

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมะม่วงโดยใช้คอมพิวเตอร์วิชัน

MANGO'S PHYSICAL PROPERTIES ANALYSIS USING
COMPUTER VISION

พนิทนาถ ยิ้มแย้ม
PANITNAT YIMYAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2566-4

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมะม่วงโดยใช้คอมพิวเตอร์วิชัน

MANGO'S PHYSICAL PROPERTIES ANALYSIS USING
COMPUTER VISION



พนิตนาถ ยิ้มแย้ม
PANITNAT YIMYAM

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **63341**
วัน,เดือน,ปี **25 ส.ค. 2549**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2566-4

**MANGO'S PHYSICAL PROPERTIES ANALYSIS USING
COMPUTER VISION**

PANITNAT YIMYAM

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE PROGRAM IN INFORMATION TECHNOLOGY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2566-4

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมะม่วงโดยใช้คอมพิวเตอร์วิชัน
MANGO'S PHYSICAL PROPERTIES ANALYSIS USING COMPUTER
VISION

ชื่อนักศึกษา นางสาวพนิตนาฏ ยิ้มแย้ม






รหัสประจำตัว 44067025

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีสารสนเทศ

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชนารัตน์ ชลิตาพงศ์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุรณ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชนารัตน์	ชลิตาพงศ์	
รศ.ดร.ปานมนัส	ศิริสมบุรณ์	
รศ.ดร.บุญวัฒน์	อัทธู	
รศ.ดร.นพพร	โชติศักดิ์	
รศ.ดร.อาริต	ธรรมโน	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 29 พฤษภาคม 2548 เวลา 9.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ ห้อง M 04 (ชั้นลอย) อาคารเรียนรวมและปฏิบัติการคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ.ดร.จรรูวัตร เจริญสุข)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....31.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....๒๕๔๘.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมะม่วงโดยใช้ คอมพิวเตอร์วิชัน
นักศึกษา	นางสาว พนิดนาฏ อิมเข้ม
รหัสนักศึกษา	44067025
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีสารสนเทศ
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. ธนารัตน์ ชลิดาพงศ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ. ดร. ปานมนัส ศิริสมบุญ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมะม่วงโดยใช้หลักการประมวลผลภาพและคอมพิวเตอร์วิชัน ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานประกอบไปด้วยขั้นตอนแรกเป็นการถ่ายภาพของผลมะม่วงในหลายมุมมองและสแกนภาพเปลือกมะม่วง แล้วนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์กับภาพถ่ายของผลมะม่วง ซึ่งจะทำการแยกส่วนของมะม่วงออกจากพื้นหลังโดยพิจารณาจากแบบจำลองค่าสีของผลมะม่วงที่สร้างขึ้น และทำการประมาณเส้นขอบของผลมะม่วงโดยใช้สไปน์ฟังก์ชัน ในส่วนที่สองจะนำส่วนของมะม่วงที่ได้มาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพในเชิง 2 มิติ จากมุมมองด้านบนจะนำมาใช้คำนวณหาพื้นที่ภาพฉาย ความยาว ความกว้าง และสี ส่วนความหนาสามารถคำนวณได้จากมุมมองด้านข้าง ในส่วนที่สามเป็นการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพในเชิง 3 มิติ โดยทำการเทียบวัดกล้องเพื่อนำตัวแปรที่ได้มาใช้ในการสร้างวัตถุในเชิง 3 มิติจากหลายมุมมองโดยใช้หลักการของสเตอริโอวิชัน และนำมาคำนวณหาปริมาตรและพื้นที่ผิว ส่วนภาพสแกนเปลือกมะม่วงนั้นเมื่อผ่านขั้นตอนการกำจัดสัญญาณรบกวนแล้วจะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาพื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือก สุดท้ายเป็นการนำผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพที่ได้ มาใช้เป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาดโดยใช้วิธีแบคพรอพพาเกชัน พร้อมทั้งทำการคัดแยกดำหนิ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกับมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เบอร์ 4 จำนวน 182 ผล ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขนาด ตามมาตรฐานน้ำหนักที่ใช้ในการส่งออก จากผลการทดลองพบว่างานวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นวิธีการวัดลักษณะทางกายภาพและคัดแยกขนาดของมะม่วง ที่มีประสิทธิภาพและสะดวกรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบการทำงานต่างๆ เหล่านี้โดยใช้คนหรือเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ

Thesis Title	Mango's Physical Properties Analysis using Computer Vision
Student	Ms. Panitnat Yimyam
Student ID.	44067025
Degree	Master of Science
Programme	Information Technology
Year	2006
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Thanarat Chalidabhongse
Thesis Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr. Panmanas Sirisomboon

ABSTRACT

This research proposes computer vision system that can extract 2D and 3D visual properties of mango such as size, projected area, color, volume, surface area and peel area from images. The 2D/3D visual properties are extracted from multiple view images of mango. The images are segmented based on constructed hue model of the sample mangoes. A spatial filtering technique is then applied to clean noises before fitting spline curve on the mango boundary. From the clean segmented top-view image, the projected area, length, width and color can be computed. The thickness can be computed by special side-view image. After cameras are calibrated to obtain the intrinsic and extrinsic camera parameters, volumetric caving is performed on multiple silhouette images to construct 3D model and estimate its volume and surface area. To obtain the peel area, the mango is peeled and its scanned peels image is then segmented and filtered using morphology approach. With calibration parameters, the peel area could then be computed. After that we use these features in automatic mango sorting which we employ a typical backpropagation neural networks. We employed the proposed system to evaluate physical properties of a mango cultivar called "Nam Dokmai". There were two sets total of 182 mangoes in three various sizes sorted by weights according to a standard sorting metric for mango export as a ground truth. The experimental results show the technique could be a good alternative and more feasible method for sorting mango comparing to human's manual sorting.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ธนรัตน์ ชลิตาพงศ์ ผู้ซึ่งให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ และให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอดในทุกๆ เรื่อง ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณรศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ ผู้ซึ่งทำให้เกิดหัวข้องานวิจัยนี้ขึ้น และช่วยให้ ข้อมูลความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ร่วมทั้งสนับสนุนอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายในการทำวิจัยจน สำเร็จ

ขอขอบคุณคุณพิชัย อำนวยกาญจนสิน และคุณสุรศักดิ์ ทรัพย์ากร แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวคิดของทฤษฎีต่างๆ และให้ความช่วยเหลืออย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบคุณอาจารย์เสรี ชิโนดม อาจารย์กฤษณะ ชินสาร อาจารย์อารยา วิวัฒน์วานิช และ คุณสยาม ศรีพั้ว แห่งมหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายต่างๆ ของคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ ที่ให้ความช่วยเหลือและ อำนวยความสะดวกในทุกๆ ด้าน

ขอขอบคุณบิดามารดา ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านทุนทรัพย์และคอยเป็นห่วงให้กำลังใจ อยู่ตลอด

สุดท้ายขอขอบคุณเพื่อนๆ ร่วมรุ่น IS11.1 รุ่นพี่ รุ่นน้อง น้องๆ ใน PIC Lab และอีก หลายๆ ท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่ให้คำปรึกษาทำให้ผู้จัดทำเข้าใจแนวทาง รวมทั้งช่วยให้มีกำลังใจใน การทำงานวิจัยเสมอมา

พนิตนาฏ ยิ้มแย้ม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยในการคัดคุณภาพมะม่วง.....	5
2.1.1 การคัดขนาด.....	5
2.1.2 การคัดรูปร่าง.....	6
2.1.3 การคัดความแก่.....	6
2.1.4 การคัดความสุก.....	7
2.1.5 การประเมินปริมาณตำหนิ.....	7
2.2 งานวิจัยที่นำหลักการคอมพิวเตอร์วิชันและการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้กับ งานทางการเกษตร.....	7
2.2.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะ.....	8
2.2.2 การคัดคุณภาพ.....	8
2.2.3 การแบ่งแยกประเภทและการระบุประเภท.....	9

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 งานวิจัยในการสร้างวัตถุในเชิง 3 มิติจากหลายมุมมอง.....	10
2.3.1 อีพิโพลาร์จีโอเมทรี (Epipolar Geometry).....	10
2.3.2 โวลูมอินเตอร์เซกชัน (Volume Intersection).....	10
2.3.3 สเปนคาฟวิง (Space Carving).....	10
2.3.4 การสร้างภาพ 3 มิติจากภาพตัดขวางของวัตถุ.....	11
บทที่ 3 ทฤษฎีการประมวลผลภาพและคอมพิวเตอร์วิชัน.....	12
3.1 การประมวลผลภาพเชิงตัวเลข (Digital Image Processing).....	12
3.2 มอร์โฟโลยีทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Morphology).....	13
3.2.1 อีรอสัน (Erosion).....	14
3.2.2 ไดเลชัน (Dilation).....	15
3.2.3 โอเพนนิ่ง (Opening).....	16
3.2.4 โคลสซิง (Closing).....	16
3.3 แบบจำลองสี (Color Model).....	17
3.3.1 แบบจำลองสี RGB.....	17
3.3.2 แบบจำลองสี HSI.....	18
3.4 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบที่เชื่อมต่อกันของภาพ (Connected Components).....	20
3.5 การติดตามเส้นขอบ (Contour Following).....	21
3.6 การหมุนภาพ.....	22
3.7 การประมาณค่าในช่วงจุดภาพด้วยเส้นโค้ง.....	22
3.7.1 การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น.....	23
3.7.2 การประมาณค่าในช่วงกำลังสอง.....	23
3.7.3 การประมาณค่าในช่วงกำลังสาม.....	25
3.8 กฎของโคไซน์ (The Law of Cosines).....	27
3.9 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงปกติ.....	27
3.9.1 ค่าเฉลี่ย.....	28
3.9.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation).....	28
3.9.3 การแจกแจงปกติ (Normal Distribution).....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.10 สหสัมพันธ์.....	29
3.10.1 การแปลสหสัมพันธ์จากกราฟ.....	30
3.10.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	33
3.11 ระบบพิกัดฉากในปริภูมิ 3 มิติ (Rectangular Coordinate in Three Dimension).....	33
3.11.1 การกำหนดแกนพิกัด.....	33
3.11.2 ระบบพิกัดฉาก (Rectangular Coordinate Planes).....	34
3.11.3 จุดพิกัด.....	35
3.12 ประเภทกรอบพิกัด (Coordinate Frame).....	35
3.12.1 กรอบพิกัดวัตถุ (Object Coordinate Frame).....	36
3.12.2 กรอบพิกัดโลก (World Coordinate Frame).....	36
3.12.3 กรอบพิกัดกล้อง (Camera Coordinate Frame).....	36
3.12.4 กรอบพิกัดระนาบภาพ (Image Plane Coordinate Frame).....	36
3.12.5 กรอบพิกัดพิกเซล (Pixel Coordinate Frame).....	37
3.13 การฉายภาพ (Projection).....	38
3.13.1 การฉายภาพแบบขนาน (Parallel Projection).....	38
3.13.2 การฉายภาพแบบเพอสเปคทีฟ (Perspective Projection).....	38
3.14 สมการการฉายภาพแบบเพอสเปคทีฟ.....	39
3.15 ตัวแปรภายนอกกล้อง (Extrinsic Camera Parameters).....	40
3.16 ตัวแปรภายในกล้อง (Intrinsic Camera Parameters).....	41
3.16.1 ความยาวโฟกัส.....	41
3.16.2 พิกัดจุดพริ้นซิเพิล.....	42
3.16.3 ค่าการเบี่ยงเบน.....	42
3.16.4 สัมประสิทธิ์ความบิดเบี้ยว.....	42
3.17 การแปลงพิกัดของวัตถุในเชิง 3 มิติเป็นพิกัดบนระนาบภาพในเชิง 2 มิติ.....	43
3.18 วิธีสเปศคาฟวิง (Space Carving Method).....	44
3.19 ว็อกเซลไลเซชัน (Voxelization).....	45
3.20 โครงข่ายประสาทเทียมแบบแบคพรอพพาทาเกชัน (Backpropagation Neural Network).....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 กรรมวิธีที่นำเสนอ.....	48
4.1 การเก็บข้อมูลภาพมะม่วงตัวอย่าง.....	48
4.1.1 ภาพผลมะม่วง.....	48
4.1.2 ภาพสแกนเปลือกมะม่วง.....	50
4.2 การแยกส่วนของมะม่วงออกจากพื้นหลัง (Segmentation).....	51
4.2.1 การสร้างแบบจำลองค่าฮิว (Hue) ของผลมะม่วง.....	51
4.2.2 การแยกส่วนของมะม่วงออกจากพื้นหลังโดยพิจารณาแบบจำลองค่าฮิว ของผลมะม่วง.....	52
4.2.3 สไปลน์ฟังก์ชัน.....	53
4.3 วิธีการเทียบวัตถุกล้อง (Camera Calibration).....	55
4.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....	56
4.4.1 พื้นที่ภาพฉาย (Projected Area).....	57
4.4.2 ขนาด.....	57
4.4.3 สี.....	60
4.4.4 ปริมาตร	61
4.4.5 พื้นที่ผิว (Surface Area).....	62
4.5 การคัดแยกขนาด.....	62
4.6 การวิเคราะห์ปริมาณตำหนิ.....	64
บทที่ 5 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ.....	65
5.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....	66
5.1.1 ผลการวัดพื้นที่ภาพฉาย.....	66
5.1.2 ผลการวัดความยาว.....	67
5.1.3 ผลการวัดความกว้าง.....	68
5.1.4 ผลการวัดความหนา.....	69
5.1.5 ผลการวัดสี.....	70
5.1.6 ผลการวัดปริมาตร.....	70
5.1.7 ผลการวัดพื้นที่ผิว.....	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ผลการคัดแยกขนาด.....	73
5.3 ผลการคัดแยกคำหยาบ.....	79
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	80
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
6.1.1 การวัดลักษณะทางกายภาพ.....	81
6.1.2 การคัดแยกขนาด.....	81
6.1.3 การคัดแยกคำหยาบ.....	82
6.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป.....	83
บรรณานุกรม.....	84
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก. ลักษณะทางกายภาพ.....	89
ภาคผนวก ข. ผลการคัดแยกขนาด.....	106
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	114
ประวัติผู้เขียน.....	128

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ขนาดและจำนวนมะม่วงที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	65
5.2 เปรียบเทียบผลการวัดพื้นที่ภาพฉายจากเพลนมิเตอร์และวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ.	67
5.3 เปรียบเทียบผลการวัดความยาวจากเวอร์เนียร์และวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ.....	68
5.4 เปรียบเทียบผลการวัดความกว้างจากเวอร์เนียร์และวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ.....	69
5.5 เปรียบเทียบผลการวัดความหนาจากเวอร์เนียร์และวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ.....	70
5.6 ผลการวัดสีจากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ.....	70
5.7 เปรียบเทียบผลการวัดปริมาตรจากการใช้เครื่องมือและวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ.....	71
5.8 เปรียบเทียบผลการวัดปริมาตรจากการใช้เครื่องมือและวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ โดยใช้จำนวนมุมภาพและความละเอียดภาพที่แตกต่างกัน.....	72
5.9 ผลการวัดพื้นที่ผิวของวัตถุในเชิง 3 มิติจากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ.....	72
5.10 เปรียบเทียบผลการวัดพื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือกจากเพลนมิเตอร์และวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ.....	73
5.11 คำสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับลักษณะทางกายภาพต่างๆ.....	73
5.12 ผลการคัดแยกขนาดมะม่วงกลุ่มที่ 1 ด้วยข้อมูลชุดทดสอบ โดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วัดได้จากเครื่องมือ.....	76
5.13 ผลการคัดแยกขนาดมะม่วงกลุ่มที่ 1 ด้วยข้อมูลชุดทดสอบ โดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่นำเสนอ.....	77
5.14 ผลการคัดแยกขนาดมะม่วงกลุ่มที่ 2 ทั้งหมดด้วยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1.....	77
5.15 ผลการคัดแยกขนาดมะม่วงกลุ่มที่ 2 ทั้งหมดด้วยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 2.....	78
5.16 ผลการคัดแยกขนาดมะม่วงกลุ่มที่ 2 ทั้งหมด โดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่นำเสนอ.....	78
5.17 ผลการคัดแยกขนาดมะม่วงกลุ่มที่ 2 ด้วยข้อมูลชุดทดสอบ โดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่นำเสนอ.....	78
5.18 เปรียบเทียบผลการคัดแยกขนาดโดยใช้วิธีแบบครอบพาเกชั่น.....	79
5.19 ผลการคัดแยกกำหนดำหนิของมะม่วงกลุ่มที่ 1.....	79
ก.1 คุณสมบัติทางกายภาพมะม่วงกลุ่มที่ 1 โดยการวัดจากเครื่องมือ.....	89
ก.2 คุณสมบัติทางกายภาพมะม่วงกลุ่มที่ 1 โดยการวิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ.....	93
ก.3 คุณสมบัติทางกายภาพมะม่วงกลุ่มที่ 2 โดยการวิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ.....	97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.4 ผลการวัดสีมะม่วงกลุ่มที่ 1 โดยการวิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ.....	101
ก.5 ผลการวัดปริมาตรจากการใช้เครื่องมือและวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอโดยใช้จำนวนรูปภาพและความละเอียดภาพที่แตกต่างกัน.....	105
ข.1 ผลการคัดแยกขนาดของมะม่วงกลุ่มที่ 1.....	106
ข.2 น้ำหนักของมะม่วงกลุ่มที่ 2 และผลการคัดแยกขนาด.....	110

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การคัดคุณภาพและคัดขนาดมะม่วงเพื่อการส่งออกโดยเกษตรกรผู้เชี่ยวชาญ.....	2
2.1 การวัดลักษณะรูปร่างของมะม่วง.....	6
3.1 ตัวอย่างสตรักเจอร์อีลิเมนต์ขนาด 3×3 พิกเซล.....	14
3.2 การทำอีรอสัน $A \ominus B$	15
3.3 การทำไคเลชัน $A \oplus B$	15
3.4 การทำโอเพนนิ่ง $A \circ B$	16
3.5 การทำโคลสซิง $A \bullet B$	16
3.6 แบบจำลองสี RGB.....	17
3.7 แบบจำลองสี HSI.....	18
3.8 องค์ประกอบของภาพ.....	20
3.9 การระบุหมายเลขให้กับองค์ประกอบของภาพโดยพิจารณาใน 4 ทิศทาง.....	20
3.10 วิธีการติดตามเส้นขอบ.....	21
3.11 การหมุนภาพ.....	22
3.12 การประมาณค่าในช่วงโดยการใช้ฟังก์ชันเส้นตรง.....	23
3.13 การประมาณค่าในช่วงโดยการใช้ฟังก์ชันกำลังสอง.....	25
3.14 การประมาณค่าในช่วงโดยการใช้ฟังก์ชันกำลังสาม.....	26
3.15 อินเทอร์โพลชันสไปไลน์.....	26
3.16 แอ็ปพรีอซิเมชันสไปไลน์.....	27
3.17 ตัวอย่างสามเหลี่ยม.....	27
3.18 คุณสมบัติ μ และ σ ของการแจกแจงปกติ.....	29
3.19 กราฟแสดงสหสัมพันธ์อย่างสมบูรณ์เป็นไปทางบวก.....	30
3.20 กราฟแสดงสหสัมพันธ์อย่างสมบูรณ์เป็นไปทางลบ.....	30
3.21 กราฟแสดงสหสัมพันธ์ค่อนข้างสูงเป็นไปทางบวก.....	31
3.22 กราฟแสดงสหสัมพันธ์ค่อนข้างสูงเป็นไปทางลบ.....	31
3.23 กราฟแสดงสหสัมพันธ์ค่อนข้างต่ำเป็นไปทางบวก.....	32
3.24 กราฟแสดงสหสัมพันธ์ค่อนข้างต่ำเป็นไปทางลบ.....	32
3.25 กราฟแสดงสหสัมพันธ์เป็นศูนย์.....	32
3.26 การกำหนดแกนพิกัดจาก 3 มิติโดยระบบมือขวา.....	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27 การกำหนดแกนพิกัดฉาก 3 มิติโดยระบบมือซ้าย.....	34
3.28 ระนาบของปริภูมิ 3 มิติ.....	34
3.29 ตำแหน่งพิกัดของจุดใดๆ ในปริภูมิ 3 มิติ.....	35
3.30 ประเภทของกรอบพิกัด.....	36
3.31 การแสดงพิกัดจุดบนกรอบพิกัดพิเซล.....	37
3.32 ลำดับความสัมพันธ์ในการแปลงกรอบพิกัด.....	37
3.33 การฉายภาพแบบขนาน.....	38
3.34 การฉายภาพแบบเพอสเปคทีฟ.....	39
3.35 รูปแบบการบันทึกภาพ.....	39
3.36 ความสัมพันธ์ของจุด P ในกรอบพิกัด โลกและกรอบพิกัดกล้อง.....	40
3.37 การเบี่ยงเบนของภาพ.....	42
3.38 ภาพที่เกิดผลกระทบจากเลนส์.....	42
3.39 รูปทรงวัตถุที่เกิดจากวิธีสเปคตาฟวิง.....	45
3.40 การเปรียบเทียบระหว่างพิกเซลและว็อกเซล.....	45
3.41 การแสดงวัตถุในภาพด้วยว็อกเซล.....	46
3.42 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแบคพรอพพาเกชัน.....	47
4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพที่น่าเสนอ.....	48
4.2 การติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพมะม่วง.....	49
4.3 ภาพมะม่วง 1 ผลใน 4 มุมภาพ.....	49
4.4 เปลือกมะม่วง 1 ผลที่จะสแกน.....	50
4.5 การสแกนเปลือกมะม่วง.....	50
4.6 ภาพสแกนเปลือกมะม่วง.....	51
4.7 ส่วนของมะม่วงที่ถูกแยกออกจากพื้นหลัง.....	52
4.8 เส้นขอบเบื้องต้น โดยวิธีการติดตามเส้นขอบ.....	53
4.9 จุดอ้างอิงบนเส้นขอบเบื้องต้น.....	53
4.10 จุดเชื่อมที่เกิดจากสไปลน์ฟังก์ชัน.....	54
4.11 เส้นขอบของมะม่วงโดยวิธีสไปลน์ฟังก์ชัน.....	54
4.12 โครงร่าง 2 มิติใน 4 มุมภาพ.....	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ภาพกระดานตารางขาวดำของกล่องที่หนึ่ง.....	55
4.14 การกำหนดระบบพิกัดโลกที่ใช้ในการอ้างอิง.....	56
4.15 การวัดขนาดของมะม่วงโดยการใช้เครื่องมือ.....	57
4.16 การหามุมบนเส้นขอบมะม่วง.....	58
4.17 ความยาวของมะม่วง.....	59
4.18 ขนาดความยาวและความกว้างของมะม่วง.....	59
4.19 ขนาดความหนาของมะม่วง.....	60
4.20 การแบ่งส่วนพื้นที่ของมะม่วง.....	61
4.21 ตัวอย่างวัตถุในเชิง 3 มิติที่ได้สร้างขึ้น.....	62
4.22 ตัวอย่างโครงร่างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแบคพรอพพาเกชั่นที่ใช้.....	63
4.23 คำหน้าที่เกิดขึ้นในแต่ละมุมมองของมะม่วง 1 ผล.....	64
5.1 การวัดพื้นที่ภาพฉายโดยใช้แพลนิเมเตอร์.....	66
5.2 การวัดขนาดความยาวโดยใช้เวอร์เนีย.....	67
5.3 การวัดขนาดความกว้างโดยใช้เวอร์เนีย.....	68
5.4 การวัดขนาดความหนาโดยใช้เวอร์เนีย.....	69
5.5 อุปกรณ์การวัดปริมาตร.....	71
5.6 การวัดพื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือกโดยใช้แพลนิเมเตอร์.....	72
5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับพื้นที่ภาพฉายที่วิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ.....	74
5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความยาวที่วิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ.....	74
5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความกว้างที่วิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ.....	74
5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความหนาที่วิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ.....	75
5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับปริมาตรที่วิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ.....	75
5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับพื้นที่ผิวของวัตถุในเชิง 3 มิติที่วิเคราะห์จากวิธีที่ นำเสนอ.....	75
5.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับพื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือกที่วิเคราะห์จากวิธีที่ นำเสนอ.....	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้นทางเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งมีสภาพดินฟ้าอากาศที่เหมาะสมในการปลูกไม้ผลเมืองร้อน ฤดูกาลให้ผลิตผลของไม้ผลแต่ละชนิดจะแตกต่างกันออกไป รวมทั้งสภาพพื้นที่ของแต่ละภาคด้วย จึงทำให้ประเทศไทยมีผลไม้หลากหลายชนิดหมุนเวียนออกสู่ตลาดตลอดปี และยังได้มีการพัฒนาพันธุ์ เทคโนโลยีการผลิต และการผลิตผลไม้ นอกฤดู ทำให้มีผลไม้บางชนิดสามารถให้ผลิตผลตลอดทั้งปีได้อีกด้วยเช่น ลำไย ทุเรียน มะม่วง เป็นต้น (กรมส่งเสริมการเกษตร. 2548)

ในบรรดาผลไม้หลากหลายชนิดที่มีในประเทศไทยนั้น มะม่วงถือว่าเป็นผลไม้ที่มีการเพาะปลูกและมีปริมาณผลผลิตรวมสูงกว่าผลไม้อื่นๆ เนื่องจากมะม่วงสามารถปลูกได้ดีในพื้นที่ต่างๆ จังหวัดของประเทศไทย และเป็นผลไม้ที่นิยมบริโภคทั้งภายในประเทศและยังสามารถส่งออกไปขายต่างประเทศได้อีกด้วย เช่น ญี่ปุ่น ฮองกง อินโดนีเซีย สิงคโปร์ มาเลเซีย เป็นต้น ซึ่งในการบริโภคสามารถบริโภคมะม่วงได้ทั้งผลสุกและผลดิบตามลักษณะของพันธุ์ และยังสามารถแปรรูปในลักษณะต่างๆ ได้ รัฐบาลจึงได้มีการสนับสนุนให้มีการส่งออกมะม่วงและผลิตภัณฑ์แปรรูปจากมะม่วงให้มากขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร จึงได้มีการสนับสนุนทำให้มะม่วงมีการพัฒนาถึงคุณภาพมากขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งออกให้ดีขึ้นก่อนจะถึงผู้บริโภค

หลังจากการเก็บเกี่ยวนั้นก่อนที่จะส่งผลิตผลออกสู่ตลาด จะต้องมีการคัดเลือกมะม่วงคือการคัดคุณภาพและคัดขนาด ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เป็นขั้นตอนในการคัดคุณภาพและคัดขนาดก่อนนำมะม่วงบรรจุเพื่อส่งออก ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้แรงงานคนที่เชี่ยวชาญ โดยในการคัดคุณภาพจะใช้สายตาในการประเมินปริมาณตำหนิหรือความสุกแก่ หรือในการคัดขนาดจะประมาณโดยใช้การสัมผัสด้วยมือและอาจมีการใช้เครื่องชั่งน้ำหนักมาช่วยเพื่อตรวจสอบเป็นบางผล งานเหล่านี้เป็นงานที่จะต้องให้ผู้เชี่ยวชาญเป็นจำนวนมากและใช้เวลานานซึ่งมีโอกาสเกิดความผิดพลาดสูง นอกจากนั้นในงานทางด้านการศึกษาลักษณะทางกายภาพของมะม่วงเช่น ขนาด น้ำหนัก รูปร่าง มาตรฐานลักษณะผล สี ความหนาแน่น จุดศูนย์กลาง พื้นที่ผิว พื้นที่ภาพฉาย ปริมาตร เป็นต้น ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการออกแบบเครื่องจักรอุปกรณ์ต่างๆ ในการเก็บเกี่ยวและหลังการเก็บเกี่ยว เช่น เครื่องเก็บเกี่ยว เครื่องคัดคุณภาพ เครื่องล้างและทำความสะอาด ภาชนะบรรจุ และการขนถ่ายลำเลียง (ปานมนัส ศิริสมบุรณ์ และคณะ. 2538) ซึ่งขั้นตอนในการวัดขนาดนั้นอาจมีความ

ผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้จากผู้วัดหรือวิธีที่ใช้ในการวัดเช่น ผู้วัดอาจเกิดความเมื่อยล้าในการทำงาน ในการวัดวัตถุเดียวกันแต่ผู้วัดต่างกันอาจได้ผลการวัดที่แตกต่างกัน หรือผู้วัดมีการใช้อุปกรณ์ที่ไม่แม่นยำอาจมีความบิดเบือนทิศทางในการจับอุปกรณ์กับวัตถุ เป็นต้น ทำให้ผลของการวัดที่ได้มีความผิดพลาดเกิดขึ้น



รูปที่ 1.1 การคัดคุณภาพและคัดขนาดมะม่วงเพื่อการส่งออกโดยเกษตรกรผู้เชี่ยวชาญ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์วิชันได้เข้ามามีบทบาทกับงานทางการเกษตรมากขึ้น โดยเป้าหมายของงานทางด้านคอมพิวเตอร์วิชันจะนำมาใช้ในการสร้างรูปแบบจำลองจากภาพถ่าย จึงสามารถนำมาใช้กับผลิตผลทางการเกษตรได้ เช่น การตรวจสอบคุณภาพ การจัดประเภท การคัดระดับคุณภาพ การคัดขนาด เป็นต้น ดังนั้นเพื่อช่วยลดต้นทุน ลดเวลา ลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้ใช้หลักการประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวัดลักษณะทางกายภาพของวัตถุทั้งในเชิง 2 มิติและ 3 มิติ เพื่อช่วยให้การคัดขนาดและคุณภาพมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยจะใช้มะม่วงเป็นวัตถุตัวอย่างในการวิเคราะห์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัตถุในเชิง 2 มิติและ 3 มิติ โดยใช้หลักการประมวลผลภาพและคอมพิวเตอร์วิชัน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการวัดลักษณะทางกายภาพของวัตถุ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาวิธีการสร้างวัตถุในเชิง 3 มิติ จากภาพถ่ายในหลายมุมมอง

1.2.4 เพื่อสร้างวิธีการมาช่วยนักวิจัยทางการเกษตรในการวัดลักษณะทางกายภาพของผลิตผลทางการเกษตรทดแทนการวัดด้วยเครื่องมือ ทำให้มีความสะดวกและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาแนวคิดทฤษฎีต่างๆ เพื่อมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัตถุ (มะม่วง) ในภาพ โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองค่าสีของวัตถุที่ต้องการเพื่อนำมาใช้ในการพิจารณาแยกส่วนวัตถุออกจากพื้นหลัง และใช้หลักการวิเคราะห์องค์ประกอบที่เชื่อมต่อกันของภาพในการกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นรอบๆ วัตถุ จากนั้นจะใช้สไปลน์ฟังก์ชันในการประมาณเส้นขอบของวัตถุ แล้วจึงนำมุมภาพด้านบนและด้านข้างมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพในเชิง 2 มิติคือ ขนาด พื้นที่ภาพฉาย และสี ส่วนการวิเคราะห์ในเชิง 3 มิติจะเริ่มจากการเทียบวัตถุกล้องและนำโครงร่าง 2 มิติของทุกมุมภาพมาสร้างโมเดลวัตถุในเชิง 3 มิติโดยใช้หลักการของสเปคคาฟวิงและคำนวณหาปริมาตรและพื้นที่ผิว จากนั้นจะวิเคราะห์กับภาพสแกนของเปลือกมะม่วงโดยใช้หลักการของมอร์โฟโลยีในการกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นและคำนวณหาพื้นที่เปลือกซึ่งลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จะนำมาใช้เป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาด โดยใช้วิธีแบคพรอพพาเกชัน สุดท้ายจะคัดแยกค่าหนีโดยพิจารณาจากปริมาณของสีที่เป็นส่วนค่าหนีที่เกิดขึ้น

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ใช้ทฤษฎีและหลักการประมวลผลภาพและคอมพิวเตอร์วิชันในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัตถุในเชิง 2 มิติคือ ความยาว ความกว้าง ความหนา พื้นที่ภาพฉาย และสี

1.4.2 สร้างโมเดลวัตถุในเชิง 3 มิติ และคำนวณหาปริมาตรและพื้นที่ผิว

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษาบทความและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

1.5.2 เก็บภาพตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลอง

1.5.3 ศึกษาแบบจำลองสีต่างๆ และการเปลี่ยนค่าแบบจำลองสี

1.5.4 ออกแบบอัลกอริทึมและเขียน โปรแกรมในการแยกวัตถุออกจากพื้นหลัง

1.5.5 ศึกษาโครงสร้างภาพ 2 มิติและศึกษาจุดเด่นของลักษณะทางกายภาพของวัตถุ

1.5.6 ออกแบบอัลกอริทึมและเขียน โปรแกรมในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพในเชิง 2 มิติ

- 1.5.7 ศึกษาการเทียบวัดกล้องและหลักการสร้าง โมเดล 3 มิติจากหลายมุมมองภาพ
- 1.5.8 ออกแบบอัลกอริทึมและเขียน โปรแกรมคำนวณหาลักษณะทางกายภาพในเชิง 3 มิติ
- 1.5.9 บันทึกและสรุปผลการทดลอง
- 1.5.10 รวบรวมข้อมูลจัดทำเอกสารเพื่อนำเสนอเป็นงานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้ทราบถึงงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้
- 1.6.2 ได้วิธีการวัดลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่สะดวกรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ
- 1.6.3 สามารถนำงานวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อเพื่อสร้างระบบอัตโนมัติมาช่วยเกษตรกรในการ คัดขนาดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร แทนการใช้แรงงานคนหรือเครื่องมือ
- 1.6.4 ได้วิธีการพื้นฐานในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานการตรวจสอบลักษณะทาง กายภาพของวัตถุอื่นๆ ต่อไป

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยในการคัดคุณภาพมะม่วง

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่ามะม่วงนั้นเป็นผลไม้ที่สำคัญในการจำหน่ายส่งออกภายในและภายนอกของประเทศไทย จึงได้มีงานวิจัยต่างๆ ที่คิดค้นวิธีการเพื่อช่วยเกษตรกรในการคัดคุณภาพของมะม่วงตามมาตรฐานการส่งออก โดยพิจารณาจาก ขนาด รูปร่าง ความอ่อนแก่ ความสุก ปริมาณน้ำเป็นต้น ซึ่งระบบจะถูกประเมินความสามารถโดยเปรียบเทียบผลการทำงานของระบบกับการทำงานด้วยคน โดยแต่ละลักษณะที่นำมาใช้ในการคัดคุณภาพของมะม่วงจะมีวิธีการพิจารณาดังต่อไปนี้

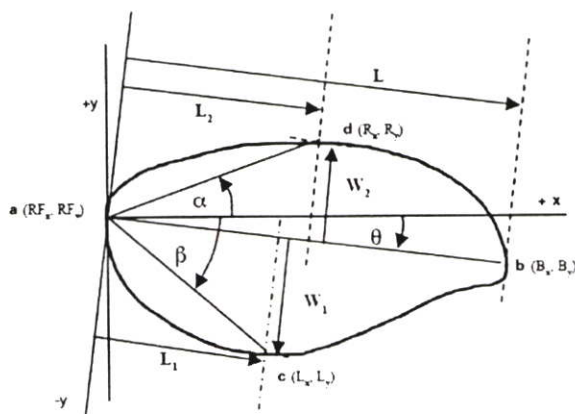
2.1.1 การคัดขนาด

จากงานวิจัยของพูนพัฒน์ พูนน้อย และอัมพวัน ต้นสกุล (2548) และงานวิจัยของบัณฑิต จริโมภาส และคณะ (2534) ได้สร้างเครื่องคัดขนาดมะม่วงโดยได้เลือกใช้พื้นที่ที่ภาพฉายของผลมะม่วงในการคัดขนาดแทนการใช้น้ำหนัก เนื่องจากได้พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ระหว่างน้ำหนักกับพื้นที่ภาพฉาย ความยาว และความกว้างของผลมะม่วง ซึ่งพื้นที่ภาพฉายจะให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุด และในงานวิจัยของบัณฑิต จริโมภาส และคณะ (2534) นั้นจะนำพื้นที่ภาพฉายที่คำนวณได้ของมะม่วงแต่ละผลมาเปรียบเทียบกับพื้นที่ภาพฉายของผลมะม่วงขนาดมาตรฐาน เพื่อใช้ในการคัดแยกขนาดของมะม่วงต่อไป

ต่อจากนั้นได้มีงานวิจัยของสันต์ มีผูก (2534) ที่ได้พัฒนาเครื่องคัดขนาดมะม่วงต่อจากบัณฑิต จริโมภาส และคณะ (2534) ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยให้ความสำคัญในเรื่องอิทธิพลของการแปรเปลี่ยนความเข้มของแสงสว่างและการป้อนมะม่วงในลักษณะต่างๆ เข้าสู่เครื่องคัดขนาด ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าแสงมีผลต่อการคัดขนาดมะม่วง โดยในขั้นตอนของการถ่ายภาพนั้นถ้าใช้ความเข้มแสงมากจะทำให้ได้คุณภาพของมะม่วงถูกต้องมากกว่าการใช้ความเข้มแสงน้อย และในขั้นตอนของการป้อนมะม่วงเข้าสู่เครื่องคัดขนาดนั้นเมื่อหันเอาด้านหัว (มีขั้ว) เข้าเครื่องคัดขนาดก่อนจะทำให้จำนวนคุณภาพของมะม่วงที่ได้มีความถูกต้องมากกว่าการหันเอาด้านอื่นเข้า แต่จากผลการทดลองนั้นค่าความถูกต้องจะแตกต่างกันไม่มากนัก

2.1.2 การคัดรูปร่าง

ในการคัดรูปร่างของมะม่วงจะทำเพื่อแยกมะม่วงที่มีรูปร่างผิดปกติหรือไม่ตรงตามเกณฑ์ที่ต้องการออกไป จากงานวิจัยของพูนพัฒน์ พูนน้อย และอัมพวัน ตันสกุล (2548) จะพิจารณาจากค่าสัดส่วนของความยาวในแนวแกนหลัก (L) ความยาวในแนวแกนรอง (W) ระยะในแนวแกนหลักจากขั้วไปยังด้านท้อง (L_1) ระยะในแนวแกนหลักจากขั้วไปยังด้านหลัง (L_2) ระยะในแนวแกนรองจากขั้วไปยังด้านท้อง (W_1) และระยะในแนวแกนรองจากขั้วไปยังด้านหลัง (W_2) เพื่อใช้ในการประเมินรูปร่างของมะม่วงและคัดแยกมะม่วงที่มีค่าสัดส่วนไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดออกไป



รูปที่ 2.1 การวัดลักษณะรูปร่างของมะม่วง

2.1.3 การคัดความแก่

จากงานวิจัยของฤติกร ทับทิมทอง (2532) ได้ทำการคัดแยกมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ออกเป็นกลุ่มๆ ตามความแก่โดยพิจารณาจากค่าความถ่วงจำเพาะของมะม่วง เนื่องจากมะม่วงเมื่อมีอายุมากขึ้นจะมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ความถ่วงจำเพาะของมะม่วงมีค่ามากขึ้น จึงได้ใช้วิธีการสังเกตการจมหรือลอยในน้ำเกลือ ซึ่งจากผลการทดลองทำให้ได้ว่ามะม่วงที่เหมาะสมสำหรับการส่งออกควรเป็นมะม่วงที่จมน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นต่ำๆ เพราะมีค่าความถ่วงจำเพาะที่เหมาะสมและมีความแน่นเนื้อสูงทำให้ไม่เกิดการชำได้ง่ายในการขนส่ง แต่วิธีการลอยในน้ำเกลือนี้อาจจะทำให้เกิดผลกระทบต่อมะม่วง เช่นจะทำให้รสชาติของมะม่วงผิดปกติไปจากเดิมและมีแนวโน้มในการเป็นโรคแอนแทรกโนส ซึ่งจะแสดงอาการเมื่อผลสุกทำให้เก็บรักษาได้ไม่นาน

จากงานวิจัยของพูนพัฒน์ พูนน้อย และอัมพวัน ตันสกุล (2548) จะพิจารณาความแก่จากความนูนของด้านท้องเนื่องจากมะม่วงที่แก่จะมีความนูนของด้านท้องมากขึ้น (เมื่อเทียบกับความยาวของผล) จึงได้เลือกใช้อัตราส่วนของระยะในแนวแกนรองจากขั้วไปยังด้านท้องกับความยาวในแนวแกนหลักมาใช้ในการคัดความแก่ของมะม่วง

ความแก่ของมะม่วงหรือความสมบูรณ์ของการเติบโตสามารถวัดได้ด้วยความแน่นเนื้อ โดยความแน่นเนื้อจะค่อยๆ ลดลงเมื่อมีการเติบโตที่มากขึ้นและจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อสุก จากงานวิจัยของอุดมศักดิ์ กิจทวี (2547) ได้สร้างเครื่องมือเพื่อวัดหาความแน่นเนื้อของมะม่วงโดยใช้วิธีกระแทก และทำการเปรียบเทียบเครื่องมือที่สร้างขึ้นกับเครื่อง Effegi และ UTM (Universal Testing Machine) ซึ่งจากผลการทดลองของทั้ง 3 วิธีนั้นสามารถทำนายความแน่นเนื้อของมะม่วงได้ และมีแนวโน้มในการทำนายเดียวกันคือแยกมะม่วงออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ มะม่วงกลุ่มผลดิบ (ผลมะม่วงอายุ 60 80 และ 100 วัน) และกลุ่มผลแก่ (ผลมะม่วงอายุมากกว่า 110 วัน)

2.1.4 การคัดความสุก

ในการจำหน่ายส่งออกมะม่วงนั้นจะต้องคำนึงถึงความสุกดิบของมะม่วงด้วย เนื่องจากมะม่วงสุกนั้นจะซำและเน่าเสียง่าย จากงานวิจัยของพูนพัฒน์ พูนน้อย และอัมพวัน ตันสกุล (2548) จะพิจารณาค่าอัตราส่วนปริมาตรพื้นที่สีเหลืองที่ปรากฏบนเปลือกต่อปริมาตรพื้นที่ทั้งหมด โดยจะกำหนดค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคัดเลือกมะม่วงที่สุกออกไป

ในงานวิจัยของก่อเกียรติ จรัสวิชรกุล และคณิตพงษ์ แซ่ก่อง (2538) ได้คัดความสุกแก่ของมะม่วงโดยพิจารณาจากหลักของความแน่นเนื้อของมะม่วง เนื่องจากมะม่วงที่มีความสุกแก่ต่างกัน จะมีความแน่นเนื้อที่ต่างกัน โดยความแน่นเนื้อจะมีค่าลดลงเมื่อมะม่วงมีความแก่เพิ่มขึ้น และเมื่อมะม่วงสุกจะทำให้มีความแน่นเนื้อที่น้อยมาก จึงได้อาศัยความแน่นเนื้อของมะม่วงบ่งบอกถึงความสามารถในการสะท้อนกลับของแรง ซึ่งมะม่วงที่มีความแน่นเนื้อสูงจะมีความสามารถในการสะท้อนกลับของแรงได้ดี และจะวัดค่าแรงสะท้อนกลับโดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพลังงานจากการวัดแรงสะท้อนของสปริง ทำให้สามารถคัดความสุกแก่ของมะม่วงได้

2.1.5 การประเมินปริมาณตำหนิ

เนื่องจากปริมาณตำหนิจะนำมาใช้ในการแบ่งชั้นคุณภาพของมะม่วง จากงานวิจัยของพูนพัฒน์ พูนน้อย และอัมพวัน ตันสกุล (2548) จะพิจารณาพื้นที่ของตำหนิที่เกิดขึ้นจากมุมมองด้านบน โดยตำหนิบนเปลือกมะม่วงส่วนใหญ่จะมีสีดำหรือน้ำตาลเข้ม ดังนั้นจะใช้ขนาดพื้นที่ของตำหนิที่ได้ในการแบ่งชั้นคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด

2.2 งานวิจัยที่นำหลักการคอมพิวเตอร์วิชันและการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้กับ

งานทางการเกษตร

จากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้นำหลักการคอมพิวเตอร์วิชันและการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้กับงานทางการเกษตร สามารถแบ่งวัตถุประสงค์ในการนำมาใช้งานได้เป็นลักษณะต่างๆ เช่น การวิเคราะห์คุณลักษณะ (Characterization) การคัดคุณภาพ (Grading) การแบ่งแยก

ประเภท (Classification) การระบุประเภท (Identifying) เป็นต้น ซึ่งแต่ละลักษณะจะมีวิธีการนำมาพิจารณาดังต่อไปนี้

2.2.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะ

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะมักจะนำมาใช้วิเคราะห์กับผลิตภัณฑ์การเกษตรหรือใบไม้ของพืชเช่น งานวิจัยของ Cunha (2003) จะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของใบไม้เช่น ขนาด ความกว้าง ความยาว พื้นที่ ขอบเขต รูปร่างที่เกิดขึ้น เป็นต้น ซึ่งจะวิเคราะห์เฉพาะส่วนของใบไม้ในภาพ ดังนั้นจึงต้องแยกส่วนของใบไม้ออกจากพื้นหลัง และกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น จากนั้นจะทำการหาขอบของใบไม้โดยใช้วิธี Prewitt Edge Detector และนำไปคำนวณหาคุณลักษณะต่างๆ ของใบไม้ และนำลักษณะต่างๆ ที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

2.2.2 การคัดคุณภาพ

ในการคัดคุณภาพนั้นมักจะนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์การเกษตร ซึ่งอาจจะมีข้อกำหนดกฎเกณฑ์ที่นำมาใช้ในการคัดคุณภาพแตกต่างกันออกไปเช่น จากงานวิจัยของ Gejima et al. (2003) จะพิจารณาที่ระดับความสูงของผลมะเขือเทศโดยใช้ระบบสี RGB และ $L^*a^*b^*$ ในการวิเคราะห์กับสีผิวด้านนอก ซึ่งจะสร้างฮิสโตแกรมระหว่างค่าสีในแต่ละระบบสีกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความสูงของมะเขือเทศ จากผลการทดลองทำให้สามารถเลือกใช้ค่า R G และ a^* ในการประเมินและจัดระดับความสูงของมะเขือเทศได้แบ่งออกเป็น 6 ระดับ ซึ่งสามารถนำมาใช้กำหนดมาตรฐานของการจำหน่ายมะเขือเทศออกสู่ตลาดได้

จากงานวิจัยของ Njoroge et al. (2002) ได้นำมาใช้ในการคัดคุณภาพของผลไม้เช่น ส้ม โดยจะใช้ภาพถ่ายในการนำมาวิเคราะห์ลักษณะภายนอกเช่น ความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากและน้อยที่สุด พื้นที่ภาพฉาย สีจากระบบสี HSI และ RGB และรูปทรง จากนั้นยังได้ใช้เซนเซอร์ (Sensor) เฉพาะในการวิเคราะห์ลักษณะภายในเช่น ปริมาณน้ำตาล กรด และใช้กล้องรังสีเอ็กซ์ (X-ray Sensor) ในการวิเคราะห์รอยชำของผลไม้ ซึ่งจะนำลักษณะต่างๆ เหล่านี้มาใช้ในการคัดคุณภาพของผลไม้ต่อไป

จากงานวิจัยของนพดล อรุณยะเดช (2545) ได้ทำการวิเคราะห์ความแก่ของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง โดยการวัดขนาดและความหนาแน่นของต่อมน้ำมันที่ผิวของผลส้มโอจากภาพถ่ายผิวของผลส้มโอจากบริเวณกลางผลในด้านต่างๆ จำนวน 6-18 ภาพต่อผล จากนั้นจะแปลงภาพสีที่ได้เป็นภาพระดับเทาและทำการปรับปรุงภาพให้มีความคมชัดมากขึ้นด้วยตัวกรองโซโมเมอร์ฟิกและตัวกรองมัชชาน และแปลงภาพที่ได้เป็นภาพไบนารีเพื่อทำการตรวจวัด (Edge Detection) และลดความกว้างขอบ (Thinning) แล้วจึงคำนวณหาขนาดและความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน เพื่อนำไปกำหนดมาตรฐานความแก่จากขนาดและความหนาแน่นของต่อมน้ำมันของผลส้มโอที่ต้องการ

จากงานวิจัยของอลงกรณ์ ธรรมบุตร (2548) ได้มีการศึกษาและวิเคราะห์ความแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองจากภาพถ่ายที่ก้านผล เพื่อทำการหาความแตกต่างระหว่างความกว้างบริเวณส่วนล่างของปากปลิงและก้านส่วนที่ติดกับผล โดยมีระยะต่ำลงมาจากรอยแยกของปากปลิง 25 มิลลิเมตร โดยในขั้นตอนการประมวลผลภาพจะเริ่มจากการใช้ค่าเรดโซลด์ในการแยกก้านทุเรียนออกจากพื้นหลัง และนำภาพของก้านทุเรียนที่ได้ทำการลดเส้นขอบของก้านให้เหลือขนาดของขอบเป็น 1 พิกเซล จากนั้นจะคำนวณหาระยะความกว้างที่ยาวที่สุดของก้านและกำหนดค่าให้เป็นความกว้างของปากปลิงส่วนล่างให้เป็นระยะ D_1 และกำหนดความกว้างที่ต่ำลงมาจากรอยแยกของปากปลิง 25 มิลลิเมตรให้เป็นระยะ D_2 และคำนวณหาความแตกต่างกันแล้วบันทึกผลเพื่อนำไปวิเคราะห์บ่งชี้ความแก่ของทุเรียนต่อไป

จากงานวิจัยของชลวี คำนทิพารักษ์ (2546) ได้ทำการออกแบบและทดสอบระบบในการคัดขนาดผลผลิตผลทางการเกษตรด้วยกล้องถ่ายภาพ ซึ่งจะทดสอบระบบกับผลผลิตผลทางการเกษตรต่างๆ คือ ส้ม มะเขือเทศ ฝรั่ง มันฝรั่ง ชมพู และหอมหัวใหญ่ โดยจะพิจารณาจากพื้นที่ภาพฉายซึ่งได้ถูกนำมาเทียบหาพื้นที่ผิวจากวัตถุรูปทรงมาตรฐานที่ทราบพื้นที่ผิวที่แน่นอน ทำให้ได้พื้นที่ผิวของผลผลิตเพื่อนำมาใช้ในการคัดขนาดต่อไป

2.2.3 การแบ่งแยกประเภทและการระบุประเภท

ในการแบ่งแยกประเภทและระบุประเภทถูกนำมาใช้ในการแยกแยะความแตกต่างของผลผลิตหรือสายพันธุ์ของพืชเช่น จากงานวิจัยของ Dave and Runtz (1995) ได้นำมาใช้ในการระบุความแตกต่างของสายพันธุ์พืชโดยวิธีที่ได้นำมาศึกษาเพื่อใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 3 วิธีคือ การวิเคราะห์โดยใช้รูปแบบการแปลงภาพของฟูเรียร์ (Fourier) การวิเคราะห์โดยใช้แฟร็กทัลไดเมนชัน (Fractal Dimension) และการวิเคราะห์โดยใช้วิธีโค-อ็อกเคอเรนซ์เมทริกซ์ (Co-occurrence Matrix) ซึ่งในการทดลองจะทดลองกับภาพใบนารีและภาพระดับเทา โดยเริ่มจากการแยกส่วนพืชออกจากพื้นหลังและกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ทั้ง 3 วิธีมีการทำงานดังต่อไปนี้ วิธีแรกจะสร้างกราฟเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์แยกสายพันธุ์พืชที่แตกต่างกันได้ วิธีที่สองจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์และจัดกลุ่มรูปทรงและพื้นผิวของวัตถุที่เป็นธรรมชาติที่มีความซับซ้อน ซึ่งเป็นรูปแบบการวัดลักษณะต่างๆ ทำให้สามารถนำมาใช้ในการแยกแยะความแตกต่างของสายพันธุ์พืชได้ และวิธีที่สามเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิววัตถุของภาพ ทำให้สามารถแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ของลักษณะพื้นผิวของแต่ละสายพันธุ์พืชได้

จากงานวิจัยของ Runtz (1991) ได้นำมาใช้ในการระบุความแตกต่างของสายพันธุ์พืชพวกธัญพืชต่างๆ โดยจะวิเคราะห์กับรูปทรงลักษณะเด่นของแต่ละสายพันธุ์เช่น ความยาวของใบ การแตกแขนงของใบ เป็นต้น และจะพิจารณาจากรูปแบบการแปลงภาพของฟูเรียร์ หรือรูปแบบการแปลงภาพของ Walsh-Hadamard เพื่อที่จะระบุความแตกต่างของแต่ละสายพันธุ์ได้

นอกจากนั้นยังพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงใน 2 ทิศทางของภาพ (Two-dimensional Transforms) ซึ่งจะใช้อัลกอริทึม TFI (Transition Frequency Index) ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าพิกเซลของภาพไบนารี และนำมาสร้างฮิสโตแกรมของแต่ละภาพระหว่างตำแหน่งของภาพในแต่ละทิศทางกับจำนวนร้อยละของพิกเซลของพีชในตำแหน่งนั้น

2.3 งานวิจัยในการสร้างวัตถุในเชิง 3 มิติจากหลายมุมมอง

2.3.1 อีพิโพลาร์จีโอเมทรี (Epipolar Geometry)

ในงานวิจัยของ Kimura et al. (1999) ได้ถ่ายภาพวัตถุในมุมมองด้านบน 1 ภาพและมุมมองด้านข้าง 2 ภาพ จากนั้นจะทำการสร้างวัตถุในเชิง 3 มิติโดยการวิเคราะห์จากหลักการของอีพิโพลาร์จีโอเมทรีซึ่งเป็นโปรเจกทีฟจีโอเมทรีภายใน (Intrinsic Projective Geometry) ระหว่างมุมมองซึ่งจะมีเส้นฐาน (Baseline) เป็นแกน โดยจะพิจารณาจุดที่สัมพันธ์กันหรือตรงกัน (Matching Point) ในระหว่างแต่ละมุมมองจากพินดามเมทริกซ์ (Fundamental Matrices) ของแต่ละคู่ภาพ จากนั้นจะระบุว็อกเซล (voxel) ที่อยู่ในตำแหน่งพื้นผิวของวัตถุโดยพิจารณาจากค่าคอร์รีเลชัน (Correlation Value) ของว็อกเซลนั้นในทุกๆ มุมภาพ

2.3.2 โวลูมอินเตอร์เซกชัน (Volume Intersection)

จากงานวิจัยของ Wada et al. (2000) และ Kuzu and Sinram (2003) ได้ทำการสร้างวัตถุในเชิง 3 มิติจากหลายมุมมอง โดย Wada et al. (2000) จะใช้กล้องในการถ่ายภาพวัตถุทั้งหมด 9 กล้องในมุมมองที่แตกต่างกัน ส่วน Kuzu and Sinram (2003) จะใช้กล้องวิดีโอ 1 กล้องในการบันทึกภาพรอบวัตถุ จากนั้นจะทำการแยกวัตถุออกจากพื้นหลังเพื่อทำให้ได้โครงร่าง 2 มิติ (Silhouette) ของวัตถุในแต่ละภาพ และเมื่อทำการเทียบวัตถุกล้องในแต่ละมุมมองแล้วนั้น วัตถุที่ได้สร้างขึ้นจะเกิดจากการตัดกันของแนวทรงกรวยการฉายด้านหลัง (Back-projected Cone) ของโครงร่าง 2 มิติของวัตถุในทุกๆ มุมภาพ ซึ่งรูปทรงที่ได้ของวัตถุที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปทรงอย่างหยาบ เนื่องจากวิธีนี้ไม่สามารถแสดงรายละเอียดในส่วนพื้นผิวของวัตถุได้ โดยในขั้นตอนการประมวลผลของ Wada et al. (2000) นั้นจะทำแบบคู่ขนานทำให้ได้ผลออกมาอย่างรวดเร็ว

2.3.3 สเปสคาฟวิ่ง (Space Carving)

จากงานวิจัยของ Eisert et al. (1999) และงานวิจัยของ Mulayim et al. (2003) ได้ทำการสร้างวัตถุในเชิง 3 มิติจากลำดับภาพหลายภาพรอบวัตถุ ซึ่งจะถูกบันทึกจากกล้องวิดีโอเพียง 1 กล้อง โดยวัตถุจะวางอยู่บนจานหมุน ซึ่งภาพจะถูกเลือกออกมาวิเคราะห์ประมาณ 10-20 ภาพ โดยแต่ละภาพจะถูกแยกวัตถุออกจากพื้นหลังเพื่อให้เป็นภาพที่มีวัตถุบนพื้นหลังสีดำ หลังจากที่ได้เทียบวัตถุกล้องแล้ว จะทำการสร้างลูกบาศก์ 3 มิติสมมติ (Bounding Box) ที่มีขนาดทั้ง 3 แกนเท่ากัน

และกำหนดให้มีปริมาตรเริ่มต้นเพียงพอที่จะครอบคลุมปริมาตรวัตถุได้ จากนั้นจะแบ่งลูกบาศก์ออกเป็นว็อกเซลย่อยๆ และกำหนดพิกัดของแต่ละว็อกเซล จากนั้นจะพิจารณาทุกๆ พิกัดของว็อกเซลกับตัวแปรภายในและตัวแปรภายนอกกล้องของทุกๆ มุมภาพ โดยในงานวิจัยของ Mulayim et al. (2003) จะพิจารณาว่าถ้าเป็นว็อกเซลที่ปรากฏอยู่ภายในโครงร่าง 2 มิติของวัตถุในทุกๆ มุมภาพ จะกำหนดให้ว็อกเซลนั้นเป็นส่วนของวัตถุ แต่ถ้าไม่ใช่จะกำหนดให้เป็นส่วนของพื้นหลัง และในงานวิจัยของ Eisert et al. (1999) นั้นถ้าพิจารณาพบว่าเป็นว็อกเซลของวัตถุก็จะทำการกำหนดค่าสีให้กับว็อกเซลนั้นตามค่าสีของวัตถุที่คำนวณได้

2.3.4 การสร้างภาพ 3 มิติจากภาพตัดขวางของวัตถุ

จากงานวิจัยของสุพจน์ จันทรวิวัฒน์ (2541) และงานวิจัยของพีระ เลี้ยวประเสริฐพร (2544) ได้ทำการสร้างภาพ 3 มิติจากลำดับข้อมูลภาพตัดขวางที่แบ่งออกเป็นช่วงบนระนาบที่ขนานกันของอวัยวะซึ่งได้จากเครื่อง CT และเครื่อง MRI จากนั้นจะนำโครงร่าง 2 มิติของวัตถุที่ได้จากภาพตัดขวางทั้งหมดมาประกอบกัน แล้วทำการสร้างข้อมูลในส่วนที่ขาดหายไประหว่างภาพตัดขวาง โดยงานวิจัยของสุพจน์ จันทรวิวัฒน์ (2541) จะใช้วิธีคิวบิกสไปน์อินเตอร์โพลชัน (Cubic Spline Interpolation) ส่วนงานวิจัยของพีระ เลี้ยวประเสริฐพร (2544) จะใช้การเชื่อมจุดที่เรียงกันตามแนวแกน Z จากนั้นจะพิจารณาว่าส่วนใดเป็นพื้นผิวที่สามารถมองเห็นได้หรือเป็นพื้นผิวที่ถูกบดบัง จากงานวิจัยของสุพจน์ จันทรวิวัฒน์ (2541) จะพิจารณาด้วยอัลกอริธึมสแกนไลน์ (Scan Line) ทำให้ได้พิกัดของจุดต่างๆ บนพื้นผิว และพิจารณาความสัมพันธ์ของจุดพิกัดต่างๆ บนพื้นผิวในรูปของค่าเวกเตอร์ปกติ จากนั้นทั้งสองงานวิจัยจะจำลองการให้แสงเงาบนพื้นผิวของวัตถุโดยกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) และทำการแสดงภาพ 3 มิติของวัตถุที่ได้บนหน้าจอ โดยงานวิจัยของพีระ เลี้ยวประเสริฐพร (2544) จะแสดงวัตถุในรูปของว็อกเซลของพื้นผิววัตถุ

ส่วนงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้ใช้วิธีที่ต่างออกไปเช่น จากงานวิจัยของอะโณ จันทเนตร และคณะ (2540) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องเก็บข้อมูลภาพ 3 มิติ (3D Scanner) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสแกนลักษณะโครงสร้างภายนอกของวัตถุ โดยในการถ่ายภาพวัตถุจะใช้แสงเลเซอร์ยิงไปตกกระทบที่ผิวของวัตถุในแนวแกนตั้งเพื่อทำให้เกิดขอบของวัตถุ แล้วทำการหมุนและถ่ายภาพวัตถุไปในมุมต่างๆ จนครบรอบ จากนั้นจะนำแค่ส่วนของเส้นเลเซอร์ของภาพที่ถ่ายได้ในแต่ละมุมมองมาสร้างเป็นโครงสร้าง 3 มิติของวัตถุและแสดงออกทางหน้าจอ เป็นต้น

บทที่ 3

ทฤษฎีการประมวลผลภาพและคอมพิวเตอร์วิชัน

3.1 การประมวลผลภาพเชิงตัวเลข (Digital Image Processing)

โดยปกติแล้วสายตาของคนทั่วไปจะมองเห็นภาพต่างๆ เป็นลักษณะแบบอนาล็อก (Analog) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยคณิตศาสตร์ที่มีตัวแปรนับได้อย่างต่อเนื่อง แต่เครื่องคอมพิวเตอร์จะใช้เลขฐานสองเป็นหลักในการคำนวณ โดยภาพจะถูกแทนที่ด้วยตัวเลขให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ (Matrix) ดังนั้นเมื่อนำภาพมาแปลงเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ ภาพนั้นจะกลายเป็นภาพดิจิทัล (Digital Image) ซึ่งจะเรียกการทำงานนี้ว่าเป็นการประมวลผลภาพเชิงตัวเลข

ระบบพิกัดระนาบ 2 มิติ (Spatial Coordinate) จะใช้ในการแสดงภาพดิจิทัล ซึ่งมีขนาดความกว้างและความสูงของภาพแสดงในแกน X และแกน Y ส่วนจุดใดๆ ที่อยู่บนระนาบ XY จะเรียกแทนจุดใดๆ นั้นว่าพิกเซล (Pixel) โดยจะมีฟังก์ชัน $f(x,y)$ ที่แสดงถึงค่าระดับความเข้มที่มีอยู่ L ระดับ ซึ่งเป็นจำนวนที่นับได้จำกัดแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Quantity) ซึ่งค่าที่ได้เป็นผลมาจากการทำควอนไทซ์ (Quantization) นั่นคือการแปลงจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล

จำนวนช่วงระดับความเข้ม L ของจุดภาพจะบ่งบอกถึงระดับความเข้มของภาพเชิงตัวเลข ซึ่งโดยทั่วไประดับความเข้ม L จะมีค่าตั้งแต่ 2 ระดับขึ้นไป เช่นที่ค่าระดับความเข้ม 256 ระดับ นั่นคือค่าระดับความเข้มของจุดภาพอยู่ในช่วง $[0-255]$ โดยจะใช้เนื้อที่ในการเก็บขนาด 1 ไบต์ (Byte) หรือ 8 บิต (Bit) สำหรับข้อมูล 1 จุดภาพ ($2^8 = 256$) ในกรณีที่ต้องการภาพที่มีความละเอียดของระดับความเข้มสูงกว่านี้ขึ้นไป จะต้องใช้เนื้อที่ในการเก็บข้อมูลมากกว่า 8 บิต ซึ่งอาจจะเป็น 16 บิต หรือ 24 บิต โดยค่าระดับความเข้มของจุดภาพจะเป็น 2^{16} ระดับและ 2^{24} ระดับตามลำดับ

รูปแบบในการประมวลผลภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระดับคือ การประมวลผลภาพในระดับต่ำ (Low-level Image Processing) และการประมวลผลภาพในระดับสูง (High-level Image Processing) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การประมวลผลภาพในระดับต่ำ เป็นการประมวลผลภาพเชิงตัวเลขเพื่อหาตัวแปรต่างๆ มาอธิบายข้อมูลภาพ โดยทั่วไปแล้วการประมวลผลภาพในระดับต่ำจะหมายถึง การประมวลผลภาพก่อน (Image Preprocessing) เช่น การกำจัดสัญญาณรบกวน การจำแนกภาพ การหาขอบภาพ การเปลี่ยนแปลงภาพ การทำให้ภาพคมชัด เป็นต้น โดยการประมวลผลในระดับต่ำจะใช้ค่าความสว่างหรือระดับความเข้มของจุดภาพโดยตรง ซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการเบื้องต้นที่มีความสำคัญมาก เพื่อจะนำตัวแปรที่ได้ไปใช้ในการประมวลผลภาพในระดับสูงต่อไป

การประมวลผลภาพในระดับสูง เป็นการนำผลลัพธ์หรือตัวแปรที่ได้จากการประมวลระดับต่ำมาตีความหรือประมวลผลและแสดงให้อยู่ในรูปของสัญลักษณ์ โดยสัญลักษณ์เหล่านี้จะแสดงถึงสิ่งต่างๆ ในภาพเพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจภาพได้ เช่น การรู้จำรูปแบบของตัวอักษร ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุในภาพ ขนาดหรือรูปร่างของวัตถุ เป็นต้น

3.2 มอร์โฟโลยีทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Morphology) (Gonzalez and Woods, 1992)

ภาพของวัตถุที่ได้จากการสแกนด้วยเครื่องสแกน (Scanner) หรือได้จากการถ่ายภาพของกล้องดิจิทัล (Digital Camera) เพื่อนำมาประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์นั้น ภาพที่ได้อาจจะมีสัญญาณรบกวน (Noise) เกิดขึ้น ซึ่งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นคือจุดภาพที่ไม่พึงประสงค์อาจเกิดได้จากหลายสาเหตุเช่น ความไม่สม่ำเสมอของแสงในการสแกน กระงกที่วางภาพในการสแกนไม่สะอาด รอยนิ้วมือที่เกิดจากการสัมผัส ความผิดพลาดในการส่งผ่านข้อมูล เป็นต้น ซึ่งจะทำให้คุณภาพของภาพนั้นลดลงไป ดังนั้นก่อนที่จะทำการประมวลผลภาพต่อไปจึงต้องมีการวิเคราะห์เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

มอร์โฟโลยีทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีที่นำหลักการทางคณิตศาสตร์คือทฤษฎีเซต มาใช้ในการนำเสนอรูปแบบหรือโครงสร้างของวัตถุในภาพ ซึ่งสามารถเป็นวิธีที่จะนำมาใช้ในการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบเกลือและพริกไทย (Salt-and-pepper Noise) ที่เกิดขึ้นบนภาพไบนารีได้ โดยมีบทนิยามเบื้องต้นดังนี้

กำหนดให้ A และ B เป็นเซตของจุดภาพในเชิง 2 มิติ ซึ่งประกอบด้วยจุดภาพ $a = (a_1, a_2)$ และ $b = (b_1, b_2)$ ตามลำดับ

1. ทรานสเลชัน (Translation) การทำทรานสเลชันของ A โดย $x = (x_1, x_2)$ เขียนแทนด้วย $(A)_x$ เป็นการย้ายตำแหน่งจุดภาพที่อยู่ในเซต A ด้วยขนาด x มีนิยามดังนี้

$$(A)_x = \{c \mid c = a + x ; a \in A\} \quad (3.1)$$

2. รีเฟล็กชัน (Reflection) การทำรีเฟล็กชันของ A เขียนแทนด้วย \hat{A} เป็นการกลับตำแหน่งจุดภาพที่อยู่ในเซต A มีนิยามดังนี้

$$\hat{A} = \{x \mid x = -a ; a \in A\} \quad (3.2)$$

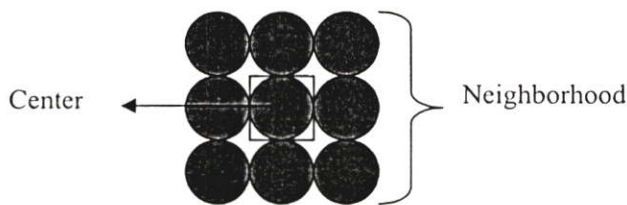
3. คอมพลิเมนต์ (Complement) การทำคอมพลิเมนต์ของเซต A เขียนแทนด้วย A^c เป็นการกำหนดตำแหน่งจุดภาพที่ไม่ได้อยู่ในเซต A มีนิยามดังนี้

$$A^c = \{x \mid x \notin A\} \quad (3.3)$$

4. ผลต่าง (Difference) การทำผลต่างของเซต A และเซต B เขียนแทนด้วย $A - B$ เป็นการกำจัดจุดภาพบางส่วนในเซต A ซึ่งเป็นจุดภาพที่อยู่ในเซต B มีนิยามดังนี้

$$A - B = \{x \mid x \in A ; x \notin B\} = A \cap B^c \quad (3.4)$$

หลักการทำงานของมอร์โฟโลยีทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาเฉพาะกลุ่มสีที่เป็นวัตถุในภาพตามที่ได้กำหนดไว้ นั่นคืออาจจะพิจารณาเฉพาะกลุ่มจุดภาพดำซึ่งอยู่บนพื้นหลังสีขาว หรืออาจจะพิจารณาเฉพาะกลุ่มจุดภาพขาวซึ่งอยู่บนพื้นหลังสีดำ ในแต่ละกลุ่มจุดภาพอาจจะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น จึงควรจะมีการกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้ออกไปก่อนที่จะนำภาพไปประมวลผลต่อไป ในการพิจารณาการกำจัดสัญญาณรบกวนนั้นจะต้องมีการกำหนดสตรักเจอร์อิเลิเมนต์ (Structure Element) ขึ้นมาช่วยในการพิจารณา กำหนดให้เป็นสตรักเจอร์อิเลิเมนต์ B มีตัวอย่างดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างสตรักเจอร์อิเลิเมนต์ขนาด 3x3 พิกเซล

จากตัวอย่างสตรักเจอร์อิเลิเมนต์ B ดังแสดง เป็นโครงสร้างจุดภาพดำที่มีขนาด 3x3 พิกเซล โดยจะนำจุดกลาง (Center) และจุดรอบข้าง (Neighborhood) ของสตรักเจอร์อิเลิเมนต์ B มาพิจารณาร่วมกับวัตถุที่เป็นเซตของจุดภาพดำ

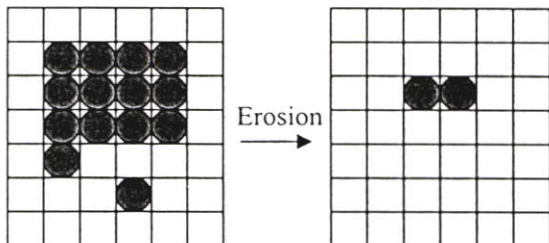
การทำงานโดยพื้นฐานของมอร์โฟโลยีจะประกอบไปด้วย อีโรชัน (Erosion) และไดเลชัน (Dilation) ซึ่งมีการทำงานดังนี้

3.2.1 อีโรชัน (Erosion)

การทำอีโรชันของเซต A กับสตรักเจอร์อิเลิเมนต์ B เขียนแทนด้วย $A \ominus B$ มีนิยามดังนี้

$$A \ominus B = \{ x \mid (B)_x \subseteq A \} \tag{3.5}$$

เป็นการลดจำนวนจุดภาพดำในเซต A ซึ่งจะเพิ่มช่องว่างให้กว้างขึ้นระหว่างแต่ละกลุ่มของจุดภาพดำที่อยู่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน หรือเป็นการกำจัดจุดภาพดำที่มีขนาดเล็กมากออกไป ดังตัวอย่างต่อไปนี้



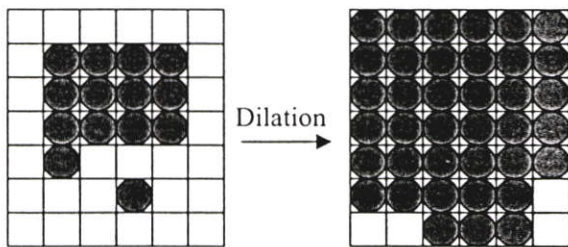
รูปที่ 3.2 การทำอีรอสัน $A \ominus B$

3.2.2 ไดเลชัน (Dilation)

การทำไดเลชันของเซต A กับสตรักเจอร์อีลิเมนต์ B เขียนแทนด้วย $A \oplus B$ มีนิยามดังนี้

$$A \oplus B = \{ x \mid (\bar{B})_x \cap A \neq \emptyset \} \tag{3.6}$$

เป็นการทำงานที่ตรงข้ามกับอีรอสันคือ เป็นการเพิ่มจำนวนจุดภาพดำเพื่อขยายขนาดกลุ่มของจุดภาพดำในเซต A ทำให้เป็นการลดช่องว่างให้แคบลง หรืออาจเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างแต่ละกลุ่มจุดภาพดำที่อยู่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน ดังตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 การทำไดเลชัน $A \oplus B$

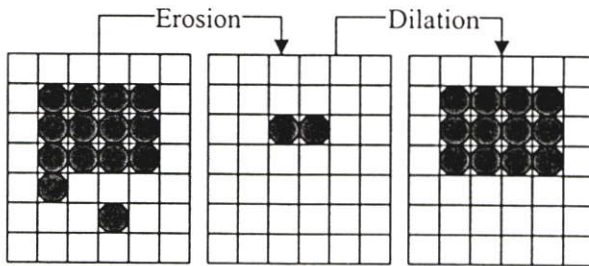
ในการเพิ่มประสิทธิภาพของมอร์ฟอโลยีทางคณิตศาสตร์สามารถรวมการทำงานของทั้ง 2 พื้นฐานเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดวิธีการโอเพนนิ่ง (Opening) และโคลสซิง (Closing) ซึ่งมีการทำงานดังนี้

3.2.3 โอเพนนิ่ง (Opening)

การทำโอเพนนิ่งของเซต A กับสตรักเจอร์อีลิเมนต์ B เขียนแทนด้วย $A \circ B$ มีนิยามดังนี้

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (3.7)$$

เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างการทำอีรอสันและไดเลชันตามลำดับ ก็จะเริ่มจากการทำอีรอสันโดยลดจำนวนจุดภาพดำ แล้วตามด้วยการทำไดเลชันโดยเพิ่มจำนวนจุดภาพดำลงไป ภาพให้เท่ากับจำนวนรอบของการทำอีรอสัน ดังตัวอย่างต่อไปนี้



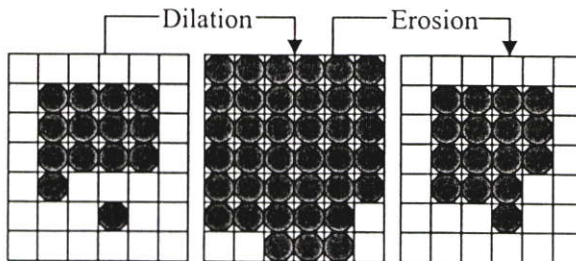
รูปที่ 3.4 การทำโอเพนนิ่ง $A \circ B$

3.2.4 โคลสซิง (Closing)

การทำโคลสซิงของเซต A กับสตรักเจอร์อีลิเมนต์ B เขียนแทนด้วย $A \bullet B$ มีนิยามดังนี้

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (3.8)$$

เป็นการทำงานที่มีลำดับตรงข้ามกับการทำโอเพนนิ่ง โดยจะทำไดเลชันและอีรอสันตามลำดับก็จะเริ่มจากการทำไดเลชันโดยเพิ่มจำนวนจุดภาพดำ แล้วตามด้วยการทำอีรอสันโดยลดจำนวนจุดภาพดำของภาพให้เท่ากับจำนวนรอบของการทำไดเลชัน ดังตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 3.5 การทำโคลสซิง $A \bullet B$

จากวิธีข้างต้นอาจยังไม่ครอบคลุมพอในการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบเกลือและพริกไทย จึงมีการพัฒนาผลลัพธ์ที่ได้จากการทำโอเพนนิ่งและโคลสซิง โดยนำทั้งสองการทำงานนี้มาทำงานร่วมกันคือ อาจจะทำโอเพนนิ่งก่อนแล้วตามด้วยโคลสซิง หรือในทางตรงกันข้าม อาจจะทำโคลสซิงก่อนแล้วตามด้วยโอเพนนิ่ง ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

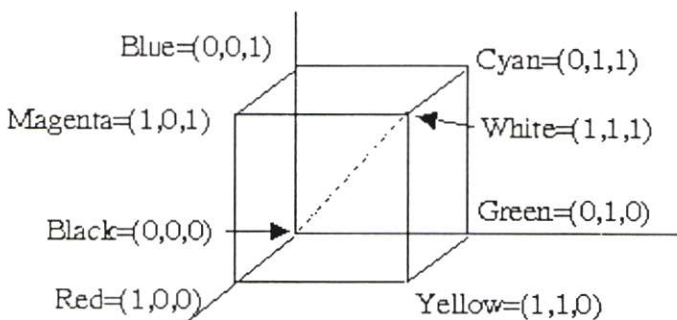
3.3 แบบจำลองสี (Color Model) (Castleman. 1996 ; Mai. 2005)

สีเป็นคุณสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่งของวัตถุ เกิดจากการรับรู้สัญญาณในรูปของคลื่นแสงที่ตกกระทบตามนุษย์และส่งสัญญาณผ่านประสาทตาไปยังสมอง จากนั้นจึงแปลงค่าเป็นค่าสีต่างๆ ในระบบสีจะมีแบบจำลองสีหลายรูปแบบให้เลือกใช้ตามความเหมาะสมเช่น แบบจำลองสี XYZ ซึ่งเป็นแบบจำลองสีมาตรฐานที่พัฒนาขึ้นโดย CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) ถูกใช้เป็นตัวกลางในการอ้างอิงและแปลงค่าระหว่างแบบจำลองสีทั้งหมด ในงานทางด้านกราฟิกจะใช้แบบจำลองสี CMY ในการแสดงภาพบนหน้าจอคอมพิวเตอร์จะใช้แบบจำลองสี RGB ในงานทางด้านคอมพิวเตอร์กราฟิกหรืองานที่ต้องคำนึงในด้านของศิลปะจะใช้แบบจำลองสี HSI หรือมาตรฐานในการวัดสีเช่นเครื่องมือในการวัดสีของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจะใช้แบบจำลองสี $L^*a^*b^*$ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาแบบจำลองสีต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.3.1 แบบจำลองสี RGB

แบบจำลองสี RGB เป็นระบบสีที่ใช้กันทั่วไปจะประกอบไปด้วยแม่สีหลัก 3 สีคือ แดง (R) เขียว (G) และน้ำเงิน (B) ซึ่งแต่ละแม่สีจะมีขนาดเป็น 8 บิต ดังนั้นในควมลึกของแต่ละพิกเซลจะมีขนาดเป็น 24 บิต ซึ่งในแต่ละแม่สีจะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 255 ดังนั้นสามารถที่จะนำมาสร้างสีได้ถึง $256 \times 256 \times 256$ เท่ากับ 16,777,216 สี

แบบจำลองสี RGB สามารถนำมาแสดงในระบบพิกัดปริภูมิสี (Color Space) ในแบบลูกบาศก์ได้ดังรูปที่ 3.6



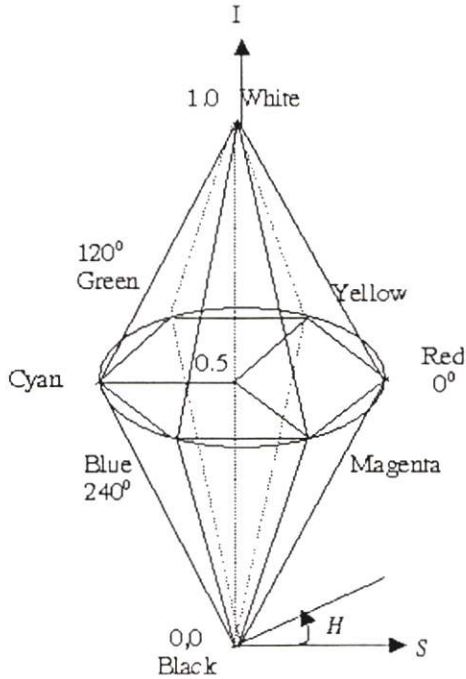
รูปที่ 3.6 แบบจำลองสี RGB

3.3.2 แบบจำลองสี HSI

ค่าสี (Hue) ความอิ่มสี (Saturation) และความเข้มสี (Intensity) เป็นคุณสมบัติหนึ่งที่จะนำมาใช้ในการแสดงสี ซึ่งเป็นแบบจำลองสีที่สื่อความหมายในการรับรู้ของมนุษย์ได้ดีกว่าแบบจำลองสี RGB

แบบจำลองสี HSI สามารถนำมาแสดงในระบบพิกัดปริภูมิสีด้วยพิกัดทรงกรวย ได้ดังรูปที่

3.7



รูปที่ 3.7 แบบจำลองสี HSI

H ใช้แสดงสีต้นซึ่งสีต่างๆ ถูกนำมาจัดด้วยการสร้างเป็นวงล้อสี โดยกำหนดค่าสีด้วยค่ามุมซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา โดยที่ $H=0$ คือค่าสีแดง $H=120$ คือค่าสีเขียว $H=240$ คือค่าสีน้ำเงิน เป็นต้น

S ใช้กำหนดความอิ่มสี เป็นระดับความสดหรือความหมองที่เกิดขึ้นจากการผสมกันระหว่างสีที่อยู่ตรงข้ามในวงล้อสี โดยระดับสีที่สดที่สุดคือสีที่ไม่ถูกนำมาผสมเลย $S=1$ และระดับสีที่หมองที่สุดคือสีที่ถูกผสมกันในอัตราส่วนครึ่งต่อครึ่งระหว่างสีที่อยู่ตรงข้ามกันในวงล้อสี $S=0$

I ใช้กำหนดความมืดหรือความสว่างของสี โดยระดับที่สว่างที่สุดของทุกสีคือสีขาว $I=1$ และระดับที่มืดที่สุดของทุกสีคือสีดำ $I=0$

ในการแปลงค่าสีจากแบบจำลองสี RGB เป็นแบบจำลองสี HSI สามารถทำได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (3.9)$$

$$S = 1 - \frac{3 \min(R, G, B)}{R + G + B} \quad (3.10)$$

$$H = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right] \quad (3.11)$$

เมื่อค่า B มากกว่าค่า G จะกำหนดให้ $H = 360 - H$

และในการแปลงค่าสีจากแบบจำลองสี HSI เป็นแบบจำลองสี RGB สามารถทำได้โดยแยกกรณีตามค่า H ดังต่อไปนี้

กรณีที่ $0^\circ \leq H < 120^\circ$

$$R = \frac{I}{\sqrt{3}} \left[1 + \frac{S \cos(H)}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (3.12)$$

$$G = \sqrt{3}I - R - B \quad (3.13)$$

$$B = \frac{I}{\sqrt{3}}(1 - S) \quad (3.14)$$

กรณีที่ $120^\circ \leq H < 240^\circ$

$$R = \frac{I}{\sqrt{3}}(1 - S) \quad (3.15)$$

$$G = \frac{I}{\sqrt{3}} \left[1 + \frac{S \cos(H - 120^\circ)}{\cos(180^\circ - H)} \right] \quad (3.16)$$

$$B = \sqrt{3}I - R - G \quad (3.17)$$

กรณีที่ $240^\circ \leq H < 360^\circ$

$$R = \sqrt{3}I - G - B \quad (3.18)$$

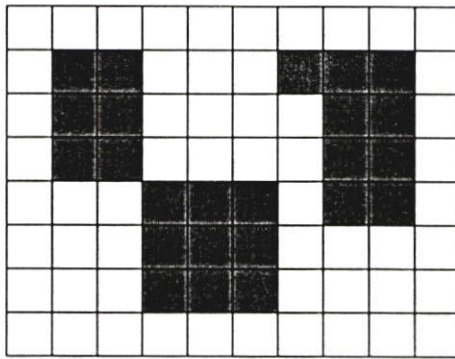
$$G = \frac{I}{\sqrt{3}}(1 - S) \quad (3.19)$$

$$B = \frac{I}{\sqrt{3}} \left[1 + \frac{S \cos(H - 240^\circ)}{\cos(300^\circ - H)} \right] \quad (3.20)$$

3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบที่เชื่อมต่อกันของภาพ (Connected Components)

(Lohmann. 1998)

ในภาพๆ หนึ่งอาจจะมียังองค์ประกอบหรือวัตถุอยู่วัตถุเดียวหรือมากกว่าหนึ่งวัตถุขึ้นไป โดยในแต่ละวัตถุอาจจะอยู่ในตำแหน่งที่ต่อเนื่องกัน ซ้อนทับกัน หรือแยกออกจากกัน ซึ่งในภาพที่เป็นแบบไบนารีจะมีการพิจารณาการเชื่อมต่อของวัตถุโดยพิจารณาจากพิกเซลที่เป็นส่วนของวัตถุกับพิกเซลรอบข้าง (Neighborhoods) ว่ามีการเชื่อมต่อกันหรือไม่ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ทั้งใน 4 ทิศทาง (4-connected Neighborhoods) หรือใน 8 ทิศทาง (8-connected Neighborhoods) ซึ่งถ้าพิกเซลที่เป็นส่วนของวัตถุมีการเชื่อมต่อกันจะถือว่าเป็นวัตถุเดียวกัน แต่ถ้าพิกเซลที่เป็นส่วนของวัตถุแยกออกจากกันหรือไม่เชื่อมต่อกันจะกำหนดให้เป็นวัตถุที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 องค์ประกอบของภาพ

จากรูปที่ 3.8 นั้นกำหนดให้พิกเซลสีขาวเป็นส่วนของพื้นหลัง และพิกเซลสีดำเป็นส่วนของวัตถุ เมื่อนำภาพมาวิเคราะห์องค์ประกอบที่เชื่อมต่อกันของภาพทำให้สามารถระบุหมายเลข (Labeling of Connected Components) ให้กับองค์ประกอบของภาพได้ดังรูปที่ 3.9

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	3	3	3	0
0	1	1	0	0	0	0	3	3	0
0	1	1	0	0	0	0	3	3	0
0	0	0	2	2	2	0	3	3	0
0	0	0	2	2	2	0	0	0	0
0	0	0	2	2	2	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

รูปที่ 3.9 การระบุหมายเลขให้กับองค์ประกอบของภาพโดยพิจารณาใน 4 ทิศทาง

จากรูปที่ 3.9 เป็นผลการระบุหมายเลขให้กับองค์ประกอบของภาพ ซึ่งภาพจะประกอบไปด้วย 4 องค์ประกอบด้วยกัน โดยหมายเลข 0 แสดงส่วนของพื้นหลัง หมายเลข 1 แสดงวัตถุที่หนึ่ง หมายเลข 2 แสดงวัตถุที่สอง และหมายเลข 3 แสดงวัตถุที่สามของภาพ ซึ่งจากผลที่ได้ข้างต้นเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบที่เชื่อมต่อกันของภาพโดยใช้ 4 ทิศทาง แต่ถ้าเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ 8 ทิศทาง จะทำให้ภาพข้างต้นประกอบไปด้วย 2 วัตถุเท่านั้น นั่นคือวัตถุที่หนึ่งและวัตถุที่สองเป็นวัตถุที่เชื่อมต่อกันในแนวทแยงจึงถือว่าเป็นวัตถุเดียวกัน

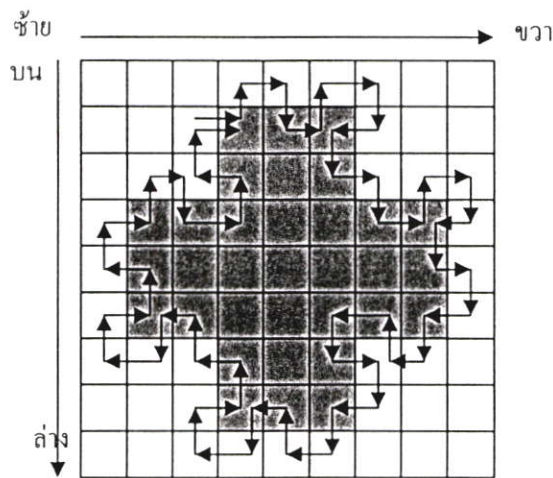
3.5 การติดตามเส้นขอบ (Contour Following) (ลัทธิชัย บุษหมั่น. 2540)

การติดตามเส้นขอบเป็นการติดตามรอยขอบของวัตถุในภาพ ซึ่งเป็นการได้ไล่ไปตามขอบโดยใช้ความแตกต่างของสีจุดภาพระหว่างวัตถุกับพื้นหลัง ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววิธีการนี้จะใช้กับภาพไบนารีเช่น แทนจุดภาพดำเป็นส่วนของวัตถุ และแทนจุดภาพขาวเป็นส่วนของพื้นหลัง ดังนั้นในการทำงานจะตรวจกวาดไปทุกๆ จุดภาพ โดยเริ่มจากจุดภาพแรกที่มุมซ้ายบนของภาพ และตรวจกวาดไปในทิศทางจากซ้ายไปขวาและเลื่อนจากบนลงล่าง เมื่อตรวจกวาดมาพบจุดภาพดำจุดแรกซึ่งเป็นส่วนของวัตถุ จะเปลี่ยนลักษณะการเคลื่อนที่ไปยังจุดภาพถัดไปใหม่ โดยมีเงื่อนไขการเคลื่อนที่ดังต่อไปนี้

กรณีจุดภาพปัจจุบันเป็นจุดภาพของวัตถุ ให้เลี้ยวซ้ายแล้วเคลื่อนตรงไปยังจุดภาพข้างหน้าถัดไป

กรณีจุดภาพปัจจุบันเป็นจุดภาพของพื้นหลัง ให้เลี้ยวขวาแล้วเคลื่อนตรงไปยังจุดภาพข้างหน้าถัดไป

ทำการเคลื่อนที่จุดภาพที่พิจารณาเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าจุดปัจจุบันเป็นจุดเดียวกันกับจุดที่เริ่มต้นของวัตถุ วิธีการหาขอบเขตของภาพสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วิธีการติดตามเส้นขอบ

3.6 การหมุนภาพ

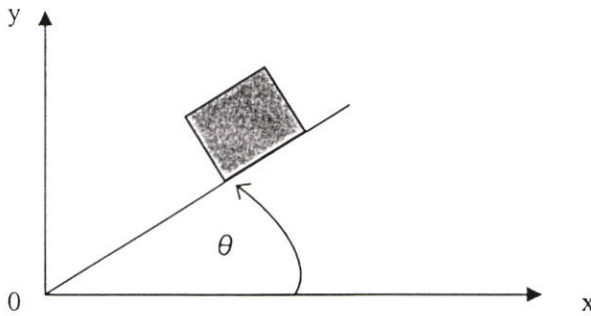
การหมุนภาพเป็นกระบวนการในการเปลี่ยนแปลงภาพอย่างหนึ่ง ซึ่งจะต้องมีการกำหนดจุดหมุนของวัตถุในภาพ หลังจากที่ว่าวัตถุถูกหมุนไปแล้ว ระยะห่างระหว่างจุดหมุนกับภาพจะยังคงมีค่าเท่าเดิม และรูปร่างลักษณะของภาพก็ยังคงเหมือนเดิมเช่นกัน แต่วัตถุจะมีการจัดวางที่ต่างไปจากเดิมซึ่งได้มาจากการหมุนนั่นเอง ในการหมุนจะสามารถหมุนได้ 2 แบบคือ หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา และหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา การบอกขนาดของมุมมีข้อตกลงว่า ถ้าหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาจะแสดงขนาดของมุมด้วยจำนวนบวก แต่ถ้าหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาจะแสดงขนาดของมุมด้วยจำนวนลบ

จุดพิกัดใหม่ (x_2, y_2) ของวัตถุที่ได้จากการหมุนจากจุดพิกัดเดิม (x_1, y_1) ด้วยมุม θ สามารถทำได้ดังสมการต่อไปนี้

$$x_2 = x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta \quad (3.21)$$

$$y_2 = y_1 \cos \theta + x_1 \sin \theta \quad (3.22)$$

จากรูปที่ 3.11 จะเป็นการหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา ถ้าจะหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาจะใช้ $-\theta$ แทน



รูปที่ 3.11 การหมุนภาพ

3.7 การประมาณค่าในช่วงจุดภาพด้วยเส้นโค้ง (ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2544)

ในการปรับปรุงแก้ไขการกระจายตำแหน่งจุดภาพของขอบวัตถุที่ไม่เหมาะสม สามารถใช้สไปลน์ฟังก์ชัน (Spline Function) มาช่วยแก้ไขการเชื่อมต่อระหว่างจุดภาพได้ ซึ่งผลที่ได้จากการเชื่อมต่อของสไปลน์ฟังก์ชันจะทำให้ลักษณะการกระจายในภาพรวมเข้าใกล้ความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของเส้นโค้งแทนจุดภาพที่กระจายของขอบวัตถุ

3.7.1 การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น

เป็นการสร้างฟังก์ชันในการเชื่อมจุดภาพโดยการใช้เส้นตรง (Linear Spline) ซึ่งเป็นการทำที่ง่ายและสะดวกที่สุด ในการเชื่อมจุดด้วยฟังก์ชันเส้นตรงทั้งหมด $n+1$ จุด จะต้องสร้างฟังก์ชันเส้นตรงทั้งหมด n ฟังก์ชัน ดังรูปแบบสมการต่อไปนี้

$$f_1(x) = f(x_0) + m_1(x-x_0) \quad x_0 \leq x \leq x_1 \quad (3.23)$$

$$f_2(x) = f(x_1) + m_2(x-x_1) \quad x_1 \leq x \leq x_2$$

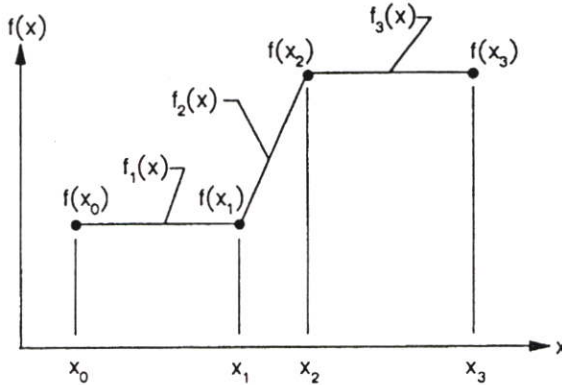
$$f_3(x) = f(x_2) + m_3(x-x_2) \quad x_2 \leq x \leq x_3$$

⋮
⋮
⋮

$$f_n(x) = f(x_{n-1}) + m_n(x-x_{n-1}) \quad x_{n-1} \leq x \leq x_n$$

$$m_i = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.24)$$

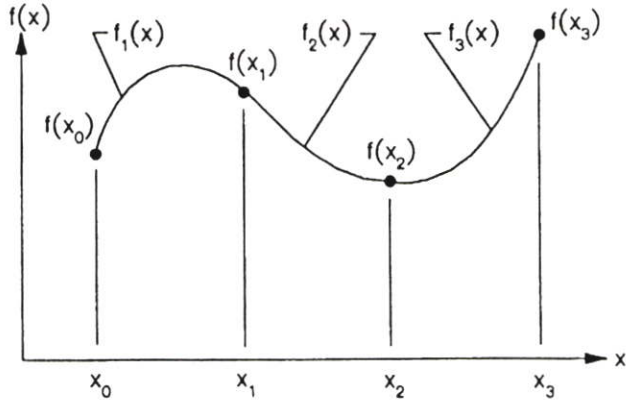
โดย m จะแทนค่าความชันของฟังก์ชันเส้นตรง



รูปที่ 3.12 การประมาณค่าในช่วงโดยการใช้ฟังก์ชันเส้นตรง

3.7.2 การประมาณค่าในช่วงกำลังสอง

เป็นการสร้างฟังก์ชันเพื่อเชื่อมต่อจุดภาพ โดยการใช้เส้นโค้งกำลังสอง (Quadratic Spline) ในการเชื่อมจุดด้วยฟังก์ชันเส้นโค้งกำลังสอง $n+1$ จุด จะต้องสร้างฟังก์ชันกำลังสองทั้งหมด n ฟังก์ชัน ดังรูปแบบสมการต่อไปนี้



รูปที่ 3.13 การประมาณค่าในช่วงโดยใช้ฟังก์ชันกำลังสอง

3.7.3 การประมาณค่าในช่วงกำลังสาม

เป็นการสร้างฟังก์ชันเพื่อเชื่อมต่อจุดภาพโดยใช้เส้นโค้งกำลังสาม (Cubic Spline) การใช้เส้นโค้งกำลังสามจะมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งกำลังสอง นั่นคือในช่วงระหว่างจุดภาพ 2 จุดที่กำหนดไว้ นั้นเส้นโค้งกำลังสามสามารถมีลักษณะการกระจายแบบเว้าเข้าและเว้าออกที่ต่อเนื่องกันในช่วงระหว่างจุด 2 จุดที่กำหนดไว้ได้ ในการเชื่อมจุดด้วยเส้นโค้งทั้งหมด $n+1$ จุดจะต้องสร้างฟังก์ชันกำลังสามทั้งหมด n ฟังก์ชัน ดังรูปแบบสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 f_1(x) &= a_1x^3 + b_1x^2 + c_1x + d_1 & x_0 \leq x \leq x_1 & \quad (3.27) \\
 f_2(x) &= a_2x^3 + b_2x^2 + c_2x + d_2 & x_1 \leq x \leq x_2 & \\
 f_3(x) &= a_3x^3 + b_3x^2 + c_3x + d_3 & x_2 \leq x \leq x_3 & \\
 &\vdots & & \\
 &\vdots & & \\
 f_n(x) &= a_nx^3 + b_nx^2 + c_nx + d_n & x_{n-1} \leq x \leq x_n &
 \end{aligned}$$

ค่า a_i, b_i, c_i, d_i โดย $i = 1, 2, 3, \dots, n$ เป็นค่าคงที่ที่จะต้องหาค่า ซึ่งจะมีทั้งหมด $4n$ ค่า ดังนั้นทำให้เกิดระบบสมการซึ่งประกอบด้วยสมการย่อย $4n$ สมการ เพื่อนำไปหาค่าคงที่ดังกล่าว ดังรูปแบบต่อไปนี้

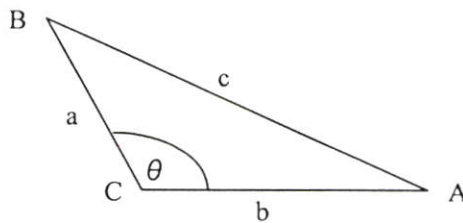
2. แอ็ปพริอ็อกซิเมชันสไปลน์ (Approximation Spline) เป็นการสร้างเส้นโค้งโดยการประมาณที่เหมาะสมซึ่งเส้นโค้งที่ได้จะไม่ผ่านจุดอ้างอิง แต่บางครั้งในกรณีที่ไม่ใช่รูปปิดสามารถทำให้ผ่านจุดอ้างอิงที่จุดเริ่มต้นและจุดปลายได้ แอ็ปพริอ็อกซิเมชันสไปลน์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แอ็ปพริอ็อกซิเมชันสไปลน์

3.8 กฎของโคไซน์ (The Law of Cosines)

ในความสัมพันธ์ของด้านและมุมของรูปสามเหลี่ยมใดๆ สามารถแสดงได้ด้วยกฎของโคไซน์ ดังตัวอย่างของรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 3.17 นั้น a , b และ c เป็นด้านของสามเหลี่ยม ABC โดย θ เป็นมุมตรงข้ามกับด้าน c จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ของกฎโคไซน์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos\theta \quad (3.29)$$

3.9 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงปกติ (จรัญ จันทลักขณา และอนันต์ชัย เขื่อนธรรม. 2529)

ในการอธิบายถึงกลุ่มข้อมูลนั้นจะประกอบไปด้วยคุณสมบัติ 2 อย่างคือ แนวกลาง และการกระจายของข้อมูล ซึ่งจะทำให้ผู้ที่ศึกษาสามารถเข้าใจเกี่ยวกับข้อมูลกลุ่มนั้นได้ โดยทั่วไปวิธีวัดแนวกลางของข้อมูลควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือ แนวกลางจะเป็นศูนย์กลางของการแจกแจง ไม่เบนไปข้างใดข้างหนึ่ง สามารถแสดงข้อมูลทั้งหมดอย่างทั่วถึงเพียงพอ ใช้สื่อความหมายได้

และเป็นประโยชน์ในการเปรียบเทียบข้อมูล ซึ่งวิธีวัดเนวกลางของข้อมูลมีหลายวิธีเช่น ค่าเฉลี่ย (Mean) ฐานนิยม (Mode) ค่ามัธยฐาน (Median) เป็นต้น โดยวิธีวัดเนวกลางข้อมูลที่ใช้กันทั่วไปคือค่าเฉลี่ย ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

3.9.1 ค่าเฉลี่ย

ค่าเฉลี่ยคือผลรวมของค่าข้อมูลทุกค่าหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด ค่าเฉลี่ยเป็นค่าปานกลางของทุกค่าในข้อมูล นั่นคือความสูงต่ำของแต่ละค่าถูกเฉลี่ยลงหรือขึ้นให้เสมอกัน ซึ่งค่าเฉลี่ยจะมีสมการในการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3.30)$$

โดย \bar{X} แทนค่าเฉลี่ย

X_i แทนค่าข้อมูลลำดับที่ i

i แทนลำดับข้อมูล โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$

n แทนจำนวนข้อมูล

3.9.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นการวัดการกระจายของข้อมูล ซึ่งเป็นการวัดระยะห่างของค่าข้อมูลแต่ละค่าจากค่าเฉลี่ย ทำให้สามารถศึกษาได้ถึงความแตกต่างหรือการกระจายของค่าในกลุ่มข้อมูล ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3.31)$$

โดย σ แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

\bar{X} แทนค่าเฉลี่ย

X_i แทนค่าข้อมูลลำดับที่ i

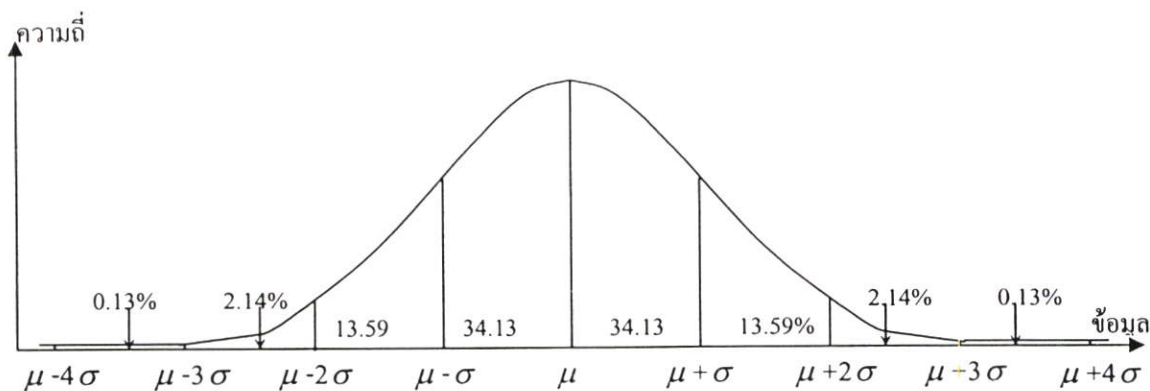
i แทนลำดับข้อมูล โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$

n แทนจำนวนข้อมูล

3.9.3 การแจกแจงปกติ (Normal Distribution)

ข้อมูลที่มีลักษณะการแจกแจงเป็นแบบปกติคือเมื่อมีการแสดงข้อมูลเป็นแบบกราฟจะได้เส้นโค้งรูประฆังคว่ำ ซึ่งการแจกแจงปกติเป็นเส้นโค้งที่สามารถกำหนดได้โดยค่าคงที่ 2 ค่าคือค่าเฉลี่ย (μ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ซึ่งส่วนสูงสุดของเส้นโค้งจะอยู่ตรงกลางซึ่งเป็น

ค่าเฉลี่ยของข้อมูล ส่วนด้านซ้ายและด้านขวาของเส้นโค้งจะสมมาตรหรือเท่ากัน โดยคุณสมบัติเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงปกติ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.18 คุณสมบัติ μ และ σ ของการแจกแจงปกติ

1. ข้อมูลที่มีค่าอยู่ระหว่าง $\mu - \sigma$ ถึง $\mu + \sigma$ คิดเป็นจำนวนอย่างน้อยร้อยละ 68 ของจำนวนทั้งหมด
2. ข้อมูลที่มีค่าอยู่ระหว่าง $\mu - 2\sigma$ ถึง $\mu + 2\sigma$ คิดเป็นจำนวนอย่างน้อยร้อยละ 95 ของจำนวนทั้งหมด
3. ข้อมูลที่มีค่าอยู่ระหว่าง $\mu - 3\sigma$ ถึง $\mu + 3\sigma$ คิดเป็นจำนวนอย่างน้อยร้อยละ 99 ของจำนวนทั้งหมด

ซึ่งในการแสดงกราฟการแจกแจงปกติของข้อมูลสามารถใช้สมการของเกาส์เซียน (Gaussian) ดังต่อไปนี้

$$p(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.32)$$

โดย X แทนข้อมูล

$p(X)$ แทนความถี่ของข้อมูล

e แทนค่า 2.7183

3.10 สหสัมพันธ์ (ล้วน สายยศ และอังคณา สายยศ. 2540)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้มาจากสิ่งๆ เดียวกัน สามารถแสดงได้โดยใช้กราฟที่เรียกว่าสแคตเตอร์ไดอะแกรม (Scatter Diagram) และสามารถแสดงค่าความสัมพันธ์

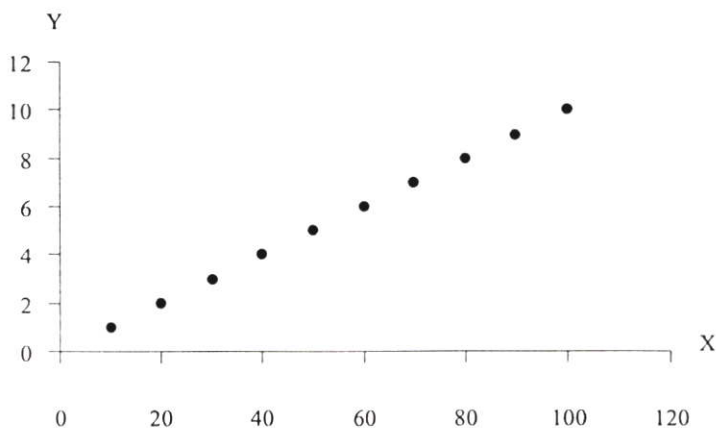
ระหว่างข้อมูลได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.10.1 การแปลสหสัมพันธ์จากกราฟ

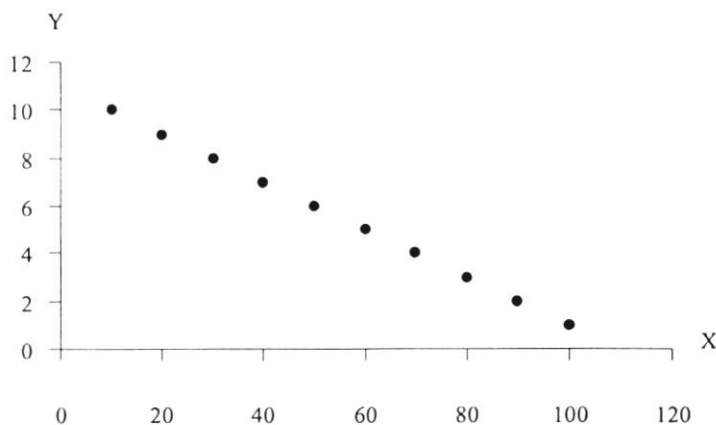
ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากกราฟนี้ทำให้เห็นแนวโน้มความสัมพันธ์หรือจุดร่วมระหว่างข้อมูลเป็นลักษณะต่างๆ ทำให้คาดคะเนได้ว่าข้อมูลคู่หนึ่งสัมพันธ์กันอย่างไร และสัมพันธ์กันในทิศทางใด ซึ่งความสัมพันธ์ของกราฟสามารถแบ่งออกเป็นลักษณะต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

3.10.1.1 ข้อมูลสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือแบบไปทางบวก (Positive) เช่นถ้าค่า X มาก ค่า Y จะมากด้วย เป็นต้น ซึ่งเป็นลักษณะข้อมูลที่มีค่าเคลื่อนตามกันทำให้จุดร่วมของข้อมูล X และ Y เป็นเส้นตรงเริ่มจากค่าต่ำไปหาค่าสูง จึงทำให้เกิดความสัมพันธ์อย่างสมบูรณ์ไปทางบวก และอีกประเภทคือแบบไปทางลบ (Negative) เช่นถ้าค่า X มาก ค่า Y จะน้อย เป็นต้น ซึ่งเป็นลักษณะข้อมูลที่เป็นความสัมพันธ์กลับไม่เคลื่อนตามกัน จึงทำให้เกิดความสัมพันธ์อย่างสมบูรณ์ไปทางลบ



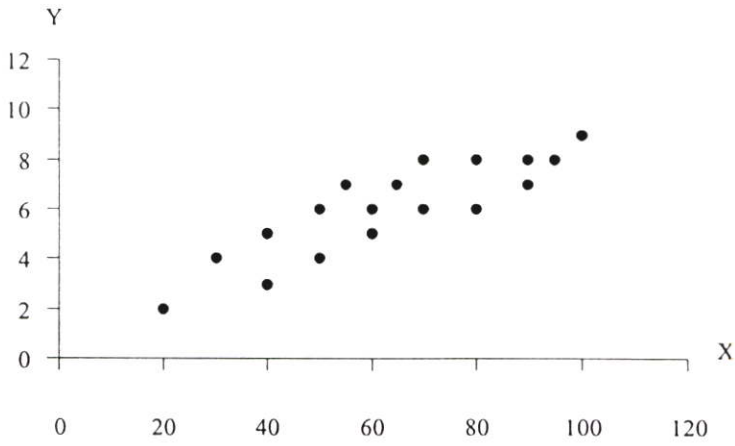
รูปที่ 3.19 กราฟแสดงสหสัมพันธ์อย่างสมบูรณ์เป็นไปทางบวก



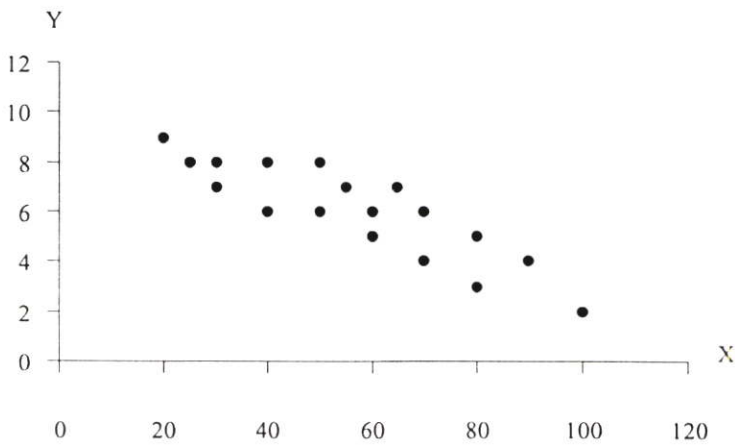
รูปที่ 3.20 กราฟแสดงสหสัมพันธ์อย่างสมบูรณ์เป็นไปทางลบ

3.10.1.2 ข้อมูลสัมพันธ์กันสูงแต่ไม่สมบูรณ์

ข้อมูลลักษณะนี้มีค่าของข้อมูลทั้งสองจะคล้อยตามกันแต่ไม่ถึงกับเป็นเส้นตรง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทเช่นกันคือแบบไปทางบวกและแบบไปทางลบ



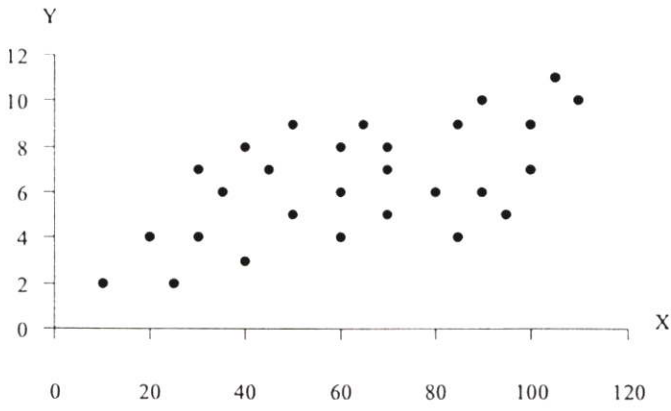
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงสหสัมพันธ์ค่อนข้างสูงเป็นไปทางบวก



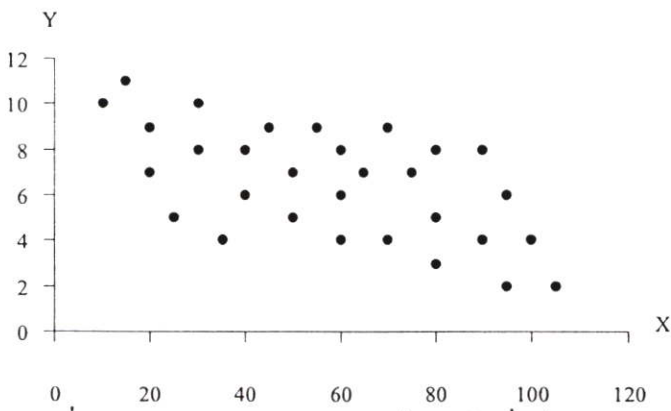
รูปที่ 3.22 กราฟแสดงสหสัมพันธ์ค่อนข้างสูงเป็นไปทางลบ

3.10.1.3 ข้อมูลสัมพันธ์กันต่ำ

ข้อมูลลักษณะนี้มีค่าของข้อมูลทั้งสองจะคล้อยตามกันน้อย สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทเช่นกันคือแบบไปทางบวกและแบบไปทางลบ



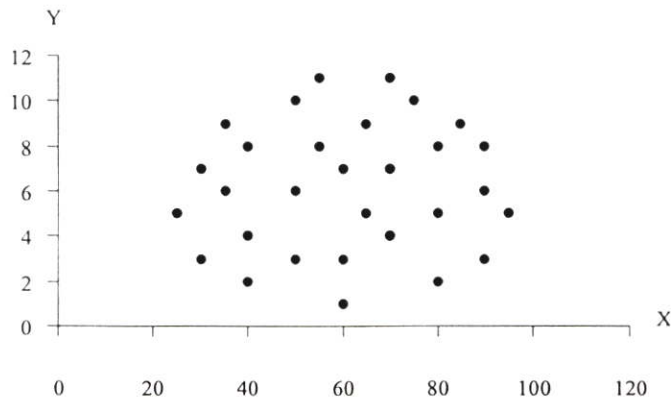
รูปที่ 3.23 กราฟแสดงสหสัมพันธ์ก่อนข้างต่ำเป็นไปทางบวก



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงสหสัมพันธ์ก่อนข้างต่ำเป็นไปทางลบ

3.10.1.4 ข้อมูลสัมพันธ์เป็นศูนย์

ข้อมูลลักษณะนี้มีค่าของข้อมูลไม่เกี่ยวกับเลขคือกระจายไปทั่วจนเป็นรูปวงกลม



รูปที่ 3.25 กราฟแสดงสหสัมพันธ์เป็นศูนย์

3.10.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) จะทำให้เห็นว่าข้อมูล X และ Y มีความสัมพันธ์กันเท่าใด โดยสมการที่จะนำมาใช้ในการคำนวณจะเป็นสมการที่สามารถนำข้อมูลดิบมาใช้ในการคำนวณได้โดยง่ายดังต่อไปนี้

$$r = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{(N \sum X^2 - (\sum X)^2)(N \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \quad (3.33)$$

โดย N แทนจำนวนข้อมูล

$\sum X$ แทนผลรวมทั้งหมดของข้อมูล X

$\sum Y$ แทนผลรวมทั้งหมดของข้อมูล Y

$\sum X^2$ แทนผลรวมทั้งหมดของข้อมูล X แต่ละตัวยกกำลังสอง

$\sum Y^2$ แทนผลรวมทั้งหมดของข้อมูล Y แต่ละตัวยกกำลังสอง

$\sum XY$ แทนผลรวมทั้งหมดของข้อมูล X และ Y คูณกันแต่ละคู่

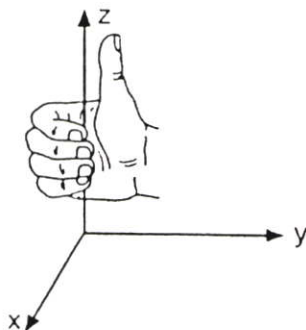
3.11 ระบบพิกัดฉากในปริภูมิ 3 มิติ (Rectangular Coordinate in Three Dimension)

(Stein and Barcellos. 1992)

3.11.1 การกำหนดแกนพิกัด

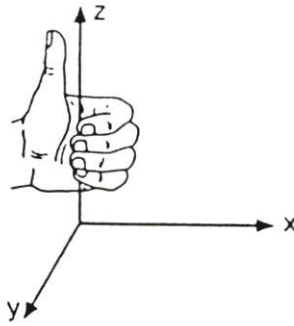
ในการกำหนดแกนพิกัดของระบบพิกัดฉาก 3 มิตินั้น สามารถกำหนดโดยแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบคือ

3.11.1.1 ระบบมือขวา (Right-handed System)



รูปที่ 3.26 การกำหนดแกนพิกัดฉาก 3 มิติโดยระบบมือขวา

3.11.1.2 ระบบมือซ้าย (Left-handed System)



รูปที่ 3.27 การกำหนดแกนพิกัดฉาก 3 มิติโดยระบบมือซ้าย

3.11.2 ระนาบพิกัดฉาก (Rectangular Coordinate Planes)

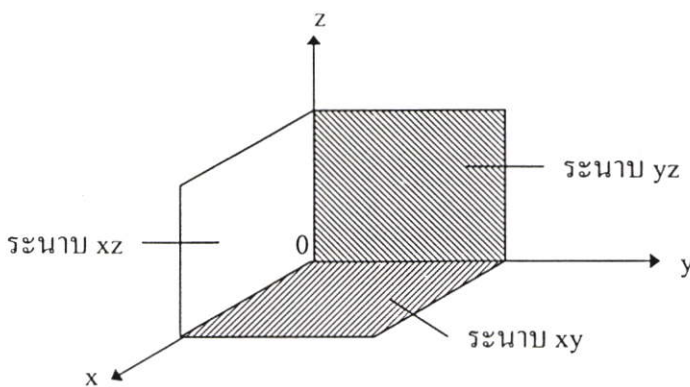
ในปริภูมิ 3 มิติ (Three Dimension) พิกัดของจุดหมายถึงระยะห่างจากระนาบ 3 ระนาบซึ่งต่างตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตัดกันที่จุดหนึ่งที่เรียกว่าจุดกำเนิด (Origin) ส่วนเส้นตรงทั้ง 3 เส้นที่ตั้งฉากกันเรียกว่า แกน X แกน Y และแกน Z โดยแต่ละแกนมีพิกัดบอกระยะห่างเท่าๆ กัน แกน X แกน Y และแกน Z ที่ตัดกันทำให้เกิดระนาบ 3 ระนาบเรียกว่าระนาบพิกัดฉาก โดย

ระนาบ XY มีแกน X และแกน Y อยู่ในระนาบ

ระนาบ YZ มีแกน Y และแกน Z อยู่ในระนาบ

ระนาบ XZ มีแกน X และแกน Z อยู่ในระนาบ

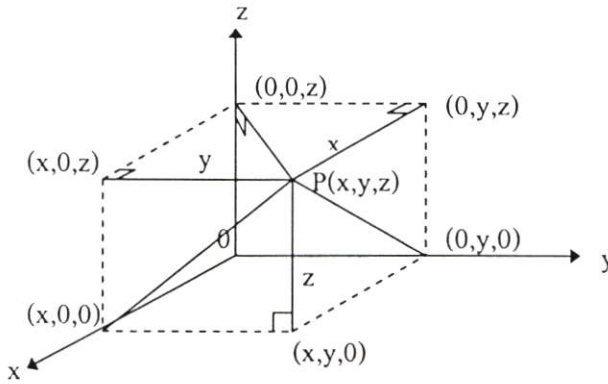
สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ระนาบของปริภูมิ 3 มิติ

3.11.3 จุดพิกัด

ในการแสดงค่าพิกัดของจุดใดๆ ในปริภูมิ 3 มิติ สามารถแสดงได้ดังตัวอย่างรูปที่ 3.29



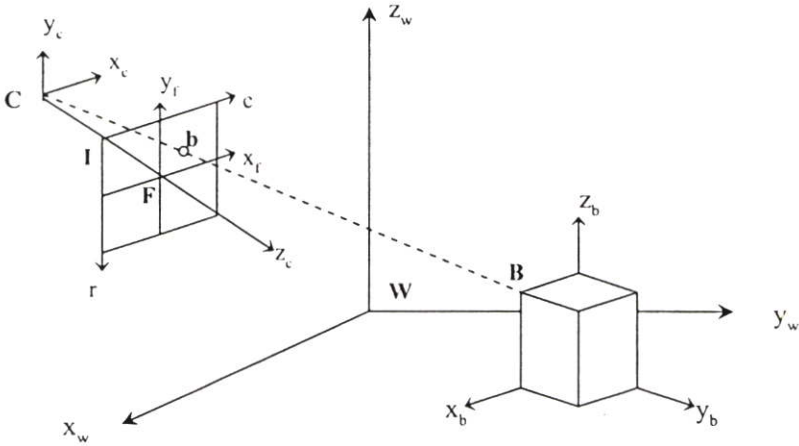
รูปที่ 3.29 ตำแหน่งพิกัดของจุดใดๆ ในปริภูมิ 3 มิติ

จากรูปที่ 3.29 ถ้าจุด P เป็นจุดใดๆ ในปริภูมิ 3 มิติ เมื่อลากเส้นตรงจากจุด P ให้ตั้งฉากกับระนาบพิกัดทั้งสามดังรูป ระยะห่างจากระนาบ YZ ถึงจุด P ซึ่งขนานกับแกน X เรียกว่า พิกัดแรก (X -coordinate) ของจุด P จะมีค่าเป็นบวกเมื่อจุด P อยู่ทางด้าน Ox ของระนาบ YZ และจะมีค่าลบเมื่อจุด P อยู่ฝั่งตรงข้าม เรียก Ox ว่าแกน X ทางบวก ในทำนองเดียวกันพิกัดที่สอง (Y -coordinate) หมายถึงระยะห่างจากระนาบ XZ ถึงจุด P ซึ่งขนานกับแกน Y และพิกัดที่สาม (Z -coordinate) หมายถึงระยะห่างจากระนาบ XY ถึงจุด P ซึ่งขนานกับแกน Z ซึ่งพิกัดทั้งสามของจุด P จะเขียนแทนด้วย (x, y, z) เรียกว่าพิกัดฉาก (Rectangular Coordinate) ของจุด P

จุดทุกจุดในปริภูมิ 3 มิติจะมีพิกัดฉาก (x, y, z) เพียงพิกัดเดียวที่แทนจุดนั้น และในทางกลับกันทุกพิกัดฉาก (x, y, z) เมื่อ x , y และ z เป็นจำนวนจริง จะแทนจุดในปริภูมิ 3 มิติได้เพียงจุดเดียวเช่นกัน ด้วยวิธีการกำหนดพิกัดของจุดดังกล่าว ทำให้สามารถจับคู่หนึ่งต่อหนึ่งระหว่างจุดในปริภูมิ 3 มิติกับพิกัด (x, y, z) เมื่อ x , y และ z เป็นจำนวนจริงได้

3.12 ประเภทกรอบพิกัด (Coordinate Frame) (Babis, 2004)

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุในเชิง 3 มิติกับระนาบภาพในเชิง 2 มิติ นั้นจะต้องมีกรอบพิกัดต่างๆ ที่นำมาใช้ในการพิจารณาโดยยกตัวอย่างดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 ประเภทของกรอบพิกัด

3.12.1 กรอบพิกัดวัตถุ (Object Coordinate Frame)

กรอบพิกัดวัตถุเป็นระบบพิกัดในเชิง 3 มิติ จากรูปที่ 3.30 จะระบุโดยใช้แกน x_b, y_b, z_b ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการแสดงแบบจำลองของวัตถุทั้งในงานทางด้านคอมพิวเตอร์กราฟฟิกและคอมพิวเตอร์วิชัน โดยจะใช้ในการตรวจสอบหรือวิเคราะห์กับจุดต่างๆ ที่อยู่บนวัตถุโดยตรง ซึ่งพิกัดของวัตถุที่อ้างอิงด้วยกรอบพิกัดวัตถุจะไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าวัตถุจะถูกหมุนหรือเคลื่อนย้ายตำแหน่งไป เช่นจุด B ที่วัตถุจะมีพิกัด $(x_b, 0, z_b)$ เป็นต้น

3.12.2 กรอบพิกัดโลก (World Coordinate Frame)

กรอบพิกัดโลกเป็นระบบพิกัดในเชิง 3 มิติ จากรูปที่ 3.30 จะระบุโดยใช้แกน x_w, y_w, z_w ซึ่งเป็นฉากที่ไว้สำหรับแสดงวัตถุ หรือใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุต่างๆ หรือใช้ในการอ้างอิงการเปลี่ยนแปลงของวัตถุ เช่น การหมุน การเปลี่ยนตำแหน่ง เป็นต้น โดยอ้างอิงตำแหน่งเดิมและตำแหน่งที่เปลี่ยนไปจากระบบพิกัดโลก

3.12.3 กรอบพิกัดกล้อง (Camera Coordinate Frame)

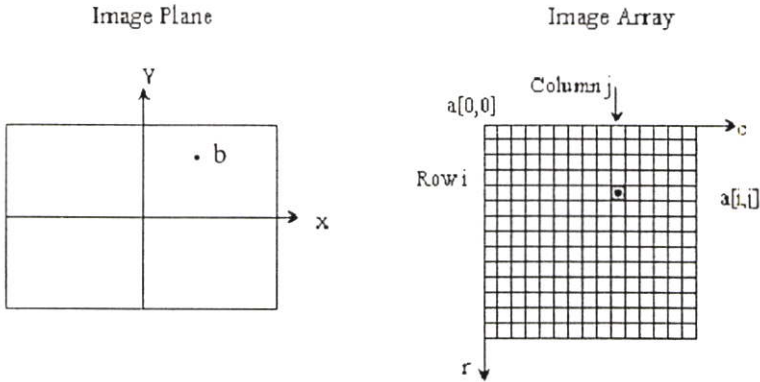
กรอบพิกัดกล้องเป็นระบบพิกัดในเชิง 3 มิติ จากรูปที่ 3.30 จะระบุโดยใช้แกน x_c, y_c, z_c ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการแสดงวัตถุที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของกล้อง

3.12.4 กรอบพิกัดระนาบภาพ (Image Plane Coordinate Frame)

กรอบพิกัดระนาบภาพเป็นระบบพิกัดในเชิง 2 มิติ จากรูปที่ 3.30 จะระบุโดยใช้แกน x_f, y_f ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการแสดงพิกัดของวัตถุที่ถูกฉายมายังระนาบภาพ เช่นจากรูปจุด B ของวัตถุจะถูกฉายมายังระนาบภาพที่จุด b เป็นต้น

3.12.5 กรอบพิกัดพิกเซล (Pixel Coordinate Frame)

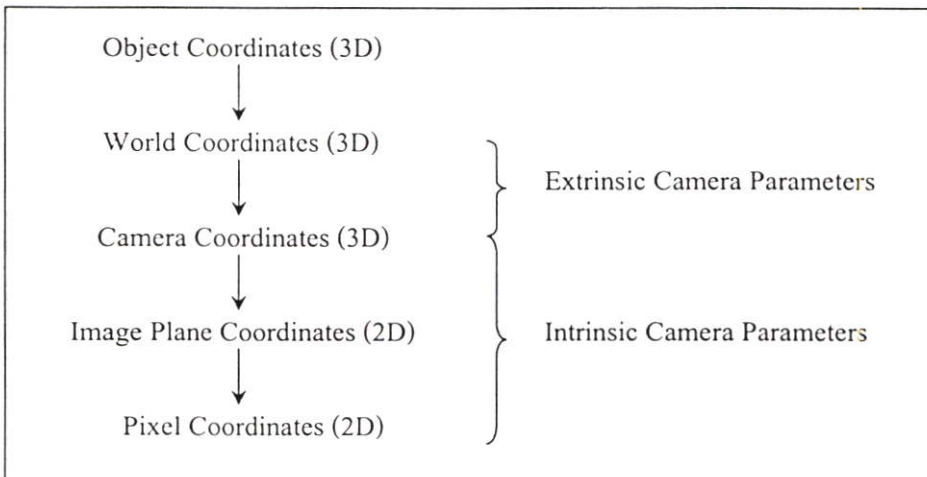
กรอบพิกัดพิกเซลเป็นระบบพิกัดในเชิง 2 มิติ จากรูปที่ 3.30 จะระบุโดยใช้แกน r, c แต่ละพิกเซลในกรอบพิกัดนี้จะถูกนำมาใช้แสดงพิกัดของวัตถุจากระนาบภาพมาเป็นรูปแบบพิกัดของพิกเซล เช่นจุด b บนระนาบภาพจะเป็นจุด $a[i,j]$ บนกรอบพิกัดพิกเซล นั่นคือจะอยู่ในตำแหน่งแถว (Row) ที่ i และคอลัมน์ (Column) ที่ j เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 การแสดงพิกัดจุดบนกรอบพิกัดพิกเซล

จากประเภทของกรอบพิกัดต่างๆ จะมีลำดับความสัมพันธ์ในการแปลงกรอบพิกัดดังรูปที่

3.32



รูปที่ 3.32 ลำดับความสัมพันธ์ในการแปลงกรอบพิกัด

จากรูปที่ 3.32 ในการแปลงกรอบพิกัดจะทำให้เกิดตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะนำไปอธิบายในหัวข้อต่อไป

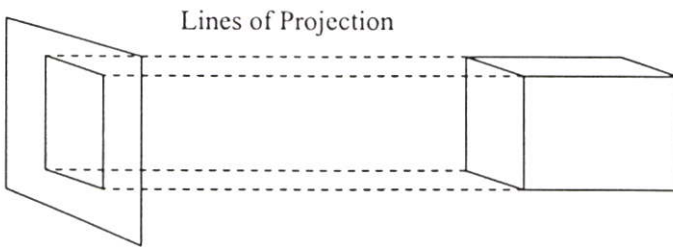
3.13 การฉายภาพ (Projection)

การฉายภาพเป็นวิธีในการแสดงวัตถุจากในเชิง 3 มิติมาอยู่บนระนาบภาพในเชิง 2 มิติ ซึ่งเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของวัตถุในเชิง 3 มิติแล้วจะประกอบด้วยความยาว ความกว้าง และความหนา โดยสามารถแสดงได้ด้วยแกน X แกน Y และแกน Z แต่เมื่อถูกฉายมาอยู่บนระนาบภาพทำให้เป็นการลดแกนพิสัยในการแสดงภาพของวัตถุเหลือ 2 แกน วิธีการฉายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ

3.13.1 การฉายภาพแบบขนาน (Parallel Projection)

วิธีการฉายภาพแบบขนานนั้นเส้นของการฉายภาพ (Lines of Projection) จะลากขนานจากจุดยอดของวัตถุในทุกๆ จุดมายังบนระนาบภาพ โดยจุดตัดที่เกิดจากเส้นของการฉายภาพจากจุดยอดของวัตถุกับระนาบภาพจะเป็นจุดของการฉายภาพ ซึ่งเมื่อลากเส้นเชื่อมระหว่างจุดของการฉายภาพทั้งหมด จะทำให้ได้ภาพของการฉายภาพแบบขนานของวัตถุบนระนาบภาพ

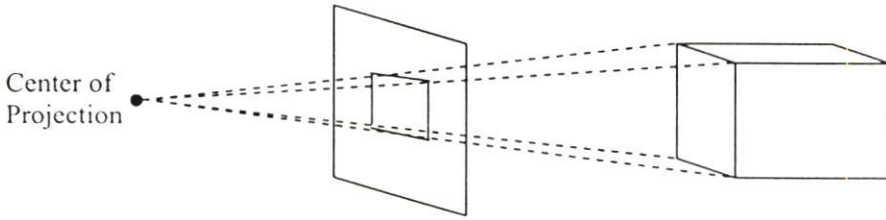
ในการฉายภาพแบบขนานนี้มีแนวความคิดมาจากการมองวัตถุในระยะไกลๆ และเมื่อมีการเคลื่อนวัตถุเข้าออกในแนวแกน Z จะไม่ค่อยมีผลกระทบต่อขนาดของวัตถุที่มองเห็น หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าในแนวแกน Z จะไม่มีผลต่อค่าของวัตถุในแนวแกน X และแกน Y ทำให้จุดตัดของการฉายภาพบนระนาบภาพมีค่าในแนวแกน X และแกน Y เท่ากับค่าของจุดยอดของวัตถุในแนวแกน X และแกน Y นั่นคือความยาวโฟกัสเข้าใกล้ระยะอนันต์ (Infinity) ทำให้จุด x บนระนาบภาพเท่ากับจุด X ของวัตถุ และจุด y บนระนาบภาพเท่ากับจุด Y ของวัตถุ โดยไม่คำนึงถึงแกน Z



รูปที่ 3.33 การฉายภาพแบบขนาน

3.13.2 การฉายภาพแบบเพอสเปคทีฟ (Perspective Projection)

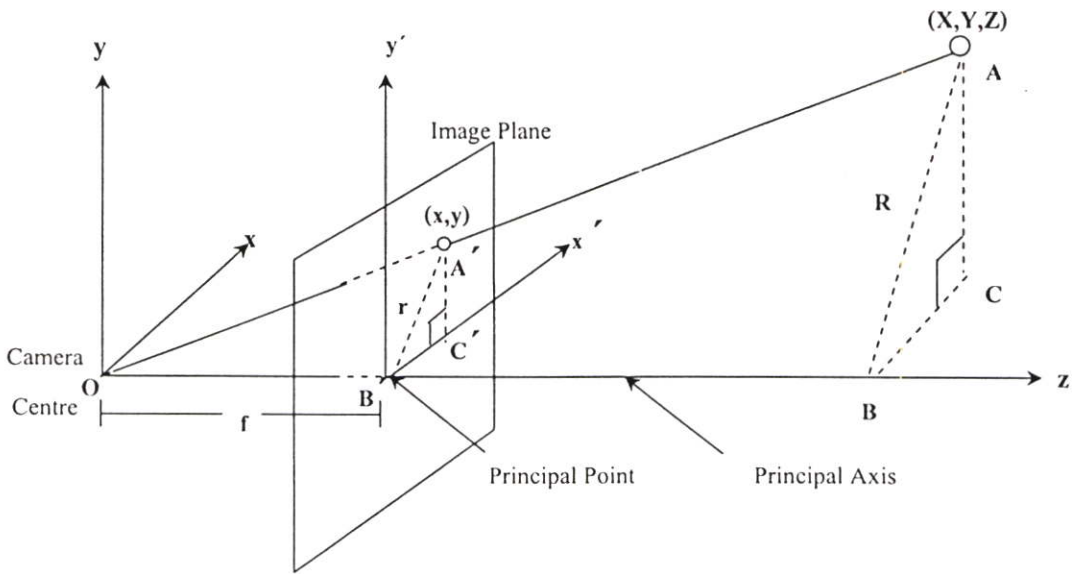
วิธีการฉายภาพแบบเพอสเปคทีฟนั้นเส้นของการฉายภาพจากจุดยอดของวัตถุในทุกๆ จุดจะมารวมกันที่จุดๆ หนึ่ง โดยเรียกจุดนั้นว่าจุดศูนย์กลางของการฉายภาพ (Center of Projection) ซึ่งภาพของวัตถุที่ได้บนระนาบภาพจะมีขนาดขึ้นอยู่กับตำแหน่งของผู้มองหรือจุดศูนย์กลางของการฉายภาพและระยะห่างของวัตถุ



รูปที่ 3.34 การฉายภาพแบบเพอสเปคตีฟ

3.14 สมการการฉายภาพแบบเพอสเปคตีฟ (Babis. 2004)

การบันทึกภาพของวัตถุด้วยกล้องนั้น กล้องจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพิกัดวัตถุจากพิกัดโลกในเชิง 3 มิติมาอยู่ในพิกัดภาพในเชิง 2 มิติ ซึ่งในการบันทึกภาพนั้นจะประกอบด้วยระนาบภาพที่เป็นตัวรับภาพ แต่ในความเป็นจริงนั้นระนาบภาพจะต้องอยู่หลังจุดศูนย์กลางของการฉายภาพหรือจุดกลางกล้อง (Camera Centre) แต่เพื่อหลีกเลี่ยงการกลับหัวของภาพที่จะเกิดขึ้น จึงได้นำเอาระนาบภาพมาไว้ที่ด้านหน้าจุดกลางกล้อง



รูปที่ 3.35 รูปแบบการบันทึกภาพ

ในการพิจารณาในส่วนของกล้องนั้นจะสนใจที่จุด O ซึ่งเป็นจุดกลางกล้อง และเป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัดกล้อง เส้นที่ลากจากจุดกลางกล้องมาตั้งฉากกับระนาบภาพคือแกนพริซิเพิล (Principal Axis หรือ Optical Axis) ระยะ f คือความยาวโฟกัส (Focal Length) ซึ่งอยู่บนแกนพริซิเพิลและเป็นระยะระหว่างจุดกลางกล้องมายังระนาบภาพ จุดที่เกิดจากการตัดกันของแกนพริซิเพิลกับระนาบภาพคือจุดพริซิเพิล (Principal Point) ซึ่งจุดพริซิเพิลอาจไม่ได้อยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางของระนาบภาพก็ได้

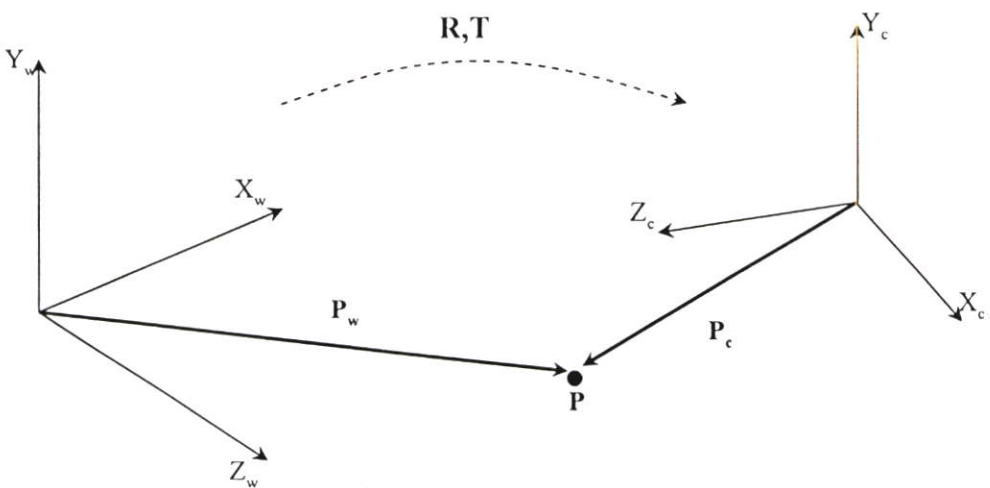
จากรูปที่ 3.35 เป็นการฉายภาพแบบเพอสเปคตีฟของจุด (X,Y,Z) มายังระนาบภาพโดยตกที่จุด (x,y) ซึ่งจากคุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายนั้น จากสามเหลี่ยม OAB กับ $OA'B'$ ทำให้ได้ $\frac{f}{Z} = \frac{r}{R}$ และจากสามเหลี่ยม ABC กับ $A'B'C'$ ทำให้ได้ $\frac{x}{X} = \frac{y}{Y} = \frac{r}{R}$ จึงได้สมการการฉายภาพแบบเพอสเปคตีฟเป็นดังนี้

$$x = \frac{Xf}{Z}, \quad y = \frac{Yf}{Z}, \quad z = f \quad (3.34)$$

ซึ่งจุดที่อยู่ในแนวเดียวกันกับจุด (X,Y,Z) ก็จะถูกฉายมายังระนาบภาพโดยตกที่จุด (x,y) เดียวกัน

3.15 ตัวแปรภายนอกกล้อง (Extrinsic Camera Parameters) (Babis. 2004 ; Bouquet. 2005)

โดยทั่วไปแล้วระบบพิกัดโลกและระบบพิกัดกล้องจะไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกันจึงต้องมีการแปลงให้กรอบพิกัดโลกมาอยู่ในทิศทางและตำแหน่งเดียวกันกับกรอบพิกัดกล้อง โดยจะใช้ตัวแปรภายนอกกล้องซึ่งประกอบไปด้วยเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง (Translation Vector) และเมทริกซ์การหมุน (Rotation Matrix) โดยเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งจะหาเพื่อย้ายตำแหน่งจุดกำเนิดของกรอบพิกัดโลกมาอยู่ตำแหน่งเดียวกันกับจุดกำเนิดของกรอบพิกัดกล้อง และเมทริกซ์การหมุนจะหาเพื่อหมุนให้แกนทั้งสามของกรอบพิกัดโลกมาอยู่ในทิศทางเดียวกันกับแกนของกรอบพิกัดกล้อง



รูปที่ 3.36 ความสัมพันธ์ของจุด P ในกรอบพิกัดโลกและกรอบพิกัดกล้อง

จากรูปจะสามารถใช้ตัวแปรภายนอกกล้องในการหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของจุด P ในระบบพิกัดโลกคือ P_w และในระบบพิกัดกล้องคือ P_c ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันดังสมการต่อไปนี้

$$P_c = RP_w + T \quad (3.35)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

โดย R แทนเมทริกซ์การหมุน

T แทนเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง

3.16 ตัวแปรภายในกล้อง (Intrinsic Camera Parameters) (Hartley and Zisserman, 2003 ; Bouguet, 2005)

ตัวแปรภายในกล้องเป็นตัวแปรที่แสดงถึงคุณลักษณะต่างๆ ภายในกล้อง ซึ่งตัวแปรที่นำมาใช้ในการพิจารณามีดังนี้คือ ความยาวโฟกัส พิกัดจุดพริ้นซิเพิล ค่าการเบี่ยงเบน (Skew Factor) และสัมประสิทธิ์ความบิดเบี้ยว (Distortion Coefficients)

3.16.1 ความยาวโฟกัส

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าความยาวโฟกัสเป็นระยะจากจุดกลางกล้องมาตั้งฉากกับระนาบภาพซึ่งในการนำมาคำนวณนั้นจะต้องเปลี่ยนระยะความยาวให้อยู่ในหน่วยของพิกเซล โดยค่าคงที่ที่นำมาใช้ในการแปลงนี้คือค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) ซึ่งเป็นจำนวนพิกเซลในหนึ่งหน่วยความยาว เพราะเนื่องจากซีซีดีในกล้องเป็นอุปกรณ์รับภาพ (Photo-sensor) ทำหน้าที่ในการบันทึกภาพของวัตถุ โดยจะเปลี่ยนพลังงานแสง (Light Energy) มาอยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้าต่อเนื่อง (Continuous Electric Signal หรือ Video Signal) ซีซีดีจะมีลักษณะเป็นตารางสี่เหลี่ยม (Grid) ซึ่งในการผลิตซีซีดีจะมีขนาดเล็กหรือกำหนดให้ระนาบซีซีดีมีขนาด $n \times m$ ในหน่วยความยาวเช่น มิลลิเมตร ส่วนภาพที่ได้ถูกเก็บในเชิง 2 มิติบนระนาบภาพที่มีขนาด $N \times M$ ในหน่วยความยาวพิกเซล โดยทั้ง 2 แกนอาจมีขนาดความยาวไม่เท่ากัน ซึ่ง $n \neq N$ และ $m \neq M$ ทำให้ในจุดเดียวกันนั้นมีพิกัดที่อยู่บนระนาบซีซีดีกับพิกัดที่อยู่บนระนาบภาพพิกเซลแตกต่างกัน ดังนั้นในการคำนวณจะต้องใช้ค่าสเกลแฟกเตอร์ทั้งในแนวแกน X และแกน Y มาคำนวณกับความยาวโฟกัสทำให้ได้ความยาวโฟกัสในหน่วยพิกเซลในแนวแกน X คือ f_x และในแนวแกน Y คือ f_y

3.16.2 พิกัดจุดพริ้นซิเพิล

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าจุดพริ้นซิเพิลเป็นจุดที่เกิดจากแกนพริ้นซิเพิลตัดกับระนาบภาพ ซึ่งอาจเป็นตำแหน่งที่ไม่อยู่ตรงกลางระนาบภาพก็ได้ โดยในการคำนวณจะต้องเปลี่ยนตำแหน่งจุดพริ้นซิเพิลให้อยู่ในรูปแบบตำแหน่งของหน่วยพิกเซลเช่นกัน ทำให้ได้จุดพริ้นซิเพิลในแนวแกน X คือ O_x และในแนวแกน Y คือ O_y

3.16.3 ค่าการเบี่ยงเบน

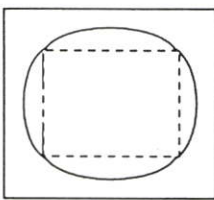
การเบี่ยงเบนของภาพจะเป็นการระบุเกี่ยวกับขนาดของมุมระหว่างแกนพิกเซลในแนวแกน X และแกน Y ซึ่งถ้ามีขนาดมุม 90 องศาหรือทำมุมตั้งฉากกันจะทำให้ค่าการเบี่ยงเบนของภาพเท่ากับศูนย์ ซึ่งในกล้องโดยทั่วไปจะมีค่าการเบี่ยงเบนของภาพเป็นศูนย์ การเบี่ยงเบนของภาพสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.37



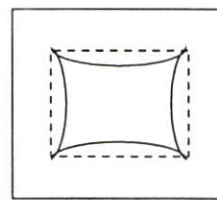
รูปที่ 3.37 การเบี่ยงเบนของภาพ

3.16.4 สัมประสิทธิ์ความบิดเบี้ยว

เนื่องจากการบันทึกภาพของกล้องนั้นจะต้องผ่านเลนส์ (Lens) ซึ่งภาพที่ได้อาจเกิดความบิดเบี้ยว (Lens Distortion) ดังแสดงในรูปที่ 3.38



Barrel Distortion



Pincushion Distortion

รูปที่ 3.38 ภาพที่เกิดผลกระทบจากเลนส์

ดังนั้นพิกัดที่เกิดการบิดเบี้ยวไปจะสามารถปรับประมาณค่าพิกัดกลับคืนได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\hat{x} = x_c + L(r)(x-x_c) \quad (3.38)$$

$$\hat{y} = y_c + L(r)(y-y_c) \quad (3.39)$$

โดย (x,y) แทนพิกัดที่เกิดความบิดเบี้ยวไป

(\hat{x}, \hat{y}) แทนพิกัดที่ได้จากการปรับค่า

(x_c, y_c) แทนพิกัดจุดกลางของรัศมีที่บิดเบี้ยว (Radial Distortion)

r แทนระยะรัศมี (Radial Distance) ที่บิดเบี้ยว โดยมีค่า $r = \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}$

$L(r)$ แทนฟังก์ชันความบิดเบี้ยว (Distortion Function) โดยใช้ค่ารัศมี r

3.17 การแปลงพิกัดของวัตถุในเชิง 3 มิติเป็นพิกัดบนระนาบภาพในเชิง 2 มิติ

(Bouguet. 2005)

การเทียบวัตถุคือการดำเนินการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกล้องในการถ่ายภาพกับวัตถุ ซึ่งผลที่ได้คือค่าตัวแปรภายในและภายนอกกล้องดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยจะนำไปใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของวัตถุจริงในเชิง 3 มิติกับพิกัดของวัตถุบนระนาบภาพในเชิง 2 มิติ ซึ่งในการแปลงพิกัดของวัตถุมาเป็นพิกัดบนระนาบภาพสามารถทำได้โดยเริ่มจากการแปลงจากพิกัดของวัตถุในระบบพิกัดโลกมาอยู่ในระบบพิกัดกล้องโดยใช้ตัวแปรภายนอกกล้องดังสมการต่อไปนี้

$$X_c = RX_w + T \quad (3.40)$$

โดย X_w แทนพิกัดวัตถุในระบบพิกัดโลก $[x_w \ y_w \ z_w]^T$

X_c แทนพิกัดวัตถุในระบบพิกัดกล้อง $[x_c \ y_c \ z_c]^T$

เมื่อได้พิกัดวัตถุในระบบพิกัดกล้องแล้วจะใช้ตัวแปรภายในกล้องในการแปลงให้มาอยู่ในระบบพิกัดพิกเซล โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$x_n = \begin{bmatrix} x_c / z_c \\ y_c / z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (3.42)$$

$$dx = \begin{bmatrix} 2kc_3xy + kc_4(r^2 + 2x^2) \\ kc_3(r^2 + 2y^2) + 2kc_4xy \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$\begin{bmatrix} x_{dx} \\ y_{dy} \end{bmatrix} = (1 + kc_1r^2 + kc_2r^4 + kc_5r^6)x_n + dx \quad (3.44)$$

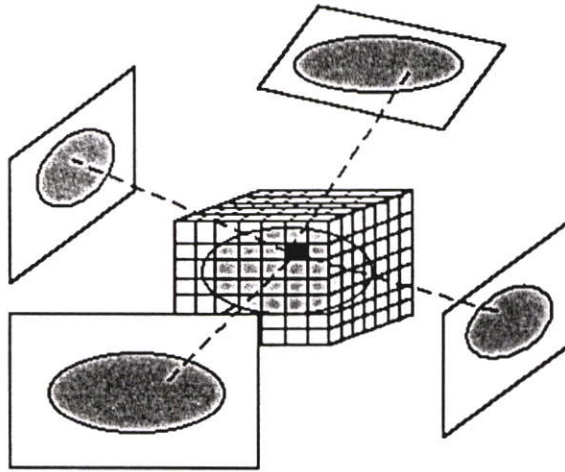
$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & Sf_x & O_x \\ 0 & f_y & O_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{dx} \\ y_{dy} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

- โดย x_n แทนพิกัดนอร์มอลไลซ์
 kc_{1-5} แทนสัมประสิทธิ์ความบิดเบี้ยวตัวที่ 1 ถึง 5
 x_{dx}, y_{dy} แทนพิกัดที่ได้ปรับแก้ความบิดเบี้ยวแล้วในแกน x และแกน y
 f_x, f_y แทนความยาวโฟกัสในแกน x และแกน y
 O_x, O_y แทนพิกัดจุดพริ้นซิเพิลในแกน x และแกน y
 S แทนค่าการเบี่ยงเบนของภาพ
 x_p, y_p แทนพิกัดวัตถุในระบบพิกัดพิกเซล

3.18 วิธีสเปสคาฟวิง (Space Carving Method) (Wada. et.al. 2000)

การที่กล้องทำการบันทึกภาพของวัตถุที่อยู่ในพิกัดเชิง 3 มิติมาอยู่บนระนาบภาพในพิกัดเชิง 2 มิติ นั้น จะเป็นการลดพิกัดออกไป 1 มิติ คือจะตัดแนวแกน Z ออกไป ดังนั้นในการนำภาพที่ได้จากการถ่ายวัตถุนั้นกลับมาสร้างเป็นวัตถุในเชิง 3 มิติ (3D Reconstruction) จึงต้องมีการเพิ่มพิกัดในแนวแกน Z ขึ้นมา และในการสร้างวัตถุเชิง 3 มิติให้สมจริงจากภาพถ่ายนั้นจะต้องคำนึงถึงรูปร่าง (Shape) และพื้นผิว (Texture) ของวัตถุด้วย ซึ่งในการสร้างวัตถุอาจเกิดปัญหาขึ้นถ้ามีบางส่วนของวัตถุที่ถูกบดบังทำให้วัตถุส่วนนั้นไม่ปรากฏอยู่ในมุมมองใดๆ เลย จะทำให้ในการสร้างวัตถุมีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง แต่ถ้ามีการถ่ายภาพในหลายๆ มุมมองของวัตถุมากขึ้น จะทำให้ส่วนวัตถุที่ถูกบดบังอยู่สามารถปรากฏในมุมมองอื่นๆ ได้ ทำให้ได้รูปร่างของวัตถุที่ใกล้เคียงกับวัตถุจริงมากขึ้น

สเปสคาฟวิงเป็นวิธีหนึ่งที่ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างวัตถุในเชิง 3 มิติจากภาพถ่ายหลายมุมมอง โดยในปริภูมิ 3 มิติสมมติจะกำหนดลูกบาศก์ขนาดใหญ่ที่มีขนาดเท่ากันทั้งสามแกน โดยให้มีปริมาตรครอบคลุมปริมาตรของวัตถุซึ่งลูกบาศก์ขนาดใหญ่นี้จะเกิดขึ้นจากลูกบาศก์หรือว็อกเซลย่อยๆ หลายอันประกอบกัน จากนั้นจะทำการโปรเจกต์แต่ละว็อกเซลไปยังภาพ ซึ่งถ้าว็อกเซลใดเมื่อโปรเจกต์แล้วไม่ได้้อยู่ภายในโครงร่าง 2 มิติของวัตถุเพียงแค่ภาพใดภาพหนึ่ง ก็จะถือว่าว็อกเซลนั้นไม่ใช่ส่วนของวัตถุและจะทำการตัดว็อกเซลนั้นออกไป ดังนั้นท้ายสุดจะเหลือแต่ว็อกเซลที่เป็นส่วนของวัตถุเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 3.39

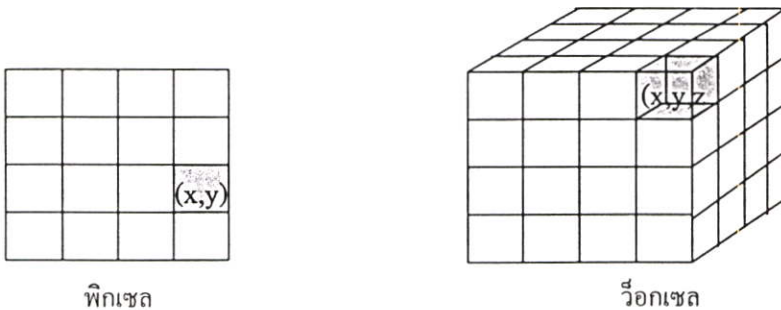


รูปที่ 3.39 รูปทรงวัตถุที่เกิดจากวิธีสเปคคาฟวิง

ซึ่งรูปทรงที่ได้ของวัตถุที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปทรงอย่างหยาบที่มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับวัตถุจริง โดยรูปทรงที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าวิซวลฮัลล์ (Visual Hull) ดังนั้นปริมาตรที่วัดได้จะเป็นการประมาณรูปทรงของวัตถุ ซึ่งรูปทรงที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใกล้เคียงกับวัตถุมากขึ้นถ้าได้ใช้จำนวนระนาบภาพมากขึ้น แต่ถึงจะใช้ระนาบภาพมากขึ้นรูปทรงวัตถุที่สร้างขึ้นจะคงยังไม่สมบูรณ์เหมือนวัตถุจริงนัก เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่สามารถสร้างรายละเอียดส่วนเว้าของพื้นผิวที่เกิดขึ้นทั้งหมดของวัตถุได้

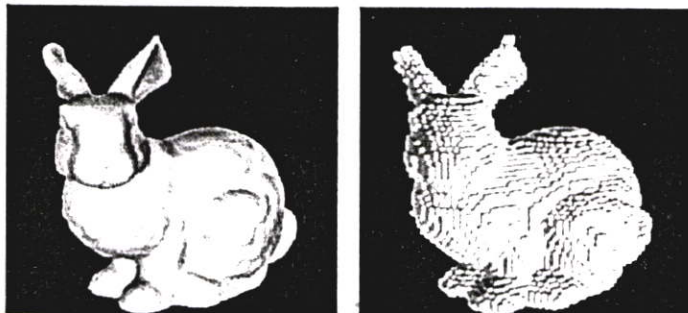
3.19 ว็อกเซลไลเซชัน (Voxelization) (Kaufman. et.al. 1993 ; Krishnamurthy. 2002)

ในระบบพิกัดระนาบ 2 มิติที่ใช้ในการแสดงภาพนั้น สามารถวัดขนาดของวัตถุในภาพได้ในเชิง 2 มิติคือ ความกว้าง และความยาว และหน่วยที่เล็กที่สุดที่อยู่บนระนาบ 2 มิติจะเรียกว่าพิกเซล ส่วนในระบบพิกัดปริภูมิ 3 มิติสามารถวัดปริมาตรของวัตถุในภาพได้ในเชิง 3 มิติคือ ความกว้าง ความยาว และความหนา ซึ่งหน่วยที่เล็กที่สุดที่ใช้ในการแสดงหน่วยของปริมาตร (Volume Element หรือ Volume Cell) ของวัตถุจะเรียกว่าว็อกเซล ดังแสดงในรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 การเปรียบเทียบระหว่างพิกเซลและว็อกเซล

ว็อกเซลไลเซชันเป็นการแบ่งวัตถุในเชิง 3 มิติออกเป็นว็อกเซลย่อยๆ ที่มีขนาดเท่ากันหรือแตกต่างกันก็ได้ ดังนั้นรูปทรงหรือปริมาตรของวัตถุในภาพเมื่อนำมาพิจารณาในเชิง 3 มิติจะเกิดขึ้นจากการประกอบกันของว็อกเซลย่อยๆ หลายว็อกเซลรวมกัน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.41

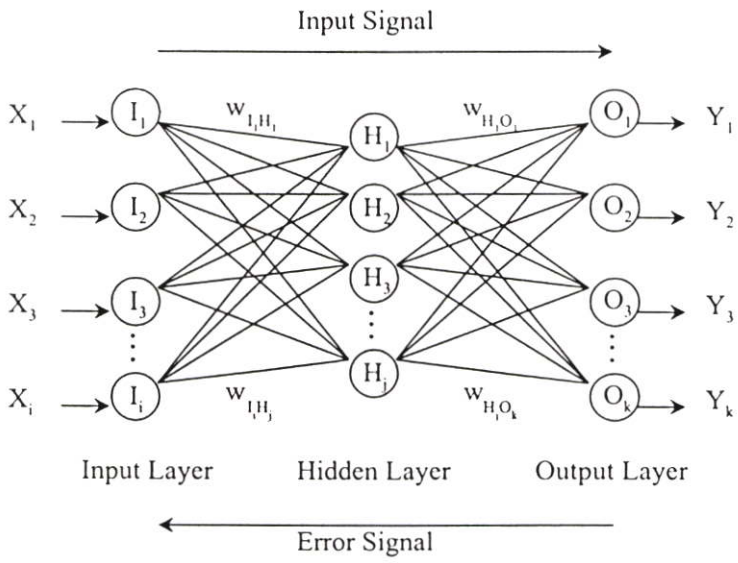


รูปที่ 3.41 การแสดงวัตถุในภาพด้วยว็อกเซล (Kim and Ree. 2002)

3.20 โครงข่ายประสาทเทียมแบบแบคพรอพพาเกชัน (Backpropagation Neural Network) (จินดารัตน์ จันทอุปพี. 2547)

โครงข่ายประสาทเทียมแบบแบคพรอพพาเกชันเป็นโครงข่ายที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการจัดกลุ่มของข้อมูล (Classification) หรือการรู้จำแพทเทิน (Pattern Recognition) เป็นต้น โดยโครงข่ายประสาทเทียมแบบแบคพรอพพาเกชันจะประกอบด้วยนิวรอนที่รวมกันโดยแบ่งออกเป็น 3 ชั้น (Layer) คือ ชั้นอินพุท (Input Layer) ชั้นฮิดเดน (Hidden Layer) และชั้นเอาต์พุท (Output Layer) ซึ่งนิวรอน ของแต่ละชั้นจะเชื่อมต่อถึงกันหมดโดยในแต่ละเส้นเชื่อมต่องจะมีน้ำหนัก (Weight) กำกับเพื่อบอกถึงความสำคัญของเส้นเชื่อมนั้น โดยนิวรอนในชั้นอินพุทจะมีจำนวนเท่ากับจำนวนค่าที่อยู่ในเวกเตอร์อินพุท ส่วนจำนวนนิวรอนในชั้นฮิดเดนจะไม่มีกำหนดหลักเกณฑ์ที่แน่นอน และจำนวนนิวรอนในชั้นเอาต์พุทจะเท่ากับจำนวนกลุ่มคำตอบที่ต้องการ

โครงข่ายประสาทเทียมแบบแบคพรอพพาเกชันเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบฟีดฟอร์เวิร์ด (Feedforward) คือทิศทางการไหลของข้อมูลจะไหลจากชั้นอินพุทผ่านชั้นฮิดเดนและไปยังชั้นเอาต์พุท โดยอาศัยหลักการเรียนรู้แบบย้อนกลับนั่นคือในการเรียนรู้จะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกแพทเทินอินพุทถูกส่งเข้าไปยังชั้นอินพุท จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งให้กับชั้นฮิดเดนทำการคำนวณ และส่งค่าที่ได้ไปยังชั้นเอาต์พุทจนได้คำตอบออกมา ส่วนในขั้นตอนที่ 2 เมื่อได้คำตอบออกมาจะนำมาเปรียบเทียบกับคำตอบจริง ถ้าคำตอบไม่ถูกต้องก็จะคำนวณค่าความผิดพลาดและทำการแพร่ย้อนกลับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไปยังชั้นเอาต์พุทและชั้นฮิดเดน และทำการปรับค่าน้ำหนักในชั้นฮิดเดนและชั้นเอาต์พุทเพื่อทำให้โครงข่ายสามารถให้คำตอบได้ใกล้เคียงกับคำตอบจริงมากที่สุด

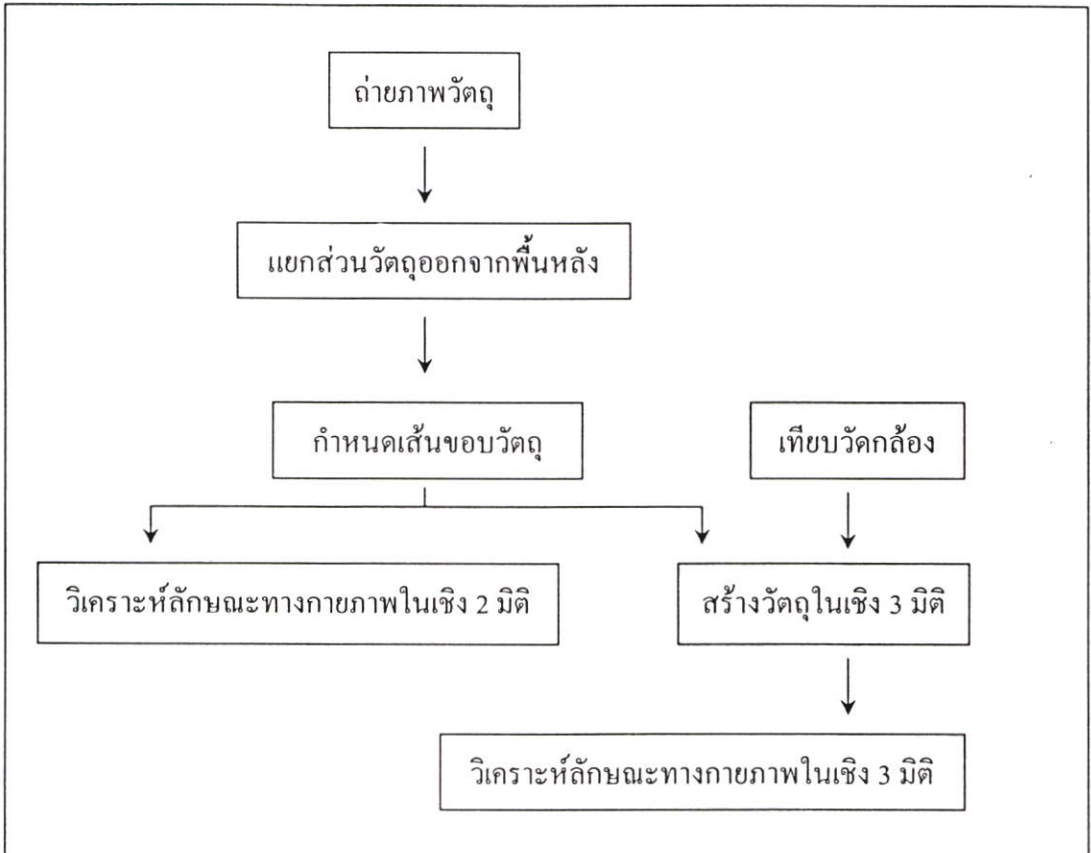


รูปที่ 3.42 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแบคพรอพพาเกชัน

บทที่ 4

กรรมวิธีที่นำเสนอ

วิธีในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพที่นำเสนอสามารถแสดงขั้นตอนได้ดังแผนภาพในรูปที่ 4.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพที่นำเสนอ

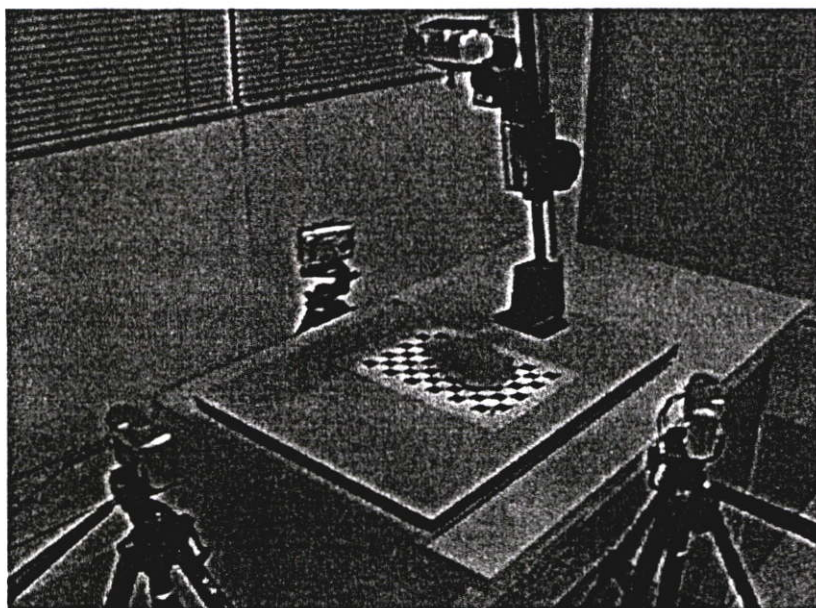
โดยแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การเก็บข้อมูลภาพมะม่วงตัวอย่าง

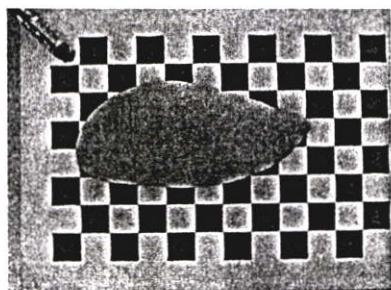
4.1.1 ภาพผลมะม่วง

ในการเก็บภาพผลมะม่วงนั้นจะทำการถ่ายภาพโดยใช้กล้องดิจิทัล โดยมะม่วง 1 ผลจะถ่ายภาพในหลายมุมมองที่แตกต่างกัน และเก็บอยู่ในรูปแบบสี RGB

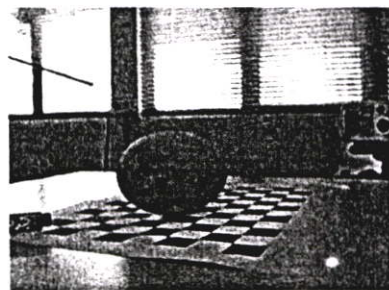
การติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเพื่อถ่ายภาพมะม่วงแสดงดังรูปที่ 4.2



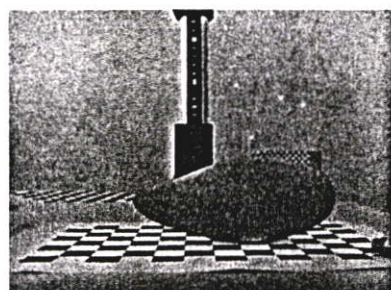
รูปที่ 4.2 การติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพมะม่วง



มุมมองด้านบน



มุมมองด้านข้างที่ 1



มุมมองด้านข้างที่ 2

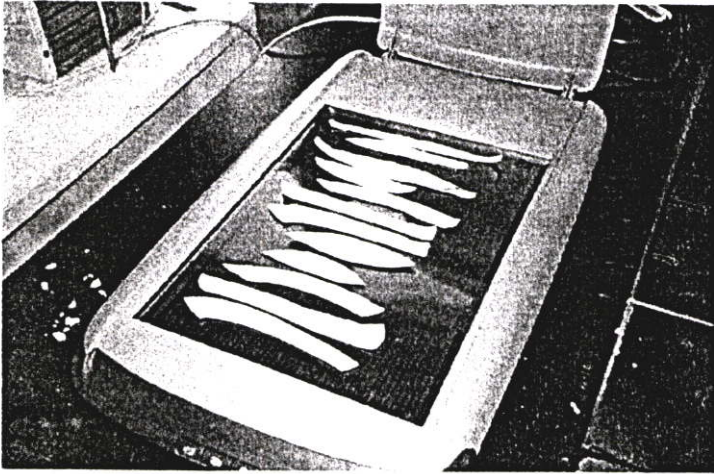


มุมมองด้านข้างที่ 3

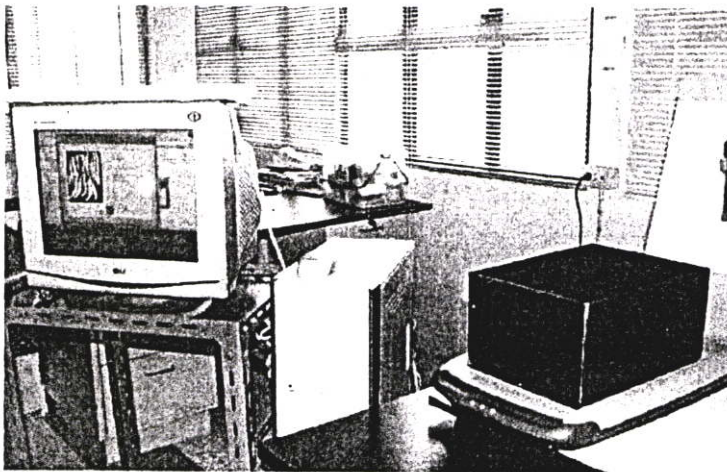
รูปที่ 4.3 ภาพมะม่วง 1 ผลใน 4 มุมภาพ

4.1.2 ภาพสแกนเปลือกมะม่วง

ในการเก็บภาพสแกนเปลือกมะม่วงนั้นจะทำการปอกเปลือกมะม่วงเพื่อนำเปลือกมาสแกน ซึ่งเก็บเป็นภาพแบบไบนารี ในการสแกนนั้นจะวางเปลือกมะม่วงลงบนแผ่นใสที่วางอยู่บนเครื่องสแกนเนอร์ และนำกล่องพลาสติกสีดำมาวางทับ จากนั้นจึงทำการสแกนเปลือก ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 เปลือกมะม่วง 1 ผลที่จะสแกน



รูปที่ 4.5 การสแกนเปลือกมะม่วง

ภาพที่ได้นั้นจะเป็นภาพแบบไบนารี โดยพื้นที่สีขาวเป็นส่วนของเปลือกมะม่วง และพื้นที่สีดำเป็นส่วนของพื้นหลัง ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ภาพสแกนเปลือกมะม่วง

4.2 การแยกส่วนของมะม่วงออกจากพื้นหลัง (Segmentation)

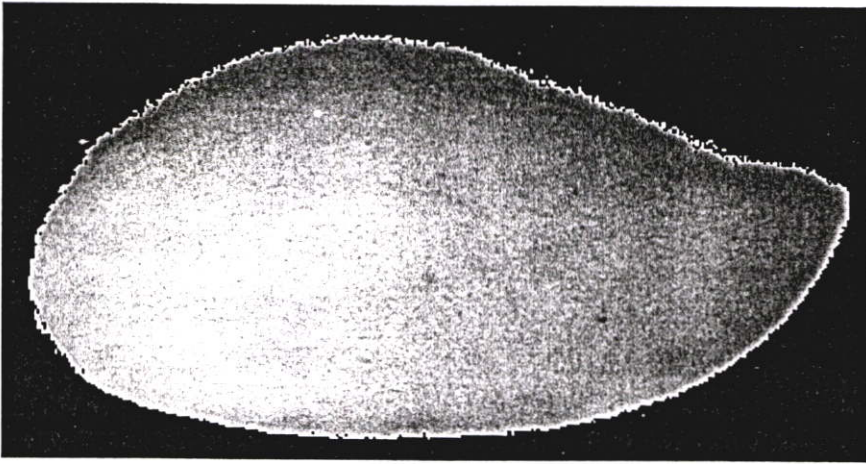
ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมะม่วงจะวิเคราะห์กับภาพถ่ายในหลายมุมมองดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นภาพผลมะม่วงที่มีพื้นหลังประกอบด้วยหลายกลุ่มสี ดังนั้นก่อนที่จะวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมะม่วงจึงจะต้องแยกส่วนของมะม่วงออกจากพื้นหลังเสียก่อนซึ่งมีวิธีในการดำเนินการดังต่อไปนี้

4.2.1 การสร้างแบบจำลองค่าฮิว (Hue) ของผลมะม่วง

การสร้างแบบจำลองค่าฮิวจะทำการสร้างให้กับแต่ละมุมมอง โดยการสุ่มภาพมะม่วงตัวอย่างออกมาจำนวนหนึ่ง ซึ่งเป็นภาพที่อยู่ในรูปแบบสี RGB จากนั้นจะแปลงค่าสีของภาพจาก RGB เป็นค่าฮิว เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองค่าฮิวเฉพาะในส่วนของผลมะม่วงของแต่ละมุมมอง ซึ่งแบบจำลองค่าฮิวจะอยู่ในรูปแบบของการแจกแจงแบบปกติ โดยจะบันทึกค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละแบบจำลองไว้ เพื่อนำมาใช้ในการพิจารณากับภาพทั้งหมดตามมุมมองนั้น

4.2.2 การแยกส่วนของมะม่วงออกจากพื้นหลังโดยพิจารณาแบบจำลองค่าฮิวของผล มะม่วง

ภาพมะม่วงที่มีรูปแบบสี RGB ทั้งหมดจะถูกแปลงออกมาเป็นค่าฮิว จากนั้นจะนำค่าฮิวที่ได้ของภาพมาพิจารณากับค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแบบจำลองค่าฮิวของผลมะม่วงที่สร้างขึ้นตามมูมภาพนั้น โดยพิกเซลใดที่มีค่าฮิวอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ก็จะมีค่าอยู่ระหว่าง $\mu - k\sigma$ ถึง $\mu + k\sigma$ จะถือว่าพิกเซลนั้นเป็นส่วนของมะม่วง ทำให้ได้ภาพส่วนของมะม่วงที่ถูกแยกออกจากพื้นหลัง ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ส่วนของมะม่วงที่ถูกแยกออกจากพื้นหลัง

ภาพที่ได้จะเป็นภาพส่วนของมะม่วงบนพื้นหลังสีดำ ซึ่งในส่วนพื้นหลังอาจจะยังมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น โดยใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบที่เชื่อมต่อกันของภาพมาพิจารณาถึงองค์ประกอบที่ใหญ่ที่สุดของภาพ ซึ่งจะเลือกองค์ประกอบที่ใหญ่ที่สุดของภาพให้เป็นส่วนของมะม่วง ทำให้สามารถกำจัดจุดภาพเล็กๆ ที่เกิดขึ้นบนพื้นหลังรอบๆ ส่วนของมะม่วงออกไปได้

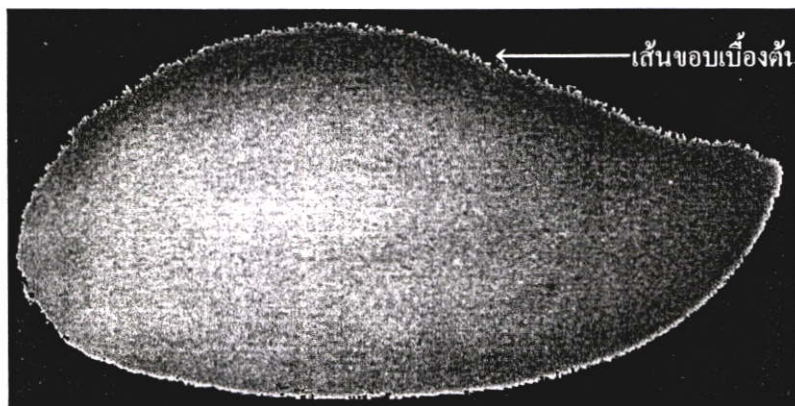
แต่เมื่อได้มีการสังเกตในส่วนของขอบมะม่วงในภาพจะเห็นว่า ขอบมะม่วงไม่ค่อยเรียบ เนื่องจากมีการกระจายของจุดภาพ ซึ่งอาจจะทำให้มีผลกระทบต่อการใช้งานในขั้นตอนต่อไป ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีการประมาณค่าในช่วงจุดภาพโดยใช้เส้นโค้งกำลังสามหรือเส้นสไปน์มาช่วยทำให้ขอบมะม่วงมีความคมชัดและเรียบมากขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

4.2.3 สไลด์ฟังกซ์ชัน

สไลด์ฟังกซ์ชันนั้นจะประกอบไปด้วยชั้นตอนย่อยๆ 3 ชั้นตอนดังนี้คือ

4.2.3.1 การกำหนดเส้นขอบเบื้องต้น

ในการกำหนดเส้นขอบเบื้องต้นจะใช้วิธีการติดตามเส้นขอบ ซึ่งจะทำได้เส้นขอบเบื้องต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8

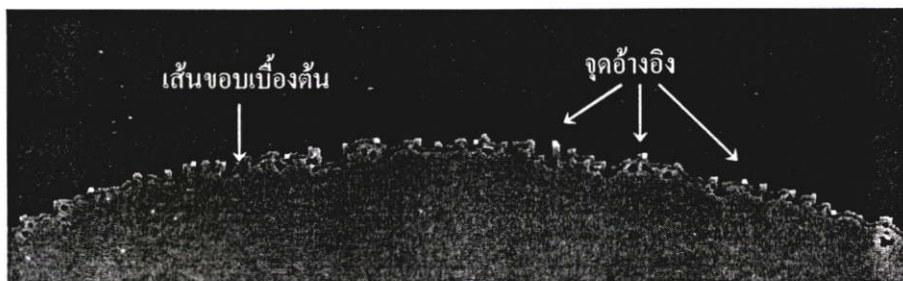


รูปที่ 4.8 เส้นขอบเบื้องต้นโดยวิธีการติดตามเส้นขอบ

จากรูปเส้นที่ได้แสดงจะเป็นเส้นขอบเบื้องต้น จากนั้นจะต้องมีการกำหนดจุดอ้างอิงบนเส้นขอบเบื้องต้นดังนี้

4.2.3.2 การกำหนดจุดอ้างอิง (Control Point)

เป็นการกำหนดจุดควบคุมเพื่อนำไปใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งให้กับสไลด์ฟังกซ์ชัน โดยจะกำหนดไล่ไปตามเส้นขอบเบื้องต้น ซึ่งแต่ละจุดจะห่างจากจุดถัดไปในจำนวนพิกเซลเท่าๆ กัน ทำให้ได้จุดอ้างอิงบนเส้นขอบเบื้องต้น แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 จุดอ้างอิงบนเส้นขอบเบื้องต้น

จากรูปเป็นบางส่วนของภาพโดยจุดที่ได้แสดงเป็นจุดอ้างอิงบนเส้นขอบเบื้องต้น ซึ่งในการทดลองจะกำหนดจุดอ้างอิงโดยเฉลี่ยประมาณ 30 จุดต่อ 1 ภาพ เมื่อได้จุดอ้างอิงแล้วนั้นจะนำตำแหน่งจุดอ้างอิงทั้งหมดไปดำเนินการด้วยสไลด์ฟังกซ์ชัน ดังต่อไปนี้

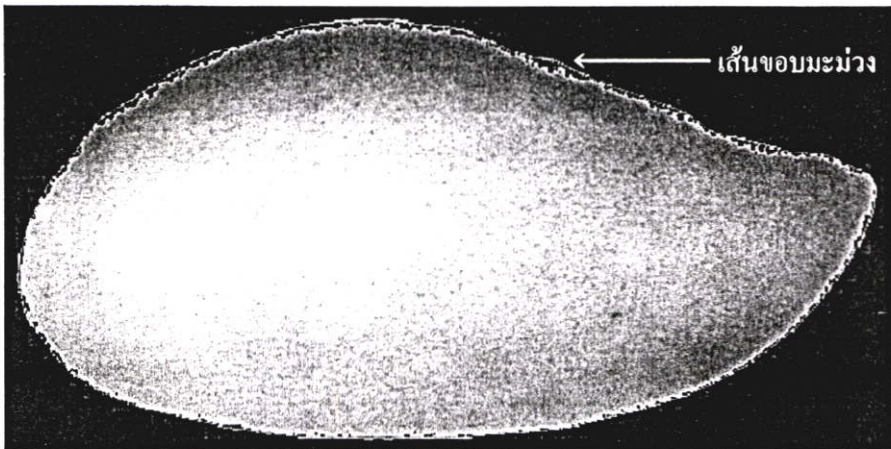
4.2.3.3 การกำหนดจุดเชื่อมด้วยสไปลน์ฟังก์ชัน

จากจุดอ้างอิงที่ได้จะนำไปใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงให้กับสไปลน์ฟังก์ชัน โดยสไปลน์ฟังก์ชันจะสร้างจุดเพิ่มขึ้นมาระหว่างจุดอ้างอิง ซึ่งเป็นจุดที่ใช้ในการประมาณการเชื่อมตำแหน่งจุดภาพเพื่อให้เข้าใกล้กับความเป็นจริง แสดงดังรูปที่ 4.10



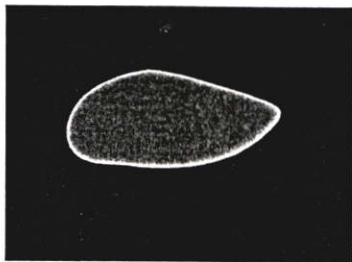
รูปที่ 4.10 จุดเชื่อมที่เกิดจากสไปลน์ฟังก์ชัน

จากรูปเป็นบางส่วนของภาพโดยจุดที่ได้แสดงที่อยู่ระหว่างจุดอ้างอิงเป็นจุดเชื่อมที่เกิดจากสไปลน์ฟังก์ชัน หลังจากที่ได้จุดเชื่อมจากสไปลน์ฟังก์ชันแล้ว จะทำการลากเส้นเพื่อเชื่อมต่อระหว่างจุดเชื่อมเหล่านั้น จะทำให้ได้เส้นขอบของมะม่วงที่เกิดจากการใช้สไปลน์ฟังก์ชัน แสดงดังรูปที่ 4.11

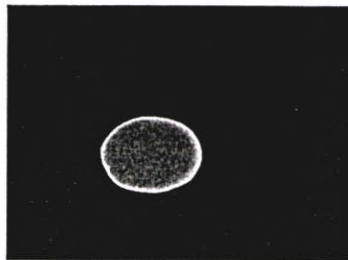


รูปที่ 4.11 เส้นขอบของมะม่วงโดยวิธีสไปลน์ฟังก์ชัน

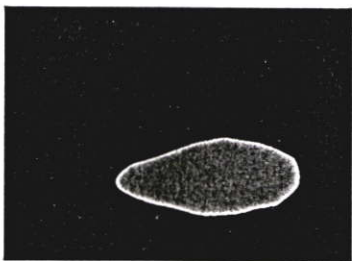
จากรูปเส้นที่ได้แสดงเป็นเส้นขอบของมะม่วง ซึ่งเป็นเส้นขอบขั้นสุดท้ายที่แสดงขอบเขตของมะม่วง และนำไปสร้างเป็นภาพโครงร่าง 2 มิติของมุมมองนั้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมะม่วงต่อไป ดังรูปที่แสดงเป็นภาพโครงร่าง 2 มิติในแต่ละมุมมองของภาพถ่ายมะม่วงใน 4 มุมภาพ



โครงร่าง 2 มิติในมุมมองด้านบน



โครงร่าง 2 มิติในมุมมองด้านข้างที่ 1



โครงร่าง 2 มิติในมุมมองด้านข้างที่ 2

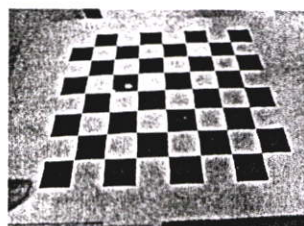
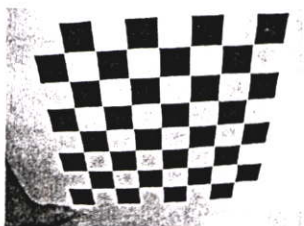
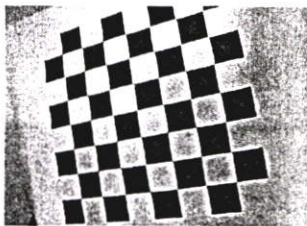
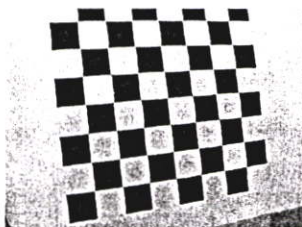
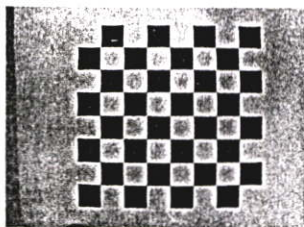


โครงร่าง 2 มิติในมุมมองด้านข้างที่ 3

รูปที่ 4.12 โครงร่าง 2 มิติใน 4 มุมภาพ

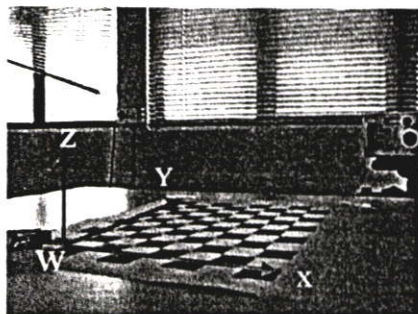
4.3 วิธีการเทียบวัตถุกล้อง (Camera Calibration)

การเทียบวัตถุกล้องจะทำให้ได้ค่าตัวแปรภายในและตัวแปรภายนอกกล้อง โดยในการเทียบวัตถุภายในของกล้องจะทำการถ่ายภาพกระดานตารางขาวดำในแต่ละกล้อง ซึ่งในการถ่ายจะจัดวางกระดานตารางขาวดำในทิศทางที่แตกต่างกันออกไป จากนั้นจะนำภาพทั้งหมดที่ถ่ายได้ในแต่ละกล้องนั้นไปผ่านกระบวนการคำนวณจากเครื่องมือการเทียบวัตถุกล้อง (Bouguet, 2005) เพื่อให้ได้ค่าตัวแปรภายในกล้องของแต่ละกล้อง



รูปที่ 4.13 ภาพกระดานตารางขาวดำของกล้องที่หนึ่ง

จากนั้นจะหาค่าตัวแปรภายนอกกล้องโดยการถ่ายภาพเพื่อกำหนดจุดกำเนิดของระบบพิกัดโลกที่ใช้ในการอ้างอิงในแต่ละกล้อง ซึ่งกำหนดให้จุด w เป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัดโลกดังภาพ จากนั้นจะนำภาพในแต่ละกล้องที่ถ่ายได้ไปผ่านกระบวนการคำนวณจากเครื่องมือการเทียบวัตถุกล้อง (Bouguet, 2005) เพื่อทำให้ได้ค่าตัวแปรภายนอกกล้องของแต่ละกล้อง และทำให้ได้แกนพิกัดของระบบพิกัดโลกที่ใช้ในการอ้างอิงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การกำหนดระบบพิกัดโลกที่ใช้ในการอ้างอิง

จากนั้นในการถ่ายภาพของวัตถุในแต่ละครั้งนั้นจะไม่มี การปรับกล้องและตำแหน่งของกล้องทุกตัวจะไม่เปลี่ยนแปลง

4.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

ในการคัดขนาดและวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมะม่วงนั้น เกษตรกรหรือนักวิจัยทางการเกษตรต้องใช้เครื่องมือเข้ามาช่วยในการวัดเช่น ใช้เครื่องชั่งในการวัดน้ำหนัก ใช้เวอร์เนีย (Vernier Caliper) ในการวัดขนาด ใช้แพลนนิมิเตอร์ (Planimeter) ในการวัดพื้นที่ เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนในการวัดนั้นอาจจะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ไม่ว่าจะเป็นที่ผู้วัดหรือวิธีการใช้เครื่องมือในการวัด ดังนั้นในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมะม่วงด้วยวิธีที่ได้ทำขึ้น จะสามารถช่วยเกษตรกรและนักวิจัยในขั้นตอนการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพให้สะดวกรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

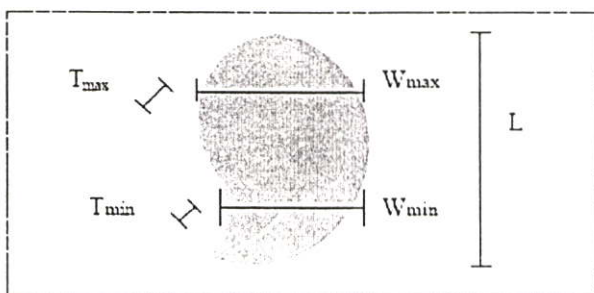
การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมะม่วงในเชิง 2 มิติคือ พื้นที่ภาพถ่าย ความยาว ความกว้าง และสีจะวิเคราะห์กับภาพถ่ายในมุมมองด้านบน ส่วนความหนาจะวิเคราะห์กับภาพถ่ายในมุมมองด้านข้าง ในการวิเคราะห์ในเชิง 3 มิติคือปริมาตรและพื้นที่ผิวจะวิเคราะห์กับภาพถ่ายในทุกๆ มุมภาพ และพื้นที่เปลือกซึ่งจะวิเคราะห์กับภาพสแกนของเปลือกมะม่วง โดยในแต่ละลักษณะจะมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

4.4.1 พื้นที่ภาพฉาย (Projected Area)

กำหนดให้พื้นที่ภาพฉายแทนสัญลักษณ์ด้วย A โดยจะวิเคราะห์กับมุมมองด้านบน พื้นที่ภาพฉายเป็นพื้นที่ภายในเส้นขอบของมะม่วง ซึ่งมีวิธีการคำนวณโดยนำจำนวนพิกเซลทั้งหมดของมะม่วงที่อยู่ภายในเส้นขอบมาเทียบกับอัตราส่วนเทียบวัดขนาด เพื่อแปลงจำนวนพิกเซลให้เป็นหน่วยพื้นที่ ซึ่งอัตราส่วนเทียบวัดขนาดจะได้อัตราส่วนเทียบวัดขนาดจากตารางขาวดำที่ได้ทำขึ้น

4.4.2 ขนาด

ได้มีงานวิจัย (Vasques-Caiced et al. 2002) ที่ได้ศึกษาลักษณะทางกายภาพของมะม่วงโดยมีการใช้เครื่องมือในการวัดขนาด ซึ่งทำให้ได้ความยาว (L) และความกว้าง (W_{max} , W_{min}) ของมะม่วงดังแสดงในรูปที่ 4.15



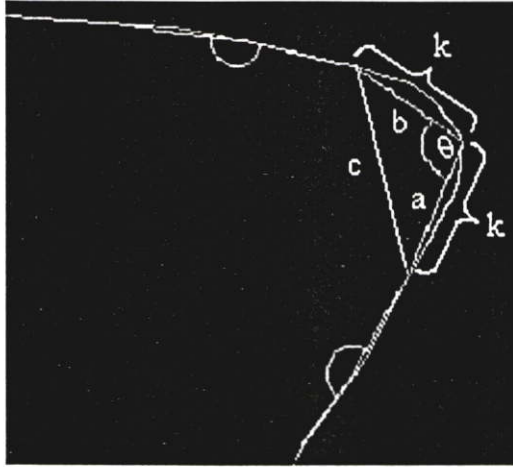
รูปที่ 4.15 การวัดขนาดของมะม่วงโดยการใช้เครื่องมือ (Vasques-Caiced. 2002)

จากรูปที่แสดงจะเห็นว่าในการใช้เครื่องมือวัดนั้นอาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ถ้าหากผู้วัดจับเครื่องมือวัดขนาดที่มีการบิดเบือนทิศทางออกไป ทำให้ขนาดที่วัดได้นั้นคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ดังนั้นในการวัดขนาดโดยใช้การประมวลผลภาพจะทำให้ช่วยลดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้ได้

ในการคำนวณขนาดของมะม่วงจะประกอบด้วยการวัดความยาว ความกว้าง และความหนาของมะม่วง ซึ่งจะมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

4.4.2.1 การวัดความยาวของมะม่วง

กำหนดให้ความยาวแทนสัญลักษณ์ด้วย L โดยจะวิเคราะห์กับมุมมองด้านบน ซึ่งเป็นการวัดขนาดความยาวของมะม่วงจากจุดปลาย (Tip) ถึงจุดขั้ว (Pole) ดังนั้นจึงต้องมีการหาจุดที่เป็นจุดปลายและจุดที่เป็นจุดขั้วของมะม่วงก่อนที่จะวัดความยาว ซึ่งในการหาจุดปลายและจุดขั้วของมะม่วงจะหาได้จากการพิจารณาจากมุมมองในทุกๆ จุดพิกเซลบนเส้นขอบมะม่วง โดยในการพิจารณามุมในแต่ละจุดพิกเซลบนเส้นขอบนั้นจะเว้นระยะของด้านเริ่มต้นมุมและด้านสิ้นสุดมุมจำนวน k พิกเซลบนเส้นขอบทั้งสองด้านเท่าๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การหามุมบนเส้นขอบมะม่วง

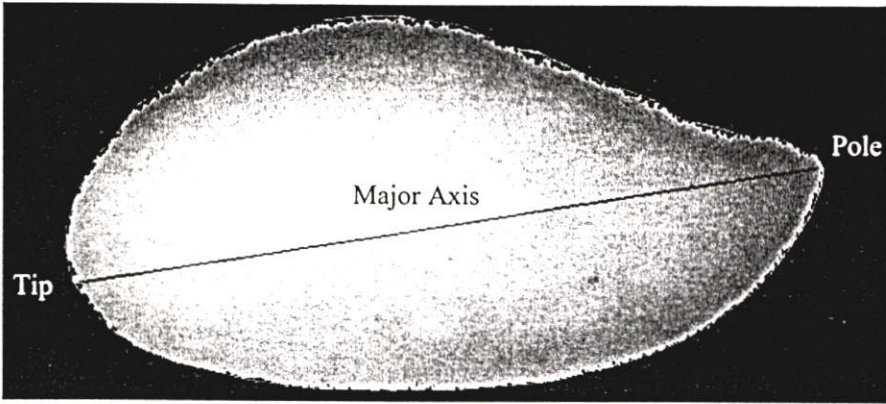
จากรูปตัวอย่างเมื่อสามารถหาขนาดของด้าน a , b และ c ได้แล้วทำให้ได้ความยาวของด้านเริ่มต้นมุม (ด้าน a) ด้านสิ้นสุดมุม (ด้าน b) และด้านตรงข้ามมุม (ด้าน c) จึงสามารถนำมาหามุมได้ โดยการประยุกต์ใช้สมการจากกฎโคไซน์ดังต่อไปนี้

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \right) \quad (4.1)$$

เมื่อได้ขนาดของมุมในทุกๆ จุดพิกเซลบนเส้นขอบมะม่วงแล้ว จะพิจารณาว่าจุดใดเป็นจุดปลายและจุดหัวของมะม่วงตามลำดับดังนี้

1. จุดปลายของมะม่วง คือจุดที่มีขนาดของมุมที่เล็กที่สุดของทุกๆ จุดพิกเซลบนเส้นขอบมะม่วง
2. จุดหัวของมะม่วง คือจุดที่มีขนาดของมุมที่เล็กที่สุดในบริเวณครึ่งหนึ่งของเส้นขอบมะม่วงที่อยู่ตำแหน่งตรงข้ามกับจุดปลาย

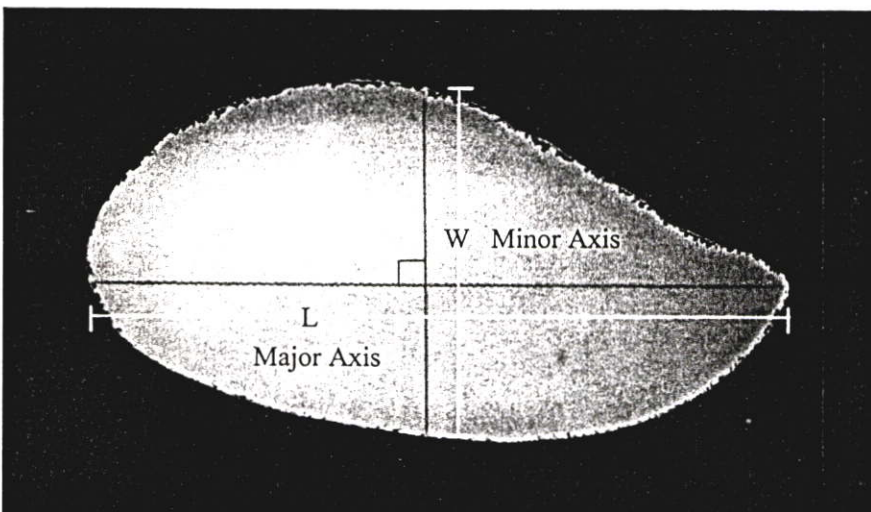
ความยาวระหว่างจุดปลายและจุดหัวของมะม่วงที่วัดได้จะเป็นระยะแสดงความยาว และทำการเทียบกับอัตราส่วนเทียบวัดขนาดเพื่อแปลงระยะห่างพิกเซลให้เป็นหน่วยความยาว ซึ่งความยาวจะถูกแสดงด้วย Major Axis ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความยาวของมะม่วง

4.4.2.2 การวัดความกว้างของมะม่วง

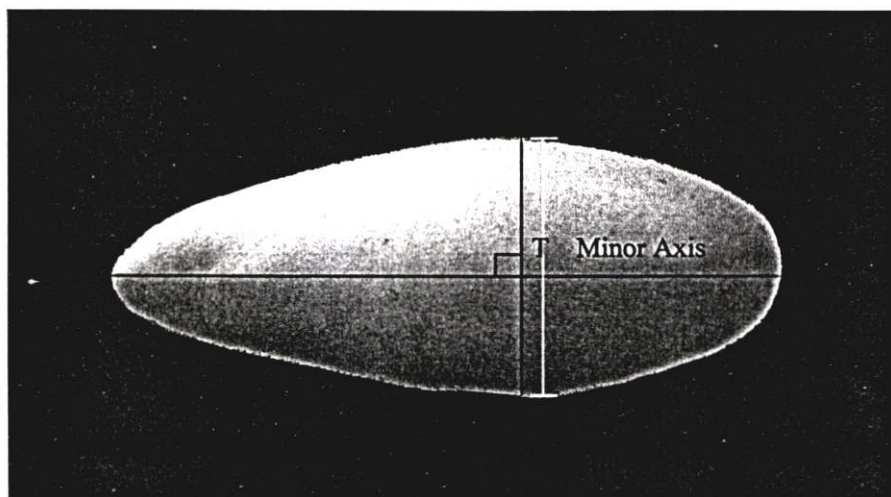
กำหนดให้ความกว้างแทนสัญลักษณ์ด้วย W โดยจะวิเคราะห์กับมุมมองด้านบน และเพื่อให้ง่ายต่อการวัดขนาดความกว้างของมะม่วงจะทำการหมุนภาพเพื่อให้เส้น Major Axis ขนานกับแกน X จากนั้นจะวัดขนาดความกว้างของมะม่วงโดยวัดขนาดของเส้นทุกเส้นในแนวแกน Y ภายในเส้นขอบมะม่วงที่ตั้งฉากกับเส้น Major Axis และเลือกเส้นที่มีขนาดความยาวมากที่สุดเป็นระยะแสดงความกว้างของมะม่วง และทำการเทียบกับอัตราส่วนเทียบวัดขนาดเพื่อแปลงระยะห่างพิกเซลให้เป็นหน่วยความยาว ซึ่งความกว้างจะถูกแสดงด้วย Minor Axis ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ขนาดความยาวและความกว้างของมะม่วง

4.4.2.2 การวัดความหนาของมะม่วง

กำหนดให้ความหนาแทนสัญลักษณ์ด้วย T ในการวัดความหนาจะดำเนินการเหมือนกับการวัดความกว้างเพียงแต่จะทำกับภาพถ่ายในมุมมองด้านข้างที่สามารถพิจารณาถึงความหนาได้ ดังนั้นความหนาของมะม่วงคือระยะความยาวของเส้น Minor Axis ในมุมมองด้านข้าง และทำการเทียบกับอัตราส่วนเทียบวัดขนาดเพื่อแปลงระยะห่างพิกเซลให้เป็นหน่วยความยาว

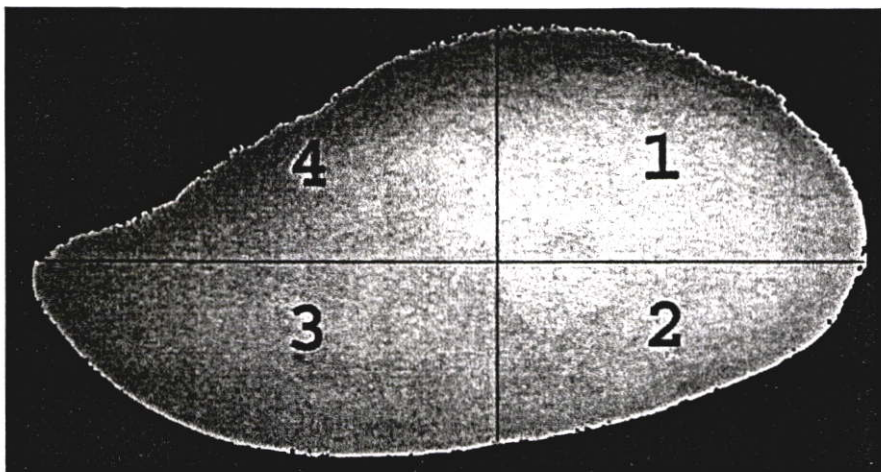


รูปที่ 4.19 ขนาดความหนาของมะม่วง

4.4.3 สี

ในการคัดมะม่วงเพื่อการส่งออกต่างประเทศนั้นจะต้องคำนึงถึงความสุกดิบของมะม่วงด้วย เพราะถ้าเป็นมะม่วงสุกเมื่อผ่านขั้นตอนการส่งออกอาจทำให้มะม่วงนั้นช้ำหรือเน่าเสียได้ จึงจำเป็นต้องคัดแยกเอามะม่วงสุกออก ซึ่งในการทดลองได้ใช้มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ โดยในการเก็บมะม่วงเพื่อการส่งขายนั้นจะเก็บเมื่อถึงเวลาที่มะม่วงแก่แต่ยังไม่สุก ดังนั้นในการวิเคราะห์ลักษณะของสีจะวิเคราะห์ในด้านการกระจายของสีเพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบในแต่ละขนาด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การวิเคราะห์สีจะวิเคราะห์กับมุมมองด้านบน โดยแบ่งส่วนของมะม่วงออกเป็น 4 ส่วน โดยยึดเส้น Major Axis และ Minor Axis เป็นเส้นแบ่งมะม่วงออกเป็น 4 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.20

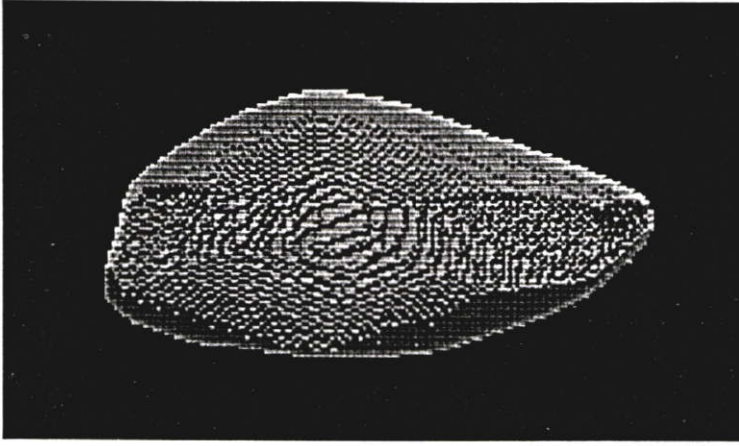


รูปที่ 4.20 การแบ่งส่วนพื้นที่ของมะม่วง

จากนั้นจะวิเคราะห์สีโดยคำนวณค่าเฉลี่ยของสี R G และ B ของทั้ง 4 ส่วน และค่าเฉลี่ยสีของผลจะได้จากค่าเฉลี่ยของทั้ง 4 ส่วนนั้น และบันทึกผลที่ได้เพื่อนำไปเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสีในแต่ละขนาด

4.4.4 ปริมาตร

กำหนดให้ปริมาตรของมะม่วงเป็น V โดยหลังจากที่ได้ทำการเทียบวัดกล้องทุกกล้องแล้ว จะทำให้ได้ตัวแปรภายในและตัวแปรภายนอกของกล้องทั้งหมด และจะใช้ตัวแปรต่างๆ เหล่านี้มาพิจารณาร่วมกับหลักการของสเปคตาฟิงเพื่อใช้ในการสร้างวัตถุในเชิง 3 มิติจากโครงร่าง 2 มิติของทุกมุมมอง โดยเริ่มจากในปริภูมิ 3 มิติสมมติจะทำการสร้างลูกบาศก์ขนาดใหญ่ซึ่งจะประกอบด้วยว็อกเซลย่อยหลายๆ อันประกอบกัน จากนั้นจะทำการโปรเจ็คทีละว็อกเซลไปยังระนาบภาพซึ่งตำแหน่งของจุดภาพที่เกิดขึ้นนั้นจะได้จากการแปลงพิกัดของว็อกเซลในเชิง 3 มิติมาเป็นพิกัดพิกเซลในเชิง 2 มิติบนระนาบภาพ โดยถ้าว็อกเซลใดที่เมื่อโปรเจ็คมาบนระนาบภาพแล้วเป็นจุดภาพที่อยู่ภายในโครงร่าง 2 มิติในทุกมุมมองจะถือว่าว็อกเซลนั้นเป็นส่วนของวัตถุ แต่ถ้าเป็นว็อกเซลที่เมื่อโปรเจ็คมาบนระนาบภาพแล้วไม่ได้้อยู่ภายในโครงร่าง 2 มิติของวัตถุเพียงภาพใดภาพหนึ่ง ถือว่าว็อกเซลนั้นไม่ใช่ส่วนของวัตถุก็จะตัดว็อกเซลนั้นออกจากปริมาตรวัตถุ ดังนั้นว็อกเซลที่เหลืออยู่ทั้งหมดในปริภูมิสมมติจะเป็นว็อกเซลที่เป็นส่วนของวัตถุเท่านั้น จากรูปที่ 4.21 เป็นตัวอย่างวัตถุในเชิง 3 มิติที่ถูกสร้างขึ้น ดังนั้นปริมาตรของวัตถุจะเท่ากับปริมาตรของว็อกเซลที่เหลืออยู่ทั้งหมด



รูปที่ 4.21 ตัวอย่างวัตถุในเชิง 3 มิติที่ได้สร้างขึ้น

4.4.5 พื้นที่ผิว (Surface Area)

ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจะแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

4.4.5.1 พื้นที่ผิวของวัตถุในเชิง 3 มิติ

กำหนดให้พื้นที่ผิวที่ของวัตถุในเชิง 3 มิติของมะม่วงเป็น S เป็นการคำนวณหาพื้นที่ผิวจากวัตถุ 3 มิติที่ได้สร้างขึ้น โดยพื้นที่ผิวจะเท่ากับพื้นที่ด้านของว็อกเซลที่อยู่ในตำแหน่งผิว (ริมสุด) ของวัตถุ

4.4.5.2 พื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือก

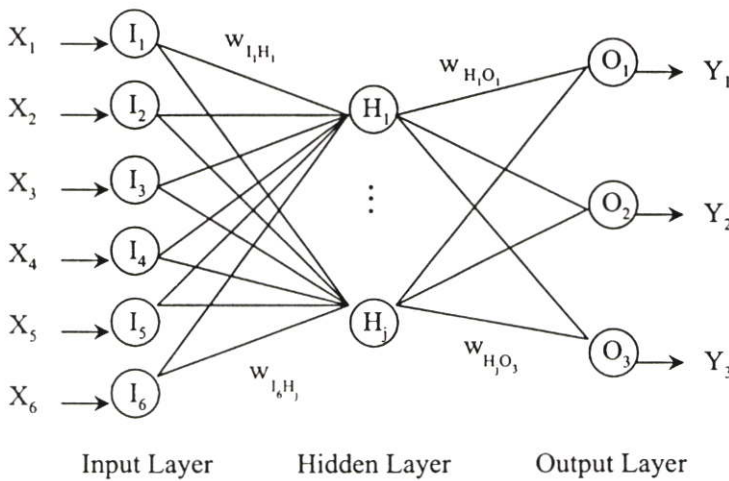
กำหนดให้พื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือกของมะม่วงเป็น P เป็นการคำนวณหาพื้นที่ของเปลือกมะม่วงที่ได้จากการสแกนของเปลือก ซึ่งก่อนจะคำนวณพื้นที่นั้นภาพต้นแบบที่ได้จากการสแกนอาจจะมีสัญญาณรบกวนแบบเกลือและพริกไทยเกิดขึ้น จึงต้องมีการกำจัดสัญญาณรบกวนนั้นออกไปโดยใช้วิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบมอร์โฟโลยี จากนั้นจะคำนวณพื้นที่โดยจะนับจุดพิกเซลที่เป็นสีขาวซึ่งเป็นส่วนเปลือก และนำจำนวนพิกเซลสีขาวที่ได้มาเทียบกับอัตราส่วนเทียบวัดขนาดเพื่อแปลงจำนวนพิกเซลให้เป็นหน่วยพื้นที่

4.5 การคัดแยกขนาด

โดยทั่วไปในการคัดแยกขนาดของมะม่วงเพื่อการส่งออกนั้นจะพิจารณาถึงน้ำหนักตามมาตรฐานที่ได้ตกลงกับบริษัทลูกค้าอย่างเช่น บริษัท Taniyama Siam ต้องการมะม่วงเพื่อส่งออก 2 ขนาดคือ ขนาดใหญ่ซึ่งมีน้ำหนัก 331-550 กรัม และมะม่วงขนาดเล็กซึ่งมีน้ำหนัก 280-330 กรัม ดังนั้นในทางปฏิบัติในการคัดแยกขนาดของเกษตรกรโดยผู้เชี่ยวชาญนั้นจะทำการพิจารณาโดยใช้การคาดคะเนด้วยสายตาและการสัมผัสด้วยมือ และหากมีความไม่แน่ใจก็จะทำการชั่งเพื่อทำให้ได้น้ำหนักของมะม่วงที่แท้จริง ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญเป็นจำนวนมากและอาจมีความ

ผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้วิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันมาช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพอื่นๆ เพื่อนำมาใช้ในการคัดแยกขนาดแทนการใช้น้ำหนัก

ในการทดลองการคัดแยกขนาดจะทดสอบกับมะม่วงทั้ง 2 กลุ่ม โดยในกลุ่มแรกจะทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการใช้ลักษณะทางกายภาพที่วัดได้จากเครื่องมือและที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันคือ พื้นที่ภาพถ่าย ความยาว ความกว้าง ความหนา ปริมาตร และพื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือก มาใช้เป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาดมะม่วง ซึ่งได้นำวิธีแบบพรอพพาเกชันมาใช้ในการคัดแยกขนาด โดยจะแบ่งข้อมูลทั้งหมดออกเป็น 2 ชุดคือ ชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (Training) และชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบ (Testing) ซึ่งแบ่งเป็นอัตราส่วนร้อยละ 50:50 โดยให้ชั้นอินพุตประกอบด้วย 6 นิวรอนตามจำนวนลักษณะทางกายภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์ ส่วนชั้นเอาต์พุตประกอบด้วย 3 นิวรอนตามจำนวนกลุ่มที่ต้องการคัดแยก และกำหนดชั้นฮิดเดน 1 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยทำการทดสอบเพื่อเลือกจำนวนนิวรอนให้เหมาะสมทำให้สามารถทำการคัดแยกขนาดได้ถูกต้องมากที่สุด



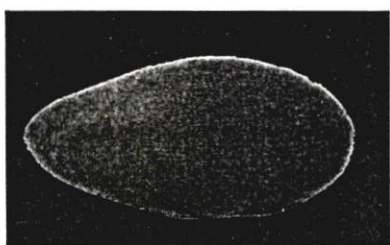
รูปที่ 4.22 ตัวอย่างโครงร่างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแบคพรอพพาเกชันที่ใช้

ในการทดลองการคัดแยกขนาดกับมะม่วงในกลุ่มที่ 2 จะทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการใช้ผู้เชี่ยวชาญในการคัดแยกขนาด 2 คนกับการใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันคือ พื้นที่ภาพถ่าย ความยาว ความกว้าง ความหนา ปริมาตร และพื้นที่ผิวของวัตถุในเชิง 3 มิติ มาใช้เป็นคุณสมบัติในการคัดขนาดโดยใช้วิธีแบคพรอพพาเกชันดังที่ได้กล่าวไป

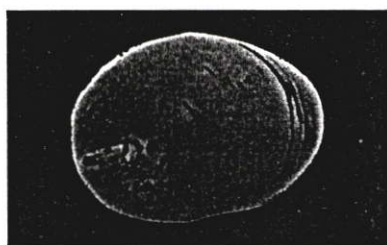
4.6 การวิเคราะห์ปริมาณตำหนิ

ในการคัดมะม่วงเพื่อการส่งออกสู่ต่างประเทศนั้นจะต้องพิจารณาถึงปริมาณตำหนิที่เกิดขึ้นบนผิวมะม่วงด้วย โดยทั่วไปแล้วเกษตรกรจะพิจารณาคำหนิจากสีที่เป็นรอยขีดหรือสีที่ผิดปกติไปจากสีโดยรวมทั้งหมดของผิว โดยจะตั้งเกณฑ์ในการพิจารณาจากสายตาเองว่า มะม่วงที่มีพื้นที่ที่เป็นตำหนิเกินกว่า 10% ของผิวมะม่วงทั้งหมดจะทำการคัดออก ซึ่งมะม่วงที่นำมาใช้ในการทดลองเมื่อพิจารณาถึงคำหนิจะเป็นมะม่วงที่ผ่านเกณฑ์และไม่ผ่านเกณฑ์ปะปนกันไป

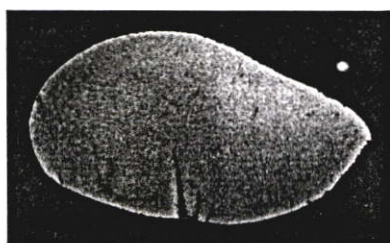
ในการวิเคราะห์คำหนิโดยวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันนั้น จะวิเคราะห์โดยพิจารณาว่าพิกเซลที่เป็นสีดำที่อยู่ภายในเส้นขอบของมะม่วงถือว่าเป็นส่วนพิกเซลที่มีสีที่เป็นตำหนิ โดยพิกเซลส่วนนั้นจะถูกแยกออกไปตั้งแต่ขั้นตอนของการแยกส่วนของมะม่วงออกจากพื้นหลังโดยพิจารณาจากค่าฮิว จากนั้นจะทำการรวมจำนวนพิกเซลที่เป็นสีดำทั้งหมดภายในเส้นขอบของมะม่วงในทุกมุมมองมาเทียบกับจำนวนพิกเซลทั้งหมดที่อยู่ภายในเส้นขอบของมะม่วงในทุกมุมมอง เพื่อคิดเป็นร้อยละของคำหนิที่เกิดขึ้น



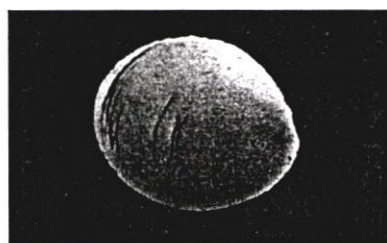
มุมมองด้านบน



มุมมองด้านข้างที่ 1



มุมมองด้านข้างที่ 3



มุมมองด้านข้างที่ 4

รูปที่ 4.23 คำหนิที่เกิดขึ้นในแต่ละมุมมองของมะม่วง 1 ผล

บทที่ 5

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ผลิตผลทางการเกษตรในการวิเคราะห์คือมะม่วง โดยมะม่วงที่ใช้เป็นมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เบอร์ 4 จากสวนของนายมานพ แก้ววงษ์นุกูล จากจังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งเป็นมะม่วงที่เก็บเพื่อจำหน่ายส่งออกโดยมีอายุเฉลี่ยประมาณ 110 วันหลังจากออกดอก ในการทดลองจะใช้มะม่วง 3 ขนาดตามมาตรฐานที่ใช้ในการส่งออกของบริษัท Taniyama Siam และแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกมีจำนวน 97 ผลและกลุ่มที่สองมีจำนวน 85 ผล ซึ่งจำนวนของแต่ละขนาดมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ขนาดและจำนวนมะม่วงที่นำมาใช้ในการทดลอง

ขนาด	น้ำหนัก (กรัม)	กลุ่มที่ 1 (ผล)	กลุ่มที่ 2 (ผล)
L	331-550	55	33
S	280-330	23	25
SS	น้อยกว่า 280	19	27
รวม		97	85

ขนาด L และ S จะถูกคัดมาเพื่อส่งขายออกต่างประเทศให้กับบริษัท Taniyama Siam

มะม่วงกลุ่มแรกจะทำการทดลองเพื่อ 3 วัตถุประสงค์คือ เพื่อเปรียบเทียบการวัดลักษณะทางกายภาพระหว่างการวัดด้วยเครื่องมือกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกขนาดโดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วัดได้จากเครื่องมือและที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอเป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาด และเพื่อทดสอบความถูกต้องการวิเคราะห์ดำหนิ ส่วนมะม่วงกลุ่มที่สองจะทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกขนาดระหว่างผู้เชี่ยวชาญ 2 คนกับการใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอเป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาด

ขั้นตอนแรกของการทดลองนั้นจะเป็นการถ่ายภาพมะม่วงและสแกนภาพเปลือกมะม่วง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพมะม่วงมีดังนี้คือ

1. กล้องดิจิทัล (Kodak CX6330 Zoom) 4 เครื่อง
2. แท่นขาตั้งกล้อง 1 อัน และขาตั้งกล้อง 3 อัน
3. กระดาษตารางขาวดำ โดย 1 ช่องมีขนาด 20×20 มิลลิเมตร

และอุปกรณ์ที่ใช้ในการสแกนเปลือกมะม่วงมีดังนี้คือ

1. สแกนเนอร์ (HP ScanJet 3500C) 1 เครื่อง
2. แผ่นใส
3. กล่องพลาสติกสีดำ 1 กล่อง
4. คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง

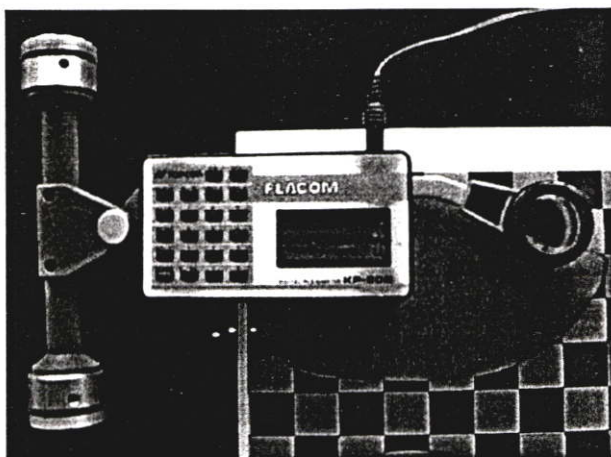
ซึ่งวิธีการทดลองและผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

5.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมะม่วงกลุ่มแรกแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ผลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ และผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้วิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ ซึ่งลักษณะทางกายภาพที่ได้ทำการวิเคราะห์คือ พื้นที่ภาพฉาย ความยาว ความกว้าง ความหนา สี ปริมาตร พื้นที่ผิวของวัตถุในเชิง 3 มิติ และพื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือก โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลการวัดที่ได้ของทั้ง 2 วิธีในแต่ละขนาด จากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Paired-Samples T Test ที่ระดับความเชื่อมั่น $P < 0.05$ โดยจะแสดงผลการวิเคราะห์เป็นตัวอักษรต่อท้ายค่าเฉลี่ย ซึ่งถ้าเป็นตัวอักษรที่แตกต่างกันจะแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น $P < 0.05$ ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพมีดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการวัดพื้นที่ภาพฉาย

ในการวัดพื้นที่ภาพฉายด้วยเครื่องมือ นั้นจะใช้แพลนมิเตอร์วัดกับภาพปริ้นต์ของมุมมองด้านบนดังรูปที่ 5.1 โดยผู้วัดจะทำการลากแพลนมิเตอร์ไปตามเส้นขอบของผลมะม่วง จากนั้นแพลนมิเตอร์จะคำนวณพื้นที่พร้อมแสดงผลออกมา



รูปที่ 5.1 การวัดพื้นที่ภาพฉายโดยใช้แพลนมิเตอร์

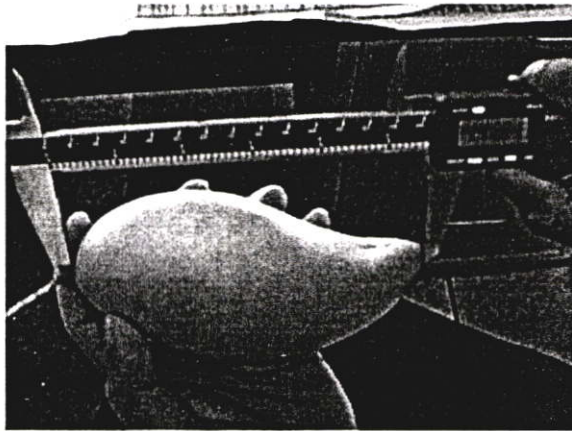
ผลการวัดพื้นที่ภาพฉายจะแสดงโดยใช้ค่าเฉลี่ย (μ) ของผลการวัดทั้งหมดในแต่ละขนาด และแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของผลการวัดที่ได้ โดยกำหนดให้ A_1 แทนพื้นที่ภาพฉายที่วัดได้จากแพลนนิมิเตอร์ และ A_v แทนพื้นที่ภาพฉายที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการวัดพื้นที่ภาพฉายจากแพลนนิมิเตอร์และวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ

พื้นที่ภาพฉาย (ตร.ซม.)	SS		S		L	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
A_1 (เครื่องมือวัด)	78.65a	6.27	88.14a	3.85	100.07a	8.86
A_v (วิธีที่นำเสนอ)	76.92b	6.98	86.83a	4.46	99.50a	9.96

5.1.2 ผลการวัดความยาว

ในการวัดขนาดความยาวด้วยเครื่องมือนั้นจะใช้เวอร์เนียในการวัด โดยผู้วัดจะทำการคาดคะเนเอาเองว่าจุดไหนคือส่วนหัวหรือปลายของมะม่วง และใช้เวอร์เนียวัดขนาดความยาวดังกล่าว



รูปที่ 5.2 การวัดขนาดความยาวโดยใช้เวอร์เนีย

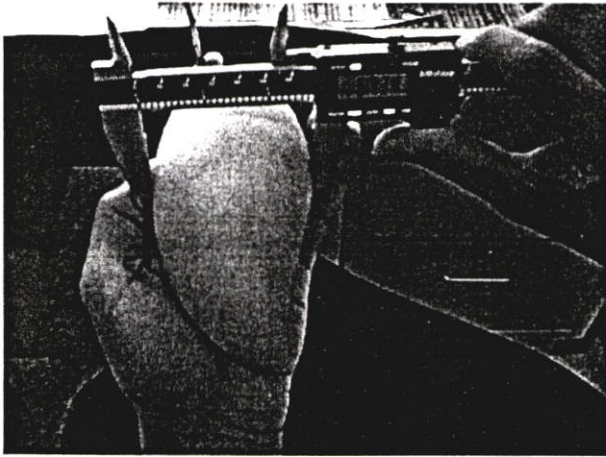
ผลการวัดขนาดความยาวจะแสดงโดยใช้ค่าเฉลี่ยของผลการวัดทั้งหมดในแต่ละขนาด และแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัดที่ได้ โดยกำหนดให้ L_1 แทนความยาวที่วัดได้จากเวอร์เนีย และ L_v แทนความยาวที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการวัดความยาวจากเวอร์เนียและวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ

ความยาว (ซม.)	SS		S		L	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
L_i (เครื่องมือวัด)	13.34a	0.84	13.92a	0.59	14.87a	0.86
L_v (วิธีที่นำเสนอ)	13.88b	1.00	14.86b	0.59	15.83b	0.99

5.1.3 ผลการวัดความกว้าง

ในการวัดขนาดความกว้างด้วยเครื่องมือ นั้นจะใช้เวอร์เนียในการวัดเช่นกัน โดยผู้วัดจะทำการคาดคะเนเอาเองว่าระยะนี้จะเป็นความกว้างของมะม่วง และใช้เวอร์เนียวัดขนาดความกว้างดังกล่าว



รูปที่ 5.3 การวัดขนาดความกว้างโดยใช้เวอร์เนีย

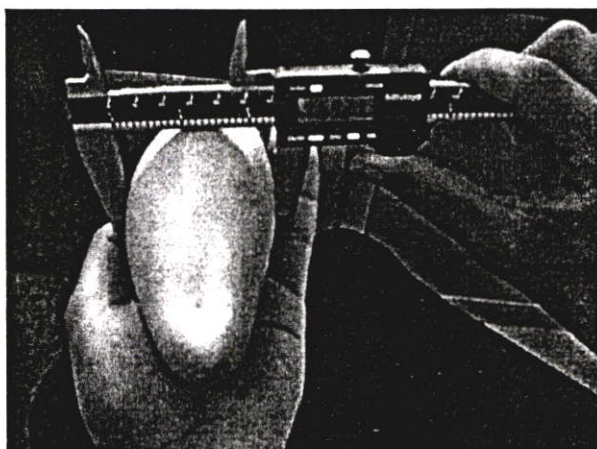
ผลการวัดขนาดความกว้างจะแสดง โดยใช้ค่าเฉลี่ยของผลการวัดทั้งหมดในแต่ละขนาด และแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัดที่ได้ โดยกำหนดให้ W_i แทนความกว้างที่วัดได้จากเวอร์เนีย และ W_v แทนความกว้างที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบผลการวัดความกว้างจากเวอร์เนียและวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ

ความกว้าง (ซม.)	SS		S		L	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
W_i (เครื่องมือวัด)	6.83a	0.18	7.14a	0.14	7.62a	0.39
W_v (วิธีที่นำเสนอ)	7.53b	0.27	7.93b	0.26	8.54b	0.47

5.1.4 ผลการวัดความหนา

ในการวัดขนาดความหนาด้วยเครื่องมือนี้จะใช้เวอร์เนียในการวัดเช่นกัน โดยผู้วัดจะทำการคาดคะเนเอาเองว่าระยะนี้ น่าจะเป็นความหนาของมะม่วง และใช้เวอร์เนียวัดขนาดความหนาดังกล่าว



รูปที่ 5.4 การวัดขนาดความหนาโดยใช้เวอร์เนีย

ผลการวัดขนาดความหนาจะแสดงโดยใช้ค่าเฉลี่ยของผลการวัดทั้งหมดในแต่ละขนาด และแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัดที่ได้ โดยกำหนดให้ T_i แทนความหนาที่วัดได้จากเวอร์เนีย และ T_v แทนความหนาที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบผลการวัดความหนาจากเวอร์เนียร์และวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ

ความหนา (ชม.)	SS		S		L	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
T_i (เครื่องมือวัด)	6.06a	0.28	6.31a	0.12	6.74a	0.34
T_v (วิธีที่นำเสนอ)	5.42b	0.30	5.71b	0.30	6.02b	0.37

5.1.5 ผลการวัดสี

ในการวัดสีนั้นจะวิเคราะห์โดยใช้วิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอเท่านั้น โดยผลจะแสดงโดยใช้ค่าเฉลี่ยสี R (μ_R) G (μ_G) และ B (μ_B) ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.6 ผลการวัดสีจากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ

ส่วนที่	SS	S	L
	μ_R, μ_G, μ_B	μ_R, μ_G, μ_B	μ_R, μ_G, μ_B
1	139.0 , 145.5 , 63.9	137.8 , 143.8 , 63.5	138.4 , 143.2 , 63.8
2	155.7 , 170.3 , 85.6	154.7 , 168.7 , 85.5	153.8 , 166.8 , 84.8
3	125.3 , 132.4 , 56.2	127.6 , 132.8 , 57.1	124.3 , 129.9 , 55.9
4	128.0 , 143.6 , 63.6	128.5 , 143.0 , 64.7	125.9 , 140.6 , 63.7
ทั้ง 4 ส่วน	137.0 , 148.0 , 67.3	137.2 , 147.1 , 67.7	135.6 , 145.1 , 67.1

5.1.6 ผลการวัดปริมาตร

ในการวัดปริมาตรด้วยเครื่องมือ นั้นจะติดตั้งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยผู้วัดจะทำการชั่งน้ำหนักของมะม่วงในน้ำกลั่น โดยน้ำหนักที่วัดได้จะทำการแปลงเป็นปริมาตรได้ดังสมการต่อไปนี้

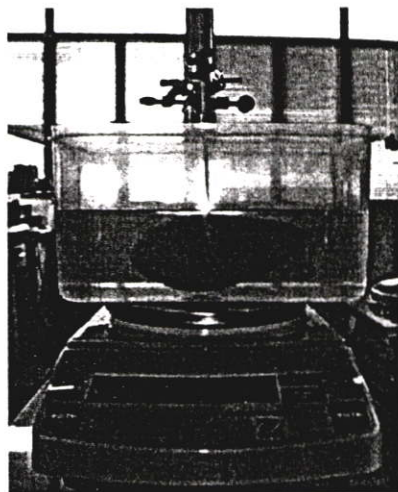
$$W_w = \rho V \quad (5.1)$$

โดย W_w แทนน้ำหนักของวัตถุในน้ำ (g)

ρ แทนความหนาแน่นของน้ำกลั่นซึ่งมีค่า 1 g/cm^3

V แทนปริมาตรของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยวัตถุ (cm^3)

ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการดังกล่าวทำให้ได้ว่าตัวเลขแสดงปริมาตรของวัตถุจะเท่ากับตัวเลขแสดงน้ำหนักของวัตถุเมื่อชั่งในน้ำ



รูปที่ 5.5 อุปกรณ์การวัดปริมาตร

ผลการวัดปริมาตรจะแสดงโดยใช้ค่าเฉลี่ยของผลการวัดทั้งหมดในแต่ละขนาด และแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัดที่ได้ โดยกำหนดให้ V_i แทนปริมาตรที่วัดได้จากการใช้เครื่องมือ และ V_v แทนปริมาตรที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบผลการวัดปริมาตรจากการใช้เครื่องมือและวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ

ปริมาตร (ลบ.ซม.)	SS		S		L	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
V_i (เครื่องมือวัด)	257.09a	18.93	297.48a	16.32	365.89a	48.03
V_v (วิธีที่นำเสนอ)	279.96b	22.12	327.12b	14.02	401.14b	58.85

ซึ่งในการวิเคราะห์ปริมาตร โดยใช้วิธีที่นำเสนอ นั้น ถ้าได้มีการสร้างวัตถุในเชิง 3 มิติโดยใช้จำนวนมุมมองที่มากขึ้น หรือได้ใช้ภาพที่มีความละเอียดมากขึ้น จะทำให้รูปทรงของวัตถุในเชิง 3 มิติที่สร้างขึ้นนั้นมีปริมาตรลดลง ทำให้ใกล้เคียงกับวัตถุจริงมากขึ้น ดังการทดลองต่อไปนี้เป็นการวัดปริมาตรของมะม่วงกลุ่มที่ 2 จากจำนวน 5 ผลในแต่ละขนาด โดยจะทำการเปรียบเทียบกันระหว่างการวัดปริมาตรโดยใช้เครื่องมือกับการวิเคราะห์โดยใช้จำนวนมุมมองที่ต่างกันและใช้ความละเอียดของภาพที่ต่างกัน ซึ่งมีผลการทดลองจะแสดงโดยใช้ค่าเฉลี่ยปริมาตรของกลุ่มดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบผลการวัดปริมาตรจากการใช้เครื่องมือและวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ โดยใช้จำนวนมุมมองและความละเอียดภาพที่แตกต่างกัน

ขนาด	ค่าเฉลี่ยปริมาตรจากการวัดด้วยเครื่องมือ	ค่าเฉลี่ยปริมาตรจากการวัดด้วยวิธีที่นำเสนอ		
		4 มุมภาพ , ความละเอียดภาพ 1 M	4 มุมภาพ , ความละเอียดภาพ 3 M	5 มุมภาพ , ความละเอียดภาพ 1 M
L	403.88	451.32	443.35	430.45
S	304.96	339.80	333.49	321.88
SS	254.00	278.16	277.50	267.52

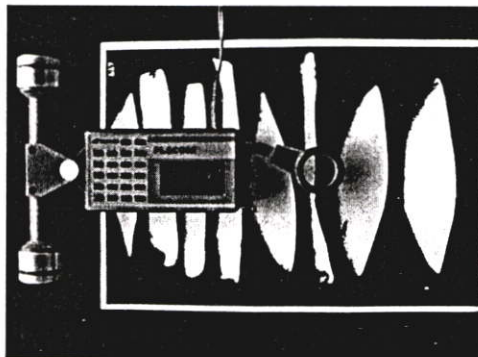
5.1.7 ผลการวัดพื้นที่ผิว

ในการวัดพื้นที่ผิวของวัตถุในเชิง 3 มิติที่ได้สร้างขึ้นนั้น จะวิเคราะห์โดยใช้วิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอเท่านั้น จะแสดงโดยใช้ค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์ทั้งหมดในแต่ละขนาด และแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวิเคราะห์ที่ได้ โดยกำหนดให้ S_v แทนพื้นที่ผิวของวัตถุในเชิง 3 มิติ ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.9 ผลการวัดพื้นที่ผิวของวัตถุในเชิง 3 มิติจากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ

พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	SS		S		L	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
S_v (วิธีที่นำเสนอ)	336.16	18.73	372.69	11.63	426.17	40.38

ในการวัดพื้นที่ผิวที่วัดจากภาพสแกนเปลือกนั้น โดยการวัดด้วยเครื่องมือจะใช้แพลนิเมเตอร์ในการวัดกับภาพปริ้นต์ของภาพสแกนเปลือก โดยผู้วัดจะทำการลากแพลนิเมเตอร์ไปตามเส้นขอบของเปลือกมะม่วง จากนั้นแพลนิเมเตอร์จะคำนวณพื้นที่พร้อมแสดงผลออกมา ทำเช่นนี้กับเปลือกทั้งหมดในภาพและทำการรวมพื้นที่



รูปที่ 5.6 การวัดพื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือกโดยใช้แพลนิเมเตอร์

ผลการวัดพื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือกจะแสดงโดยใช้ค่าเฉลี่ยของผลการวัดทั้งหมดในแต่ละขนาด และแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัดที่ได้ โดยกำหนดให้ P_i แทนพื้นที่ผิวที่วัดได้จากแพลนมิเตอร์ และ P_v แทนพื้นที่ผิวที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบผลการวัดพื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือกจากแพลนมิเตอร์และวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ

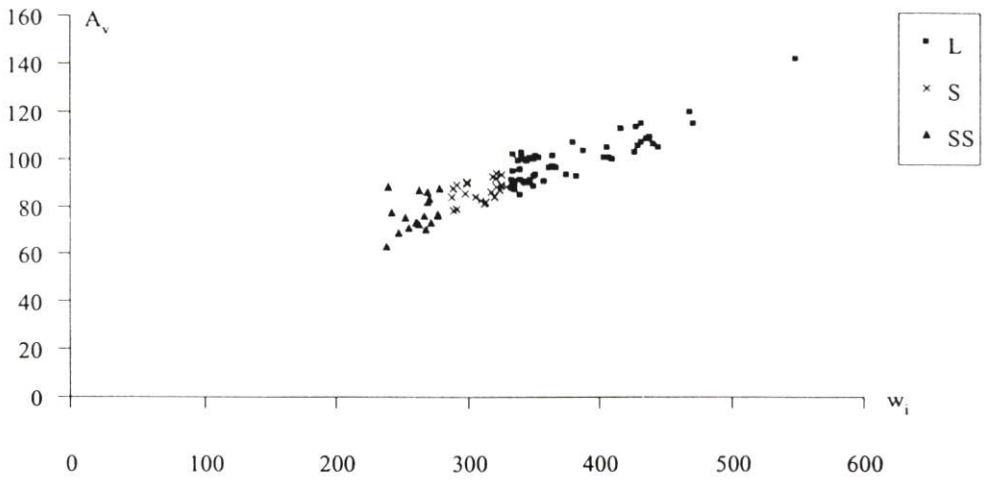
พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	SS		S		L	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
P_i (เครื่องมือวัด)	190.77a	15.39	209.03a	11.93	235.43a	23.47
P_v (วิธีที่นำเสนอ)	187.11b	15.41	207.35a	10.43	235.87a	22.41

5.2 ผลการคัดแยกขนาด

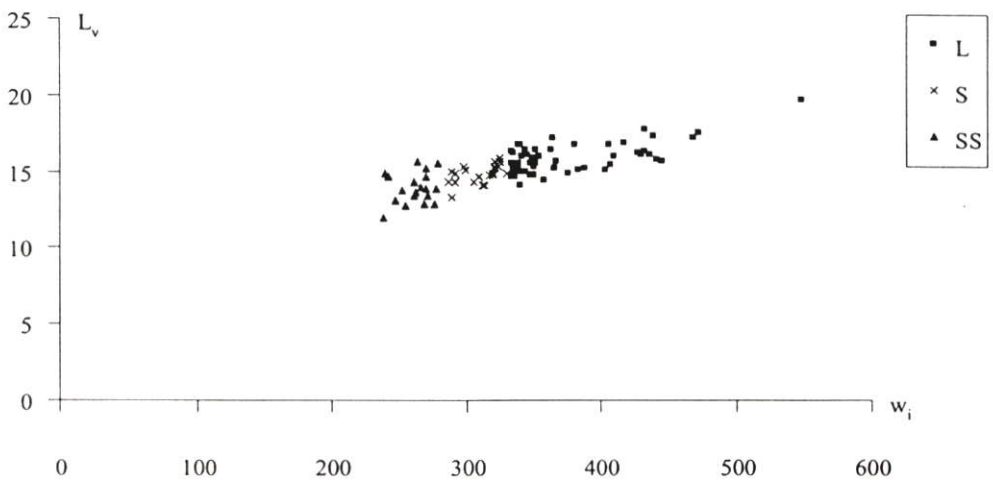
ในการคัดแยกขนาดมะม่วงเพื่อการส่งออกนั้น เกษตรกรจะคัดแยกขนาดโดยพิจารณาจากน้ำหนักตามมาตรฐานที่ใช้ในการส่งออก โดยในการทดลองจะกำหนดให้ w_i แทนน้ำหนักที่วัดได้จากเครื่องชั่ง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้ และกราฟความสัมพันธ์ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.11 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับลักษณะทางกายภาพต่างๆ

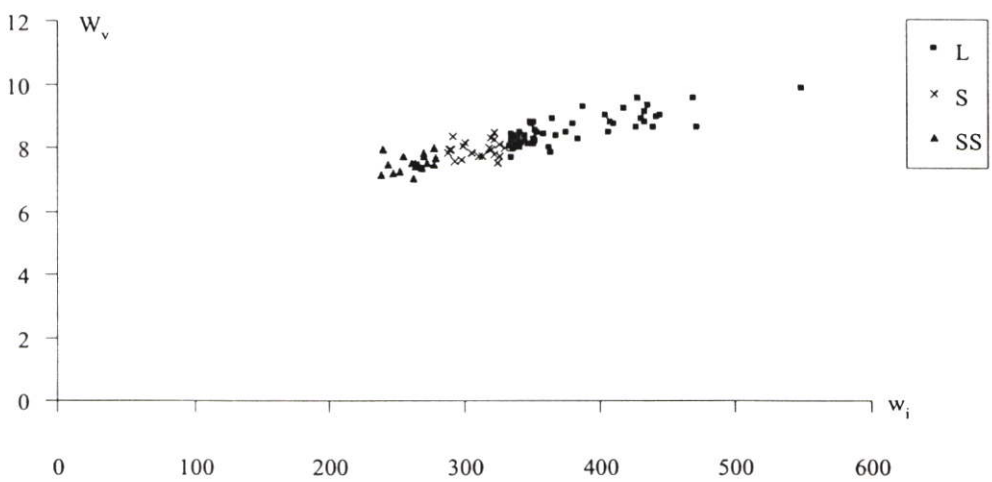
วิธีการ วัดด้วย	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับลักษณะทางกายภาพ						
	พื้นที่ ภาพฉาย	ความ ยาว	ความ กว้าง	ความ หนา	ปริมาตร	พื้นที่ผิวของ ภาพสแกน เปลือก	พื้นที่ผิว ของวัตถุใน เชิง 3 มิติ
เครื่องมือ	0.9427	0.7851	0.9074	0.8885	0.9816	0.8973	-
วิธีที่เสนอ	0.9079	0.7722	0.8736	0.7099	0.9725	0.9149	0.9707



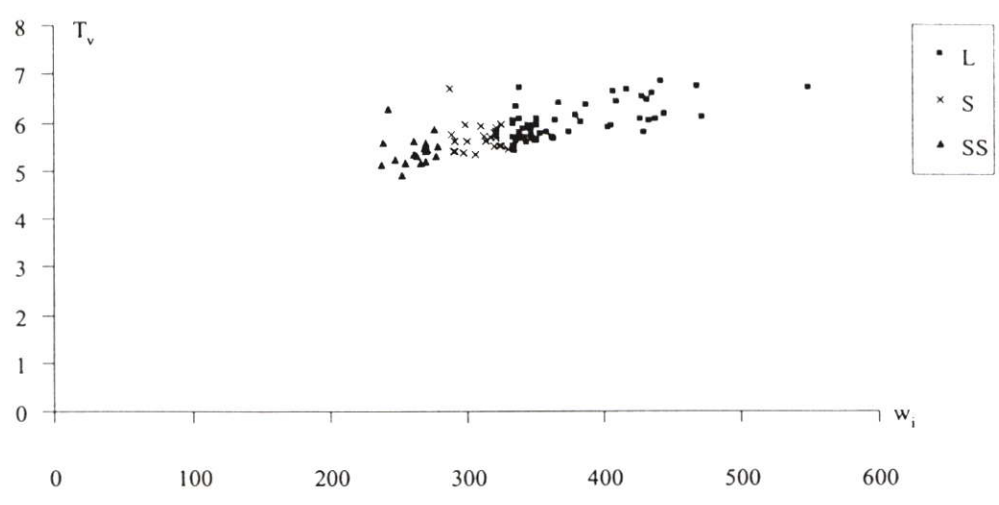
รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับพื้นที่ภาพฉายที่วิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ



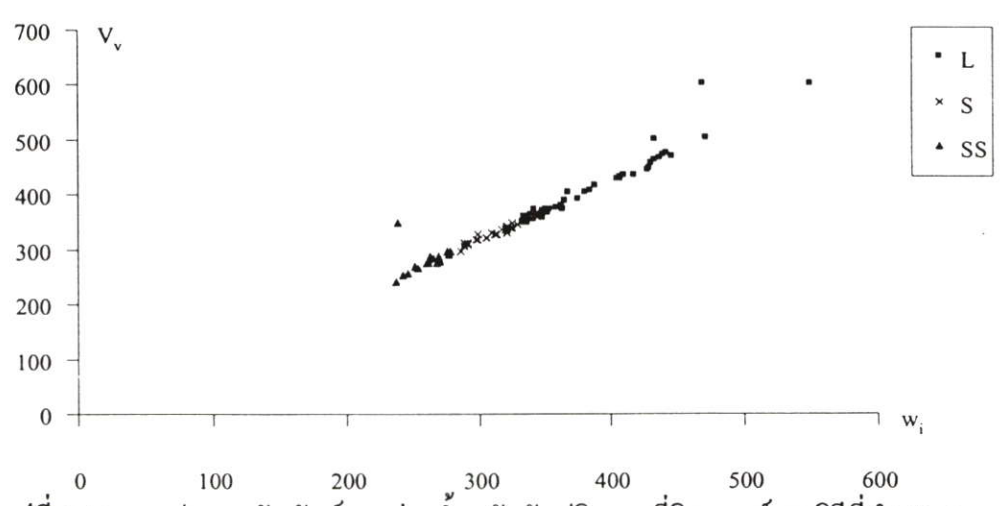
รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความยาวที่วิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ



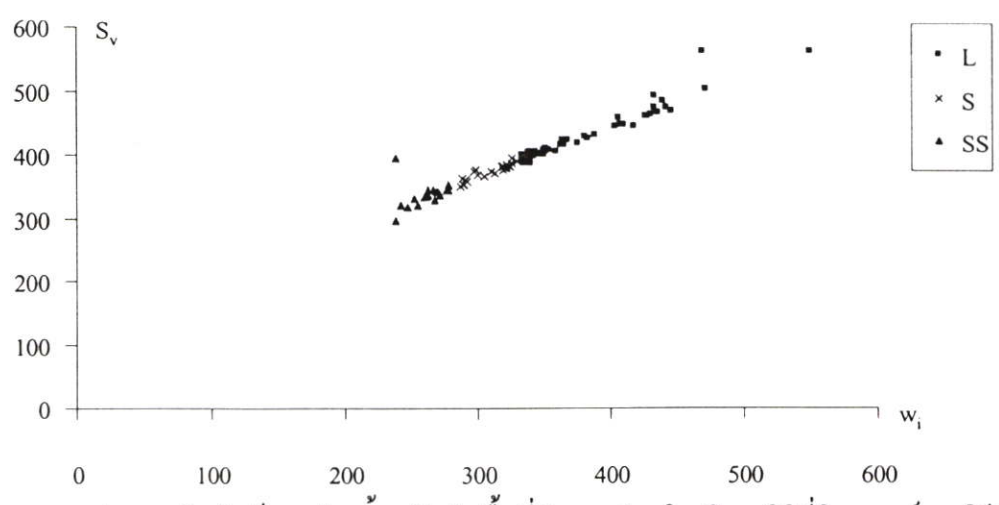
รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความกว้างที่วิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ



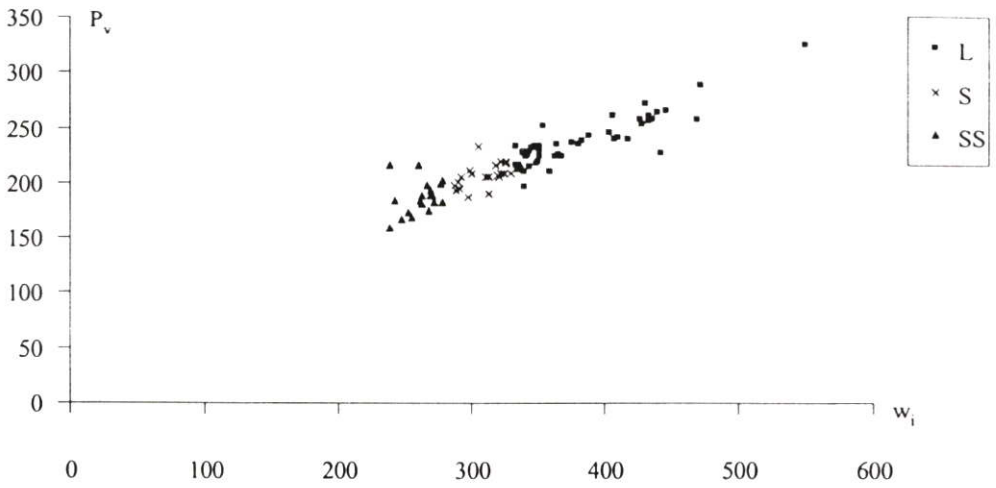
รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความหนาที่วิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับปริมาตรที่วิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับพื้นที่ผิวของวัตถุในเชิง 3 มิติที่วิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 5.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับพื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือกที่วิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ

ในการทดลองการคัดแยกขนาดจะทดสอบกับมะม่วงทั้ง 2 กลุ่ม โดยในกลุ่มแรกจะทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการใช้ลักษณะทางกายภาพที่เครื่องมือวัดได้และที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่นำเสนอคือ พื้นที่ภาพฉาย ความยาว ความกว้าง ความหนา ปริมาตร และพื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือก เป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาดโดยใช้วิธีแบบพรอพพาเกชัน ซึ่งมะม่วงกลุ่มแรกมีจำนวน 97 ผล จะถูกแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุดคือ ชุดข้อมูลการเรียนรู้ 49 ผล และชุดข้อมูลการทดสอบ 48 ผล ซึ่งผลในการคัดแยกขนาดที่ดีที่สุดของการใช้ลักษณะทางกายภาพที่เครื่องมือวัดได้โดยใช้จำนวนนิรอนในชั้นฮิคเดน 10 นิรอน มีความถูกต้อง 91.67% และผลในการคัดแยกขนาดที่ดีที่สุดโดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่นำเสนอโดยใช้จำนวนนิรอนในชั้นฮิคเดน 6 นิรอน มีความถูกต้อง 93.76% ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.12 ผลการคัดแยกขนาดมะม่วงกลุ่มที่ 1 ด้วยข้อมูลชุดทดสอบ โดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วัดได้จากเครื่องมือ

ขนาด	คัดด้วยน้ำหนัก (ผล)	คัดด้วยผลการวัดจากเครื่องมือ			ความถูกต้อง (ร้อยละ)
		SS	S	L	
SS	9	9	0	0	100.00
S	11	0	10	1	99.91
L	28	0	3	25	89.29
				เฉลี่ย	91.67

ตารางที่ 5.13 ผลการคัดแยกขนาดมะม่วงกลุ่มที่ 1 ด้วยข้อมูลชุดทดสอบ โดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่นำเสนอ

ขนาด	คัดด้วยน้ำหนัก (ผล)	คัดด้วยผลการวัดจากวิธีที่นำเสนอ			ความถูกต้อง (ร้อยละ)
		SS	S	L	
SS	9	9	0	0	100.00
S	11	1	9	1	81.82
L	28	0	1	27	96.43
				เฉลี่ย	93.76

ในการทดลองการคัดแยกขนาดของมะม่วงกลุ่มที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการใช้ผู้เชี่ยวชาญในการคัดแยกขนาด 2 คน กับการใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่นำเสนอคือ พื้นที่ภาพฉาย ความยาว ความกว้าง ความหนา ปริมาตร และพื้นที่ผิวของวัตถุในเชิง 3 มิติ เป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาดโดยใช้วิธีแบบพรอพพาเกชันเช่นกัน ซึ่งมะม่วงกลุ่มที่ 2 มีจำนวน 85 ผล จะถูกแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุดคือ ชุดข้อมูลการเรียนรู้ 43 ผล และชุดข้อมูลการทดสอบ 42 ผล ซึ่งผลในการคัดแยกขนาดของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 2 คนมีความถูกต้องเฉลี่ย 87.65% โดยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1 มีความถูกต้อง 83.53% ใช้เวลา 4 นาที 15 วินาที และผู้เชี่ยวชาญคนที่ 2 มีความถูกต้อง 91.76% ใช้เวลา 3 นาที 10 วินาที ซึ่งผลในการคัดแยกขนาดที่ดีที่สุดของทั้งกลุ่ม จากการใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่นำเสนอ โดยใช้จำนวนนิวรอนในชั้นฮิดเดน 3 นิวรอน มีความถูกต้อง 96.47% และผลในการคัดแยกขนาดที่ดีที่สุดของข้อมูลกลุ่มทดสอบ จากการใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่นำเสนอ โดยใช้จำนวนนิวรอนในชั้นฮิดเดน 3 นิวรอนเช่นกัน มีความถูกต้อง 92.86% ซึ่งในการคัดแยกขนาดจากวิธีแบบพรอพพาเกชันใช้เวลาไม่ถึง 1 วินาที (ไม่รวมเวลาในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ) โดยมีรายละเอียดดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.14 ผลการคัดแยกขนาดมะม่วงกลุ่มที่ 2 ทั้งหมดด้วยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1

ขนาด	คัดด้วยน้ำหนัก (ผล)	คัดด้วยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1			ความถูกต้อง (ร้อยละ)
		SS	S	L	
SS	27	18	9	0	66.67
S	25	0	20	5	80.00
L	33	0	0	33	100.00
				เฉลี่ย	83.53

ตารางที่ 5.15 ผลการคัดแยกขนาดมะม่วงกลุ่มที่ 2 ทั้งหมดด้วยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 2

ขนาด	คัดด้วยน้ำหนัก (ผล)	คัดด้วยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 2			ความถูกต้อง (ร้อยละ)
		SS	S	L	
SS	27	26	1	0	96.30
S	25	0	21	4	84.00
L	33	0	2	31	93.94
				เฉลี่ย	91.76

ตารางที่ 5.16 ผลการคัดแยกขนาดมะม่วงกลุ่มที่ 2 ทั้งหมด โดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่นำเสนอ

ขนาด	คัดด้วยน้ำหนัก (ผล)	คัดด้วยผลการวัดจากวิธีที่นำเสนอ			ความถูกต้อง (ร้อยละ)
		SS	S	L	
SS	27	26	1	0	96.30
S	25	1	24	0	96.00
L	33	0	1	32	96.97
				เฉลี่ย	96.47

ตารางที่ 5.17 ผลการคัดแยกขนาดมะม่วงกลุ่มที่ 2 ด้วยข้อมูลชุดทดสอบ โดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่นำเสนอ

ขนาด	คัดด้วยน้ำหนัก (ผล)	คัดด้วยผลการวัดจากวิธีที่นำเสนอ			ความถูกต้อง (ร้อยละ)
		SS	S	L	
SS	13	12	1	0	92.31
S	12	1	11	0	91.67
L	17	0	1	16	94.12
				เฉลี่ย	92.86

นอกจากนี้ได้ทำการคัดแยกขนาดโดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วัดได้จากเครื่องมือและที่วัดได้จากวิธีที่นำเสนอเป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาดโดยใช้วิธีแบบพรอพพาเกชัน เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกขนาดของแต่ละวิธี โดยทำการทดลองวิธีละ 2 ครั้ง ในการแบ่งชุดข้อมูลการเรียนรู้และชุดข้อมูลทดสอบมีอัตราส่วน 50:50 ซึ่งการทดลองในแต่ละครั้งของวิธี

หนึ่งจะทำการสุ่มจัดชุดข้อมูลการเรียนรู้และชุดข้อมูลการทดสอบคนละชุดข้อมูลกัน โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.18 เปรียบเทียบผลการคัดแยกขนาดโดยใช้วิธีแบบพรอพพาเกชัน

มะม่วง กลุ่มที่	ลักษณะทางกายภาพ ที่วัดโดย	ครั้งที่	จำนวนนิรอน ในชั้นฮิดเดน	ความถูกต้อง(%)
1	เครื่องมือ	1	10	91.67
		2	5	91.67
	วิธีที่นำเสนอ	1	6	93.75
		2	14	91.67
2	วิธีที่นำเสนอ	1	3	96.47
		2	3	97.65

5.3 ผลการคัดแยกตำหนิ

ในการวิเคราะห์การคัดแยกตำหนิจะวิเคราะห์กับมะม่วงกลุ่มที่ 1 ซึ่งเป็นมะม่วงที่มีทั้งตำหนิและไม่มีตำหนิปะปนกัน ซึ่งจากผลการทดลองในการวิเคราะห์ตำหนิโดยวิธีที่นำเสนอมีความถูกต้องทั้งหมด 90.72% ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.19 ผลการคัดแยกตำหนิของมะม่วงกลุ่มที่ 1

คัดด้วยคน (ผล)		คัดด้วยวิธีที่นำเสนอ		ความถูกต้อง (ร้อยละ)
		ผ่านเกณฑ์	ไม่ผ่านเกณฑ์	
ผ่านเกณฑ์	86	80	6	93.02
ไม่ผ่านเกณฑ์	11	4	7	63.64
			เฉลี่ย	90.72

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการโดยใช้หลักการประมวลผลภาพและคอมพิวเตอร์วิชันมาช่วยนักวิจัยทางการเกษตรในการวัดลักษณะทางกายภาพของผลิตผลทางการเกษตรทดแทนการวัดด้วยเครื่องมือ ซึ่งสามารถนำลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้มาช่วยในการคัดขนาดและคุณภาพของผลิตผลทางการเกษตร โดยผลิตผลทางการเกษตรที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างในการทดลองคือมะม่วง ซึ่งเป็นมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เบอร์ 4 แบ่งออกเป็น 3 ขนาดตามมาตรฐานการส่งออกของบริษัท Taniyama Siam คือขนาด SS ซึ่งมีน้ำหนักน้อยกว่า 280 กรัม ขนาด S ซึ่งมีน้ำหนัก 280-330 กรัม และขนาด L ซึ่งมีน้ำหนัก 331-550 กรัม จำนวนทั้งหมด 182 ผล โดยในการทดลองจะแบ่งมะม่วงออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกจำนวน 97 ผล จะนำมาใช้ในการทดลองเพื่อ 3 วัตถุประสงค์คือ เพื่อเปรียบเทียบการวัดลักษณะทางกายภาพระหว่างการใช้เครื่องมือกับวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกขนาดโดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วัดได้จากเครื่องมือและที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ เป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาด และเพื่อทดสอบความถูกต้องในการคัดแยกค้ำหนั ส่วนมะม่วงกลุ่มที่สองจะทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกขนาดระหว่างผู้เชี่ยวชาญ 2 คนกับการใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอเป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาด

ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทดลองที่วิเคราะห์โดยใช้วิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ ซึ่งจะทำการเก็บภาพของมะม่วงทั้งหมด โดยมะม่วง 1 ผลจะเก็บภาพในมุมมองที่แตกต่างกัน เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ โดยลักษณะทางกายภาพที่สามารถวิเคราะห์ได้คือ พื้นที่ภาพฉาย ความยาว ความกว้าง ความหนา สี ปริมาตร พื้นที่ผิวของวัตถุในเชิง 3 มิติ พื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือก และค้ำหนั จากนั้นจะนำลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้นั้นมาใช้ในการคัดแยกขนาดและคัดแยกค้ำหนั ในส่วนที่สองเป็นการทดลองการทำงานโดยคนกับการใช้เครื่องมือวัด โดยในการทดลองกับมะม่วงกลุ่มที่ 1 จะนำมาวัดลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่องมือต่างๆ โดยลักษณะทางกายภาพที่สามารถวัดได้คือ พื้นที่ภาพฉาย ความยาว ความกว้าง ความหนา ปริมาตร พื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือก และค้ำหนั และในการทดลองกับมะม่วงกลุ่มที่ 2 จะนำมาคัดแยกขนาดโดยใช้ผู้เชี่ยวชาญ 2 คน ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการวิจัย

6.1.1 การวัดลักษณะทางกายภาพ

ในการวัดลักษณะทางกายภาพนั้นไม่สามารถหาคำตอบที่แน่ชัดได้ว่าผลการวัดด้วยเครื่องมือหรือด้วยวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอ นั้น วิธีการไหนจะให้ความแม่นยำถูกต้องมากกว่ากัน เพราะไม่สามารถใช้วิธีการใดเป็นข้อมูลที่แท้จริงมาเปรียบเทียบได้ และในการวัดด้วย 2 วิธีนี้สามารถให้ค่าคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ถูกต้องแท้จริงได้ เนื่องจากการวัดด้วยเครื่องมืออาจมีความผิดพลาดได้จากตัวผู้วัดเช่น ทักษะ ความชำนาญ ความเมื่อยล้า หรือวิธีในการวัด เป็นต้น ส่วนวิธีที่นำเสนอก็อาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้เช่น จากขั้นตอนของการแยกส่วนของวัตถุออกจากพื้นหลัง เพราะจะเป็นสาเหตุเบื้องต้นทำให้ในการนำภาพไปวิเคราะห์ต่อไปนั้นมีความผิดพลาดได้ เป็นต้น

จากผลการทดลองในการวัดลักษณะทางกายภาพคือ พื้นที่ภาพฉาย ความยาว ความกว้าง ความหนา และพื้นที่ผิวของภาพสแกนเปลือก เมื่อพิจารณาถึงค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าที่แสดงค่าโดยรวมของกลุ่มข้อมูลและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการกระจายของข้อมูล ผลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีที่นำเสนอนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันแล้วจะเห็นว่ามี ความแตกต่างกันไม่มากนัก ส่วนในการวัดปริมาตรจะเห็นว่าค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีที่นำเสนอนั้นมีค่ามากกว่าการวัดด้วยเครื่องมือ เนื่องจากในการถ่ายภาพจะถ่ายด้วย 4 มุมภาพ และใช้ความละเอียดของภาพที่ 1 ล้านพิกเซล ทำให้ปริมาตรของวัตถุที่ได้มีความหนาและขนาดมากกว่าวัตถุจริง ซึ่งถ้ามีการใช้จำนวนมุมภาพมากขึ้นหรือใช้ความละเอียดของภาพมากขึ้นจะทำให้ปริมาตรของวัตถุที่ได้มีความใกล้เคียงกับปริมาตรที่วัดได้จากเครื่องมือมากขึ้น

ในการวิเคราะห์สีของแต่ละส่วนของผลมะม่วงจะเห็นว่าขนาดมะม่วงที่แตกต่างกันในส่วนพื้นที่เดียวกันมีค่าเฉลี่ยของสีที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นสีจะไม่มีความสัมพันธ์ต่อขนาด เนื่องจากเป็นมะม่วงที่มีอายุการเก็บเกี่ยวชุดเดียวกัน

ดังนั้นในการวัดลักษณะทางกายภาพแสดงให้เห็นว่าในการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอนั้น มีความแม่นยำใกล้เคียงกับการวัดด้วยเครื่องมือเป็นอย่างมาก และทำให้วิธีในการวัดลักษณะทางกายภาพนั้นสะดวกรวดเร็ว ไม่มีความยุ่งยากในการเตรียมเครื่องมือการวัด และไม่ต้องใช้แรงงานคนจำนวนมาก

6.1.2 การคัดแยกขนาด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะใช้พื้นที่ภาพฉายเป็นคุณสมบัติในการนำมาคัดแยกขนาด ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของลักษณะทางกายภาพในเชิง 3 มิติเช่น ปริมาตร มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของลักษณะทางกายภาพในเชิง 2 มิติเช่น พื้นที่ภาพฉาย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะทางกายภาพในเชิง 3 มิติจะมี

ความสัมพันธ์กับน้ำหนักมากกว่าลักษณะทางกายภาพในเชิง 2 มิติ ดังนั้นถ้าได้นำลักษณะทางกายภาพในเชิง 3 มิติมาใช้เป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาดก็จะทำให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงการคัดแยกขนาดของมะม่วงกลุ่มที่ 1 โดยใช้วิธีแบคพรอพพาเกชัน จากการใช้ลักษณะทางกายภาพที่วัดได้จากเครื่องมือและที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอเป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาด จะเห็นว่าค่าความถูกต้องโดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่นำเสนอมีความถูกต้อง 93.76% ซึ่งมากกว่าการใช้ลักษณะทางกายภาพที่วัดได้จากเครื่องมือที่มีความถูกต้อง 91.67%

เมื่อพิจารณาถึงการคัดแยกขนาดของมะม่วงกลุ่มที่ 2 โดยคัดแยกขนาดจากผู้เชี่ยวชาญ 2 คนที่มีประสบการณ์มากกว่า 20 ปีและการใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอเป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาดโดยใช้วิธีแบคพรอพพาเกชัน จะเห็นว่าการใช้ผู้เชี่ยวชาญ 2 คนในการคัดแยกขนาดก็มีค่าความถูกต้องและใช้เวลาที่แตกต่างกันคือผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1 มีความถูกต้อง 83.53% ใช้เวลา 4 นาที 15 วินาที และผู้เชี่ยวชาญคนที่ 2 มีความถูกต้อง 91.76% ใช้เวลา 3 นาที 10 วินาที โดยมีค่าความถูกต้องเฉลี่ย 87.65% ซึ่งน้อยกว่าค่าความถูกต้องในการคัดแยกขนาดโดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้จากวิธีที่นำเสนอเป็นคุณสมบัติในการคัดแยกขนาดที่มีความถูกต้อง 96.47% และในการคัดแยกขนาดโดยใช้วิธีแบคพรอพพาเกชันจะใช้เวลาไม่ถึง 1 วินาที (ไม่รวมเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ)

แสดงให้เห็นว่าในการคัดแยกขนาดโดยใช้ลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์จากวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอมีความถูกต้องและรวดเร็วมากกว่าการใช้แรงงานคน และไม่ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญจำนวนมากในการทำงาน

หากวิเคราะห์ถึงวิธีในการคัดแยกขนาดนั้นอาจมีข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นคือ ผลที่ได้จากการวัดลักษณะทางกายภาพทั้งจากการวัดด้วยเครื่องมือหรือการวัดด้วยวิธีที่นำเสนอ และโครงข่ายประสาทเทียมแบบแบคพรอพพาเกชันยังมีส่วนทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้ด้วยเช่นกัน ดังผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 5.18 จะเห็นว่ามีผลการทดลองที่ให้ค่าความถูกต้องในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน เนื่องจากได้มีการใช้ชุดข้อมูลในการเรียนรู้ที่แตกต่างกัน จึงมีส่วนทำให้ความถูกต้องในการคัดแยกขนาดกับชุดข้อมูลทดสอบแตกต่างกันไปด้วย แสดงว่าในการคัดแยกขนาดโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแบคพรอพพาเกชันอาจทำให้ผลผิดพลาดขึ้นได้ เกิดจากชุดข้อมูลที่ได้นำมาใช้ในการเรียนรู้อาจมีคุณสมบัติไม่ครอบคลุมพอกับกลุ่มข้อมูลทั้งหมด

6.1.3 การคัดแยกคําหนิ

จากผลการทดลองในการคัดแยกคําหนิโดยการใช้วิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอมีความถูกต้อง 90.72% ซึ่งจากผลการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กรณีดังที่ได้แสดง โดยวิธีที่นำเสนอสามารถวิเคราะห์ถูกต้องได้ทั้งกรณีที่เป็นมะม่วงที่ผ่านเกณฑ์และไม่ผ่านเกณฑ์ ส่วนกรณี

ที่เกิดความผิดพลาดคือ กรณีที่เป็นมะม่วงที่ผ่านเกณฑ์แต่หลักการของคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ว่าไม่ผ่านเกณฑ์ ซึ่งกรณีนี้ความผิดพลาดนั้นเกิดขึ้นจากผลการแยกส่วนของมะม่วงออกจากพื้นหลัง โดยพิจารณาจากค่าฮิว เนื่องจากเป็นส่วนของมะม่วงแต่มีค่าฮิวที่อยู่นอกขอบเขตแบบจำลองค่าฮิวของส่วนมะม่วงที่กำหนด และการกำหนดเส้นขอบให้กับขอบเขตของมะม่วงที่มีความคลาดเคลื่อน และอีกกรณีที่มีความผิดพลาดคือเป็นมะม่วงที่ไม่ผ่านเกณฑ์แต่วิธีที่นำเสนอวิเคราะห์ว่าผ่านเกณฑ์ ซึ่งกรณีนี้ความผิดพลาดนั้นเกิดขึ้นจากผลการแยกส่วนของมะม่วงออกจากพื้นหลังเช่นกัน เนื่องจากเป็นส่วนที่เป็นดำนิแต่มีค่าฮิวที่อยู่ภายในขอบเขตแบบจำลองค่าฮิวของส่วนมะม่วงที่กำหนด

6.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป

6.2.1 ในการถ่ายภาพของวัตถุนั้นควรมีการควบคุมคุณภาพในการถ่ายภาพที่ดีเช่นคุณภาพของกล้องในการปรับโฟกัสเพื่อถ่ายวัตถุในระยะใกล้ให้คมชัด ทิศทางของแสงที่ตกกระทบวัตถุเพื่อไม่ทำให้เกิดเงาของวัตถุนั้นภาพ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ภาพถ่ายที่ได้เหมาะในการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

6.2.2 ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพในเชิง 3 มิตินั้น ถ้าในการถ่ายภาพมีการใช้ความละเอียดของภาพสูงและใช้จำนวนมุมภาพที่ครอบคลุมวัตถุจำนวนมากขึ้น จะทำให้ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับวัตถุจริงมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

กรมส่งเสริมทางการเกษตร. 2548. [Online]. Available : <http://www.doac.go.th>.

ก่อเกียรติ จรัสวิชรกุล และคณิตพงษ์ แซ่ก่อง. 2538. “เครื่องคัดความสูงแก่ของมะม่วง.”

วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการเกษตร บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

จรัญ จันทลักษณ์ และอนันต์ชัย เขื่อนธรรม. 2529. สถิติเบื้องต้นแบบประยุกต์. พิมพ์ครั้งที่ 2
กรุงเทพฯ : ไทยวัฒนาพานิช.

จินดารัตน์ จันทอุปพี. 2547. “การทำนายข้อมูลอนุกรมเวลาโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ
ซิมพลิไฟด์พีซซี้อาทเมพและแบคพรอพพาเกชั่น.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง.

นพพล อรุณยะเดช. 2545. “การวิเคราะห์ความแก่ของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง โดยใช้เทคนิคการ
ประมวลผลภาพ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บัณฑิต จริโมภาส, พันศักดิ์ ศิริรัชตพงษ์, ธนิตย์ ชัยยะบุญธนิตย์ และสุทธิพร นิยมหอม. 2534.
“เครื่องคัดขนาดมะม่วงด้วยระบบแปรรูปภาพ.” วิทยาสารเกษตรศาสตร์ สาขาวิทยา
ศาสตร์. 25(3) : 333-344.

ปานมนัส ศิริสมบูรณ์, พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และสาทิป รัตนภาสกร. 2538. สมบัติทางกายภาพ
และวิศวกรรมของซีวัสตุ. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง.

ปราโมทย์ เฉชะอำไพ. 2544. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.

ปุลณรัตน์ พิชญ์ไพบุลย์. 2542. Computer Graphics สำหรับนักออกแบบ. กรุงเทพฯ : จุฬาลง
กรณ์มหาวิทยาลัย.

พรพล สครินทร์ และกฤษฎา แก้วมณี. 2521. 3D Graphics. กรุงเทพฯ : ชัดเชส มีเดีย.

พีระ เลียวประเสริฐพร. 2544. “การลดข้อมูลโดยการแปลงเวฟเลตเพื่อใช้ในการประมาณพื้นผิวเชิง
ปริมาตร.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

พูนพัฒน์ พูนน้อย และอัมพวัน ต้นสกุล. 2548. “เครื่องคัดคุณภาพมะม่วงระบบแมชชีนวิชัน.”
วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 28(1) : 43-58.

ขลรวี คำนทิวาร์กษ. 2546. “การออกแบบระบบคัดขนาดผลผลิตผลเกษตรด้วยกล้องถ่ายภาพ.”

โครงการวิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตร
ศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

ล้วน สายยศ และอังคณา สายยศ. 2540. สถิติวิทยาทางการวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ :
สุวีริยาสาส์น.

ฤดีกร ทับทิมทอง. 2532. “การคัดเลือกมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เพื่อการส่งออกโดยการลอยในน้ำ
เกลือ.” ปัญหาพิเศษปริญญาตรี ภาควิชาพืชสวน เกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมพัฒน์ รุ่งตะวันเรืองศรี. 2521. เรียนรู้คอมพิวเตอร์กราฟิกส์ 2 มิติด้วยภาษา C. กรุงเทพฯ :
เอช.เอ็น.กรุ๊ป.

สันต์ มีผูก. 2534. “พัฒนาเครื่องคัดขนาดมะม่วงด้วยระบบแปรรูปภาพ.” โครงการวิศวกรรม
ศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สิทธิชัย บุญหมั่น. 2540. “การสร้างภาพใบนารีของภาพเอกสารโดยการจำแนกส่วนของข้อความ
และภาพถ่าย.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และ
เทคโนโลยีสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง.

สุพจน์ จันทร์วิพัฒน์. 2541. “การสร้างภาพ 3 มิติจากลำดับของข้อมูลภาพตัดขวางโดยใช้วิธี
พิจารณาจากเวกเตอร์ปกติของพื้นผิว.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง.

อลงกรณ์ ธรรมบุตร. 2548. “การวิเคราะห์ความแก่ของผลทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยใช้เทคนิค
การประมวลผลภาพที่ก้านผล.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรม
ไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อะไฉ่ จันทเนตร, สุกัญญา ศรีสุเทพ และวิจิตรา บุรพพงยานนท์. 2540. “เครื่องเก็บข้อมูลภาพ 3
มิติ.” ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อุดมศักดิ์ กิจทวี่. 2547. “การรับรู้ความแน่นอนของผลมะม่วงภายใต้การกระทำกระแทก.” วิทยา
นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการเกษตร บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์.

Babis, G. 2004. **Computer Vision**. [Online]. Available :

<http://www.cse.unr.edu/~bebis/CS791E>.

Bouguet, J. Y. 2005. **Camera Calibration Toolbox for Matlab**. [Online]. Available:

http://www.caltech.edu/bouguetj/calib_doc.

- Castleman, K. R. 1996. **Digital Image Processing**. Prentice Hall.
- Chapra, S. C. and Canale, R. P. 1988. **Numerical Methods for Engineers**. 2nd Ed. Singapore : McGraw-Hill.
- Cunha, J. B. 2003. "Application of Image Processing Techniques in the Characterization of Plant Leafs." **Proc. IEEE Intl' Symposium on Industrial Electronics**.
- Dave, S. and Runtz, K. 1995. "Image Processing Methods for Identifying Species of Plants." **Proc. IEEE WESCANEX'95**.
- Eisert, P., Steinbach, E. and Girod, B. 1999. "Multi-Hypothesis, Volumetric Reconstruction of 3-D Objects from Multiple Calibrated Camera Views." **ICASSP'99**. pp. 3509-3512.
- Eisert, P. 2001. **Reconstruction of Volumetric 3D Models**. [Online]. Available: <http://iphome.hhi.de/eisert>.
- Emanuele, T. And Alessandro, V. 1998. **Introductory Techniques for 3-D Computer Vision**. Prentice Hall.
- Gejima, Y., Zhang, H. and Nagata, M. 2003. "Judgement on Level of Maturity for Tomato Quality Using L*a*b* Color Image Processing." **Proc. the 2003 IEEE/ASME Intl' Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003)**.
- Glass, G. V. and Hopkins, K. D. 1996. **Statistical Methods in Education and Psychology**. 3th Ed. USA.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. 1992. **Digital Image Processing**. Addison-Wesley.
- Hartley, R. and Zisserman, A. 2003. **Multiple View Geometry in Computer Vision**. 2nd Ed. Cambridge : University Press.
- Jain, R., Kasturi, R., and Schunck, G. B. 1995. **Machine Vision**. Singapore : McGraw-Hill.
- Kaufman, A., Cohen, D. and Yagel, R. 1993. "Volume Graphics." **IEEE Computer**. vol26 : 51-64.
- Kim, C. S. and Lee, S. U. 2002. "Compact Encoding of 3-D Voxel Surfaces Based on Pattern Code Representation." **IEEE Transactions on Image Processing**. 8(11).
- Kimura, M., Saito, H. and Kanade, T. 1999. "3D Voxel Construction based on Epipolar Geometry." **Proc. the 1999 Intl' Conf. on Image Processing**. vol3 : 135-139.
- Krishnamurthy, N. 2002. **Introduction to Computer Graphics**. Singapore : Tata McGraw-Hill.

Kuzu, Y. and Sinram, O. 2003. "Volumetric Reconstruction of Cultural Heritage Artifacts."

CIPA Heritage Documentation.

Loannis, P. 1993. **Digital Image Processing Algorithms.** Prentice Hall.

Lohmann, G. 1998. **Volumetric Image Analysis.** Great Britain : Biddles.

Mai, L. H. 2005. **Color Representation.** [Online]. Available :

<http://www.netnam.vn/unescocourse/computervision/12.htm>.

Mulayim, A. Y., Yilmaz, U. and Atalay, V. 2003. "Silhouette-based 3D Model Reconstruction

From Multiple Images." **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics,**

Part B. pp. 1-10.

Njoroge, J. B., Ninomiya K., Kondo N. and Toita, H. 2002. "Automated Fruit Grading System

using Image Processing." **Proc. SICE Annual Conference (SICE2002), Japan.**

Runtz, K. J. 1991. "Electronic Recognition of Plant Species for Machine Vision Sprayer Control

Systems." **Proc. IEEE Western Canada Conference on Computer, Power, and**

Communication Systems in a Rural Environment (WESCANEX'91). pp. 84-88.

Stein, S. K. and Barcellos, A. 1992. **Calculus and Analytic Geometry.** Von Hoffmann

Press.

Takahashi, Y., Ogawa, J. and Saeki, K. 2001. "Automatic Tomato Picking Robot System with

Human Interface using Image Processing." **IECON'01 : The 27th Annual Conference**

Of the IEEE Industrial Electronics Society.

Vasquez-Caicedo, A. L., Neidhart, S., Pathomrungsinyounggul, P., Wiriyaacharee, P.,

Chatracul, A., Sruamsiri, P., Manochai, P., Bangerth, F. and Carle, R. 2002. "Physical,

Chemical, and Sensory Properties of Nine Thai Mango Cultivars and Evaluation of their

Technological and Nutritional Potential." **Proc. Intl'. Symposium Sustaining Food**

Security and Managing Natural Resources in Southeast Asia, Thailand.

Wada, T., Wu, X., Tokai, S. and Matsuyama, T. 2000. "Homography Based Parallel Volume

Intersection: Toward Real-Time Volume Reconstruction Using Active Cameras."

Fifth IEEE International Workshop on Computer Architectures for Machine

Perception (CAMP'00). pp. 331-340.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
ลักษณะทางกายภาพ

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติทางกายภาพมะม่วงกลุ่มที่ 1 โดยการวัดจากเครื่องมือ

ชื่อ	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ ภาพฉาย (ตร.ซม.)	พื้นที่ เปลือก (ตร.ซม.)
L1	442.09	15.62	8.08	7.15	432.18	108.60	229.20
L2	417.62	14.64	7.96	7.07	403.55	104.90	243.00
L3	407.70	15.14	7.86	7.11	392.48	102.10	224.30
L4	410.25	14.44	8.20	6.92	394.98	103.50	245.70
L5	436.42	15.11	8.16	7.33	420.93	107.60	264.90
L6	428.81	15.11	8.08	7.23	411.00	110.00	256.80
L7	432.91	16.08	7.85	7.27	466.51	110.30	265.50
L8	549.40	18.12	8.53	7.43	538.46	138.00	328.70
L9	468.83	15.53	8.28	7.43	458.84	113.40	263.80
L10	471.98	16.87	7.97	7.13	459.13	118.60	290.70
L11	445.52	14.87	8.99	7.37	428.36	108.20	267.90
L12	433.25	16.00	7.84	7.09	419.91	111.30	263.00
L13	430.43	15.44	8.10	6.85	419.96	110.00	276.00
L14	404.28	14.69	8.01	6.94	389.74	104.60	243.80
L15	406.68	15.85	7.66	7.01	400.70	108.30	256.90
L16	439.37	16.28	7.93	7.04	429.38	113.90	260.60
L17	427.50	15.38	7.99	7.22	407.81	98.90	259.60
L18	350.69	14.51	7.56	6.58	343.98	94.80	230.80
L19	367.49	14.75	7.58	6.63	361.17	100.80	216.50
L20	365.12	14.20	7.62	6.62	354.34	98.10	229.00
L21	380.33	15.59	7.64	6.69	371.42	104.30	236.30
L22	388.00	13.57	7.98	7.03	375.49	98.80	235.40
L23	353.88	14.56	7.23	6.38	342.43	95.90	217.00
L24	350.64	14.62	7.49	6.52	339.93	96.70	222.40

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

ชื่อ	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ ภาพฉาย (ตร.ซม.)	พื้นที่ เปลือก (ตร.ซม.)
L25	351.57	14.99	7.51	6.56	341.08	98.20	230.00
L26	383.57	14.33	7.40	7.05	369.87	97.20	239.40
L27	364.13	16.11	7.18	6.38	355.45	104.10	234.90
L28	358.46	13.71	7.52	6.63	346.65	92.70	213.30
L29	351.59	14.94	7.46	6.40	337.48	99.50	205.10
L30	362.54	15.61	7.30	6.52	349.53	100.10	226.10
L31	375.59	14.32	7.67	6.96	363.18	98.40	244.90
L32	339.31	14.78	7.22	6.33	328.18	86.30	213.10
L33	340.60	15.14	7.54	6.34	335.80	98.70	221.80
L34	336.31	13.41	7.30	6.95	324.81	87.60	213.20
L35	338.34	15.73	6.94	6.41	328.94	96.80	227.80
L36	334.75	14.80	7.40	6.08	323.43	98.80	215.80
L37	348.09	13.99	7.52	6.58	336.98	96.30	239.50
L38	344.88	14.80	7.41	6.43	330.82	94.80	236.30
L39	341.23	14.60	7.47	6.46	342.04	95.90	227.60
L40	344.13	14.44	7.59	6.52	332.91	94.30	226.90
L41	334.96	14.90	7.11	6.47	323.48	93.70	220.10
L42	336.05	14.18	7.36	6.62	318.77	91.00	219.90
L43	336.56	14.38	7.33	6.52	322.32	93.20	219.10
L44	339.31	14.16	7.44	6.52	327.12	95.10	227.70
L45	349.15	14.53	7.72	6.51	339.21	93.00	237.70
L46	344.11	14.99	7.29	6.46	332.77	96.60	214.10
L47	350.40	13.99	7.43	6.76	336.83	93.00	221.90
L48	341.95	14.27	7.33	6.46	327.62	96.00	228.10
L49	340.05	13.53	7.32	6.67	324.81	89.20	195.90
L50	348.18	14.62	7.43	6.53	334.59	95.40	220.00
L51	347.15	14.22	7.27	6.39	332.36	95.00	232.60

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

ชื่อ	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ ภาพฉาย (ตร.ซม.)	พื้นที่ เปลือก (ตร.ซม.)
L52	333.80	15.35	6.97	6.37	323.91	95.90	231.90
L53	334.16	14.26	7.28	6.65	323.45	93.10	212.00
L54	333.20	13.97	7.41	6.46	325.19	91.20	220.10
L55	334.20	13.96	7.37	6.47	321.56	91.10	204.10
S1	321.49	14.75	7.13	6.12	311.48	94.00	222.60
S2	309.67	13.84	7.07	6.35	298.33	86.50	202.10
S3	319.44	13.79	7.30	6.39	307.21	89.40	211.70
S4	321.01	14.18	6.93	6.38	310.11	87.50	199.80
S5	299.98	14.18	7.21	6.04	252.91	88.30	205.20
S6	288.55	14.00	6.96	6.25	280.52	84.50	192.90
S7	321.59	14.02	7.36	6.49	310.06	87.90	210.20
S8	298.82	14.04	6.97	6.30	287.94	86.10	212.30
S9	319.67	14.24	7.32	6.37	310.97	90.00	212.50
S10	289.53	12.51	7.29	6.33	278.00	79.50	220.70
S11	329.38	14.53	7.20	6.37	315.77	92.70	216.00
S12	291.81	13.64	6.95	6.30	283.16	83.40	210.00
S13	312.22	13.68	7.11	6.37	299.18	86.80	210.80
S14	305.65	13.49	7.24	6.25	294.66	87.90	208.30
S15	313.16	13.47	7.22	6.33	299.58	86.90	190.30
S16	317.68	14.01	7.18	6.59	306.30	91.10	222.40
S17	298.06	14.50	6.97	6.20	289.91	89.80	187.70
S18	287.03	12.61	6.95	6.21	275.07	81.50	201.30
S19	325.19	14.62	7.13	6.32	312.59	95.40	239.90
S20	324.10	14.35	7.08	6.30	316.06	92.30	210.40
S21	291.64	13.22	7.35	6.14	283.84	85.10	195.50
S22	321.12	13.88	7.23	6.31	302.34	90.40	205.10
S23	325.19	14.71	7.21	6.49	316.16	90.20	220.00

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

ชื่อ	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ ภาพฉาย (ตร.ซม.)	พื้นที่ เปลือก (ตร.ซม.)
SS1	276.80	12.79	7.01	6.24	268.61	79.20	195.00
SS2	261.70	13.67	6.56	6.88	251.30	77.60	181.60
SS3	263.18	14.34	6.70	5.66	259.27	83.80	178.80
SS4	270.12	13.98	6.72	5.94	261.63	80.40	189.00
SS5	269.65	14.14	6.80	5.87	262.25	83.40	191.90
SS6	269.54	13.36	6.84	6.01	258.72	78.30	198.40
SS7	247.13	12.55	6.68	6.02	239.74	72.70	169.70
SS8	266.08	14.15	6.72	5.92	259.32	81.90	207.90
SS9	254.83	12.22	7.07	6.05	242.81	77.00	175.50
SS10	260.68	13.16	6.84	6.07	250.99	77.40	221.60
SS11	252.06	13.72	6.65	5.66	243.68	78.60	168.40
SS12	262.69	13.01	6.91	6.15	252.62	76.40	194.30
SS13	238.06	11.60	6.69	5.91	224.02	61.20	176.60
SS14	239.07	14.66	7.31	6.52	318.54	93.70	222.40
SS15	271.67	12.72	6.93	6.21	260.91	76.80	195.00
SS16	268.37	12.32	6.88	6.21	256.41	74.60	182.40
SS17	242.29	13.24	6.72	5.83	238.17	75.70	193.00
SS18	278.75	14.45	6.72	6.01	269.84	84.50	202.20
SS19	277.59	13.33	6.97	6.00	265.84	81.10	181.00

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติทางกายภาพมะม่วงกลุ่มที่ 1 โดยการวิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ

ชื่อ	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	พื้นที่ ภาพฉาย (ตร.ซม.)	พื้นที่ เปลือก (ตร.ซม.)
L1	15.76	8.98	6.87	475.57	473.20	106.21	227.32
L2	16.80	9.24	6.69	435.56	443.68	112.87	239.34
L3	15.44	8.80	6.67	428.26	446.06	100.80	240.61
L4	15.93	8.76	6.44	434.64	446.48	99.82	241.17
L5	16.07	9.36	6.62	464.37	466.32	108.36	258.91
L6	16.18	9.56	6.53	448.35	459.38	113.06	254.10
L7	17.73	9.13	6.47	500.40	492.04	114.48	261.36
L8	19.62	9.87	6.71	602.09	561.44	142.24	327.37
L9	17.20	9.56	6.78	602.09	561.44	119.58	258.49
L10	17.58	8.67	6.13	502.01	501.90	114.45	289.36
L11	15.60	9.02	6.20	468.69	468.60	104.45	266.93
L12	16.31	8.82	6.04	462.71	472.84	106.56	257.55
L13	16.04	8.91	5.82	457.03	462.78	105.53	271.80
L14	15.04	9.00	5.91	429.09	445.32	100.63	245.80
L15	16.78	8.47	5.96	432.72	457.34	104.51	261.89
L16	17.29	8.67	6.09	472.86	482.86	108.91	265.02
L17	16.13	8.62	6.09	444.29	459.20	102.75	258.57
L18	15.24	8.29	6.04	373.31	404.32	92.83	230.67
L19	15.58	8.38	6.40	402.82	423.96	96.21	225.12
L20	15.13	8.91	6.04	389.06	414.18	101.40	226.86
L21	16.78	8.73	6.16	402.99	429.44	106.78	236.09
L22	15.22	9.29	6.38	414.96	431.06	103.68	242.83
L23	15.91	8.47	5.78	373.19	406.50	100.47	251.75
L24	15.44	8.82	6.09	371.07	405.88	99.92	220.43
L25	16.40	8.51	5.93	373.47	408.70	101.38	234.30
L26	15.09	8.29	6.02	405.65	425.40	92.68	237.73
L27	17.18	7.84	5.67	372.35	421.68	97.21	235.32

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

ชื่อ	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	พื้นที่ ภาพฉาย (ตร.ซม.)	พื้นที่ เปลือก (ตร.ซม.)
L28	14.44	8.42	5.80	376.70	403.80	90.41	210.85
L29	15.51	8.20	5.62	367.41	405.88	93.40	224.41
L30	16.36	7.98	5.69	377.92	416.00	95.84	224.04
L31	14.82	8.47	5.82	392.78	418.90	93.17	237.42
L32	15.31	8.11	6.09	364.75	401.56	91.18	210.51
L33	16.73	8.49	5.67	364.64	404.00	102.40	225.06
L34	14.58	8.40	6.33	352.60	385.66	90.07	214.61
L35	16.78	8.02	5.82	359.54	403.92	99.01	227.32
L36	16.16	8.44	5.40	353.72	397.54	102.08	215.76
L37	15.51	8.82	5.89	369.05	401.06	100.71	233.82
L38	16.02	8.38	5.93	360.83	398.40	99.24	231.72
L39	15.98	8.47	5.87	371.74	403.80	100.66	224.51
L40	14.98	8.29	5.60	361.42	399.74	89.40	228.52
L41	15.16	7.93	5.53	352.41	394.78	89.37	216.55
L42	14.80	8.16	5.69	348.26	389.68	87.05	216.26
L43	14.93	8.09	5.62	352.28	392.52	88.84	214.26
L44	15.56	8.29	6.71	353.72	392.78	95.78	228.71
L45	15.82	8.73	5.96	369.67	402.60	99.80	232.75
L46	16.44	8.40	5.89	364.75	403.22	99.95	215.16
L47	14.73	8.09	5.62	368.23	399.24	88.48	220.43
L48	14.93	8.16	5.71	355.54	396.08	90.71	226.71
L49	14.04	8.00	5.71	353.15	385.12	85.01	196.13
L50	15.47	8.09	5.67	359.07	400.86	90.85	218.49
L51	14.73	8.11	5.73	361.17	397.82	89.63	234.38
L52	16.27	7.69	6.04	359.43	399.42	91.16	233.87
L53	15.51	8.27	6.00	349.94	389.24	94.44	213.89
L54	14.78	8.04	5.53	350.94	389.86	87.53	217.13

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

ชื่อ	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	พื้นที่ ภาพฉาย (ตร.ซม.)	พื้นที่ เปลือก (ตร.ซม.)
L55	14.60	8.22	5.69	351.34	393.64	88.75	212.93
S1	15.22	7.80	5.84	341.17	382.84	88.10	219.60
S2	14.64	7.73	5.93	331.05	372.04	82.68	206.29
S3	14.82	8.33	5.82	337.48	376.42	92.60	207.67
S4	15.67	7.78	5.78	336.08	378.20	91.55	206.22
S5	15.11	8.16	5.64	316.68	366.52	90.29	208.63
S6	14.93	7.96	5.76	311.56	361.94	87.36	193.94
S7	15.31	8.49	5.91	338.85	378.96	91.78	208.80
S8	15.11	8.07	5.98	326.65	375.78	89.37	211.41
S9	14.78	7.93	5.53	336.80	380.80	84.30	207.09
S10	13.33	7.93	5.40	304.42	350.90	78.15	201.88
S11	14.89	7.98	5.44	345.60	388.38	88.05	209.22
S12	14.33	7.56	5.40	308.03	356.54	79.21	206.18
S13	14.09	7.73	5.73	325.64	371.10	81.39	206.20
S14	14.29	7.87	5.33	320.12	365.08	83.68	233.63
S15	14.11	7.71	5.64	326.76	369.40	81.64	189.78
S16	14.69	7.98	5.69	335.90	381.52	85.94	217.44
S17	15.29	7.64	5.38	317.73	373.28	85.16	187.56
S18	14.33	7.82	6.73	297.03	348.30	83.85	198.36
S19	15.62	7.76	5.51	338.07	384.90	88.68	218.56
S20	15.31	7.53	5.51	339.36	381.20	87.02	208.43
S21	14.87	8.36	5.64	310.79	358.48	89.23	195.78
S22	15.29	8.27	5.71	329.50	376.78	93.79	205.94
S23	15.80	8.11	5.98	348.48	392.55	93.29	220.38
SS1	12.84	8.02	5.89	295.11	343.70	76.39	199.47
SS2	14.27	7.04	5.64	273.75	331.96	73.49	184.21
SS3	15.60	7.53	5.31	286.93	344.78	87.12	181.28

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

ชื่อ	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	พื้นที่ ภาพฉาย (ตร.ซม.)	พื้นที่ เปลือก (ตร.ซม.)
SS4	14.58	7.71	5.40	286.79	341.34	83.21	188.42
SS5	15.22	7.76	5.20	283.83	341.54	86.06	189.53
SS6	13.84	7.82	5.58	284.28	339.66	81.60	193.86
SS7	13.11	7.18	5.24	257.10	316.62	69.20	167.55
SS8	13.96	7.49	5.18	284.74	342.82	76.39	198.12
SS9	12.69	7.71	5.18	264.31	320.16	71.23	169.01
SS10	13.40	7.53	5.33	274.80	332.36	73.43	217.48
SS11	13.71	7.27	4.93	267.32	331.52	75.35	173.45
SS12	13.60	7.42	5.36	279.47	335.02	72.34	188.55
SS13	11.98	7.13	5.13	240.41	297.22	63.11	158.98
SS14	14.84	7.93	5.60	348.62	392.74	88.12	216.37
SS15	13.36	7.53	5.47	278.61	334.54	73.32	182.47
SS16	12.80	7.36	5.49	273.72	326.88	70.00	175.72
SS17	14.62	7.49	6.29	252.87	319.38	77.27	185.00
SS18	15.51	7.69	5.53	296.96	351.72	87.39	203.17
SS19	13.87	7.49	5.31	289.72	343.16	76.43	182.42

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติทางกายภาพมะม่วงกลุ่มที่ 2 โดยการวิเคราะห์จากวิธีที่น่าเสนอ

ชื่อ	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	พื้นที่ ภาพฉาย (ตร.ซม.)
L1	16.93	8.82	6.33	469.08	476.40	110.35
L2	17.73	8.58	6.42	476.39	485.92	113.10
L3	15.58	8.38	6.31	404.28	429.84	96.25
L4	15.91	8.89	6.31	443.89	457.16	103.94
L5	17.40	8.62	6.22	408.17	433.72	108.38
L6	15.49	8.27	6.20	349.37	388.76	94.78
L7	16.07	8.22	5.89	342.52	382.46	97.77
L8	16.96	8.36	5.89	365.30	409.84	105.27
L9	15.73	8.69	6.13	370.97	404.26	99.04
L10	16.58	8.04	6.27	363.73	400.46	98.43
L11	16.42	8.02	5.98	347.05	389.40	96.24
L12	15.24	8.42	6.42	362.77	395.42	95.62
L13	15.47	8.38	6.18	341.97	384.70	93.72
L14	16.82	7.96	5.89	348.27	390.44	97.12
L15	16.78	8.47	6.00	374.50	409.00	104.14
L16	15.80	8.36	5.96	336.00	376.70	97.17
L17	15.36	8.49	6.24	351.61	385.60	96.42
L18	15.49	8.27	6.29	331.90	369.80	93.36
L19	16.53	8.31	5.96	356.18	391.12	99.24
L20	18.07	8.27	6.07	409.12	435.44	110.09
L21	14.96	8.58	6.16	335.85	371.84	92.43
L22	16.89	7.93	5.91	342.79	386.48	97.69
L23	16.58	8.80	6.60	428.92	439.02	107.79
L24	17.51	8.56	6.51	440.05	449.52	110.00
L25	16.38	9.27	6.31	421.59	438.02	110.41
L26	16.96	9.09	6.36	429.73	442.36	109.96
L27	15.96	9.58	7.00	449.07	447.38	111.55

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

ชื่อ	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	พื้นที่ ภาพฉาย (ตร.ซม.)
L28	17.80	9.38	6.56	490.60	494.36	121.79
L29	16.49	9.09	6.49	421.83	437.04	111.15
L30	17.20	8.93	6.38	433.64	444.44	113.42
L31	16.93	9.20	6.78	447.73	448.44	115.62
L32	16.62	8.02	5.96	398.78	426.14	97.46
L33	16.38	7.49	5.82	362.82	404.58	92.33
S1	15.07	8.11	5.40	325.50	378.18	89.54
S2	16.13	7.93	5.71	353.73	398.90	93.61
S3	15.22	8.04	5.80	353.35	389.20	89.54
S4	15.40	7.49	5.42	311.44	365.98	84.29
S5	14.67	8.09	5.84	340.94	384.06	87.02
S6	16.16	7.71	5.49	346.43	394.86	92.27
S7	15.40	7.40	5.29	307.99	364.56	84.62
S8	16.00	7.71	5.71	341.56	391.04	89.67
S9	15.69	7.82	5.89	357.81	400.56	91.11
S10	14.87	8.13	5.78	349.78	392.34	91.73
S11	15.47	7.71	5.38	316.54	370.10	86.47
S12	15.07	7.64	5.58	308.37	363.42	83.92
S13	15.96	7.76	5.62	351.96	398.66	91.00
S14	15.53	7.56	5.38	336.77	383.74	88.51
S15	16.58	7.80	5.58	352.16	399.10	95.15
S16	15.62	7.58	5.58	316.78	371.98	87.47
S17	16.09	7.53	5.73	351.08	399.54	90.30
S18	15.96	7.78	5.87	360.46	402.82	90.67
S19	16.47	7.71	5.69	349.19	397.22	92.86
S20	14.69	8.11	6.04	350.56	387.74	86.82
S21	15.60	8.04	5.89	352.83	396.68	90.36

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

ชื่อ	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	พื้นที่ ภาพฉาย (ตร.ซม.)
S22	15.09	7.82	5.76	333.64	379.52	87.65
S23	15.80	7.80	5.76	353.02	395.86	89.85
S24	15.04	7.44	5.49	303.92	357.06	83.25
S25	14.64	7.78	5.91	333.67	376.02	84.47
SS1	15.13	7.38	5.53	294.78	354.30	82.02
SS2	15.02	7.22	5.42	282.53	343.76	79.09
SS3	14.18	7.16	5.36	272.93	333.34	75.22
SS4	14.20	7.09	5.18	271.84	331.34	74.55
SS5	15.22	7.09	5.42	285.78	345.28	79.69
SS6	14.42	7.36	5.49	284.71	339.20	77.90
SS7	14.47	7.27	5.47	295.15	351.72	78.08
SS8	14.73	6.69	5.38	268.84	334.22	74.35
SS9	15.04	7.31	5.49	293.67	353.44	80.54
SS10	15.29	7.27	5.60	307.71	362.26	83.84
SS11	14.29	7.13	5.11	270.55	332.20	76.24
SS12	15.07	7.07	5.33	281.25	344.12	79.86
SS13	13.91	7.07	5.62	268.68	326.62	71.91
SS14	14.02	6.84	5.42	237.99	305.58	69.21
SS15	15.38	7.42	5.44	304.12	360.96	82.99
SS16	14.38	7.33	5.31	276.86	335.76	77.79
SS17	14.51	7.47	5.29	278.70	337.30	77.81
SS18	14.58	7.38	5.36	276.25	335.36	77.27
SS19	13.53	7.18	5.29	262.15	318.96	70.82
SS20	15.04	7.22	5.29	293.54	353.44	81.50
SS21	14.20	7.49	5.36	275.72	333.12	76.05
SS22	14.84	7.44	5.33	281.74	344.06	79.54
SS23	14.98	7.33	5.18	281.62	344.44	80.45

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

ชื่อ	ความยาว (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)	พื้นที่ ภาพฉาย (ตร.ซม.)
SS24	14.98	7.27	5.44	290.86	348.66	79.11
SS25	15.53	7.16	5.18	281.47	344.18	79.08
SS26	14.38	7.22	5.24	279.55	342.78	77.50
SS27	13.96	6.93	5.33	250.00	314.20	69.45

ตารางที่ ก.4 ผลการวัดสีมะม่วงกลุ่มที่ 1 โดยการวิเคราะห์จากวิธีที่นำเสนอ

ชื่อ	ส่วนที่ 1	ส่วนที่ 2	ส่วนที่ 3	ส่วนที่ 4	ทั้ง 4 ส่วน
	$\mu_r \cdot \mu_G \cdot \mu_b$	$\mu_r \cdot \mu_G \cdot \mu_b$	$\mu_r \cdot \mu_G \cdot \mu_b$	$\mu_r \cdot \mu_G \cdot \mu_b$	$\mu_r \cdot \mu_G \cdot \mu_b$
L1	139 , 145 , 67	152 , 164 , 85	122 , 129 , 56	123 , 139 , 64	134.0,144.3,68.0
L2	143 , 144 , 67	150 , 164 , 87	134 , 135 , 59	121 , 137 , 63	137.0,145.0,69.0
L3	135 , 139 , 58	153 , 162 , 81	130 , 128 , 57	128 , 138 , 64	136.5,141.8,65.0
L4	144 , 145 , 61	155 , 165 , 79	129 , 128 , 47	124 , 134 , 53	138.0,143.0,60.0
L5	138 , 142 , 68	155 , 167 , 93	124 , 128 , 55	131 , 143 , 68	137.0,145.0,71.0
L6	138 , 130 , 54	157 , 161 , 78	122 , 121 , 49	129 , 135 , 61	136.5,136.8,60.5
L7	136 , 146 , 67	152 , 169 , 89	118 , 131 , 57	128 , 147 , 70	133.5,148.3,70.8
L8	130 , 134 , 58	157 , 168 , 89	115 , 123 , 51	131 , 144 , 70	133.3,142.3,67.0
L9	139 , 135 , 55	159 , 166 , 85	126 , 117 , 44	132 , 135 , 58	139.0,138.3,60.5
L10	139 , 140 , 66	156 , 165 , 89	121 , 126 , 57	127 , 139 , 66	135.8,142.5,69.5
L11	134 , 135 , 53	149 , 162 , 74	121 , 126 , 49	125 , 138 , 59	132.3,140.3,58.8
L12	143 , 143 , 68	161 , 170 , 93	117 , 122 , 55	125 , 139 , 67	136.5,143.5,70.8
L13	141 , 140 , 66	154 , 164 , 86	120 , 122 , 52	123 , 134 , 59	134.5,140.0,65.8
L14	136 , 141 , 59	155 , 167 , 86	120 , 124 , 49	123 , 138 , 61	133.5,142.5,63.8
L15	143 , 150 , 70	157 , 172 , 91	122 , 131 , 58	119 , 137 , 63	135.3,147.5,70.5
L16	145 , 146 , 69	160 , 168 , 90	125 , 130 , 59	126 , 139 , 65	139.0,145.8,70.8
L17	137 , 146 , 67	156 , 172 , 92	116 , 128 , 57	119 , 138 , 65	132.0,146.0,70.3
L18	142 , 150 , 73	150 , 167 , 90	130 , 135 , 61	126 , 143 , 69	137.0,148.8,73.3
L19	142 , 153 , 75	151 , 169 , 91	130 , 138 , 64	126 , 144 , 68	137.3,151.0,74.5
L20	133 , 144 , 60	143 , 160 , 73	126 , 137 , 59	126 , 146 , 63	132.0,146.8,63.8
L21	133 , 145 , 64	149 , 169 , 88	121 , 132 , 57	120 , 136 , 60	130.8,145.5,67.3
L22	141 , 145 , 63	155 , 170 , 87	124 , 131 , 56	129 , 146 , 66	137.3,148.0,68.0
L23	145 , 142 , 62	157 , 164 , 83	127 , 127 , 56	121 , 132 , 60	137.5,141.3,65.3
L24	138 , 143 , 64	154 , 168 , 84	125 , 134 , 58	125 , 144 , 63	135.5,147.3,67.3
L25	143 , 145 , 66	154 , 163 , 77	129 , 127 , 57	128 , 136 , 60	138.5,142.8,65.0
L26	142 , 139 , 59	161 , 167 , 83	121 , 125 , 52	132 , 142 , 64	139.0,143.3,64.5
L27	131 , 149 , 69	145 , 169 , 85	112 , 129 , 56	111 , 135 , 59	124.8,145.5,67.3
L28	140 , 141 , 70	158 , 163 , 85	129 , 130 , 60	139 , 145 , 71	141.5,144.8,71.5

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

ชื่อ	ส่วนที่ 1	ส่วนที่ 2	ส่วนที่ 3	ส่วนที่ 4	ทั้ง 4 ส่วน
	$\mu_k \cdot \mu_G \cdot \mu_n$	$\mu_k \cdot \mu_G \cdot \mu_n$	$\mu_k \cdot \mu_G \cdot \mu_n$	$\mu_k \cdot \mu_G \cdot \mu_n$	$\mu_k \cdot \mu_G \cdot \mu_n$
L29	135 , 144 , 59	147 , 168 , 80	119 , 129 , 52	113 , 137 , 57	128.5,144.5,62.0
L30	134 , 143 , 62	153 , 168 , 86	117 , 128 , 55	121 , 139 , 64	131.3,144.5,66.8
L31	139 , 146 , 67	152 , 167 , 87	129 , 138 , 64	126 , 143 , 68	136.5,148.5,71.5
L32	137 , 146 , 64	144 , 165 , 82	125 , 133 , 55	119 , 138 , 61	131.3,145.5,65.5
L33	140 , 152 , 69	150 , 170 , 85	128 , 140 , 60	127 , 144 , 65	136.3,151.5,69.8
L34	140 , 149 , 68	147 , 166 , 83	128 , 135 , 60	126 , 148 , 69	135.3,149.5,70.0
L35	120 , 142 , 58	141 , 167 , 79	114 , 134 , 55	117 , 144 , 61	123.0,146.8,63.3
L36	137 , 150 , 64	157 , 172 , 85	126 , 139 , 59	135 , 150 , 68	138.8,152.8,69.0
L37	132 , 141 , 53	153 , 166 , 74	122 , 130 , 47	130 , 148 , 59	134.3,146.3,58.3
L38	136 , 144 , 65	153 , 167 , 86	129 , 135 , 60	129 , 145 , 69	136.8,147.8,70.0
L39	128 , 139 , 63	149 , 165 , 81	123 , 133 , 58	126 , 143 , 63	131.5,145.0,66.3
L40	129 , 141 , 63	149 , 168 , 83	119 , 132 , 60	119 , 140 , 64	129.0,145.3,67.5
L41	131 , 140 , 59	157 , 169 , 84	123 , 133 , 58	127 , 145 , 65	134.5,146.8,66.5
L42	140 , 137 , 55	162 , 167 , 80	130 , 121 , 46	127 , 131 , 53	139.8,139.0,58.5
L43	147 , 142 , 66	157 , 159 , 78	129 , 130 , 59	128 , 138 , 63	140.3,142.3,66.5
L44	152 , 139 , 64	157 , 160 , 83	131 , 121 , 55	136 , 134 , 65	144.0,138.5,66.8
L45	140 , 135 , 62	155 , 163 , 85	136 , 132 , 61	139 , 148 , 73	142.5,144.5,70.3
L46	140 , 146 , 62	150 , 167 , 80	124 , 132 , 54	116 , 136 , 56	132.5,145.3,63.0
L47	140 , 138 , 60	157 , 165 , 83	129 , 127 , 53	133 , 142 , 64	139.8,143.0,65.0
L48	144 , 145 , 63	163 , 173 , 87	126 , 131 , 55	129 , 145 , 64	140.5,148.5,67.3
L49	142 , 135 , 59	164 , 166 , 84	133 , 124 , 50	142 , 142 , 63	145.3,141.8,64.0
L50	137 , 147 , 70	153 , 172 , 91	120 , 132 , 58	122 , 142 , 67	133.0,148.3,71.5
L51	150 , 146 , 64	162 , 168 , 87	130 , 131 , 56	125 , 138 , 64	141.8,145.8,67.8
L52	137 , 143 , 65	144 , 160 , 81	130 , 135 , 59	120 , 135 , 59	132.8,143.3,66.0
L53	133 , 149 , 73	154 , 175 , 97	117 , 133 , 61	125 , 149 , 72	132.3,151.5,75.8
L54	144 , 154 , 76	159 , 175 , 99	127 , 138 , 65	127 , 144 , 72	139.3,152.8,78.0
L55	139 , 144 , 60	156 , 170 , 82	119 , 124 , 50	124 , 140 , 59	134.5,144.5,62.8
S1	136 , 147 , 63	145 , 165 , 82	120 , 131 , 52	114 , 133 , 56	128.8,144.0,63.3

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

ชื่อ	ส่วนที่ 1	ส่วนที่ 2	ส่วนที่ 3	ส่วนที่ 4	ทั้ง 4 ส่วน
	$\mu_k \cdot \mu_G \cdot \mu_n$	$\mu_k \cdot \mu_G \cdot \mu_n$	$\mu_k \cdot \mu_G \cdot \mu_n$	$\mu_k \cdot \mu_G \cdot \mu_n$	$\mu_k \cdot \mu_G \cdot \mu_n$
S2	138 , 145 , 67	154 , 166 , 90	131 , 137 , 64	132 , 142 , 70	138.8,147.5,72.8
S3	141 , 146 , 60	151 , 168 , 77	133 , 138 , 55	127 , 144 , 60	138.0,149.0,63.0
S4	137 , 147 , 62	153 , 170 , 83	127 , 130 , 51	123 , 138 , 58	135.0,146.3,63.5
S5	114 , 138 , 58	134 , 164 , 77	106 , 129 , 50	113 , 144 , 59	116.8,143.8,61.0
S6	135 , 145 , 66	157 , 172 , 93	131 , 140 , 64	132 , 149 , 72	138.8,151.5,73.8
S7	140 , 148 , 69	155 , 172 , 90	129 , 138 , 65	130 , 148 , 70	138.5,151.5,73.5
S8	127 , 140 , 57	146 , 165 , 78	122 , 136 , 57	130 , 152 , 68	131.3,148.3,65.0
S9	139 , 142 , 65	157 , 168 , 84	130 , 132 , 60	129 , 140 , 64	138.8,145.5,68.3
S10	133 , 140 , 60	154 , 170 , 85	129 , 136 , 62	132 , 149 , 68	137.0,148.8,68.8
S11	133 , 133 , 61	161 , 165 , 86	115 , 120 , 52	130 , 138 , 65	134.8,139.0,66.0
S12	136 , 147 , 67	156 , 174 , 88	122 , 135 , 57	125 , 146 , 63	134.8,150.5,68.8
S13	143 , 146 , 63	154 , 166 , 85	129 , 131 , 56	130 , 142 , 67	139.0,146.3,67.8
S14	147 , 147 , 69	156 , 166 , 86	137 , 136 , 60	128 , 139 , 63	142.0,147.0,69.5
S15	149 , 145 , 69	164 , 170 , 89	133 , 126 , 58	134 , 139 , 66	145.0,145.0,70.5
S16	142 , 143 , 63	162 , 173 , 90	122 , 128 , 54	125 , 142 , 63	137.8,146.5,67.5
S17	139 , 142 , 60	161 , 173 , 90	124 , 125 , 52	135 , 149 , 71	139.8,147.3,68.3
S18	143 , 141 , 62	155 , 163 , 81	139 , 133 , 59	133 , 134 , 59	142.5,142.8,65.3
S19	138 , 143 , 66	160 , 171 , 91	129 , 130 , 58	128 , 138 , 63	138.8,145.5,69.5
S20	137 , 145 , 64	156 , 173 , 89	125 , 129 , 55	124 , 139 , 62	135.5,146.5,67.5
S21	135 , 138 , 55	153 , 162 , 76	134 , 137 , 58	142 , 151 , 70	141.0,147.0,64.8
S22	149 , 149 , 69	160 , 170 , 88	141 , 141 , 59	133 , 148 , 66	145.8,152.0,70.5
S23	138 , 150 , 65	155 , 173 , 89	126 , 136 , 56	126 , 145 , 64	136.3,151.0,68.5
SS1	147 , 143 , 64	158 , 167 , 83	130 , 133 , 55	127 , 144 , 62	140.5,146.8,66.0
SS2	140 , 150 , 66	148 , 165 , 80	133 , 141 , 60	125 , 141 , 61	136.5,149.3,66.8
SS3	127 , 146 , 55	143 , 167 , 77	119 , 134 , 51	121 , 146 , 56	127.5,148.3,59.8
SS4	138 , 142 , 66	151 , 165 , 86	131 , 133 , 61	126 , 141 , 67	136.5,145.3,70.0
SS5	146 , 150 , 69	161 , 178 , 95	123 , 128 , 56	121 , 140 , 62	137.8,149.0,70.5
SS6	147 , 151 , 70	170 , 179 , 98	128 , 136 , 60	143 , 153 , 73	147.0,154.8,75.3

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

ชื่อ	ส่วนที่ 1	ส่วนที่ 2	ส่วนที่ 3	ส่วนที่ 4	ทั้ง 4 ส่วน
	μ_r, μ_G, μ_B	μ_r, μ_G, μ_B	μ_r, μ_G, μ_B	μ_r, μ_G, μ_B	μ_r, μ_G, μ_B
SS7	139 , 150 , 69	155 , 174 , 89	124 , 134 , 59	121 , 140 , 62	134.8,149.5,69.8
SS8	134 , 144 , 65	161 , 177 , 94	118 , 134 , 58	133 , 154 , 72	136.5,152.3,72.3
SS9	141 , 134 , 58	160 , 165 , 79	131 , 126 , 53	135 , 141 , 62	141.8,141.5,63.0
SS10	132 , 140 , 57	150 , 166 , 78	122 , 133 , 53	130 , 149 , 64	133.5,147.0,63.0
SS11	142 , 139 , 61	173 , 168 , 87	125 , 122 , 53	151 , 144 , 69	147.8,143.3,67.5
SS12	149 , 145 , 62	164 , 170 , 83	135 , 133 , 57	133 , 140 , 61	145.3,147.0,65.8
SS13	142 , 149 , 61	145 , 163 , 75	127 , 137 , 54	124 , 146 , 64	134.5,148.8,63.5
SS14	141 , 145 , 68	160 , 171 , 95	126 , 129 , 61	124 , 136 , 65	137.8,145.3,72.3
SS15	134 , 146 , 63	151 , 174 , 86	121 , 134 , 57	126 , 150 , 66	133.0,151.0,68.0
SS16	130 , 147 , 66	148 , 172 , 82	124 , 134 , 55	122 , 144 , 59	131.0,149.3,65.5
SS17	134 , 151 , 63	147 , 172 , 83	114 , 131 , 53	112 , 134 , 54	126.8,147.0,63.3
SS18	136 , 145 , 65	153 , 169 , 87	124 , 131 , 55	130 , 144 , 66	135.8,147.3,68.3
SS19	142 , 147 , 67	160 , 173 , 89	126 , 133 , 57	128 , 142 , 63	139.0,148.8,69.0

ตารางที่ ก.5 ผลการวัดปริมาณจากการใช้เครื่องมือและวิธีทางคอมพิวเตอร์วิชันที่นำเสนอโดยใช้
จำนวนมุมมองและความละเอียดภาพที่แตกต่างกัน

ชื่อ	ปริมาณจากการ วัดด้วยเครื่องมือ	ปริมาณจากการวัดด้วยวิธีที่นำเสนอ		
		4 มุมภาพ , ความ ละเอียดภาพ 1 M	4 มุมภาพ , ความ ละเอียดภาพ 3 M	5 มุมภาพ , ความ ละเอียดภาพ 1 M
L1	421.53	471.46	463.08	450.64
L2	429.28	478.56	471.09	457.18
L3	364.1	404.14	396.99	387.77
L4	398.84	448.88	440.17	424.66
L5	405.63	453.56	445.42	432.01
S1	298.77	331.33	325.08	316.82
S2	318.26	356.75	350.19	339.80
S3	317.95	355.88	349.05	329.73
S4	282.43	313.33	307.77	298.40
S5	307.38	341.73	335.36	324.63
SS1	263.72	291.56	290.30	281.43
SS2	256.89	279.37	279.02	272.84
SS3	246.81	270.04	269.73	256.61
SS4	243.52	269.40	268.22	254.93
SS5	259.06	280.42	280.26	271.81

ภาคผนวก ข.

ผลการคัดแยกขนาด

ตารางที่ ข.1 ผลการคัดแยกขนาดของมะม่วงกลุ่มที่ 1

ชื่อ	ผลการคัดแยกขนาดโดยใช้ลักษณะทางกายภาพ	
	ที่วัดได้จากเครื่องมือ	ที่วัดได้จากวิธีที่นำเสนอ
L1	L	L
L2	L	L
L3	L	L
L4	L	L
L5	L	L
L6	L	L
L7	L	L
L8	L	L
L9	L	L
L10	L	L
L11	L	L
L12	L	L
L13	L	L
L14	L	L
L15	L	L
L16	L	L
L17	L	L
L18	L	L
L19	L	L
L20	L	L
L21	L	L
L22	L	L
L23	L	L
L24	L	L
L25	L	L

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ชื่อ	ผลการคัดแยกขนาดโดยใช้ลักษณะทางกายภาพ	
	ที่วัดได้จากเครื่องมือ	ที่วัดได้จากวิธีที่นำเสนอ
L26	L	L
L27	L	L
L28	L	L
L29	S	L
L30	L	L
L31	L	L
L32	L	L
L33	L	L
L34	L	L
L35	L	L
L36	S	L
L37	L	L
L38	L	L
L39	L	L
L40	L	L
L41	L	L
L42	L	L
L43	L	L
L44	L	L
L45	L	L
L46	L	L
L47	L	L
L48	L	L
L49	L	L
L50	L	L
L51	L	L
L52	L	L
L53	L	S

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ชื่อ	ผลการคัดแยกขนาดโดยใช้ลักษณะทางกายภาพ	
	ที่วัดได้จากเครื่องมือ	ที่วัดได้จากวิธีที่นำเสนอ
L54	L	L
L55	S	L
S1	S	S
S2	S	S
S3	S	S
S4	S	S
S5	S	S
S6	S	S
S7	S	S
S8	S	S
S9	S	S
S10	S	S
S11	S	S
S12	S	S
S13	S	S
S14	S	S
S15	S	S
S16	S	S
S17	S	S
S18	S	SS
S19	S	S
S20	S	S
S21	S	S
S22	S	S
S23	L	L
SS1	SS	SS
SS2	SS	SS
SS3	SS	SS

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ชื่อ	ผลการคัดแยกขนาดโดยใช้ลักษณะทางกายภาพ	
	ที่วัดได้จากเครื่องมือ	ที่วัดได้จากวิธีที่นำเสนอ
SS4	SS	SS
SS5	SS	SS
SS6	SS	SS
SS7	SS	SS
SS8	SS	SS
SS9	SS	SS
SS10	SS	SS
SS11	SS	SS
SS12	SS	SS
SS13	SS	SS
SS14	SS	SS
SS15	SS	SS
SS16	SS	SS
SS17	SS	SS
SS18	SS	SS
SS19	SS	SS

ตารางที่ ข.2 น้ำหนักของมะม่วงกลุ่มที่ 2 และผลการคัดแยกขนาด

ชื่อ	น้ำหนัก	ผลการคัดแยกขนาด		
		โดยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1	โดยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 2	โดยวิธีที่นำเสนอ
L1	426.91	L	L	L
L2	439.66	L	L	L
L3	371.12	L	L	L
L4	404.60	L	L	L
L5	411.32	L	L	L
L6	370.74	L	L	L
L7	360.78	L	L	L
L8	371.93	L	L	L
L9	381.02	L	L	L
L10	375.88	L	L	L
L11	356.16	L	L	L
L12	386.72	L	L	L
L13	358.36	L	L	L
L14	358.63	L	L	L
L15	391.52	L	L	L
L16	359.89	L	L	L
L17	374.07	L	L	L
L18	351.47	L	L	L
L19	369.34	L	L	L
L20	413.65	L	L	L
L21	352.37	L	L	L
L22	356.76	L	L	L
L23	446.07	L	L	L
L24	456.63	L	L	L
L25	445.20	L	L	L
L26	448.97	L	L	L
L27	495.22	L	L	L
L28	516.76	L	L	L

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

ชื่อ	น้ำหนัก	ผลการคัดแยกขนาด		
		โดยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1	โดยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 2	โดยวิธีที่นำเสนอ
L29	451.68	L	L	L
L30	465.72	L	L	L
L31	491.05	L	L	L
L32	361.84	L	S	L
L33	337.74	L	S	S
S1	307.73	S	L	S
S2	320.23	L	L	S
S3	321.52	L	L	S
S4	287.93	S	S	S
S5	314.38	S	L	S
S6	323.93	S	S	S
S7	283.99	S	S	SS
S8	311.42	S	S	S
S9	328.32	S	S	S
S10	319.42	L	S	S
S11	287.34	S	S	S
S12	283.09	S	S	S
S13	324.99	L	S	S
S14	308.78	S	S	S
S15	325.26	L	S	S
S16	288.09	S	S	S
S17	318.22	S	S	S
S18	330.06	S	S	S
S19	319.97	S	S	S
S20	322.05	S	S	S
S21	324.24	S	S	S
S22	310.90	S	S	S
S23	327.56	S	S	S

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

ชื่อ	น้ำหนัก	ผลการคัดแยกขนาด		
		โดยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1	โดยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 2	โดยวิธีที่นำเสนอ
S24	281.81	S	S	S
S25	309.76	S	S	S
SS1	267.36	SS	S	SS
SS2	260.43	SS	SS	SS
SS3	251.06	S	SS	SS
SS4	245.49	SS	SS	SS
SS5	263.80	SS	SS	SS
SS6	256.54	S	SS	SS
SS7	264.10	S	SS	S
SS8	241.31	SS	SS	SS
SS9	270.10	SS	SS	SS
SS10	277.55	S	SS	SS
SS11	248.79	SS	SS	SS
SS12	254.47	S	SS	SS
SS13	244.87	SS	SS	SS
SS14	221.87	SS	SS	SS
SS15	276.21	S	SS	SS
SS16	250.71	SS	SS	SS
SS17	252.75	SS	SS	SS
SS18	250.84	SS	SS	SS
SS19	240.42	SS	SS	SS
SS20	265.59	SS	SS	SS
SS21	251.93	SS	SS	SS
SS22	249.87	SS	SS	SS
SS23	252.20	S	SS	SS
SS24	262.37	SS	SS	SS
SS25	256.46	S	SS	SS
SS26	250.72	S	SS	SS

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

ชื่อ	น้ำหนัก	ผลการัดขนาด		
		โดยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1	โดยผู้เชี่ยวชาญคนที่ 2	โดยวิธีที่นำเสนอ
SS27	228.56	SS	SS	SS

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. P. Yimyam, T. Chalidabhongse, P. Sirisomboon, and S. Boonmung, “**Physical Properties Analysis of Mango using Computer Vision**”, Proc. ICCAS2005, 2005.
2. T. Chalidabhongse, P. Yimyam, and P. Sirisomboon, “**2D/3D Vision-Based Mango’s Feature Extraction and Sorting**”, Submitted to ICARCV2006. (under Review).



ICCAS 2005

**International Conference on
Control, Automation, and Systems**

June 2-5, 2005

**KINTEX(Korea International Exhibition Center)
The Province of Gyeonggi, Korea**



The Institute of Control, Automation and Systems Engineers, Korea
<http://www.icase.or.kr>

Physical Properties Analysis of Mango using Computer Vision

Panitnat Yimyam*, Thanarat Chalidabhongse*, Panmanas Sirisomboon**, and Suwance Boonmung**

*Faculty of Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
(Tel: +66-2-737-2551; E-mail: panitnat11@hotmail.com, thanarat@it.kmitl.ac.th)

** Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang, Bangkok, Thailand

(Tel: +66-2-737-3000 Ext.5120; E-mail: kspanman@kmitl.ac.th, kbsuwane@kmitl.ac.th)

Abstract: This paper describes image processing techniques that can detect, segment, and analyze the mango's physical properties such as size, shape, surface area, and color from images. First, images of mangoes taken by a digital camera are analyzed and segmented. The segmentation is done based on constructed hue model of the sample mangoes. Some morphological and filtering techniques are then applied to clean noises before fitting spline curve on the mango boundary. From the clean segmented image, the mango projected area can be computed. The shape of the mango is then analyzed using some structuring models. Color is also spatially analyzed and indexed in the database for future classification. To obtain the surface area, the mango is peeled. The scanned image of its peels is then segmented and filtered using similar approach. With calibration parameters, the surface area could then be computed. We employed the system to evaluate physical properties of a mango cultivar called "Nam Dokmai". There were sixty mango samples in three various sizes graded by an experienced farmer's eyes and hands. The results show the techniques could be a good alternative and more feasible method for grading mango comparing to human's manual grading.

Keywords: Machine Vision, Physical Properties Analysis, Mango, Image Processing.

1. INTRODUCTION

Thailand is known as a home to a large variety of fruits, both seasonal and all-year-round. Mango is one of the potential fruits for both local and international markets. Its industry plays an important role in the country's export economy. It is grown in all regions but area of concentration is in the Central and Northeast. At present, mango production has greatly been developed through improved varieties to meet the consumer taste and preference. Overseas demand for Thai mango has steadily increased both in the forms of fresh and canned fruit. In grading mangoes for export, the farmers must examine all the harvested mature mangoes by eyes and hands. This is quite subjective. So, farmers need alternatives for sorting and grading mangoes since hand labor is costly and inaccurate. An automated mango sorting system could be more feasible.

In recent years, machine vision technology has become more potential and more important to many areas including agricultural industry. The uses of machine vision technology for quality inspection, classification, sorting, and grading agricultural products become more interest [1-3]. Runtz [4] developed a real-time plant recognition algorithm, which is able to distinguish between broadleaf and grassy plant species. It was then applied to build a sprayer control system. Later, Dave and Runtz [5] improved the methods and evaluated three image processing methods for their ability to identify species of plants. The study concluded texture analysis yields best result. Chapron et al. [6] proposed a multiresolution-based method for recognizing weeds in corn fields. They used a color camera, which provides four-band (R, G, B, IR) images, to capture agronomic scene. These multi-band images were processed to obtain color and geometrical features of the vegetation and soil. Bayesian networks was then used to recognize and classify the vegetal species. Recently, Cunha [7] showed another use of image processing approach in crop modeling. He developed a system that analyzes and models leaf images. Some other reports on fruit analysis include works of Njoroge et al. [8] and Gejima et al. [9]. The first developed an automated fruit grading system using color image processing and some special

sensors. The latter used color image processing techniques in judging the maturity level of tomatoes. Both RGB and $L^*a^*b^*$ color metrics were used. The research concluded that the a^* value of the tomato's external surface color can be used as a maturity index.

In this project, we propose a vision system that can detect, segment, and analyze the mango's physical properties such as size, shape, surface area, and color from images. First, the chromaticity of the sample mangoes is learned. The original RGB color image of a mango is transformed to HSI image. H dimension is then used to build the mango's chromaticity model. After training, the input mango image is then segmented from the background image using chromaticity similarity. Some spatial morphology is applied to suppress the segmentation errors. We then apply a spline fitting to obtain smooth curve of mango boundary. From the segmented image, the mango projected area can be computed. The shape of the mango is then analyzed using some structuring models. Color is also spatially analyzed and indexed in the database for future classification. To obtain the surface area, the mango is peeled. The scanned image of its peels is then segmented and filtered using similar approach. With calibration parameters, the surface area could then be computed. We employed the system to evaluate physical properties of a mango cultivar called "Nam Dokmai". There were sixty mangoes in three various sizes graded by an experienced farmer's eyes and hands, twenty mangoes each size.

The general objective of this research is to investigate the potential of using image processing techniques on mango's external physical analysis as an alternative or supplemental to the traditional manual method. The techniques could be extended and applied to analyze external physical properties of other agricultural products as well.

The organization of this paper is as follows. Section 2 describes our proposed methods in segmenting and analyzing the mango images. Section 3 discusses the experimental setup and results. Section 4 concludes the paper and addresses future works.

2. OUR APPROACH

In this section, we describe in details our methods in processing and analyzing mango images in order to extract their physical properties. We divide the section into three parts: first part discusses our image acquisition method and setup. The second part proposes image processing techniques used for segmenting mango image from the background image. The last part describes methods for computing mango physical properties.

2.1 Mango Images Acquisition

The image acquisition setting is shown in Fig. 1. A digital camera is used to capture top-view image of the mango, which is placed on a black-and-white chessboard calibration grid. The image resolution is about 3 million pixels and saved in raw RGB format. The reason that we need that high resolution is that we want to measure accurate size. In addition, we plan to extend this work by reconstructing the 3D volume of mango using voxel crafting techniques on multiple-view images. The calibration grid is used for two purposes: to calibrate size, and to calibrate color. The normal illumination condition with white fluorescent lamps is used. Fig. 2 shows an obtained image.



Fig. 1 Image acquisition setup.

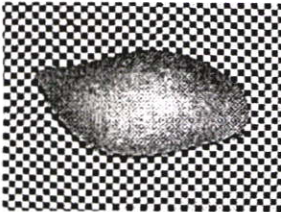


Fig. 2 Acquired input image of mango.

2.2 Mango Image Segmentation

After acquiring all mango images, a set of images is randomly picked and used as a training set for building a mango's surface chromaticity model. First, the original RGB color image is transformed to obtain hue value, H , according to this equation:

$$\cos H = \frac{2R - G - B}{2\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}}$$

Mango pixel regions are segmented by hand from the training images. A mango's surface hue model is then constructed using hue values computed from those pixels. This model is then used to segment mango region from the original input images using a simple chromaticity similarity. Fig. 3 shows hue histogram of an input image. Some spatial morphology such as closing and opening operations [10] are then applied to suppress the segmentation errors. The segmentation result is shown in Fig. 4.

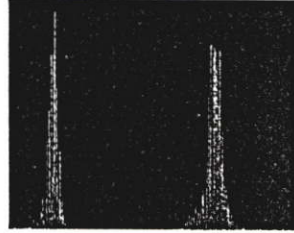


Fig. 3 Hue histogram of an input image.

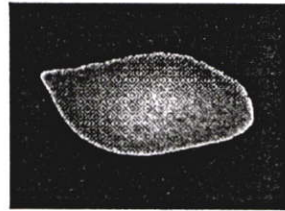


Fig. 4 Segmented mango image

Although the spatial filtering can eliminate most segmentation false, however, there is still some erroneous segmentation found along the edges of the mango (see Fig. 5). This could be due to the sampling effect and blurry image.

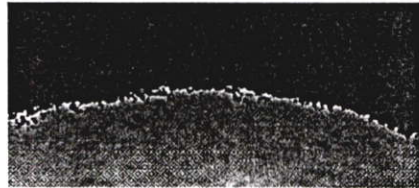


Fig. 5 Erroneous segmentation along the edges.

To smooth the mango region, spline curvature fitting using MATLAB function is then applied. The initial control points for spline fitting are extracted from preliminary boundary pixels. To do this, we first apply boundary detection algorithm [10] on the early segmented image. Then every n^{th} boundary pixels are selected and used as initial control points. A cropped region of spline-fit mango image is shown in Fig. 6.

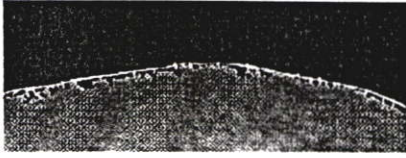


Fig. 6 Result after spline fit.

2.3 Physical Properties Analysis

After obtaining clean segmented mango region, we then further analyze the image to obtain some physical properties of the mangoes such as size, shape, area, and color. In this research, we define a set of parameters that are used to refer to mangoes' physical properties as follows:

- **Projected area (A)** is defined as the area of the 2D projection image of the top view mango. This can be easily estimated by counting number of pixels inside the boundary. With the known calibration grid size, we can calculate the region area.
- **Length & Width:** Mangoes' shape and size can be implied using their lengths and widths. Vasquez-Caicedo et al. [11] defined five mango size parameters as shown in Fig. 7. However, we found these parameters are very difficult to measure either by automate process or by hands. In this project we define two parameters; length L and width W as follows (see Fig. 8):
 - **Length (L)** is defined as the distance between the pole and the tip of the mango. The line between the pole and the tip called *mango's major axis*.
 - **Width (W)** is defined as the maximum distance from a boundary pixel to another boundary pixel that is on the other side of the major axis, and the line between them, which is called *mango's minor axis*, is perpendicular to the major axis.

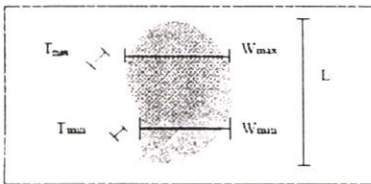


Fig. 7 Mango size parameters defined by Vasquez-Caicedo et al. [11].

To compute L and W , we first must find major and minor axes. We do this by computing angle of mango boundary pixels, i.e., angle between 3 points $(P_i, y_i, P_{i-1}, P_{i+1})$ where P_i is the i^{th} boundary pixel. Then, the *tip* of the mango is the boundary pixel P_i that has global minimum angle. The *pole* of the mango is estimated by finding a boundary pixel P_i that has local minimum angle and is located about half of the mango perimeter from the tip. Once we get pole and tip, we can obtain major axis and its length, L . We then rotate the image

so that the major axis is lined horizontally. We then search for the minor axis. The minor axis is the line that is perpendicular to the major axis and has maximum distance measured between two boundary pixels that cross this line and be on the other side of the major axis. The maximum distance is the width W .

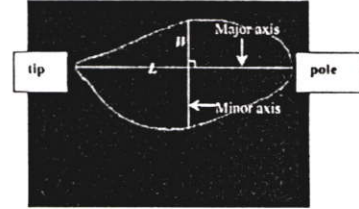


Fig. 8 The proposed mango size parameters.

- **Color:** Color can also be spatially analyzed and indexed in the database for future classification. The color features are measured separately in five regions; northeast, southeast, southwest, and northwest of the major and minor axes, and at the center where major and minor axes intersected as shown in Fig. 9. We keep the color model in RGB as it is original color space when acquiring image, and it is easily to transform to other color metrics when needed.

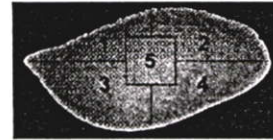


Fig. 9 Segmented regions for color analysis.

- **Surface area (S)** is defined as the area of the surface of mango in 3D. To measure surface area of the mango, all the mangoes were peeled using hand peelers. The peels images are then captured and digitized using a scanner at 300dpi. The image is then binarized, where white pixels correspond to mango peel and black pixels correspond to background. However, the image obtained from scanner is not clean. A salt-and-pepper noise reduction technique must be applied. Fig. 10 shows the clean binary mango peel image. Then, the white pixels are counted and the area of the surface can be estimated using the known calibration grid size.

3. EXPERIMENTS AND RESULTS

The proposed algorithms mentioned in the previous section were implemented in C/C++ and MATLAB on a typical PC. For image acquisition, a scanner and a 3 Mega-pixel digital camera connected to the PC are used. We employed the system to evaluate physical properties of a mango cultivar called "Nam Dokmai". Sixty mango samples were obtained from a local mango farm in Chachoengsao, a province in Central of Thailand. The mangoes were harvested at the same maturity as they are harvested for export. There are

three various sizes: Small, Medium, and Large, twenty mangoes each size. They were graded by an experienced farmer's eyes and hands.



Fig. 10 Image of mango peels after noise cleaning.

After obtaining the mangoes, we captured their images using setup as shown in Fig.1 with a Kodak CX6330 digital camera. Each mango is placed on a black-and-white chessboard calibration grid with 5mm x 5mm grid size (see Fig. 2). To measure 3D surface area of the mango, all the mangoes were peeled by hands. The peels of each mango were laid down on a transparent sheet and covered by a black plastic box. They were then scanned by a scanner (HP Scanjet3500c Series) at 300lpi resolution. The image is then binarized, where white pixels correspond to mango peel and black pixels correspond to background.

All the 60 top-view mango images were then processed according to the algorithms explained in previous section to obtain projected area, length, width, and color. Another 60 scanned image of mango peels were also processed and the 3D surface areas were computed. The results show in Table 1.

Table 1 Physical properties of "Nam Dokmai" in three size.

Parameters	Small		Medium		Large	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
S (cm^2)	213.95	6.44	232.72	7.15	260.07	12.50
A (cm^2)	60.26	2.50	67.18	2.86	75.22	3.77
L (cm)	12.60	0.44	13.46	0.47	14.12	0.59
W (cm)	6.58	0.21	6.90	0.19	7.31	0.21

For color analysis, we segmented projected image of mango into 5 regions as shown in Fig.9. Each region was then analyzed and its average color in R,G,B was recorded. This spatial color information is indexed in the database for future classification. Table 2 shows the color in each region of the sixty mangoes. The results demonstrate that the color spatial distribution is not related to its size.

Table 2 Color of "Nam Dokmai" at various positions

Region	Small	Medium	Large
	(μ_R, μ_G, μ_B)	(μ_R, μ_G, μ_B)	(μ_R, μ_G, μ_B)
1	(178,173,135)	(181,175,139)	(175,171,136)
2	(193,183,139)	(194,185,144)	(191,186,148)
3	(195,187,144)	(196,191,148)	(189,185,146)
4	(214,201,158)	(212,202,160)	(210,203,166)
5	(219,210,166)	(217,211,168)	(212,208,168)

4. CONCLUSIONS AND FUTURE WORKS

We have described image processing techniques that can detect, segment, and analyze the mango's external physical properties. Some parameters are defined and calculated from the segmented mango images. These include 2D projected area, 2D projected length, 2D projected width, and 3D surface area. Color is also measured and modeled spatially. Sixty "Nam Dokmai" cultivar mangoes in three sizes (S, M, L) were evaluated. Their physical properties parameters were recorded. The results show the techniques could be a good alternative and more feasible method for grading mango comparing to human's manual grading.

To extend the work, we plan to work with multiple-view mango images. The goal is to estimate 3D volumetric of the mango. This would be done using voxel crafting technique. Once the 3D volume is constructed, we can estimate the 3D size, shape as well as the volume more precisely.

REFERENCES

- [1] A. Milella, G.Reina, M. Foglia, and A. Gentile, "Computer Vision Applications in Agricultural Robotics", Proc. 11th IEEE Intl' Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Macau, 2004.
- [2] Y.R. Chen, "Future Trends of Machine Vision Technology for Agricultural Applications", Proc. Intl' Conf. on Engineering and Technological Science (ICETS2000), China, 2000.
- [3] W. Lu and S. Da-Wen, "Computer Vision Systems for Rapid Quality Inspection of Agricultural and Food Products", Proc. Intl' Conf. on Engineering and Technological Science (ICETS2000), China, 2000.
- [4] K.J. Runtz, "Electronic Recognition of Plant Species for Machine Vision Sprayer Control Systems", Proc. IEEE Western Canada Conference on Computer, Power, and Communication Systems in a Rural Environment (WESCANEX'91), pp. 84-88, 1991.
- [5] S. Dave, K. Runtz, "Image Processing Methods for Identifying Species of Plants," Proc. IEEE Western Canada Conference on Computer, Power, and Communication Systems in a Rural Environment (WESCANEX'95), pp. 403-408, 1995.
- [6] M. Chapron, P. Boissard, and L. Assemat, "A Multiresolution Based Method for Recognizing Weeds in Corn Fields," Proc. 15th Intl' Conf. on Pattern Recognition (ICPR'2000), pp. 303-306, 2000.
- [7] J. B. Cunha, "Application of Image Processing Techniques in the Characterization of Plant Leaves," Proc. IEEE Intl' Symposium on Industrial Electronics, 2003.

- [8] J.B Njoroge, K. Ninomiya, N. Kondo, and H. Toita, "Automated Fruit Grading System using Image Processing", Proc SICE Annual Conference (SICE2002), Japan, 2002.
- [9] Y. Gejima, H. Zhang, and M. Nagata, "Judgement on Level of Maturity for Tomato Quality Using L*a*b* Color Image Processing", Proc. the 2003 IEEE/ASME Intl' Conf on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003), 2003.
- [10] Shapiro and Stockman, "Computer Vision", Prentice Hall, 2001.
- [11] A.L Vasquez-Caicedo, S Neidhart, P Pathomrungruiyounggul, P. Wiriyaacharee, A. Chattracul, P Sruamsiri, P Manochai, F. Bangert, R. Carle, "Physical, Chemical, and Sensory Properties of Nine Thai Mango Cultivars and Evaluation of their Technological and Nutritional Potential", Proc. Intl' Symposium Sustaining Food Security and Managing Natural Resources in Southeast Asia, Thailand, 2002.



9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision

ICARCV 2006

http://www.icarcv.org

5 - 8 December 2006, Grand Hyatt Singapore

**Organisers**

-School of Electrical and Electronic Eng.
Nanyang Technological University,
-Institution of Engineers, Singapore

Technical Sponsors

-IEEE Control Systems Society
-IEEE Robotics and Automation Society
-IEEE Systems, Man and Cybernetics Society
-Singapore Institute of Manufacturing Technology

International Advisory Committee

Arimoto, Suguru; Japan
Basar, Tamer; USA
Blake, Andrew; UK
Cao, Xiren; HK, China
Cassandras, Christos G; USA
Chai, Tianyou; China
Chung, Myung Jin; Korea
De Luca, Alessandro; Italy
De Silva, Clarence W; Canada
Durrant-Whyte, Hugh; Australia
Er, Meng Hwa; Singapore
Foo, Say Wei; Singapore
Goodwin, Graham C; Australia
Guo, Lei; China
Ikeda, Masao; Japan
Isidori, Alberto; Italy
Jain, Anil K; USA
Kam, Chan Hin; Singapore
Kaymak, M. Okyay; Turkey
Kwon, Wook Hyun; Korea
Lee, Kok Meng; USA
Lee, Seong-Whan; Korea
Luh, Peter; USA
Laujier, Christian; France
Lewis, Frank L; USA
Lim, Khiam Wee; Singapore
Newcomb, Robert W; USA
Ngan King Ng; HK, China
Pal, Nikhil R; India
Parent, Michel; France
Rogers, Eric; UK
Schapire, Robert; USA
Shaked, Uri; Israel
Siciliano, Bruno; Italy
Slotine, Jean-Jacques E; USA
Soh, Yeng Chai; Singapore
Tam, Tzyh-Jong; USA
Vidyasagar, M; India
Zurada, Jacek M.; USA

Organising Committee

Xie, Lihua (General Chair)
Wang, Dan Wei (Advisor)
Cheah, Chien Chern (Program Chair)
Chua, Chin Seng (Program Co-chair)
Huang, Jie (Program Co-chair)
Sung, Eric (Invited Session Chair)
Hirai, Shinichi (Invited Session Co-chair)
Feng, Gary (Invited Session Co-Chair)
Lee, Peng Hin (Finance Chair)
Wijesoma, Sarsha W. (Publicity)
Zhang, Cishen (Publication)
Suganthan, P. N. (Keynotes & Tutorials)
Low, Kay Soon (Local Arrangement)
Zhang, Jing Bing; Ling, Keck Voon (Exhibition)
Wong, Patricia (Secretary)

CALL FOR PAPERS

The 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2006, will be held in Singapore from 5 - 8 December 2006. The conference is organised by the School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore and Institution of Engineers, Singapore. ICARCV focuses on both theory and applications mainly covering the topics of control, automation, robotics and vision. In addition to the technical sessions, there will be invited sessions, tutorials and keynote addresses.

The Proceedings of ICARCV are indexed by ISI Proceedings, EI Compendex and included in the IEEE Xplore.

The topics of interest include, but are not limited to:

Control: Adaptive control; Robust control; Process control; Complex systems; Identification and estimation; Nonlinear systems; Intelligent systems; Discrete event systems; Hybrid systems; Networked control systems; Delay systems; Neural networks; Fuzzy systems; Control of biological systems; Precision motion control; Control applications; Control engineering education.

Automation: Man-machine interactions; Process automation; Intelligent automation; Factory modeling and simulation; Home, laboratory and service automation; Network-based systems; Planning, scheduling and coordination; Nano-scale automation and assembly; Instrumentation systems; Biomedical instrumentation and applications.

Robotics: Modeling and identification; Robot control; Mobile robotics; Mobile sensor networks; Perception systems; Micro robots and micro-manipulation; Visual servoing; Search, rescue and field robotics; Robot sensing and data fusion; Localization, navigation and mapping; Dexterous manipulation; Medical robots and bio-robotics; Human centered systems; Space and underwater robots; Tele-robotics; Mechanism design and applications.

Vision: Image/video analysis; Feature extraction, grouping and segmentation; Scene analysis; Pattern recognition; Learning in vision; Human-computer interaction; Tracking and surveillance; Biometrics; Biomedical Image analysis; Activity/behaviour recognition; Applications.

Best Paper Award: Selection of the best paper will be made at the Conference based on both the technical content and presentation. The winner will be chosen by the Technical Program Committee in consultation with the International Advisory Committee.

Paper Submission:

Papers must be written in English and should describe original work in detail. Please download the template from the conference website and submit the full papers online <http://www.icarcv.org> by 1 April, 2006. Upon acceptance, authors will be required to register and present their papers.

Invited Sessions:

The Technical Program Committee is soliciting proposals for invited sessions focusing on topics of ICARCV 2006. Prospective organisers should submit proposals to the invited Session Chairman eericsung@ntu.edu.sg by 1 March, 2006. Invited sessions are to provide a forum for focused discussions on new topics, or innovative applications of established approaches.

KEYNOTE SPEECHES**Rescue Robotics: A Grand Challenge**

Professor Robin R. Murphy, University of South Florida, USA

Identification of Nonlinear Dynamical Systems

Professor Lennart Ljung, Linköping University, Sweden

Probabilistic Inference in Low Level Vision

Professor Andrew Blake, University of Oxford and Microsoft Research, UK

Important Dates:

Deadline for Full Paper submission	1 April 2006
Notification of Acceptance	1 July 2006
Deadline for Camera Ready Manuscript Submission	1 September 2006
Deadline for Authors' Registration	1 September 2006

Contact

Ms Merlin TOH, ICARCV 2006 Secretariat, Nanyang Technological University
Conference Management Centre/CCE, Nanyang Executive Centre #02-08, 60 Nanyang View, Singapore 639673
Tel: +(65) 6790-4723 Fax: +(65) 6793-0997 Email secretariat@icarcv.org

2D/3D Vision-Based Mango's Feature Extraction and Sorting

Thanarat Chalidabhongze*, Panitnat Yimyan*, and Panmanas Surisomboon**

*Faculty of Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

E-mail: thanarat@it.kmitl.ac.th, panitnat11@hotmail.com

** Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, E-mail: kspanman@kmitl.ac.th

Abstract - This paper describes a vision system that can extract 2D and 3D visual properties of mango such as size (length, width, and thickness), projected area, volume, and surface area from images and use them in sorting. The 2D/3D visual properties are extracted from multiple view images of mango. The images are first segmented to extract the silhouette regions of mango. The 2D visual properties are then measured from the top view silhouette as explained in [7]. The 3D mango volume reconstruction is done using volumetric caving on multiple silhouette images. First the cameras are calibrated to obtain the intrinsic and extrinsic camera parameters. Then the 3D volume voxels are crafted based on silhouette images of the fruit in multiple views. After craving all silhouettes, we obtain the coarse 3D shape of the fruit and then we can compute the volume and surface area. We then use these features in automatic mango sorting which we employ a typical backpropagation neural networks. In this research, we employed the system to evaluate visual properties of a mango cultivar called "Nam Dokmai". There were two sets total of 182 mangoes in three various sizes sorted by weights according to a standard sorting metric for mango export. Two experiments were performed. One is for showing the accuracy of our vision-based feature extraction and measurement by comparing results with the measurements using various instruments. The second experiment is to show the sorting accuracy by comparing to human sorting. The results show the technique could be a good alternative and more feasible method for sorting mango comparing to human's manual sorting.

Index Terms - Vision system, Vision-base fruit sorting, 3D Volume reconstruction, Feature extraction.

I. INTRODUCTION

Thailand is known as a home to a large variety of fruits, both seasonal and all-year-round. Mango is one of the potential fruits for both local and international markets. Its industry plays an important role in the country's export economy. It is grown in all regions but area of concentration is in the Central and Northeast. At present, mango production has greatly been developed through improved varieties to meet the consumer taste and preference. Overseas demand for Thai mango has steadily increased both in the forms of fresh and canned fruit. In grading mangoes for export, the farmers must examine all the harvested mature mangoes by eyes and hands. In sorting mangoes, some confused mango is resolved

by weighing. This is quite subjective. So, farmers need alternatives for sorting and grading mangoes since hand labor is costly and inaccurate. An automated mango sorting system could be more feasible.

In recent years, image processing and computer vision technology has become more potential and more important to many areas including agricultural industry. Machine vision has been often used to develop automatic fruits/vegetable sorting and grading. Color image processing techniques, presented in [1-3], were proposed to judge maturity levels or growing of the agricultural products. Reference [3] developed an automated fruit grading system using physical properties analysis such as size, maximum and minimum diameters, projected area, shape, color, bruise, etc. Cunha [4] used recognition technique to analyse the pathological stress conditions and characterization of the fruits or plant leaf. Runtz and Dave [5,6] applied image processing techniques for classification and identifying of the plant species. All above systems are very beneficial to the agricultural industry.

There have been many works in agricultural product sorting using vision techniques. However, most of them work on 2D vision such as work presented in [3] which considered the size such as diameters or projected area. Also, most techniques are suitable for circular agricultural products. Thus, the motivation of our work is to develop a method that can extract both 2D and 3D visual properties of generic shape fruits for grading and sorting.

This report describes a vision system that can extract the 2D and 3D mango's visual features and use them in fruit sorting. The work is an extension of the previous system proposed in [7] which introduced techniques for extract and analyse the 2D mango properties which include projected area, length and width. This report introduces an additional 2D property which is thickness and also 3D properties, volume and surface area, of the fruit. The thickness comes from the side view image. The 3D fruit volume reconstruction is done using volumetric caving on multiple silhouette images. First the cameras are calibrated to obtain the intrinsic and extrinsic camera parameters. Then the 3D volume voxels are crafted based on silhouette images of the fruit in multiple views. After craving all silhouettes, we obtain the coarse 3D shape of the fruit and then we can compute the surface area. We then use these features in automatic mango sorting which we employ a typical backpropagation neural networks

We employed the system to evaluate visual properties of a mango cultivar called "Nam Dokmai". There were two sets total of 182 mangoes in three various sizes sorted by weights according to a standard sorting metric for mango export. Two experiments were performed. One is for showing the accuracy of our vision-based feature extraction and measurement by comparing results with the measurements using various instruments. The second experiment is to show the sorting accuracy by comparing to human sorting.

The main objective of this research is to investigate the potential of using image processing and computer vision techniques on mango's external physical analysis as an alternative or supplemental to the traditional manual method. The method is shown to be more convenient, comfortable, efficient, and less time consuming than management by human. In addition, the method can be extended and applied to analyse and extract visual properties of other agricultural products as well.

II. SHAPE FROM SILHOUETTES

The reconstruction of object's 3D shape from its multiple 2D images has been a challenging problem in the field of computer vision. Shape from silhouettes is well-known technique for estimating 3D shape. The process starts by obtaining the multiple views images of the object which can perform in many ways. The works presented in [8-14] capture an object images using multiple cameras which are located in the different positions surrounding the object. References [15,16] use a fixed camera capturing image sequence of an object which is placed on a rotating table. Kuzni and Sinram [17] use a camera moving surrounding an object to capture multiple views sequence. After camera calibration is done to produce the intrinsic and extrinsic parameters of each camera, these parameters are then used to reconstruct 3D model. There are approaches for 3D model reconstruction. Reference [10] employed a basic theory of epipolar geometry to reconstruct the 3D shape of the object by considering camera calibration information and matching points in the images. References [11-15,17-18] used volumetric intersection techniques. The idea is based on silhouette constraints that each 2D silhouette of an object constrains the object inside the volume produced by back projecting the silhouette from the corresponding view point. The object is generated by intersection of back-projecting silhouette images into the 3D world space. Reference [14] applied parallel processing for the volume intersection because the back-projection process can be divided into small independent processes. The back-projecting of each silhouette to 3D space runs on each computer without referring to other silhouettes. The method generates a coarse conical shape, which is an approximate model that called visual hull. The shape is more similar and accurate to the real object, if it is generated by more multiple view images of the object. However, the concavities and critical areas on the object cannot be recovered because the viewing region doesn't completely surround the object.

Works presented in [8,9,16] employ another methods for 3D reconstruction which is space carving technique. This technique is quite intuitive. After camera calibration is processed to obtain the intrinsic and extrinsic camera parameters. A 3D bounding box is modelled to be an initial volume model of the object, then discrete it into voxels. The algorithm is performed by projecting each voxel onto each image plane. If the projected voxel is not totally contained by the silhouette region, the voxel is removed from the object volume. Otherwise, it is kept in the object volume.

III. PROPOSED SYSTEM

In this section, we describe in details our methods in processing and analysing mango images in order to extract their 2D and 3D visual properties. We divide the section into five subsections: first subsection discusses our image acquisition method and setup. The second subsection describes camera calibration. The third subsection describes the method for 3D object reconstruction from multiple views of silhouette images. Then, next subsection describes methods for computing 2D and 3D mango's visual properties. The last one, we discuss about the automatic sorting method using these extracted features.

A. Mango Images Acquisition

Our image acquisition setup is shown in Fig. 1. The four digital cameras are used. One camera captures top-view image of the object, the other three are put surrounding the object to capture three side-view images. The images are 1200 x 900 pixels and saved in raw RGB format. The mango is placed on a back-and-white chessboard calibration grid with 20mm x 20mm grid size. The captured images are shown in Fig. 2. After capturing all mango images, the region of mango is segmented by our methods explained in [7], and it is defined to be the object silhouette. Fig. 3 shows the four silhouette images which are results of our segmentation on the input images shown in Fig. 2.

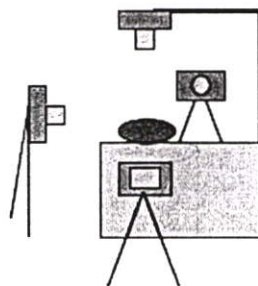


Fig. 1 Image acquisition setup

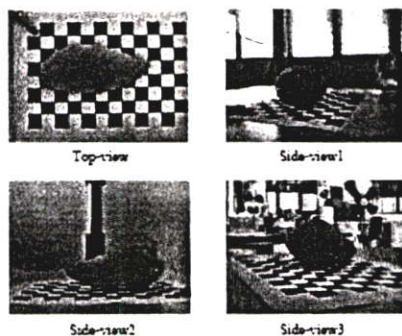


Fig. 2. The captured images from four camera views.

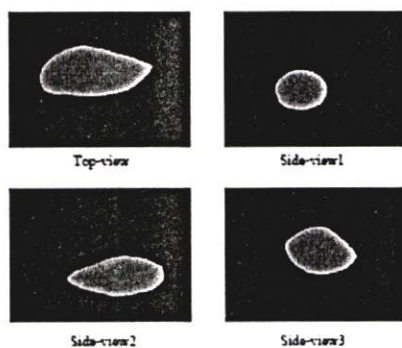


Fig. 3. Segmentation results.

B. Camera Calibration

To reconstruct 3D model from multiple view images, we calibrate our cameras using method in [19] to obtain both intrinsic and extrinsic camera parameters.

The intrinsic camera parameters are the parameters to link the pixel coordinates of an image point with the corresponding coordinates in the camera reference frame. The intrinsic camera parameters include focal length (f_x, f_y), principal point coordinate (O_x, O_y), skew coefficient (S) and image distortion coefficients (k_r) which contain both radial and tangential distortions.

The extrinsic camera parameters are the parameters that define the orientation and location of the camera reference frame with respect to the world reference frame. The extrinsic camera parameters, rotation matrix (R) and translation vector (T).

C. 3D Volume Reconstruction

After obtaining the intrinsic and extrinsic camera parameters from calibration, the next process is based on space carving method. A large bounding box is modelled to be an initial volume enclosing the 3D as initialization. After that we divide the whole volume into cubical voxels. Then the voxel space containing n^3 voxels is generated. Subsequently, we project each voxel in the voxel space onto the images by using the corresponding camera parameters. If the projected voxel falls outside the silhouette in at least one view, it is discarded from the volume which is set to be transparent. Otherwise, it is kept in the object voxel space and set opaque to be an object voxel. After all voxels in the voxel space are processed, the remaining is an approximation of the object volume. The correct object volume is definitely equal or less than this rough approximation. Fig. 4 illustrates the explained method of 3D volume reconstruction.

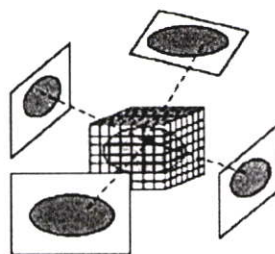


Fig. 4. Voxel space and 3D volume reconstruction from multiple silhouette images.

To project the voxel onto image planes, we follow these equations. First, transform the world coordinate to camera coordinate by considering extrinsic camera parameters using this equation

$$X_c = RX_w + T \quad (1)$$

where X_c is an object's coordinate in the camera coordinate and X_w is an object's coordinate in the world coordinate.

Equation (2)-(6) are then used to transform the camera coordinate to pixel coordinate by considering intrinsic camera parameters.

$$x_p = \begin{bmatrix} x_c / z_c \\ y_c / z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (3)$$

$$dx = \begin{bmatrix} 2kx_1x_2 - kx_2(r^2 + 2x^2) \\ kx_1(r^2 - 2y^2) + 2kx_2x_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = [1 + kx_1r^2 - kx_2r^2 - kx_3r^2]x_n - dx \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 & sf_1 & 0 & 0 \\ 0 & f_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

where x_n is normalized image projection, dx is a tangential distortion, k contains both radial and tangential distortion coefficients. x_p, y_p is a projected pixel coordinate in the image.

D. 2D:3D Visual Feature Extraction

As mentioned, this work is an extension of the previous system proposed in [7] which introduced techniques for extract and analyse the 2D mango properties which include projected area, length and width. This report introduces an additional 2D property which is thickness and also 3D properties, volume and surface area, of the fruit. The 2D:3D features that our system extracts include:

1) *Projected area (A)* is defined as the area of the 2D projection image of the mango's top-view shown in Fig. 5a.

2) *Length (L)* is defined as the length of the mango's major axis which lies between the tip and the pole of the mango.

3) *Width (W)* is defined as the length of the mango's minor axis in the top-view image. The minor axis is the widest line that perpendicular to the major axis.

4) *Thickness (T)* is defined as the length of the mango's minor axis in the side-view image.

5) *Volume (V)* is defined as the volume of 3D object which is reconstructed using four views of silhouette images. The volume is estimated by counting the number of voxels which are set to be object voxel in the 3D object voxel space. With the known calibration grid size, we can calculate the volume.

6) *Surface area (S)* is defined as the surface area of the reconstructed 3D object. Surface area is estimated by counting the number of voxels that are located on the surface of 3D object.

Fig. 5 shows 2D visual properties, A , L , W , and T . Fig. 6 shows the image of the reconstructed 3D mango volume from four view images which we can computed V and S .

E. Mango Sorang

In sorting mangoes for export, the farmers examine all the harvested mature mangoes by eyes and hands which are quite subjective. The manual sorting is usually acceptable but sometimes mistaken. Moreover, the sorting process by hands is quite time consuming. Our objective of this work is to investigate the potential of using image processing and

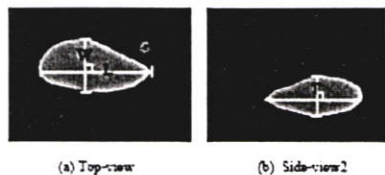


Fig. 5 2D visual features: (a) Projected Area (A), Length (L), Width (W), and (b) Thickness (T).



Fig. 6 Reconstructed 3D voxel surface.

computer vision techniques as an alternative or supplemental to the traditional manual method. To sort the mangoes, we employ backpropagation neural networks to classify the mangoes samples into three classes – SS, S, L – according to the standard sorting metric used in export business. The network is three-layer network. The input layer contains 6 nodes; each corresponds to each of the 6 measurements described in previous subsection. The network contains one hidden layer. The output layer contains 3 nodes; each corresponds to each size (SS, S, L).

IV. EXPERIMENTS AND RESULTS

The proposed techniques mentioned in previous sections were implemented in C++ and MATLAB on a typical PC. We employed the system to evaluate visual properties of a mango cultivar called "Nam Dokmai" obtained from a local mango farm in Chachoengsao, a province in Central of Thailand. The mangoes were harvested at the same maturity as they are harvested for export. There were two sets total of 182 mangoes in three various sizes sorted by weights according to a standard sorting metric for mango export. The standard metric for export sorting uses mango's weight: SS is for mango weighs less than 280 grams, S is for weight between 280-330 grams, and L is for weight between 331-550 grams.

The mango samples were divided into two groups. First group consists of 97 mangoes. We analyze this group for two purposes, first is comparing the feature measurement accuracy between proposed vision techniques and using instruments. The other purpose is to compare the classification accuracy

using the extracted visual features. The second group of mango samples consists of 85 mangoes. We analyze this group for comparing of classification accuracy between proposed vision technique and experienced farmers

A. Experiment#1: Feature Extraction and Analysis

The purpose of this experiment is to evaluate the accuracy of our proposed vision-based mango feature extraction and analysis. We did this by comparing the vision-based results with the results obtained from using instruments typically used in laboratory. Various instruments were used to measure mango's physical properties. Length, width and thickness are measured using vernier caliper. The mangoes' volume is measured by weighing mango in the distilled water. The obtained weight generates the volume using Eq. (7), where W_w is weight of the fluid displaced by the object (g), ρ is density of the fluid that is about 1 g/cm^3 , V is volume of the fluid displaced by the object (cm^3).

$$W_w = \rho V \quad (7)$$

The projected area is measured using planimeter on top-view images. Fig. 7 shows some of the equipment setup and measurement. The measurements were done on the first set of mangoes, and the results are shown in Table 1.



Fig. 7 Equipment setup for measurement by lab instruments.

To evaluate our vision system, we captured images of those mangoes using four Kodak CX6330 digital cameras. We then perform techniques we have described above to extract those features and analyse them to obtain those 6 measurements. The results are shown in Table 2. Compare to the results from instrument measurement, our vision approach yields bigger variations. However, the vision-based measurement is much efficient in term of speed and convenience.

B. Experiment#2: Mango Sorting

For sorting, we used the backpropagation neural network toolbox in MATLAB. The two groups of samples in the total of 182 mangoes were used in sorting experiments. All mangoes were classified into three size groups (SS, S and L) based on their visual features extracted using our vision-based technique. The 6 features (A , L , W , T , V , S) were used and the classification result shows 96.47% accuracy.

Table 1 Mango's physical properties measured using lab instruments

Parameters	SS		S		L	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
A (cm^2)	8.65	6.27	88.14	3.85	100.07	8.86
L (cm)	13.34	0.84	13.92	0.59	14.87	0.86
W (cm)	6.83	0.18	7.14	0.14	7.62	0.39
T (cm)	6.06	0.28	6.31	0.12	6.74	0.34
V (cm^3)	257.69	18.93	297.48	16.32	365.89	48.03

Table 2 Mango's physical properties measured using proposed vision-based system.

Parameters	SS		S		L	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
A (cm^2)	76.92	6.98	86.83	4.46	99.30	9.96
L (cm)	13.88	1.00	14.86	0.59	15.83	0.99
W (cm)	7.33	0.27	7.93	0.26	8.54	0.47
T (cm)	5.42	0.30	5.71	0.30	6.02	0.37
V (cm^3)	279.56	22.12	327.12	14.02	401.14	38.83
S (cm^2)	336.16	18.73	372.69	11.63	426.17	46.38

For the second sample set, we asked two experienced farmers sorted mangoes using their eyes and hands comparing to the ground-truth which is the classification based on weight following the standard metric. The average classification accuracy of the two experienced farmers is 87.65% (farmer1: 83.53%, farmer2: 91.76%).

IV. CONCLUSIONS

We have described image processing and computer vision techniques to analyze the 2D and 3D mango's physical properties. Some parameters are defined and calculated for physical properties. These include projected area (A), length (L), width (W), thickness (T), 3D volume (V), and 3D surface area (S). One hundred and eighty two "Nani Dokmai" cultivar mangoes in three sizes (SS, S and L) were evaluated. The experimental results show that our propose techniques could be a good alternative and more feasible method for grading and sorting mango comparing to human's manual.

REFERENCES

- [1] Y. Gejima, H. Zhang, and M. Nagata, "Judgement on Level of Maturity for Tomato Quality Using L*a*b* Color Image Processing." Proc. the 2003 IEEE ASME Int'l Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003), 2003.
- [2] T. Masahiko, K. Miyazono, I. Hiroaki, and T. Nishimaru, "Near Infrared Spectral Imaging for the Field Service of Lettuce Growth." SICE, pp. 380-381, 2002.
- [3] J.B. Njorgega, K. Ninomiya, N. Kanda, and H. Toita, "Automated Fruit Grading System using Image Processing." Proc. SICE Annual Conference (SICE2002), Japan, 2002.
- [4] J. B. Cunha, "Application of Image Processing Techniques in the Characterization of Plant Leaf." Proc. IEEE Int'l Symposium on Industrial Electronics, 2003.

- [5] K.J. Kunz, "Electronic Recognition of Plant Species for Machine Vision Spray Control Systems", Proc. IEEE Western Canada Conference on Computer, Power, and Communication Systems in a Rural Environment (WESCANEX'91), pp. 84-88, 1991.
- [6] S. Drew and K. Kunz, "Image Processing Methods for Identifying Species of Plants," Proc. IEEE Western Canada Conference on Computer, Power, and Communication Systems in a Rural Environment (WESCANEX'95), pp. 403-408, 1995.
- [7] P. Yanyan, T. Chahdabhougje, P. Surisomboun, and S. Boonning, "Physical Properties Analysis of Mango using Computer Vision," Proc. ICCAS2005, 2005.
- [8] P. Esser, E. Sminchischi, and B. Girod, "Multi-Hypothesis Volumetric Reconstruction of 3-D Objects from Multiple Calibrated Camera Views," Proc. ICASSP'99, 1999.
- [9] K.N. Kutulalos and S.M. Seitz, "A Theory of Shape by Space Carving," Proc. CVU, 38(3): 197-216, 2000.
- [10] M. Kimura, H. Saito, and T. Kanade, "2D Visual Construction based on Epipolar Geometry", Proc. IEEE, 2000.
- [11] Y. Iwadate, M. Katayama, K. Tomiyama, and H. Inuzumi, "VRML Animation from Multi-view Images," NHK Laboratories Note No. 473, 2002.
- [12] B. Lok, "Online Model Reconstruction for Interactive Virtual Environments," Proc. ACM 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics, Chapel Hill, NC, 18-21, March 2001, pp. 69-72.
- [13] M. Kampel, R. Sablmann, and S. Tosovic, "Fusion of Surface and Volume Data," CVGIP: Image Understanding, 58(1): 23-32, 1993.
- [14] T. Wada, X. Wu, S. Tokai, and T. Matsuyama, "Homography Based Parallel Volume Intersection: Toward Real-Time Volume Reconstruction Using Active Cameras," Fifth IEEE International Workshop on Computer Architectures for Machine Perception (CAMP'00), pp. 331-340, 2000.
- [15] V. Fremont and R. Chellah, "Turntable-Based 3D Object Reconstruction," Proc. IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, Singapore, pp. 1276-1281, 2004.
- [16] A.Y. Mulyavin and V. Atalay, "Silhouettes-based 3D Model Reconstruction from Multiple Images," Proc. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B.
- [17] Y. Kuzun and O. Sertoz, "Volumetric Reconstruction of Cultural Heritage Artifacts," CIPA 2003, XIXth International Symposium, Antalya, Turkey, pp. 93-98, 2003.
- [18] J. Carr, W. Fright, A. Gee, R. Prager and K. Dalton, "3D Shape Reconstruction using Volume Intersection Techniques," IEEE International Conference on Computer Vision Proceedings, pp. 1095-1110, January 1998.
- [19] J.Y. Bouguet, "Camera Calibration Toolbox for MATLAB," unpublished.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวพนิตนาฏ ขี้มเข้ม
วัน เดือน ปีเกิด	22 เมษายน พ.ศ.2523
ที่อยู่	เลขที่ 10/6 ซ.18 ถ.บางแสนล่าง ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20130
ประวัติการศึกษา	2543 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา