058	7.178	193.550	213.103	9.175	0.949
10	7.752	6.800	6.507	6.653	7.000	179.505	194.990	7.941	0.858
11	7.595	7.515	6.130	6.823	7.046	183.067	195.297	6.262	0.898
12	6.962	6.832	6.302	6.567	6.692	156.837	184.877	15.167	0.943
13	7.377	7.113	6.027	6.570	6.813	165.500	191.820	13.721	0.891
14	7.873	7.153	6.550	6.852	7.172	193.065	215.790	10.531	0.870
15	8.013	7.522	6.392	6.957	7.276	201.586	225.297	10.524	0.868
16	7.713	7.343	6.962	7.153	7.333	206.361	219.423	5.953	0.927
17	7.878	7.230	7.235	7.233	7.442	215.700	224.360	3.860	0.918
18	7.815	7.227	7.045	7.136	7.355	208.224	220.203	5.440	0.913
19	8.230	7.627	7.055	7.341	7.622	231.733	237.360	2.371	0.892
20	8.095	7.912	6.485	7.198	7.461	217.357	239.190	9.128	0.889
21	8.105	7.372	7.008	7.190	7.481	219.109	229.363	4.471	0.887
22	7.958	7.637	7.472	7.554	7.686	237.620	248.160	4.247	0.949
23	8.115	7.653	6.507	7.080	7.393	211.468	230.207	8.140	0.872
24	8.142	8.045	7.443	7.744	7.870	255.097	248.690	2.576	0.951
25	8.077	7.925	6.763	7.344	7.565	226.573	240.617	5.837	0.909
26	8.215	7.707	7.062	7.384	7.646	233.929	248.757	5.961	0.899
27	8.228	8.137	6.642	7.389	7.633	232.738	254.450	8.533	0.898
28	8.947	8.923	8.322	8.623	8.726	347.718	379.063	8.269	0.964
29	9.845	9.478	7.852	8.665	9.015	383.424	385.173	0.454	0.880
30	9.935	9.617	7.990	8.803	9.139	399.464	430.287	7.163	0.886

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-5 สมบัติทางกายภาพของส้ม

ลูกที่	ขนาดความยาวแกน			เฉลี่ย b และ c	GMD	ปริมาตรเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล(cm <sup>3</sup> )	ปริมาตรแทนที่น้ำ(cm <sup>3</sup> )	ความผิดพลาด(%)	อัตราส่วนแกน (b,c)/แกน a
	a	b	c						
1	3.000	2.997	2.362	2.679	2.769	11.111	13.627	18.463	0.893
2	3.102	3.040	2.432	2.736	2.841	12.000	14.903	19.479	0.882
3	3.423	3.360	2.608	2.984	3.107	15.697	19.683	20.251	0.872
4	3.530	3.393	2.868	3.131	3.251	17.982	20.833	13.685	0.887
5	3.483	3.377	2.910	3.143	3.247	17.915	20.203	11.325	0.902
6	3.723	3.650	3.292	3.471	3.550	23.414	26.440	11.445	0.932
7	3.940	3.865	3.305	3.585	3.692	26.337	30.353	13.231	0.910
8	4.685	4.533	3.838	4.186	4.336	42.663	46.997	9.222	0.893
9	5.233	5.112	4.705	4.908	5.011	65.850	69.510	5.265	0.938
10	5.162	5.068	4.370	4.719	4.853	59.815	65.883	9.210	0.914
11	5.343	5.295	4.803	5.049	5.141	71.109	79.577	10.641	0.945
12	5.488	5.407	4.792	5.099	5.219	74.395	79.983	6.986	0.929
13	5.383	5.333	4.425	4.879	5.027	66.483	76.353	12.927	0.906
14	5.327	5.307	4.607	4.957	5.069	68.163	74.433	8.424	0.931
15	5.418	5.215	4.820	5.018	5.145	71.275	79.963	10.865	0.926
16	5.932	5.880	5.712	5.796	5.840	104.237	110.667	5.810	0.977
17	6.093	5.413	5.340	5.377	5.606	92.202	110.960	16.905	0.882
18	6.272	6.255	5.702	5.978	6.070	117.044	127.577	8.256	0.953
19	6.190	6.110	5.143	5.627	5.794	101.793	116.610	12.706	0.909
20	6.368	6.262	5.305	5.783	5.958	110.684	123.490	10.370	0.908
21	6.430	6.388	6.033	6.211	6.281	129.679	140.440	7.662	0.966
22	6.637	6.217	5.262	5.739	6.010	113.607	129.600	12.340	0.865
23	6.535	6.428	5.788	6.108	6.242	127.278	137.327	7.318	0.935
24	6.543	6.498	5.615	6.057	6.204	124.968	137.187	8.907	0.926
25	6.680	6.612	5.767	6.189	6.339	133.304	147.990	9.924	0.927
26	6.498	6.488	5.385	5.937	6.101	118.846	143.373	17.107	0.914
27	6.673	6.552	5.848	6.200	6.347	133.810	146.493	8.658	0.929
28	6.810	6.835	5.850	6.343	6.482	142.531	160.503	11.197	0.931
29	6.913	6.840	5.532	6.186	6.395	136.868	152.583	10.299	0.895
30	6.945	6.693	5.910	6.302	6.501	143.788	163.210	11.900	0.907

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-6 – 5-10 เป็นตารางที่แสดงถึงการวัดขนาดและปริมาตรของแครอท แดงร้านมะม่วง ฝรั่งและส้มตามลำดับ จากเทคนิคการวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วน

ตารางที่ 5-6 ขนาดและปริมาตรของแครอทจากเทคนิคการวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วน

ลูก ที่	a (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ a (%)	b (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ b (%)	c (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ c (%)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความคลาดเคลื่อน ของปริมาตร (%)
1	13.776	7.388	4.046	9.244	3.548	1.299	117.936	0.473
2	16.552	1.671	3.892	7.968	3.737	4.379	120.709	0.945
3	17.350	1.166	3.733	6.094	3.449	1.600	110.961	1.348
4	16.556	3.557	4.546	2.548	4.382	1.123	172.817	2.009
5	16.724	4.252	3.697	7.577	3.324	3.890	132.662	0.545
6	16.970	2.658	4.442	2.306	4.236	2.071	170.694	0.333
7	17.865	4.805	4.222	6.559	3.849	2.217	143.436	1.425
8	17.980	4.784	4.510	4.956	4.650	4.803	201.965	0.820
9	19.050	0.436	4.334	4.983	4.054	2.280	133.746	2.385
10	18.745	1.515	5.094	0.037	5.189	3.498	220.876	0.490
11	18.780	4.346	4.476	2.650	4.401	1.060	182.927	0.383
12	18.875	3.617	4.261	4.998	4.057	0.359	150.997	1.466
13	18.824	3.631	4.541	7.871	4.208	0.503	154.965	0.670
14	18.988	3.369	3.965	3.028	3.736	0.209	137.811	0.132
15	19.100	3.454	4.472	1.513	4.485	3.296	148.263	1.029
16	20.012	1.419	4.209	0.404	4.158	0.516	168.136	0.212
17	20.092	3.326	4.952	3.565	5.025	0.227	251.355	0.495
18	20.008	3.187	4.449	4.679	4.220	0.713	173.155	0.498
19	20.587	1.967	4.196	4.453	3.900	0.624	167.677	0.544
20	20.532	3.303	4.201	9.063	3.807	0.263	176.542	0.509
21	20.555	3.949	4.040	7.645	3.723	1.548	153.857	0.060
22	20.580	3.305	4.622	2.893	4.548	2.123	216.964	0.320
23	20.810	4.395	4.529	3.156	4.561	1.350	199.180	0.544
24	22.078	0.325	4.507	3.021	4.294	0.020	190.055	0.127
25	21.032	5.827	4.723	5.627	4.198	2.032	201.963	0.207
26	22.060	0.481	4.883	0.234	4.776	0.507	255.133	0.238
27	21.060	6.883	4.579	3.510	4.395	0.888	183.404	0.600
28	21.937	3.503	4.293	6.011	3.974	0.319	162.944	1.186
29	21.940	3.912	4.617	3.913	4.555	3.205	205.675	0.913
30	23.230	2.121	4.082	5.879	3.738	2.357	189.273	0.374

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-7 ขนาดและปริมาตรของแฉ่งร้านจากเทคนิคการวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วน

ลูก ที่	a (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ a (%)	b (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ b (%)	c (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ c (%)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความคลาดเคลื่อน ของปริมาตร (%)
1	8.021	1.844	2.752	1.292	2.608	0.279	38.136	3.989
2	8.675	1.177	3.111	0.407	2.956	5.152	55.886	7.116
3	9.124	1.059	2.867	2.408	2.827	3.185	49.017	11.092
4	9.091	8.048	2.928	1.834	2.784	2.671	52.644	1.170
5	10.113	0.178	3.200	7.867	3.084	0.996	59.948	0.727
6	10.224	0.034	3.029	5.906	2.740	0.249	54.247	2.728
7	10.248	1.839	3.197	5.507	2.999	2.047	62.680	0.643
8	10.349	1.192	2.928	1.543	2.871	1.786	54.842	2.074
9	10.452	0.882	3.556	5.168	3.293	1.703	76.090	3.481
10	10.693	2.153	3.378	10.985	3.210	4.659	73.625	3.087
11	13.130	0.025	3.205	0.369	3.169	1.183	68.709	5.369
12	12.104	0.513	3.922	3.521	4.082	5.717	108.589	7.255
13	12.130	1.346	4.086	4.092	3.892	1.132	104.579	1.086
14	12.128	1.175	3.998	4.023	3.658	4.627	103.095	0.822
15	14.786	0.151	4.085	0.529	3.776	2.081	151.940	0.237
16	15.105	0.299	4.093	1.141	3.927	2.163	160.069	2.193
17	15.124	0.859	4.359	2.374	4.041	4.841	173.319	0.023
18	15.275	3.241	4.537	3.615	4.118	5.467	172.190	0.021
19	16.130	1.245	4.189	2.660	4.003	0.039	182.111	0.598
20	16.680	0.616	4.275	2.476	3.927	5.644	185.596	0.851
21	17.290	3.498	4.533	5.289	4.232	3.556	216.035	0.261
22	18.110	0.055	4.435	4.671	4.193	3.206	201.742	1.414
23	18.340	0.036	4.266	1.135	4.155	1.071	187.420	0.924
24	18.560	0.215	4.100	0.563	4.002	3.673	204.038	0.232
25	19.225	0.043	4.187	4.370	3.925	2.396	191.764	0.134
26	19.110	0.052	4.458	10.308	4.041	2.121	207.559	1.085
27	19.110	0.140	4.093	1.468	3.886	5.834	192.836	1.472
28	19.780	0.101	4.276	2.743	4.002	3.010	220.945	0.546
29	19.690	1.055	4.353	3.653	3.991	3.668	212.115	0.565
30	20.220	0.182	4.595	7.352	4.404	4.167	222.420	0.129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-8 ขนาดและปริมาตรของมะม่วงจากเทคนิคการวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วน

ลูก ที่	a (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ a (%)	b (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ b (%)	c (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ c (%)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความคลาดเคลื่อน ของปริมาตร (%)
1	9.192	1.373	5.957	1.319	4.804	6.896	140.488	0.839
2	9.960	6.244	6.302	1.450	4.804	7.290	172.613	0.524
3	10.472	1.810	6.348	0.392	5.205	8.195	187.833	0.680
4	10.728	1.608	5.768	2.737	4.943	7.315	170.358	1.629
5	10.972	3.783	5.812	1.350	5.205	7.411	169.312	2.232
6	10.650	11.238	6.971	3.588	5.658	8.371	263.252	1.679
7	11.752	3.116	5.704	1.690	4.743	7.355	167.374	0.471
8	11.163	9.059	6.060	0.742	4.891	5.546	182.539	0.173
9	11.090	10.768	5.758	3.360	4.970	7.079	183.050	0.355
10	11.160	6.987	6.912	1.859	5.370	7.048	235.837	0.286
11	12.080	4.657	5.938	1.284	4.945	6.021	189.729	0.444
12	11.906	7.406	5.933	3.974	5.011	6.739	200.778	0.138
13	11.906	7.298	6.411	1.474	4.793	7.046	218.493	1.855
14	11.780	5.785	6.364	0.770	5.016	7.118	203.763	1.541
15	11.725	5.405	6.097	4.229	5.042	6.433	212.802	1.009
16	11.505	10.397	7.223	6.641	5.571	7.092	296.623	0.888
17	11.900	7.740	6.175	4.444	5.139	5.883	222.699	0.301
18	12.550	5.200	6.001	4.501	5.109	6.679	217.494	1.116
19	12.275	5.915	7.239	2.592	5.928	9.037	338.546	0.321
20	12.210	3.274	7.280	1.957	5.701	9.268	296.435	0.839
21	12.180	5.728	7.825	0.849	5.544	8.310	303.578	0.283
22	13.100	3.900	7.315	0.682	5.544	8.958	302.414	0.215
23	13.465	0.895	6.626	1.494	5.597	6.745	252.795	0.237
24	13.575	0.477	6.174	0.840	5.110	8.613	218.479	0.957
25	13.644	1.079	5.850	5.437	4.940	5.820	212.244	0.557
26	13.700	0.424	6.200	0.462	5.007	6.819	224.270	1.199
27	14.440	2.315	6.669	1.102	5.298	7.697	254.880	1.434
28	14.140	0.784	6.895	0.761	5.461	8.829	264.646	0.633
29	13.730	4.309	6.723	0.069	5.488	8.450	269.485	0.027
30	15.650	1.098	7.034	0.174	5.642	7.818	318.016	1.099

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-9 ขนาดและปริมาตรของฝั้งจากเทคนิคการวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วน

ลูก ที่	a (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ a (%)	b (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ b (%)	c (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ c (%)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความคลาดเคลื่อน ของปริมาตร (%)
1	6.528	0.489	6.526	3.719	5.187	1.535	127.896	0.277
2	6.647	0.411	6.648	3.063	4.876	10.534	143.008	0.244
3	6.661	3.037	6.664	1.378	6.213	1.574	163.194	1.032
4	6.905	2.614	6.902	1.748	5.788	5.881	162.469	0.254
5	7.046	5.292	7.048	1.968	6.437	0.313	177.387	0.256
6	6.907	1.585	6.904	0.344	6.319	2.108	175.280	0.451
7	7.214	3.256	7.203	2.298	6.259	0.259	178.568	0.707
8	7.206	2.310	7.204	5.652	6.211	1.272	180.788	0.770
9	7.483	0.577	7.435	1.013	5.660	16.211	213.532	0.201
10	7.570	2.341	7.557	11.131	6.517	0.156	195.277	0.147
11	7.539	0.733	7.502	0.171	6.318	3.067	197.845	1.305
12	7.246	4.082	7.224	5.748	6.445	2.282	185.306	0.232
13	7.435	0.785	7.423	4.360	6.213	3.087	190.211	0.839
14	7.828	0.576	7.835	9.525	6.472	1.193	215.576	0.099
15	7.725	3.604	7.745	2.975	6.610	3.408	226.603	0.580
16	7.334	4.915	7.325	0.256	6.799	2.342	220.822	0.638
17	7.560	4.036	7.525	4.074	7.005	3.181	223.583	0.346
18	7.893	1.003	7.869	8.886	6.721	4.603	221.306	0.501
19	8.288	0.711	8.275	8.495	6.926	1.829	236.029	0.561
20	8.197	1.258	8.183	3.434	6.462	0.353	240.885	0.709
21	7.556	6.774	7.543	2.328	6.751	3.665	227.468	0.826
22	7.337	7.809	7.313	4.235	7.355	1.556	249.004	0.340
23	8.149	0.422	8.135	6.288	6.631	1.918	230.925	0.312
24	7.920	2.720	7.935	1.373	6.874	7.654	248.674	0.007
25	7.907	2.103	7.857	0.862	6.657	1.567	238.655	0.815
26	8.019	2.386	7.947	3.116	6.795	3.775	247.532	0.492
27	7.902	3.969	7.902	2.888	6.574	1.024	253.845	0.238
28	9.002	0.615	9.046	1.371	8.776	5.455	379.948	0.233
29	9.625	2.239	9.625	1.543	7.361	6.248	387.713	0.659
30	10.107	1.731	10.107	5.099	7.588	5.027	430.409	0.028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-10 ขนาดและปริมาตรของส้มจากเทคนิคการวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยการ ใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วน

ลูก ที่	a (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ a (%)	b (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ b (%)	c (cm)	ความคลาด เคลื่อนของ c (%)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความคลาดเคลื่อน ของปริมาตร (%)
1	3.192	6.400	3.154	5.261	2.787	18.021	13.814	1.372
2	3.149	1.530	3.045	0.176	2.875	18.231	15.329	2.858
3	3.441	0.503	3.439	2.342	2.832	8.578	20.397	3.624
4	3.683	4.328	3.546	4.485	3.175	10.707	20.656	0.849
5	3.665	5.219	3.446	2.043	3.298	13.316	20.307	0.512
6	3.918	5.223	3.735	2.316	3.662	11.261	26.057	1.448
7	4.149	5.303	4.012	3.809	3.542	7.185	33.715	11.075
8	4.565	2.558	4.345	4.144	4.039	5.240	46.901	0.203
9	5.199	0.648	5.035	1.509	4.339	7.777	68.626	1.272
10	5.289	2.476	5.146	1.526	4.514	3.304	65.769	0.173
11	5.256	1.632	5.165	2.447	4.551	5.262	66.711	16.168
12	5.347	2.582	5.123	5.238	4.552	4.999	79.966	0.022
13	5.549	3.086	5.349	0.303	4.521	2.167	73.717	3.453
14	5.280	0.873	5.103	3.830	4.495	2.414	74.693	0.349
15	5.255	3.019	5.123	1.756	4.616	4.228	81.019	1.320
16	5.792	2.349	5.592	4.893	5.208	8.816	112.666	1.807
17	6.070	0.384	6.035	11.476	5.081	4.851	110.640	0.288
18	6.130	2.256	5.946	4.945	5.304	6.978	128.446	0.682
19	6.298	1.747	6.077	0.546	5.221	1.502	117.470	0.737
20	6.223	2.281	6.235	0.433	5.087	4.111	122.197	1.047
21	6.258	2.669	6.254	2.098	5.566	7.744	140.009	0.307
22	6.387	3.769	6.323	1.718	5.223	0.732	129.121	0.370
23	6.435	1.525	6.435	0.109	5.460	5.681	138.469	0.832
24	6.449	1.447	6.433	1.012	5.302	5.571	136.787	0.291
25	6.536	2.161	6.552	0.897	5.518	4.316	148.544	0.375
26	6.716	3.354	6.745	3.962	5.286	1.835	142.927	0.311
27	6.504	2.541	6.523	0.431	5.527	5.495	145.723	0.526
28	6.782	0.413	6.732	1.500	5.538	5.332	161.452	0.591
29	6.737	2.556	6.753	1.269	6.572	18.801	151.695	0.582
30	6.847	1.410	6.623	1.044	5.918	0.140	161.476	1.062

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดขนาดของผักและผลไม้ชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิค 3D-LLS

ตารางที่ 5-11 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนความยาวแกนสั้นและแกนยาวไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการวัดปริมาตรผักและผลไม้รูปทรงต่างๆ ด้วยเทคนิค 3D-LLS ( $P \leq 0.05$ ) เนื่องจากค่าความผิดพลาดในการวัดปริมาตรด้วยเทคนิค 3D-LLS ขึ้นอยู่กับความยาวในแนวแกน a ของผักและผลไม้ที่วางบนสายพาน เนื่องจากความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่สัมพันธ์กับความเร็วในการจับภาพของกล้องวิดีโอ

เมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของผักและผลไม้รูปทรงต่างๆ พบว่าไม่สามารถแบ่งกลุ่มได้ แสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในช่วง 0.521-0.799% โดยส้มมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำที่สุดคือ 0.521% เนื่องจากมีลักษณะความสมมาตรสูง และมีค่าความยาวในแกน a ต่ำกว่าผักและผลไม้รูปทรงอื่นๆ มะม่วงมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสูงสุดคือ 0.799% เพราะมีลักษณะความสมมาตรต่ำ และมีค่าความยาวในแนวแกน a สูง

ตารางที่ 5-11 ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของผักและผลไม้ชนิดต่างๆ จากการวัดปริมาตรด้วยเทคนิค 3D-LLS เปรียบเทียบกับวิธี Water Displacement

ชนิด	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	อัตราส่วนความยาว แกนสั้นและแกนยาว
แครอท	0.709±0.56 a	0.210±0.02a
แตงร้าน	0.721±0.56 a	0.267±0.04b
มะม่วง	0.799±0.58 a	0.484±0.05c
ฝรั่ง	0.570±0.43 a	0.904±0.03d
ส้ม	0.521±0.33 a	0.916±0.03d

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังกันในแนวตั้ง แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

#### 5.4 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ซึ่งจากตาราง 5-1 สามารถสรุปได้ว่า เมื่อแครอทมีลักษณะเป็นทรงกรวย แดงด้านมีลักษณะเป็นทรงรี มะม่วงไม่มีรูปทรงที่แน่นอน และ ฟรุ้งกับส้มจะมีลักษณะเป็นทรงกลม การใช้วิธี 3D-LLS นี้ค่าความผิดพลาดไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปทรงของผลไม้ ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถวัดปริมาตรของผลไม้ได้ทุกรูปทรง โดยให้ค่าความผิดพลาดน้อย แต่วัตถุนี้นำมาใช้ในการวัด ควรมีความสมมาตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอวิธีการวัดปริมาตรของผักและผลไม้โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพโดยเทคนิคการวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วน (3D-laser light sectioning, 3D-LLS) เมื่อเปรียบเทียบการวัดปริมาตรของ 3D-LLS กับวิธีการวัดปริมาตรด้วยน้ำ จะเห็นได้ว่าวิธีดังกล่าวมีประสิทธิภาพและแม่นยำสูง ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดปริมาตรแบบต่อเนื่องสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องได้ทันที และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผักและผลไม้ที่มีรูปร่างต่างๆ ที่มีลักษณะสมมาตร

#### 6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

นำเทคนิคดังกล่าวสามารถนำไปดัดแปลงให้เป็นเทคนิคการวัดปริมาตรแบบต่อเนื่อง โดยเทคนิค 3D-LLS เป็นเทคนิคที่ใช้จำนวนอุปกรณ์ไม่มาก ง่ายในการออกแบบและติดตั้ง แต่มีปัญหาในเรื่องของการลดผลกระทบจากแสงภายนอก ซึ่งการแก้ปัญหาได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.4 ระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นที่ได้นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กับผักและผลไม้ที่มีรูปร่างหลากหลาย สามารถนำไปเป็นพื้นฐานในการพัฒนาให้สามารถใช้ในระบบคัดแยก ในระบบอื่นๆ ได้ สามารถปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้น และอาจมีการเพิ่มการคำนวณมวลต่อพื้นที่เพื่อใช้ในการคำนวณน้ำหนักของวัตถุได้ต่อไปในอนาคต

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Yaowarat Sirisathitkul, Naphasorn Thumpen and Weerayut Puangtong, “Automated Chokun Orange Maturity Sorting by Color Grading”, *Walailak J Sci & Tech* 2006; 3(2): 195-205.
- [2] Watcharin Kaewapichai, Pakorn Kaewtrakulpong and Asa Prateepasen, “A Real-Time Automatic Inspection System for Pattavia Pineapples”, *Engineering Materials* Vol. 321-323 (2006) pp 1186-1191
- [3] นางสาวสิมิลัน อาศัยพานิชย์, ดร.ฐิติวรรณ ศรีนาค, “Automatic Fish Measurement and Classification System using Video Image Analysis”, *ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*
- [4] B. Zion, A.Shklyar and I.Karplus, “Sorting fish by computer vision”, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 23 (1999) page 175–187, Elsevier
- [5] D.Wulfsohn, H.J.G. Gundersen, E.B. Vedel Jensen, “Volume estimation from projections”, *Journal of Microscopy*, Vol. 215 (2004) page 111–120, Elsevier
- [6] E.Guerra, J.R. Villalobos, “A three-dimensional automated visual inspection system for SMT assembly”, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 40 (2001) page 175–190, Elsevier
- [7] Frank Storbeck, Berent Daan, “Fish species recognition using computer vision and a neural network”, *Fisheries Research*, Vol. 51 (2001) pages 11-15, Elsevier.
- [8] ปานมนัส ศิริสมบุญ, พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และสาทิป รัตนภาสกร. 2538. สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของชีววัสดุ. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] Jarimopas, B., Nunak, N., and Nunak, T. 2005. Electronic device for measuring volume of selected fruit and vegetables. Vol. 35, Elsevier, 25–31.
- [10] Scott, U.E. 1998. *Computer Vision and Image Processing a practical approach using CVIPtools*. Prentice-Hall International (UK) Limited, England.
- [11] Cey, K. 2006. A comparison of the antibacterial effectiveness of commercial fruit and vegetable washes using an *Escherichia coli* zone of inhibition test and an optical density test to measure bacterial presence on the surface of organic versus non-organic apples. Senior Seminar, St. Martin’s University.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] สรายุทธ อินทุเศรษฐ. การวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม] กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ; 2553.
- [13] Mohsenin, N.N. 1980. Physical properties of plant and animal materials. third ed. Gordon and Breach, Science Publisher Inc., New York.
- [14] Nunak, N. and Suesut, T. 2009. Measuring Geometric Mean Diameter of fruits and vegetables using Light Sectioning Method. Vol. 31, Prince of Songkla University, 629-633.
- [15] Ferruh, E. and Rahmi, U. 2009. Potential use of 3-dimentional scanners for food process modeling. Vol.93, Elsevier, 337-343.
- [16] Khojastehnazhand, M., Omid, M., and Tabatabaeefar, A. 2010. Estimating volume and mass of citrus fruits by image processing technique. Vol.100, Elsevier, 315-321.
- [17] Du, C.J. and Sun, D.W. 2006. Estimating the surface area and volume of ellipsoidal ham using computer vision. Vol.73, Elsevier, 260-268.
- [18] Ferruh, E. and Rahmi, U. 2009. Potential use of 3-dimentional scanners for food process modeling. Vol.93, Elsevier, 337-343.
- [19] วราศิริ พวงมาลัย, วริศร์ วรเวทย์สกุล และวัชรพงษ์ คุปตวุฒินันท์. การรู้จำภาพใบหน้า [ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์] กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ; 2551.
- [20] Awock, G.W. and Thomas R, 1995. Applied Image Processing. THE MACMILLAN PRESS LTD, London.
- [21] Suesut, T. 2006. Assignment of measurement of 3D-Objects. Institute for Automation, University of Leoben, Austria.
- [22] Hartley, R. and Zisserman, A. 2003. Multiple View Geomerty in ComputerVision. second ed. Cambridge University Press.
- [23] จตุพล เผือกกลางเมือง, ศรศวิสน์ ศรีศิริ, อภิชน ต้นตนานนท์ และเอกรัช พุทธรักษา. เครื่องสร้างภาพสามมิติด้วยแสงเลเซอร์ [ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม]. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ; 2546.
- [24] Bradley, B.D., Chan, A.D.C., and Hayes, M.J.D. 2008. A Simple, Low Cost, 3D Scanning System Using the Laser Light-Sectioning Method, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Victoria, Canada, May 12–15, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] Ofner, R., O'Leary P., Schalk, P., and Gfrerrer, A. 2008. Measuring and Analyzing Cross-Sectional Profiles of Rotating Objects Using Light Sectioning. Vol. 57, No. 10, IEEE Transaction on instrumentation and Measurement, 2329–2338.
- [26] Karplus, I., Shklyar, A., and Zion, B. 1999. Sorting fish by computer vision. Vol. 23, Elsevier, 175-187.
- [27] Aleixos, N., Blasco, J., and Molto, E. 2003. Machine Vision System for Automatic Quality Grading of Fruit. Vol. 85 No. 4, Sciencedirect, 415-423.
- [28] Brosnan, T., Sun, D.W. 2004. Improving quality inspection of food products by computer vision-a review. Vol.61, Elsevier, 3-16.
- [29] Inthuset, S., Nunak, N., and Suesut, T. 2009. Fish Size Measurement by Computer Vision using Laser Light Sectioning. School of Agricultural Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# นวัตกรรม สสะอาด และยั่งยืน

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12

31 มีนาคม - 1 เมษายน 2554

ณ ชลจันทร์ พักยา รีสอร์ท จ. ชลบุรี



สถาบัน  
NSTDA



โดย  
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย (TSAE)

และ

หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (KMITL)

เอกสารนี้เป็นเอกสาร

ไม่ทำกรณีใดๆ ทั้งสิ้น



## การวัดปริมาตรผักและผลไม้ด้วยวิธีลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง

Volume measurement of some selected vegetables and fruits using Laser-Light sectioning

นภัทธา หนูนา<sup>1</sup> นพรัตน์ สุขเกษม<sup>2</sup> ทวีพล ชือสัตย์<sup>2</sup>  
Navaphattra Nunak<sup>1</sup>, Nopparat Sukkasem<sup>2</sup>, Taweepol Suesut<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการวัดปริมาตรของผักและผลไม้แบบไม่ทำลาย โดยการวัดสมบัติของวัตถุด้วยระบบ 3 มิติในระบบคอมพิวเตอร์วิชั่นโดยการใช้วิธีลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ วัตถุที่จะทำการวัดจะถูกลำแสงเลเซอร์แบบเส้นตรงพาดผ่านซึ่งสามารถตรวจจับได้ด้วยกล้อง ลำแสงเลเซอร์นี้จะตั้งฉากกับสายพานลำเลียง เมื่อผ่านการประมวลผลภาพแบบดิจิตอลจะทำให้เราทราบมิติที่เป็นความกว้างและยาวที่สามารถนำมาคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ จากนั้นนำพื้นที่หน้าตัดตลอดความยาวมาประกอบกันเพื่อใช้ในการหาปริมาตรรวมของวัตถุและทำการแปลงข้อมูลที่ได้นี้เป็นค่าจริง โดยใช้ทฤษฎีการแปลงพิกัดแบบโฮโมกราฟี (Homography Transformation) จากการทดสอบพบว่าความถูกต้องและแม่นยำของปริมาตรที่ได้จากวิธีดังกล่าวนี้มากกว่าการหาปริมาตรด้วยวิธีคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางแบบสมมูล (Equivalent Diameter) ซึ่งระบบนี้จะประโยชน์สามารถนำไปพัฒนาเป็นระบบคัดเลือกและตรวจสอบผักและผลไม้แบบอัตโนมัติได้

**คำสำคัญ:** การวัดขนาดแบบไม่ทำลาย การประมวลผลภาพ ระบบแมชชีนวิชั่น

### Abstract

This paper presents a non-destructive measurement of volume for vegetables and fruits. From the measurement of a 3D objects properties in computer vision system by using a laser beam cross-section; the object is measured by a linear laser beam through a cross-section objects, which detected by the camera. Laser beam is perpendicular with the conveyor belt. Then the image was performed a digital image processing in order to measure the width and the height of object. The integration of small trapezoids was sum to determine the volume of the object and converts to our results by using transformation theory (Homography Transformation). The volume measurement could be processed by cross-sectional area of a moving object on conveyor belt. Our experimental results show the higher accurate more that calculate diameter of an equivalent (Equivalent Diameter). This system would be useful for the empirical design for selection and monitoring instrument vegetables and fruits automatically.

**Keywords:** Non destructive measurement, Image processing, Machine vision system

### บทนำ

วิธีการวัดปริมาตรมีหลายวิธีได้แก่ วิธีแทนที่น้ำ (water displacement, WD) วิธีคอมพิวเตอร์วิชั่น (computer vision, CV) (Toda et al., 1992) การคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงเรขาคณิต (geometric mean diameter, GMD) และวิธีทางไฟฟ้า (electrical, E)

(Kato,1997; Jarimopas et.al., 2005) เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดบางอย่างเกิดขึ้น เช่น วิธีการ WD ไปกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เนื่องจากความชื้นบริเวณพื้นผิวของวัตถุที่ถูกวัด ซึ่งวิธีการแทนที่ด้วยน้ำนี้เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันทั่วไปและง่ายในการหาปริมาตรของวัตถุ เช่น ผักและผลไม้ ตัวอย่างจะถูกชั่งน้ำหนักและนำไป

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
Email: kbnavaph@kmitl.ac.th

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
Email: kstaweep@kmitl.ac.th

จุ่มลงในน้ำ โดยมีแท่งวัตถุค้ำให้จม มวลของน้ำที่ถูกแทนที่ ถูกคำนวณโดยการลบออกจากมวลของน้ำที่มีอยู่เต็มภาชนะ จากมวลของภาชนะที่มีผลไม่บรรจุอยู่ผลที่ได้นำมาคำนวณ ปริมาตรโดยสมการต่อไปนี้

$$(V) = \frac{M(kg)}{W(kg/m^3)} \quad (1)$$

เมื่อ M หมายถึงน้ำที่ล้นออก และWหมายถึงความหนาแน่นของน้ำ

ส่วนวิธีวัดปริมาตรด้วยไฟฟ้าในการหาค่าปริมาตรโดยการวัดความสามารถในการเก็บประจุกระแสไฟฟ้าที่ความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างความสามารถในการเก็บประจุกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับปริมาตรของเส้นผ่านศูนย์กลาง ของทรงกลมที่รู้รัศมีของความจุของกระแสไฟฟ้าของศูนย์กลางทรงกลมที่มีอากาศอยู่ในช่องว่างทั้งสอง หาได้โดยมิติและสมบัติทางไฟฟ้า แสดงได้ในสมการต่อไปนี้ (Kato,1997)

$$C_s = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad (2)$$

เมื่อ  $C_s$  เป็นค่าความจุกระแสไฟฟ้าระหว่างทรงกลมภายใน และทรงกลมภายนอก (หน่วย farad, F)  $\epsilon_0$  เป็นการยอมให้ผ่านของพื้นที่ว่าง ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m) ,  $\epsilon_r$  เป็นความสัมพันธ์ของการยอมให้ผ่านของช่องอากาศ  $r_1$  คือรัศมีของทรงกลมภายใน(m)และ  $r_2$  เป็นรัศมีของทรงกลมภายนอก(หรือรอบภายนอก)

เมื่อ  $r_2$  มีค่ามาก( $r_2 \gg r_1$ ) ดังนั้น  $\frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \rightarrow r_1$  ค่ามวลปริมาตรทรงกลมหาได้โดยทรงกลมภายในหาได้โดย

$$V = \frac{4}{3}\pi r_1^3 = \frac{C_s^3}{48\pi^2\epsilon_0^3\epsilon_r^3} \quad (3)$$

โดยวิธีดังกล่าวเป็นการหาเส้นผ่านศูนย์กลางแบบสมมูล

ต่อมาได้มีวิธีการวัดปริมาตรด้วยเทคนิคเลเซอร์ตัดขวาง (Nunak et al., 2009) หาปริมาตรโดยการนำภาพที่ได้มาคำนวณหา ความสูง ความกว้างของวัตถุ และนำมาคำนวณเป็น พื้นที่(A)ของวัตถุ จากนั้น จึงนำภาพที่ได้มา รวมกันในแต่ละเฟรม มาอินทิเกรตเพื่อหาความหนาของวัตถุ และจะได้ผลรวมเป็นปริมาตร(V)จึงเขียนได้ดังสูตร

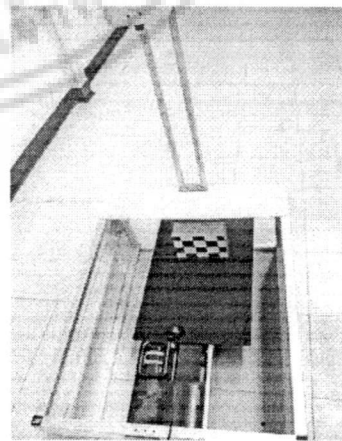
$$(V) = \int Adl \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา

จะได้เป็นค่าปริมาตร ของวัตถุดังกล่าว แต่วิธีดังกล่าวสามารถวัดปริมาตรได้เพียงรูปทรงของเรขาคณิตเท่านั้น เนื่องจากใช้ค่าความสูงและความกว้างมาคำนวณพื้นที่ โดยตรง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการ นี้ได้มีการพัฒนาการวัดปริมาตรด้วยเทคนิคเลเซอร์ตัดขวางให้มีความละเอียดและแม่นยำสูงขึ้น และสามารถวัดได้หลากหลายรูปทรงมากขึ้น เนื่องจากการนำเทคนิคการอินทิเกรตพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู มาใช้ในการคำนวณค่าปริมาตร

**ทฤษฎีและหลักการออกแบบ**

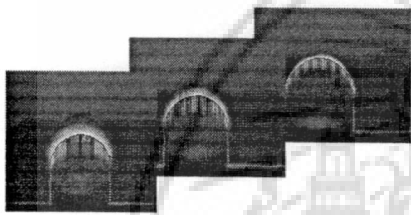
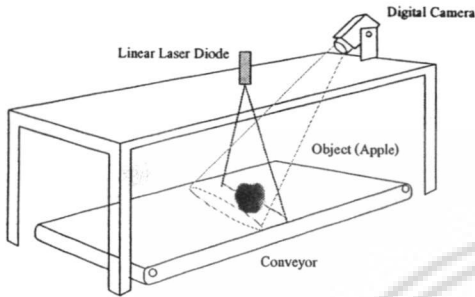
ระบบการวัดโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางบนผิวของวัตถุ ระบบที่ออกแบบเพื่อใช้ในการตรวจวัดวัตถุจะแสดงอยู่ในภาพที่ 1 ซึ่งวัตถุตัวอย่างจะถูกวางบนสายพานลำเลียงและทำการควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้วงจรควบคุมความเร็วที่ทำการพัฒนาด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ DS-PIC 16-bit ทำหน้าที่ปรับความเร็วและควบคุมทิศทางของมอเตอร์ 24VDC และติดตั้งแสงเลเซอร์โดยให้เส้นของแสงเลเซอร์ฉายไปในทิศทางขวางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแสงเลเซอร์ตามลักษณะพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งเลเซอร์ที่ใช้เป็นเลเซอร์แบบเส้นสีแดงความยาวคลื่น 650 nm ขนาด 16 mW (Roithner laser technik, Austria) และทำการเก็บข้อมูลภาพภาพโดยใช้กล้องวิดีโอ QuickC am® Pro 9000 ความละเอียดในการจับภาพวิดีโอ 640x480 พิกเซลและอัตราการถ่ายภาพวิดีโอที่ 30 เฟรมต่อวินาที อุปกรณ์ดังกล่าวจะแสดงในภาพที่ 1 ในงานวิจัยนี้จะทำการเก็บบันทึกข้อมูลภาพภาพที่ได้อยู่ในรูปแบบของ AVI ไฟล์ และนำไปประมวลผลบนโปรแกรมที่พัฒนาโดยโปรแกรม MATLAB 7.10.0



ภาพที่ 1 ภาพจริงจากเครื่องวัดปริมาตร

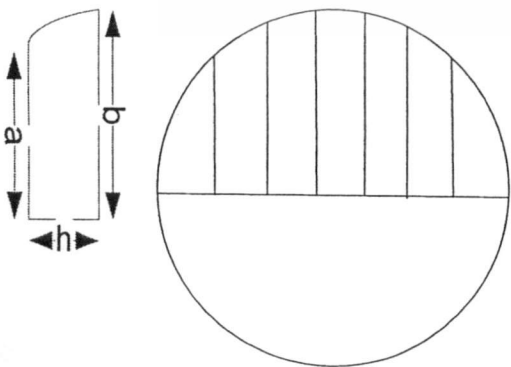
หลักการใช้แสงตัดผ่านเป็นเทคนิคการวัดภาพทรงแบบตัดขวางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายในการออกแบบ โดยวิธีนี้เป็นการฉายแสงแหล่งกำเนิดแสงลงบนพื้นผิววัตถุเพื่อให้เกิดเป็นลักษณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงตกกระทบซึ่งส่วนมากแล้ว แหล่งกำเนิดแสงนี้จะใช้เส้นเลเซอร์สีแดง เนื่องจากการนำมาวิเคราะห์และประมวลผลทำได้ง่ายและช่วยลดขั้นตอนในการปรับแต่งคุณภาพของภาพ แสงที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพและบันทึกไว้ด้วยกล้องที่วางทำมุมเอียง 45 องศา กับแหล่งกำเนิดแสงดังแสดงใน ภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ระบบแสงเลเซอร์ตัดขวางสำหรับวัดขนาด

การวัดปริมาตรผลไม้โดยเทคนิคเลเซอร์ตัดขวาง นั้นมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มจากการรับภาพวัตถุเข้ามา ทำการปรับปรุงคุณภาพของภาพและเส้นเลเซอร์ แปลงหน่วยจาก Pixel ให้เป็น mm โดยใช้ทฤษฎีของ(Homography Transfom) นำค่าที่ได้จากเส้นเลเซอร์มาคำนวณ เพื่อหาความกว้าง ยาวของวัตถุ จากนั้นตีเส้นกึ่งกลางในแนวนอน จะได้ค่าความกว้างของวัตถุ นำผลดังกล่าวมาตีเส้นเพื่อซอยวัตถุออกเป็นช่องเล็กๆ ในแนวตั้ง



ภาพที่ 3 ภาพการแบ่งส่วนและคำนวณสี่เหลี่ยมคางหมู

$$(A) = 2 \int_0^n \frac{1}{2} (a + b)h dh \tag{5}$$

ทำการหาพื้นที่ในสี่เหลี่ยมคางหมูและนำค่าที่ได้มารวมกันโดยใช้การ อินทิเกรต จะได้พื้นที่รวม (A)

$$(V) = \int_0^n Adl \tag{6}$$

จากนั้นนำค่าพื้นที่ในแต่ละเฟรมมารวมกันโดยใช้การอินทิเกรต ทำให้สามารถ จะได้ปริมาตรรวม(V)ของผลไม้

ค่าทั้งหมดที่วัดได้แสดงผลลงบนจอและเก็บค่าบันทึกค่าผลทั้งหมดลงใน Microsoft Office Excel 2007แบบอัตโนมัติ เพื่อสะดวกในการเรียกดูภายหลัง

### Homography Transform

ระบบการวัดบนระนาบเป็นวิธีการวัดในลักษณะเรขาคณิตบนระนาบ นำมาใช้เพื่อแปลงระยะทางในพิกัดบนภาพภาพเป็นค่าระยะทางจริงโดยเทียบกับพิกัดอ้างอิง ในระบบสองมิติ Homography Matrix จะเป็นตัวแปลงระหว่าง Homogeneous Point และ Homogeneous Coordinate จากความสัมพันธ์ระหว่างระนาบในระบบพิกัดภาพภาพ ( $p$ ) และจุดบนพิกัดจริง ( $p'$ ) สามารถที่เขียนได้เป็น

$$p' = Hp \tag{7}$$

เมื่อ  $p'$  และ  $p$  เป็น Homogeneous Coordinate ที่ร่วมกันของตำแหน่ง  $p$  (พิกัดภาพภาพ) และ  $p'$  (พิกัดจริง) ซึ่งมี  $H$  เป็น Homography Matrix

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \tag{8}$$

โดยในสมการที่ 8 ด้านบนนี้ จะเพิ่มจุดสมมุติ  $w$  และ  $w'$  ขึ้นมาโดยให้มีค่าเท่ากับ 1 แล้วคูณ  $p$  และ  $H$  เมื่อ  $\frac{x}{w}$  และโดยที่  $\frac{y}{w}$  ค่า  $w = w' = 1$  ซึ่งสามารถจัดสมการใหม่ให้อยู่ในภาพแบบ Homogeneous ได้เป็นสมการที่ ด้านล่างในสมการที่ 9 ตัวภายใน  $H$  สามารถที่จะแปลความหมายเป็นอัตราการขยายหรือตัวแปลงค่าจุดระหว่างพิกัด ซึ่งในการหาค่า Homography Matrix จำเป็นจะต้องทราบค่าจุดบนพิกัดอย่างน้อย 4 จุด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ผลการทดลองและวิจารณ์**

ในส่วนนี้แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดปริมาตรด้วยน้ำและวิธีการวัดปริมาตรด้วยวิธี ลำแสงเลเซอร์ตัดขวางที่ใช้ในการวัดปริมาตร ผักและผลไม้ ผักและผลไม้ที่ใช้ในการวัดปริมาตรในครั้งนี้ ประกอบไปด้วย แอปเปิ้ล ฝรั่ง แตงกวา และส้ม เป็นต้น

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & x'_1 x_1 & x'_1 y_1 & x'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & x'_4 x_4 & x'_4 y_4 & x'_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & y'_1 x_1 & y'_1 y_1 & y'_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & y'_4 x_4 & y'_4 y_4 & y'_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Homography Matrix สามารถหาได้โดยการใช้ระบบสมการเชิงเส้น Singular value decomposition (SVD) เป็นวิธีการประมาณค่าแบบ Least Squares (LS) ซึ่งเมื่อทราบค่าของ  $H$  ก็จะสามารถที่จะนำไปคำนวณหาค่าจริงของตำแหน่งบนภาพภาพโดยการคูณกันระหว่าง  $H$  และ  $p$  ดังสมการที่ (1)

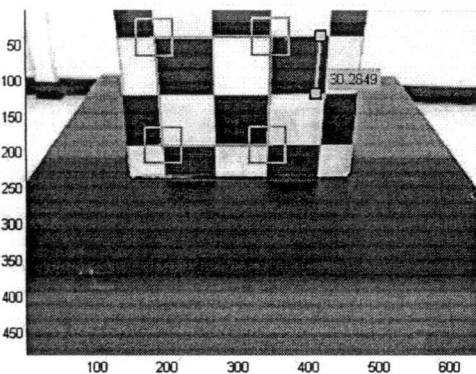
**การสอบเทียบ**

ในการสอบเทียบจะใช้ตารางที่ทราบขนาดเพื่อจะเป็นตัวกำหนดตำแหน่ง 4 จุดของพิกัดภาพภาพเทียบกับขนาดจริงในพิกัดจริง เพื่อที่จะนำไปคำนวณหาค่า Homography Matrix ( $H$ ) ซึ่งเป็นค่าเฟกเตอร์ที่นำไปแปลงค่าจากข้อมูลภาพภาพเป็นค่าในพิกัดจริง ขั้นตอนจะทำการกำหนดจุดแต่ละจุดและนำค่าที่ได้จากกำหนดนี้ไปคำนวณตามสมการนี้ โดยการใช้ฟังก์ชัน SVD ที่เป็นการประมาณค่าแบบ Least Squares (LS) ในโปรแกรม Matlabเป็นตัวช่วยในการคำนวณหาค่า Homography Matrix ( $H$ ) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในภาพแบบเมทริกซ์ขนาด 3X3 และสามารถนำค่า  $H$  ไปใช้ในสมการที่  $p' = Hp$

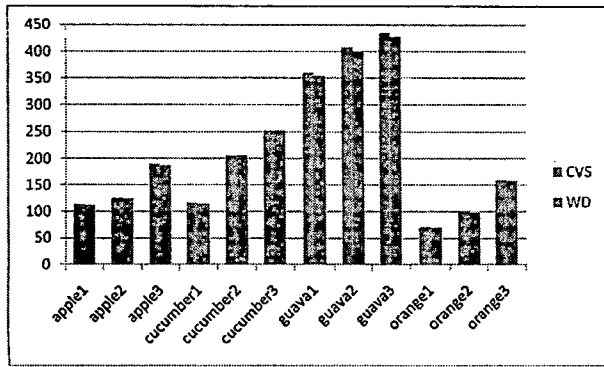
**ตารางที่ 1 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับวิธี WD**

ขนาด	วิธี	แอปเปิ้ล	ส้ม	ฝรั่ง	แตงกวา
เล็ก	Laser-Light Sectioning	113.32	71.45	359.44	115.75
	WD	111.66	70	353.33	115
	Error (%)	1.487	2.04	1.70	0.65
กลาง	Laser-Light Sectioning	125.33	99.23	407.74	205.55
	WD	123.33	98.33	400	205
	Error (%)	1.59	0.90	1.9	0.27
ใหญ่	Laser-Light Sectioning	189.57	160.34	435.45	252.04
	WD	186.66	158.33	428	251.66
	Error (%)	1.53	1.461	1.711	0.148

จากผลการเปรียบเทียบในภาพที่ 5 พบว่าผลที่ได้จากการโดยใช้ CVS มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากวิธีการ WD โดยในแอปเปิ้ล แตงกวา ฝรั่ง ได้ผลที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะแตงกว่ามีผลที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้มีค่าใกล้เคียงที่สุด ค่าความผิดพลาดโดยรวมที่เกิดขึ้นของปริมาตรเกิดมาจากวิธีที่ใช้ในการหาเนื่องจากการรวมพื้นที่ที่หน้าตัดของแต่ละส่วนย่อยๆของวัตถุเข้าด้วยกัน หากค่าความสูงและความกว้างมีความผิดพลาดอยู่แล้วเมื่อนำมาคำนวณเป็นพื้นที่หน้าตัดและนำมารวมกันก็จะยิ่งเพิ่มความผิดพลาดให้เพิ่มขึ้นมากตามไปด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าภาพที่ 4 ขั้นตอนและผลลัพธ์ที่ได้ของการสอบเทียบ



ภาพที่ 5 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการวัด

### สรุป

วิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้ให้ผลลัพธ์ในการวัดขนาดของความสูงความกว้างและความยาวที่มีความแม่นยำสูงและมีค่าเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดค่อนข้างต่ำ และจะมีความผิดพลาดอยู่บ้างพอสมควรในวัดปริมาตรแต่ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการคัดขนาดหรือตรวจสอบวัตถุที่ไม่ได้ต้องการความแม่นยำสูงมาก หรือนำไปประยุกต์ใช้วัดขนาดและตรวจสอบวัตถุที่มีลักษณะภาพทรงที่สมมาตรและเป็นภาพทรงเรขาคณิตพื้นฐานต่างๆ ได้แก่ ทรงสี่เหลี่ยม ทรงกลม ทรงวงรี หรือทรงกระบอก ตัวอย่างเช่น ผักและผลไม้ ปลา นอกจากนี้วิธีการที่ได้เสนอนี้อาจเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปเป็นระบบอัตโนมัติแบบ Real-Time และพัฒนาให้เพิ่มความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ระบบคัดแยกและตรวจสอบขนาดวัตถุดิบ ระบบคัดแยกและตรวจสอบขนาดชิ้นส่วน ระบบคัดแยกและตรวจสอบขนาดผลผลิตในอุตสาหกรรม การเกษตรและอาหาร เป็นต้น

### เอกสารอ้างอิง

- Kato, K., 1997. Electrical density sorting and estimation of soluble solids content of watermelon. J. Agric. Eng. Res. 67, 161–170.
- Toda, S., Mosishima, H., Seo, Y., 1992. Fundamental study of mechanical sorting for fruits II. In: Proceedings of Annual Meeting of the Society of Agricultural structures, Japan, pp. 340–341.
- Jarimopasa B., Nunak., T. and Nunak, N. 2005.

selected fruit and vegetables. Postharvest Biology and Technology. 35.

Nunak, N., Suesut, T. and Inthuset, S. 2009. Fish Size Measurement by Computer Vision using Laser Light Sectioning “International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind”.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการศึกษานี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายพรรัตน์ สุขเกษม เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ.2527 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราชเป็นบุตรคนโต ในจำนวนพี่น้อง 2 คนของ นายสานิต สุขเกษม และ นางอารมย์ สุขเกษม ภูมิลำเนาเดิม 117/2 หมู่ 8 ตำบลตลาดน้อย อำเภอบ้านหม้อ จังหวัดสระบุรี

**ประวัติการศึกษา** ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ป.ว.ช) สาขาวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง แผนกวิชาไฟฟ้าวิทยาลัยเทคนิคลพบุรี ในปีการศึกษา 2542-2545

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ป.ว.ส) สาขาวิชาเครื่องกลไฟฟ้า แผนกวิชาไฟฟ้าวิทยาลัยเทคนิคลพบุรี ในปีการศึกษา 2545-2547

ระดับปริญญาตรี หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548-2549

ระดับปริญญาโท

หลักสูตรบริหารธุรกิจ มหาบัณฑิต สาขาการจัดการอุตสาหกรรม (MBA IM) หลักสูตร เสาร์-อาทิตย์ ภาควิชาบริหารธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ในปีการศึกษา 2551-2553

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2552-2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p' = Hp \quad (3.67)$$

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

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

และ

$$p' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

และ  $H$  เป็นโฮโมกราฟฟีเมทริกซ์ (Homography Matrix) ซึ่งเป็นเมทริกซ์โฮโมจีเนียสขนาด  $3 \times 3$  โดยเมทริกซ์  $H$  จะประกอบด้วยพารามิเตอร์อยู่ทั้งหมด 9 ตัวคือ

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

ดังนั้นจากสมการที่ (3.67) จะได้เป็น

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

นำ  $H$  คูณกับ  $p$  จะได้สมการใหม่ 3 สมการ คือ

$$x' = h_{11}x + h_{12}y + h_{13}w \quad (3.72)$$

$$y' = h_{21}x + h_{22}y + h_{23}w \quad (3.73)$$

$$w' = h_{31}x + h_{32}y + h_{33}w \quad (3.74)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้