การจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟ เฟสคอลลีเรชั่น และวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน

IMAGE REGISTRATION USING HOUGH TRANSFORM, PHASE CORRELATION AND BEST FIRST SEARCH ALGORITHM

ศิวพร ชุณหวิทยะธีระ
SIWAPHON CHUNHAVITTAYATERA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูล แบบฮัฟ เฟสคอลลีเรชั่น และวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน

IMAGE REGISTRATION USING HOUGH TRANSFORM, PHASE CORRELATION AND BEST FIRST SEARCH ALGORITHM

ศิวพร ชุณหวิทยะธีระ

SIWAPHON CHUNHAVITTAYATERA

เลขหมู่.........................
เลขทะเบียน 75115
วัน,เดือน,ปี 19 ต.ค. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

IMAGE REGISTRATION USING HOUGH TRANSFORM, PHASE CORRELATION AND BEST FIRST SEARCH ALGORITHM

SIWAPHON CHUNHAVITTAYATERA

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
2007

COPYRIGHT 2007
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟ เฟสคอลลีเรชั่น และวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน
นักศึกษา	นางสาวศิวพร ชุณหวิทยะธีระ
รหัสนักศึกษา	47060801
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.อรฉัตร จิตต์โสภักตร์

บทคัดย่อ

การจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่เป็นกระบวนนำภาพย่อยๆ ที่ถ่าย ณ บริเวณพื้นที่ใกล้เคียงกันมาเรียงต่อกันให้มีพิกัดจุดสอดคล้องกัน เพื่อให้ดูกลมกลืนเป็นภาพเดียวกัน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายด้าน อาทิเช่น งานภาพถ่ายดาวเทียม งานสำรวจพื้นที่ การทำแผ่นที่ การพยากรณ์อากาศ การประมวลผลภาพเพื่อการรักษาทางการแพทย์ เป็นต้น

งานวิจัยนี้ได้รวมเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัพ (Hough Transform) เฟสคอลลีเรชั่น (Phase Correlation) และวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (Best First Search) ร่วมกับการพิจารณาค่ามุมที่มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับค่ามุมการหมุนอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อแก้ปัญหาของการจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่ โดยใช้เทคนิคเฟสคอลลีเรชั่นแบบหนึ่งมิติเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของมุมในฮัฟสเปซซึ่งได้มาจากเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟ จากนั้นอาศัยวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ได้ผลลัพธ์ของมุมการหมุนที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นสำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ กัน จากนั้นเมื่อได้มุมการหมุนแล้ว จะทำการหมุนภาพกลับเพื่อชดเชยการหมุน สุดท้ายใช้เฟสคอลลีเรชั่นแบบสองมิติเพื่อทำการหาค่าของการเลื่อนตำแหน่ง และใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ในขั้นตอนทำการรวมภาพเพื่อสร้างภาพรวมใหญ่ต่อไป

ผลการทดลองสำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ กันแสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอนั้นสามารถหาค่าของการเลื่อนตำแหน่งได้อย่างถูกต้อง และวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนร่วมกับการพิจารณาค่ามุมที่มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับค่ามุมการหมุนอย่างมีนัยสำคัญ สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของมุมการหมุนให้กับการใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัพและเฟสคอลลีเรชั่นในการหาค่ามุมการหมุนโดยใช้เวลาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการค้นหาแบบพิจารณาทุกค่า (Full Search)

Thesis Title	Image Registration using Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search Algorithm
Student	Miss Siwaphon Chunhavittayatera
Student ID.	47060801
Degree	Master of Engineering
Program	Computer Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Orachat Chitsobhuk

ABSTRACT

Image registration is a process to compose two or more nearly located images according to coordinate points and to fit them in the same geographical location. It is useful to apply image registration in several applications such as a satellite photography, geography, cartography, weather forecasting, or medical image processing.

This reseach presents a combination of Hough transform, phase correlation and Best-First Search algorithm to solve the problem of image registration. In the First step, the translation of angles are pre-calculated based on 1D phase correlation in Hough space and used as candidate angles. Then, Best First Search algorithm is applied to obtain the best translation of angle from candidate angles. The rotation parameter obtain from this step is used to de-rotated the input images. In the second step, the translation in x-y axis is computed using 2D phase correlation. Finally, the input images are registered using the estimated translation parameter.

The experimental results in various image details and sizes show the accuracy of the proposed technique to detect the translation parameters. The Best First Search algorithm can help increasing the percent of correct of rotation parameter from using Hough transform and phase correlation while require less amount of processing compared to Full Search algorithm.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปเสียมิได้ หากปราศจากความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ได้ให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อรณัตร จิตต์โสภักตร์ สำหรับวิชาความรู้ที่ได้มอบให้การให้คำปรึกษา ดูแล ตลอดจนคอยให้แนวทางในการแก้ปัญหาตั้งแต่เริ่มต้นจนสามารถสำเร็จเป็นวิทยานิพนธ์นี้ได้

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่ได้คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในหลายๆ ด้านแก่ข้าพเจ้า

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สำหรับการสนับสนุนงบประมาณในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

คุณความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดามารดาที่รัก และครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้เคยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ศิวพร ชุณหวิทยะธีระ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง IX

สารบัญรูป XIV

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย 2

1.4 ทฤษฎี และหลักการที่ใช้ในงานวิจัย 2

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย 3

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา 3

1.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 4

1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ 4

บทที่ 2 แนวคิดเบื้องต้น และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 แนวคิดเบื้องต้นของ Image Registration 6

2.2 การจำแนกประเภทของอัลกอริทึมที่ใช้ทำ Image Registration 9

2.2.1 การจำแนกประเภทตามโดเมนที่ใช้ประมวลผล 9

2.2.1.1 Spatial Domain 9

2.2.1.2 Frequency Domain 9

2.2.2 การจำแนกประเภทตามมุมมองของภาพ 9

2.2.2.1 Area-based methods 9

2.2.2.2 Feature-based methods 10

2.2.3 การจำแนกประเภทตาม Transformation model 10

2.2.3.1 Linear Transformation 10

2.2.3.2 Non-Linear Transformation 10

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.2.4 การจำแนกประเภทตามเทอมของการค้นหา 10

2.2.4.1 Search-based methods 10

2.2.4.2 Direct methods 11

2.2.5 การจำแนกประเภทตามการได้มาของภาพ 11

2.2.5.1 Single-modality 11

2.2.5.2 Multi-modality 11

2.2.6 การจำแนกประเภทตามแอปปลิเคชั่น 11

2.2.6.1 Remote sensing 11

2.2.6.2 Medical Image Analysis 11

2.2.6.3 Computer Vision และ Pattern Recognition 12

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 12

บทที่ 3 ความรู้พื้นฐานในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 14

3.1 ระบบพิกัดในระนาบ 14

3.1.1 ระบบพิกัดฉาก 14

3.1.2 ระบบพิกัดเชิงขั้ว 15

3.1.3 ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดฉากและระบบพิกัดเชิงขั้ว 17

3.2 Geometric transformation 18

3.2.1 Geometric Spatial Transform 18

3.2.2 Interpolation 21

3.2.2.1 วิธีการคำนวณที่ใช้ Forward mapping 21

3.2.2.2 วิธีการคำนวณที่ใช้ Inverse mapping 22

3.2.2.2.1 Zero-order Interpolation 23

3.2.2.2.2 First-order interpolation 24

3.2.2.2.3 High-order interpolation 25

3.3 Fourier Transform 26

3.3.1 Discrete Fourier Transform 28

3.3.2 Fast Fourier Transform 30

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4 Phase Correlation 32
3.5 Hough Transform 34
3.6 เทคนิค Canny edge detection 36
3.7 Searching Algorithm 39
3.7.1 Blind Search 39
3.7.1.1 Full Search 39
3.7.1.2 Partial Search 39
3.7.1.2.1 Depth First Search 39
3.7.1.2.2 Breadth First Search 40
3.7.2 Heuristic Search 40
3.7.2.1 Hill Climbing 41
3.7.2.2 Best First Search 41
3.7.2.3 A* Search 42
3.8 Root Mean Square Error 43

บทที่ 4 วิธีการทำ Image Registration ด้วยวิธีการที่นำเสนอ 45
4.1 ภาพรวมของการทำ Image Registration ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ 45
4.2 การปรับขนาดของภาพด้วยเทคนิคการ Padding 47
4.3 การค้นหาเส้นขอบภาพด้วยเทคนิค Edge Detection 47
4.4 Hough Transform 48
4.5 1D Phase Correlation 50
4.6 Candidate Angles 51
4.7 Best-first search 52
4.8 De-rotate Input Image2 54
4.9 2D Phase Correlation 55
4.10 Registering Image 56

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง 57

5.1 บทนำ 57

5.2 ภาพที่ใช้สำหรับการทดลอง 58

5.3 การวัดผลการทดลอง 66

5.4 การทดลองและผลการทดลอง 66

5.4.1 การทดลองเพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสม 67

5.4.2 การทดลองเพื่อพิจารณาความสำคัญของมุมการหมุนที่เกี่ยวข้อง 72

5.4.3 การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน 74

5.4.4 การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอ 76

5.4.5 การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณความเข้มแสง ของวิธีการที่นำเสนอ 81

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และแนวทางการพัฒนา 94

6.1 สรุปผลการวิจัย 94

6.2 แนวทางการพัฒนา 96

เอกสารอ้างอิง 97

ภาคผนวก 98

ภาคผนวก ก เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของพื้นที่ซ้อนทับกันน้อยที่สุด 99

ภาคผนวก ข การทดลองเพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสม 103

ภาคผนวก ค การทดลองเพื่อพิจารณาความสำคัญของมุมการหมุนที่เกี่ยวข้อง 109

ภาคผนวก ง การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดที่แตกต่างกัน 116

ภาคผนวก จ การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวน ของวิธีการที่นำเสนอ 110

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ฉ การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณความเข้มแสง
ของวิธีการที่นำเสนอ 127

ภาคผนวก ช ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่........152

ประวัติผู้เขียน 165

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 Affine Transformation ชนิดต่างๆ 20

3.2 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนการคูณเลขเชิงซ้อนของ DFT และ FFT 32

4.1 แสดงคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง 56

5.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม 68

5.2 แสดงเวลาประมวลผลโดยเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม 69

5.3 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องและเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพในทุกๆลักษณะและขนาด เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม 70

5.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน 72

5.5 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน 73

5.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยและความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในทุกๆลักษณะและขนาดภาพ ที่มุมการหมุนต่างๆที่เกี่ยวข้อง 74

5.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน 74

5.8 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน 75

5.9 แสดงเวลาที่ใช้ประมวลผลโดยเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน (วินาที) 75

5.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ 77

5.11 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและ ขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ 78

5.12 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 79

5.13 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 79

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

5.14 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 82

5.15 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 86

5.16 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อทำการปรับค่าความเข้มแสงเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 90

5.17 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อทำการปรับค่าความเข้มแสงเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 91

ก.1 แสดงภาพตัวอย่างการเลื่อนตำแหน่งด้วยระยะ M ใดๆ ที่มากที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ และภาพที่เกิดจากการเลื่อนตำแหน่งด้วยระยะ M ที่มากเกินกว่าจะสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ แสดงเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ สำหรับภาพขนาดต่างๆ 100

ก.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกันคือ ภาพ line, mixline, moreline และ multiline ซึ่งได้มาจากภาพภาพดาวเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง 101

ก.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกันคือ ภาพ line, mixline, moreline และ multiline ซึ่งได้มาจากภาพภาพดาวเทียมในบริเวณเขตมีนบุรี 101

ก.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกันคือ ภาพ line, mixline, moreline และ multiline ซึ่งได้มาจากภาพภาพดาวเทียมในบริเวณเขตดอนเมือง 101

ก.5 แสดงเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกัน ทั้งเขตลาดกระบัง เขตมีนบุรี และเขตดอนเมือง 102

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ก.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะและขนาดต่างๆกันที่ได้มาจากภาพภาพดาวเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง เขตมีนบุรี และเขตดอนเมือง 102

ข.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆเขตลาดกระบัง เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม 103

ข.2 แสดงเวลาประมวลผลโดยเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและและขนาดต่างๆเขตลาดกระบัง เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม 104

ข.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและและขนาดต่างๆเขตมีนบุรี เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม 105

ข.4 แสดงเวลาประมวลผลโดยเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและและขนาดต่างๆเขตมีนบุรี เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม 106

ข.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและและขนาดต่างๆเขตดอนเมือง เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม 107

ข.6 แสดงเวลาประมวลผลโดยเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและและขนาดต่างๆเขตดอนเมือง เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม 108

ค.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆเขตลาดกระบัง โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน (เปอร์เซ็นต์) 110

ค.2 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆเขตลาดกระบัง โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน (องศา) 111

ค.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆเขตมีนบุรี โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน (เปอร์เซ็นต์) 112

ค.4 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆเขตมีนบุรี โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน (องศา) 113

ค.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆเขตดอนเมือง โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน (เปอร์เซ็นต์) 114

ค.6 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆเขตดอนเมือง โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน (องศา) 115

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ง.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตลาดกระบัง (เปอร์เซ็นต์) 117

ง.2 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตลาดกระบัง (องศา) 117

ง.3 แสดงเวลาที่ใช้ประมวลผลโดยเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน กัน เขตลาดกระบัง (วินาที) 117

ง.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตมีนบุรี (เปอร์เซ็นต์) 118

ง.5 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตมีนบุรี (องศา) 118

ง.6 แสดงเวลาที่ใช้ประมวลผลโดยเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน กัน เขตมีนบุรี (วินาที) 118

ง.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตดอนเมือง (เปอร์เซ็นต์) 119

ง.8 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตดอนเมือง (องศา) 119

ง.9 แสดงเวลาที่ใช้ประมวลผลโดยเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน กัน เขตดอนเมือง (วินาที) 119

จ.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตลาดกระบัง เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ 121

จ.2 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตลาดกระบัง เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ 122

จ.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตมีนบุรี เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ 123

จ.4 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตมีนบุรี เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ 124

จ.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตดอนเมือง เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ 125

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

จ.6 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตดอนเมือง เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ 126

ฉ.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตลาดกระบัง เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 128

ฉ.2 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตลาดกระบัง เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 132

ฉ.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตมีนบุรี เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 136

ฉ.4 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตมีนบุรี เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 140

ฉ.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตดอนเมือง เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 144

ฉ.6 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เขตดอนเมือง เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 148

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ตัวอย่างการทำ Image Registration 8

2.2 ตัวอย่างการทำ Image Registration 8

2.3 แสดงผลลัพธ์ของการทำ Image Registration ที่ต่างออกไปเมื่อเลือกภาพอ้างอิงต่างกัน 8

2.4 แสดงผลลัพธ์ของการทำ Image Registration ที่ต่างออกไปเมื่อเลือกภาพอ้างอิงต่างกัน 8

3.1 แสดงจตุภาคทั้งสี่ในระบบพิกัดฉาก 14

3.2 พิกัดของจุด P(x, y) ใดๆในจตุภาคที่ 1 15

3.3 ระบบพิกัดเชิงขั้ว 16

3.4 พิกัดเชิงขั้วเมื่อ $r < 0$ 16

3.5 จุดหนึ่งจุดมีพิกัดเชิงขั้วได้หลายพิกัด 16

3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากและพิกัดเชิงขั้ว 17

3.7 ตัวอย่างของ spatial transformation 19

3.8 การทำ Forward mapping 21

3.9 ปัญหาของการทำ Forward mapping 22

3.10 การทำ Inverse Mapping 23

3.11 การทำ Inverse mapping แบบ Zero-order Interpolation 23

3.12 การทำ Inverse Mapping แบบ First-order Interpolation 24

3.13 การทำ Inverse Mapping แบบ high-order Interpolation 25

3.14 การแปลงสัญญาณจาก Time Domain เป็น Frequency Domain 27

3.15 การทำ Fourier Transform กับภาพ 28

3.16 การทำ FFT 30

3.17 เทคนิค DIT-FFT สำหรับข้อมูลจำนวน 8 จุด 31

3.18 วิธีการวัด ρ และ θ ของเส้นตรงในพิกัดเชิงขั้ว 35

3.19 การทำ Hough Transform 36

3.20 ลำดับการค้นหาบนโหนดของการค้นหาแบบลึกก่อน 40

3.21 ลำดับการค้นหาบนโหนดของการค้นหาแบบกว้างก่อน 40

3.22 แสดงลักษณะการค้นหาแบบ Hill climbing 41

3.23 แสดงขั้นตอนของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน 42

3.24 แสดงขั้นตอนของการค้นหาแบบ A* 43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการทำ Image Registration ด้วยวิธีการที่นำเสนอ	49
4.2	แสดงการทำ Padding	47
4.3	แสดงการทำ Canny edge detection	48
4.4	การทำ Hough Transform	49
4.5	แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน θ ของฮัฟสเปซเมื่อมีการหมุนภาพตั้งต้น	49
4.6	กราฟของ Sine Function และ Cosine Function	51
4.7	ตัวอย่างขั้นตอนของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน	53
4.8	ตัวอย่างของการหมุนภาพกลับในทิศตามเข็มนาฬิกา	55
5.1	ภาพถ่ายดาวเทียมต้นฉบับที่ใช้ในการทดลอง	59
5.2	ภาพที่ใช้ในการทดลองซึ่งได้จากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง แบ่งออกเป็นลักษณะและขนาดต่างๆกัน	60
5.3	ภาพที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตมีนบุรี แบ่งออกเป็นลักษณะและขนาดต่างๆกัน	61
5.4	ภาพที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตดอนเมือง แบ่งออกเป็นลักษณะและขนาดต่างๆกัน	62
5.5	ภาพที่ใช้ในการทดลองหลังจากทำการหาเส้นขอบแล้วซึ่งได้จาก ภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง	63
5.6	ภาพที่ใช้ในการทดลองหลังจากทำการหาเส้นขอบแล้วซึ่งได้จาก ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตมีนบุรี	64
5.7	ภาพที่ใช้ในการทดลองหลังจากทำการหาเส้นขอบแล้วซึ่งได้จาก ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตดอนเมือง	65
5.8	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของภาพในทุกๆลักษณะ และขนาดเมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม	70
5.9	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพในทุกๆลักษณะ และขนาดเมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม	71
5.10	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.11 กราฟแสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 80

5.12 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อมีการปรับค่าความเข้มแสง 92

5.13 กราฟแสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อมีการปรับค่าความเข้มแสง 92

ก.1 แสดงพื้นที่ซ้อนทับของภาพขนาด NxN ใดๆ 99

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย

Image Registration หรือการจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่เป็นปัญหาพื้นฐานหนึ่งสำหรับการประยุกต์ใช้งานทั้งทางด้าน Image Processing หรือการประมวลภาพ และ Computer Vision หรือคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ตัวอย่างงานที่สำคัญของการทำ Image Registration คือ การจัดเรียงภาพถ่ายจากดาวเทียม การประกอบภาพเป็นแผนที่ของบริเวณที่ถูกถ่ายภาพ งานทางด้านแพทย์เช่นภาพเอ็กซ์เรย์ของคนไข้ เป็นต้น

Image Registration เป็นขั้นตอนแรกในการสร้างภาพใหญ่ทั้งหมด โดยนำเอาภาพย่อยครั้งละสองภาพซึ่งถ่ายมาจากตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันมาทำการจัดเรียง และประกอบกันเป็นภาพใหญ่ภาพใหม่ โดยในภาพย่อยๆ นั้น จะต้องมีส่วนที่ทับซ้อนกันอยู่บางส่วนและจะทำเช่นนี้กับทุกๆ ภาพย่อยเพื่อให้ได้ภาพรวมใหญ่ทั้งหมดออกมาซึ่งในภาพรวมใหญ่นั้นเกิดจากรายละเอียดของภาพย่อยๆ ทั้งหมดประกอบเข้าด้วยกัน

ความสำคัญของ Image Registration เนื่องมาจากในการถ่ายภาพนั้น บางครั้งเราไม่สามารถเก็บรายละเอียดของภาพที่ต้องการได้ทั้งหมด ซึ่งอาจเนื่องมาจากรายละเอียดต่างๆ ในภาพ ความละเอียดในการถ่ายภาพ รวมถึงความสามารถของกล้องในการย่อ และขยายขนาดของภาพ ภาพถ่ายที่ได้อาจมีรายละเอียดไม่เพียงพอต่อการพิจารณา หรือต้องใช้หลายภาพในการพิจารณา ดังนั้นเราสามารถถ่ายภาพหลายๆ ภาพต่อเนื่องกัน แล้วนำเอาภาพทั้งหมดมาทำการจัดเรียง และประกอบกันเข้าให้กลายเป็นภาพเดียวกัน เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาและวิเคราะห์ภาพ

แนวความคิดเบื้องต้นในการทำ Image Registration นั้น เราจะใช้สมมติฐานที่ว่า บริเวณที่ถูกถ่ายภาพนั้นคงที่ สิ่งที่เปลี่ยนไปคือตำแหน่งกล้องที่ถ่ายภาพ ภาพถ่ายที่มีส่วนที่ทับซ้อนนั้นจึงเกิดจากการที่กล้องมีการเคลื่อนไหว หรือมีการเปลี่ยนแปลง หากเราหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ เราก็จะสามารถนำภาพมาประกอบกันได้ การเปลี่ยนแปลงที่สามารถเกิดขึ้นได้นี้ ได้แก่ การเลื่อนในแนวแกนนอน การเลื่อนในแนวแกนตั้ง การหมุน การบิด การยืด และการเปลี่ยนแปลงขนาด โดยอาจเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียง 1 ประเภท แต่ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการประกอบกันมากกว่า 1 ประเภท สำหรับงานวิจัยนี้จะครอบคลุมเฉพาะการเลื่อนในแนวแกนนอน การเลื่อนในแนวแกนตั้ง และการหมุนของภาพ

งานวิจัยนี้นำเสนอการทำ Image Registration โดยได้รวมเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟ (Hough Transform) เฟสคอลลีเรชั่น (Phase Correlation) และวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (Best First Search Algorithm) ร่วมกับการพิจารณาค่ามุมที่มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับค่ามุม

การหมุนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นการรวมข้อดีของการทำงานในโดเมนความถี่ที่ใช้เวลาในการทำงานที่น้อยร่วมกับการทำงานในโดเมนของจุดในภาพซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง ทำให้การจัดเรียงภาพเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่สามารถรองรับการทำงานกับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้น โดยผลลัพธ์ที่ได้จะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นและใช้เวลาในการประมวลผลที่น้อยเมื่อเทียบการทำงานในโดเมนของจุดในภาพอย่างเดียว และการทำงานในโดเมนความถี่ไม่ต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์จำนวนมากมายเหล่านั้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาเทคนิคและวิธีการทำ Image Registration ที่มีอยู่ในปัจจุบันเพื่อดูแนวโน้มความเป็นไปได้ตลอดจนพิจารณาถึงข้อดีและข้อด้อยของแต่ละวิธีการ

1.2.2 ศึกษาเทคนิคและวิธีการทำ Image Registration โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟ เฟสคอลลีเรชั่น และการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน

1.2.3 ศึกษาภาพลักษณะและขนาดต่างๆ กันว่ามีผลต่อวิธีการทำ Image Registration ที่ได้นำเสนออย่างไร

1.2.4 ศึกษาประสิทธิภาพและข้อจำกัดของวิธีการทำ Image Registration Image Registration ที่ได้นำเสนอเทียบกับวิธีอื่นๆ อย่างไร

1.2.5 เพื่อเป็นแหล่งข้อมูลอ้างอิงสำหรับผู้สนใจงานวิจัยด้านนี้ต่อไป

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาเทคนิคและวิธีการทำ Image Registration ด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อให้ได้วิธีการที่มีประสิทธิภาพ นั่นคือมีทั้งความถูกต้องและรวดเร็วและมีความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงต่อไป โดยได้ทำการประยุกต์ เทคนิคการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (Best First Search) ร่วมกับการพิจารณาค่ามุมที่มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับค่ามุมการหมุนอย่างมีนัยสำคัญเข้ากับเทคนิคเดิมที่มีผู้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง นั่นคือ เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟ (Hough Transform) และเฟสคอลลีเรชั่น (Phase Correlation) ทำให้ผลที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นและสามารถรองรับการทำงานกับภาพที่มีลักษณะและขนาดต่างๆ ได้หลากหลายยิ่งขึ้น

1.4 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในงานวิจัย

การทำ Image Registration ในงานวิจัยนี้ จะอาศัยทฤษฎี และหลักการดังต่อไปนี้

1.4.1 Geometric Transform

1.4.2 Fourier Transform และคุณสมบัติ Phase Correlation

1.4.3 Hough Transform และ Canny Edge Detection

1.4.4 Best First Search algorithm

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองการทำ Image Registration ด้วยเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัพและเฟสคอลลีเรชั่นบนโดเมนความถี่ และเทคนิคการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน บนโดเมนของจุดในภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้รองรับเฉพาะการเปลี่ยนแปลงในลักษณะการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนตั้ง แนวแกนนอน และการหมุนภาพเท่านั้น และสามารถรองรับได้เฉพาะขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงที่เป็นจำนวนเต็มเท่านั้น ในการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีผู้ทำอยู่เดิมและเปรียบเทียบกับการค้นหาแบบทุกค่าเพื่อพิจารณาถึงความถูกต้องและเวลาที่ใช้ในการประมวลผลสำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ กัน

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1.6.1 กำหนดวัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัย ว่าต้องการนำเสนอ หรือศึกษางานวิจัยในหัวข้อนี้อย่างไร

1.6.2 ศึกษาวิธีการทำ Image Registration ตามที่เคยมีผู้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้เพื่อดูความเป็นได้ เปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของแต่ละวิธีการเพื่อนำมาปรับปรุง และประยุกต์ใช้

1.6.3 ตั้งสมมุติฐานในงานวิจัยนี้ ตามทฤษฎีและหลักการที่ได้ศึกษา และกำหนดแนวทางในการทำงานวิจัย

1.6.4 เตรียมฐานข้อมูลงานวิจัยเพื่อนำมาใช้ทดลอง ซึ่งอาศัยภาพถ่ายจากดาวเทียมเป็นหลัก โดยมีการแยกภาพตามรายละเอียดและขนาดของภาพ

1.6.5 พัฒนาโปรแกรมที่จำเป็นต้องใช้ในการทำ Image Registration ตามลักษณะ และวิธีการตามที่ได้กำหนดแนวทางไว้

1.6.6 ทำการทดลองกับฐานข้อมูลภาพที่ได้เตรียมไว้ โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น และทำการเก็บข้อมูล และผลลัพธ์จากการทดลอง เพื่อการวิเคราะห์ และปรับปรุงในงานวิจัย

1.6.7 ประเมินผลการทดลองโดยใช้ข้อมูลและผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับงานวิจัยเดิมที่เคยมีผู้ทำมาก่อน ทั้งในด้านความถูกต้องและเวลาที่ใช้ในการประมวลผล และทำการสรุปผลการทดลอง

1.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ ได้แก่

1.7.1 เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ค ใช้หน่วยประมวลผลกลาง CPU Intel Pentium M processor 1300 MHz ความเร็ว 1.3 GHz หน่วยความจำ 640 MB จำนวน 1 เครื่อง

1.7.2 ระบบปฏิบัติการ Windows XP Professional

1.7.3 โปรแกรม Matlab 7.0

1.7.4 โปรแกรม Adobe Photoshop CS

1.7.5 โปรแกรม Paint

1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท แต่ละบทประกอบด้วยเนื้อหาดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมติฐานของงานวิจัย ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงแนวคิดเบื้องต้น ตัวอย่างในการทำ Image Registration การจำแนกประเภทของอัลกอรึทึมที่ใช้งาน และตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆเพื่อประกอบความเข้าใจในการทำการทดลอง ได้แก่ ระบบพิกัดในระนาบ, Geometric Transform, Fourier Transform, Phase Correlation, Hough Transform, Canny edge detection, Searching Algorithm และการคำนวณค่า RMSE

บทที่ 4 กล่าวถึงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของการทำ Image Registration ด้วยเทคนิคที่ได้นำเสนอ โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดทีละขั้นตอนจนได้ผลลัพธ์ที่ต้องการออกมา

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองทั้งหมดด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอและวิธีการอื่นๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ทั้งในเรื่องของความถูกต้องและเวลาที่ใช้

บทที่ 6 กล่าวถึงภาพรวมของงานวิจัยที่ได้นำเสนอ และผลการทดลองโดยสรุป พร้อมทั้งข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาระบบเพื่อใช้ต่อไปในอนาคต

ภาคผนวก แสดงรายละเอียดของผลการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ และผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทที่ 2
แนวคิดเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันงานวิจัยที่นำความรู้ในเรื่อง Image Registration ไปประยุกต์ใช้งานมีทั้งทางด้านการประมวลผลภาพ (Image Processing) และคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้มีการวิจัยและพัฒนาเทคนิคต่างๆ มาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดเบื้องต้นของการทำ Image Registration และอัลกอริธึมประเภทต่างๆ ที่มีการคิดค้นขึ้น ตลอดจนกล่าวถึงตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้เทคนิคทางด้านโดเมนความถี่

2.1 แนวคิดเบื้องต้นของ Image Registration

หลายๆ ท่านอาจจะสับสนระหว่าง Image Registration และ Image Fusion ว่าคือเรื่องเดียวกัน แต่จริงๆ แล้ว Image fusion จะเป็นส่วนของแอปปลิเคชั่นหรือการประยุกต์ใช้งาน โดยการซ้อนทับภาพ เพื่อให้ได้ข้อมูลเพิ่มขึ้น แต่ Image Registration เป็นกระบวนการหรือ วิธีการที่จะพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดบนภาพสองภาพ ซึ่งเป็นพื้นฐานของการนำไปประยุกต์ใช้ในงานการประมวลผลภาพ กล่าว คือ Image Registration เป็นส่วนหนึ่งของ Image Fusion นั่นเอง

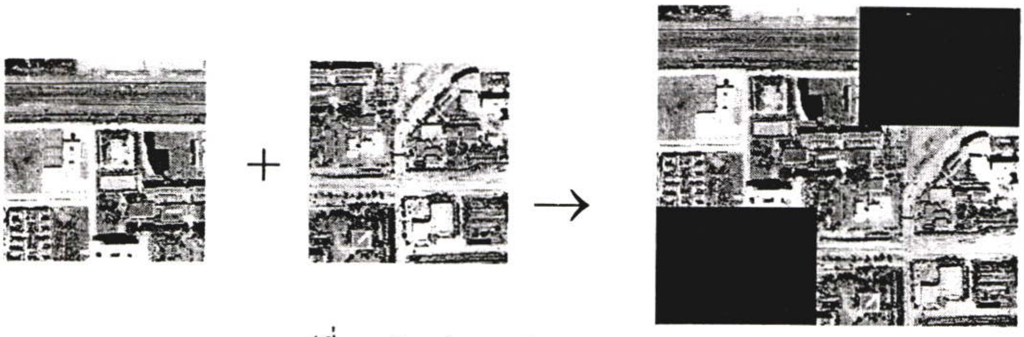
การจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่ หรือ Image Registration จะประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก คือ ข้อมูล ซึ่งในที่นี้ คือ ภาพอินพุท 2 ภาพ และการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพทั้งสอง อีกส่วนหนึ่ง คือ อัลกอริธึมที่นำมาใช้หาการเปลี่ยนระหว่างภาพทั้งสองนั่นเอง ซึ่งแนวคิดเบื้องต้นของการจัดเรียงและประกอบภาพนั้น ใช้สมมุติฐานที่ว่า บริเวณที่ถูกถ่ายภาพนั้นคงที่ โดยสิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปคือตำแหน่งกล้องที่ถ่ายภาพ ภาพถ่ายที่มีส่วนซ้อนทับกันจึงเกิดจากการที่กล้องมีการเคลื่อนไหว หรือมีการเปลี่ยนแปลง หากเราหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ เราก็จะสามารถนำภาพทั้งสองมาประกอบกันได้ ด้วยแนวคิดเบื้องต้นนี้เอง จึงได้มีผู้พยายามศึกษาวิจัยเพื่อคิดค้นอัลกอริธึมต่างๆ ขึ้นมามากมายเพื่อให้สามารถหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างภาพทั้งสองอันจะนำไปสู่การจัดเรียงและประกอบภาพใหม่ได้

วิธีการในการทำ Image Registration โดยปกติแล้วจะเป็นการประกอบภาพทีละคู่ภาพตามตำแหน่งที่ถูกต้องโดยอาศัยอัลกอริธึมที่ได้ศึกษามาแล้ว นั่นคือ เริ่มแรกจะนำภาพใดๆ สองภาพมาทำ Image Registration กัน ผลที่ได้คือภาพรวมที่มีรายละเอียดของภาพทั้งสองอยู่อย่างกลมกลืนเป็นภาพเดียวกัน จากนั้นนำภาพดังกล่าวไปทำ Image Registration อีกครั้งกับภาพตั้งต้นภาพอื่น ก็จะได้ภาพรวมที่ใหญ่ขึ้นอีก ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆจนหมดภาพตั้งต้น สุดท้ายผลที่ได้คือ ภาพรวมขนาดใหญ่ที่มีรายละเอียดของทุกๆ ภาพตั้งต้นในตำแหน่งที่ถูกต้อง ดูกลมกลืนเป็นภาพขนาดใหญ่ภาพเดียว

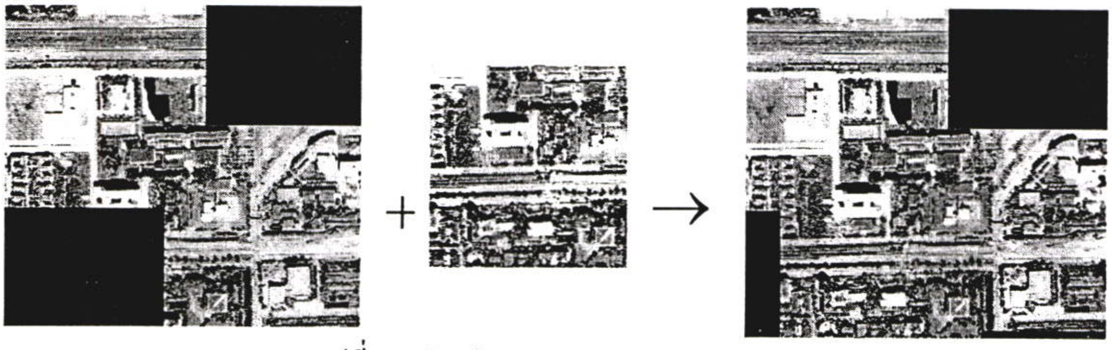
หรืออาจจะทำ Image Registration กับทีละคู่ของภาพตั้งต้นก็ได้ แล้วนำภาพรวมของภาพตั้งต้นนั้นมาทำ Image Registration อีกจนกระทั่งได้ภาพรวมขนาดใหญ่ที่ดูกลมกลืนเป็นภาพเดียวกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การทำ Image Registration ไม่จำเป็นต้องคำนึงว่าจะต้องเริ่มต้นจากภาพตั้งต้นคู่ใดก่อน แต่สิ่งหนึ่งที่เป็นกฎสำคัญในการทำ Image Registration นั่นคือ ภาพตั้งต้นทั้งสองจะต้องมีส่วนที่ซ้อนทับกันอยู่บางส่วน หรือเป็นภาพที่ถ่ายมาในบริเวณที่ใกล้เคียงกัน มีส่วนเหลื่อมล้ำกันเพื่อให้สามารถมีจุดอ้างอิงในการคำนวณหาความสัมพันธ์ หรือ ความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพทั้งสองได้ การเลือกภาพใดในระหว่างคู่ภาพเป็นภาพตั้งต้นหรือภาพอ้างอิง และให้อีกภาพเป็นภาพอินพุทหรือภาพเป้าหมายนั้น หากเลือกสลับกัน ผลลัพธ์ที่ได้จะแตกต่างกันออกไปในเรื่องของมุมมองการมองเห็นเพราะการทำ Image Registration จะต้องมีการคำนวณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างคู่ภาพ ดังนั้นจึงต้องมีภาพหนึ่งที่ใช้เป็นหลักในการอ้างอิง คือ ภาพตั้งต้นหรือภาพอ้างอิง และภาพที่ต้องการหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น คือ ภาพอินพุทหรือภาพเป้าหมาย เพื่อหาว่าภาพอินพุทมีการเปลี่ยนแปลงไปจากภาพอ้างอิงเท่าใด จากนั้นจึงเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพของภาพอินพุทเพื่อให้เป็นไปในรูปแบบเดียวกับภาพอ้างอิงในมุมมองของการมองเห็นเดียวกันหรือสัมพันธ์กัน รูปที่ 2.1 และ 2.2 แสดงตัวอย่างของการทำ Image Registration และรูปที่ 2.3 และ 2.4 แสดงผลลัพธ์ที่ต่างออกไปเมื่อเลือกภาพอ้างอิงต่างกัน

จากตัวอย่างของการทำ Image Registration ในรูปที่ 2.1 ภาพย่อยแรกทางซ้ายมือและภาพย่อยที่สองตรงกลางมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน คือ ภาพย่อยที่สองมีการเลื่อนตำแหน่งตัวรับภาพไปจากภาพย่อยแรกไปในระยะของแกนตั้งและแกนนอนจำนวนหนึ่ง แนวคิดสำคัญของการทำ Image Registration ของทั้งสองภาพนี้ก็คือการหาระยะของการเลื่อนตำแหน่งดังกล่าวให้ได้นั่นเอง จากนั้นจึงทำการจัดเรียง และประกอบภาพใหม่ขึ้น ดังภาพรวมทางขวามือซึ่งจะมีรายละเอียดของภาพย่อยทั้งสองครบถ้วนและดูกลมกลืนกัน และรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าเราสามารถทำการจัดเรียงและประกอบภาพใหม่ได้เรื่อยๆ เพื่อให้ได้ภาพรวมที่ใหญ่ขึ้นอีก ซึ่งจะเห็นได้ว่า เราได้นำภาพรวมที่เป็นผลลัพธ์จากรูปที่ 2.1 มามองเสมือนเป็นภาพย่อยภาพใหม่แล้วทำ Image Registration อีกครั้ง ทำให้ได้ภาพผลลัพธ์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งมีรายละเอียดของภาพที่เราต้องการครบถ้วน

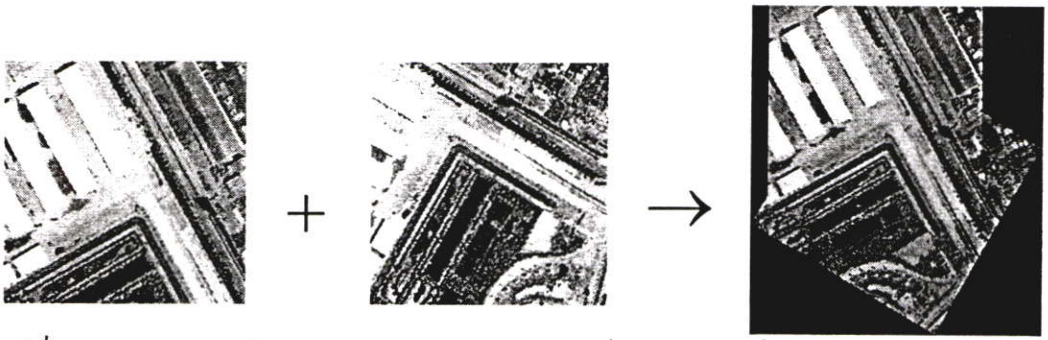
การเลือกภาพใดในระหว่างคู่ภาพเป็นภาพตั้งต้น และให้อีกภาพเป็นภาพอินพุทนั้นหากเลือกสลับกัน ผลลัพธ์ที่ได้จะแตกต่างกันออกไปในเรื่องของมุมมองการมองเห็น ดังรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 โดยในรูปจะกำหนดให้ภาพย่อยแรกทางซ้ายมือเป็นภาพตั้งต้น และภาพย่อยที่สองตรงกลางเป็นภาพอินพุท จะสังเกตเห็นว่า รูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 มีการเลือกสลับกันระหว่างภาพตั้งต้นและภาพอินพุท ทำให้ภาพรวมที่ได้ทางขวามือมีความแตกต่างกันเรื่องมุมมองของการมองเห็น แต่อย่างไรก็ตามภาพรวมทั้งสอง สามารถรวบรวมรายละเอียดของภาพย่อยทั้งสองได้ครบถ้วนทุกประการและดูกลมกลืนกัน ดังนั้นหากไม่มีข้อกำหนดในเรื่องมุมมองของการมองเห็น เราสามารถเลือกภาพย่อยใดในภาพย่อยทั้งสองเป็นภาพตั้งต้นและให้ภาพย่อยอีกภาพเป็นภาพอินพุทได้เสมอ



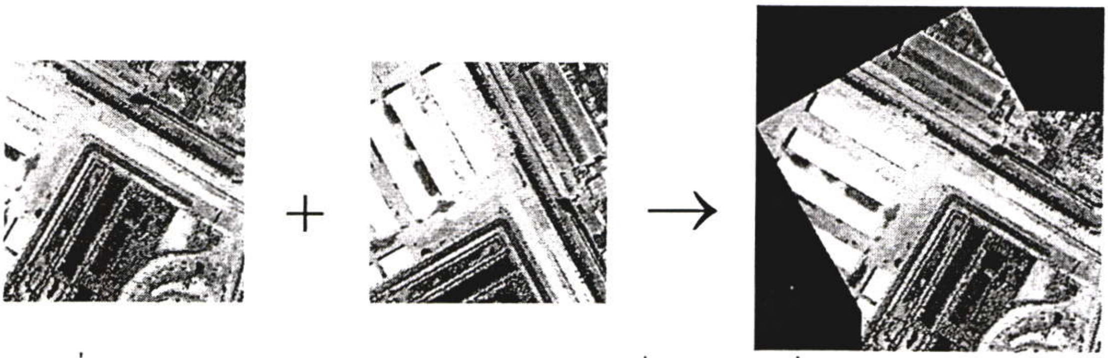
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการทำ Image Registration



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการทำ Image Registration



รูปที่ 2.3 แสดงผลลัพธ์ของการทำ Image Registrationที่ต่างออกไปเมื่อเลือกภาพอ้างอิงต่างกัน



รูปที่ 2.4 แสดงผลลัพธ์ของการทำ Image Registrationที่ต่างออกไปเมื่อเลือกภาพอ้างอิงต่างกัน

2.2 การจำแนกประเภทของอัลกอริธึมที่ใช้ทำ Image Registration

Registration เป็นพื้นฐานของการวิจัยและประมวลผลภาพเพื่อใช้จัดเรียงภาพและประกอบภาพตั้งแต่สองภาพหรือมากกว่า ที่ได้รับมา ณ เวลาที่แตกต่างกัน ตัวรับภาพที่แตกต่างกัน หรือมุมมองที่แตกต่างกัน หลายปีที่ผ่านมา อัลกอริธึมต่างๆถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อให้สามารถรองรับกับชนิดของข้อมูลและปัญหาที่หลากหลาย อัลกอริธึมต่างๆเหล่านี้สามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่างๆได้หลากหลายตามแต่วิธีการที่นำมาใช้พิจารณาแยกประเภท ดังนี้ [1]

2.2.1 การจำแนกประเภทตามโดเมนที่ใช้ประมวลผล

2.2.1.1 Spatial Domain

Image Registration บน Spatial Domain [2] เป็นการประมวลผลกับแต่ละจุดของภาพโดยตรง โดยไม่มีการแปลงภาพให้อยู่ในรูปแบบอื่นก่อนการคำนวณ การคำนวณบน Spatial Domain นี้ มีการทำงานที่ตรงไปตรงมา เนื่องจากภาพยังคงมีลักษณะเช่นเดิมและการประมวลผลเป็นการประมวลผลกับจุดจริงบนภาพ

2.2.1.2 Frequency Domain

การทำ Image Registration อีกประเภทหนึ่งเป็นการทำบน Frequency Domain หรือโดเมนความถี่ของภาพ [3] โดยต้องทำการแปลงภาพให้อยู่ในโดเมนความถี่เสียก่อน โดยใช้ Fourier Transform แล้วใช้คุณสมบัติ Phase Correlation ของ Fourier ในการหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลง การทำ Image Registration บน Frequency Domain นี้ มีข้อดีคือ สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและมีความถูกต้องค่อนข้างสูง แต่มีข้อเสียคือ Phase Correlation สามารถหาการเปลี่ยนแปลงได้เฉพาะการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบการเลื่อนตำแหน่งเท่านั้น สำหรับการเปลี่ยนแปลงประเภทอื่นๆ จำเป็นต้องนำใช้เทคนิคอื่นมาใช้ร่วมด้วย จึงจะได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำ Phase Correlation จะมีความถูกต้องอยู่ในระดับจำนวนเต็มเท่านั้น หากต้องการให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของจุดทศนิยมจะต้องมีการประยุกต์ใช้เทคนิคอื่นเพิ่มเติมเข้ากับกระบวนการ

2.2.2 การจำแนกประเภทตามมุมมองของภาพ

2.2.2.1 Area-based methods

สำหรับวิธีการทำ Image Registration แบบ Area-based methods [4] นี้ อัลกอริธึมจะมองโครงสร้างของภาพเป็นเมตริกซ์ความสัมพันธ์ คุณสมบัติแบบฟูเรียร์ และรูปแบบอื่นๆ ซึ่งล้วนเป็นการวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง

2.2.2.2 Feature-based methods

สำหรับวิธีการทำ Image Registration แบบ Feature-based methods [5] เป็นการมองภาพในลักษณะที่เป็นคุณลักษณะที่สัมพันธ์กันของภาพเช่น เส้นตรง เส้นโค้ง จุด เส้นที่ตัดกัน เส้นขอบ แทนการมองในเชิงโครงสร้างของภาพ

2.2.3 การจำแนกประเภทตาม Transformation model

เราสามารถจำแนกอัลกอริธึมของ Image Registration ตาม Transformation model ได้ซึ่งเป็นการจำแนกอย่างกว้างๆ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของภาพอ้างอิงและภาพเป้าหมาย ได้ดังนี้

2.2.3.1 Linear Transformation (Affine, Rigid)

Linear Transformation หรือ Rigid Registration [6] จะเป็นการซ้อนทับภาพ 2 ภาพ โดยภาพที่จะนำมาซ้อนทับกัน จะไม่มีการเปลี่ยนรูปในเชิงกายภาพ เช่น ภาพอวัยวะของบุคคลคนเดียวกัน แต่ถ่ายต่างช่วงเวลากัน จึงสามารถใช้เทคนิค Geometric Transformation อันได้แก่ Translation, Rotation และ Scaling ได้

2.2.3.2 Non-Linear Transformation (Elastic, Non-Rigid)

Non-Linear Transformation หรือ Non-Rigid Registration [7] ใช้สำหรับการซ้อนทับภาพ หรือการเปลี่ยนรูปที่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ภาพอวัยวะของผู้ป่วยที่แตกต่างกัน หรือมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันเป็นต้น สำหรับ Non-Rigid Registration จะมีการประยุกต์ใช้เทคนิคต่างๆเพื่อทำการปรับเปลี่ยนรูปให้เป็นไปตามต้องการ ตัวอย่างเช่น

- Thin Plate Spline
- Radial basis function
- Approximation Method
- Piecewise Method
- Piecewise Approximation Method

2.2.4 การจำแนกประเภทตามรูปแบบของการค้นหา

2.2.4.1 Search-based methods

Image registration สามารถจำแนกในรูปแบบของการค้นหาได้ นั่นคือต้องมีการคำนวณการเปลี่ยนแปลงระหว่างโดเมนของภาพทั้งสอง สำหรับวิธีการของ search-based method [8] ผลของความแตกต่างอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของภาพจะถูกประเมินค่าและเปรียบเทียบ

2.2.4.2 Direct methods

ตัวอย่างของการทำ Image Registration ด้วยวิธี Direct methods เช่น Lucas Kanade method [9] และ Phase-based methods [10] การประมาณการของ image deformation จะคำนวณได้จาก local image statistics และใช้สำหรับอัพเดท estimated image deformation ระหว่างทั้งสองโดเมน

2.2.5 การจำแนกประเภทตามการได้มาของภาพ

2.2.5.1 Single-modality

อัลกอริธึมของ Image Registration แบบ Single-modality [11] จะสนใจเฉพาะการจัดเรียงและประกอบภาพที่มีรูปแบบเดียวกัน (เช่น ได้จากการใช้ imaging device ชนิดเดียวกัน)

2.2.5.2 Multi-modality

อัลกอริธึมของการทำ Image Registration แบบ Multi-modality [12] จะสนใจการจัดเรียงและประกอบภาพที่ได้รับมาจาก imaging device ที่แตกต่างกัน ตัวอย่างของการจัดเรียงและประกอบภาพแบบ Multi-modality ในงานด้านการประมวลผลภาพเพื่อการรักษาทางการแพทย์ ประกอบด้วย การจัดเรียงและประกอบภาพของสมองที่เรียกว่า “CT/MRI images” หรือทุกส่วนของร่างกายที่เรียกว่า “PET/CT images” สำหรับการระบุขอบเขตที่เป็นบริเวณของเนื้องอก เป็นต้น

2.2.6 การจำแนกประเภทตามแอปปลิเคชั่น

การจำแนกประเภทอัลกอริธึมของ Image Registration โดยใช้ประเภทของแอปปลิเคชั่นนั้น พิจารณาจาก จำนวนของข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการจัดการ แอปปลิเคชั่นของอัลกอริธึมและทฤษฎีกลางที่เป็นพื้นฐานของอัลกอริธึม จากการสำรวจพบว่าสามารถจำแนกประเภทของแอปปลิเคชั่นที่นำความรู้ทางด้าน Image Registration ไปใช้งาน ได้ดังนี้ [13]

2.2.6.1 Remote sensing

ทั้งแอปปลิเคชั่นที่เกี่ยวข้องกับกองทัพและพลเรือน เช่น งานด้านการเกษตรกรรม ธรณีวิทยา สมุทรศาสตร์ การสำรวจแหล่งน้ำมันและแร่ธาตุตามธรรมชาติ มลภาวะ ทั้งในเมืองและเขตป่าไม้หรือพื้นที่เป้าหมาย

2.2.6.2 Medical Image Analysis

Medical Image Analysis ประกอบด้วยการประมวลผลภาพเพื่อการวินิจฉัยโรคทางการแพทย์ ตัวอย่างเช่น การตรวจพบเนื้องอกและบริเวณที่เป็นโรค ตลอดจนงานวิจัย

ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น การจำแนกภาพของเซลล์เม็ดเลือด โครโมโซม ซึ่งได้มาจากกล้องจุลทรรศน์ เป็นต้น

2.2.6.3 Computer Vision และ Pattern Recognition

ในปัจจุบันพบว่ามีงานมากมายที่เกี่ยวข้องกับ Computer Vision และ Pattern Recognition ตัวอย่างเช่น การรู้จำวัตถุ การรู้จำตัวอักษร การติดตามการเคลื่อนไหว การสร้างภาพสามมิติ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การแบ่งส่วนของรูปภาพ เป็นต้น

เนื่องจากมีการทำงานมากมายที่นำความรู้ทางด้าน Image Registration ไปประยุกต์เพื่อการใช้งานจึงเป็นไปไม่ได้ที่จะพัฒนาขั้นตอนวิธีหนึ่งให้เหมาะสมสำหรับตอบสนองในทุกๆความต้องการได้

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากแนวความคิดเบื้องต้นในการทำ Image Registration ที่ใช้สมมติฐานว่า บริเวณที่ถูกถ่ายภาพนั้นคงที่ สิ่งที่เปลี่ยนไปคือตำแหน่งกล้องที่ถ่ายภาพ ภาพถ่ายที่มีส่วนที่ทับซ้อนนั้นจึงเกิดจากการที่กล้องมีการเคลื่อนไหว หรือมีการเปลี่ยนแปลง หากเราหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ เราจะสามารถนำภาพมาประกอบกันได้ ดังนั้นจึงได้มีผู้เสนอแนวความคิดในการจัดเรียงภาพมากมายทั้งในโดเมนของจุดในภาพ และโดเมนความถี่ สำหรับผู้ที่จัดเรียงภาพบนโดเมนของจุดในภาพ จะเป็นการเสนอวิธีการในการค้นหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยใช้เทคนิคต่างๆ เข้ามาช่วยในการค้นหา หากภาพที่ต้องการจัดเรียงนั้นเป็นภาพขนาดใหญ่ เวลาที่ใช้ในการค้นหานั้นย่อมนานขึ้นด้วย แต่ผลลัพธ์ที่ได้ค่อนข้างจะถูกต้องแม่นยำ ส่วนผู้ที่ทำบนโดเมนความถี่จะทำการแปลงภาพจากโดเมนของจุดในภาพ (Spatial Domain) ให้อยู่ในโดเมนความถี่ (Frequency Domain)แล้วใช้เทคนิคต่างๆ ทางโดเมนความถี่มาช่วยหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เช่น เทคนิคการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากเนื่องจากใช้เวลาในการคำนวณน้อย

จากการศึกษางานวิจัยของ Li Zhongke, Yang Xiaohui, และ Wu Lenan [14] ที่ได้ทำการวิจัยเรื่อง Image Registration โดยใช้เทคนิคทางโดเมนความถี่ คือ เฟสคอลลีเรชั่นซึ่งเป็นคุณสมบัติหนึ่งของเทคนิคการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว นำมาหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพ ซึ่งพบว่าเทคนิคนี้มีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตาม การทำ Image Registration โดยใช้เทคนิคเฟสคอลลีเรชั่นทำได้เฉพาะกรณีที่ภาพสองภาพนั้นมีการเลื่อนตำแหน่งเท่านั้น ไม่สามารถรองรับในกรณีที่ภาพมีการหมุนเกิดขึ้น ดังนั้น Li Zhongke และคณะ จึงได้นำเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัพมาช่วยเพื่อแปลงภาพจากระบบพิกัดฉาก (rectangular coordinate) ไปเป็นระบบพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate) แล้วจึงใช้เฟสคอลลีเรชั่นหาการเปลี่ยนแปลงของมุมการหมุนในระบบพิกัดขั้ว

อีกทีหนึ่ง ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นตัวเปรียบเทียบประสิทธิภาพในเรื่องของความถูกต้อง ความคาดเคลื่อน และเวลาที่ใช้ในการประมวลผล โดยจะกล่าวต่อไปในบทที่ 5

บทที่ 3
ความรู้พื้นฐานในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

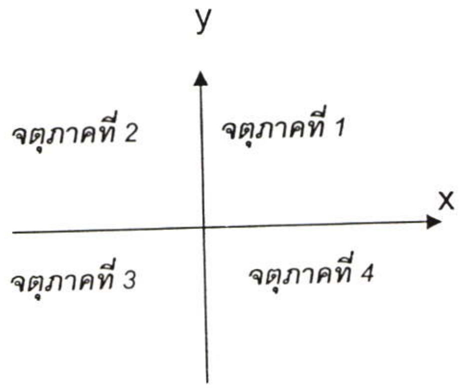
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎี และความรู้พื้นฐานที่ใช้ประกอบการทำ Image Registration ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ระบบพิกัดในระนาบ, Geometric Transform, Fourier Transform, Phase Correlation, Hough Transform, Canny Edge Detection, Searching Algorithm และ การคำนวณค่า RMSE

3.1 ระบบพิกัดในระนาบ

3.1.1 ระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinates or Rectangular Coordinates)

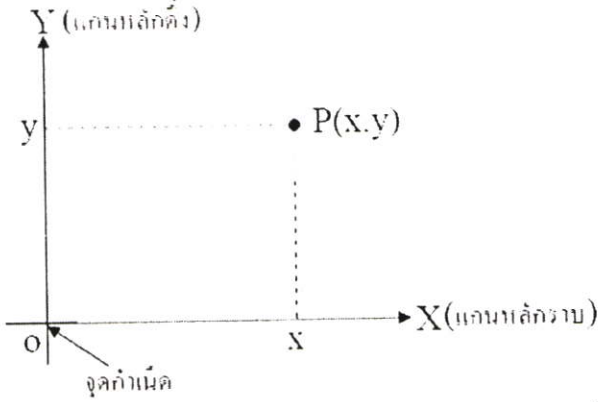
ระบบพิกัดฉาก เป็นแนวคิดเริ่มต้นที่สำคัญและเป็นพื้นฐานอย่างหนึ่งของเรขาคณิตวิเคราะห์ โดยแนวคิดของระบบพิกัดฉากทำให้สามารถจับคู่แบบหนึ่งต่อหนึ่งระหว่างคู่อันดับกับจุดบนระนาบและขยายไปทำนองเดียวกันได้ กรณีสามมิติก็เช่นเดียวกัน

ระบบพิกัดฉากในกรณีสองมิติประกอบด้วยเส้นจำนวนแนวนอนหนึ่งเส้นซึ่งตัดกันเป็นมุมฉากกับเส้นจำนวนแนวตั้งอีกเส้นหนึ่งที่จุดกำเนิด O (Origin) เรียกเส้นจำนวนแนวนอนว่าแกน X และเรียกเส้นจำนวนแนวตั้งว่าแกน Y ดังรูปที่ 3.1 จุดบนแกน X ที่อยู่ทางด้านขวาและทางด้านซ้ายของแกน Y จะแทนจำนวนจริงที่มีค่าเป็นบวก (มากกว่า 0) และลบ (น้อยกว่า 0) ตามลำดับ ส่วนจุดบนแกน Y ที่อยู่เหนือและใต้แกน X จะแทนจำนวนจริงที่มีค่าเป็นบวกและลบตามลำดับ จะเห็นว่าแกน X และแกน Y ในลักษณะดังกล่าวนี้ แบ่งระนาบออกเป็น 4 ส่วน แต่ละส่วนเรียกว่า “จตุภาค (Quadrant)” รูปที่ 3.1 แสดงจตุภาคที่ 1 (Q1) จตุภาคที่ 2 (Q2) จตุภาคที่ 3 (Q3) และจตุภาคที่ 4 (Q4) โดยทั่วไปนิยมใส่หัวลูกศรบนแกนทั้งสอง โดยให้ชี้ไปในทิศของค่าที่เป็นบวกและเรียกระนาบนี้ว่า “ระนาบ XY”



รูปที่ 3.1 แสดงจตุภาคทั้งสี่ในระบบพิกัดฉาก

พิกัดตำแหน่งของจุดที่อยู่บนระนาบ XY ได้จากการลากเส้นจากจุดนั้น ไปตัดตั้งฉากกับแกนหลักทั้งสอง (x - intercept และ y – intercept) ระยะทางที่วัดจากจุดกำเนิดไปตามแกนหลักทั้งสอง ถึงจุดตัดแกน X และ Y เป็นค่าพิกัดตำแหน่งของจุดที่อยู่บนระนาบนั้น รูปที่ 3.2 แสดงพิกัดของจุด P(x, y) ใดๆ ในจตุภาคที่ 1



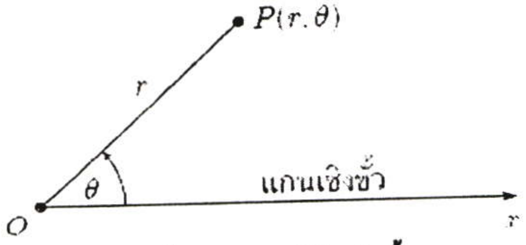
รูปที่ 3.2 พิกัดของจุด P(x, y) ใดๆในจตุภาคที่ 1

3.1.2 ระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinates)

นอกเหนือจากระบบพิกัดฉากที่ใช้ระบุตำแหน่งของจุดในระนาบสองมิติ เรายังสามารถอาศัยระบบพิกัดเชิงขั้วในการระบุตำแหน่งบนระนาบสองมิติได้เช่นกัน ระบบพิกัดเชิงขั้วไม่ได้เป็นเพียงอีกทางเลือกหนึ่งในการระบุตำแหน่งของระนาบสองมิติ แต่มีความเหมาะสมกับลักษณะเส้นโค้งบางรูปแบบ กล่าวคือ เส้นโค้งบางเส้นมีรูปแบบสมการที่ยุ่งยากในระบบพิกัดฉาก แต่กลับมีรูปแบบง่ายๆ ในระบบพิกัดเชิงขั้ว

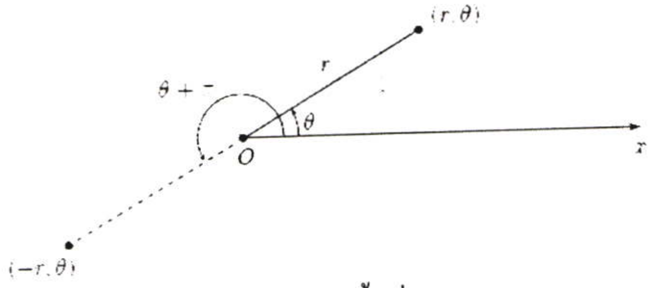
ระบบพิกัดเชิงขั้วประกอบด้วยจุด O ในระนาบซึ่งเรียกว่าขั้ว (Pole) หรือจุดกำเนิด (Origin) และลากรังสีจากจุด O ไปจนถึงจุดอนันต์ เรียกรังสีดังกล่าวว่า แกนเชิงขั้ว (Polar Axis) ซึ่งมักจะลากในแนวราบไปทางขวามือและสมนัยกับแกน x ด้านบวกในระบบพิกัดฉาก

กำหนด P เป็นจุดใดๆ ในระนาบ ให้ r เป็นระยะจากจุด O ถึงจุด P และให้ θ เป็นมุมระหว่างแกนเชิงขั้วกับส่วนของเส้นตรง OP ดังรูป 3.3 โดยมุม θ มีค่าบวกเมื่อวัดในทิศทวนเข็มนาฬิกา และมีค่าลบเมื่อวัดในทิศตามเข็มนาฬิกา จุด P จึงแทนได้ด้วยคู่ลำดับ (r,θ) และเรียก r กับ θ ว่า "พิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinates) ของจุด P" ในกรณีที่จุด P คือจุด O เราจะพบว่า $r = 0$ และตกลงให้ $(0, \theta)$ แทนขั้วสำหรับทุกค่าใดๆ ของ θ



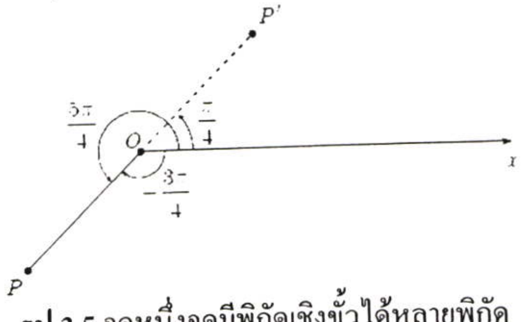
รูปที่ 3.3 ระบบพิกัดเชิงขั้ว

เราสามารถขยายความหมายของพิกัดเชิงขั้ว (r,θ)เมื่อ $r < 0$ ได้โดยตกลงว่าจุด $(-r,\theta)$ เป็นจุดที่ได้จากการสะท้อนจุด (r,θ) ผ่านจุด O ดังรูป 3 .4 กล่าวคือเส้นตรงที่เชื่อมจุดทั้งสองผ่านจุด O และจุดทั้งสองอยู่ห่างจากจุด O เท่าๆ กัน แต่อยู่กันคนละด้านของจุด O สังเกตว่าจุด $(-r,\theta)$แทนจุดเดียวกับ $(r,\theta+\pi)$



รูป 3.4 พิกัดเชิงขั้วเมื่อ $r < 0$

ในระบบพิกัดฉากนั้น จุดทุกจุดจะมีพิกัดเพียงพิกัดเดียวเท่านั้น แต่ในระบบพิกัดเชิงขั้ว จุดหนึ่งจุดมีพิกัดได้หลายพิกัด ยกตัวอย่างเช่นจุด $P\left(1,\frac{5\pi}{4}\right)$ ในรูป 3.5 ยังสามารถแทนได้ด้วยพิกัด $\left(1,-\frac{3\pi}{4}\right)$ หรือแม้แต่ $\left(1,\frac{13\pi}{4}\right)$ ก็ได้ นอกจากนี้หากพิจารณาจุด $P'\left(1,\frac{\pi}{4}\right)$ ซึ่งเป็นการสะท้อนจุด P ผ่านจุด O จะเห็นว่าจุด P ยังสามารถแทนได้ด้วยพิกัด $\left(-1,\frac{\pi}{4}\right)$ ได้ด้วย ในกรณีทั่วไป เรากล่าวได้ว่าจุดที่แทนด้วยพิกัดเชิงขั้ว (r,θ) ยังสามารถแทนได้ด้วยพิกัด$(r,\theta+2n\pi)$หรือ $(-r,\theta+(2n+1)\pi)$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มใดๆ



รูป 3.5 จุดหนึ่งจุดมีพิกัดเชิงขั้วได้หลายพิกัด

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โดยทั่วไปแล้วเรามักใช้มุมระหว่าง 0 ถึง 2π เท่านั้น เพราะค่ามุมที่เพิ่มขึ้นมา $2n\pi$ ทำให้จุดของพิกัดเชิงขั้วไม่เปลี่ยนแปลง และค่า $r < 0$ ก็ทำให้จุด (r,θ) ไปซ้ำกับจุดอื่นได้

3.1.3 ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดฉากและระบบพิกัดเชิงขั้ว

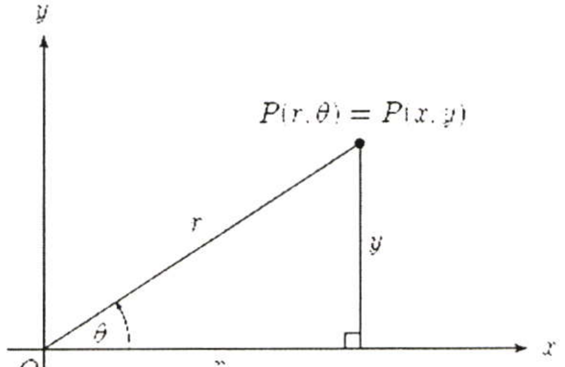
ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากกับพิกัดเชิงขั้วพิจารณาได้จากรูป 3.6 ซึ่งขั้วของระบบพิกัดเชิงขั้วทับกับจุดกำเนิดของระบบพิกัดฉาก และแกนเชิงขั้วของระบบพิกัดเชิงขั้วทับกับแกน x ด้านบวกของระบบพิกัดฉาก กำหนดจุด P ให้มีพิกัด (x, y) ในระบบพิกัดฉาก และมีพิกัด (r,θ) ในระบบพิกัดเชิงขั้วจะเห็นได้จากรูปว่า

$$x = r\cos\theta \text{ และ } y = r\sin\theta \tag{3.1}$$

แม้เราจะได้สมการ (3.2) จากการพิจารณารูป 3.6 ซึ่งแสดงเฉพาะกรณีเมื่อ $r > 0$ และ $0 < \theta < \dfrac{\pi}{2}$ แต่สมการ (3.2) เป็นจริงสำหรับทุกค่าของ r และ θ สมการดังกล่าวทำให้เราสามารถหาพิกัดฉากได้เมื่อทราบพิกัดเชิงขั้ว ในทางกลับกัน เมื่อทราบพิกัดฉาก เราสามารถหาพิกัดเชิงขั้วได้จาก

$$r^2 = x^2 + y^2 \text{ และ } \tan\theta = \frac{y}{x} \tag{3.2}$$

สังเกตว่า θ ที่สอดคล้องกับสมการ (3.3) มีได้หลายค่า ในการหาพิกัดเชิงชั้วจากพิกัดฉาก เราจึงจะไม่เพียงเลือกค่า θ ใดๆ ที่สอดคล้องกับ $\tan\theta = \dfrac{y}{x}$ แต่จะต้องเลือก θ ที่ทำให้จุด (r,θ) อยู่ในจตุภาคที่ตรงกับที่ต้องการด้วย



รูป 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากและพิกัดเชิงขั้ว

3.2 Geometric Transformation

Geometric Transformation เป็นการแปลงความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละพิกเซลในภาพ บ่อยครั้งเรามักเรียก Geometric Transform ว่าเป็น "Rubber-sheet Transformation" เพราะถูกมองว่าเป็นการทำงานที่มีการพิมพ์ภาพบนแผ่นยางแล้วจับให้ยืดหยุ่นตามกฎที่นิยามไว้

Geometric Transformation ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลภาพทางดิจิตอลประกอบด้วยการทำงาน 2 ส่วนหลักๆ

1. Geometric Spatial Transformation ซึ่งนิยามการจัดเตรียมใหม่หรือ Re-arrangement ของพิกเซลบนระนาบของภาพ
2. Interpolation ซึ่งเกี่ยวข้องกับการประมาณค่าของพิกเซลในตำแหน่งหรือบริเวณระหว่างพิกเซลที่จะต้องทำการแปลง

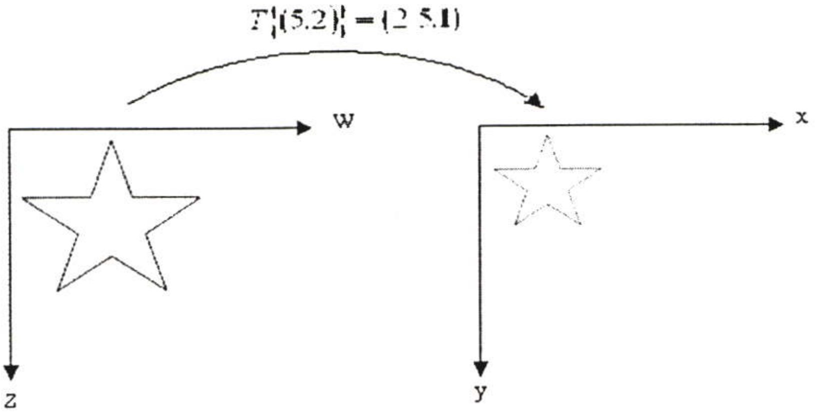
3.2.1 Geometric Spatial Transformation

Geometric Spatial Transform เป็นเทคนิคในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ลักษณะ รูปร่าง และขนาดของวัตถุใดๆ ในขอบเขตที่กำหนด โดยการเปลี่ยนแปลงที่สามารถเกิดขึ้นกับวัตถุได้นั้นมีมากมายหลายรูปแบบ ได้แก่ การเลื่อนตำแหน่ง การหมุน การย่อ หรือขยายขนาดของภาพ การบิด การยืด และการผิดรูปของภาพ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงชิดเดียว หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงหลายๆ อย่างร่วมกัน เทคนิคการทำ Geometric Transform จึงเป็นเทคนิคเบื้องต้น และมีความสำคัญมากในการประมวลผลภาพทางดิจิตอลที่ใช้ทำการแปลงวัตถุจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่ง

สำหรับ Geometric Spatial Transform นั้นจะอยู่ในรูปของสมการที่ใช้ในการแปลงวัตถุจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่ง ตามที่ต้องการ สมการในการแปลงวัตถุแต่ละรูปแบบ จะใช้สมการแตกต่างกัน ตัวอย่างของการทำ Geometric Spatial Transform อย่างง่ายแสดงโดยสมมุติให้ภาพ f ซึ่งนิยามอยู่ในระบบพิกัด (w, z) ต้องการแปลงพิกัดเพื่อสร้างภาพ g ซึ่งนิยามอยู่ในระบบพิกัด (x, y) การแปลงพิกัดนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$(x, y) = T\{(w, z)\} \tag{3.3}$$

T เป็นสมการการแปลงของวัตถุโดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ เช่น ถ้า $(x, y) = T\{(w, z)\} = \left(\frac{w}{2}, \frac{z}{2}\right)$ การแปลงนี้จึงเป็นการย่อขนาดอย่างง่ายๆ ของภาพ f โดยย่อลงไปครึ่งหนึ่งทั้งด้านกว้างและด้านยาว ดังรูปที่ 3.7



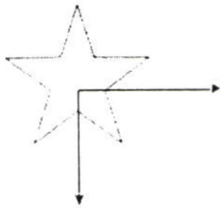
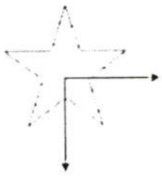
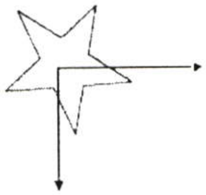
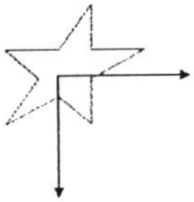
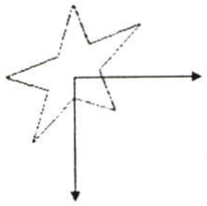
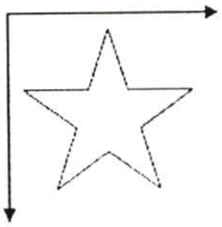
รูป 3.7 ตัวอย่างของ Spatial Transformation

รูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นรูปแบบโดยทั่วไปของ Geometric Spatial Transform คือ Affine Transform ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w & z & 1 \end{bmatrix} T = \begin{bmatrix} w & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & 0 \\ t_{21} & t_{22} & 0 \\ t_{31} & t_{32} & 1 \end{bmatrix} \qquad (3.4)$$

การแปลงนี้สามารถทำการย่อหรือขยายขนาด การหมุน การเลื่อนตำแหน่ง หรือการบิดกับเซ็ตของจุดในภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกตั้งไว้ในเมตริกซ์ T ตารางที่ 3.1 จะแสดงวิธีการตั้งค่าในสมาชิกแต่ละตัวของเมตริกซ์ T เพื่อการแปลงที่ต่างออกไป

ตารางที่ 3.1 Affine Transformation ชนิดต่างๆ

ชนิดการแปลง	เมตริกซ์ T	สมการพิกัด	ไดอะแกรม
Identity	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = w$ $y = z$	
Scaling	$\begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = s_x w$ $y = s_y z$	
Rotation	$\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = w\cos\theta - z\sin\theta$ $y = w\sin\theta + z\cos\theta$	
Shear (horizontal)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = w + \alpha z$ $y = z$	
Shear (vertical)	$\begin{bmatrix} 1 & \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = w$ $y = \beta w + z$	
Translation	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \delta_x & \delta_y & 1 \end{bmatrix}$	$x = w + \delta_x$ $y = z + \delta_y$	

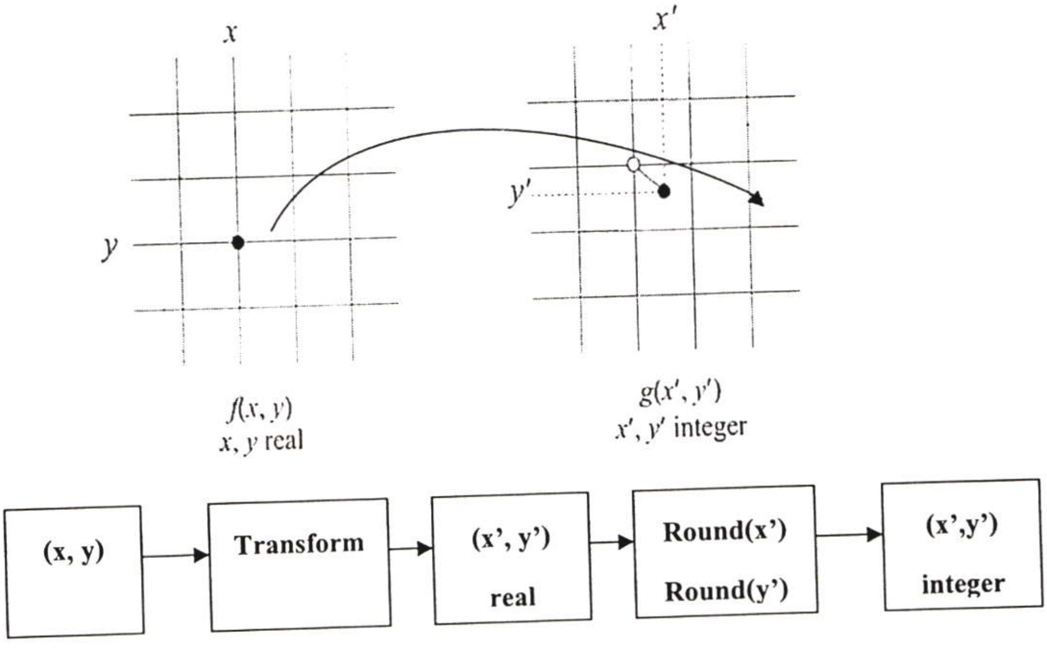
3.2.2 Interpolation

Interpolation เป็นกระบวนการที่ช่วยให้เราสามารถประยุกต์ใช้ Geometric Spatial Transformation กับภาพได้ โดยเมื่อมีการแปลงเกิดขึ้นจะต้องมีการคำนวณค่าตำแหน่งใหม่ให้แต่ละพิกเซลในภาพเดิม ซึ่งต้องมีการประมาณค่าของพิกเซลหรือบริเวณระหว่างพิกเซลในภาพ เช่น ในกรณีที่ต้องการขยายขนาดภาพ กระบวนการ Interpolation จะถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าของพิกเซลที่เพิ่มขึ้นกว่าเดิม ดังนั้นกระบวนการ Interpolation จึงเป็นส่วนหนึ่งของการประมวลผลภาพด้วยเสมอ

วิธีการคำนวณโดยส่วนมากสำหรับ Geometric Spatial Transform ที่ทำกับภาพสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

3.2.2.1 วิธีการคำนวณที่ใช้ Forward mapping

Forward mapping เป็นการคำนวณโดยตรงโดยคำนวณแต่ละจุดในภาพตั้งต้นไปเป็นแต่ละจุดในภาพใหม่ ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งจะเห็นว่า จุดใดๆ ในภาพตั้งต้นซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่มีค่าเป็นจำนวนเต็ม มีโอกาสที่จะกลายเป็นจุดในตำแหน่งที่มีค่าเป็นทศนิยมในภาพใหม่



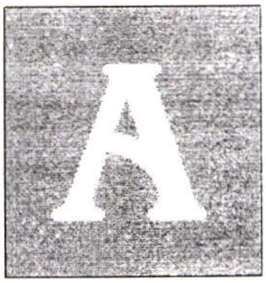
รูปที่ 3.8 การทำ Forward mapping

ลักษณะการทำ Forward mapping นี้ เมื่อมีการคำนวณตำแหน่งของจุดในภาพใหม่แล้วได้เป็นจุดทศนิยม ปกติแล้วจะใช้การปัดค่า หรือ Round ให้เป็นค่า

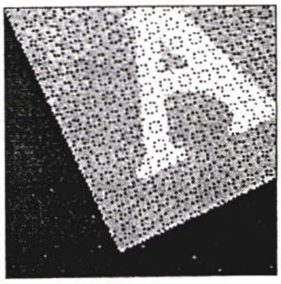
จำนวนเต็มที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้มากที่สุด ดังรูปที่ 3.14 ดังนั้นค่าใหม่ $g(x',y')$ หาได้จาก

$$g(round(x'),round(y'))=f(x,y) \tag{3.5}$$

วิธีการนี้อาจทำให้เกิดปัญหาที่มีพิกเซลที่ต่างกันสองพิกเซลหรือมากกว่าคำนวณแล้วไปตก ณ ตำแหน่งพิกเซลเดียวกันของภาพเอาท์พุท ทำให้เกิดปัญหาว่าจะทำอย่างไรที่จะรวมค่าพิกเซลที่เป็นอินพุทหลายๆ ค่านั้นไปใส่ในค่าพิกเซลเอาท์พุทเพียงค่าเดียว ปัญหาอื่นซึ่งมีความสำคัญเช่นกันได้แก่ บางพิกเซลของภาพเอาท์พุทอาจจะไม่ได้ถูกกำหนดค่าให้ หรือ ภาพที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงจะมีบางส่วน หรือทั้งหมดหลุดหายไปจากภาพ เนื่องจากก่อนการทำการเปลี่ยนแปลงภาพ ขอบเขตของภาพจะมีเท่ากับภาพ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาพ ข้อมูลบางส่วนจากเดิม หรือทั้งหมดอาจจะตกในตำแหน่งนอกขอบเขตของภาพดังรูปที่ 3.9



(a)



(b)

รูปที่ 3.9 ปัญหาของการทำ Forward mapping

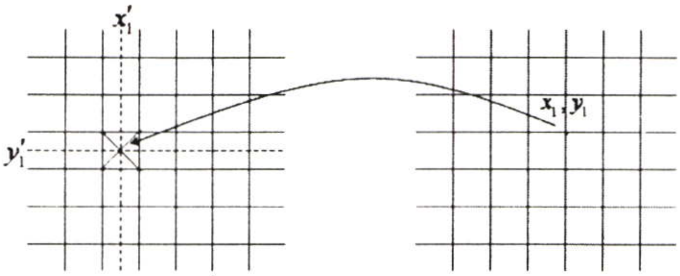
(a) ภาพตั้งต้น (b) ภาพหลังจากการทำ Geometric Transform

รูปแบบที่ซับซ้อนกว่าของ Forward mapping คือนำมุมทั้ง 4 ของแต่ละพิกเซลที่เป็นอินพุทจับคู่เข้ากับรูปสี่เหลี่ยมในภาพที่เป็นเอาท์พุท พิกเซลอินพุทจะถูกแจกจ่ายไปท่ามกลางพิกเซลเอาท์พุทสอดคล้องกับพื้นที่ที่ครอบคลุม ถึงแม้จะมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า แต่ก็มีความซับซ้อนและเสียค่าใช้จ่ายมากในการคำนวณ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วจึงนิยมใช้วิธีการ Inverse mapping แทนการใช้ Forward mapping

3.2.2.2 วิธีการคำนวณที่ใช้ Inverse mapping

การคำนวณการทำ Geometric Transform แบบ Inverse mapping จะคำนวณในลักษณะย้อนกลับว่าแต่ละจุดในภาพใหม่ว่านำมาจากตำแหน่งใดในภาพตั้งต้น ดัง

รูปที่ 3.10 การทำ Inverse mapping เช่นนี้ทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานมากกว่าวิธีการ Forward mapping

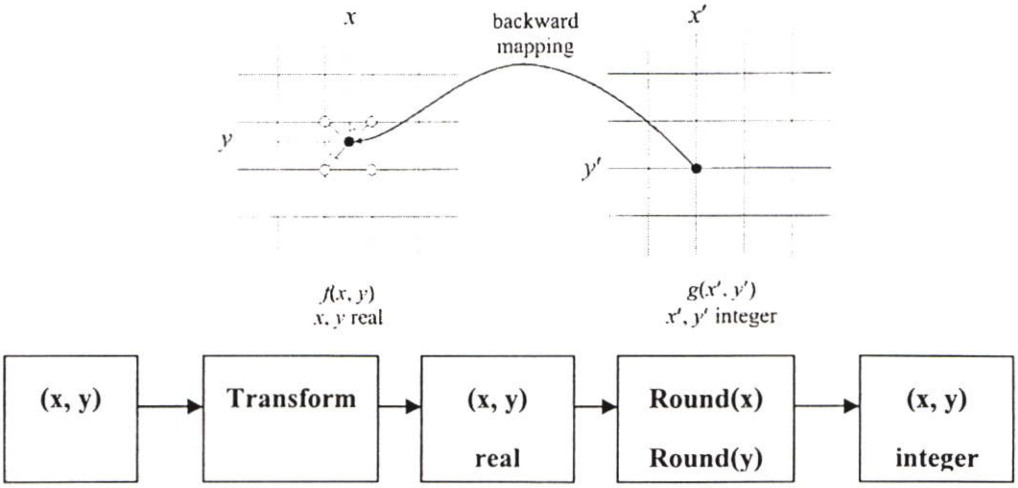


รูปที่ 3.10 การทำ Inverse Mapping

ในการประมาณค่าแบบ Inverse mapping ที่ใช้ในการประมวลผลภาพแบ่งได้เป็นหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีวิธีการคล้ายคลึงกันโดยจะกำหนดค่าของพิกเซลจากการหาตำแหน่งพิกเซลในภาพเอาท์พุทที่สอดคล้องกันบนภาพอินพุทและมีการคำนวณค่าเฉลี่ยบนเซตของพิกเซลในบริเวณนั้นๆ โดยค่าถ่วงน้ำหนักจะขึ้นกับระยะห่างระหว่างพิกเซลบนภาพอินพุทที่นำมาคำนวณกับพิกเซลในภาพเอาท์พุทที่สอดคล้องกันบนภาพอินพุทนั้นๆ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้

3.2.2.2.1 Zero-order Interpolation หรือ Nearest-neighbor Interpolation

Zero-order Interpolation เป็นการประมาณค่าโดยกำหนดค่าจากจุดภาพข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด ค่าของพิกเซลในภาพเอาท์พุทจะถูกกำหนดจากค่าของพิกเซลในเซตของพิกเซลที่นำมาคำนวณที่ใกล้ที่สุด จุดที่อยู่ใกล้ที่สุดจะถูกสุ่มขึ้นมาโดยไม่นำพิกเซลอื่นในเซตนั้นมาคำนวณ ซึ่งสามารถแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การทำ Inverse mapping แบบ Zero-order Interpolation

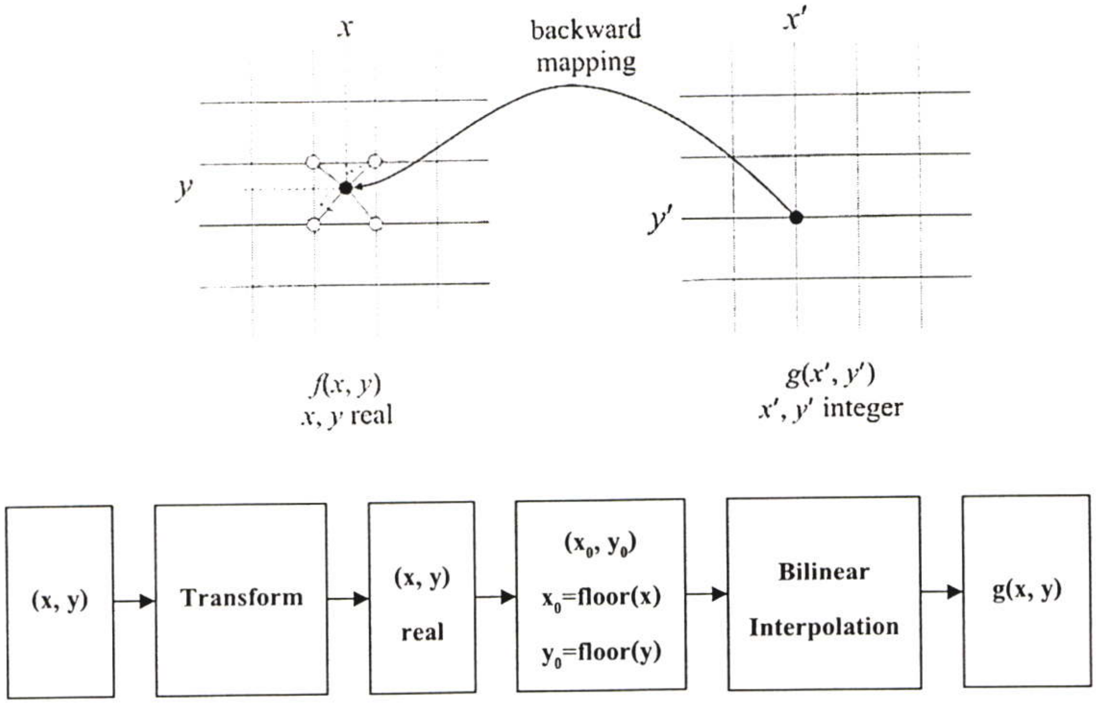
การคำนวณหาความเข้มแสงวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด คือคำนวณว่าตำแหน่งที่คำนวณได้นั้นใกล้เคียงกับตำแหน่งใดในภาพตั้งต้นมากที่สุด แล้วใช้ความเข้มแสงจากจุดนั้นเป็นความเข้มแสงของจุดในภาพใหม่ ความเข้มแสงของจุดในภาพใหม่ $g(x', y')$ จะมีสมการเป็นดังนี้

$$g(x', y') = f[round(x), round(y)] \tag{3.6}$$

การคำนวณหาความเข้มแสดงด้วย Zero-order Interpolation จะทำได้ง่ายและรวดเร็วที่สุด แต่เนื่องจากเป็นการปัดค่าใกล้เคียงที่สุดแล้วใช้ความเข้มแสงจากตำแหน่งนั้น ทำให้เกิดภาพผลลัพธ์ที่ได้เกิดความผิดพลาดได้ง่ายที่สุด

3.2.2.2.2 First-order Interpolation หรือ Bilinear Interpolation

First-order Interpolation เป็นการประมาณค่าโดยค่าของพิกเซลในภาพเอาท์พุทจะถูกกำหนดจากการหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก โดยจุดภาพข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด จำนวน 4 หรือ 2x2 พิกเซล ข้อมูลจะเรียบและต่อเนื่องหลังการการประมาณค่าการทำ Inverse mapping แบบ First-order Interpolation แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การทำ Inverse mapping แบบ First-order Interpolation

First-order Interpolation มีสมการดังนี้

$$g(x',y') = f(x_0,y_0) + [f(x_1,y_0) - f(x_0,y_0)]\Delta x + [f(x_0,y_1) - f(x_0,y_0)]\Delta y + [f(x_1,y_1) + f(x_0,y_0) - f(x_0,y_1) - f(x_1,y_0)]\Delta x \Delta y \quad (3.7)$$

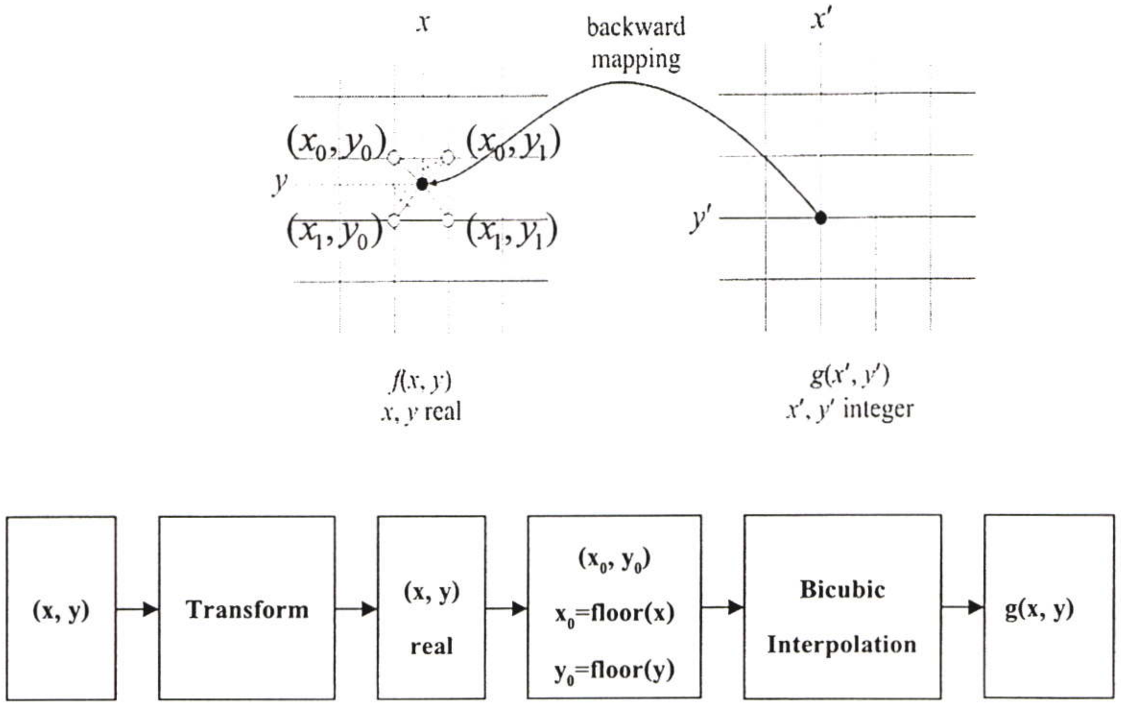
โดย $\Delta x = x - x_0$

$\Delta y = y - y_0$

$f(x_1,y_1), f(x_0,y_0), f(x_0,y_1), f(x_1,y_0)$ เป็นจุดใกล้เคียงรอบจุดที่คำนวณได้ x, y

3.2.2.2.3 High-order Interpolation หรือ Bicubic Interpolation

High-order Interpolation เป็นการประมาณค่าโดยค่าของพิกเซลในภาพเอาท์พุทจะถูกกำหนดจากการหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก โดยจุดภาพข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด จำนวน 16 พิกเซล หรือ 4x4 พิกเซล การประมาณค่าด้วยวิธีนี้ให้ผลดีทั้งด้านความคมชัดและมีความต่อเนื่อง แต่ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าวิธีอื่นๆ ที่ผ่านมา การทำ Inverse mapping แบบ High-order Interpolation แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การทำ Inverse mapping แบบ High-order Interpolation

High-order Interpolation มีสมการดังนี้

$$g(x',y') = \sum_{m=-1}^{2}\sum_{n=-1}^{2} f(x_0+m, y_0+n)\,R(m-\Delta x)\,R(\Delta y-n) \tag{3.8}$$

$$R(k) = \frac{1}{6}\left[P(k-2)^3 - 4P(k+1)^3 - 4P(k-1)^3 + 6P(k)^3\right] \tag{3.9}$$

$$P(k) = \begin{cases} k & , \quad k>0 \\ 0 & , \quad k \le 0 \end{cases} \tag{3.10}$$

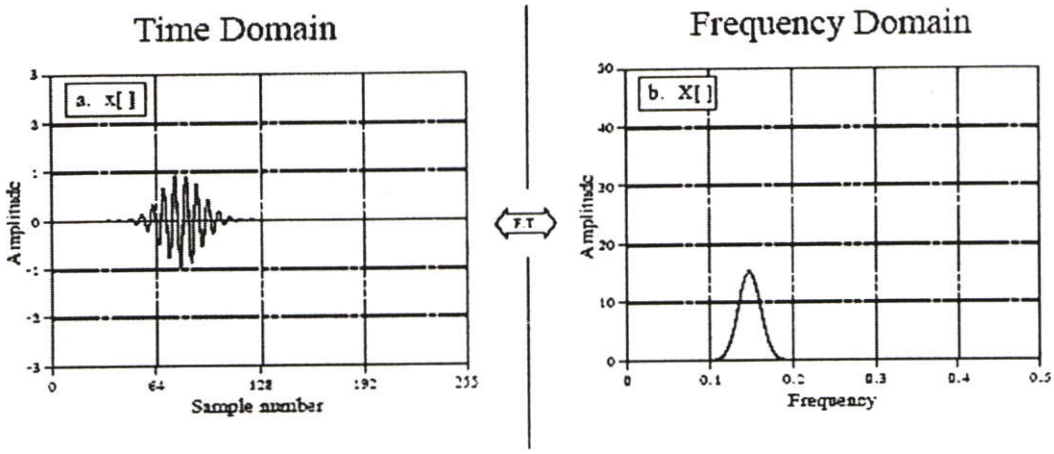
โดย $\Delta x = x - x_0$

$\Delta y = y - y_0$

การคำนวณ Geometric Transform แบบ Inverse mapping ทั้ง 3 วิธีพบว่าจำนวนพิกเซลที่นำมาคำนวณมีผลโดยตรงต่อความซับซ้อนในการคำนวณ เช่น การประมาณค่าแบบ High-order Interpolation จะมีความซับซ้อนและใช้เวลานานกว่าการประมาณค่าแบบ First-order Interpolation และการประมาณค่าแบบ First-order Interpolation ก็จะซับซ้อนและใช้เวลานานกว่าแบบ Zero-order Interpolation ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม จำนวนของพิกเซลที่นำมาใช้ประมาณค่าก็เกี่ยวข้องโดยตรงกับความถูกต้องเช่นเดียวกัน ดังนั้นในการเลือกวิธีประมาณค่าแบบใดจึงขึ้นอยู่กับงานและความต้องการของผู้ใช้ในเรื่องของความถูกต้องและซับซ้อนของการดำเนินงาน โดยทั่วไปแล้วการ Interpolation ทั่วๆ ไปที่ไม่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงมากๆ เราสามารถใช้ First-order Interpolation ก็เพียงพอต่อการใช้งานแล้ว

3.3 Fourier Transform

Fourier Transform เป็นเทคนิคในการแยกองค์ประกอบของสัญญาณ เป็นองค์ประกอบของสัญญาณถี่ความถี่ต่างๆ กัน โดยสัญญาณจะถูกแปลงจากโดเมนของเวลา เป็นโดเมนของความถี่ ดังรูปที่ 3.14 หลังจากการทำ Fourier Transform แล้วสัญญาณที่ความถี่ต่างกันจะถูกแยกออกจากกัน



(a) (b)

รูป 3.14 การแปลงสัญญาณจาก (a) Time Domain เป็น (b) Frequency Domain

วิธีของ Fourier ในการวิเคราะห์สัญญาณมีอยู่ 4 วิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีนั้น ใช้วิเคราะห์สัญญาณต่างชนิดกันดังนี้

1. Fourier Series (FS) ใช้วิเคราะห์สัญญาณคาบ (Periodic Signal) ที่เป็นสัญญาณต่อเนื่อง (Continuous-time Signal)
2. Fourier Transform (FT) ใช้วิเคราะห์สัญญาณต่อเนื่องที่ไม่เป็นสัญญาณคาบ (Continuous Nonperiodic Signal)
3. Discrete Fourier Series (DFS) ใช้วิเคราะห์สัญญาณคาบ (Periodic Signal) ที่เป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง(Discrete Periodic Signal)
4. Discrete Fourier Transform (DFT) ใช้วิเคราะห์สัญญาณไม่ต่อเนื่องที่ไม่เป็นสัญญาณสัญญาณคาบ (Discrete-time Nonperiodic Signal)

สำหรับการประยุกต์ใช้ Fourier Transform กับงานด้านการประมวลผลภาพซึ่งแต่ละจุดในภาพมีตำแหน่งเป็นจำนวนเต็ม ไม่ต่อเนื่องกันจึงเป็นการนำ Discrete Fourier Transform (DFT) มาใช้งาน โดยในที่นี้จะได้มีการอธิบายเฉพาะ Discrete Fourier Transform ซึ่งใช้ในงานวิจัยเท่านั้น

Fourier Transform สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการประมวลผลภาพได้ ถ้าพิจารณารายละเอียดภายในภาพ จะพบว่าส่วนของภาพที่เป็นรายละเอียดทั่วๆ 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 3.15

(a) (b)

รูปที่ 3.15 การทำ Fourier Transform กับภาพ

(a) ภาพตั้งต้น

(b) ภาพที่ได้หลังจากการทำ Fourier Transform ภาพ a

3.3.1 Discrete Fourier Transform (DFT)

Discrete Fourier Transform (DFT) จะสามารถแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ให้กลายเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ของภาพได้ ถ้าหากเป็นสัญญาณที่ไม่จำกัด และเป็นสัญญาณต่อเนื่องในโดเมนความถี่ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยคอมพิวเตอร์ ด้วยเหตุนี้ จึงนำเอาหลักการของ Discrete Fourier Transform (DFT) เข้ามาช่วย

การทำ Discrete Fourier Transform (DFT) เป็นการ Sampling สัญญาณในโดเมนความถี่ เพื่อให้ได้สัญญาณไม่ต่อเนื่อง แ ละสามารถใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์และคำนวณได้ ถ้าหากเรา Sampling ด้วย Sampling Frequency ที่สูงๆ จะทำให้ได้สัญญาณที่ดี เมื่อเราทำการ Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT) แปลงกลับจะทำให้ ไ ด้สัญญาณที่คล้ายกับสัญญาณเดิมมาก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ Sampling Frequency

Discrete Fourier Transform (DFT) มีสมการดังนี้

$$F(u) \quad = \quad \frac{1}{M}\sum_{x=0}^{M-1} f(x)e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{M}\right)} \qquad (3.11)$$

โดย $f(x)$ คือความเข้มแสงของจุดในภาพเดิมที่ตำแหน่ง x

$F(u)$ คือค่าที่ได้ใน Frequency Domain ที่ตำแหน่ง u

M คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

เนื่องจาก $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$ จากสมการที่ 3.11 จะได้เป็น

$$F(u) = \frac{1}{M}\sum_{x=0}^{M-1} f(x)\left[\cos\left(\frac{2\pi ux}{M}\right) - j\sin\left(\frac{2\pi ux}{M}\right)\right] \tag{3.12}$$

สำหรับการแปลง Fourier Transform มีข้อกำหนดว่า ขนาดของข้อมูล หรือคือค่า M จะต้องมีค่าอยู่ในรูปของ 2^n ในกรณีที่มีค่าไม่เป็น 2^n จะต้องมีการเติมค่าเปล่าขึ้นเพื่อให้ถึง 2^n จากสมการที่ 3.11 และ 3.12 เป็นสมการการแปลง Fourier Transform ให้ข้อมูลอยู่ในโดเมนความถี่สำหรับการแปลงข้อมูลกลับจากโดเมนความถี่เรียกว่า Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT) มีสมการดังนี้

$$f(x) = \sum_{u=0}^{M-1} F(u)e^{j2\pi\left(\frac{ux}{M}\right)} \tag{3.13}$$

$$f(x) = \sum_{u=0}^{M-1} F(u)\left[\cos\left(\frac{2\pi ux}{M}\right) + j\sin\left(\frac{2\pi ux}{M}\right)\right] \tag{3.14}$$

สมการที่ 3.11 – 3.14 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 มิติ แสดงได้ดังนี้

$$F(u,v) = \frac{1}{MN}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1} f(x,y)e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{M}+\frac{vy}{N}\right)} \tag{3.15}$$

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

$$f(x,y) = \sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1} F(u,v)e^{j2\pi\left(\frac{ux}{M}+\frac{vy}{N}\right)} \tag{3.16}$$

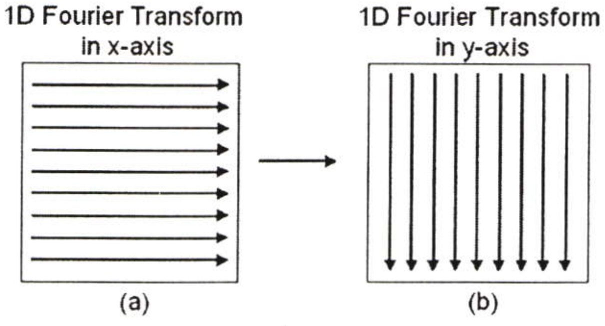
3.3.2 Fast Fourier Transform (FFT)

ปัจจุบัน อุปกรณ์ทางคอมพิวเตอร์มีราคาถูก อีกทั้งมีความแม่นยำสูง ทำให้การวิจัยและพัฒนาของการประมวลผลภาพเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในสาขาวิชาต่างๆ อย่างกว้างขวาง การประมวลสัญญาณเป็นอีกงานหนึ่งที่ถูกนำไปใช้และ Discrete Fourier Transform ก็สามารถรองรับงานดังกล่าวได้เป็นอย่างดี แต่การคำนวณ Discrete Fourier Transform นั้น เมื่อข้อมูลหรือลำดับของสัญญาณมีมาก ก็จะใช้เวลาในการประมวลผลมากขึ้นตามไปด้วยเท่านั้น ตัวอย่างเช่น การคำนวณสำหรับลำดับสัญญาณ N จุดนั้น คอมพิวเตอร์ต้องทำการคูณจำนวนเชิงซ้อนถึง NxN ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อนอีก N(N-1) ครั้ง และจากสมการที่ 3.15 และ 3.16 สังเกตได้ว่าการทำ Fourier Transform สำหรับข้อมูล 2 มิติจะต้องใช้เวลาการคำนวณค่อนข้างนาน เนื่องจาก 1 ตำแหน่งของ $F(u,v)$ ในภาพ Frequency Domain นั้น จะต้องทำการคำนวณผลรวมทั้งหมดเท่ากับ MxN ครั้ง ดังนั้นภาพซึ่งมีขนาดเท่ากับ MxN จะต้องใช้การคำนวณผลรวมทั้งหมด $(MxN)^2$ ครั้ง หากภาพมีขนาดเท่ากับ 100x100 จะต้องทำการคำนวณทั้งหมด 10^8 ครั้ง และหากภาพมีขนาดใหญ่ขึ้น การคำนวณก็จะต้องใช้เวลานานขึ้นอีก ดังนั้นจึงได้มีผู้คิดค้นเทคนิคที่เรียกว่า Fast Fourier Transform (FFT) ซึ่งเป็นการคำนวณ Fourier Transform อย่างรวดเร็ว โดยมีแนวคิดในการคำนวณดังนี้

จากสมการที่ 3.15 จากคุณสมบัติของ $\sum$ และเลขยกกำลัง สามารถจัดเรียงใหม่ได้เป็น

$$F(u,v) = \frac{1}{N}\sum_{y=0}^{n-1}\left(\sum_{x=0}^{M-1} f(x,y)e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{M}\right)}\right)e^{-j2\pi\left(\frac{vy}{N}\right)} \tag{3.17}$$

เมื่อจัดเรียงรูปแบบตามสมการที่ 3.17 แล้ว สังเกตว่าในวงเล็บ คือการทำ Discrete Fourier Transform 1 มิติในแนวแกน x ส่วนที่อยู่นอกวงเล็บ หมายถึงให้นำค่าที่ได้จากการคำนวณ Fourier Transform ในแนวแกน x มาทำ Fourier Transform ต่ออีกครั้งหนึ่งในแนวแกน y ดังรูปที่ 3.16

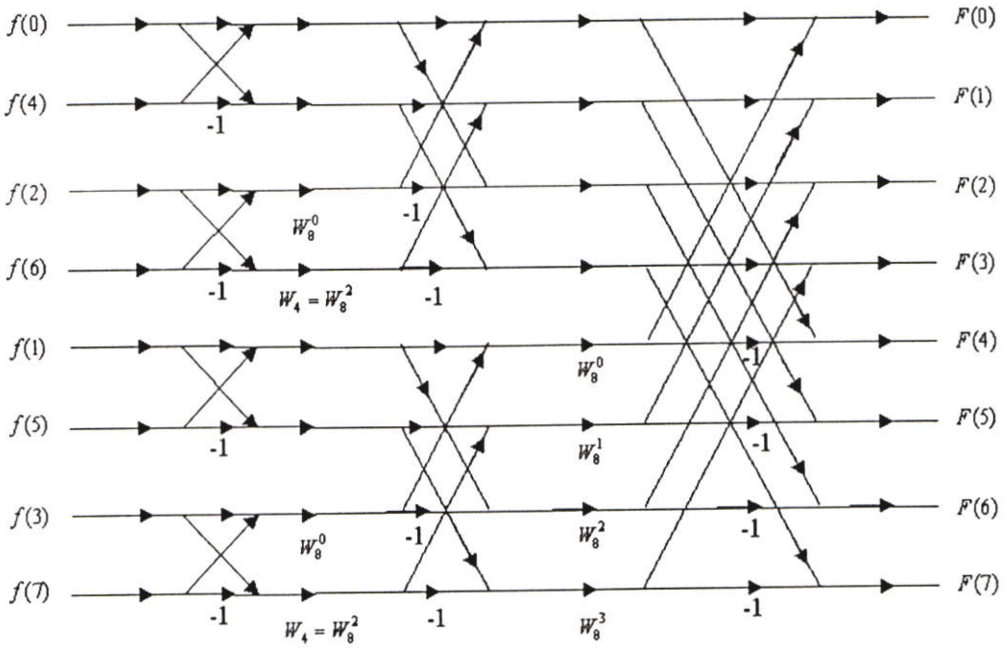


รูปที่ 3.16 การทำ FFT โดย (a) เริ่มจากการทำ 1D DFT ในแนวแกน x
(b) นำภาพที่ได้จากภาพ a มาทำ 1D DFT ในแนวแกน y

ลักษณะเช่นนี้จะทำให้จำนวนครั้งของการคำนวณลดลงจาก $(MxN)^2$ ครั้ง เหลือ $2(MxN)$ ครั้ง ถ้าภาพตั้งต้นมีขนาด 100x100 จะทำการคำนวณทั้งหมด 20,000 ครั้ง จะเห็นได้ว่าจำนวนรอบของการคำนวณจะลดลงอย่างมาก ซึ่งจะทำให้เวลาในการคำนวณรวดเร็วยิ่งขึ้นด้วย ตารางที่ 3.2 จะเปรียบเทียบให้เห็นประสิทธิภาพของ Fast Fourier Transform เทียบกับวิธี Discrete Fourier Transform

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 โดยการลดการคำนวณค่าซ้ำซ้อนลง เรียกวิธีการนี้ว่า DIT-FFT มีตัวอย่างการคำนวณดังรูปที่ 3.17 ซึ่งจะลดเวลาในการคำนวณลงจากเดิม $O(n^2)$ เหลือ $O(\log_2 n)$



รูปที่ 3.17 เทคนิค DIT-FFT สำหรับข้อมูลจำนวน 8 จุด

ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนการคูณเลขเชิงซ้อนของ DFT และ FFT

N	**DFT** N^2	**DIT-FFT** $(2\log_2 N)$
2	4	2
4	16	4
8	64	6
…	…	…
256	65,536	16
512	262,144	18
1024	1,048,576	20

3.4 Phase Correlation

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

$$I_1(x+\Delta x, y+\Delta y) \quad = \quad I_2(x,y) \tag{3.18}$$

เมื่อทำ Fourier ทั้งสองข้างสองสมการที่ 3.18

$$\Im\{I_1(x+\Delta x, y+\Delta y)\} \quad = \quad \Im\{I_2(x,y)\} \tag{3.19}$$

จากคุณสมบัติของ Fourier Transform

$$\Im\{f(x,y)\} \quad = \quad \hat{f}(\omega_x,\omega_y) \tag{3.20}$$

$$\Im\{f(x+\Delta x, y+\Delta y)\} \quad = \quad \hat{f}(\omega_x,\omega_y)\, e^{j(\omega_x\Delta x+\omega_y\Delta y)} \tag{3.21}$$

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

แทนค่าสมการที่ 3.20 และ 3.21 ในสมการที่ 3.19 จะได้

$$\hat{I}_1(\omega_x,\omega_y)\, e^{j(\omega_x \Delta x+\omega_y \Delta y)} \quad = \quad \hat{I}_2(\omega_x,\omega_y) \tag{3.22}$$

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

$$\frac{\hat{I}_2(\omega_x,\omega_y)}{\hat{I}_1(\omega_x,\omega_y)} \quad = \quad e^{j(\omega_x \Delta x+\omega_y \Delta y)} \tag{3.23}$$

จากสมการที่ 3.23 ค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ยังอยู่ใน Frequency Domain อยู่ ทำ IFFT ทั้งสองข้างของสมการที่ 3.23 จะได้

$$Corr(x,y) \quad = \quad \Im^{-1}\{e^{j(\omega_x \Delta x+\omega_y \Delta y)}\} \quad = \quad \delta(x-\Delta x, y-\Delta y) \tag{3.24}$$

ค่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากสมการนี้จะอยู่ในรูปแบบของภาพขนาดเท่ากับภาพตั้งต้น หรือเป็นอาร์เรย์ 2 มิติขนาดเท่ากับจำนวนข้อมูลนั่นเอง แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงนี้ตามปกติแล้ว ควรจะเป็นจุดที่ทำให้ $Corr(x,y)$ มีค่าเป็น 1.0 คือเป็นค่า Peak ที่สุดของภาพ แต่เนื่องจากความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากข้อมูลที่ไม่ได้ทับซ้อนกันในระหว่างภาพตั้งต้นทั้งสอง การมีสัญญาณรบกวน (Noise) หรือความผิดพลาดใดๆ อาจทำให้เราคำนวณได้ออกมามี Peak ของสัญญาณมีค่าน้อยกว่า 1.0 ดังนั้น เราจะเลือกค่าการเปลี่ยนแปลงจากตำแหน่งที่ให้ค่า $Corr(x,y)$ สูงที่สุดในภาพ ดังสมการที่ 3.25

$$(x,y) \quad = \quad \arg\left\{\max_{(\bar{x},\bar{y})}\{Corr(\bar{x},\bar{y})\}\right\} \tag{3.25}$$

ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้อีกคือ ภาพตั้งต้น และภาพอินพุตเมื่อหารกันอาจทำให้ตัวหารเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในกระบวนการ หรือการที่ภาพมี Noise ปะปนอยู่ในภาพ ซึ่งอาจทำให้การคำนวณเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นเราจึงต้องทำการคำนวณการหารแบบใช้ Magnitude ของ Complex Number ของภาพด้วย ตามสมการที่ 3.26

$$\overline{Corr}(\omega_x,\omega_y) \quad = \quad \frac{\hat{f}_1(\omega_x,\omega_y)\, \hat{f}_2^{\bullet}(\omega_x,\omega_y)}{\left|f_1(\omega_x,\omega_y)\right|\left|f_2(\omega_x,\omega_y)\right|} \quad = \quad e^{j(\omega_x \Delta x+\omega_y \Delta y)} \tag{3.26}$$

โดย $\hat{f}_2^{\bullet}(\omega_x,\omega_y)$ หมายถึง Complex Conjugate ของ f_2

3.5 Hough Transform

Hough Transform เป็นวิธีการในการตรวจจับเส้นตรงที่อยู่ในภาพ โดยจะเป็นการตรวจหาเส้นตรงแต่ละเส้นที่แฝงอยู่ในภาพ โดยมีข้อกำหนดว่า ก่อนหน้าที่จะนำภาพเข้ากระบวนการ Hough Transform ได้นั้น ภาพตั้งต้นจะต้องผ่านเทคนิคการหาขอบของภาพมาก่อน ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้เทคนิค Canny Edge Detection ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

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

$$y = mx + b \tag{3.27}$$

โดย m คือความชันของเส้นตรง และ b คือจุดตัดของเส้นตรงกับแกน y

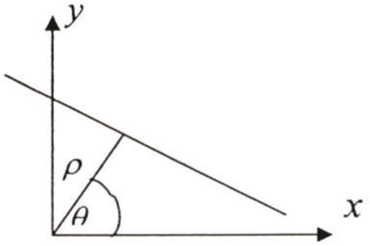
จุดใดๆ ที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกัน จะมีค่า m และค่า b เท่ากันเสมอ นั่นคือ จากสมการที่ 3.27 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$b = y - mx \tag{3.28}$$

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 3.28 นี้จะสังเกตว่ายังใช้งานไม่ได้จริง เนื่องจากในกรณีที่เส้นตรงทำมุมเป็น 90 องศา จะทำให้ค่าความชันมีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้นต้องเปลี่ยนวิธีการในการเก็บค่าใหม่ โดยใช้การคำนวณบนพิกัดเชิงขั้ว ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วิธีการวัด ρ และ θ ของเส้นตรงในพิกัดเชิงขั้ว

สมการเส้นตรงสำหรับพิกัดเชิงขั้วมีลักษณะดังนี้

$$\rho \;=\; x\cos\theta + y\sin\theta \tag{3.29}$$

โดย ρ คือระยะทางที่ใกล้ที่สุดจากเส้นตรงถึงจุดกำเนิด หรือเป็นความยาวของเส้นที่ลากจากจุดกำเนิดไปตั้งฉากกับเส้นตรงนั่นเอง

θ คือมุมระหว่าเส้นที่ลากจากจุดกำเนิดไปตั้งฉากกับเส้นตรง กับแกน x

Hough Space สำหรับพิกัดเชิงขั้วนี้คือ (ρ,θ) จะเห็นว่าการเก็บข้อมูลในลักษณะเช่นนี้จะทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้ทั้ง 360 องศา สำหรับวิธีการเก็บข้อมูลนั้น จะทำได้โดยการพิจารณาที่แต่ละพิกเซลในภาพตั้งต้นซึ่งผ่านการหาขอบมาแล้ว ทำให้ภาพมีลักษณะเป็น Binary Image หากตำแหน่งพิกเซลใดมีค่าเป็น 1 แสดงว่าพิกเซลนั้นอาจเป็นส่วนประกอบของเส้นใดเส้นหนึ่งในภาพ ทำการแทนค่าสมการที่ 3.29 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 และการแบ่งช่วงของมุมนี้ขึ้นอยู่กับผู้ใช้ว่าต้องการความละเอียด 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 3.29 นี้ได้ค่า ρ และ θ เท่ากัน นั่นคือเซ็ตของจุดกลุ่มนี้จะตกในตำแหน่ง (ρ,θ) เดียวกันทั้งหมด ทำให้อาร์เรย์ (ρ,θ) ในตำแหน่งนั้นมีความถี่สูง หากนำ Hough Space มาเขียนเป็นภาพจะเห็นว่าในตำแหน่งนั้นจะมีลักษณะเป็นจุดสว่างขึ้นมา ดังรูปที่ 3.19(c)

(a) (b) (c)

รูปที่ 3.19 การทำ Hough Transform

(a) ภาพตั้งต้น

(b) Edge Image ของภาพ a

(c) ภาพของ Hough Space ที่ได้จากการทำ Hough Transform กับภาพ b

3.6 เทคนิค Canny Edge Detection

Canny ได้เสนอวิธีการตรวจหาขอบวัตถุ [15] ซึ่งสัมพันธ์กับเงื่อนไข 3 ประการ คือ

1. เงื่อนไขในการตรวจหา (Detection criteria) โดยเน้นว่าต้องไม่พลาดขอบวัตถุที่สำคัญและไม่มีการตรวจหาผิดจากการตอบสนองปลอม
2. เงื่อนไขของการระบุตำแหน่ง (Localization criteria) โดยระยะระหว่างตำแหน่งจริงและตำแหน่งของขอบวัตถุที่หาได้ต้องน้อยที่สุด
3. เงื่อนไขการตอบสนองเดียว (One response criteria) โดยทำให้การตอบสนองจากหลายตำแหน่งกับขอบวัตถุเดียวมีจำนวนน้อยที่สุด

วิธีการตรวจหาขอบวัตถุของ Canny นั้นมีแนวคิดพื้นฐานหลายอย่าง ได้แก่

1. การตรวจหาขอบวัตถุที่ใช้กับสัญญาณในหนึ่งมิติตามเงื่อนไขสองข้อแรกนั้น วิธีที่ได้คือ การใช้แคลคูลัสที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลง
2. ถ้าเพิ่มเงื่อนไขที่สามเข้าไป วิธีที่ได้คือ การคำนวณเชิงตัวเลขที่มีการปรับค่าให้เหมาะสม ซึ่งตัวกรองที่ได้นั้นสามารถประมาณได้โดยมีความผิดพลาดต่ำกว่า 20% โดยการหาอนุพันธ์ของตัวกรองสำหรับทำให้เรียบแบบเกาส์ที่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ
3. เมื่อพิจารณาการตรวจหาขอบวัตถุในสองมิติ จะพบว่าขอบวัตถุในสองมิตินั้นจะหาได้จากการหาตำแหน่ง ทิศทาง และขนาดหรือความแรงของขอบวัตถุนั้น ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าการคอนโวลูชันระหว่างภาพกับฟังก์ชั่นเกาส์ในสองมิติที่สมมาตรและนำไปหาอนุพันธ์ในทิศทางของเกรเดียนต์เวกเตอร์นั้นสามารถสร้างตัวดำเนินการที่ง่ายและมีทิศทางที่ถูกต้อง

ให้ G แทนฟังก์ชั่นเกาส์ในสองมิติที่แสดงได้ด้วยสมการ

$$G(x,y)=e^{\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{3.30}$$

สมมุติว่าต้องการคอนโวลูชั่นภาพกับตัวดำเนินการ G_n ที่เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ G ในทิศทาง n โดย

$$G_n=\frac{\partial G}{\partial n}=n.\nabla G \tag{3.31}$$

ทิศทาง n ควรจะมีทิศทางตั้งฉากกับขอบวัตถุ แม้จะยังไม่สามารถหาทิศทางนี้ได้ แต่ก็สามารถใช้การประมาณจากทิศทางของเกรเดียนต์ที่ทำให้เรียบแล้ว ถ้า f แทนฟังก์ชั่นภาพแล้วค่าปกติของขอบวัตถุ n จะประมาณได้จาก

$$n=\frac{\nabla(G*f)}{|\nabla(G*f)|} \tag{3.32}$$

ตำแหน่งของขอบวัตถุนั้นเป็นตำแหน่งที่ให้ค่าสูงสุดในบริเวณที่พิจารณาของฟังก์ชั่นภาพ f ที่คอนโวลูชั่นกับตัวดำเนินการ G_n ในทิศทาง n ซึ่งแสดงได้โดย

$$\frac{\partial}{\partial n}G_n*f=0 \tag{3.33}$$

แทนค่า G_n จากสมการ (3.31) ลงในสมการ (3.33) จะได้

$$\frac{\partial^2}{\partial n^2}G*f=0 \tag{3.34}$$

สมการ 3.34 นี้แสดงวิธีการหาค่ามากที่สุดในบริเวณที่พิจารณาที่ทิศทางที่ตั้งฉากกับขอบวัตถุ ซึ่งมักจะเรียกว่าเป็นวิธีการกำจัดค่าที่ไม่ใช่ค่าสูงที่สุด (Non-maximal Suppression)

จากการที่คอนโวลูชั่นและการหาอนุพันธ์เป็นตัวดำเนินการที่สัมพันธ์กันตามสมการ 3.34 นั้น สามารถที่จะทำการคอนโวลูชั่นภาพ f กับฟังก์ชั่นเกาส์ที่สมมาตร G จากนั้นจึงคำนวณอนุพันธ์อันดับสองแบบมีทิศทางโดยใช้การประมาณทิศทางของ n โดยคำนวณจากสมการ 3.32 ขนาดความแรงของขอบวัตถุ (ขนาดเกรเดียนต์ของฟังก์ชั่นความเข้มของภาพ f) วัดได้จาก

$$\left|G_n * f\right| = \left|\nabla\left(G * f\right)\right| \tag{3.35}$$

4. การตอบสนองปลอมกับขอบวัตถุที่มีเพียงตำแหน่งเดียวซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนมักจะทำให้เกิดปัญหา Streaking ที่พบทั่วไปในการตรวจหาขอบวัตถุ เนื่องจากผลที่ได้จากการตรวจหาขอบวัตถุจะนำมาผ่านการทำเทรโชลด์เพื่อเลือกขอบวัตถุที่มีความสำคัญและ Streaking ที่หมายถึงการขาดหายของเส้นขอบวัตถุจะเกิดจากค่าที่ขึ้นๆ ลงๆอยู่ระหว่างค่าเทรโชลด์ ซึ่ง Streaking นี้สามารถกำจัดได้ด้วยการทำ Hysteresis Thresholding ถ้าขอบวัตถุที่ตอบสนองสูงกว่าค่าเทรโชลด์บน จุดภาพเหล่านั้นก็จะผ่านการพิจารณาเป็นขอบวัตถุของการตรวจหาขอบวัตถุอย่างแน่นอน สำหรับการตอบสนองค่าน้อยๆ อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน แต่จุดเหล่านี้เชื่อมต่อกับจุดภาพที่มีการตอบสนองแรงก็ควรจะได้รับการพิจารณาเป็นขอบวัตถุจริงในภาพ ซึ่งจุดภาพที่เชื่อมต่อกันนี้จะพิจารณาให้เป็นขอบวัตถุถ้าการตอบสนองอยู่เหนือค่าเทรโชลด์ล่าง โดยที่ทั้งค่าเทรโชลด์บนและค่าเทรโชลด์ล่างจะถูกกำหนดตามอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ประมาณได้
5. สเกลที่เหมาะสมสำหรับตัวดำเนินการนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุในภาพ ซึ่งสามารถหาได้โดยการตรวจหาขอบวัตถุในหลายสเกลและรวบรวมข้อมูลจากสเกลเหล่านั้น การเปลี่ยนสเกลตามวิธีของ Canny นั้นทำได้โดยการเปลี่ยนค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ของฟังก์ชั่นเกาส์ ซึ่งอาจจะพบว่ามีหลายสเกลที่ให้การตอบสนองที่ดีกับขอบวัตถุ ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกตัวดำเนินการที่มีสเกลเล็กที่สุดที่ให้ตำแหน่งของขอบวัตถุดีที่สุด ซึ่ง Canny ได้เสนอวิธีการสังเคราะห์คุณสมบัติ (Feature Synthesis) โดยขอบวัตถุที่สำคัญจากตัวดำเนินการที่สเกลเล็กที่สุดจะถูกบันทึกไว้ก่อนและใช้ในการสร้างขอบวัตถุจาหการสมมุติให้ σ มีค่ามากขึ้น จากนั้นการตอบสนองของขอบวัตถุที่สร้างขึ้นจะนำมาเปรียบเทียบกับขอบวัตถุจริง ขอบวัตถุที่เพิ่มขึ้นจะถูกบันทึกไว้ถ้ามีการตอบสนองที่มากกว่าค่าประมาณที่สร้างขึ้นอย่างชัดเจน

วิธีการตรวจหาขอบวัตถุของ Canny นี้มีความแตกต่างจากวิธีการอื่นๆ และมีประสิทธิภาพมากเนื่องจากมีการตรวจหาทั้งขอบวัตถุที่ตอบสนองสูงและขอบวัตถุที่มีการตอบสนองค่าน้อยๆ โดยพิจารณาขอบวัตถุที่มีการตอบสนองค่าน้อยๆเป็นขอบวัตถุจริงด้วยหากมีการเชื่อมต่อกับขอบวัตถุที่ตอบสนองสูง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วิธีการตรวจหาขอบวัตถุของ Canny ทนทานต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าวิธีการอื่นๆ

3.7 Searching Algorithm

การค้นหาคำตอบ หรือการค้นหาข้อมูลในทางคอมพิวเตอร์มักจะกระทำบนโครงสร้างข้อมูลแบบต้นไม้ และกราฟ ทั้งนี้เพราะโครงสร้างข้อมูลในลักษณะนี้สามารถทำให้การค้นหาทำได้สะดวกและสามารถพลิกแพลงการค้นหาได้ง่าย ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว การค้นหาข้อมูลบางครั้งสามารถกระทำบนโครงสร้างข้อมูลชนิดอื่นก็ได้เช่น อาเรย์ แสตก และคิว แต่การจัดข้อมูลในโครงสร้างนี้มีข้อจำกัดในการค้นหาข้อมูลอยู่มาก การค้นหาทำได้แบบเรียงลำดับ (Sequential Search) เท่านั้น ซึ่งใช้ได้กับข้อมูลที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นในการค้นหาข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ ก่อนการค้นหา หรือระหว่างการค้นหา ข้อมูลที่จะถูกค้นจะต้องถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบของต้นไม้ หรือกราฟเท่านั้น การค้นหาข้อมูลบนโครงสร้างต้นไม้และกราฟสามารถจำ แนกได้ 2 แบบคือ การค้นหาแบบไบล์ด (Blind Search) และการค้นหาแบบฮิวริสติก (Heuristic Search)

3.7.1 การค้นหาแบบไบล์ด (Blind Search)

การค้นหาแบบไบล์ด (Blind Search) เป็นการค้นหาแบบที่เดินทางจากโหนดหนึ่งไปยังอีกโหนดหนึ่ง โดยอาศัยทิศทางเป็นตัวกำหนดการค้นหา ไม่ต้องมีข้อมูลอะไรมาช่วยเสริมการตัดสินใจว่าจะเดินทางต่อไปอย่างไร หรือกล่าวอย่างง่ายๆ คือการจะหยิบข้อมูลใดมาช่วยในการค้นหาต่อไป ไม่ต้องอาศัยข้อมูลใดๆ ทั้งสิ้น นอกจากทิศทางซึ่งเป็นรูปแบบตายตัว การค้นหาแบบไบล์ดสามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้ คือ การค้นหาทั้งหมด และการค้นหาบางส่วน

3.7.1.1 การค้นหาทั้งหมด (Full Search)

การค้นหาทั้งหมด คือ การค้นหาทั้งหมดของปริภูมิสถานะ โดยทำการไล่หาคำตอบตั้งแต่โหนดแรกไปยังโหนดสุดท้ายหรือ จนกว่าจะพบคำตอบที่ต้องการในกรณีที่ทราบคำตอบที่ต้องการค้นหาล่วงหน้าแล้ว

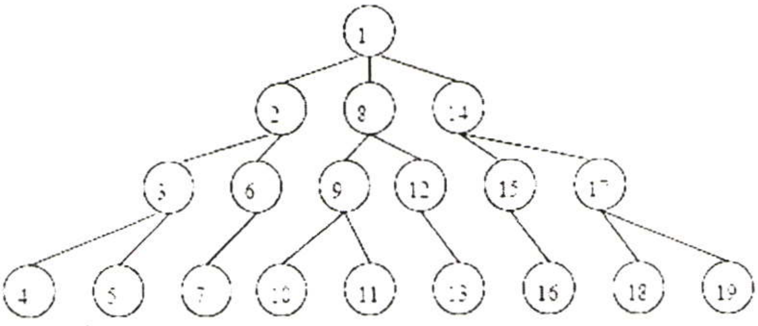
3.7.1.2 การค้นหาบางส่วน (Partial Search)

เป็นการค้นหาเพียงบางส่วนของปริภูมิสถานะ ซึ่งในความเป็นจริงการค้นหาส่วนมากใช้การค้นหาเฉพาะบางส่วนเท่านั้นเนื่องจากปริภูมิสถานะมักมีขนาดใหญ่เท่าให้ไม่สามารถค้นหาได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าคำตอบที่ได้อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด การค้นหาแบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การค้นหาแบบลึกก่อน (Depth First Search) และการค้นหาแบบกว้างก่อน (Breadth First Search)

3.7.1.2.1 การค้นหาแบบลึกก่อน (Depth First Search)

การค้นหาแบบลึกก่อนเป็นการค้นหาที่กำหนดทิศทางจากรูปของโครงสร้างต้นไม้ ที่เริ่มต้นจากโหนดราก(Root Node) ที่อยู่บนสุด แล้วเดินลงมาให้ลึกที่สุด เมื่อถึงโหนดล่างสุด (Terminal Node) ให้ย้อนขึ้นมาที่จุดสูงสุดของกิ่งเดียวกันที่มีกิ่งแยกและยังไม่ได้เดินผ่าน แล้วเริ่มเดินลงจนถึงโหนดลึก

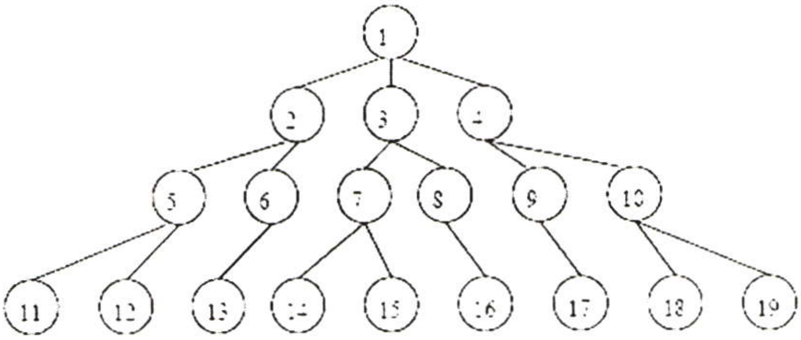
สุดอีก ทำเช่นนี้สลับไปเรื่อยจนพบโหนดที่ต้องการหาหรือสำรวจครบทุกโหนดแล้วตามรูปที่ 3.20 การค้นหาแบบลึกก่อนจะมีลำดับการเดินตามโหนดดังตัวเลขที่กำกับไว้ในแต่ละโหนด



รูปที่ 3.20 ลำดับการค้นหาบนโหนดของการค้นหาแบบลึกก่อน

3.7.1.2.2 การค้นหาแบบกว้างก่อน (Breadth First Search)

การค้นหาแบบกว้างก่อนเป็นการกำหนดทิศทางการค้นหาแบบทีละระดับของโครงสร้างต้นไม้โดยเริ่มจากโหนดราก(ระดับที่ 0) แล้วลงมาระดับที่ 1 จากซ้ายไปขวา เมื่อเสร็จระดับที่ 1 ไปประดับที่ 2จากซ้ายไปขวาเช่นกัน ทำเช่นนี้เรื่อยๆ จนพบโหนดที่ต้องการตามรูปที่ 3.21 ลำดับการเดินทางของโหนดเป็นไปตามหมายเลขที่กำกับไว้บนโหนด



รูปที่ 3.21 ลำดับการค้นหาบนโหนดของการค้นหาแบบกว้างก่อน

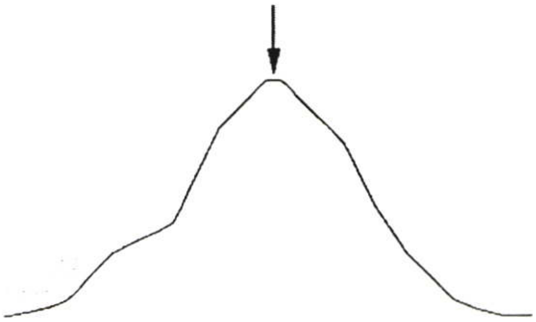
3.7.2 การค้นหาแบบฮิวริสติก (Heuristic Search)

การค้นหาคำตอบโดยอาศัยวิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic Search) มีความแตกต่างจากการค้นหาข้อมูลแบบธรรมดา โดยการค้นหาข้อมูลแบบธรรมดา ผู้ที่ทำการค้นข้อมูลจะต้องตรวจสอบข้อมูลทีละตัวทุกตัวจนครบ แต่ฮิวริสติกจะไม่ลงไปดูข้อมูลทุกตัว วิธีการนี้จะเลือกคำตอบที่เหมาะสมให้กับการค้นหา ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถทำการค้นหาคำตอบจากข้อมูลที่มีขนาดใหญ่มากๆ ได้ แต่มีข้อเสียคือ คำตอบที่ได้เป็นเพียงคำตอบที่ดีเท่านั้นไม่แน่ว่าจะดีที่สุด แต่เนื่องจากว่าปัญหาในบางลักษณะนั้นใหญ่มาก และเป็นไปไม่ได้ที่จะทำ การค้นหาด้วยวิธีธรรมดา กระบวนการของ

ฮิวริสติกจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและการค้นหาแบบฮิวริสติกมีสิ่งหนึ่งที่สำคัญคือ ฮิวริสติกฟังก์ชัน (Heuristic Function) ซึ่งหมายถึงฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ในการวัดขนาดของความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหาซึ่งจะแสดงด้วยตัวเลข วิธีการดังกล่าวจะกระทำได้โดยการพิจารณาถึงวิธีการ (Aspects) ต่างๆ ที่ใช้ในการแก้ปัญหา ณ สถานะหนึ่งว่าจะสามารถแก้ปัญหาได้ตามที่ต้องการหรือไม่ โดยกำหนดเป็นน้ำหนักที่ให้กับการแก้ปัญหาของแต่ละวิธี น้ำหนักเหล่านี้จะถูกแสดงด้วยตัวเลขที่กำกับไว้กับโหนดต่างๆ ในกระบวนการ ค้นหา และค่าเหล่านี้จะเป็นตัวที่ใช้ในการประมาณความเป็นไปได้ว่าเส้นทางที่ผ่านโหนดนั้น จะมีความเป็นไปได้ในการนำไปสู่หนทางการแก้ปัญหาได้มากน้อยแค่ไหน จุดประสงค์ที่แท้จริงของฮิวริสติกฟังก์ชันก็คือ การกำกับทิศทางของกระบวนการค้นหาเพื่อให้อยู่ในทิศทางที่ได้ประโยชน์สูงสุด โดยการบอกว่าควรเลือกเดินเส้นทางไหนก่อน การแก้ปัญหาหนึ่งๆ จะดีหรือไม่ ก็ขึ้นอยู่กับฮิวริสติกฟังก์ชัน ดังนั้นการค้นหาแบบนี้จึงไม่มีอะไรเป็นหลักประกันว่าผลที่ได้ออกมาจะดีหรือไม่ ซึ่งการค้นหาแบบนี้ สามารถแบ่งได้เป็น

3.7.2.1 การค้นหาแบบปีนเขา (Hill Climbing)

การค้นหาแบบปีนเขา (Hill Climbing) เป็นวิธีการค้นหาข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายกับการปีนภูเขาที่นักปีนภูเขาจะเดินทางไปถึงยอดภูเขา โดยจะต้องมองก่อนว่ายอดเขาอยู่ที่ใด แล้วต้องพยายามไปจุดถึงนั้นโดยเร็วที่สุด นักปีนเขาจะมองไปที่ยอดเขาแล้วสังเกตว่าทิศทางใดที่เมื่อปีนแล้วจะยิ่งใกล้ยอดเขา และหลีกเลี่ยงทิศทางที่เมื่อไปแล้วจะทำให้ตัวเองห่างจากยอดเขา นักปีนเขาจะต้องทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงยอดเขา ดังรูปที่ 3.22

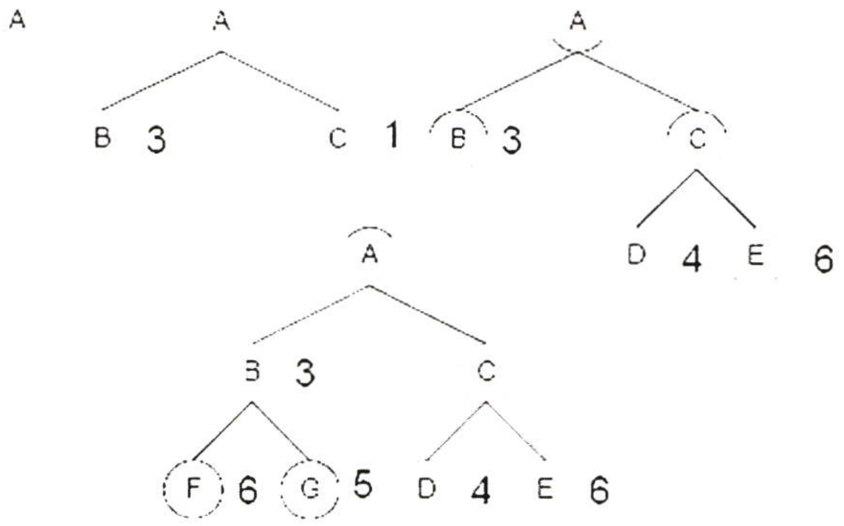


รูป 3.22 แสดงลักษณะการค้นหาแบบ Hill Climbing

3.7.2.2 การค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (Best First Search)

การค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (Best First Search) เป็นกระบวนการค้นหาข้อมูลที่ได้นำเอาข้อดีของทั้งการค้นหาแบบลึกก่อน(Depth First Search) และการค้นหาแบบกว้างก่อน(Breadth First Search) มารวมกันเป็นวิธีการเดียว โดยที่แต่ละขั้นของการค้นหาในโหนดลูกนั้น จะเลือกโหนดที่ดีที่สุด (Most promising)และการที่จะทราบว่าโหนดใดดีที่สุดนี้สามารถทำได้โดยอาศัยฮิวริสติกฟังก์ชัน ซึ่งจะทำหน้าที่

เสมือนตัววัดผล และให้ผลของการวัดนี้ออกมาเป็นคะแนน รูปที่ 3.23 แสดงตัวอย่างของการค้นหาแบบดีที่สุดก่อน โดยเริ่มจากขั้นตอนแรกสร้างโหนดราก(Root Node) ขั้นตอน 2 สร้างโหนดลูกB และ C แล้วตรวจสอบโหนด B และ C ด้วยฮิวริสติกฟังก์ชัน ได้ผลออกมาเป็นคะแนนคือ 3 และ 1ตามลำดับ จากนั้นให้เลือกโหนด C เป็นโหนดต่อไปที่สนใจ เพราะมีค่าน้อยกว่า (หมายเหตุ ในการเลือกนี้จะเลือกค่ามากสุดหรือน้อยสุดก็ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา) แล้วสร้างโหนด ลูกให้กับโหนด C ในขั้นตอน 3 ได้โหนด D และ E แล้วตรวจสอบคะแนนได้ 4 และ 6 ตามลำดับ จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าของโหนดท้ายสุด หรือเทอร์มินอล โหนด(Terminal Node) ทุกโหนดว่าโหนดใดมีค่าดีที่สุด ในที่นี้จะต้องเลือกโหนด B เพราะมีคะแนนเพียง 3 (เลือกคะแนนต่ำสุด) แล้วสร้างโหนดลูกตามขั้นตอน 4 ได้ F และ G แล้วตรวจสอบคะแนนได้ 6 และ 5 คะแนนตามลำดับ ทำเช่นนี้เรื่อยๆ จนพบคำตอบหรือจนไม่สามารถ สร้างโหนดต่อไปได้อีก

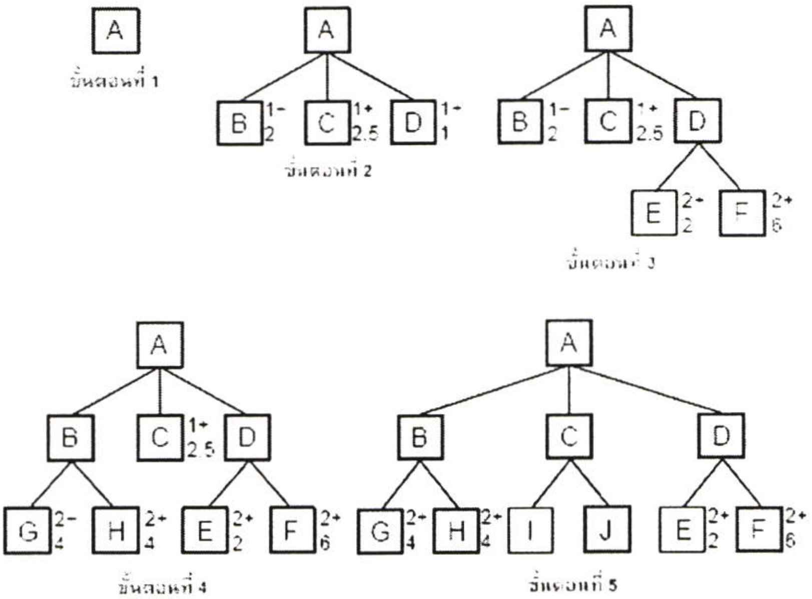


รูป 3.23 แสดงขั้นตอนของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน

3.7.2.3 การค้นหาแบบ A* (A* Search)

การค้นหาแบบ A* เป็นอีกแบบของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน แต่ในกรณีของ A* นี้จะมีลักษณะพิเศษกว่าคือ ส่วนของฮิวริสติกฟังก์ชัน ซึ่งการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนนั้น ค่าที่ได้จากฮิวริสติกฟังก์ชันจะเป็นค่าที่วัดจากโหนดปัจจุบัน แต่ในกรณีของ A* ค่าของฮิวริสติกฟังก์ชันจะวัดจากค่า 2 ค่าคือ ค่าที่วัดจากโหนด

ปัจจุบันไปยังโหนดราก และจากโหนดปัจจุบันไปยังโหนดเป้าหมาย รูป 3.24 แสดงตัวอย่างของการค้นหาคำตอบด้วยเทคนิคการค้นหาแบบ A*



รูป 3.24 แสดงขั้นตอนของการค้นหาแบบ A*

3.8 Root Mean Square Error

การคำนวณค่า Root Mean Square Error หรือ RMSE [15] เพื่อวัดความแตกต่างระหว่างภาพนั้น จะคำนวณเฉพาะพื้นที่ของภาพส่วนที่เกิดการทับซ้อนกันเท่านั้น โดยมีสมการดังนี้

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}}{n} \qquad (3.36)$$

โดย x_i คือค่าความแตกต่างของความเข้มแสงระหว่างภาพตั้งต้นทั้งสอง

i คือตำแหน่งใดๆที่มีการซ้อนทับขึ้นซึ่งจะเป็นจุดเดียวกันในภาพผลลัพธ์

n คือจำนวนตำแหน่งทั้งหมดที่เกิดการซ้อนทับขึ้น

การทำ RMSE เป็นการวัดความแตกต่างของความเข้มแสงระหว่างภาพ ซึ่งโดยปกติ ถ้าหากทำ Image Registration แล้วผลที่ได้มีความถูกต้องแน่นอน ค่า RMSE ที่คำนวณได้จากภาพผลลัพธ์ควรจะมีค่าเป็น 0 นั่นหมายความว่า ไม่มีความแตกต่างระหว่างภาพเลย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือภาพที่ได้จากการทำ Image Registration ออกมาดูกลมกลืนเป็นภาพเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การที่ภาพอาจมีการหมุนร่วมด้วยเมื่อใช้การคำนวณ Interpolation ซึ่งเป็นการประมาณค่าใกล้เคียง หรือ

ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนจะทำให้ค่า RMSE ที่คำนวณได้มีค่าไม่เท่าศูนย์ ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงที่ให้ค่า RMSE น้อยที่สุดจึงเป็นค่าที่ให้ความถูกต้องมากที่สุด

บทที่ 4

วิธีการทำ Image Registration ด้วยเทคนิคที่นำเสนอ

งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการทำ Image Registration ด้วยเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟ เฟสคอลลีเรชั่น และการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน ซึ่งได้นำข้อดีของการทำงานในโดเมนความถี่ที่ใช้เวลาในการงานที่น้อยร่วมกับการทำงานในโดเมนของจุดในภาพซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง ทำให้สามารถรองรับการทำงานกับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้น โดยผลลัพธ์ที่ได้จะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นและใช้เวลาในการประมวลผลที่น้อยเมื่อเทียบการทำงานในโดเมนของจุดในภาพอย่างเดียว และการทำงานในโดเมนความถี่ไม่ต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์จำนวนมากมายเหล่านั้นด้วย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของการทำ Image Registration ด้วยเทคนิคที่ได้นำเสนอ โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดทีละขั้นตอนจนได้ผลลัพธ์ที่ต้องการออกมา

4.1 ภาพรวมของการทำ Image Registration ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

ภาพรวมของการทำ Image Registration แบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ การหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างคู่ภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะจำกัดเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของการเลื่อนตำแหน่งและการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของภาพเท่านั้น อีกส่วนหนึ่งคือ การนำภาพทั้งสองมาจัดเรียงและประกอบกันเป็นภาพใหญ่ภาพใหม่

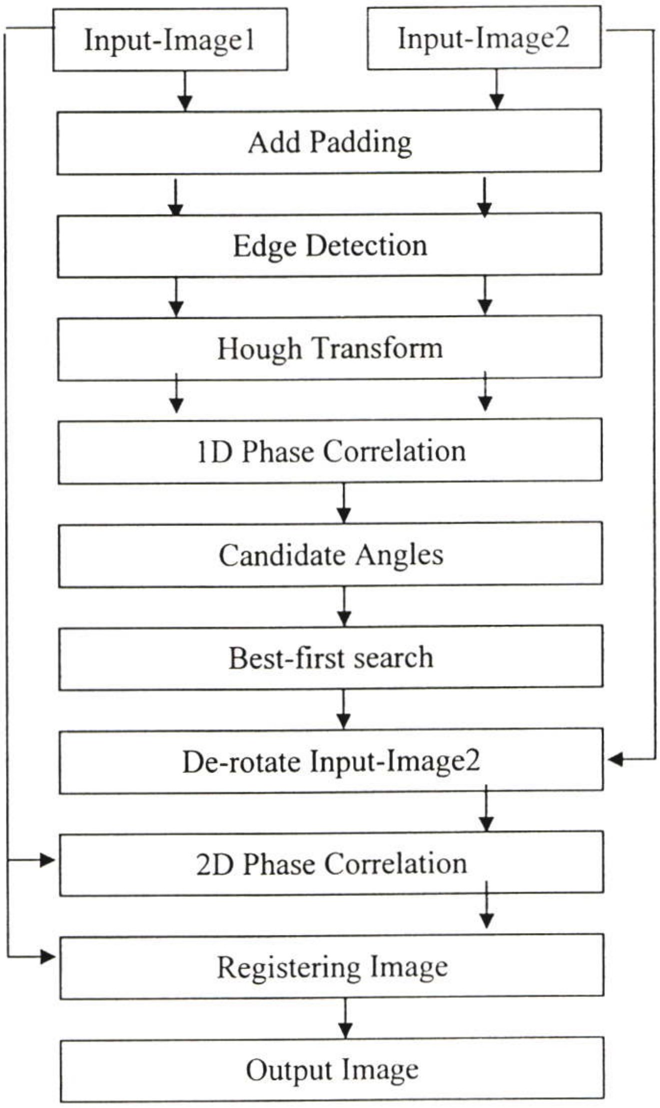
การหาการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของภาพเริ่มจากการนำภาพย่อย 2 ภาพมาทำ Edge Detection เพื่อให้ได้ภาพที่มีแต่เส้นขอบ จากนั้นจะทำการแปลงให้อยู่ในรูปเชิงขั้วด้วยเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟ จากนั้นจึงหาการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนด้วยเฟสคอลลีเรชั่นแบบ 1 มิติ มุมการหมุนที่ได้จะถูกปรับปรุงให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นด้วยการนำไปหามุมการหมุนอื่นๆ ที่อาจเป็นมุมการหมุนที่ถูกต้องแล้วใช้การค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนมาทำการค้นหาจนพบมุมการหมุนที่น่าจะเป็นมุมการหมุนที่ถูกต้องออกมา

การหาการเปลี่ยนแปลงของการเลื่อนตำแหน่งสามารถหาได้ง่ายและมีความถูกต้องมากกว่าการหาการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุน โดยใช้แค่เฟสคอลลีเรชั่นแบบ 2 มิติก็จะได้ค่าของการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน x และแนวแกน y ออกมา

การจัดเรียงและประกอบภาพใหม่อาศัยเทคนิค Geometric Transform ตามที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 3

จากไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของวิธีการที่ได้นำเสนอดังแสดงในรูปที่ 4.1 กล่าวได้ว่ามีการปรับปรุง และเพิ่มเติมวิธีการบางอย่างเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพจากการทำ

Image Registration ด้วยวิธีการแปลงข้อมูลแบบฮัฟและเฟสคอลลีเรชั่นของ Li Zhongke และคณะ [14] เนื่องจากพบว่าวิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการทำ Image Registration กับภาพที่มีการเลื่อนตำแหน่งแต่เพียงอย่างเดียวได้ดีทั้งในเรื่องของความถูกต้องและเวลาที่ใช้ประมวลผล แต่เมื่อภาพที่นำมาเป็นภาพตั้งต้นมีการเปลี่ยนแปลงของมุมการหมุนร่วมด้วย ผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่น่าพึงพอใจนักโดยเฉพาะภาพที่มีรายละเอียดในภาพมากและมีเส้นตรงในภาพน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากเทคนิคที่นำมาใช้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงเทคนิค 1D Phase Correlation และเพิ่มเติมเทคนิค Candidate Angles และ Best-first Search เข้าไปเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหามุมการหมุนให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

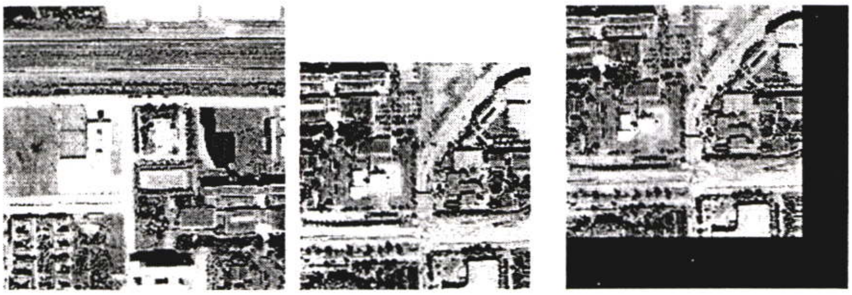


รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำ Image Registration ด้วยวิธีการที่นำเสนอ

4.2 การปรับขนาดของภาพด้วยเทคนิคการ Padding

การทำ Image Registration โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัพ เฟสคอลลีเรชั่นและการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน ในขั้นตอนแรก เริ่มต้นที่การนำภาพย่อย 2 ภาพในรูปที่ 4.1 คือ Input Image1 ซึ่งเป็นเสมือนภาพตั้งต้นหรือภาพอ้างอิงและ Input Image2 ซึ่งเสมือนเป็นภาพอินพุท หรือภาพเป้าหมายมาตรวจสอบว่าภาพทั้งสองมีขนาดเท่ากันหรือไม่ หากไม่ ต้องทำการเติมค่า 0 ลงไปในภาพที่เล็กกว่าโดยจะเติมด้านมุมล่างขวาจนได้ขนาดเท่ากัน ดังรูปที่ 4.2

การทำ Padding เป็นการเตรียมภาพให้มีขนาดเหมาะสมสำหรับทำ Phase Correlation เนื่องจากการทำ Phase Correlation อาศัยเทคนิคของ Fast Fourier Transform ซึ่งข้อมูลนำเข้าต้องเป็นจำนวนของ 2^n



(a) (b) (c)

รูป 4.2 แสดงการทำ Padding

(a) และ (b) แสดงภาพอินพุทที่ต้องการทำ Image Registration

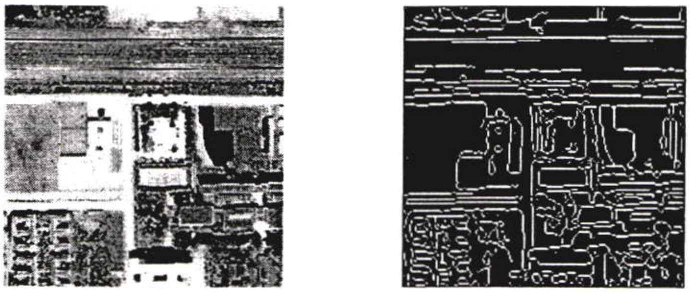
(c) ภาพอินพุท

(b) ที่ได้ทำการเพิ่ม 0 จนมีขนาดเท่ากับภาพอินพุท (a) และมีขนาดเป็น 2^n

4.3 การค้นหาเส้นขอบภาพด้วยเทคนิค Edge Detection

การทำ Edge Detection เพื่อให้ได้ภาพที่มีแต่เส้นขอบ หรือที่เรียกว่า Binary Edge Image ทั้งนี้เนื่องมาจากการแปลงข้อมูลด้วยเทคนิคฮัฟเป็นการทำงานกับเส้นตรงที่อยู่ในภาพ ดังนั้นการทำ Edge Detection จึงเป็นการเตรียมข้อมูลให้พร้อมสำหรับเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟต่อไปนั่นเอง

ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการของ Canny Edge Detection มาใช้หาเส้นขอบในภาพเนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพทำให้ภาพที่ได้ปรากฏเส้นตรงค่อนข้างชัดเจน ซึ่งจะส่งผลดีต่อกระบวนการหาการแปลงแปลงของมุมการหมุนใน Hough space ต่อไป ตัวอย่างของการทำ Canny Edge Detection แสดงดังรูปที่ 4.3



(a) (b)

รูป 4.3 แสดงการทำ Canny Edge Detection

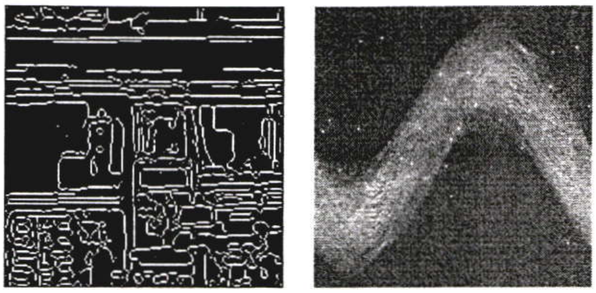
(a) ภาพอินพุท

(b) ภาพที่ได้หลังทำการหาเส้นขอบของภาพ (a)

4.4 Hough Transform

เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟ (Hough Transform) เป็นเทคนิคที่นำมาใช้เพื่อแปลงภาพจากระบบพิกัดฉากซึ่งแต่ละจุดในภาพถูกอ้างอิงด้วยตำแหน่ง (x, y) ไปเป็นระบบพิกัดเชิงขั้วซึ่งอ้างอิงโดยพิกัด (ρ,θ)

วัตถุประสงค์ของการแปลงนี้เพื่อให้สามารถใช้เทคนิคเฟสคอลลีเรชั่นแบบ 1 มิติมาหาการเปลี่ยนแปลงของมุมการหมุนในฮัฟสเปซได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนในพิกัด (x, y) ถูกแปลงไปเป็นการเลื่อนตำแหน่งในพิกัด (ρ,θ) แทน ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติของฮัฟสเปซดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.5 โดยจุดที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกันจะมีค่าในตารางฮัฟสเปซเดียวกันนั่นคือมีค่า ρ และ θ เท่ากัน เมื่อจุดเหล่านี้บวกความถี่เพิ่มขึ้นในฮัฟสเปซช่องเดียวกัน จะทำให้ค่าในฮัฟสเปซช่องนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น หากนำฮัฟสเปซดังกล่าวมาสร้างเป็นภาพก็จะเห็นว่าช่องเหล่านี้ดูสว่าง ซึ่งตัวอย่างของภาพฮัฟสเปซแสดงในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 จะแสดงให้เห็นว่าหากมีการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของเส้นตรงเส้นใดๆในภาพ จุดบนเส้นตรงที่เดิมเคยอยู่บนฮัฟสเปซช่องเดียวกัน จะเปลี่ยนไปตกในฮัฟสเปซช่องอื่นแทน กล่าวคือ จุดเหล่านี้มีการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน θ ตามมุมที่เส้นหมุนไป รูปที่ 4.5(b) แสดงภาพที่เกิดจากการหมุนภาพ 4.5(a) ไปในทิศทวนเข็มนาฬิกาจำนวน 20 องศา และรูปที่ 4.5 (c) แสดงภาพฮัฟสเปซของรูปที่ 4.5(a) จะเห็นว่าจุดสว่างสีขาวซึ่งเป็นจุดที่แสดงว่ามีเส้นตรงตกอยู่ในช่องนั้นมาก เมื่อมีการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน θ ไปเป็นรูปที่ 4.5(d) เมื่อมีการหมุนภาพขึ้น ภาพของฮัฟสเปซก็เปลี่ยนไปด้วยเช่นเดียวกัน ทำให้สามารถใช้ทฤษฎีเฟสคอลลีเรชั่นแบบ 1 มิติ ซึ่งมีคุณสมบัติในการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งมาหาการเปลี่ยนแปลงของการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน θ ของฮัฟสเปซได้ โดยในรูปแกน θ ของฮัฟสเปซ ตรงกับแกน X ในระบบพิกัดฉากและแกน ρ ของฮัฟสเปซ จะตรงกับแกน Y ในระบบพิกัดฉาก



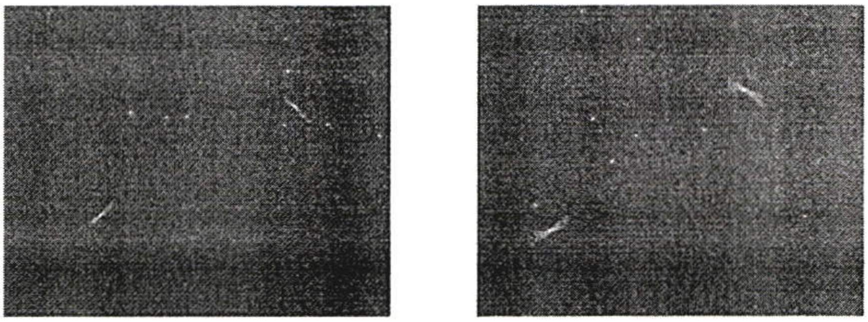
(a) (b)

รูปที่ 4.4 การทำ Hough Transform

(a) ภาพตั้งต้น

(b) ภาพของ Hough Space ที่ได้จากการทำ Hough Transform กับภาพ a

(a) (b)



(c) (d)

รูปที่ 4.5 แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน θ ของฮัฟสเปซเมื่อมีการหมุนภาพตั้งต้น

(a) ภาพตั้งต้น 1

(b) ภาพตั้งต้น 2 ซึ่งเกิดจากการหมุนภาพตั้งต้น 1 ทวนเข็มนาฬิกา 20 องศา

(c) Hough Space ของภาพตั้งต้น 1

(d) Hough Space ของภาพตั้งต้น 2

4.5 1D Phase Correlation

เทคนิคเฟสคอลลีเรชั่นแบบ 1 มิติ (1D Phase Correlation) เป็นเทคนิคที่นำมาใช้หาการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของภาพ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ นำมาใช้หาค่าของการเลื่อนตำแหน่งในแนว θ ของภาพในฮัฟสเปซ (Hough Space)

สมการ Phase Correlation ที่ 3.25 และ 3.26 เป็นการหาการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน x และ y หรือหาการเปลี่ยนแปลงใน 2 มิติ แต่สำหรับการหามุมการหมุนนั้นต้องการเฉพาะค่า θ_{rot} หรือการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน θ เท่านั้น จึงไม่จำเป็นจะต้องทำ Inverse Fourier Transform ทั้ง 2 แกน สามารถทำการถอด Inverse Fourier Transform เฉพาะในแนวแกน θ แล้วทำการบวกค่า ρ ทุกๆ ค่าในแกน θ แทนดังนี้

$$\theta_{rot} = \arg\left\{ \max_{\theta}\left(\sum_{\alpha} F_{\theta}^{-1}\left(\frac{F_{\theta}\left(F_{\rho}\left(H_2(\rho,\theta)\right)\right)}{F_{\theta}\left(F_{\rho}\left(H_1(\rho,\theta)\right)\right)} \right)\right)\right\} \tag{4.1}$$

โดย $H_n(\rho,\theta)$ คือค่าในฮัฟสเปซจากภาพตั้งต้นที่ n ในตำแหน่ง (ρ,θ) ใดๆ

F_{θ} และ F_{ρ} คือการทำ Fourier Transform ในแนวแกน θ และ ρ ตามลำดับ

F_{θ}^{-1} คือการทำ Inverse Fourier Transform ในแนวแกน θ

สมการที่ 4.1 เป็นสมการรวมสำหรับการหาค่า $\Delta\theta$ ระหว่างภาพตั้งต้นทั้ง 2 ภาพ โดยเริ่มจากการทำ Fourier Transform 2 มิติกับภาพตั้งต้นทั้ง 2 ภาพ แล้วนำค่าที่ได้หารกันแบบจุดต่อจุดตามสมการที่ 3.26 เช่นเดียวกับการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพ หลังจากนั้นทำการแปลง Inverse Fourier Transform 1 มิติ ในทิศ θ กับภาพการเปลี่ยนแปลงที่ได้ ส่วนในด้านของ ρ นั้นไม่ต้องการค่าการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำ Inverse Fourier Transform ในทิศ ρ เมื่อแปลง Inverse Fourier Transform ในทิศ θ แล้ว นำภาพการเปลี่ยนแปลงที่ได้มาทำการบวกค่าในทุกๆ ρ ใน θ เดียวกัน จะได้อาร์เรย์ขนาด 1 มิติของการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ ผลลัพธ์ที่ได้จะเลือกจากตำแหน่งของอาร์เรย์ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเป็นค่า θ_{rot}

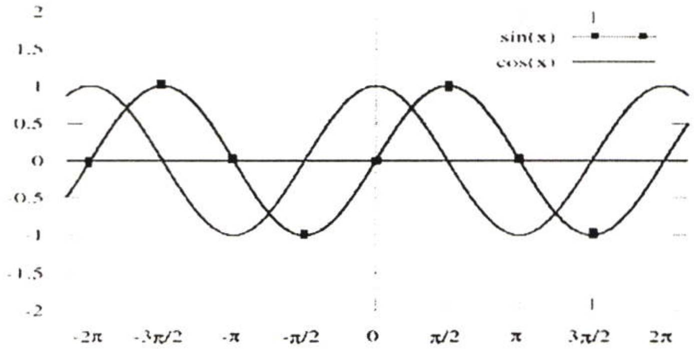
อย่างไรก็ตาม จากการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนกับภาพในหลากหลายลักษณะและหลากหลายขนาดก็พบว่าค่าที่มากที่สุดในอาร์เรย์การเปลี่ยนแปลงที่ได้อาจไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด ดังนั้นเราจึงได้ทำการเก็บค่าสูงสุดในลำดับรองๆ ลงไปด้วย รวมเป็นทั้งสิ้น 5 ลำดับ ซึ่งผลการทดลองในบทที่ 5 จะแสดงให้เห็นว่าการเก็บค่าสูงสุดในลำดับรองลงไปช่วยเพิ่มความถูกต้องให้กับการทดลองมากน้อยเพียงไร

การเพิ่มการพิจารณามุมการหมุนในลำดับรองลงไปนี้เป็นการปรับปรุงเทคนิค 1D Phase Correlation จากการทำ Image Registration ด้วยวิธีการแปลงข้อมูลแบบฮัฟและเฟสคอลลีเรชั่นของ Li Zhongke และคณะ [14] ที่พิจารณาค่าสูงสุดในอาร์เรย์การเปลี่ยนแปลงเพียงค่าเดียว

4.6 Candidate Angles

การเตรียม Candidate Angles เป็นการเตรียมมุมการหมุนไว้สำหรับคัดเลือกเป็น Start Node ของการค้นหาแบบ Best-First Search ในหัวข้อถัดไป ซึ่งจะช่วยเพิ่มโอกาสหรือความน่าจะเป็นที่จะเข้าใกล้มุมการหมุนที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

จากขั้นตอนการทำ 1D Phase Correlation จะได้มุมการหมุนเบื้องต้นออกมา 5 ค่า จากนั้นจะนำมาพิจารณาเพื่อหามุมการหมุนอื่นๆ ที่มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับมุมการหมุนดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อพิจารณาสมการเส้นตรงในฮัฟสเปซ สมการที่ 3.29 พบว่าค่า ρ เกิดจากการบวกกันของค่า $\cos\theta$ และ $\sin\theta$ ที่คูณอยู่กับคู่อันดับ (x, y) ตามลำดับ และจากการที่ Sine Function และ Cosine Function มีพฤติกรรมเป็น Cyclical หรือ Periodic Function ดังรูปที่ 4.6 ทำให้ค่า cos และ sin ในบาง θ มีค่าเท่ากัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุน หรือ θ_{rot} ที่ได้จากเทคนิค 1D Phase Correlation นั้นอาจไม่ใช่มุม θ จริงๆ แต่เป็นมุมที่มีความเกี่ยวข้องกับมุม θ อย่างมีนัยสำคัญด้วยค่า cos และ sin โดยค่ามุมที่มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับค่ามุม θ ได้แก่ มุม $(90+\theta)$, $(180+\theta)$ และ $(270+\theta)$



รูป 4.6 กราฟของ Sine Function และ Cosine Function

สมมุติให้มุมการหมุนที่ได้จากขั้นตอนการทำ 1D Phase Correlation คือมุม $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ และ θ_5 เมื่อพิจารณามุมการหมุนที่มีความเกี่ยวข้องกับมุมเหล่านี้อย่างมีนัยสำคัญพบว่ามีด้วยกันทั้งสิ้น 15 มุม และเมื่อรวมกันมุมการหมุนเดิม ทำให้มุมการหมุนที่มีโอกาสเป็นมุมการหมุนที่ถูกต้องมีด้วยกันทั้งสิ้น 20 มุมด้วยกัน ดังนี้

$$\theta_1,(90+\theta_1),(180+\theta_1),(270+\theta_1)$$
$$\theta_2,(90+\theta_2),(180+\theta_2),(270+\theta_2)$$
$$\theta_3,(90+\theta_3),(180+\theta_3),(270+\theta_3)$$
$$\theta_4,(90+\theta_4),(180+\theta_4),(270+\theta_4)$$
$$\theta_5,(90+\theta_5),(180+\theta_5),(270+\theta_5)$$

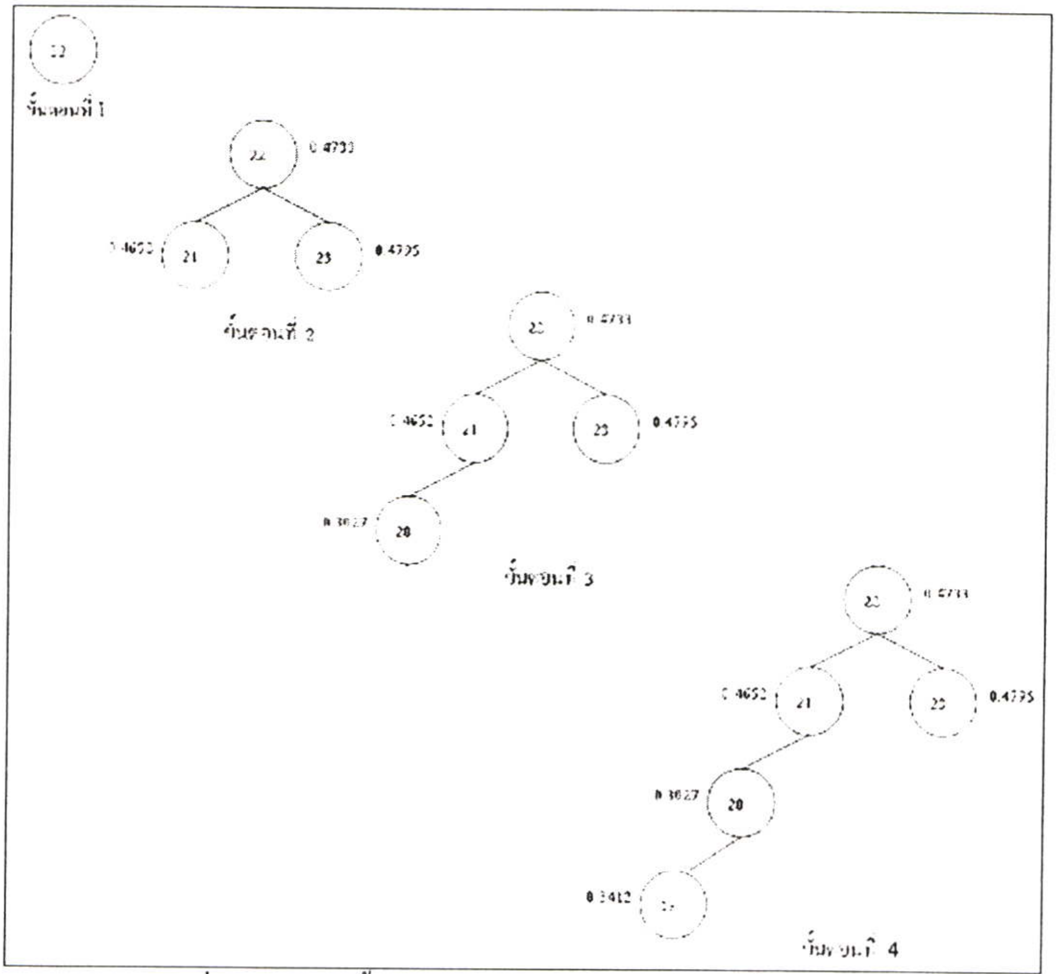
โดยมุมทั้งหมด 20 มุมนั้นจะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 359 องศา เพราะเราจะถือว่ามุมที่เกินไปจากนั้นเป็นมุมที่ทับซ้อนกันกับมุม [0,359] องศาเรื่อยไป ตัวอย่างเช่น มุม 360 องศา เป็นมุมที่มีการทับซ้อนกับมุม 0 องศา ดังนั้นหากเมื่อทำการบวกค่ามุม $\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4$ และ θ_5 ด้วยมุม $(90+\theta)$, $(180+\theta)$ และ $(270+\theta)$ แล้ว มุมที่ได้ออกมาเกินไปจาก 359 องศาจะต้องทำการลบออกด้วยค่า 360 จนกว่าผลที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง [0,359] ซึ่งกระบวนการเช่นนี้ในทางคณิตศาสตร์เรียกว่าการ “Modulus after division” หรือเรียกง่ายๆ ว่าเป็นการหารแล้วเอาเศษที่ได้หลังการหาร

4.7 Best-first Search

Best-first Search หรือการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนเป็นกระบวนการค้นหาข้อมูลในโดเมนของจุดในภาพ ดังนั้นภาพที่นำมาใช้จะต้องเป็นภาพก่อนการแปลงโดเมนหรือพิกัดใดๆ นั่นคือเป็นภาพอินพุททั้งสองภาพ

Best-first Search ได้นำเอาข้อดีของการค้นหาแบบลึกก่อน (Depth First Search) และการค้นหาแบบกว้างก่อน (Breadth First Search) มารวมกันเป็นวิธีการเดียว โดยในแต่ละขั้นตอนของการค้นหาจะเลือกเอาโหนดที่ดีที่สุดด้วยการคำนวณค่าฮิวริสติกฟังก์ชัน ผลที่ได้จะเป็นคะแนนของแต่ละโหนดลูก และการที่จะเลือกเส้นทางในการค้นหาต่อไปขึ้นอยู่กับนโยบายของปัญหาที่ต้องการแก้ไข ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ดังที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 3 เป็นค่าฮิวริสติกฟังก์ชัน ซึ่งค่า RMSE เป็นค่าที่วัดความแตกต่างของความเข้มแสงระหว่างภาพ คู่ภาพใดที่คำนวณแล้วได้ค่า RMSE ออกมาน้อย หมายความว่าคู่ภาพมีความคล้ายคลึงหรือใกล้เคียงกันมาก ในทางกลับกันหากคู่ภาพใด เมื่อคำนวณแล้วได้ค่า RMSE มาก นั่นหมายความว่าคู่ภาพนั้นมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งการทำ Image Registration นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการจัดเรียงและประกอบภาพย่อยทั้งสองให้บริเวณที่ซ้อนทับกันดูกลมกลืนเป็นภาพเดียวกัน ดังนั้นการทำ Image Registration ที่ดีจึงต้องการให้เมื่อคำนวณค่า RMSE ในบริเวณที่ซ้อนทับกันแล้วได้ค่า RMSE ออกมาน้อยที่สุด กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ค่าการเปลี่ยนแปลงใดที่เมื่อทดลองจัดเรียงและประกอบภาพแล้วได้ค่า RMSE ออกมาน้อยที่สุด ค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นจะเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงที่ดีที่สุดหรือมีความใกล้เคียงกับค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงที่สุด

จากขั้นตอนของ Candidate Angles จะได้มุมการหมุนที่มีความเป็นได้ว่าจะเป็นมุมการหมุนที่ถูกต้องออกมาทั้งสิ้น 20 มุม มุมการหมุนเหล่านี้จะนำไปหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง แล้วทดลองทำการจัดเรียงและประกอบภาพ เพื่อคำนวณค่า RMSE ออกมา มุมการหมุนใดที่ให้ค่า RMSE น้อยที่สุด หมายความว่า มุมการหมุนเป็นมุมการหมุนที่ทำให้การทดลองจัดเรียงและประกอบภาพดูกลมกลืนเป็นภาพเดียวกันมากที่สุดในบรรดามุมการหมุนทั้งหมดที่พิจารณา มุมการหมุนจึงถูกเลือกให้เป็นโหนดเริ่มต้น หรือ Start Node ของ Best-first Search จากนั้นจะทำการค้นหาในโหนดข้างเคียงแล้วเลือกไปในทิศทางที่มีค่า RMSE น้อยกว่า ทำเช่นนี้เรื่อยไปและจะหยุดเมื่อโหนดถัดไปมีค่า RMSE มากกว่าโหนดปัจจุบันที่กำลังพิจารณา โหนดปัจจุบันที่กำลังพิจารณาจะเป็นคำตอบของการค้นหา



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างขั้นตอนของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน

รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างของการนำเทคนิคการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนมาใช้ในงานวิจัยนี้ และมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างโหนดเริ่มต้นด้วยค่ามุมการหมุนที่ได้จาก Candidate Angles ที่ให้ค่า RMSE น้อยที่สุด ในภาพคือโหนดที่ 22

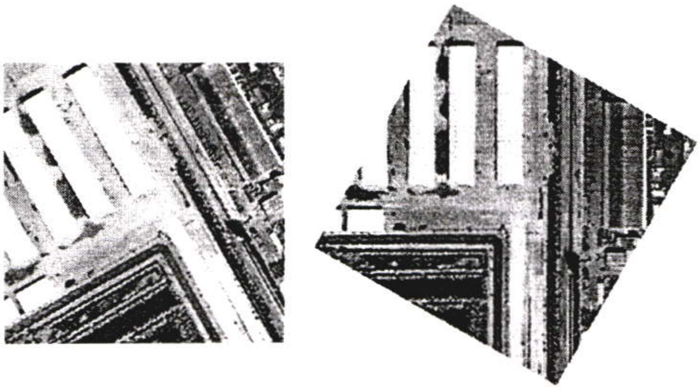
ขั้นตอน 2 สร้างโหนดลูกซ้ายขวา คือ โหนด 21 และ 23 แล้วตรวจสอบโหนดทั้งสาม ด้วยค่า RMSE ได้ผลคะแนนออกมาเป็น 0.4733, 0.4652 และ 0.4795 ตามลำดับ จึงเลือกโหนด 21 เป็นโหนดต่อไปที่เราสนใจ เพราะมีค่า RMSE น้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 สร้างโหนดลูกให้กับโหนด 21 ได้โหนด 20 (สำหรับโหนดทางขวาของโหนด 21 เราจะไม่สนใจเพราะได้พิจารณาไปแล้ว) ตรวจสอบคะแนนมีค่าเป็น 0.4652 และ 0.3027 ตามลำดับ จากนั้นเลือกโหนดที่มีค่าน้อยสุด ซึ่งก็คือโหนด 20

ขั้นตอนที่ 4 สร้างโหนด ลูกให้กับโหนด 20 ได้โหนด 19 (สำหรับโหนดทางขวาของโหนด 20 เราจะไม่สนใจเพราะได้พิจารณาไปแล้ว) ตรวจสอบคะแนนได้ 0.3027 และ 0.3412 ต ามลำ าดับ จากนั้นเลือกโหนดที่มีค่าน้อยสุด ซึ่งก็คือ 20 จากขั้นตอนนี้จะพบว่าโหนดที่ดีที่สุดคือ โหนด 20 เนื่องจากมีค่า RMSE น้อยที่สุด

4.8 De-rotate Input Image2

จากขั้นตอนของการทำ Best-first Search ผลที่ได้คือมุมการหมุนจำนวน 1 ค่า ซึ่งมุมการหมุนนี้ คือ มุมการหมุนที่ภาพอินพุทที่ 2 หมุนไปจากภาพอินพุทที่ 1 นั่นเอง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าภาพอินพุทที่สองมีการเปลี่ยนแปลงเชิงมุมการหมุนไปจากภาพย่อยที่ 1 จำนวนเท่าใด จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนนี้มีการวัดโดยใช้ภาพอินพุทที่ 1 เป็นภาพอ้างอิง ดังนั้นเพื่อขจัดให้ค่าการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนหมดไป เราต้องทำการหมุนภาพย่อยที่ 2 กลับไปในทิศตรงข้ามกับทิศมุมการหมุนที่หาได้ด้วยค่ามุมเท่ากัน ในงานวิจัยนี้ถือว่าการหมุนภาพเป็นการหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นการหมุนภาพอินพุทที่ 2 กลับจึงเป็นการหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาโดยหมุนเท่ากับมุมการหมุนที่ได้รับจากขั้นตอนการทำ Best-first Search รูปที่ 4.8 จะแสดงตัวอย่างของการหมุนภาพกลับในทิศตามเข็มนาฬิกาจำนวน 30 องศา



(a) (b)

รูป 4.8 ตัวอย่างของการหมุนภาพกลับในทิศตามเข็มนาฬิกา

(a) ภาพตั้งต้น

(b) ภาพหลังจากหมุนภาพตั้งต้น (a) ในทิศตามเข็มนาฬิกาจำนวน 30 องศา

4.9 2D Phase Correlation

หลังจากขั้นตอนการทำ De-rotate Input-Image2 แล้ว จะถือว่าภาพอินพุทที่ 1 และภาพอินพุทที่ 2 เป็นภาพที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนแล้ว ขั้นตอนต่อมาจึงเป็นการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง ซึ่งสามารถใช้เฟสคอลลีเรชั่นแบบสองมิติหาการเปลี่ยนแปลงของการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน x และแนวแกน y ได้

สมการ Phase Correlation ที่ 3.25 และ 3.26 เป็นการหาการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน x และ y หรือหาการเปลี่ยนแปลงใน 2 มิติ สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ว่า

$$(\Delta x, \Delta y) = \arg\max_{(x,y)} \left\{ F^{-1}\left(\frac{F(I_2(x,y))}{F(I_1(x,y))} \right) \right\} \tag{4.2}$$

โดย $(\Delta x, \Delta y)$ คือ การเปลี่ยนแปลงของการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน x และ y

F เป็นการทำ Fourier Transform แบบ 2 มิติ

F^{-1} เป็นการทำ Inverse Fourier Transform แบบ 2 มิติ

$I_1(x,y)$ และ $I_2(x,y)$ คือภาพตั้งต้นทั้งสอง

จากสมการที่ 4.2 เริ่มต้นจากการนำภาพตั้งต้นทั้งสองมาทำการแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่ด้วย Fast Fourier Transform จากนั้นจะนำมาหารกันแบบจุดต่อจุด โดยใช้การคำนวณตามสมการที่ 3.26 แล้วเก็บค่าไว้ในอาร์เรย์ ค่าในตารางอาร์เรย์เหล่านี้คือค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างภาพนั่นเอง แต่การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ยังอยู่ในโดเมนความถี่จึงต้องทำการแปลงกลับให้มาอยู่ในโดเมน

ของจุดในภาพด้วยการทำ Inverse Fourier Transform จากนั้นจะเลือกตำแหน่ง (x, y) ที่ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุด ซึ่งจะเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน x และ y หรือ $(\Delta x, \Delta y)$ นั่นเอง

4.10 Registering Image

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะได้ Output Image ซึ่งเป็นภาพรวมใหม่ที่เกิดจากการนำภาพอินพุททั้งสองมาทำ Image Registration โดยจะต้องทำการรวมภาพอินพุททั้งสองที่ขจัดการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนเรียบร้อยแล้วด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่หามาได้จากขั้นตอน 2D Phase Correlation

จากคุณสมบัติของ Fourier Transform ค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการ 4.2 อาจเป็นไปได้ทั้งค่าลบและค่าบวก ดังนั้นจึงมีค่าที่เป็นไปได้ทั้งสิ้น 4 กรณี คือ กรณีที่เป็นบวกทั้งคู่ กรณีที่ตัวใดตัวหนึ่งเป็นลบ และกรณีที่เป็นลบทั้งคู่ ซึ่งในกรณีที่ค่าเป็นบวกสามารถใช้ค่าที่คำนวณได้เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงโดยตรง แต่ในกรณีที่เป็นลบจะต้องนำค่าที่ได้ไปลบออกจากความกว้างของด้านนั้นๆ ดังตารางที่ 4.1 แสดงคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง

ตารางที่ 4.1 แสดงคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง

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

จากตารางที่ 4.1 จะพบว่ามีความเป็นไปได้ของการจัดเรียงและประกอบภาพทั้งสิ้น 4 กรณี เราจึงต้องทดลองทำการจัดเรียงและประกอบภาพด้วยค่า $(\Delta x, \Delta y)$ เหล่านี้ด้วยเทคนิค Geometric Transform ดังที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 3 แล้วทำการคำนวณค่า RMSE ของแต่ละกรณีออกมา กรณีใดที่ให้ค่า RMSE น้อยที่สุด หมายความว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของกรณีนั้นเป็นค่าที่เป็นคำตอบที่เราต้องการ และภาพที่ได้จากการทำ Geometric Transform ด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นก็คือผลลัพธ์ที่ได้จากการนำภาพอินพุททั้งสองมาทำ Image Registration ด้วยวิธีการที่นำเสนอนั่นเอง

บทที่ 5
การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองของการทำ Image Registration ด้วยเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟ เฟสคอลลีเรชั่น และการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Li Zhongke และคณะ ที่ทำการวิจัยเรื่อง Image Registration โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟและเฟสคอลลีเรชั่น และเปรียบเทียบกับการทำ Image Registration ที่ใช้เทคนิคการค้นหาแบบพิจารณาทุกค่าโดยวัดผลในเรื่องของความถูกต้องและเวลาที่ใช้ประมวลผล

5.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการทำ Image Registration โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟ เฟสคอลลีเรชั่น และการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน ซึ่งเป็นการรวมเทคนิคที่ทำงานบนโดเมนความถี่ และโดเมนของจุดในภาพเข้าด้วยกันเพื่อรวมข้อดีของการทำงานบนโดเมนทั้งสองเข้าด้วยกัน

การเปรียบเทียบผลการทดลองในเรื่องของความถูกต้องของผลลัพธ์และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลจึงได้เลือกงานวิจัยของ Li Zhongke และคณะ ที่ทำการวิจัยเรื่อง Image Registration โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟและเฟสคอลลีเรชั่น ซึ่งเทคนิคเหล่านี้เป็นเทคนิคที่ทำบนโดเมนความถี่ และเปรียบเทียบกับการทำ Image Registration ที่ใช้เทคนิคการค้นหาพิจารณาทุกค่า ซึ่งเป็นการทำงานกับโดเมนของจุดในภาพ

งานวิจัยเรื่อง Image Registration โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟและเฟสคอลลีเรชั่น ข้อดีที่ได้รับ คือเรื่องของความเร็วในการประมวลผล และเมื่อทำการทดลองกับภาพในหลากหลายลักษณะและขนาด พบว่าสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของการเลื่อนตำแหน่งได้ถูกต้องไม่ว่าภาพจะมีลักษณะและขนาดเช่นไร ทั้งนี้ไม่รวมถึงกรณีที่ภาพมีการเลื่อนตำแหน่งไปเป็นระยะทางมากเกินกว่าเทคนิคเฟสคอลลีเรชั่นจะรองรับได้ โดยภาพที่มีขนาดใหญ่ เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่ต้องซ้อนทับกันมีจำนวนลดลง หมายความว่าสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงได้มากกว่าภาพขนาดเล็ก ซึ่งเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเลื่อนตำแหน่งได้จะแสดงไว้ในภาคผนวก ก. อย่างไรก็ตามสำหรับการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของภาพ พบว่าเมื่อภาพยิ่งมีขนาดเล็กและมีรายละเอียดในภาพมาก มุมการหมุนที่หาได้มีความผิดเพี้ยนไปจากความจริงมากพอควร ทำให้ไม่สามารถจัดเรียงและประกอบได้อย่างกลมกลืนจึงเป็นข้อด้อยในงานวิจัยนี้ ดังนั้นงานวิจัยที่นำเสนอนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงผลของค่ามุมการหมุนที่ได้รับเป็นหลัก โดย

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงเทคนิค 1D Phase Correlation และเพิ่มเติมเทคนิคของ Candidate Angles และ Best First Search ซึ่งได้ทำการอธิบายรายละเอียดไปในบทที่ 4 และสำหรับการทำงานในโดเมนของจุดในภาพได้เลือกการค้นหาแบบพิจารณาทุกค่า (Full Search) ซึ่งเป็นการตรวจสอบทุกค่ามุมเพื่อหาค่ามุมการหมุนที่ดีที่สุด มาเปรียบเทียบด้วย ซึ่งการทำงานบนโดเมนของจุดในภาพนั้น จะได้รับข้อดีในเรื่องของความถูกต้อง เพราะเป็นการทำงานโดยตรงกับภาพ

5.2 ภาพที่ใช้สำหรับการทดลอง

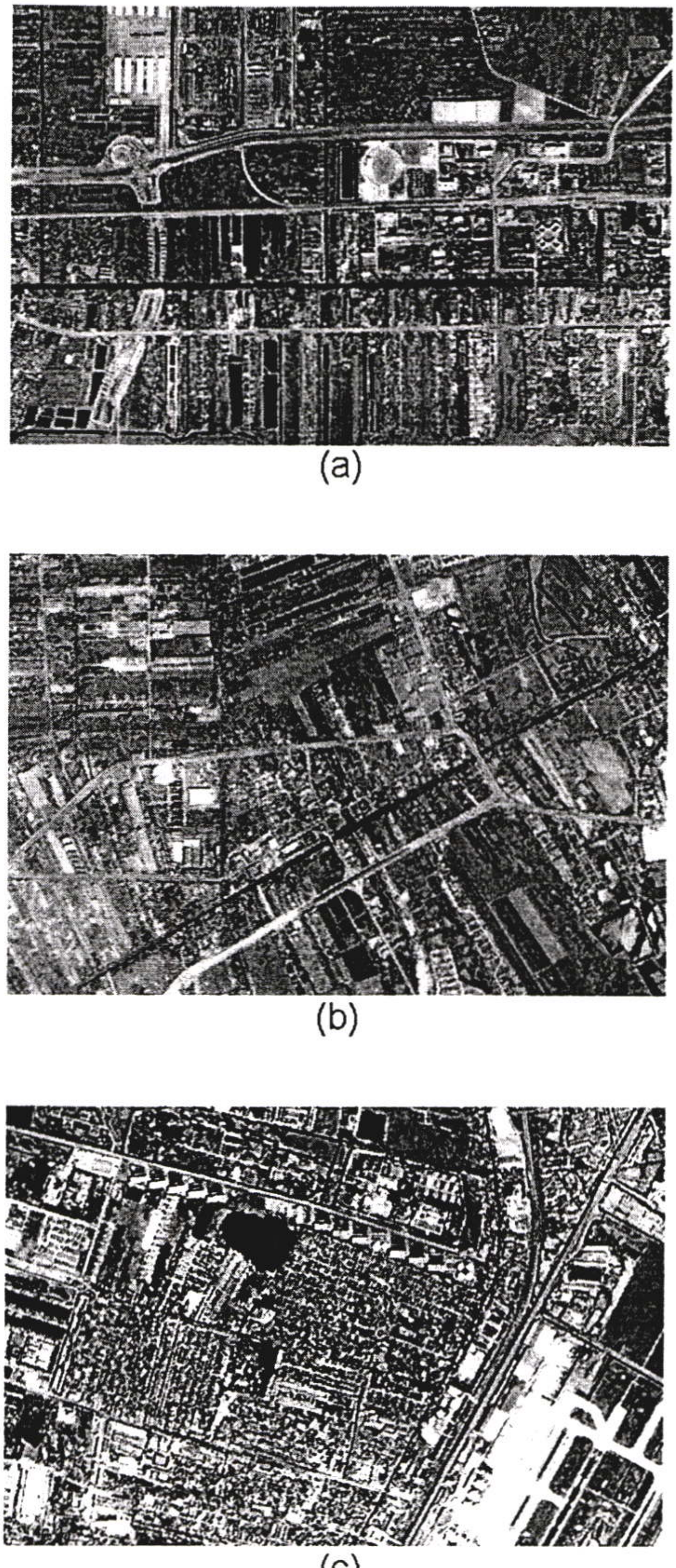
การทดลองทำ Image Registration นี้ ได้ทำการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนระหว่างภาพ โดยได้มีการรวบรวมภาพที่ใช้ในการทดลองจากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง เขตมีนบุรี และเขตดอนเมือง ภาพทั้งหมดมีขนาด 1876x1251 พิกเซล ซึ่งภาพต้นฉบับนี้แสดงได้ในรูปที่ 5.1

ภาพต้นฉบับแต่ละภาพได้มีการเลือกบางส่วนมาใช้ โดยแบ่งภาพที่เลือกออกเป็น 4 ลักษณะ คือ

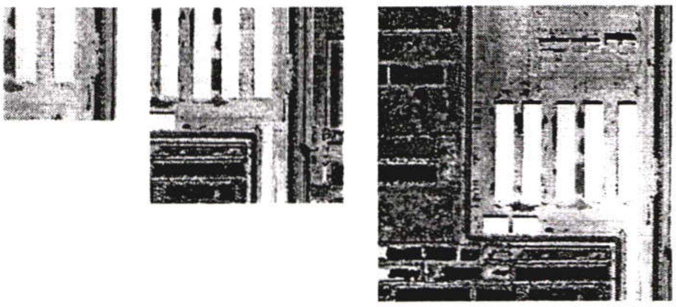
1. Line คือภาพที่มีเส้นตรงในภาพชัดเจนและมีรายละเอียดในภาพน้อย
2. Mixline คือภาพที่มีเส้นตรงในภาพชัดเจนและมีรายละเอียดในภาพปานกลาง
3. Moreline คือภาพที่มีเส้นตรงในภาพและมีรายละเอียดในภาพมาก
4. Multiline คือภาพที่มีเส้นตรงในภาพไม่ชัดเจนและมีรายละเอียดในภาพมาก

ในภาพแต่ละลักษณะได้มีการเก็บรวบรวมไว้ทั้งสิ้น 3 ขนาด คือ 100x100 พิกเซล, 200x200 พิกเซล และ 300x300 พิกเซล ดังแสดงในรูปที่ 5.2, 5.3, 5.4

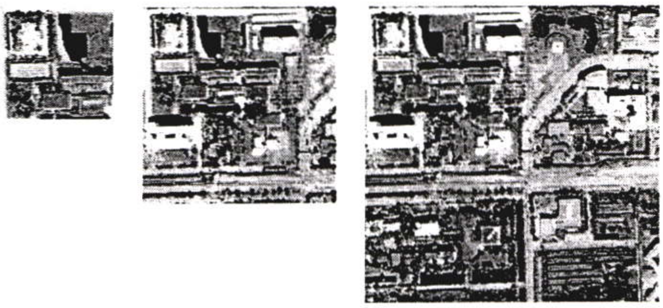
ภาพทั้งหมดจะถูกหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาทีละ 30 องศา ดังนั้นมุมการหมุนทั้งหมดที่พิจารณา ได้แก่ 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300 และ 330 องศา



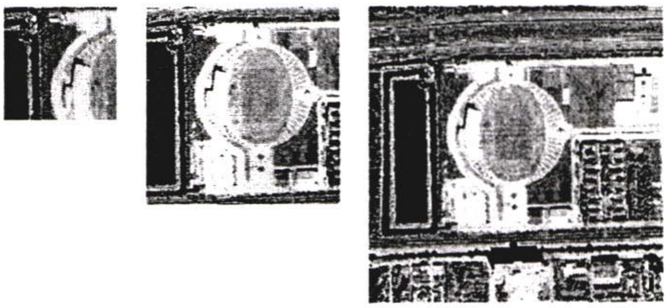
รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายดาวเทียมต้นฉบับที่ใช้ในการทดลอง (a) ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตลาดกระบัง (b) ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตมีนบุรี (c) ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตดอนเมือง



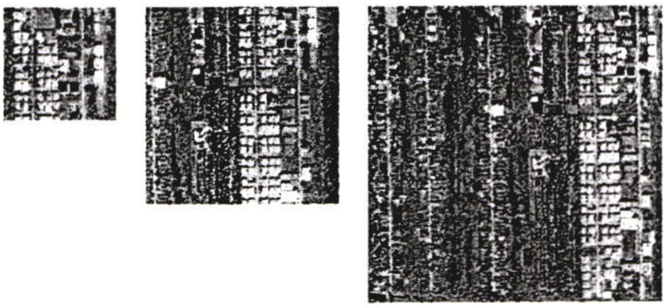
(a) ภาพ Line ขนาด 100x100, 200x200 และ 300x300 พิกเซล ตามลำดับ



(b) ภาพ Mixline ขนาด 100x100, 200x200 และ 300x300 พิกเซล ตามลำดับ

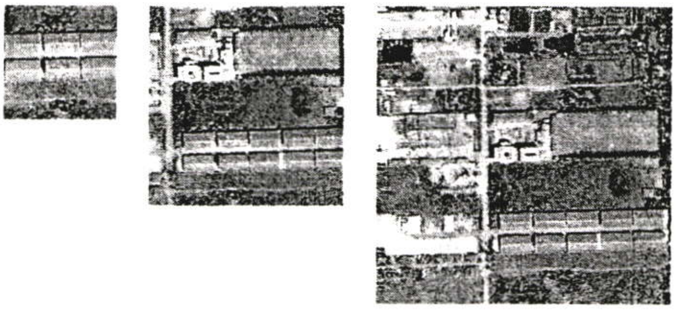


(c) ภาพ Moreline 100x100 pixels, 200x200 pixels และ 300x300 pixels ตามลำดับ

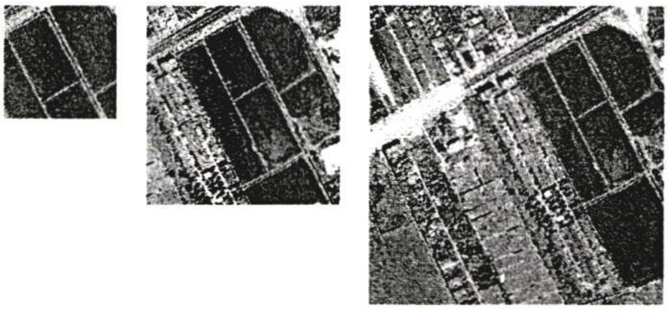


(d) ภาพ Multiline 100x100 pixels, 200x200 pixels และ 300x300 pixels ตามลำดับ

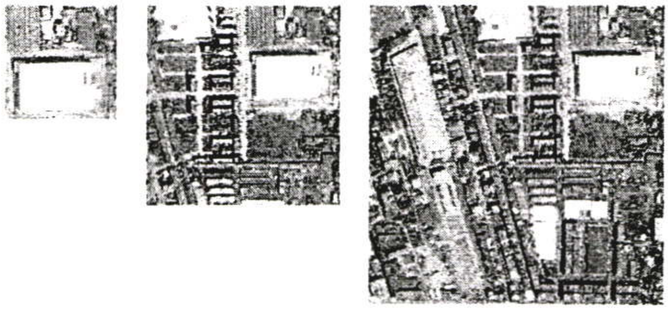
รูปที่ 5.2 ภาพที่ใช้ในการทดลองซึ่งได้จากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง แบ่งออกเป็นลักษณะและขนาดต่างๆกัน



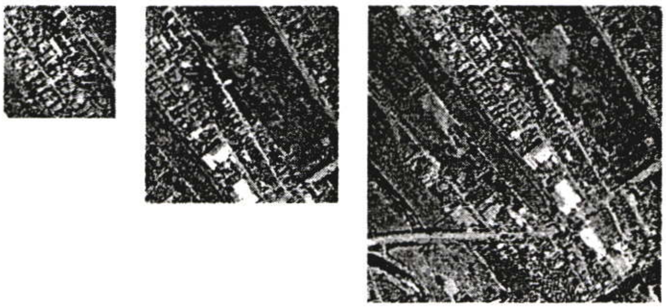
(a) ภาพ Line ขนาด 100x100, 200x200 และ 300x300 พิกเซล ตามลำดับ



(b) ภาพ Mixline ขนาด 100x100, 200x200 และ 300x300 พิกเซล ตามลำดับ



(c) ภาพ Moreline 100x100 pixels, 200x200 pixels และ 300x300 pixels ตามลำดับ

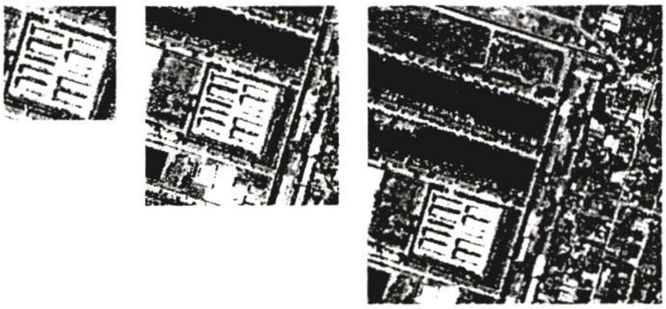


(d) ภาพ Multiline 100x100 pixels, 200x200 pixels และ 300x300 pixels ตามลำดับ

รูปที่ 5.3 ภาพที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตมีนบุรี แบ่งออกเป็นลักษณะและขนาดต่างๆ

(a) ภาพ Line ขนาด 100x100, 200x200 และ 300x300 พิกเซล ตามลำดับ

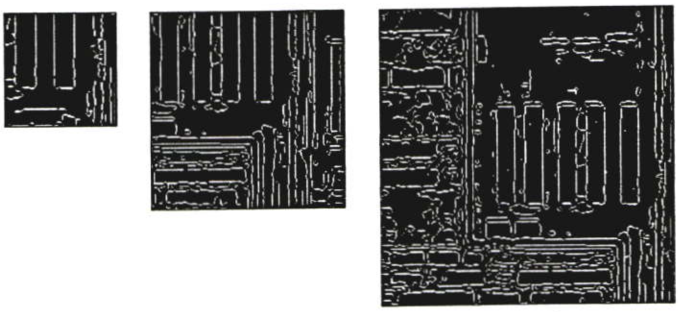
(b) ภาพ Mixline ขนาด 100x100, 200x200 และ 300x300 พิกเซล ตามลำดับ



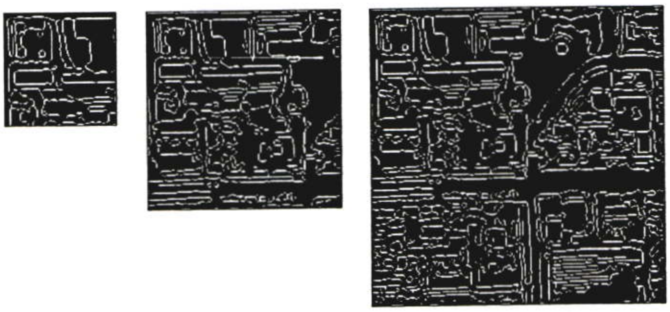
(c) ภาพ Moreline 100x100 pixels, 200x200 pixels และ 300x300 pixels ตามลำดับ

(d) ภาพ Multiline 100x100 pixels, 200x200 pixels และ 300x300 pixels ตามลำดับ

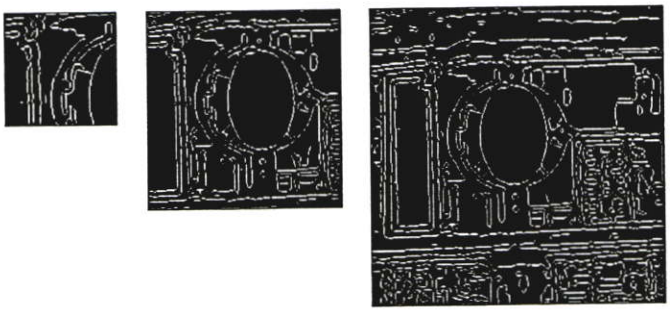
รูปที่ 5.4 ภาพที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตดอนเมือง แบ่งออกเป็นลักษณะและขนาดต่างๆ



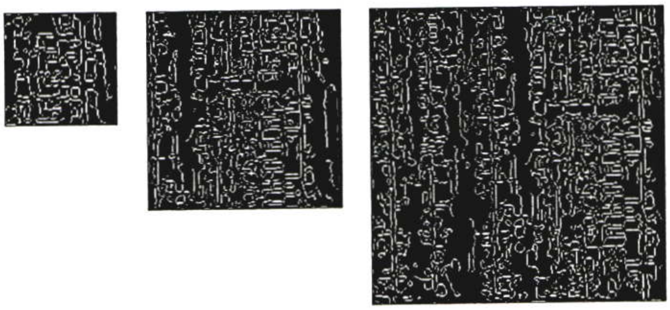
(a) ภาพ Line ขนาด 100x100, 200x200 และ 300x300 พิกเซล ตามลำดับ



(b) ภาพ Mixline ขนาด 100x100, 200x200 และ 300x300 พิกเซล ตามลำดับ

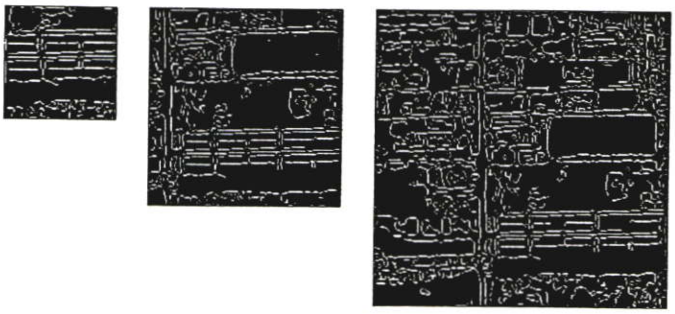


(c) ภาพ Moreline 100x100 pixels, 200x200 pixels และ 300x300 pixels ตามลำดับ

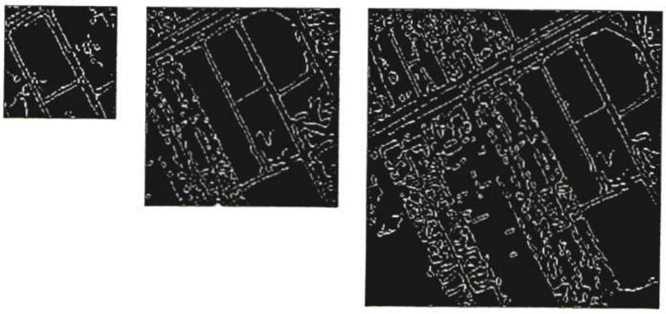


(d) ภาพ Multiline 100x100 pixels, 200x200 pixels และ 300x300 pixels ตามลำดับ

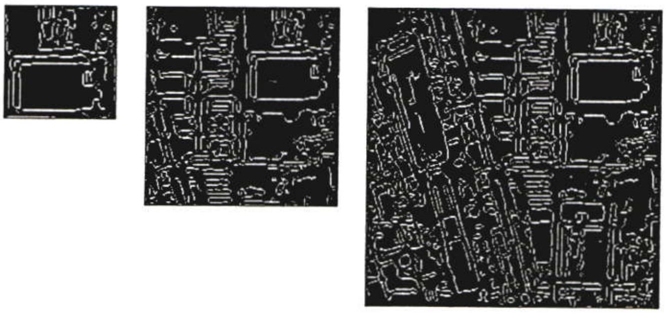
รูปที่ 5.5 ภาพที่ใช้ในการทดลองหลังจากทำการหาเส้นขอบแล้วซึ่งได้จากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง แบ่งออกเป็นลักษณะและขนาดต่างๆกัน



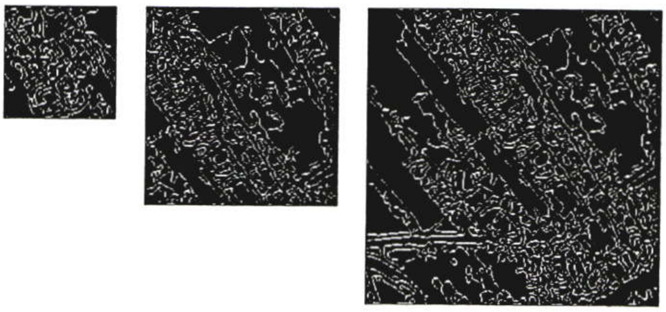
(a) ภาพ Line ขนาด 100x100, 200x200 และ 300x300 พิกเซล ตามลำดับ



(b) ภาพ Mixline ขนาด 100x100, 200x200 และ 300x300 พิกเซล ตามลำดับ

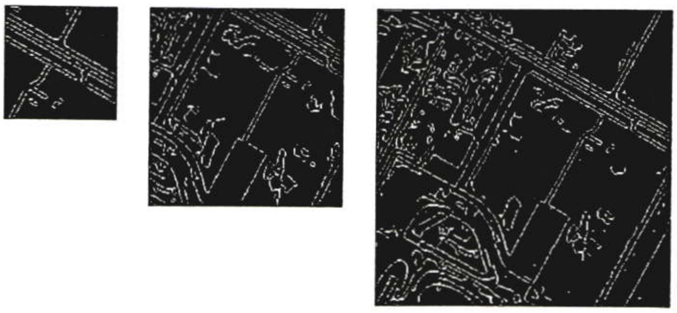


(c) ภาพ Moreline 100x100 pixels, 200x200 pixels และ 300x300 pixels ตามลำดับ

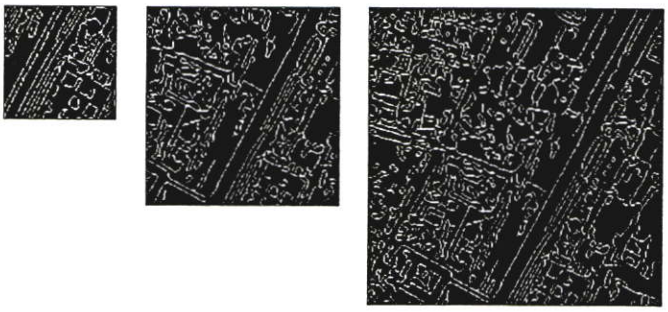


(d) ภาพ Multiline 100x100 pixels, 200x200 pixels และ 300x300 pixels ตามลำดับ

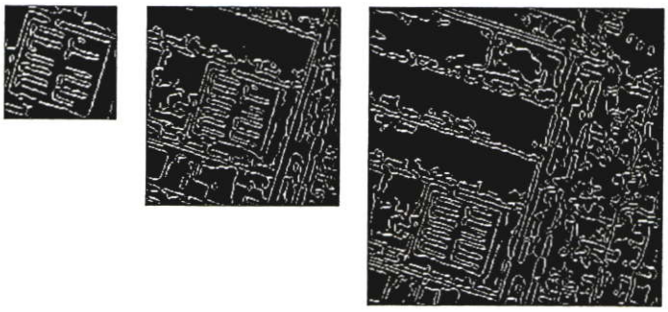
รูปที่ 5.6 ภาพที่ใช้ในการทดลองหลังจากทำการหาเส้นขอบแล้ว ซึ่งได้จากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตมีนบุรี แบ่งออกเป็นลักษณะและขนาดต่างๆ



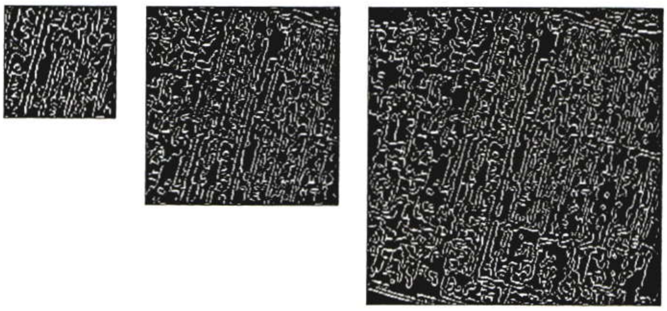
(a) ภาพ Line ขนาด 100x100, 200x200 และ 300x300 พิกเซล ตามลำดับ



(b) ภาพ Mixline ขนาด 100x100, 200x200 และ 300x300 พิกเซล ตามลำดับ



(c) ภาพ Moreline 100x100 pixels, 200x200 pixels และ 300x300 pixels ตามลำดับ



(d) ภาพ Multiline 100x100 pixels, 200x200 pixels และ 300x300 pixels ตามลำดับ

รูปที่ 5.7 ภาพที่ใช้ในการทดลองหลังจากทำการหาเส้นขอบแล้ว ซึ่งได้จากภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตดอนเมืองแบ่งออกเป็นลักษณะและขนาดต่างๆ

5.3 การวัดผลการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการวัดผลการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย เป็นการให้คะแนนความถูกต้องของแต่ละวิธีการที่ใช้หาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ ซึ่งมุมที่พิจารณามีทั้งสิ้น 12 มุม ดังนั้นการวัดความถูกต้องจึงคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของความถูกต้องทั้งหมด โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\%correct = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{N} \times 100 \qquad (5.1)$$

X_i เป็นคะแนนความถูกต้องของมุม i โดยมีค่าเท่ากับ 1 ถ้ามุมที่หาได้ถูกต้องตามมุมการหมุนจริง และเป็น 0 เมื่อมุมที่หาได้ผิดไปจากมุมการหมุนจริง

N เท่ากับมุมการหมุนทั้งหมดที่พิจารณา ซึ่งในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 12

2. เวลาที่ใช้ประมวลผล จะเริ่มนับจากเริ่มต้นประมวลผลไปจนสิ้นสุดกระบวนการและได้ค่ามุมการหมุนออกมา เวลาที่ใช้ประมวลผลมีหน่วยเป็นวินาที

3. ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย ได้จากการนำค่าความแตกต่างระหว่างมุมการหมุนจริงและมุมการหมุนที่หาได้หารด้วยมุมการหมุนทั้งหมดที่พิจารณา

5.4 การทดลองและผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองการหาการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนระหว่างภาพโดยใช้ภาพตั้งต้นหลากหลายลักษณะและขนาดซึ่งได้มาจากภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณเขตลาดกระบัง เขตมีนบุรีและเขตดอนเมือง ค่าที่ได้ของทั้งสามบริเวณจะถูกนำไปหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของภาพลักษณะและขนาดนั้นๆ สำหรับค่าต่างๆที่ได้จากแต่ละบริเวณจะได้แสดงรายละเอียดไว้ในส่วนของภาคผนวกต่อไป

การทดลองทั้งหมดได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

5.4.1 การทดลองเพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสม

5.4.2 การทดลองเพื่อพิจารณาความสำคัญของมุมการหมุนที่เกี่ยวข้อง

5.4.3 การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดที่แตกต่างกัน

5.4.4 การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอ

5.4.5 การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอ

5.4.1 การทดลองเพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงเทคนิค 1D Phase Correlation เพิ่มเติมจากงานวิจัยของ Li Zhongke และคณะ โดยได้ทำการพิจารณามุมการหมุนที่ได้จากอาร์เรย์การเปลี่ยนแปลงที่มีค่าสูงสุดในลำดับรองๆ ลงไปด้วยเพื่อเพิ่มความถูกต้องของการหามุมการหมุนระหว่างภาพ ซึ่งมุมการหมุนที่ได้รับจากขั้นตอนนี้จะเป็นมุมการหมุนเริ่มต้นและถูกนำไปใช้ในขั้นตอนการหามุมการหมุนด้วยวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนเป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้ได้มุมการหมุนที่ถูกต้องที่สุดออกมา ดังนั้นกล่าวได้ว่า มุมการหมุนเริ่มต้นนี้มีความสำคัญต่อความถูกต้องที่ได้รับเนื่องจากเป็นตัวชี้นำอย่างคร่าวๆ ถึงมุมการหมุนที่น่าจะเป็นมุมการหมุนที่ถูกต้องให้แก่วิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน ทำให้ไม่ต้องทำการค้นหาในทุกมุมการหมุนอย่างวิธีการค้นหาแบบพิจารณาทุกค่า

จำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสม คือ มุมการหมุนเริ่มต้นที่มีจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจาก เมื่อมุมการหมุนเริ่มต้นที่ต้องพิจารณามีจำนวนเพิ่มมากขึ้น เวลาที่ใช้ในการประมวลผลก็มากขึ้นตามไปด้วย แต่มุมการหมุนที่น่าจะเป็นมุมการหมุนที่ถูกต้องก็จะได้รับการพิจารณามากขึ้นด้วย ทำให้ช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยให้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นการหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสมจึงเป็นการหาความสมดุลระหว่างเวลาที่ต้องเสียไปเพื่อการประมวลผลและความถูกต้องของมุมการหมุนที่ได้รับ

การพิจารณาค่าจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสมสามารถยกตัวอย่างได้จากตารางที่ 5.1 และ 5.2 ซึ่งเห็นได้ว่า ในการหาค่ามุมการหมุนของภาพ Mixline ขนาด 100x100 พิกเซล เมื่อจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเท่ากับ 3 (N = 3) ความถูกต้องเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 86.11 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเท่ากับ 4 (N = 4) ความถูกต้องเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 97.22 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 5 ขึ้นไป ความถูกต้องเฉลี่ยที่ได้รับมีค่าเท่ากับ 100.00 เปอร์เซ็นต์ และเวลาที่ใช้ประมวลผลเมื่อจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเท่ากับ 3 มีค่าเท่ากับ 21.85 วินาที และมีค่าเท่ากับ 24.49, 28.47, 37.62 และ 41.04 วินาที เมื่อจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในกรณีของภาพ Mixline ขนาด 100x100 พิกเซล จำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นควรเลือกที่ N = 5 เนื่องจากมุมการหมุนเริ่มต้นที่มีจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ขณะที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงที่สุดคือ 100.00 เปอร์เซ็นต์ หากเลือก N=6 ขึ้นไป เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องยังคงมีค่าเท่ากับ 100.00 เปอร์เซ็นต์ แต่เวลาที่ต้องเสียไปในการประมวลผลมีค่ามากขึ้น ทำให้เสียเวลาไปโดยเปล่าประโยชน์

ตารางที่ 5.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search (%)						
		N = 3	N = 4	N = 5	N = 6	N = 7
100X100	Line	100	100.00	100.00	100.00	100.00
	Mixline	86.11	97.22	100.00	100.00	100.00
	Moreline	97.22	97.22	100.00	100.00	100.00
	multiline	55.55	69.44	69.44	72.22	75.00
200X200	Line	94.44	100.00	100.00	100.00	100.00
	Mixline	83.33	97.22	100.00	100.00	100.00
	Moreline	88.89	94.44	100.00	100.00	100.00
	multiline	61.11	72.22	80.56	86.11	94.44
300X300	Line	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	Mixline	88.89	97.22	100.00	100.00	100.00
	Moreline	83.33	91.67	100.00	100.00	100.00
	multiline	61.11	75.00	88.89	94.44	94.44

ตารางที่ 5.2 แสดงเวลาประมวลผลโดยเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search (วินาที)						
		N=3	N=4	N=5	N=6	N=7
100X100	Line	18.40	21.81	24.50	31.57	32.85
	Moreline	20.51	23.66	28.88	31.03	38.38
	Mixline	21.85	24.49	28.47	37.62	41.04
	multiline	16.88	21.73	25.88	30.12	32.54
200X200	Line	41.97	58.38	64.83	76.70	91.88
	Moreline	45.29	57.58	69.81	85.90	92.72
	Mixline	48.16	59.95	66.92	83.28	88.88
	multiline	36.33	43.67	55.11	65.38	76.29
300X300	Line	91.36	113.46	131.81	161.70	199.12
	Moreline	85.83	111.13	131.73	176.39	218.20
	Mixline	76.16	96.92	117.95	140.89	167.66
	multiline	73.90	97.44	121.11	137.16	166.09

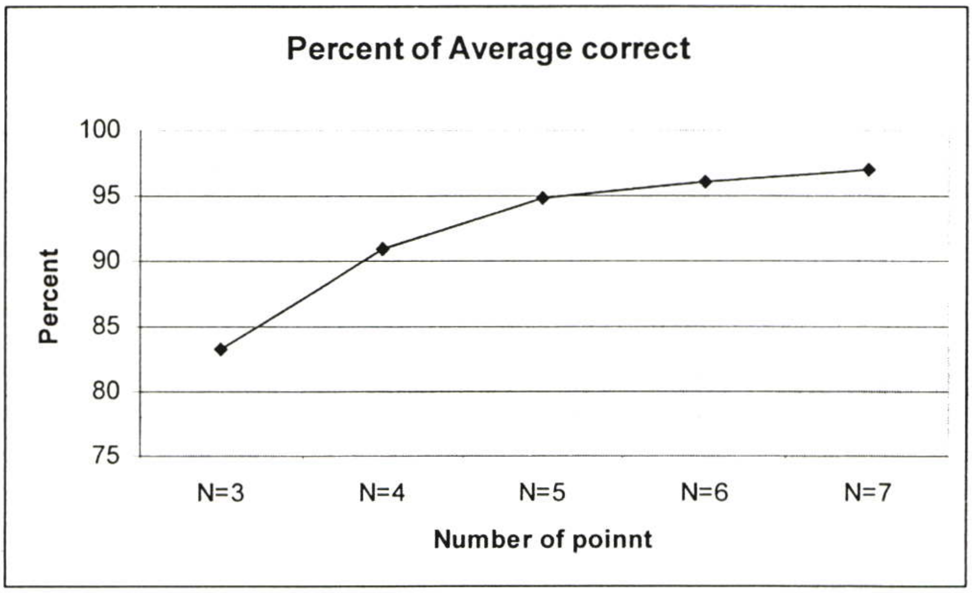
จากตารางที่ 5.1 และ 5.2 สามารถหาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องและเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพในทุกๆ ลักษณะและขนาด เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุมแสดงได้ดังตารางที่ 5.3

การหาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องและเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพในทุกๆ ลักษณะและขนาด เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม เพื่อที่จะทำการพิจารณาเลือกจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเพียงจำนวนเดียวเป็นตัวแทนของจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นสำหรับภาพในแต่ละลักษณะและขนาด และจะใช้จำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นนี้ในการทดลองหัวข้ออื่นๆ ต่อไป เนื่องจากถือว่า จำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นนี้เป็นจำนวนมุมการหมุนที่เหมาะสมสำหรับภาพทุกๆ ลักษณะและขนาด

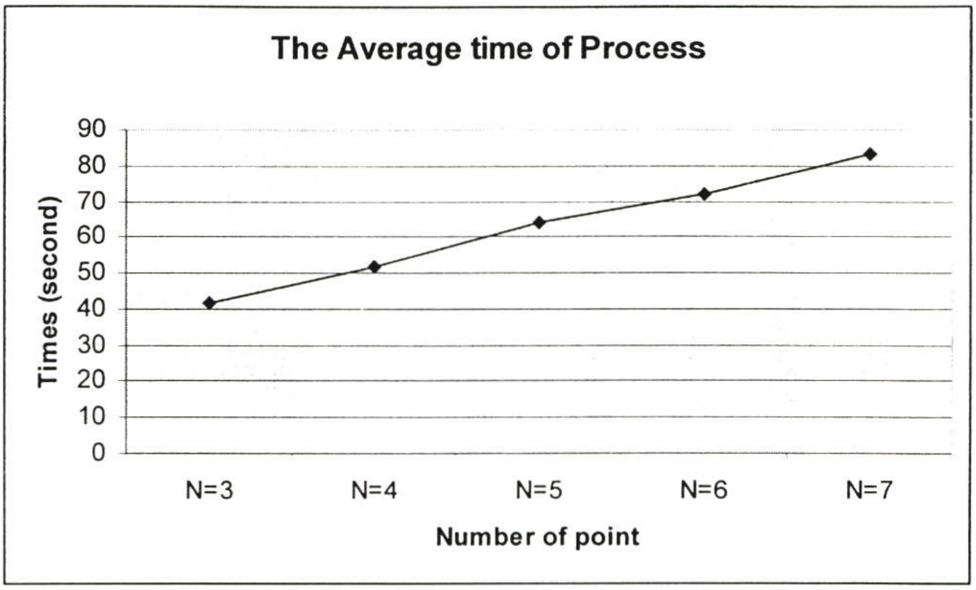
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องและเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพในทุกๆ ลักษณะและขนาด เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม

	Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search				
	N=3	N=4	N=5	N=6	N=7
Average of correct (percent)	83.33	90.97	94.91	96.07	96.99
Average of time(second)	41.83	51.73	64.34	71.94	83.06

จากตารางที่ 5.3 สามารถนำไปสร้างกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่มีต่อค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของภาพ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่มีต่อค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของภาพในทุกๆ ลักษณะและขนาดเมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม



รูป 5.9 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพในทุกๆ ลักษณะและขนาดเมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม

จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 5.8 นั้น จะเห็นได้ว่าในช่วงที่จำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 4 และจาก 4 เป็น 5 นั้น ทำให้ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของภาพเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก และลดลงในช่วงที่จำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 6 และแทบไม่เพิ่มขึ้นเลยเมื่อจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 6 เป็น 7 และเมื่อพิจารณาในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.9 พบว่าเมื่อจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ประมวลผลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันและเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เกือบเป็นกราฟเส้นตรง ดังนั้นมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสมจึงควรมีค่าเท่ากับ 5 เนื่องจากให้ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงและใช้เวลาในการประมวลผลไม่สูงจนเกินไป ซึ่งหากเลือกมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสมเป็น 4 จะทำให้ได้รับค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องไม่มากนัก และหากเลือกมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสมเป็น 6 จะทำให้ได้รับค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าที่ได้รับจากการเลือกมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสมเป็น 5 แต่ใช้เวลาในการประมวลผลที่มากกว่า จึงไม่คุ้มค่ากับเวลาที่เสียไป

5.4.2 การทดลองเพื่อพิจารณาความสำคัญของมุมการหมุนที่เกี่ยวข้อง

มุมการหมุนที่เกี่ยวข้องกับมุมการหมุนที่ได้จากขั้นตอน 1D Phase Correlation ในงานวิจัยนี้ หรือเรียกว่ามุม θ ได้แก่มุม $(90+\theta)$,$(180+\theta)$ และ $(270+\theta)$ การทดลองนี้จะพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยและ ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย ของและมุมการหมุนที่เกี่ยวข้อง เพื่อพิจารณาความสำคัญของมุมที่เกี่ยวข้องได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 5.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search (%)					
		θ	$(90+\theta)$	$(180+\theta)$	$(270+\theta)$
100X100	Line	63.89	13.89	50.00	16.67
	Moreline	50.00	19.45	52.78	19.44
	Mixline	44.45	36.11	50.00	27.78
	multiline	41.67	13.89	27.78	22.22
200X200	Line	80.56	25.00	83.33	22.22
	Moreline	75.00	22.22	69.44	16.67
	Mixline	66.67	27.78	61.11	30.56
	multiline	55.55	19.45	47.22	19.45
300X300	Line	100.00	27.78	91.67	30.56
	Moreline	80.56	25.00	77.78	25.00
	Mixline	75.00	27.78	77.78	27.78
	multiline	50.00	19.45	63.89	19.44

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search (degree)					
		θ	$(90+\theta)$	$(180+\theta)$	$(270+\theta)$
100X100	Line	68.25	118.75	78.45	99.86
	Moreline	92.66	107.47	67.97	99.83
	Mixline	99.67	86.19	65.50	102.22
	multiline	86.25	106.67	96.00	94.17
200X200	Line	18.17	102.70	13.56	92.42
	Moreline	38.31	104.14	35.45	122.94
	Mixline	37.22	92.53	64.89	91.34
	multiline	60.64	94.25	86.11	91.70
300X300	Line	0.00	70.83	15.25	99.31
	Moreline	22.45	92.78	29.70	109.17
	Mixline	44.11	92.53	46.75	83.92
	multiline	81.41	95.83	54.61	104.08

จากตารางที่ 5.4 และ 5.5 สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยและค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยในทุกๆลักษณะและขนาดภาพได้ดังตารางที่ 5.6 เพื่อดูแนวโน้มในภาพรวมเรื่องความสำคัญของมุมการหมุนที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ามุม θ และ $(180+\theta)$ ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงและค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำ ซึ่งถือว่าเป็นมุมที่มีความสำคัญต่อการจัดเรียงและประกอบภาพ

ตารางที่ 5.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยและความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในทุกๆลักษณะและขนาดภาพ ที่มุมการหมุนต่างๆที่เกี่ยวข้อง

	θ	$(90+\theta)$	$(180+\theta)$	$(270+\theta)$
Average of correct (percent)	65.28	23.15	62.73	23.15
Average of error (degree)	54.09	97.06	54.52	99.25

5.4.3 การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน

การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองกับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน โดยวัดผลในเรื่องของค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย และเวลาที่ใช้ประมวลผล ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Li Zhongke และคณะ ที่ทำการวิจัยเรื่อง Image Registration โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟ (Hough Transform) และเฟสคอลลีเรชั่น (Phase Correlation) และเปรียบเทียบกับการทำ Image Registration ที่ใช้เทคนิคการค้นหาแบบพิจารณาทุกค่า (Full search) ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.7, 5.8 และ 5.9

ตารางที่ 5.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน (%)

	100x100			200x200			300x300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Line	63.89	100.00	100.00	80.56	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Mixline	44.45	100.00	100.00	72.22	100.00	100.00	80.56	100.00	100.00
Moreline	36.11	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00
Multiline	36.11	69.44	100.00	55.55	80.56	100.00	50.00	88.89	100.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ 5.8 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน (องศา)

	100x100			200x200			300x300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Line	68.39	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mixline	84.72	0.00	0.00	39.14	0.00	0.00	20.81	0.00	0.00
Moreline	104.89	0.00	0.00	37.33	0.00	0.00	44.17	0.00	0.00
Multiline	82.94	36.45	0.00	59.06	20.83	0.00	71.53	20.78	0.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ 5.9 แสดงเวลาที่ใช้ประมวลผลโดยเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน (วินาที)

	100x100			200x200			300x300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Line	16.30	27.59	163.67	28.97	75.99	864.65	46.31	142.42	2460.94
Mixline	15.95	28.80	199.30	27.50	69.49	1014.62	47.31	146.06	2666.29
Moreline	17.15	29.22	178.81	26.19	63.09	1000.77	42.52	135.29	2451.35
Multiline	16.83	28.82	208.01	26.77	62.33	1026.67	44.30	129.01	2542.70

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

จากตารางที่ 5.7 ซึ่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน พบว่าในแง่ของลักษณะภาพ เมื่อภาพมีขนาดเท่ากันและใช้วิธีการเดียวกัน จะเห็นได้ว่าภาพ Line ซึ่งเป็นภาพที่มีเส้นตรงในภาพชัดเจนและมีรายละเอียดในภาพน้อยจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงที่สุด รองลงมาคือภาพ Mixline ซึ่งเป็นภาพที่มีเส้นตรงในภาพชัดเจนและมีรายละเอียดในภาพปานกลาง รองลงไปอีกคือภาพ Moreline ซึ่งเป็นภาพที่มีเส้นตรงในภาพและมีรายละเอียดในภาพมาก และสุดท้ายคือ ภาพ Multiline ซึ่งเป็นภาพที่มีเส้นตรง

ในภาพไม่ชัดเจนและมีรายละเอียดในภาพมาก จะได้รับค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยน้อยที่สุด จะเห็นได้ว่าเส้นตรงในภาพมีผลโดยตรงต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ยิ่งมีเส้นตรงที่ชัดเจนมากและมีรายละเอียดอื่นๆในภาพน้อย ยิ่งให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงมากเท่านั้น และเมื่อพิจารณาในแง่ของขนาดภาพ เมื่อภาพมีลักษณะเหมือนกันและใช้วิธีการเดียวกัน จะเห็นได้ว่า ยิ่งภาพมีขนาดใหญ่ขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยยิ่งเพิ่มสูงขึ้น

สำหรับวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ พบว่าสามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยได้มากกว่างานวิจัยของ Li Zhongke และคณะ และให้ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำ สำหรับภาพในทุกลักษณะและขนาด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อภาพมีเส้นตรงที่ชัดเจนอยู่ในภาพบ้าง เช่นภาพ Line, Mixline และ Moreline ดังตารางที่ 5.7 จะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมีค่าสูงเทียบเท่ากับค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ได้รับจากวิธี Full Search คือ 100 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเลย ดังตารางที่ 5.8 ขณะที่เวลาในการประมวลผลมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวิธี Full Search ซึ่งยิ่งภาพมีขนาดใหญ่ขึ้นเท่าไร เวลาที่ใช้ในการประมวลผลของ Full Search ยิ่งเพิ่มมากขึ้นทวีคูณ ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 5.9

5.4.4 การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอ

การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองนำภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกันไปทำการเพิ่มสัญญาณรบกวนหรือ noise แบบ Gaussian ซึ่งเป็น noise ที่พบได้ทั่วไปในทางปฏิบัติ เข้าไปในภาพเป็นจำนวน 5 เปอร์เซ็นต์ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 15 เปอร์เซ็นต์ และทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยและค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Li Zhongke และคณะ และเปรียบเทียบกับเทคนิคการค้นหาแบบ Full search ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ (%)

		Noise=5%			Noise=10%			Noise=15%		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	58.34	100.00	100.00	41.67	55.56	52.78	27.78	27.78	22.22
	Mixline	33.34	77.78	88.89	19.44	50.00	66.67	16.67	16.67	52.78
	Moreline	44.45	100.00	100.00	30.56	44.44	69.44	22.22	38.89	50.00
	multiline	27.78	61.11	100.00	30.55	52.78	100.00	22.22	19.44	75.00
200 x 200	Line	66.67	100.00	100.00	41.67	61.11	100.00	22.22	33.33	69.44
	Mixline	58.33	80.56	100.00	47.22	61.11	100.00	30.55	47.22	77.78
	Moreline	58.33	97.22	100.00	36.11	72.56	100.00	38.89	50.00	97.22
	multiline	50.00	72.22	100.00	33.33	50.00	97.22	27.78	33.33	88.89
300 x 300	Line	75.00	100.00	97.22	41.67	72.22	100.00	41.67	47.22	91.67
	Mixline	69.44	86.11	100.00	52.78	69.45	100.00	30.55	26.11	97.22
	Moreline	58.34	88.89	100.00	36.11	58.33	97.22	33.33	38.89	100.00
	multiline	41.66	49.45	100.00	38.89	44.44	97.22	33.33	36.11	100

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ 5.11 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและ ขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ (องศา)

		Noise=5%			Noise=10%			Noise=15%		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	68.47	0.00	0.00	98.89	48.69	25.58	116.25	83.36	45.44
	Mixline	101.03	20.78	7.50	116.03	72.06	18.33	159.39	80.45	28.39
	Moreline	82.44	0.00	0.00	107.06	30.56	12.89	115.81	71.86	21.00
	multiline	103.36	59.80	0.00	72.11	51.44	0.00	101.94	84.72	20.08
200 x 200	Line	40.06	0.00	0.00	70.69	51.50	0.00	106.28	69.36	14.00
	Mixline	70.16	30.31	0.00	98.00	63.50	0.00	104.86	77.25	6.47
	Moreline	58.31	0.81	0.00	78.92	37.42	0.00	75.97	49.92	9.97
	multiline	82.78	31.72	0.00	99.30	57.67	5.53	123.47	83.25	5.56
300 x 300	Line	29.08	0.00	0.11	66.36	25.64	0.00	83.14	68.75	17.53
	Mixline	41.67	14.97	0.00	73.78	37.08	0.00	102.08	65.20	4.75
	Moreline	48.61	8.72	0.00	94.64	54.94	4.97	109.75	89.78	0.00
	multiline	79.11	37.94	0.00	99.81	90.58	0.61	116.64	65.33	0.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

จากตารางที่ 5.10 สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยในทุกๆ ลักษณะและขนาดภาพได้ดังตารางที่ 5.12 และจากตารางที่ 5.11 สามารถหาค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยในทุกๆ ลักษณะและขนาดภาพได้ดังตารางที่ 5.13 เพื่อพิจารณาแนวโน้มในภาพรวมเรื่องความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับวิธีการของ Li Zhongke และคณะ ที่ใช้เทคนิค Hough Transform และ Phase Correlation และเปรียบเทียบกับเทคนิคการค้นหาแบบ Full search ซึ่งผลที่ได้ในตารางที่ 5.12 และ 5.13 สามารถสร้างเป็นกราฟเพื่อใช้ในการพิจารณาได้ ดังรูปที่ 5.10 และ 5.11

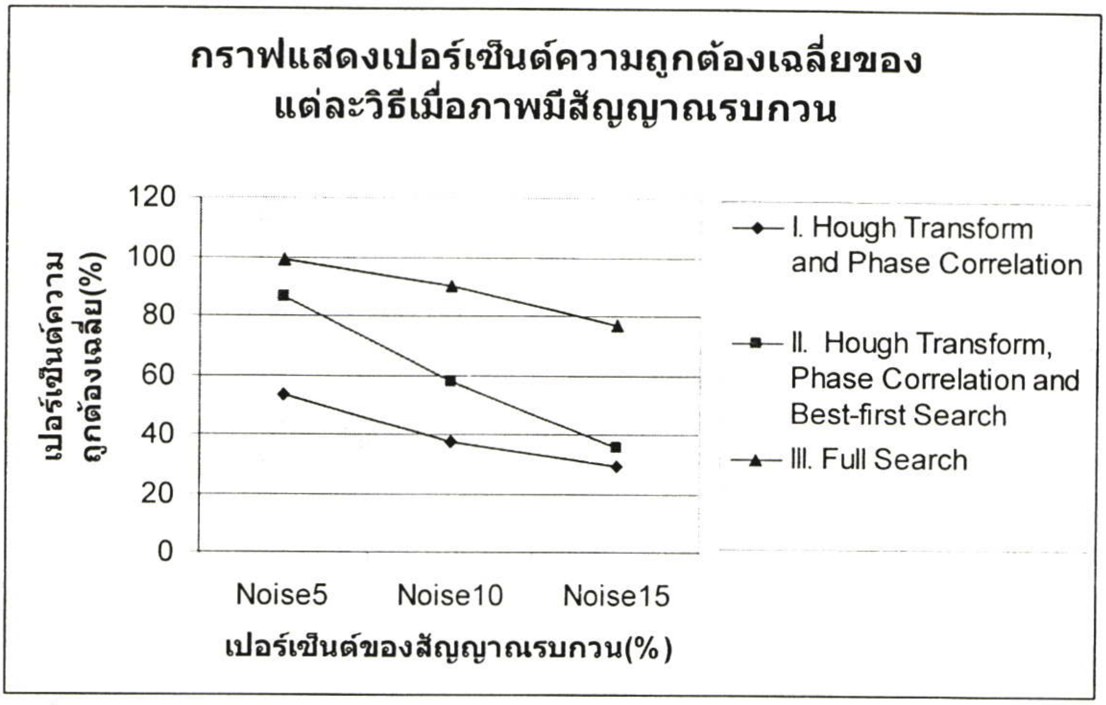
สำหรับเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยเมื่อพิจารณาในแง่ของลักษณะภาพและในแง่ของขนาดภาพ อาจจะไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่ว่า ยิ่งภาพมีเส้นตรงที่ชัดเจนมากและมีรายละเอียดอื่นๆ ในภาพน้อย ยิ่งให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงมากเท่านั้น และในแง่ของขนาดภาพ ยิ่งภาพมีขนาดใหญ่ขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยยิ่งเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เพิ่มเข้าไปในภาพอาจไปรบกวนเส้นตรงในภาพ ทำให้ภาพที่มีเส้นตรงชัดเจนมีการเบลอไป ซึ่งในกรณีนี้ ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยจะมีค่าลดลง หรือในทางกลับกัน สัญญาณรบกวนที่เพิ่มเข้าไปในภาพ อาจทำให้รายละเอียดอื่นๆ ในภาพเลือนไป ทำให้ผลของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นก็เป็นได้

ตารางที่ 5.12 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ

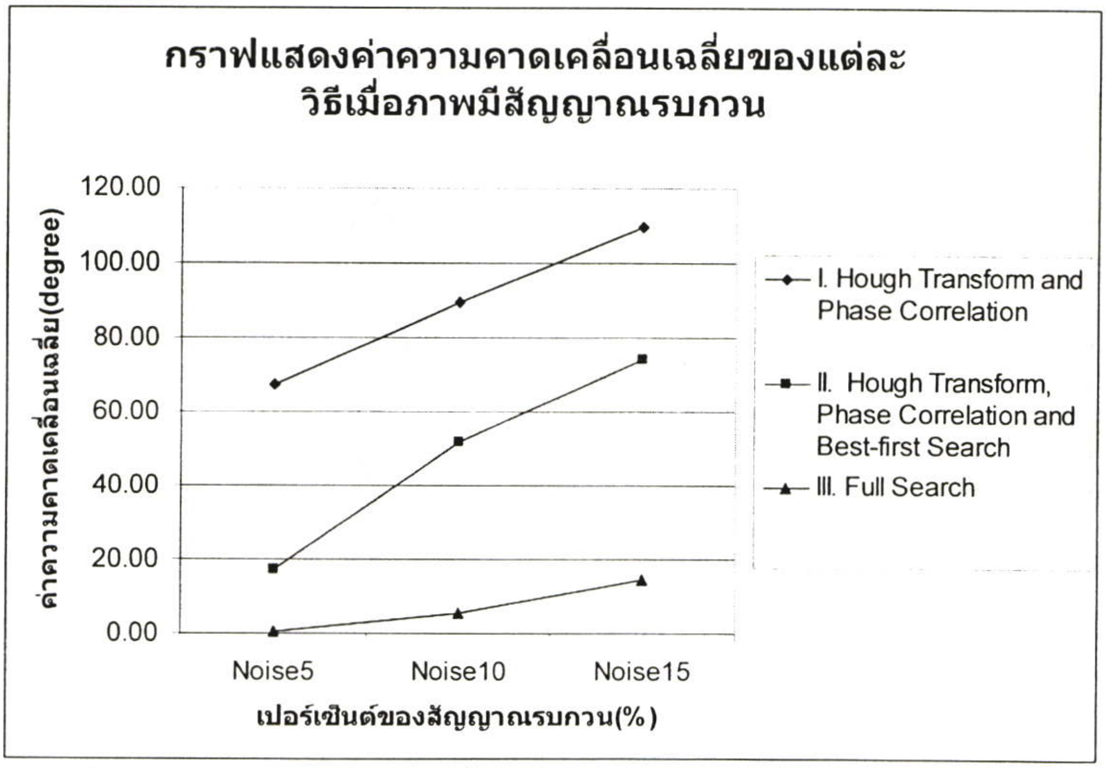
	I. Hough Transform and Phase Correlation	II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search	III. Full Search
Noise5	53.47	86.11	98.84
Noise10	37.5	57.64	90.05
Noise15	28.93	35.42	76.85

ตารางที่ 5.13 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ

	I. Hough Transform and Phase Correlation	II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search	III. Full Search
Noise5	67.09	17.09	0.63
Noise10	89.63	51.76	5.66
Noise15	109.63	74.10	14.43



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อภาพมีสัญญาณรบกวน



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อภาพมีสัญญาณรบกวน

จากกราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ ในรูปที่ 5.10 พบว่า วิธีการที่นำเสนอ คือ Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงกว่าวิธีการ Hough Transform and Phase Correlation ของ Li Zhongke และคณะ แต่มีค่าต่ำกว่าวิธีการ Full Search โดยเมื่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ วิธีการที่นำเสนอสามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยได้ใกล้เคียงกับวิธีการของ Full Search และมีค่าลดลงเมื่อมีสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น และค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอจะมีค่าลดลงจนใกล้เคียงกับวิธีการของ Li Zhongke และคณะ เมื่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์

จากกราฟแสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ ในรูปที่ 5.8 พบว่า วิธีการที่นำเสนอให้ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่าวิธีการของ Li Zhongke และคณะ แต่สูงกว่าวิธีการ Full Search โดยเมื่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ วิธีการที่นำเสนอให้ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยได้ใกล้เคียงกับวิธีการของ Full Search แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ไม่มากนัก ไม่ควรเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสัญญาณรบกวนจะทำให้เส้นตรงที่มีในภาพเลือนไป และเมื่อใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟซึ่งเป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับเส้นตรงในภาพ จะทำให้ค่าที่ได้ผิดเพี้ยนไป ยิ่งมีสัญญาณรบกวนในภาพมาก ยิ่งทำให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอมีค่าลดลงและค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงมากขึ้นเท่านั้น

5.4.5 การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอ

การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองนำภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกันไปทำการปรับความสว่างในภาพทั้งปรับให้มืดลงและสว่างขึ้น โดยทำการปรับทั้งสิ้น 12 ลำดับ คือ -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 แล้วทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยและค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Li Zhongke และคณะ และเปรียบเทียบกับเทคนิคการค้นหาแบบ Full search ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.14 และ 5.15 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.14 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 (%)

		Bright = -10			Bright = -20			Bright= -30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	58.33	100.00	100.00	63.89	100.00	100.00	61.11	100.00	100.00
	Mixline	36.11	97.22	83.33	41.67	97.22	86.11	41.67	94.45	80.56
	Moreline	41.67	100.00	94.44	38.89	97.22	88.89	38.89	97.22	83.33
	multiline	33.33	72.22	72.22	27.78	69.44	69.44	30.55	55.55	55.55
200 x 200	Line	69.44	100.00	100.00	72.22	100.00	100.00	69.44	97.22	97.22
	Mixline	69.45	91.67	88.89	66.67	91.67	88.89	61.11	91.67	88.89
	Moreline	69.44	100.00	100.00	72.22	97.22	94.45	69.45	100.00	97.22
	multiline	52.78	75.00	75.00	52.78	75.00	75.00	52.78	77.78	77.78
300 x 300	Line	94.44	100.00	100.00	94.44	100.00	100.00	94.44	100.00	100.00
	Mixline	77.78	97.22	97.22	80.56	100.00	100.00	80.56	97.22	97.22
	Moreline	72.22	97.22	97.22	69.44	100.00	100.00	72.22	97.22	97.22
	multiline	58.33	88.89	88.89	58.33	88.89	88.89	58.33	91.67	91.67

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ 5.14 (ต่อ)

		Bright = -40			Bright = -50			Bright= -60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	55.55	100.00	100.00	52.78	94.44	94.44	58.34	100.00	100.00
	Mixline	38.89	86.11	77.78	41.67	83.33	69.44	33.34	69.45	55.56
	Moreline	33.33	97.22	80.56	38.89	88.89	75.00	36.11	88.89	80.56
	multiline	27.78	63.89	63.89	30.55	52.78	52.78	22.22	55.55	55.55
200 x 200	Line	69.44	94.44	94.44	77.78	100.00	100.00	72.22	100.00	100.00
	Mixline	58.33	88.89	86.11	63.89	91.67	91.67	61.11	83.33	83.33
	Moreline	63.89	94.44	88.89	66.67	97.22	91.67	52.78	97.22	83.33
	multiline	50.00	77.78	77.78	47.22	75.00	75.00	41.67	75.00	75.00
300 x 300	Line	91.67	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00	86.11	100.00	100.00
	Mixline	66.67	94.44	94.44	63.89	88.89	88.89	63.89	86.11	86.11
	Moreline	69.44	94.44	94.44	72.22	94.44	94.44	58.33	91.67	91.67
	multiline	52.78	83.33	83.33	58.33	75.00	75.00	50.00	75.00	75.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ 5.14 (ต่อ)

		Bright = +10			Bright = +20			Bright= +30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	61.11	100.00	100.00	61.11	100.00	100.00	61.11	100.00	100.00
	Mixline	41.67	100.00	86.11	44.44	97.22	88.89	47.22	97.22	88.89
	Moreline	44.44	100.00	100.00	44.44	100.00	100.00	41.67	97.22	97.22
	multiline	30.56	69.44	69.44	27.78	69.44	69.44	27.78	69.44	69.44
200 x 200	Line	72.22	100.00	100.00	77.78	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00
	Mixline	66.67	88.89	91.67	69.44	88.89	86.11	72.22	91.67	91.67
	Moreline	63.89	100.00	100.00	61.11	97.22	97.22	63.89	97.22	97.22
	multiline	52.78	83.34	83.34	55.55	83.33	83.33	58.33	83.33	83.33
300 x 300	Line	94.45	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	97.22	100.00	100.00
	Mixline	83.34	100.00	100.00	83.34	100.00	100.00	86.11	100.00	100.00
	Moreline	66.66	97.22	97.22	75.00	100.00	100.00	63.89	100.00	100.00
	multiline	61.11	83.33	83.33	58.33	86.11	86.11	61.11	86.11	86.11

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ 5.14 (ต่อ)

		Bright = +40			Bright = +50			Bright= +60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	58.34	100.00	100.00	61.11	100.00	100.00	63.89	100.00	100.00
	Mixline	50.00	97.22	88.89	44.45	94.44	86.11	50.00	100.00	88.89
	Moreline	44.44	100.00	100.00	36.11	100.00	97.22	41.67	100.00	91.67
	multiline	30.55	66.67	66.67	33.33	66.67	66.67	30.55	63.89	63.89
200 x 200	Line	80.55	100.00	100.00	80.55	100.00	100.00	69.44	100.00	100.00
	Mixline	69.44	94.45	91.67	75.00	94.45	94.45	66.67	97.22	94.45
	Moreline	66.67	94.45	94.45	61.11	97.22	97.22	66.66	97.22	97.22
	multiline	58.33	83.34	83.34	52.78	80.56	80.56	58.33	91.67	91.67
300 x 300	Line	97.22	100.00	100.00	97.22	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	Mixline	86.11	100.00	100.00	86.11	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
	Moreline	69.44	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	72.22	97.22	97.22
	multiline	58.34	86.11	86.11	61.11	94.44	94.44	52.78	94.45	94.45

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ 5.15 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 (องศา)

		Bright = -10			Bright = -20			Bright= -30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	78.22	0.00	0.00	65.86	0.00	0.00	67.42	0.00	0.00
	Mixline	96.03	0.81	11.72	97.64	1.11	21.86	99.17	0.83	20.72
	Moreline	103.78	0.00	2.39	86.47	0.44	3.64	100.31	0.97	22.39
	multiline	91.72	28.67	28.67	110.81	23.42	23.42	97.92	35.33	35.33
200 x 200	Line	51.69	0.00	0.00	47.36	0.00	0.00	49.97	1.64	1.64
	Mixline	59.03	10.58	16.53	44.92	13.36	22.56	62.42	15.72	24.00
	Moreline	47.45	0.00	0.00	44.92	3.25	4.11	49.20	0.00	0.78
	multiline	63.22	19.22	19.22	57.25	24.92	24.92	73.17	21.61	21.61
300 x 300	Line	6.67	0.00	0.00	5.83	0.00	0.00	5.81	0.00	0.00
	Mixline	24.17	0.83	0.83	17.44	0.00	0.00	21.69	0.81	0.81
	Moreline	34.11	0.83	0.83	51.89	0.00	0.00	37.39	4.53	4.53
	multiline	52.33	15.95	15.95	55.69	9.86	9.86	61.05	12.08	12.08

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ 5.15 (ต่อ)

		Bright = -40			Bright = -50			Bright= -60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	80.89	0.00	0.00	66.72	0.06	0.06	68.47	0.00	0.00
	Mixline	78.80	10.81	22.53	91.36	10.42	26.22	111.03	18.67	46.36
	Moreline	119.75	0.67	26.56	116.28	3.22	26.05	93.53	11.61	7.14
	multiline	115.97	46.36	46.36	114.72	51.86	51.86	118.83	49.06	49.06
200 x 200	Line	53.17	2.50	2.50	27.50	0.00	0.00	44.92	0.00	0.00
	Mixline	58.92	10.25	16.05	57.44	15.75	12.36	64.44	18.47	18.42
	Moreline	40.14	3.42	12.56	58.45	1.64	8.28	60.92	0.83	19.72
	multiline	85.69	14.72	14.72	72.86	22.44	22.44	110.64	41.14	41.14
300 x 300	Line	9.17	0.00	0.00	4.14	0.00	0.00	18.36	0.00	0.00
	Mixline	47.42	7.00	7.00	29.61	16.08	16.08	45.36	18.89	18.89
	Moreline	53.31	12.44	12.44	46.86	7.50	7.50	65.42	9.86	9.86
	multiline	63.03	15.22	15.22	49.64	22.39	22.39	76.83	38.64	38.64

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ 5.15 (ต่อ)

		Bright = +10			Bright = +20			Bright= +30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	74.75	0.00	0.00	75.86	0.00	0.00	69.11	0.00	0.00
	Mixline	81.97	0.00	10.92	97.36	0.83	14.17	80.64	8.31	17.53
	Moreline	85.22	0.00	0.00	83.34	0.00	0.00	89.53	2.44	2.44
	multiline	113.05	34.58	34.58	117.86	60.47	60.47	105.36	47.47	47.47
200 x 200	Line	36.69	0.00	0.00	26.61	0.00	0.00	19.19	0.00	0.00
	Mixline	44.97	10.03	9.22	45.83	7.50	13.36	45.67	17.61	12.67
	Moreline	54.97	0.00	0.00	66.86	0.83	0.83	51.69	6.67	6.67
	multiline	51.56	14.97	14.97	54.39	22.83	22.83	43.22	14.91	14.91
300 x 300	Line	6.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.17	0.00	0.00
	Mixline	24.14	0.00	0.00	13.31	0.00	0.00	9.97	0.00	0.00
	Moreline	53.25	9.14	9.14	29.25	0.00	0.00	32.50	0.00	0.00
	multiline	40.25	20.28	20.28	62.50	15.20	15.20	49.86	23.25	23.25

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ 5.15 (ต่อ)

		Bright = +40			Bright = +50			Bright= +60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	70.92	0.00	0.00	69.94	0.00	0.00	64.08	0.00	0.00
	Mixline	76.00	0.83	12.39	84.89	1.31	13.78	88.92	0.00	15.03
	Moreline	81.61	0.00	0.00	83.22	0.00	9.08	82.53	0.00	3.28
	multiline	97.42	35.92	35.92	92.81	27.78	27.78	103.89	41.31	41.31
200 x 200	Line	22.47	0.00	0.00	33.33	0.00	0.00	54.19	0.00	0.00
	Mixline	36.66	9.94	10.81	35.81	9.11	14.08	41.69	0.81	6.64
	Moreline	48.89	10.39	10.39	61.94	7.67	7.67	51.33	0.50	0.50
	multiline	71.14	18.44	18.44	62.39	15.17	15.17	55.22	11.06	11.06
300 x 300	Line	8.31	0.00	0.00	8.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mixline	17.47	0.00	0.00	16.67	0.00	0.00	28.31	0.00	0.00
	Moreline	34.97	0.00	0.00	40.81	0.00	0.00	35.81	0.83	0.83
	multiline	74.83	21.89	21.89	59.17	6.78	6.78	51.58	7.50	7.50

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

จากตารางที่ 5.14 สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยในทุกๆ ลักษณะและขนาดภาพได้ดังตารางที่ 5.16 และ ตารางที่ 5.15 สามารถหาค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยในทุกๆ ลักษณะและขนาดภาพได้ดังตารางที่ 5.17 เพื่อพิจารณาแนวโน้มในภาพรวมเรื่องความทนทานต่อความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับวิธีการของ Li Zhongke และคณะ ที่ใช้เทคนิค Hough Transform และ Phase Correlation และเปรียบเทียบกับเทคนิคการค้นหาแบบ Full search ซึ่งผลที่ได้ในตารางที่ 5.16 และ 5.17 สามารถนำไปสร้างเป็นกราฟเพื่อใช้ในการพิจารณาได้ ดังรูปที่ 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.16 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อทำการปรับค่าความเข้มแสงเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 (%)

	I	II	III
Bright = -10	66.11	93.29	91.44
Bright = -20	61.57	93.06	90.97
Bright = -30	60.88	91.67	88.89
Bright = -40	56.48	89.58	86.80
Bright = -50	58.80	86.81	84.03
Bright = -60	53.01	85.19	82.18
Bright = +10	61.57	93.52	92.59
Bright = +20	63.19	93.52	92.59
Bright = +30	62.96	93.52	92.82
Bright = +40	64.12	93.52	92.59
Bright = +50	62.96	93.98	93.06
Bright = +60	62.96	95.14	93.29

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

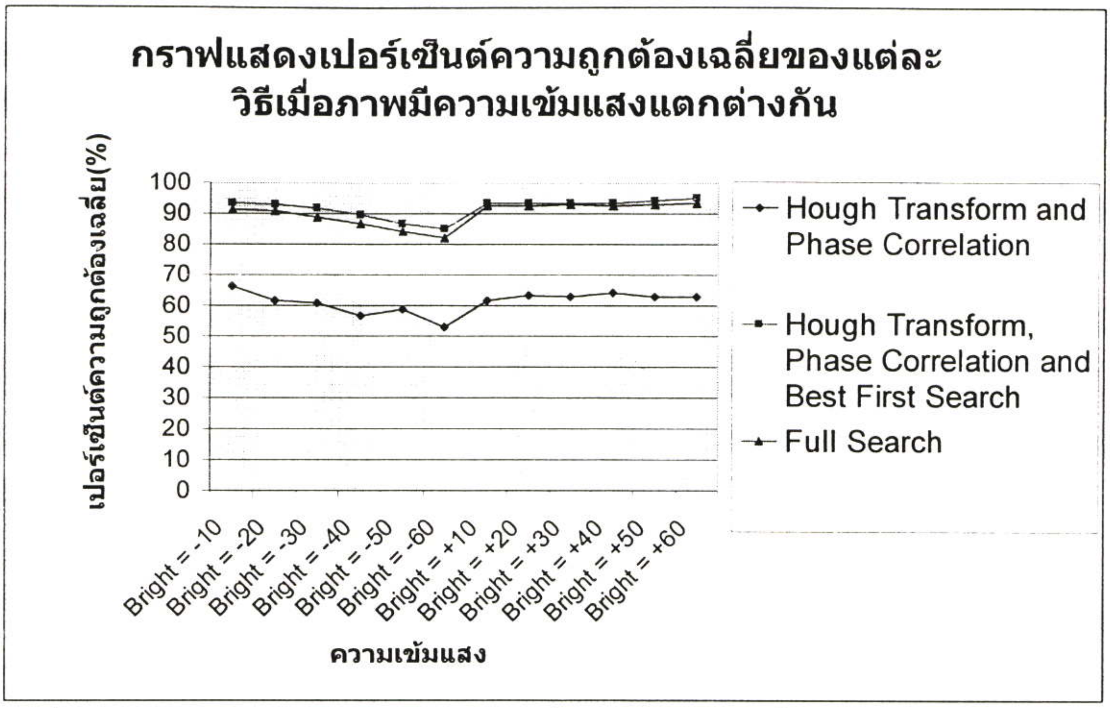
ตารางที่ 5.17 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ เมื่อทำการปรับค่าความเข้มแสงเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 (องศา)

	I	II	III
Bright = -10	59.04	6.41	8.01
Bright = -20	57.17	6.36	9.2
Bright = -30	60.46	7.79	11.99
Bright = -40	67.19	10.28	14.66
Bright = -50	61.3	12.61	16.1
Bright = -60	73.23	17.26	20.77
Bright = +10	55.62	7.42	8.26
Bright = +20	56.1	8.97	10.57
Bright = +30	50.08	10.06	10.41
Bright = +40	53.39	8.12	9.15
Bright = +50	54.11	5.65	7.86
Bright = +60	54.8	5.17	7.18

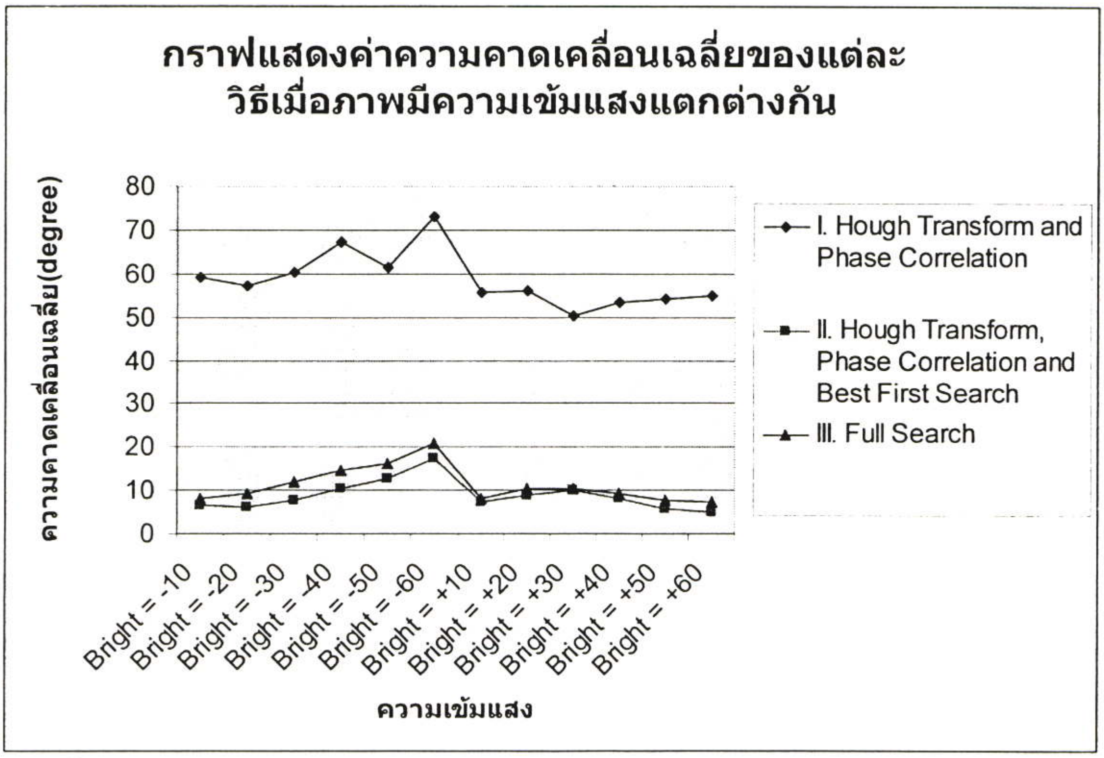
I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการเมื่อมีการปรับค่าความเข้มแสง



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการเมื่อมีการปรับค่าความเข้มแสง

จากกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการเมื่อมีการปรับค่าความเข้มแสงเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.12 พบว่าวิธีการ Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงที่สุด รองลงมาคือวิธี Full search และวิธี Hough Transform and Phase Correlation ตามลำดับ และเมื่อพิจารณากราฟความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการเมื่อมีการปรับค่าความเข้มแสงเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.13 พบว่าวิธีการที่นำเสนอมีค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำที่สุด รองลงมาคือวิธี Full search และวิธี Hough Transform and Phase Correlation ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอนี้มีความทนทานต่อความเข้มแสงมากเนื่องจากให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงที่สุดและมีค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำที่สุด

สำหรับการปรับความเข้มแสงต่างๆทั้งปรับให้มืดลง และสว่างขึ้น ทั้งสิ้น 12 ระดับ คือ-60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60 เรียงจากมืดที่สุดไปจนสว่างที่สุด ตามลำดับ พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกันในแต่ละวิธีการ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าค่าความเข้มแสงที่พิจารณาอยู่ในช่วงที่ไม่ส่งผลกระทบต่อรายละเอียดในภาพมากนักจึงทำให้ได้ผลของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ใกล้เคียงกัน

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย และแนวทางการพัฒนา

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการทำ Image Registration ด้วยเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟและเฟสคอลลีเรชั่นที่ทำงานบนโดเมนความถี่ และเทคนิคการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนซึ่งทำงานบนโดเมนของจุดในภาพ โดยจะรองรับเฉพาะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างคู่ภาพในลักษณะการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนตั้ง แนวแกนนอน และการหมุนภาพเท่านั้น

จากการทดลองหาค่าการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง และมุมการหมุนระหว่างภาพด้วยเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟและเฟสคอลลีเรชั่น ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัยของ Li Zhongke, Yang Xiaohui, และ Wu Lenan พบว่า ข้อดีที่ได้รับ คือเรื่องของความเร็วในการประมวลผล และเมื่อทำการทดลองกับภาพในหลากหลายลักษณะและขนาด พบว่าสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของการเลื่อนตำแหน่งได้ถูกต้องไม่ว่าภาพจะมีลักษณะและขนาดเช่นไร ทั้งนี้ไม่รวมถึงกรณีที่ภาพมีการเลื่อนตำแหน่งไปเป็นระยะทางมากเกินกว่าเทคนิคเฟสคอลลีเรชั่นจะรองรับได้ แต่สำหรับการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของภาพ พบว่าเมื่อภาพยิ่งมีขนาดเล็กและมีรายละเอียดในภาพมาก มุมการหมุนที่หาได้มีความผิดเพี้ยนไปจากความจริงมากพอควร ทำให้ไม่สามารถจัดเรียงและประกอบได้อย่างกลมกลืนจึงเป็นข้อด้อยในงานวิจัยที่อ้างอิงนี้ ดังนั้นงานวิจัยที่นำเสนอนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงผลของค่ามุมการหมุนที่ได้รับเป็นหลัก โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงเทคนิคเฟสคอลลีเรชั่นแบบหนึ่งมิติของงานวิจัยเดิมและเพิ่มเติมเทคนิคของ Candidate Angles และการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนเข้าไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหาการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนระหว่างภาพให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

การปรับปรุงเทคนิคเฟสคอลลีชั่นแบบหนึ่งมิติเพิ่มเติมจากงานวิจัยของ Li Zhongke และคณะโดยทำการพิจารณามุมการหมุนเริ่มต้นที่ได้จากอาร์เรย์การเปลี่ยนแปลงที่มีค่าสูงสุดในลำดับรองๆ ลงไปด้วย โดยทำการทดลองเพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสมที่ให้ผลลัพธ์ในการทำ Image Registration ที่ดีที่สุดแต่เสียเวลาในการประมวลผลน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ จากการทดลองพบว่าจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับภาพทุกๆ ลักษณะและทุกๆ ขนาดที่ใช้ในการทดลอง มีค่าเท่ากับ 5 นั่นหมายความว่า ในขั้นตอนการทำเฟสคอลลีเรชั่นแบบหนึ่งมิติเพื่อหามุมการหมุนเริ่มต้นจะทำการเก็บค่าสูงสุดในอาร์เรย์การเปลี่ยนแปลงไว้ทั้งสิ้น 5 ค่า ค่าเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยชี้นำทิศทางการค้นหามุมการหมุนที่ถูกต้องให้แก่เทคนิคการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนต่อไป

การทดลองเพื่อพิจารณาความสำคัญของมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องพบว่า มุม θ และ $(180+\theta)$ ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงกว่าและค่าความคาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าที่ได้จากมุม $(90+\theta)$ และ $(270+\theta)$

สำหรับการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้มีการทดลองเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Li Zhongke และคณะ ซึ่งเสนอการทำ Image Registration ด้วยเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟและเฟสคอลลีเรชั่น และเปรียบเทียบกับการทำ Image Registration ด้วยเทคนิคการค้นหาแบบพิจารณาทุกค่า โดยได้ทำการทดลองกับภาพในหลากหลายลักษณะและขนาด และแบ่งวัดผลการทดลองออกเป็นการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย และการวัดผลในเรื่องของเวลาที่ใช้ประมวลผล ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า วิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากกว่าและให้ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่างานวิจัยของ Li Zhongke และคณะ สำหรับภาพในทุกๆ ลักษณะและทุกๆขนาด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อภาพที่ใช้ในการทดลองเป็นภาพที่มีเส้นตรงที่ชัดเจนอยู่ในภาพบ้าง ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ได้จะมีค่าเทียบเท่ากับค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ได้รับจากการทำ Image Registration ด้วยเทคนิคการค้นหาแบบพิจารณาทุกค่า คือ 100 เปอร์เซ็นต์และไม่มีความคาดเคลื่อนเกิดขึ้นเลย ขณะที่ใช้เวลาในการประมวลผลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเทคนิคการค้นหาแบบพิจารณาทุกค่า ซึ่งยิ่งภาพมีขนาดใหญ่ขึ้นเท่าไร เวลาที่ใช้ในการประมวลผลของเทคนิคการค้นหาแบบพิจารณาทุกค่ายิ่งเพิ่มมากขึ้นทวีคูณ

จากการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เห็นได้ชัดว่าเส้นตรงในภาพมีผลโดยตรงต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ทั้งนี้เนื่องมาจาก เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟเป็นเทคนิคที่ใช้สกัดเส้นตรงในภาพแล้วแปลงให้อยู่ในรูปฮัฟสเปซซึ่งจะใช้เป็นรูปตั้งต้นในการหามุมการหมุนเริ่มต้นของเทคนิคเฟสคอลลีเรชั่นต่อไป ดังนั้นภาพที่มีเส้นตรงในภาพชัดเจนมากเท่าไรก็จะสามารถหาค่ามุมการหมุนเริ่มต้นได้ถูกต้องมากเท่านั้น

สัญญาณรบกวนในภาพอาจส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย เนื่องจากอาจไปรบกวนเส้นตรงในภาพ ทำให้ภาพที่เส้นตรงชัดเจนมีการเบลอไป ซึ่งในกรณีนี้ ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยจะมีค่าลดลง หรือในทางกลับกัน สัญญาณรบกวนที่เพิ่มเข้าไปในภาพ อาจทำให้รายละเอียดอื่นๆ ในภาพเลือนไป ทำให้ผลของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นก็เป็นได้ การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อภาพมีสัญญาณรบกวนไม่มากนัก วิธีการที่นำเสนอนี้สามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยได้ใกล้เคียงกับวิธีการค้นหาแบบพิจารณาทุกค่า และมีค่าลดลงเมื่อมีสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น และในทางกลับกัน ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยจะมีค่าใกล้เคียงกับวิธีการค้นหาแบบพิจารณาทุกค่าและเพิ่มมากขึ้นเมื่อภาพมีสัญญาณรบกวนมากขึ้น ซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ไม่มากนัก ไม่ควรเกิน 10 เปอร์เซ็นต์

ในการทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอพบว่าวิธีการที่นำเสนอ ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงกว่าวิธีการของ Li Zhongke และคณะ และสูงกว่าวิธีการค้นหาแบบพิจารณาทุกค่าอีกด้วย ในส่วนของค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย วิธีการที่นำเสนอให้ค่าความคาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าวิธีการที่นำเสนอมีความทนทานต่อความเข้มแสงมาก

6.2 แนวทางการพัฒนา

- เฟสคอลลีเรชั่นสามารถคำนวณหาได้เฉพาะการเปลี่ยนแปลงในขอบเขตที่เป็นจำนวนเต็มเท่านั้น เทคนิคการทำ Sub-pixel Registration สามารถนำเข้ามาช่วยในกระบวนการทำงานเพื่อให้สามารถหาการเปลี่ยนแปลงถูกต้องมากยิ่งขึ้น
- งานวิจัยนี้สามารถรองรับได้เฉพาะการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนในแนวแกนตั้ง แนวแกนนอนและการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนระหว่างภาพเท่านั้น สำหรับการหาการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่ การย่อ และขยายขนาดภาพ และการบิด การยืด การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาพ ต้องพัฒนาเทคนิคอื่นๆ เข้าช่วย
- การปรับค่าพารามิเตอร์ของจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสมในแต่ละภาพอย่างอัตโนมัติ สามารถช่วยให้ทำงานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และลดเวลาในการประมวลผลที่ไม่จำเป็นลงไปได้มาก
- การปรับปรุงคุณภาพของภาพเพื่อให้ได้ภาพที่มีเส้นตรงที่ชัดเจนและมีรายละเอียดอื่นๆในภาพน้อยเป็นเรื่องที่น่าพิจารณา ซึ่งจะช่วยให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการทำ Image Registration มีค่ามากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Wikipedia, the free encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Image_registration, Last modified: 28 February 2007, 13:22.

[2] Ton J., Jain A.K., "Registering Landsat images by point matching" , Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, vol. 27, issue 5, pp. 642-651, 1989.

[3] Manduchi R. and Mian G.A., "Accuracy analysis for correlation-based image registration algorithms", Circuits and Systems, IEEE International Symposium, vol.1, pp. 834 – 837, 1993.

[4] Thorpe G. and Fraser D., "Problems in area-based image registration for stereo" Speech and Image Technologies for Computing and Telecommunications, IEEE Region 10 Annual Conference, vol. 1, pp. 347-352, 1997.

[5] Meshoul S. and Batouche M., "A fully automatic method for feature-based image registration", Systems, Man and Cybernetics, IEEE International Conference, vol. 4, 2002.

[6] Livyatan H., Yaniv Z. and Joskowicz L., "Gradient-based 2-D/3-D rigid registration of fluoroscopic X-ray to CT", Medical Imaging, IEEE Transactions, vol. 22, issue 11, pp. 1395-1406, 2003.

[7] Abolhassani N. and Samani A., "Non-rigid registration using free-form deformation for prostate images", Fuzzy Information Processing Society, Annual Meeting of the North American, pp. 51-54,2005.

[8] Cordon O., Damas S. and Santamaria J., "A scatter search based optimizer for the registration of 3D surfaces", Evolutionary Computation, IEEE Congress, vol. 3, pp. 2738-2744, 2005

[9] Dong Sik Kim, Su Yeon Lee and Kiryung Lee, "Joint Optimization of Image Registration and Comparametric Exposure Compensation Based on the Lucas-Kanade Algorithm", Pattern Recognition, 18th International Conference, vol. 3, pp. 905-908, 2006.

[10] Weiwei Zhang Noble, Brady J.A. and J.M., "Real time 3-D ultrasound to MR cardiovascular image registration using a phase-based approach", Biomedical Imaging: Macro to Nano, IEEE International Symposium, pp. 666-669, 2006.

[11] Yongmei Wang Staib, L.H. "Integrated approaches to non-rigid registration in medical images", Applications of Computer Vision, Fourth IEEE Workshop, pp. 102-108, 1998.

[12] Zhao Zhang, Su Zhang, Chne-Xi Zhang and Ya-Zhu Chen, "Multi-Modality Medical Image registration Using Support Vector Machines", Engineering in Medicine and Biology Society, 27th Annual International Conference, pp. 6293-6296, 2005.

[13] L. Gottesfeld Brown. "A survey of image registration techniques", ACM Computing Surveys, vol. 24, issue 4, pp. 325 – 376, 1992.

[14] Li Zhongke, Yang Xiaohui, Wu Lenan, Image Registration based on Hough transform and phase correlation, IEEE Int. Conf. Neural Networks & Signal Processing, 2003, pp 956-959.

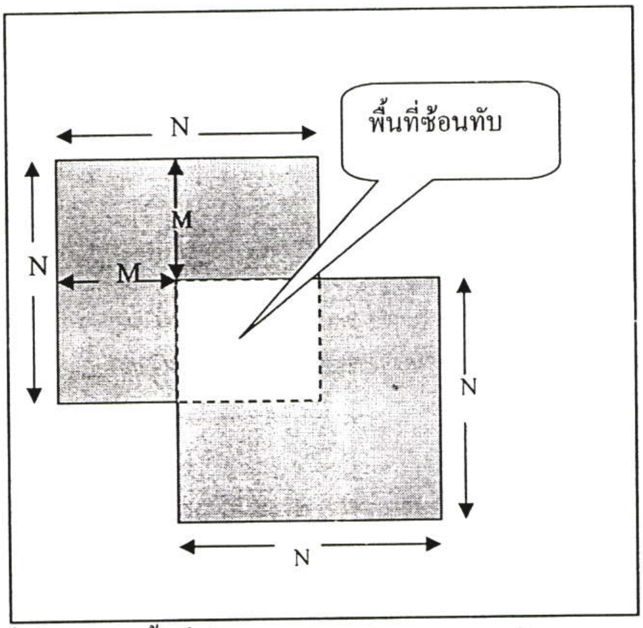
[15] Canny John, "A Computational Approach to Edge Detection," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-8, No. 6, pp. 679-698, 1986.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของพื้นที่ซ้อนทับกันน้อยที่สุด

สำหรับในงานวิจัยนี้ การหาเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของพื้นที่ซ้อนทับกันน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพขนาด NxN ใดๆ คำนวณได้จากการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน x และแกน y ไปเป็นระยะทาง M ดังนั้นพื้นที่ที่เกิดการซ้อนทับจึงมีขนาด $(N-M)^2$ ดังรูปที่ ก.1

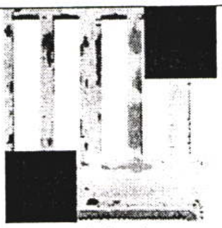
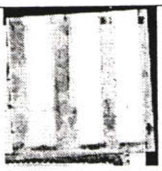
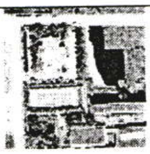
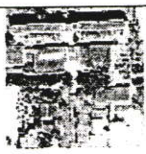
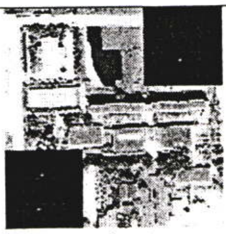
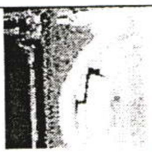
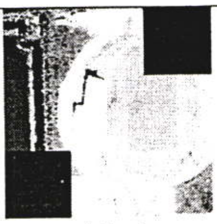
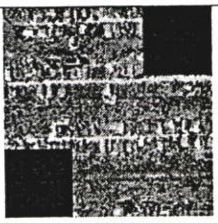
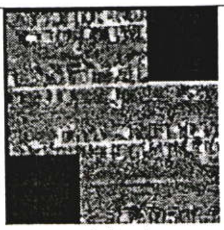


รูปที่ ก.1 แสดงพื้นที่ซ้อนทับของภาพขนาด NxN ใดๆ

เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับในที่นี้คำนวณได้จาก $\frac{(N-M)^2}{N^2} x100$ และเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับที่น้อยที่สุดที่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้จึงเกิดการการเลื่อนระยะไปในแนวแกน x และแกน y ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้แล้วยังสามารถใช้วิธีการที่นำเสนอหาระยะการเลื่อนตำแหน่งที่เกิดขึ้นได้นั่นเอง

ตัวอย่างการเลื่อนตำแหน่งไปในแนวแกน x และแกน y ด้วยระยะ M ใดๆ ให้มากที่สุดโดยยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ และการเลื่อนตำแหน่งไปในแนวแกน x และแกน y ด้วยระยะ M ใดๆ ที่มากเกินกว่าจะสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ สามารถแสดงได้ในตารางที่ ก.1 โดยแสดงตัวอย่างของภาพ line, mixline, moreline และ multiline ขนาด 100x100 พิกเซล ของภาพภาพดาวเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ ก.1 แสดงภาพตัวอย่างการเลื่อนตำแหน่งด้วยระยะ M ใดๆ ที่มากที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ และภาพที่เกิดจากการเลื่อนตำแหน่งด้วยระยะ M ที่มากเกินกว่าจะสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้

	ภาพตั้งต้น M=0	ภาพที่มีการเลื่อนด้วยระยะ M ที่มากที่สุดที่ยังสามารถหาค่า M ได้	ภาพที่มีการเลื่อนด้วยระยะ M ที่มากเกินกว่าจะหาค่า M ได้	ภาพการทำ Image Registrationที่สามารถหาระยะการเลื่อน M ได้	ภาพการทำ Image Registrationที่ไม่สามารถหาระยะการเลื่อน Mได้
Line	M=0	M=51	M=52	 เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 24.01%	 เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 23.04%
Mixline	 M=0	M=56	 M=57	 เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 19.36%	เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 18.49%
Moreline	 M=0	M=48	M=49	 เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 27.04%	เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 26.01%
Multiline	M=0	M=49	M=50	 เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 26.01%	 เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 25.00%

ตารางที่ ก.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกันคือ ภาพ line, mixline, moreline และ multiline ซึ่งได้มาจากภาพภาพดาวเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง

	100x100	200x200	300x300
Line	24.01	12.25	10.95
Mixline	19.36	9.00	5.29
Moreline	27.04	8.41	7.65
Multiline	26.01	14.06	5.44

ตารางที่ ก.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกันคือ ภาพ line, mixline, moreline และ multiline ซึ่งได้มาจากภาพภาพดาวเทียมในบริเวณเขตมีนบุรี

	100x100	200x200	300x300
Line	12.25	10.24	6.42
Mixline	23.04	7.02	5.14
Moreline	16.00	9.00	4.69
Multiline	14.44	7.29	5.29

ตารางที่ ก.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกันคือ ภาพ line, mixline, moreline และ multiline ซึ่งได้มาจากภาพภาพดาวเทียมในบริเวณเขตดอนเมือง

	100x100	200x200	300x300
Line	15.21	12.60	11.11
Mixline	19.36	8.70	5.60
Moreline	9.61	9.00	4.69
Multiline	13.69	8.41	7.65

ตารางที่ ก.5 แสดงเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกัน ทั้งเขตลาดกระบัง เขตมีนบุรี และเขตดอนเมือง

	100x100	200x200	300x300
Line	17.16	11.70	9.49
Mixline	20.59	8.24	5.34
Moreline	17.55	8.80	5.68
Multiline	18.05	9.92	6.13

จากผลการทดลองสังเกตได้ว่า ภาพลักษณะเดียวกันที่ได้มาจากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเดียวกัน เมื่อภาพมีขนาดใหญ่ขึ้น จะใช้เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซ้อนทับน้อยกว่าภาพที่มีขนาดเล็ก นั่นหมายความว่าภาพขนาดใหญ่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของการเลื่อนตำแหน่งได้มากกว่าภาพขนาดเล็กนั่นเอง และข้อสรุปนี้เป็นจริงในตารางที่ ก.5 ซึ่งเป็นตารางสรุปผลการทดลองทั้งหมดเช่นเดียวกัน

ตารางที่ ก.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะและขนาดต่างๆกันที่ได้มาจากภาพภาพดาวเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง เขตมีนบุรี และเขตดอนเมือง

	100x100	200x200	300x300
เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับเฉลี่ย	18.34	9.67	6.66

ภาคผนวก ข.

การทดลองเพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสม

จำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสม คือ มุมการหมุนเริ่มต้นที่มีจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงที่สุด ซึ่งในการทดลองนี้ได้พิจารณามุมการหมุนเริ่มต้นของภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง เขตมีนบุรี และเขตดอนเมือง ผลการทดลองเพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นต้นที่เหมาะสมสำหรับแต่ละบริเวณ แสดงในตารางที่ ข.1- ข.6

I. บริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ ข.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search (%)						
		N = 3	N = 4	N = 5	N = 6	N = 7
100X100	Line	100	100	100	100	100
	Mixline	91.67	100	100	100	100
	Moreline	100	100	100	100	100
	multiline	58.33	83.33	83.33	83.33	91.67
200X200	Line	100	100	100	100	100
	Mixline	100	100	100	100	100
	Moreline	100	100	100	100	100
	multiline	58.33	83.33	91.67	91.67	100
300X300	Line	100	100	100	100	100
	Mixline	100	100	100	100	100
	Moreline	100	100	100	100	100
	multiline	75	83.33	91.67	100	100

ตารางที่ ข.2 แสดงเวลาประมวลผลโดยเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search (วินาที)						
		N=3	N=4	N=5	N=6	N=7
100X100	Line	30.34	36.95	42.76	57.21	60.32
	Moreline	35.16	40.35	53.07	54.16	73.86
	Mixline	33.38	40.32	49.16	69.06	72.75
	multiline	24.65	36.81	44.77	53.43	57.77
200X200	Line	54.31	83.77	88.61	106.46	118.81
	Moreline	57.89	78.91	101.46	122.14	133.18
	Mixline	68.04	94.24	102.54	132.52	133.97
	multiline	41.70	53.52	67.11	79.07	98.00
300X300	Line	103.94	133.16	164.51	198.06	264.97
	Moreline	89.23	119.21	146.61	226.76	295.29
	Mixline	85.61	106.83	138.97	167.37	199.57
	multiline	79.46	102.80	131.47	151.20	179.04

II. บริเวณเขตมีนบุรี

ตารางที่ ข.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search (%)						
		N = 3	N = 4	N = 5	N = 6	N = 7
100X100	Line	100	100	100	100	100
	Mixline	83.33	100	100	100	100
	Moreline	100	100	100	100	100
	multiline	50	58.33	58.33	66.67	66.67
200X200	Line	100	100	100	100	100
	Mixline	83.33	100	100	100	100
	Moreline	91.67	100	100	100	100
	multiline	66.67	66.67	75	75	83.33
300X300	Line	100	100	100	100	100
	Mixline	91.67	100	100	100	100
	Moreline	75	83.33	100	100	100
	multiline	66.67	83.33	83.33	83.33	83.33

ตารางที่ ข.4 แสดงเวลาประมวลผลโดยเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search (วินาที)						
		N=3	N=4	N=5	N=6	N=7
100X100	Line	13.29	15.63	15.69	21.38	21.52
	Moreline	12.31	13.90	15.44	17.07	18.46
	Mixline	14.32	14.49	15.19	20.92	22.73
	multiline	12.08	13.32	15.43	17.77	18.91
200X200	Line	40.31	50.23	60.22	69.87	97.01
	Moreline	35.03	45.31	46.87	65.68	67.11
	Mixline	44.16	48.61	50.39	65.95	73.85
	multiline	33.19	35.64	43.67	51.58	63.49
300X300	Line	92.66	113.93	120.33	160.95	187.42
	Moreline	78.41	99.50	102.93	138.96	166.67
	Mixline	79.19	101.16	111.59	139.54	166.90
	multiline	69.33	91.26	100.12	122.81	148.60

III. บริเวณเขตดอนเมือง

ตารางที่ ข.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search (%)						
		N = 3	N = 4	N = 5	N = 6	N = 7
100X100	Line	100	100	100	100	100
	Mixline	83.33	91.67	100	100	100
	Moreline	91.67	91.67	100	100	100
	multiline	58.33	66.67	66.67	66.67	66.67
200X200	Line	83.33	100	100	100	100
	Mixline	66.67	91.67	100	100	100
	Moreline	75	83.33	100	100	100
	multiline	58.33	66.67	75	91.67	100
300X300	Line	100	100	100	100	100
	Mixline	75	91.67	100	100	100
	Moreline	75	91.67	100	100	100
	multiline	41.67	58.33	91.67	100	100

ตารางที่ ข.6 แสดงเวลาประมวลผลโดยเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 7 มุม

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search (วินาที)						
		N=3	N=4	N=5	N=6	N=7
100X100	Line	11.58	12.84	15.05	16.11	16.72
	Moreline	14.05	16.72	18.13	21.87	22.83
	Mixline	17.84	18.65	21.07	22.87	27.65
	multiline	13.91	15.05	17.44	19.15	20.93
200X200	Line	31.29	41.13	45.66	53.76	59.81
	Moreline	42.96	48.53	61.09	69.87	77.86
	Mixline	32.28	36.99	47.83	51.38	58.83
	multiline	34.09	41.86	54.55	65.50	67.38
300X300	Line	77.49	93.30	110.60	126.10	144.97
	Moreline	89.86	114.69	145.64	163.44	192.64
	Mixline	63.69	82.76	103.29	115.77	136.51
	multiline	72.91	98.26	131.74	137.48	170.64

ภาคผนวก ค.

การทดลองเพื่อพิจารณาความสำคัญของมุมการหมุนที่เกี่ยวข้อง

มุมการหมุนที่เกี่ยวข้องกับมุมการหมุนที่ได้จากขั้นตอน 1D Phase Correlation ในงานวิจัยนี้ หรือเรียกว่ามุม θ ได้แก่มุม $(90+\theta),(180+\theta)$ และ $(270+\theta)$ การทดลองนี้จะพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยและ ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย ของและมุมการหมุนที่เกี่ยวข้อง เพื่อพิจารณาความสำคัญของมุมที่เกี่ยวข้องได้อย่างถูกต้อง

ในการทดลองนี้ได้ใช้ภาพตั้งต้นจากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง เขตมีนบุรี และเขตดอนเมือง ผลการทดลองเพื่อประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ แสดงในตารางที่ ค.1- ค.6

I. บริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ ค.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน (เปอร์เซ็นต์)

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search					
		θ	$(90+\theta)$	$(180+\theta)$	$(270+\theta)$
100X100	Line	66.67	25.00	41.67	25.00
	Moreline	41.67	25.00	58.33	33.33
	Mixline	50.00	50.00	41.67	25.00
	multiline	50.00	25.00	33.33	25.00
200X200	Line	91.67	41.67	91.67	41.67
	Moreline	83.33	25.00	83.33	16.67
	Mixline	75.00	33.33	58.33	33.33
	multiline	58.33	25.00	50.00	25.00
300X300	Line	100.00	58.33	91.67	41.67
	Moreline	83.33	41.67	91.67	33.33
	Mixline	83.33	25.00	91.67	41.67
	multiline	50.00	25.00	66.67	8.33

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน (องศา)

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search					
		θ	$(90+\theta)$	$(180+\theta)$	$(270+\theta)$
100X100	Line	72.17	114.75	93.92	83.00
	Moreline	116.83	94.00	69.42	79.67
	Mixline	79.92	75.17	57.75	108.00
	multiline	69.50	89.25	88.50	94.75
200X200	Line	4.67	58.00	0.58	53.92
	Moreline	29.83	92.50	17.42	105.08
	Mixline	32.58	89.25	60.75	84.17
	multiline	47.50	81.92	66.58	45.92
300X300	Line	0.00	52.75	12.67	90.67
	Moreline	25.00	79.33	17.67	99.75
	Mixline	42.50	102.17	27.83	72.58
	multiline	49.83	62.42	45.25	116.33

II. บริเวณเขตมีนบุรี

ตารางที่ ค.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน (เปอร์เซ็นต์)

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search					
		θ	$(90+\theta)$	$(180+\theta)$	$(270+\theta)$
100X100	Line	58.33	8.33	50.00	16.67
	Moreline	50.00	16.67	41.67	8.33
	Mixline	41.67	33.33	66.67	33.33
	multiline	33.33	8.33	16.67	25.00
200X200	Line	83.33	16.67	75.00	16.67
	Moreline	66.67	16.67	50.00	16.67
	Mixline	66.67	33.33	66.67	41.67
	multiline	58.33	16.67	41.67	16.67
300X300	Line	100.00	8.33	91.67	25.00
	Moreline	66.67	16.67	66.67	25.00
	Mixline	66.67	33.33	75.00	25.00
	multiline	58.33	16.67	50.00	25.00

ตารางที่ ค.4 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน (องศา)

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search					
		θ	$(90+\theta)$	$(180+\theta)$	$(270+\theta)$
100X100	Line	80.17	119.08	81.75	106.33
	Moreline	96.33	106.50	81.83	124.33
	Mixline	112.25	78.08	52.33	100.42
	multiline	82.67	116.00	110.67	101.00
200X200	Line	17.50	105.17	32.42	107.83
	Moreline	49.92	117.42	63.75	127.67
	Mixline	31.75	72.00	53.17	91.42
	multiline	42.50	91.67	86.00	98.25
300X300	Line	0.00	34.25	6.25	98.42
	Moreline	22.42	109.92	45.50	110.33
	Mixline	49.83	80.50	46.58	98.67
	multiline	79.83	96.08	72.50	77.08

III. บริเวณเขตดอนเมือง

ตารางที่ ค.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน (เปอร์เซ็นต์)

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search					
		θ	$(90+\theta)$	$(180+\theta)$	$(270+\theta)$
100X100	Line	66.67	8.33	58.33	8.33
	Moreline	58.33	16.67	58.33	16.67
	Mixline	41.67	25.00	41.67	25.00
	multiline	41.67	8.33	33.33	16.67
200X200	Line	66.67	16.67	83.33	8.33
	Moreline	75.00	25.00	75.00	16.67
	Mixline	58.33	16.67	58.33	16.67
	multiline	50.00	16.67	50.00	16.67
300X300	Line	100.00	16.67	91.67	25.00
	Moreline	91.67	16.67	75.00	16.67
	Mixline	75.00	25.00	66.67	16.67
	multiline	41.67	16.67	75.00	25.00

ตารางที่ ค.6 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับภาพลักษณะและขนาดต่างๆ โดยมีมุมการหมุนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน (องศา)

Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search					
		θ	$(90+\theta)$	$(180+\theta)$	$(270+\theta)$
100X100	Line	52.42	122.42	59.67	110.25
	Moreline	64.83	121.92	52.67	95.50
	Mixline	106.83	105.33	86.42	98.25
	multiline	106.58	114.75	88.83	86.75
200X200	Line	32.33	144.92	7.67	115.50
	Moreline	35.17	102.50	25.17	136.08
	Mixline	47.33	116.33	80.75	98.42
	multiline	91.92	109.17	105.75	130.92
300X300	Line	0.00	125.50	26.83	108.83
	Moreline	19.92	89.08	25.92	117.42
	Mixline	40.00	94.92	65.83	80.50
	multiline	114.58	129.00	46.08	118.83

ภาคผนวก ง.

การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ
สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน

การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองกับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน โดยแบ่งการวัดผลออกเป็น 3 ส่วนคือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาที่ใช้ประมวลผล ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Li Zhongke และคณะ ที่ทำการวิจัยเรื่อง Image Registration โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟ (Hough Transform) และเฟสคอลลีเรชั่น (Phase Correlation) และเปรียบเทียบกับการทำ Image Registration ที่ใช้เทคนิคการค้นหาแบบพิจารณาทุกค่า (Full search)

ในการทดลองนี้ได้ใช้ภาพตั้งต้นจากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง เขตมีนบุรี และเขตดอนเมือง ผลการทดลองเพื่อประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ แสดงในตารางที่ ง.1- ง.9

I. บริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ ง.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน (เปอร์เซ็นต์)

	100x100			200x200			300x300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Line	66.67	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Mixline	41.67	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
Moreline	25.00	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
Multiline	33.33	83.33	100.00	58.33	91.67	100.00	50.00	91.67	100.00

ตารางที่ ง.2 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน (องศา)

	100x100			200x200			300x300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Line	72.42	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mixline	97.17	0.00	0.00	32.33	0.00	0.00	30.00	0.00	0.00
Moreline	85.33	0.00	0.00	32.58	0.00	0.00	42.50	0.00	0.00
Multiline	69.75	4.92	0.00	47.42	2.42	0.00	50.00	2.50	0.00

ตารางที่ ง.3 แสดงเวลาที่ใช้ประมวลผลโดยเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน (วินาที)

	100x100			200x200			300x300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Line	18.40	52.03	172.85	35.28	122.10	1023.24	55.93	196.32	3100.95
Mixline	16.48	52.82	227.83	27.23	100.49	1049.57	52.64	189.61	2832.69
Moreline	15.61	51.41	233.25	26.95	91.04	1162.12	48.04	191.00	2857.12
Multiline	18.21	53.60	220.87	25.06	88.77	1185.42	40.05	155.18	2574.78

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

II. บริเวณเขตมีนบุรี

ตารางที่ ง.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน

	100x100			200x200			300x300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Line	58.33	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Mixline	50.00	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
Moreline	41.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
Multiline	33.33	58.33	100.00	58.33	75.00	100.00	58.33	83.33	100.00

ตารางที่ ง.5 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน (องศา)

	100x100			200x200			300x300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Line	75.25	0.00	0.00	17.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mixline	91.67	0.00	0.00	49.92	0.00	0.00	22.42	0.00	0.00
Moreline	122.33	0.00	0.00	32.08	0.00	0.00	50.00	0.00	0.00
Multiline	72.50	60.50	0.00	42.50	35.00	0.00	74.92	34.92	0.00

ตารางที่ ง.6 แสดงเวลาที่ใช้ประมวลผลโดยเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน (วินาที)

	100x100			200x200			300x300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Line	15.52	15.69	164.68	27.95	60.22	804.82	42.82	120.33	2134.16
Mixline	15.25	15.44	167.50	24.62	46.88	792.09	38.54	102.93	2236.30
Moreline	15.01	15.19	16.22	28.58	50.39	962.14	41.57	111.59	2287.40
Multiline	15.29	15.43	171.02	26.13	43.67	933.71	41.58	100.12	2399.23

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

III. บริเวณเขตดอนเมือง

ตารางที่ ง.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน

	100x100			200x200			300x300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Line	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Mixline	41.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00
Moreline	41.67	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00
Multiline	41.67	66.67	100.00	50.00	75.00	100.00	41.67	91.67	100.00

ตารางที่ ง.8 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน (องศา)

	100x100			200x200			300x300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Line	57.50	0.00	0.00	32.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mixline	65.33	0.00	0.00	35.17	0.00	0.00	10.00	0.00	0.00
Moreline	107.00	0.00	0.00	47.33	0.00	0.00	40.00	0.00	0.00
Multiline	106.58	43.92	0.00	87.25	25.08	0.00	89.67	24.92	0.00

ตารางที่ ง.9 แสดงเวลาที่ใช้ประมวลผลโดยเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน (วินาที)

	100x100			200x200			300x300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Line	14.97	15.05	153.49	23.68	45.66	765.89	40.17	110.60	2147.72
Mixline	16.11	18.13	202.57	30.65	61.09	1202.21	50.74	145.64	2929.88
Moreline	20.84	21.07	286.97	23.03	47.83	878.04	37.95	103.29	2209.53
Multiline	17.00	17.44	232.14	29.12	54.55	960.88	51.28	131.74	2654.10

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ภาคผนวก จ.

การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวน ของวิธีการที่นำเสนอ

การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองนำภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกันไปทำการเพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไปในภาพเป็นจำนวน 5 เปอร์เซ็นต์ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 15 เปอร์เซ็นต์ และทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยและค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย

ในการทดลองนี้ได้ใช้ภาพตั้งต้นจากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง เขตมีนบุรี และเขตดอนเมือง ผลการทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอ แสดงในตารางที่ จ.1- จ.6

I. บริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ จ.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์

		Noise=5%			Noise=10%			Noise=15%		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	66.67	100.00	100.00	50.00	41.67	50.00	33.33	16.67	0.00
	Mixline	41.67	100.00	100.00	25.00	75.00	100.00	16.67	0.00	66.67
	Moreline	41.67	100.00	100.00	16.67	16.67	50.00	25.00	8.33	25.00
	multiline	25.00	66.67	100.00	33.33	75.00	100.00	33.33	8.33	66.67
200 x 200	Line	75.00	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	33.33	50.00	66.67
	Mixline	75.00	100.00	100.00	66.67	91.67	100.00	41.67	91.67	100.00
	Moreline	41.67	100.00	100.00	33.33	75.00	100.00	33.33	33.33	91.67
	multiline	66.67	91.67	100.00	33.33	50.00	91.67	33.33	33.33	100.00
300 x 300	Line	83.33	100.00	91.67	50.00	100.00	100.00	41.67	50.00	91.67
	Mixline	100.00	100.00	100.00	50.00	91.67	100.00	33.33	41.67	100.00
	Moreline	66.67	100.00	100.00	33.33	75.00	100.00	33.33	41.67	100.00
	multiline	58.33	91.67	100.00	50.00	58.33	91.67	33.33	33.33	100.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ จ.2 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์

		Noise=5%			Noise=10%			Noise=15%		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	70.25	0.00	0.00	84.75	65.58	2.83	147.50	110.67	41.17
	Mixline	87.08	0.00	0.00	118.42	49.42	0.00	179.17	83.92	0.33
	Moreline	75.00	0.00	0.00	136.50	50.92	38.25	117.50	78.00	31.00
	multiline	101.33	46.83	0.00	59.67	21.33	0.00	65.33	75.42	15.00
200 x 200	Line	52.50	0.00	0.00	50.00	0.00	0.00	82.50	38.25	7.75
	Mixline	32.58	0.00	0.00	45.17	15.25	0.00	100.00	13.42	0.00
	Moreline	72.50	0.00	0.00	89.00	47.42	0.00	81.58	73.42	29.92
	multiline	45.08	5.00	0.00	94.50	71.75	16.58	124.33	82.00	0.00
300 x 300	Line	17.42	0.00	0.33	47.00	0.00	0.00	67.42	46.75	22.58
	Mixline	0.00	0.00	0.00	77.25	4.92	0.00	64.75	59.92	0.00
	Moreline	55.00	0.00	0.00	132.33	44.67	0.00	124.83	120.17	0.00
	multiline	60.00	19.83	0.00	84.83	65.17	1.83	133.83	80.25	0.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

II. บริเวณเขตมีนบุรี

ตารางที่ จ.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์

		Noise=5%			Noise=10%			Noise=15%		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	41.67	100.00	100.00	8.33	25.00	16.67	0.00	0.00	8.33
	Mixline	16.67	58.33	66.67	0.00	0.00	0.00	8.33	0.00	0.00
	Moreline	50.00	100.00	100.00	25.00	25.00	58.33	8.33	16.67	25.00
	multiline	25.00	50.00	100.00	25.00	33.33	100.00	8.33	0.00	58.33
200 x 200	Line	66.67	100.00	100.00	41.67	41.67	100.00	8.33	16.67	58.33
	Mixline	50.00	66.67	100.00	25.00	33.33	100.00	16.67	16.67	33.33
	Moreline	58.33	100.00	100.00	33.33	50.00	100.00	33.33	41.67	100.00
	multiline	33.33	50.00	100.00	25.00	33.33	100.00	8.33	8.33	66.67
300 x 300	Line	75.00	100.00	100.00	25.00	41.67	100.00	33.33	25.00	83.33
	Mixline	50.00	83.33	100.00	50.00	50.00	100.00	33.33	33.33	91.67
	Moreline	41.67	75.00	100.00	33.33	41.67	100.00	33.33	33.33	100.00
	multiline	33.33	50.00	100.00	33.33	33.33	100.00	33.33	33.33	100.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ จ.4 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์

		Noise=5%			Noise=10%			Noise=15%		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	80.42	0.00	0.00	164.67	80.50	60.92	154.42	139.08	92.50
	Mixline	133.58	32.66	22.50	86.33	95.50	55.00	163.67	87.50	69.42
	Moreline	92.25	0.00	0.00	116.50	34.83	0.42	119.75	113.58	32.00
	multiline	108.00	91.33	0.00	65.33	66.92	0.00	134.42	132.92	45.25
200 x 200	Line	40.17	0.00	0.00	47.50	45.00	0.00	136.67	94.75	32.42
	Mixline	108.08	66.00	0.00	141.25	90.25	0.00	102.50	118.75	19.42
	Moreline	52.50	0.00	0.00	65.08	54.92	0.00	56.33	51.58	0.00
	multiline	118.33	60.75	0.00	121.33	55.42	0.00	181.50	113.00	16.67
300 x 300	Line	20.08	0.00	0.00	84.75	59.75	0.00	132.08	134.33	30.00
	Mixline	52.50	4.92	0.00	82.17	42.58	0.00	97.08	37.42	14.25
	Moreline	65.00	24.75	0.00	69.75	54.83	0.00	77.33	76.83	0.00
	multiline	79.92	55.08	0.00	119.92	96.91	0.00	106.75	61.08	0.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

III. บริเวณเขตดอนเมือง

ตารางที่ จ.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์

		Noise=5%			Noise=10%			Noise=15%		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	91.67	50.00	66.67	58.33
	Mixline	41.67	75.00	100.00	33.33	75.00	100.00	25.00	50.00	91.67
	Moreline	41.67	100.00	100.00	50.00	91.67	100.00	33.33	91.67	100.00
	multiline	33.33	66.67	100.00	33.33	50.00	100.00	25.00	50.00	100.00
200 x 200	Line	58.33	100.00	100.00	16.67	41.67	100.00	25.00	33.33	83.33
	Mixline	50.00	75.00	100.00	50.00	58.33	100.00	33.33	33.33	100.00
	Moreline	75.00	91.67	100.00	41.67	91.67	100.00	50.00	75.00	100.00
	multiline	50.00	75.00	100.00	41.67	66.67	100.00	41.67	58.33	100.00
300 x 300	Line	66.67	100.00	100.00	50.00	75.00	100.00	50.00	66.67	100.00
	Mixline	58.33	75.00	100.00	58.33	66.67	100.00	25.00	33.33	100.00
	Moreline	66.67	91.67	100.00	41.67	58.33	91.67	33.33	41.67	100.00
	multiline	33.33	66.67	100.00	33.33	41.67	100.00	33.33	41.67	100.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ จ.6 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์

		Noise=5%			Noise=10%			Noise=15%		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	54.75	0.00	0.00	47.25	0.00	13.00	46.83	0.33	2.66
	Mixline	82.42	29.67	0.00	143.33	71.25	0.00	135.33	69.92	15.42
	Moreline	80.08	0.00	0.00	68.17	5.92	0.00	110.17	24.00	0.00
	multiline	100.75	41.25	0.00	91.33	66.08	0.00	106.08	45.83	0.00
200 x 200	Line	27.50	0.00	0.00	114.58	109.50	0.00	99.67	75.08	1.83
	Mixline	69.83	24.92	0.00	107.58	85.00	0.00	112.08	99.58	0.00
	Moreline	49.92	2.42	0.00	82.67	9.92	0.00	90.00	24.75	0.00
	multiline	84.92	29.42	0.00	82.08	45.83	0.00	64.58	54.75	0.00
300 x 300	Line	49.75	0.00	0.00	67.33	17.17	0.00	49.92	25.17	0.00
	Mixline	72.50	40.00	0.00	61.92	63.75	0.00	144.42	98.25	0.00
	Moreline	25.83	1.42	0.00	81.83	65.33	14.92	127.08	72.33	0.00
	multiline	97.42	38.92	0.00	94.67	109.67	0.00	109.33	54.67	0.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ภาคผนวก ฉ.

การทดลองวัดความทนทานต่อความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอ

การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองนำภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกันไปทำการปรับความสว่างในภาพทั้งปรับให้มืดลงและสว่างขึ้น โดยทำการปรับทั้งสิ้น 12 ลำดับ คือ -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60

ในการทดลองนี้ได้ใช้ภาพตั้งต้นจากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง เขตมีนบุรี และเขตดอนเมือง ผลการทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอแสดงในตารางที่ ฉ.1- ฉ.6

I. บริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ ฉ.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60

		Bright = -10			Bright = -20			Bright= -30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	Mixline	33.33	100.00	58.33	33.33	100.00	66.67	41.67	100.00	58.33
	Moreline	50.00	100.00	83.33	41.67	100.00	75.00	50.00	100.00	58.33
	multiline	33.33	91.67	91.67	33.33	91.67	91.67	33.33	58.33	58.33
200 x 200	Line	66.67	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00
	Mixline	75.00	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	Moreline	75.00	100.00	100.00	75.00	100.00	91.67	66.67	100.00	91.67
	multiline	58.33	91.67	91.67	58.33	91.67	91.67	58.33	91.67	91.67
300 x 300	Line	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	Mixline	83.33	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00
	Moreline	91.67	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
	multiline	66.67	100.00	100.00	50.00	91.67	91.67	58.33	100.00	100.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.1 (ต่อ)

		Bright = -40			Bright = -50			Bright= -60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	58.33	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	Mixline	41.67	100.00	75.00	50.00	100.00	58.33	41.67	91.67	50.00
	Moreline	33.33	91.67	41.67	33.33	75.00	33.33	25.00	75.00	50.00
	multiline	33.33	83.33	83.33	33.33	58.33	58.33	25.00	75.00	75.00
200 x 200	Line	75.00	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
	Mixline	75.00	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
	Moreline	58.33	100.00	83.33	66.67	100.00	83.33	41.67	91.67	50.00
	multiline	50.00	100.00	100.00	50.00	91.67	91.67	41.67	91.67	91.67
300 x 300	Line	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	Mixline	75.00	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	83.33	91.67	91.67
	Moreline	83.33	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00
	multiline	58.33	100.00	100.00	75.00	91.67	91.67	58.33	100.00	100.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.1 (ต่อ)

		Bright = +10			Bright = +20			Bright= +30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	Mixline	33.33	100.00	58.33	33.33	100.00	75.00	41.67	100.00	75.00
	Moreline	58.33	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00	50.00	100.00	100.00
	multiline	41.67	83.33	83.33	33.33	83.33	83.33	25.00	83.33	83.33
200 x 200	Line	75.00	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
	Mixline	75.00	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
	Moreline	66.67	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00
	multiline	50.00	91.67	91.67	58.33	91.67	91.67	58.33	91.67	91.67
300 x 300	Line	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	Mixline	91.67	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	Moreline	83.33	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00	50.00	100.00	100.00
	multiline	75.00	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.1 (ต่อ)

		Bright = +40			Bright = +50			Bright= +60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	Mixline	41.67	100.00	75.00	41.67	100.00	75.00	41.67	100.00	66.67
	Moreline	58.33	100.00	100.00	50.00	100.00	91.67	58.33	100.00	75.00
	multiline	33.33	75.00	75.00	41.67	66.67	66.67	33.33	83.33	83.33
200 x 200	Line	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	Mixline	75.00	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00
	Moreline	83.33	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
	multiline	66.67	91.67	91.67	50.00	91.67	91.67	58.33	91.67	91.67
300 x 300	Line	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	Mixline	91.67	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
	Moreline	83.33	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00
	multiline	66.67	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.2 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60

		Bright = -10			Bright = -20			Bright= -30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	69.92	0.00	0.00	72.50	0.00	0.00	52.42	0.00	0.00
	Mixline	112.17	0.00	32.75	108.17	0.00	62.25	108.25	0.00	59.67
	Moreline	80.92	0.00	7.17	63.25	0.00	9.58	82.92	0.00	64.25
	multiline	71.33	4.92	4.92	87.33	24.00	24.00	78.00	22.17	22.17
200 x 200	Line	60.00	0.00	0.00	17.50	0.00	0.00	42.50	0.00	0.00
	Mixline	22.58	0.00	0.00	30.08	0.00	0.00	22.67	0.00	0.00
	Moreline	35.00	0.00	0.00	44.92	0.00	2.58	62.67	0.00	2.33
	multiline	57.33	4.83	4.83	59.83	4.92	4.92	50.00	2.58	2.58
300 x 300	Line	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mixline	15.17	0.00	0.00	17.58	0.00	0.00	15.08	0.00	0.00
	Moreline	14.92	0.00	0.00	32.42	0.00	0.00	29.92	0.00	0.00
	multiline	65.00	0.00	0.00	68.33	0.83	0.83	60.00	0.00	0.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.2 (ต่อ)

		Bright = -40			Bright = -50			Bright= -60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	72.42	0.00	0.00	62.67	0.00	0.00	57.67	0.00	0.00
	Mixline	72.58	0.00	35.17	101.92	0.00	47.42	110.25	0.58	83.67
	Moreline	111.50	2.00	79.67	116.92	8.08	76.58	99.42	33.25	19.83
	multiline	84.91	24.00	24.00	95.25	40.08	40.08	115.42	27.67	27.67
200 x 200	Line	52.42	0.00	0.00	15.08	0.00	0.00	27.42	0.00	0.00
	Mixline	40.00	0.00	0.00	30.08	0.00	0.00	19.92	0.00	0.00
	Moreline	57.50	0.00	27.42	54.25	0.00	19.92	47.58	2.50	59.17
	multiline	74.75	0.00	0.00	61.50	5.08	5.08	96.83	21.00	21.00
300 x 300	Line	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mixline	40.00	0.00	0.00	20.25	0.00	0.00	27.50	20.08	20.08
	Moreline	27.50	0.00	0.00	22.67	0.00	0.00	52.50	0.00	0.00
	multiline	59.83	0.00	0.00	10.00	17.58	17.58	66.83	0.00	0.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.2 (ต่อ)

		Bright = +10			Bright = +20			Bright= +30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	72.33	0.00	0.00	72.33	0.00	0.00	72.58	0.00	0.00
	Mixline	96.08	0.00	32.75	100.00	0.00	40.00	77.25	0.00	27.67
	Moreline	62.75	0.00	0.00	75.17	0.00	0.00	70.25	0.00	0.00
	multiline	76.83	11.58	11.58	116.75	44.00	44.00	87.50	23.50	23.50
200 x 200	Line	37.58	0.00	0.00	17.50	0.00	0.00	15.00	0.00	0.00
	Mixline	32.58	0.00	0.00	22.50	0.00	0.00	19.92	0.00	0.00
	Moreline	52.42	0.00	0.00	80.08	0.00	0.00	37.58	0.00	0.00
	multiline	47.50	2.50	2.50	57.42	10.00	10.00	42.42	2.58	2.58
300 x 300	Line	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mixline	14.92	0.00	0.00	17.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Moreline	37.33	0.00	0.00	17.67	0.00	0.00	42.50	0.00	0.00
	multiline	12.42	0.00	0.00	44.92	0.00	0.00	35.00	0.00	0.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.2 (ต่อ)

		Bright = +40			Bright = +50			Bright= +60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	72.50	0.00	0.00	72.17	0.00	0.00	62.25	0.00	0.00
	Mixline	82.00	0.00	34.67	70.08	0.00	37.42	109.50	0.00	45.08
	Moreline	62.33	0.00	0.00	67.75	0.00	27.25	77.67	0.00	9.83
	multiline	96.75	17.75	17.75	65.42	32.42	32.42	123.58	26.50	26.50
200 x 200	Line	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	55.00	0.00	0.00
	Mixline	30.08	0.00	0.00	15.08	0.00	0.00	20.08	0.00	0.00
	Moreline	32.67	0.00	0.00	42.58	0.00	0.00	35.00	0.00	0.00
	multiline	78.08	4.92	4.92	50.00	2.42	2.42	47.50	10.00	10.00
300 x 300	Line	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mixline	17.50	0.00	0.00	2.50	0.00	0.00	32.42	0.00	0.00
	Moreline	10.00	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00
	multiline	67.50	0.00	0.00	32.50	0.00	0.00	37.42	0.00	0.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

II. บริเวณเขตมีนบุรี

ตารางที่ ฉ.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60

		Bright = -10			Bright = -20			Bright= -30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	50.00	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00
	Mixline	50.00	100.00	100.00	50.00	100.00	100.00	41.67	91.67	91.67
	Moreline	41.67	100.00	100.00	41.67	100.00	100.00	41.67	100.00	100.00
	multiline	25.00	58.33	58.33	25.00	58.33	58.33	33.33	50.00	50.00
200 x 200	Line	83.33	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00
	Mixline	66.67	91.67	83.33	58.33	91.67	83.33	58.33	91.67	83.33
	Moreline	75.00	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	multiline	50.00	66.67	66.67	50.00	66.67	66.67	50.00	66.67	66.67
300 x 300	Line	83.33	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
	Mixline	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00
	Moreline	58.33	91.67	91.67	58.33	100.00	100.00	58.33	91.67	91.67
	multiline	58.33	83.33	83.33	58.33	83.33	83.33	58.33	83.33	83.33

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.3 (ต่อ)

		Bright = -40			Bright = -50			Bright= -60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	50.00	100.00	100.00	41.67	83.33	83.33	41.67	100.00	100.00
	Mixline	33.33	83.33	83.33	33.33	66.67	66.67	16.67	41.67	41.67
	Moreline	41.67	100.00	100.00	41.67	100.00	100.00	41.67	100.00	100.00
	multiline	25.00	50.00	50.00	25.00	41.67	41.67	16.67	33.33	33.33
200 x 200	Line	83.33	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	Mixline	58.33	91.67	83.33	66.67	83.33	83.33	58.33	83.33	83.33
	Moreline	58.33	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	50.00	100.00	100.00
	multiline	50.00	58.33	58.33	33.33	50.00	50.00	33.33	50.00	50.00
300 x 300	Line	83.33	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00
	Mixline	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	58.33	91.67	91.67
	Moreline	58.33	83.33	83.33	58.33	100.00	100.00	50.00	91.67	91.67
	multiline	50.00	66.67	66.67	50.00	66.67	66.67	33.33	33.33	33.33

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.3 (ต่อ)

		Bright = +10			Bright = +20			Bright= +30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	50.00	100.00	100.00	50.00	100.00	100.00	50.00	100.00	100.00
	Mixline	50.00	100.00	100.00	50.00	100.00	100.00	50.00	100.00	100.00
	Moreline	41.67	100.00	100.00	41.67	100.00	100.00	41.67	100.00	100.00
	multiline	25.00	66.67	66.67	25.00	66.67	66.67	33.33	66.67	66.67
200 x 200	Line	75.00	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
	Mixline	66.67	91.67	100.00	66.67	91.67	83.33	66.67	83.33	83.33
	Moreline	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00
	multiline	50.00	66.67	66.67	58.33	83.33	83.33	58.33	83.33	83.33
300 x 300	Line	91.67	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	Mixline	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	Moreline	58.33	91.67	91.67	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	multiline	58.33	83.33	83.33	58.33	91.67	91.67	58.33	83.33	83.33

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.3 (ต่อ)

		Bright = +40			Bright = +50			Bright= +60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	41.67	100.00	100.00	50.00	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00
	Mixline	50.00	100.00	100.00	50.00	100.00	100.00	50.00	100.00	100.00
	Moreline	33.33	100.00	100.00	33.33	100.00	100.00	41.67	100.00	100.00
	multiline	33.33	58.33	58.33	33.33	66.67	66.67	33.33	58.33	58.33
200 x 200	Line	83.33	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
	Mixline	58.33	91.67	83.33	66.67	91.67	91.67	75.00	100.00	91.67
	Moreline	50.00	91.67	91.67	50.00	91.67	91.67	58.33	100.00	100.00
	multiline	50.00	66.67	66.67	50.00	66.67	66.67	58.33	83.33	83.33
300 x 300	Line	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	Mixline	75.00	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00
	Moreline	41.67	100.00	100.00	41.67	100.00	100.00	50.00	91.67	91.67
	multiline	66.67	83.33	83.33	58.33	83.33	83.33	58.33	91.67	91.67

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.4 แสดงค่าความกาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60

		Bright = -10			Bright = -20			Bright= -30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	92.58	0.00	0.00	75.17	0.00	0.00	74.92	0.00	0.00
	Mixline	96.92	0.00	0.00	109.75	0.00	0.00	102.00	0.08	0.08
	Moreline	122.50	0.00	0.00	112.33	0.00	0.00	107.08	0.00	0.00
	multiline	115.00	50.92	50.92	110.42	22.58	22.58	99.83	60.83	60.83
200 x 200	Line	27.58	0.00	0.00	42.42	0.00	0.00	42.50	0.00	0.00
	Mixline	72.25	2.42	19.75	62.25	9.83	37.42	69.83	2.42	27.25
	Moreline	27.42	0.00	0.00	37.50	0.00	0.00	42.42	0.00	0.00
	multiline	57.42	24.25	24.25	79.75	59.83	59.83	87.25	45.00	45.00
300 x 300	Line	20.00	0.00	0.00	17.50	0.00	0.00	17.42	0.00	0.00
	Mixline	44.83	0.00	0.00	14.92	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00
	Moreline	37.42	2.50	2.50	52.42	0.00	0.00	67.58	13.58	13.58
	multiline	42.17	30.42	30.42	67.42	27.42	27.42	61.08	34.08	34.08

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.4 (ต่อ)

		Bright = -40			Bright = -50			Bright= -60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	90.33	0.00	0.00	72.50	0.17	0.17	92.83	0.00	0.00
	Mixline	96.83	0.50	0.50	94.58	15.33	15.33	128.92	23.42	23.42
	Moreline	97.08	0.00	0.00	110.50	0.00	0.00	99.75	0.00	0.00
	multiline	128.42	65.33	65.33	134.17	71.92	71.92	125.58	54.00	54.00
200 x 200	Line	22.50	0.00	0.00	37.42	0.00	0.00	37.58	0.00	0.00
	Mixline	49.92	2.42	19.83	57.42	29.83	19.67	82.33	27.42	27.25
	Moreline	35.08	0.00	0.00	47.42	0.00	0.00	65.17	0.00	0.00
	multiline	100.58	22.67	22.67	89.33	53.50	53.50	126.00	81.33	81.33
300 x 300	Line	27.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.08	0.00	0.00
	Mixline	32.50	0.00	0.00	24.92	0.00	0.00	27.33	5.08	5.08
	Moreline	84.75	37.33	37.33	67.33	0.00	0.00	77.33	4.83	4.83
	multiline	36.92	19.83	19.83	37.25	17.75	17.75	91.42	103.25	103.25

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.4 (ต่อ)

		Bright = +10			Bright = +20			Bright= +30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	92.00	0.00	0.00	90.33	0.00	0.00	79.75	0.00	0.00
	Mixline	92.25	0.00	0.00	107.08	0.00	0.00	94.58	0.00	0.00
	Moreline	103.67	0.00	0.00	87.17	0.00	0.00	111.93	0.00	0.00
	multiline	135.75	44.08	44.08	132.92	71.83	71.83	87.00	49.50	49.50
200 x 200	Line	35.00	0.00	0.00	37.33	0.00	0.00	17.50	0.00	0.00
	Mixline	49.92	2.41	0.00	50.00	2.33	19.92	62.33	34.83	20.00
	Moreline	42.50	0.00	0.00	52.50	0.00	0.00	57.50	0.00	0.00
	multiline	77.17	39.92	39.92	43.33	16.00	16.00	32.42	4.83	4.83
300 x 300	Line	14.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mixline	42.50	0.00	0.00	19.92	0.00	0.00	14.92	0.00	0.00
	Moreline	54.92	27.42	27.42	32.50	0.00	0.00	17.50	0.00	0.00
	multiline	52.50	20.00	20.00	67.42	12.67	12.67	29.83	27.17	27.17

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.4 (ต่อ)

		Bright = +40			Bright = +50			Bright= +60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	85.33	0.00	0.00	85.33	0.00	0.00	62.42	0.00	0.00
	Mixline	92.08	0.00	0.00	89.58	0.00	0.00	87.33	0.00	0.00
	Moreline	102.67	0.00	0.00	85.75	0.00	0.00	79.83	0.00	0.00
	multiline	94.75	50.75	50.75	95.92	29.33	29.33	84.00	51.75	51.75
200 x 200	Line	17.50	0.00	0.00	27.50	0.00	0.00	30.08	0.00	0.00
	Mixline	69.83	24.83	27.42	42.42	2.41	17.33	32.50	0.00	17.50
	Moreline	62.50	22.33	22.33	65.75	23.00	23.00	55.08	0.00	0.00
	multiline	77.83	40.33	40.33	69.75	31.25	31.25	58.17	23.17	23.17
300 x 300	Line	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mixline	22.42	0.00	0.00	32.50	0.00	0.00	47.50	0.00	0.00
	Moreline	59.92	0.00	0.00	72.42	0.00	0.00	77.33	2.50	2.50
	multiline	34.75	29.75	29.75	50.00	20.33	20.33	42.50	19.92	19.92

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

III. บริเวณเขตดอนเมือง

ตารางที่ ฉ.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60

		Bright = -10			Bright = -20			Bright= -30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	58.33	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00
	Mixline	25.00	91.67	91.67	41.67	91.67	91.67	41.67	91.67	91.67
	Moreline	33.33	100.00	100.00	33.33	91.67	91.67	25.00	91.67	91.67
	multiline	41.67	66.67	66.67	25.00	58.33	58.33	25.00	58.33	58.33
200 x 200	Line	58.33	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00	58.33	91.67	91.67
	Mixline	66.67	83.33	83.33	66.67	83.33	83.33	58.33	83.33	83.33
	Moreline	58.33	100.00	100.00	66.67	91.67	91.67	75.00	100.00	100.00
	multiline	50.00	66.67	66.67	50.00	66.67	66.67	50.00	75.00	75.00
300 x 300	Line	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	Mixline	83.33	91.67	91.67	91.67	100.00	100.00	75.00	91.67	91.67
	Moreline	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00
	multiline	50.00	83.33	83.33	66.67	91.67	91.67	58.33	91.67	91.67

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.5 (ต่อ)

		Bright = -40			Bright = -50			Bright= -60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	58.33	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	Mixline	41.67	75.00	75.00	41.67	83.33	83.33	41.67	75.00	75.00
	Moreline	25.00	100.00	100.00	41.67	91.67	91.67	41.67	91.67	91.67
	multiline	25.00	58.33	58.33	33.33	58.33	58.33	25.00	58.33	58.33
200 x 200	Line	50.00	83.33	83.33	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	Mixline	41.67	75.00	75.00	50.00	91.67	91.67	41.67	66.67	66.67
	Moreline	75.00	83.33	83.33	66.67	91.67	91.67	66.67	100.00	100.00
	multiline	50.00	75.00	75.00	58.33	83.33	83.33	50.00	83.33	83.33
300 x 300	Line	91.67	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00	83.33	100.00	100.00
	Mixline	58.33	83.33	83.33	58.33	66.67	66.67	50.00	75.00	75.00
	Moreline	66.67	100.00	100.00	66.67	83.33	83.33	66.67	83.33	83.33
	multiline	50.00	83.33	83.33	50.00	66.67	66.67	58.33	91.67	91.67

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.5 (ต่อ)

		Bright = +10			Bright = +20			Bright= +30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	Mixline	41.67	100.00	100.00	50.00	91.67	91.67	50.00	91.67	91.67
	Moreline	33.33	100.00	100.00	33.33	100.00	100.00	33.33	91.67	91.67
	multiline	25.00	58.33	58.33	25.00	58.33	58.33	25.00	58.33	58.33
200 x 200	Line	66.67	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00
	Mixline	58.33	75.00	75.00	58.33	75.00	75.00	66.67	91.67	91.67
	Moreline	58.33	100.00	100.00	58.33	91.67	91.67	58.33	91.67	91.67
	multiline	58.33	91.67	91.67	50.00	75.00	75.00	58.33	75.00	75.00
300 x 300	Line	91.67	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00
	Mixline	91.67	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00
	Moreline	58.33	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00
	multiline	50.00	66.67	66.67	41.67	66.67	66.67	50.00	75.00	75.00

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.5 (ต่อ)

		Bright = +40			Bright = +50			Bright= +60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00
	Mixline	58.33	91.67	91.67	41.67	83.33	83.33	58.33	100.00	100.00
	Moreline	41.67	100.00	100.00	25.00	100.00	100.00	25.00	100.00	100.00
	multiline	25.00	66.67	66.67	25.00	66.67	66.67	25.00	50.00	50.00
200 x 200	Line	58.33	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00	58.33	100.00	100.00
	Mixline	75.00	91.67	91.67	66.67	91.67	91.67	50.00	91.67	91.67
	Moreline	66.67	91.67	91.67	58.33	100.00	100.00	58.33	91.67	91.67
	multiline	58.33	91.67	91.67	58.33	83.33	83.33	58.33	100.00	100.00
300 x 300	Line	91.67	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	Mixline	91.67	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00	91.67	100.00	100.00
	Moreline	83.33	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00	75.00	100.00	100.00
	multiline	41.67	75.00	75.00	50.00	100.00	100.00	33.33	91.67	91.67

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.6 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน เมื่อมีการปรับความเข้มแสงในภาพเป็น -60, -50, -40, -30, -20, -10, +10, +20, +30, +40, +50, +60

		Bright = -10			Bright = -20			Bright= -30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	72.17	0.00	0.00	49.92	0.00	0.00	74.92	0.00	0.00
	Mixline	79.00	2.42	2.42	75.00	3.33	3.33	87.25	2.42	2.42
	Moreline	107.92	0.00	0.00	83.83	1.33	1.33	110.92	2.92	2.92
	multiline	88.83	30.17	30.17	134.67	23.67	23.67	115.92	23.00	23.00
200 x 200	Line	67.50	0.00	0.00	82.17	0.00	0.00	64.92	4.92	4.92
	Mixline	82.25	29.33	29.83	42.42	30.25	30.25	94.75	44.75	44.75
	Moreline	79.92	0.00	0.00	52.33	9.75	9.75	42.50	0.00	0.00
	multiline	74.92	28.58	28.58	32.17	10.00	10.00	82.25	17.25	17.25
300 x 300	Line	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mixline	12.50	2.50	2.50	19.83	0.00	0.00	25.00	2.42	2.42
	Moreline	50.00	0.00	0.00	70.83	0.00	0.00	14.67	0.00	0.00
	multiline	49.83	17.42	17.42	31.33	1.33	1.33	62.08	2.17	2.17

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.6 (ต่อ)

		Bright = -40			Bright = -50			Bright= -60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	79.92	0.00	0.00	65.00	0.00	0.00	54.92	0.00	0.00
	Mixline	67.00	31.92	31.92	77.58	15.92	15.92	93.92	32.00	32.00
	Moreline	150.67	0.00	0.00	121.42	1.58	1.58	81.42	1.58	1.58
	multiline	134.58	49.75	49.75	114.75	43.58	43.58	115.50	65.50	65.50
200 x 200	Line	84.58	7.50	7.50	30.00	0.00	0.00	69.75	0.00	0.00
	Mixline	86.83	28.33	28.33	84.83	17.42	17.42	91.08	28.00	28.00
	Moreline	27.83	10.25	10.25	73.67	4.92	4.92	70.00	0.00	0.00
	multiline	81.75	21.50	21.50	67.75	8.75	8.75	109.08	21.08	21.08
300 x 300	Line	0.08	0.00	0.00	12.42	0.00	0.00	10.00	0.00	0.00
	Mixline	69.75	21.00	21.00	43.67	48.25	48.25	81.25	31.50	31.50
	Moreline	47.67	0.00	0.00	50.58	22.50	22.50	66.42	24.75	24.75
	multiline	92.33	25.83	25.83	101.67	31.83	31.83	72.25	12.67	12.67

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.6 (ต่อ)

		Bright = +10			Bright = +20			Bright= +30		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	59.92	0.00	0.00	64.92	0.00	0.00	55.00	0.00	0.00
	Mixline	57.58	0.00	0.00	85.00	2.50	2.50	70.08	24.92	24.92
	Moreline	89.25	0.00	0.00	87.67	0.00	0.00	86.42	7.33	7.33
	multiline	126.58	48.08	48.08	103.92	65.58	65.58	141.58	69.42	69.42
200 x 200	Line	37.50	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	25.08	0.00	0.00
	Mixline	52.42	27.67	27.67	65.00	20.17	20.17	54.75	18.00	18.00
	Moreline	70.00	0.00	0.00	68.00	2.50	2.50	60.00	20.00	20.00
	multiline	30.00	2.50	2.50	62.42	42.50	42.50	54.83	37.33	37.33
300 x 300	Line	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.50	0.00	0.00
	Mixline	15.00	0.00	0.00	2.50	0.00	0.00	15.00	0.00	0.00
	Moreline	67.50	0.00	0.00	37.58	0.00	0.00	37.50	0.00	0.00
	multiline	55.83	40.83	40.83	75.17	32.92	32.92	84.75	42.58	42.58

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ตารางที่ ฉ.6 (ต่อ)

		Bright = +40			Bright = +50			Bright= +60		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
100 x 100	Line	54.92	0.00	0.00	52.33	0.00	0.00	67.58	0.00	0.00
	Mixline	53.92	2.50	2.50	95.00	3.92	3.92	69.92	0.00	0.00
	Moreline	79.83	0.00	0.00	96.17	0.00	0.00	90.08	0.00	0.00
	multiline	100.75	39.25	39.25	117.08	21.58	21.58	104.08	45.67	45.67
200 x 200	Line	49.92	0.00	0.00	72.50	0.00	0.00	77.50	0.00	0.00
	Mixline	10.08	5.00	5.00	49.92	24.92	24.92	72.50	2.42	2.42
	Moreline	51.50	8.83	8.83	77.50	0.00	0.00	63.92	1.50	1.50
	multiline	57.50	10.08	10.08	67.42	11.83	11.83	60.00	0.00	0.00
300 x 300	Line	24.92	0.00	0.00	24.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mixline	12.50	0.00	0.00	15.00	0.00	0.00	5.00	0.00	0.00
	Moreline	35.00	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	29.92	0.00	0.00
	multiline	122.25	35.92	35.92	95.00	0.00	0.00	74.83	2.58	2.58

I. Hough Transform and Phase Correlation

II. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search

III. Full Search

ภาคผนวก ช.

ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

[1] Siwaphon Chunhavittayatera, Orachat Chitsobhuk and Kiatnarong Tongprasert, "Image Registration using Hough Transform and Phase Correlation", The 8th International Conference in Advanced Communication Technology, pp. 973-977, 2006.

[2] Siwaphon Chunhavittayatera and Orachat Chitsobhuk, "Image Registration using Hough Transform, Phase Correlation and Best-first search algorithm", The 2007 IAENG International Conference on Imaging Engineering, Vol. 2, pp. 1898-1902, 2007.

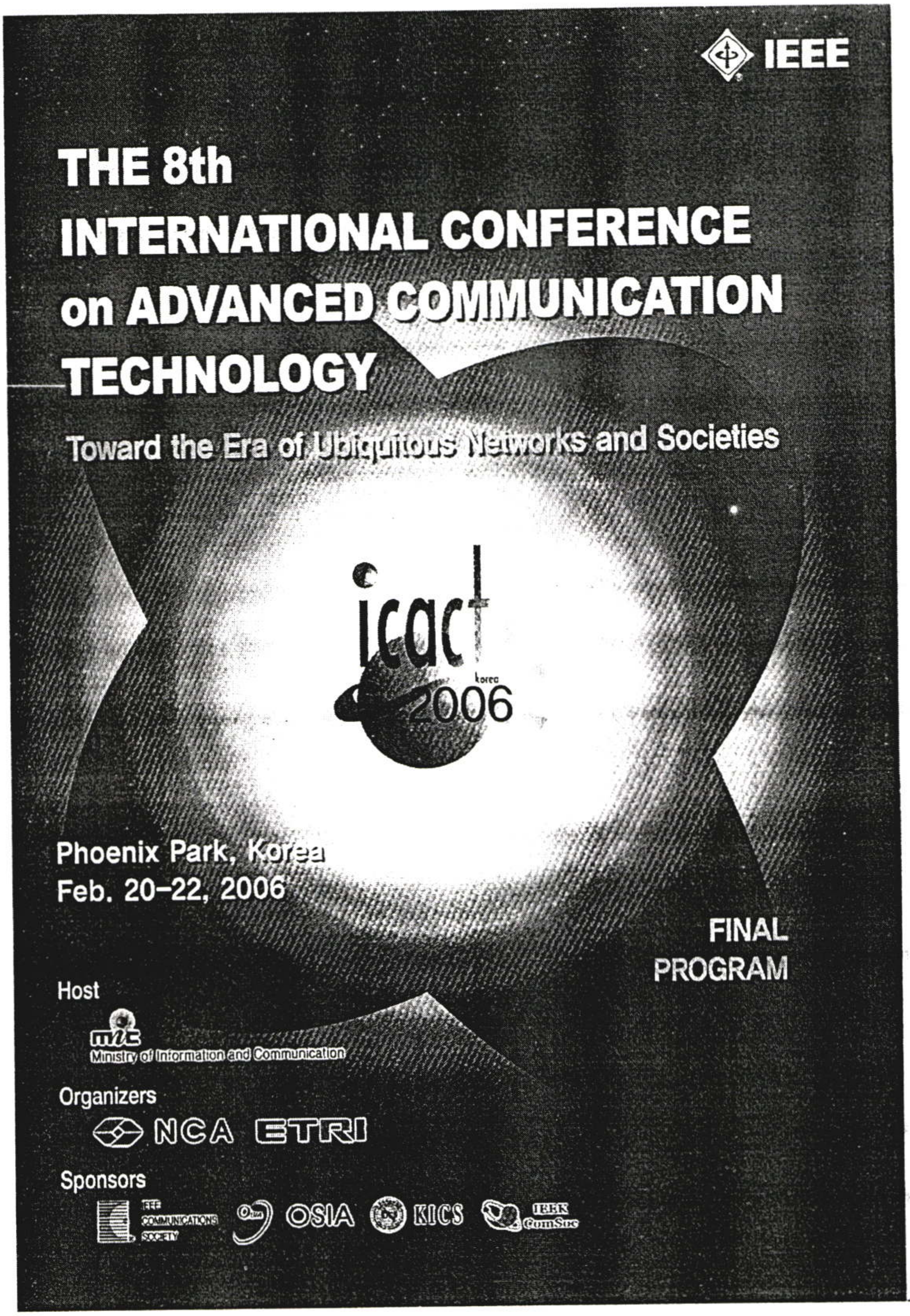

IEEE
THE 8th
INTERNATIONAL CONFERENCE
on ADVANCED COMMUNICATION
TECHNOLOGY
Toward the Era of Ubiquitous Networks and Societies
icact
korea
2006
Phoenix Park, Korea
Feb. 20–22, 2006
FINAL
PROGRAM
Host
mic
Ministry of Information and Communication
Organizers
NCA
ETRI
Sponsors
IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY
OSIA
KICS
IEEK ComSoc

Image Registration using Hough Transform and Phase Correlation

Siwaphon Chunhavittayatera
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
siwa_382@hotmail.com

Orachat Chitsobhuk
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
kcoracha@kmitl.ac.th

Kiatnarong Tongprasert
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
ktkiatna@kmitl.ac.th

***Abstract* — This paper presents image registration using a combination of Hough transform and phase correlation technique in Fourier domain to estimate rotation and translation parameters. These paramters are used to register input images and create a seamless representation of the registered image. The first step is based on 1D phase correlation which calculates the translation of angle in Hough space, obtained form Hough transform. The rotation parameter obtain from this step is used to de-rotated the input images. The second step provides the translation in x-y axis using 2D phase correlation. Finally, the input images are registered using the estimated translation parameter. The experimental results show the accuracy of the proposed method to detect the translation parameters and find the relevant potential angles of rotation for various image details and sizes. The proposed method is ease to operation, less computation complexity, thus requires less amount of process time due to the high efficiency of fast Fourier transform (FFT).**

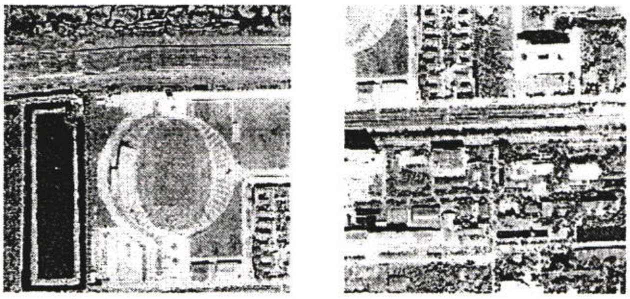
***Keywords* — image registration, Hough transform, phase correlation**

1. Introduction

Image Registration is one of the most active fields in image processing and computer vision for a few decades [1]. It is a crucial step in all image analysis tasks in which the information is gained by combining various data sources, such as remote sensing, image fusion, image mosaicing, environmental monitoring, medical image processing, video compression, image enhancement and restoration [2].

Taking an image sometimes can not capture all the details of an interesting scene due to a limitation of the camera viewpoint, zooming ability, or resolution. Therefore, several images should be taken in order to obtain all the details of the scene. Image registration is a process of registering or aligning two or more images of the same scene and making a new image that contains complete details of all input images. However, an important requirement is that the input images must be overlapped in order to be registered. Registered images help us to view overall details without swapping image many times and image analysis can be done easily.

The concept of image registration shows in figure 1 and figure 2. Figure 1 shows two input images taken at different camera position which causes the translation between two images. However, there must be the overlapped area between two input images. Then, we can use Hough transform and phase correlation technique to combine two input images and make a new one that contains details of two input images.



(a) (b)

Figure 1. Two input images (a) and (b) that have overlapped area

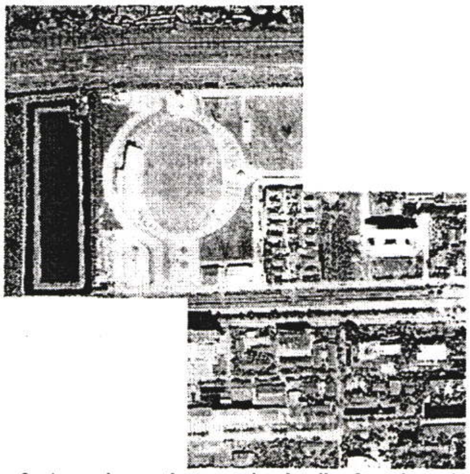


Figure 2. A new image that contains details of two input images

2. Hough transform and phase correlation

2.1 Hough transform

In this paper, Hough transform is combined with phase correlation to detect rotation and translation between two

images. Hough transform is a feature extraction technique used in digital image processing [3], [4]. The standard transform identifies lines in the image, but could be extended to identify positions of arbitrary shapes. In the proposed algorithm, the Hough function is implemented using the Standard Hough Transform (SHT). In the standard Hough transform, each line in the images is represented by two parameters, commonly called ρ (rho) and θ (theta), which represent the length and angle of the line respectively. The representation of these two parameters is sometimes referred to Hough space [5]. After Hough function is applied, each line in spatial domain is transformed to ρ and θ in polar domain. Therefore, the rotation in spatial domain will be transformed into the translation in polar domain. Then, 1D phase correlation can be applied to detect an angle of rotation as the translation in polar domain.

The Hough transform is designed to detect lines, using the parametric representation of a line as presented in (1).

$$\rho \;=\; x\cos\theta + y\sin\theta \qquad (1)$$

where ρ is the distance from the origin to the line along a vector perpendicular to the line and θ is the angle between the x-axis and this vector.

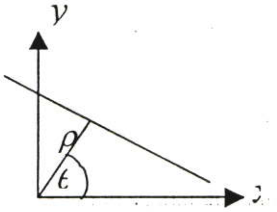


Figure 3.Hough Space representation of a line

2.2 Phase correlation

Phase correlation is one of the most widely used techniques for image registration in frequency domain to determine the relative translation between two images [6]. Phase correlation is based on Fourier shift theorem, which is easy to implement, less computation complexity, thus requires less amount of process time due to the high efficiency of fast Fourier transform (FFT). Furthermore, it is robustness to interference. However, phase correlation can deal with only translation between two images in x-y axis.

The concept of 1D phase correlation is introduced here for simplicity. The method is often derived by assuming only translation occurred between two input signals:

$$f_2(x) = f_1(x+d) \text{ ; } d \text{ is disparity}$$

The Fourier shift theorem tells that the results of Fourier transforms of two related signals satisfy:

$$F_2(\omega) \approx F_1(\omega)e^{id\omega}$$

Taking $F_1(\omega)$ divided by $F_2(\omega)$ as shown below:

$$\frac{F_2(\omega)}{F_1(\omega)} = \frac{F_2(\omega)F_1^*(\omega)}{A_2(\omega)A_1(\omega)}$$

$$\frac{F_2(\omega)}{F_1(\omega)} = \frac{A_1(\omega)A_2(\omega)e^{i(\psi_1(\omega)-\psi_2(\omega))}}{A_2(\omega)A_1(\omega)} = e^{id\omega} \qquad (2)$$

where, $e^{id\omega}$ is a sinusoidal function in the frequency domain, and therefore its inverse Fourier transform is an impulse, locating at the disparity d, that is, $\delta(x+d)$. Thus, in short, phase correlation methods measure disparity by finding peaks as follows:

$$d = \arg\max_{\omega}\left|F^{-1}\left(\frac{F_2(\omega)}{F_1(\omega)}\right)\right| \qquad (3)$$

when F^{-1} denotes inverse Fourier transform, $|\bullet|$ is the magnitude.

In this paper, 1D phase correlation is used to detect relevant potential angles of rotation from Hough space, by applying 1D phase correlation in (3) to image $R_1(\rho,\theta)$ and $R_2(\rho,\theta)$ in Hough space. Thus, the angle of rotation (θ_{rot}) can be estimated as followed:

$$\theta_{rot} = \arg_{\theta}\max\sum_{\omega}\left|F_{\theta}^{-1}\left(\frac{F_{\theta}\left(R_2^{\rho\to\omega}(\omega,\theta)\right)}{F_{\theta}\left(R_1^{\rho\to\omega}(\omega,\theta)\right)}\right)\right| \qquad (4)$$

where F_{θ} and F_{θ}^{-1} denote Fourier transform and inverse Fourier transform in direction of θ respectively.

The translation in x-y axis can be estimated using 2D phase correlation. Assuming that the relation between $I_1(x,y)$ and $I_2(x,y)$ is:

$$I_2(x,y) = I_1(x+\Delta x, y+\Delta y) \qquad (5)$$

The disparity $(\Delta x, \Delta y)$ of two input images can be derived as follow:

$$(\Delta x, \Delta y) = \arg_{\Delta x,\Delta y}\max\left|F^{-1}\left(\frac{F(I_2(x,y))}{F(I_1(x,y))}\right)\right| \qquad (6)$$

where F and F^{-1} denote 2D Fourier transform and 2D inverse Fourier transform respectively.

3. Experimental Results

The experiments are conducted based on various types of image details and sizes. There are 80 satellite images in the database, which can be categorized into 4 groups: images containing strong straight lines with smooth texture, strong straight lines with medium texture, straight lines with

high texture, and no straight line. Each group consists of images with image sizes of 100x100, 200x200, 300x300 and 400x400 pixels.

To show the performance of the proposed algorithm, several rotation and translation parameters are examined. The proposed algorithm performs 1D phase correlation and searches the rotation parameter from top five high correlation positions obtained from phase correlation. The resulted rotation parameter is used to de-rotated the image prior to translation detection process. Translation parameters are obtained from 2D phase correlation. Finally, the input images are registered according to the resulted translation parameters to create a new image.

The experiments are setup in order to show the effects of different image details and sizes resulted to the estimated rotation and translation parameters. The experiments are divided into 4 parts:

Part 1: To show the effects of different image details to the correctness of rotation parameter.

In this part, 4 groups of different image details are used with size of 100x100. The registration results of part 1 experiment are shown in figure 4-7.

Figure 4 shows that in the case of images containing strong straight lines with smooth texture, the rotate parameter obtained from the maximum value of 1D phase correlation is correctly estimated.

In the case of images containing strong straight lines with medium texture, the rotation parameter obtained from the maximum value of 1D phase correlation is not reliable in some cases. However, we have found that the correct rotation parameter could be correctly estimated if the search for rotation parameter is extended to first five high correlation values. For example in figure 5, for the example image, The top five high correlation positions are 0, 354, 20, 356, and 348. The third peak position is the correct rotate parameter.

In the case of images containing straight lines with high texture shown in figure 6, the top five high correlation positions are 0, 343, 340, 22, and 342. There is no the correct result. However, at least one of the top five peaks is close to the correct rotation parameter.

In the case of images containing no straight line shown in figure 7, the top five high correlation positions are 0, 13, 10, 3, and 358. From the results, the second peak position is the most nearest rotation parameter but it is still far from the correct rotation.

From the experimental results in part 1, it can be concluded that the different image details effect the estimation of rotation parameter. The stronger straight lines and smoother texture, the better the estimation results.

Part 2: To show the effects of different image sizes to the correctness of rotation parameter.

In this part, four sizes of different image details are used and the examples of estimated results are presented in figure 8-11. From the results, as the size of image increases, the image contains more detail information. This helps for better estimation of the rotation results.

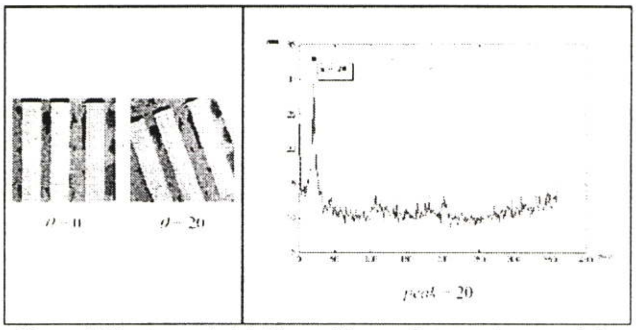


Figure 4. The strong straight lines with smooth texture image and the result of 1D phase correlation plot with graph.

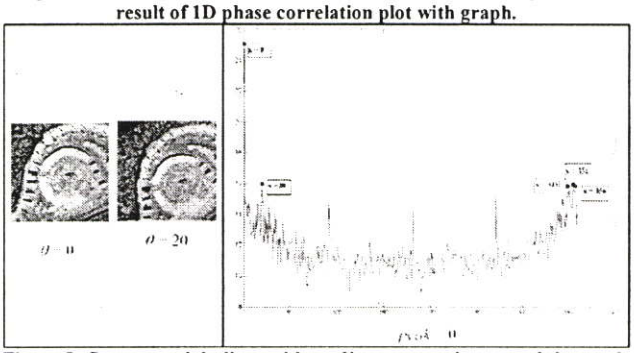


Figure 5. Strong straight lines with medium texture image and the result of 1D phase correlation plot with graph.

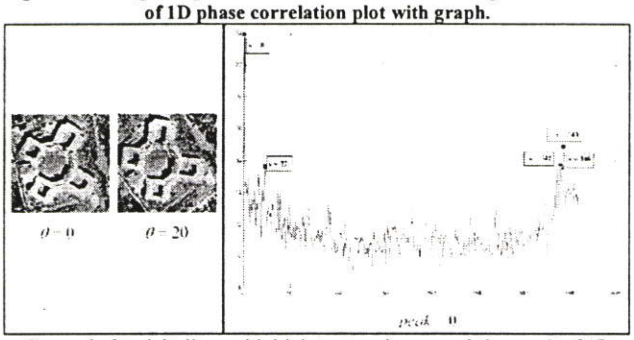


Figure 6. Straight lines with high texture image and the result of 1D phase correlation plot with graph.

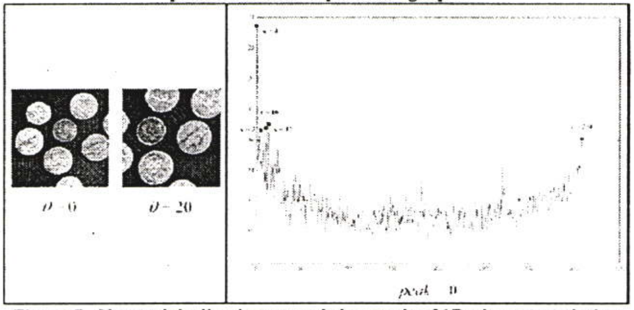


Figure 7. No straight line image and the result of 1D phase correlation plot with graph.

Part 3: To show the effects of different image details to the correctness of translation parameters.

The examples of estimated translation parameters for different image details are shown in figure 12-14. From the experimental results, 2D phase correlation is very efficient to accurately detect the translation parameters whatever the details of the image are.

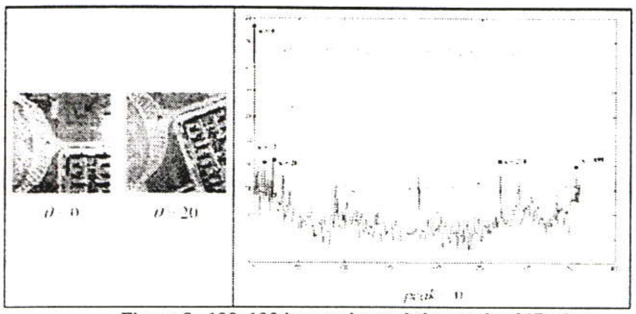


Figure 8. 100x100 image size and the result of 1D phase correlation plot with graph.

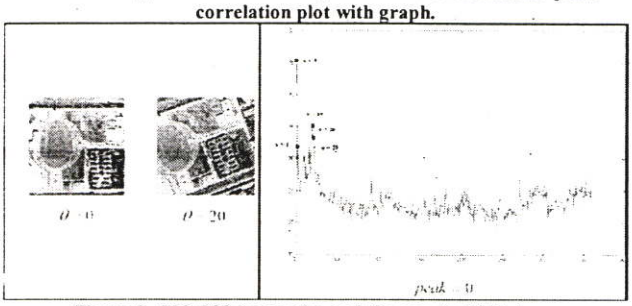


Figure 9. 200x200 image size and the result of 1D phase correlation plot with graph.

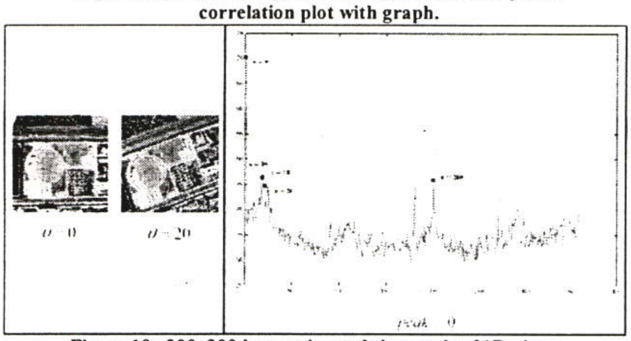


Figure 10. 300x300 image size and the result of 1D phase correlation plot with graph.

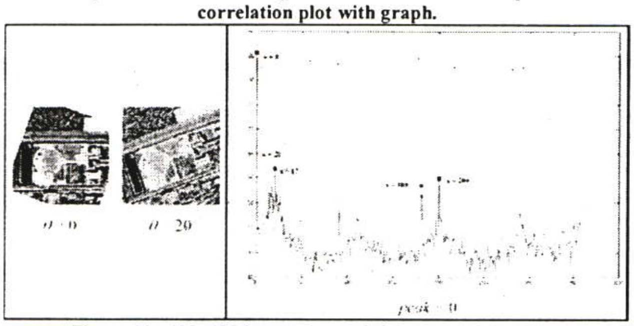


Figure 11. 400x400 image size and the result of 1D phase correlation plot with graph.

Figure 12. Show the image before and after the translation with x=-15, y=+25 and the result of 2D phase correlation in the right.

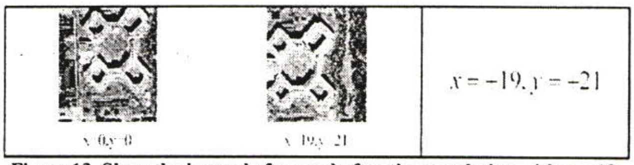


Figure 13. Show the image before and after the translation with x=+19, y=+21 and the result of 2D phase correlation in the right.

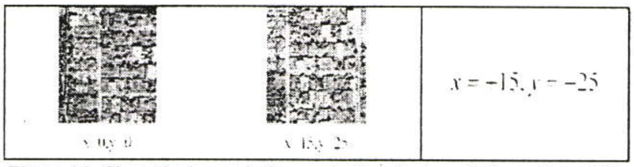


Figure 14. Show the image before and after the translation with x=+15, y=+25 and the result of 2D phase correlation in the right.

Part 4: To show the effects of different image sizes to the correctness of translation parameters.

The examples of estimated translation parameters for different image sizes are shown in figure 15-18. From the experimental results, 2D phase correlation is very efficient to accurately detect the translation parameters whatever the size of the image is.

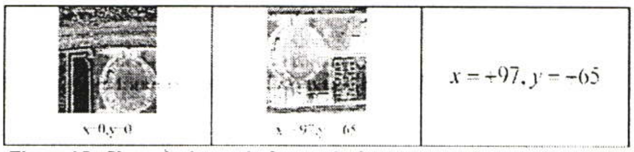


Figure 15. Show the image before and after the translation with x=+97, y=+65 and the result of 2D phase correlation in the right.

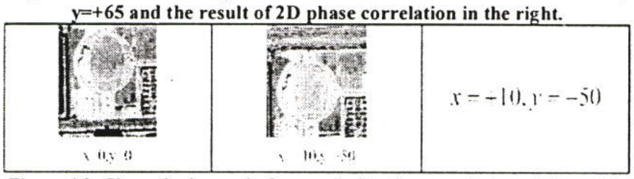


Figure 16. Show the image before and after the translation with x=+10, y=-50 and the result of 2D phase correlation in the right.

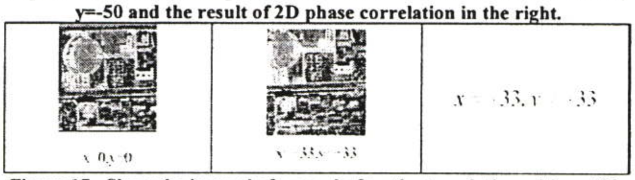


Figure 17. Show the image before and after the translation with x=+33, y=+33 and the result of 2D phase correlation in the right.

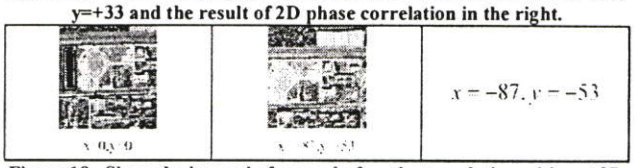


Figure 18. Show the image before and after the translation with x=+87, y=-53 and the result of 2D phase correlation in the right.

Table 1. shows the average errors for estimating rotation parameters from many details of images in the database.

Details in the image	Average errors of rotation
Strong straight lines with smooth texture	0.08
Strong straight lines with medium texture	0.20
Straight lines with high texture	1.33
No strong straight lines	2.67

Table 2. shows the average errors for estimating rotation parameters from many sizes of images in the database.

Sizes of the image	Average errors of rotation
100x100 pixels	0.50
200x200 pixels	0.33
300x300 pixels	0.12
400x400 pixels	0.05

From the experimental results shown in table 1 and 2, the correctness of the estimated rotation parameters depends on the details in the input image. The stronger straight lines and smoother texture, the better the estimation results. And the size of image increases, the image contains more detail information. This helps for better estimation of the rotation results. Hough function used in the proposed algorithm estimates straight lines. Therefore, there will be errors for calculating rotation parameter if the images contain no straight lines. These errors could be reduced by using additional Hough functions. In addition, using 2D phase correlation is every efficient for estimating translation parameters whatever the details and sizes of the input images are.

4. Conclusion

In this paper, a combination of Hough transform and phase correlation technique in Fourier domain is proposed for image registration. The proposed algorithm is proved to accurately detect the translation parameters in x-y axis and can be used to find the relevant potential angles of rotation for various types of image details and sizes. The resulted rotation and translation parameters are used to transform and registered the input images. Several advantages of using the Hough transform and phase correlation to register images are that it is easy to implement, less computation complexity, thus requires less amount of process time due to the high efficiency of fast Fourier transform (FFT). Since Hough function used in the proposed algorithm is linear function of a straight line, the resulted rotation parameters may be errors if the input images contain no straight line. Therefore, additional Hough functions may be explored to minimize these errors.

References

[1] Sylvie Daniel, Jae-Dong Jang, and Alain Viau, "Airborne Multi-Spectral Image Registration Through Genetic Algorithm", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybermetics, the Hague, Netherlands, October 10-13 2004, pp. 3046-3050.

[2] Li Zhongke, Yang Xiaohui, and Wu Lenan, "Image Registration based on Hough Transform and Phase Correlation", IEEE Int. Conf. Neural Networks & Signal Processing, Nanjiing, China, December 14-17 2003, pp.956-959.

[3] D.P. Argialas and O.D. Mavrantza, "Comparison edge detection and Hough Transform Techniques for the extraction of geologic features", The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part xxx, Istanbul ,Turkey, July 12-23 2004, pp. 790-795.

[4] Thomas Risse, Computer Vision, Graphics and Image Processing, Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA, USA, June 1989.

[5] Duda, R. O. and P. E. Hart, "Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures", Comm. ACM, Vol. 15, January, 1972, pp. 11-15.

[6] A.Averbuch and Y. Keller, "FFT Based Image Registration", IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol.4, Orlando, USA, May 2002, pp.3608-3601.

Lecture Notes in Engineering and Computer Science

IMECS 2007

International MultiConference of

Engineers and Computer Scientists 2007

Volume II

S. I. Ao
Oscar Castillo
Craig Douglas
David Dagan Feng
Jeong-A Lee (Eds.)

Hong Kong
21-23 March, 2007

IAENG
International Association of Engineers

ISBN: 978-988-98671-7-1

Image Registration using Hough Transform, Phase Correlation and Best-first search algorithm

Siwaphon Chunhavittayatera[1] and Orachat Chitsobhuk[2]

Abstract — **This paper presents image registration using a combination of Hough transform, phase correlation and best-first search algorithm to estimate rotation and translation parameters. These parameters are used to register input images and create a seamless representation of the registered image. In the first step, the translation of angles are pre-calculated based on 1D phase correlation in Hough space and used as candidate angles. Then, best-first search algorithm is applied to obtain the best translation of angle from candidate angles, which is used to de-rotated the input images. In the second step, the translation in x-y axis is computed using 2D phase correlation. Finally, the input images are registered using the estimated translation parameter. The experimental results using various image details and sizes show the accuracy of the proposed technique to detect the translation parameters. The best-first search algorithm can help to increase the precision of rotation parameter after Hough transform and phase correlation while require less amount of processing time compared to full search algorithm.**

Keywords — **best-first search, full search, Hough transform image registration, phase correlation**

1. Introduction

Image registration is a method of registering or aligning two or more images of the same scene taken at different times, from different viewpoints or by different sensors and then making a new image that contains complete details of all input images. However, an important requirement is that the input images must be overlapped in order to be registered [1].

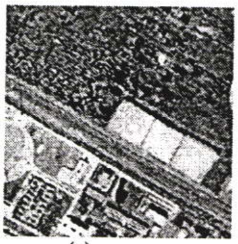
The process of image registration is to take a pair of images, register them to create a new image then take other images to register again. This process is continued until all images have been registered. We get a new large image with details of all images in correct position. This registered image help us to view overall details without swapping image many times and image analysis can be done easily.

Image Registration is an essential component in many computer vision and image processing tasks such as remote sensing, image fusion, motion analysis, environmental monitoring, medical image processing, video compression, image enhancement and restoration [2].

Siwaphon Chunhavittayatera[1] is with the Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520 (Tel. No. 66-2-739-2400-3; Fax. No. 66-2-739-2404; e-mail: siwa_382@hotmail.com)

Orachat Chitsobhuk[2] is with the Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520 (Tel. No. 66-2-739-2400-3; Fax. No. 66-2-739-2404; e-mail: kcoracha@kmitl.com)

The concept of image registration shows in figure 1 and figure 2. Figure 1 shows two input images taken at different camera positions, which cause the translation and rotation between two images. However, there must be the overlapped area between two input images. Then, we can use Hough transform, phase correlation and best-first search algorithm to combine two input images and make a new one that contains details of two input images.


(a)

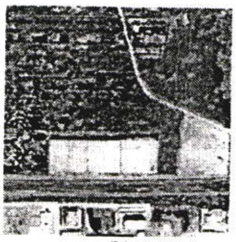

(b)

Figure 1. Two input images (a) and (b) that have overlapped area

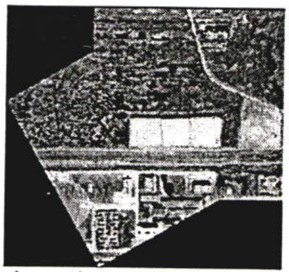


Figure 2. A new image that contains details of two input images

2. The proposed registration techniques

2.1 Overview of the proposed registration technique

The proposed image registration technique is presented in figure 3. The beginning of the process is to detect edges in both input images using edge detection. Then, all the edges in spatial domain are transformed to polar domain using Hough transform so that 1D phase correlation can be applied to detect an angle of rotation as the translation in polar domain. Each of the best five angles obtained from phase correlation is expanded according to its associated angles to construct the candidate angles. These candidate angles are further explored by best-first search algorithm to acquire the appropriate angle and use it to de-rotate the input image. The next step is to compute the translation in x-y axis using 2D phase correlation. Finally, the input images are registered using the estimated translation parameter and created a seamless representation of the registered image.

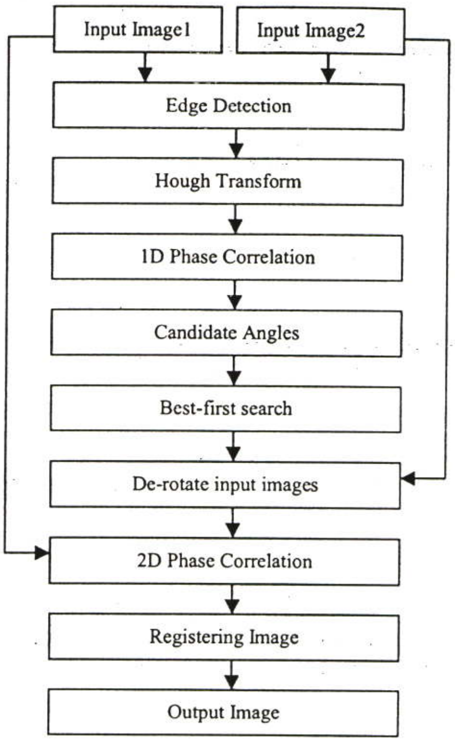


Figure 3. Block diagram presents system flow

2.2 Hough Transform

Before applying Hough transform, edge images must be obtained from two input images. In this paper, canny edge detector [2] is used to extracted edges from the image.

Hough transform is combined with phase correlation to detect rotation between two images. Hough transform is a feature extraction technique used in digital image processing [3, 4]. The standard transform identifies lines in the image, but could be extended to identify positions of arbitrary shapes. In the proposed algorithm, the Hough function is implemented using the Standard Hough Transform (SHT). In the standard Hough transform, each line in the images is represented by two parameters, commonly called ρ (rho) and θ (theta), which represent the length and angle of the line respectively. The representation of these two parameters is sometimes referred to Hough space [5]. After Hough function is applied, each line in spatial domain is transformed to ρ and θ in polar domain. Therefore, the rotation in spatial domain will be transformed into the translation in polar domain. Then, 1D phase correlation can be applied to detect an angle of rotation as the translation in polar domain.

The Hough transform is designed to detect lines, using the parametric representation of a line as presented in (1).

$$\rho = x\cos\theta + y\sin\theta \qquad (1)$$

Where ρ is the distance from the origin to the line along a vector perpendicular to the line and θ is the angle between the x-axis and this vector.

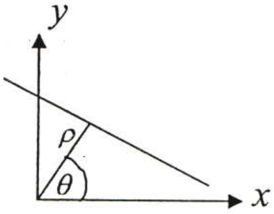


Figure 4. Hough Space representation of a line

2.2 Phase correlation

Phase correlation is one of the most widely used techniques for image registration in frequency domain to determine the relative translation between two images [6]. Phase correlation is based on Fourier shift theorem, which is easy to implement, less computation complexity, thus requires less amount of process time due to the high efficiency of fast Fourier transform (FFT). Furthermore, it is robust to interference. However, phase correlation can deal with only translation between two images in x-y axis.

The concept of 1D phase correlation is introduced here for simplicity. The method is often derived by assuming only translation occurred between two input signals:

$$f_2(x) = f_1(x+d) \text{ ; } d \text{ is disparity}$$

The Fourier shift theorem states that the results of Fourier transforms of two related signals satisfy:

$$F_2(\omega) \approx F_1(\omega)e^{id\omega}$$

Taking $F_1(\omega)$ divided by $F_2(\omega)$ as shown below:

$$\frac{F_2(\omega)}{F_1(\omega)} = \frac{F_2(\omega)F_1^*(\omega)}{A_2(\omega)A_1(\omega)}$$

$$\frac{F_2(\omega)}{F_1(\omega)} = \frac{A_1(\omega)A_2(\omega)e^{i(\psi_1(\omega)-\psi_2(\omega))}}{A_2(\omega)A_1(\omega)} = e^{id\omega} \qquad (2)$$

where, $e^{id\omega}$ is a sinusoidal function in the frequency domain, and therefore its inverse Fourier transform is an impulse, locating at the disparity d, that is, $\delta(x+d)$. Thus, in short, phase correlation methods measure disparity by finding peaks as follows:

$$d = \arg\max_{\omega} \left| F^{-1}\left(\frac{F_2(\omega)}{F_1(\omega)}\right) \right| \qquad (3)$$

When F^{-1} denotes inverse Fourier transform, $|\bullet|$ is the magnitude.

In this paper, 1D phase correlation is used to detect the angle of rotation from Hough space, by applying 1D phase correlation in (3) to image $R_1(\rho,\theta)$ and $R_2(\rho,\theta)$ in Hough space. Thus, the angle of rotation (θ_{rot}) can be estimated as followed:

$$\theta_{rot} = \arg_{\theta} \max \sum_{\omega} \left| F_{\theta}^{-1} \left(\frac{F_{\theta}\left(R_2^{\rho \to \omega}(\omega, \theta)\right)}{F_{\theta}\left(R_1^{\rho \to \omega}(\omega, \theta)\right)} \right) \right| \quad (4)$$

Where F_{θ} and F_{θ}^{-1} denote Fourier transform and inverse Fourier transform in direction of θ respectively.

The translation in x-y axis can be estimated using 2D phase correlation. Assuming that the relation between $I_1(x, y)$ and $I_2(x, y)$ is:

$$I_2(x, y) = I_1(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (5)$$

The disparity $(\Delta x, \Delta y)$ of two input images can be derived as follow:

$$(\Delta x, \Delta y) = \arg_{\Delta x, \Delta y} \max \left| F^{-1} \left(\frac{F(I_2(x, y))}{F(I_1(x, y))} \right) \right| \quad (6)$$

Where F and F^{-1} denote 2D Fourier transform and 2D inverse Fourier transform respectively.

2.3 Candidate angles

Before applying best-first search, the candidate angles are prepared from the associate angles of best five angles from phase correlation.

In the theory, the estimated rotation parameter from phase correlation is the angle, which gives maximum correlation as present in (4). Nevertheless, due to noises in input image or the details of the image, the maximum point of phase correlation may be mistake. Therefore, the top five highest correlation positions are chosen to deal with this problem.

The top five highest correlation positions (θ) are expanded according to their associate angles, which are $(90 + \theta)$, $(180 + \theta)$ and $(270 + \theta)$. Twenty candidate angles are presented as followed:

$$\theta_1, (90 + \theta_1), (180 + \theta_1), (270 + \theta_1)$$
$$\theta_2, (90 + \theta_2), (180 + \theta_2), (270 + \theta_2)$$
$$\theta_3, (90 + \theta_3), (180 + \theta_3), (270 + \theta_3)$$
$$\theta_4, (90 + \theta_4), (180 + \theta_4), (270 + \theta_4)$$
$$\theta_5, (90 + \theta_5), (180 + \theta_5), (270 + \theta_5)$$

Where $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ and θ_5 denote the top five highest correlation positions.

2.4 Best-first search algorithm

Best-first search is a search algorithm which optimizes depth-first search by expanding the most promising node chosen according to some rule.

Pearl [7] described best-first search as a method to estimate the promising node n by a "heuristic evaluation function f(n) which, in general, may depend on the description of n, the description of the goal, the information gathered by the search up to that point, and most important, on any extra knowledge about the problem domain." This general sense of term is used by many authors, including Russell and Norvig [8].

In this paper, Hough transform and phase correlation are proposed to solve the rotation between two input images. However, Hough transform is a linear function of a straight line. As a result, if the input images contain no strong straight line, the resulted rotation parameter may be errors. Therefore, best-first search algorithm is proposed to further explore the candidate results and estimate the best angle to de-rotate the input images.

The root-mean-square-error (RMSE) [9], [10] between overlapped areas of two input images is used as a heuristic evaluation function to determine the selecting path and the position to finish the search. The candidate angle, which gives the least value of RMSE, is promoted to the start node since it gives a better representation of the registered image than the others. The root-mean-square-error (RMSE) can be calculated as followed:

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (I_1 - I_2)_i^2}}{n} \quad (7)$$

Where I_1 and I_2 are two input image and n is the amount of overlapped area of two input images.

At the start node, the selected path (left or right) is decided by the next node, which gives the least value of RMSE. In figure 5 show that the selected path is the left one because the next node in left (node 21) of the start node has RMSE less than the right node (node 23). The search is finished when the next node (node 19) has the value of RMSE greater than the current node (node 20). Finally, the current node is the goal of this search.

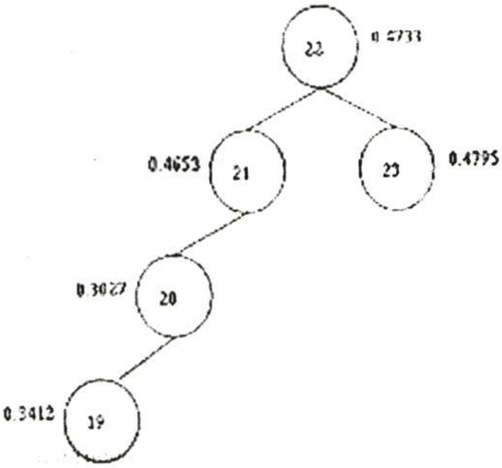


Figure 5. Example of best-first search

Even though best-first search algorithm does not guarantee that the search result is the best solution from all possible angles thus only the best angle from candidate angles, it requires less amount of searching time compared to full search algorithm, which checking every possible nodes in sequence until finish [7], [8].

3. Experimental Results

The experiments are conducted based on various types of image details and sizes. There are 144 satellite images in the database, which can be categorized into 4 groups (36 images for each group): images containing strong straight lines with smooth texture, straight lines with less texture, straight lines with medium texture, and straight lines with high texture. Each group consists of images with sizes of 100x100, 200x200, and 300x300 pixels as show in figure 6 - 9.

In the experiment, the translation between two input images in x-y axis is computed using only 2D phase correlation. The results are accurate as long as there is an overlapped area between two input images. The smaller size of the image, the larger size of the overlapped area.

To show the performance of the proposed techniques, several rotation parameters (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300 and 330 degrees) are examined.

The efficiency of the proposed algorithm is measured using average processing time and the percent of average precision. The percent of average precision can be calculated as followed:

$$\%\ average\ precision = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{N} \times 100 \qquad (8)$$

Where x_i is the score of angle i, it is equal 1 if the received angle is correct but equal 0 if the received angle is false. N is all considered angles.

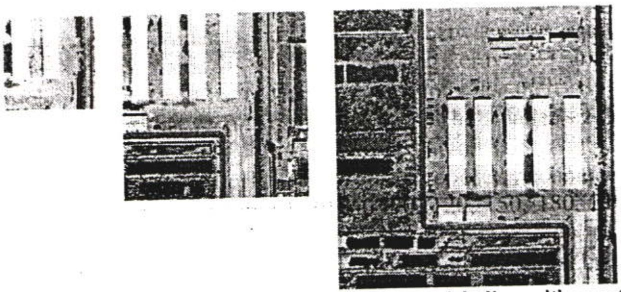


Figure 6 show example images containing strong straight lines with smooth texture with the size of 100x100, 200x200 and 300x300 pixels.

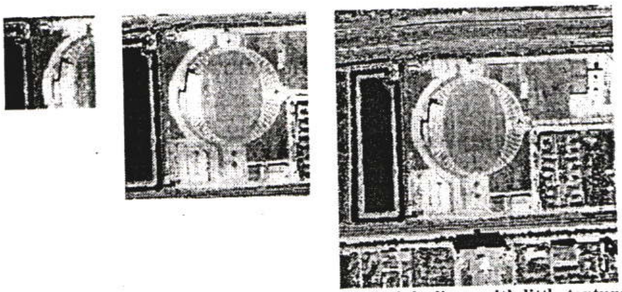


Figure 7 show example images containing straight lines with little texture with the size of 100x100, 200x200 and 300x300 pixels.

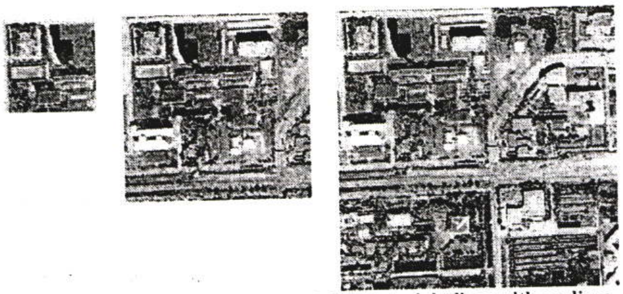


Figure 8 show example images containing straight lines with medium texture with the size of 100x100, 200x200 and 300x300 pixels.

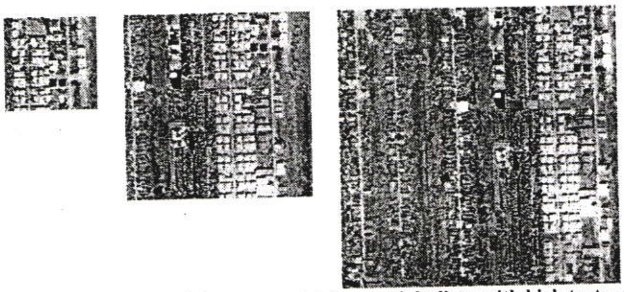


Figure 9 show example images containing straight lines with high texture with the size of 100x100, 200x200 and 300x300 pixels.

The percent of average precision for three techniques, Hough transform and phase correlation (I), Hough transform, phase correlation and best-first search algorithm (II) and full search algorithm (III), to estimate the rotation parameters of all 4 groups of images are compared. Table 1 shows the percent of average precision while table 2 shows the average processing time of the registration process in second.

Table 1 shows the percent of average precision.

	100X100			200X200			300X300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Group 1	66.67	100	100	91.67	100	100	100	100	100
Group 2	41.67	100	100	83.33	100	100	83.33	100	100
Group 3	25.00	100	100	75.00	100	100	83.33	100	100
Group 4	33.33	83.33	100	58.33	91.67	100	50.00	91.67	100

Table 2 shows average processing times in second.

	100X100			200X200			300X300		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Group 1	7.30	19.56	250.36	23.02	76.56	1132.55	51.77	193.30	3083.90
Group 2	7.35	18.06	249.91	22.11	73.38	1126.89	48.70	181.59	3106.06
Group 3	7.18	17.47	248.96	21.94	72.00	1132.39	50.40	186.23	3124.35
Group 4	6.85	15.73	250.21	19.11	59.96	1123.39	39.12	138.52	3106.72

From table 1, the precision of the estimated rotation parameters depends on the details in the input image. The best-first search algorithm can help increasing the percent of average precision of rotation parameter from using Hough transform and phase correlation. The proposed techniques give perfect average precision the same as the results from full search algorithm for images containing strong straight lines with smooth texture (group 1), straight lines with less texture (group 2), and straight lines with medium texture (group 3), while require less amount of processing time. However, in the case of images containing straight lines with high texture (group 4), there is less amount of strong straight lines resulted in more errors. Therefore, the stronger the straight lines and the smoother texture, the better the estimation results. As the size of image increases, it contains more detail information. This also helps for better estimation of the rotation parameters.

4. Conclusion

In this paper, image registration using Hough transform, phase correlation, and best-first search algorithm are proposed. The proposed techniques are proved to accurately detect the translation parameters in x-y axis and can be used to find the angles of rotation for various types of image details and sizes. The resulted rotation and translation parameters are used to transform and register the input images. Several advantages of using the Hough transform and phase correlation are that it is easy to implement, less computation complexity, thus requires less amount of process time due to the high efficiency of fast Fourier transform (FFT). Since Hough function used in the proposed algorithm is a linear function of a straight line, the resulted rotation parameters may be errors if the input images contain less number of straight lines. Therefore, additional best-first search algorithm is introduced to search for the best angle using the heuristic function from the candidate angles obtained from phase correlation in Hough space. The best-first search can help to increase the precision of the estimated rotation parameter while require less amount of processing time compared to full search algorithm.

References

[1] Chunhavittayatera S., Chitsobhuk O., and Tongprasert K., "Image Registration using Hough Transform and Phase Correlation", The 8th International Conference in Advanced Communication Technology, Korea, Feb. 20-22 2006, pp. 973-977.

[2] Li Zhongke, Yang Xiaohui, and Wu Lenan, "Image Registration based on Hough Transform and Phase Correlation", IEEE Int. Conf. Neural Networks & Signal Processing, Nanjiing, China, December 14-17 2003, pp.956-959.

[3] D.P. Argialas and O.D. Mavrantza, "Comparison edge detection and Hough Transform Techniques for the extraction of geologic features", The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part xxx, Istanbul ,Turkey, July 12-23 2004, pp. 790-795.

[4] Thomas Risse, Computer Vision, Graphics and Image Processing, Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA, USA, June 1989.

[5] Duda, R. O. and P. E. Hart, "Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures", Comm. ACM, Vol. 15, January, 1972, pp. 11–15.

[6] A.Averbuch and Y. Keller, "FFT Based Image Registration", IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol.4, Orlando, USA, May 2002, pp.3608-3601.

[7] J. Pearl, "Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving", Addison-Wesley, 1984, p. 48.

[8] S.J. Russell and P. Norvig, "Artificial Intelligence: A Modern Approach", 2nd edition. Pearson Education, Inc, 2003. pp. 94 and 95 (note 3).

[9] Hui Li, B.S. Manjunath and Smjit K. Mitra, A contour-based approach to multi-sensor image registration, IEEE Transactions on Image Processing, March 1995, pp 320 – 334.

[10] Y. Bentoutou, N. Taleb, K. Kpalma, and J. Ronsin, A Feature-Based Approach to Automated Registration of Remotely Sensed Images, Information and Communication Technologies, April 2006 , pp1835 – 1840.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวศิวพร ชุณหวิทยะธีระ
วัน เดือน ปีเกิด	4 มกราคม 2525
การศึกษา	ปีการศึกษา 2537-2539 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสอาดเผดิมวิทยา จังหวัดชุมพร ปีการศึกษา 2540-2542 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนศรียาภัย จังหวัดชุมพร ปีการศึกษา 2543-2546 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ปีการศึกษา 2545-2548 ระดับปริญญาตรี บริหารธุรกิจบัณฑิต สาขาวิชาบริหารธุรกิจ เอกการจัดการทั่วไป