

การต่อภาพด้วยเทคนิคของฮัฟและเฟสคอร์รีเลชันสำหรับแผนที่อิเล็กทรอนิกส์
จากภาพถ่ายทางอากาศ

IMAGE REGISTRATION USING HOUGH TRANSFORM AND PHASE
CORRELATION FOR ELECTRONICS MAP FROM AERIAL MAP



พุทธิชัย สัมมา
BHUTTICHAJ SUMMAR

ฉพ.
พ 6๖7 ก
2548

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**61205**
วัน,เดือน,ปี.....**17 ก.ค. 2549**

b. 115๗๔๑18
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2548

ISBN 974-15-2058-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**IMAGE REGISTRATION USING HOUGH TRANSFORM AND PHASE
CORRELATION FOR ELECTRONICS MAP FROM AERIAL MAP**



BHUTTICHAJ SUMMAR

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

2005

ISBN 974-15-2058-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การต่อภาพด้วยเทคนิคของฮัฟและเฟสคอรี่เลขชั้นสำหรับแผนที่อิเล็กทรอนิกส์จากภาพถ่ายทางอากาศ
นักศึกษา	นายพุทธิชัย สัมมา
รหัสนักศึกษา	45061052
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.อรฉัตร จิตต์โสภักตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการจัดเรียงภาพเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่ โดยใช้เทคนิคความสัมพันธ์ระหว่างเฟสในฟูรีเยร์โคเมน เทคนิคของฮัฟ และมัลติรีโซลูชันเวฟเล็ต การจัดเรียงภาพเพื่อประกอบภาพ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านภูมิศาสตร์ได้ โดยเราอาจใช้ภาพที่ถ่ายมาจากกล้องของดาวเทียมซึ่งมีการเคลื่อนที่ตามวงโคจร เรานำภาพที่ใช้มาหลายๆ ภาพนั้นมาทำการจัดเรียง และประกอบกันเข้าให้เป็นภาพใหญ่ภาพเดียว เพื่อให้ง่ายต่อการมองเห็นพื้นที่โดยรวม หรืออาจใช้สร้างแผนที่ สำหรับการจัดเรียงภาพเพื่อประกอบนี้ เริ่มต้นจากการทำมัลติรีโซลูชันเวฟเล็ตกับภาพ แล้วใช้เทคนิคของฮัฟเพื่อหามุมที่เปลี่ยนไประหว่างภาพ เมื่อได้มุมแล้วเราจะทำการหมุนภาพกลับ แล้วใช้เทคนิคความสัมพันธ์ระหว่างเฟสมาทำการเปลี่ยนแปลงในแนวแกนนอน และการเปลี่ยนแปลงในแนวแกนตั้งต่อไป เมื่อได้ค่าการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดแล้ว จึงนำการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมาทำการเปลี่ยนแปลงภาพอินพุต แล้วทำการรวมภาพกับภาพตั้งต้น เพื่อสร้างภาพใหญ่ภาพเดียวที่มีรายละเอียดของทั้ง 2 ภาพ

Thesis Title	Image Registration Using Hough Transform and Phase Correlation for Electronics Map from Aerial Map
Student	Mr.Bhuttichai Summar
Student ID.	45061052
Degree	Master of Engineering
Programme	Computer Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Orachat Chitsobhuk

ABSTRACT

This research presents a method for registering images using phase correlation technique on fourier domain, hough transform and multi-resolution wavelet. Image registration can be applied in several applications. We can use images taken by the camera on the moving satellite to register into a large image. The purpose of satellite image registration is making it easier to view all images. We can create a map of the desired location from the registered images. Image registration can be created by transforming source and input image to wavelet domain. An angular transition can be obtained by applying hough transform technique. Then we apply phase correlation technique to find x-axis and y-axis transition. After we get the transition, we use the transition to transform the input image. Then we compose and blend all images into a new large image with detail of all source images.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้เสียมิได้ หากปราศจากความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และญาติของข้าพเจ้าที่ได้ให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อรฉัตร จิตต์โสภักตร์ สำหรับวิชาความรู้ที่ได้มอบให้การให้คำปรึกษา ดูแล ตลอดจนคอยให้แนวทางในการแก้ปัญหาตั้งแต่เริ่มต้นจนสามารถสำเร็จเป็นวิทยานิพนธ์นี้ได้

ขอบคุณเพื่อนๆ ข้าพเจ้า ที่ได้คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือหลายๆ ด้านแก่ข้าพเจ้า และท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนส่งเสริมการวิจัย (สกว.) สำหรับการสนับสนุนงบประมาณในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

คุณความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดามารดาที่รัก และครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้เคยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า

พุทธิชัย สัมมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
1.7 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 แนวความคิดเบื้องต้น และตัวอย่างการทำ Image Registration.....	5
2.1 แนวคิดเบื้องต้นของการทำ Image Registration.....	5
2.2 ตัวอย่างการทำ Image Registration.....	7
2.2.1 Image Registration บน Spatial Domain.....	7
2.2.1.1 การคำนวณ โดยใช้ Control Point.....	7
2.2.1.2 การคำนวณค่าตัวแปรแต่ละตัวในเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลง โดยใช้วิธีการค้นหา.....	8
2.2.2 Image Registration บน Frequency Domain.....	9
บทที่ 3 ความรู้พื้นฐานในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	10
3.1 Geometric Transform.....	10
3.1.1 การทำ Geometric Transform โดยการเลือกใช้จุดใดๆ แทนรูปร่างทั้งหมด.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 การเลื่อนตำแหน่งของภาพ (Translation).....	12
3.1.3 การหมุนภาพ (Rotation).....	14
3.1.4 การย่อ และขยายขนาด (Scaling).....	16
3.1.5 การบิด การยืด และการเปลี่ยนรูปร่าง.....	17
3.1.6 สมการรวมของ Geometric Transform.....	18
3.2 Interpolation.....	21
3.2.1 Forward Mapping.....	22
3.2.2 Backward Mapping.....	22
3.2.2.1 Zero-order Interpolation (Nearest Neighbor).....	23
3.2.2.2 First-order Interpolation.....	23
3.2.2.3 High-order Interpolation (Cubic Interpolation).....	24
3.3 Fourier Transform.....	25
3.4 Phase Correlation.....	28
3.5 Wavelet Transform.....	29
3.6 Hough Transform.....	32
3.7 Low Pass Filter.....	35
3.7.1 การทำ Low Pass Filter บน Spatial Domain.....	35
3.7.1.1 Mean Filtering.....	35
3.7.1.2 Order-statistic Filtering.....	36
บทที่ 4 การต่อภาพด้วยเทคนิคของฮัฟ และเฟสคอร์เรเลชันสำหรับแผนที่อิเล็กทรอนิกส์จากภาพถ่าย ทางอากาศ.....	38
4.1 ขั้นตอนการทำงานรวมของการทำ Image Registration.....	38
4.2 การหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ.....	39
4.2.1 การหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยใช้เทคนิค Canny Edge Detector ในการหา ขอบของวัตถุภายในภาพ.....	39
4.2.1.1 Wavelet Transform.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.2 Canny Edge Detector.....	40
4.2.1.3 Hough Transform.....	41
4.2.1.4 การหาการเปลี่ยนแปลงมุมด้วยเทคนิค Phase Correlation.....	44
4.2.2 การหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยการใช้องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ.....	44
4.2.2.1 Median Low Pass Filter.....	45
4.2.2.2 Wavelet Transform.....	46
4.3 การหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง.....	47
4.4 การรวมภาพตั้งต้น.....	49
4.4.1 การทำ Root Mean Square Error วัดความแตกต่างระหว่างภาพ.....	50
4.4.2 การทำ Normalized cross-correlation.....	51
4.4.3 การนำภาพที่ได้มารวมกัน เพื่อสร้างเป็นภาพใหม่.....	51
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	52
5.1 ข้อมูลภาพต้นฉบับที่ใช้.....	52
5.2 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุม.....	54
5.2.1 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของผลจากการเลือกค่า Threshold ของ Hough Transform.....	54
5.2.1.1 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมจากภาพถ่ายดาวเทียมจาก บริเวณเขตลาดกระบัง.....	55
5.2.1.2 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมจากภาพถ่ายดาวเทียมจาก บริเวณถนนอุทยาน.....	56
5.2.1.3 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมจากภาพถ่ายดาวเทียมจาก บริเวณเขตดอนเมือง.....	57
5.2.2 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของผลของการใช้ Window ขนาดต่างๆ ในการทำ Median Low Pass Filter.....	59
5.2.2.1 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมจากภาพถ่ายดาวเทียมจาก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บริเวณเขตลาดกระบัง.....	59
5.2.2.2 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมจากภาพถ่ายดาวเทียมจาก บริเวณถนนอุทยาน.....	60
5.2.2.3 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมจากภาพถ่ายดาวเทียมจาก บริเวณเขตคอนเมือง.....	60
5.2.3 การทดลองเปรียบเทียบเวลาในการหาการเปลี่ยนแปลงมุม.....	61
5.3 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง.....	62
5.3.1 การทดลองหาความถูกต้อง และขอบเขตของการหาการเปลี่ยนแปลง ตำแหน่ง.....	63
5.3.2 การทดลองเปรียบเทียบเวลาในการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง.....	65
5.4 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดหลังจากการรวมภาพ.....	67
5.4.1 ตัวอย่างการทดลองวัดค่า RMSE และ Cross-correlation เพื่อใช้ เปรียบเทียบในการเลือกผลการทดลอง.....	68
5.4.1.1 การทดลองที่ 1.....	68
5.4.1.2 การทดลองที่ 2.....	70
5.4.1.3 การทดลองที่ 3.....	72
5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	73
บทที่ 6 สรุปผล และแนวทางในการพัฒนา.....	76
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
6.2 ข้อจำกัด และขอบเขตของงานวิจัยนี้.....	79
6.3 แนวทางในการพัฒนา.....	79
เอกสารอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข ผลการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง.....	96
ภาคผนวก ค การทดลองหาขอบเขตของการทับซ้อนกันระหว่างภาพในการหา การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งกับภาพขนาดต่างๆ.....	146
ภาคผนวก ง การทดลองการรวมภาพตั้งต้นด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้.....	152
ภาคผนวก จ ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	161
ประวัติผู้เขียน.....	172



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากการทำ Phase Correlation ที่ต้องพิจารณา.....	49
5.1 ผลการหาความผิดพลาดเฉลี่ยจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพโดยใช้ ภาพตัวอย่างที่ 5.3.....	56
5.2 ผลการหาความผิดพลาดเฉลี่ยจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพโดยใช้ ภาพตัวอย่างที่ 5.4.....	57
5.3 ผลการหาความผิดพลาดเฉลี่ยจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพโดยใช้ ภาพตัวอย่างที่ 5.4.....	58
5.4 ผลการหาความผิดพลาดเฉลี่ยจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพโดยใช้ ภาพตัวอย่างที่ 5.3.....	60
5.5 ผลการหาความผิดพลาดเฉลี่ยจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ โดยใช้ ภาพตัวอย่างที่ 5.4.....	60
5.6 ผลการหาความผิดพลาดเฉลี่ยจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพโดยใช้ ภาพตัวอย่างที่ 5.5.....	60
5.7 ผลค่าความผิดพลาดจากการทดลองการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับ ภาพในรูปที่ 5.3.....	63
5.8 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับ ภาพในรูปที่ 5.4.....	63
5.9 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับ ภาพในรูปที่ 5.5.....	64
5.10 เปรอ์เซ็นต์เฉลี่ยของพื้นที่ทับซ้อนกันน้อยที่สุดที่สามารถหาการเปลี่ยนแปลง การเลื่อนตำแหน่งได้ สำหรับภาพขนาดต่างๆ.....	65
5.11 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลงที่ คำนวณได้.....	69
5.12 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลงที่ คำนวณได้.....	71
5.13 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลงที่ คำนวณได้.....	72

ก.1 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมกับภาพตัวอย่างดังรูปที่ ก.1..... 84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ 84

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ก.2 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมกับภาพตัวอย่างดังรูปที่ ก.2.....	86
ก.3 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมกับภาพตัวอย่างดังรูปที่ ก.3.....	88
ก.4 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมกับภาพตัวอย่างในรูปที่ ก.1.....	90
ก.5 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมกับภาพตัวอย่างในรูปที่ ก.2.....	92
ก.6 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมกับภาพตัวอย่างในรูปที่ ก.3.....	94
ข.1 ตัวอย่างค่าการคำนวณการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง.....	96
ค.1 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 100x100.....	146
ค.2 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 200x200.....	147
ค.3 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 300x300.....	147
ค.4 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 400x400.....	148
ค.5 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 500x500.....	148
ค.6 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 600x600.....	149
ค.7 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 700x700.....	149
ค.8 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 800x800.....	150
ค.9 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 900x900.....	150
ค.10 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 1000x1000.....	151
ง.1 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลง.....	153
ง.2 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลง.....	154
ง.3 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลง.....	156
ง.4 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลง.....	158
ง.5 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลง.....	160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างการทำ Image Registration.....	5
2.2 ตัวอย่างการทำ Image Registration.....	5
2.3 การเปลี่ยนแปลงในลักษณะ 3 มิติจะทำให้เกิดการย่อ ขยาย บิด หรือผิดรูปของภาพ.....	6
2.4 โดยวิธีการใช้ Control Point ผู้ใช้ต้องเลือก Control Point ซึ่งเป็นจุดเดียวกัน ในภาพที่ 1 และ 2 อย่างน้อยที่สุด 3 คู่.....	7
3.1 การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง.....	11
3.2 การเลือกกลุ่มของจุดแทนเส้นตรงทั้งเส้นในการทำ Geometric Transform.....	11
3.3 การใช้จุดยอดมุมของรูปทรงเหลี่ยมแทนรูปทรงในการทำการเปลี่ยนแปลงภาพ.....	12
3.4 การเปลี่ยนแปลงรูปวงกลม.....	12
3.5 การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง.....	13
3.6 การคำนวณ Geometric Transform โดยตรง และการเลื่อนแกน.....	13
3.7 จุดในตำแหน่ง x_1, y_1 มีการหมุนด้วยมุม θ รอบจุด $(0,0)$ ไปยังจุด x'_1, y'_1	14
3.8 การหมุนแกนรอบจุดใดๆ.....	15
3.9 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของการจับภาพในระนาบเดิม ทำให้ภาพเกิดการย่อ หรือขยายขนาด.....	16
3.10 การขยายขนาดของวัตถุ.....	16
3.11 การเปลี่ยนตำแหน่งของจุดจับภาพ และระนาบของการจับภาพ จะทำให้ภาพ มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป.....	17
3.12 การเปลี่ยนรูปร่างของภาพ.....	18
3.13 การเปลี่ยนแปลงภาพทำให้บางส่วนของภาพเกินขอบเขตของภาพ และหายไป.....	21
3.14 การทำ Forward Mapping และการปิดค่าตำแหน่งของจุดที่ได้.....	22
3.15 การทำ Backward Mapping โดยการคำนวณย้อนกลับการเปลี่ยนแปลงปกติ ที่ทุกๆ จุดในภาพใหม่.....	23
3.16 การทำ Geometric Transform ด้วยวิธี Backward Mapping.....	23
3.17 การแปลงสัญญาณจาก Time Domain เป็น Frequency Domain.....	25
3.18 การทำ Fourier Transform กับภาพ.....	25
3.19 การทำ FFT กับภาพ.....	27
3.20 เทคนิค DIT-FFT สำหรับข้อมูลจำนวน 8 จุด.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21 การแยกองค์ประกอบของภาพโดยใช้ Wavelet กับภาพตั้งต้น	30
3.22 องค์ประกอบของภาพ Wavelet	30
3.23 การทำ DWT through Lifting	31
3.24 การทำ Multi-resolution Wavelet	32
3.25 เส้นตรงในพิกัดเชิงขั้ว	33
3.26 การทำ Hough Transform	34
3.27 การใช้ Windowing Technique เข้าไปวิ่งในภาพ	36
3.28 การแก้ปัญหาโดยการสะท้อนค่าใน Window ในกรณีที่พิกเซลอยู่ที่ขอบหรือมุมของภาพ	36
3.29 การทำ Median Filtering กับภาพ โดยใช้ Window ขนาดต่างๆ	37
4.1 โค้ดแกรมรวมขั้นตอนทั้งหมดของการทำ Image Registration ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	38
4.2 ขั้นตอนการหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยใช้เทคนิค Canny Edge Detector ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ	39
4.3 การทำ Wavelet Transform เพื่อลดขนาดภาพตั้งต้นลง	40
4.4 ตัวอย่างการทำการหาขอบโดยการทำ Canny Edge Detector กับองค์ประกอบความถี่ต่ำของภาพ Wavelet	41
4.5 ตัวอย่างการทำให้ Hough Transform กับภาพ	42
4.6 การทดลองการหมุนเส้นตรงเพื่อหาความสัมพันธ์ของ Hough Transform	42
4.7 การทำ Hough Transform และการเลือกค่า Threshold ต่างๆ	43
4.8 ขั้นตอนการหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยใช้องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ	45
4.9 ตัวอย่างผลจากการทำ Median Low Pass Filter ขนาดต่างๆ	46
4.10 การใช้องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet เพื่อหาขอบของวัตถุภายในภาพ	47
4.11 ขั้นตอนในส่วนการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง	48
4.12 ค่าการเปลี่ยนแปลงที่ต้องพิจารณาทั้งหมดจำนวน 12 ค่า	50
5.1 ภาพถ่ายดาวเทียมต้นฉบับที่ใช้ในการทดลอง	53
5.2 ภาพตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุม	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 ภาพตัวอย่างการทดลอง.....	55
5.4 ภาพตัวอย่างการทดลอง.....	57
5.5 ภาพตัวอย่างการทดลอง.....	58
5.6 ผลการวัดเวลาในการหาการเปลี่ยนแปลงมุมด้วยเทคนิคต่างๆ.....	62
5.7 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการประมวลผลการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง.....	66
5.8 ตัวอย่างการรวมภาพเข้าด้วยกัน.....	67
5.9 ภาพตั้งต้นในการทดลองที่ 1.....	68
5.10 ตัวอย่างการรวมภาพเข้าด้วยกัน.....	70
5.11 ภาพตั้งต้นในการทดลองที่ 2.....	70
5.12 ตัวอย่างการรวมภาพเข้าด้วยกัน.....	71
5.13 ภาพตั้งต้นในการทดลองที่ 3.....	72
5.14 ตัวอย่างการรวมภาพเข้าด้วยกัน.....	73
ก.1 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	84
ก.2 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	86
ก.3 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	88
ข.1 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	96
ค.1 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	146
ค.1 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	146
ค.1 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	146
ค.1 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	146
ค.1 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	146
ง.1 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	152
ง.2 ผลการรวมภาพตั้งต้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ได้.....	153
ง.3 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	154
ง.4 ผลการรวมภาพตั้งต้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ได้.....	155
ง.5 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	156
ง.6 ผลการรวมภาพตั้งต้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ได้.....	157
ง.7 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้วยประการใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.8 ผลการรวมภาพตั้งต้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ได้.....	158
จ.9 ภาพตั้งต้นในการทดลอง.....	159
จ.10 ผลการรวมภาพตั้งต้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ได้.....	160



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการประมวลผลภาพ (Image Processing) เป็นขอบเขตงานวิจัยที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากภาพที่ได้มานั้นอาจจะยังไม่ตรงกับความต้องการของผู้ใช้ หรือมีข้อบกพร่องเกิดขึ้นในภาพ เช่น ภาพที่ถ่ายมามี Noise, ภาพผิดโฟกัส, มีดหรือสว่างเกินไป ภาพเหล่านี้จำเป็นต้องนำมาผ่านการประมวลผลภาพ เพื่อให้ภาพที่ได้มานั้นมีคุณภาพสูงขึ้น การประมวลผลภาพนี้อาจจะเป็นการเพียงการเพิ่มความสว่างให้แก่ภาพ, มีการตัดแต่งภาพ หรือมีการกรอง Noise อย่างไรก็ตามจุดประสงค์หลักของการประมวลผลภาพโดยส่วนใหญ่ก็เพื่อทำการเพิ่มคุณภาพของภาพ เพื่อนำไปใช้งานต่อไปนั่นเอง

การจัดเรียงภาพย่อย เพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่ (Image Registration) คือการรวมภาพหลายๆ ภาพ ที่มีการทับซ้อนกันอยู่ จัดเรียง และประกอบเข้าด้วยกันให้เป็นภาพใหญ่เพียงภาพเดียว เทคนิค Image Registration นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลายรูปแบบ โดยเฉพาะงานวิจัยภาพถ่ายทางอากาศ เนื่องจากภาพถ่ายทางอากาศนั้น มีการถ่ายภาพมาจากดาวเทียม ลักษณะของภาพจะเป็นภาพในแถวเดียวกันต่อกัน กันไปตามวงโคจรของดาวเทียม และมีจำนวนภาพที่ถ่ายมาได้เป็นจำนวนมาก ในการนำภาพถ่ายดาวเทียมมาวิเคราะห์นี้ เราสามารถนำภาพทั้งหมดเข้ากระบวนการ Image Registration เพื่อรวมภาพทั้งหมดให้กลายเป็นภาพเพียงภาพเดียว เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ภาพ นอกจากนี้ภาพที่ได้จากการทำ Image Registration จากภาพถ่ายทางอากาศนี้ คือแผนที่ทางอากาศขนาดใหญ่ในบริเวณที่ถ่ายภาพมานั่นเอง ซึ่งแผนที่นี้อาจจะใช้เป็นแผนที่ทางภูมิศาสตร์ แผนที่ทรัพยากรธรรมชาติ หรือแผนที่ทางทหารก็เป็นที่

Image Registration สามารถนำมาใช้สร้างโลกเสมือน (Virtual World) ได้ โดยการถ่ายภาพรอบตัวเอง 360 องศา แล้วนำภาพทั้งหมดมาประกอบเข้าด้วยกัน แล้วนำไปวางบนพื้นผิวด้านในของทรงกระบอก โดยให้ผู้ใช้อยู่ที่ศูนย์กลาง ก็จะเกิดเป็นโลกเสมือนในลักษณะของทรงกระบอกขึ้นทันที

Image Registration โดยการใช้เทคนิค Phase Correlation เป็นแนวทางหนึ่งในการทำ Image Registration ซึ่งสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว และมีความแม่นยำสูง แต่มีข้อเสียคือ หาได้แค่การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวแกน x และ y เท่านั้น นอกจากนี้ความถูกต้องของการ Register นั้นจำกัดอยู่ที่ระดับจำนวนเต็มเท่านั้น ในที่นี้เราจะได้ใช้เทคนิค Hough Transform เข้ามาช่วยในการหาการเปลี่ยนแปลงมุมของภาพ และใช้ Wavelet Transform เพื่อลดขนาดของข้อมูลลง ทำให้การประมวลผลทำได้รวดเร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาเทคนิค และวิธีการจัดเรียงและประกอบภาพย่อยที่ผ่านมาเพื่อหาข้อดี และข้อเสียของแต่ละวิธี
- 1.2.2 ปรับปรุงวิธีการเดิมโดยอาศัยสมมติฐาน ความเข้าใจ และทฤษฎีอื่นประกอบการทดลอง
- 1.2.3 ทดลองจัดเรียง และประกอบภาพถ่ายดาวเทียมจริง เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง
- 1.2.4 เป็นแหล่งข้อมูลอ้างอิงสำหรับผู้สนใจงานวิจัยด้านนี้ต่อไป

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้จะทำการหาเทคนิค และวิธีการในการทำ Image Registration เพื่อประกอบภาพได้อย่างถูกต้อง หรือมีความคลาดเคลื่อนให้น้อยที่สุด โดยใช้เวลาในการประมวลผลน้อย เพื่อให้สามารถรองรับการจัดเรียงภาพถ่ายทางอากาศซึ่งโดยมากแล้วจะมีปริมาณข้อมูลมากได้อย่างรวดเร็ว หรือสามารถทำในลักษณะของ Real-time ได้ โดยวิธีที่เลือกนำมาใช้นั้นเป็นการใช้เทคนิคประยุกต์เพิ่มเติมเข้ากับทฤษฎีที่มีผู้วิจัยไว้ก่อนหน้านี้ ทำให้เวลาในการคำนวณลดลง และมีความคลาดเคลื่อนจากเดิมไม่มากนัก ผลที่ได้จากการทำ Image Registration จะดูเสมือนกับว่าเป็นภาพถ่ายมาในครั้งเดียวกัน

1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การทำ Image Registration ในงานวิจัยนี้ จะอาศัยทฤษฎี และหลักการดังต่อไปนี้

- 1.4.1 การทำ Geometric Transform
- 1.4.2 การทำ Fourier Transform และคุณสมบัติ Phase Correlation
- 1.4.3 การทำ Hough Transform
- 1.4.4 การทำ Wavelet Transform

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองการทำ Image Registration บน Frequency Domain โดยทำการเปรียบเทียบกับวิธีที่มีผู้ทดลองไว้ในลักษณะเดียวกัน ซึ่งเป็นการหาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงในลักษณะการเลื่อนตำแหน่ง และการหมุนภาพเท่านั้น และสามารถรองรับได้เฉพาะขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงที่เป็นจำนวนเต็มเท่านั้น โดยจะทำการเพิ่มคุณภาพของผลลัพธ์ที่ได้ และลดเวลาที่ใช้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการประมวลผลลง โดยจะมีการวิเคราะห์ภาพ Input ในลักษณะต่างๆ ว่าใช้เทคนิคใดจะให้ผลการทำ Image Registration ได้ดีที่สุด

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.6.1 กำหนดวัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัย ว่าต้องการนำเสนอ หรือศึกษา งานวิจัยในหัวข้อนี้อย่างไร
- 1.6.2 ศึกษาวิธีการทำ Image Registration ที่เคยมีผู้ทำไว้ก่อนหน้านี้ เปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของแต่ละวิธีการ เพื่อนำมาปรับปรุง และประยุกต์ใช้
- 1.6.3 ตั้งสมมุติฐานในงานวิจัยนี้ ตามทฤษฎี หรือวิธีการที่ได้ศึกษา และกำหนดแนวทางในการทำงานวิจัย
- 1.6.4 เตรียมฐานข้อมูลงานวิจัย เพื่อนำมาใช้ทดลองในงานวิจัยนี้ โดยจะใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียมเป็นหลัก โดยจะมีการแยกภาพตามรายละเอียดภายในภาพ
- 1.6.5 พัฒนาโปรแกรมที่จำเป็นต้องใช้ในการทำ Image Registration ตามลักษณะ และวิธีการตามที่ได้กำหนดแนวทางไว้
- 1.6.6 ทำการทดลองกับฐานข้อมูลภาพที่ได้เตรียมไว้ โดยใช้โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น และทำการเก็บข้อมูล และผลลัพธ์จากการทดลอง เพื่อการวิเคราะห์ และปรับปรุงในงานวิจัย
- 1.6.7 ประเมินผลการทดลองโดยใช้ข้อมูล และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ทั้งในด้านความถูกต้อง และเวลาและทำการสรุปผลการทดลอง

1.7 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ ได้แก่

- 1.7.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ใช้หน่วยประมวลผลกลาง CPU Intel Pentium 4 3.0EM64T ความเร็ว 3 GHz แบบ 64 บิต หน่วยความจำ DDR Ram 1 GB จำนวน 1 เครื่อง
- 1.7.2 ระบบปฏิบัติการ Windows XP Professional
- 1.7.3 โปรแกรม Microsoft Visual Studio 6.0
- 1.7.4 โปรแกรม Adobe Photoshop 7.0
- 1.7.5 โปรแกรม Matlab 7.0
- 1.7.6 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท แต่ละบทประกอบด้วยเนื้อหาดังนี้

- บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัยขอบเขตของงานวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา
- บทที่ 2 กล่าวถึงแนวความคิด และรูปแบบการทำ Image Registration ชนิดต่างๆ ที่เคยมีผู้ทำไว้ก่อนหน้า ข้อดี และข้อเสียของแต่ละวิธีการ และตัวอย่างในการทำ Image Registration
- บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเพื่อประกอบความเข้าใจในการทำการทดลอง ได้แก่ ทฤษฎีเกี่ยวกับ Geometric Transform, Fourier Transform, Phase Correlation, Wavelet Transform, Hough Transform และการทำ Low Pass Filter
- บทที่ 4 กล่าวถึงขั้นตอนในการทำ Image Registration ในงานวิจัยนี้ เริ่มจากการหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ การหาการเปลี่ยนแปลงในลักษณะการเลื่อนตำแหน่ง และการรวมภาพตั้งต้นทั้งสองเข้าด้วยกัน
- บทที่ 5 ผลการทดลอง
- บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาระบบ Image Registration ต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

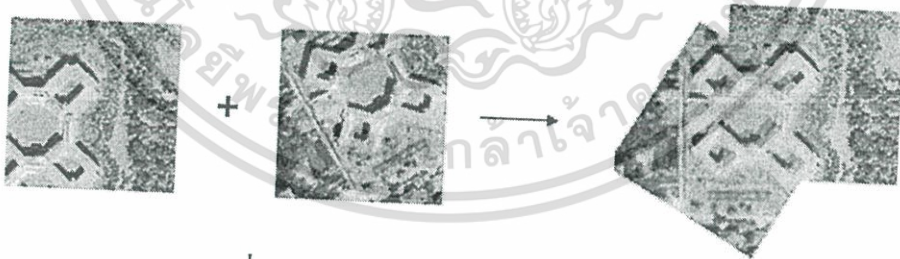
แนวความคิดเบื้องต้น และตัวอย่างการทำ Image Registration

2.1 แนวคิดเบื้องต้นของการทำ Image Registration

Image Registration โดยปกติแล้วก็คือการจัดเรียงภาพย่อยๆ หลายๆ ภาพ ตามตำแหน่งที่ถูกต้อง เพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่ภาพเดียว ซึ่งมีรายละเอียดของภาพทั้งหมดที่นำมาประกอบกัน การจัดเรียง และประกอบภาพ โดยทำการประกอบภาพทีละคู่ภาพ ก็เริ่มแรกนำภาพ 1 คู่มาทำ Image Registration กัน แล้วนำภาพผลลัพธ์ที่ได้จากคู่แรกนี้ไปทำ Image Registration กับภาพอื่นต่อไปเรื่อยๆ จนหมด หรือในกรณีที่ทราบตำแหน่งที่แน่นอนของภาพแต่ละภาพแล้ว สามารถใช้การจับคู่ทำ Image Registration กับทุกคู่ภาพ แล้วนำภาพที่ผ่านการทำ Image Registration ของแต่ละคู่มาทำ Image Registration กันอีกครั้งไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ภาพสุดท้ายเพียงภาพเดียว ตัวอย่างการทำ Image Registration แสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการทำ Image Registration

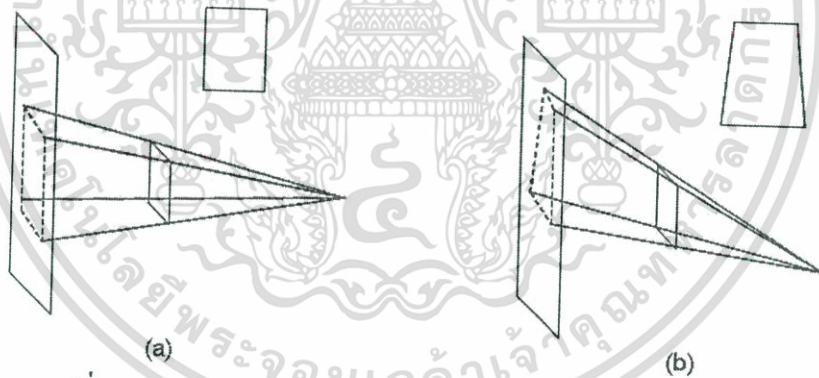


รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการทำ Image Registration

สำหรับการทำ Image Registration มีข้อกำหนดเบื้องต้นว่า เพื่อให้สามารถทำ Image Registration ได้ ภาพที่จะนำมาทำ Image Registration กันได้นั้น จะต้องเป็นภาพที่มีส่วนทับซ้อนกันอยู่ คือมีการถ่ายภาพมาในบริเวณข้างเคียงที่มีส่วนที่เหลื่อมกันอยู่ในระหว่างภาพ หากภาพที่นำมาทำ Image Registration ด้วยกันนั้นไม่มีส่วนที่ทับซ้อนหรือเหลื่อมกันอยู่ ย่อมไม่มีจุดอ้างอิงในการคำนวณด้วย Image Registration จากรูปตัวอย่างที่ 2.1 และ 2.2 เมื่อภาพ 2 ภาพมีส่วนที่ทับซ้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันอยู่ หมายความว่า ภาพที่ 2 คือภาพที่ 1 ที่มีการเลื่อนตำแหน่งไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และในทำนองเดียวกัน ภาพที่ 1 คือภาพที่ 2 ที่มีการเลื่อนตำแหน่งไปเช่นเดียวกันแต่เป็นการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงกันข้ามกัน ลำดับของคู่ภาพในการนำมาทำ Image Registration นั้นไม่สำคัญ ใช้ภาพใดเป็นภาพตั้งต้น และภาพอินพุตก็ได้ ถ้าภาพที่ 2 เกิดจากภาพที่ 1 มีการเคลื่อนที่ไปนั้น หากสามารถหาการเคลื่อนที่ หรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นย่อมสามารถเลื่อนภาพให้อยู่ในพิกัดเดียวกัน เพื่อทำการรวมกับอีกภาพหนึ่งได้ ดังนั้นแนวคิดหลักในการทำ Image Registration นั้นก็คือการหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างคู่ภาพนั่นเอง

การเปลี่ยนแปลงระหว่างคู่ภาพที่อาจเกิดขึ้นได้นั้นมีมากมาย อาจเป็นเพียงการเลื่อนตำแหน่งของภาพ หรือมีการหมุนภาพ จนกระทั่งถึงการที่ภาพมีการบิด หรือผิดรูปไป ซึ่งถ้าเป็นการเปลี่ยนแปลงประเภทการเลื่อน หรือการหมุนภาพนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงจะมีลักษณะเป็น 2 มิติ คือมีการเลื่อน หรือการหมุนในระนาบของการถ่ายภาพ หรือระนาบของการ Projection ภาพนั่นเอง ค่าที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ก็จะมิลักษณะเป็น 2 มิติ คือมีการเปลี่ยนแปลงค่า x และ y สำหรับค่า z หรือแกนลึกนั้นจะไม่เข้ามาเกี่ยวข้องในการคำนวณ แต่ในกรณีที่มีการย่อ ขยาย หรือการผิดรูปของภาพนั้น อาจเกิดจากการเปลี่ยนจุดถ่ายภาพ หรือเปลี่ยนระนาบของการถ่ายภาพ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งในกรณีนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของ 3 มิติ



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงในลักษณะ 3 มิติจะทำให้เกิดการย่อ ขยาย บิด หรือผิดรูปของภาพ
(a) การจับภาพที่มุมมองปกติ (b) เมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งการจับภาพ ลักษณะภาพที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไป

สรุปแล้วการทำ Image Registration นั้นคือการหาค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างคู่ภาพ เพื่อจะได้นำค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นมาทำ Geometric Transform ภาพ เพื่อนำมารวมกันเป็นภาพเดียวในขั้นตอนสุดท้าย

2.2 ตัวอย่างการทำ Image Registration

การทำ Image Registration ได้มีผู้เริ่มทำมาเป็นเวลานานแล้ว ได้มีผู้นำเสนอทฤษฎีต่างๆ ในการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างคู่ภาพ มีการใช้เทคนิคอื่นๆ เข้ามาประยุกต์ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ แต่โดยรวมแล้ว เทคนิค และวิธีการทำ Image Registration นั้นสามารถแบ่งออกได้ตามโดเมนของการประมวลผลได้เป็น 2 ประเภท คือ

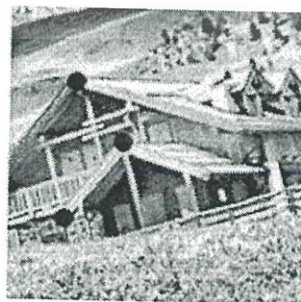
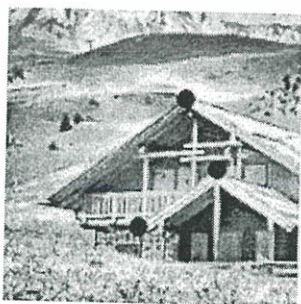
- Image Registration in Spatial Domain การทำ Image Registration บนโดเมนจุดของภาพ
- Image Registration in Frequency Domain การทำ Image Registration บนโดเมนความถี่ของภาพ

2.2.1 Image Registration บน Spatial Domain

Image Registration บน Spatial Domain เป็นการประมวลผลกับแต่ละจุดของภาพโดยตรง โดยไม่มีการแปลงภาพให้อยู่ในรูปแบบอื่นก่อนการคำนวณ การคำนวณบน Spatial Domain นี้ค่อนข้างจะเข้าใจได้ง่าย เนื่องจากภาพยังคงมีลักษณะเช่นเดิม และการประมวลผลเป็นการประมวลผลกับจุดจริงบนภาพ การทำ Image Registration บน Spatial Domain ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นอีก 2 ประเภท คือ

2.2.1.1 การคำนวณโดยใช้ Control Point

ในกระบวนการทำงานจะต้องให้ผู้ใช้ทำการเลือก Control Point บนภาพทั้ง 2 ภาพ ก่อน Control Point คือจุดอ้างอิงในการประมวลผล ซึ่งผู้ใช้จะต้องทำการเลือกในภาพทั้ง 2 ภาพ ทีละคู่ เพื่อเจาะจงว่าจุดอ้างอิงที่ผู้ใช้เลือกจากภาพแรกคือตำแหน่งใดในภาพที่ 2 โดยผู้ใช้จะต้องเลือก Control Point อย่างน้อย 3 คู่ เพื่อให้สามารถทำการคำนวณได้อย่างถูกต้อง ดังรูปที่ 2.4 แต่การคำนวณอาจจะมีการค้นหาในขอบเขตรอบๆ แต่ละ Control Point นั้นด้วย เนื่องจากการที่จะบังคับให้ผู้ใช้ต้องระบุจุดอย่างแม่นยำ 100 % นั้นเป็นไปได้



รูปที่ 2.4 โดยวิธีการใช้ Control Point ผู้ใช้ต้องเลือก Control Point ซึ่งเป็นจุดเดียวกันในภาพที่ 1 และ 2 อย่างน้อยที่สุด 3 คู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ Control Point ในการคำนวณนั้นมีข้อดีคือสามารถทำได้ง่าย การคำนวณไม่ซับซ้อน และประมวลผลได้อย่างรวดเร็ว แต่ผลจากการหาการเปลี่ยนแปลงนั้นจะขึ้นอยู่กับผู้ใช้เป็นหลัก เนื่องจากหากผู้ใช้กำหนด Control Point ได้อย่างถูกต้อง การเปลี่ยนแปลงที่คำนวณได้ก็必将มีความถูกต้อง แต่หากผู้ใช้เลือก Control Point คลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ถูกต้อง หรือเลือก Control Point ผิดไป ผลที่ได้ย่อมมีความผิดพลาดเกิดขึ้นด้วย ซึ่งในลักษณะเช่นนี้จะทำให้คุณภาพของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับความสามารถของผู้ใช้ สำหรับตัวอย่างของการทำ Image Registration โดยใช้ Control Point เช่น [1]

ผลจากการทำ Image Registration โดยใช้ Control Point ความถูกต้องของผลลัพธ์จะขึ้นอยู่กับความถูกต้อง และเหมาะสมของ Control Point เป็นหลัก และในกรณีที่มีภาพตั้งต้นจำนวนมาก การกำหนดให้ผู้ใช้ต้องเลือก Control Point ในทุกๆ ขั้นตอนนั้นอาจไม่เหมาะสมในการทำงาน ดังนั้นจึงได้มีการเสนอเทคนิคในการเลือก Control Point โดยอัตโนมัติขึ้น เช่น [2] และ [3]

2.2.1.2 การคำนวณค่าตัวแปรแต่ละตัวในเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงโดยใช้วิธีการค้นหา

เนื่องจากการหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น สิ่งที่ต้องการหาคือ ค่าตัวแปรแต่ละตัวในเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลง มีผู้นำเอา Searching Algorithm ชนิดต่างๆ เข้ามาใช้ในการค้นหาคำตอบ เช่น [4], [5], [6] ความเร็วในการใช้ Searching Algorithm ในการค้นหาจะขึ้นอยู่กับขอบเขตของการค้นหา หากต้องการค้นหาการเปลี่ยนแปลงเพียงแค่การเลื่อน และการหมุน ขอบเขตของตัวแปรที่จะต้องค้นหาจะเหลือเพียงแค่ 3 ตัว แต่หากต้องการค้นหาการเปลี่ยนแปลงข้อมูลทั้งหมด ก็จะต้องค้นหาทั้งหมด 6 ตัว ซึ่งจะใช้เวลานานขึ้นด้วย นอกจากนี้ขอบเขตของข้อมูลในการค้นหาที่เป็นปัจจัยที่สำคัญในการค้นหาด้วย หากขอบเขตของข้อมูลที่เป็นไปได้ ที่จะทำการค้นหา มีจำนวนมาก การค้นหาจะใช้เวลาเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับการทำให้ Image Registration โดยการหา Searching Algorithm นี้มีข้อดีคือสามารถค้นหาค่าตัวแปรในเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงได้ทุกตัว หมายถึงสามารถหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ทุกประเภท สำหรับความถูกต้อง และความเร็วในการค้นหาจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของ Searching Algorithm ที่นำมาใช้ในการค้นหา โดยเฉพาะหาก Searching Algorithm ที่นำมาใช้มีการรันตัวที่สามารถค้นหาคำตอบที่ถูกต้องได้แน่นอน หากมีคำตอบที่ถูกต้องอยู่ในขอบเขตของข้อมูลที่ทำการค้นหา ผลที่ได้จากกระบวนการจะมีความถูกต้องแน่นอน แต่ทั้งนี้จะต้องมีการกำหนดขอบเขตในการค้นหาข้อมูลให้ถูกต้อง และเหมาะสมด้วย

2.2.2 Image Registration บน Frequency Domain

การทำ Image Registration อีกประเภทหนึ่ง เป็นการทำบน Frequency Domain หรือโดเมนความถี่ของภาพ โดยเราจะต้องทำการแปลงภาพทั้ง 2 ภาพให้อยู่ในโดเมนความถี่เสียก่อน โดยใช้ Fourier Transform แล้วใช้คุณสมบัติ Phase Correlation ของ Fourier ในการหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะได้มีการอธิบายวิธีการในบทที่ 4 ตัวอย่างการทำ Image Registration บน Frequency Domain ได้แก่ [7], [8], [9] การทำ Image Registration บน Frequency Domain นี้มีข้อดีคือ สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็ว และมีความถูกต้องค่อนข้างสูง แต่มีข้อเสียคือ Phase Correlation สามารถหาการเปลี่ยนแปลงได้แค่การเปลี่ยนแปลงชนิดการเลื่อนตำแหน่ง สำหรับการเปลี่ยนแปลงประเภทอื่นๆ จะต้องใช้เทคนิคอื่น เข้ามาช่วย นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำ Phase Correlation จะมีความถูกต้องอยู่ในระดับจำนวนเต็มเท่านั้น หากต้องการให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของจุดทศนิยม จะต้องมีการประยุกต์ใช้เทคนิคอื่นเพิ่มเติมเข้ากับกระบวนการ



บทที่ 3

ความรู้พื้นฐานในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎี และความรู้พื้นฐานที่ใช้ประกอบการทำ Image Registration ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ Geometric Transform, Fourier Transform, Phase Correlation, Hough Transform, Wavelet Transform และการทำ Low Pass Filter

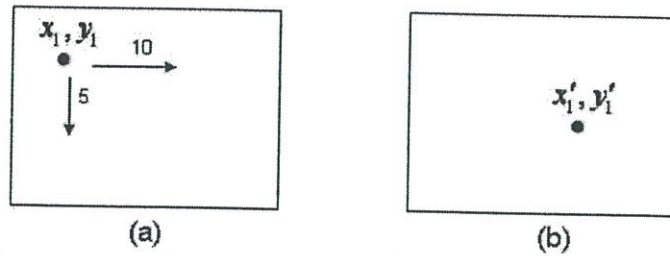
3.1 Geometric Transform

Geometric Transform เป็นเทคนิคในทาง Computer Graphics ในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ลักษณะ รูปร่าง และขนาดของวัตถุใดๆ ในขอบเขตที่กำหนด โดยการเปลี่ยนแปลงที่สามารถเกิดขึ้นกับวัตถุได้นั้นมีมากมายหลายรูปแบบ ได้แก่ การเลื่อนตำแหน่ง การหมุน การย่อ หรือขยายขนาดของภาพ การบิด การยัด และการผิดรูปของภาพ เทคนิคการทำ Geometric Transform จึงเป็นเทคนิคเบื้องต้น และมีความสำคัญมากในทาง Computer Graphics ใช้ทำการ Transform วัตถุจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงสถานะนี้ก็อาจเป็นเพียงแค่การเลื่อนวัตถุ หรืออาจมีการหมุนวัตถุ การย่อ หรือขยายขนาดของวัตถุ โดยการเลือกใช้สมการของ Geometric Transform ในการแปลงวัตถุนั้นเอง แล้วแต่ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงในลักษณะใด ในขอบเขตของวิชา Computer Graphics นั้นจะมีการพิจารณาทั้งในกรณีที่เป็นการเปลี่ยนแปลง 2 มิติ และ 3 มิติ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของวัตถุในขอบเขตที่กำหนด ซึ่งวัตถุ และขอบเขตที่สนใจนี้อาจเป็น 2 มิติ หรือ 3 มิติก็ได้ สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้กับการทำ Image Registration ซึ่งเป็นขอบเขตในทาง Image Processing นั้น จะพิจารณา และทำการเปลี่ยนแปลงกับภาพซึ่งเป็น 2 มิติเป็นส่วนใหญ่ และการทำ Image Registration ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เป็น 2 มิติเท่านั้น

สำหรับ Geometric Transform นั้นจะอยู่ในรูปของสมการที่ใช้ในการแปลงวัตถุจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่ง ตามที่ต้องการ สมการในการแปลงวัตถุแต่ละรูปแบบ จะใช้สมการแตกต่างกัน โดยในการแปลงครั้งหนึ่งๆ อาจจะเป็นการแปลงในหลายรูปแบบผสมกันได้ เช่น มีการเลื่อน และการหมุนวัตถุ ในการคำนวณตามสมการของ Geometric Transform จะต้องคำนวณให้ถูกต้องตามลำดับการแปลงวัตถุ เช่นหากทำการเลื่อนวัตถุก่อนการหมุน จะต้องคำนวณตำแหน่งจากการเลื่อนวัตถุก่อน แล้วจึงใช้ตำแหน่งในการคำนวณการหมุนต่อไป หากทำการคำนวณไม่ถูกต้องตามลำดับจะทำให้ค่าที่คำนวณได้นั้นผิดพลาด สมการ Geometric Transform สำหรับการเปลี่ยนแปลงแต่ละรูปแบบจะมีสมการแตกต่างกันออกไป แต่สุดท้ายแล้ว ได้มีการรวบรวมให้เป็นสมการสุดท้ายเพียงสมการเดียวในภายหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

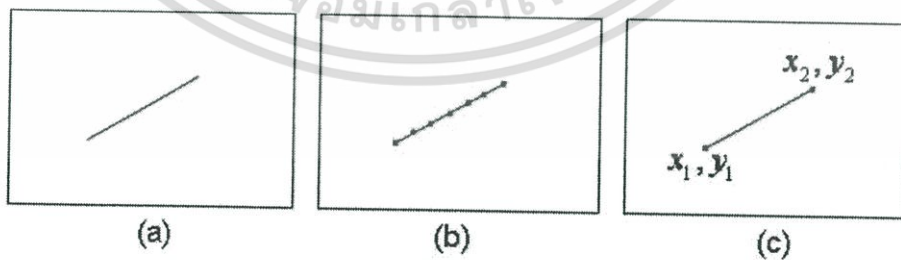
3.1.1 การทำ Geometric Transform โดยการเลือกใช้จุดใดๆ แทนรูปร่างทั้งหมด



รูปที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง (a) จุดที่ตำแหน่ง x_1, y_1 มีการเลื่อนไปทางขวา 10 หน่วย และด้านล่าง 5 หน่วย (b) จุดจากภาพ a เลื่อนมาอยู่ที่ตำแหน่งใหม่ที่ตำแหน่ง x'_1, y'_1 ในภาพ b

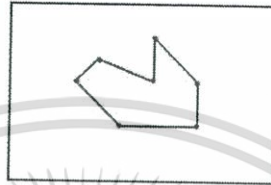
ถ้ามีจุดอยู่ในภาพที่ 1 ดังรูปที่ 3.1(a) ที่ตำแหน่ง x_1, y_1 ต้องการเลื่อนจุดนี้ไปทางขวามือ 10 หน่วย และเลื่อนลง 10 หน่วย จุดนี้จะไปอยู่ที่ตำแหน่งใดในภาพที่ 2 ในกรณีนี้สามารถใช้สมการการเลื่อนตำแหน่งของ Geometric Transform ในการ Transform จุดจากตำแหน่ง x_1, y_1 ในภาพที่ 3.1(a) ไปเป็น x'_1, y'_1 ในภาพ 3.1(b) ได้โดยตรง ซึ่งเป็นตำแหน่งใหม่ของจุด

ในกรณีที่ภาพเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 3.2 เนื่องจากเส้นตรงเกิดจากจุดจำนวนมากเรียงต่อกันในแนวเดียวกัน การทำ Geometric Transform เพื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเส้นตรงนี้ โดยปกติแล้วจะต้องทำ Geometric Transform กับทุกๆ จุดบนเส้นตรง ซึ่งในความเป็นจริงนั้นไม่สามารถทำได้ เนื่องจากจำนวนจุดที่อยู่บนเส้นตรงใดๆ นั้นมีมากมาย ในกรณีนี้สามารถจะสุ่มเลือกตำแหน่งของจุดระหว่างจุดเริ่มต้น และจุดปลายเป็นช่วงๆ กัน แล้วทำ Geometric Transform กับแต่ละจุดที่เลือกมานั้น แต่ที่จริงแล้วสามารถจะเลือกใช้แค่จุดเริ่มต้น และจุดปลายของเส้นตรงใดๆ แทนเส้นตรงทั้งเส้นในการคำนวณ Geometric Transform ได้ ดังรูปที่ 3.2(c)

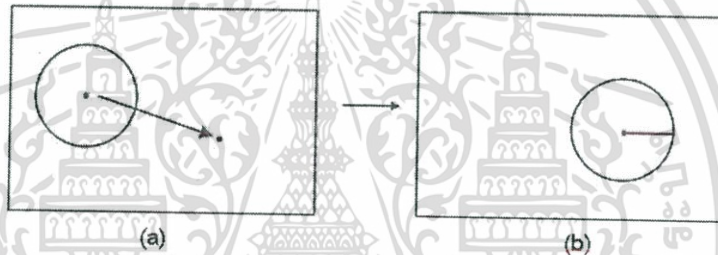


รูปที่ 3.2 การเลือกกลุ่มของจุดแทนเส้นตรงทั้งเส้นในการทำ Geometric Transform (a) เส้นตรงประกอบด้วยจุดจำนวนไม่จำกัดเรียงต่อกัน (b) การสุ่มจุดบนเส้นตรงเป็นช่วงๆ (c) การเลือกใช้จุดต้น และจุดปลายแทนเส้นตรงทั้งเส้น

ในกรณีที่วัตถุที่ต้องการทำการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะเป็นรูปทรงเหลี่ยมต่างๆ สามารถที่จะใช้จุดยอดมุมต่างๆ จุดของรูปทรงเหลี่ยมนั้นแทนรูปทรงนั้นๆ เพื่อทำการคำนวณการเปลี่ยนแปลงได้ ดังรูปที่ 3.3 ส่วนในกรณีของรูปวงกลม วงรี หรือส่วนโค้ง จะใช้จุดศูนย์กลางของวงกลม วงรี หรือส่วนโค้งนั้นแทนรูปทรงที่ต้องการทำการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 3.4 เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปวงกลมแล้วใช้รัศมี หรือเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมทำการสร้างรูปขึ้นใหม่ ในกรณีของรูปวงรี หรือส่วนโค้งก็จะใช้หลักการเช่นเดียวกันกับวงกลม



รูปที่ 3.3 การใช้จุดยอดมุมของรูปทรงเหลี่ยมแทนรูปทรงในการทำการเปลี่ยนแปลงภาพ

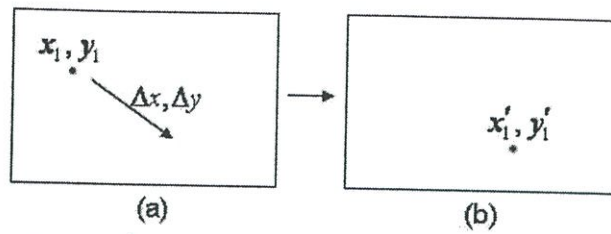


รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงรูปวงกลม (a) การใช้จุดศูนย์กลางของวงกลมแทนรูปวงกลมในการทำการเปลี่ยนแปลง (b) การสร้างรูปวงกลมขึ้นใหม่โดยใช้ขนาดรัศมีจากรูปวงกลมเดิม

3.1.2 การเลื่อนตำแหน่งของภาพ (Translation)

การเลื่อนตำแหน่งเป็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงพื้นฐานอย่างง่ายที่สุดของภาพ การเลื่อนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของภาพ โดยภาพทั้งภาพจะมีระยะในการเลื่อนตำแหน่งเท่ากันหมดทั้งภาพ ภาพใหม่ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเป็นภาพเดิมที่ตำแหน่งใหม่ สำหรับการเลื่อนตำแหน่งอาจเป็นการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน x การเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน y หรือมีการเลื่อนตำแหน่งทั้งแกน x และ y

ถ้ามีจุดอยู่ในภาพที่ 1 ที่ตำแหน่ง x_1, y_1 มีการเลื่อนตำแหน่งด้วยระยะทาง $\Delta x, \Delta y$ ไปเป็น x'_1, y'_1 ตามลำดับในภาพที่ 2 ดังรูปที่ 3.5 ต้องการหาตำแหน่งใหม่ x'_1, y'_1 ที่ภาพที่ 2



รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง (a) จุดในตำแหน่ง x_1, y_1 มีการเลื่อนตำแหน่งด้วยระยะทาง $\Delta x, \Delta y$ (b) ตำแหน่งใหม่ของจุด x_1, y_1 ในภาพ a เปลี่ยนแปลงเป็น x'_1, y'_1 ในภาพ b

จะได้สมการการเปลี่ยนแปลงดังนี้

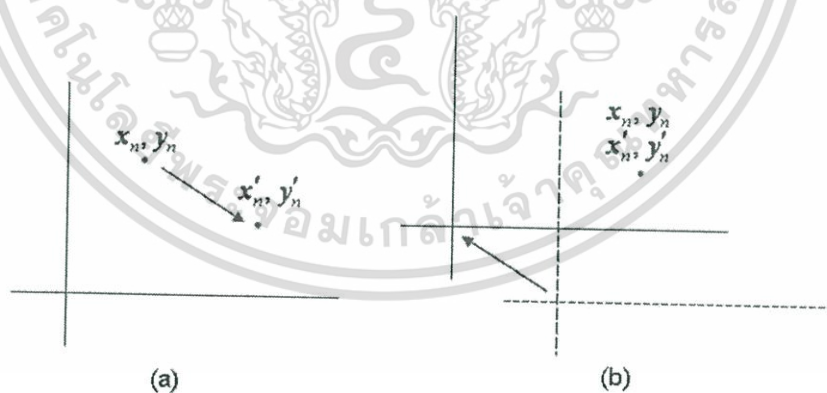
$$x'_n = x_n + \Delta x \quad (3.1)$$

$$y'_n = y_n + \Delta y \quad (3.2)$$

โดย x'_n, y'_n คือตำแหน่งใหม่ของจุด x_n, y_n หลังจากการเลื่อนตำแหน่งด้วยระยะ $\Delta x, \Delta y$ ถ้านำสมการที่ 3.1 และ 3.2 มาเขียนรวมกันให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ จะได้สมการที่ 3.3

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

นอกจากการคำนวณโดยการเลื่อนวัตถุโดยตรงแล้ว ยังมีวิธีการคำนวณอีกรูปแบบหนึ่ง โดยใช้แนวความคิดที่ว่า เมื่อมีการเลื่อนวัตถุไปในทิศทางใด จะมีค่าเท่ากับการเลื่อนแกนของภาพไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การคำนวณโดยตรง และการเลื่อนแกน (a) การคำนวณการเลื่อนวัตถุตามปกติ (b) การคำนวณโดยการเลื่อนแกนในทิศทางตรงกันข้าม

ในการคำนวณโดยการเลื่อนแกนนี้ สมการการคำนวณจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็น

$$x'_n = x_n - \Delta x \quad (3.4)$$

$$y'_n = y_n - \Delta y \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย x'_n, y'_n คือตำแหน่งใหม่ของจุด x_n, y_n หลังจากการเลื่อนตำแหน่งด้วยระยะ $\Delta x, \Delta y$ ถ้านำสมการที่ 3.4 และ 3.5 มาเขียนรวมกันให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ จะได้สมการที่ 3.6

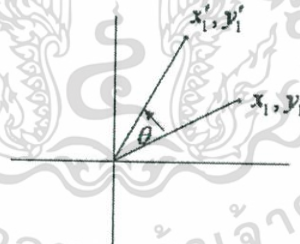
$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ค่าตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณด้วยการเลื่อนวัตถุโดยตรง และการเลื่อนแกนนั้น ค่าที่ได้จะมีค่าเท่ากัน การคำนวณโดยการเลื่อนแกนนี้จะมีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานร่วมกับการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ

3.1.3 การหมุนภาพ (Rotation)

การหมุนภาพเป็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงภาพอีกประเภทหนึ่ง โดยการหมุนจะต้องมีจุดศูนย์กลางของการหมุนอยู่ การหมุนโดยใช้จุดศูนย์กลางการหมุนต่างกันย่อมทำให้ผลของการหมุนมีความแตกต่างกัน สำหรับการหมุนภาพด้วยสมการ Geometric Transform จะถือว่าการหมุนจะมีมุมเป็นบวกเมื่อมีการหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา และเป็นลบเมื่อมีการหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา และโดยปกติจะถือว่าจุดศูนย์กลางของการหมุนอยู่ที่ตำแหน่ง $(0,0)$ แต่ในกรณีที่ต้องการหมุนรอบจุดใดๆ ก็สามารถทำได้โดยการใช้เทคนิคการเลื่อนแกนเข้ามาช่วย

ถ้ามีจุดอยู่ในภาพที่ 1 ที่ตำแหน่ง x_1, y_1 มีการหมุนรอบจุด $(0,0)$ ด้วยมุม θ ดังรูปที่ 3.7 กลายเป็นจุดใหม่ x'_1, y'_1 ต้องการหาค่าตำแหน่งใหม่ x'_1, y'_1 ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.7 จุดในตำแหน่ง x_1, y_1 มีการหมุนด้วยมุม θ รอบจุด $(0,0)$ ไปยังจุด x'_1, y'_1

จะได้สมการการเปลี่ยนแปลงดังนี้

$$x'_n = x_n \cos \theta - y_n \sin \theta \quad (3.7)$$

$$y'_n = x_n \sin \theta + y_n \cos \theta \quad (3.8)$$

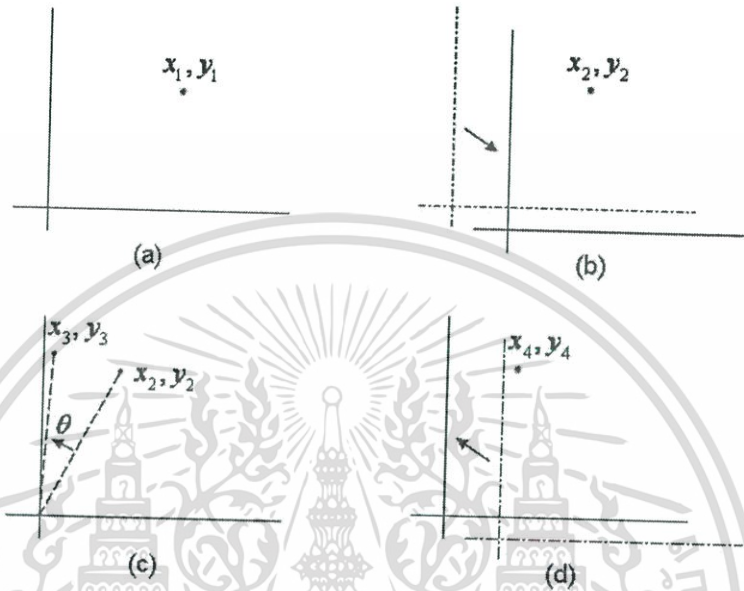
โดย x'_n, y'_n คือตำแหน่งใหม่ของจุด x_n, y_n หลังจากการหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา รอบจุด $(0,0)$ ด้วยมุม θ

ถ้านำสมการที่ 3.7 และ 3.8 มาเขียนรวมกันให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ จะได้ดังสมการที่ 3.9

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของการหมุนวัตถุรอบจุดใดๆ ในภาพนั้น สามารถทำได้โดยการเลื่อนแกน ให้จุด $(0,0)$ ของแกนอยู่ที่ตำแหน่งของจุดที่ต้องการหมุนวัตถุรอบนั้นๆ แล้วจึงทำการคำนวณการหมุนแกนตามปกติ และที่สำคัญ สุดท้ายจะต้องทำการเลื่อนแกนกลับมายังตำแหน่งเดิมด้วยค่าเดิมที่ทำการเลื่อนแกนไป ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การหมุนแกนรอบจุดใดๆ (a) จุด ณ ตำแหน่งใดๆ (b) เลื่อนแกนให้อยู่ในตำแหน่งศูนย์กลางที่ต้องการทำการหมุน (c) คำนวณการหมุนแกนตามปกติ (d) เลื่อนแกนกลับด้วยค่าเดิม

ใน Image Processing นั้น การหมุนจะมีความซับซ้อนมากกว่าการหมุนวัตถุปกติ เนื่องจากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงจะต้องทำการคำนวณกับทุกๆ จุดของภาพ ดังนั้นในกรณีนี้ ต้องพิจารณาด้วยว่า จะใช้จุดยอดมุมด้านใดของภาพ หรือใช้จุดศูนย์กลางของภาพเป็นจุด $(0,0)$ ในการทำการหมุน เนื่องจากการเลือกจุดศูนย์กลางต่างกันย่อมทำให้ผลลัพธ์ของการหมุนออกมาแตกต่างกันด้วย ซึ่งอาจทำให้ผลที่ได้มีความผิดพลาด

สำหรับการหมุนนี้ก็เช่นเดียวกับการเลื่อนวัตถุ ก็สามารถทำได้โดยการคำนวณการหมุนวัตถุโดยตรง และอีกรูปแบบหนึ่งคือการทำการหมุนแกนย้อนกลับในทิศทาง $-\theta$ สมการที่ได้จะเป็นดังนี้

$$x'_n = x_n \cos(-\theta) - y_n \sin(-\theta) \quad (3.10)$$

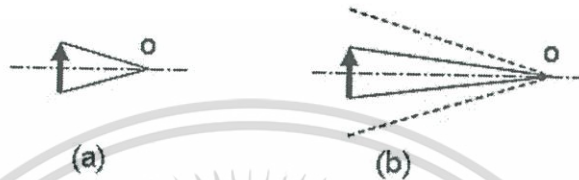
$$y'_n = x_n \sin(-\theta) + y_n \cos(-\theta) \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

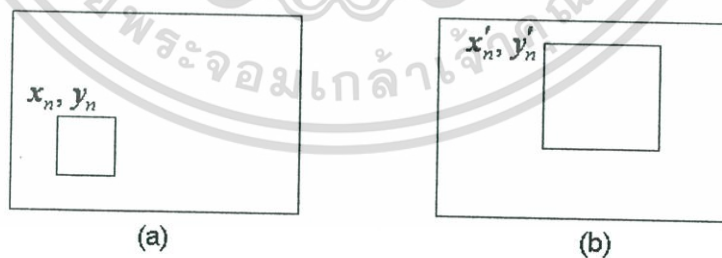
3.1.4 การย่อ และขยายขนาด (Scaling)

การย่อ และขยายขนาดวัตถุนี้ ถือเป็นการเริ่มเข้าสู่โลก 3 มิติ เนื่องจากการย่อ และขยายขนาดของภาพนี้เกิดจากการเปลี่ยนระยะของวัตถุ หรือจุดจับภาพ โดยระนาบของการจับภาพยังเป็นระนาบเดิม ดังรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าเมื่อจุดจับภาพ O มีการเลื่อนตำแหน่งในระนาบเดิมจากรูปที่ 3.9(a) ออกจากวัตถุดังรูปที่ 3.9(b) จะทำให้เมื่อมองวัตถุเมื่อเทียบกับมุมมองในภาพ 3.9(a) แล้วภาพจะดูมีขนาดเล็กลง



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของการจับภาพในระนาบเดิม ทำให้ภาพเกิดการย่อ หรือขยายขนาด (a) ทำการจับภาพที่ตำแหน่งใดๆ (b) เมื่อเลื่อนจุดจับภาพออกจากวัตถุจะทำให้วัตถุดูเล็กลง

ถ้าวัตถุมีลักษณะเป็นจุด การย่อ และขยายขนาดจะไม่ทำให้วัตถุมีการเปลี่ยนแปลงขนาด แต่จะทำให้จุดมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ในกรณีที่วัตถุมีลักษณะเป็นรูปร่าง เมื่อมีการย่อ หรือขยายขนาด จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.10 ถ้าพิจารณาที่จุดใดจุดหนึ่งของรูปร่าง x_n, y_n เมื่อมีการย่อ หรือขยายขนาดด้วยค่า S จะทำให้เกิดตำแหน่งใหม่ที่ x'_n, y'_n ต้องการหาค่าของ x'_n, y'_n ซึ่งเป็นตำแหน่งใหม่ของวัตถุ ซึ่งค่า S นี้สามารถมีได้ทั้งในแกน x และแกน y จะใช้สัญลักษณ์เป็น S_x, S_y ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 การขยายขนาดของวัตถุ (a) วัตถุก่อนขยาย เลือจุดจุดอ้างอิงใดๆ x_n, y_n (b) ทำการขยายขนาดวัตถุด้วยค่า S ได้ตำแหน่งใหม่ของจุด x_n, y_n ในภาพ a กลายเป็น x'_n, y'_n

จะได้สมการการเปลี่ยนแปลงดังนี้

$$x'_n = S_x x_n \quad (3.13)$$

$$y'_n = S_y y_n \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย x'_n, y'_n คือตำแหน่งใหม่ของจุด x_n, y_n หลังจากการย่อ หรือขยายขนาดด้วย S_x, S_y ถ้านำสมการที่ 3.13 และ 3.14 มาเขียนรวมกันให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ จะได้ดังสมการที่

3.15

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

ในที่นี้จะสังเกตได้ว่า S จะต้องมีค่ามากกว่า 0 เนื่องจากการทำการย่อ หรือขยายขนาดแล้ว ทำให้เครื่องหมายของตำแหน่งเปลี่ยนแปลงนั้นเป็นไปได้ในโลกของความเป็นจริง โดยหากค่า S มีค่ามากกว่า 1 สมการนี้จะเป็นการขยายขนาด และหาก S มีค่ามากกว่า 0 แต่ไม่ถึง 1 แสดงว่าเป็นการย่อขนาด

สำหรับการย่อ และขยายขนาดของวัตถุสามารถทำได้โดยการคำนวณการย่อ และขยายแกนแทนการย่อ และขยายวัตถุโดยตรงเช่นกัน โดยสมการการย่อ และขยายแกนเป็นดังนี้

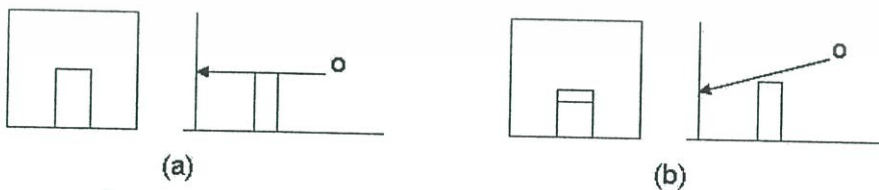
$$x'_n = \frac{1}{S_x} x_n \quad (3.16)$$

$$y'_n = \frac{1}{S_y} y_n \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{S_x} & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

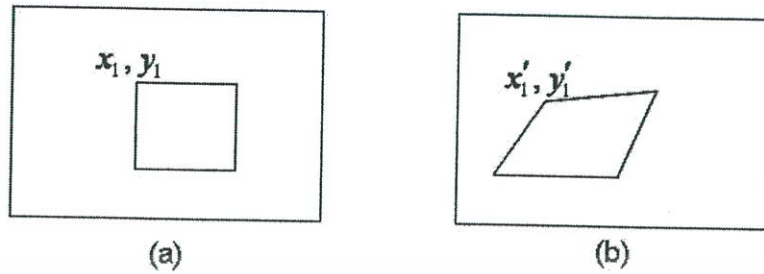
3.1.5 การบิด การยืด และการเปลี่ยนรูปร่าง

การบิด การยืด และการเปลี่ยนรูปร่างนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของ 3 มิติ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง และของจุดที่จับภาพ และระนาบในการจับภาพ ทำให้ภาพที่ได้มามีลักษณะผิดรูปไปจากเดิม อาจจะมีลักษณะยืดออก เกิดการบิดภาพ หรือการเปลี่ยนรูปร่างไปจากภาพเดิม ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การเปลี่ยนตำแหน่งของจุดจับภาพ และระนาบของการจับภาพ จะทำให้ภาพมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป (a) จับภาพวัตถุที่ตำแหน่งใดๆ (b) เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งจุดที่จับภาพจะทำให้เห็นภาพวัตถุเปลี่ยนแปลงไป

ถ้ามีจุด x_1, y_1 ในภาพที่ 1 ดังรูปที่ 3.12 มีการเปลี่ยนรูปร่างไปเป็น x'_1, y'_1 ในภาพที่ 2 ต้องการหาตำแหน่ง x'_1, y'_1 ที่เกิดขึ้นใหม่ในภาพที่ 2



รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนรูปร่างของภาพ (a) จุดเดิมที่ตำแหน่ง x_1, y_1 มีการเปลี่ยนรูปร่าง (b) จุด x'_1, y'_1 ที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของจุด x_1, y_1 ในภาพ a

สมการของการยืด การบิด และการเปลี่ยนรูปร่างจะเป็นดังนี้

$$x'_n = ax_n + by_n \quad (3.19)$$

$$y'_n = cx_n + dy_n \quad (3.20)$$

โดย x'_n, y'_n คือตำแหน่งใหม่ของจุด x_n, y_n หลังจากการเปลี่ยนรูปร่างด้วยสัมประสิทธิ์ a, b, c, d เหตุผลที่ต้องใช้สัมประสิทธิ์เป็น a, b, c, d 4 ตัว เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างมีได้หลายรูปแบบ ซึ่งทำให้ค่า a, b, c, d มีการเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของการเปลี่ยนรูปร่างนั้นๆ จากสมการที่ 3.19 และ 3.20 สามารถนำมาเขียนรวมกันให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ 3.21

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

3.1.6 สมการรวมของ Geometric Transform

ทั้ง 4 รูปแบบที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.1.2 - 3.1.5 คือ การทำ Geometric Transform ในรูปแบบต่างๆ ซึ่งจะสังเกตได้ว่า แต่ละรูปแบบจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ ที่มี output อยู่ในด้านเดียวกันได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงสามารถรวมสมการ Geometric Transform ทั้งหมดเข้าด้วยกันได้ ดังสมการที่ 3.22

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

โดยจะแยกเป็นประเภทของการทำ Geometric Transform ได้ดังนี้

- การเลื่อนตำแหน่ง จะมีเฉพาะค่า $\Delta x, \Delta y$ เท่านั้น ส่วนค่า a, b, c, d จะมีค่าเท่ากับ 1 ทั้งหมด
- การหมุน จะได้ $a = d = \cos \theta, b = -\sin \theta, c = \sin \theta$ และ $\Delta x = \Delta y = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์และขยายขนาดจะได้ $a = S_x, d = S_y, b = c = 1$ และ $\Delta x = \Delta y = 0$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเปลี่ยนรูปร่าง ค่า $\Delta x = \Delta y = 0$ และใช้ค่าสัมประสิทธิ์ a, b, c, d ในการคำนวณสมการที่ 3.22 นี้เป็นรูปแบบรวมของการทำ Geometric Transform ทั้งหมด โดยการนำไปใช้จะต้องเลือกแทนค่าตัวแปรให้ถูกต้องตามรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงภาพ

นอกจากนี้ จากคุณสมบัติของเมตริกซ์

$$[A \cdot B] \cdot C = A \cdot [B \cdot C] \quad (3.23)$$

เมื่อ A, B และ C เป็นเมตริกซ์ใดๆ ที่มีขนาดเท่ากัน นั่นคือการคำนวณสามารถสลับกลุ่มของการคูณกันของเมตริกซ์ได้ ดังนั้นในการคำนวณ Geometric Transform ก็เช่นเดียวกัน ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงหลายๆ รูปแบบ แต่ไม่มีการเลื่อนตำแหน่ง นอกจากการทำการคำนวณทีละขั้นตอนแล้ว สามารถนำเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดมาคูณกันเอง แล้วจึงนำไปคูณกับค่าตำแหน่งเดิม เช่น ในกรณีที่มีการหมุน แล้วทำการย่อขนาดลง จะมีสมการการคำนวณดังนี้

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

นำเมตริกซ์ของการหมุน และเมตริกซ์การย่อขนาดทำการคูณกันเองก่อนได้ จะกลายเป็น

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

เมื่อ a_1, a_2, a_3, a_4 เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการคูณเมตริกซ์การหมุน และการย่อขนาดจากสมการที่ 3.24

ลักษณะการคำนวณเช่นนี้จะมีประโยชน์มาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงหลายๆ รูปแบบ และจำนวนจุด x_n, y_n ที่นำมาคำนวณมีจำนวนมาก ดังเช่นลักษณะของการคำนวณใน Image Processing หากแต่ละจุด x_n, y_n จะต้องทำการคำนวณทีละขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงจนครบทุกจุด จะใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างนาน แต่สามารถจะลดเวลาลงได้ โดยการนำเอาเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดมาคูณรวมกันตามลำดับให้เหลือเพียงเมตริกซ์เดียว เก็บไว้เสียก่อน ดังตัวอย่างในสมการที่ 3.24 แล้วนำแต่ละจุดที่จะใช้คำนวณ มาทำการคูณกับเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงดังแสดงในสมการที่ 3.25 จะเป็นการลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณการคูณกับแต่ละเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงในทุกๆ จุด ให้เหลือเพียงครั้งเดียว แต่สมการที่ 3.25 นี้ใช้ไม่ได้กับการคำนวณการเลื่อนตำแหน่ง เนื่องจากสมการการเลื่อนตำแหน่งอยู่ในรูปของการบวก และลบเมตริกซ์ ไม่สามารถนำมาสลับที่ร่วมกับการคูณเมตริกซ์ได้ ดังนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเมตริกซ์ในการคำนวณการเลื่อนตำแหน่ง เพื่อให้สามารถทำการคำนวณรวมกันได้ โดยต้องเปลี่ยนสมการจากที่ใช้การบวกเมตริกซ์ให้อยู่ในรูปของการคูณกันของเมตริกซ์ ดังสมการที่ 3.26

$$X' = A \cdot X \quad (3.26)$$

โดย X' คือเมตริกซ์ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ, X คือเมตริกซ์ของจุดตั้งต้นที่ต้องการคำนวณ, A คือเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงที่นำมาทำการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเมตริกซ์สมการที่ 3.3 ในการคำนวณการเลื่อนวัตถุ เราสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบดังสมการที่ 3.26 ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

จะเห็นว่ามีการเพิ่มแถว และคอลัมน์ของเมตริกซ์ขึ้นอีก 1 แถว และ 1 คอลัมน์ เพื่อให้สามารถรองรับการเลื่อนตำแหน่งของวัตถุได้ ดังนั้นสำหรับการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ เพื่อให้สามารถคำนวณร่วมกันได้ทั้งหมด จึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์ 3×3 เท่ากัน ดังนี้

สมการการหมุน จากสมการที่ 3.9 จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

สมการการย่อ และขยายขนาด จากสมการที่ 3.15 จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

สมการการบิด การบิด และการเปลี่ยนรูปร่าง จากสมการที่ 3.21 จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & 0 \\ c & d & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

เมื่อรวมสมการทั้งหมดเข้าด้วยกัน จะได้สมการรวมดังนี้

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & \Delta x \\ c & d & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงแต่ละชนิดก็จะต้องมีการเลือกค่า a, b, c, d ตามรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

จากสมการที่ 3.22 และ 3.31 จะเห็นว่าในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับภาพนั้น รูปแบบการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดจะถูกกำหนดด้วยสัมประสิทธิ์ 6 ตัว คือ $a, b, c, d, \Delta x, \Delta y$ ดังนั้นการหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จะต้องทำการหาค่าสัมประสิทธิ์แต่ละตัวนั่นเอง แต่ในที่นี้อาจทำการกำหนดขอบเขตในการคำนวณ เพื่อลดจำนวนสัมประสิทธิ์ในการค้นหาได้ สืบเนื่องจากสัมประสิทธิ์ของการเลื่อนตำแหน่งนั้นใช้เพียง 2 ตัว คือ $\Delta x, \Delta y$ สัมประสิทธิ์ตัวที่เหลือจะเป็นค่าคงที่ ดังนั้นการค้นหาจะทำได้ง่ายขึ้น หรือในกรณีที่มีเพียงการเลื่อน และการหมุน ก็จะมีตัวแปรให้ค้นหา 3 ตัว คือ $\Delta x, \Delta y, \theta$ เนื่องจากค่า a, b, c, d จะอยู่ในรูปฟังก์ชันของ θ ดังนั้นความ

ซับซ้อน และเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับขอบเขตที่ต้องการค้นหาด้วย หากต้องการค้นหา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงได้ทั้งหมดนั้น การค้นหาจะซับซ้อนยิ่งขึ้น และใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น

3.2 Interpolation

การคำนวณทำ Geometric Transform นั้น ใน Image Processing โดยการคำนวณค่าตำแหน่งใหม่ จากแต่ละตำแหน่งในภาพเดิมนั้น จะเกิดปัญหาในการเปลี่ยนแปลงภาพ 2 กรณี

- ภาพที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงจะมีบางส่วน หรือทั้งหมดหลุดหายไปจากภาพ เนื่องจากก่อนการทำการเปลี่ยนแปลงภาพ ขอบเขตของภาพจะมีเท่ากับภาพ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาพ ข้อมูลบางส่วนจากเดิม หรือทั้งหมดอาจจะตกในตำแหน่งนอกขอบเขตของภาพดังรูปที่ 3.13

การแก้ไขปัญหาเรื่องขอบเขตของภาพ สามารถทำได้โดยการหาขอบเขตที่แท้จริงของภาพใหม่ก่อนการทำ Geometric Transform โดยการทดลองทำการคำนวณการเปลี่ยนแปลงกับมุมทั้ง 4 มุมของภาพ เพื่อหาขอบเขตของภาพใหม่ แล้วจึงใช้ขอบเขตของภาพใหม่เป็น Space ในการสร้างภาพใหม่จากการเปลี่ยนแปลงภาพ



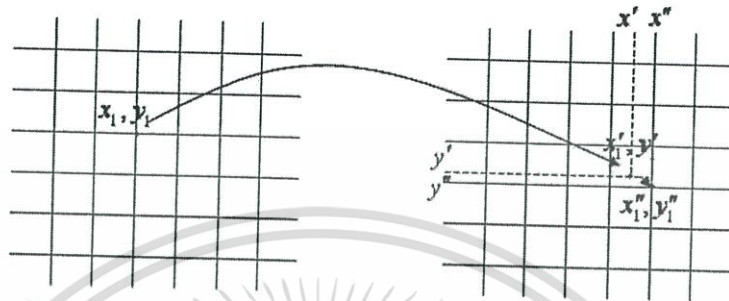
รูปที่ 3.13 การเปลี่ยนแปลงภาพทำให้บางส่วนของภาพเกินขอบเขตของภาพ และหายไป (a) ภาพดั้งเดิม (b) ภาพหลังจากการทำ Geometric Transform จะมีบางส่วนเกินขอบเขตของภาพ

- เนื่องจากระบบของภาพนั้นมีการระบุค่าแต่ละตำแหน่งในรูปแบบของจำนวนเต็ม จะไม่มีค่าตำแหน่งที่เป็นจำนวนทศนิยม แต่การคำนวณ Geometric Transform ด้วยสมการต่างๆ นั้น มีโอกาสที่ผลการคำนวณจะออกมาเป็นจำนวนทศนิยม ดังนั้นต้องหาวิธีการในการปัดค่าที่ได้ หรือหาดำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อให้ภาพใหม่ที่ได้มีความถูกต้อง หรือใกล้เคียงกับภาพเดิมให้มากที่สุด ในที่นี้จะได้อธิบายถึงการทำ Geometric Transform แบบ Forward Mapping, Backward Mapping และการทำ Interpolation ในรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 Forward Mapping

เป็นการคำนวณโดยตรงโดยคำนวณแต่ละจุดในภาพดั้งเดิม ไปเป็นแต่ละจุดในภาพใหม่ ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งจะเห็นว่า จุดใดๆ ในภาพดั้งเดิมซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่มีค่าเป็นจำนวนเต็ม มีโอกาสที่จะกลายเป็นจุดในตำแหน่งที่มีค่าเป็นทศนิยมในภาพใหม่



รูปที่ 3.14 การทำ Forward Mapping และการปัดค่าตำแหน่งของจุดที่ได้ จาก x', y' ให้เป็นจำนวนเต็ม x'', y''

ลักษณะการทำ Forward Mapping นี้ เมื่อมีการคำนวณตำแหน่งของจุดในภาพใหม่แล้วได้เป็นจุดทศนิยม ปกติแล้วจะทำการปัดค่า หรือ Round ให้เป็นค่าจำนวนเต็มที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้มากที่สุด ดังรูปที่ 3.14 จะได้ค่าใหม่ x'', y'' ดังนี้

$$I(x'', y'') = I(\text{round}(x'), \text{round}(y')) \quad (3.32)$$

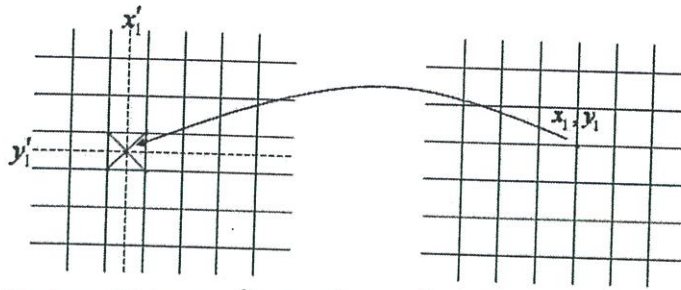
โดย $I(x'', y'')$ คือความเข้มแสงของตำแหน่งในภาพใหม่ที่ได้หลังจากการปัดค่าใกล้เคียงของตำแหน่ง x', y'

การคำนวณตำแหน่งใหม่โดยใช้การปัดค่าจำนวนเต็มเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด แต่ความคลาดเคลื่อนก็จะมากที่สุดเช่นกัน นอกจากนี้ เมื่อทำ Forward Mapping แล้วตำแหน่งใหม่ที่ได้จากจุดมากกว่า 1 จุด อาจได้ค่าตำแหน่งใหม่ที่ตำแหน่งเดียวกันในภาพใหม่ได้ จึงเป็นปัญหาขึ้นอีกว่าจะใช้จุดใด หรืออาจทำการเฉลี่ยค่าทั้งหมด

3.2.2 Backward Mapping

วิธีการคำนวณในลักษณะนี้เป็นการคำนวณในลักษณะย้อนกลับ โดยขั้นแรกต้องหา Space ของภาพใหม่เสียก่อน อาจหาได้โดยการทดลองคำนวณ Geometric Transform จุดมุมทุกมุมของภาพ แล้วหาขอบเขตใหม่ของภาพ แล้วใช้ Space นี้ทำการหาค่าตำแหน่งของจุดจากภาพแรกที่จะมาตกที่แต่ละจุดใน Space ใหม่ ดังรูปที่ 3.15 การคำนวณการทำ Geometric Transform จะคำนวณในลักษณะย้อนกลับจากการเปลี่ยนแปลงปกติที่แต่ละจุดในภาพใหม่ว่าจะนำจุดจากตำแหน่งใดในภาพดั้งเดิมมาใช้ ดังรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 การทำ Backward Mapping โดยการคำนวณย้อนกลับการเปลี่ยนแปลงปกติที่ทุกๆ จุด ในภาพใหม่

ค่าที่ได้ออกมาหลังจากการคำนวณย้อนกลับ คือ ค่าความเข้มแสงของตำแหน่งที่คำนวณได้ ซึ่งจะนำมาใช้เป็นค่าความเข้มแสงของจุดที่ทำการคำนวณ ซึ่งมีโอกาสที่เมื่อคำนวณแล้วตำแหน่งของจุดในภาพตั้งต้นได้เป็นจำนวนทศนิยม ในที่นี้จะใช้เทคนิค Interpolation ในการคำนวณความเข้มแสงที่จะนำไปใช้

3.2.2.1 Zero-order Interpolation (Nearest Neighbor)

การคำนวณหาความเข้มแสงวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด คือคำนวณว่าตำแหน่งที่คำนวณได้นั้นใกล้เคียงกับตำแหน่งใดในภาพตั้งต้นมากที่สุด แล้วใช้ความเข้มแสงจากจุดนั้นเป็นความเข้มแสงของจุดในภาพใหม่ ความเข้มแสงของจุดในภาพใหม่จะมีสมการเป็นดังนี้

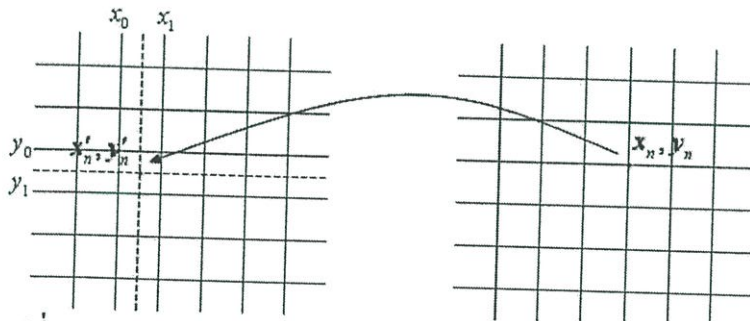
$$I(x_n'', y_n'') = I(\text{round}(x_n'), \text{round}(y_n')) \tag{3.33}$$

โดย $I(x_n'', y_n'')$ คือความเข้มแสงของตำแหน่งจากภาพตั้งต้นที่ได้หลังจากการปิดค่าใกล้เคียงของตำแหน่ง x_1', y_1'

การคำนวณหาความเข้มแสงด้วย Zero-order Interpolation จะทำได้ง่าย และรวดเร็วที่สุด เนื่องจากการปิดค่าใกล้เคียงที่สุดแล้วใช้ความเข้มแสงจากตำแหน่งนั้น ทำให้เกิดภาพผลลัพธ์ที่ได้เกิดความผิดพลาดได้ง่ายที่สุด

3.2.2.2 First-order Interpolation

First-order Interpolation เป็นรูปแบบการทำ Interpolation อีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งมีความซับซ้อนในการทำมากขึ้น และมีความผิดพลาดเกิดขึ้นน้อยลง เนื่องจากจะมีการใช้ความเข้มแสงจากจุดใกล้เคียงรอบๆ ทั้ง 4 จุด มาใช้ในการคำนวณค่าความเข้มแสงในภาพใหม่ด้วย ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การทำ Geometric Transform ด้วยวิธี Backward Mapping

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

First-order Interpolation มีสมการดังนี้

$$I(x_n, y_n) = I(x_0, y_0) + [I(x_1, y_0) - I(x_0, y_0)]\Delta x + [I(x_0, y_1) - I(x_0, y_0)]\Delta y + [I(x_1, y_1) + I(x_0, y_0) - I(x_0, y_1) - I(x_1, y_0)]\Delta x\Delta y \quad (3.34)$$

$$\text{โดย } \Delta x = x'_n - x_0$$

$$\Delta y = y'_n - y_0$$

$I(x_1, y_1), I(x_0, y_0), I(x_0, y_1), I(x_1, y_0)$ เป็นจุดใกล้เคียงรอบจุดที่คำนวณได้

x'_n, y'_n

การทำ First-order Interpolation เป็นการคำนวณหาความเข้มแสงที่ตำแหน่ง x_n, y_n ใดๆ ที่คำนวณได้ค่าตำแหน่งจากภาพตั้งต้นเป็น x'_n, y'_n โดยใช้จุดใกล้เคียงรอบๆ จำนวน 4 จุดมาหาค่าร่วมกับระยะทางระหว่างจุดด้วย การคำนวณด้วยวิธีนี้จะใช้เวลาในการคำนวณนานขึ้นกว่าการทำ Zero-order Interpolation แต่ผลที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้นกว่าค่อนข้างมาก

3.2.2.3 High-order Interpolation (Cubic Interpolation)

High-order Interpolation เป็นเทคนิคการทำ Interpolation ที่มีความละเอียดมากที่สุด มีความซับซ้อน และใช้เวลาในการคำนวณมากที่สุด โดยมีการใช้ความเข้มแสงของจุดใกล้เคียงทั้ง 4 ด้านรอบๆ ในการคำนวณ เช่นเดียวกับการทำ First-order Interpolation ดังรูปที่ 3.16 สมการการทำ High-order Interpolation มีดังนี้

$$I(x'_n, y'_n) = \sum_{m=-1}^2 \sum_{n=-1}^2 I(x_0 + m, y_0 + n) R(m - \Delta x) R(\Delta y - n) \quad (3.35)$$

$$R(k) = \frac{1}{6} [P(k-2)^3 - 4P(k+1)^3 - 4P(k-1)^3 + 6P(k)^3] \quad (3.36)$$

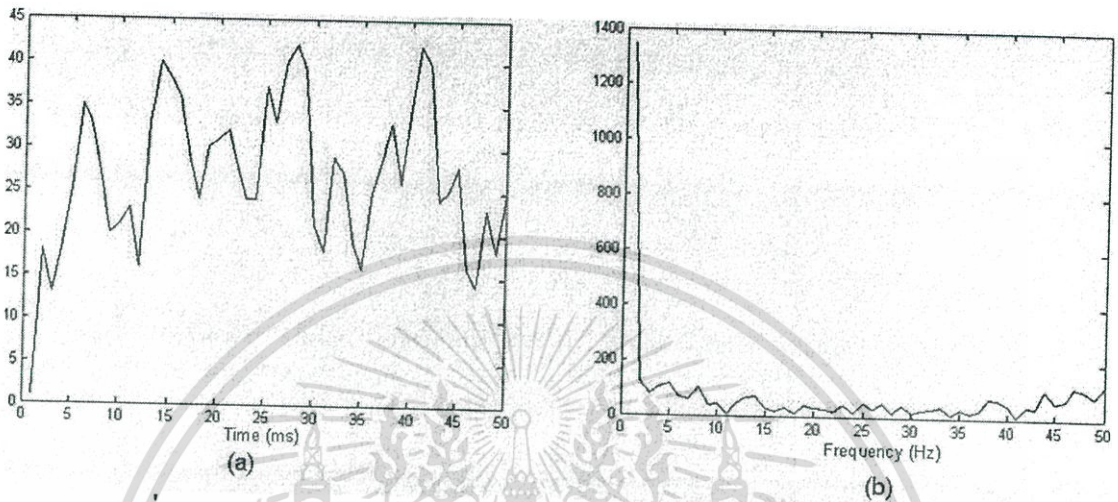
$$P(k) = \begin{cases} k & , k > 0 \\ 0 & , k \leq 0 \end{cases} \quad (3.37)$$

จะเห็นว่าการคำนวณสำหรับ High-order Interpolation นี้ค่อนข้างมีความซับซ้อนมาก เวลาที่ใช้ในการประมวลผลก็จะมากขึ้นด้วย ดังนั้นสำหรับการ Interpolation ทั่วๆ ไปที่ไม่ต้องการความละเอียดสูงมากๆ การใช้ First-order Interpolation ก็เพียงพอต่อการใช้งานแล้ว

3.3 Fourier Transform

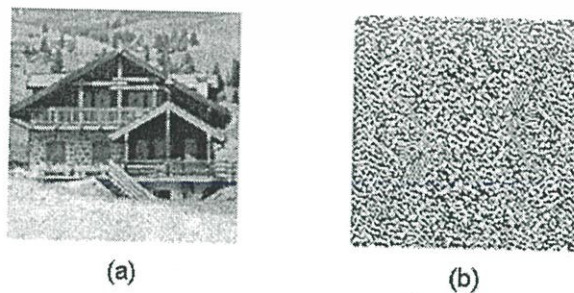
Fourier Transform เป็นเทคนิคในการแยกองค์ประกอบของสัญญาณ เป็นองค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆ กัน โดยสัญญาณจะถูกแปลงจากโดเมนของเวลา เป็นโดเมนของความถี่ ดังรูปที่ 3.17 หลังจากการทำ Fourier Transform แล้วสัญญาณที่มีความถี่ต่างกันจะถูกแยกออกจากกัน Fourier Transform แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ Continuous Fourier Transform ซึ่งเป็นการทำ Fourier Transform กับสัญญาณทั่วๆ ไปซึ่งมีข้อมูลต่อเนื่องกันตลอดเวลา และ Discrete Fourier Transform เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Transform เป็นการทำ Fourier Transform ในลักษณะไม่ต่อเนื่อง สัญญาณ input จะมีลักษณะเป็นขั้นๆ ไม่ต่อเนื่องกัน ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้กับงาน Image Processing เนื่องจากจุดแต่ละจุดในภาพมีตำแหน่งเป็นจำนวนเต็ม ไม่ต่อเนื่องกัน โดยในที่นี้จะได้มีการอธิบายเฉพาะ Discrete Fourier Transform ซึ่งใช้ในงานวิจัยเท่านั้น



รูปที่ 3.17 การแปลงสัญญาณจาก (a) Time Domain เป็น (b) Frequency Domain

Fourier Transform สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ Image Processing ได้ ถ้าพิจารณารายละเอียดภายในภาพ จะพบว่าส่วนของภาพที่เป็นรายละเอียดต่างๆ ไปนั้นคือองค์ประกอบความถี่ต่ำของภาพ สำหรับส่วนที่เป็นองค์ประกอบความถี่สูงของภาพนั้นคือ ส่วนที่เป็นเส้นขอบของรูปภายในภาพ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างรวดเร็วจากค่าหนึ่งไปเป็นอีกค่าหนึ่ง สามารถใช้เทคนิค Fourier Transform ทำการแปลงภาพซึ่งอยู่ในโดเมนจุดของภาพ (Spatial Domain) ให้กลายเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ของภาพได้ แต่เนื่องจากภาพมีลักษณะเป็น 2 มิติ ดังนั้นการทำ Fourier Transform จะต้องทำในลักษณะ 2 มิติ เช่นกัน ตัวอย่างของการทำ Fourier กับภาพแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การทำ Fourier Transform กับภาพ (a) ภาพดั้งเดิม (b) ภาพที่ได้หลังจากการทำ Fourier Transform ภาพ a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Discrete Fourier Transform (DFT) มีสมการดังนี้

$$F(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{M}\right)} \quad (3.38)$$

โดย $f(x)$ คือความเข้มแสงของจุดในภาพเดิมที่ตำแหน่ง x

$F(u)$ คือค่าที่ได้ใน Frequency Domain ที่ตำแหน่ง u

M คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

เนื่องจาก $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$ จากสมการที่ 3.38 จะได้เป็น

$$F(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) \left[\cos\left(\frac{2\pi ux}{M}\right) - j\sin\left(\frac{2\pi ux}{M}\right) \right] \quad (3.39)$$

สำหรับการแปลง Fourier Transform มีข้อกำหนดว่า ขนาดของข้อมูล หรือคือค่า M จะต้อง มีค่าอยู่ในรูปของ 2^n ในกรณีที่ค่าไม่เป็น 2^n จะต้องมีการเติมค่าเปล่าขึ้นเพื่อให้ถึง 2^n จาก สมการที่ 3.38 และ 3.39 เป็นสมการการแปลง Fourier Transform ให้ข้อมูลอยู่ใน Frequency Domain สำหรับการแปลงข้อมูลกลับ จาก Frequency Domain เรียกว่า Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT) มีสมการดังนี้

$$f(x) = \sum_{u=0}^{M-1} F(u) e^{j2\pi\left(\frac{ux}{M}\right)} \quad (3.40)$$

$$f(x) = \sum_{u=0}^{M-1} F(u) \left[\cos\left(\frac{2\pi ux}{M}\right) + j\sin\left(\frac{2\pi ux}{M}\right) \right] \quad (3.41)$$

สมการที่ 3.38 – 3.41 เป็นสมการของ Discrete Fourier Transform ในลักษณะ 1 มิติ แต่การทำ Fourier Transform กับภาพนั้น ภาพมีลักษณะเป็น 2 มิติ ดังนั้นจึงต้องทำการแปลง Fourier Transform แบบ 2 มิติ สมการ Discrete Fourier Transform 2 มิติมีดังนี้

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)} \quad (3.42)$$

โดย $F(u, v)$ คือค่าของข้อมูลในภาพ Frequency Domain ในตำแหน่ง (u, v)

$f(x, y)$ คือค่าของข้อมูลในภาพ ในโดเมนปกติในตำแหน่ง (x, y)

M คือ ขนาดของภาพในแนวแกน x

N คือขนาดของภาพในแนวแกน y

และสมการ Inverse Discrete Fourier Transform 2 มิติ มีดังนี้

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)} \quad (3.43)$$

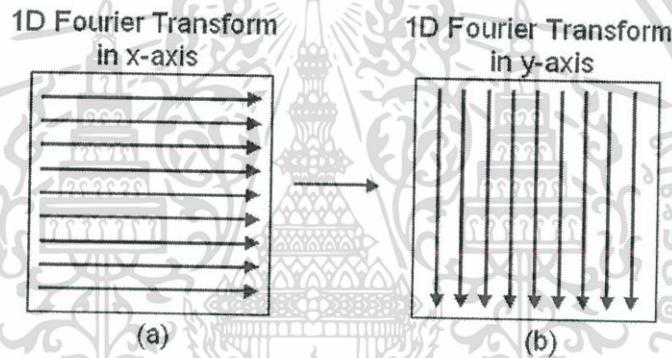
จากสมการที่ 3.42 และ 3.43 สังเกตได้ว่าการทำ Fourier Transform สำหรับข้อมูล 2 มิติ จะต้องใช้เวลาคำนวณค่อนข้างนาน เนื่องจาก 1 ตำแหน่งของ $F(u, v)$ ในภาพ Frequency Domain นั้น จะต้องทำการคำนวณผลรวมทั้งหมดเท่ากับ $M \times N$ ครั้ง ดังนั้นภาพซึ่งมีขนาดเท่ากับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$M \times N$ จะต้องใช้การคำนวณผลรวมทั้งหมด $(M \times N)^2$ ครั้ง หากภาพมีขนาดเท่ากับ 100×100 จะต้องทำการคำนวณทั้งหมด 10^8 ครั้ง และหากภาพมีขนาดใหญ่ขึ้น การคำนวณก็จะต้องใช้เวลานานขึ้นอีก ดังนั้นจึงได้มีผู้คิดค้นเทคนิคที่เรียกว่า Fast Fourier Transform (FFT) ซึ่งเป็นการคำนวณ Fourier Transform อย่างรวดเร็ว โดยมีแนวคิดในการคำนวณดังนี้

จากสมการที่ 3.42 จากคุณสมบัติของ Σ และเลขยกกำลัง จะสามารถจัดเรียงใหม่ได้เป็น

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{y=0}^{n-1} \left(\sum_{x=0}^{M-1} f(x, y) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{M}\right)} \right) e^{-j2\pi \left(\frac{vy}{N}\right)} \quad (3.44)$$

เมื่อจัดเรียงรูปแบบตามสมการที่ 3.44 แล้ว สังเกตว่าในวงเล็บ คือการทำ Discrete Fourier Transform 1 มิติในแนวแกน x นั่นเอง ส่วนที่อยู่นอกวงเล็บ หมายถึงให้นำค่าที่ได้จากการคำนวณ Fourier Transform ในแนวแกน x มาทำ Fourier Transform ต่ออีกครั้งหนึ่งในแนวแกน y ดังรูปที่ 3.19

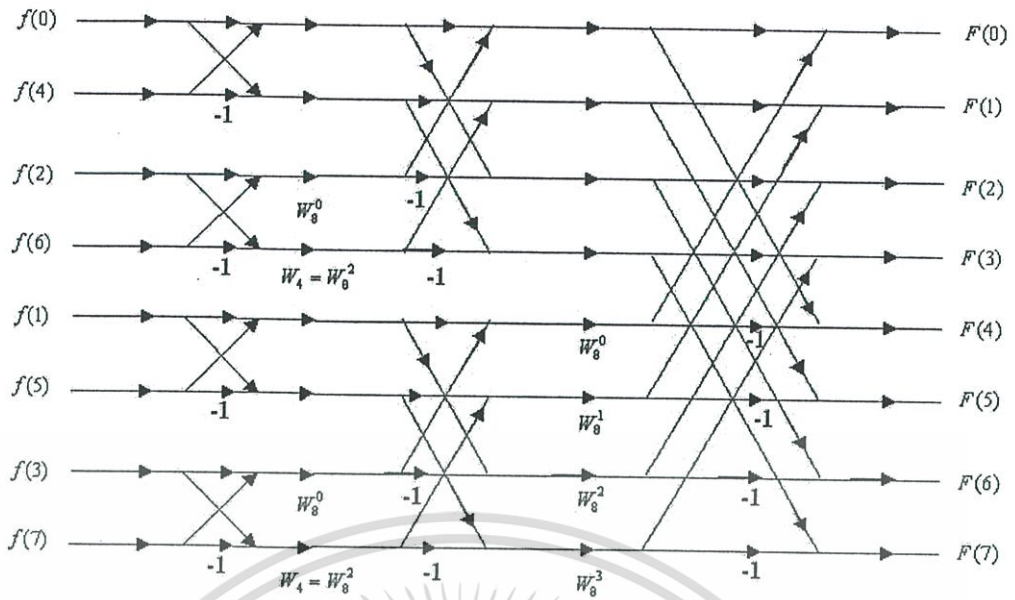


รูปที่ 3.19 การทำ FFT โดย (a) เริ่มจากการทำ 1D DFT ในแนวแกน x (b) นำภาพที่ได้จากภาพ a มาทำ 1D DFT ในแนวแกน y

ลักษณะเช่นนี้จะทำให้จำนวนครั้งของการคำนวณลดลงจาก $(M \times N)^2$ ครั้ง เหลือ $2(M \times N)$ ครั้ง ถ้าภาพตั้งต้นมีขนาด 100×100 จะทำการคำนวณทั้งหมด 20,000 ครั้ง จะเห็นได้ว่าจำนวนรอบของการคำนวณจะลดลงอย่างมาก ซึ่งจะทำให้เวลาในการคำนวณรวดเร็วยิ่งขึ้นด้วย ทิศทางในการทำ Fourier Transform นั้นสามารถสลับกันได้ กล่าวคือทำในแนวแกน x หรือ y ก่อนก็ได้ แล้วจึงกลับมาทำอีกแนวที่เหลือต่อไป สำหรับการทำ Inverse Fourier Transform ก็ใช้หลักการเดียวกันในการทำ Inverse Discrete Fourier Transform คือทำทีละแนวแกน แล้วใช้ค่าที่ได้ไปทำต่อในอีกแนวแกนหนึ่ง

การทำ Fast Fourier Transform ยังมีผู้ได้ทำการปรับปรุง เพื่อให้คำนวณได้เร็วขึ้นกว่าเดิม โดยการลดการคำนวณซ้ำซ้อนลง เรียกวิธีการนี้ว่า DIT-FFT มีตัวอย่างการคำนวณดังรูปที่ 3.20 ซึ่งจะลดเวลาในการคำนวณลงจากเดิม $O(n^2)$ เหลือ $2 \log_2 n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 เทคนิค DIT-FFT สำหรับข้อมูลจำนวน 8 จุด

3.4 Phase Correlation

Phase Correlation เป็นคุณสมบัติของภาพที่มีการเลื่อนตำแหน่งของภาพเมื่อทำ Fourier Transform ให้อยู่บน Frequency Domain จะมีความสัมพันธ์ระหว่างภาพ 2 ภาพเกิดขึ้น ถ้าภาพที่ 1 และ 2 เป็นภาพเดียวกันที่มีการเลื่อนตำแหน่งด้วยการเปลี่ยนแปลง Δx และ Δy ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ จะได้ว่า

$$I_1(x + \Delta x, y + \Delta y) = I_2(x, y) \quad (3.45)$$

เมื่อทำ Fourier ทั้งสองข้างของสมการที่ 3.45

$$\mathcal{F}\{I_1(x + \Delta x, y + \Delta y)\} = \mathcal{F}\{I_2(x, y)\} \quad (3.46)$$

จากคุณสมบัติของ Fourier Transform

$$\mathcal{F}\{f(x, y)\} = \hat{f}(\omega_x, \omega_y) \quad (3.47)$$

$$\mathcal{F}\{f(x + \Delta x, y + \Delta y)\} = \hat{f}(\omega_x, \omega_y) e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} \quad (3.48)$$

โดย $\hat{f}(\omega_x, \omega_y)$ คือค่า Fourier ของภาพใน Fourier Domain ในตำแหน่ง (ω_x, ω_y)

แทนค่าสมการที่ 3.47 และ 3.48 ในสมการที่ 3.46 จะได้

$$\hat{I}_1(\omega_x, \omega_y) e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} = \hat{I}_2(\omega_x, \omega_y) \quad (3.49)$$

จะเห็นว่าสิ่งที่แตกต่างกันคือค่า $e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)}$ ซึ่งเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพนั่นเอง ทำการย้ายค่าเพื่อหาค่า $e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)}$ จะได้

$$\frac{\hat{I}_2(\omega_x, \omega_y)}{\hat{I}_1(\omega_x, \omega_y)} = e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} \quad (3.50)$$

จากสมการที่ 3.50 ค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ยังอยู่ใน Frequency Domain อยู่ ทำ IFFT ทั้งสองข้างของสมการที่ 3.50 จะได้

$$\text{Corr}(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}\{e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)}\} = \delta(x - \Delta x, y - \Delta y) \quad (3.51)$$

ค่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากสมการนี้จะอยู่ในรูปแบบของภาพขนาดเท่ากับภาพตั้งต้น หรือเป็นอาร์เรย์ 2 มิติขนาดเท่ากับจำนวนข้อมูลนั่นเอง แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงนี้ตามปกติแล้ว ควรจะเป็นจุดที่ทำให้ $\text{Corr}(x, y)$ มีค่าเป็น 1.0 คือเป็นค่า Peak ที่สุดของภาพ แต่เนื่องจากความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากข้อมูลที่ไม่ได้ทับซ้อนกันในระหว่างภาพตั้งต้นทั้งสอง, การมีสัญญาณรบกวน (Noise) หรือความผิดพลาดใดๆ อาจทำให้เรากำหนดได้ออกมามี Peak ของสัญญาณมีค่าน้อยกว่า 1.0 ดังนั้น เราจะเลือกค่าการเปลี่ยนแปลงจากตำแหน่งที่ให้ค่า $\text{Corr}(x, y)$ สูงที่สุดในภาพ ดังสมการที่ 3.52

$$(x, y) = \arg\{\max_{(\bar{x}, \bar{y})}\{\text{Corr}(\bar{x}, \bar{y})\}\} \quad (3.52)$$

ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้อีกคือ ภาพตั้งต้น และภาพอินพุตเมื่อหารกันอาจทำให้ตัวหารเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในกระบวนการ หรือการที่ภาพมี Noise ปะปนอยู่ในภาพ ซึ่งอาจทำให้การคำนวณเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นเราจึงต้องทำการคำนวณการหารแบบใช้ Magnitude ของ Complex Number ของภาพด้วย ตามสมการที่ 3.53

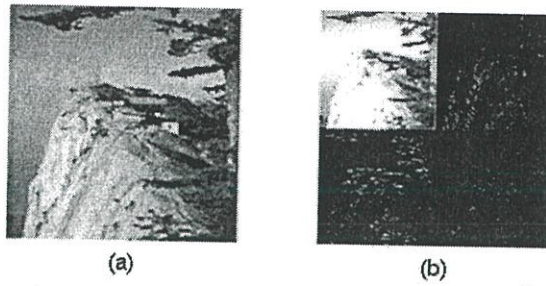
$$\overline{\text{Corr}(\omega_x, \omega_y)} = \frac{\hat{f}_1(\omega_x, \omega_y) \hat{f}_2^*(\omega_x, \omega_y)}{|\hat{f}_1(\omega_x, \omega_y)| |\hat{f}_2(\omega_x, \omega_y)|} = e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} \quad (3.53)$$

โดย $\hat{f}_2^*(\omega_x, \omega_y)$ หมายถึง Complex Conjugate ของ \hat{f}_2

3.5 Wavelet Transform

Wavelet เป็นเทคนิคในการแยกส่วนประกอบของภาพ ตามองค์ประกอบในด้านความถี่ และตำแหน่งของความถี่นั้นๆ ในภาพ ในการแปลงภาพให้อยู่ใน Frequency Domain โดยใช้ Fourier Transform นั้น ภาพที่ได้จะมีแบ่งออกตามความถี่ต่างๆ ในภาพ แต่ไม่สามารถทราบได้ว่าความถี่นั้นๆ อยู่ในตำแหน่งใดบ้างของภาพ ส่วนในกรณีของ Wavelet Transform จะเป็นการแสดงผลทั้งความถี่ต่างๆ และแสดงตำแหน่งของความถี่ด้วย ภาพที่ได้จากการทำ Wavelet 1 ชั้นจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังรูปที่ 3.21 ซึ่งภาพทั้ง 4 ส่วนนี้ คือส่วนประกอบในด้านความถี่ของภาพเดิม

ภาพ Wavelet ที่ได้จะมีองค์ประกอบอยู่ 4 ส่วน ดังรูปที่ 3.22 เรียกองค์ประกอบทั้ง 4 ส่วน ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 การแยกองค์ประกอบของภาพโดยใช้ Wavelet กับภาพตั้งต้น (a) จะได้ภาพ (b)

Low-Low (LL)	Low-High (LH)
High-Low (HL)	High-High (HH)

รูปที่ 3.22 องค์ประกอบของภาพ Wavelet

ส่วน Low-Low (LL) เป็นส่วนประกอบในภาพที่มีความถี่ต่ำ โดยมากจะเป็นส่วนของเนื้อหาข้อมูล รายละเอียดของภาพจะสามารถดูได้จากส่วนนี้ ภาพในส่วน LL นี้จะมีลักษณะเหมือนกับภาพตั้งต้น โดยจะมีขนาดจะเล็กลงเหลือ $1/4$ จากภาพเดิม ดังนั้นสังเกตได้ว่าเราสามารถให้ Wavelet ในการย่อขนาดของภาพลงได้ แต่เราจะสังเกตได้ว่าภาพใหม่ที่เกิดขึ้นจะมีแสงมากขึ้นจากเดิม ทั้งนี้เนื่องมาจากสมการการแปลง Wavelet ที่ใช้ ซึ่งสามารถจะแก้ไขโดยการใส่เทคนิคการลดแสงในภาพลงได้ สำหรับส่วน Low-High (LH) เป็นส่วนที่ภาพมีความถี่สูงในแนวแกน x หรือคือเป็นขอบของภาพในแนวแกน x นั่นเอง รายละเอียดของภาพจะมองได้ยากเนื่องจากมีแต่ขอบของภาพในแนวแกน x เป็นส่วนใหญ่ ส่วนประกอบ High-Low (HL) เป็นการหาในส่วนที่มีความถี่สูงในทิศแกน แกน y ภาพนี้จะมีลักษณะเป็นขอบของวัตถุในภาพในแนวแกน y เช่นกัน ในส่วนสุดท้ายของภาพ Wavelet คือส่วน High-High (HH) จะเป็นส่วนประกอบที่มีความถี่สูงทั้ง 2 ทิศ กล่าวคือเป็นส่วนที่เป็นขอบ เป็นมุมของภาพจริงๆ เท่านั้น ทำให้ในภาพ HH นี้มองรายละเอียดของภาพเห็นได้ยากมาก จะเห็นว่าในส่วนที่เป็น LH, HL และ HH นั้นรายละเอียดต่างๆ ในภาพนั้นจะมองไม่เห็นชัดเจน

สำหรับสมการในการทำ Wavelet นั้นจะใช้ฟังก์ชันที่เรียกว่า Mother Wavelet ในการคำนวณ ซึ่งได้มีผู้คิดค้น Mother Wavelet ขึ้นมาหลายชนิด และแต่ละชนิดก็จะให้ผลออกมาที่มีความแตกต่างกัน ที่ใช้กันมากจะเป็น Mother Wavelet ของ Haar และ Daubechies ในที่นี้จะได้อธิบายการทำ Wavelet Transform ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือเทคนิคที่เรียกว่า Discrete Wavelet Transform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

through Lifting (DWT through Lifting) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้งาน Wavelet Transform ชนิด Daubechies4 ซึ่งเป็น Mother Wavelet หนึ่งในตระกูล Daubechies มีวิธีการคำนวณดังนี้

$$s^{(1)}[n] = S[2n] + \sqrt{3}S[2n+1] \quad (3.54)$$

$$d^{(1)}[n] = S[2n+1] - \frac{1}{4}\sqrt{3}s^{(1)}[n] - \frac{1}{4}(\sqrt{3}-2)s^{(1)}[n-1] \quad (3.55)$$

$$s^{(2)}[n] = s^{(1)}[n] - d^{(1)}[n+1] \quad (3.56)$$

$$s[n] = \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{2}}s^{(2)}[n] \quad (3.57)$$

$$d[n] = \frac{\sqrt{3}+1}{\sqrt{2}}d^{(1)}[n] \quad (3.58)$$

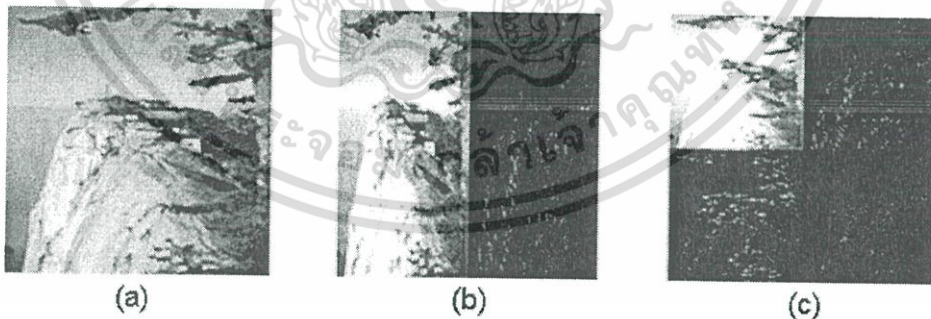
สมการทั้งหมดนี้ เป็นการทำงานเพียง 1 แถวของภาพ

โดย $S[i]$ คือความเข้มแสงในตำแหน่งที่ i ของแถวในภาพที่เราป้อนเข้าให้กับสมการ n คือตำแหน่งที่เราต้องการหา

$s[n]$ คือค่าภาพ Wavelet ในส่วนความถี่ต่ำคำนวณจากตำแหน่ง n

$d[n]$ คือภาพ Wavelet ส่วนที่เป็นความถี่สูงคำนวณจากตำแหน่ง n

จากสมการที่ 3.54 – 3.58 นี้เป็นวิธีการทำ DWT through Lifting ใน 1 มิติ ซึ่งปกติจะใช้ในการแยกสัญญาณต่างๆ ไป แต่หากนำมาใช้กับภาพแล้ว จะทำให้เป็นการทำ Wavelet Transform เพียงด้านเดียวเท่านั้น ภาพที่ได้หลังจากการทำตามขั้นตอนสมการที่ 3.54 – 3.58 จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.23 ซึ่งจะต้องนำภาพที่ได้นี้ไปทำ DWT through Lifting ในอีกแนวแกนหนึ่ง จึงจะได้ภาพที่สมบูรณ์ออกมา

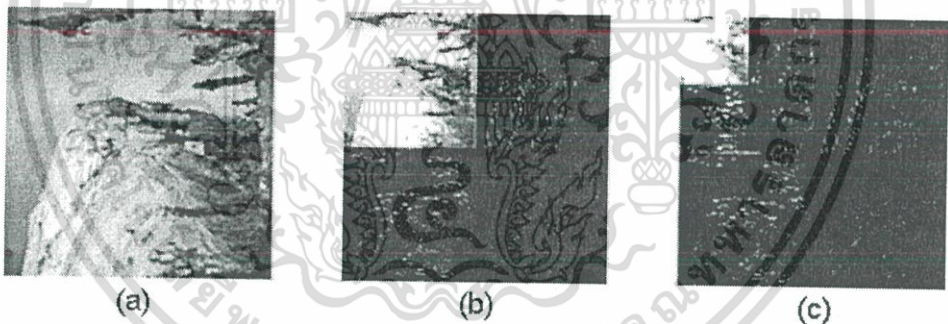


รูปที่ 3.23 การทำ DWT through Lifting (a) ภาพตั้งต้น (b) หลังจากการทำ DWT through Lifting กับภาพ a ในแนวแกน x (c) นำภาพ b มาทำ DWT through Lifting อีกครั้งหนึ่งในแนวแกน y

ภาพที่ผ่านการทำ Wavelet Transform สามารถทำการแปลงกลับไปให้เป็นภาพตั้งต้นอีกครั้งหนึ่งได้ โดยใช้ค่าทั้ง 4 องค์ประกอบ LL, LH, HL และ HH มาทำการคำนวณย้อนกลับ จะได้ภาพตั้งต้นเดิมออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ผ่านการทำ Wavelet Transform แล้วสามารถจะนำมาทำ Wavelet Transform ต่ออีกครั้งเพื่อให้ได้ภาพขนาดเล็กลงได้อีก โดยใช้องค์ประกอบ LL ในภาพ Wavelet ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีรายละเอียดของภาพเดิมมากที่สุดมาเข้ากระบวนการเพื่อทำ Wavelet Transform ซ้ำอีกครั้ง จะได้ภาพ Wavelet ที่มีขนาดเล็กลงอีก และกระบวนการนี้ยังสามารถทำต่อได้เรื่อยๆ เพื่อย่อขนาดของภาพให้มีขนาดเล็กลงตามที่ต้องการ ในการทำงานสามารถนำภาพเล็กใน Level สูงๆ (ชั้นหยาบ) ไปใช้ประมวลผลก่อน แล้วนำค่าที่ได้จากการประมวลผลมาใช้คำนวณต่อในภาพ Level ที่ต่ำลงมา (ชั้นละเอียดขึ้น) แล้วทำการประมวลผลต่อจนถึงชั้นที่ละเอียดที่สุด ลักษณะแบบนี้จะเป็นการช่วยลดเวลาในการประมวลผลลงได้ ดังรูปที่ 3.24 เราเรียกเทคนิคนี้ว่า Multi-resolution Wavelet ซึ่งมีประโยชน์มากในการคำนวณกับภาพขนาดใหญ่ เนื่องจากเมื่อภาพที่ต้องการคำนวณมีขนาดใหญ่ขึ้น เวลาที่ใช้ในการประมวลผลก็จะนานขึ้นด้วย ถ้าทำการค้นหาโดยตรงในภาพขนาดใหญ่ทันที การค้นหาจะใช้เวลานานมาก เช่น การใช้ Sequential Search หรือการใช้ Genetic Algorithms หากภาพมีขนาดใหญ่ Gene String ที่ต้องใช้ก็จะต้องมีขนาดใหญ่ เวลาที่ใช้ในการ Search อาจจะยอมรับไม่ได้เลยในทางทฤษฎี ดังนั้นการที่สามารถย่อขนาดภาพลงได้ เพื่อทำการค้นหาในขอบเขตเล็กๆ ก่อน แล้วใช้ผลลัพธ์ที่ได้มาช่วยในการค้นหาในชั้นที่ละเอียดขึ้นไปเรื่อยๆ จะทำให้การค้นหาทำได้อย่างรวดเร็วขึ้น



รูปที่ 3.24 การทำ Multi-resolution Wavelet (a) ภาพดั้งเดิม (b) ผลจากการทำ Wavelet Transform กับภาพ a (c) ผลจากการนำเอาส่วนประกอบ LL ของภาพ b มาทำ Wavelet Transform อีกครั้ง

3.6 Hough Transform

Hough Transform เป็นวิธีการในการตรวจจับเส้นตรงที่อยู่ในภาพ โดยจะเป็นการตรวจหาเส้นตรงแต่ละเส้นที่แฝงอยู่ในภาพ โดยมีข้อกำหนดว่า ก่อนหน้าที่จะนำภาพเข้ากระบวนการ Hough Transform ได้ นั้น ภาพดั้งเดิมจะต้องผ่านเทคนิคการหาขอบของภาพมาก่อน อาจจะใช้เทคนิคของ Sobel หรือ Canny Detector หรือเทคนิคอื่นๆ

แนวความคิดเบื้องต้นของ Hough Transform คือ ที่จุดใดๆ ของภาพ (x, y) จะสามารถมีเส้นตรงผ่านได้เป็นจำนวนไม่จำกัด ซึ่งเส้นตรงแต่ละเส้นจะมีสมการเส้นตรงของแต่ละเส้นเป็นของตัวเอง และเส้นตรงใดๆ จะเป็นเส้นตรงเดียวกันย่อมมีสมการเส้นตรงเป็นสมการเดียวกัน จากสมการเส้นตรง

$$y = mx + b \quad (3.59)$$

โดย m คือความชันของเส้นตรง และ b คือจุดตัดของเส้นตรงกับแกน y

จุดใดๆ ที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกัน จะมีค่า m และค่า b เท่ากันเสมอ นั่นคือ จากสมการที่ 3.59 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$b = y - mx \quad (3.60)$$

หากทำการแปลงข้อมูลจากพิกัด (x, y) ให้อยู่ในพิกัด (m, b) แล้ว จะมีความสัมพันธ์ใหม่เกิดขึ้น นั่นคือหากจุดใดๆ อยู่บนเส้นตรงเดียวกัน ย่อมต้องมีค่า m และค่า b เท่ากัน นั่นคือถ้าแปลงมาอยู่ในพิกัด (m, b) จะอยู่ในอาร์เรย์ช่องเดียวกัน หากใช้อาร์เรย์ (m, b) นี้เก็บค่าความถี่ของจุดในช่อง แต่ละช่องของ (m, b) จะเป็นจำนวนจุดที่อยู่บนเส้นตรงที่มีความชัน m และ b เท่ากัน ซึ่งอาร์เรย์พิกัด (m, b) นี้เรียกว่า Hough Space

ดังนั้น Hough Space คือ อาร์เรย์ที่ใช้เก็บค่าความถี่ของจุดที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกันในภาพ โดยวิธีการค้นหาจะต้องตรวจสอบดูที่ทุกๆ จุดในภาพ ว่ามีเส้นตรงอยู่ที่ใดบ้าง แล้วทำการบวกเพิ่มในตารางความถี่

แต่จากสมการที่ 3.60 นี้จะสังเกตว่ายังไม่ใช้งานไม่ได้จริง เนื่องจากในกรณีที่เส้นตรงทำมุมเป็น 90 องศา จะทำให้ค่าความชันมีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้นต้องเปลี่ยนวิธีการในการเก็บค่าใหม่ โดยใช้การคำนวณบนพิกัดเชิงขั้ว ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 เส้นตรงในพิกัดเชิงขั้ว

สมการเส้นตรงสำหรับพิกัดเชิงขั้วมีลักษณะดังนี้

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (3.61)$$

โดย ρ คือระยะทางที่ใกล้ที่สุดจากเส้นตรงถึงจุดกำเนิด หรือเป็นความยาวของเส้นที่ลากจากจุดกำเนิดไปตั้งฉากกับเส้นตรงนั่นเอง

θ คือมุมระหว่างเส้นที่ลากจากจุดกำเนิดไปตั้งฉากกับเส้นตรง กับแกน x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hough Space สำหรับพิกัดเชิงขั้วนี้คือ (ρ, θ) จะเห็นว่าการเก็บข้อมูลในลักษณะเช่นนี้จะทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้ทั้ง 360 องศา สำหรับวิธีการเก็บข้อมูลนั้น จะทำได้โดยการพิจารณาที่แต่ละพิกเซลในภาพตั้งต้นซึ่งผ่านการหาขอบมาแล้ว ทำให้ภาพมีลักษณะเป็น Binary Image หากตำแหน่งพิกเซลใดมีค่าเป็น 1 แสดงว่าพิกเซลนั้นอาจเป็นส่วนประกอบของเส้นใดเส้นหนึ่งในภาพทำการแทนค่าสมการที่ 3.61 โดยแทนค่า x และ y ซึ่งเป็นตำแหน่งของพิกเซลนั้นๆ ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ แล้วจึงแทนค่ามุม θ ที่ต้องการค้นหาทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จะใช้ θ เป็นมุมระหว่าง 1 ถึง 360 องศา แบ่งช่วงละ 1 องศา แล้วทำการหาค่า ρ ออกมาตามสมการ สำหรับการกำหนดมุม และการแบ่งช่วงของมุมนี้ขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานว่าต้องการความละเอียด และขอบเขตเท่าใด เมื่อได้ค่า ρ แล้ว จะนำไปบวกค่าเพิ่มขึ้น 1 ใน Hough Space ในตำแหน่งที่ (ρ, θ) ตามที่คำนวณได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ขอบเขตของ Hough Space เท่ากับ $(-Max(\rho) to Max(\rho), 1 to 360)$

ถ้าเซตของจุดกลุ่มหนึ่งเป็นจุดที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกัน จะทำให้การคำนวณค่าตามสมการที่ 3.61 นี้ได้ค่า ρ และ θ เท่ากัน นั่นคือเซตของจุดกลุ่มนี้จะตกในตำแหน่ง (ρ, θ) เดียวกันทั้งหมด ทำให้อาร์เรย์ (ρ, θ) ในตำแหน่งนั้นมีความถี่สูง หากนำ Hough Space มาเขียนเป็นภาพจะเห็นว่าในตำแหน่งนั้นจะมีลักษณะเป็นจุดสว่างขึ้นมา ดังรูปที่ 3.26(c)



รูปที่ 3.26 การทำ Hough Transform (a) ภาพตั้งต้น (b) ภาพหลังจากการทำ Edge Detection กับภาพ a (c) ภาพของ Hough Space ที่ได้จากการทำ Hough Transform กับภาพ b

3.7 Low Pass Filter

การทำ Filter โดยทั่วไปจะใช้กับข้อมูลสัญญาณต่างๆ ใช้ในการกรองความถี่ของสัญญาณตามที่ต้องการ โดย Filter นี้มีทั้งการกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter - LPF) การกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter - HPF) การกรองช่องความถี่ของสัญญาณผ่าน (Band Pass Filter - BPF) และการกรองช่องความถี่ของสัญญาณ (Band Reject Filter) ซึ่งแต่ละชนิดจะมีจุดประสงค์ในการนำไปใช้งานแตกต่างกัน โดย Low Pass Filter จะนำไปใช้ในการกรองสัญญาณรบกวน (Noise) ส่วน High Pass Filter ก็จะนำไปใช้ในการกรองเอาเฉพาะสัญญาณรบกวน ซึ่งเทคนิคและวิธีการในการทำ Filter แต่ละชนิดก็จะมีหลายรูปแบบ

สำหรับการประยุกต์ใช้งาน Filter ใน Image Processing นั้น สามารถใช้ประยุกต์ได้ในงานหลายรูปแบบ แต่การทำ Filter กับภาพนั้นจะแตกต่างกับการทำ Filter สัญญาณทั่วไป เนื่องจากสัญญาณทั่วไปจะมีลักษณะเป็นข้อมูลใน 1 มิติ แต่ภาพนั้นเป็นข้อมูลใน 2 มิติ การทำ Filter กับภาพก็จะอยู่ในลักษณะของ 2 มิติด้วย

ในงานวิจัยนี้จุดประสงค์ของการนำ Filter มาช่วยในงานวิจัยคือ การทำการเบลอภาพ เพื่อลบขอบ และรายละเอียดเล็กๆ น้อยๆ ภายในภาพ และเป็นการช่วยกรองสัญญาณรบกวนภายในภาพออกจากภาพ ดังนั้นในที่นี้จะได้มีการอธิบายเฉพาะในส่วนของ Low Pass Filter เท่านั้น สำหรับการทำให้ Filter ชนิดอื่นๆ นั้นไม่มีการใช้งานในงานวิจัยนี้ จึงขอละการอธิบายไว้

Low Pass Filter คือการกรองความถี่ต่ำผ่าน ในกรณีของภาพถ้าพิจารณาภาพแล้ว ส่วนที่มีความถี่ต่ำของภาพคือส่วนที่เป็นรายละเอียดต่างๆ ไปด้วยของภาพ หรือเป็นข้อมูลภายในภาพนั่นเอง และส่วนที่มีความถี่สูงในภาพก็คือ ส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าระหว่างพิกเซลอย่างรวดเร็ว โดยมากจะเป็นขอบของภาพ หรืออาจเป็นสัญญาณรบกวนภายในภาพได้ ดังนั้นจุดประสงค์หลักของการทำ Low Pass Filter กับภาพจะมีด้วยกันอยู่ 2 ประการ คือ การเบลอภาพ และการลด Noise ภายในภาพ

เทคนิคการทำ Low Pass Filter มีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ โดยสามารถแบ่งออกตามโดเมนในการทำ Filter ได้เป็น 2 โดเมน คือ Spatial Domain และ Frequency Domain

3.7.1 การทำ Low Pass Filter บน Spatial Domain

สำหรับเทคนิคการทำ Low Pass Filter บน Spatial Domain จะแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีการใหญ่ๆ คือ

3.7.1.1 Mean Filtering คือเป็นเทคนิคการใช้ Window 2 มิติ ขนาดใดๆ เข้าไปวิ่งภายในภาพ เรียกว่า Windowing Technique ดังรูปที่ 3.27 ที่แต่ละพิกเซล จะคำนวณโดยให้ตำแหน่งนั้นเป็นศูนย์กลางของ Window แล้วทำการเฉลี่ยค่าทั้งหมดภายใน Window เพื่อใช้เป็นค่าใหม่ของพิกเซลนั้นๆ โดยวิธีการเฉลี่ยค่านั้นขึ้นอยู่กับว่าจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูล
ใช้วิธีใดในการหาค่าเฉลี่ย เช่น Arithmetic Mean, Geometric Mean และขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูล
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ตำแหน่งพิกเซลนั้นอยู่ที่ขอบ หรือมุมของภาพ จะใช้การสะท้อนค่าใน Window โดยใส่ค่าที่สามารถใส่ได้ให้ครบเสียก่อน แล้วจึงทำการสะท้อนค่าใน Window เพื่อแทนค่าในช่องที่ไม่มีข้อมูล ดังรูปที่ 3.27 ตามตัวอย่างรูปที่ 3.27 และ 3.28 นี้เป็นการใช้ Window ขนาด 3x3 แต่สามารถจะเพิ่มขนาดของ Window ขึ้นได้ โดยขนาดของ Window ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ภาพที่ได้มีความเบลอมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีข้อดีคือ สัญญาณรบกวนต่างๆ ภายในภาพจะถูกลดลงได้มากขึ้น แต่มีข้อเสียคือ ภาพที่ได้จะดูเบลอมากขึ้น และเวลาที่ใช้ในการคำนวณย่อมจะมากขึ้นด้วย



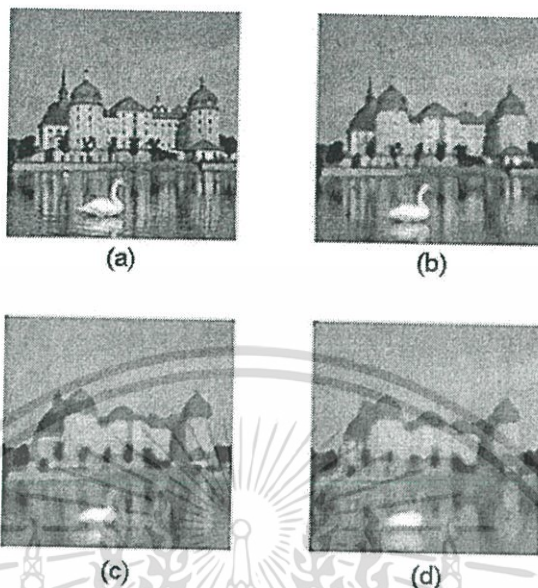
รูปที่ 3.27 การใช้ Windowing Technique เข้าไปวิ่งในภาพ

รูปที่ 3.28 การแก้ปัญหาโดยการสะท้อนค่าใน Window ในกรณีที่พิกเซลอยู่ที่ขอบ หรือมุมของภาพ

3.7.1.2 Order-statistic Filtering เป็นอีกเทคนิคหนึ่งของ Windowing ดังรูปที่ 3.27 แต่จะเปลี่ยนจากการทำการหาค่าเฉลี่ย จะใช้การเรียงค่าทั้งหมดจากน้อยไปหามาก แล้วจึงเลือกค่า ณ ตำแหน่งที่ต้องการ เช่นเลือกค่ากลางของค่าทั้งหมด เรียกการทำ Filter แบบนี้ว่า Median Filtering ซึ่งเป็นรูปแบบที่จะใช้งานในงานวิจัยนี้ หรือการใช้ค่ามากที่สุด และน้อยสุด แล้วนำมาเฉลี่ยกัน การทำ Median Filtering นี้ก็สามารถจะเพิ่มขนาดของ Window ได้เช่นกัน โดยขนาดของ Window ที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถกรองสัญญาณรบกวนได้มากขึ้น ภาพตั้งต้นก็จะมีการเบลอมากขึ้น และใช้เวลาในการคำนวณนานขึ้นด้วย ดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 การทำ Median Filtering กับภาพ โดยใช้ Window ขนาดต่างๆ (a) ภาพตั้งต้น (b) Window ขนาด 3x3 (c) Window ขนาด 5x5 (d) Window ขนาด 7x7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

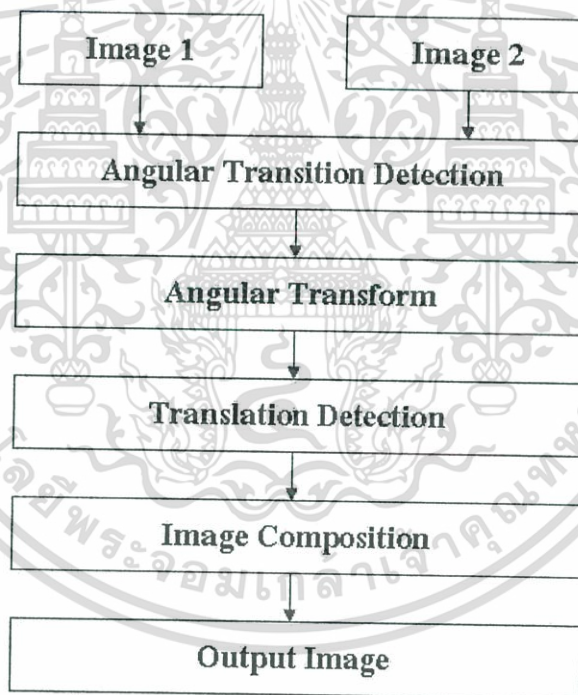
บทที่ 4

การต่อภาพด้วยเทคนิคของฮัฟ และเฟสคอริเลชันสำหรับแผนที่ อิเล็กทรอนิกส์จากภาพถ่ายทางอากาศ

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการทำ Image Registration ในงานวิจัยนี้ ได้แก่การหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ การหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งระหว่างภาพ และการรวมภาพในขั้นตอนสุดท้าย

4.1 ขั้นตอนการทำงานรวมของการทำ Image Registration

ขั้นตอนการทำ Image Registration เป็นไปตามไดอะแกรมในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมขั้นตอนทั้งหมดของการทำ Image Registration ที่ใช้ในงานวิจัย

จากไดอะแกรมในรูปที่ 4.1 สามารถแบ่งขั้นตอนของการทำงานงานได้เป็นขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน คือ

- 4.1.1 การหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ
- 4.1.2 การหาการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน x และ y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การรวมภาพเพื่อสร้างเป็นภาพใหม่

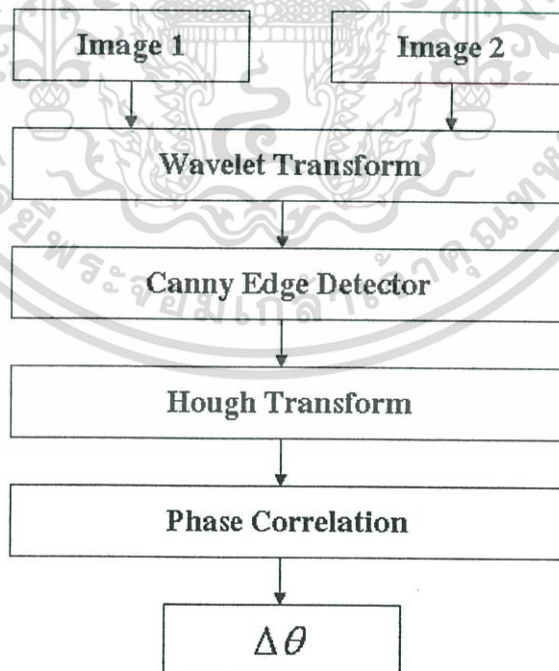
ขั้นตอนการทำ Image Registration จะเริ่มจากการหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ ($\Delta\theta$) จากนั้นจะใช้ค่า $\Delta\theta$ ทำการหมุนภาพตั้งต้นกลับให้ภาพทั้งสองอยู่ในมุมเดียวกัน เมื่อภาพทั้งสองอยู่ในมุมเดียวกันแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ($\Delta x, \Delta y$) เมื่อได้ค่าการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดแล้ว จะใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดในการรวมภาพตั้งต้นทั้งสองเข้าด้วยกัน

4.2 การหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ

ในขั้นตอนการหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ จะทำการเปรียบเทียบระหว่าง 2 วิธีการคือการใช้ Canny Edge Detector และการใช้การรวมองค์ประกอบความถี่สูงของภาพ Wavelet ในกระบวนการหาขอบของวัตถุภายในภาพ

4.2.1 การหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยการใช้เทคนิค Canny Edge Detector ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ

ขั้นตอนการหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยการใช้เทคนิค Canny Edge Detector ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพเป็นไปตามไดอะแกรมในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยการใช้เทคนิค Canny Edge Detector ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโคอะแกรมในรูปที่ 4.2 ขั้นตอนการหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพจะเริ่มจากการทำ Wavelet Transform เพื่อลดขนาดของภาพลง ซึ่งจะส่งผลให้ใช้เวลาในการประมวลผลลดลง เมื่อภาพตั้งต้นทั้งสองอยู่ในรูปแบบของภาพ Wavelet เฉพาะองค์ประกอบ LL ซึ่งเป็นองค์ประกอบความถี่ต่ำของภาพจะถูกนำไปใช้ประมวลผล ขั้นตอนถัดไปคือการทำ Canny Edge Detector กับภาพองค์ประกอบ LL จากภาพตั้งต้นทั้งสอง จะได้ภาพตั้งต้นทั้งสองอยู่ในรูปแบบของ Binary Edge Image หรือภาพที่แสดงขอบของวัตถุภายในภาพ จากนั้นภาพขอบของวัตถุทั้งสองภาพจะถูกนำไปสร้าง Hough Space (ρ, θ) จากภาพทั้งสองโดยผ่านกระบวนการ Hough Transform เพื่อแยกเส้นต่างๆ ภายในภาพออกจากกัน ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำ Hough Space จากภาพตั้งต้นทั้งสองเข้าสู่กระบวนการ Phase Correlation เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ

4.2.1.1 Wavelet Transform

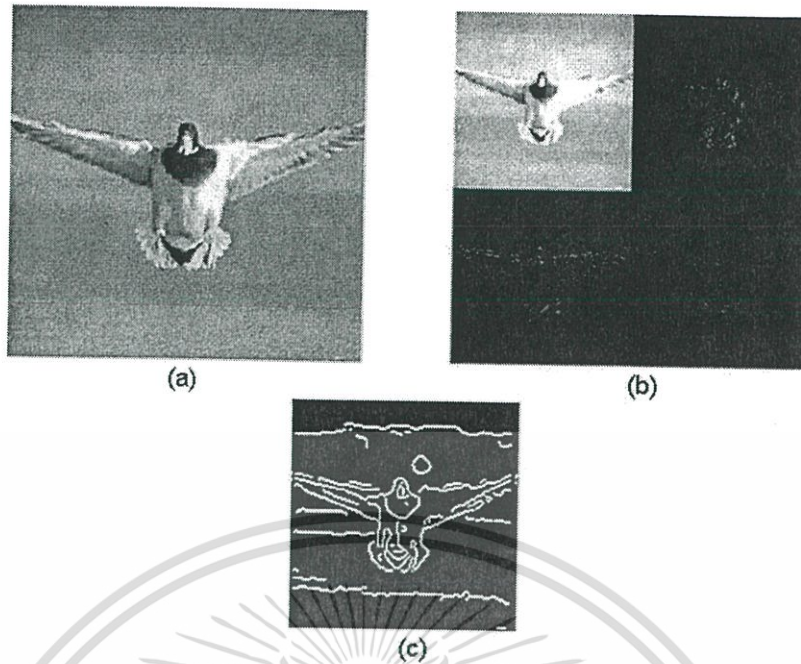
การทำ Wavelet Transform กับภาพตั้งต้นทำเพื่อลดขนาดภาพตั้งต้นลง โดยการนำองค์ประกอบความถี่ต่ำ LL มาใช้แทนภาพตั้งต้น การทำ Wavelet Transform 1 ชั้น จะลดขนาดของภาพตั้งต้นลงเหลือ 1 ใน 4 จากเดิม หรือคือการที่ภาพถูก Down-sampling ลงด้านละครึ่งหนึ่ง ดังรูปที่ 4.3 โดยขนาดของภาพที่เล็กลงจะทำให้ใช้พื้นที่ และเวลาในการประมวลผลลดลง



รูปที่ 4.3 การทำ Wavelet Transform เพื่อลดขนาดภาพตั้งต้นลง (a) ภาพตั้งต้น (b) ภาพจากการทำ Wavelet Transform

4.2.1.2 Canny Edge Detector

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการหาขอบของภาพ เพื่อเตรียมภาพตั้งต้นให้กับกระบวนการ Hough Transform ต่อไป ในวิธีการนี้จะนำองค์ประกอบ LL ของภาพตั้งต้นที่ผ่านการทำ Wavelet Transform มาทำการหาขอบโดยใช้ Canny Edge Detector ดังรูปที่ 4.4

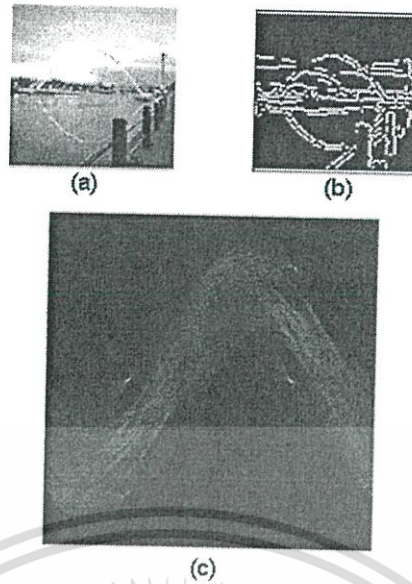


รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการทำการหาขอบโดยการทำ Canny Edge Detector กับองค์ประกอบความถี่ต่ำของภาพ Wavelet (a) ภาพตั้งต้น (b) ภาพ Wavelet จากภาพ a (c) การใช้ Canny Edge Detector กับองค์ประกอบความถี่ต่ำของภาพ Wavelet

จะเห็นว่าการหาขอบของวัตถุในภาพโดยวิธีนี้จะได้ภาพที่มีขอบค่อนข้างชัดเจน ซึ่งจะทำให้กระบวนการหาการเปลี่ยนแปลงมุมได้ผลออกมามีความถูกต้องสูง แต่การทำ Canny Edge Detector จะใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างนาน ดังนั้นการที่ภาพตั้งต้นถูกลดขนาดลงด้วย Wavelet Transform มาก่อนย่อมทำให้เวลาในการประมวลผลลดลง

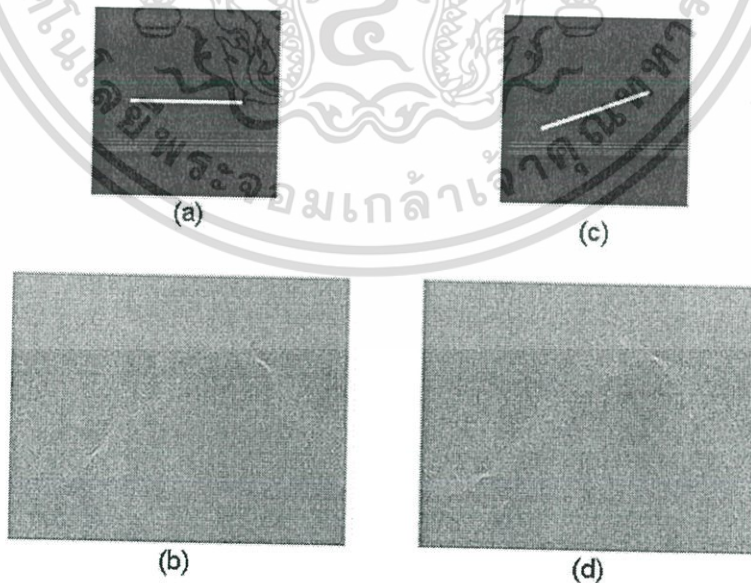
4.2.1.3 Hough Transform

การทำ Hough Transform ในขั้นตอนนี้เพื่อแปลงจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพไปเป็นการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพ โดยทำการแปลงจากภาพปกติให้กลายเป็น Hough Space (ρ, θ) จากคุณสมบัติของ Hough Space ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.6 จุดที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกัน จะมีค่าอยู่ใน Hough Space เดียวกัน คือมีค่า ρ และ θ เท่ากัน เนื่องจากค่าในแต่ละช่องของ Hough Space คือความถี่ของจุดที่มีค่า ρ และ θ เท่ากัน เมื่อจุดเหล่านี้บวกความถี่เพิ่มขึ้นใน Hough Space ช่องเดียวกัน จะทำให้ Hough Space ในช่องนั้นมีค่าสูง ถ้านำ Hough Space มาเขียนเป็นภาพจะเห็นว่าช่องเหล่านี้จะดูสว่าง ดังรูปที่ 4.5 ในงานวิจัยนี้จะใช้แกน x แทนแกน θ ของ Hough Space และ แกน y แทนแกน ρ ของ Hough Space



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการทำ Hough Transform กับภาพ (a) ภาพตั้งต้น (b) ภาพหลังจากการทำ Edge Detection ด้วย Canny Detector (c) ภาพจากการ Plot Hough Space

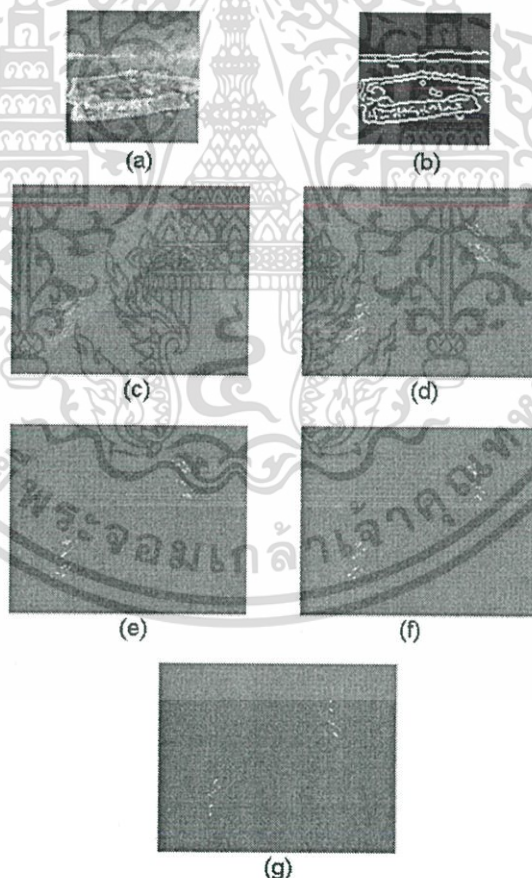
หากมีการเปลี่ยนมุมของเส้นตรงเส้นใดๆ ในภาพ จุดบนเส้นตรงเดิมทั้งหมดที่เคยอยู่บน Hough Space ช่องใดช่องหนึ่ง จะเปลี่ยนไปอยู่ใน Hough Space อีกช่องหนึ่ง กล่าวคือ จุดเหล่านี้จะมีการเลื่อนในแนวแกน θ ตามมุมที่เส้นหมุนไป ดังรูปที่ 4.6 ดังจะเห็นว่าจุดสว่างสีขาวในภาพที่ 4.6(b) ทั้ง 2 จุดมีการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน θ เป็นรูปที่ 4.6(d) ทำให้สามารถใช้ทฤษฎีของ Phase Correlation เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพได้



รูปที่ 4.6 การทดลองการหมุนเส้นตรงเพื่อหาความสัมพันธ์ของ Hough Transform (a) ภาพตั้งต้น 1 (b) Hough Space ของภาพตั้งต้น 1 (c) ภาพตั้งต้น 2 ซึ่งเกิดจากการหมุนภาพตั้งต้น 1 ทวน เข็มนาฬิกา 20 องศา (d) Hough Space ของภาพตั้งต้น 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวอย่างการทำ Hough Transform ในรูปที่ 4.5 และ 4.6 จะเห็นว่านอกจากจุดที่มีความสว่างมากในภาพ ซึ่งเป็นตำแหน่งของเส้นตรงในภาพ ยังมีจุดสว่างเล็กๆ น้อยๆ มากมายในภาพ ซึ่งจุดเล็กน้อยเหล่านี้ อาจส่งผลกระทบต่อ การคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงมุมของภาพ ดังนั้นอาจทำการเลือกใช้ค่า Threshold กับภาพ เพื่อกรองจุดเล็กๆ น้อยๆ เหล่านี้ออก โดยทำการ Normalize ภาพ เพื่อให้ภาพมีความเข้มแสงสูงสุดให้เป็น 255 เท่ากันทั้งภาพ แล้วทำการเลือกค่า Threshold เพื่อทำการตัดค่าของ Hough Space ที่มีค่าน้อยกว่า Threshold ที่กำหนดไว้ให้เป็น 0 ซึ่งจะทำให้รายละเอียดเล็กน้อยเหล่านี้หายไป การพิจารณาเลือกค่า Threshold นั้นจะมีผลต่อคุณภาพของผลการทดลอง หากเลือกค่า Threshold มีค่าต่ำเกินไป จะทำให้ยังมีรายละเอียดเล็กน้อยอยู่ในภาพ ทำให้ผลการทดลองอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้เช่นเดิม แต่หากเลือกค่า Threshold สูงเกินไปจะทำให้รายละเอียดสำคัญในภาพหายไป ค่า Threshold ปกติที่เลือกใช้จะอยู่ที่ประมาณ 40 – 55 ตัวอย่างการทดลองเลือกตัดด้วยค่า Threshold ต่างๆ เป็นดังรูปที่ 4.7 จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อเลือกค่า Threshold ของ Hough สูงขึ้น จะทำให้รายละเอียดใน Hough Space ลดลง



รูปที่ 4.7 การทำ Hough Transform และการเลือกค่า Threshold ต่างๆ (a) ภาพตั้งต้น (b) ภาพหลังการผ่าน Canny Detector (c) Hough Space ปกติ (d) Hough Space ที่มีค่า Threshold 40 (e) Hough Space ที่มีค่า Threshold 45 (f) Hough Space ที่มีค่า Threshold 50 (g) Hough Space ที่มีค่า Threshold 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.4 การหาการเปลี่ยนแปลงมุมด้วยเทคนิค Phase Correlation

สำหรับการหาการเปลี่ยนแปลงมุมหลังจากการทำ Hough Transform แปลงภาพตั้งต้นทั้ง 2 ภาพให้กลายเป็น Hough Space ที่ได้ในขั้นตอนก่อนหน้านี จะใช้เป็นภาพ Input สำหรับการเปลี่ยนแปลงมุมโดยใช้ Phase Correlation

สมการ Phase Correlation ที่ 3.14, 3.15 และ 3.16 เป็นการหาการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน x และ y หรือหาการเปลี่ยนแปลงใน 2 ทิศทาง สำหรับการหา มุมนั้นต้องการเฉพาะค่า $\Delta\theta$ หรือการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน θ เท่านั้น จึงไม่จำเป็นจะต้องทำ Inverse Fourier Transform ทั้ง 2 แกน สามารถทำการถอด Inverse Fourier Transform เฉพาะในแนวแกน θ แล้วทำการบวกค่าทุกๆ ค่า ρ ใน θ แทน

$$\Delta\theta = \arg \left\{ \max_{\theta} \left(\sum_{\rho} F_{\theta}^{-1} \left(\frac{F_{\theta}(F_{\rho}(H_2(\rho, \theta)))}{F_{\theta}(F_{\rho}(H_1(\rho, \theta)))} \right) \right) \right\} \quad (4.1)$$

$H_n(\rho, \theta)$ คือค่าใน Hough Space จากภาพตั้งต้นที่ n ที่ตำแหน่ง (ρ, θ) ใดๆ

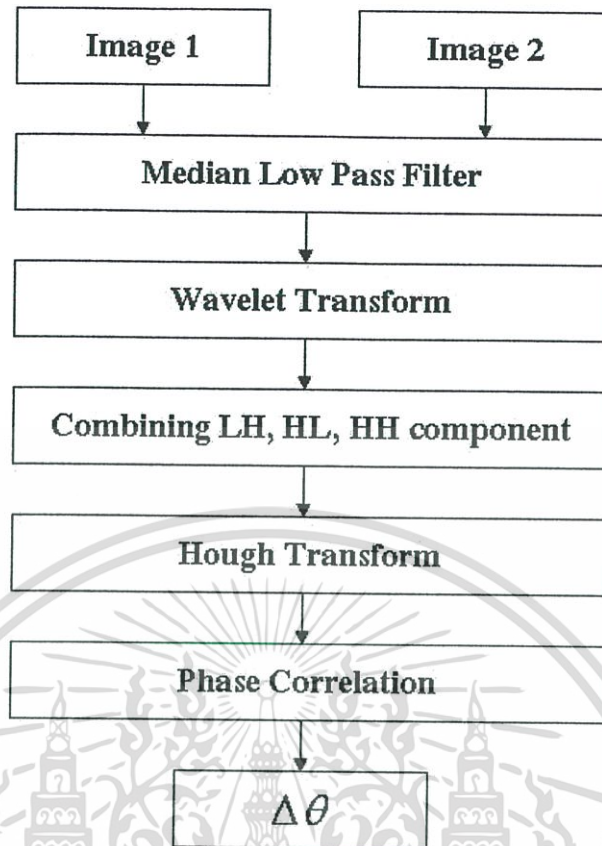
F_D คือการทำ Fourier Transform ในแนวแกน D

F_D^{-1} คือการทำ Inverse Fourier Transform ในแนวแกน D

สมการที่ 4.1 เป็นสมการรวมสำหรับการหาค่า $\Delta\theta$ ระหว่างภาพตั้งต้นทั้ง 2 ภาพ โดยเริ่มจากการทำ Fourier Transform 2 มิติกับภาพตั้งต้นทั้ง 2 ภาพ แล้วนำค่าที่ได้แต่ละคู่มาทำตามสมการที่ 3.16 เช่นเดียวกับการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพ หลังจากนั้นทำการแปลง Inverse Fourier Transform 1 มิติ ในทิศ θ กับภาพการเปลี่ยนแปลงที่ได้ ในด้านของ ρ นั้นไม่ต้องการค่าการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำ Inverse Fourier Transform ในทิศ ρ เมื่อแปลง Inverse Fourier Transform ในทิศ θ แล้ว นำภาพการเปลี่ยนแปลงที่ได้มาทำการบวกค่าในทุกๆ ρ ใน θ เดียวกัน จะได้อาร์เรย์ขนาด 1 มิติของการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ ผลลัพธ์ที่ได้จะเลือกจากตำแหน่งของอาร์เรย์ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเป็นค่า $\Delta\theta$ แต่เนื่องจากค่าที่มากที่สุด ในอาร์เรย์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อาจไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการเก็บค่าที่สูงที่สุด 3 ลำดับเพื่อใช้พิจารณาต่อไป

4.2.2 การหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยใช้องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ

ขั้นตอนการหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยใช้องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพเป็นไปตามไดอะแกรมในรูปที่ 4.8

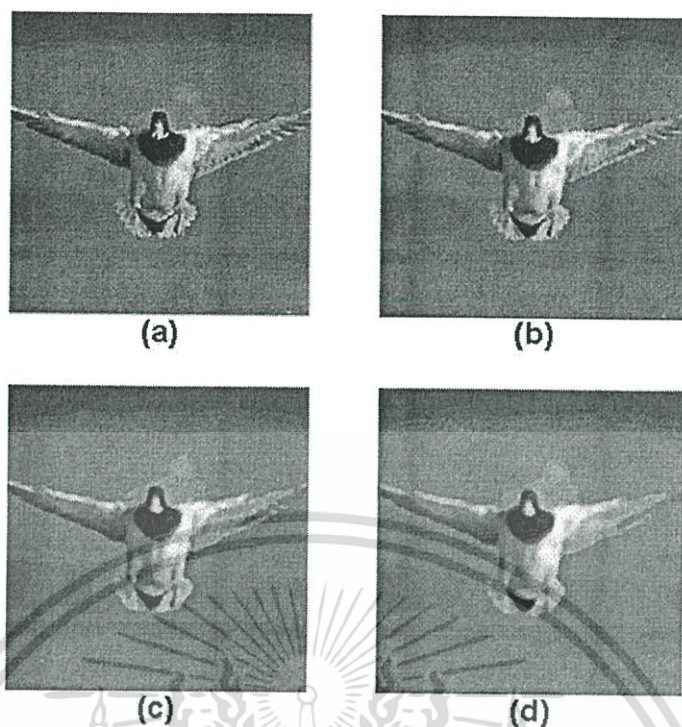


รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยใช้องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ

วิธีการนี้จะเป็นการลดเวลาในการทำ Canny Edge Detector โดยการใช้องค์ประกอบความถี่สูงของภาพ Wavelet รวมกันแทนการหาขอบของภาพ แต่เนื่องจากภาพที่ได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าการใช้ Canny Edge Detector มาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำเทคนิค Median Low Pass Filter ช่วยในการลดรายละเอียดของเส้นขอบ (edge) ที่ได้จากการรวมสัมประสิทธิ์ความถี่สูงของ Wavelet Transform (LH, HL, HH) เพื่อให้เส้นเล็กน้อยภายในภาพลดลง ให้เหลือเพียงเส้นที่เด่นชัดภายในภาพ และยังสามารถลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนภายในภาพอีกด้วย

4.2.2.1 Median Low Pass Filter

ในวิธีการนี้ ขั้นตอนแรกคือการทำ Median Low Pass Filter กับภาพตั้งต้น เพื่อลดรายละเอียดของเส้นขอบ (edge) ที่ได้จากการรวมสัมประสิทธิ์ความถี่สูงของ Wavelet Transform (LH, HL, HH) เพื่อให้เส้นเล็กน้อยภายในภาพลดลง ให้คงเหลือแต่เส้นที่ชัดเจนภายในภาพ ผลจากการทำ Median Low Pass Filter แสดงในรูปที่ 4.9

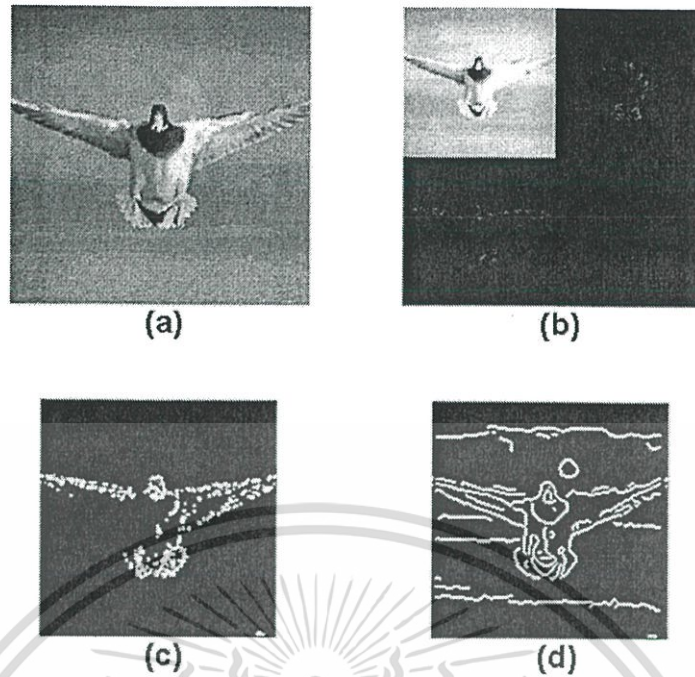


รูปที่ 4.9 ตัวอย่างผลจากการทำ Median Low Pass Filter ขนาดต่างๆ (a) ภาพตั้งต้น (b) ผลจากการทำ Median LPF ขนาด 3x3 (c) ผลจากการทำ Median LPF ขนาด 5x5 (d) ผลจากการทำ Median LPF ขนาด 7x7

สังเกตว่าการทำ Median LPF ด้วยขนาด Window ต่างกัน จะให้ผลที่มีความแตกต่างกัน และหากนำภาพเหล่านี้ไปประมวลผลต่อไป อาจทำให้ผลการทดลองมีความแตกต่างกัน ดังนั้นขนาดของ Window ในการทำ Median LPF จึงเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ต้องทำการพิจารณา

4.2.2.2 Wavelet Transform

การทำ Wavelet Transform สำหรับวิธีนี้ นอกจากจะเป็นการลดขนาดของภาพลง ยังจะใช้แทนการหาขอบของภาพแทนการทำ Canny Edge Detector โดยการนำองค์ประกอบความถี่สูง LH, HL และ HH รวมกัน ผลการหาขอบของวัตถุภายในภาพด้วยเทคนิคนี้แสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การใช้องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet เพื่อหาขอบของวัตถุภายในภาพ (a) ภาพตั้งต้น (b) ภาพจากการทำ Wavelet Transform (c) ภาพขอบจากการรวมองค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet (d) ภาพจากการใช้ Canny Edge Detector

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่า การใช้องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet หาขอบนั้น ภาพจะมีคุณภาพต่ำกว่าการใช้ Canny Edge Detector มาก และผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมอาจมีความถูกต้องน้อยลงเมื่อเทียบกับการใช้ Canny Edge Detector แต่มีข้อดีคือไม่ต้องเสียเวลาทำ Canny Edge Detection อีกครั้งหนึ่ง ใช้การรวมกันขององค์ประกอบความถี่สูงทั้ง 3 องค์ประกอบ ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการประมวลผลลง อย่างไรก็ตามในกรณีที่ภาพมีขนาดเล็ก เวลาในการประมวลผลไม่มากนัก ในกรณีนี้จึงอาจใช้ Canny Edge Detector ในการหาขอบได้ เนื่องจากใช้เวลาไม่มากนัก แต่หากภาพมีขนาดใหญ่ เวลาในการประมวลผลจะมากขึ้น การใช้เทคนิคนี้จะช่วยลดเวลาในการประมวลผลลงได้อย่างมาก

สำหรับขั้นตอนถัดไป คือการทำ Hough Transform เพื่อสร้าง Hough Space และการใช้ Phase Correlation หาการเปลี่ยนแปลงมุมนั้นเป็นเช่นเดียวกับวิธีการใช้ Canny Edge Detector หาขอบของวัตถุภายในภาพ

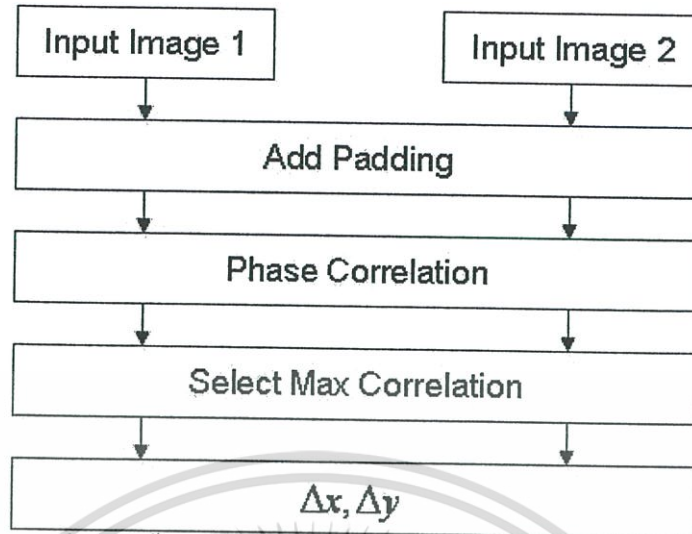
ค่าการเปลี่ยนแปลงมุมจะมีการเก็บค่าที่มีค่า Correlation สูงที่สุด 3 ลำดับแรกเพื่อใช้พิจารณาเลือกคำตอบที่ดีที่สุด ในขั้นตอนการรวมภาพตั้งต้น

4.3 การหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง

ขั้นตอนการหาการเลื่อนตำแหน่งของภาพเป็นไปตามไดอะแกรมในรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ขั้นตอนในส่วนการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง

หลังจากการหาการเปลี่ยนแปลงมุม จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงมุมทั้งหมด 3 ค่าเพื่อทำการพิจารณา จากนั้นจะใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงมุมแต่ละค่าทำการหมุนภาพตั้งต้นทั้งสองกลับ เพื่อให้ภาพตั้งต้นทั้งสองอยู่ในมุมเดียวกัน หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพอีก แล้วจึงนำภาพจากการหมุนด้วยค่าแต่ละมุมใช้หาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งระหว่างภาพต่อไป

ในขั้นตอนนี้ภาพตั้งต้นทั้ง 2 ภาพจะต้องผ่านการทำ Wavelet Transform มาก่อนหน้านี้แล้ว และถือว่าภาพทั้งสองจะเป็นภาพที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพแล้ว ในขั้นตอนนี้จะใช้เฉพาะในส่วนประกอบ LL ของภาพ Wavelet คำนวณหาการเปลี่ยนแปลง เพื่อเป็นการลดขนาดของภาพตั้งต้นลง ซึ่งจะทำให้เวลาในการประมวลผลลดลงจากเดิมมากในกรณีที่ภาพตั้งต้นมีขนาดใหญ่ แต่หากภาพตั้งต้นมีขนาดเล็ก ขั้นตอนในการทำ Wavelet Transform อาจจะถูกตัดออกได้ เนื่องจากในกรณีที่ภาพมีขนาดเล็ก เวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยใช้ Wavelet Transform และไม่ใช้ Wavelet Transform จะแตกต่างกันน้อยมาก

จากรูปที่ 4.11 เริ่มต้นจากการนำภาพตั้งต้นทั้ง 2 ภาพมาทำการแปลงให้อยู่ใน Frequency Domain โดยใช้ Fast Fourier Transform ทั้ง 2 ภาพ แต่การทำ Fourier Transform และการทำ Phase Correlation ภาพตั้งต้นจะต้องมีขนาดเป็นจำนวน 2^n ซึ่งหากภาพมีขนาดไม่ถึง จะต้องเติมค่าศูนย์ลงในภาพ เพื่อให้ภาพมีขนาดเป็น 2^n เท่ากันทั้ง 2 ภาพ (Zero Padding)

หลังจากภาพทั้งสองผ่านการทำ Fourier Transform อยู่ในรูปของ Frequency Domain แล้ว จะใช้ทฤษฎี Phase Correlation กับภาพทั้งสอง โดยคำนวณตามสมการที่ 3.53 ในทุกๆ จุดของภาพแล้วเก็บค่าไว้เป็นอาร์เรย์ หรือภาพใหม่ซึ่งเป็นภาพของค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างภาพ แต่ภาพการเปลี่ยนแปลงนี้ยังอยู่ในรูปของ Frequency Domain ทำให้ต้องแปลงค่ากลับมาให้อยู่ในรูป

ของ Spatial Domain โดยการทำ Inverse Fourier Transform ถ้าภาพตั้งต้นทั้งสองภาพมีขนาดเท่ากับ

MxN ภาพการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีขนาดเท่ากับ MxN ด้วย แต่ละจุดในภาพการเปลี่ยนแปลงนี้จะเก็บค่า Correlation ระหว่างภาพตั้งต้นทั้ง 2 เอาไว้ ทำการเลือกตำแหน่ง x และ y ของจุดที่มีค่า Correlation สูงที่สุด ตามสมการที่ 3.52 เป็นค่า $\Delta x, \Delta y$ หรือค่าการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่เกิดขึ้นระหว่างภาพทั้งสอง

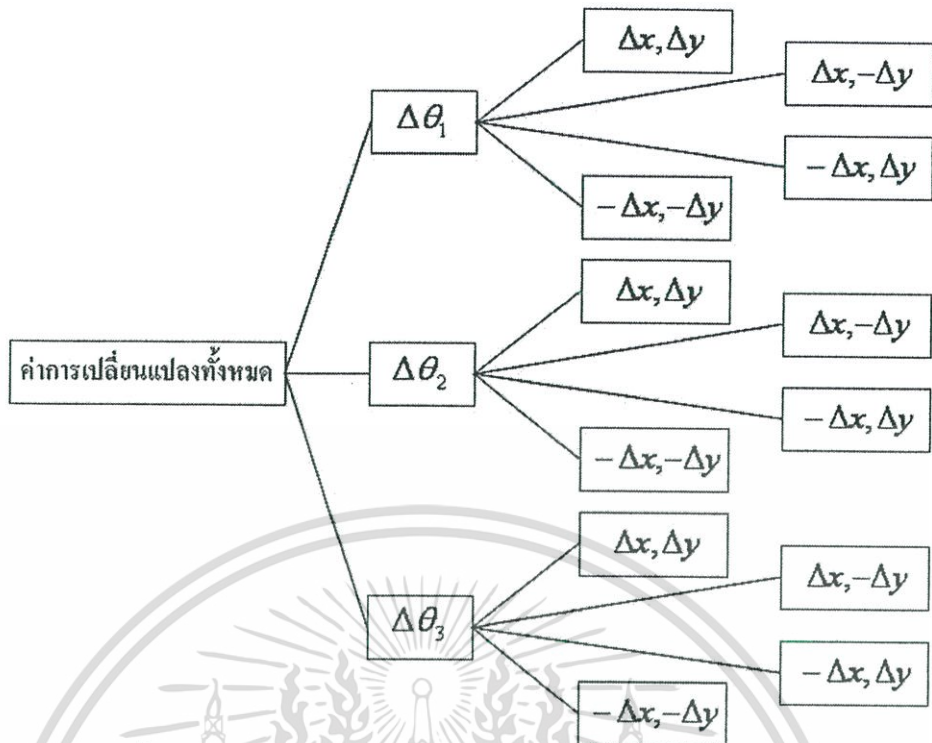
โดยคุณสมบัติของ Fourier Transform ค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 3.52 อาจเป็นได้ทั้งค่าลบ และค่าบวก ดังนั้นจึงมีค่าที่เป็นไปได้ 4 กรณีคือ กรณีที่เป็นบวกทั้งคู่, กรณีที่ตัวใดตัวหนึ่งเป็นลบ และกรณีที่เป็นลบทั้งคู่ ซึ่งในกรณีที่ค่าเป็นบวกสามารถใช้ค่าที่คำนวณได้เป็นการเปลี่ยนแปลงได้โดยตรง แต่ในกรณีที่เป็นลบจะต้องนำค่าที่ได้ไปลบออกจากความกว้างของด้านนั้นๆ ดังตารางที่ 4.1 แสดงคำตอบที่เป็นไปได้จากการทำ Phase Correlation

ตารางที่ 4.1 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากการทำ Phase Correlation ที่ต้องพิจารณา

Δx	Δy
Δx	Δy
Δx	$Height - \Delta y$
$Width - \Delta x$	Δy
$Width - \Delta x$	$Height - \Delta y$

4.4 การรวมภาพตั้งต้น

จากการหาการเปลี่ยนแปลงมุม จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงมุมทั้งหมด 3 ค่า และแต่ละค่าของการเปลี่ยนแปลงมุมจะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง 4 ค่า ดังนั้นจึงมีค่าที่ต้องทำการพิจารณาทั้งสิ้น 12 ค่า ดังรูปที่ 4.12 การเลือกคำตอบที่ดีที่สุดจะใช้วิธีการทดลองรวมภาพ แล้ววัดความแตกต่างระหว่างภาพเฉพาะในส่วนที่มีการทับซ้อนกันของภาพ โดยหากคำตอบที่พิจารณาเป็นคำตอบที่ดีที่สุด หมายถึงภาพทั้งสองในตำแหน่งที่ทับซ้อนกันจุดต่อจุดแล้ว ย่อมมีความแตกต่างกันน้อยที่สุด



รูปที่ 4.12 ค่าการเปลี่ยนแปลงที่ต้องพิจารณาทั้งหมดจำนวน 12 ค่า

ในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการวัดความถูกต้องของผลการหาการเปลี่ยนแปลง 2 วิธีการคือ

1. การทำ Root Mean Square Error (RMSE) วัดความแตกต่างระหว่างภาพ
2. การทำ Normalized cross-correlation

4.4.1 การทำ Root Mean Square Error วัดความแตกต่างระหว่างภาพ

การทำ RMSE เพื่อวัดความแตกต่างระหว่างภาพนั้น จะทำเฉพาะในส่วนที่มีการทับซ้อนกันระหว่างภาพเท่านั้น โดยมีสมการดังสมการที่ 4.2

$$RMSE = \frac{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2}}{n} \quad (4.2)$$

โดย x_i คือ ค่าความแตกต่างของความเข้มแสงระหว่างภาพตั้งต้นทั้งสอง หรือ $I_1 - I_2$
 i คือ ตำแหน่งของจุดในภาพแรก และภาพที่สองซึ่งเป็นจุดเดียวกันในภาพผลลัพธ์
 n คือ จำนวนจุดทั้งหมดที่นำมาเปรียบเทียบกัน โดย $n \geq 1$

การทำ RMSE เป็นการวัดความแตกต่างของความเข้มแสงระหว่างภาพ ซึ่งโดยปกติแล้วถ้าคำตอบเป็นคำตอบที่ถูกต้องแน่นอน ค่า RMSE ควรจะมีค่าเป็น 0 หมายถึงไม่มีความแตกต่างระหว่างภาพเลย แต่เนื่องจากภาพอาจมีการหมุนโดยใช้การคำนวณ First-order Interpolation ซึ่งเป็นการปิดค่าใกล้เคียงในการหมุนภาพ หรือผลกระทบจากสัญญาณรบกวน จะทำให้ค่า RMSE มีค่าไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นจะเลือกใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงที่วัดค่า RMSE ได้น้อยที่สุดเป็นคำตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การทำ Normalized cross-correlation

Normalized cross-correlation เป็นเทคนิคในการวัดความเหมือน หรือความคล้ายกันของภาพ โดยมีสมการดังสมการที่ 4.3

$$C(A, B) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} ((A_{ij} - \bar{A}) \cdot (B_{ij} - \bar{B}))}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (A_{ij} - \bar{A})^2 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (B_{ij} - \bar{B})^2}} \quad (4.3)$$

เมื่อ A และ B คือภาพตั้งต้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ $N \times N$

$C(A, B)$ คือค่า Normalized cross-correlation ระหว่างภาพ A และ B

A_{ij} และ B_{ij} คือค่าความเข้มแสงของภาพ ณ ตำแหน่งที่ i และ j ใดๆ

\bar{A} และ \bar{B} คือค่าเฉลี่ยของความเข้มแสงภายในภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

การทำ Cross-correlation จะต้องทำ Geometric Transform กับภาพที่สองด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้ แล้วจึงทำให้ภาพทั้งสองมีขนาดเท่ากัน และเป็นขนาด $N \times N$ ใดๆ แล้วจึงคำนวณหา $C(A, B)$ ตามสมการที่ 4.3 ค่า Cross-correlation นี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเหมือนหรือคล้ายกันระหว่างภาพ หากภาพมีความคล้ายกันมาก ค่า Cross-correlation นี้จะมีค่าสูง

4.3.3 การนำภาพที่ได้มารวมกัน เพื่อสร้างเป็นภาพใหม่

หลังจากที่ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง $\Delta x, \Delta y$ และการเปลี่ยนแปลงมุมของภาพ $\Delta \theta$ แล้ว ค่าที่ได้ทั้งหมดจะถูกใช้ในการรวมภาพตั้งต้นทั้ง 2 เพื่อสร้างเป็นภาพใหม่ขึ้น โดยใช้เทคนิค Geometric Transform ตามสมการที่ 3.31

ในงานวิจัยนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงภาพเฉพาะการเลื่อนตำแหน่ง และการหมุนภาพเท่านั้น ดังนั้นสมการการเปลี่ยนแปลงที่ใช้จะมีลักษณะดังนี้

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \Delta x \\ \sin \theta & \cos \theta & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

บทที่ 5

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงผลการทดลองการทำ Image Registration ในงานวิจัย ตามขั้นตอนที่ได้อธิบายในบทที่แล้ว สำหรับการทดลองทำ Image Registration นี้จะได้ทำการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองได้แก่

1. การทดลองการหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ
2. การทดลองเฉพาะการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งเท่านั้น
3. การทดลองทำ Image Registration จนถึงการรวมภาพเพื่อสร้างภาพใหม่

เหตุผลที่ต้องแยกการทดลองออกเป็น 3 ลักษณะเนื่องจากแต่ละการทดลองจะเป็นการทดลองต่างรูปแบบกัน อีกทั้งผลที่ได้จากการทดลองนั้นยังเป็นผลการทดลองเฉพาะในการทดลองนั้นๆ ซึ่งอาจจะต้องนำไปใช้ต่อในการทดลองอื่น ดังนั้นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดลองใดๆ ย่อมส่งผลกระทบต่อผลการทดลองอื่น และผลการทดลองทั้งหมดด้วย เพื่อให้สามารถแสดงผลการทดลองในแต่ละขั้นตอนได้อย่างชัดเจน จึงต้องมีการแบ่งการทดลองเป็นลักษณะดังกล่าว

ในการทดลองทั้งหมดนี้จะทำการวัดผลการทดลองใน 2 มิติ ได้แก่

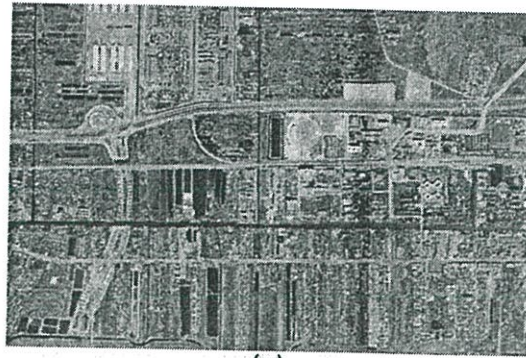
- 1) ความถูกต้องของผลการทดลอง จะวัดจากความผิดพลาดเฉลี่ยของการทดลองทั้งหมด
- 2) เวลาในการประมวลผล โดยจะทำการวัดเวลาในแต่ละการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกัน

ภาพต้นฉบับที่ใช้ในการทดลองจะแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ ภาพที่มีรายละเอียดเล็กน้อย มีเส้นหลักในภาพเด่นชัด, ภาพที่มีรายละเอียดภายในภาพมากขึ้น และภาพที่มีรายละเอียดในภาพมาก และมีความซับซ้อน เส้นหลักๆ ในภาพไม่เด่นชัด

ในการทดลองทั้งหมดจะทำการทดลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์ CPU Intel Pentium 4 3.0EM64T ความเร็ว 3 GHz Memory DDR Ram 1 GB

5.1 ข้อมูลภาพต้นฉบับที่ใช้

ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อการทำ Image Registration กับภาพถ่ายดาวเทียม ดังนั้นภาพที่ใช้ทำการทดลองส่วนใหญ่จะเป็นภาพถ่ายดาวเทียม ภาพต้นฉบับที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ 5.1 ได้แก่ ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตลาดกระบัง เขตมีนบุรี เขตดอนเมือง และบริเวณถนนอุทยาน โดยภาพต้นฉบับทั้งหมดมีขนาด 1876x1251 พิกเซล



(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายดาวเทียมต้นฉบับที่ใช้ในการทดลอง (a) ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขต

ลาดกระบัง (b) ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตมีนบุรี (c) ภาพถ่ายดาวเทียมจาก

บริเวณเขตดอนเมือง (d) ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณถนนอุทยาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ใช่ว่าการนำเอกสารไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวิธีการนำมาใช้ จะใช้การตัดบางส่วนของภาพจากภาพต้นฉบับเก็บไว้ และทำการเลื่อนตำแหน่งของการตัดภาพตามที่กำหนดเก็บไว้เป็นอีกภาพหนึ่ง เพื่อใช้ทดลองการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง สำหรับภาพเพื่อทดลองการหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ สร้างโดยการหมุนภาพต้นฉบับด้วยมุมที่กำหนด และตัดภาพที่ได้ เมื่อทำการหมุนภาพ และตัดภาพต้นฉบับ ภาพที่ได้จะมีทั้งการเปลี่ยนแปลงมุม และการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งรวมอยู่ด้วยเสมอ

5.2 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุม

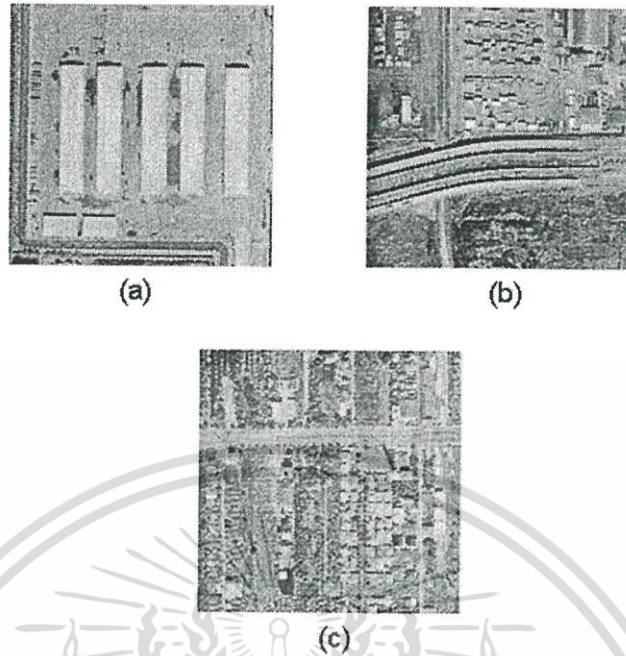
ในขั้นตอนนี้เป็น การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ โดยใช้ทฤษฎี Phase Correlation ร่วมกับ Hough Transform โดยจะทดลองเลือกค่า Threshold ของ Hough Transform ต่างๆ กัน เพื่อพิจารณาผลที่ได้จากการเลือกค่า Threshold ที่แตกต่างกัน ในการทดลองเทคนิคการหาขอบของภาพด้วย 2 วิธีการ คือการใช้ Canny Edge Detector และการใช้องค์ประกอบความถี่สูงของภาพ Wavelet คือ ส่วน LH, HL และ HH เพื่อศึกษา และวิเคราะห์ข้อดี และข้อเสียของแต่ละวิธีการ สำหรับวิธีการเก็บค่าผลของการทำ Phase Correlation ในงานวิจัยนี้จะเก็บค่าที่มีค่า Correlation สูงที่สุด 3 ลำดับ แล้วนำมาเลือกค่าที่ดีที่สุด ในภายหลัง นอกจากนี้จะทำการทดลองการใช้ Median Low Pass Filter เพื่อช่วยในการเบลอรายละเอียดเล็กๆ น้อยๆ ภายในภาพด้วย Window ขนาดต่างๆ

5.2.1 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของผลจากการเลือกค่า Threshold ของ Hough Transform

ในการทดลองนี้จะทำการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ โดยการเลือกใช้ค่า Threshold ของ Hough Transform ต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ นอกจากนี้จะเปรียบเทียบการใช้เทคนิคการหาขอบของวัตถุภายในภาพ 2 วิธีการ คือ

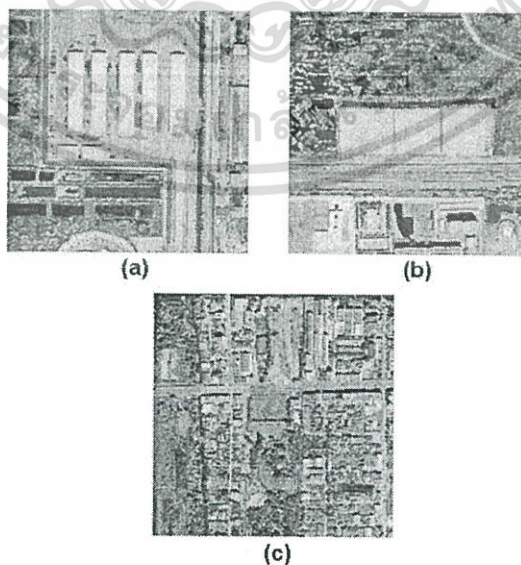
- Canny Edge Detector
- การรวมองค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform โดยไม่มีการทำ Median LPF ภาพตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.2 โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการพิจารณาความถูกต้องของการใช้ค่า Threshold ของ Hough Transform ที่แตกต่างกัน จากตัวอย่างภาพที่ใช้ทำการทดลองในรูปที่ 5.2 จะสังเกตได้ว่าภาพที่ใช้ทำการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือภาพที่มีรายละเอียดน้อย จำนวนเส้นน้อย สามารถเห็นเส้นหลักภายในภาพได้อย่างเด่นชัดคือภาพ 5.2(a), ภาพที่มีรายละเอียด และจำนวนเส้นปานกลางคือภาพ 5.2(b) และภาพที่มีรายละเอียดมาก เส้นหลักๆ ที่เด่นชัดในภาพนั้นมีน้อย ภาพจะมีความซับซ้อนมากคือภาพ 5.2(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ภาพตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุม (a) ภาพมีรายละเอียดน้อย และเส้นหลักเด่นชัด (b) ภาพมีรายละเอียดปานกลาง (c) ภาพมีรายละเอียด และความซับซ้อนมาก

5.2.1.1 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมจากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตลาดกระบัง ภาพตัวอย่างการทดลองแสดงในรูปที่ 5.3 ใช้การตัดจากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตลาดกระบัง



รูปที่ 5.3 ภาพตัวอย่างการทดลอง (a) ภาพรายละเอียดน้อย (b) ภาพรายละเอียดปานกลาง (c) ภาพ

รายละเอียดมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดผลการทดลองจะพิจารณาความผิดพลาดจากการหาการเปลี่ยนแปลงมุม โดยทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมตามทฤษฎีกับภาพที่ทราบการเปลี่ยนแปลงมุมที่ถูกต้องแล้ว จำนวน 35 มุม เริ่มจาก 10 องศา และเพิ่มทีละ 10 องศา จนถึง 350 องศา หากผลการทดลองที่ได้มีค่าตอบที่ดีที่สุด อยู่ใน 1 ใน 3 คำตอบถือว่าความผิดพลาดเป็น 0 ในกรณีที่ไม่ถูกต้อง จะเลือกคำตอบที่ใกล้เคียงที่สุด โดยหากมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ค่าความผิดพลาดจะเท่ากับความแตกต่างของค่าที่ใกล้เคียงที่สุด นั้น กับค่ามุมที่ถูกต้อง แต่หากคลาดเคลื่อนมากกว่า 4 องศา ถือว่าการหามุมมีความผิดพลาด ค่าความผิดพลาดจะเท่ากับ 4 นำค่าความผิดพลาดทั้งหมดมารวมกัน แล้วหารด้วยจำนวนของค่าความผิดพลาดนั้น หรือ 35 นั่นเอง ค่าความผิดพลาดนี้จะแสดงถึงความผิดพลาดของการหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ ของภาพใดๆ ด้วยเทคนิคใดๆ โดยมีค่าน้อยที่สุดคือ 0 หมายถึงสามารถหาคำตอบที่ถูกต้องได้ครบถ้วน และมากที่สุดคือ 4 หมายถึงไม่สามารถหาคำตอบที่ถูกต้องได้เลย ผลการทดลองกับภาพที่ 5.3 แสดงในตารางที่ 5.1 โดย (a) หมายถึงภาพที่ 5.3(a), (b) หมายถึงภาพที่ 5.3(b) และ (c) หมายถึงภาพที่ 5.3(c)

ตารางที่ 5.1 ผลการหาความผิดพลาดเฉลี่ยจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ โดยใช้ภาพตัวอย่างที่ 5.3

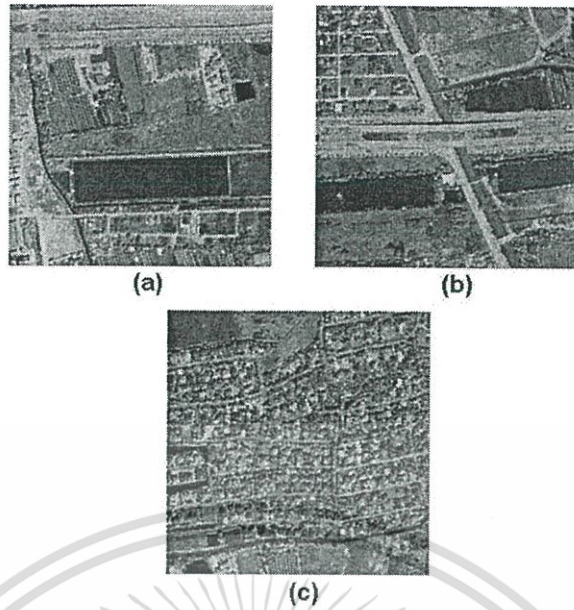
	Th = 0		Th = 40		Th = 45		Th = 50		Th = 55	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
(a)	2.74	0.68	2.37	0.14	2	0.22	2.11	0.45	2.74	0.49
(b)	2.94	0.31	2.86	0.37	2.57	0	2.77	0.23	2.91	0
(c)	3.37	2.86	3.66	3.49	3.51	3.49	3.48	3.51	3.37	3.57

M1 คือการใช้เทคนิคการรวมองค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ

M2 คือการใช้เทคนิค Canny Edge Detector ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ

5.2.1.2 การหาการเปลี่ยนแปลงมุมจากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณถนนอุทยาน

ภาพตัวอย่างการทดลองแสดงในรูปที่ 5.4 ใช้การตัดจากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณถนนอุทยาน โดยความผิดพลาดของผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมของชุดภาพตัวอย่างที่ 5.4 แสดงในตารางที่ 5.2 โดย (a) หมายถึงภาพที่ 5.4(a), (b) หมายถึงภาพที่ 5.4(b) และ (c) หมายถึงภาพที่ 5.4(c)



รูปที่ 5.4 ภาพตัวอย่างการทดลอง (a) ภาพรายละเอียดน้อย (b) ภาพรายละเอียดปานกลาง (c) ภาพรายละเอียดมาก

ตารางที่ 5.2 ผลการหาความผิดพลาดเฉลี่ยจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพโดยใช้ภาพตัวอย่างที่ 5.4

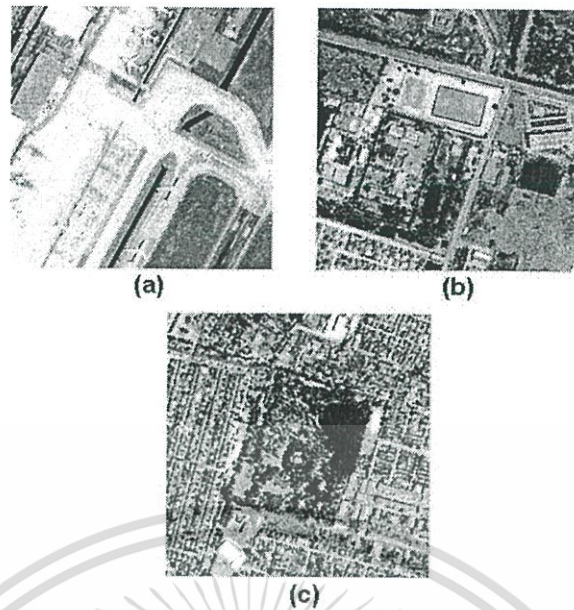
	Th = 0		Th = 40		Th = 45		Th = 50		Th = 55	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
(a)	2.57	0.94	2.42	0	2.23	0.11	2.37	0	2.6	0
(b)	2.68	0.11	2.51	0.57	2.34	0.37	2.49	0	2.51	0.11
(c)	3.66	3.54	3.57	3.74	3.66	3.54	3.65	3.69	3.51	3.49

M1 คือการใช้เทคนิคการรวมองค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ

M2 คือการใช้เทคนิค Canny Edge Detector ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ

5.2.1.3 การหาการเปลี่ยนแปลงมุมจากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตดอนเมือง

ภาพตัวอย่างการทดลองแสดงในรูปที่ 5.5 ใช้การตัดจากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตดอนเมือง โดยความผิดพลาดของผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมของชุดภาพตัวอย่างที่ 5.5 แสดงในตารางที่ 5.3 โดย (a) หมายถึงภาพที่ 5.5(a), (b) หมายถึงภาพที่ 5.5(b) และ (c) หมายถึงภาพที่ 5.5(c)



รูปที่ 5.5 ภาพตัวอย่างการทดลอง (a) ภาพรายละเอียดน้อย (b) ภาพรายละเอียดปานกลาง (c) ภาพรายละเอียดมาก

ตารางที่ 5.3 ผลการหาความผิดพลาดเฉลี่ยจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพโดยใช้ภาพตัวอย่างที่ 5.4

	Th = 0		Th = 40		Th = 45		Th = 50		Th = 55	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
(a)	2.66	0.65	2.49	0.4	2.11	0.11	2.43	0	2.37	0
(b)	2.94	2.26	2.8	3.03	2.71	2.49	2.66	1.63	2.74	1.17
(c)	3.66	3.37	3.66	3.34	3.54	3.8	3.66	3.71	3.49	3.49

M1 คือการใช้เทคนิคการรวมองค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ

M2 คือการใช้เทคนิค Canny Edge Detector ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.1 – 5.3 สังเกตได้ว่าในภาพที่มีจำนวนเส้น และรายละเอียดภายในภาพน้อย และเด่นชัด คือภาพชุด (a) การหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพโดยใช้ Phase Correlation ร่วมกับ Hough Transform และ Canny Edge Detector จะให้ผลมีความถูกต้องสูง การเลือกใช้ค่า Threshold ของ Hough แต่ละค่านั้นไม่ส่งผลกระทบต่อผลการทดลองที่ได้มากนัก ส่วนการใช้องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform แทนการหาขอบของภาพจะให้ผลที่มีความผิดพลาดมากกว่า การเลือกใช้ค่า Threshold ของ Hough ถ้าเลือกใช้ค่าที่เหมาะสมจะทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความผิดพลาดเพียงน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาพที่มีจำนวนเส้น และรายละเอียดปานกลาง คือภาพชุด (b) ผลการทดลองโดยใช้ Canny Edge Detector จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นมากกว่าในภาพที่มีรายละเอียดน้อย แต่ผลการทดลองที่ได้ถือว่ามีคุณภาพสูง การใช้อ็องค์ประกอบความถี่สูงของภาพ Wavelet จะเกิดความผิดพลาดขึ้นค่อนข้างมาก แต่การเลือกค่า Threshold ของ Hough Transform ที่เหมาะสมจะช่วยทำให้ผลการทดลองที่ได้มีคุณภาพสูงขึ้น

ในภาพที่มีจำนวนเส้น และรายละเอียดมาก คือภาพชุด (c) จะเห็นว่าผลการทดลองมีความผิดพลาดสูง การใช้ Canny Edge Detection ยังให้ผลการทดลองที่มีความถูกต้องต่ำ สำหรับการใช้อ็องค์ประกอบความถี่สูงของภาพ Wavelet นั้นผลการทดลองที่ได้จะมีความถูกต้องต่ำเช่นกัน และการเลือกค่า Threshold ไม่สามารถช่วยให้ผลการทดลองมีความถูกต้องสูงขึ้น

สังเกตว่าความผิดพลาดเฉลี่ยสำหรับภาพตั้งต้นแต่ละชนิด และแต่ละค่า Threshold จะมีความแตกต่างกัน สำหรับภาพที่มีรายละเอียดไม่มาก การเลือกใช้ค่า Threshold ที่เหมาะสมสามารถจะลดความผิดพลาดลงได้ แต่สำหรับภาพที่มีรายละเอียดมาก การเลือกใช้ค่า Threshold ไม่สามารถลดความผิดพลาดของผลลัพธ์ลงได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่า Threshold ของ Hough Transform ที่ 45 เนื่องจากเป็นค่าที่ให้ผลการทดลองที่มีความถูกต้องสูง

5.2.2 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของผลของการใช้ Window ขนาดต่างๆ ในการทำ Median Low Pass Filter

ในการทดลองนี้จะทำการทดลองการใช้ Median Low Pass Filter เข้ามาช่วยในการหาการเปลี่ยนแปลงมุมของภาพ โดยจะทำการเบลอภาพ เพื่อให้รายละเอียดเล็กๆ น้อยๆ ภายในภาพหายไป และเหลือเพียงเส้นหลักที่เด่นชัดภายในภาพ โดยใช้ภาพการทดลองเช่นเดียวกับ 5.2.1 คือมีการแบ่งภาพตามจำนวนเส้น และรายละเอียดภายในภาพเป็น 3 ชนิด คือ ภาพที่มีจำนวนเส้น และรายละเอียดในเส้นน้อย, ภาพที่มีจำนวนเส้น และรายละเอียดภายในภาพปานกลาง และภาพที่มีจำนวนเส้นและรายละเอียดภายในภาพมาก

ในขั้นตอนนี้จะทำการทดลองเฉพาะวิธีการใช้อ็องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ เนื่องจากการหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยใช้เทคนิค Canny Edge Detector หาขอบนั้นผลการทดลองมีความถูกต้องสูงอยู่แล้ว ค่า Threshold ของ Hough Transform จะเลือกใช้ที่ 45 เนื่องจากเป็นค่าที่ให้ผลการทดลองที่มีความถูกต้องสูง

5.2.2.1 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมจากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตลาดกระบัง

การทดลองนี้ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตลาดกระบัง ดังรูปที่ 5.3 ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.4 โดยใช้วิธีการวัดความผิดพลาดเฉลี่ยเช่นเดียวกับ 5.2.1 ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ผลการหาความผิดพลาดเฉลี่ยจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ โดยใช้ภาพตัวอย่างที่ 5.3

	No filter	Median LPF 3x3	Median LPF 5x5	Median LPF 7x7
(a)	2	1.91	1.6	0.68
(b)	2.57	2.37	1.91	2.17
(c)	3.51	3.54	3.46	2.97

5.2.2.2 การหาการเปลี่ยนแปลงมุมจากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณถนนอุทยาน

การทดลองนี้ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณถนนอุทยาน ดังรูปที่ 5.4 ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลการหาความผิดพลาดเฉลี่ยจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ โดยใช้ภาพตัวอย่างที่ 5.4

	No filter	Median LPF 3x3	Median LPF 5x5	Median LPF 7x7
(a)	2.23	2.31	1.77	1.8
(b)	2.34	2.23	0.25	0.29
(c)	3.66	3.6	3.69	3.74

5.2.2.3 การหาการเปลี่ยนแปลงมุมจากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตดอนเมือง

การทดลองนี้ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตดอนเมือง ดังรูปที่ 5.5 ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลการหาความผิดพลาดเฉลี่ยจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ โดยใช้ภาพตัวอย่างที่ 5.5

	No filter	Median LPF 3x3	Median LPF 5x5	Median LPF 7x7
(a)	2.11	1.49	0.65	0.94
(b)	2.71	2.6	2.43	2.51
(c)	3.54	3.66	3.77	3.74

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.4 – 5.6 แสดงให้เห็นว่า การใช้ Median Low Pass Filter เพื่อทำการเบลอภาพก่อนจะทำการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพจะทำให้ผลการทดลองมีคุณภาพดี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเลือกใช้ขนาด Window ที่เหมาะสม จะช่วยทำให้ผลมีความผิดพลาดน้อยลงเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากหากเลือกใช้ขนาดของ Window เล็กเกินไป จะทำให้ผลการทดลองไม่แตกต่างจากการไม่ใช้ Median Filter คือยังมีความผิดพลาดอยู่ แต่หากใช้ Window ที่มีขนาดใหญ่เกินไป อาจทำให้เส้นหลักๆ ที่สำคัญภายในภาพหายไป ทำให้ผลการทดลองผิดพลาดได้

ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดในการหาการเปลี่ยนแปลงมุมสำหรับภาพตั้งต้น 3 ภาพ และขนาด Window ของ Median LPF ขนาดต่างๆ แสดงในตารางที่ 5.12 สังเกตได้ว่าการใช้ Window ขนาด 3x3 จะไม่ทำให้ผลการทดลองดีขึ้นมากนัก เนื่องจากภาพยังอยู่ในลักษณะใกล้เคียงกับภาพตั้งต้น เมื่อเพิ่มขนาดของ Window เป็น 5x5 จะทำให้ผลการทดลองมีความผิดพลาดเฉลี่ยน้อยลง และเมื่อเพิ่มขนาด Window ขึ้นเป็น 7x7 จะเริ่มทำให้เกิดความผิดพลาดมากขึ้น เนื่องจากเส้นหลักที่สำคัญในภาพอาจจะเบลอหายไป

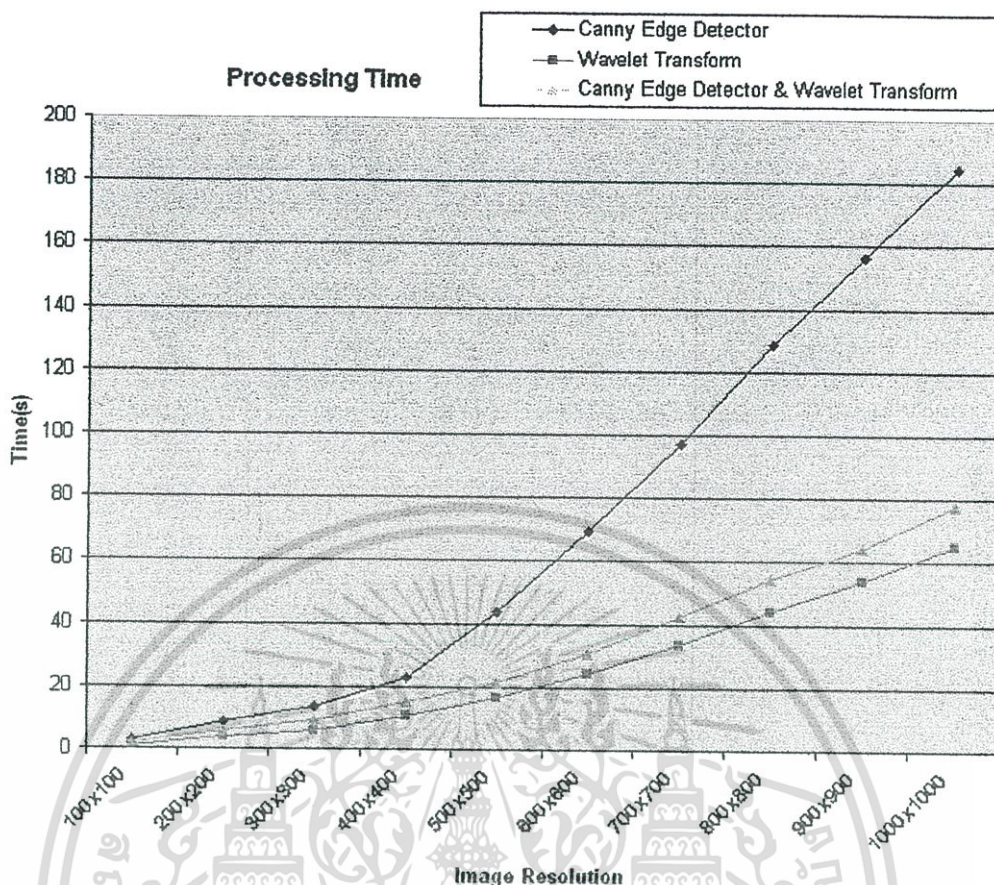
ขนาด Window ของการทำ Median LPF นั้น โดยปกติแล้วที่ขนาด 5x5 จะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด แต่ในบางกรณีที่ภาพมีจำนวนเส้น และรายละเอียดภายในภาพค่อนข้างมาก การใช้ Window ขนาด 7x7 จะให้ผลการทดลองที่มีความถูกต้องมากกว่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ขนาด Window ที่ขนาด 5x5

หากภาพมีรายละเอียดไม่มากเกินไป Median LPF จะสามารถช่วยลดความผิดพลาดของการหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพลงได้ แต่หากภาพมีรายละเอียดมาก การใช้ Median LPF จะไม่สามารถช่วยลดความผิดพลาดลงได้

5.2.3 การทดลองเปรียบเทียบเวลาในการหาการเปลี่ยนแปลงมุม

ในการทดลองเปรียบเทียบเวลาจะทำการเปรียบเทียบใน 3 วิธีการ คือ การคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยใช้เทคนิค Canny Edge Detection ในการหาขอบโดยไม่มีการใช้ Wavelet Transform, การเทคนิค Canny Edge Detection ในการหาขอบ โดยใช้ Wavelet Transform และการใช้องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet แทนการหาขอบ โดยจะทำการทดลองกับภาพที่ Resolution ต่างๆ จำนวน 10 Resolution เริ่มตั้งแต่ 100x100 จนถึง 1000x1000

ผลการเปรียบเทียบเวลาการหาการเปลี่ยนแปลงมุมด้วยเทคนิคดังกล่าวที่ Resolution ใดๆ แสดงในกราฟในรูปที่ 5.6 โดยเส้นรูปสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแสดงเวลาในการหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยใช้เทคนิค Canny Edge Detector ในการหาขอบ โดยไม่มีการใช้ Wavelet Transform, เส้นรูปสามเหลี่ยมแสดงเวลาในการหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยใช้เทคนิค Canny Edge Detector โดยใช้ Wavelet Transform ช่วยลดขนาดของภาพลง และเส้นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแสดงเวลาในการหาการเปลี่ยนแปลงมุมโดยการใช้องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform แทนการหาขอบ



รูปที่ 5.6 ผลการวัดเวลาในการหาการเปลี่ยนแปลงมุมด้วยเทคนิคต่างๆ

จากกราฟในรูปที่ 5.6 เห็นได้ว่าเมื่อภาพมีขนาดเล็กการใช้ Wavelet Transform ในการลดขนาดของภาพลง จะทำให้การประมวลผลใช้เวลาน้อยลงไม่มาก เห็นได้ชัดว่าภาพที่มีขนาดไม่เกิน 200x200 ใช้เวลาในการประมวลผลแตกต่างกันประมาณ 5 วินาที สำหรับในกรณีที่ภาพที่ทำการทดลองมีขนาดใหญ่ การใช้ Wavelet Transform เพื่อลดขนาดของภาพลงจะทำให้เวลาในการประมวลผลลดลงอย่างมาก ที่ภาพขนาด 1000x1000 จะใช้เวลาต่างกันประมาณ 100 วินาที

การใช้ Canny Edge Detector ทำการหาขอบบนองค์ประกอบความถี่ต่ำของภาพ Wavelet แทนการใช้องค์ประกอบความถี่สูงของภาพ Wavelet หาขอบของภาพ เมื่อภาพมีขนาดเล็กจะใช้เวลาในการประมวลผลนานขึ้นไม่มากนัก แต่เมื่อภาพมีขนาดมากขึ้น เวลาที่แตกต่างกันจะมากขึ้นเช่นกัน เช่นในภาพขนาด 1000x1000 จะใช้เวลาต่างกันประมาณ 15 วินาที

5.3 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง

ในการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง จะทำการทดลองเพื่อทดสอบทฤษฎี Phase Correlation ทั้งในด้านของความถูกต้อง และเวลาในการประมวลผล ในการทดลองนี้จะทำการทดลองกับภาพ 3 ชุด ซึ่งภาพ 3 ชุดนี้ได้จากการตัดจากภาพถ่ายดาวเทียมขนาดใหญ่ ตามคำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง แล้วทำการทดลองใช้ทฤษฎี Phase Correlation หาค่าความถูกต้อง และความผิดพลาดในแต่ละรูปแบบ ภาพในการทดลอง 3 ชุด แสดงดังรูปที่ 5.3 – 5.5

5.3.1 การทดลองหาความถูกต้อง และขอบเขตของการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง

การทดลองในขั้นตอนนี้ จะใช้ภาพในการทดลองชุดเดียวกันกับการทดลองเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ แต่จะเปลี่ยนแปลงจากการหมุนภาพเพื่อตัดภาพออกมา เป็นการเลื่อนตำแหน่งการตัดภาพ โดยจะแบ่งช่วงการตัดภาพในด้านกว้าง และด้านยาวด้านละ 10 ช่วง ทั้งค่าบวก และค่าลบ แล้วจับคู่ค่าที่แบ่งในแต่ละช่วงเพื่อตัดภาพออกมา รายละเอียดการทดลองแสดงในภาคผนวก ก

ผลการทดลองกับชุดภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณเขตลาดกระบังแสดงในตารางที่ 5.7 ผลการทดลองกับชุดภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณถนนอุทยานแสดงในตารางที่ 5.8 และผลการทดลองกับชุดภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณเขตคอนเมืองแสดงในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.7 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับภาพในรูปที่ 5.3

	Phase Correlation	Phase Correlation & Wavelet Transform 1 level	Phase Correlation & Wavelet Transform 2 level
(a)	0	± 1	± 3
(b)	0	± 1	± 3
(c)	0	± 1	± 3

ตารางที่ 5.8 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับภาพในรูปที่ 5.4

	Phase Correlation	Phase Correlation & Wavelet Transform 1 level	Phase Correlation & Wavelet Transform 2 level
(a)	0	± 1	± 3
(b)	0	± 1	± 3
(c)	0	± 1	± 3

ตารางที่ 5.9 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับภาพในรูปที่ 5.5

	Phase Correlation	Phase Correlation & Wavelet Transform 1 level	Phase Correlation & Wavelet Transform 2 level
(a)	0	± 1	± 3
(b)	0	± 1	± 3
(c)	0	± 1	± 3

จากการทดลองในตารางที่ 5.7 - 5.9 พบว่าการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของภาพโดยใช้ Phase Correlation ให้ผลการทดลองมีความถูกต้องแม่นยำสูง ไม่ว่าจะรายละเอียดภายในภาพจะมาก หรือน้อย หรือมีความเด่นชัดหรือไม่ สำหรับการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งโดยใช้ Wavelet Transform เพื่อลดขนาดของข้อมูลนั้นจะทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากเดิมเล็กน้อย เนื่องจากการลดขนาดของรูปโดยใช้ Wavelet Transform 1 ชั้น จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการที่ภาพถูก Down-sampling ลงด้านละครึ่งหนึ่งทั้งในแนวแกน x และ y ค่าการเปลี่ยนแปลงที่ถูกต้องอาจจะอยู่ในส่วนที่ถูก Down-sampling ออกไป สำหรับความคลาดเคลื่อนของผลการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากการใช้ Wavelet Transform เท่ากับ $\pm(2^n - 1)$ โดย n คือจำนวนชั้นของการทำ Wavelet Transform กับภาพตั้งต้น

ในกรณีที่ภาพทั้งสองมีส่วนที่ทับซ้อนกันอยู่มาก ผลที่ได้จากการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งนั้นจะถูกต้องแม่นยำ แต่ในกรณีที่มีส่วนที่ทับซ้อนกันระหว่างภาพน้อยเกินไป จะทำให้ไม่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่ถูกต้องได้ เช่น ในภาพตัวอย่างการทดลองซึ่งมีขนาด 200x200 พิกเซลนี้ จะเริ่มมีความผิดพลาดเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งประมาณ 150 พิกเซลขึ้นไป และเมื่อสังเกตจากผลการทดลองแล้วจะเห็นว่า ภาพที่มีรายละเอียดน้อย และมีความเด่นชัด ขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่สามารถรองรับได้จะมากกว่าภาพที่มีรายละเอียดมาก ตารางที่ 5.10 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ของส่วนที่ทับซ้อนกันระหว่างภาพ ที่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้สำหรับภาพขนาดต่างๆ

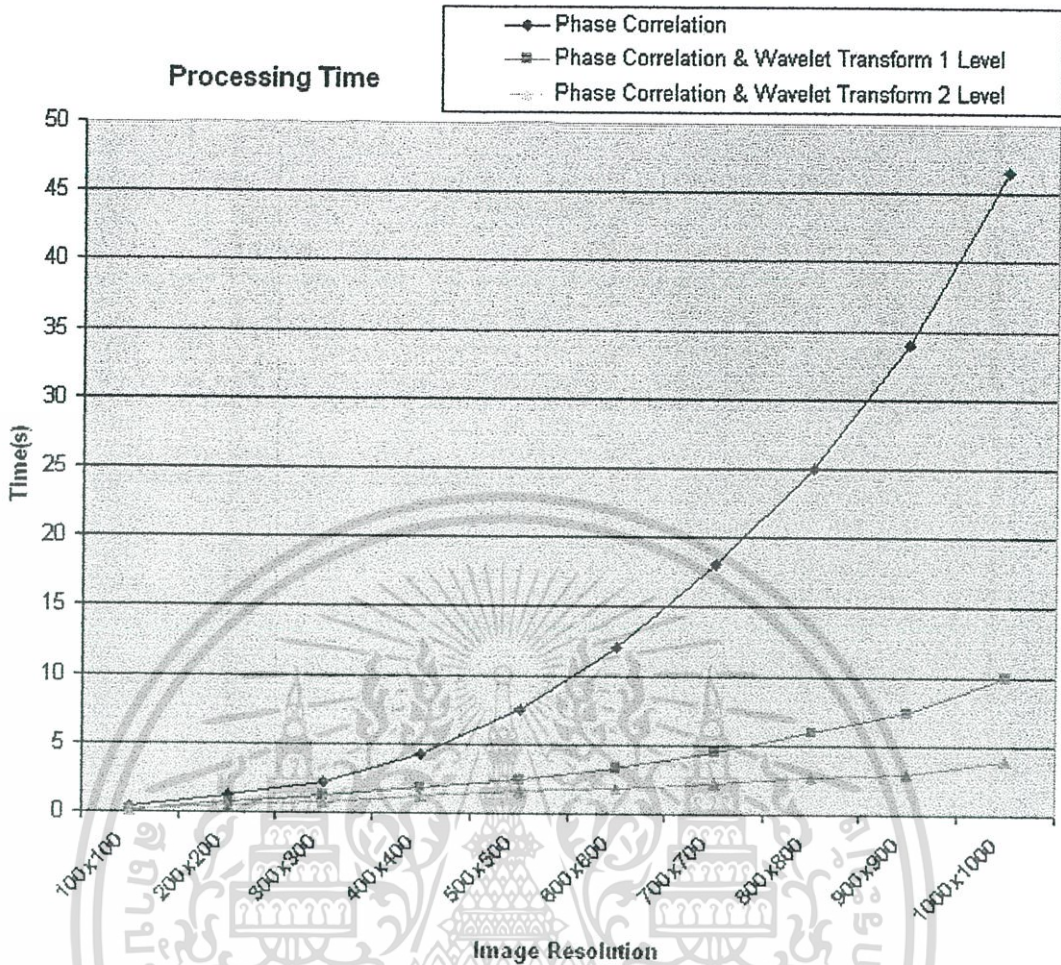
ตารางที่ 5.10 ค่าเหล่านี้เป็นค่าเฉลี่ยของพื้นที่ส่วนที่ทับซ้อนกันน้อยที่สุดของคู่ภาพใดๆ ต่อขนาดของภาพ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าเมื่อภาพมีขนาดใหญ่ขึ้น เปอร์เซ็นต์ของส่วนที่ทับซ้อนกันต่อขนาดภาพที่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงได้จะลดลง ซึ่งหมายความว่าจะสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงได้กว้างมากขึ้น

ตารางที่ 5.10 เปอร์เซนต์เฉลี่ยของพื้นที่ทับซ้อนกันน้อยที่สุดที่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ สำหรับภาพขนาดต่างๆ

ขนาดภาพ (พิกเซล)	ส่วนที่ทับซ้อนกันน้อยที่สุดที่รองรับได้ (%)
100x100	7.84
200x200	4.62
300x300	2.67
400x400	1.76
500x500	1.39
600x600	1.14
700x700	1.02
800x800	0.93
900x900	0.85
1000x1000	0.77

5.3.2 การทดลองเปรียบเทียบเวลาในการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง

เวลาที่ใช้ในการทำในขั้นตอนการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งกับภาพขนาดต่างๆ จะแสดงในกราฟในรูปที่ 5.7 ซึ่งเป็นเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผลในภาพขนาดต่างๆ โดยเปรียบเทียบกัน 3 วิธีการ คือ การใช้ Phase Correlation โดยตรง, การทำ Wavelet Transform 1 ชั้น ก่อนทำ Phase Correlation และการทำ Wavelet Transform Phase 2 ชั้นก่อนทำ Phase Correlation



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการประมวลผลการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง

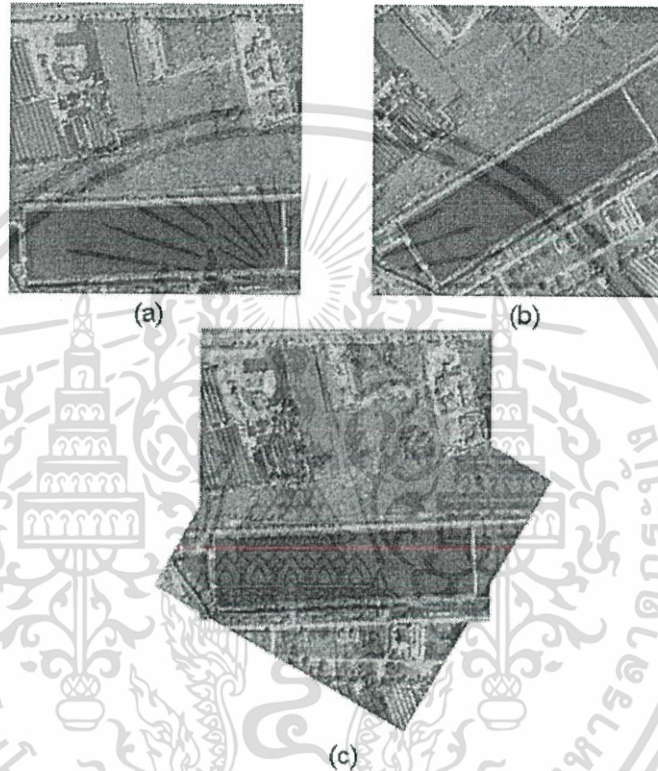
กราฟในรูปที่ 5.7 จะแสดงเวลาในการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแต่ละวิธี โดยแกน x ของกราฟแทนขนาดของภาพ โดยเริ่มจาก 100x100 พิกเซล จนถึง 1000x1000 พิกเซล และแกน y ของกราฟแทนเวลาที่ใช้ในการประมวลผลมีหน่วยเป็นวินาที เส้นรูปสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดในกราฟ แสดงเวลาที่ได้จากการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งโดยใช้ Phase Correlation โดยตรง, เส้นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแสดงเวลาที่ได้จากการทำ Wavelet Transform 1 ชั้นก่อนการทำ Phase Correlation และเส้นรูปสามเหลี่ยมแสดงเวลาที่ได้จากการทำ Wavelet Transform 2 ชั้นก่อนการทำ Phase Correlation

จากกราฟในรูปที่ 5.7 จะเห็นว่า เมื่อภาพมีขนาดเล็ก เช่น ภาพขนาด 100x100 และ 200x200 พิกเซล การทำ Phase Correlation โดยตรงนั้นใช้เวลาไม่มาก การลดขนาดของภาพตั้งต้นโดยใช้ Wavelet Transform 1 และ 2 ชั้นนั้นจะช่วยลดเวลาได้ไม่มากนัก แต่เมื่อภาพมีขนาดใหญ่ขึ้นจะสังเกตเห็นว่าการทำ Wavelet Transform ลดขนาดของภาพก่อนการทำ Phase Correlation จะช่วยลดเวลาในการประมวลผลได้อย่างมาก โดยจะเริ่มสังเกตเห็นเวลาที่แตกต่างเด่นชัดที่ภาพขนาด

500x500 พิกเซลขึ้นไปเวลาจะแตกต่างกันมากกว่า 4 วินาที และที่ภาพขนาด 1000x1000 พิกเซล เวลาในการประมวลผลจะแตกต่างกันมากกว่า 40 วินาที

5.4 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดหลังจากการรวมภาพ

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการทำ Image Registration หลังจากได้ค่า $\Delta x, \Delta y, \Delta \theta$ แล้วค่าเหล่านี้จะถูกใช้ในการรวมภาพตั้งต้นทั้งคู่เข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ตัวอย่างการรวมภาพเข้าด้วยกัน (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2 (c) ภาพผลการรวมกัน

ในขั้นตอนการรวมภาพจะมีการวัดค่าความแตกต่างระหว่างภาพ ด้วยเทคนิค 2 วิธีการ คือ

- การทำ Root Mean Square Error (RMSE)
- การทำ Normalized cross-correlation

การทำ RMSE ตามสมการที่ 4.2 กับภาพตั้งต้นทั้ง 2 จะทำเฉพาะจุดที่มีส่วนที่ทับซ้อนกันเท่านั้น จุดอื่นๆ นอกบริเวณที่ทับซ้อนกันจะไม่นำมาคิด โดยปกติแล้วหากการเปลี่ยนแปลงที่หาได้มีความถูกต้อง ค่า RMSE นี้ควรจะมีค่าเป็นศูนย์ คือไม่มีความแตกต่างกันในขณะทำการรวมเลย แต่เนื่องจากการคำนวณ Geometric Transform มีการทำ Interpolation ทำให้ค่าความเข้มแสงอาจเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นค่า RMSE อาจมีค่าไม่เป็นศูนย์ แต่จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการ

เปลี่ยนแปลงอื่นๆ หากทำการทดลองวัดค่า RMSE จากการทดลองแล้วมีค่าสูง แสดงว่าค่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้นั้นอาจจะผิดพลาด

ส่วนการทำ Normalized cross-correlation นั้นเป็นการวัดความเหมือน หรือความคล้ายกัน ระหว่างภาพ โดยทำ Geometric Transform กับภาพตั้งต้นที่สองด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้ แล้วคำนวณตามสมการที่ 4.3 สำหรับค่า Cross-correlation นี้ หากคำนวณได้ค่ามาก หมายถึงภาพทั้งสองมีความเหมือน หรือคล้ายกันมาก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มที่จะเป็นคำตอบที่ถูกต้อง ในทางตรงกันข้าม หากค่าที่ได้มีค่าต่ำ หมายถึงภาพทั้งสองมีความเหมือน หรือคล้ายกันน้อย ดังนั้น น่าจะเป็นคำตอบที่ไม่ถูกต้อง

5.4.1 ตัวอย่างการทดลองวัดค่า RMSE และ Cross-correlation เพื่อใช้เปรียบเทียบในการเลือกผลการทดลอง

5.4.1.1 การทดลองที่ 1



รูปที่ 5.9 ภาพตั้งต้นในการทดลองที่ 1 (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2

จากภาพตั้งต้นในรูปที่ 5.9 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ $\Delta\theta$ โดยเลือก 3 ค่าที่ให้ค่า Correlation สูงที่สุดเป็น 1, 11 และ 10 องศา เรียงลำดับตามค่า Correlation จากมากไปน้อย ใช้ค่าแต่ละมุม หากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ได้ค่า Δx และ Δy สำหรับในแต่ละมุมซึ่งมีอาจค่าเป็นได้ทั้งค่าบวก และลบเนื่องจากคุณสมบัติของ Fourier Transform สำหรับค่าที่เป็นลบนั้นสามารถหาได้จากการนำค่า Δx หรือ Δy ที่ได้ลบออกจากขนาดของภาพ ดังนั้นค่าในแต่ละ $\Delta\theta$ จะต้องพิจารณาทั้งหมด 4 ค่าคือ ในกรณีที่ Δx และ Δy เป็นบวกทั้งคู่, Δx เป็นค่าบวก Δy เป็นค่าลบ, Δx เป็นค่าลบ Δy เป็นค่าบวก และ Δx และ Δy เป็นลบ ดังแสดงในตารางที่ 5.11

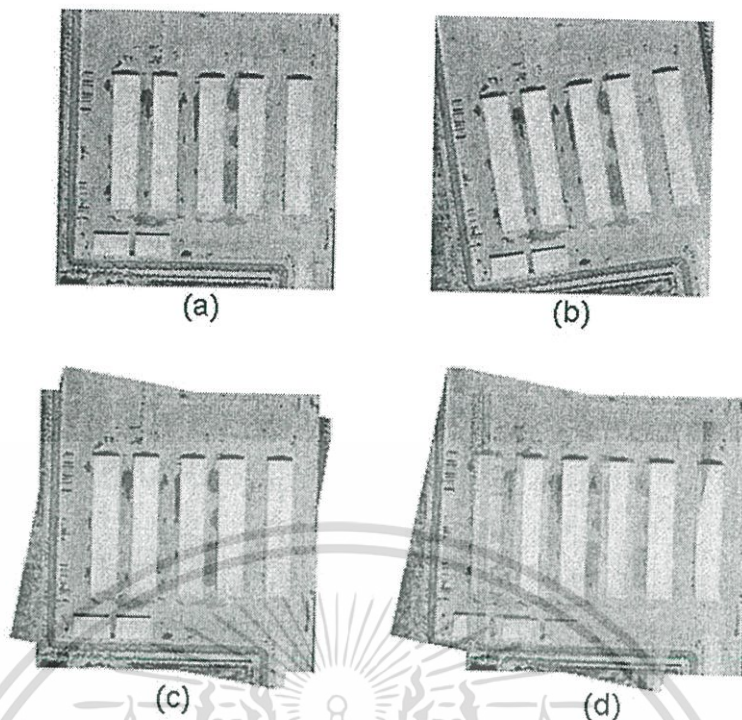
ตารางที่ 5.11 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลงที่คำนวณได้

	$\Delta\theta$	Δx	Δy	Cross-correlation	RMSE
1	0	199	185	-0.278	∞
2	0	199	-15	-0.278	19.603
3	0	-1	185	-0.192	34.337
4	0	-1	-15	0.268	23.416
5	11	217	221	-0.175	∞
6	11	217	-17	-0.202	∞
7	11	-21	221	-0.188	∞
8	11	-21	-17	0.368	22.011
9	10	12	180	-0.215	36.733
10	10	12	-20	0.64	5.63
11	10	-188	180	-0.217	∞
12	10	-188	-20	-0.207	28.581

ในตารางที่ 5.10 หากในกรณีที่ทำการ Geometric Transform เพื่อทำการรวมภาพแล้ว ปรากฏว่าภาพทั้งสองไม่มีการทับซ้อนกันเลย จะทำให้ไม่มีจุดในการคำนวณ RMSE เลย ค่า n ในสมการที่ 4.2 จะมีค่าเป็น 0 ซึ่งทำให้การคำนวณสมการที่ 4.2 มีค่าเป็น ∞ ดังนั้นต้องพิจารณาขอบเขตของการทับซ้อนกันระหว่างภาพตั้งต้นทั้ง 2 ในกรณีที่คำนวณแล้วทำให้ภาพตั้งต้นทั้ง 2 ไม่ทับซ้อนกัน แสดงว่าผลการทดลองนั้นเป็นผลการทดลองที่ผิดพลาด

สำหรับค่า Cross-correlation นั้นจะสังเกตได้ว่าที่คำตอบใดๆ อาจให้ค่าเป็นได้ทั้งค่าบวกและลบ โดยค่าที่เป็นค่าดีที่สุดคือค่าบวกที่มากที่สุดนั่นเอง

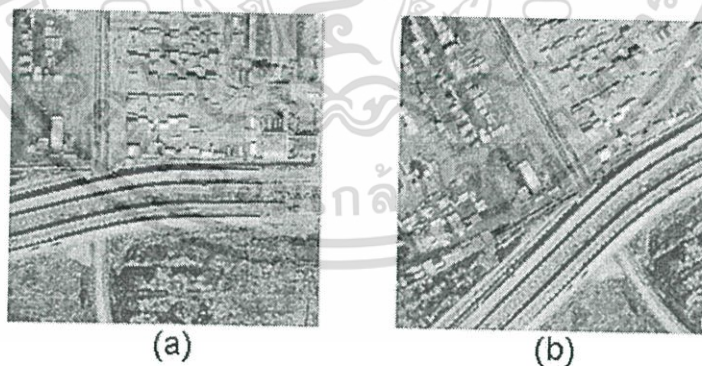
จากตารางที่ 5.10 สังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงในคำตอบที่ 10 จะให้ค่า RMSE มีค่าต่ำที่สุด และค่า Cross-correlation สูงที่สุดด้วย และเมื่อนำมาใช้ในการรวมภาพจะได้ภาพดังรูปที่ 5.10(c) ส่วนการเปลี่ยนแปลงในคำตอบอื่นนั้นจะให้ค่า RMSE มากกว่า และค่า Cross-correlation น้อยกว่า แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงที่ดีที่สุดคือค่าการเปลี่ยนแปลงในคำตอบที่ 10 สำหรับการทดลองรวมภาพด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงอื่นแสดงในรูปที่ 5.10(d) โดยใช้คำตอบที่ 8 ในการรวมภาพ



รูปที่ 5.10 ตัวอย่างการรวมภาพเข้าด้วยกัน (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2 (c) ภาพผลการรวมกันด้วยค่าตอบที่ดีที่สุด (d) ผลการรวมกันด้วยค่าตอบอื่น

5.4.1.2 การทดลองที่ 2

ในการทดลองนี้ใช้ภาพตั้งต้นดังรูปที่ 5.11 หากค่าการเปลี่ยนแปลงมุมได้ $\Delta\theta$ เป็น 1, 30 และ 31 ตามลำดับ ใช้ค่ามุมทั้ง 3 หากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 5.12

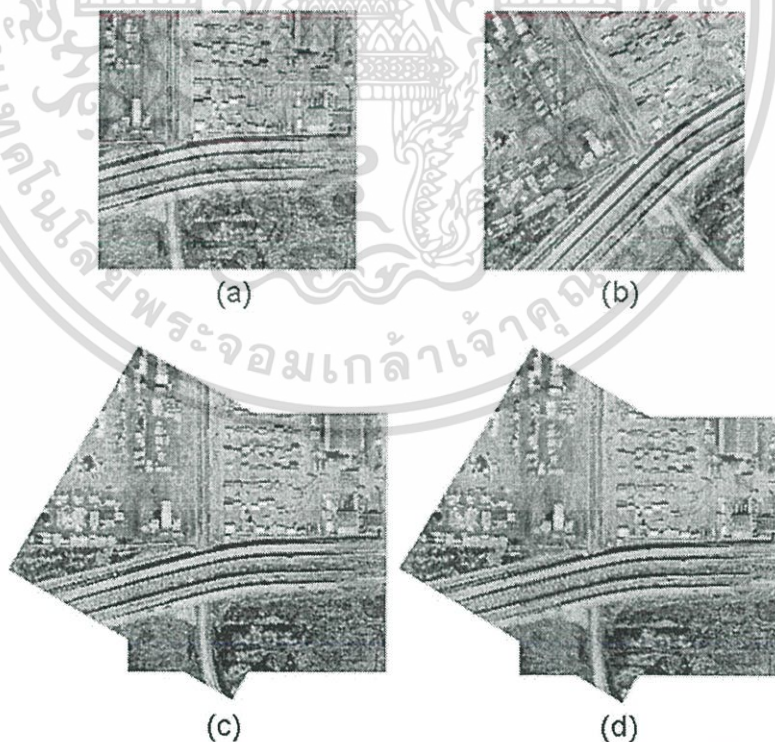


รูปที่ 5.11 ภาพตั้งต้นในการทดลองที่ 2 (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลงที่คำนวณได้

	$\Delta\theta$	Δx	Δy	Cross-correlation	RMSE
1	0	73	14	0.102	29.917
2	0	73	-186	-0.279	28.566
3	0	-127	14	-0.005	32.434
4	0	-127	-186	-0.293	29.092
5	30	222	181	-0.181	∞
6	30	222	-52	-0.181	∞
7	30	-93	181	-0.208	30.973
8	30	-93	-52	0.516	13.043
9	31	181	221	-0.180	∞
10	31	181	-54	-0.208	20.72
11	31	-94	221	-0.180	∞
12	31	-94	-54	0.501	18.804



รูปที่ 5.12 ตัวอย่างการรวมภาพเข้าด้วยกัน (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2 (c) ภาพผลการรวมกันด้วยคำตอบที่ดีที่สุด (d) ผลการรวมกันด้วยคำตอบอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางผลการทดลองที่ 5.11 สังเกตว่าคำตอบของการเปลี่ยนแปลงที่ได้แต่ละค่า จะให้ค่าการทำ RMSE ในขั้นตอนการรวมภาพแตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงที่มีค่า RMSE ต่ำที่สุดคือคำตอบที่ 8 และยังให้ค่า Cross-correlation สูงที่สุด แสดงว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด เมื่อนำการเปลี่ยนแปลงในคำตอบที่ 8 มาใช้รวมภาพตั้งต้นจะเป็นดังรูปที่ 5.12(c) เมื่อนำคำตอบอื่นมาใช้ในการรวมภาพเช่น คำตอบที่ 12 จะได้ภาพรวมดังรูปที่ 5.12(d)

5.4.1.3 การทดลองที่ 3

ในการทดลองนี้ใช้ภาพตั้งต้นดังรูปที่ 5.13 หากค่าการเปลี่ยนแปลงมุมได้ $\Delta\theta$ เป็น 0, 359 และ 355 ตามลำดับ ใช้ค่ามุมทั้ง 3 หากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ภาพตั้งต้นในการทดลองที่ 3 (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2

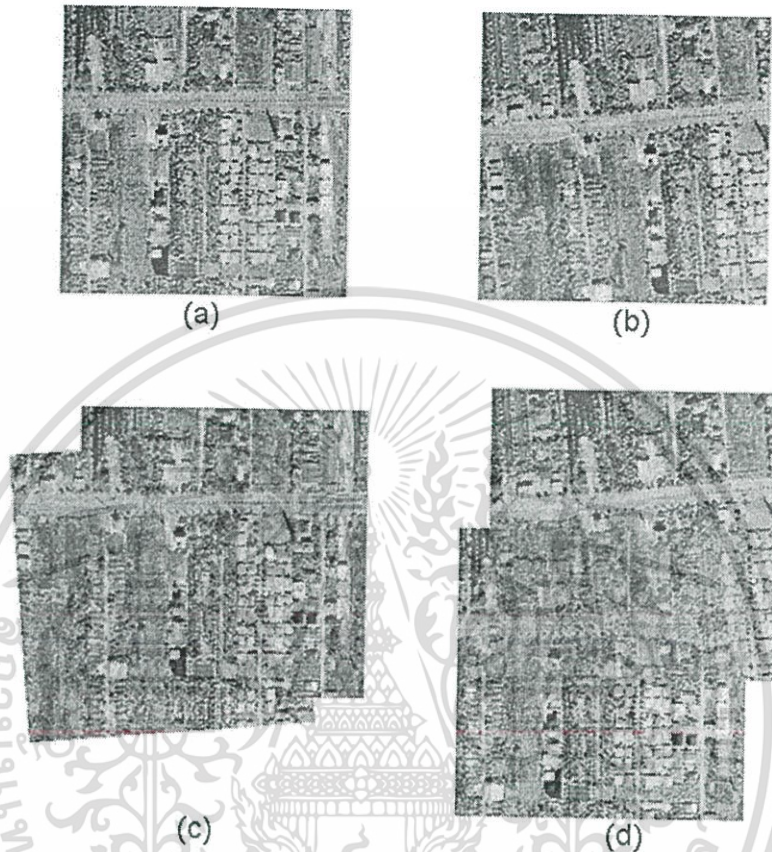
ตารางที่ 5.13 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลงที่คำนวณได้

	$\Delta\theta$	Δx	Δy	Cross-correlation	RMSE
1	0	21	103	-0.012	30.057
2	0	21	-97	0.025	28.022
3	0	-179	103	-0.285	28.243
4	0	-179	-97	-0.288	36.496
5	359	58	118	-0.157	30.462
6	359	58	-86	-0.067	26.334
7	359	-146	118	-0.260	27.87
8	359	-146	-86	-0.173	37.921
9	355	166	17	-0.221	26.517
10	355	166	-200	-0.281	26.575
11	355	-51	17	0.244	13.189
12	355	-51	-200	-0.228	32.539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.12 คำตอบที่ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด และค่า Cross-correlation ต่ำที่สุด คือ คำตอบที่ 11 เมื่อใช้การเปลี่ยนแปลงในคำตอบที่ 11 ทำการรวมภาพจะได้ภาพผลลัพธ์ดังรูปที่ 5.14(c) และ เมื่อใช้คำตอบที่ 2 ทำการรวมภาพจะได้ภาพผลลัพธ์ดังรูปที่ 5.14(d)



รูปที่ 5.14 ตัวอย่างการรวมภาพเข้าด้วยกัน (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2 (c) ภาพผลการรวมกันด้วยคำตอบที่ดีที่สุด (d) ผลการรวมกันด้วยคำตอบอื่น

จากการทดลองวัดค่า RMSE และค่า Normalized Cross-correlation เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดในการรวมภาพพบว่า RMSE สามารถใช้ตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบของการหาการเปลี่ยนแปลงได้ โดยคำตอบที่ถูกต้องจะทำให้ค่า RMSE ในการรวมภาพมีค่าน้อยที่สุด สำหรับภาพใดๆ ในทุกๆ ขนาด เช่นเดียวกับการใช้ค่า Normalized Cross-correlation โดยคำตอบที่ถูกต้องจะให้ค่า Cross-correlation สูงที่สุด

5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่า การหาการเปลี่ยนแปลงมุม ในเทคนิคการทำกรหาขอบของภาพที่เลือกใช้ พบว่า Canny Edge Detector จะให้ผลการทดลองที่มีคุณภาพสูงกว่าการใช้องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet แทนการหาขอบของภาพอย่างมาก แต่ในกรณีที่ภาพมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดน้อย เส้นค่อนข้างชัดเจน การใช้ Wavelet Transform แทนการหาขอบสามารถให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องได้เช่นเดียวกัน แต่ในกรณีของภาพที่มีรายละเอียดปานกลาง และรายละเอียดมาก จะให้ผลที่มีความผิดพลาดมากเมื่อเทียบกับการใช้ Canny Edge Detector หาขอบ

การเลือกใช้ค่า Threshold ของ Hough Transform สามารถช่วยตัดรายละเอียดเล็กๆ น้อยๆ ภายใน Hough Space ออก ซึ่งทำให้ผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพมีคุณภาพมากขึ้น แต่ต้องเลือกใช้ค่า Threshold ให้เหมาะสม สำหรับค่า Threshold ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละภาพนั้นไม่เท่ากัน โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่า Threshold ที่ 45 เนื่องจากให้ผลที่มีความถูกต้องสูง

การใช้ Median Low Pass Filter ช่วยทำการเบลอภาพ เพื่อให้รายละเอียดเล็กๆ น้อยๆ ในภาพจางลง เหลือเพียงเส้นหลักที่เด่นชัด ทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องมากขึ้น การเลือกขนาด Window ของ Median LPF เล็กเกินไปจะทำให้ภาพไม่ต่างจากภาพตั้งต้นมากนัก ทำให้ผลการทดลองไม่แตกต่างจากภาพตั้งต้นเช่นกัน แต่การเลือกขนาด Window ใหญ่เกินไป จะทำให้ภาพเบลอมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้เส้นหลักในภาพหายไปด้วย ดังนั้นจึงควรเลือกขนาด Window ให้เหมาะสม โดยส่วนมากแล้วกับภาพทั่วไป การทำ Median LPF ขนาด Window 5x5 จะให้ผลการทดลองที่มีความถูกต้องสูงที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่าขนาดของ Window ที่ 5x5 นี้ แต่ในบางกรณีที่ภาพมีรายละเอียดภายในภาพมาก การใช้ Window ขนาดใหญ่ขึ้นคือ 7x7 จะให้ผลที่มีความถูกต้องมากกว่าได้

สำหรับเวลาในการประมวลผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพจะเห็นว่า เนื่องจากมีหลายขั้นตอนย่อยๆ มากกว่าการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง ดังนั้นในการหาการเปลี่ยนแปลงมุม จะใช้เวลาประมวลผลนานกว่าการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง การใช้ Wavelet Transform เพื่อช่วยลดขนาดภาพนั้นสามารถลดเวลาการประมวลผลได้ นอกจากนี้ในกรณีที่เรารู้ข้อประกอบความถี่สูงของภาพที่ผ่านการทำ Wavelet Transform แทนการหาขอบของภาพนั้นก็จะช่วยลดเวลาในการทำการหาขอบของภาพลงได้มากขึ้น แต่สำหรับในกรณีที่ภาพมีรายละเอียดค่อนข้างซับซ้อน สามารถใช้ Wavelet Transform ทำเพียงการลดขนาดของภาพลงเท่านั้น แล้วใช้ Canny Edge Detector ในการหาขอบของภาพบนองค์ประกอบความถี่ต่ำของภาพ Wavelet ได้ แต่จะใช้เวลาประมวลผลเพิ่มในส่วนของการทำ Canny Edge Detector

การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งโดยใช้เทคนิค Phase Correlation นั้นได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ความถูกต้องของการประมวลผลนั้นมีผิดพลาดไปน้อยมาก สำหรับเวลาที่ใช้ในการประมวลผลนั้นเมื่อภาพมีขนาดใหญ่หลายๆ เวลาที่ใช้ในการประมวลผลจะนานขึ้น การใช้ Wavelet Transform เข้ามาช่วยลดขนาดของข้อมูลนั้นจะช่วยลดเวลาในการประมวลผลได้ค่อนข้างดี แต่จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นคิดเป็น $\pm 2'' - 1$ พิกเซล เมื่อ n เป็นจำนวนชั้นในการทำ Wavelet Transform สำหรับภาพตั้งต้นขนาดเล็กๆ ที่ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยอยู่แล้ว หากใช้ Wavelet Transform ลดขนาดของภาพลง จะลดเวลาได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และยังมีมีความผิดพลาดเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นจะต้องนำ Wavelet Transform เข้ามาช่วยในกรณีที่ภาพมีขนาดเล็ก แต่สำหรับภาพขนาดใหญ่ Wavelet Transform จะช่วยลดเวลาในการประมวลผลได้มาก ในกรณีทำ Wavelet เพียง 1 ชั้น หากภาพมีขนาด 1000x1000 ข้อผิดพลาดเพียง 1 พิกเซลนั้นไม่ทำให้ภาพโดยรวมทั้งหมดผิดพลาดไปมากนัก

ค่าการเปลี่ยนแปลงที่หาได้มาทั้งหมด จะมีมากกว่า 1 ค่า เนื่องจากการหาการเปลี่ยนแปลง มุมของภาพจะมีความผิดเพี้ยนค่อนข้างมาก ในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการเก็บค่าการเปลี่ยนแปลงที่ให้ค่า Correlation สูงสุดมา 3 ลำดับ ซึ่งโดยมากแล้วจะมีค่าที่เป็นคำตอบ หรือใกล้เคียงอยู่ใน 3 ลำดับที่ เก็บไว้เป็นส่วนมาก ค่าที่เก็บไว้จะต้องนำไปหาอีกครั้งว่าค่าใดที่เหมาะสมที่สุด และในแต่ละการเปลี่ยนแปลงมุม เมื่อนำไปหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งจะต้องพิจารณาทั้งค่าบวก และค่าลบ การใช้วิธีการคำนวณ RMSE และการทำ Normalized Cross-correlation ในขั้นตอนการรวมภาพ หากค่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้ทั้งหมดมีความถูกต้อง หรือเป็นค่าที่ดีที่สุด เมื่อคำนวณค่า RMSE จะต้องได้ค่า RMSE ที่มีค่าน้อยที่สุด หากค่า RMSE ที่คำนวณได้มีค่ามาก แสดงว่าการเปลี่ยนแปลง ที่หาได้อาจมีความผิดพลาด สำหรับค่า Normalized Cross-correlation เป็นค่าที่แสดงถึงความ เหมือน หรือคล้ายกันของภาพ หากค่า Cross-correlation มีค่าสูง แสดงว่าภาพมีความคล้าย หรือ เหมือนกัน ดังนั้นจึงสามารถนำแนวความคิดทั้งสองนี้ไปใช้ในการเลือกคำตอบที่ดีที่สุด ในเซตของ คำตอบที่ต้องพิจารณา จะทำให้สามารถพิจารณาความถูกต้องของผลการทดลองได้โดยอัตโนมัติ โดยไม่ต้องใช้คนทำการพิจารณา

บทที่ 6

สรุปผล และแนวทางในการพัฒนา

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการทำ Image Registration ซึ่งเป็นการหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างคู่ภาพ และทำการจัดเรียงภาพทั้งสองเข้าด้วยกันเพื่อสร้างเป็นภาพใหม่ที่มีรายละเอียดของทั้ง 2 ภาพรวมกัน โดยเป็นการทำบน Frequency Domain จึงต้องมีการแปลง Fourier Transform กับภาพทั้งสอง โดยในงานวิจัยนี้จะใช้คุณสมบัติ Phase Correlation ของ Fourier Transform เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพ โดย Phase Correlation นี้มีข้อดีคือ สามารถประมวลผลได้โดยตรงไม่ได้ใช้การค้นหา ทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลน้อย แต่ข้อเสียคือทฤษฎี Phase Correlation สามารถหาได้เพียงการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เป็นการเลื่อนตำแหน่งเท่านั้น การเปลี่ยนแปลงในลักษณะอื่นๆ จะต้องใช้เทคนิคอื่นเข้ามาช่วยในกระบวนการ นอกจากนี้ Phase Correlation ยังรองรับการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เป็นจำนวนเต็มเท่านั้น หากต้องการให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงที่เป็นจุดทศนิยมได้จะต้องใช้เทคนิคอื่นเข้ามาช่วยในกระบวนการเช่นกัน

สำหรับการหามุมที่เปลี่ยนแปลงไปของภาพนั้น Phase Correlation ไม่สามารถทำได้เนื่องจาก Phase Correlation นั้นสามารถรองรับได้แค่การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งเท่านั้น แต่หากสามารถแปลงการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพทั้งสองให้อยู่ในรูปการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ ก็จะสามารถใช้ทฤษฎี Phase Correlation ในการหาการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งการแปลงจากการเปลี่ยนแปลงมุมให้อยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง จะใช้ทฤษฎี Hough Transform ในการแปลง เนื่องจาก Hough Transform จะเก็บค่าของจุดบนเส้นตรงที่มุมต่างๆ กันในภาพเดิมที่อยู่ในพิกัด (x, y) มาเก็บไว้ใน Hough Space ที่มีพิกัดเป็น (ρ, θ) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน θ ซึ่งสามารถจะใช้ทฤษฎี Phase Correlation มาหาค่าการเปลี่ยนแปลงระหว่าง Hough Space ทั้งสองได้ แต่จะเป็นการหาที่แกน θ ที่ต้องการเท่านั้น

ในขั้นตอนการรวมภาพ จะวัดความแตกต่างระหว่างภาพ โดยจะทำการวัดค่า Root Mean Square Error (RMSE) ระหว่างภาพในขั้นตอนรวมภาพ เฉพาะในส่วนที่ทับซ้อนกัน ความเข้มแสงของจุดที่ทับซ้อนกันจะทำการเฉลี่ยค่าความเข้มแสงที่จุดนั้น หากค่าการเปลี่ยนแปลงที่ใช้รวมภาพนั้นถูกต้อง ค่า RMSE ควรจะมีค่าน้อยที่สุด หรือในกรณีที่ค่าการเปลี่ยนแปลงคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ค่า RMSE ก็ควรจะมีค่าน้อยเข้าใกล้ค่าที่น้อยที่สุด ในกรณีที่คำนวณค่า RMSE แล้วค่าที่ได้มีค่ามาก แสดงว่าค่าการเปลี่ยนแปลงที่หาได้นั้นมีความผิดพลาด

จากผลการทดลองวัดค่าการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง แสดงว่าการใช้ทฤษฎี Phase Correlation ในการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งนั้นผลที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำสูง แต่ความถูกต้องที่ได้จะอยู่ในขอบเขตจำนวนเต็มเท่านั้น ในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นจุดทศนิยม จะต้องใช้เทคนิคอื่นเข้ามาช่วย เช่น เทคนิค Sub-pixel Registration

การทำ Wavelet Transform กับภาพตั้งต้น ก่อนการทำ Phase Correlation ช่วยลดเวลาในการประมวลผล แต่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ และเมื่อใช้การทำ Wavelet Transform มากกว่า 1 ชั้น ความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ก็จะเพิ่มมากขึ้นเท่ากับ $\pm(2^n - 1)$ โดย n คือจำนวนชั้นของการทำ Wavelet Transform กับภาพตั้งต้น

พื้นที่ส่วนที่ทับซ้อนกันระหว่างภาพมีผลต่อผลการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง หากมีพื้นที่ส่วนที่ทับซ้อนกันน้อยเกินไป จะไม่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ สำหรับภาพขนาดเล็ก เปรียบเช่นต์ของพื้นที่ส่วนที่ทับซ้อนกับระหว่างภาพกับขนาดของภาพที่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงได้จะมากกว่าภาพขนาดใหญ่ กล่าวคือ ภาพขนาดใหญ่ขึ้นจะสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของภาพที่ทับซ้อนกันน้อยกว่าภาพขนาดเล็ก

การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพโดยใช้ Hough Transform และ Phase Correlation ความถูกต้องขึ้นอยู่กับรายละเอียดภาพในภาพ เทคนิคการทำ Edge Detection ก่อนการเข้า Hough Transform และการเลือกค่า Threshold ของการทำ Hough Transform โดยหากภาพมีรายละเอียดเล็กน้อยภายในภาพค่อนข้างมาก ผลการทดลองที่ได้อาจจะมีความผิดพลาดมาก ในการเก็บค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้จะเก็บค่ามากที่สุด 3 ลำดับ แล้วจึงนำค่าทั้ง 3 มาเลือกค่าที่เหมาะสมอีกครั้ง การเลือกใช้ค่า Threshold ของ Hough Transform สามารถเพิ่มความถูกต้องให้กับผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมได้หากเลือกใช้ค่าที่เหมาะสม

เทคนิคในการทำ Edge Detection ก่อนการเข้า Hough Transform นั้นการใช้ Canny Edge Detector จะให้ผลของภาพของขอบที่มีคุณภาพสูงกว่าการใช้องค์ประกอบความถี่สูงของภาพ Wavelet อย่างมาก ซึ่งส่งผลให้ผลการทดลองการหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยเฉพาะในภาพที่มีรายละเอียดเล็กๆ น้อยๆ มากภายในภาพ การใช้วิธีหาขอบด้วย Wavelet Transform จะทำให้ผลการทดลองผิดพลาด ในกรณีนี้จึงควรใช้ Canny Edge Detector ในการหาขอบของภาพแทน แต่สำหรับภาพที่มีรายละเอียดเล็กน้อย มีเส้นหลักเด่นชัด การใช้องค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet แทนการหาขอบก็จะให้ผลการทดลองที่ถูกต้อง

บางกรณีที่ภาพมีรายละเอียดค่อนข้างมาก แม้การใช้ Canny Detector ทำการหาขอบของภาพ แต่ผลการทดลองที่ได้ก็ยังมีผิดพลาด ในกรณีนี้เราจะใช้ทฤษฎี Median Low Pass Filter เข้ามาช่วยในการเบลอภาพ เพื่อให้รายละเอียดเล็กน้อยๆ ในภาพนั้นดูจางลง ให้เหลือเพียงเส้นหลักๆ ในภาพ และยังเป็นการช่วยลดผลของ Noise ในภาพลงด้วย ซึ่งเมื่อใช้ Low Pass Filter แล้ว ผลการทดลองที่ได้จะมีความถูกต้องมากขึ้น สำหรับขนาดของ Window ในการทำ Median LPF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากเลือกขนาด Window เล็กเกินไปจะทำให้ผลลัพธ์ไม่ต่างจากการไม่ทำ Low Pass Filter เนื่องจากภาพตั้งต้นจะไม่แตกต่างจากภาพเดิม แต่หากใช้ Window ขนาดใหญ่เกินไป จะทำให้ผลการทดลองผิดพลาดได้ เนื่องจากเส้นหลักๆ ในภาพอาจจะถูกเบลอหายไป

สำหรับเวลาในการประมวลผลการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง ในกรณีที่ภาพมีขนาดใหญ่ขึ้น จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการประมวลผลจะมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอาจไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง การใช้ Wavelet Transform ในการลดขนาดของข้อมูลลง จะช่วยลดเวลาในการประมวลผลลงได้อย่างมากต่อ 1 ชั้นของการทำ Wavelet Transform แต่การทำ Wavelet Transform เพื่อลดขนาดของภาพ และเวลาในการประมวลผลลง จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองมากขึ้นต่อ 1 ชั้นของการทำ Wavelet Transform เช่นกัน ดังนั้นการพิจารณาจำนวนชั้นของ Wavelet Transform ที่เหมาะสมสำหรับภาพขนาดต่างๆ นั้นเป็นสิ่งที่จำเป็น และในกรณีที่ภาพมีขนาดเล็ก ใช้เวลาในการประมวลผลน้อย การใช้ และไม่ใช่ Wavelet Transform ช่วยในกระบวนการไม่ทำให้เวลาการประมวลผลแตกต่างกันมากนัก ในกรณีนี้อาจไม่จำเป็นต้องใช้ Wavelet Transform เข้ามาช่วยในกระบวนการทำงาน

เวลาในการประมวลผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ จะมากกว่าการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง เนื่องจากมีขั้นตอนมากกว่า การใช้ Wavelet Transform ช่วยลดขนาดของภาพจะทำให้เวลาในกระบวนการประมวลผลลดลง นอกจากนี้ยังสามารถใช้องค์ประกอบความถี่สูงแทนการทำการหาขอบของภาพได้ แต่คุณภาพของการทำการหาขอบจะต่ำกว่าการใช้ Canny Edge Detector อย่างมาก ดังนั้นในกรณีที่ภาพมีขนาดเล็กอยู่แล้วจึง อาจจะตัดขั้นตอนในการทำ Wavelet Transform ออกได้ แต่สำหรับภาพใหญ่ที่มีรายละเอียดค่อนข้างมาก การใช้ Wavelet Transform ลดขนาดของข้อมูลสามารถลดเวลาในการคำนวณลงได้มาก แต่การใช้แทนการหาขอบของภาพอาจไม่เหมาะสม ดังนั้นในกรณีนี้อาจใช้การทำ Canny Edge Detector กับองค์ประกอบ LL ของภาพ Wavelet เพื่อให้คุณภาพของผลการทดลองดีขึ้น

เมื่อได้ค่าการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดแล้ว จะใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดทำการรวมภาพตั้งต้นโดยใช้ทฤษฎี Geometric Transform ในงานวิจัยนี้มีการเก็บค่าการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพไว้ 3 ค่า และใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงมุมทั้ง 3 ค่า หากการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่ได้ อาจเป็นค่าบวก หรือค่าลบ ดังนั้นจะมีการใช้เทคนิคหาความแตกต่างระหว่างภาพหลังจากการรวมภาพ เพื่อตรวจสอบว่าคำตอบใดให้ผลที่ดีที่สุด โดยการหาค่า RMSE ในทุกจุดที่มีการทับซ้อนกันของภาพ ค่า RMSE นี้คือค่าความแตกต่างระหว่างภาพ หากคำตอบที่นำมาใช้วัดค่า RMSE เป็นคำตอบที่ถูกต้อง หรือดีที่สุด จะให้ค่า RMSE มีค่าต่ำที่สุด หากคำนวณค่า RMSE ได้ค่าสูง แสดงว่าคำตอบนั้นเป็นคำตอบที่ผิดพลาด การวัดค่า RMSE ทำให้สามารถจะเลือกคำตอบที่ถูกต้องของการทำการรวมภาพได้โดยไม่ต้องใช้คนเป็นผู้เลือกคำตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อจำกัด และขอบเขตของงานวิจัยนี้

- การใช้เทคนิค Phase Correlation ไม่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นจำนวนเต็มได้ ซึ่งอาจทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากภาพตั้งต้นที่ได้มาจริงนั้น โอกาสที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นจำนวนเต็มพอดีนั้นมีน้อย
- การคำนวณการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งต้องทำการพิจารณาค่าทั้งในกรณีที่มีค่าเป็นบวก และมีค่าเป็นลบ
- การคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพนั้น ค่าที่ถูกต้องอาจจะไม่ใช่ค่าที่มีค่า Correlation สูงสุด จึงต้องพิจารณาค่ารองๆ ลงมาด้วย ในที่นี้จะใช้ 3 ลำดับที่มากที่สุด
- การใช้ Median Low Pass Filter ช่วยให้ผลการทดลองที่ได้มีคุณภาพมากขึ้น แต่ต้องเลือกขนาดของ Window ให้เหมาะสม เพราะการใช้ Window ขนาดเล็กเกินไปย่อมไม่ทำให้ผลแตกต่างจากเดิม แต่หากใช้ Window ขนาดใหญ่เกินไป จะทำให้รายละเอียดหลักๆ ภายในภาพหายไป
- ในกรณีที่ภาพมีรายละเอียดมาก ซับซ้อน จะทำให้ผลการทดลองผิดพลาดแม้จะใช้ Canny Edge Detector ร่วมกับ Low Pass Filter แล้วก็ตาม
- ค่า Threshold ของ Hough Transform นั้นมีผลกับคุณภาพของผลการทดลองที่ได้ แต่เป็นไปในลักษณะที่ไม่มีความสัมพันธ์กัน และค่า Threshold ที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละภาพนั้นต่างกัน การเลือกค่า Threshold ค่าเดียวที่ดีที่สุดสำหรับทุกภาพนั้นไม่สามารถทำได้

6.3 แนวทางในการพัฒนา

- ในงานวิจัยนี้สามารถรองรับได้แก่การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง และการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ สำหรับการหาการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่ การย่อ และขยายขนาดภาพ และการบิด การยืด การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาพ รวมทั้งการเปลี่ยนความเข้มแสงของภาพ จะต้องใช้เทคนิคอื่นเข้ามาช่วย
- Phase Correlation สามารถคำนวณหาได้แก่การเปลี่ยนแปลงในขอบเขตที่เป็นจำนวนเต็ม เทคนิคในการทำ Sub-pixel Registration สามารถนำเข้ามาช่วยในกระบวนการทำงาน เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงถูกต้อง
- ภาพบางภาพไม่จำเป็นต้องผ่าน Low Pass Filter และใช้แค่ Wavelet Transform แทน การหาขอบก็ได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง แต่บางภาพจำเป็นต้องใช้ Low Pass Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วมกับ Canny Edge Detector จึงจะได้ผลที่ถูกต้อง ดังนั้นจึงต้องการเทคนิคในการแยกแยะภาพเพื่อเลือกวิธีการทำงานโดยอัตโนมัติ

- ค่า Threshold ของ Hough ในการทดลองนี้ยังค่อนข้างเป็นปัญหา เนื่องจากค่า Threshold ต่างกัน ย่อมให้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน การเลือกค่า Threshold ของ Hough ให้เหมาะสมกับลักษณะภาพเป็นเรื่องที่ต้องพิจารณา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ton J., Jain A.K., “Registering Landsat images by point matching”, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, vol. 27, no. 5, pp. 642-651, 1989
- [2] Pavlidis I., Papanikolopoulos N.P., “Automatic selection of control points for deformable-model-based target tracking”, *Robotics and Automation, 1996. Proceedings.*, vol. 4, pp. 2915-2920, 1996
- [3] Salgado L., Garcia N., Menendez J.M., Rendon E., “Determination of control point sets for motion description based on motion interpolation accuracy constraints”, *Image Processing, 1999. ICIP 99. Proceedings.*, vol. 3, pp. 709-713, 1999
- [4] Bansal R., Staib L.H., Zhe Chen, Rangarajan A., Knisely J., Nath R., Duncan J.S., “Entropy-based dual-portal-to-3-DCT registration incorporating pixel correlation”, *Medical Imaging, IEEE Transactions*, vol. 22, pp. 29-49, 2003
- [5] Yang-Ming Zhu, Cochoff S.M., “Likelihood maximization approach to image registration”, *Image Processing, IEEE Transactions*, vol. 11, pp. 1417-1426, 2002
- [6] Chalermwat P., El-Ghazawi T., “Multi-resolution image registration using genetics”, *Image Processing, 1999. ICIP 99. Proceedings.*, vol. 2, pp.452-456, 1999
- [7] Averbuch A., Keller Y., “FFT based image registration”, *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2002. Proceedings. (ICASSP '02).*, vol 4, pp. IV-3608 - IV-3611, 2002
- [8] Li Zhongke, Yang Xiaohui, Wu Lenan, “Image registration based on Hough transform and phase correlation”, *Neural Networks and Signal Processing, 2003. Proceedings of the 2003*, vol. 2, pp. 956-959, 2003
- [9] Mankun Xu, Xijian Ping, “An improved fast Fourier transform in polar coordinate system”, *Intelligent Transportation Systems, 2003. Proceedings.* vol. 2, pp. 1735-1739, 2003
- [10] Jeungtae Kim and Jeffrey A.Fessler, “Image registration using robust correlation”, *IEEE International Symposium*, Pages:353 – 356, 2002
- [11] A.Kadyrov and M.Petrou, “Fast Registration for 2D Images : The Clock Algorithm”, 2003 *International Conference*, Pages:II - 715-18 vol.3, 2003
- [12] Jacqueline Le Moigne and James A.Smith, “Image registration and fusion for NASA remotely sensed imagery”, *Information Fusion, Third International Conference on*

Volume: 1, Pages:TUB3/24 - TUB3/31 vol.1, 2000

- [13] Yalin Xiong and Ken Turkowski, "Registration, Calibration and Blending in Creating High Quality Panoramas", 1999
- [14] B.Srinivasa Reddy and B.N. Chatterji, "An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration", IEEE Transactions on Image Processing, Volume 5, No.8, Pages 1266-1271, 1996
- [15] L.M.G. Fonseca and C.S. Kenney, "Control point assessment for image registration", Computer Graphics and Image Processing, Pages:125 – 132, 1999
- [16] Minghui Xia and Bede Liu, "Image registration by Super-curves", Image Processing, IEEE Transactions on, Volume: 13, Pages:720 – 732, 2004
- [17] Jean E.Vuillemin, "Fast linear Hough transform", Application Specific Array Processors, Pages: 1-9, 1994.
- [18] Rafael C. Gonzales, Richard E. Woods, "Digital Image Processing", Prentice Hall, 2002
- [19] J.R. Parker, "Algorithm for Image Processing and Computer Vision", Wiley Computer Publishing, 1997
- [20] Roy A. Plastock, Gordon Kalley, "Theory and Problems of Computer Graphics", McGraw Hill, 1986

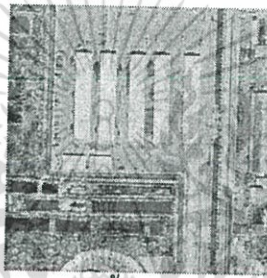


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ

การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ จะทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้เทคนิค Canny Edge Detector และการรวมองค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform โดยจะทำการทดลองปรับค่า Threshold ของการทำ Hough Transform และปรับค่าขนาด Window ของการทำ Median Low Pass Filter เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการทำ Image Registration การทดลองปรับค่า Threshold ของ Hough Transform กับภาพที่ ก.1 แสดงในตารางที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ภาพตั้งต้นในการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมกับภาพตัวอย่างดังรูปที่ ก.1

$\Delta\theta$	Threshold = 40						Threshold = 45						Threshold = 50					
	Wavelet			Canny Detector			Wavelet			Canny Detector			Wavelet			Canny Detector		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0	10	7	10	9	7	0	11	343	10	190	11	0	10	2	10	190	9
20	0	340	20	20	200	21	0	20	359	20	200	290	0	20	355	20	200	110
30	0	7	30	30	300	210	0	27	29	30	210	29	0	5	30	210	30	300
40	0	40	311	40	220	219	0	39	270	40	221	220	0	39	11	40	220	310
50	0	354	31	50	142	322	0	347	50	45	225	135	0	37	8	225	45	135
60	0	90	13	240	60	331	0	355	357	240	60	331	0	342	341	330	331	151
70	0	334	357	70	250	251	0	90	70	70	250	249	0	90	4	70	250	340
80	0	4	337	80	351	81	0	79	22	80	260	81	0	13	35	80	260	350
90	0	90	270	90	270	89	90	91	270	90	270	0	0	90	92	90	270	180
100	0	90	11	100	280	99	0	100	18	100	99	10	0	346	100	100	280	10
110	90	270	0	110	290	109	90	0	27	110	290	109	13	0	180	110	290	109
120	0	358	122	120	30	29	0	90	120	300	120	30	270	120	90	120	300	30
130	0	90	130	130	220	39	0	90	6	130	310	40	0	359	130	130	310	220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ปรึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

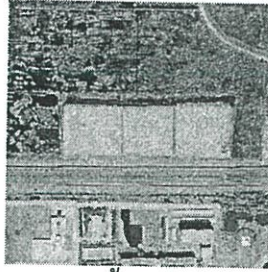
ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

$\Delta\theta$	Threshold = 40						Threshold = 45						Threshold = 50					
	Wavelet			Canny Detector			Wavelet			Canny Detector			Wavelet			Canny Detector		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
140	0	348	3	49	48	139	0	270	90	51	320	230	0	7	44	51	231	320
150	0	270	335	60	331	330	0	270	89	330	150	240	0	90	2	330	150	240
160	0	339	90	340	341	250	0	359	260	340	160	341	0	342	160	340	341	160
170	0	343	4	350	349	170	0	170	348	350	170	349	0	270	90	350	170	351
180	0	180	3	0	180	1	0	180	358	0	180	270	0	90	180	180	0	90
190	0	10	11	10	9	190	190	280	0	10	9	11	190	0	72	10	190	280
200	0	20	6	20	21	200	0	270	20	20	19	21	0	90	20	20	200	199
210	0	59	211	30	29	31	0	30	22	29	30	120	0	270	38	30	210	300
220	0	14	40	40	39	132	0	33	38	40	220	130	38	0	44	220	40	130
230	0	90	270	320	50	49	0	3	90	320	230	50	0	343	48	320	50	230
240	0	270	333	240	241	330	0	8	43	240	60	241	0	15	270	240	60	241
250	0	270	76	251	250	252	0	358	270	70	250	251	0	90	270	250	70	340
260	0	270	67	270	90	271	270	0	4	90	270	271	270	0	323	90	270	180
270	0	270	68	270	90	0	270	0	90	270	90	271	270	0	90	270	90	271
280	0	270	100	280	281	279	0	45	270	280	100	279	0	344	17	280	100	279
290	0	90	109	290	109	111	0	109	270	290	110	289	0	90	314	290	110	20
300	0	346	270	120	30	300	0	301	97	300	120	30	0	270	300	300	120	30
310	0	270	343	310	220	130	0	334	313	130	310	220	0	310	270	130	310	40
320	0	31	21	140	231	50	0	12	324	320	51	232	0	270	320	231	51	230
330	0	17	25	330	332	240	0	16	332	330	240	150	0	7	335	150	330	240
340	0	21	9	340	342	339	0	343	270	340	71	161	0	90	318	160	340	161
350	0	350	270	350	351	352	0	354	349	349	170	350	0	357	351	170	350	260

P1, P2 และ P3 คือตำแหน่งที่มีค่า Correlation สูงที่สุดเป็นลำดับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองปรับค่า Hough Transform Threshold กับภาพที่ ก.2 แสดงในตารางที่ ก.2



รูปที่ ก.2 ภาพตั้งต้นในการทดลอง

ตารางที่ ก.2 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมกับภาพตัวอย่างดังรูปที่ ก.2

$\Delta\theta$	Threshold = 40						Threshold = 45						Threshold = 50					
	Wavelet			Canny Detector			Wavelet			Canny Detector			Wavelet			Canny Detector		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0	10	355	11	10	12	0	9	270	10	9	11	0	10	90	10	11	9
20	0	18	12	23	21	20	0	7	20	21	20	22	0	20	351	20	22	21
30	0	270	33	30	28	32	0	31	358	29	30	31	0	30	11	29	30	211
40	0	3	331	219	221	220	0	335	270	220	219	39	0	348	41	219	39	220
50	0	90	52	230	50	231	0	11	356	230	50	49	0	353	355	51	49	50
60	0	7	352	238	240	241	0	352	1	240	241	238	0	90	24	60	240	239
70	0	90	303	249	250	251	0	352	349	249	250	252	0	90	332	249	250	69
80	0	17	27	261	260	259	0	79	90	259	261	260	0	5	17	259	261	260
90	0	90	270	270	271	90	0	90	355	270	271	90	14	0	90	91	270	90
100	0	100	326	281	280	279	0	355	100	279	280	282	0	100	4	282	279	281
110	0	90	39	291	290	289	0	110	341	290	289	291	0	109	110	290	289	110
120	0	270	300	300	301	299	0	123	120	300	301	299	0	3	90	301	300	121
130	0	350	270	311	309	310	0	270	1	129	130	311	0	11	33	130	310	129
140	0	270	329	320	139	321	0	6	90	320	321	318	0	15	270	321	319	140
150	0	355	358	332	329	331	0	12	340	332	330	328	0	8	348	330	329	331
160	0	90	63	339	340	341	0	8	356	339	340	338	0	355	344	339	338	340
170	0	357	347	349	351	347	0	355	25	350	351	349	0	18	356	351	350	349
180	0	180	357	0	357	1	0	270	180	0	359	1	0	29	37	0	180	1
190	0	10	337	11	8	12	0	10	190	12	11	10	0	90	357	11	12	9
200	0	180	90	21	20	19	0	90	20	21	20	19	0	9	279	21	19	20
210	0	90	270	31	30	32	0	30	347	31	30	32	0	3	22	30	32	31
220	0	90	356	43	39	220	0	4	270	220	40	41	0	11	209	221	220	222

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นได้

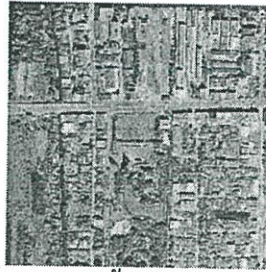
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

$\Delta\theta$	Threshold = 40						Threshold = 45						Threshold = 50					
	Wavelet			Canny Detector			Wavelet			Canny Detector			Wavelet			Canny Detector		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
230	0	90	54	49	50	230	0	357	22	230	50	49	0	334	328	50	49	231
240	0	270	180	61	240	242	0	349	333	240	241	59	0	358	5	240	241	61
250	0	357	354	69	249	252	0	353	59	252	249	251	0	270	332	252	250	69
260	0	90	315	260	261	259	0	8	270	260	259	261	0	90	357	260	259	261
270	0	90	270	270	271	269	0	16	270	270	271	269	0	90	85	270	269	271
280	0	270	5	280	279	281	0	6	15	280	279	281	0	270	39	280	279	281
290	0	329	90	291	290	289	0	357	335	290	291	289	0	10	6	291	290	289
300	0	356	90	300	299	298	0	270	323	301	302	299	0	12	51	299	301	298
310	0	90	352	310	309	308	0	270	357	310	309	311	0	3	337	309	310	131
320	0	270	8	319	321	320	0	79	38	320	319	321	0	356	31	320	319	321
330	0	5	329	330	329	331	0	355	2	329	330	150	0	2	90	329	331	330
340	0	90	270	338	339	340	0	350	356	339	341	340	0	340	357	339	340	338
350	0	351	350	350	349	348	0	358	353	349	350	351	0	355	350	350	349	351

P1, P2 และ P3 คือตำแหน่งที่มีค่า Correlation สูงที่สุดเป็นลำดับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

การทดลองปรับค่า Hough Transform Threshold กับภาพที่ ก.3 แสดงในตารางที่ ก.3



รูปที่ ก.3 ภาพตั้งต้นในการทดลอง

ตารางที่ ก.3 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมกับภาพตัวอย่างดังรูปที่ ก.3

$\Delta\theta$	Threshold = 40						Threshold = 45						Threshold = 50					
	Wavelet			Canny Detector			Wavelet			Canny Detector			Wavelet			Canny Detector		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0	270	2	0	9	10	0	10	5	9	7	10	0	6	90	0	334	10
20	0	5	90	0	2	18	0	16	90	0	20	10	0	5	14	0	18	15
30	0	3	90	0	5	353	0	352	270	0	8	90	0	18	31	0	358	339
40	0	355	3	0	20	19	0	270	333	12	0	13	0	4	270	5	0	22
50	0	270	353	0	26	347	0	6	259	0	15	20	0	2	90	0	345	359
60	0	270	354	270	2	320	0	270	90	0	40	328	0	270	90	0	2	336
70	0	90	3	23	10	0	0	90	336	10	0	41	0	355	270	351	4	22
80	0	338	270	0	18	9	0	265	347	0	353	292	0	3	270	0	90	33
90	0	270	90	0	6	90	0	90	270	270	6	0	0	18	90	90	270	0
100	0	270	90	0	12	9	0	4	270	0	98	111	0	13	90	331	0	90
110	0	5	26	0	33	17	0	90	270	0	11	34	0	90	270	0	295	333
120	0	90	270	0	351	9	0	90	2	358	0	359	0	270	34	3	0	321
130	0	90	270	0	348	345	0	345	8	0	33	3	0	90	270	10	52	26
140	0	29	270	0	30	332	0	270	352	0	6	337	0	79	9	0	4	318
150	0	270	344	0	325	66	0	90	348	0	353	15	0	90	270	0	52	355
160	0	270	90	0	1	8	0	270	90	0	341	331	0	270	90	357	0	1
170	0	90	2	0	5	35	0	270	90	351	64	47	0	348	335	0	351	311
180	0	270	90	0	90	270	0	359	90	0	106	343	0	8	90	16	0	31
190	0	270	90	0	11	13	0	270	7	0	359	355	0	337	90	342	0	340
200	0	90	349	0	1	26	0	90	349	0	37	10	0	90	332	0	29	280
210	0	4	270	0	6	331	0	7	16	0	4	7	0	90	341	0	349	29
220	0	270	90	23	0	328	0	354	344	3	0	337	0	28	17	7	6	344

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานวิจัยที่จัดทำขึ้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

$\Delta\theta$	Threshold = 40						Threshold = 45						Threshold = 50					
	Wavelet			Canny Detector			Wavelet			Canny Detector			Wavelet			Canny Detector		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
230	0	270	345	0	340	339	0	324	346	8	0	309	0	353	343	0	328	346
240	0	90	12	0	4	13	0	4	270	0	3	356	0	270	359	0	106	339
250	0	270	356	0	358	347	0	270	346	0	358	347	0	270	7	0	10	6
260	0	270	90	0	6	347	0	270	267	0	353	32	0	270	339	0	270	90
270	0	270	90	0	270	357	0	270	354	0	348	19	0	270	19	0	347	315
280	0	270	15	0	345	292	0	90	341	0	20	344	0	270	5	308	20	97
290	0	270	90	0	333	270	0	270	90	4	0	319	0	351	339	90	95	68
300	0	270	90	22	358	0	0	344	270	0	13	351	0	357	270	0	270	357
310	0	270	7	0	11	23	0	6	270	1	341	15	0	270	90	12	0	354
320	0	355	90	0	9	342	0	54	270	0	343	27	0	3	270	90	345	14
330	0	270	90	0	353	270	0	270	12	0	90	15	0	270	332	0	353	356
340	0	270	350	0	359	12	0	90	3	18	24	3	0	356	12	0	62	353
350	0	90	270	5	0	54	0	2	353	0	343	345	0	353	331	0	356	349

P1, P2 และ P3 คือตำแหน่งที่มีค่า Correlation สูงที่สุดเป็นลำดับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

การทดลองปรับขนาดของ Window ของการทำ Hough Transform กับภาพตั้งต้นที่ ก.1 แสดงในตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.4 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมกับภาพตัวอย่างในรูปที่ ก.1

$\Delta\theta$	No Filter			Median LPF 3x3			Median LPF 5x5			Median LPF 7x7		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0	11	343	10	0	9	11	9	10	10	9	11
20	0	20	359	0	20	8	19	21	20	20	19	21
30	0	27	29	0	211	30	301	300	29	31	32	30
40	0	39	270	41	0	353	311	307	308	39	42	43
50	0	347	50	0	50	24	45	318	46	50	49	48
60	0	355	357	0	320	24	332	330	328	60	61	238
70	0	90	70	340	2	337	340	71	338	71	70	68
80	0	79	22	0	348	2	352	349	351	81	352	80
90	90	91	270	0	2	90	90	89	91	90	91	89
100	0	100	18	0	348	100	282	100	101	99	98	100
110	90	0	27	0	16	6	289	18	288	110	289	109
120	0	90	120	0	28	120	299	300	298	119	121	120
130	0	90	6	0	33	358	310	314	309	310	313	312
140	0	270	90	23	0	13	322	319	323	317	323	318
150	0	270	89	0	26	329	329	331	327	327	328	329
160	0	359	260	0	27	2	340	341	339	340	342	339
170	0	170	348	33	0	7	345	349	350	350	349	169
180	0	180	358	0	90	180	0	359	358	359	0	1
190	190	280	0	0	325	10	11	10	7	10	11	9
200	0	270	20	0	21	90	19	20	17	20	19	21
210	0	30	22	30	0	358	29	26	32	29	30	27
220	0	33	38	0	30	40	41	42	45	40	0	221
230	0	3	90	230	0	353	0	315	45	49	227	51
240	0	8	43	0	8	90	331	240	329	60	61	240
250	0	358	270	338	0	356	342	337	341	70	71	250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

$\Delta\theta$	No Filter			Median LPF 3x3			Median LPF 5x5			Median LPF 7x7		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
260	270	0	4	0	349	5	270	0	3	90	91	271
270	270	0	90	0	270	90	270	90	271	270	271	90
280	0	45	270	0	350	280	280	279	100	100	99	277
290	0	109	270	0	290	341	290	111	21	111	109	110
300	0	301	97	0	1	342	117	120	119	121	120	117
310	0	334	313	3	0	4	130	307	127	131	128	129
320	0	12	324	0	349	1	139	136	49	136	139	138
330	0	16	332	0	329	353	330	331	329	332	330	329
340	0	343	270	0	340	169	337	338	336	341	340	339
350	0	354	349	352	349	0	350	349	346	350	349	351

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองปรับขนาดของ Window ของการทำ Hough Transform กับภาพตั้งต้นที่ ก.2 แสดงในตารางที่ ก.5

ตารางที่ ก.5 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมกับภาพตัวอย่างในรูปที่ ก.2

$\Delta\theta$	No Filter			Median LPF 3x3			Median LPF 5x5			Median LPF 7x7		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0	9	270	359	10	22	0	10	358	3	4	7
20	0	7	20	0	20	338	20	14	18	0	8	7
30	0	31	358	0	31	296	29	12	30	0	7	30
40	0	335	270	0	41	23	41	0	40	32	38	28
50	0	11	356	270	0	90	19	0	241	12	22	3
60	0	352	1	358	17	261	334	286	16	53	244	238
70	0	352	349	0	21	12	288	267	241	252	251	245
80	0	79	90	322	320	341	254	288	12	255	268	253
90	0	90	355	270	90	22	90	267	262	267	262	270
100	0	355	100	101	4	102	101	100	90	279	281	271
110	0	110	341	0	112	115	290	292	0	293	289	285
120	0	123	120	90	109	357	290	300	308	298	307	301
130	0	270	1	358	1	3	300	346	302	311	312	297
140	0	6	90	0	16	5	12	323	328	327	326	322
150	0	12	340	0	32	23	17	328	20	330	329	331
160	0	8	356	0	26	339	337	355	342	342	337	339
170	0	355	25	29	0	350	348	352	39	350	348	351
180	0	270	180	0	180	358	0	180	1	353	352	0
190	0	10	190	10	0	36	190	3	14	0	3	8
200	0	90	20	20	354	13	20	16	36	14	3	11
210	0	30	347	0	14	343	30	9	58	25	20	31
220	0	4	270	44	39	40	46	21	67	43	356	41
230	0	357	22	47	50	49	21	42	47	232	50	228
240	0	349	333	0	270	53	28	74	56	59	243	249
250	0	353	59	37	344	313	294	74	258	248	247	251

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

$\Delta\theta$	No Filter			Median LPF 3x3			Median LPF 5x5			Median LPF 7x7		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
260	0	8	270	0	180	344	43	334	258	259	256	251
270	0	16	270	62	90	0	273	270	357	270	262	260
280	0	6	15	105	17	301	276	279	277	281	269	272
290	0	357	335	36	37	282	299	290	301	290	288	284
300	0	270	323	0	14	4	337	301	312	287	286	297
310	0	270	357	0	346	310	341	301	0	311	305	300
320	0	79	38	356	330	315	20	0	324	313	321	319
330	0	355	2	332	359	49	341	332	349	329	330	331
340	0	350	356	0	359	356	0	347	339	336	339	340
350	0	358	353	355	0	356	355	352	350	353	351	355

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองปรับขนาดของ Window ของการทำ Hough Transform กับภาพตั้งต้นที่ ก.3 แสดงในตารางที่ ก.6

ตารางที่ ก.6 ผลการหาการเปลี่ยนแปลงมุมกับภาพตัวอย่างในรูปที่ ก.3

$\Delta\theta$	No Filter			Median LPF 3x3			Median LPF 5x5			Median LPF 7x7		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10	0	10	5	0	13	10	8	0	5	8	11	10
20	0	16	90	0	4	24	0	335	18	15	27	22
30	0	352	270	0	353	19	72	3	134	18	33	11
40	0	270	333	30	17	357	18	7	20	26	23	15
50	0	6	259	0	337	353	0	344	23	13	315	311
60	0	270	90	0	358	349	343	0	9	42	43	44
70	0	90	336	0	12	342	0	266	344	337	354	347
80	0	265	347	0	319	16	6	346	8	356	352	349
90	0	90	270	0	8	308	0	5	90	266	271	267
100	0	4	270	0	355	3	342	2	335	255	274	352
110	0	90	270	0	348	12	296	342	345	291	289	292
120	0	90	2	0	26	322	346	315	299	313	291	312
130	0	345	8	0	345	4	314	305	228	322	300	291
140	0	270	352	8	0	2	330	9	315	308	306	329
150	0	90	348	0	90	11	322	329	348	313	333	330
160	0	270	90	0	270	355	10	343	0	339	331	330
170	0	270	90	0	352	357	0	332	310	269	349	326
180	0	359	90	0	5	20	0	2	3	359	177	178
190	0	270	7	0	10	15	354	353	13	348	343	357
200	0	90	349	5	0	17	225	109	321	357	8	6
210	0	7	16	0	353	90	304	317	284	11	206	197
220	0	354	344	0	337	353	0	37	26	227	13	3
230	0	324	346	0	345	335	318	315	347	232	223	237
240	0	4	270	0	350	353	339	0	280	311	308	242
250	0	270	346	0	330	356	350	355	357	249	311	343

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการทำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

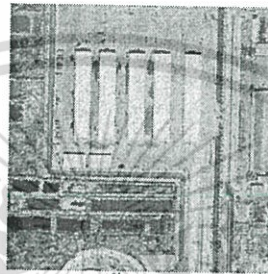
$\Delta\theta$	No Filter			Median LPF 3x3			Median LPF 5x5			Median LPF 7x7		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
260	0	270	267	0	357	346	0	27	337	350	349	347
270	0	270	354	0	311	8	0	345	353	270	266	265
280	0	90	341	0	6	348	1	313	353	282	279	280
290	0	270	90	0	7	270	0	6	352	292	297	290
300	0	344	270	0	358	90	23	22	17	312	307	311
310	0	6	270	0	3	1	0	354	356	318	314	340
320	0	54	270	0	9	346	26	333	337	329	313	314
330	0	270	12	0	1	357	10	339	333	332	336	337
340	0	90	3	0	355	319	0	340	47	223	349	246
350	0	2	353	0	353	350	354	14	348	357	352	353

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลการหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง

การทดลองนี้จะทำการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง โดยใช้ภาพตั้งต้นที่ ข.1 ซึ่งมีขนาด 300x300 พิกเซล ทำการตัดภาพโดยเลื่อนตำแหน่งการตัดภาพเป็นช่วงๆ ช่วงละ 15 พิกเซล ตั้งแต่ 0 ถึง 270 ทั้งในแกน x และ y ดังแสดงในตารางที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ภาพตั้งต้นในการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างค่าการคำนวณการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
0	0	0	0	0	0	0	0
0	15	0	15	0	14	0	12
0	30	0	30	0	30	0	28
0	45	0	45	0	44	0	44
0	60	0	60	0	60	0	60
0	75	0	75	0	74	0	72
0	90	0	90	0	90	0	88
0	105	0	105	0	104	0	104
0	120	0	120	0	120	0	120
0	135	0	135	0	134	0	132
0	150	0	150	0	150	0	148
0	165	0	165	0	164	0	164
0	180	0	180	0	180	0	180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในห้องเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
0	195	0	195	0	194	0	192
0	210	0	210	0	210	0	208
0	225	0	225	0	224	0	224
0	240	0	240	0	240	0	240
0	255	0	255	0	254	0	252
0	270	0	270	0	270	0	268
0	-15	0	-15	0	-16	0	-16
0	-30	0	-30	0	-30	0	-32
0	-45	0	-45	0	-46	0	-48
0	-60	0	-60	0	-60	0	-60
0	-75	0	-75	0	-76	0	-76
0	-90	0	-90	0	-90	0	-92
0	-105	0	-105	0	-106	0	-108
0	-120	0	-120	0	-120	0	-120
0	-135	0	-135	0	-136	0	-136
0	-150	0	-150	0	-150	0	-152
0	-165	0	-165	0	-166	0	-168
0	-180	0	-180	0	-180	0	-180
0	-195	0	-195	0	-196	0	-196
0	-210	0	-210	0	-210	0	-212
0	-225	0	-225	0	-226	0	-228
0	-240	0	-240	0	-240	0	-240
0	-255	0	-255	0	-256	0	-256
0	-270	0	-270	0	-270	0	-272
15	0	15	0	14	0	12	0
15	15	15	15	14	14	12	12
15	30	15	30	14	30	12	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
15	45	15	45	14	44	12	44
15	60	15	60	14	60	12	60
15	75	15	75	14	74	12	72
15	90	15	90	14	90	12	88
15	105	15	105	14	104	12	102
15	120	15	120	14	120	12	120
15	135	15	135	14	134	12	132
15	150	15	150	14	150	12	148
15	165	15	165	14	164	12	164
15	180	15	180	14	180	12	180
15	195	15	195	14	194	12	192
15	210	15	210	14	210	12	208
15	225	15	225	14	224	12	224
15	240	15	240	14	240	12	240
15	255	15	255	14	254	12	252
15	270	15	270	14	270	12	268
15	-15	15	-15	14	-16	12	-16
15	-30	15	-30	14	-30	12	-32
15	-45	15	-45	14	-46	12	-48
15	-60	15	-60	14	-60	12	-60
15	-75	15	-75	14	-76	12	-76
15	-90	15	-90	14	-90	12	-92
15	-105	15	-105	14	-106	12	-108
15	-120	15	-120	14	-120	12	-120
15	-135	15	-135	14	-136	12	-136
15	-150	15	-150	14	-150	12	-152
15	-165	15	-165	14	-166	12	-168

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
15	-180	15	-180	14	-180	12	-180
15	-195	15	-195	14	-196	12	-196
15	-210	15	-210	14	-210	12	-212
15	-225	15	-225	14	-226	12	-228
15	-240	15	-240	14	-240	12	-240
15	-255	15	-255	14	-256	12	-256
15	-270	15	-270	14	-270	12	-272
30	0	30	0	30	0	28	0
30	15	30	15	30	14	28	12
30	30	30	30	30	30	28	28
30	45	30	45	30	44	28	44
30	60	30	60	30	60	28	60
30	75	30	75	30	74	28	72
30	90	30	90	30	90	28	88
30	105	30	105	30	104	28	102
30	120	30	120	30	120	28	120
30	135	30	135	30	134	28	132
30	150	30	150	30	150	28	148
30	165	30	165	30	164	28	164
30	180	30	180	30	180	28	180
30	195	30	195	30	194	28	192
30	210	30	210	30	210	28	208
30	225	30	225	30	224	28	224
30	240	30	240	30	240	28	240
30	255	30	255	30	254	28	252
30	270	30	270	30	270	28	268
30	-15	30	-15	30	-16	28	-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
30	-30	30	-30	30	-30	28	-32
30	-45	30	-45	30	-46	28	-48
30	-60	30	-60	30	-60	28	-60
30	-75	30	-75	30	-76	28	-76
30	-90	30	-90	30	-90	28	-92
30	-105	30	-105	30	-106	28	-108
30	-120	30	-120	30	-120	28	-120
30	-135	30	-135	30	-136	28	-136
30	-150	30	-150	30	-150	28	-152
30	-165	30	-165	30	-166	28	-168
30	-180	30	-180	30	-180	28	-180
30	-195	30	-195	30	-196	28	-196
30	-210	30	-210	30	-210	28	-212
30	-225	30	-225	30	-226	28	-228
30	-240	30	-240	30	-240	28	-240
30	-255	30	-255	30	-256	28	-256
30	-270	30	-270	30	-270	28	-272
45	0	45	0	44	0	44	0
45	15	45	15	44	14	44	12
45	30	45	30	44	30	44	28
45	45	45	45	44	44	44	44
45	60	45	60	44	60	44	60
45	75	45	75	44	74	44	72
45	90	45	90	44	90	44	88
45	105	45	105	44	104	44	102
45	120	45	120	44	120	44	120
45	135	45	135	44	134	44	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
45	150	45	150	44	150	44	148
45	165	45	165	44	164	44	164
45	180	45	180	44	180	44	180
45	195	45	195	44	194	44	192
45	210	45	210	44	210	44	208
45	225	45	225	44	224	44	224
45	240	45	240	44	240	44	240
45	255	45	255	44	254	44	252
45	270	45	270	44	270	44	268
45	-15	45	-15	44	-16	44	-16
45	-30	45	-30	44	-30	44	-32
45	-45	45	-45	44	-46	44	-48
45	-60	45	-60	44	-60	44	-60
45	-75	45	-75	44	-76	44	-76
45	-90	45	-90	44	-90	44	-92
45	-105	45	-105	44	-106	44	-108
45	-120	45	-120	44	-120	44	-120
45	-135	45	-135	44	-136	44	-136
45	-150	45	-150	44	-150	44	-152
45	-165	45	-165	44	-166	44	-168
45	-180	45	-180	44	-180	44	-180
45	-195	45	-195	44	-196	44	-196
45	-210	45	-210	44	-210	44	-212
45	-225	45	-225	44	-226	44	-228
45	-240	45	-240	44	-240	44	-240
45	-255	45	-255	44	-256	44	-256
45	-270	45	-270	44	-270	44	-272

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
60	0	60	0	60	0	60	0
60	15	60	15	60	14	60	12
60	30	60	30	60	30	60	28
60	45	60	45	60	44	60	44
60	60	60	60	60	60	60	60
60	75	60	75	60	74	60	72
60	90	60	90	60	90	60	88
60	105	60	105	60	104	60	102
60	120	60	120	60	120	60	120
60	135	60	135	60	134	60	132
60	150	60	150	60	150	60	148
60	165	60	165	60	164	60	164
60	180	60	180	60	180	60	180
60	195	60	195	60	194	60	192
60	210	60	210	60	210	60	208
60	225	60	225	60	224	60	224
60	240	60	240	60	240	60	240
60	255	60	255	60	254	60	252
60	270	60	270	60	270	60	268
60	-15	60	-15	60	-16	60	-16
60	-30	60	-30	60	-30	60	-32
60	-45	60	-45	60	-46	60	-48
60	-60	60	-60	60	-60	60	-60
60	-75	60	-75	60	-76	60	-76
60	-90	60	-90	60	-90	60	-92
60	-105	60	-105	60	-106	60	-108
60	-120	60	-120	60	-120	60	-120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
60	-135	60	-135	60	-136	60	-136
60	-150	60	-150	60	-150	60	-152
60	-165	60	-165	60	-166	60	-168
60	-180	60	-180	60	-180	60	-180
60	-195	60	-195	60	-196	60	-196
60	-210	60	-210	60	-210	60	-212
60	-225	60	-225	60	-226	60	-228
60	-240	60	-240	60	-240	60	-240
60	-255	60	-255	60	-256	60	-256
60	-270	60	-270	60	-270	60	-272
75	0	75	0	74	0	72	0
75	15	75	15	74	14	72	12
75	30	75	30	74	30	72	28
75	45	75	45	74	44	72	44
75	60	75	60	74	60	72	60
75	75	75	75	74	74	72	72
75	90	75	90	74	90	72	88
75	105	75	105	74	104	72	102
75	120	75	120	74	120	72	120
75	135	75	135	74	134	72	132
75	150	75	150	74	150	72	148
75	165	75	165	74	164	72	164
75	180	75	180	74	180	72	180
75	195	75	195	74	194	72	192
75	210	75	210	74	210	72	208
75	225	75	225	74	224	72	224
75	240	75	240	74	240	72	240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
75	255	75	255	74	254	72	252
75	270	75	270	74	270	72	268
75	-15	75	-15	74	-16	72	-16
75	-30	75	-30	74	-30	72	-32
75	-45	75	-45	74	-46	72	-48
75	-60	75	-60	74	-60	72	-60
75	-75	75	-75	74	-76	72	-76
75	-90	75	-90	74	-90	72	-92
75	-105	75	-105	74	-106	72	-108
75	-120	75	-120	74	-120	72	-120
75	-135	75	-135	74	-136	72	-136
75	-150	75	-150	74	-150	72	-152
75	-165	75	-165	74	-166	72	-168
75	-180	75	-180	74	-180	72	-180
75	-195	75	-195	74	-196	72	-196
75	-210	75	-210	74	-210	72	-212
75	-225	75	-225	74	-226	72	-228
75	-240	75	-240	74	-240	72	-240
75	-255	75	-255	74	-256	72	-256
75	-270	75	-270	74	-270	72	-272
90	0	90	0	90	0	88	0
90	15	90	15	90	14	88	12
90	30	90	30	90	30	88	28
90	45	90	45	90	44	88	44
90	60	90	60	90	60	88	60
90	75	90	75	90	74	88	72
90	90	90	90	90	90	88	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
90	105	90	105	90	104	88	102
90	120	90	120	90	120	88	120
90	135	90	135	90	134	88	132
90	150	90	150	90	150	88	148
90	165	90	165	90	164	88	164
90	180	90	180	90	180	88	180
90	195	90	195	90	194	88	192
90	210	90	210	90	210	88	208
90	225	90	225	90	224	88	224
90	240	90	240	90	240	88	240
90	255	90	255	90	254	88	252
90	270	90	270	90	270	88	268
90	-15	90	-15	90	-16	88	-16
90	-30	90	-30	90	-30	88	-32
90	-45	90	-45	90	-46	88	-48
90	-60	90	-60	90	-60	88	-60
90	-75	90	-75	90	-76	88	-76
90	-90	90	-90	90	-90	88	-92
90	-105	90	-105	90	-106	88	-108
90	-120	90	-120	90	-120	88	-120
90	-135	90	-135	90	-136	88	-136
90	-150	90	-150	90	-150	88	-152
90	-165	90	-165	90	-166	88	-168
90	-180	90	-180	90	-180	88	-180
90	-195	90	-195	90	-196	88	-196
90	-210	90	-210	90	-210	88	-212
90	-225	90	-225	90	-226	88	-228

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
90	-240	90	-240	90	-240	88	-240
90	-255	90	-255	90	-256	88	-256
90	-270	90	-270	90	-270	88	-272
105	0	105	0	104	0	102	0
105	15	105	15	104	14	102	12
105	30	105	30	104	30	102	28
105	45	105	45	104	44	102	44
105	60	105	60	104	60	102	60
105	75	105	75	104	74	102	72
105	90	105	90	104	90	102	88
105	105	105	105	104	104	102	102
105	120	105	120	104	120	102	120
105	135	105	135	104	134	102	132
105	150	105	150	104	150	102	148
105	165	105	165	104	164	102	164
105	180	105	180	104	180	102	180
105	195	105	195	104	194	102	192
105	210	105	210	104	210	102	208
105	225	105	225	104	224	102	224
105	240	105	240	104	240	102	240
105	255	105	255	104	254	102	252
105	270	105	270	104	270	102	268
105	-15	105	-15	104	-16	102	-16
105	-30	105	-30	104	-30	102	-32
105	-45	105	-45	104	-46	102	-48
105	-60	105	-60	104	-60	102	-60
105	-75	105	-75	104	-76	102	-76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
105	-90	105	-90	104	-90	102	-92
105	-105	105	-105	104	-106	102	-108
105	-120	105	-120	104	-120	102	-120
105	-135	105	-135	104	-136	102	-136
105	-150	105	-150	104	-150	102	-152
105	-165	105	-165	104	-166	102	-168
105	-180	105	-180	104	-180	102	-180
105	-195	105	-195	104	-196	102	-196
105	-210	105	-210	104	-210	102	-212
105	-225	105	-225	104	-226	102	-228
105	-240	105	-240	104	-240	102	-240
105	-255	105	-255	104	-256	102	-256
105	-270	105	-270	104	-270	102	-272
120	0	120	0	120	0	120	0
120	15	120	15	120	14	120	12
120	30	120	30	120	30	120	28
120	45	120	45	120	44	120	44
120	60	120	60	120	60	120	60
120	75	120	75	120	74	120	72
120	90	120	90	120	90	120	88
120	105	120	105	120	104	120	102
120	120	120	120	120	120	120	120
120	135	120	135	120	134	120	132
120	150	120	150	120	150	120	148
120	165	120	165	120	164	120	164
120	180	120	180	120	180	120	180
120	195	120	195	120	194	120	192

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในห้องเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
120	210	120	210	120	210	120	208
120	225	120	225	120	224	120	224
120	240	120	240	120	240	120	240
120	255	120	255	120	254	120	252
120	270	120	270	120	270	120	268
120	-15	120	-15	120	-16	120	-16
120	-30	120	-30	120	-30	120	-32
120	-45	120	-45	120	-46	120	-48
120	-60	120	-60	120	-60	120	-60
120	-75	120	-75	120	-76	120	-76
120	-90	120	-90	120	-90	120	-92
120	-105	120	-105	120	-106	120	-108
120	-120	120	-120	120	-120	120	-120
120	-135	120	-135	120	-136	120	-136
120	-150	120	-150	120	-150	120	-152
120	-165	120	-165	120	-166	120	-168
120	-180	120	-180	120	-180	120	-180
120	-195	120	-195	120	-196	120	-196
120	-210	120	-210	120	-210	120	-212
120	-225	120	-225	120	-226	120	-228
120	-240	120	-240	120	-240	120	-240
120	-255	120	-255	120	-256	120	-256
120	-270	120	-270	120	-270	120	-272
135	0	135	0	134	0	132	0
135	15	135	15	134	14	132	12
135	30	135	30	134	30	132	28
135	45	135	45	134	44	132	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
135	60	135	60	134	60	132	60
135	75	135	75	134	74	132	72
135	90	135	90	134	90	132	88
135	105	135	105	134	104	132	102
135	120	135	120	134	120	132	120
135	135	135	135	134	134	132	132
135	150	135	150	134	150	132	148
135	165	135	165	134	164	132	164
135	180	135	180	134	180	132	180
135	195	135	195	134	194	132	192
135	210	135	210	134	210	132	208
135	225	135	225	134	224	132	224
135	240	135	240	134	240	132	240
135	255	135	255	134	254	132	252
135	270	135	270	134	270	132	268
135	-15	135	-15	134	-16	132	-16
135	-30	135	-30	134	-30	132	-32
135	-45	135	-45	134	-46	132	-48
135	-60	135	-60	134	-60	132	-60
135	-75	135	-75	134	-76	132	-76
135	-90	135	-90	134	-90	132	-92
135	-105	135	-105	134	-106	132	-108
135	-120	135	-120	134	-120	132	-120
135	-135	135	-135	134	-136	132	-136
135	-150	135	-150	134	-150	132	-152
135	-165	135	-165	134	-166	132	-168
135	-180	135	-180	134	-180	132	-180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
135	-195	135	-195	134	-196	132	-196
135	-210	135	-210	134	-210	132	-212
135	-225	135	-225	134	-226	132	-228
135	-240	135	-240	134	-240	132	-240
135	-255	135	-255	134	-256	132	-256
135	-270	135	-270	134	-270	132	-272
150	0	150	0	150	0	148	0
150	15	150	15	150	14	148	12
150	30	150	30	150	30	148	28
150	45	150	45	150	44	148	44
150	60	150	60	150	60	148	60
150	75	150	75	150	74	148	72
150	90	150	90	150	90	148	88
150	105	150	105	150	104	148	102
150	120	150	120	150	120	148	120
150	135	150	135	150	134	148	132
150	150	150	150	150	150	148	148
150	165	150	165	150	164	148	164
150	180	150	180	150	180	148	180
150	195	150	195	150	194	148	192
150	210	150	210	150	210	148	208
150	225	150	225	150	224	148	224
150	240	150	240	150	240	148	240
150	255	150	255	150	254	148	252
150	270	150	270	150	270	148	268
150	-15	150	-15	150	-16	148	-16
150	-30	150	-30	150	-30	148	-32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
150	-45	150	-45	150	-46	148	-48
150	-60	150	-60	150	-60	148	-60
150	-75	150	-75	150	-76	148	-76
150	-90	150	-90	150	-90	148	-92
150	-105	150	-105	150	-106	148	-108
150	-120	150	-120	150	-120	148	-120
150	-135	150	-135	150	-136	148	-136
150	-150	150	-150	150	-150	148	-152
150	-165	150	-165	150	-166	148	-168
150	-180	150	-180	150	-180	148	-180
150	-195	150	-195	150	-196	148	-196
150	-210	150	-210	150	-210	148	-212
150	-225	150	-225	150	-226	148	-228
150	-240	150	-240	150	-240	148	-240
150	-255	150	-255	150	-256	148	-256
150	-270	150	-270	150	-270	148	-272
165	0	165	0	164	0	164	0
165	15	165	15	164	14	164	12
165	30	165	30	164	30	164	28
165	45	165	45	164	44	164	44
165	60	165	60	164	60	164	60
165	75	165	75	164	74	164	72
165	90	165	90	164	90	164	88
165	105	165	105	164	104	164	102
165	120	165	120	164	120	164	120
165	135	165	135	164	134	164	132
165	150	165	150	164	150	164	148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในห้องเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
165	165	165	165	164	164	164	164
165	180	165	180	164	180	164	180
165	195	165	195	164	194	164	192
165	210	165	210	164	210	164	208
165	225	165	225	164	224	164	224
165	240	165	240	164	240	164	240
165	255	165	255	164	254	164	252
165	270	165	270	164	270	164	268
165	-15	165	-15	164	-16	164	-16
165	-30	165	-30	164	-30	164	-32
165	-45	165	-45	164	-46	164	-48
165	-60	165	-60	164	-60	164	-60
165	-75	165	-75	164	-76	164	-76
165	-90	165	-90	164	-90	164	-92
165	-105	165	-105	164	-106	164	-108
165	-120	165	-120	164	-120	164	-120
165	-135	165	-135	164	-136	164	-136
165	-150	165	-150	164	-150	164	-152
165	-165	165	-165	164	-166	164	-168
165	-180	165	-180	164	-180	164	-180
165	-195	165	-195	164	-196	164	-196
165	-210	165	-210	164	-210	164	-212
165	-225	165	-225	164	-226	164	-228
165	-240	165	-240	164	-240	164	-240
165	-255	165	-255	164	-256	164	-256
165	-270	165	-270	164	-270	164	-272
180	0	180	0	180	0	180	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
180	15	180	15	180	14	180	12
180	30	180	30	180	30	180	28
180	45	180	45	180	44	180	44
180	60	180	60	180	60	180	60
180	75	180	75	180	74	180	72
180	90	180	90	180	90	180	88
180	105	180	105	180	104	180	102
180	120	180	120	180	120	180	120
180	135	180	135	180	134	180	132
180	150	180	150	180	150	180	148
180	165	180	165	180	164	180	164
180	180	180	180	180	180	180	180
180	195	180	195	180	194	180	192
180	210	180	210	180	210	180	208
180	225	180	225	180	224	180	224
180	240	180	240	180	240	180	240
180	255	180	255	180	254	180	252
180	270	180	270	180	270	180	268
180	-15	180	-15	180	-16	180	-16
180	-30	180	-30	180	-30	180	-32
180	-45	180	-45	180	-46	180	-48
180	-60	180	-60	180	-60	180	-60
180	-75	180	-75	180	-76	180	-76
180	-90	180	-90	180	-90	180	-92
180	-105	180	-105	180	-106	180	-108
180	-120	180	-120	180	-120	180	-120
180	-135	180	-135	180	-136	180	-136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ในเพื่อการศึกษ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
180	-150	180	-150	180	-150	180	-152
180	-165	180	-165	180	-166	180	-168
180	-180	180	-180	180	-180	180	-180
180	-195	180	-195	180	-196	180	-196
180	-210	180	-210	180	-210	180	-212
180	-225	180	-225	180	-226	180	-228
180	-240	180	-240	180	-240	180	-240
180	-255	180	-255	180	-256	180	-256
180	-270	180	-270	180	-270	180	-272
195	0	195	0	194	0	192	0
195	15	195	15	194	14	192	12
195	30	195	30	194	30	192	28
195	45	195	45	194	44	192	44
195	60	195	60	194	60	192	60
195	75	195	75	194	74	192	72
195	90	195	90	194	90	192	88
195	105	195	105	194	104	192	102
195	120	195	120	194	120	192	120
195	135	195	135	194	134	192	132
195	150	195	150	194	150	192	148
195	165	195	165	194	164	192	164
195	180	195	180	194	180	192	180
195	195	195	195	194	194	192	192
195	210	195	210	194	210	192	208
195	225	195	225	194	224	192	224
195	240	195	240	194	240	192	240
195	255	195	255	194	254	192	252

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
195	270	195	270	194	270	192	268
195	-15	195	-15	194	-16	192	-16
195	-30	195	-30	194	-30	192	-32
195	-45	195	-45	194	-46	192	-48
195	-60	195	-60	194	-60	192	-60
195	-75	195	-75	194	-76	192	-76
195	-90	195	-90	194	-90	192	-92
195	-105	195	-105	194	-106	192	-108
195	-120	195	-120	194	-120	192	-120
195	-135	195	-135	194	-136	192	-136
195	-150	195	-150	194	-150	192	-152
195	-165	195	-165	194	-166	192	-168
195	-180	195	-180	194	-180	192	-180
195	-195	195	-195	194	-196	192	-196
195	-210	195	-210	194	-210	192	-212
195	-225	195	-225	194	-226	192	-228
195	-240	195	-240	194	-240	192	-240
195	-255	195	-255	194	-256	192	-256
195	-270	195	-270	194	-270	192	-272
210	0	210	0	210	0	208	0
210	15	210	15	210	14	208	12
210	30	210	30	210	30	208	28
210	45	210	45	210	44	208	44
210	60	210	60	210	60	208	60
210	75	210	75	210	74	208	72
210	90	210	90	210	90	208	88
210	105	210	105	210	104	208	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
210	120	210	120	210	120	208	120
210	135	210	135	210	134	208	132
210	150	210	150	210	150	208	148
210	165	210	165	210	164	208	164
210	180	210	180	210	180	208	180
210	195	210	195	210	194	208	192
210	210	210	210	210	210	208	208
210	225	210	225	210	224	208	224
210	240	210	240	210	240	208	240
210	255	210	255	210	254	208	252
210	270	210	270	210	270	208	268
210	-15	210	-15	210	-16	208	-16
210	-30	210	-30	210	-30	208	-32
210	-45	210	-45	210	-46	208	-48
210	-60	210	-60	210	-60	208	-60
210	-75	210	-75	210	-76	208	-76
210	-90	210	-90	210	-90	208	-92
210	-105	210	-105	210	-106	208	-108
210	-120	210	-120	210	-120	208	-120
210	-135	210	-135	210	-136	208	-136
210	-150	210	-150	210	-150	208	-152
210	-165	210	-165	210	-166	208	-168
210	-180	210	-180	210	-180	208	-180
210	-195	210	-195	210	-196	208	-196
210	-210	210	-210	210	-210	208	-212
210	-225	210	-225	210	-226	208	-228
210	-240	210	-240	210	-240	208	-240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
210	-255	210	-255	210	-256	208	-256
210	-270	210	-270	210	-270	208	-272
225	0	225	0	224	0	224	0
225	15	225	15	224	14	224	12
225	30	225	30	224	30	224	28
225	45	225	45	224	44	224	44
225	60	225	60	224	60	224	60
225	75	225	75	224	74	224	72
225	90	225	90	224	90	224	88
225	105	225	105	224	104	224	102
225	120	225	120	224	120	224	120
225	135	225	135	224	134	224	132
225	150	225	150	224	150	224	148
225	165	225	165	224	164	224	164
225	180	225	180	224	180	224	180
225	195	225	195	224	194	224	192
225	210	225	210	224	210	224	208
225	225	225	225	224	224	224	224
225	240	225	240	224	240	224	240
225	255	225	255	224	254	224	252
225	270	225	270	224	270	224	268
225	-15	225	-15	224	-16	224	-16
225	-30	225	-30	224	-30	224	-32
225	-45	225	-45	224	-46	224	-48
225	-60	225	-60	224	-60	224	-60
225	-75	225	-75	224	-76	224	-76
225	-90	225	-90	224	-90	224	-92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
225	-105	225	-105	224	-106	224	-108
225	-120	225	-120	224	-120	224	-120
225	-135	225	-135	224	-136	224	-136
225	-150	225	-150	224	-150	224	-152
225	-165	225	-165	224	-166	224	-168
225	-180	225	-180	224	-180	224	-180
225	-195	225	-195	224	-196	224	-196
225	-210	225	-210	224	-210	224	-212
225	-225	225	-225	224	-226	224	-228
225	-240	225	-240	224	-240	224	-240
225	-255	225	-255	224	-256	224	-256
225	-270	225	-270	224	-270	224	-272
240	0	240	0	240	0	240	0
240	15	240	15	240	14	240	12
240	30	240	30	240	30	240	28
240	45	240	45	240	44	240	44
240	60	240	60	240	60	240	60
240	75	240	75	240	74	240	72
240	90	240	90	240	90	240	88
240	105	240	105	240	104	240	102
240	120	240	120	240	120	240	120
240	135	240	135	240	134	240	132
240	150	240	150	240	150	240	148
240	165	240	165	240	164	240	164
240	180	240	180	240	180	240	180
240	195	240	195	240	194	240	192
240	210	240	210	240	210	240	208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
240	225	240	225	240	224	240	224
240	240	240	240	240	240	240	240
240	255	240	255	240	254	240	252
240	270	240	270	240	270	240	268
240	-15	240	-15	240	-16	240	-16
240	-30	240	-30	240	-30	240	-32
240	-45	240	-45	240	-46	240	-48
240	-60	240	-60	240	-60	240	-60
240	-75	240	-75	240	-76	240	-76
240	-90	240	-90	240	-90	240	-92
240	-105	240	-105	240	-106	240	-108
240	-120	240	-120	240	-120	240	-120
240	-135	240	-135	240	-136	240	-136
240	-150	240	-150	240	-150	240	-152
240	-165	240	-165	240	-166	240	-168
240	-180	240	-180	240	-180	240	-180
240	-195	240	-195	240	-196	240	-196
240	-210	240	-210	240	-210	240	-212
240	-225	240	-225	240	-226	240	-228
240	-240	240	-240	240	-240	240	-240
240	-255	240	-255	240	-256	240	-256
240	-270	240	-270	240	-270	240	-272
255	0	255	0	254	0	252	0
255	15	255	15	254	14	252	12
255	30	255	30	254	30	252	28
255	45	255	45	254	44	252	44
255	60	255	60	254	60	252	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
255	75	255	75	254	74	252	72
255	90	255	90	254	90	252	88
255	105	255	105	254	104	252	102
255	120	255	120	254	120	252	120
255	135	255	135	254	134	252	132
255	150	255	150	254	150	252	148
255	165	255	165	254	164	252	164
255	180	255	180	254	180	252	180
255	195	255	195	254	194	252	192
255	210	255	210	254	210	252	208
255	225	255	225	254	224	252	224
255	240	255	240	254	240	252	240
255	255	255	255	254	254	252	252
255	270	255	270	254	270	252	268
255	-15	255	-15	254	-16	252	-16
255	-30	255	-30	254	-30	252	-32
255	-45	255	-45	254	-46	252	-48
255	-60	255	-60	254	-60	252	-60
255	-75	255	-75	254	-76	252	-76
255	-90	255	-90	254	-90	252	-92
255	-105	255	-105	254	-106	252	-108
255	-120	255	-120	254	-120	252	-120
255	-135	255	-135	254	-136	252	-136
255	-150	255	-150	254	-150	252	-152
255	-165	255	-165	254	-166	252	-168
255	-180	255	-180	254	-180	252	-180
255	-195	255	-195	254	-196	252	-196

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
255	-210	255	-210	254	-210	252	-212
255	-225	255	-225	254	-226	252	-228
255	-240	255	-240	254	-240	252	-240
255	-255	255	-255	254	-256	252	-256
255	-270	255	-270	254	-270	252	-272
270	0	270	0	270	0	268	0
270	15	270	15	270	14	268	12
270	30	270	30	270	30	268	28
270	45	270	45	270	44	268	44
270	60	270	60	270	60	268	60
270	75	270	75	270	74	268	72
270	90	270	90	270	90	268	88
270	105	270	105	270	104	268	102
270	120	270	120	270	120	268	120
270	135	270	135	270	134	268	132
270	150	270	150	270	150	268	148
270	165	270	165	270	164	268	164
270	180	270	180	270	180	268	180
270	195	270	195	270	194	268	192
270	210	270	210	270	210	268	208
270	225	270	225	270	224	268	224
270	240	270	240	270	240	268	240
270	-15	270	-15	270	-16	268	-16
270	-30	270	-30	270	-30	268	-32
270	-45	270	-45	270	-46	268	-48
270	-60	270	-60	270	-60	268	-60
270	-75	270	-75	270	-76	268	-76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
270	-90	270	-90	270	-90	268	-92
270	-105	270	-105	270	-106	268	-108
270	-120	270	-120	270	-120	268	-120
270	-135	270	-135	270	-136	268	-136
270	-150	270	-150	270	-150	268	-152
270	-165	270	-165	270	-166	268	-168
270	-180	270	-180	270	-180	268	-180
270	-195	270	-195	270	-196	268	-196
270	-210	270	-210	270	-210	268	-212
270	-225	270	-225	270	-226	268	-228
270	-240	270	-240	270	-240	268	-240
270	-255	270	-255	270	-256	268	-256
270	-270	270	-270	270	-270	268	-272
-15	0	-15	0	-16	0	-16	0
-15	15	-15	15	-16	14	-16	12
-15	30	-15	30	-16	30	-16	28
-15	45	-15	45	-16	44	-16	44
-15	60	-15	60	-16	60	-16	60
-15	75	-15	75	-16	74	-16	72
-15	90	-15	90	-16	90	-16	88
-15	105	-15	105	-16	104	-16	102
-15	120	-15	120	-16	120	-16	120
-15	135	-15	135	-16	134	-16	132
-15	150	-15	150	-16	150	-16	148
-15	165	-15	165	-16	164	-16	164
-15	180	-15	180	-16	180	-16	180
-15	195	-15	195	-16	194	-16	192

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-15	210	-15	210	-16	210	-16	208
-15	225	-15	225	-16	224	-16	224
-15	240	-15	240	-16	240	-16	240
-15	-15	-15	-15	-16	-16	-16	-16
-15	-30	-15	-30	-16	-30	-16	-32
-15	-45	-15	-45	-16	-46	-16	-48
-15	-60	-15	-60	-16	-60	-16	-60
-15	-75	-15	-75	-16	-76	-16	-76
-15	-90	-15	-90	-16	-90	-16	-92
-15	-105	-15	-105	-16	-106	-16	-108
-15	-120	-15	-120	-16	-120	-16	-120
-15	-135	-15	-135	-16	-136	-16	-136
-15	-150	-15	-150	-16	-150	-16	-152
-15	-165	-15	-165	-16	-166	-16	-168
-15	-180	-15	-180	-16	-180	-16	-180
-15	-195	-15	-195	-16	-196	-16	-196
-15	-210	-15	-210	-16	-210	-16	-212
-15	-225	-15	-225	-16	-226	-16	-228
-15	-240	-15	-240	-16	-240	-16	-240
-15	-255	-15	-255	-16	-256	-16	-256
-15	-270	-15	-270	-16	-270	-16	-272
-30	0	-30	0	-30	0	-32	0
-30	15	-30	15	-30	14	-32	12
-30	30	-30	30	-30	30	-32	28
-30	45	-30	45	-30	44	-32	44
-30	60	-30	60	-30	60	-32	60
-30	75	-30	75	-30	74	-32	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-30	90	-30	90	-30	90	-32	88
-30	105	-30	105	-30	104	-32	102
-30	120	-30	120	-30	120	-32	120
-30	135	-30	135	-30	134	-32	132
-30	150	-30	150	-30	150	-32	148
-30	165	-30	165	-30	164	-32	164
-30	180	-30	180	-30	180	-32	180
-30	195	-30	195	-30	194	-32	192
-30	210	-30	210	-30	210	-32	208
-30	225	-30	225	-30	224	-32	224
-30	240	-30	240	-30	240	-32	240
-30	-15	-30	-15	-30	-16	-32	-16
-30	-30	-30	-30	-30	-30	-32	-32
-30	-45	-30	-45	-30	-46	-32	-48
-30	-60	-30	-60	-30	-60	-32	-60
-30	-75	-30	-75	-30	-76	-32	-76
-30	-90	-30	-90	-30	-90	-32	-92
-30	-105	-30	-105	-30	-106	-32	-108
-30	-120	-30	-120	-30	-120	-32	-120
-30	-135	-30	-135	-30	-136	-32	-136
-30	-150	-30	-150	-30	-150	-32	-152
-30	-165	-30	-165	-30	-166	-32	-168
-30	-180	-30	-180	-30	-180	-32	-180
-30	-195	-30	-195	-30	-196	-32	-196
-30	-210	-30	-210	-30	-210	-32	-212
-30	-225	-30	-225	-30	-226	-32	-228
-30	-240	-30	-240	-30	-240	-32	-240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-30	-255	-30	-255	-30	-256	-32	-256
-30	-270	-30	-270	-30	-270	-32	-272
-45	0	-45	0	-46	0	-48	0
-45	15	-45	15	-46	14	-48	12
-45	30	-45	30	-46	30	-48	28
-45	45	-45	45	-46	44	-48	44
-45	60	-45	60	-46	60	-48	60
-45	75	-45	75	-46	74	-48	72
-45	90	-45	90	-46	90	-48	88
-45	105	-45	105	-46	104	-48	102
-45	120	-45	120	-46	120	-48	120
-45	135	-45	135	-46	134	-48	132
-45	150	-45	150	-46	150	-48	148
-45	165	-45	165	-46	164	-48	164
-45	180	-45	180	-46	180	-48	180
-45	195	-45	195	-46	194	-48	192
-45	210	-45	210	-46	210	-48	208
-45	225	-45	225	-46	224	-48	224
-45	240	-45	240	-46	240	-48	240
-45	-15	-45	-15	-46	-16	-48	-16
-45	-30	-45	-30	-46	-30	-48	-32
-45	-45	-45	-45	-46	-46	-48	-48
-45	-60	-45	-60	-46	-60	-48	-60
-45	-75	-45	-75	-46	-76	-48	-76
-45	-90	-45	-90	-46	-90	-48	-92
-45	-105	-45	-105	-46	-106	-48	-108
-45	-120	-45	-120	-46	-120	-48	-120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-45	-135	-45	-135	-46	-136	-48	-136
-45	-150	-45	-150	-46	-150	-48	-152
-45	-165	-45	-165	-46	-166	-48	-168
-45	-180	-45	-180	-46	-180	-48	-180
-45	-195	-45	-195	-46	-196	-48	-196
-45	-210	-45	-210	-46	-210	-48	-212
-45	-225	-45	-225	-46	-226	-48	-228
-45	-240	-45	-240	-46	-240	-48	-240
-45	-255	-45	-255	-46	-256	-48	-256
-45	-270	-45	-270	-46	-270	-48	-272
-60	0	-60	0	-60	0	-60	0
-60	15	-60	15	-60	14	-60	12
-60	30	-60	30	-60	30	-60	28
-60	45	-60	45	-60	44	-60	44
-60	60	-60	60	-60	60	-60	60
-60	75	-60	75	-60	74	-60	72
-60	90	-60	90	-60	90	-60	88
-60	105	-60	105	-60	104	-60	102
-60	120	-60	120	-60	120	-60	120
-60	135	-60	135	-60	134	-60	132
-60	150	-60	150	-60	150	-60	148
-60	165	-60	165	-60	164	-60	164
-60	180	-60	180	-60	180	-60	180
-60	195	-60	195	-60	194	-60	192
-60	210	-60	210	-60	210	-60	208
-60	225	-60	225	-60	224	-60	224
-60	240	-60	240	-60	240	-60	240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-60	-15	-60	-15	-60	-16	-60	-16
-60	-30	-60	-30	-60	-30	-60	-32
-60	-45	-60	-45	-60	-46	-60	-48
-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60
-60	-75	-60	-75	-60	-76	-60	-76
-60	-90	-60	-90	-60	-90	-60	-92
-60	-105	-60	-105	-60	-106	-60	-108
-60	-120	-60	-120	-60	-120	-60	-120
-60	-135	-60	-135	-60	-136	-60	-136
-60	-150	-60	-150	-60	-150	-60	-152
-60	-165	-60	-165	-60	-166	-60	-168
-60	-180	-60	-180	-60	-180	-60	-180
-60	-195	-60	-195	-60	-196	-60	-196
-60	-210	-60	-210	-60	-210	-60	-212
-60	-225	-60	-225	-60	-226	-60	-228
-60	-240	-60	-240	-60	-240	-60	-240
-60	-255	-60	-255	-60	-256	-60	-256
-60	-270	-60	-270	-60	-270	-60	-272
-75	0	-75	0	-76	0	-76	0
-75	15	-75	15	-76	14	-76	12
-75	30	-75	30	-76	30	-76	28
-75	45	-75	45	-76	44	-76	44
-75	60	-75	60	-76	60	-76	60
-75	75	-75	75	-76	74	-76	72
-75	90	-75	90	-76	90	-76	88
-75	105	-75	105	-76	104	-76	102
-75	120	-75	120	-76	120	-76	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-75	135	-75	135	-76	134	-76	132
-75	150	-75	150	-76	150	-76	148
-75	165	-75	165	-76	164	-76	164
-75	180	-75	180	-76	180	-76	180
-75	195	-75	195	-76	194	-76	192
-75	210	-75	210	-76	210	-76	208
-75	225	-75	225	-76	224	-76	224
-75	240	-75	240	-76	240	-76	240
-75	-15	-75	-15	-76	-16	-76	-16
-75	-30	-75	-30	-76	-30	-76	-32
-75	-45	-75	-45	-76	-46	-76	-48
-75	-60	-75	-60	-76	-60	-76	-60
-75	-75	-75	-75	-76	-76	-76	-76
-75	-90	-75	-90	-76	-90	-76	-92
-75	-105	-75	-105	-76	-106	-76	-108
-75	-120	-75	-120	-76	-120	-76	-120
-75	-135	-75	-135	-76	-136	-76	-136
-75	-150	-75	-150	-76	-150	-76	-152
-75	-165	-75	-165	-76	-166	-76	-168
-75	-180	-75	-180	-76	-180	-76	-180
-75	-195	-75	-195	-76	-196	-76	-196
-75	-210	-75	-210	-76	-210	-76	-212
-75	-225	-75	-225	-76	-226	-76	-228
-75	-240	-75	-240	-76	-240	-76	-240
-75	-255	-75	-255	-76	-256	-76	-256
-75	-270	-75	-270	-76	-270	-76	-272
-90	0	-90	0	-90	0	-92	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-90	15	-90	15	-90	14	-92	12
-90	30	-90	30	-90	30	-92	28
-90	45	-90	45	-90	44	-92	44
-90	60	-90	60	-90	60	-92	60
-90	75	-90	75	-90	74	-92	72
-90	90	-90	90	-90	90	-92	88
-90	105	-90	105	-90	104	-92	102
-90	120	-90	120	-90	120	-92	120
-90	135	-90	135	-90	134	-92	132
-90	150	-90	150	-90	150	-92	148
-90	165	-90	165	-90	164	-92	164
-90	180	-90	180	-90	180	-92	180
-90	195	-90	195	-90	194	-92	192
-90	210	-90	210	-90	210	-92	208
-90	225	-90	225	-90	224	-92	224
-90	240	-90	240	-90	240	-92	240
-90	-15	-90	-15	-90	-16	-92	-16
-90	-30	-90	-30	-90	-30	-92	-32
-90	-45	-90	-45	-90	-46	-92	-48
-90	-60	-90	-60	-90	-60	-92	-60
-90	-75	-90	-75	-90	-76	-92	-76
-90	-90	-90	-90	-90	-90	-92	-92
-90	-105	-90	-105	-90	-106	-92	-108
-90	-120	-90	-120	-90	-120	-92	-120
-90	-135	-90	-135	-90	-136	-92	-136
-90	-150	-90	-150	-90	-150	-92	-152
-90	-165	-90	-165	-90	-166	-92	-168

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-90	-180	-90	-180	-90	-180	-92	-180
-90	-195	-90	-195	-90	-196	-92	-196
-90	-210	-90	-210	-90	-210	-92	-212
-90	-225	-90	-225	-90	-226	-92	-228
-90	-240	-90	-240	-90	-240	-92	-240
-90	-255	-90	-255	-90	-256	-92	-256
-90	-270	-90	-270	-90	-270	-92	-272
-105	0	-105	0	-106	0	-108	0
-105	15	-105	15	-106	14	-108	12
-105	30	-105	30	-106	30	-108	28
-105	45	-105	45	-106	44	-108	44
-105	60	-105	60	-106	60	-108	60
-105	75	-105	75	-106	74	-108	72
-105	90	-105	90	-106	90	-108	88
-105	105	-105	105	-106	104	-108	102
-105	120	-105	120	-106	120	-108	120
-105	135	-105	135	-106	134	-108	132
-105	150	-105	150	-106	150	-108	148
-105	165	-105	165	-106	164	-108	164
-105	180	-105	180	-106	180	-108	180
-105	195	-105	195	-106	194	-108	192
-105	210	-105	210	-106	210	-108	208
-105	225	-105	225	-106	224	-108	224
-105	240	-105	240	-106	240	-108	240
-105	-15	-105	-15	-106	-16	-108	-16
-105	-30	-105	-30	-106	-30	-108	-32
-105	-45	-105	-45	-106	-46	-108	-48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-105	-60	-105	-60	-106	-60	-108	-60
-105	-75	-105	-75	-106	-76	-108	-76
-105	-90	-105	-90	-106	-90	-108	-92
-105	-105	-105	-105	-106	-106	-108	-108
-105	-120	-105	-120	-106	-120	-108	-120
-105	-135	-105	-135	-106	-136	-108	-136
-105	-150	-105	-150	-106	-150	-108	-152
-105	-165	-105	-165	-106	-166	-108	-168
-105	-180	-105	-180	-106	-180	-108	-180
-105	-195	-105	-195	-106	-196	-108	-196
-105	-210	-105	-210	-106	-210	-108	-212
-105	-225	-105	-225	-106	-226	-108	-228
-105	-240	-105	-240	-106	-240	-108	-240
-105	-255	-105	-255	-106	-256	-108	-256
-105	-270	-105	-270	-106	-270	-108	-272
-120	0	-120	0	-120	0	-120	0
-120	15	-120	15	-120	14	-120	12
-120	30	-120	30	-120	30	-120	28
-120	45	-120	45	-120	44	-120	44
-120	60	-120	60	-120	60	-120	60
-120	75	-120	75	-120	74	-120	72
-120	90	-120	90	-120	90	-120	88
-120	105	-120	105	-120	104	-120	102
-120	120	-120	120	-120	120	-120	120
-120	135	-120	135	-120	134	-120	132
-120	150	-120	150	-120	150	-120	148
-120	165	-120	165	-120	164	-120	164

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-120	180	-120	180	-120	180	-120	180
-120	195	-120	195	-120	194	-120	192
-120	210	-120	210	-120	210	-120	208
-120	225	-120	225	-120	224	-120	224
-120	240	-120	240	-120	240	-120	240
-120	-15	-120	-15	-120	-16	-120	-16
-120	-30	-120	-30	-120	-30	-120	-32
-120	-45	-120	-45	-120	-46	-120	-48
-120	-60	-120	-60	-120	-60	-120	-60
-120	-75	-120	-75	-120	-76	-120	-76
-120	-90	-120	-90	-120	-90	-120	-92
-120	-105	-120	-105	-120	-106	-120	-108
-120	-120	-120	-120	-120	-120	-120	-120
-120	-135	-120	-135	-120	-136	-120	-136
-120	-150	-120	-150	-120	-150	-120	-152
-120	-165	-120	-165	-120	-166	-120	-168
-120	-180	-120	-180	-120	-180	-120	-180
-120	-195	-120	-195	-120	-196	-120	-196
-120	-210	-120	-210	-120	-210	-120	-212
-120	-225	-120	-225	-120	-226	-120	-228
-120	-240	-120	-240	-120	-240	-120	-240
-120	-255	-120	-255	-120	-256	-120	-256
-120	-270	-120	-270	-120	-270	-120	-272
-135	0	-135	0	-136	0	-136	0
-135	15	-135	15	-136	14	-136	12
-135	30	-135	30	-136	30	-136	28
-135	45	-135	45	-136	44	-136	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-135	60	-135	60	-136	60	-136	60
-135	75	-135	75	-136	74	-136	72
-135	90	-135	90	-136	90	-136	88
-135	105	-135	105	-136	104	-136	102
-135	120	-135	120	-136	120	-136	120
-135	135	-135	135	-136	134	-136	132
-135	150	-135	150	-136	150	-136	148
-135	165	-135	165	-136	164	-136	164
-135	180	-135	180	-136	180	-136	180
-135	195	-135	195	-136	194	-136	192
-135	210	-135	210	-136	210	-136	208
-135	225	-135	225	-136	224	-136	224
-135	240	-135	240	-136	240	-136	240
-135	-15	-135	-15	-136	-16	-136	-16
-135	-30	-135	-30	-136	-30	-136	-32
-135	-45	-135	-45	-136	-46	-136	-48
-135	-60	-135	-60	-136	-60	-136	-60
-135	-75	-135	-75	-136	-76	-136	-76
-135	-90	-135	-90	-136	-90	-136	-92
-135	-105	-135	-105	-136	-106	-136	-108
-135	-120	-135	-120	-136	-120	-136	-120
-135	-135	-135	-135	-136	-136	-136	-136
-135	-150	-135	-150	-136	-150	-136	-152
-135	-165	-135	-165	-136	-166	-136	-168
-135	-180	-135	-180	-136	-180	-136	-180
-135	-195	-135	-195	-136	-196	-136	-196
-135	-210	-135	-210	-136	-210	-136	-212

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-135	-225	-135	-225	-136	-226	-136	-228
-135	-240	-135	-240	-136	-240	-136	-240
-135	-255	-135	-255	-136	-256	-136	-256
-135	-270	-135	-270	-136	-270	-136	-272
-150	0	-150	0	-152	0	-152	0
-150	15	-150	15	-152	14	-152	12
-150	30	-150	30	-152	30	-152	28
-150	45	-150	45	-152	44	-152	44
-150	60	-150	60	-152	60	-152	60
-150	75	-150	75	-152	74	-152	72
-150	90	-150	90	-152	90	-152	88
-150	105	-150	105	-152	104	-152	102
-150	120	-150	120	-152	120	-152	120
-150	135	-150	135	-152	134	-152	132
-150	150	-150	150	-152	150	-152	148
-150	165	-150	165	-152	164	-152	164
-150	180	-150	180	-152	180	-152	180
-150	195	-150	195	-152	194	-152	192
-150	210	-150	210	-152	210	-152	208
-150	225	-150	225	-152	224	-152	224
-150	240	-150	240	-152	240	-152	240
-150	-15	-150	-15	-152	-16	-152	-16
-150	-30	-150	-30	-152	-30	-152	-32
-150	-45	-150	-45	-152	-46	-152	-48
-150	-60	-150	-60	-152	-60	-152	-60
-150	-75	-150	-75	-152	-76	-152	-76
-150	-90	-150	-90	-152	-90	-152	-92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-150	-105	-150	-105	-152	-106	-152	-108
-150	-120	-150	-120	-152	-120	-152	-120
-150	-135	-150	-135	-152	-136	-152	-136
-150	-150	-150	-150	-152	-150	-152	-152
-150	-165	-150	-165	-152	-166	-152	-168
-150	-180	-150	-180	-152	-180	-152	-180
-150	-195	-150	-195	-152	-196	-152	-196
-150	-210	-150	-210	-152	-210	-152	-212
-150	-225	-150	-225	-152	-226	-152	-228
-150	-240	-150	-240	-152	-240	-152	-240
-150	-255	-150	-255	-152	-256	-152	-256
-150	-270	-150	-270	-152	-270	-152	-272
-165	0	-165	0	-166	0	-168	0
-165	15	-165	15	-166	14	-168	12
-165	30	-165	30	-166	30	-168	28
-165	45	-165	45	-166	44	-168	44
-165	60	-165	60	-166	60	-168	60
-165	75	-165	75	-166	74	-168	72
-165	90	-165	90	-166	90	-168	88
-165	105	-165	105	-166	104	-168	102
-165	120	-165	120	-166	120	-168	120
-165	135	-165	135	-166	134	-168	132
-165	150	-165	150	-166	150	-168	148
-165	165	-165	165	-166	164	-168	164
-165	180	-165	180	-166	180	-168	180
-165	195	-165	195	-166	194	-168	192
-165	210	-165	210	-166	210	-168	208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-165	225	-165	225	-166	224	-168	224
-165	240	-165	240	-166	240	-168	240
-165	-15	-165	-15	-166	-16	-168	-16
-165	-30	-165	-30	-166	-30	-168	-32
-165	-45	-165	-45	-166	-46	-168	-48
-165	-60	-165	-60	-166	-60	-168	-60
-165	-75	-165	-75	-166	-76	-168	-76
-165	-90	-165	-90	-166	-90	-168	-92
-165	-105	-165	-105	-166	-106	-168	-108
-165	-120	-165	-120	-166	-120	-168	-120
-165	-135	-165	-135	-166	-136	-168	-136
-165	-150	-165	-150	-166	-150	-168	-152
-165	-165	-165	-165	-166	-166	-168	-168
-165	-180	-165	-180	-166	-180	-168	-180
-165	-195	-165	-195	-166	-196	-168	-196
-165	-210	-165	-210	-166	-210	-168	-212
-165	-225	-165	-225	-166	-226	-168	-228
-165	-240	-165	-240	-166	-240	-168	-240
-165	-255	-165	-255	-166	-256	-168	-256
-165	-270	-165	-270	-166	-270	-168	-272
-180	0	-180	0	-180	0	-180	0
-180	15	-180	15	-180	14	-180	12
-180	30	-180	30	-180	30	-180	28
-180	45	-180	45	-180	44	-180	44
-180	60	-180	60	-180	60	-180	60
-180	75	-180	75	-180	74	-180	72
-180	90	-180	90	-180	90	-180	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-180	105	-180	105	-180	104	-180	102
-180	120	-180	120	-180	120	-180	120
-180	135	-180	135	-180	134	-180	132
-180	150	-180	150	-180	150	-180	148
-180	165	-180	165	-180	164	-180	164
-180	180	-180	180	-180	180	-180	180
-180	195	-180	195	-180	194	-180	192
-180	210	-180	210	-180	210	-180	208
-180	225	-180	225	-180	224	-180	224
-180	240	-180	240	-180	240	-180	240
-180	-15	-180	-15	-180	-16	-180	-16
-180	-30	-180	-30	-180	-30	-180	-32
-180	-45	-180	-45	-180	-46	-180	-48
-180	-60	-180	-60	-180	-60	-180	-60
-180	-75	-180	-75	-180	-76	-180	-76
-180	-90	-180	-90	-180	-90	-180	-92
-180	-105	-180	-105	-180	-106	-180	-108
-180	-120	-180	-120	-180	-120	-180	-120
-180	-135	-180	-135	-180	-136	-180	-136
-180	-150	-180	-150	-180	-150	-180	-152
-180	-165	-180	-165	-180	-166	-180	-168
-180	-180	-180	-180	-180	-180	-180	-180
-180	-195	-180	-195	-180	-196	-180	-196
-180	-210	-180	-210	-180	-210	-180	-212
-180	-225	-180	-225	-180	-226	-180	-228
-180	-240	-180	-240	-180	-240	-180	-240
-180	-255	-180	-255	-180	-256	-180	-256

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-180	-270	-180	-270	-180	-270	-180	-272
-195	0	-195	0	-196	0	-196	0
-195	15	-195	15	-196	14	-196	12
-195	30	-195	30	-196	30	-196	28
-195	45	-195	45	-196	44	-196	44
-195	60	-195	60	-196	60	-196	60
-195	75	-195	75	-196	74	-196	72
-195	90	-195	90	-196	90	-196	88
-195	105	-195	105	-196	104	-196	102
-195	120	-195	120	-196	120	-196	120
-195	135	-195	135	-196	134	-196	132
-195	150	-195	150	-196	150	-196	148
-195	165	-195	165	-196	164	-196	164
-195	180	-195	180	-196	180	-196	180
-195	195	-195	195	-196	194	-196	192
-195	210	-195	210	-196	210	-196	208
-195	225	-195	225	-196	224	-196	224
-195	240	-195	240	-196	240	-196	240
-195	-15	-195	-15	-196	-16	-196	-16
-195	-30	-195	-30	-196	-30	-196	-32
-195	-45	-195	-45	-196	-46	-196	-48
-195	-60	-195	-60	-196	-60	-196	-60
-195	-75	-195	-75	-196	-76	-196	-76
-195	-90	-195	-90	-196	-90	-196	-92
-195	-105	-195	-105	-196	-106	-196	-108
-195	-120	-195	-120	-196	-120	-196	-120
-195	-135	-195	-135	-196	-136	-196	-136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในห้องเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-195	-150	-195	-150	-196	-150	-196	-152
-195	-165	-195	-165	-196	-166	-196	-168
-195	-180	-195	-180	-196	-180	-196	-180
-195	-195	-195	-195	-196	-196	-196	-196
-195	-210	-195	-210	-196	-210	-196	-212
-195	-225	-195	-225	-196	-226	-196	-228
-195	-240	-195	-240	-196	-240	-196	-240
-195	-255	-195	-255	-196	-256	-196	-256
-195	-270	-195	-270	-196	-270	-196	-272
-210	0	-210	0	-210	0	-212	0
-210	15	-210	15	-210	14	-212	12
-210	30	-210	30	-210	30	-212	28
-210	45	-210	45	-210	44	-212	44
-210	60	-210	60	-210	60	-212	60
-210	75	-210	75	-210	74	-212	72
-210	90	-210	90	-210	90	-212	88
-210	105	-210	105	-210	104	-212	102
-210	120	-210	120	-210	120	-212	120
-210	135	-210	135	-210	134	-212	132
-210	150	-210	150	-210	150	-212	148
-210	165	-210	165	-210	164	-212	164
-210	180	-210	180	-210	180	-212	180
-210	195	-210	195	-210	194	-212	192
-210	210	-210	210	-210	210	-212	208
-210	225	-210	225	-210	224	-212	224
-210	240	-210	240	-210	240	-212	240
-210	-15	-210	-15	-210	-16	-212	-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-210	-30	-210	-30	-210	-30	-212	-32
-210	-45	-210	-45	-210	-46	-212	-48
-210	-60	-210	-60	-210	-60	-212	-60
-210	-75	-210	-75	-210	-76	-212	-76
-210	-90	-210	-90	-210	-90	-212	-92
-210	-105	-210	-105	-210	-106	-212	-108
-210	-120	-210	-120	-210	-120	-212	-120
-210	-135	-210	-135	-210	-136	-212	-136
-210	-150	-210	-150	-210	-150	-212	-152
-210	-165	-210	-165	-210	-166	-212	-168
-210	-180	-210	-180	-210	-180	-212	-180
-210	-195	-210	-195	-210	-196	-212	-196
-210	-210	-210	-210	-210	-210	-212	-212
-210	-225	-210	-225	-210	-226	-212	-228
-210	-240	-210	-240	-210	-240	-212	-240
-210	-255	-210	-255	-210	-256	-212	-256
-210	-270	-210	-270	-210	-270	-212	-272
-225	0	-225	0	-226	0	-228	0
-225	15	-225	15	-226	14	-228	12
-225	30	-225	30	-226	30	-228	28
-225	45	-225	45	-226	44	-228	44
-225	60	-225	60	-226	60	-228	60
-225	75	-225	75	-226	74	-228	72
-225	90	-225	90	-226	90	-228	88
-225	105	-225	105	-226	104	-228	102
-225	120	-225	120	-226	120	-228	120
-225	135	-225	135	-226	134	-228	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-225	150	-225	150	-226	150	-228	148
-225	165	-225	165	-226	164	-228	164
-225	180	-225	180	-226	180	-228	180
-225	195	-225	195	-226	194	-228	192
-225	210	-225	210	-226	210	-228	208
-225	225	-225	225	-226	224	-228	224
-225	240	-225	240	-226	240	-228	240
-225	-15	-225	-15	-226	-16	-228	-16
-225	-30	-225	-30	-226	-30	-228	-32
-225	-45	-225	-45	-226	-46	-228	-48
-225	-60	-225	-60	-226	-60	-228	-60
-225	-75	-225	-75	-226	-76	-228	-76
-225	-90	-225	-90	-226	-90	-228	-92
-225	-105	-225	-105	-226	-106	-228	-108
-225	-120	-225	-120	-226	-120	-228	-120
-225	-135	-225	-135	-226	-136	-228	-136
-225	-150	-225	-150	-226	-150	-228	-152
-225	-165	-225	-165	-226	-166	-228	-168
-225	-180	-225	-180	-226	-180	-228	-180
-225	-195	-225	-195	-226	-196	-228	-196
-225	-210	-225	-210	-226	-210	-228	-212
-225	-225	-225	-225	-226	-226	-228	-228
-225	-240	-225	-240	-226	-240	-228	-240
-225	-255	-225	-255	-226	-256	-228	-256
-225	-270	-225	-270	-226	-270	-228	-272
-240	0	-240	0	-240	0	-240	0
-240	15	-240	15	-240	14	-240	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ในเพื่อการศึกษา เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-240	30	-240	30	-240	30	-240	28
-240	45	-240	45	-240	44	-240	44
-240	60	-240	60	-240	60	-240	60
-240	75	-240	75	-240	74	-240	72
-240	90	-240	90	-240	90	-240	88
-240	105	-240	105	-240	104	-240	102
-240	120	-240	120	-240	120	-240	120
-240	135	-240	135	-240	134	-240	132
-240	150	-240	150	-240	150	-240	148
-240	165	-240	165	-240	164	-240	164
-240	180	-240	180	-240	180	-240	180
-240	195	-240	195	-240	194	-240	192
-240	210	-240	210	-240	210	-240	208
-240	225	-240	225	-240	224	-240	224
-240	240	-240	240	-240	240	-240	240
-240	-15	-240	-15	-240	-16	-240	-16
-240	-30	-240	-30	-240	-30	-240	-32
-240	-45	-240	-45	-240	-46	-240	-48
-240	-60	-240	-60	-240	-60	-240	-60
-240	-75	-240	-75	-240	-76	-240	-76
-240	-90	-240	-90	-240	-90	-240	-92
-240	-105	-240	-105	-240	-106	-240	-108
-240	-120	-240	-120	-240	-120	-240	-120
-240	-135	-240	-135	-240	-136	-240	-136
-240	-150	-240	-150	-240	-150	-240	-152
-240	-165	-240	-165	-240	-166	-240	-168
-240	-180	-240	-180	-240	-180	-240	-180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-240	-195	-240	-195	-240	-196	-240	-196
-240	-210	-240	-210	-240	-210	-240	-212
-240	-225	-240	-225	-240	-226	-240	-228
-240	-240	-240	-240	-240	-240	-240	-240
-240	-255	-240	-255	-240	-256	-240	-256
-240	-270	-240	-270	-240	-270	-240	-272
-255	0	-255	0	-256	0	-256	0
-255	15	-255	15	-256	14	-256	12
-255	30	-255	30	-256	30	-256	28
-255	45	-255	45	-256	44	-256	44
-255	60	-255	60	-256	60	-256	60
-255	75	-255	75	-256	74	-256	72
-255	90	-255	90	-256	90	-256	88
-255	105	-255	105	-256	104	-256	102
-255	120	-255	120	-256	120	-256	120
-255	135	-255	135	-256	134	-256	132
-255	150	-255	150	-256	150	-256	148
-255	165	-255	165	-256	164	-256	164
-255	180	-255	180	-256	180	-256	180
-255	195	-255	195	-256	194	-256	192
-255	210	-255	210	-256	210	-256	208
-255	225	-255	225	-256	224	-256	224
-255	240	-255	240	-256	240	-256	240
-255	-15	-255	-15	-256	-16	-256	-16
-255	-30	-255	-30	-256	-30	-256	-32
-255	-45	-255	-45	-256	-46	-256	-48
-255	-60	-255	-60	-256	-60	-256	-60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-255	-75	-255	-75	-256	-76	-256	-76
-255	-90	-255	-90	-256	-90	-256	-92
-255	-105	-255	-105	-256	-106	-256	-108
-255	-120	-255	-120	-256	-120	-256	-120
-255	-135	-255	-135	-256	-136	-256	-136
-255	-150	-255	-150	-256	-150	-256	-152
-255	-165	-255	-165	-256	-166	-256	-168
-255	-180	-255	-180	-256	-180	-256	-180
-255	-195	-255	-195	-256	-196	-256	-196
-255	-210	-255	-210	-256	-210	-256	-212
-255	-225	-255	-225	-256	-226	-256	-228
-255	-240	-255	-240	-256	-240	-256	-240
-255	-255	-255	-255	-256	-256	-256	-256
-255	-270	-255	-270	-256	-270	-256	-272
-270	0	-270	0	-270	0	-272	0
-270	15	-270	15	-270	14	-272	12
-270	30	-270	30	-270	30	-272	28
-270	45	-270	45	-270	44	-272	44
-270	60	-270	60	-270	60	-272	60
-270	75	-270	75	-270	74	-272	72
-270	90	-270	90	-270	90	-272	88
-270	105	-270	105	-270	104	-272	102
-270	120	-270	120	-270	120	-272	120
-270	135	-270	135	-270	134	-272	132
-270	150	-270	150	-270	150	-272	148
-270	165	-270	165	-270	164	-272	164
-270	180	-270	180	-270	180	-272	180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

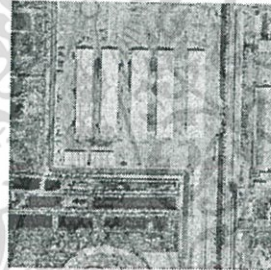
Actual Transition		Phase Correlation		Phase Correlation & Wavelet 1 level		Phase Correlation & Wavelet 2 level	
Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
-270	195	-270	195	-270	194	-272	192
-270	210	-270	210	-270	210	-272	208
-270	225	-270	225	-270	224	-272	224
-270	240	-270	240	-270	240	-272	240
-270	-15	-270	-15	-270	-16	-272	-16
-270	-30	-270	-30	-270	-30	-272	-32
-270	-45	-270	-45	-270	-46	-272	-48
-270	-60	-270	-60	-270	-60	-272	-60
-270	-75	-270	-75	-270	-76	-272	-76
-270	-90	-270	-90	-270	-90	-272	-92
-270	-105	-270	-105	-270	-106	-272	-108
-270	-120	-270	-120	-270	-120	-272	-120
-270	-135	-270	-135	-270	-136	-272	-136
-270	-150	-270	-150	-270	-150	-272	-152
-270	-165	-270	-165	-270	-166	-272	-168
-270	-180	-270	-180	-270	-180	-272	-180
-270	-195	-270	-195	-270	-196	-272	-196
-270	-210	-270	-210	-270	-210	-272	-212
-270	-225	-270	-225	-270	-226	-272	-228
-270	-240	-270	-240	-270	-240	-272	-240
-270	-255	-270	-255	-270	-256	-272	-256

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

การทดลองหาขอบเขตของการทับซ้อนกันระหว่างภาพในการหา การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับภาพขนาดต่างๆ

ในการทดลองนี้จะใช้ภาพตั้งต้นในรูปที่ ค.1 ผลการทดลองกับภาพขนาด 100x100 พิกเซล แสดงในตารางที่ ค.1 ภาพขนาด 200x200 แสดงในตารางที่ ค.2 ภาพขนาด 300x300 แสดงในตารางที่ ค.3 ภาพขนาด 400x400 แสดงในตารางที่ ค.4 ภาพขนาด 500x500 แสดงในตารางที่ ค.5 ภาพขนาด 600x600 แสดงในตารางที่ ค.6 ภาพ 700x700 แสดงในตารางที่ ค.7 ภาพ 800x800 แสดงในตารางที่ ค.8 ภาพ 900x900 แสดงในตารางที่ ค.9 และภาพ 1000x1000 แสดงในตารางที่ ค.2



รูปที่ ค.1 ภาพตั้งต้นในการทดลอง

ตารางที่ ค.1 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 100x100

การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งจริง		การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่หาได้	
Δx	Δy	Δx	Δy
10	10	10	10
20	20	20	20
30	30	30	30
40	40	40	40
50	50	50	50
55	55	55	55
60	60	60	60
65	65	65	65
70	70	70	70
75	75	112	154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 200x200

การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งจริง		การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่หาได้	
Δx	Δy	Δx	Δy
10	10	10	10
30	30	30	30
50	50	50	50
70	70	70	70
90	90	90	90
110	110	110	110
130	130	130	130
150	150	150	150
155	155	155	155
160	160	17	135

ตารางที่ ค.3 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 300x300

การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งจริง		การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่หาได้	
Δx	Δy	Δx	Δy
30	30	30	30
60	60	60	60
90	90	90	90
120	120	120	120
150	150	150	150
180	180	180	180
210	210	210	210
240	240	240	240
245	245	245	245
250	250	202	191

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 400x400

การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งจริง		การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่หาได้	
Δx	Δy	Δx	Δy
40	40	40	40
80	80	80	80
120	120	120	120
160	160	160	160
200	200	200	200
240	240	240	240
280	280	280	280
320	320	320	320
340	340	340	340
345	345	138	231

ตารางที่ ค.5 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 500x500

การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งจริง		การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่หาได้	
Δx	Δy	Δx	Δy
50	50	50	50
100	100	100	100
150	150	150	150
200	200	200	200
250	250	250	250
300	300	300	300
350	350	350	350
400	400	400	400
440	440	440	440
445	445	32	426

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 600x600

การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งจริง		การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่หาได้	
Δx	Δy	Δx	Δy
60	60	60	60
120	120	120	120
180	180	180	180
240	240	240	240
300	300	300	300
360	360	360	360
420	420	420	420
480	480	480	480
530	530	530	530
535	535	552	264

ตารางที่ ค.7 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 700x700

การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งจริง		การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่หาได้	
Δx	Δy	Δx	Δy
70	70	70	70
140	140	140	140
210	210	210	210
280	280	280	280
350	350	350	350
420	420	420	420
490	490	490	490
560	560	560	560
625	625	625	625
630	630	594	373

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๘.๘ การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 800x800

การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งจริง		การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่หาได้	
Δx	Δy	Δx	Δy
80	80	80	80
160	160	160	160
240	240	240	240
320	320	320	320
400	400	400	400
480	480	480	480
560	560	560	560
640	640	640	640
720	720	720	720
725	725	259	407

ตารางที่ ๘.๙ การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 900x900

การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งจริง		การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่หาได้	
Δx	Δy	Δx	Δy
90	90	90	90
180	180	180	180
270	270	270	270
360	360	360	360
450	450	450	450
540	540	540	540
630	630	630	630
720	720	720	720
805	805	805	805
810	810	11	438

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 การหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพขนาด 1000x1000

การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งจริง		การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่หาได้	
Δx	Δy	Δx	Δy
100	100	100	100
200	200	200	200
300	300	300	300
400	400	400	400
500	500	500	500
600	600	600	600
700	700	700	700
800	800	800	800
910	910	910	910
915	915	818	206

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

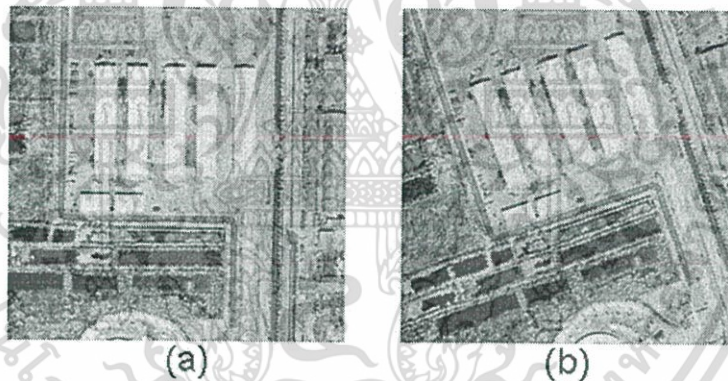
ภาคผนวก ง.

การทดลองการรวมภาพตั้งต้นด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้

ในการทดลองนี้จะทำการรวมภาพตั้งต้นด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงที่หาได้ แล้วคำนวณค่า Root Mean Square Error (RMSE) และค่า Normalized Cross-correlation เพื่อวัดความถูกต้องของการรวมภาพตั้งต้น

ง.1 การทดลองที่ 1

ภาพตั้งต้นในการทดลองแสดงดังรูปที่ ง.1 คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงโดยการใช้วิธีการรวมองค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform ในการหาขอบของวัตถุภายในภาพ โดยใช้ Median LPF ขนาด Window 5x5 และค่า Threshold ของการทำ Hough Transform เท่ากับ 45 โดยภาพทั้งสองหาค่าการเปลี่ยนแปลงมุม และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งได้ตามตารางที่ ง.1

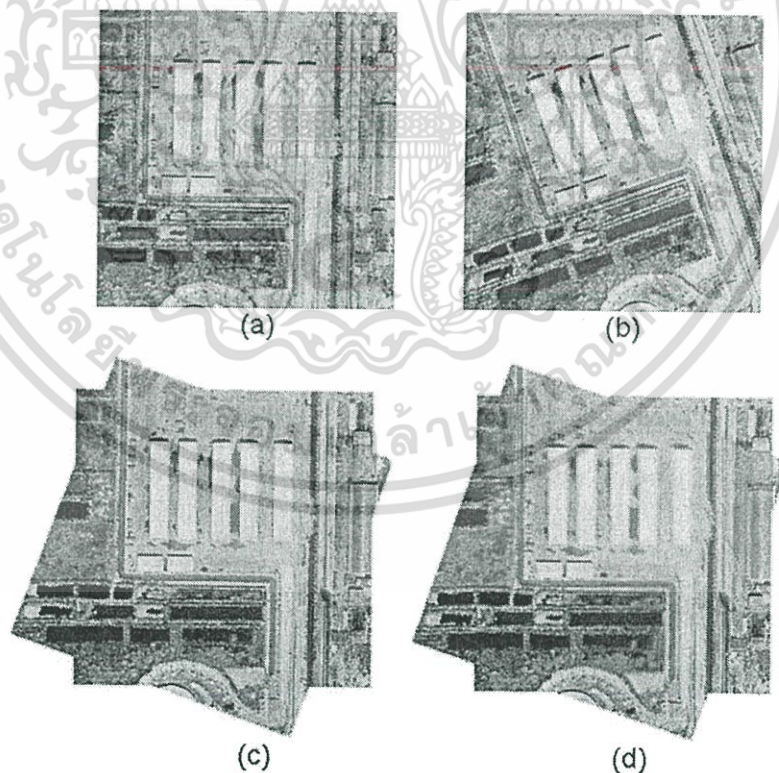


รูปที่ ง.1 ภาพตั้งต้นในการทดลอง (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2

ผลการหาค่า RMSE และ Cross-correlation แสดงในตารางที่ ง.1 จากตารางที่ ง.1 จะเห็นว่าคำตอบที่ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุดและ Cross-correlation สูงที่สุดคือคำตอบที่ 12 ซึ่งเมื่อใช้ในการรวมภาพตั้งต้นแล้วจะได้ภาพดังรูปที่ ง.2 และผลการรวมภาพตั้งต้นจากการใช้คำตอบอื่น แสดงในรูปที่ ง.2

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลง

	$\Delta\theta$	Δx	Δy	Cross-correlation	RMSE
1	19	319	349	-0.183	∞
2	19	319	-33	-0.201	∞
3	19	-63	349	-0.183	∞
4	19	-63	-33	0.710	15.071
5	21	319	350	-0.178	∞
6	21	319	-38	-0.198	∞
7	21	-69	350	-0.178	∞
8	21	-69	-38	0.681	20.189
9	20	322	352	-0.179	∞
10	20	322	-33	-0.199	∞
11	20	-63	352	-0.179	∞
12	20	-63	-33	0.729	6.512

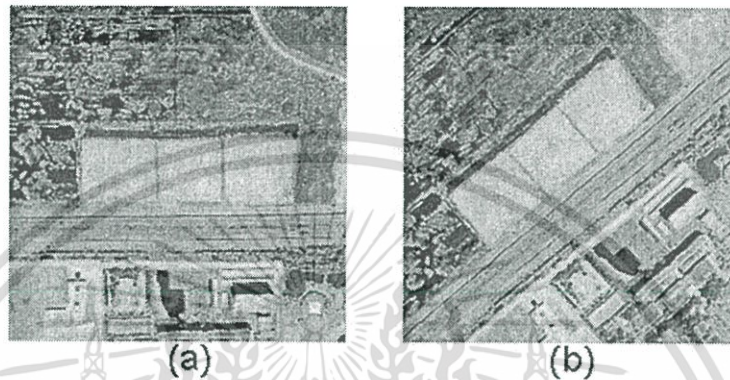


รูปที่ ง.2 ผลการรวมภาพตั้งต้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ได้ (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2
(c) ผลการรวมภาพด้วยคำตอบที่ดีที่สุด (d) ผลการรวมภาพด้วยคำตอบอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.2 การทดลองที่ 2

ภาพตั้งต้นในการทดลองแสดงดังรูปที่ ง.3 จำนวนค่าการเปลี่ยนแปลงโดยการใช้วิธีการรวมองค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform ในการหาขอบ โดยใช้ Median LPF ขนาด Window 5x5 และค่า Threshold ของการทำ Hough Transform เท่ากับ 45 โดยภาพทั้งสองหาค่าการเปลี่ยนแปลงมุม และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งได้ตามตารางที่ ง.2



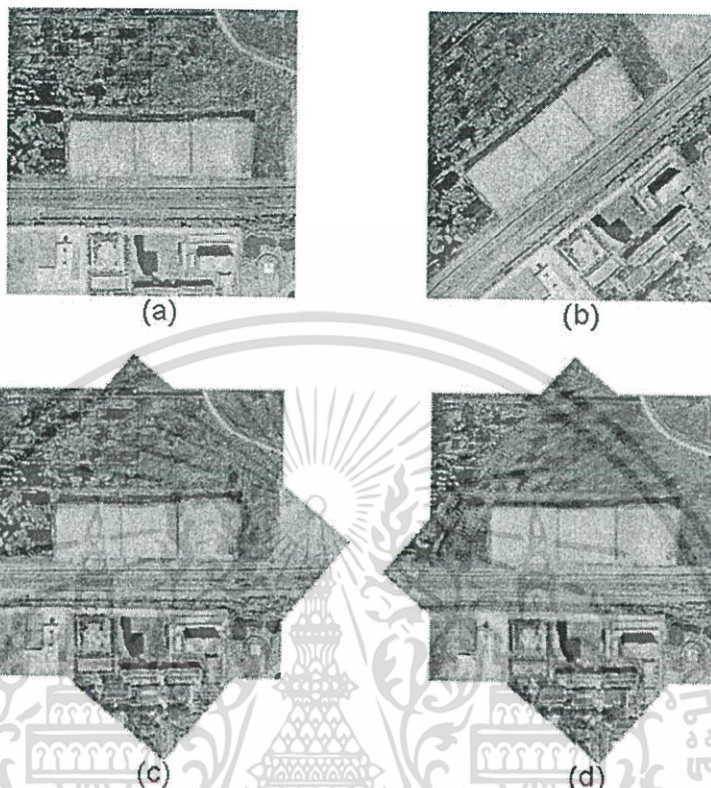
รูปที่ ง.3 ภาพตั้งต้นในการทดลอง (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลง

	$\Delta\theta$	Δx	Δy	Cross-correlation	RMSE
1	41	373	386	-0.144	∞
2	41	373	-38	-0.149	∞
3	41	-51	386	-0.144	∞
4	41	-51	-38	0.672	16.119
5	0	61	195	-0.104	36.082
6	0	61	-105	-0.094	37.1
7	0	-139	195	-0.294	30.489
8	0	-139	-105	-0.157	41.405
9	40	371	387	-0.144	∞
10	40	371	-36	-0.152	∞
11	40	-52	387	-0.144	∞
12	40	-52	-36	0.684	8.157

ผลการหาค่า RMSE และ Cross-correlation แสดงในตารางที่ ง.2 จากตารางที่ ง.2 จะเห็นว่าคำตอบที่ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุดและ Cross-correlation สูงที่สุดคือคำตอบที่ 12 ซึ่งเมื่อใช้ในการรวมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

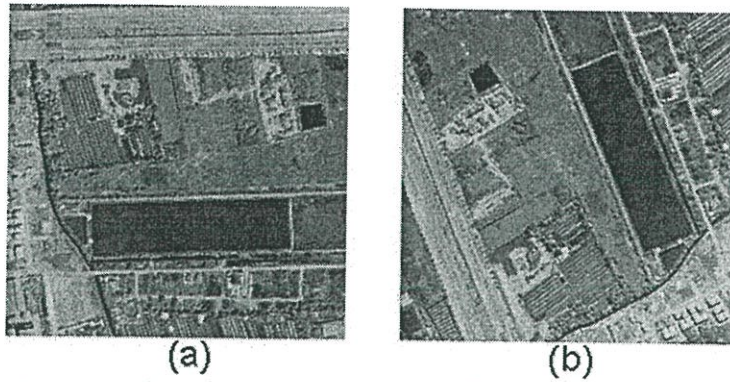
ภาพตั้งต้นแล้วจะได้ภาพดังรูปที่ ๓.4 และผลการรวมภาพตั้งต้นจากการใช้คำตอบอื่นแสดงในรูปที่ ๓.4



รูปที่ ๓.4 ผลการรวมภาพตั้งต้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ได้ (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2 (c) ผลการรวมภาพด้วยคำตอบที่ดีที่สุด (d) ผลการรวมภาพด้วยคำตอบอื่น

๓.3 การทดลองที่ 3

ภาพตั้งต้นในการทดลองแสดงดังรูปที่ ๓.5 คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงโดยการใช้วิธีการรวมองค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform ในการหาขอบ โดยใช้ Median LPF ขนาด Window 5x5 และค่า Threshold ของการทำ Hough Transform เท่ากับ 45 โดยภาพทั้งสองหาค่าการเปลี่ยนแปลงมุม และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งได้ตามตารางที่ ๓.3



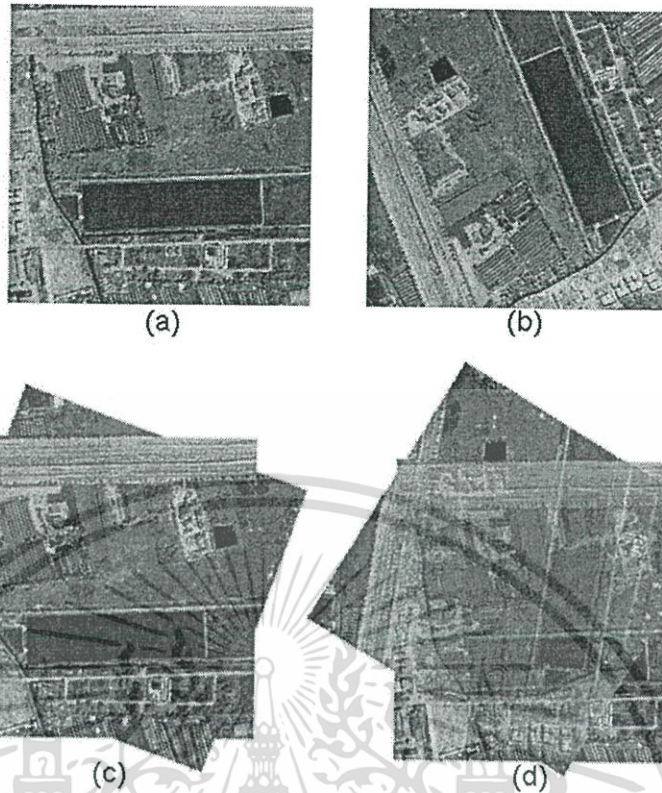
รูปที่ 3.5 ภาพตั้งต้นในการทดลอง (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2

ผลการหาค่า RMSE และ Cross-correlation แสดงในตารางที่ 3.3 จากตารางที่ 3.3 จะเห็นว่าค่าตอบที่ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุดและ Cross-correlation สูงที่สุดคือค่าตอบที่ 12 ซึ่งเมื่อใช้ในการรวมภาพตั้งต้นแล้วจะได้ภาพดังรูปที่ 3.6 และผลการรวมภาพตั้งต้นจากการใช้ค่าตอบอื่นแสดงในรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลง

	$\Delta\theta$	Δx	Δy	Cross-correlation	RMSE
1	31	324	315	-0.193	∞
2	31	324	-97	-0.194	∞
3	31	-88	315	-0.199	∞
4	31	-88	-97	0.621	22.788
5	21	116	131	-0.179	20.396
6	21	116	-257	-0.146	21.894
7	21	-273	131	-0.144	31.173
8	21	-273	-257	-0.210	24.415
9	110	352	334	-0.192	∞
10	110	352	-51	-0.192	∞
11	110	-33	334	-0.203	∞
12	110	-33	-51	0.767	5.234

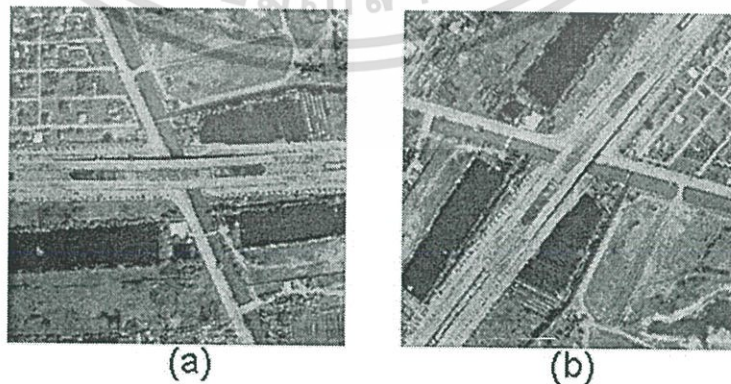
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๖.6 ผลการรวมภาพตั้งต้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ได้ (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2 (c) ผลการรวมภาพด้วยคำตอบที่ดีที่สุด (d) ผลการรวมภาพด้วยคำตอบอื่น

๖.4 การทดลองที่ 4

ภาพตั้งต้นในการทดลองแสดงดังรูปที่ ๖.7 จำนวนค่าการเปลี่ยนแปลงโดยการใช้วิธีการรวมองค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform ในการหาขอบ โดยใช้ Median LPF ขนาด Window 5x5 และค่า Threshold ของการทำ Hough Transform เท่ากับ 45 โดยภาพทั้งสองหาค่าการเปลี่ยนแปลงมุม และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งได้ตามตารางที่ ๖.4

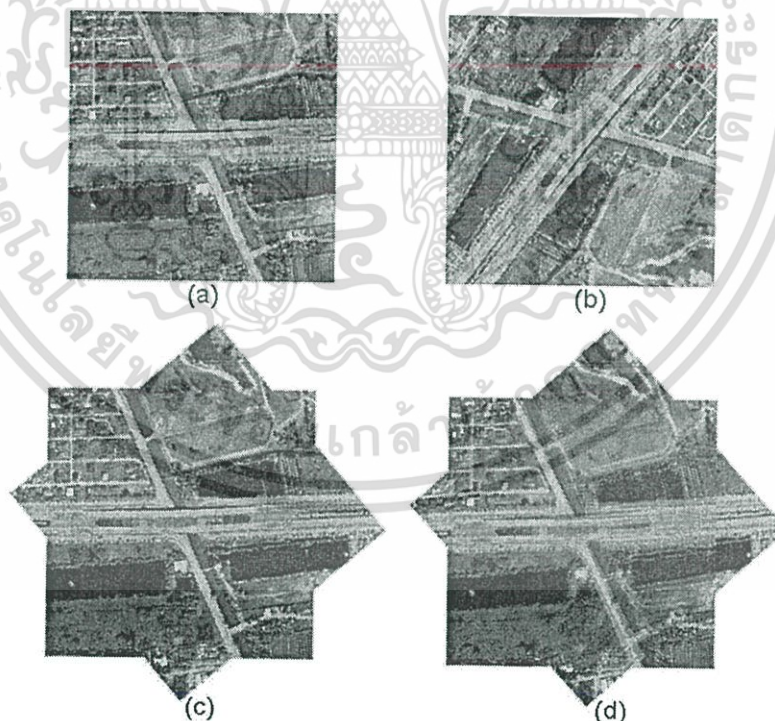


รูปที่ ๖.7 ภาพตั้งต้นในการทดลอง (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลง

	$\Delta\theta$	Δx	Δy	Cross-correlation	RMSE
1	230	381	349	-0.155	∞
2	230	381	-74	-0.158	∞
3	230	-42	349	-0.174	∞
4	230	-42	-74	0.712	5.765
5	232	138	311	-0.196	∞
6	232	138	-111	-0.010	23.642
7	232	-284	311	-0.196	∞
8	232	-284	-111	0.018	25.028
9	228	381	345	-0.157	∞
10	228	381	-79	-0.158	∞
11	228	-43	345	-0.176	∞
12	228	-43	-79	0.697	15.102



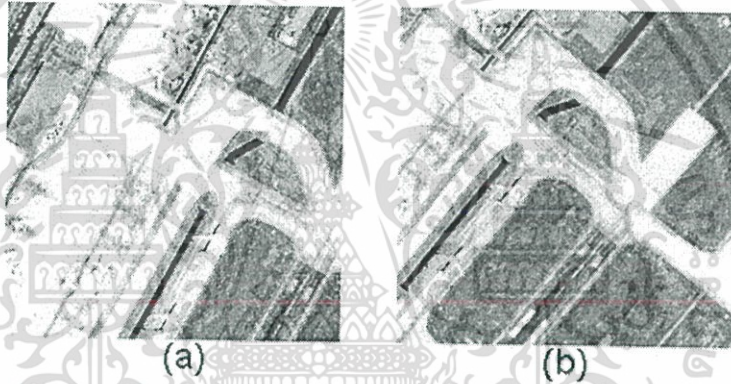
รูปที่ ง.8 ผลการรวมภาพตั้งต้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ได้ (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2 (c) ผลการรวมภาพด้วยคำตอบที่ดีที่สุด (d) ผลการรวมภาพด้วยคำตอบอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการหาค่า RMSE และ Cross-correlation แสดงในตารางที่ ๓.4 จากตารางที่ ๓.4 จะเห็นว่าคำตอบที่ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุดและ Cross-correlation สูงที่สุดคือคำตอบที่ 4 ซึ่งเมื่อใช้ในการรวมภาพตั้งต้นแล้วจะได้ภาพดังรูปที่ ๓.8 และผลการรวมภาพตั้งต้นจากการใช้คำตอบอื่นแสดงในรูปที่ ๓.8

๓.5 การทดลองที่ 5

ภาพตั้งต้นในการทดลองแสดงดังรูปที่ ๓.9 คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงโดยการใช้วิธีการรวมองค์ประกอบความถี่สูงของ Wavelet Transform ในการหาขอบ โดยใช้ Median LPF ขนาด Window 5x5 และค่า Threshold ของการทำ Hough Transform เท่ากับ 45 โดยภาพทั้งสองหาค่าการเปลี่ยนแปลงมุม และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งได้ตามตารางที่ ๓.5

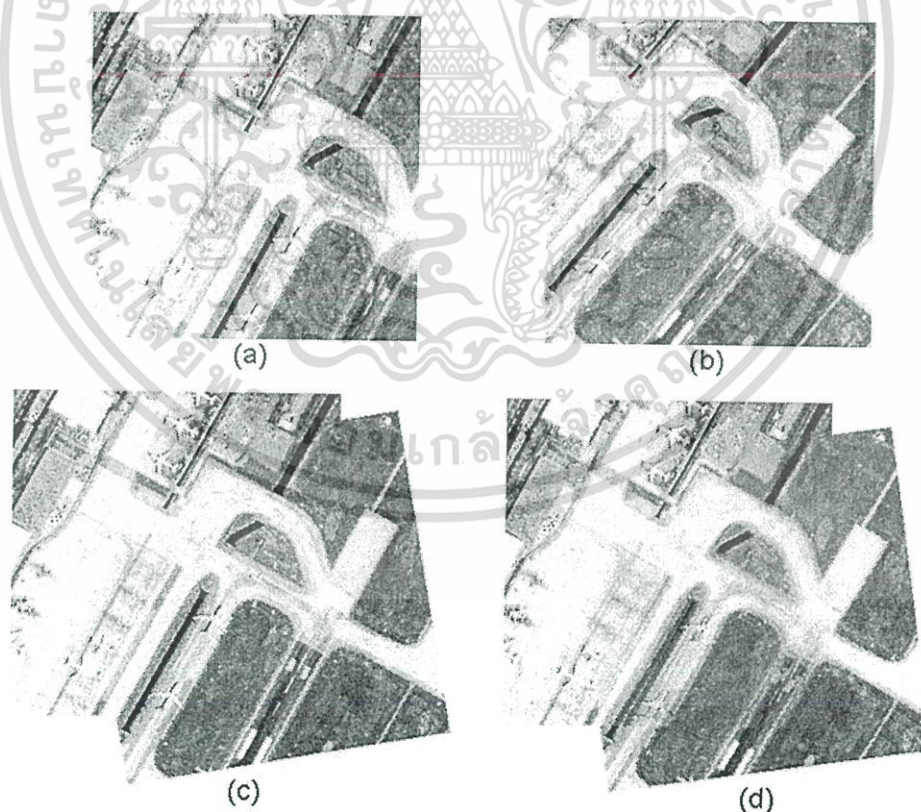


รูปที่ ๓.9 ภาพตั้งต้นในการทดลอง (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2

ผลการหาค่า RMSE และ Cross-correlation แสดงในตารางที่ ๓.5 จากตารางที่ ๓.5 จะเห็นว่าคำตอบที่ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุดและ Cross-correlation สูงที่สุดคือคำตอบที่ 1 ซึ่งเมื่อใช้ในการรวมภาพตั้งต้นแล้วจะได้ภาพดังรูปที่ ๓.10 และผลการรวมภาพตั้งต้นจากการใช้คำตอบอื่นแสดงในรูปที่ ๓.10

ตารางที่ ๓.5 ผลการทดลองการวัดค่า RMSE และ Cross-correlation กับค่าการเปลี่ยนแปลง

	$\Delta\theta$	Δx	Δy	Cross-correlation	RMSE
1	350	57	15	0.364	8.003
2	350	57	-333	-0.142	44.345
3	350	-291	15	-0.099	64.079
4	350	-291	-333	-0.144	∞
5	352	57	22	0.286	23.994
6	352	57	-317	-0.144	52.182
7	352	-282	22	-0.093	61.317
8	352	-282	-317	-0.157	∞
9	349	57	12	0.339	17.526
10	349	57	-340	-0.138	37.734
11	349	-295	12	-0.105	65.028
12	349	-295	-340	-0.139	∞



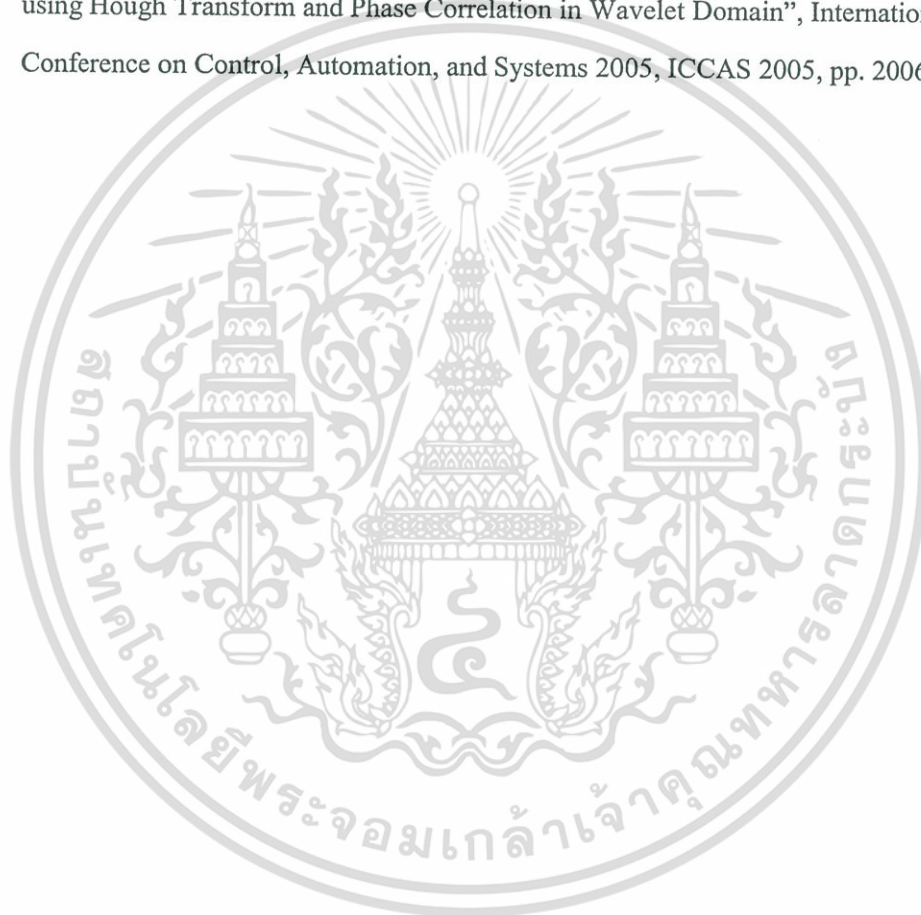
รูปที่ ๓.10 ผลการรวมภาพตั้งต้นจากการเปลี่ยนแปลงที่ได้ (a) ภาพตั้งต้นที่ 1 (b) ภาพตั้งต้นที่ 2
(c) ผลการรวมภาพด้วยคำตอบที่ดีที่สุด (d) ผลการรวมภาพด้วยคำตอบอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] Bhuttichai Summar, Orachat Chitsobhuk, “Image Registration using Phase correlation in Wavelet Domain”, International Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing 2005, NSIP 2005
- [2] Bhuttichai Summar, Orachat Chitsobhuk, Watjanapong Kasemsiri, “Image Registration using Hough Transform and Phase Correlation in Wavelet Domain”, International Conference on Control, Automation, and Systems 2005, ICCAS 2005, pp. 2006-2009



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACTS

IEEE-EURASIP

Nonlinear Signal and Image Processing

(NSIP 2005)

May 18 - 20, 2005

Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan

Official WEB site: <http://www.ice.eng.hokudai.ac.jp/nsip/>

Sponsored by

Hokkaido University, Graduate School of Information Science and Technology

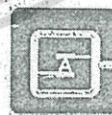
Hokkaido University, 21st Century COE Program

IEEE Circuits and Systems Society

IEEE Sapporo Section

In cooperation with

IEICE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Image registration using Phase correlation in Wavelet Domain

Bhuttichai Summar^{*} Orachat Chitsobhuk
 Department of Computer Engineering
 Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520

Abstract— This paper presents an image registration technique in frequency domain. We apply phase correlation to find the translation between images. However, phase correlation can find only translation on x-y axis. We have to apply other technique before performing phase correlation to find an angular translation. Therefore, hough transform technique is implemented to overcome this problem. In this paper, images will be pre-processed using wavelet transform. Multi-resolution property of wavelet transform can help reducing processing time. The experiments are conducted to show the proposed structure of wavelet, such as number of levels, selected sub-band and other parameters suitable for image registration.

I. INTRODUCTION

Image registration is a method to register or arrange small images and compose them to make one image that contains details of all input images. Images taken as inputs of process must have some overlap area. Registered images help us to view overall detail without swapping image many times and image analysis can be done easily. In satellite image analysis, image registration can be applied in process. Satellite images are captured in a row, continuous in the same interval in satellite orbit. Moreover, almost all images taken by satellite have some overlap area. We will take a pair of images and register them to an image and take other image to register again. This process is continued until all images have been registered. We get a new big image with detail of all images in correct position. This image is more useful in geography because it is a map of the region we have taken and can be used as input to image analysis process for several applications. This image may be a natural resource map, mineral map or military map.

In the past image registration was proposed by many researchers either in spatial domain or frequency domain. Image registration in spatial domain can be divided into 2 groups. The first group uses control point as a reference of registration process [6]. User must select points in an image and select those points in other image. User must select at least 3 pairs to be references of registration process. If user makes an error in this process or select bad points, it will cause errors in the result image. However, the advantage of this method is that it is fast and simple. The second group do not use control point but try to search all possible transitions to find the best match [4][7]. Main point of this method is

search algorithm. Processing time for this method depend on speed and complexity of searching algorithm. Image registration in frequency domain by phase correlation can be done easily and fast. But images must be transformed from spatial domain to frequency domain by fourier transform and transformed from frequency domain back to spatial domain by Inverse fourier transform. fourier transform and Inverse fourier transform take some time to process. Image registration on spatial domain can find several type of geometric transform while image registration using phase correlation in frequency domain is limited to translation only in x-y axis. However, the main disadvantage of registration in spatial domain is that it requires longer processing time than phase correlation does. Time spending in search algorithm is greater than that used for fourier and inverse fourier transform. Phase correlation also has a restriction. It can find only x-axis and y-axis translation. We have to apply other technique to find an angular transition. In the proposed algorithm, we apply hough transform technique prior to phase correlation to overcome this problem.

In this paper, images will be pre-processed using wavelet transform to reduce size of image. Even though wavelet can reduce image size and processing time to 1/4 from original for each wavelet level, error also increases for each wavelet level. So, we have to find the appropriate level of wavelet to get the correct result at the least time.

II. BASIC THEORY

In this part we will see the basic principle that will be applied in our work.

A. Phase Correlation

Phase correlation is one of fourier properties. From fourier equation (1) [1][3]

$$\mathcal{F}\{f(x, y)\} = \hat{f}(\omega_x, \omega_y) \quad (1)$$

$$\mathcal{F}\{f(x + \Delta x, y + \Delta y)\} = \hat{f}(\omega_x, \omega_y) e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} \quad (2)$$

We have a point in image that is shifted to any point image 2.

$$I_1(x + \Delta x, y + \Delta y) = I_2(x, y) \quad (3)$$

We apply equation (1) and (2) in (3).

$$\hat{I}_1(\omega_x, \omega_y) e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} = \hat{I}_2(\omega_x, \omega_y) \quad (4)$$

$$\frac{\hat{I}_1(\omega_x, \omega_y)}{\hat{I}_2(\omega_x, \omega_y)} = e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} \quad (5)$$

$e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)}$ is x-axis transition and y-axis transition from input images in fourier domain. We can use inverse fourier transform to get the x-axis translation and y-axis translation in spatial domain [2].

$$\text{Corr}(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}\{e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)}\} = \delta(x - \Delta x, y - \Delta y) \quad (6)$$

We will select transition at the point where correlation equal to 1. However, we cannot get perfect correlation because of non-overlapping area and noise in input images. As a result, we select the point where correlation is max.

$$(x, y) = \arg \max_{(x, y)} \{\text{Corr}(x, y)\} \quad (7)$$

We use x and y as an x-axis and y-axis transition respectively. Notice that x and y never become negative but translation can be negative. So, we have to determine sign of x-y transition. Another problem occurs when input images have different contrast or have less overlapping area or contain a large amount of noise. This makes the resulted image from phase correlation incorrect. Therefore, we use another form of phase correlation as follow:

$$\overline{\text{Corr}}(\omega_x, \omega_y) = \frac{\hat{f}_1(\omega_x, \omega_y) \hat{f}_2^*(\omega_x, \omega_y)}{|\hat{f}_1(\omega_x, \omega_y)| |\hat{f}_2(\omega_x, \omega_y)|} = e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} \quad (8)$$

Symbol $\hat{f}_2^*(\omega_x, \omega_y)$ is complex conjugate of f_2 .

B. Hough Transform [2][11]

Hough transform is a technique to collect all lines hiding in an image. Before applying hough transform, images have to be processed in edge detection process. Hough transform can indicate how lines are in an image at any distance and any angle. Hough transform will collect lines from image in hough space (ρ, θ) . ρ is a distance of the line from original point and θ is an angle of the line. Each cell in hough space is the density of line at (ρ, θ) . We can get ρ from

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (9)$$

We can draw an image from hough space. We apply θ in x-axis and ρ in y-axis. We get image as show in fig. 1.

The white spots in figure are the dense point of hough space. If θ is changed, hough image will also change in x-axis. Notice that there are many trivial lines in hough image. These lines may disturb our result so we have to filter out with a threshold.

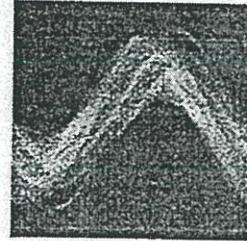


Fig. 1. Hough image plotted from hough space. In x-axis is θ and y-axis is ρ θ is changed from 1 to 360 degree

III. EXPERIMENT

First, we have to perform wavelet transform of two input images. With a wavelet level, we get $\frac{1}{4}$ size of original image, see Fig. 2. We will use only LL part of wavelet image to find transition between images.

Second, we have to find an angular transition between images by applying hough transform to two images. We create image of hough space of two images. The low density of hough space will be ignored because low density data may occur by noise or non-overlapping area and can affect our result. We use only the high density of hough space to create hough image. In Fig. 3 we apply hough threshold at 60.



Fig. 2. Image after applied wavelet transform



Fig. 3. Hough image from Fig. 2. Note we adjusted brightness and contrast for clarity.

The bright spots in images show high density of hough space. If image 1 and 2 have angular transition, these point will translate in x-axis (θ) and y-axis (ρ). We ignore result in y-axis because distance from origin point (ρ) is not concerned. We apply phase correlation to two images. From (8), we do not concern with y-axis thus we take inverse fourier transform only in direction θ or x-axis.

$e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)}$ is x-axis and y-axis translation of images in fourier form.

$$Corr(\theta) = \sum_{\rho} \mathcal{F}_{\theta}^{-1} \left(e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} \right) \quad (10)$$

We select max correlation of θ

$$\Delta\theta = \arg \left\{ \max_{\theta} \{Corr(\theta)\} \right\} \quad (11)$$

After we get θ , we transform input image (LL part of wavelet images) by rotating with angle $-\theta$ to get new input image with the same angle of source image.

Third, we apply phase correlation to two images after correcting the angular translation to get x-y axis translation. Then, we apply Δx , Δy and $\Delta\theta$ with source and input image to construct a new image with all details in both images.

In our experiment, we begin testing process with only x-y axis translation as shown in table I. Image registration with phase correlation in wavelet domain can be done well. However, there are some errors occur in our process because phase correlation can be used to find only integer transition.

Next, we perform hough transform and phase correlation to find angular transition of two images. We found that image registration process can be done well in every wavelet level, see table II. Although there are some errors but may not affect result obviously.



Fig. 4. Source image and input image after rotated

TABLE I
RESULT FROM PERFORMING PHASE CORRELATION WITH MULTIPLE WAVELET LEVEL

Wavelet level	Actual (Δx , Δy)	Computed (Δx , Δy)
0	(10,10)	(10,10)
0	(15,20)	(15,20)
0	(-10,-14)	(-10,-14)
1	(10,10)	(10,10)
1	(15,20)	(16,20)
1	(-10,-14)	(-10,-14)
2	(10,10)	(12,12)
2	(15,20)	(16,20)
2	(-10,-14)	(-12,-16)

TABLE II
RESULT FROM ANGULAR TRANSITION FINDING PROCESS

Wavelet level	Actual $\Delta\theta$	Computed $\Delta\theta$
0	10	10
0	20	20
0	27	26
1	10	10
1	20	20
1	27	27
2	10	11
2	20	20
2	27	26

TABLE III
PROCESSING TIME OF EACH PROCESS

Image size	Hough transform	Angular phase correlation	Phase correlation
64 x 64	<1 sec.	8 sec.	1 sec.
128 x 128	2 sec.	19 sec.	2 sec.
256 x 256	6 sec.	44 sec.	7 sec.

We found that transforming image with wavelet transform need only small time, about 0.5 seconds for 128 x 128 and about 2 second for 256 x 256 image size. Processing time increases nonlinearly as the size of the image grows up as show in table III. Therefore, with lower size of image, processing time can be reduced.

Suitable wavelet levels for applying to the image is depend on image size. If image size is small, processing time may not different but error can occur and accumulate for each level we applied. However, when image size becomes large, wavelet transform can decrease processing time dramatically and error accumulated is not obvious in the large image. Accumulate error is 2^{n-1} , n is number of wavelet level we applied. In our experiment, we found that image size 200 x 200 or less is not suitable to apply wavelet transform before registration because processing time differ less than 10 seconds. Image size more than 200 x 200 can apply wavelet level more than 1 level if image size still more than 200 x 200 to speed up processing time but may not more than 3 levels because errors may accumulate and affect our results.

IV. CONCLUSION AND FUTURE WORK

In this paper, image registration using hough transform and phase correlation in wavelet domain is proposed. The proposed image registration system can find rotation and translation in x-y axis between two images correctly in case of integer transition. Wavelet transform can reduce size of image by $\frac{1}{4}$ for each level. With smaller size of image, we can process with less time and space. However, some error may occur at each level of wavelet. Therefore, sub-pixel registration is required in order to obtain accurate result in case of non-integer transition. If the resolution of the image is

high, hough transform may take a plenty of time. We may apply fast hough transform or other line collector method to reduce processing time.

REFERENCES

- [1] A.Averbuch and Y.Keller, "FFT Based Image Registration", Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2002. Proceedings. (ICASSP '02), IEEE International Conference Pages:IV-3608 - IV-3611 vol.4, 2002
- [2] Li Zhongke, Yang Xiaohui and Wu Lenan, "Image Registration Based on Hough Transform and Phase Correlation", 2003 International Conference, Pages:956 - 959 Vol.2, 2003
- [3] Jeungtae Kim and Jeffrey A.Fessler, "Image registration using robust correlation", IEEE International Symposium, Pages:353 - 356. 2002
- [4] Prachya Chalermwat and Tarek El-Ghazawi, "Multi-resolution Image Registration using Genetics", 1999 International Conference on . Volume: 2, Pages:452 - 456 vol.2, 1999
- [5] A.Kadyrov and M.Petrou, "Fast Registration for 2D Images : The Clock Algorithm", 2003 International Conference, Pages:II - 715-18 vol.3, 2003
- [6] Jacqueline Le Moigne and James A.Smith, "Image registration and fusion for NASA remotely sensed imagery", Information Fusion, Third International Conference on , Volume: 1, Pages:TUB3/24 - TUB3/31 vol.1, 2000
- [7] Yalin Xiong and Ken Turkowski, "Registration, Calibration and Blending in Creating High Quality Panoramas", 1999
- [8] B.Srinivasa Reddy and B.N. Chatterji, "An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration", IEEE Transactions on Image Processing, Volum 5, No.8, Pages 1266-1271, 1996
- [9] Winston Li and Henry Leung, "A Maximum Likelihood Approach for Image Registration Using Control Point And Intensity", Image Processing, IEEE Transactions, Volume: 13, Pages:1115 - 1127, 2004
- [10] L.M.G. Fonseca and C.S. Kenney, "Control point assessment for image registration", Computer Graphics and Image Processing, Pages:125 - 132, 1999
- [11] Jean E. Vuillemin, "Fast linear Hough transform", Application Specific Array Processors, Pages: 1-9, 1994.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Final Program & Digest Book

**International Conference on
Control, Automation, and Systems
(ICCAS 2005)**

June 2 - 5, 2005

KINTEX(Korea International Exhibition Center)

The Province of Gyeonggi, Korea



Organized by

The Institute of Control, Automation, and Systems Engineers (ICASE), Korea

In association with

IEEE Robotics and Automation Korea Chapter
IEEE Computational Intelligent Society Korea Chapter
The Society of Instrument and Control Engineers (SICE) of Japan
The Chinese Association of Automation (CAA)
The Instrumentation, Systems and Automation Society (ISA)
The Chinese Association for Artificial Intelligence (CAAI)
The Chinese Automatic Control Society (CACS)

Sponsored by

The Korean Society of Mechanical Engineers (KSME)
The Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE)
The Institute of Electronics Engineers of Korea (IEEK)
The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences (KSAS)
The Korean Institute of Chemical Engineers (KICChE)
The Province of Gyeonggi
Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)
Korea International Exhibition Center (KINTEX)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Image registration using Hough transform and Phase correlation in Wavelet domain

Bhuttichai Summar*, Orachat Chitsobhuk**, and Watjanapong Kasemsiri***

Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok

Abstract: This paper presents a method for registering images using phase correlation technique in fourier domain, hough transform and multi-resolution wavelet. To register images, source and input images are transformed to wavelet domain. An angular transition can be obtained by applying hough transform technique followed by phase correlation. Then we apply phase correlation technique to find x-axis and y-axis transition. We apply wavelet transform to reduce processing time and also use its coefficients as edge information instead of canny detector. With multi-resolution property of wavelet transform, registration time can be greatly reduced. After we get all transition parameters, we transform the input images according to these parameters. Then, we compose and blend all images into a new large image with details of all source images. From our experiment, we can find the accurate transition both x-y translation and angular transition with less error.

Keywords: image registration, phase correlation, hough, wavelet

1. INTRODUCTION

Image registration is the method to register or arrange small images and compose them to make one image that contains details of all input images. Images taken as inputs of process must have some overlapped area. Registered images help us to view overall details without swapping image many times. So that image analysis can be done easily. In satellite image analysis, image registration can be applied in process. Satellite images are captured in a row, continuous in the same interval of satellite orbit. Moreover, almost all images taken by satellite have some overlapped area. We will take a pair of images, register them to create new image then take other image to register again. This process is continued until all images have been registered. We get a new large image with details of all images in correct position. This image has more useful information in geography because it is a map of the region we have taken and can be applied in many analysis processes. This image may be a natural resource map, mineral map or military map.

This paper presents an image registration technique using hough transform and phase correlation in wavelet domain. Several algorithms have been proposed in the past both in spatial and frequency domain. Image registration in spatial domain uses techniques such as user's specified control points and searching algorithm. The first technique is simple but depends on user's ability to select good control points [6, 9, 10]. Selecting bad control points can cause errors in the registration process. The second technique gives better registration results and covers several cases of geometric transformation such as rotation, translation, sheering, and different point's of views [4, 6, 7, 11, 12]. However, it requires greater complexity and processing time since the algorithm has to search all the possible solutions before identifying the correct one.

Phase correlation is the most widely used technique for image registration in frequency domain [1, 2, 5, 8]. It applies the property of Fourier transform in order to find translation between images. The algorithm is easy to implement and requires less amount of processing time due to the benefit of fast Fourier transform (FFT) algorithm. However, phase correlation can be used to find only translation in x-y axis. Other techniques must be applied in advance to transform information from x-y axis to suitable space in order to find other types of geometric transform such as angular transition, zooming, sheering, or stretching. In the proposed algorithm, hough transform is used to transform line information in x-y

axis to hough space (ρ, θ) . Therefore, rotation in x-y axis will be transformed to translation in hough space (ρ, θ) . Then, phase correlation can be used to find angular transition in hough space (ρ, θ) .

Recently, wavelet transform has become a widely used technique to compress image data. With its multi-resolution property, the resolution of the image can be reduced. This results in less amount of processing time. Therefore, in the proposed algorithm, we first transform our images into wavelet domain. Then, angular transition is calculated using hough transform and phase correlation. Generally, edge detection algorithm must be done before hough transform process to extract lines in the image. This process causes additional processing time. Since high frequency information corresponding to edges is already there in wavelet domain, we can directly use this information as input to hough transform. As a result, we can eliminate edge detection process thus additionally reduce the processing time. However edge detection using information in wavelet domain is not as good as edges from canny edge detector or sobel. There are some trivial details and noises in an image that can cause errors and affect our result. Therefore, we filter images using low pass filter to eliminate trivial details and noises in images. Only main lines and details remain in the image. After we obtain angular transition, the image is rotated using angular transition parameter. Finally, phase correlation is performed to obtain translation parameter in x-y axis.

2. OVERVIEW OF THE PROPOSED IMAGE REGISTRATION IN WAVELET DOMAIN

In image registration process, we work with a pair of images. We call the first image as "Source image" and the other one as "Input image". The work flow from our system is shown in Fig.1. We begin the process by filtering both images with low pass filter. Then, we transform images using wavelet transform. After wavelet transformation each image is separated into 4 components, LL LH HL and HH. In stead of using canny detector, we combine LH, HL and HH coefficients to obtain edge information. After that, we start finding angular transition parameter to compensate rotation of the camera. Hough transform method is performed to edge information of both images to transform angular transition in image space to translation transition in hough space. After we

obtain hough space of both image, we use phase correlation process to find angular transition between 2 images. We then use angular transition obtained from previous step to rotate LL part in wavelet components of the input image. After that we find x and y translation between images. We use only LL component from source and input images. Phase correlation is applied in this step. After we get all transitions, we compose source and input image together to obtain an output image. The detail of each process will be discussed in the next sections.

we can see all details of original image with size $\frac{1}{4}$ of original image. Wavelet transform is one of the techniques used to reduce resolution of the image needed to be processed. The smaller size of the image, the less processing time and processing space.

We can further apply wavelet transform to LL part and we can continue transform with LL part to get lower resolution of image, however error will increase accumulatively for each level of wavelet, see Fig. 3.

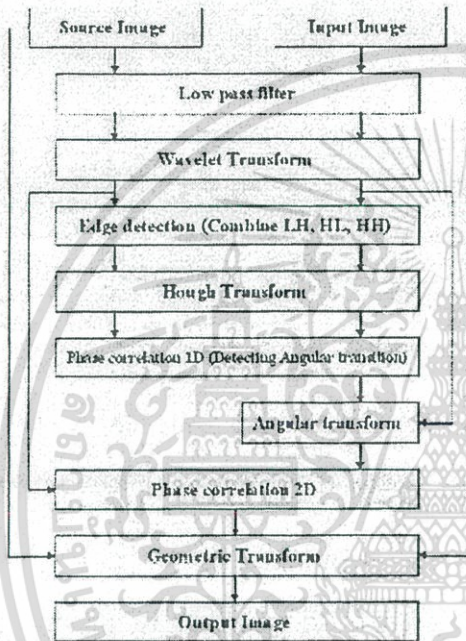


Fig.1 Block diagram presents our system flow

2.1 Wavelet transform

Wavelet transform is a method to separate an image into different frequency parts. After wavelet transform, image is separated as Fig. 2

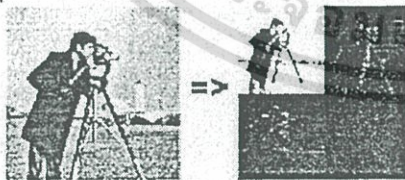


Fig. 2 Image is transformed with wavelet transform.

The top-left part of image is called LL part. The LL part of image is the lowest frequency. Most of this part is the details of original image. The bottom-right part is called HH, which is the highest frequency. This part consists of only the sharp edges in diagonal direction of original image. In LL part you

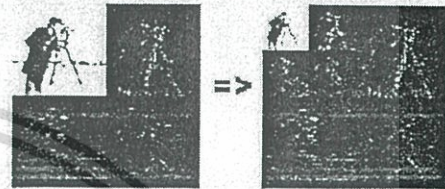


Fig. 3 Multi-level wavelet transform

2.2 Edge detection

Before applying hough transform, edge information must be obtained from the image. We may use canny detector or sobel in this step. However, we can take the advantage of wavelet property by combining LH, HL and HH part together to use as an edge detection process. But the result of edge detection process from wavelet is not as good as that of canny detector or sobel. There are many trivial points and lines in the image that may cause an error in hough transform process. We can improve quality of edge information from wavelet coefficients by pre-processing an image with low pass filter to filter out small points that disperse an image. If we select a suitable type of filter, we will get better quality edge image as shown in Fig. 4.



Fig. 4 (left) Edge image using canny detector, (center) Edge image using wavelet without filter, (right) Edge image using wavelet and low pass filter

2.3 Hough transform [2]

Hough transform is a technique to collect all lines hidden in an image. Hough transform can indicate how lines are in an image at any distance and any angle. Hough transform will collect lines from image in hough space (ρ, θ) . ρ is a distance of the line from original point and θ is an angle of the line. Each cell in hough space is the density of line at (ρ, θ) . We can get ρ from

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \tag{1}$$

We can plot an image from hough space as show in Fig. 5.

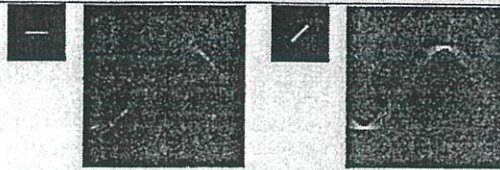


Fig. 5 Original image and hough image plotted from hough space. In x-axis is θ and y-axis is ρ . θ is changed from 1 to 360 degree

The brightest spots in figure are the dense points of hough space. Notice that, when θ is changed, hough image will also change in x-axis. However, there are many trivial lines in hough image. These lines may disturb our results, therefore, we have to threshold hough information to reduce this problem.

2.4 Phase correlation [1]

Phase correlation is one of Fourier properties. From Fourier equation

$$\mathfrak{F}\{f(x, y)\} = \hat{f}(\omega_x, \omega_y) \tag{2}$$

$$\mathfrak{F}\{f(x + \Delta x, y + \Delta y)\} = \hat{f}(\omega_x, \omega_y) e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} \tag{3}$$

We have image 1 that is shifted to any point and become image 2.

$$I_1(x + \Delta x, y + \Delta y) = I_2(x, y) \tag{4}$$

We apply equation (2) and (3) in (4).

$$\hat{I}_1(\omega_x, \omega_y) e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} = \hat{I}_2(\omega_x, \omega_y) \tag{5}$$

$$\frac{\hat{I}_1(\omega_x, \omega_y)}{\hat{I}_2(\omega_x, \omega_y)} = e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} \tag{6}$$

$e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)}$ is x-axis transition and y-axis transition from input images in Fourier domain. We can use inverse Fourier transform to get the x-y translation in spatial domain.

$$Corr(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}\{e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)}\} = \delta(x - \Delta x, y - \Delta y) \tag{7}$$

We should select transition at the point where correlation is 1. However, we cannot get the perfect correlation because of non-overlapping area and noise in input images. Therefore, we select the point that correlation is maximum instead.

$$(x, y) = \arg\{\max_{(\bar{x}, \bar{y})}\{Corr(\bar{x}, \bar{y})\}\} \tag{8}$$

We use x and y as an x-axis and y-axis transition respectively. Notice that x and y never become negative but translation can be negative. If transition is negative x and y become back to another side because of Fourier transform and phase correlation. As a result, we have to determine both positive and negative. There is another problem. If input images have different contrast, less overlapping area, or large amount of noise, the result from phase correlation may become incorrect. Therefore, it is better to use another form of phase correlation, which incorporates magnitude of Fourier coefficients to reduce the effect. From (6) we adapt to

$$\overline{Corr}(\omega_x, \omega_y) = \frac{\hat{f}_1^*(\omega_x, \omega_y) \hat{f}_2(\omega_x, \omega_y)}{|\hat{f}_1(\omega_x, \omega_y)| |\hat{f}_2(\omega_x, \omega_y)|} = e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} \tag{9}$$

Symbol $\hat{f}_2^*(\omega_x, \omega_y)$ is complex conjugate of f_2 .

3. EXPERIMENT

We perform the experiment on 3 input images, cameraman and satellite images of Bangkok and Pentagon. Several resolution of the input images (64x64, 128x128, 256x256, 512x512 and 1024x1024) are used. We divide our experiment into 2 parts. In the first part, we test the translation effect in x-y axis. The second part is to find both angular transition and x-y translation. The x-y translation from 5 pixels to 100 pixels are divided into 10 steps and tested. To obtain angular transition, we tested the total of 36 steps with 10 degrees apart. We also compare accuracy and processing time of the proposed algorithm with that of [2] as shown in table 1 and 2 and Fig. 6 and 7.

The results show that the propose algorithm can correctly detect x-y translation with errors of $\pm 2^{n-1}$, where n is the number of levels of wavelet transform we applied to the image. This error occurs due to the reduction of the resolution in wavelet domain. However, the error does not affect the result much. In the case of angular transition, the results using phase correlation and hough transform with canny detector as an edge detection process causes average error about 0.6%. Using edge information from wavelet domain without preprocessing is resulted in average errors about 3.23%. However, after we apply low pass filter before wavelet transform, average error decreases to 0.8%. Even though the error is greater than the previous case, it does not obviously affect output image. Moreover, by using information from wavelet domain, we can reduce the processing time not only from the reduction in resolution of the processing information but also the elimination of edge detection process. The larger the resolution of the image, the more reduction in the processing time. This can help making real-time image registration and analysis of high resolution images possible.

Processing time in our system is less than [2] especially when image resolution is large, see Fig.6 and 7. Notice that if images are small (less than 200 x 200 pixels), there is no need to apply wavelet transform in the process because processing time may differ less than 5 seconds while error may obviously seen. If images are large, processing time in our system will reduce sharply while error may not affect our result image much. The example result images are shown in Fig.8.

Table 1 Translation error occurred in our system compare to [2] (pixel)

Translation	[2]	Proposed system
Even value	0	0
Odd value	0	± 1

Table 2 Average angular transition error occurred in our system compare [2]

Angular transition	[2]	Proposed system
Average error	0.67	0.8

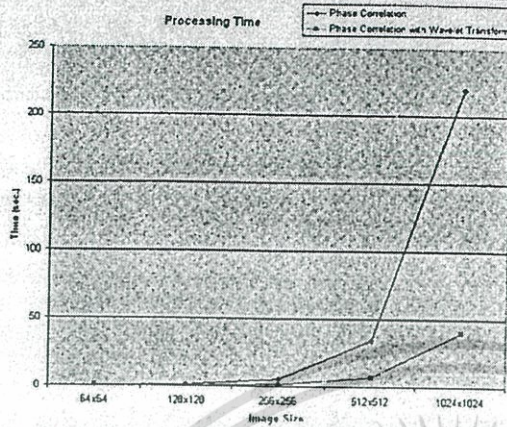


Fig. 6 Processing time of phase correlation technique with and without wavelet pre-processing

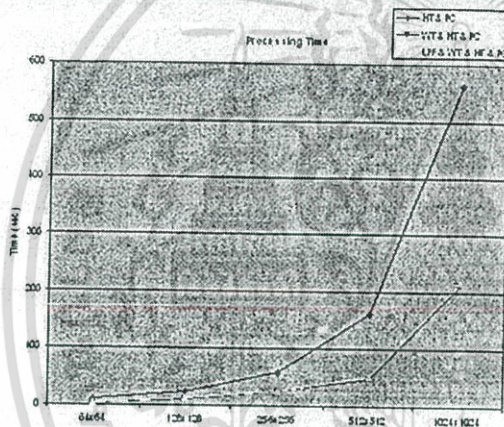


Fig. 7 Processing time of angular transition detection with and without wavelet and low pass filter

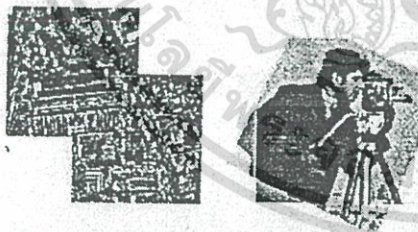


Fig.8 Example result images from our system

4. CONCLUSION AND FUTURE WORK

Image registration with phase correlation can find transition of two images correctly in case of integer translation. Wavelet transform can reduce the resolution of the image by 1/4 at each level. With lower resolution of the image, we can process with less time and space. Moreover, we can use information from wavelet transform in the place of edge detection process. However, some errors occur accumulatively at each level of wavelet. Therefore, we have to adjust some parameters to get the best registration result. Sub-pixel

registration is still required to accurately correct our result in case of real number transition. Even though edge information from wavelet transform is lower quality, we can improve the quality by filtering an image before applying wavelet transform to filter out trivial details that can cause errors. We may apply fast hough transform or other line collector method to further reduce processing time. For very low resolution of the image, there is no need to apply wavelet transform in the process because processing time may differ less than 5 seconds while error may obviously seen. However, for high resolution of the image which is usually the case for image registration, registration time is very high, thus registration in wavelet domain as proposed in this paper can help reduce the processing time sharply while error occurred is trivial and may not obvious.

REFERENCES

- [1] A.Averbuch and Y.Keller, "FFT Based Image Registration", IEEE International Conference Pages:IV-3608 - IV-3611 vol.4, 2002
- [2] Li Zhongke, Yang Xiaohui and Wu Lenan, "Image Registration Based on Hough Transform and Phase Correlation", 2003 International Conference, Pages:956 - 959 Vol.2, 2003
- [3] Jeungtae Kim and Jeffrey A.Fessler, "Image registration using robust correlation", IEEE International Symposium, Pages:353 - 356, 2002.
- [4] Prachya Chalermwat and Tarek El-Ghazawi, "Multi-resolution Image Registration using Genetics", 1999 International Conference on . Volume: 2, Pages:452 - 456 vol.2, 1999
- [5] A.Kadyrov and M.Petrou, "Fast Registration for 2D Images : The Clock Algorithm", 2003 International Conference, Pages:II - 715-18 vol.3, 2003
- [6] Jacqueline Le Moigne and James A.Smith, "Image registration and fusion for NASA remotely sensed imagery", Information Fusion, Third International Conference on , Volume: 1, Pages:TUB3/24 - TUB3/31 vol.1, 2000
- [7] Yalin Xiong and Ken Turkowski, "Registration, Calibration and Blending in Creating High Quality Panoramas", 1999
- [8] B.Srinivasa Reddy and B.N. Chatterji, "An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration", IEEE Transactions on Image Processing, Volumn 5, No.8, Pages 1266-1271, 1996
- [9] Winston Li and Henry Leung, "A Maximum Likelihood Approach for Image Registration Using Control Point And Intensity", Image Processing, IEEE Transactions, Volume: 13 , Pages:1115 - 1127, 2004
- [10] Jezching Ton and Anil K. Jain, "Registering Landsat images by point matching", Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, Volume: 27, Pages:642 - 651, 1989
- [11] L.M.G Fonseca and C.S. Kenney, "Control point assessment for image registration", Computer Graphics and Image Processing, Pages:125 - 132, 1999
- [12] Minghui Xia and Bede Liu, "Image registration by Super-curves", Image Processing, IEEE Transactions on, Volume: 13, Pages:720 - 732, 2004

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายพุทธิชัย สัมมา
เกิดวันที่	10 มกราคม 2523 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร
การศึกษา	ปีการศึกษา 2529-2534 ระดับประถมศึกษา โรงเรียนศรีวิทยา จังหวัดสมุทรปราการ ปีการศึกษา 2535-2537 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเทพศิรินทร์ ปีการศึกษา 2538-2540 ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2541-2544 ระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) การวิเคราะห์ ออกแบบ และดูแลระบบคอมพิวเตอร์ 2) การประมวลผลภาพ
ประสบการณ์ทำงาน	1) ปี 2546 สำนักงานประกันสุขภาพแห่งชาติ (สปสช.) ตำแหน่งเจ้าหน้าที่
งานสารสนเทศ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้