

การจับเทียบภาพซ้อนเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่โดยเทคนิคการแปลงเชิงฟูรีเยอร์  
ระบบพิกัดขั้วขั้ว สรณวิศิษฐกรศึกษาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน  
IMAGE REGISTRATION USING FFT-BASED TECHNIQUE AND  
BEST FIRST SEARCH ALGORITHM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-070-065

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูล  
แบบฟาสฟูเรียร์ และวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน

IMAGE REGISTRATION USING FFT-BASED TECHNIQUE AND  
BEST FIRST SEARCH ALGORITHM



เลขหมู่.....105129  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....16 พ.ย. 2552

b. 1216622A  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2552

KMITL-2009-EN-M-070-065

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**IMAGE REGISTRATION USING FFT-BASED TECHNIQUE AND  
BEST FIRST SEARCH ALGORITHM**

**OLAN SAMRITJIARAPON**

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

**2009**

**KMITL-2009-EN-M-070-065**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฟาสฟูเรียร์  
และวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน

Thesis Title Image Registration using FFT-based Technique and Best First Search Algorithm

นักศึกษา นายโอฬาร สัมฤทธิ์เจียรผล

รหัสประจำตัว 49060707

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อรฉัตร จิตต์โสภักตร์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-070-065

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชุตินเมษณี ศรีนิลทา	ชุตินเมษณี ศรีนิลทา
ผศ.ดร.สุรินทร์ กิตติขจรกุล	สุรินทร์ กิตติขจรกุล
ดร.ศุภกานต์ พิมลธเรศ	ศุภกานต์ พิมลธเรศ
ผศ.ดร.สมศักดิ์ วลัยรัชต์	วลัยรัชต์
ผศ.ดร.อรฉัตร จิตต์โสภักตร์	อรฉัตร จิตต์โสภักตร์

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

โอฬาร สัมฤทธิ์เจียรผล

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฟาสฟูเรียร์ และวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน
นักศึกษา	นายโอฬาร สัมฤทธิ์เจียรผล
รหัสนักศึกษา	49060707
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.อรฉัตร จิตต์โสภักตร์

### บทคัดย่อ

การจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่ (Image Registration) เป็นงานด้านการประมวลผลภาพ (Image Processing) สำหรับรวมภาพย่อยตั้งแต่สองภาพขึ้นไป ที่ถูกถ่ายในเวลาแตกต่างกัน จากอุปกรณ์รับภาพคนละตัว หรือจุดถ่ายภาพที่แตกต่างกัน ความท้าทายของการจัดเรียงภาพย่อยคือการรวมภาพที่มีการเลื่อนขนาดใหญ่ เมื่อภาพที่นำมาจัดเรียงมีพื้นที่ทับซ้อนกันขนาดเล็ก การจัดเรียงภาพย่อยสำหรับการเลื่อนขนาดใหญ่โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยง่ายโดยใช้วิธีการค้นหาตำแหน่งเดียวกันบนภาพตั้งต้นทั้งสองภาพ (Control point) ซึ่งจำเป็นต้องแลกด้วยระยะเวลาในการคำนวณมาก เนื่องจากขอบเขตการค้นหาที่มีขนาดกว้าง ดังนั้นเทคนิคการหาการเลื่อนบนโดเมนความถี่เป็นทางเลือกหนึ่ง ซึ่งสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนของภาพด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งอาศัยการแปลงข้อมูลแบบฟาสฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform) ถึงอย่างนั้นเทคนิคเหล่านี้ยังไม่สามารถหาการเลื่อนที่ถูกต้องได้แม่นยำ ในกรณีที่มีการเลื่อนของภาพตั้งต้นทั้งสองมีขนาดใหญ่

งานวิจัยนี้ได้เสนอการนำเทคนิคต่างๆ ซึ่งอาศัยการแปลงฟาสฟูเรียร์และวิธีการค้นหาค่าที่ดีที่สุดก่อน (Best First Search) ร่วมกับการพิจารณาค่ามุมและการขยายหรือลดขนาดที่มีความเกี่ยวข้องกับสัมพันธเพื่อวิเคราะห์หาค่าการเลื่อนที่ถูกต้องระหว่างภาพตั้งต้นทั้งสอง เทคนิคการแปลงฟาสฟูเรียร์ใช้ประมาณการเลื่อน และลดขอบเขตการค้นหา ในขณะวิธีการค้นหาค่าที่ดีที่สุดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาการเลื่อนที่ถูกต้อง วิธีที่นำเสนอสามารถประมาณค่าการเลื่อนขนาดใหญ่ อาทิเช่น การเลื่อนแนวนอน การเลื่อนแนวตั้ง การหมุน และการขยายหรือลดขนาดของภาพโดยขยายความสามารถของเทคนิคเฟสคอรีเลชัน (Phase Correlation) ซึ่งสามารถหาการเลื่อนได้เพียงแนวตั้งและแนวนอน ด้วยการแปลงพิกัดจากพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian) เป็นพิกัดล็อกโพลาร์ (Log-Polar)

ผลการทดลองด้วยภาพที่หลากหลายรายละเอียดแสดงความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนอสามารถหาค่าการเลื่อนตำแหน่งได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ เมื่อทำการจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่ที่มีการเลื่อนขนาดใหญ่เปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ บนโดเมนความถี่

<b>Thesis Title</b>	Image Registration using FFT-based Technique and Best First Search Algorithm
<b>Student</b>	Mr. Olan Samritjarapon
<b>Student ID.</b>	49060707
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Computer Engineering
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Orachat Chitsobhuk

### ABSTRACT

The image registration is a fundamental task in image processing used to match two or more pictures taken, for example, at different time, from different sensors, or from different viewpoints. One of the major challenges related to image registration is the estimation of large motion, when input images contain small overlapped area. Common image registration using the search algorithm can accurately finds large motion but requires high computation cost due to large search space. FFT-based technique is an alternative approach since it can rapidly achieve the registration results through its FFT algorithm. However, only FFT-based technique cannot produce the correct results in the case of large translation.

This thesis presents a FFT-based technique cooperated with best-first search algorithm to analyze the correct translation between two input images. The FFT-based technique is used to estimate the candidate translations to decrease searching space while best-first search algorithm is used to further search for the correct translation. The proposed technique can estimate large translations, rotations, and scalings in images by an extension of a well-known phase correlation technique.

The experimental results using various image details show the accuracy of the proposed technique to detect large translations compared to the other techniques in frequency domain.

# กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้เสียมิได้ หากไม่ได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ คือ ผศ.ดร.อรฉัตร จิตต์โสภักตร์ ที่ช่วยให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือในหลายอย่างจนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ต่างๆ ตลอดจนนักวิจัยทุกท่านที่เอื้อเพื่อ งานวิจัยด้วยดีเสมอมา

ขอบคุณและขอใจเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่ได้คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในหลายๆ ด้านตลอดจนคำแนะนำแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ได้ให้การสนับสนุนในเรื่องต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้คุณความดีประโยชน์และคุณค่าที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบแต่บิดา มารดา ครูอาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสามความรู้ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

โอฬาร สัมฤทธิ์เจียรผล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี และหลักการที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
1.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 แนวคิดเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 แนวคิดเบื้องต้นของการจัดเรียงภาพ (Image Registration).....	6
2.2 การจำแนกประเภทของอัลกอริธึมที่ใช้ทำการจัดเรียงภาพ.....	8
2.2.1 การจำแนกประเภทตาม โดเมนที่ใช้ประมวลผล.....	9
2.2.1.1 โดเมนจุดภาพ (Spatial Domain).....	9
2.2.1.2 โดเมนความถี่ (Frequency Domain).....	9
2.2.2 การจำแนกประเภทตามมุมมองของภาพ.....	9
2.2.2.1 อาศัยความสัมพันธ์ของพื้นที่เป็นหลัก (Area-based methods).....	9
2.2.2.2 อาศัยคุณลักษณะเฉพาะเป็นหลัก (Feature-based methods).....	9
2.2.3 การจำแนกประเภทตามการแปลงสัญญาณ.....	10
2.2.3.1 การแปลงสัญญาณเชิงเส้น (Linear Transformation).....	10
2.2.3.2 การแปลงสัญญาณไม่เชิงเส้น (Non-Linear Transformation).....	10

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4 การจำแนกประเภทตามเทอมของการค้นหา.....	10
2.2.4.1 การค้นหาเป็นหลัก (Search-based methods).....	10
2.2.4.2 คุณสมบัติของเทคนิคโดยตรง (Direct methods).....	10
2.2.5 การจำแนกประเภทตามการได้มาของภาพ.....	11
2.2.5.1 แบบจำลองเชิงเดี่ยว (Single-modality).....	11
2.2.5.2 แบบจำลองเชิงมัลติ (Multi-modality).....	11
2.2.6 การจำแนกประเภทตามแอปพลิเคชัน.....	11
2.2.6.1 การควบคุมระยะไกล (Remote sensing).....	11
2.2.6.2 การวิเคราะห์ภาพทางการแพทย์ (Medical Image Analysis).....	11
2.2.6.3 การรู้จำรูปแบบ (Pattern Recognition).....	11
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.3.1 งานวิจัยของ S. Chunhavittayatera and O.Chitsobhuk.....	12
2.3.2 งานวิจัยของ B.S. Reddy and B.N. Chatterji.....	14
2.3.3 งานวิจัยของ Hanzhou Liu, Baolong Guo and Zongzhe Feng.....	15
บทที่ 3 ความรู้พื้นฐานในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	17
3.1 ระบบพิกัดในระนาบ.....	17
3.1.1 ระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinates).....	17
3.1.2 ระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinates).....	18
3.1.3 ระบบพิกัดล็อกโพลาร์ (Log Polar Coordinates).....	21
3.2 การแปลงเรขาคณิต (Geometric transformation).....	22
3.2.1 การแปลงเรขาคณิตเชิงตำแหน่ง (Geometric Spatial Transform).....	22
3.2.2 อินเตอร์โพลชัน (Interpolation).....	25
3.2.2.1 วิธีการคำนวณที่ใช้ Forward mapping.....	25
3.2.2.2 วิธีการคำนวณที่ใช้ Inverse mapping.....	27
3.3 การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform).....	31
3.3.1 การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform).....	32
3.3.2 การแปลงฟูเรียร์แบบรวดเร็ว (Fast Fourier Transform).....	34

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 เฟสคอรีเลชัน (Phase Correlation).....	36
3.4.1 ภาพอินพุตที่มีการเลื่อนในแนวแกนอนและแกนตั้งเพียงอย่างเดียวจากภาพ อ้างอิง.....	36
3.4.2 ภาพอินพุตถูกหมุนและการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนและแกนตั้งแต่ไม่ถูก ขยายหรือลดขนาดจากภาพอ้างอิง.....	38
3.4.3 ภาพอินพุตถูกขยายหรือลดขนาดเพียงอย่างเดียวจากภาพอ้างอิง.....	39
3.4.4 ภาพอินพุตที่ถูกหมุน ขยายหรือลดขนาดและการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน นอนและแกนตั้งจากภาพอ้างอิง.....	40
3.5 วิธีการค้นหา (Searching Algorithm).....	41
3.5.1 การค้นหาแบบโบลด์ (Blind Search).....	41
3.5.1.1 การค้นหาทั้งหมด (Full Search).....	41
3.5.1.2 การค้นหาบางส่วน (Partial Search).....	41
3.5.2 การค้นหาแบบฮิวริสติก (Heuristic Search).....	42
3.5.2.1 การค้นหาแบบปีนเขา (Hill Climbing).....	43
3.5.2.2 การค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (Best First Search).....	43
3.5.2.3 การค้นหาแบบ A*.....	44
3.6 Root Mean Square Error.....	45
<b>บทที่ 4 วิธีการจัดเรียงภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....</b>	<b>46</b>
4.1 ภาพรวมของการจัดเรียงภาพที่นำเสนอในงานวิจัยนี้.....	46
4.2 การปรับขนาดของภาพด้วยเทคนิคการ Padding.....	48
4.3 การแปลงฟาสฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform).....	48
4.4 การกรองความถี่สูงผ่าน (Highpass Filter).....	49
4.5 ระบบพิกัดล็อกโพลาร์ (Log-Polar Coordinates or Log-Polar Grid).....	50
4.6 เฟสคอรีเลชัน 2 มิติสำหรับการหาค่ามุมการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาด.....	51
4.7 การค้นหาโหนดเริ่มต้นของ Best-first Search.....	54
4.8 การค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (Best-first Search).....	55

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.9 การปรับมุมการหมุนและขนาดของภาพอินพุต (De-rotate and De-scale Input image)	57
4.10 เฟสคอลลีเรชั่น 2 มิติสำหรับการหาค่าการเลื่อนในแนวแกนอนและแกนตั้ง	58
4.11 การรวมภาพ (Registering Image)	59
<b>บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>61</b>
5.1 บทนำ	61
5.2 ภาพที่ใช้สำหรับการทดลอง	61
5.2.1 ชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนแนวอน การเลื่อนแนวตั้งและการหมุน	62
5.2.2 ชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการหมุนและการขยายหรือลดขนาด	63
5.3 การวัดผลการทดลอง	64
5.4 การทดลองและผลการทดลอง	65
5.4.1 การทดลองเปรียบเทียบเทคนิคการดึงลักษณะเด่นจากภาพระหว่างเทคนิคการกรองความถี่สูงผ่าน (HPF) และเทคนิคการกรองขอบภาพของแคนนี่ (CED) ที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัย	66
5.4.2 การทดลองเปรียบเทียบอวิริตติกฟังก์ชันระหว่าง RMSE และ $Cor(x, y)$ สำหรับเลือกโหนดเริ่มต้นของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน	68
5.4.3 การทดลองเพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสม	70
5.4.4 การทดลองเปรียบเทียบวิธีการค้นหาระหว่างการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (BFS) กับ การค้นหาแบบทำซ้ำ (ITS)	73
5.4.5 การทดลองวัดประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอสำหรับหาค่าการขยายหรือลดขนาด	75
5.4.6 การทดลองวัดประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	76
5.4.7 การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอ	82
5.4.8 การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของวิธีที่นำเสนอ	85

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4.9 การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบการจัดเรียงที่นำเสนอ ในกรณี  
มุมการหมุน การเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งมีความละเอียดระดับทศนิยม...88

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และแนวทางการพัฒนา.....	91
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	91
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
เอกสารอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก. เบอร์เชนต์เฉลี่ยของพื้นที่ทับกันน้อยที่สุด.....	97
ภาคผนวก ข. การทดลองเปรียบเทียบการดึงลักษณะเด่นจากภาพระหว่างเทคนิคการกรอง ความถี่สูงผ่านและเทคนิคการกรองขอบภาพของเคาน์ที่ เหมาะสมกับ งานวิจัย.....	100
ภาคผนวก ค. การทดลองเปรียบเทียบค่าฮิวริสติกฟังก์ชันระหว่าง RMSE และ $Cor(x, y)$ สำหรับการเลือก โหนดเริ่มต้น.....	101
ภาคผนวก ง. การทดลองเพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้น.....	102
ภาคผนวก จ. การทดลองเปรียบเทียบวิธีการค้นหาระหว่างการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุด ก่อนกับการค้นหาแบบทำซ้ำ.....	104
ภาคผนวก ฉ. การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอสำหรับหาค่าการขยาย หรือลดขนาด.....	105
ภาคผนวก ช. การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอสำหรับภาพที่มีลักษณะ แตกต่างกัน.....	107
ภาคผนวก ซ. การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอ.....	111
ภาคผนวก ฌ. การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของวิธีการ ที่นำเสนอ.....	113
ภาคผนวก ฎ. ผลงานวิจัยในระหว่างศึกษาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	115
ประวัติผู้เขียน.....	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **viii** อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 Affine Transformation ชนิดต่างๆ.....	24
3.2 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนการคูณเลขเชิงซ้อนของ DFT และ FFT.....	35
4.1 แสดงค่าคอสลีเรชันของการหมุนและการขยายหรือลดขนาด $Corr(s, \theta)$ ลำดับต่างๆ.....	52
4.2 แสดงค่าคอสลีเรชันของการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้ง.....	55
4.3 แสดงคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง.....	59
5.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาประมวลผลเฉลี่ยด้วย HPF และ CED สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน.....	67
5.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาประมวลผลเฉลี่ยโดยใช้ อิวิริสติกฟังก์ชัน RMSE และ CED สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน.....	69
5.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย สำหรับภาพลักษณะต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุน เริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ.....	70
5.4 แสดงเวลาประมวลผลเฉลี่ย สำหรับภาพลักษณะต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้น เป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ.....	71
5.5 แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องและเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพในทุกๆลักษณะ เมื่อจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ.....	71
5.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เวลาเฉลี่ยที่ใช้ประมวลผลของ เทคนิคการค้นหาแบบต่างๆ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน (%).....	74
5.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เวลาเฉลี่ยที่ใช้ประมวลผลของ แต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน (%).....	75
5.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อ ภาพทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ (%).....	76
5.9 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพ ทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ (องศา).....	79
5.10 แสดงเวลาประมวลผลเฉลี่ยของแต่ละวิธีการสำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพ ทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ (วินาที).....	81
5.11 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อ มีสัญญาณรบกวนในภาพ (%).....	83

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.12 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในภาพ (%).....	86
5.13 แสดงค่า RMSE เมื่อนำมุมการหมุนจริง และมุมการหมุนที่คำนวณได้มาจัดเรียง.....	88
5.14 แสดงค่า RMSE เมื่อนำการเลื่อนจริง และการเลื่อนที่คำนวณได้มาจัดเรียง.....	89
ก.1 แสดงภาพตัวอย่างการเลื่อนตำแหน่งด้วยระยะ M ใดๆ ที่มากที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ และภาพที่เกิดจากการเลื่อนตำแหน่งด้วยระยะ M ที่มากเกินกว่าจะสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้.....	98
ก.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกันคือ ภาพ Simple , Detail และ Complex ซึ่งได้มาจากภาพภาพดาวเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง.....	99
ก.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกันคือ ภาพ Simple , Detail และ Complex ซึ่งได้มาจากภาพภาพดาวเทียมในบริเวณเขตถนนอุทยาน.....	99
ก.4 แสดงเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกัน ทั้งเขตลาดกระบัง ถนนอุทยาน.....	99
ข.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาประมวลผลเฉลี่ย ด้วย HPF และ CED สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตลาดกระบัง.....	100
ข.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาประมวลผลเฉลี่ย ด้วย HPF และ CED สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตถนนอุทยาน.....	100
ค.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาประมวลผลเฉลี่ย โดยใช้ฮิวริสติกฟังก์ชัน RMSE และ CED สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตลาดกระบัง.....	101
ค.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาประมวลผลเฉลี่ย โดยใช้ฮิวริสติกฟังก์ชัน RMSE และ CED สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตถนนอุทยาน.....	101
ง.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย สำหรับภาพลักษณะต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 1 , 2 , 4 , 6 , 8 , 10 และ 12 มุมตามลำดับ บริเวณเขตลาดกระบัง.....	102

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.2 แสดงเวลาประมวลผลเฉลี่ย สำหรับภาพลักษณะต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้น เป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ บริเวณเขตลาดกระบัง.....	102
ง.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย สำหรับภาพลักษณะต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการ หมุนเริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ บริเวณเขตถนนอุทยาน.....	103
ง.4 แสดงเวลาประมวลผลเฉลี่ย สำหรับภาพลักษณะต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้น เป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ บริเวณเขตถนนอุทยาน.....	103
จ.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย เวลาเฉลี่ยที่ใช้ประมวลผลของ เทคนิคการค้นหาแบบต่างๆ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตลาดกระบัง (%).....	104
จ.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย เวลาเฉลี่ยที่ใช้ประมวลผลของ เทคนิคการค้นหาแบบต่างๆ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตถนนอุทยาน (%).....	104
ฉ.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย เวลาเฉลี่ยที่ใช้ประมวลผลของ แต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตลาดกระบัง (%).....	105
ฉ.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย เวลาเฉลี่ยที่ใช้ประมวลผลของ แต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตถนนอุทยาน (%).....	106
ช.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อ ภาพทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ บริเวณเขตลาดกระบัง (%).....	107
ช.2 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพ ทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ บริเวณเขตลาดกระบัง (องศา).....	108
ช.3 แสดงเวลาประมวลผลเฉลี่ยของแต่ละวิธีการสำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพทั้ง สองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ บริเวณเขตลาดกระบัง (วินาที).....	108
ช.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อ ภาพทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ บริเวณเขตถนนอุทยาน (%).....	109
ช.5 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพ ทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ บริเวณเขตถนนอุทยาน (องศา).....	109
ช.6 แสดงเวลาประมวลผลเฉลี่ยของแต่ละวิธีการสำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพทั้ง สองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ บริเวณเขตถนนอุทยาน (วินาที).....	110

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ซ.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพบริเวณเขตลาดกระบัง (%).....	111
ซ.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพบริเวณเขตถนนอุทยาน (%).....	112
ฌ.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในภาพบริเวณเขตลาดกระบัง (%).....	113
ฌ.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในภาพบริเวณเขตถนนอุทยาน (%).....	114



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างการจัดเรียงภาพเมื่อมีการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้ง.....	6
2.2 ตัวอย่างการจัดเรียงภาพเมื่อมีการเลื่อนจากการการหมุน.....	7
2.3 ตัวอย่างการจัดเรียงภาพเมื่อมีการเลื่อนจากการลดขนาด.....	7
2.4 แสดงผลลัพธ์ของการจัดเรียงภาพที่ต่างออกไปเมื่อเลือกภาพอ้างอิงต่างกัน.....	8
2.5 แสดงผลลัพธ์ของการจัดเรียงภาพที่ต่างออกไปเมื่อเลือกภาพอ้างอิงต่างกัน.....	8
2.6 แสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพจากงานวิจัย [14].....	13
2.7 แสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพจากงานวิจัย [15].....	14
2.8 แสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพจากงานวิจัย [16].....	15
3.1 แสดงจุดภาคทั้งสี่ในระบบพิกัดฉาก.....	17
3.2 พิกัดของจุด $P(x, y)$ ใดๆ ในจุดภาคที่ 1.....	18
3.3 ระบบพิกัดเชิงขั้ว.....	19
3.4 พิกัดเชิงขั้วเมื่อ $r < 0$ .....	19
3.5 จุดหนึ่งจุดมีพิกัดเชิงขั้วได้หลายพิกัด.....	19
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากและพิกัดเชิงขั้ว.....	20
3.7 ตัวอย่างการแปลงภาพจากระบบพิกัดฉากเป็นระบบพิกัดแบบลอค โพล่า.....	21
3.8 ตัวอย่างการแปลงภาพจากระบบพิกัดฉากเป็นระบบพิกัดแบบลอค โพล่า.....	21
3.9 ระบบพิกัดเชิงขั้วและระบบพิกัดลอค โพล่ากริด.....	21
3.10 ตัวอย่างการแปลงตำแหน่งของภาพ.....	23
3.11 การทำ Forward mapping.....	26
3.12 ปัญหาของการทำ Forward mapping.....	27
3.13 การทำ Inverse mapping.....	27
3.14 การทำ Inverse mapping แบบ Zero-order Interpolation.....	28
3.15 การทำ Inverse mapping แบบ First-order Interpolation.....	29
3.16 การทำ Inverse mapping แบบ High-order Interpolation.....	30
3.17 การแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่.....	31
3.18 การแปลงฟูเรียร์กับข้อมูลภาพ.....	32
3.19 การทำ FFT.....	34
3.20 เทคนิค DIT-FFT สำหรับข้อมูลจำนวน 8 จุด.....	35

# สารบัญรูป (ต่อ)

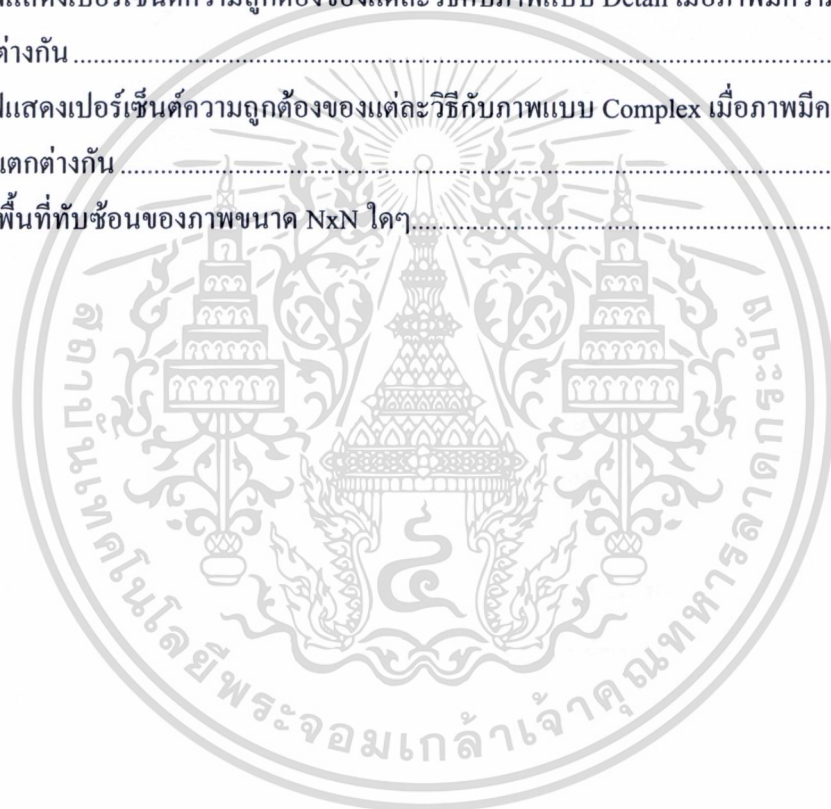
รูปที่	หน้า
3.21 กราฟแสดงค่าคอลลีเรชันการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้ง	37
3.22 ลำดับการค้นหาบนโหนดของการค้นหาแบบลึกก่อน	42
3.23 ลำดับการค้นหาบนโหนดของการค้นหาแบบกว้างก่อน	42
3.24 แสดงลักษณะการค้นหาแบบ Hill Climbing	43
3.25 แสดงขั้นตอนของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน	44
3.26 แสดงขั้นตอนของการค้นหาแบบ A*	44
4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอ	47
4.2 แสดงการทำ Padding	48
4.3 แสดงภาพอ้างอิงบนโดเมนของจุดในภาพและโดเมนความถี่	48
4.4 แสดงภาพอินพุตบนโดเมนของจุดในภาพและโดเมนความถี่	49
4.5 แสดงการกรองความถี่สูงผ่านของภาพอ้างอิง	49
4.6 แสดงการกรองความถี่สูงผ่านของภาพอินพุต	50
4.7 แสดงพิกัดฉากและพิกัดลอกโพลของภาพอ้างอิง	50
4.8 แสดงพิกัดฉากและพิกัดลอกโพลของภาพอินพุต	51
4.9 กราฟแสดงค่าคอลลีเรชันของการหมุนและการขยายหรือลดขนาด	52
4.10 กราฟของ Sine Function และ Cosine Function	53
4.11 แสดงขั้นตอนการค้นหาโหนดเริ่มต้นของ BFS	54
4.12 ตัวอย่างขั้นตอนของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน	56
4.13 ตัวอย่างของการหมุนภาพกลับในทิศตามเข็มนาฬิกา	57
4.14 ตัวอย่างของการขยายขนาดภาพและลดขนาดภาพ	58
4.15 ตัวอย่างของการจัดเรียงภาพเมื่อมีการเลื่อนด้วยค่า $(\Delta x, \Delta y)$ ทั้ง 4 กรณี	60
5.1 ภาพถ่ายดาวเทียมต้นฉบับที่ใช้ในการทดลอง	63
5.2 ภาพ Simple , Detail และ Complex จากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง	64
5.3 ภาพ Simple , Detail และ Complex จากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตลาดถนนอุทยาน	64
5.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วยเทคนิคการดึงลักษณะเด่น โดยเทคนิคการกรองความถี่สูงผ่าน	67
5.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วยเทคนิคการดึงลักษณะเด่น โดยการกรองขอบภาพของแคนนี่	67

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วยการค้นหาโหนดเริ่มต้น โดยใช้ RMSE เป็นฮิวริสติกฟังก์ชัน .....	69
5.7 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วยการค้นหาโหนดเริ่มต้น โดยใช้ $Cor(x, y)$ เป็นฮิวริสติกฟังก์ชัน .....	69
5.8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของภาพในทุกๆ ลักษณะ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ .....	72
5.9 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพในทุกๆ ลักษณะ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ .....	72
5.10 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วย BFS .....	73
5.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วย ITS .....	74
5.12 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Simple เมื่อภาพมีพื้นที่ทับซ้อนแตกต่างกัน .....	77
5.13 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Detail เมื่อภาพมีพื้นที่ทับซ้อนแตกต่างกัน .....	78
5.14 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Complex เมื่อภาพมีพื้นที่ทับซ้อนแตกต่างกัน .....	78
5.15 กราฟแสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Simple เมื่อภาพมีพื้นที่ทับซ้อนแตกต่างกัน .....	80
5.16 กราฟแสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Detail เมื่อภาพมีพื้นที่ทับซ้อนแตกต่างกัน .....	80
5.17 กราฟแสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Complex เมื่อภาพมีพื้นที่ทับซ้อนแตกต่างกัน .....	81
5.18 แสดงภาพหลังจากถูกสัญญาณรบกวนที่ค่าความแปรปรวนต่างกัน .....	82
5.19 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Simple เมื่อภาพมีสัญญาณรบกวน .....	83
5.20 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Detail เมื่อภาพมีสัญญาณรบกวน .....	84

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.21 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Complex เมื่อภาพมีสัญญาณรบกวน .....	84
5.22 แสดงภาพหลังจากถูกปรับความเข้มแสงที่ค่าแตกต่างกัน.....	85
5.23 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Simple เมื่อภาพมีความเข้มแสงแตกต่างกัน .....	86
5.24 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Detail เมื่อภาพมีความเข้มแสงแตกต่างกัน .....	87
5.25 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Complex เมื่อภาพมีความเข้มแสงแตกต่างกัน .....	87
ก.1 แสดงพื้นที่ทับซ้อนของภาพขนาด $N \times N$ ใดๆ.....	97



จัดเรียงภาพสามารถรองรับการทำงานกับภาพลักษณะต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นผลลัพธ์เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานบนโดเมนจุดภาพเพียงอย่างเดียวให้ความถูกต้องใกล้เคียงกัน และใช้เวลาในการประมวลผลที่น้อยกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานบนโดเมนความถี่เพียงอย่างเดียว งานวิจัยที่นำเสนอให้ความถูกต้องมากกว่า และใช้เวลาในการประมวลผลเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาเทคนิคและวิธีการจัดเรียงภาพที่มีอยู่ในปัจจุบันเพื่อพิจารณาถึงข้อดี และข้อจำกัดของแต่ละวิธีการ
2. ศึกษาเทคนิคและวิธีการจัดเรียงภาพ โดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฟาสฟูเรียร์ เฟสคอลลีเรชั่น ลอกลอการิทึม และการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน
3. ศึกษาภาพลักษณะต่างๆ กันว่ามีผลต่อวิธีการจัดเรียงภาพที่ได้นำเสนออย่างไร
4. ศึกษาประสิทธิภาพและข้อจำกัดของวิธีการจัดเรียงภาพที่ได้นำเสนอพร้อมกับเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ
5. เพื่อเป็นแหล่งข้อมูลอ้างอิงสำหรับผู้สนใจงานวิจัยด้านนี้ต่อไป

## 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

เนื่องจากการจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่ ด้วยวิธีการต่างๆ สามารถจำแนกประเภทตามโดเมนที่ใช้ประมวลผลได้ 2 ประเภท ได้แก่ เทคนิคการจัดเรียงภาพบนโดเมนจุดภาพ (Spatial Domain) ข้อดีคือให้ผลลัพธ์การจัดเรียงภาพที่มีความถูกต้องสูง ส่วนข้อจำกัดคือใช้เวลาการประมวลผลสูงตามไปด้วย เนื่องจากเทคนิคบนโดเมนของจุดในภาพ อาศัยเทคนิคการค้นหาตำแหน่งหรือจุดบนภาพที่เป็นจุดควบคุมเดียวกันบนภาพทั้งสอง (Control Points) ดังนั้นเมื่อภาพที่นำมาจัดเรียงมีขนาดใหญ่ ขอบเขตการค้นหาจะเพิ่มสูงขึ้นมากทำให้ต้องใช้เวลาประมวลผลที่เพิ่มขึ้นตามมา สำหรับเทคนิคการจัดเรียงภาพบนโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ข้อดีคือใช้เวลาในการประมวลผลที่รวดเร็ว ส่วนข้อจำกัดคือ เทคนิคนี้ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องน้อยกว่าการจัดเรียงบนโดเมนของจุดในภาพ และมีข้อจำกัดของเทคนิคที่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนได้เพียง การเลื่อนในแนวแกนอนและแนวแกนตั้งเท่านั้น การหาการเปลี่ยนแปลงในลักษณะอื่นจำเป็นอย่างยั้งที่จะต้องนำเทคนิคอื่น ช่วยปรับการเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปแบบของการเลื่อนเพื่อให้สามารถนำมาจัดเรียงภาพด้วยเทคนิคการจัดเรียงภาพบนโดเมนความถี่ได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ เพื่อให้ได้วิธีการจัดเรียงภาพที่มีประสิทธิภาพ มีความถูกต้องและรวดเร็ว สามารถประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป โดยใช้เทคนิคการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนบนโดเมนจุดภาพ เข้ากับเทคนิคบนโดเมนความถี่นั่นคือเทคนิคเฟสคอลลีเรชั่นและเทคนิคการแปลง

พิกัดแบบโลกโพลาริด ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นและสามารถรองรับการทำงานกับภาพที่มีลักษณะต่างๆ ได้หลากหลายยิ่งขึ้น

#### 1.4 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในงานวิจัย

เทคนิคการจัดเรียงภาพในงานวิจัยนี้จะอาศัยทฤษฎีและหลักการดังต่อไปนี้

1. การแปลงเรขาคณิต (Geometric Transform)
2. การแปลงข้อมูลแบบฟูรีเยร์ และคุณสมบัติของเฟสคอลลิเรชั่น
3. ระบบพิกัดแบบโลกโพลาริด
4. วิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน

#### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษา และพัฒนาวิธีการจัดเรียงภาพ โดยกำหนดขอบเขตปัญหาให้เฉพาะเจาะจง ซึ่งจะมีขอบเขตการวิจัย ดังนี้

1. การจัดเรียงภาพรองรับเฉพาะการเปลี่ยนแปลงในลักษณะการเลื่อนตำแหน่งในแนวนอน และแนวตั้ง การหมุน และการขยายหรือลดขนาดเท่านั้น
2. ขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงในการเลื่อนตำแหน่งในแนวนอน แนวตั้ง การหมุน ของภาพที่นำมาจัดเรียงมีข้อกำหนด คือ สำหรับผลลัพธ์การหมุนภาพสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงทั้งในรูปของจำนวนเต็มและทศนิยม แต่ผลลัพธ์การเลื่อนตำแหน่งที่ทำได้หลังจากการจัดเรียงภาพเป็นจำนวนเต็มเท่านั้น
3. ชุดข้อมูลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเขตลาดกระบัง และเขตสวนอุทยาน เป็นภาพขาวดำที่มีระดับเทา (Gray Level) อยู่ระหว่าง 0 – 255
4. การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีผู้ทำอยู่เดิม และเปรียบเทียบกับการค้นหาแบบทำซ้ำเพื่อพิจารณาถึงความถูกต้องและเวลาที่ใช้ในการประมวลผลสำหรับภาพลักษณะต่างๆ กัน

#### 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. กำหนดวัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัยตั้งสมมุติฐานการศึกษา ตลอดจนกำหนดแนวทางการศึกษาวิจัยเบื้องต้น
2. ศึกษาวิธีการจัดเรียงภาพตามที่เคยมีผู้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้เพื่อดูความเป็นได้ เปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละวิธีการเพื่อนำมาปรับปรุง และประยุกต์ใช้

3. นำทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องมาพิสูจน์สมมติฐานที่ได้กำหนดไว้ และกำหนดแนวทางในการทำงานวิจัยที่ครอบคลุมและชัดเจนยิ่งขึ้น
4. เตรียมฐานข้อมูลงานวิจัยเพื่อนำมาใช้ทดลอง โดยใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียมเป็นหลัก ซึ่งจะแยกประเภทของภาพตามรายละเอียดของภาพ
5. พัฒนาโปรแกรมที่จำเป็นต้องใช้ในการจัดเรียงภาพตามลักษณะเฉพาะของภาพ ตามวิธีการที่ได้กำหนดแนวทางไว้
6. ทำการทดลองกับฐานข้อมูลภาพที่ได้เตรียมไว้ โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น และทำการเก็บข้อมูล และผลลัพธ์ของการทดลอง เพื่อการวิเคราะห์ และปรับปรุงต่อไป
7. ประเมินผลการทดลองโดยนำข้อมูลและผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองมา เปรียบเทียบกับงานวิจัยเดิมที่เคยมีผู้วิจัยไว้ก่อนหน้านี้ ทั้งในด้านความถูกต้องและเวลาที่ใช้ในการประมวลผล สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 1.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ ได้แก่

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ ใช้หน่วยประมวลผลกลาง Intel Pentium Core 2 Duo processor 3.00 GHz หน่วยความจำ 2048 MB จำนวน 1 เครื่อง
2. ระบบปฏิบัติการ Windows XP Professional Service Pack 3
3. โปรแกรม Matlab R2006b
4. โปรแกรม Adobe Photoshop CS3
5. โปรแกรม Paint

### 1.8 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท แต่ละบทประกอบด้วยเนื้อหา ดังนี้

- บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญ วัตถุประสงค์ สมมติฐานของงานวิจัย แนวคิดเบื้องต้นที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนของการศึกษา รวมถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
- บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นตัวอย่างในการจัดเรียงภาพหรือการรวมภาพ การจำแนกประเภทของอัลกอริทึมที่ใช้งาน และตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate) , ระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinate), ระบบพิกัดลอคโพล่า การแปลงแบบเรขาคณิต (Geometric Transform) การแปลงข้อมูลแบบฟูรีเยอร์

เฟสคอลลิเรชั่น อัลกอริทึมการค้นแบบต่างๆ และค่า Root Mean Square Error (RMSE)

บทที่ 4 กล่าวถึงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของการจัดเรียงภาพด้วยเทคนิคที่ได้นำเสนอ โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดที่ละเอียดขั้นตอนจนได้ผลลัพธ์ที่ต้องการออกมา

บทที่ 5 กล่าวถึงวิธีการทดลองและผลการทดลองทั้งหมดด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอและวิธีการอื่นๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ทั้งในเรื่องของความถูกต้องและเวลาที่ใช้ในการประมวลผล

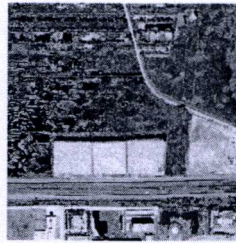
บทที่ 6 กล่าวถึงภาพรวมของงานวิจัยที่ได้นำเสนอ วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง พร้อมทั้งข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคต

ภาคผนวก แสดงรายละเอียดของผลการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ และผลงานวิจัย ในระหว่างการศึกษาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

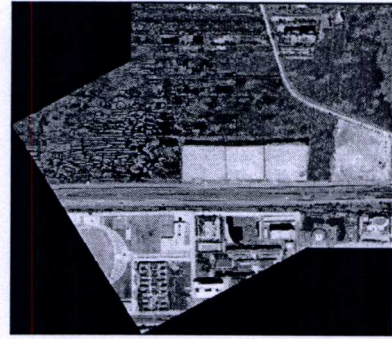




(ก)

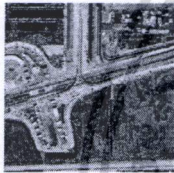


(ข)



(ค)

รูปที่ 2.2 แสดงภาพอ้างอิง (ก) และ ภาพอินพุต (ข) ที่มีการเลื่อนจากการหมุน  
(ค) เป็นภาพหลังจากทำการจัดเรียง



(ก)



(ข)

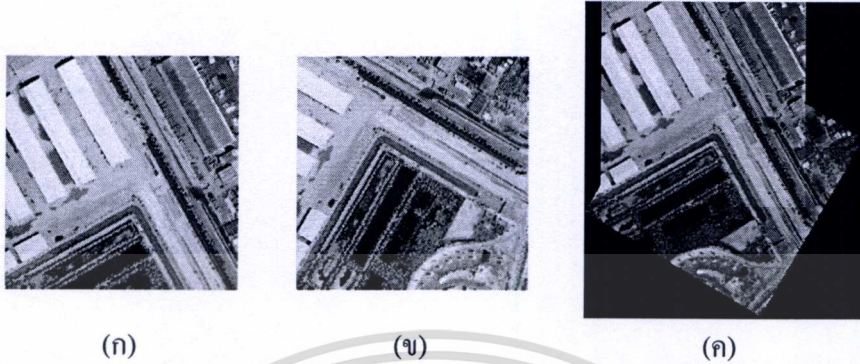


(ค)

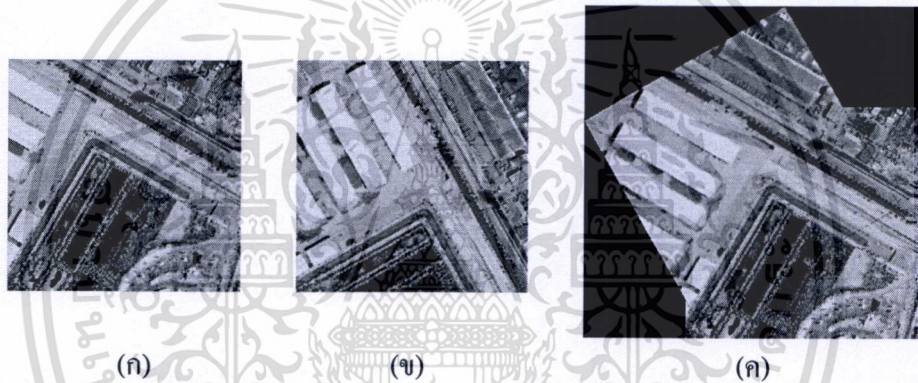
รูปที่ 2.3 แสดงภาพอ้างอิง (ก) และ ภาพอินพุต (ข) ที่มีการเลื่อนจากการลดขนาด  
(ค) เป็นภาพหลังจากทำการจัดเรียง

อีกส่วนหนึ่ง คืออัลกอริทึมที่นำมาใช้หาค่าของการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพทั้งสองนับว่ามี ความสำคัญกับการจัดเรียงภาพหรือการรวมภาพ ซึ่งได้มีผู้พยายามศึกษาวิจัยคิดค้นอัลกอริทึมขึ้นมา มากมาย เพื่อให้สามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างภาพตั้งต้นทั้งสอง อันนำไปสู่การ จัดเรียงและประกอบเป็นภาพใหม่ โดยอัลกอริทึมเหล่านี้จะสามารถจัดเรียงภาพได้ ในกรณีที่ภาพตั้ง ต้นทั้งสองจะต้องมีส่วนที่ทับซ้อนกันอยู่บางส่วน (Overlapped Area) และเป็นภาพที่ถ่ายมาบริเวณ ใกล้เคียงกัน มีส่วนเหลื่อมล้ำกัน มีจุดอ้างอิงในการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ หรือ ค่าการ เปลี่ยนแปลงระหว่างภาพทั้งสองได้ สำหรับการเลือกภาพใดๆ ในระหว่างคู่ภาพเป็นภาพอ้างอิงหรือ เป็นภาพอินพุตนั้น หากเลือกสลับกันผลลัพธ์ที่ได้จะแตกต่างกันออกไปในเรื่องของมุมมองการ มองเห็น แสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 เพราะการจัดเรียงภาพจะต้องมีภาพหนึ่งที่ใช้เป็นภาพหลักใน การอ้างอิงคือภาพอ้างอิง และภาพอีกภาพที่ต้องการหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นคือภาพอินพุต เพื่อหา

ว่าภาพอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงไปจากภาพอ้างอิงเท่าใด จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพของภาพอินพุตเพื่อให้เป็นไปในรูปแบบและมุมมองเดียวกับภาพอ้างอิง



รูปที่ 2.4 แสดงผลลัพธ์ของการจัดเรียงภาพที่ต่างออกไปเมื่อเลือกภาพอ้างอิงต่างกัน



รูปที่ 2.5 แสดงผลลัพธ์ของการจัดเรียงภาพที่ต่างออกไปเมื่อเลือกภาพอ้างอิงต่างกัน

ทั้งนี้มุมมองการมองเห็นจะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นกับลำดับของการเลือกภาพอ้างอิงและภาพอินพุต แต่อย่างไรก็ตามภาพใหม่ที่ได้จากภาพทั้งสอง สามารถที่จะรวบรวมรายละเอียดของภาพย่อยทั้งสองได้ครบถ้วนสมบูรณ์และดูกลมกลืน

## 2.2 การจำแนกประเภทของอัลกอริธึมที่ใช้ในการจัดเรียงภาพ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีผู้ศึกษาวิจัยที่มีความสนใจด้านการประมวลผลภาพได้นำเสนออัลกอริธึมต่างๆ มากมาย เพื่อให้การจัดเรียงภาพหรือการรวมภาพสามารถรองรับกับชนิดของข้อมูลและปัญหาที่หลากหลายได้ โดยอัลกอริธึมต่างๆ เหล่านี้สามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ตามวิธีการที่นำมาใช้พิจารณาแยกประเภท ดังนี้ [1]

## 2.2.1 การจำแนกประเภทตามโดเมนที่ใช้ประมวลผล

### 2.2.1.1 โดเมนจุดภาพ (Spatial Domain)

การจัดเรียงภาพบนโดเมนจุดภาพ [2] เป็นการประมวลผลกับแต่ละจุดของภาพโดยตรง โดยไม่มีการแปลงภาพให้อยู่ในรูปแบบอื่น การจัดเรียงภาพบนโดเมนจุดภาพนี้ ใช้หลักการค้นหาจุดอ้างอิงซึ่งเป็นจุดเดียวกันบนภาพอ้างอิงและภาพอินพุตถูกค้นหาโดยใช้อัลกอริธึมการค้นหาแบบต่างๆ ดังนั้นประสิทธิภาพของการจัดเรียงภาพบนโดเมนจุดภาพจึงขึ้นอยู่กับความสามารถของอัลกอริธึมที่ใช้ค้นหา

### 2.2.1.2 โดเมนความถี่ (Frequency Domain)

การจัดเรียงภาพอีกประเภทหนึ่งเป็นการทำบนโดเมนความถี่ [3] โดยต้องทำการแปลงภาพให้อยู่ในโดเมนความถี่เสียก่อน โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แล้วใช้คุณสมบัติของเฟสคอลลิเรชัน ในการทำการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลง การจัดเรียงภาพบนโดเมนความถี่นี้มีข้อดี คือ สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและมีความถูกต้องค่อนข้างสูง แต่มีข้อเสีย คือ เฟสคอลลิเรชันสามารถทำการเปลี่ยนแปลงได้เฉพาะการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบการเลื่อนตำแหน่งเท่านั้น สำหรับการเปลี่ยนแปลงประเภทอื่นๆ จำเป็นต้องนำใช้เทคนิคอื่นมาใช้ร่วมด้วย จึงจะได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำเฟสคอลลิเรชันจะมีความถูกต้องอยู่ในระดับจำนวนเต็มเท่านั้น หากต้องการให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของจำนวนจริงจะต้องมีการประยุกต์ใช้เทคนิคอื่นเพิ่มเติมเข้ากับกระบวนการ

## 2.2.2 การจำแนกประเภทตามมุมมองของภาพ

### 2.2.2.1 อาศัยความสัมพันธ์ของพื้นที่เป็นหลัก (Area-based methods)

สำหรับวิธีการจัดเรียงภาพแบบอาศัยความสัมพันธ์ของพื้นที่เป็นหลัก [4] นี้ อัลกอริธึมจะมองโครงสร้างของภาพเป็นเมตริกซ์ความสัมพันธ์ คุณสมบัติแบบฟูเรียร์ และรูปแบบอื่นๆ ที่ล้วนแต่เป็นการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างซึ่งเป็นพื้นที่ภายในภาพอ้างอิงและภาพอินพุต ไม่ได้เป็นการมองคุณลักษณะต่างๆ ของภาพ เช่น เส้นตรง เส้นโค้ง วัตถุ จุด เส้นที่ตัดกัน เส้นขอบ เป็นต้น

### 2.2.2.2 อาศัยคุณลักษณะเฉพาะเป็นหลัก (Feature-based methods)

สำหรับวิธีการจัดเรียงภาพแบบอาศัยคุณลักษณะเฉพาะเป็นหลัก [5] เป็นการมองภาพในลักษณะที่เป็นคุณลักษณะที่สัมพันธ์กันของภาพเช่น เส้นตรง เส้นโค้ง จุด เส้นที่ตัดกัน เส้นขอบ เป็นต้น ของภาพอ้างอิงและภาพอินพุตแทนการมองในเชิงโครงสร้างของภาพ

## 2.2.3 การจำแนกประเภทตามประเภทการแปลงสัญญาณ (Transformation model)

การจำแนกประเภทสามารถจำแนกอัลกอริทึมของการจัดเรียงภาพตามประเภทการแปลงสัญญาณได้อย่างกว้างๆ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของภาพอ้างอิงและภาพเป้าหมาย ได้ดังนี้

### 2.2.3.1 การแปลงสัญญาณเชิงเส้น (Linear Transformation (Affine, Rigid))

การแปลงสัญญาณเชิงเส้น [6] จะเป็นการซ้อนทับภาพ 2 ภาพ โดยภาพที่จะนำมาซ้อนทับกัน จะไม่มีการเปลี่ยนรูปในเชิงกายภาพ เช่น ภาพอวัยวะของบุคคลคนเดียวกัน แต่ถ่ายต่างช่วงเวลากัน จึงสามารถใช้การแปลงสัญญาณเชิงเรขาคณิต ได้แก่ การเลื่อนในแนวแกนอนและแกนตั้ง การหมุน และการขยายหรือลดขนาดได้

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

การแปลงสัญญาณไม่เชิงเส้น [7] ใช้สำหรับการซ้อนทับภาพ หรือการเปลี่ยนรูปที่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ภาพอวัยวะของผู้ป่วยที่แตกต่างกันหรือมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันเป็นต้น 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 การค้นหาเป็นหลัก (Search-based Methods)

การจัดเรียงภาพสามารถจำแนกตามรูปแบบของการค้นหาโดยนำเทคนิคการค้นหา มาช่วยในการหาจุดที่เป็นจุดควบคุมเดียวกัน การค้นหาอาศัยลักษณะเด่นบนภาพที่นำมาจัดเรียง เช่น เส้นตรง เส้นโค้ง วัตถุภายในภาพ เป็นต้น ตัวอย่างวิธีการของการจำแนกตามรูปแบบของการค้นหาเป็นหลัก [8] ผลของความแตกต่างกันที่ได้มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของภาพที่นำมาจัดเรียง จะถูกประเมินค่าและเปรียบเทียบเพื่อใช้ในการค้นหาจุดหรือตำแหน่งที่ตรงกันบนภาพทั้งสองที่ถูกต้องที่สุด

### 2.2.4.2 คุณสมบัติของเทคนิคโดยตรง (Direct Methods)

ตัวอย่างการจัดเรียงภาพด้วยวิธี Direct Method เช่น Lucas Kanade Method [9] และ Phase-Based Method [10] เป็นการประมาณการเปลี่ยนแปลงของภาพอ้างอิงและภาพอินพุต โดยอาศัยคุณสมบัติเชิงสถิติของภาพตามที่แต่ละเทคนิคกำหนด โดยปราศจากการนำเทคนิคการ

ค้นหาความช่วยเหลือ สำหรับ Lucas Kande Method อาศัยการวัดค่าความกลมกลืนกันระหว่างภาพที่นำมาจัดเรียง ในส่วนของ Phase-Based Method อาศัยการวัดค่าการเลื่อนตำแหน่งผ่านค่าคอลลิเรชัน เป็นต้น ค่าที่ได้เหล่านี้นำมาใช้ประมาณจุดหรือตำแหน่งที่ตรงกันบนภาพทั้งสอง

## 2.2.5 การจำแนกประเภทตามการได้มาของภาพ

### 2.2.5.1 แบบจำลองเชิงเดี่ยว (Single-modality)

อัลกอริทึมของการจัดเรียงภาพแบบจำลองเชิงเดี่ยว [11] จะสนใจเฉพาะการจัดเรียงและประกอบภาพที่มีรูปแบบเดียวกัน (เช่น ได้จากการใช้อุปกรณ์ถ่ายภาพชนิดเดียวกัน)

### 2.2.5.2 แบบจำลองเชิงมัลติ (Multi-modality)

อัลกอริทึมของการจัดเรียงภาพแบบจำลองเชิงมัลติ [12] จะสนใจการจัดเรียงและประกอบภาพที่ได้รับมาจากอุปกรณ์ถ่ายภาพที่แตกต่างกัน ตัวอย่างของการจัดเรียงและประกอบภาพแบบจำลองเชิงมัลติในงานด้านการประมวลผลภาพเพื่อการรักษาทางการแพทย์ ประกอบด้วย การจัดเรียงและประกอบภาพของสมองที่เรียกว่า “CT/MRI images” หรือทุกส่วนของร่างกายที่เรียกว่า “PET/CT images” สำหรับการระบุขอบเขตที่เป็นบริเวณของเนื้องอก เป็นต้น

## 2.2.6 การจำแนกประเภทตามการประยุกต์ใช้งาน

การจำแนกประเภทอัลกอริทึมของการจัดเรียงภาพโดยใช้ประเภทของการประยุกต์ใช้งานนั้น พิจารณาจากจำนวนของข้อมูลที่เหมาะสมของอัลกอริทึมสำหรับการจัดการ งานประยุกต์ และทฤษฎีพื้นฐานของอัลกอริทึม จากการสำรวจพบว่าสามารถจำแนกประเภทของงานประยุกต์ที่นำความรู้ทางด้านการจัดเรียงภาพไปใช้งาน ได้ดังนี้ [13]

### 2.2.6.1 การควบคุมระยะไกล (Remote sensing)

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานการควบคุมระยะไกลที่เกี่ยวข้องกับกองทัพและพลเรือน เช่น งานด้านการเกษตรกรรม ธรณีวิทยา สมุทรศาสตร์ การสำรวจแหล่งน้ำมัน และแร่ธาตุตามธรรมชาติ มลภาวะ ทั้งในเมืองและเขตป่าไม้หรือพื้นที่เป้าหมาย

### 2.2.6.2 การวิเคราะห์ทางการแพทย์ (Medical Image Analysis)

การวิเคราะห์ทางการแพทย์ประกอบด้วยการประมวลผลภาพเพื่อการวินิจฉัยโรคทางการแพทย์ ตัวอย่างเช่น การตรวจพบเนื้องอกและบริเวณที่เป็นโรค ตลอดจนงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น การจำแนกภาพของเซลล์เม็ดเลือด โครโมโซม ซึ่งได้มาจากกล้องจุลทรรศน์ เป็นต้น

### 2.2.6.3 การรู้จำรูปแบบ (Pattern Recognition)

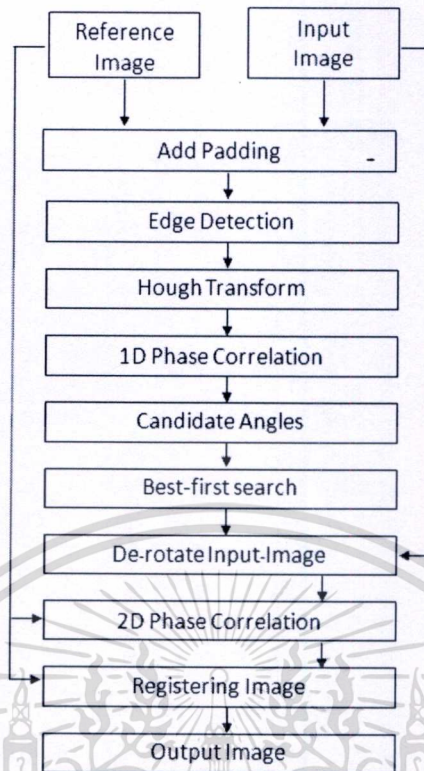
ในปัจจุบันพบว่ามียานมากมายที่เกี่ยวข้องกับการรู้จำรูปแบบ ตัวอย่างเช่น การรู้จำวัตถุ การรู้จำตัวอักษร การติดตามการเคลื่อนไหว การสร้างภาพสามมิติ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การแบ่งส่วนของรูปภาพ เป็นต้น

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากแนวความคิดเบื้องต้นในการจัดเรียงภาพที่ใช้สมมติฐานว่า บริเวณที่ถูกถ่ายภavnั้นคงที่ สิ่งที่เปลี่ยนแปลงคือตำแหน่งของอุปกรณ์ถ่ายภาพ ภาพถ่ายที่ได้จึงมีส่วนที่ทับซ้อนกัน หากหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ จะสามารถนำภาพมาประกอบกันได้ ดังนั้นจึงได้มีผู้เสนอแนวความคิดในการจัดเรียงภาพมากมาย ทั้งใน โดเมนของจุดในภาพ และ โดเมนความถี่ สำหรับผู้ที่จัดเรียงภาพบน โดเมนของจุดในภาพจะนำเสนอวิธีการในการค้นหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นโดยใช้อัลกอริธึมการค้นหาพร้อมกับเทคนิคต่างๆ เพื่อหาจุดที่เป็นจุดควบคุมเดียวกันบนภาพอ้างอิงและภาพอินพุตเรียกจุดเหล่านี้ว่า “จุดควบคุม (Control Points)” เมื่อสามารถหา จุดควบคุม ได้ก็สามารถหาการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพทั้งสองได้ จากการจัดเรียงภาพบน โดเมนจุดภาพพบว่าหากภาพที่ต้องการจัดเรียงนั้นเป็นภาพขนาดใหญ่ เวลาที่ใช้ในการค้นหานั้นย่อมนานขึ้นด้วยเนื่องจากขอบเขตการค้นหาที่เพิ่มขึ้น แต่ผลลัพธ์ที่ได้ค่อนข้างจะถูกต้องแม่นยำ ส่วนผู้ที่ทำบน โดเมนความถี่จะทำการแปลงภาพจาก โดเมนจุดภาพให้อยู่ใน โดเมนความถี่แล้วใช้เทคนิคเฟสคอลลิเรชันร่วมกับเทคนิคต่างๆ ช่วยหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น การจัดเรียงภาพบน โดเมนความถี่ประมวลผลได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากเทคนิคการแปลงฟูริเยร์และเทคนิคเฟสคอลลิเรชันใช้เวลาในการคำนวณน้อย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นการจัดเรียงภาพบน โดเมนความถี่ประกอบด้วย 3 งานวิจัย

### 2.3.1 งานวิจัยของ S. Chunhavittayatera and O. Chitsobhuk [14]

นำเสนอเทคนิคการจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่ในโดเมนความถี่โดยอาศัยเทคนิคแปลงข้อมูลแบบฮัท (Hough Transform) ร่วมกับเฟสคอลลิเรชันและการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน เพื่อหาการเลื่อนตำแหน่ง 3 ลักษณะ ได้แก่ การหมุน การเลื่อนในแนวแกนอน และการเลื่อนในแนวแกนตั้ง เพื่อแก้ปัญหาของการจัดเรียงภาพย่อยให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นจะใช้เทคนิคเฟสคอลลิเรชัน 1 มิติ เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของมุมใน Hough Space ที่ได้มาจากเทคนิคของการแปลงข้อมูลแบบฮัทการนำเทคนิคนี้มาใช้เนื่องจากเทคนิคเฟสคอลลิเรชันสามารถหาได้เพียงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนอนและแนวแกนตั้งเท่านั้น ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจึงได้นำเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัทมาช่วยเพื่อแปลงภาพจากระบบพิกัดฉากไปเป็นระบบพิกัดเชิงขั้วแล้วจึงใช้เฟสคอลลิเรชันหาการเปลี่ยนแปลงของมุมการหมุนในระบบพิกัดขั้วอีกทีหนึ่ง จากนั้นอาศัยการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ได้ผลลัพธ์ของมุมการหมุนที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นสำหรับภาพลักษณะต่างๆ กัน เมื่อได้มุมการหมุนแล้ว จะทำการหมุนภาพอินพุตกลับเพื่อชดเชยการหมุน สุดท้ายใช้เฟสคอลลิเรชัน 2 มิติ เพื่อทำการหาค่าของการเลื่อนตำแหน่ง และใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ในขั้นตอนทำการรวมภาพเพื่อสร้างภาพรวมใหญ่ แสดงขั้นตอนดังรูปที่ 2.6



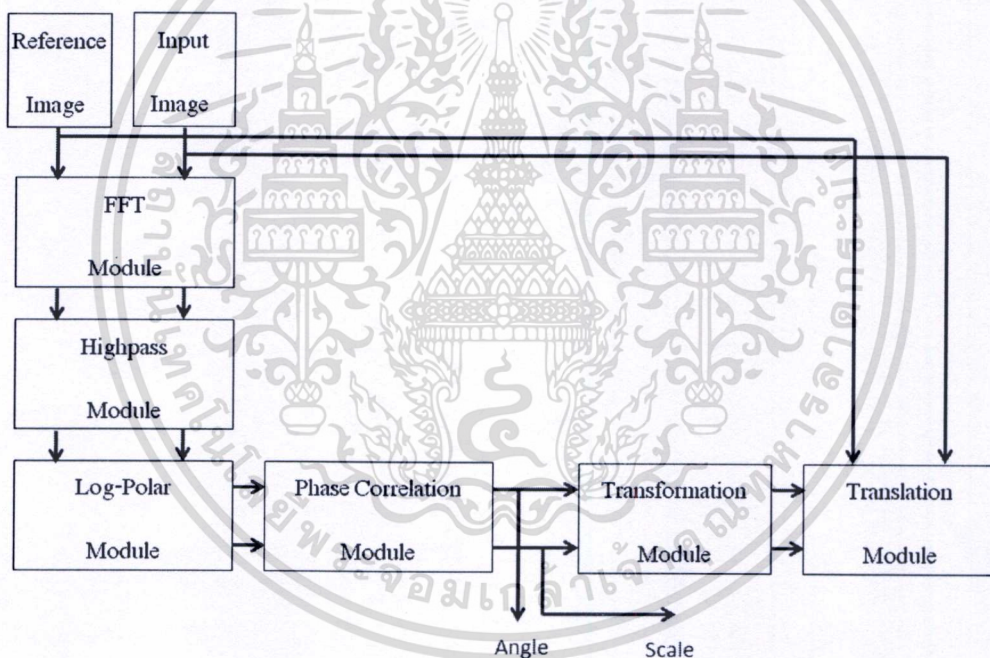
รูปที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพจากงานวิจัย [14]

จุดเด่นของงานวิจัย [14] คือ การนำข้อดีของการทำงานในโดเมนความถี่ด้วยเทคนิคเฟสคอลลิเรชั่นที่ใช้เวลาในการประมวลผลน้อย ร่วมกับการทำงานในโดเมนจุดภาพด้วยวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องสูงทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่าการทำงานในโดเมนจุดภาพเพียงอย่างเดียว การนำเทคนิคการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน มาใช้ทำให้ความถูกต้องเพิ่มขึ้นมากจากเทคนิคดั้งเดิมที่ใช้เพียงการแปลงข้อมูลแบบฮัพและเฟสคอลลิเรชั่น และสามารถหาการเลื่อนตำแหน่งได้ถูกต้องมากกว่าเทคนิคเฟสคอลลิเรชั่นเพียงอย่างเดียว

ในส่วนของข้อจำกัด คือ ความถูกต้องของเทคนิคการจัดเรียงภาพขึ้นกับลักษณะของภาพที่นำมาจัดเรียง เนื่องจากเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัพนั้นอาศัยเส้นตรงภายในภาพ ดังนั้นเมื่อภาพที่นำมาจัดเรียงมีเส้นตรงชัดเจนผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องสูง แต่เมื่อภาพที่นำมาจัดเรียงมีเส้นตรงไม่ชัดเจน จะทำให้ความถูกต้องลดลงอย่างรวดเร็ว สำหรับเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัพนั้นสามารถหาการเลื่อนตำแหน่งได้เพียง 3 ลักษณะเท่านั้น ได้แก่ การหมุน การเลื่อนในแนวแกนอนและแกนตั้ง ไม่สามารถใช้หาการเลื่อนในลักษณะของการขยายหรือลดขนาดได้ รวมถึงขั้นตอนการเลือกโหนดเริ่มต้นของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ค่า RMSE ที่ต้องใช้เวลาการประมวลผลสูง ซึ่งเวลาในการค้นหานี้เป็นการใช้เวลาในการคำนวณส่วนใหญ่ของระบบ ทำให้ระยะเวลาการรวมของระบบขึ้นตรงกับขั้นตอนนี้

### 2.3.2 งานวิจัยของ B.S. Reddy and B.N. Chatterji [15]

นำเสนอเทคนิคการจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่ในโดเมนความถี่โดยอาศัยเทคนิคเฟสคอลลิเรชั่น 2 มิติและการแปลงพิกัดลอกโปลาเพื่อหาการเลื่อน 4 ลักษณะ ได้แก่ การหมุน การขยายหรือลดขนาด การเลื่อนตำแหน่งในแนวนอน และแนวตั้ง การแปลงพิกัดจาก เป็นพิกัดลอกโปลา หลังผ่านการกรองความถี่สูงผ่าน (Highpass Filter) ทำให้สามารถใช้เทคนิคเฟสคอลลิเรชั่น 2 มิติ ในการหาการเลื่อนที่เกิดจากการหมุน และการขยายและลดขนาดได้ โดยที่ความถูกต้องไม่ขึ้นกับลักษณะของภาพที่นำมาจัดเรียง แต่ก็ยังคงขึ้นกับขนาดของพื้นที่การทับซ้อนระหว่างภาพตั้งต้นทั้งสองอยู่ จากนั้นเมื่อได้ค่ามุมการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาดที่เปลี่ยนแปลงไป จะทำการหมุนภาพและขยายหรือลดขนาดของภาพอินพุตกลับ สุดท้ายใช้เทคนิคเฟสคอลลิเรชั่น 2 มิติเพื่อทำการหาค่าของการเลื่อนตำแหน่ง และใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ในขั้นตอนทำการรวมภาพเพื่อสร้างภาพรวมใหญ่ แสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพของงานวิจัย [15] ดังรูปที่ 10



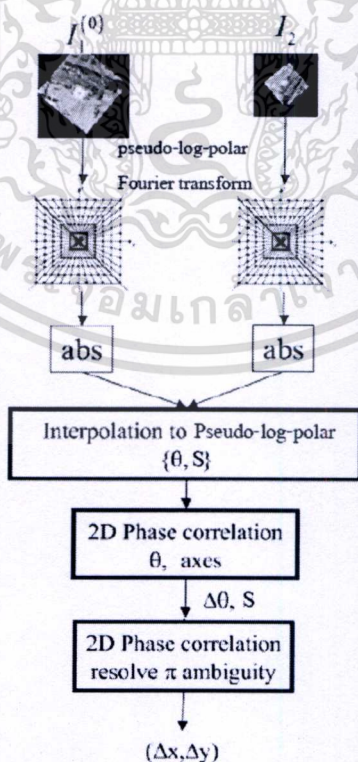
รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพจากงานวิจัย [15]

จุดเด่นของงานวิจัย [15] คือ การทำงานบนโดเมนความถี่ทั้งหมดทำให้เทคนิคการจัดเรียงภาพนี้ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยมาก รวมถึงการนำเทคนิคการแปลงพิกัดแบบลอกโปลาซึ่งขึ้นกับลักษณะของภาพน้อยส่งผลให้ความถูกต้องในภาพลักษณะต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันและสามารถหาการเลื่อนตำแหน่งได้ 4 ลักษณะ ได้แก่ การเลื่อนในแนวแกนอนและแกนตั้ง การหมุน การขยายหรือลดขนาด

ในส่วนของข้อจำกัด คือ การทำงานบนโดเมนความถี่เพียงอย่างเดียวทำให้ความถูกต้องของเทคนิคการจัดเรียงภาพถูกจำกัดด้วยคุณสมบัติของเทคนิคเฟสคอลลิเรชั่น ที่ประสิทธิภาพของการจัดเรียงภาพขึ้นกับขนาดของพื้นที่ทับซ้อนระหว่างภาพอ้างอิงและภาพอินพุต โดยถ้าพื้นที่ทับซ้อนมีขนาดใหญ่ จะทำให้ได้ความถูกต้องสูง แต่เมื่อพื้นที่ทับซ้อนมีขนาดเล็กความถูกต้องจะลดลง มุมการหมุนที่หาได้จึงมีความผิดเพี้ยนไปจากความจริงมาก ทำให้ไม่สามารถจัดเรียงภาพและประกอบได้อย่างกลมกลืน

### 2.3.3 งานวิจัยของ Hanzhou Liu, Baolong Guo and Zongzhe Feng [16]

นำเสนอเทคนิคการจัดเรียงภาพย่อยเพื่อประกอบเป็นภาพใหญ่ใน โดเมนความถี่โดยอาศัยเทคนิคเฟสคอลลิเรชั่น 2 มิติและการแปลงพิกัดลอกโปลาเทียม (Pseudo Log Polar) เพื่อหาการเลื่อนตำแหน่ง 4 ลักษณะ ได้แก่ การหมุน การขยายหรือลดขนาด การเลื่อนตำแหน่งในแนวนอน และแนวตั้ง งานวิจัยนี้พัฒนาต่อจาก [15] โดยนำเสนอการแปลงพิกัดลอกโปลาเทียมแทนการแปลงพิกัดลอกโปลาเดิม การแปลงพิกัดแบบลอกโปลาเทียมนี้สามารถหาค่าการหมุนและการขยายหรือลดขนาดได้แม่นยำมากขึ้น เมื่อภาพอ้างอิงและภาพอินพุตมีความคาบเคลื่อนที่เกิดจากการอินเตอร์โพลเลชันส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์บนพิกัดลอกโพลามีค่าใกล้ 0 จนทำให้เทคนิคเฟสคอลลิเรชั่น 2 มิติหาค่าการหมุนและการขยายหรือลดขนาดผิดพลาด



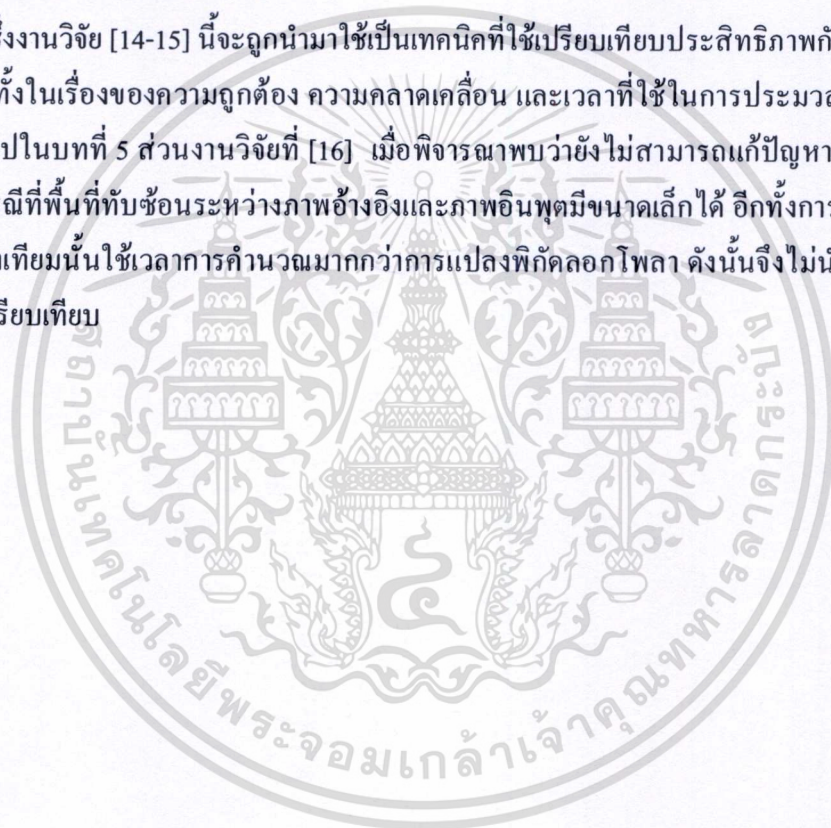
รูปที่ 2.8 แสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพจากงานวิจัย [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเด่นของงานวิจัย [16] คือ การนำพิกัดการแปลงพิกัดลอกโปลาเทียมมาใช้แทนการแปลงพิกัดลอกโปลาแบบเดิม ซึ่งขึ้นกับลักษณะของภาพน้อยส่งผลให้ความถูกต้องในภาพลักษณะต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันและสามารถหาการเลื่อนตำแหน่งได้ 4 ลักษณะ ได้แก่ การเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้ง การหมุน การขยายหรือลดขนาด สามารถทำให้ค่าคอลลิเรชันที่ได้จากเฟสคอลลิเรชันนั้นมีค่าสูงกว่าวิธีการดั้งเดิมแสดงถึงความถูกต้องที่เพิ่มมากขึ้นจากงานวิจัยที่ [15]

ในส่วนของคุณสมบัติ คือ งานวิจัยนี้ทำการทดลองจัดเรียงภาพที่มีการทับซ้อนระหว่างภาพอ้างอิงและภาพอินพุตขนาดใหญ่ได้ผลดี แต่เมื่อภาพที่นำมาจัดเรียงมีพื้นที่ทับซ้อนระหว่างภาพอ้างอิงและภาพอินพุตลดน้อยลงส่งผลให้ความถูกต้องของการจัดเรียงลดน้อยลงตามไปด้วยในอัตราส่วนที่น้อยกว่างานวิจัยที่ [15]

ซึ่งงานวิจัย [14-15] นี้จะถูกนำมาใช้เป็นเทคนิคที่ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับงานวิจัยที่นำเสนอ ทั้งในเรื่องของความถูกต้อง ความคลาดเคลื่อน และเวลาที่ใช้ในการประมวลผล โดยจะกล่าวต่อไปในบทที่ 5 ส่วนงานวิจัยที่ [16] เมื่อพิจารณาพบว่ายังไม่สามารถแก้ปัญหาการจัดเรียงภาพในกรณีที่พื้นที่ทับซ้อนระหว่างภาพอ้างอิงและภาพอินพุตมีขนาดเล็กได้ อีกทั้งการแปลงพิกัดลอกโปลาเทียมนั้นใช้เวลาการคำนวณมากกว่าการแปลงพิกัดลอกโปลา ดังนั้นจึงไม่นำงานวิจัยที่ [16] มาเปรียบเทียบ



บทที่ 3

ความรู้พื้นฐานในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

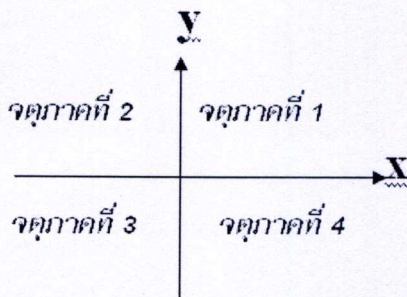
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎี และความรู้พื้นฐานที่ใช้ประกอบการจัดเรียงภาพในงานวิจัยนี้ได้แก่ ระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinates) ระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinates) ระบบพิกัดลอกโพล่า (Log-Polar Coordinates) การแปลงเรขาคณิต (Geometric Transform) การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) เฟสคอลลีเรชัน (Phase Correlation) อัลกอริทึมการค้นหา (Searching Algorithm) และการคำนวณค่า Root Mean Square Error (RMSE)

3.1 ระบบพิกัดในระนาบ

3.1.1 ระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinates or Rectangular Coordinates)

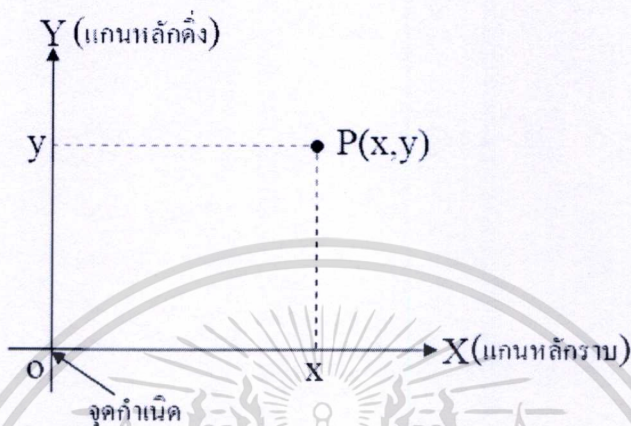
ระบบพิกัดฉาก เป็นแนวคิดเริ่มต้นที่สำคัญและเป็นพื้นฐานอย่างหนึ่งของเรขาคณิตวิเคราะห์ โดยแนวคิดของระบบพิกัดฉากทำให้สามารถจับคู่แบบหนึ่งต่อหนึ่งระหว่างคู่อันดับกับจุดบนระนาบ

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 แต่แต่ละส่วนเรียกว่า “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



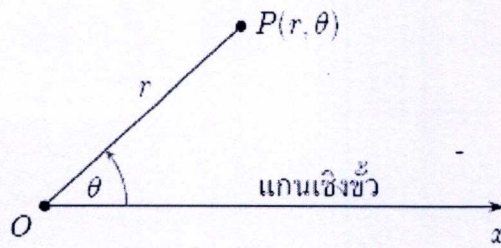
รูปที่ 3.2 พิกัดของจุด  $P(x, y)$  ใดๆ ในจตุภาคที่ 1

### 3.1.2 ระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinates or Polar Grid)

ระบบพิกัดฉากที่ใช้ระบุตำแหน่งของจุดในระนาบสองมิติ เรายังสามารถอาศัยระบบพิกัดเชิงขั้วในการระบุตำแหน่งบนระนาบสองมิติได้เช่นกัน ระบบพิกัดเชิงขั้วไม่ได้เป็นเพียงอีกทางเลือกหนึ่งในการระบุตำแหน่งของระนาบสองมิติ แต่มีความเหมาะสมกับลักษณะเส้นโค้งบางรูปแบบ กล่าวคือ เส้นโค้งบางเส้นมีรูปแบบสมการที่ยุ่งยากในระบบพิกัดฉาก แต่กลับมีรูปแบบง่ายๆ ในระบบพิกัดเชิงขั้ว

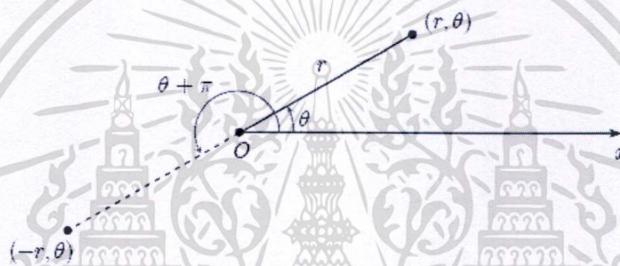
ระบบพิกัดเชิงขั้วประกอบด้วยจุด  $O$  ในระนาบซึ่งเรียกว่าขั้ว (Pole) หรือจุดกำเนิด (Origin) และลากรังสีจากจุด  $O$  ไปจนถึงจุดอนันต์ เรียกรังสีดังกล่าวว่าแกนเชิงขั้ว (Polar Axis) ซึ่งมักจะลากในแนวราบไปทางขวามือและสมนัยกับแกน  $x$  ด้านบวกในระบบพิกัดฉาก

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

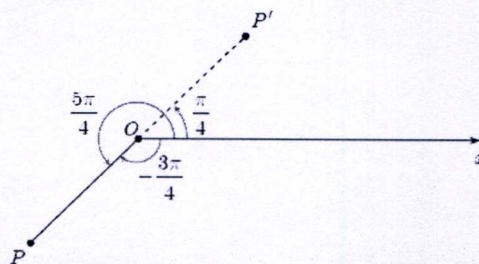


รูปที่ 3.3 ระบบพิกัดเชิงขั้ว

เราสามารถขยายความหมายของพิกัดเชิงขั้ว  $(r, \theta)$  เมื่อ  $r < 0$  ได้โดยตกลงว่าจุด  $(-r, \theta)$  เป็นจุดที่ได้จากการสะท้อนจุด  $(r, \theta)$  ผ่านจุด  $O$  ดังรูป 3.4 กล่าวคือเส้นตรงที่เชื่อมจุดทั้งสองผ่านจุด  $O$  และจุดทั้งสองอยู่ห่างจากจุด  $O$  เท่าๆ กัน แต่อยู่กันคนละด้านของจุด  $O$  สังเกตว่าจุด  $(-r, \theta)$  แทนจุดเดียวกับ  $(r, \theta + \pi)$

รูปที่ 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  $(r, \theta)$  ยังสามารถแทนได้ด้วยพิกัด  $(r, \theta + 2n\pi)$  หรือ  $(-r, \theta + (2n+1)\pi)$  เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนเต็มใดๆ



รูปที่ 3.5 จุดหนึ่งจุดมีพิกัดเชิงขั้วได้หลายพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

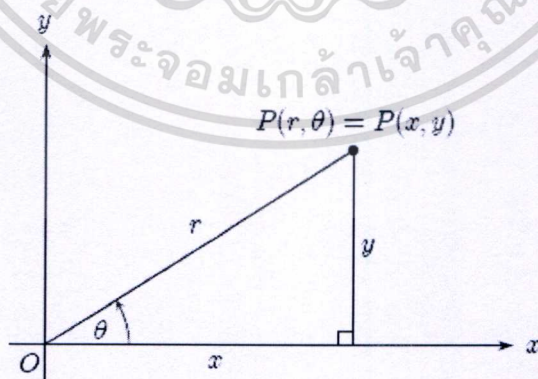
ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากกับพิกัดเชิงขั้วพิจารณาได้จากรูป 3.6 ซึ่งขั้วของระบบพิกัดเชิงขั้วทับกับจุดกำเนิดของระบบพิกัดฉาก และแกนเชิงขั้วของระบบพิกัดเชิงขั้วทับกับแกน  $x$  ด้านบวกของระบบพิกัดฉาก กำหนดจุด  $P$  ให้มีพิกัด  $(x, y)$  ในระบบพิกัดฉาก และมีพิกัด  $(r, \theta)$  ในระบบพิกัดเชิงขั้วจะเห็นได้จากรูปว่า

$$x = r \cos \theta \text{ และ } y = r \sin \theta \quad (3.1)$$

แม้เราจะได้สมการ (3.2) จากการพิจารณารูป 3.6 ซึ่งแสดงเฉพาะกรณีเมื่อ  $r > 0$  และ  $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$  แต่สมการ (3.2) เป็นจริงสำหรับทุกค่าของ  $r$  และ  $\theta$  สมการดังกล่าวทำให้เราสามารถหาพิกัดฉากได้เมื่อทราบพิกัดเชิงขั้ว ในทางกลับกัน เมื่อทราบพิกัดฉากเราสามารถหาพิกัดเชิงขั้วได้จาก

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

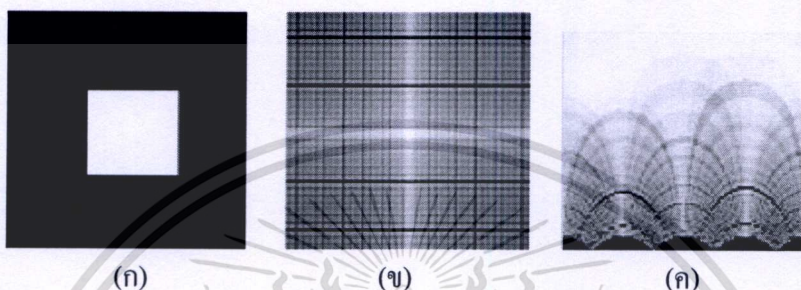
สังเกตว่า  $\theta$  ที่สอดคล้องกับสมการ (3.3) มีได้หลายค่า ในการหาพิกัดเชิงขั้วจากพิกัดฉาก เราจึงจะไม่เพียงเลือกค่า  $\theta$  ใดๆ ที่สอดคล้องกับ  $\tan \theta = \frac{y}{x}$  แต่จะต้องเลือก  $\theta$  ที่ทำให้จุด  $(r, \theta)$  อยู่ในจุดภาคที่ตรงกับที่ต้องการด้วย



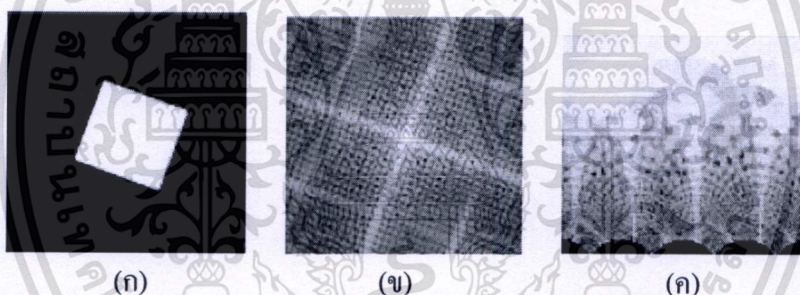
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดฉากและพิกัดเชิงขั้ว

### 3.1.3 ระบบพิกัดลอกลโลา (Log Polar Coordinates or Log Polar Grid)

ระบบพิกัดลอกลโลาคือระบบพิกัดเชิงขั้วซึ่งค่ารัศมี ( $r$ ) นั้นถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบ Log Scale ส่วนค่ามุม ( $\theta$ ) ยังคงอยู่บน Scale เดิม ระบบพิกัดลอกลโลานั้นถูกนำมาใช้ในงานด้านการประมวลผลภาพมากมาย อาทิเช่น การจัดเรียงภาพ การรู้จำภาพ การดึงคุณลักษณะเด่น เป็นต้น รูปที่ 3.7 และ 3.8 เป็นตัวอย่างของภาพดั้งเดิม (ก) และ (ข) เป็นภาพบนโดเมนความถี่ในระบบพิกัดแบบฉาก และ (ค) เป็นภาพบนโดเมนความถี่ในระบบพิกัดลอกลโลา

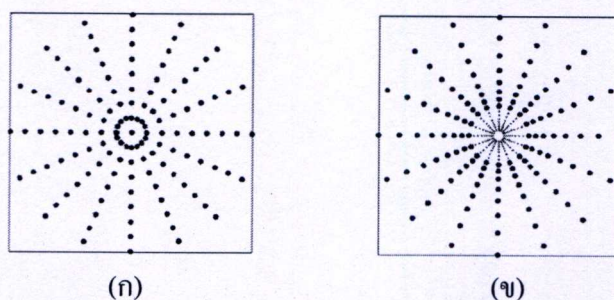


รูปที่ 3.7 (ก) Original image , (ข) FFT ในพิกัดฉาก , (ค) FFT ในพิกัดลอกลโลา



รูปที่ 3.8 (ก) Rotated image , (ข) FFT ในพิกัดฉาก , (ค) FFT ในพิกัดลอกลโลา

ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเชิงขั้วกับพิกัดลอกลโลา สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นว่าค่าที่อยู่ใกล้จุดกำเนิดจะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพิกัดเชิงขั้วและเพิ่มขึ้นเมื่อห่างจากจุดกำเนิดตามคุณสมบัติของ Log



รูปที่ 3.9 (ก) ระบบพิกัดเชิงขั้ว , (ข) ระบบพิกัดลอกลโลากริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการเปลี่ยนพิกัดจากเป็นพิกัดขั้วโพลานั้นมีขั้นตอนดังนี้

1) ทำการแปลงพิกัดจากเป็นพิกัดเชิงขั้วโดยใช้ความสัมพันธ์ ต่อไปนี้

$$(x, y) \Leftrightarrow (r, \theta)$$

โดยที่  $r^2 = x^2 + y^2$  และ  $\tan \theta = \frac{y}{x}$

2) ทำการแปลงพิกัดเชิงขั้วเป็นพิกัดขั้วลอการิทึมโดยความสัมพันธ์ ดังนี้

$$(r, \theta) \Leftrightarrow (\log r, \theta)$$

$$(\log r, \theta) \Leftrightarrow (\xi, \theta) \quad (3.3)$$

โดยที่  $\xi = \log r$

ดังนั้นความสัมพันธ์ของพิกัดเชิงขั้วและพิกัดขั้วลอการิทึมโพลานั้นมีความที่เท่ากันทุกจุด จะแตกต่างกันเพียงค่ารัศมีจากจุดกำเนิด ข้อมูลที่ได้หลังจากการแปลงพิกัดให้อยู่บนพิกัดขั้วลอการิทึมโพลานั้น เมื่อนำไปผ่านเทคนิคการดึงลักษณะเด่น อาทิเช่น เฟสคอนโวลูชัน การกรองความถี่แบบต่างๆ ลักษณะเด่นที่ได้มีคุณลักษณะที่แตกต่างไปจากที่ได้บนพิกัดเชิงขั้ว การนำไปใช้งานจึงแตกต่างกันตามความเหมาะสมในงานนั้นๆ

### 3.2 การแปลงเรขาคณิต (Geometric Transformation)

การแปลงเรขาคณิตเป็นการแปลงความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละพิกเซลในภาพ บ่อยครั้งเรามักเรียกการแปลงเรขาคณิตว่าเป็น “Rubber-sheet Transformation” เพราะถูกมองว่าเป็นการทำงานที่มีการพิมพ์ภาพบนแผ่นยางแล้วจับให้ยืดหยุ่นตามกฎที่นิยามไว้

การแปลงเรขาคณิตในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลภาพทางดิจิทัลประกอบด้วยการทำงาน 2 ส่วนหลักๆ

#### 3.2.1 การแปลงเรขาคณิตเชิงตำแหน่ง (Geometric Spatial Transformation)

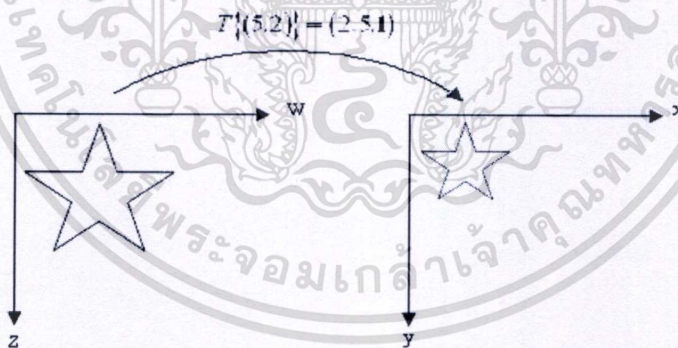
การแปลงเรขาคณิตเชิงตำแหน่งเป็นเทคนิคในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ลักษณะ รูปร่าง และขนาดของวัตถุใดๆ ในขอบเขตที่กำหนด โดยการเปลี่ยนแปลงที่สามารถเกิดขึ้นกับวัตถุได้นั้นมี

มากมายหลายรูปแบบ ได้แก่ การเลื่อนตำแหน่ง การหมุน การย่อ หรือขยายขนาดของภาพ การบิด การยืด และการผิดรูปของภาพ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงชนิดเดียว หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงหลายๆ อย่างร่วมกัน เทคนิคการทำกรแปลงเรขาคณิต จึงเป็นเทคนิคเบื้องต้น และมีความสำคัญมากในการประมวลผลภาพทางดิจิทัลที่ใช้ทำการแปลงวัตถุจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่ง

สำหรับการแปลงเรขาคณิตเชิงตำแหน่งนั้นจะอยู่ในรูปของสมการที่ใช้ในการแปลงวัตถุจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่ง ตามที่ต้องการ สมการในการแปลงวัตถุแต่ละรูปแบบ จะใช้สมการแตกต่างกัน ตัวอย่างของการแปลงเรขาคณิตเชิงตำแหน่งอย่างง่าย แสดงโดยสมมุติให้ภาพ  $f$  ซึ่งนิยามอยู่ในระบบพิกัด  $(w, z)$  ต้องการแปลงพิกัดเพื่อสร้างภาพ  $g$  ซึ่งนิยามอยู่ในระบบพิกัด  $(x, y)$  การแปลงพิกัดนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$(x, y) = T\{(w, z)\} \quad (3.4)$$

$T$  เป็นสมการการแปลงของวัตถุโดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ เช่น ถ้า  $(x, y) = T\{(w, z)\} = \left(\frac{w}{2}, \frac{z}{2}\right)$  การแปลงนี้จึงเป็นการย่อขนาดอย่างง่าย ๆ ของภาพ  $f$  โดยย่อลงไปครึ่งหนึ่งทั้งด้านกว้างและด้านยาว ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการแปลงตำแหน่งของภาพ

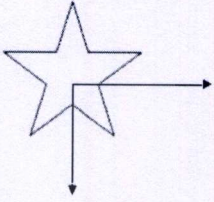

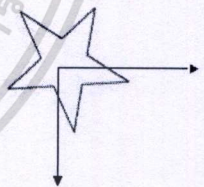
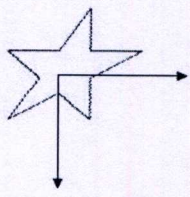
รูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นรูปแบบโดยทั่วไปของการแปลงเรขาคณิตเชิงตำแหน่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ ได้ดังนี้

$$[x \ y \ z] = [w \ z \ 1] T = [w \ z \ 1] \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & 0 \\ t_{21} & t_{22} & 0 \\ t_{31} & t_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

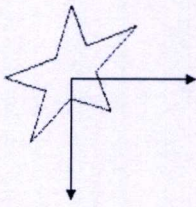

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปลงนี้สามารถทำการย่อหรือขยายขนาด การหมุน การเลื่อนตำแหน่ง หรือการบิดกับเส้นตรงของจุดในภาพ 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	$\begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = s_x w$ $y = s_y z$	
$s_x$ คือค่าการขยายหรือลดขนาดในแนวนอน $s_y$ คือค่าการขยายหรือลดขนาดในแนวตั้ง			
Rotation	$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = w \cos \theta - z \sin \theta$ $y = w \sin \theta + z \cos \theta$	
$\theta$ คือค่าของมุมการหมุน			
Shear (horizontal)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = w + \alpha z$ $y = z$	
$\alpha$ คือค่าสัมประสิทธิ์การบิดในแนวนอน			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Shear (vertical)	$\begin{bmatrix} 1 & \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = w$ $y = \beta w + z$	
$\beta$ คือค่าสัมประสิทธิ์การบิดในแนวตั้ง			
Translation	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta_x \\ 0 & 1 & \delta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$x = w + \delta_x$ $y = z + \delta_y$	
$\delta_x$ คือค่าการเลื่อนตำแหน่งในแนวนอน $\delta_y$ คือค่าการเลื่อนตำแหน่งในแนวตั้ง			

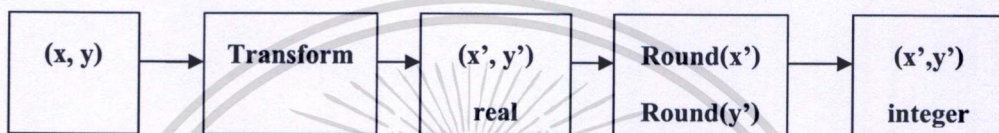
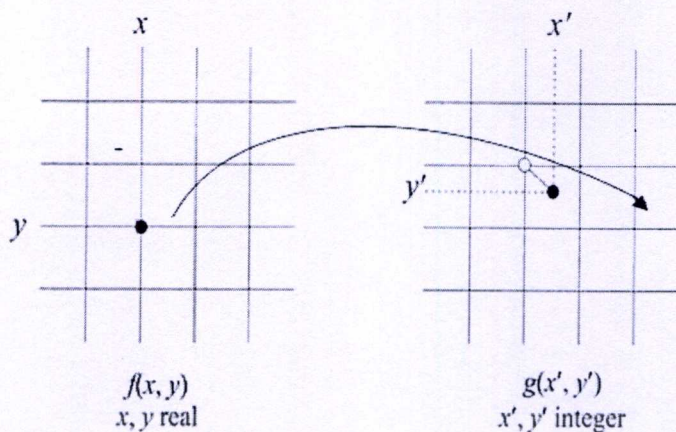
### 3.2.2 อินเตอร์โพลชัน (Interpolation)

อินเตอร์โพลชันเป็นกระบวนการที่ช่วยให้เราสามารถประยุกต์ใช้การแปลงเรขาคณิตเชิงตำแหน่งกับภาพได้ โดยเมื่อมีการแปลงเกิดขึ้นจะต้องมีการคำนวณค่าตำแหน่งใหม่ให้แก่แต่ละพิกเซลในภาพเดิม ซึ่งต้องมีการประมาณค่าของพิกเซลหรือบริเวณระหว่างพิกเซลในภาพ เช่น ในกรณีที่ต้องการขยายขนาดภาพ กระบวนการอินเตอร์โพลชันจะถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าของพิกเซลที่เพิ่มขึ้นกว่าเดิม ดังนั้นกระบวนการอินเตอร์โพลชันจึงเป็นส่วนหนึ่งของการประมวลผลภาพด้วยเสมอ

วิธีการคำนวณ โดยส่วนมากสำหรับการแปลงเรขาคณิตเชิงตำแหน่งที่ทำกับภาพสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

#### 3.2.2.1 วิธีการคำนวณที่ใช้ Forward mapping

Forward mapping เป็นการคำนวณโดยตรงโดยคำนวณแต่ละจุดในภาพตั้งต้นไปเป็นแต่ละจุดในภาพใหม่ ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งจะเห็นว่า จุดใดๆ ในภาพตั้งต้นซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่มีค่าเป็นจำนวนเต็ม มีโอกาสที่จะกลายเป็นจุดในตำแหน่งที่มีค่าเป็นทศนิยมในภาพใหม่

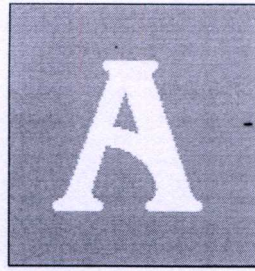


รูปที่ 3.11 การทำ Forward mapping

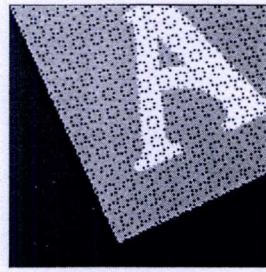
ลักษณะการทำ Forward mapping นี้ เมื่อมีการคำนวณตำแหน่งของจุดในภาพใหม่แล้วได้เป็นจุดทศนิยม ปกติแล้วจะใช้การปัดค่า (Rounding) ให้เป็นค่าจำนวนเต็มใกล้เคียงกับค่าที่ได้มากที่สุด ดังรูปที่ 3.11 ดังนั้นค่าใหม่  $g(x', y')$  หาได้จาก

$$g(\text{round}(x'), \text{round}(y')) = f(x, y) \quad (3.6)$$

วิธีการนี้อาจทำให้เกิดปัญหาที่มีพิกเซลที่ต่างกันสองพิกเซลหรือมากกว่าจำนวนแล้วไปตก ณ ตำแหน่งพิกเซลเดียวกันของภาพเอาต์พุท ทำให้เกิดปัญหาว่าจะทำอะไรที่จะรวมค่าพิกเซลที่เป็นอินพุทหลายๆ ค่านั้นไปใส่ในค่าพิกเซลเอาต์พุทเพียงค่าเดียว ปัญหาอื่นซึ่งมีความสำคัญเช่นกัน ได้แก่ บางพิกเซลของภาพเอาต์พุทอาจจะไม่ได้ถูกกำหนดค่าให้ หรือ ภาพที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงจะมีบางส่วน หรือทั้งหมดหลุดหายไปจากภาพ เนื่องจากการก่อนการทำการเปลี่ยนแปลงภาพ ขอบเขตของภาพจะมีเท่ากับภาพ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาพ ข้อมูลบางส่วนจากเดิม หรือทั้งหมดอาจจะตกในตำแหน่งนอกขอบเขตของภาพดังรูปที่ 3.12



(ก)



(ข)

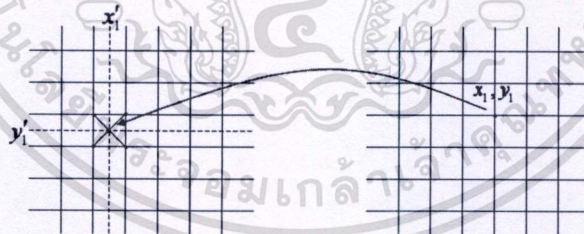
รูปที่ 3.12 ปัญหาของการทำ Forward mapping

(ก) ภาพตั้งต้น (ข) ภาพหลังจากการแปลงเรขาคณิต

รูปแบบที่ซับซ้อนกว่าของ Forward mapping คือนำมุมทั้ง 4 ของแต่ละพิกเซลที่เป็นอินพุตจับคู่เข้ากับรูปสี่เหลี่ยมในภาพที่เป็นเอาต์พุต พิกเซลอินพุตจะถูกแจกจ่ายไปทั่วกลางพิกเซลเอาต์พุตสอดคล้องกับพื้นที่ที่ครอบคลุม ถึงแม้จะมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า แต่ก็มีความซับซ้อนและเสียค่าใช้จ่ายมากในการคำนวณ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วจึงนิยมใช้วิธีการ Inverse mapping แทนการใช้ Forward mapping

### 3.2.2.2 วิธีการคำนวณที่ใช้ Inverse mapping

การคำนวณการแปลงเรขาคณิตแบบ Inverse mapping จะคำนวณในลักษณะย้อนกลับว่าแต่ละจุดในภาพใหม่นำมาจากตำแหน่งใดในภาพตั้งต้น ดังรูปที่ 3.13 Inverse mapping เช่นนี้ทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานมากกว่าวิธีการ Forward mapping

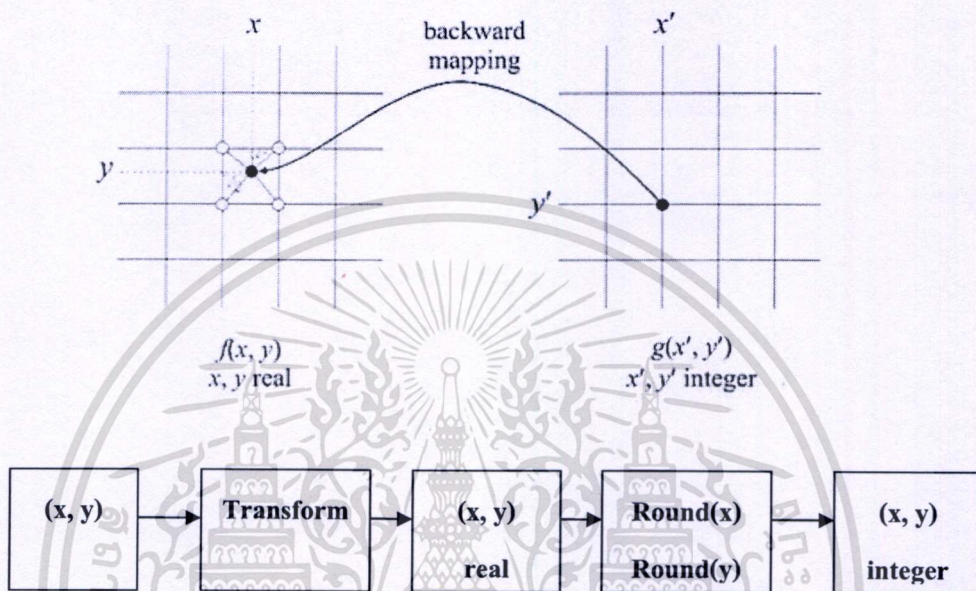


รูปที่ 3.13 การทำ Inverse mapping

ในการประมาณค่าแบบ Inverse mapping ที่ใช้ในการประมวลผลภาพแบ่งได้เป็นหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีวิธีการคล้ายคลึงกันโดยจะกำหนดค่าของพิกเซลจากการหาตำแหน่งพิกเซล ในภาพเอาต์พุตที่สอดคล้องกันบนภาพอินพุตและมีการคำนวณค่าเฉลี่ยบนเซตของพิกเซลในบริเวณนั้นๆ โดยค่าถ่วงน้ำหนักจะขึ้นกับระยะห่างระหว่างพิกเซลบนภาพอินพุตที่นำมาคำนวณกับพิกเซลในภาพเอาต์พุตที่สอดคล้องกันบนภาพอินพุตนั้นๆ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้

● **Zero-order Interpolation หรือ Nearest-neighbor Interpolation**

Zero-order Interpolation เป็นการประมาณค่าโดยกำหนดค่าจากจุดภาพข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด ค่าของพิกเซลในภาพเอาท์พุทจะถูกกำหนดจากค่าของพิกเซลในเซตของพิกเซลที่นำมาคำนวณที่ใกล้ที่สุด จุดที่อยู่ใกล้ที่สุดจะถูกสุ่มขึ้นมาโดยไม่นำพิกเซลอื่นในเซตนั้นมาคำนวณ ซึ่งสามารถแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การทำ Inverse mapping แบบ Zero-order Interpolation

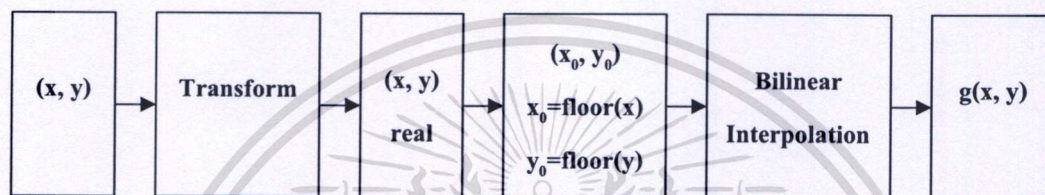
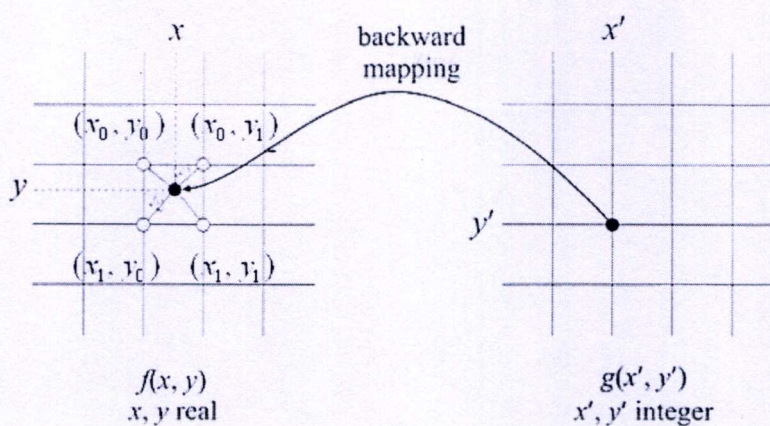
การคำนวณหาความเข้มแสงวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด คือคำนวณว่าตำแหน่งที่คำนวณได้นั้นใกล้กับตำแหน่งใดในภาพตั้งต้นมากที่สุด แล้วใช้ความเข้มแสงจากจุดนั้นเป็นความเข้มแสงของจุดในภาพใหม่ ความเข้มแสงของจุดในภาพใหม่  $g(x', y')$  จะมีสมการเป็นดังนี้

$$g(x', y') = f[\text{round}(x), \text{round}(y)] \tag{3.7}$$

การคำนวณหาความเข้มแสงด้วย Zero-order Interpolation จะทำได้ง่าย และรวดเร็วที่สุด แต่เนื่องจากการปัดค่าใกล้เคียงที่สุดแล้วใช้ความเข้มแสงจากตำแหน่งนั้น ทำให้เกิดภาพผลลัพท์ที่ได้เกิดความผิดพลาดได้ง่ายที่สุด

● **First-order Interpolation หรือ Bilinear Interpolation**

First-order Interpolation เป็นการประมาณค่าโดยค่าของพิกเซลในภาพเอาท์พุทจะถูกกำหนดจากการหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก โดยจุดภาพข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด จำนวน 4 หรือ  $2 \times 2$  พิกเซล ข้อมูลจะเรียบและต่อเนื่องหลังการการประมาณค่า การทำ Inverse mapping แบบ First-order Interpolation แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การทำ Inverse mapping แบบ First-order Interpolation

First-order Interpolation มีสมการดังนี้

$$g(x', y') = f(x_0, y_0) + [f(x_1, y_0) - f(x_0, y_0)]\Delta x + [f(x_0, y_1) - f(x_0, y_0)]\Delta y + [f(x_1, y_1) + f(x_0, y_0) - f(x_0, y_1) - f(x_1, y_0)]\Delta x\Delta y \quad (3.8)$$

โดย

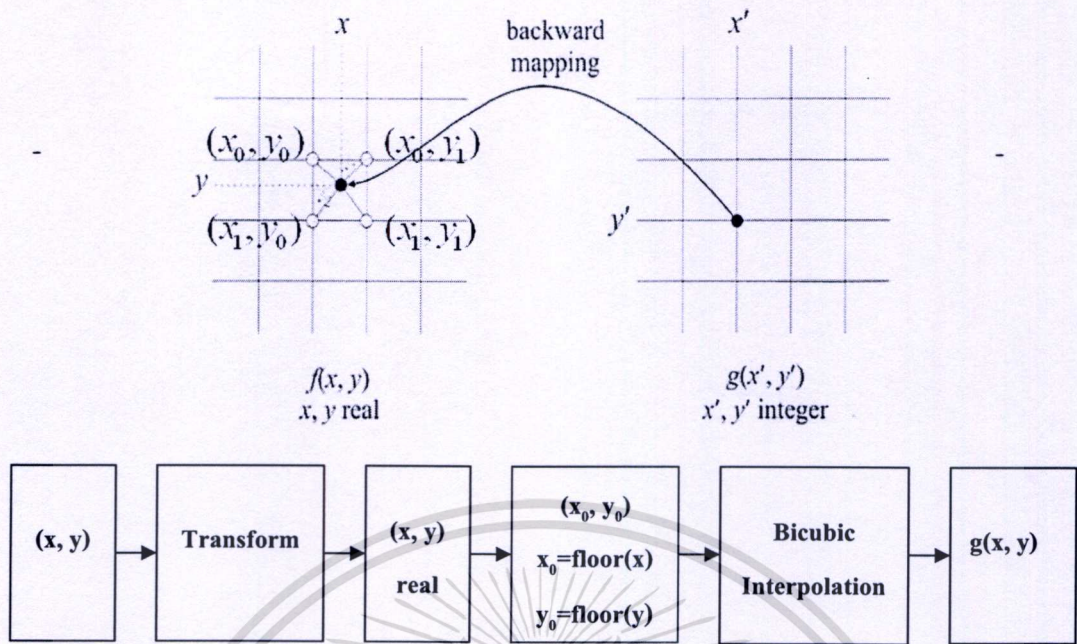
$$\Delta x = x - x_0$$

$$\Delta y = y - y_0$$

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

#### • High-order Interpolation หรือ Bicubic Interpolation

High-order Interpolation เป็นการประมาณค่าโดยค่าของพิกเซลในภาพเอาท์พุทจะถูกกำหนดจากการหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก โดยจุดภาพข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด จำนวน 16 พิกเซล หรือ  $4 \times 4$  พิกเซล การประมาณค่าด้วยวิธีนี้ให้ผลดีทั้งด้านความคมชัดและมีความต่อเนื่อง แต่ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าวิธีอื่นๆ ที่ผ่านมา การทำ Inverse mapping แบบ High-order Interpolation แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การทำ Inverse mapping แบบ High-order Interpolation

High-order Interpolation มีสมการดังนี้

$$g(x', y') = \sum_{m=-1}^2 \sum_{n=-1}^2 f(x_0 + m, y_0 + n) R(m - \Delta x) R(n - \Delta y) \quad (3.9)$$

$$R(k) = \frac{1}{6} [P(k-2)^3 - 4P(k+1)^3 - 4P(k-1)^3 + 6P(k)^3] \quad (3.10)$$

$$P(k) = \begin{cases} k, & k > 0 \\ 0, & k \leq 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

โดย

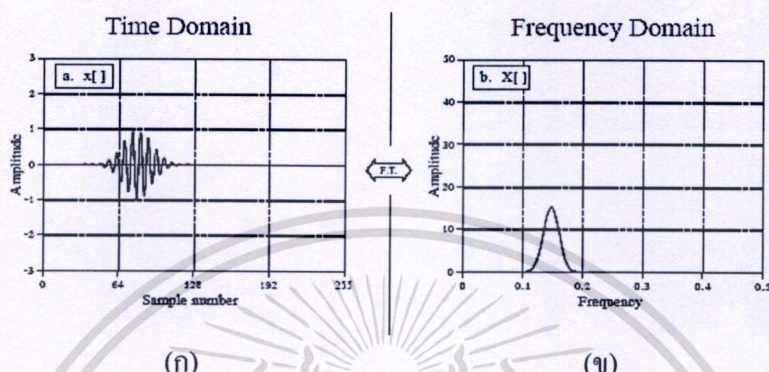
$$\Delta x = x - x_0$$

$$\Delta y = y - y_0$$

การคำนวณการแปลงเรขาคณิตแบบ Inverse mapping ทั้ง 3 วิธีพบว่าจำนวนพิกเซลที่นำมาคำนวณมีผลโดยตรงต่อความซับซ้อนในการคำนวณ เช่น การประมาณค่าแบบ High-order Interpolation จะมีความซับซ้อนและใช้เวลานานกว่าการประมาณค่าแบบ First-order Interpolation และการประมาณค่าแบบ First-order Interpolation ก็จะใช้เวลานานกว่าแบบ Zero-order Interpolation ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม จำนวนของพิกเซลที่นำมาใช้ประมาณค่าก็เกี่ยวข้องโดยตรงกับความถูกต้องเช่นเดียวกัน ดังนั้นในการเลือกวิธีประมาณค่าแบบใดจึงขึ้นอยู่กับงานและความต้องการของผู้ใช้ในเรื่องของความถูกต้องและซับซ้อนของการดำเนินงาน โดยทั่วไปแล้วการอินเตอร์โพลเช่นกันๆ ไปที่ที่ไม่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงมากๆ เราสามารถใช้ First-order Interpolation ก็เพียงพอต่อการใช้งานแล้ว

### 3.3 การแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform)

การแปลงฟูรีเยร์เป็นเทคนิคในการแยกองค์ประกอบของสัญญาณ เป็นองค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆ กัน โดยสัญญาณจะถูกแปลงจาก โดเมนของเวลา เป็น โดเมนของความถี่ ดังรูปที่ 3.17 หลังจากการแปลงฟูรีเยร์แล้วสัญญาณที่มีความถี่ต่างกันจะถูกแยกออกจากกัน



รูปที่ 3.17 การแปลงสัญญาณจาก (ก) โดเมนของเวลาเป็น (ข) โดเมนความถี่

วิธีของฟูรีเยร์ในการวิเคราะห์สัญญาณมีอยู่ 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) ใช้วิเคราะห์สัญญาณไม่ต่อเนื่องที่ไม่เป็นสัญญาณคาบ (Discrete-time Nonperiodic Signal)

สำหรับการประยุกต์ใช้การแปลงฟูรีเยร์กับงานด้านการประมวลผลภาพซึ่งแต่ละจุดในภาพมีตำแหน่งเป็นจำนวนเต็ม ไม่ต่อเนื่องกันจึงเป็นการนำ DFT มาใช้งาน โดยในที่นี้จะได้มีการอธิบายเฉพาะ DFT ซึ่งใช้ในงานวิจัยเท่านั้น

การแปลงฟูรีเยร์สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการประมวลผลภาพได้ ถ้าพิจารณารายละเอียดภายในภาพ จะพบว่าส่วนของภาพที่เป็นรายละเอียดต่างๆ ไปนั้นคือองค์ประกอบความถี่ต่ำของภาพ สำหรับส่วนที่เป็นองค์ประกอบความถี่สูงของภาพนั้นคือ ส่วนที่เป็นเส้นขอบของรูปภายในภาพ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากค่าหนึ่งไปเป็นอีกค่าหนึ่ง สามารถใช้เทคนิคการแปลงฟูรีเยร์ทำการแปลงภาพซึ่งอยู่ในโดเมนจุดภาพเป็น โดเมนความถี่ แต่เนื่องจากภาพมี

ลักษณะเป็น 2 มิติ ดังนั้นการทำ การแปลงฟูเรียร์จะต้องทำในลักษณะ 2 มิติ เช่นกัน ตัวอย่างของ การแปลงฟูเรียร์กับภาพแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การแปลงฟูเรียร์กับข้อมูลรูปภาพ

(ก) ภาพดั้งเดิม

(ข) ภาพที่ได้หลังจากการแปลงฟูเรียร์ของภาพดั้งเดิม

### 3.3.1 การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform)

การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (DFT) จะสามารถแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ให้กลายเป็นโดเมนความถี่ได้ ถ้าหากเป็นสัญญาณที่ไม่จำกัด และเป็นสัญญาณต่อเนื่องในโดเมนความถี่ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยคอมพิวเตอร์ ด้วยเหตุนี้ จึงนำเอาหลักการของ DFT เข้ามาช่วย

การทำ DFT เป็นการ Sampling สัญญาณใน โดเมนความถี่ เพื่อให้ได้สัญญาณไม่ต่อเนื่อง และสามารถใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์และคำนวณได้ ถ้าหากเรา Sampling ด้วย Sampling Frequency ที่สูงๆ จะทำให้ได้สัญญาณที่ดี เมื่อเราทำการ Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT) แปลงกลับจะทำให้ ได้สัญญาณที่คล้ายกับสัญญาณเดิมมาก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ Sampling Frequency

Discrete Fourier Transform (DFT) มีสมการดังนี้

$$F(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{M}\right)} \quad (3.12)$$

โดย  $f(x)$  คือความเข้มแสงของจุดในภาพเดิมที่ตำแหน่ง  $x$

$F(u)$  คือค่าที่ได้ในโดเมนความถี่ที่ตำแหน่ง  $u$

$M$  คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

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

$$F(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) \left[ \cos\left(\frac{2\pi ux}{M}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi ux}{M}\right) \right] \quad (3.13)$$

สำหรับการการแปลงฟูเรียร์มีข้อกำหนดว่า ขนาดของข้อมูล หรือคือค่า  $M$  จะต้องมีค่าอยู่ในรูปของ  $2^n$  ในกรณีที่มิใช่ค่า  $2^n$  จะต้องมีการเติมค่าเปล่าขึ้นเพื่อให้ถึง  $2^n$  จากสมการที่ 3.12 และ 3.13 เป็นสมการการการแปลงฟูเรียร์ให้ข้อมูลอยู่ในโดเมนความถี่สำหรับการแปลงข้อมูลกลับจากโดเมนความถี่เรียกว่า Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT) มีสมการดังนี้

$$f(x) = \sum_{u=0}^{M-1} F(u) e^{j2\pi\left(\frac{ux}{M}\right)} \quad (3.14)$$

$$f(x) = \sum_{u=0}^{M-1} F(u) \left[ \cos\left(\frac{2\pi ux}{M}\right) + j \sin\left(\frac{2\pi ux}{M}\right) \right] \quad (3.15)$$

สมการที่ 3.12 – 3.15 เป็นสมการของ DFT ในลักษณะ 1 มิติ แต่การการแปลงฟูเรียร์กับภาพนั้น ภาพมีลักษณะเป็น 2 มิติ ดังนั้นจึงต้องทำการการแปลงฟูเรียร์แบบ 2 มิติ สมการ DFT 2 มิติ แสดงได้ดังนี้

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

โดย  $F(u,v)$  คือค่าของข้อมูลในภาพบนโดเมนความถี่ในตำแหน่ง  $(u,v)$   
 $f(x,y)$  คือค่าของข้อมูลในภาพบนโดเมนจุดภาพในตำแหน่ง  $(x,y)$   
 $M$  คือ ขนาดของภาพในแนวแกน  $x$   
 $N$  คือขนาดของภาพในแนวแกน  $y$

และสมการ IDFT 2 มิติ มีดังนี้

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

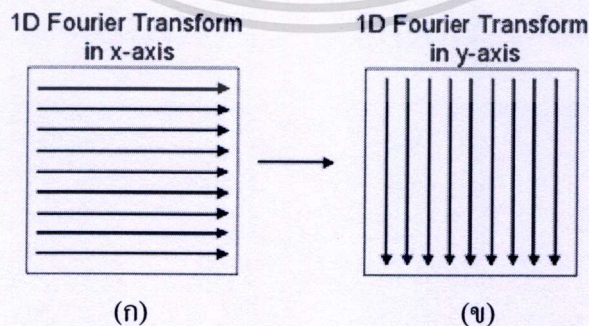
### 3.3.2 การแปลงฟูรีเยร์ (Fast Fourier Transform)

ปัจจุบัน อุปกรณ์ทางคอมพิวเตอร์มีราคาถูกลง อีกทั้งมีความแม่นยำสูง ทำให้การวิจัยและพัฒนาของการประมวลผลภาพเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในสาขาวิชาต่างๆ อย่างกว้างขวาง การประมวลผลสัญญาณเป็นอีกงานหนึ่งที่ถูกนำไปใช้และ DFT ก็สามารถรองรับงานดังกล่าวได้เป็นอย่างดี แต่การคำนวณ DFT นั้น เมื่อข้อมูลหรือลำดับของสัญญาณมีมาก ก็จะใช้เวลาในการประมวลผลมากขึ้นตามไปด้วยเท่านั้น ตัวอย่างเช่น การคำนวณสำหรับลำดับสัญญาณ  $N$  จุดนั้น คอมพิวเตอร์ต้องทำการคูณจำนวนเชิงซ้อนถึง  $N \times N$  ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อนอีก  $N(N-1)$  ครั้ง และจากสมการที่ 3.16 และ 3.17 สังเกตได้ว่าการแปลงฟูรีเยร์สำหรับข้อมูล 2 มิติ จะต้องใช้เวลาคำนวณค่อนข้างนาน เนื่องจาก 1 ตำแหน่งของ  $F(u, v)$  ในภาพบนโดเมนความถี่จะต้องทำการคำนวณผลรวมทั้งหมดเท่ากับ  $M \times N$  ครั้ง ดังนั้นภาพซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $M \times N$  จะต้องใช้การคำนวณผลรวมทั้งหมด  $(M \times N)^2$  ครั้ง หากภาพมีขนาดเท่ากับ  $100 \times 100$  จะต้องทำการคำนวณทั้งหมด  $10^8$  ครั้ง และหากภาพมีขนาดใหญ่ขึ้น การคำนวณก็จะต้องใช้เวลานานขึ้นอีก ดังนั้นจึงได้มีผู้คิดค้นเทคนิคที่เรียกว่า การแปลงฟูรีเยร์ (FFT) ซึ่งเป็นการคำนวณการแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว โดยมีแนวคิดในการคำนวณดังนี้

จากสมการที่ 3.16 จากคุณสมบัติของ  $\sum$  และเลขยกกำลัง สามารถจัดเรียงใหม่ได้เป็น

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{y=0}^{n-1} \left( \sum_{x=0}^{M-1} f(x, y) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{M}\right)} \right) e^{-j2\pi \left(\frac{vy}{N}\right)} \quad (3.18)$$

เมื่อจัดเรียงรูปแบบตามสมการที่ 3.18 แล้ว สังเกตว่าในวงเล็บ คือการทำ DFT 1 มิติในแนวแกน  $x$  ส่วนที่อยู่นอกวงเล็บ หมายถึงให้นำค่าที่ได้จากการคำนวณการแปลงฟูรีเยร์ในแนวแกน  $x$  มาทำการแปลงฟูรีเยร์ต่ออีกครั้งหนึ่งในแนวแกน  $y$  ดังรูปที่ 3.19

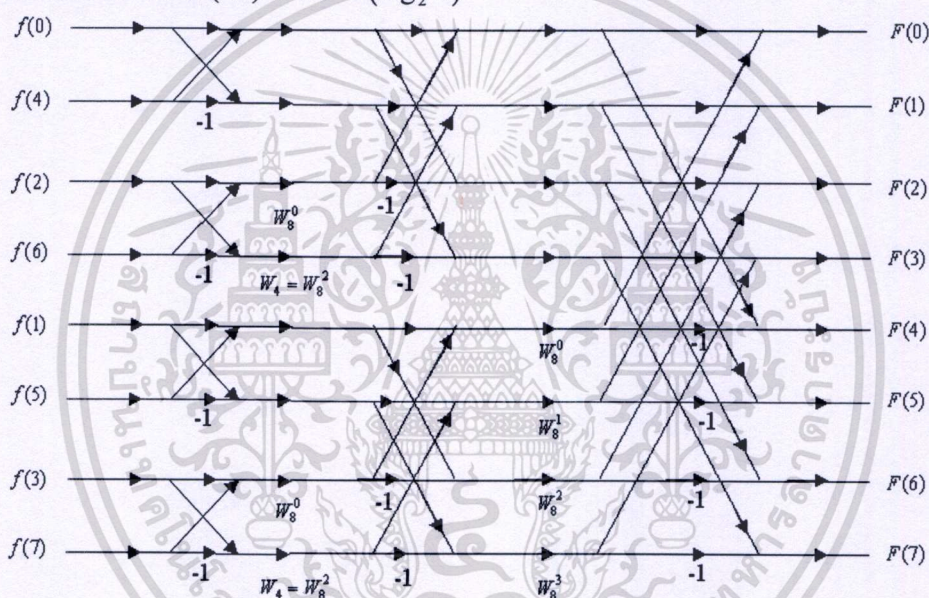


รูปที่ 3.19 การทำ FFT โดย (ก) เริ่มจากการทำ 1D DFT ในแนวแกน  $x$   
(ข) นำภาพที่ได้จากภาพ (ก) มาทำ 1D DFT ในแนวแกน  $y$

ลักษณะเช่นนี้จะทำให้จำนวนครั้งของการคำนวณลดลงจาก  $(M \times N)^2$  ครั้ง เหลือ  $2(M \times N)$  ครั้ง ถ้าภาพตั้งต้นมีขนาด  $100 \times 100$  จะทำการคำนวณทั้งหมด 20,000 ครั้ง จะเห็นได้ว่าจำนวนรอบของการคำนวณจะลดลงอย่างมาก ซึ่งจะทำให้เวลาในการคำนวณรวดเร็วยิ่งขึ้นด้วยตารางที่ 3.2 จะเปรียบเทียบให้เห็นประสิทธิภาพของ FFT เทียบกับวิธี DFT

ทิศทางในการแปลงฟูเรียร์นั้นสามารถสลับกันได้ กล่าวคือทำในแนวแกน x หรือ y ก่อนก็ได้ แล้วจึงกลับมาทำอีกแนวที่เหลือต่อไป สำหรับการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับก็ใช้หลักการเดียวกันในการทำ IDFT คือทำทีละแนวแกน แล้วใช้ค่าที่ได้ไปทำต่อในอีกแนวแกนหนึ่ง

การแปลงฟูเรียร์ยังมีผู้ได้ทำการปรับปรุง เพื่อให้คำนวณได้เร็วขึ้นกว่าเดิม โดยการลดการคำนวณค่าซ้ำซ้อนลง เรียกว่าวิธีนี้ว่า DIT-FFT มีตัวอย่างการคำนวณดังรูปที่ 3.20 ซึ่งจะลดเวลาในการคำนวณลงจากเดิม  $O(n^2)$  เหลือ  $O(\log_2 n)$



รูปที่ 3.20 เทคนิค DIT-FFT สำหรับข้อมูลจำนวน 8 จุด

ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนการคูณเลขเชิงซ้อนของ DFT และ FFT

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

### 3.4 เฟสคอรีเลชัน (Phase Correlation)

เฟสคอรีเลชันเป็นคุณสมบัติของภาพที่มีการเลื่อนตำแหน่งของสัญญาณ เมื่อนำมาใช้กับภาพจะแสดงถึงการเลื่อนตำแหน่งของภาพ ภาพที่นำมาทำเฟสคอรีเลชันได้ต้องมีขนาดเท่ากันและอยู่บนโดเมนความถี่ ค่าที่ได้หลังการเฟสคอรีเลชันนั้นจะถูกเก็บภายในอาร์เรย์ที่มีขนาดเท่ากับภาพอ้างอิงและภาพอินพุต

โดยทั่วไปนั้นเฟสคอรีเลชันสามารถนำมาใช้หาได้เพียงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนนอน  $\Delta x$  และในแนวแกนตั้ง  $\Delta y$  ระหว่างภาพ 2 ภาพ ดังนั้นการเลือกรูปแบบอื่นๆ อาทิเช่น รูปแบบการหมุนและการขยายหรือลดขนาด จำเป็นต้องนำเทคนิคอื่นๆ มาใช้ร่วมด้วย เราสามารถแบ่งวิธีการหาการเลื่อนตำแหน่งได้ 4 แบบ ดังนี้

#### 3.4.1 ภาพอินพุตที่มีการเลื่อนในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้งเพียงอย่างเดียวจากภาพตั้งต้น

การเลื่อนตำแหน่งของภาพเป้าหมายไปจากภาพอ้างอิงเมื่อทำการแปลงฟูเรียร์ให้อยู่บนโดเมนความถี่ จะมีความสัมพันธ์ระหว่างภาพ 2 ภาพเกิดขึ้น ถ้าภาพที่ 1 และ 2 เป็นภาพเดียวกันที่มีการเลื่อนตำแหน่งด้วยค่าการเปลี่ยนแปลง  $\Delta x$  และ  $\Delta y$  ในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้งตามลำดับ จะได้ว่า

$$f_2(x, y) = f_1(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (3.19)$$

โดยที่

$f_2$  คือ ภาพอ้างอิง

$f_1$  คือ ภาพเป้าหมายที่นำมาหาความสัมพันธ์กับภาพอ้างอิง

เมื่อทำการแปลงฟูเรียร์ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$F_2(u, v) = e^{-j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)} * F_1(u, v) \quad (3.20)$$

โดยที่

$$F_1(u, v) e^{-j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)}$$

คือ ค่าของภาพในโดเมนความถี่ตำแหน่ง  $(u, v)$  ใดๆ เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งของภาพ

จัดรูปสมการเพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง

$$\frac{F_1(u, v)}{F_2(u, v)} = e^{j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)} \quad (3.21)$$

จากสมการพบปัญหาเกิดขึ้นเมื่อตัวหาค่าเป็นศูนย์ทำให้การคำนวณเกิดความผิดพลาด ดังนั้นจึงทำการคำนวณการหารแบบใช้ค่าขนาดของจำนวนเชิงซ้อนที่ได้จากเฟสคอลลิเรชันเรียกวิธีการนี้ว่า Cross-power spectrum มีสมการดังนี้

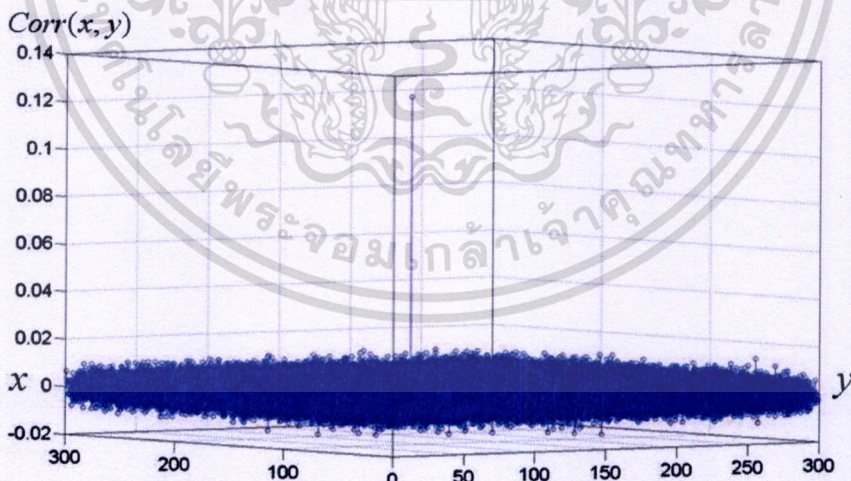
$$\frac{F_1(u, v)F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v)||F_2(u, v)|} = e^{j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)} \quad (3.22)$$

โดย  $F_2^*(u, v)$  หมายถึง Complex Conjugate ของ  $f_2$

ค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ยังอยู่ใน โดเมนความถี่อยู่ จึงทำการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับ เพื่อกลับมาอยู่ในโดเมนของจุดในภาพจะได้

$$Corr(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{e^{j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)}\} = \delta(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (3.23)$$

จากสมการด้านบนนี้  $Corr(x, y)$  ถูกเรียกว่าค่าคอลลิเรชันของการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งเก็บอยู่ในรูปแบบของภาพขนาดเท่ากับภาพตั้งต้น หรือ อาร์เรย์ 2 มิติเท่ากับจำนวนข้อมูลนั่นเอง แสดงตัวอย่างค่าคอลลิเรชันของการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งในรูปแบบของกราฟดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงค่าคอลลิเรชันการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้ง

ตามปกติแล้วค่าการเปลี่ยนแปลงควรเป็นจุดที่ทำให้  $Corr(x, y)$  มีค่าเท่ากับ 1.0 เป็นค่าสูงสุดของภาพ แต่เนื่องจากความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นเนื่องจากข้อมูลที่ไม่ได้ทับซ้อนกันระหว่างภาพตั้งต้นทั้งสอง หรือ มีสัญญาณรบกวน (Noise) ทำให้คำนวณค่าสูงสุดออกมามีค่าน้อยกว่า 1.0

ดังนั้นจึงทำการเลือกค่าการเปลี่ยนแปลงจากตำแหน่งที่ให้ค่า  $Corr(x,y)$  สูงที่สุดในภาพ ดังสมการ

$$(\Delta x, \Delta y) = \arg\{\max_{(x,y)}\{Corr(x,y)\}\} \quad (3.24)$$

$(\Delta x, \Delta y)$  เป็นค่าพิกัดที่ภาพเป้าหมายมีการเลื่อนตำแหน่งไปจากภาพอ้างอิงในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ

ดังนั้นจากทฤษฎีเฟสคอลลิเรชั่นด้านบน สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างภาพอ้างอิง และ ภาพอินพุต รวมถึงหาขนาดการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ได้ ในหัวข้อต่อไปเราจะมาพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของภาพเป้าหมายในลักษณะต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับการจัดเรียงภาพ เช่น การหมุน , การขยายขนาด , การลดขนาด เป็นต้น

### 3.4.2 ภาพอินพุตถูกหมุนและการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนนอนและแกนตั้งแต่ไม่ถูกขยายหรือลดขนาดจากภาพอ้างอิง

ถ้า  $f_2(x, y)$  เป็นภาพที่เกิดจากภาพ  $f_1(x, y)$  ที่ถูกเลื่อนตำแหน่งด้วยขนาด  $(\Delta x, \Delta y)$  และถูกหมุนด้วยมุม  $\Delta\theta$  จะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$f_2(x, y) = f_1(x \cos \Delta\theta + y \sin \Delta\theta + \Delta x, -x \sin \Delta\theta + y \cos \Delta\theta + \Delta y) \quad (3.25)$$

เมื่อทำ Fourier ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$F_2(u, v) = e^{-j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)} * F_1(u \cos \Delta\theta + v \sin \Delta\theta, -u \sin \Delta\theta + v \cos \Delta\theta) \quad (3.26)$$

ให้  $M_1$  และ  $M_2$  เป็นค่าขนาดของ  $F_1$  และ  $F_2$  ตามลำดับ

$$M_2(u, v) = M_1(u \cos \Delta\theta + v \sin \Delta\theta, -u \sin \Delta\theta + v \cos \Delta\theta) \quad (3.27)$$

ต่อมาทำการเปลี่ยนพิกัดจากเป็นพิกัดเชิงขั้วจะได้

$$M_2(r, \theta) = M_1(r, \theta + \Delta\theta) \quad (3.28)$$

ซึ่ง

$$u = r \cos \theta \quad , \quad v = r \sin \theta \quad , \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)$$

จากสมการ (3.28) สามารถใช้เทคนิคเฟสคอลลิเรชันแบบหนึ่งมิติในการหาค่ามุมการหมุน  $\Delta\theta$  ได้

### 3.4.3 ภาพอินพุตถูกขยายหรือลดขนาดเพียงอย่างเดียวจากภาพอ้างอิง

ถ้า  $f_1(x, y)$  เป็นภาพที่เกิดจาก  $f_2(x, y)$  ถูกขยายขนาดหรือลดขนาด ด้วยค่าการขยายหรือลดขนาด (Scale Factor) เป็น  $s$  จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาพทั้งสอง ดังนี้

$$f_2(x, y) = f_1(s \cdot x, s \cdot y) \quad (3.29)$$

เมื่อทำการแปลงฟูเรียร์ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$F_2(u, v) = \frac{1}{s^2} F_1\left(\frac{u}{s}, \frac{v}{s}\right) \quad (3.30)$$

ต่อมาทำการเปลี่ยนพิกัดจากเป็นพิกัดแบบลอกกาลิทึม (แนวคิดนี้ถูกเสนอ โดย [15]) การขยายหรือลดขนาดของภาพส่งผลให้การเลื่อนในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ได้ (จึงทำการแปลงพิกัดโดยละค่า  $\frac{1}{s^2}$  )

$$F_2(\log u, \log v) = F_1(\log u - \log s, \log v - \log s) \quad (3.31)$$

ถ้า

$$F_2(x, y) = F_1(x - c, y - c) \quad (3.32)$$

ดังนั้น

$$x = \log u, \quad y = \log v \quad \text{และ} \quad c = \log s$$

ค่าตำแหน่งการเลื่อน  $c$  สามารถหาได้จากเทคนิคเฟสคอลลิเรชันและค่าการขยายหรือลดขนาด  $s$  คำนวณจากหา  $c$  โดย

$$s = e^c$$

$e$  เป็นค่าฐานของ Log ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าการแปลงพิกัดจากเป็นพิกัดลอกกาลิทึมนั้นเป็นค่าฐานใดหมายความว่า ถ้า  $e$  มีค่าเท่ากับ 10 เมื่อแปลงจากพิกัดจากเป็นพิกัดลอกกาลิทึมค่าฐานของ Log Scale มีค่าเป็น 10 หรือถ้า  $e$  มีค่าเท่ากับ 2.718 เมื่อแปลงจากพิกัดจากเป็นพิกัดลอกกาลิทึมค่าฐานของ Log Scale มีค่าเป็น 2.718 ซึ่งเป็นลอกกาลิทึมฐานธรรมชาติ (Natural Logarithm)

### 3.4.4 ภาพอินพุตที่ถูกหมุน ขยายหรือลดขนาดและการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนอนและแนวตั้งจากภาพอ้างอิง

- ถ้า  $f_2(x, y)$  เป็นภาพที่เกิดจากภาพ  $f_1(x, y)$  ที่ถูกเลื่อนตำแหน่งด้วยขนาด  $(\Delta x, \Delta y)$  ถูกหมุนด้วยมุม  $\Delta\theta$  และขยายหรือลดขนาดด้วยค่า  $s$  จะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$f_2(x, y) = f_1(s \cdot x \cdot \cos \Delta\theta + s \cdot y \cdot \sin \Delta\theta + \Delta x, \\ -s \cdot x \cdot \sin \Delta\theta + s \cdot y \cdot \cos \Delta\theta + \Delta y) \quad (3.33)$$

เมื่อทำการแปลงฟูเรียร์ทั้งสองข้างของสมการและแปลงพิกัดจากเป็นพิกัดเชิงขั้วจะได้

$$F_2(r, \theta) = e^{j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} * s^{-2} F_1(s^{-1} r, \theta + \Delta\theta) \quad (3.34)$$

ให้  $M_1$  และ  $M_2$  เป็นค่าขนาดของ  $F_1$  และ  $F_2$  ตามลำดับ

$$M_2(r, \theta) = s^{-2} M_1(s^{-1} r, \theta + \Delta\theta) \quad (3.35)$$

ทำการแปลงพิกัดเชิงขั้วเป็นพิกัดลอการิทึม

$$M_2(\log r, \theta) = s^{-2} M_1(\log r - \log s, \theta + \Delta\theta) \quad (3.36)$$

$$M_2(\xi, \theta) = s^{-2} M_1(\xi - c, \theta + \Delta\theta) \quad (3.37)$$

เมื่อพิจารณาเพียงค่าขนาดแสดงดังสมการ

$$M_2(\xi, \theta) = M_1(\xi - c, \theta - \Delta\theta) \quad (3.38)$$

ซึ่ง

$$\xi = \log r, \quad c = \log s$$

สังเกตว่าสามารถใช้เทคนิคเฟสคอลลิเรชันในการหาค่าการหมุน การขยายหรือลดขนาดจากสมการที่ 3.38 ได้

### 3.5 วิธีการค้นหา (Searching Algorithm)

การค้นหาคำตอบ หรือการค้นหาข้อมูลในทางคอมพิวเตอร์มักจะกระทำบน โครงสร้างข้อมูลแบบต้นไม้ และกราฟ [17] ทั้งนี้เพราะ โครงสร้างข้อมูลในลักษณะนี้สามารถทำให้การค้นหาทำได้สะดวกและสามารถพลิกแพลงการค้นหาได้ง่าย ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว การค้นหาข้อมูล บางครั้งสามารถกระทำบน โครงสร้างข้อมูลชนิดอื่นก็ได้เช่น อาร์เรย์ แสตค และคิว แต่การจัดข้อมูล ในโครงสร้างนี้มีข้อจำกัดในการค้นหาข้อมูลอยู่มาก การค้นหาทำได้แบบเรียงลำดับ (Sequential Search) เท่านั้น ซึ่งใช้ได้กับข้อมูลที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นในการค้นหาข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ ก่อนการ ค้นหา หรือระหว่างการค้นหา ข้อมูลที่จะถูกค้นจะต้องถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบของต้นไม้ หรือกราฟ เท่านั้น การค้นหาข้อมูลบนโครงสร้างต้นไม้และกราฟสามารถจำแนกได้ 2 แบบ

#### 3.5.1 การค้นหาแบบโบลด์ (Blind Search)

การค้นหาแบบ โบลด์เป็นการค้นหาแบบที่เดินทางจากโหนดหนึ่งไปยังอีกโหนดหนึ่ง โดยอาศัยทิศทางเป็นตัวกำหนดการค้นหา ไม่ต้องมีข้อมูลอะไรมาช่วยเสริมการตัดสินใจว่าจะเดินทาง ต่อ ไปอย่างไร หรือกล่าวอย่างง่าย ๆ คือการจะหยิบข้อมูลใดมาช่วยในการค้นหาต่อไป ไม่ต้องอาศัย ข้อมูลใดๆ ทั้งสิ้น นอกจากทิศทางซึ่งเป็นรูปแบบตายตัว การค้นหาแบบ โบลด์สามารถแบ่งย่อยได้ ดังนี้ คือ การค้นหาทั้งหมด และการค้นหาบางส่วน

##### 3.5.1.1 การค้นหาทั้งหมด (Full Search)

การค้นหาทั้งหมด คือ การค้นหาทั้งหมดของปริภูมิสถานะ โดยทำการไล่หาคำตอบตั้งแต่โหนดแรกไปยังโหนดสุดท้ายหรือ จนกว่าจะพบคำตอบที่ต้องการในกรณีที่ทราบ คำตอบที่ต้องการค้นหาล่วงหน้าแล้ว

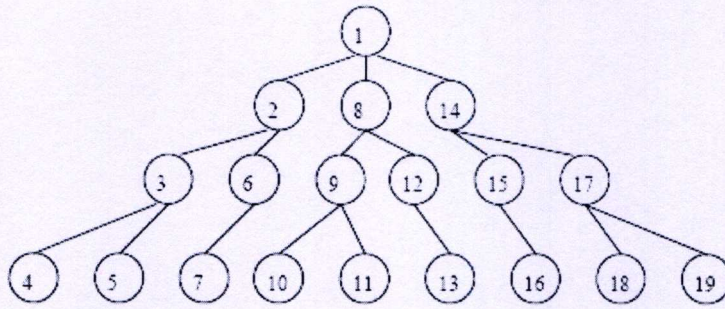
##### 3.5.1.2 การค้นหาบางส่วน (Partial Search)

เป็นการค้นหาเพียงบางส่วนของปริภูมิสถานะ ซึ่งในความเป็นจริงการค้นหา ส่วนมากใช้การค้นหาเฉพาะบางส่วนเท่านั้นเนื่องจากปริภูมิสถานะมักมีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถค้นหาได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าคำตอบที่ได้ อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด การ ค้นหาแบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

- การค้นหาแบบลึกก่อน (Depth First Search)

การค้นหาแบบลึกก่อนเป็นการค้นหาที่กำหนดทิศทางจากรูปของโครงสร้างต้นไม้ ที่เริ่มต้นจากโหนดราก(Root Node) ที่อยู่บนสุด แล้วเดินทางมาให้ลึกที่สุด เมื่อถึงโหนดล่างสุด (Terminal Node) ให้ย้อนขึ้นมาที่สุดอีก ทำเช่นนี้สลับไปเรื่อยจนพบโหนดที่ต้องการหาหรือสำรวจครบทุกโหนดแล้วตามรูปที่ 3.22 การค้นหาแบบลึกก่อนจะมีลำดับการเดินทางตามโหนดดังตัวเลขที่

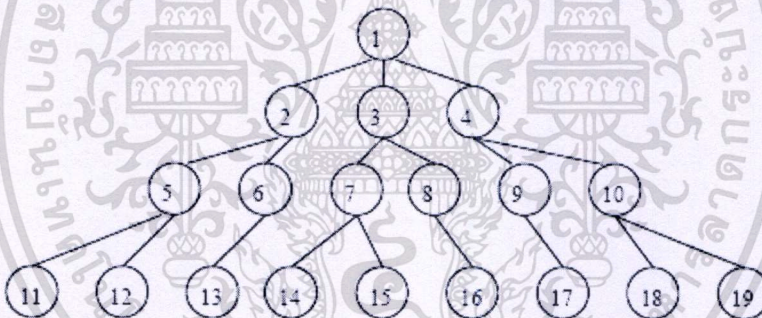
กำกับไว้ในแต่ละโหนดจุดสูงสุดของกิ่งเดียวกันที่มีกิ่งแยกและยังไม่ได้เดินผ่าน แล้วเริ่มเดินลงจนถึงโหนดลึก



รูปที่ 3.22 ลำดับการค้นหามโนทัศน์ของการค้นหาแบบลึกก่อน

- การค้นหาแบบกว้างก่อน (Breadth First Search)

การค้นหาแบบกว้างก่อนเป็นการกำหนดทิศทางการค้นหาแบบทีละระดับของโครงสร้างต้นไม้โดยเริ่มจากโหนดราก(ระดับที่ 0) แล้วลงมาระดับที่ 1 จากซ้ายไปขวา เมื่อเสร็จระดับที่ 1 ไประดับที่ 2 จากซ้ายไปขวาเช่นกัน ทำเช่นนี้เรื่อยๆ จนพบโหนดที่ต้องการตามรูปที่ 3.23 ลำดับการเดินทางของโหนดเป็นไปตามหมายเลขที่กำกับไว้บนโหนด



รูปที่ 3.23 ลำดับการค้นหามโนทัศน์ของการค้นหาแบบกว้างก่อน

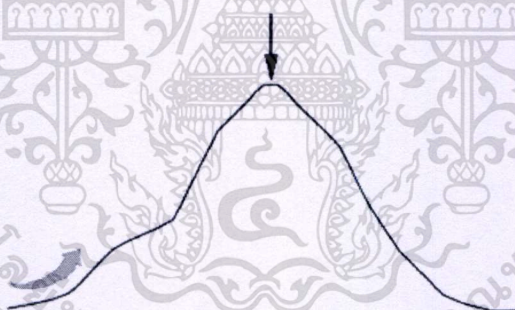
### 3.5.2 การค้นหาแบบฮิวริสติก (Heuristic Search)

การค้นหาคำตอบโดยอาศัยวิธีการทางฮิวริสติกมีความแตกต่างจากการค้นหาข้อมูลแบบธรรมดา โดยการค้นหาข้อมูลแบบธรรมดา ผู้ที่ทำการค้นข้อมูลจะต้องตรวจสอบข้อมูลที่ละตัวทุกตัวจนครบ แต่ฮิวริสติกจะไม่ลงไปดูข้อมูลทุกตัว วิธีการนี้จะเลือกคำตอบที่เหมาะสมให้กับการค้นหา ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถทำการค้นหาคำตอบจากข้อมูลที่มีขนาดใหญ่่มากๆ ได้ แต่มีข้อเสียคือคำตอบที่ได้เป็นเพียงคำตอบที่ดีเท่านั้นไม่แน่ว่าจะดีที่สุด แต่เนื่องจากว่าปัญหาในบางลักษณะนั้นใหญ่มาก และเป็นไปไม่ได้ที่จะทำ การค้นหาด้วยวิธีธรรมดา กระบวนการของฮิวริสติกจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและการค้นหาแบบฮิวริสติกมีสิ่งหนึ่งที่สำคัญคือ ฮิวริสติกฟังก์ชัน (Heuristic Function) ซึ่งหมายถึงฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ในการวัดขนาดของความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหาซึ่งจะแสดงด้วย

ตัวเลข วิธีการดังกล่าวจะกระทำได้โดยการพิจารณาถึงวิธีการ (Aspects) ต่างๆ ที่ใช้ในการแก้ปัญหา ณ สถานะหนึ่งว่าจะสามารถแก้ปัญหาได้ตามที่ต้องการหรือไม่ โดยกำหนดเป็นน้ำหนักที่ให้กับการแก้ปัญหของแต่ละวิธี น้ำหนักเหล่านี้จะถูกระบุด้วยตัวเลขที่กำกับไว้กับโหนดต่างๆ ในกระบวนการ ค้นหา และค่าเหล่านี้จะเป็นตัวที่ใช้ในการประมาณความเป็นไปได้ว่าเส้นทางที่ผ่านโหนดนั้น จะมีความเป็นไปได้ในการนำไปสู่หนทางการแก้ปัญหาได้มากน้อยแค่ไหน จุดประสงค์ที่แท้จริงของฮิวริสติกฟังก์ชันก็คือ การกำกับทิศทางของกระบวนการค้นหา เพื่อให้อยู่ในทิศทางที่ได้ประโยชน์สูงสุด โดยการบอกว่าควรเลือกเดินเส้นทางไหนก่อน การแก้ปัญหาหนึ่งๆ จะดีหรือไม่ ก็ขึ้นอยู่กับฮิวริสติกฟังก์ชันที่เลือกใช้ ดังนั้นการค้นหาแบบนี้จึงไม่มีอะไรเป็นหลักประกันว่าผลที่ได้ออกมาจะดีหรือไม่ ซึ่งการค้นหาแบบนี้ สามารถแบ่งได้เป็น

### 3.5.2.1 การค้นหาแบบปีนเขา (Hill Climbing Search)

การค้นหาแบบปีนเขาเป็นวิธีการค้นหาข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายกับการปีนภูเขาที่นักปีนภูเขาจะเดินทางไปถึงยอดเขา โดยจะต้องมองก่อนว่ายอดเขาอยู่ที่ใด แล้วต้องพยายามไปจุดถึงนั้นโดยเร็วที่สุด นักปีนเขาจะมองไปที่ยอดเขาแล้วสังเกตว่าทิศทางใดที่เมื่อปีนแล้วจะยิ่งใกล้ยอดเขา และหลีกเลี่ยงทิศทางที่เมื่อไปแล้วจะทำให้ตัวเองห่างจากยอดเขา นักปีนเขาจะต้องทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงยอดเขา ดังรูปที่ 3.24

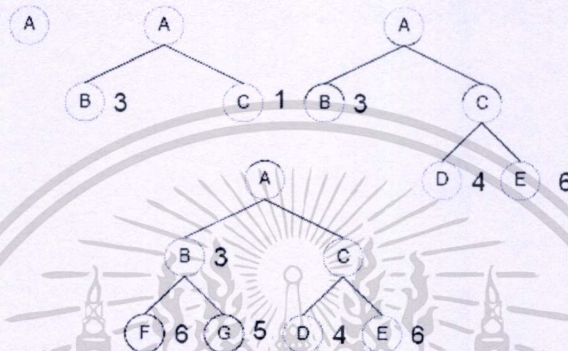


รูปที่ 3.24 แสดงลักษณะการค้นหาแบบ Hill Climbing

### 3.5.2.2 การค้นหาแบบการเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (Best First Search)

การค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (หรือเรียกสั้นๆ ว่า BFS) เป็นกระบวนการค้นหาข้อมูลที่ได้นำเอาข้อดีของทั้งการค้นหาแบบลึกก่อนและการค้นหาแบบกว้างก่อนมารวมกันเป็นวิธีการเดียว โดยที่แต่ละขั้นของการค้นหาในโหนดลูกนั้น จะเลือกโหนดที่ดีที่สุด (Most promising) และการที่จะทราบว่าโหนดใดดีที่สุดนี้สามารถทำได้โดยอาศัยฮิวริสติกฟังก์ชัน ซึ่งจะทำหน้าที่เสมือนตัววัดผล และให้ผลของการวัดนี้ออกมาเป็นคะแนน รูปที่ 3.25 แสดงตัวอย่างของการค้นหาแบบดีที่สุดก่อน โดยเริ่มจากขั้นตอนแรกสร้างโหนดราก(Root Node) ขั้นตอน 2 สร้างโหนดลูก B และ C แล้วตรวจสอบโหนด B และ C ด้วยฮิวริสติกฟังก์ชัน ได้ผลออกมาเป็นคะแนนคือ 3 และ 1 ตามลำดับ จากนั้นให้เลือกโหนด C เป็นโหนดต่อไปที่สนใจ เพราะมีค่าน้อยกว่า (หมายเหตุ

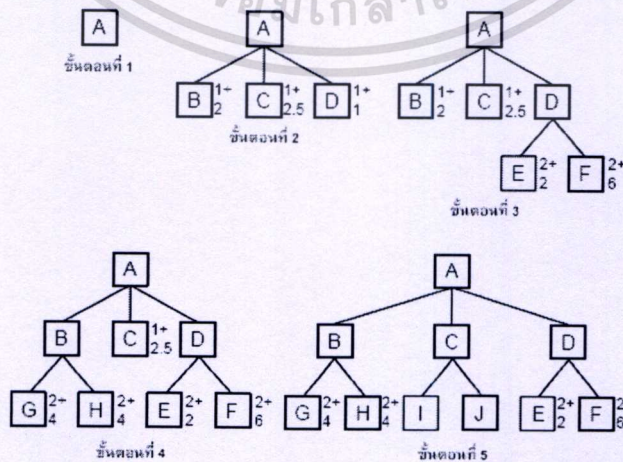
ในการเลือกนี้จะเลือกค่ามากที่สุด หรือน้อยสุดก็ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา แล้วสร้างโหนด ลูกให้กับโหนด C ในขั้นตอน 3 ได้โหนด D และ E แล้วตรวจสอบคะแนนได้ 4 และ 6 ตามลำดับ จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าของโหนดท้ายสุด หรือเทอร์มินอล โหนด(Terminal Node) ทุกโหนดว่าโหนดใดมีค่าดีที่สุด ในที่นี้จะต้องเลือกโหนด B เพราะมีคะแนนเพียง 3 (เลือกคะแนนต่ำสุด) แล้วสร้างโหนดลูกตามขั้นตอน 4 ได้ F และ G แล้วตรวจสอบคะแนนได้ 6 และ 5 คะแนนตามลำดับ ทำเช่นนี้เรื่อยๆ จนพบคำตอบหรือจนไม่สามารถ สร้างโหนดต่อไปได้อีก



รูปที่ 3.25 แสดงขั้นตอนของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน

3.5.2.3 การค้นหาแบบ A\* (A\* Search)

การค้นหาแบบ A\* เป็นอีกแบบของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน แต่ในกรณีของ A\* นี้จะมีลักษณะพิเศษก็คือ ส่วนของฮิวริสติกฟังก์ชัน ซึ่งการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนนั้น ค่าที่ได้จากฮิวริสติกฟังก์ชันจะเป็นค่าที่วัดจากโหนดปัจจุบัน แต่ในกรณีของ A\* ค่าของฮิวริสติกฟังก์ชันจะวัดจากค่า 2 ค่าคือ ค่าที่วัดจากโหนดปัจจุบันไปยังโหนดราก และจากโหนดปัจจุบันไปยังโหนดเป้าหมาย รูปที่ 3.26 แสดงตัวอย่างของการค้นหาคำตอบด้วยเทคนิคการค้นหาแบบ A\*



รูปที่ 3.26 แสดงขั้นตอนของการค้นหาแบบ A\*

### 3.6) Root Mean Square Error

การคำนวณค่า Root Mean Square Error หรือ RMSE [18] เพื่อวัดความแตกต่างระหว่างภาพนั้น จะคำนวณเฉพาะพื้นที่ของภาพส่วนที่เกิดการทับซ้อนกันเท่านั้น โดยมีสมการดังนี้

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}}{n} \quad (3.39)$$

โดย  $x_i$  คือค่าความแตกต่างของความเข้มแสงระหว่างภาพตั้งต้นทั้งสอง  
 $i$  คือตำแหน่งใดๆที่มีการซ้อนทับซึ่งจะเป็นจุดเดียวกันในภาพผลลัพธ์  
 $n$  คือจำนวนตำแหน่งทั้งหมดที่เกิดการซ้อนทับขึ้น

การทำ RMSE เป็นการวัดความแตกต่างของความเข้มแสงระหว่างภาพ ซึ่งโดยปกติ ถ้าหากทำการจัดเรียงภาพแล้วผลที่ได้มีความถูกต้องแน่นอน ค่า RMSE ที่คำนวณได้จากภาพผลลัพธ์ควรจะมีค่าเป็น 0 นั้นหมายความว่า ไม่มีความแตกต่างระหว่างภาพเลย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ภาพที่ได้จากการจัดเรียงภาพออกมาดูกลมกลืนเป็นภาพเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การที่ภาพอาจมีการหมุนร่วมด้วยเมื่อใช้การคำนวณอินเตอร์โพลชั่น ซึ่งเป็นการประมาณค่าใกล้เคียงหรือผลกระทบจากสัญญาณรบกวนจะทำให้ค่า RMSE ที่คำนวณได้มีค่าไม่ต่ำสุดย่น ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้ค่า RMSE น้อยที่สุดจึงเป็นค่าที่ให้ความถูกต้องมากที่สุด

## บทที่ 4

# วิธีการจัดเรียงภาพด้วยเทคนิคที่นำเสนอ

งานวิจัยนี้จะนำเสนอเทคนิคการจัดเรียงภาพ โดยได้รวมเทคนิคการแปลงฟูริเยร์ (FFT) เฟสคอลลิเรชัน ระบบพิกัดแบบลอคโพลารหรือลอคโพลาคริด และวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (BFS) ซึ่งได้นำข้อดีของการทำงานของโดเมนความถี่ที่ใช้เวลาในการประมวลผลที่น้อย และข้อดีของการทำงานในโดเมนของจุดในภาพซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องสูงมาใช้ร่วมกัน เทคนิคบนโดเมนความถี่ถูกนำมาช่วยลดขอบเขตการค้นหาผลลัพธ์บนโดเมนของจุด เพื่อลดเวลาการประมวลผลให้น้อยลงและยังให้ความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ทำให้สามารถรองรับการทำงานกับภาพลักษณะต่างๆ กัน โดยผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นและใช้เวลาประมวลผลที่น้อย เมื่อเปรียบเทียบการทำงานในโดเมนของจุดในภาพเพียงอย่างเดียว

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของการจัดเรียงภาพ ด้วยเทคนิคที่ได้นำเสนอ โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดที่ละเอียดจนได้ผลลัพธ์ที่ต้องการออกมา

### 4.1 ภาพรวมของการจัดเรียงภาพที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

การจัดเรียงภาพแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ การหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างคู่ภาพ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่สามารถหาได้ในงานวิจัยนี้จะจำกัดเฉพาะ การเลื่อนตำแหน่งในแนวนอนและแนวตั้ง การเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของภาพ และการขยายหรือลดขนาดของภาพเท่านั้น อีกส่วนหนึ่งคือ การนำภาพทั้งสองมาจัดเรียงและประกอบกันเป็นภาพใหญ่ภาพใหม่ ที่มีรายละเอียดของทั้งสองคู่ภาพ

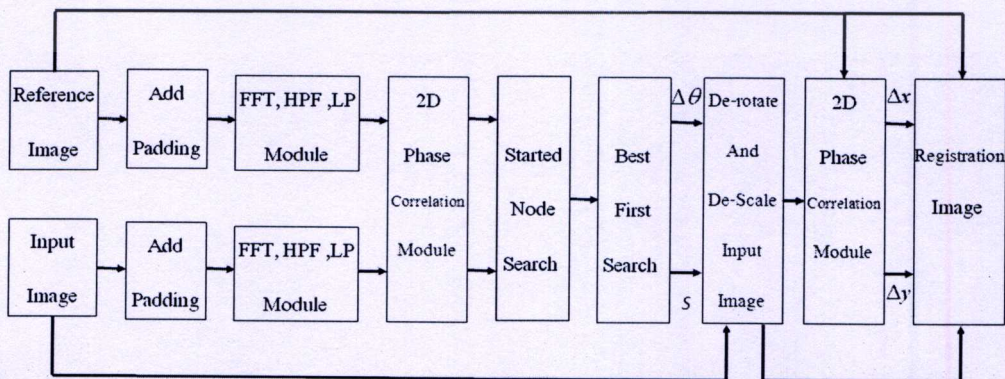
การหามุมการหมุนและการขยายหรือลดขนาดของภาพที่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในภาพที่ 4.1 เริ่มจากการนำภาพย่อย 2 ภาพมาทำการแปลงข้อมูลให้อยู่บนโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูริเยร์ผ่านการกรองความถี่สูงผ่าน เพื่อกรองให้เหลือแต่สัญญาณส่วนที่เป็นรายละเอียดของภาพที่สำคัญ รายละเอียดของภาพที่ผ่านตัวกรองความถี่สูงนี้ จะเสมือนเป็นจุดควบคุมในการต่อภาพต่อมาแปลงพิกัดของภาพจากพิกัดฉากเป็นพิกัดลอคโพลาร จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนและการขยายหรือลดขนาดด้วยเทคนิคเฟสคอลลิเรชัน 2 มิติได้  $Corr(s, \theta)$  เรียกค่านี้ว่าค่าคอลลิเรชันของการหมุนและการขยายหรือลดขนาด  $Corr(s, \theta)$  แสดงถึงมุมการหมุนและการขยายหรือลดขนาดที่เปลี่ยนแปลงที่เป็นไปได้ ต่อมานำมุมการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาดที่ได้สืบอันดับแรก จะถูกเลือกผ่านค่าคอลลิเรชันของการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้ง ( $Corr(x, y)$ ) มุมที่ให้  $Corr(x, y)$  มากที่สุดจะถูกเลือกเป็นโหนดเริ่มต้นของ BFS เพื่อค้นหามุมการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาดที่ต้องการออกมา

การหาการเปลี่ยนแปลงการการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนอนและแกนตั้ง ถูกคำนวณโดยใช้เทคนิคเฟสคอลลีเรชั่น 2 มิติ  $Corr(x, y)$  หลังจากทำการปรับภาพตั้งต้นทั้งสอง ให้อยู่ในมุมการหมุนและขนาดเดียวกันด้วยค่ามุมการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาดที่ได้จาก BFS ซึ่งหาการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนอนและแกนตั้งทำได้ง่ายและมีความถูกต้องมากกว่าการหาการเปลี่ยนแปลงมุมและการขยายขนาด การหาใช้เทคนิคเฟสคอลลีเรชั่น 2 มิติ  $Corr(x, y)$  ที่มีค่ามากที่สุดจะให้ค่าการเลื่อนตำแหน่งในแนวอน ( $\Delta x$ ) และแนวตั้ง ( $\Delta y$ ) ออกมา

ต่อมาเมื่อได้การเลื่อนตำแหน่งทั้งหมดจึงทำการจัดเรียงและประกอบภาพใหม่ โดยอาศัยเทคนิคการแปลงเรขาคณิตตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3

จากไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของวิธีการที่ได้นำเสนอแสดงในรูปที่ 4.1 กล่าวได้ว่าการปรับปรุง และเพิ่มเติมวิธีการบางอย่างเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพจากเดิมซึ่งเป็นการจัดเรียงภาพบนโดเมนความถี่โดยวิธีการแปลงข้อมูลแบบฮัพ เฟสคอลลีเรชั่นร่วมกับการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนของ [14] ซึ่งวิธีการนี้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งในแนวอนและแนวตั้ง การหมุนเท่านั้น จากงานวิจัย [14] พบว่าวิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการจัดเรียงภาพ ได้ดีทั้งความถูกต้องกับภาพบางลักษณะเท่านั้น แต่เมื่อภาพที่นำมาเป็นภาพตั้งต้นมีความหลากหลายมากขึ้น ประสิทธิภาพก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะภาพที่มีรายละเอียดในภาพมากและมีเส้นตรงในภาพน้อย อีกทั้งเวลาที่ใช้ประมวลผลค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ บนโดเมนความถี่ ทั้งนี้เนื่องมาจากเทคนิคที่นำมาใช้

งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการพัฒนาประสิทธิภาพด้านความถูกต้องให้สูงขึ้นและระยะเวลาในการประมวลผลที่ลดน้อยลง รวมถึงขยายขอบเขตการหาการเปลี่ยนแปลงให้ครอบคลุมการขยายและลดขนาด โดยการเลือกใช้การแปลงพิกัดของภาพแบบลอก โพลากริดแทนการแปลงข้อมูลแบบฮัพ ปรับปรุงเทคนิคการคัดเลือกมุมแข่งขัน (Candidate Angles) และสุดท้ายเพิ่มเติมเทคนิคการเลือกโหนดเริ่มต้นของ BFS เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหามุมการหมุนให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยใช้เวลาในการประมวลผลที่น้อยลง



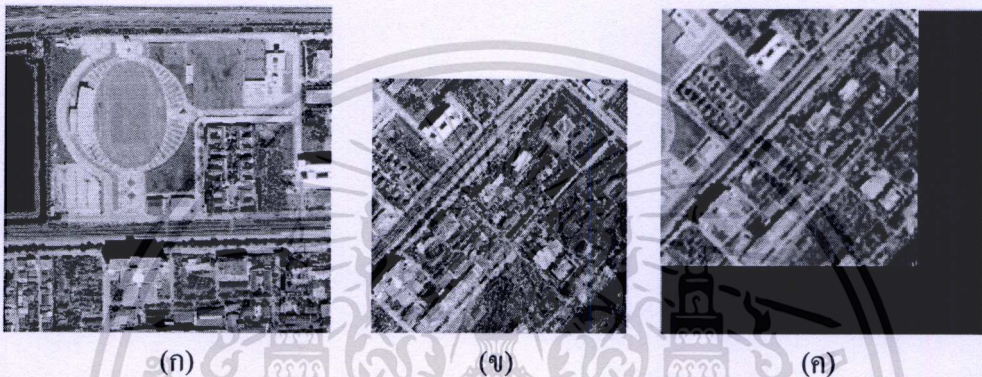
รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การปรับขนาดของภาพด้วยเทคนิคการ Padding

การจัดเรียงภาพในขั้นตอนแรก เริ่มต้นที่การนำภาพย่อย 2 ภาพในรูปที่ 4.1(ก) คือ Input Image1 ซึ่งเป็นเสมือนภาพตั้งต้นและรูปที่ 4.2(ข) คือ Input Image2 ซึ่งเสมือนเป็นภาพอินพุตมา ตรวจสอบว่าภาพทั้งสองมีขนาดเท่ากันหรือไม่ หากไม่ ต้องทำการเติมค่า 0 ลงไปในภาพที่เล็กกว่า โดยจะเติมด้านมุมล่างขวาจนได้ขนาดเท่ากัน ดังรูปที่ 4.2(ค)

การทำ Padding เป็นการเตรียมภาพให้มีขนาดเหมาะสมสำหรับทำเฟสคอลลิเรชัน เนื่องจากการทำเฟสคอลลิเรชัน อาศัยเทคนิค FFT ซึ่งข้อมูลนำเข้าต้องเป็นจำนวนของ  $2^n$



รูปที่ 4.2 แสดงการทำ Padding

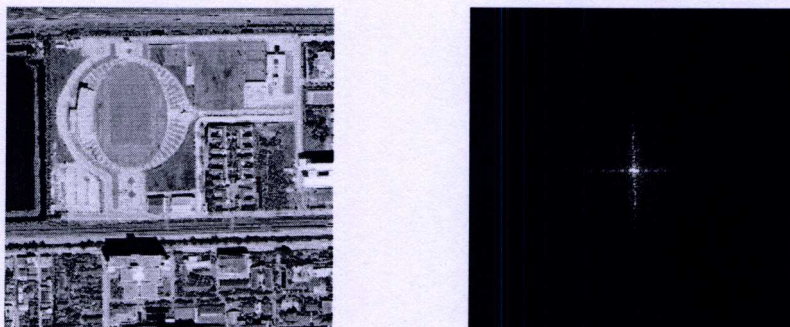
(ก) ภาพตั้งต้น

(ข) ภาพอินพุต

(ค) คือภาพอินพุต (ข) ที่ได้ทำการเพิ่ม 0 จนมีขนาดเท่ากับภาพอินพุต (ก) และมีขนาดเป็น  $2^n$

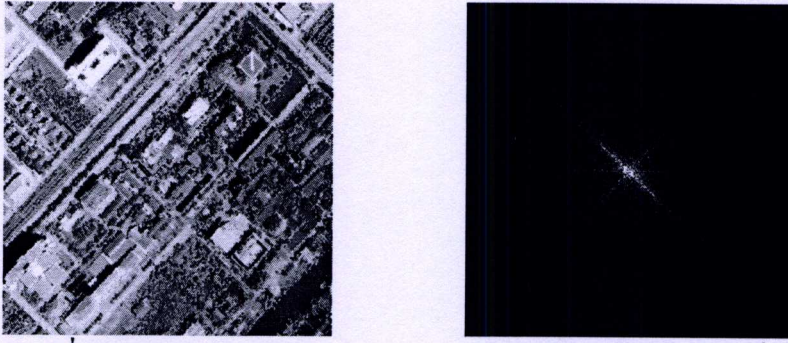
## 4.3 การแปลงฟาสฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform)

ทำหน้าที่แปลงข้อมูลภาพจากโดเมนของจุดในภาพเป็นโดเมนความถี่ด้วย FFT แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 แสดงภาพตั้งต้นบนโดเมนของจุดในภาพและ โดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงภาพอินพุตบนโดเมนของจุดในภาพและโดเมนความถี่

ภาพตั้งต้นและภาพอินพุตถูกแปลงจากโดเมนของจุดในภาพเป็นโดเมนความถี่ เพื่อให้สามารถหาการเปลี่ยนแปลงของภาพด้วยเทคนิคเฟสคอสตีเรชั่นตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3

#### 4.4 การกรองความถี่สูงผ่าน (Highpass Filter)

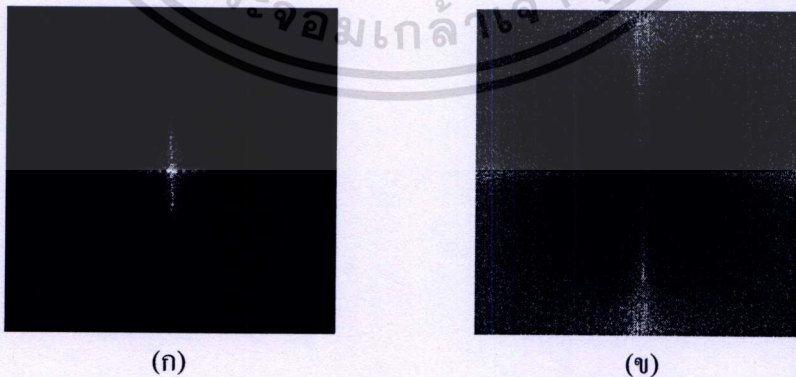
หลังผ่าน FFT ภาพทั้งสองนั้นถูกแปลงอยู่ใน โดเมนความถี่ ต่อมานำภาพทั้งสองมาผ่านการกรองความถี่สูงผ่าน เพื่อกรองสัญญาณให้เหลือแต่ส่วนที่มีความถี่สูงซึ่งเป็นส่วนที่เป็นรายละเอียดสำคัญในการหาความสัมพันธ์ของภาพต่อไป มีสมการดังนี้

$$H(u, v) = (1.0 - X(u, v)) * (2.0 - X(u, v)) \quad (4.1)$$

ซึ่ง

$$X(u, v) = [\cos(\pi u) \cos(\pi v)] \quad \text{และ} \quad -0.5 \leq u, v \leq 0.5 \quad (4.2)$$

แสดงผลลัพธ์จากการกรองความถี่สูงของภาพในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ดังต่อไปนี้



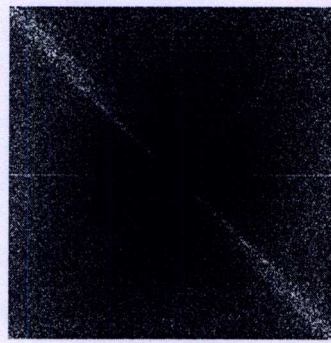
รูปที่ 4.5 แสดงการกรองความถี่สูงผ่านของภาพตั้งต้น

(ก) ภาพตั้งต้นก่อนผ่านการกรองความถี่สูงผ่าน

(ข) ภาพตั้งต้นหลังผ่านการกรองความถี่สูงผ่าน



(ก)



(ข)

#### รูปที่ 4.6 แสดงการกรองความถี่สูงผ่านของภาพอินพุต

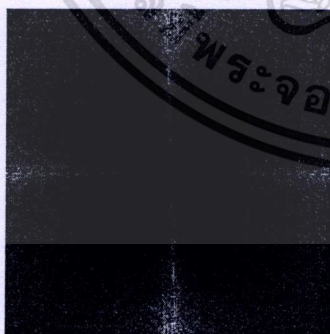
(ก) ภาพอินพุตก่อนผ่านการกรองความถี่สูงผ่าน

(ข) ภาพอินพุตหลังผ่านการกรองความถี่สูงผ่าน

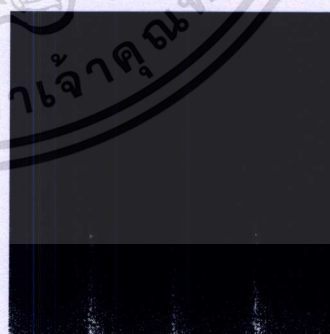
หลังผ่านกรองความถี่สูงผ่านพบว่าภาพตั้งต้นและภาพอินพุตมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แตกต่างกันเพียงภาพอินพุตนั้นมีการหมุนไปจากภาพตั้งต้น ตามที่ศทวนเข็มนาฬิกาด้วยขนาด 45 องศา

#### 4.5 ระบบพิกัดแบบลอกลโปลา (Log-Polar Coordinates or Log-Polar Grid)

ส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการแปลงพิกัดจากระบบพิกัดฉากไปเป็นพิกัดลอกลโปลา เนื่องจากพิกัดแบบฉากนั้นไม่สามารถนำมาหาค่าการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาดโดยใช้เทคนิคเฟสคอลลิเรชั่น 2 มิติได้ ขั้นตอนการแปลงพิกัดฉากเป็นพิกัดลอกลโปลา ถูกอธิบายไว้ในบทที่ 3 รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงภาพในพิกัดฉากและพิกัดลอกลโปลา ในโดเมนความถี่ ตามลำดับ



(ก)

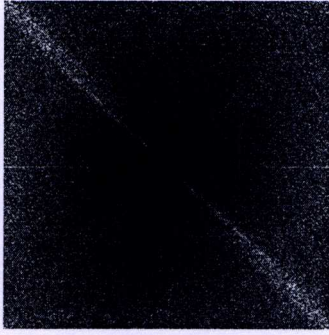


(ข)

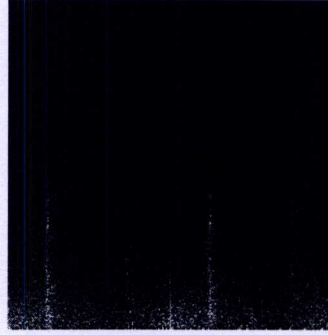
#### รูปที่ 4.7 แสดงพิกัดฉากและพิกัดลอกลโปลาของภาพตั้งต้น

(ก) ภาพตั้งต้นบนพิกัดฉาก

(ข) ภาพตั้งต้นบนพิกัดลอกลโปลา



(ก)



(ข)

#### รูปที่ 4.8 แสดงพิกัดฉากและพิกัดลอกโปลาของภาพอินพุต

(ก) ภาพอินพุตบนพิกัดฉาก

(ข) ภาพอินพุตบนพิกัดลอกโปลา

จากรูปจะพบว่าข้อมูลในพิกัดลอกโปลาของภาพทั้งสองแตกต่างกัน ข้อมูลภายในรูปที่ 4.7(ข) นั้นมีการเลื่อนในแนวนอนไปจากรูปที่ 4.8(ข) เนื่องจากภาพตั้งต้นและภาพอินพุตมีมุมการหมุนที่ต่างกัน สำหรับการเลื่อนในแนวตั้งจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อภาพทั้งสองมีค่าการขยายหรือลดขนาดที่แตกต่างกันนั่นเอง ซึ่งความแตกต่างทั้งสองแบบนี้ไม่สามารถหาได้บนพิกัดฉากและพิกัดเชิงขั้ว

#### 4.6 เฟสคอลลิเรชั่น 2 มิติสำหรับการหาค่ามุมการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาด

เมื่อทำการแปลงพิกัดมาอยู่ในรูปแบบลอกโปลาแล้ว ต่อมานำภาพทั้งสองมาหาค่าการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาด โดยใช้เทคนิคเฟสคอลลิเรชั่น 2 มิติ ค่าที่ได้เรียกว่า ค่าคอลลิเรชั่นของการหมุนและการขยายหรือลดขนาด ( $Corr(\xi, \theta)$ )

$$Corr(\xi, \theta) = F^{-1} \left( \frac{F(I_2(\xi, \theta))}{F(I_1(\xi, \theta))} \right) \quad (4.3)$$

$$(c, \Delta\theta) = \arg \max_{(\xi, \theta)} \left\{ F^{-1} \left( \frac{F(I_2(\xi, \theta))}{F(I_1(\xi, \theta))} \right) \right\} \quad (4.4)$$

$$c = \log s \quad , \quad s = e^c$$

โดย  $s$  คือ การเปลี่ยนแปลงการขยายหรือลดขนาดของภาพอินพุต (Scale Factor)

$c$  คือ การเปลี่ยนแปลงการขยายหรือลดขนาดของภาพอินพุตบน Log Scale

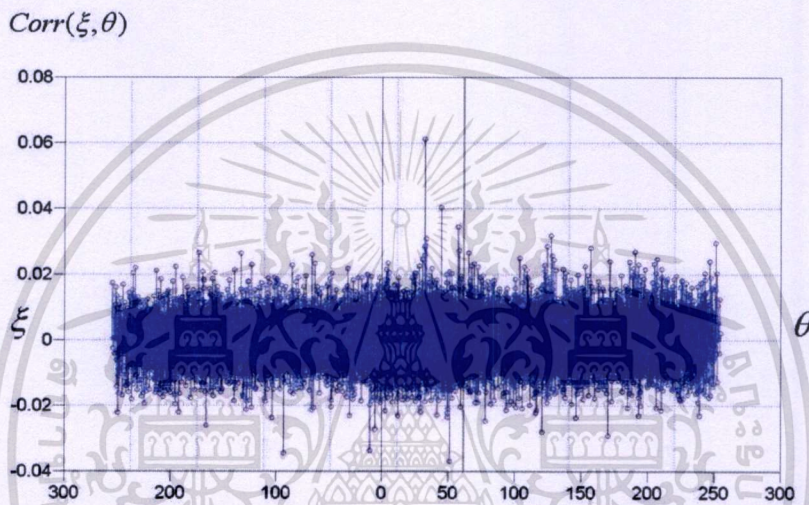
$\Delta\theta$  คือ การเปลี่ยนแปลงการหมุนของภาพอินพุต

$F$  เป็นการแปลงฟูเรียร์แบบ 2 มิติ

$F^{-1}$  เป็นการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับแบบ 2 มิติ

$I_1(\xi, \theta)$  และ  $I_2(\xi, \theta)$  คือภาพตั้งต้นและภาพอินพุตบนพิกัดลอกโปลา

สมการที่ 4.4 เป็นสมการรวมสำหรับการหาค่า  $s$  และ  $\Delta\theta$  ระหว่างภาพตั้งต้นและภาพอินพุต จากทฤษฎีที่อธิบายในบทที่ 3 ค่าคออสติเรชั่นที่มีค่ามากที่สุดแสดงถึงตำแหน่งการเลื่อนของภาพตั้งต้นและภาพอินพุต แต่เนื่องจากการรบกวนของสัญญาณรบกวนและบริเวณพื้นที่ส่วนที่ไม่ทับซ้อนกันของภาพตั้งต้นและภาพอินพุตในปริมาณที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าคออสติเรชั่นมากที่สุดอาจไม่ใช่ค่าการเลื่อนที่ถูกต้อง ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราจึงนำค่าที่สูงที่สุด 10 อันดับแรก มาทำการพิจารณาหาการเลื่อนที่ถูกต้อง ค่าคออสติเรชั่นของการหมุนและการขยายหรือลดขนาด 10 อันดับแรกถูกแสดงในตารางที่ 4.1 และค่าคออสติเรชั่นที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อนำมาแสดงในรูปแบบของกราฟได้ดังรูปที่ 4.9



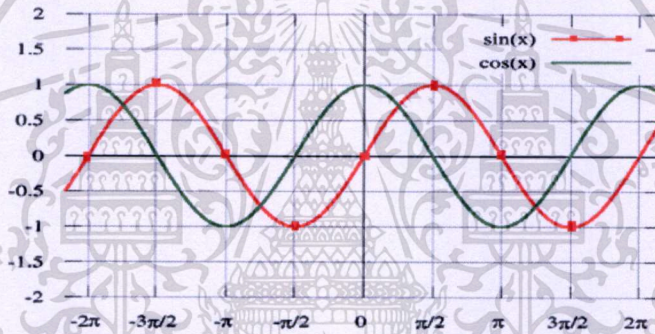
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าคออสติเรชั่นของการหมุนและการขยายหรือลดขนาด

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคออสติเรชั่นของการหมุนและการขยายหรือลดขนาด  $Corr(s, \theta)$  ลำดับต่างๆ

ลำดับที่	$Corr(\xi, \theta)$	$s$	$\Delta\theta$
1	0.0524	1.00	40
2	0.0503	1.00	46
3	0.0314	1.00	0
4	0.0283	1.10	68
5	0.0279	1.00	107
6	0.0277	1.00	76
7	0.0265	1.10	145
8	0.0257	1.10	69
9	0.0253	1.10	55
10	0.0251	1.20	104

ตารางที่ 4.1 แสดงลำดับ ค่าคอลลิเรชั่นของการหมุนและการขยายหรือลดขนาด ( $Corr(s, \theta)$ ) ค่าการขยายหรือลดขนาด ( $s$ ) และค่าการหมุน ( $\Delta\theta$ ) จำนวน 10 อันดับแรก

จากขั้นตอนการทำเฟสคอลลิเรชั่น 2 มิติ จะได้มุมการหมุนเบื้องต้นออกมา 10 ค่า จากนั้นจะนำมาพิจารณาเพื่อหามุมการหมุนอื่นๆ ที่มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับมุมการหมุนดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อพิจารณาสมการเส้นตรงในลอคโพลกริด สมการที่ 3.1 พบว่าค่า  $r$  เกิดจากการบวกกันของค่า  $\cos\theta$  และ  $\sin\theta$  ที่คูณอยู่กับคู่อันดับ  $(x, y)$  ตามลำดับ และจากการที่ Sine Function และ Cosine Function มีพฤติกรรมเป็น Cyclical หรือ Periodic Function ดังรูปที่ 4.10 ทำให้ค่า  $\cos$  และ  $\sin$  ในบาง  $\theta$  มีค่าเท่ากัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุน หรือ  $\Delta\theta$  ที่ได้จากเทคนิคเฟสคอลลิเรชั่น 2 มิติ นั้นอาจไม่ใช่มุม  $\theta$  จริงๆ แต่เป็นมุมที่มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับมุม  $\theta$  อย่างมีนัยสำคัญด้วยค่า  $\cos$  และ  $\sin$  โดยค่ามุมที่มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับค่ามุม  $\theta$  ได้แก่ มุม  $(90 + \theta)$ ,  $(180 + \theta)$  และ  $(270 + \theta)$



รูปที่ 4.10 กราฟของ Sine Function และ Cosine Function

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ และทดลองพบว่ามุม  $(90 + \theta)$  และ  $(270 + \theta)$  ไม่มีค่าที่ถูกต้องอยู่จริง จึงทำการพิจารณาเพียงมุม  $(180 + \theta)$  เท่านั้น

สมมุติให้มุมการหมุนที่ได้จากขั้นตอนการทำเฟสคอลลิเรชั่น 2 มิติคือมุม  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9$  และ  $\theta_{10}$  เมื่อพิจารณามุมการหมุนที่มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับมุมเหล่านี้ อย่างมีนัยสำคัญพบว่า มีด้วยกันทั้งสิ้น 10 มุม และเมื่อรวมกันมุมการหมุนเดิม ทำให้มุมการหมุนที่มีโอกาสเป็นมุมการหมุนที่ถูกต้องมีด้วยกันทั้งสิ้น 20 มุมด้วยกันเรียกมุมเหล่านี้ว่ามุมแข่งขัน (Candidate Angles) แสดง ดังนี้

$$\theta_1, \theta_1 + 180, \theta_2, \theta_2 + 180$$

$$\theta_3, \theta_3 + 180, \theta_4, \theta_4 + 180$$

$$\theta_5, \theta_5 + 180, \theta_6, \theta_6 + 180$$

$$\theta_7, \theta_7 + 180, \theta_8, \theta_8 + 180$$

$$\theta_9, \theta_9 + 180, \theta_{10}, \theta_{10} + 180$$

โดยมุมทั้งหมด 20 มุมนั้นจะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 359 เพราะเราจะถือว่ามุมที่เกินไปจากนั้นเป็นมุมที่ทับซ้อนกันกับมุม  $[0,359]$  องศาเรื่อยไป ตัวอย่างเช่น มุม 360 องศา เป็นมุมที่มีการทับซ้อนกับมุม 0 องศา ดังนั้นหากเมื่อทำการบวกค่ามุม  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9$  และ  $\theta_{10}$  ด้วยมุม,  $(180 + \theta)$  และ แล้ว มุมที่ได้ออกมาเกิน ไปจาก 359 องศาจะต้องทำการลบออกด้วยค่า 360 จนกว่าผลที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง  $[0,359]$  ซึ่งกระบวนการเช่นนี้ในทางคณิตศาสตร์เรียกว่าการ “Modulus after division” หรือเรียกง่าย ๆ ว่าเป็นการหารแล้วเอาเศษที่ได้หลังการหาร

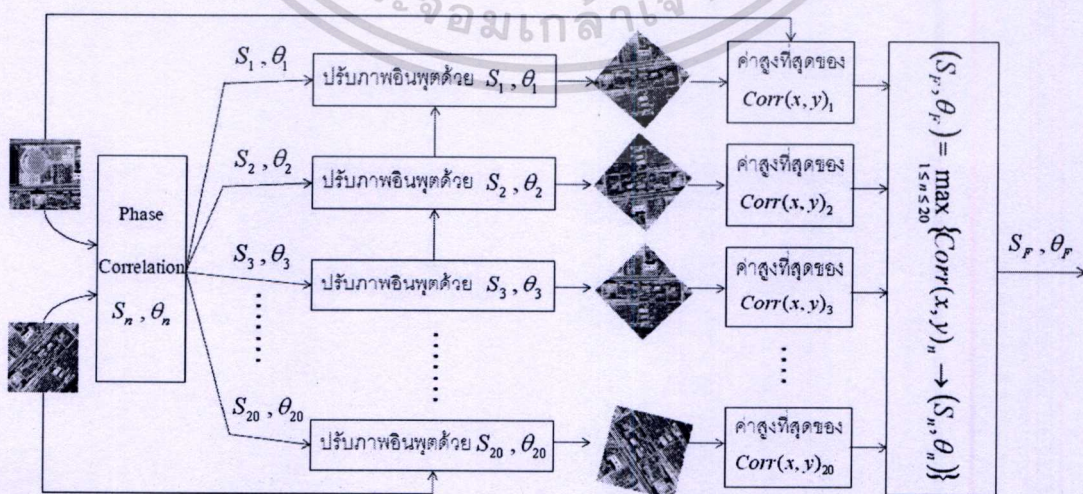
#### 4.7 การค้นหาโหนดเริ่มต้นของ BFS (Started Node Search)

ขั้นตอนนี้เป็นการค้นหาโหนดเริ่มต้นของ BFS จากมุมแข่งขันจำนวน 20 มุม มุมเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ปรับภาพอินพุตและนำไปหาค่าคอรีเลชันของการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้ง ( $Corr(x, y)$ ) ของภาพตั้งต้นและภาพอินพุต มุมที่ให้  $Corr(x, y)$  มากที่สุดแสดงถึงมุมและค่าการขยายหรือลดขนาดที่มีโอกาสเป็นค่าที่ถูกต้องการมากที่สุดแสดงสมการดังนี้

$$(S_F, \theta_F) = \max_{1 \leq n \leq 20} \{Corr(x, y)_n \rightarrow (S_n, \theta_n)\} \quad (4.5)$$

โดย  $(S_F, \theta_F)$  จะถูกเลือกเป็นพารามิเตอร์ของโหนดเริ่มต้นของ BFS รูปที่ 4.11 แสดงขั้นตอนการค้นหาโหนดเริ่มต้นของ BFS ดังรูปที่ 4.11 และค่า  $Corr(x, y)$  ของมุมแข่งขันจำนวน 20 มุมด้วยตารางที่ 4.2

การเลือกโหนดเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการค้นหาของ BFS ถ้าโหนดเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกับโหนดที่ต้องการ เวลาที่ใช้ในการประมวลผลจะน้อยกว่าโหนดอื่นๆ และความแม่นยำในการค้นหาด้วย BFS ก็จะถูกสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.11 แสดงขั้นตอนการค้นหาโหนดเริ่มต้นของ BFS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคอลลีเรชันของการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้ง

ลำดับที่	S	$\Delta\theta$	$Corr(x, y)$	$\Delta\theta+180$	$Corr(x, y)$
1	1.00	40	0.0884	220	0.0028
2	1.00	46	0.2242	226	0.0028
3	1.00	0	0.0169	180	0.0034
4	1.10	68	0.0655	248	0.0094
5	1.00	107	0.0148	287	0.0153
6	1.00	76	0.0543	256	0.0094
7	1.10	145	0.0104	325	0.0162
8	1.10	69	0.0635	249	0.0037
9	1.10	55	0.0726	235	0.0028
10	1.20	104	0.0155	284	0.0143

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าคอลลีเรชันของการเลื่อน ในแนวนอนและแนวตั้ง ของมุมแข่งขัน จำนวน 20 มุม

มุม 46 ถูกเลือกเป็น โหนดเริ่มต้นของ BFS เพราะมีค่า  $Corr(x, y)$  มากที่สุดภายใน 20 มุม แสดงถึงมุมที่มีความน่าจะเป็นสูงที่สุดที่จะเป็นมุมการเลื่อนที่ต้องการ

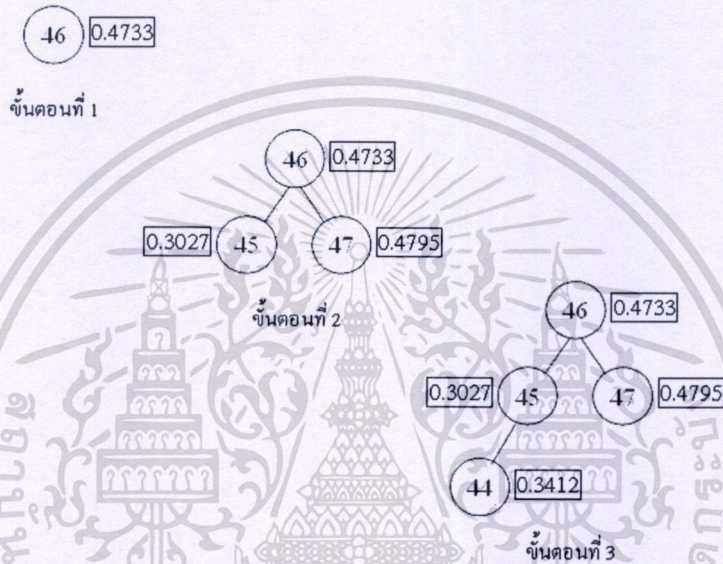
#### 4.8 การค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (Best-first Search)

การค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนเป็นกระบวนการค้นหาข้อมูลในโดเมนของจุดในภาพ ดังนั้นภาพที่นำมาใช้จะต้องเป็นภาพก่อนการแปลงโดเมนหรือพิกัดใดๆ นั่นคือเป็นภาพอินพุตทั้งสองภาพ

BFS ได้นำเอาข้อดีของการค้นหาแบบลึกก่อนและการค้นหาแบบกว้างก่อนมารวมกันเป็นวิธีการเดียว โดยในแต่ละขั้นตอนของการค้นหาจะเลือกเอาโหนดที่ดีที่สุดด้วยการคำนวณค่าฮิวริสติกฟังก์ชัน ผลที่ได้จะเป็นคะแนนของแต่ละโหนดลูก และการที่จะเลือกเส้นทางในการค้นหาต่อไปขึ้นอยู่กับนโยบายของปัญหาที่ต้องการแก้ไข ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ดังที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 3 เป็นค่าฮิวริสติกฟังก์ชัน ซึ่งค่า RMSE เป็นค่าที่วัดความแตกต่างของความเข้มแสงระหว่างภาพ คู่ภาพใดที่คำนวณแล้วได้ค่า RMSE ออกมาน้อยหมายความว่าคู่ภาพมีความคล้ายคลึงหรือใกล้เคียงกันมาก ในทางกลับกันหากคู่ภาพใด เมื่อคำนวณแล้วได้ค่า RMSE มาก นั้นหมายความว่า คู่ภาพนั้นมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งการจัดเรียงภาพ นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการจัดเรียงและประกอบภาพย่อยทั้งสองให้บริเวณที่ซ้อนทับกันดูกลมกลืนเป็นภาพเดียวกัน ดังนั้นการจัดเรียงภาพ ที่ดีจึงต้องการให้เมื่อคำนวณค่า RMSE ในบริเวณที่ซ้อนทับกันแล้วได้ค่า RMSE ออกมาน้อยที่สุด กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ค่าการเปลี่ยนแปลงใดที่เมื่อทดลอง

จัดเรียงและประกอบภาพแล้วได้ค่า RMSE ออกมาน้อยที่สุด ค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นจะเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงที่ดีที่สุดหรือมีความใกล้เคียงกับค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงที่สุด

จากขั้นตอนของการเลือกโหนดเริ่มต้นในบรรดามุมการหมุนทั้งหมดที่พิจารณาจำนวน 20 มุม มุมการหมุนที่มี  $Corr(x, y)$  มากที่สุดถูกเลือกให้เป็น โหนดเริ่มต้น หรือ Start Node ของ BFS จากนั้นจะทำการค้นหาในโหนดข้างเคียงแล้วเลือกไปในทิศทางที่มีค่า RMSE น้อยกว่า ทำเช่นนี้เรื่อยไปและจะหยุดเมื่อโหนดถัดไปมีค่า RMSE มากกว่าโหนดปัจจุบันที่กำลังพิจารณา โหนดปัจจุบันที่กำลังพิจารณาจะเป็นคำตอบของการค้นหา



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างขั้นตอนของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน

รูปที่ 4.12 แสดงตัวอย่างของการนำเทคนิคการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนมาใช้ในงานวิจัยนี้ และมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างโหนดเริ่มต้นด้วยค่ามุมการหมุนที่ได้จากมุมแข่งขัน ที่ให้  $Corr(x, y)$  มากที่สุดในภาพคือโหนดที่ 46

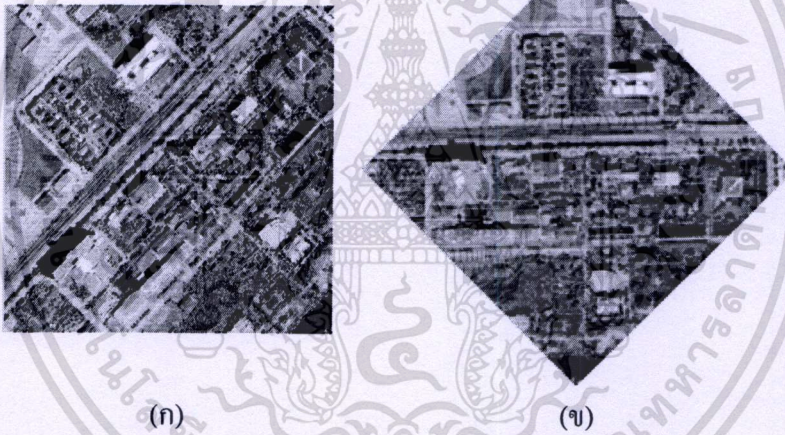
ขั้นตอนที่ 2 สร้างโหนดลูกซ้ายขวา คือ โหนด 45 และ 47 แล้วตรวจสอบโหนดทั้งสาม ด้วยค่า RMSE ได้ผลคะแนนออกมาเป็น 0.3027, 0.4733 และ 0.4795 ตามลำดับ จึงเลือกโหนด 45 เป็นโหนดต่อไปที่เราสนใจ เพราะมีค่า RMSE น้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 สร้างโหนด ลูกให้กับโหนด 45 ได้โหนด 44 (สำหรับโหนดทางขวาของโหนด 45 เราจะไม่สนใจเพราะได้พิจารณาไปแล้ว) ตรวจสอบคะแนนได้ 0.3027 และ 0.3412 ตามลำดับ จากนั้นเลือกโหนดที่มีค่าน้อยสุด ซึ่งก็คือ 45 จากขั้นตอนนี้จะพบว่าโหนดที่ดีที่สุดคือ โหนด 45 เนื่องจากมีค่า RMSE น้อยที่สุด

#### 4.9 การปรับมุมการหมุนและขนาดของภาพอินพุต (De-rotate and De-scale Input-Image)

หลังจากผ่านขั้นตอนการค้นหามุมการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาด ผลที่ได้คือมุมการหมุนจำนวน 1 ค่า และ ค่าการขยายหรือลดขนาด 1 ค่า ซึ่งค่าทั้งสองนี้ คือ มุมการหมุนที่ภาพอินพุต หมุนไปจากภาพตั้งต้น กับค่าขนาดที่เปลี่ยนแปลงของภาพอินพุต จากภาพตั้งต้นนั่นเอง

ดังนั้นเพื่อจัดให้ค่าการเปลี่ยนแปลงทั้งสองให้หมดไป เราต้องทำการหมุนและปรับขนาดภาพอินพุต ให้อยู่ในมุมและขนาดเดียวกันกับภาพตั้งต้น ในงานวิจัยนี้ถือว่าการหมุนภาพเป็นการหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นการหมุนภาพอินพุต กลับจึงเป็นการหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา โดยหมุนเท่ากับมุมการหมุนที่ได้รับจากขั้นตอนการทำ BFS รูปที่ 4.13 แสดงตัวอย่างของการหมุนภาพกลับในทิศตามเข็มนาฬิกาจำนวน 45 องศา รูปที่ 4.14 แสดงตัวอย่างของการขยายและลดขนาดของภาพ



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างของการหมุนภาพกลับในทิศตามเข็มนาฬิกา

(ก) ภาพตั้งต้น

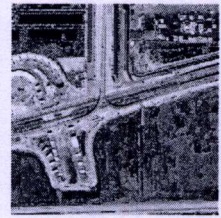
(ข) ภาพหลังจากหมุนภาพตั้งต้น (ก) ในทิศตามเข็มนาฬิกาจำนวน 45 องศา



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.14 ตัวอย่างของการขยายขนาดภาพและลดขนาดภาพ

(ก) ภาพตั้งต้น

(ข) ภาพหลังการขยายขนาดภาพ

(ค) ภาพหลังการลดขนาดภาพ

#### 4.10 เฟสคอสลีเรชัน 2 มิติสำหรับการหาค่าการเลื่อนในแนวแกนอนและแกนตั้ง

หลังจากขั้นตอนการปรับมุมการหมุนของภาพอินพุตแล้ว จะถือว่าภาพตั้งต้น และภาพอินพุต เป็นภาพที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนและการขยายหรือลดขนาดแล้ว ขั้นตอนต่อมาจึงเป็นการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง ซึ่งสามารถใช้เฟสคอสลีเรชัน 2 มิติหาการเปลี่ยนแปลงของการเลื่อนตำแหน่งในแนวอนและแนวตั้งได้

สมการเฟสคอสลีเรชันที่ 3.22 และ 3.23 เป็นการหาการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน  $x$  และ  $y$  หรือหาการเปลี่ยนแปลงใน 2 มิติ สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ว่า

$$(\Delta x, \Delta y) = \arg \max_{(x, y)} \left\{ F^{-1} \left( \frac{F(I_2(x, y))}{F(I_1(x, y))} \right) \right\} \quad (4.6)$$

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

$F$  เป็นการแปลงฟูเรียร์แบบ 2 มิติ

$F^{-1}$  เป็นการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับแบบ 2 มิติ

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

จากสมการที่ 4.6 เริ่มต้นจากการนำภาพตั้งต้นทั้งสองมาทำการแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่ด้วย FFT จากนั้นจะนำมาหารกันแบบจุดต่อจุด แล้วเก็บค่าไว้โนอาร์เรย์ ค่าในตารางอาร์เรย์เหล่านี้คือค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างภาพนั่นเอง แต่การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ยังอยู่ในโดเมน

ความถี่จึงต้องทำการแปลงกลับให้มาอยู่ในโดเมนของจุดในภาพด้วยการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับ จากนั้นจะเลือกตำแหน่ง  $(x, y)$  ที่ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุด ซึ่งจะเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน  $x$  และ  $y$  หรือ  $(\Delta x, \Delta y)$  นั่นเอง

#### 4.11 การรวมภาพ (Registering Image)

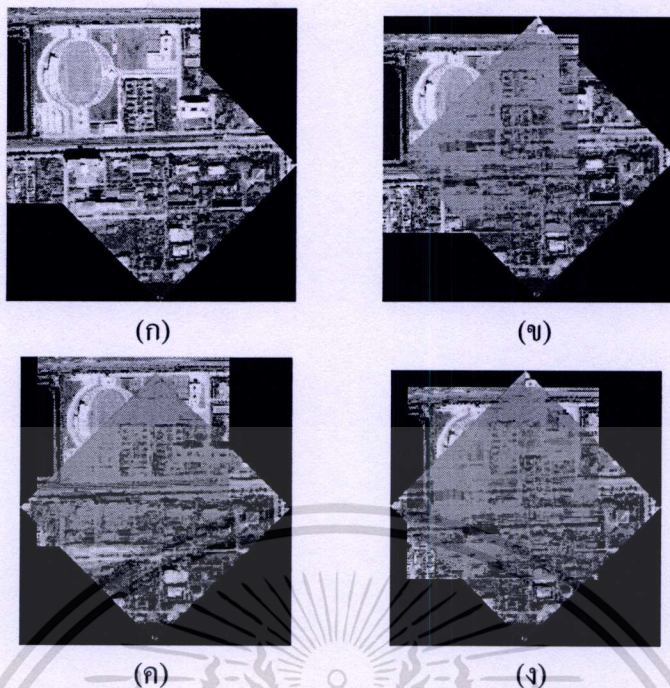
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะได้ภาพเอาต์พุต (Output Image) ซึ่งเป็นภาพรวมใหม่ที่เกิดจากการนำภาพตั้งต้นและภาพอินพุตทั้งสองมาทำการจัดเรียงภาพ โดยจะต้องทำการรวมภาพทั้งสองด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งที่หามาได้จากขั้นตอนเฟสคอลลิเรชัน 2 มิติ

จากคุณสมบัติของการแปลงฟูเรียร์ค่าที่ได้เฟสคอลลิเรชัน 2 มิติในการหาค่าการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งอาจเป็นไปได้ทั้งค่าลบและค่าบวก ดังนั้นจึงมีค่าที่เป็นไปได้ทั้งสิ้น 4 กรณี คือ กรณีที่เป็นบวกทั้งคู่ กรณีที่ตัวใดตัวหนึ่งเป็นลบ และกรณีที่ เป็นลบทั้งคู่ ซึ่งในกรณีที่ค่าเป็นบวกสามารถใช้ค่าที่คำนวณได้เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงโดยตรง แต่ในกรณีที่ เป็นลบจะต้องนำค่าที่ได้ไปลบออกจากความกว้างของค่านั้นๆ ดังตารางที่ 4.3 แสดงคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง

ตารางที่ 4.3 แสดงคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่ง

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

จากตารางที่ 4.3 จะพบว่ามีความเป็นไปได้ของการจัดเรียงและประกอบภาพทั้งสิ้น 4 กรณี เราจึงต้องทดลองทำการจัดเรียงและประกอบภาพด้วยค่า  $(\Delta x, \Delta y)$  แสดงดังรูปที่ 4.15 แล้วทำการคำนวณค่า RMSE ของแต่ละกรณีออกมา กรณีใดที่ให้ค่า RMSE น้อยที่สุด หมายความว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของกรณีนั้นเป็นค่าที่เป็นคำตอบที่ต้องการ และภาพที่ได้จากการแปลงเรขาคณิต ด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นก็คือผลลัพธ์ที่ได้จากการนำภาพอินพุตทั้งสองมาทำการจัดเรียงภาพ



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างของการจัดเรียงภาพเมื่อมีการเลื่อนด้วยค่า  $(\Delta x, \Delta y)$  ทั้ง 4 กรณี  
 (ก) แสดงภาพเอาที่พูดของการจัดเรียงภาพเมื่อ  $\Delta x$  และ  $\Delta y$  เป็นบวกทั้งคู่  
 (ข) แสดงภาพเอาที่พูดของการจัดเรียงภาพเมื่อ  $\Delta x$  เป็นบวกและ  $\Delta y$  เป็นลบ  
 (ค) แสดงภาพเอาที่พูดของการจัดเรียงภาพเมื่อ  $\Delta x$  เป็นลบและ  $\Delta y$  เป็นบวก  
 (ง) แสดงภาพเอาที่พูดของการจัดเรียงภาพเมื่อ  $\Delta x$  และ  $\Delta y$  เป็นลบทั้งคู่

จากรูปที่ 4.15 พบความสัมพันธ์ของค่า  $\Delta x$  และ  $\Delta y$  โดยค่า  $\Delta x$  เมื่อมีค่าเป็นบวกแสดงถึงภาพอินพุตเกิดการเลื่อนตำแหน่งไปทางด้านขวาจากภาพตั้งต้น และเมื่อเป็นค่าลบแสดงถึงการเลื่อนตำแหน่งไปทางด้านซ้ายจากภาพตั้งต้น ในส่วนของ  $\Delta y$  เมื่อมีค่าเป็นบวกแสดงถึงภาพอินพุตเกิดการเลื่อนตำแหน่งไปทางด้านล่างจากภาพตั้งต้น เมื่อเป็นค่าลบแสดงถึงการเลื่อนตำแหน่งไปทางด้านบนจากภาพตั้งต้น

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองของการจัดเรียงภาพด้วยเทคนิคการแปลงฟาสฟูเรียร์ เฟสคอลลิเรชั่น การแปลงพิกัดแบบลอกโปลาหรือลอกโปลากริดและวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ [14] ที่ทำการวิจัยเรื่องการจัดเรียงภาพโดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัพ เฟสคอลลิเรชั่น การค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน และงานวิจัย [15] ที่ทำการวิจัยเรื่องการจัดเรียงภาพโดยใช้เทคนิคการแปลงฟาสฟูเรียร์ เฟสคอลลิเรชั่น การแปลงพิกัดแบบลอกโปลา โดยวัดผลเพื่อเปรียบเทียบในเชิงความถูกต้องและเวลาที่ใช้ประมวลผล

การจัดเรียงภาพในงานวิจัยนี้ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมขนาดใหญ่บนพื้นที่ต่างๆ มาทำการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ การทดลองประเมินประสิทธิภาพเพื่อหาเทคนิคและตัวแปรที่เหมาะสมกับการจัดเรียงภาพที่นำเสนอ การทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่นำเสนอก่อนหน้านี้ [14, 15] และการทดลองประเมินความทนทานต่อสัญญาณรบกวน ชนิดต่างๆ ตลอดจนวิเคราะห์ข้อดีและข้อด้อยของแต่ละเทคนิค

#### 5.2 ภาพที่ใช้สำหรับการทดลอง

การทดลองการจัดเรียงภาพนี้ ได้ทำการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนในแนวอน การเลื่อนในแนวตั้ง มุมการหมุน การขยายหรือลดขนาดระหว่างภาพ โดยได้มีการรวบรวมภาพที่ใช้ในการทดลองจากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง ถนนอุทยาน ภาพทั้งหมดมีขนาด 1876x1251 พิกเซล ซึ่งภาพต้นฉบับนี้แสดงได้ในรูปที่ 5.1

ภาพต้นฉบับแต่ละภาพได้มีการเลือกบางส่วนมาใช้ โดยแบ่งภาพที่เลือกตามลักษณะของเส้นตรงและรายละเอียดภายในภาพ วัดได้จากจำนวนเส้นตรงภายในภาพ (Hough Lines) ที่มีความยาวมากกว่า 45 พิกเซล เนื่องจากเส้นตรงที่ยาวมากกว่า 45 พิกเซลเป็นเส้นตรงที่มองเห็นได้ชัดเจน และมีนัยสำคัญกับการจัดเรียงภาพ เส้นตรงเหล่านี้หาได้จากการแปลงข้อมูลแบบฮัพโดย

$$x(\rho, \theta) = \begin{cases} 1 & H(\rho, \theta) \geq 45 \\ 0 & H(\rho, \theta) \leq 45 \end{cases} \quad (5.1)$$

$$N_{HL} = \sum_{\rho=1}^m \sum_{\theta=1}^n x(\rho, \theta) \quad (5.2)$$

$x(\rho, \theta)$	มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเส้นตรงมีความยาวมากกว่า 45 พิกเซล และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อเส้นตรงมีความยาวน้อยกว่า 45 พิกเซล
$N_{HL}$	คือจำนวนเส้นตรงทั้งหมดภายในภาพที่มีความยาวมากกว่า 45 พิกเซล
$m$	คือจำนวนรัศมีของการแปลงข้อมูลแบบฮัฟซึ้นกับขนาดของภาพ ค่าที่ใช้ $0 < m \leq 845$ สำหรับภาพที่ทดลอง
$n$	คือจำนวนองศาของการแปลงข้อมูลแบบฮัฟซึ้นที่มีค่าเท่ากับ 180 ค่าที่ใช้ $0 < n \leq 180$ สำหรับที่ทดลอง

ดังนั้นจากการมองเห็นของมนุษย์และการวัดจำนวนเส้นตรงภายในภาพงานวิจัยนี้ทำการแบ่งภาพออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

- **Simple Image**

คือภาพที่มีเส้นตรงในภาพชัดเจนและมีรายละเอียดในภาพน้อย มีค่า  $N_{HL}$  (Hough Lines) อยู่ระหว่าง 1 – 75,000 เส้น

- **Detail Image**

คือภาพที่มีเส้นตรงในภาพและมีรายละเอียดในภาพปานกลาง มีค่า  $N_{HL}$  (Hough Lines) อยู่ระหว่าง 75,001 – 15,000 เส้น

- **Complex Image**

คือภาพที่มีเส้นตรงในภาพไม่ชัดเจนและมีรายละเอียดในภาพมาก มีค่า  $N_{HL}$  (Hough Lines) อยู่ระหว่าง 15,001 เส้นขึ้นไป

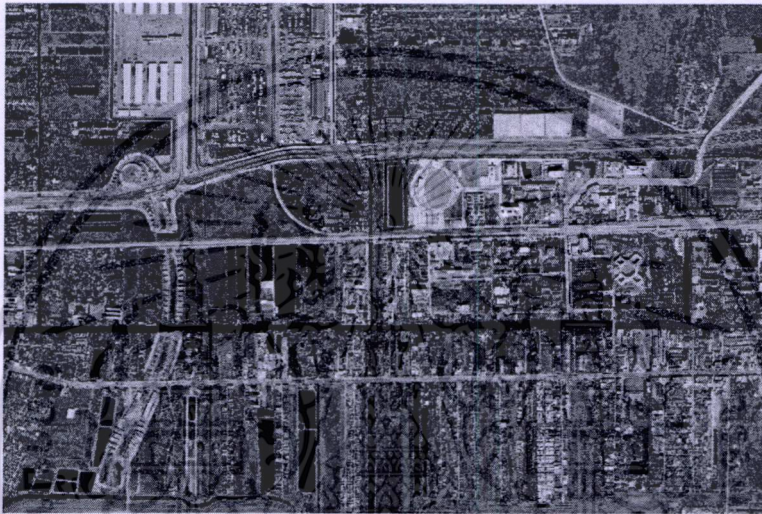
ในภาพแต่ละลักษณะได้มีการเก็บรวบรวมจำนวนต่างๆ กันมีขนาด 300x300 พิกเซล แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ โดยจะแบ่งชุดข้อมูลเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนในแนวนอนการเลื่อนแนวตั้งและการหมุน ชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการหมุนและการย่อหรือขยายขนาด

### 5.2.1 ชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนแนวนอน การเลื่อนแนวตั้งและการหมุน

ชุดข้อมูลภาพนี้เป็นภาพแต่ละลักษณะจำนวนลักษณะละ 3 ชุดที่มีการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนในแนวนอนขนาด 30, 60, 90, 120, 150, 180 พิกเซล หรือการเลื่อนในแนวตั้งขนาด 30, 60, 90, 120, 150, 180 พิกเซล หรือการเลื่อนทั้งในแนวนอนและแนวตั้งขนาด 30, 60, 90, 120, 150, 180 พิกเซล รวมทั้งหมด 18 แบบและการเปลี่ยนแปลงการหมุน ได้แก่ 0, 3, 32, 45, 90, 97, 135, 180, 187, 225, 270, 315, 339 และ 353 องศา รวมทั้งหมดจำนวน 14 แบบ ดังนั้นจำนวนภาพต่อหนึ่งลักษณะเท่ากับ 756 ภาพ เป็นจำนวนภาพทั้งหมด  $756 \times 3 = 2268$  ภาพ ชุดข้อมูลนี้ถูกนำมาใช้ในการทดลองที่ 5.4.1 - 5.4.4 และ 5.4.6 - 5.4.8

### 5.2.2 ชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการหมุนและการขยายหรือลดขนาด

ชุดข้อมูลภาพนี้เป็นภาพแต่ละลักษณะจำนวนลักษณะละ 2 ชุดที่มีการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนด้วยค่าการหมุนเท่ากับ 0, 3, 32, 45, 90, 97, 135, 180, 187, 225, 270, 315, 339 และ 353 องศา รวมทั้งหมด 14 แบบและค่าการขยายหรือลดขนาด 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 รวมทั้งหมด 16 แบบ ดังนั้นจำนวนภาพต่อหนึ่งลักษณะเท่ากับ 448 ภาพ เป็นจำนวนภาพทั้งหมด  $448 \times 3 = 1344$  ภาพ ชุดข้อมูลนี้ถูกนำมาใช้ในการทดลองที่ 5.4.5



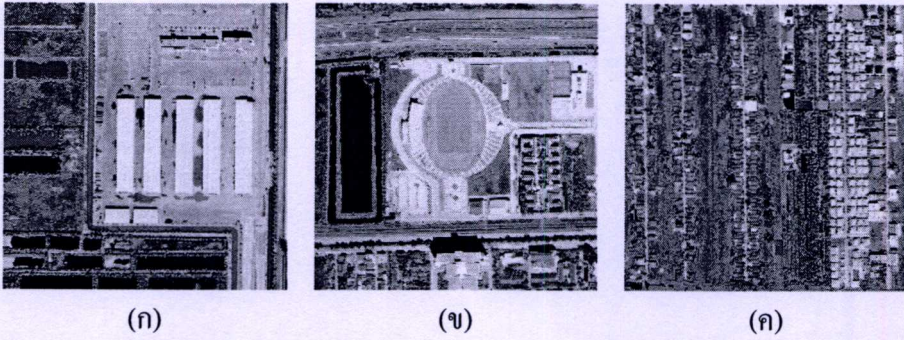
(ข)

รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายดาวเทียมต้นฉบับที่ใช้ในการทดลอง

(ก) ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตลาดกระบัง

(ข) ภาพถ่ายดาวเทียมจากบริเวณเขตถนนอุทัยาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 (ก) ภาพ Simple , (ข) ภาพ Detail , (ค) ภาพ Complex  
จากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง



รูปที่ 5.3 (ก) ภาพ Simple , (ข) ภาพ Detail , (ค) ภาพ Complex  
จากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตถนนอุทยาน

### 5.3 การวัดผลการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการวัดผลการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย (*precision*) เป็นการให้คะแนนความถูกต้องของแต่ละวิธีการที่ใช้หาการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างภาพ โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$precision = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \times 100 \quad (5.3)$$

$X_i$  เป็นคะแนนความถูกต้องของมุม  $i$  โดยมีค่าเท่ากับ 1 ถ้ามุมที่หาได้ถูกต้องตามมุมการหมุนจริง และเป็น 0 เมื่อมุมที่หาได้ผิดไปจากมุมการหมุนจริง  $N$  เท่ากับภาพทั้งหมดที่พิจารณา

2. ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย ( $\overline{error}$ ) ได้จากการนำค่าความแตกต่างระหว่างมุมการหมุนจริงและมุมการหมุนที่หาได้หารด้วยจำนวนภาพทั้งหมดที่พิจารณา

$$\overline{error} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i - y_i| \quad (5.4)$$

$Y_i$  เป็นค่าการเลื่อนจริง ,  $y_i$  เป็นค่าการเลื่อนที่หาได้  
 $N$  เท่ากับภาพทั้งหมดที่พิจารณา

3. เวลาเฉลี่ยที่ใช้ประมวลผล ( $\overline{Time}$ ) จะเริ่มนับจากเริ่มต้นประมวลผลไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ เวลาที่ใช้ประมวลผลมีหน่วยเป็นวินาที

$$\overline{Time} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (5.5)$$

$T_i$  เป็นเวลาที่ใช้ประมวลผลจำนวนหนึ่งภาพ  
 $N$  เท่ากับภาพทั้งหมดที่พิจารณา

#### 5.4 การทดลองและผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งแบบต่างๆ โดยใช้ภาพตั้งต้นหลากหลายลักษณะ ซึ่งได้มาจากภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณเขตลาดกระบัง เขตถนนอุทยาน ค่าที่ได้ของทั้งสองบริเวณจะถูกนำไปหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของภาพลักษณะนั้นๆ สำหรับค่าต่างๆ ที่ได้จากบริเวณเขตลาดกระบัง เขตถนนอุทยาน จะแสดงรายละเอียดไว้ในส่วนของภาคผนวกต่อไป การทดลองทั้งหมดได้แบ่งออกเป็น 9 ส่วน ดังนี้

- 5.4.1 การทดลองเปรียบเทียบเทคนิคการดึงลักษณะเด่นจากภาพระหว่างเทคนิคการกรองความถี่สูงผ่าน (Highpass Filter) และเทคนิคการกรองขอบภาพของแคนนี่ (Canny Edge Detection) ที่เหมาะสมกับงานวิจัย
- 5.4.2 การทดลองเปรียบเทียบค่าฮิวริสติกฟังก์ชันระหว่าง RMSE และ  $Cor(x, y)$  สำหรับการเลือกโหนดเริ่มต้น
- 5.4.3 การทดลองเพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสม
- 5.4.4 การทดลองเปรียบเทียบวิธีการค้นหาระหว่างการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (Best First Search) กับ การค้นหาแบบทำซ้ำ (Iteration Search)
- 5.4.5 การทดลองวัดประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอสำหรับหาค่าการขยายหรือลดขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

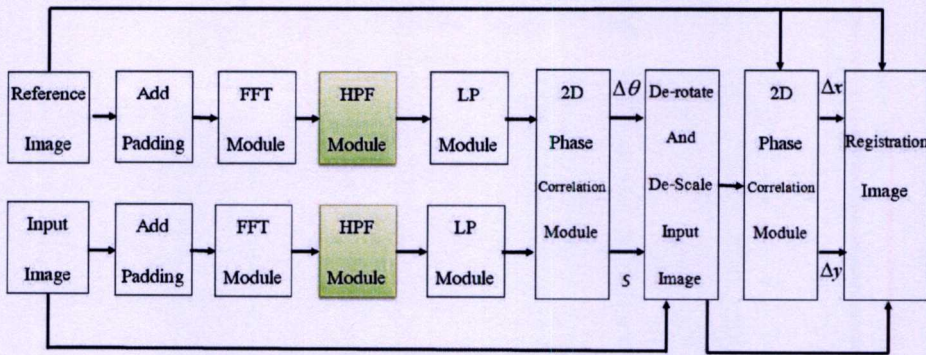
- 5.4.6 การทดลองวัดประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอเกี่ยวกับภาพลักษณะแตกต่างกัน
- 5.4.7 การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอ
- 5.4.8 การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอ
- 5.4.9 การทดลองเพื่อหามุมการหมุน การเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งระดับทัศนียม

โดยการทดลองที่ 5.4.1 – 5.4.4 และ 5.4.6 – 5.4.8 เป็นการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนระหว่างภาพไม่มีการขยายหรือลดขนาดโดยใช้ชุดข้อมูลภาพชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนแนวนอน การเลื่อนแนวตั้งและการหมุน เนื่องจากเทคนิคที่นำมาเปรียบเทียบมีความสัมพันธ์กับงานวิจัยที่ [14] ซึ่งไม่สามารถหาค่าการขยายหรือลดขนาดได้ ในส่วนการทดลองที่ 5.4.5 เป็นการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงมุมและการขยายหรือลดขนาดโดยใช้ชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการหมุนและการขยายหรือลดขนาด

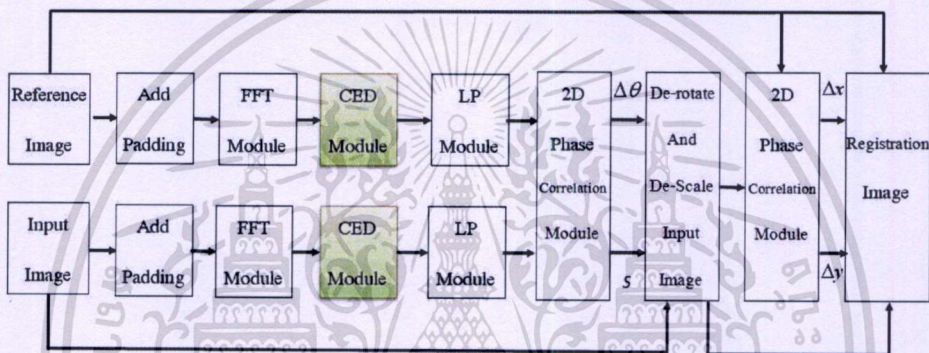
#### 5.4.1 การทดลองเปรียบเทียบเทคนิคการดึงลักษณะเด่นจากภาพระหว่างเทคนิคการกรองความถี่สูงผ่าน (HPF) และเทคนิคการกรองขอบภาพของแคนนี่ (CED) ที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงเทคนิคการแปลงพิกัดแบบลอกโพลากริด แทนการแปลงข้อมูลแบบฮัฟเฟิม ซึ่งข้อมูลที่ใช้ทำการแปลงข้อมูลนั้นต้องทำการดึงลักษณะเด่นในช่วงความถี่สูงก่อน เพื่อให้ภาพที่นำมาหาความสัมพันธ์การเลื่อนด้วยเทคนิคเฟสคอลลิเรชันมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ลักษณะเด่นในช่วงความถี่สูงของภาพคือบริเวณที่เป็นขอบภายในภาพ วิธีที่ใช้ในการหาขอบภายในภาพ ที่นำมาทดลองเพื่อเปรียบเทียบว่าเหมาะสมกับขั้นตอนอื่นๆ ของงานวิจัยนี้ คือเทคนิคการดึงลักษณะเด่นโดยการกรองความถี่สูงผ่านและการกรองขอบภาพของแคนนี่ ทั้งสองเทคนิคถูกเสนอโดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยการทดลองได้ทำการตัดขั้นตอนบางส่วนออก ได้แก่ ขั้นตอนการค้นหาโหนดเริ่มต้น ขั้นตอนการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน แสดงในรูปแบบที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ เนื่องจากขั้นตอนทั้งสองเหล่านี้ช่วยเพิ่มความถูกต้องให้แก่การจัดเรียงภาพ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่แสดงถึงประสิทธิภาพของเทคนิคการดึงลักษณะเด่นโดยตรง สำหรับชุดข้อมูลภาพที่นำมาทดลองคือชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนแนวนอน การเลื่อนแนวตั้งและการหมุน ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วย  
เทคนิคการดึงลักษณะเด่นโดยเทคนิคการกรองความถี่สูงผ่าน



รูปที่ 5.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วย  
เทคนิคการดึงลักษณะเด่นโดยเทคนิคการกรองขอบภาพของแคนนี่

ตารางที่ 5.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาประมวลผลเฉลี่ย  
ด้วย HPF และ CED สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน

	<i>precision</i> (%)		<i>error</i> (องศา)		<i>Time</i> (วินาที)	
	HPF	CED	HPF	CED	HPF	CED
Simple	83.31	35.55	17.10	76.62	1.65	1.59
Detail	82.75	33.33	17.21	76.96	1.63	1.49
Complex	82.14	29.62	18.55	99.61	1.60	1.45

จากตารางที่ 5.1 พบว่าการดึงลักษณะเด่นด้วยเทคนิคการกรองความถี่สูงผ่าน นั้นให้ความ  
ถูกต้องมากกว่าเทคนิคการกรองขอบของแคนนี่ โดยใช้เวลาประมวลผลใกล้เคียงกันเนื่องจาก HPF  
จะกรองเอาส่วนที่เป็นขอบของภาพ ซึ่งขอบของภาพที่ HPF กรองได้ประกอบไปด้วยเส้นสั้นและ  
เส้นยาว ทุกบริเวณจำนวนมาก เส้นที่ได้มีทั้งเส้นที่เด่นชัดและไม่เด่นชัด แต่ในส่วนของ CED ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบของภาพที่ได้ เป็นเส้นที่ชัดเจนเท่านั้น เส้นที่ไม่เด่นที่พบโดยการกรองด้วย HPF ส่วนใหญ่หายไปเมื่อใช้ CED การกรองเส้นที่ไม่เด่นชัดทิ้งไปทั้งหมดทำให้ประสิทธิภาพของการจัดเรียงภาพลดลง เนื่องจากข้อมูลที่จะใช้เป็นพื้นฐานร่วมในการจัดเรียงภาพหายไป จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเส้นที่เด่นชัดและไม่เด่นชัดมีผลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้เทคนิคเฟสคอลลิเรชัน ดังนั้นเทคนิคเฟสคอลลิเรชันบนข้อมูลจาก HPF นั้นให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ยที่สูงกว่า บนข้อมูลจาก CED ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเทคนิคการดึงลักษณะเด่นด้วยเทคนิคการกรองความถี่สูงผ่านเป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนการจัดเรียงภาพ

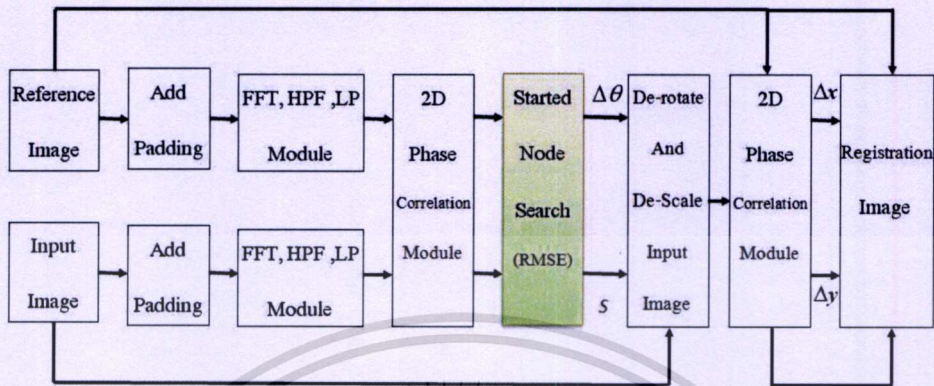
#### 5.4.2 การทดลองเปรียบเทียบฮิวริสติกฟังก์ชันระหว่าง RMSE และ $Cor(x, y)$ สำหรับเลือกโหนดเริ่มต้นของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน

ฮิวริสติกฟังก์ชันคือฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ในการวัดขนาดของความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหา ซึ่งถูกแสดงด้วยตัวเลข ซึ่งค่านี้ได้ถูกใช้ในการเลือกผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นการเลือกฮิวริสติกฟังก์ชันที่เหมาะสมจึงมีผลทำให้ผลลัพธ์มีความถูกต้องสูงไปด้วย สำหรับงานวิจัยนี้นำฮิวริสติกฟังก์ชันมาใช้พิจารณาการเลือกมุมการเลื่อน เพื่อใช้เป็นโหนดเริ่มต้นของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดต่อไป การเลือกโหนดเริ่มต้นที่ดีส่งผลต่อประสิทธิภาพของการค้นหาและเวลาที่ใช้ในการค้นหา

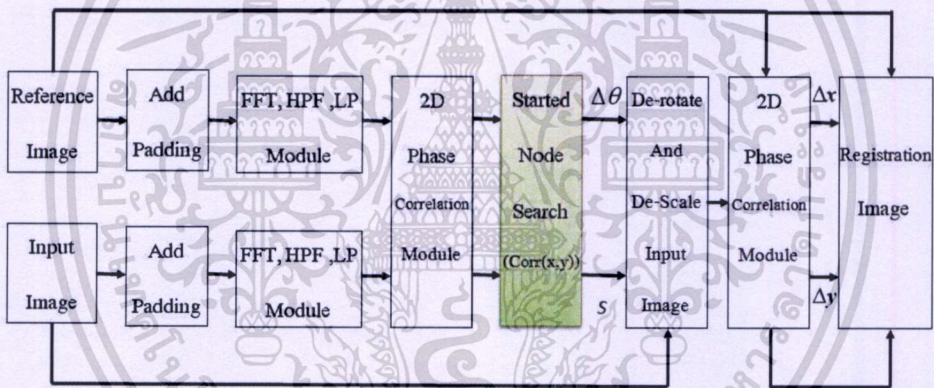
ฮิวริสติกฟังก์ชันที่เหมาะสมกับการหามุมการเลื่อนของภาพอินพุตและภาพอ้างอิง เพื่อใช้ในการจัดเรียงภาพที่ได้รับความนิยมได้แก่ ค่า RMSE ซึ่งใช้วัดความแตกต่างหรือความกลมกลืนระหว่างภาพ การจะวัดค่านี้ได้จำเป็นต้องให้ภาพอยู่บนโดเมนจุดภาพก่อน ซึ่งถ้าเทคนิคส่วนใหญ่ของระบบทำงานอยู่บนโดเมนอื่น เช่น โดเมนความถี่จำเป็นต้องแปลงข้อมูลกลับมาอยู่บนโดเมนของจุดก่อนจึงสามารถหาค่า RMSE ได้ ซึ่งใช้เวลาการประมวลผลพอสมควรขึ้นอยู่กับขนาดของรูปภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอค่า  $Cor(x, y)$  เป็นฮิวริสติกฟังก์ชันซึ่งค่านี้ใช้วัดความถูกต้องของการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งของภาพหลังจากทำการปรับมุมการหมุนแล้ว ค่า  $Cor(x, y)$  ที่มีค่ามากแสดงเป็นนัยถึงความเป็นไปได้ในการรวมภาพได้ถูกต้องมากกว่าค่า  $Cor(x, y)$  ที่มีค่าน้อย และค่านี้ยังสามารถหาได้บนโดเมนความถี่ ทำให้ไม่ต้องเสียเวลาในการแปลงข้อมูลไปโดเมนของจุดแบบค่า RMSE

การทดลองนี้ทำการเปรียบเทียบฮิวริสติกฟังก์ชันระหว่าง RMSE และ  $Cor(x, y)$  เพื่อเลือกโหนดเริ่มต้นของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน ซึ่งการทดลองได้ทำการตัดขั้นตอนบางส่วนออก ได้แก่ ขั้นตอนการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน แสดงในรูปที่ 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ เนื่องจากขั้นตอนทั้งสองเหล่านี้ช่วยเพิ่มความถูกต้องให้แก่การจัดเรียงภาพ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่แสดงถึงประสิทธิภาพของฮิวริสติกฟังก์ชัน โดยตรง สำหรับชุดข้อมูลภาพที่นำมาทดลองคือชุด

ข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนแนวนอน การเลื่อนแนวตั้งและการหมุน ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วยการค้นหาโหนดเริ่มต้นโดยใช้ RMSE เป็นฮิวริสติกฟังก์ชัน



รูปที่ 5.7 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วยการค้นหาโหนดเริ่มต้นโดยใช้  $Cor(x, y)$  เป็นฮิวริสติกฟังก์ชัน

ตารางที่ 5.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาประมวลผลเฉลี่ย โดยใช้ฮิวริสติกฟังก์ชัน RMSE และ CED สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน

	precision		error (องศา)		Time	
	RMSE	$Cor(x, y)$	RMSE	$Cor(x, y)$	RMSE	$Cor(x, y)$
Simple	92.85	92.54	10.53	12.48	22.03	6.14
Detail	91.12	91.23	13.85	13.05	22.75	6.22
Complex	89.85	89.54	14.53	14.48	21.83	6.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.2 พบว่าการใช้ฮิวริสติกฟังก์ชันแบบ RMSE และ  $Cor(x, y)$  ค่าความถูกต้องเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน แต่ในส่วนของเวลาการประมวลผลพบว่า RMSE ใช้เวลาการประมวลผลมากกว่า  $Cor(x, y)$  ค่อนข้างมากเนื่องจากขั้นตอนการแปลงโดเมนจากโดเมนความถี่ไปเป็นโดเมนของจุด และขั้นตอนการรวมภาพเพื่อคำนวณค่า RMSE ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่า  $Cor(x, y)$  เป็นฮิวริสติกฟังก์ชันในการเลือกโหนดเริ่มต้นของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน

#### 5.4.3 การทดลองเพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสม

จำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสม คือ มุมการหมุนเริ่มต้นที่มีจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงที่สุด มุมเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการค้นหาโหนดเริ่มต้นของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน เนื่องจากมุมการเลื่อนที่ถูกดึงไม่ได้มาจากมุมที่ให้ค่าคอสมิเรชันสูงที่สุดเสมอไป อาจเป็นมุมที่ได้จากค่าคอสมิเรชันลำดับถัดลงมา เพราะผลมาจากสัญญาณรบกวน (Noise) บนภาพอ้างอิงและภาพอินพุต ดังนั้นการนำมุมที่มีค่าคอสมิเรชันลำดับถัดลงมา มาทำการพิจารณาจึงทำให้สามารถหามุมการเลื่อนที่ถูกดึงมากกว่าการพิจารณาเพียงแค่มุมการเลื่อนที่ให้ค่าคอสมิเรชันสูงที่สุด แต่เมื่อมุมการหมุนเริ่มต้นที่ต้องพิจารณามีจำนวนเพิ่มมากขึ้น เวลาที่ใช้ในการประมวลผลก็มากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการทดลองนี้ทำการเปรียบเทียบจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นขนาดต่างๆ เพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสมกับขั้นตอนต่างๆ ภายในงานวิจัยที่นำเสนอ ซึ่งการทดลองได้ทำการตัดขั้นตอนบางส่วนออก ได้แก่ ขั้นตอนการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน แสดงในรูปที่ 5.7 เนื่องจากขั้นตอนนี้ช่วยเพิ่มความถูกต้องให้แก่การจัดเรียงภาพ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่แสดงถึงประสิทธิภาพของจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสมโดยตรง สำหรับชุดข้อมูลภาพที่นำมาทดลองคือชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนแนวนอน การเลื่อนแนวตั้งและการหมุน ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย สำหรับภาพลักษณะต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ

Log Polar Grid, Phase Correlation (%)							
	N=1	N=2	N=4	N=6	N=8	N=10	N=12
Simple	83.31	85.74	86.71	87.42	88.72	92.54	93.04
Detail	82.75	85.33	86.20	86.92	88.65	91.18	91.23
Complex	82.14	84.38	85.71	86.32	87.10	89.54	89.76

**ตารางที่ 5.4** แสดงเวลาประมวลผลเฉลี่ย สำหรับภาพลักษณะต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุน เริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ

Log Polar Grid, Phase Correlation (วินาที)							
	N=1	N=2	N=4	N=6	N=8	N=10	N=12
Simple	1.65	2.06	3.07	4.04	5.03	6.14	7.14
Detail	1.63	2.15	3.31	4.12	4.96	6.22	7.02
Complex	1.60	2.16	3.27	4.40	5.12	6.18	7.26

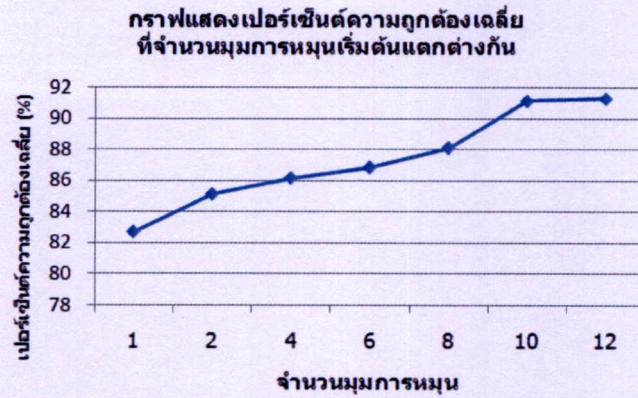
จากตารางที่ 5.3 และ 5.4 สามารถหาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องและเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพในทุกๆลักษณะ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ แสดงได้ดังตารางที่ 5.5

การหาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องและเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพในทุกๆลักษณะและขนาด เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ เพื่อที่จะทำการพิจารณาเลือกจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเพียงจำนวนเดียว เป็นตัวแทนของจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นสำหรับภาพในแต่ละลักษณะ และจะใช้จำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นนี้ในการทดลองหัวข้ออื่นๆ ต่อไป เนื่องจากถือว่า จำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นนี้เป็นจำนวนมุมการหมุนที่เหมาะสมสำหรับภาพทุกๆ ลักษณะ

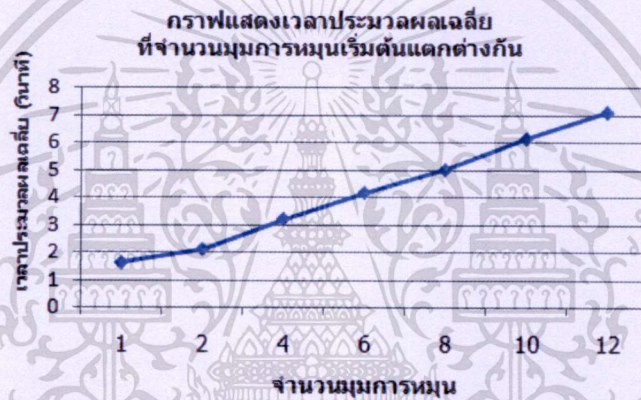
**ตารางที่ 5.5** แสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องและเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพในทุกๆลักษณะ เมื่อจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ

	Log Polar Grid, Phase Correlation						
	N=1	N=2	N=4	N=6	N=8	N=10	N=12
Average of correct (percent)	82.73	85.15	86.20	86.89	88.15	91.10	91.33
Average of time(second)	1.63	2.12	3.22	4.19	5.04	6.18	7.14

จากตารางที่ 5.3 สามารถนำไปสร้างกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่มีต่อค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของภาพ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่มีต่อค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5.9



**รูปที่ 5.8** กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของภาพในทุกๆ ลักษณะ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ



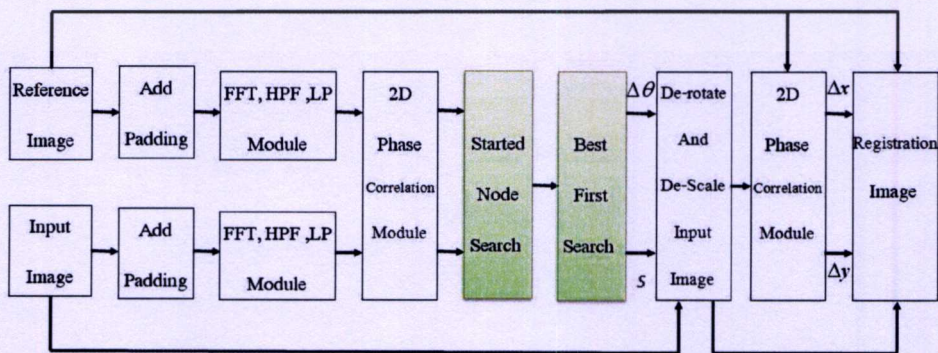
**รูป 5.9** กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ประมวลผลของภาพในทุกๆ ลักษณะ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ

จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 5.8 นั้น จะเห็นว่าการเพิ่มจำนวนมุมการหมุนเริ่มสำหรับการค้นหาโหนดเริ่มต้น ทำให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของภาพเพิ่มสูงขึ้น โดยแลกกับเวลาการประมวลผลที่มากขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้คำนึงถึงผลลัพธ์ที่ถูกต้องเป็นหลักโดยใช้เวลาประมวลผลไม่มากจนเกินไป ดังนั้นจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสมจึงควรมีค่าเท่ากับ 10 เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 10 และ 12 มีค่าสูงใกล้เคียงกัน และจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 10 ใช้เวลาการประมวลผลน้อยกว่า

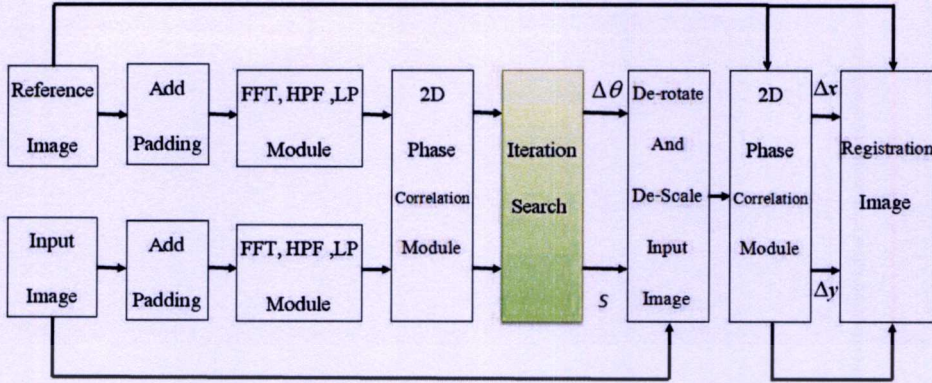
#### 5.4.4 การทดลองเปรียบเทียบวิธีการค้นหาระหว่างการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (BFS) กับการค้นหาแบบทำซ้ำ (ITS)

การทดลองนี้ทำเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการค้นหาที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยที่นำเสนอ โดยวัดผลในเรื่องของค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาที่ใช้ประมวลผลทดลองกับภาพลักษณะแตกต่างกันมาทำการจัดเรียงภาพที่ใช้วิธีการค้นหาที่แตกต่างกัน คือการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนและการค้นหาแบบทำซ้ำ ในส่วนของ BFS เป็นการหาค่าการหมุนโดยเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน และจะหยุดค้นหาเมื่อค่าการหมุนที่ได้นั้นทำให้ภาพมีความกลมกลืนมากกว่าการเลื่อนข้างเคียง แสดงขั้นตอนดังรูปที่ 5.10

ส่วน ITS เป็นการค้นหาแบบทำซ้ำจะทำการหาค่าการหมุนและค่าการขยายขนาดจากเทคนิคเฟสคอลลิเรชัน โดยเลือกจากค่าคอลลิเรชันที่มีค่าสูงที่สุดแล้วจึงทำการปรับภาพอินพุตต่อมานำภาพอินพุตมาทำการหาค่าการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาดใหม่ด้วยเทคนิคเฟสคอลลิเรชันอีกครั้ง ถ้าค่าการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาดที่ได้เป็นค่าใหม่ที่ไม่เท่ากับค่าการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาดครั้งก่อนหน้า คือค่าการหมุนที่หาได้ไม่เท่ากับ 0 และค่าการขยายขนาดไม่เท่ากับ 1 จะทำการปรับภาพอินพุต แล้วทำการหาค่าการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาดใหม่ ขั้นตอนการปรับภาพอินพุตและการหาค่าการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาดจะถูกทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าการหมุนและการขยายหรือลดขนาดที่ได้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในการค้นหาครั้งต่อไปคือได้ค่าการหมุนเท่ากับ 0 และค่าการขยายหรือลดขนาดเท่ากับ 1.0 หรือครบตามจำนวนรอบการทำซ้ำที่กำหนดไว้ ในการทดลองนี้กำหนดไว้ที่ 10 รอบ ดังนั้นถ้าค่าการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาดเมื่อทำการหาครบ 10 รอบแล้วยังไม่ได้ค่าการหมุนเท่ากับ 0 และค่าการขยายหรือลดขนาดเท่ากับ 1.0 จะนำเอาค่าการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาดที่ได้จากรอบที่ 10 ไปใช้ในการจัดเรียงภาพในขั้นตอนอื่นๆ ต่อไป แสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วยเทคนิคการค้นหาแบบ ITS ดังรูปที่ 5.11 สำหรับชุดข้อมูลภาพที่นำมาทดลองคือชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนแนวนอน การเลื่อนแนวตั้งและการหมุน ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.10 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วย BFS



รูปที่ 5.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจัดเรียงภาพด้วย ITS

ตารางที่ 5.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย เวลาเฉลี่ยที่ใช้ประมวลผลของเทคนิคการค้นหาแบบต่างๆ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน (%)

	<i>precision</i>		<i>error</i>		<i>Time</i>	
	I	II	I	II	I	II
Simple	87.74	95.31	14.36	10.44	4.42	8.26
Detail	86.23	94.46	14.40	11.04	4.51	8.17
Complex	86.04	92.82	15.23	12.19	4.48	8.21

I. Log Polar Grid , Phase Correlation and *Iteration Search*

II. Log Polar Grid , Phase Correlation and *Best First Search*

จากตารางที่ 5.6 พบว่าการนำเทคนิคการค้นหาเข้ามาช่วยในการหาค่าการเลื่อนที่ถูกต้องนั้นทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเลือกการเลื่อนที่ให้ค่าคอสสิเรชันมากที่สุดที่ได้จากเทคนิคเฟสคอสสิเรชันเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอ เพราะภาพอ้างอิงและภาพอินพุตอาจมีสัญญาณรบกวนและบริเวณส่วนที่ไม่ทับซ้อนกันมากเกินไป จนส่งผลให้ค่าคอสสิเรชันมากที่สุดนั้นไม่ใช่ค่าการเลื่อนที่ถูกต้องจริงๆ ดังนั้นการนำค่าคอสสิเรชันลำดับอื่นมาพิจารณาด้วยจึงเพิ่มโอกาสในการหาเลื่อนที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น จากผลการทดลองวิธีการที่นำ BFS มาใช้ร่วมกับเฟสคอสสิเรชัน (I) นั้นให้ประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการที่นำ ITS มาใช้ร่วมกับเฟสคอสสิเรชัน (I) เนื่องจาก ITS นำเพียงค่าคอสสิเรชันมากที่สุดมาพิจารณาปรับภาพอินพุตเพียงอย่างเดียว แล้วทำซ้ำจนกว่าค่าการเลื่อนที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่สำหรับ BFS ได้มีการนำทั้งค่าคอสสิเรชันและ RMSE ในการตัดสินใจว่าค่าการเลื่อนใดถูกต้องที่สุด พบว่าการใช้ทั้งค่าคอสสิเรชันและ RMSE นั้นให้ผลที่ดีกว่า

#### 5.4.5 การทดลองวัดประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอสำหรับหาค่าการขยายหรือลดขนาด

การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพการหาค่าการขยายหรือลดขนาดของวิธีที่นำเสนอ โดยวัดผลในเรื่องของค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย และเวลาที่ใช้ประมวลผลกับภาพลักษณะแตกต่างกันจากชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการหมุนและการขยายหรือลดขนาดมาทำการจัดเรียงภาพ มาทำการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนแบบขยายหรือลดขนาด ซึ่งในการทดลองทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัย [15] ที่ทำการวิจัยเรื่องการจัดเรียงภาพโดยใช้เทคนิคการแปลงฟาสฟูเรียร์ เฟสคอลลีเรชัน การแปลงพิกัดแบบโลกโพล่า และการจัดเรียงภาพด้วยเทคนิคการค้นหาแบบทำซ้ำ (ITS) ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เวลาเฉลี่ยที่ใช้ประมวลผลของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน (%)

	<i>precision</i>			<i>error</i>			<i>Time</i>		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	79.45	83.08	93.55	0.071	0.069	0.034	1.84	4.81	7.34
Detail	79.01	82.46	93.64	0.064	0.067	0.040	1.79	4.89	8.35
Complex	77.23	82.11	93.04	0.097	0.069	0.043	1.81	5.12	7.98

I. Log Polar Grid , Phase Correlation [15]

II. Log Polar Grid , Phase Correlation and **Iteration Search**

III. Log Polar Grid , Phase Correlation and **Best First Search**

จากตารางที่ 5.7 พบว่าการหาการเลื่อนแบบขยายหรือลดขนาดมีแนวโน้มไปทางเดียวกับการหาการเลื่อนแบบมุม คือเมื่อนำเทคนิคการค้นหาช่วยในการหาค่าการขยายหรือลดขนาดทำให้ความถูกต้องสูงขึ้นจากเดิม โดยเทคนิคที่ช่วยเพิ่มความถูกต้องของการจัดเรียงภาพอย่างชัดเจนได้แก่ การค้นหาแบบทำซ้ำ (ITS) ของวิธีการที่ II โดยการค้นหาค่าการหมุนและค่าการขยายหรือลดขนาดแล้วจึงทำปรับค่าภาพอินพุตจนได้ค่าการเลื่อนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจึงหยุด เทคนิคนี้ช่วยเพิ่มความถูกต้องขึ้นจากวิธีดั้งเดิมที่ไม่มีการนำเทคนิคการค้นหาใช้ร่วมกับเทคนิคเฟสคอลลีเรชัน ในส่วนของวิธีการที่ III เทคนิคที่ช่วยเพิ่มความถูกต้องให้คือเทคนิคการเลือกโหนดเริ่มต้น โดยพิจารณาค่าคอลลีเรชันตำแหน่งอื่นๆ จำนวน 10 ตำแหน่ง แทนการพิจารณาเพียงค่าคอลลีเรชันที่มีค่าสูงที่สุดเพียงค่าเดียว พบว่าภาพอินพุตที่มีการเลื่อนส่วนใหญ่ในชุดข้อมูลภาพที่นำมาทดลองภายในค่าคอลลีเรชัน 10 ตำแหน่งแรกมีการเลื่อนแบบขยายหรือลดขนาดที่ถูกต้องอยู่เป็นส่วนใหญ่

#### 5.4.6 การทดลองวัดประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยวัดผลในเรื่องของค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย และเวลาที่ใช้ประมวลผล โดยแบ่งแยกผลลัพธ์ตามขนาดของส่วนที่เป็นพื้นที่ทับซ้อนกันระหว่างภาพอ้างอิงและภาพอินพุตด้วยขนาดต่างๆ กันประกอบด้วยเปอร์เซ็นต์การทับซ้อนดังนี้ ( 100% - 80% , 79% - 60% , 59% - 40% , 39% - 20% , 19% - 10% ) โดยพื้นที่ทับซ้อนระหว่างภาพอ้างอิงและภาพอินพุตหาได้จากสมการดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การทับซ้อน (\%)} = \left( \frac{A_O}{A_R} \right) \times 100 \quad (5.6)$$

โดย  $A_O$  (Overlapped area) คือจำนวนพิกเซลที่ทับซ้อนกันระหว่างภาพอ้างอิงและภาพอินพุต

$A_R$  (Area of the Reference Image) คือ จำนวนพิกเซลของภาพอ้างอิง

ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัย [14] ที่ทำการวิจัยเรื่องการจัดเรียงภาพโดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟเฟสคอลลีเรชั่น ร่วมกับการค้นหาค่าที่ดีที่สุดก่อนและเปรียบเทียบกับงานวิจัย [15] ที่ทำการวิจัยเรื่องการจัดเรียงภาพโดยใช้เทคนิคการแปลงฟูริเยร์เฟสคอลลีเรชั่น การแปลงพิกัดแบบลอกโพล่า ได้ทำการทดลองกับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันและการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนแนวนอน การเลื่อนแนวตั้งและการหมุน สำหรับชุดข้อมูลภาพที่นำมาทดลองคือชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนแนวนอน การเลื่อนแนวตั้งและการหมุน การที่ใช้ชุดข้อมูลภาพชุดนี้เนื่องจากงานวิจัย [14] ไม่สามารถรองรับการหาค่าการขยายหรือลดขนาดของภาพอินพุตได้ ดังนั้นเพื่อการเปรียบเทียบกันอย่างเสมอภาคจึงใช้ชุดข้อมูลที่ทุกงานวิจัยสามารถรองรับได้ ผลลัพธ์จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.8 , 5.9 และ 5.10

ตารางที่ 5.8 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ (%)

	100% - 80%			79% - 60%			59% - 40%		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	85.12	100	100	82.45	98.30	100	74.45	96.82	100
Detail	71.42	100	100	64.28	98.53	100	35.71	97.24	100
Complex	28.57	100	100	28.43	97.31	100	28.22	97.45	100

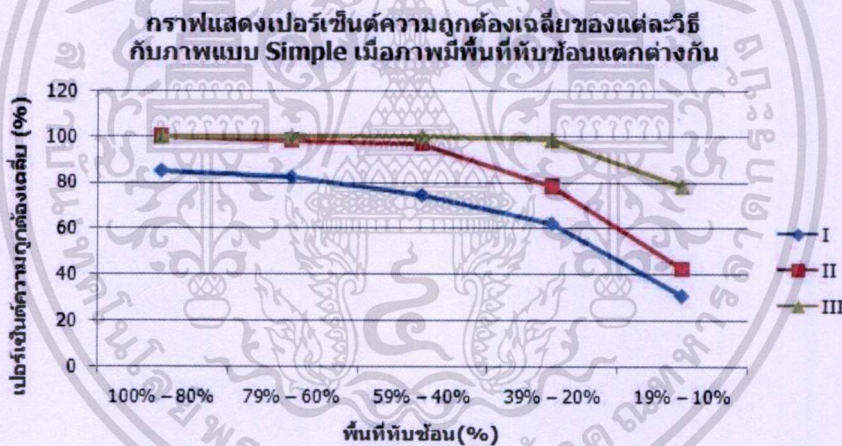
	39% – 20%			19% – 10%		
	I	II	III	I	II	III
Simple	62.25	78.57	98.37	31.06	42.89	78.18
Detail	28.57	79.43	98.02	26.80	38.55	74.28
Complex	26.30	78.30	97.40	25.67	37.64	66.70

I. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search [14]

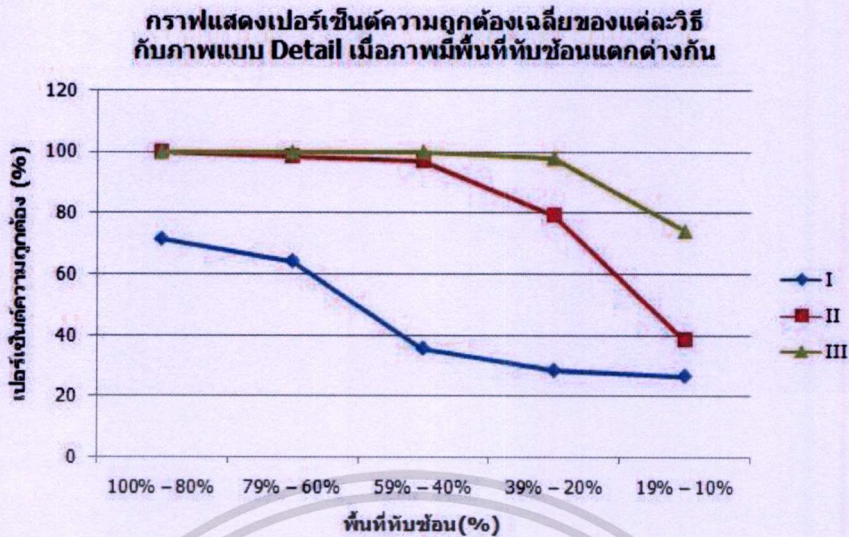
II. Log Polar Grid and Phase Correlation [15]

III. Log Polar Grid, Phase Correlation and Best First Search

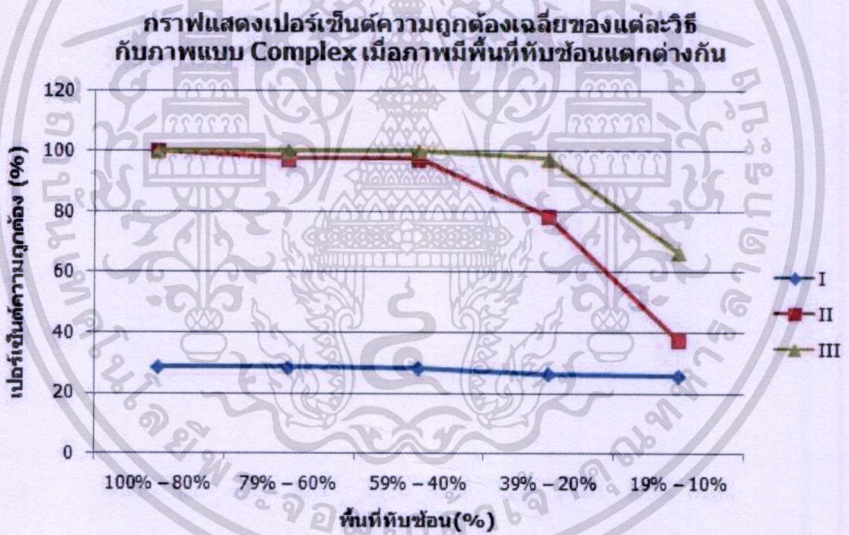
จากตารางที่ 5.8 สามารถนำไปสร้างกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของพื้นที่การทับซ้อนที่มีต่อค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของภาพลักษณะต่างๆ ประกอบด้วยภาพ Simple แสดงได้ดังรูปที่ 5.12 ภาพ Detail แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 และภาพ Complex แสดงได้ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Simple เมื่อภาพมีพื้นที่ทับซ้อนแตกต่างกัน



**รูปที่ 5.13** กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง  
ของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Detail เมื่อภาพมีพื้นที่ทับซ้อนแตกต่างกัน



**รูปที่ 5.14** กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง  
ของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Complex เมื่อภาพมีพื้นที่ทับซ้อนแตกต่างกัน

จากกราฟค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 5.12 – 5.14 พบว่าวิธีการที่นำเสนอ คือ เทคนิคการจัดเรียงภาพด้วยเทคนิคเฟสคอลลิเรชั่น การแปลงพิกัด ลอกโพลากริด และการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (III) ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงกว่าเทคนิคการจัดเรียงภาพด้วยเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัพ เฟสคอลลิเรชั่น และการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (I) ของ [14] และเทคนิคการจัดเรียงภาพด้วยเทคนิคเฟสคอลลิเรชั่นและการแปลงพิกัดแบบลอกโพลากริด (II) ของ [15] เนื่องจากพบว่าวิธีการที่ I นั้นค่าเปอร์เซ็นต์ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกต้องเฉลี่ยนั้นขึ้นกับลักษณะของภาพที่นำมาจัดเรียง สามารถจัดเรียงได้ถูกต้องสูงกับภาพแบบ Simple และการจัดเรียงได้ถูกต้องลดลงกับภาพแบบ Detail และ Complex ตามลำดับ เพราะเทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัพฟ์ที่ถูกนำมาใช้ในการจัดเรียงภาพพั้งพึงกับเส้นตรงภายในภาพ ดังนั้นภาพที่มีเส้นตรงในภาพชัดเจน ความถูกต้องของการจัดเรียงจะมากกว่าภาพที่มีเส้นตรงในภาพไม่ชัดเจน ในส่วนวิธีการที่ II สามารถจัดเรียงภาพลักษณะต่างๆ ได้ความถูกต้องใกล้เคียงกัน ไม่ขึ้นกับลักษณะของภาพแต่ความถูกต้องยังน้อยกว่าวิธีการที่นำเสนอวิธี III เพราะวิธีการที่ III ได้นำวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนเข้ามาช่วยหาค่าการเลื่อนแบบหมุนซึ่งทำงานอยู่บน โดเมนจุดภาพ เนื่องจากค่าคอสสิเรชันสูงสุดที่ได้จากเฟสคอสสิเรชันเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถหาค่าการเลื่อนที่ถูกต้องได้เมื่อภาพที่นำมาจัดเรียงมีสัญญาณรบกวนหรือพื้นที่ที่ทับซ้อนของภาพที่นำมาจัดเรียงที่ขนาดเล็ก ขนาดของพื้นที่ทับซ้อนที่วิธีการที่ II ยังสามารถหาการเลื่อนได้ถูกต้องคือ 40% - 100% เมื่อพื้นที่ทับซ้อนน้อยกว่า 40% ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีการที่ II จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการที่ III ที่นำเสนอ

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ (องศา)

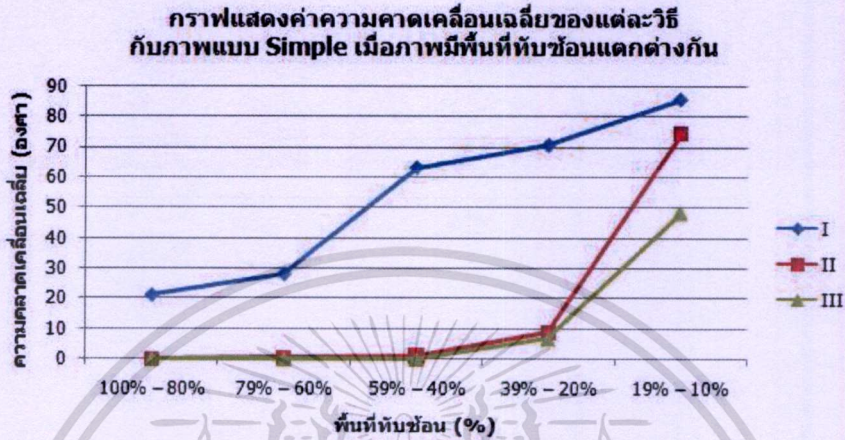
	100% – 80%			79% – 60%			59% – 40%		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	8.87	0	0	9.34	0.51	0	12.08	1.42	0
Detail	21.05	0	0	28.12	0.34	0	63.12	1.07	0
Complex	48.57	0	0	54.85	0.76	0	57.21	0.96	0
	39% – 20%			19% – 10%					
	I	II	III	I	II	III			
Simple	24.02	9.42	4.39	79.61	74.15	47.81			
Detail	70.58	8.86	6.76	85.55	74.15	48.44			
Complex	66.57	10.59	6.81	94.42	80.44	54.14			

I. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search [14]

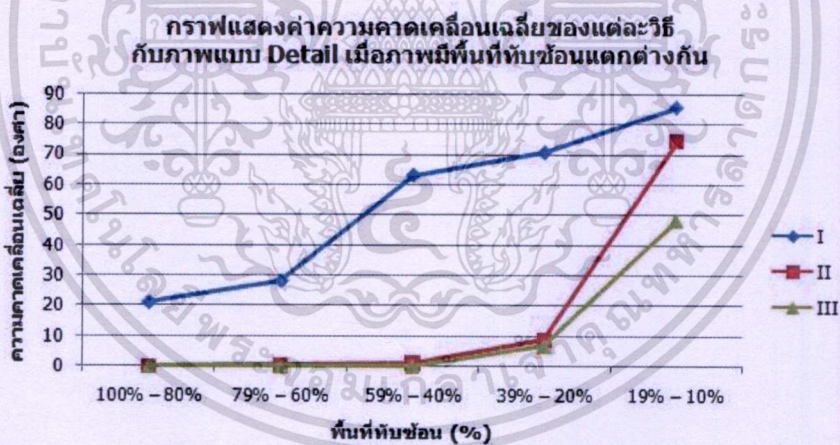
II. Log Polar Grid and Phase Correlation [15]

III. Log Polar Grid, Phase Correlation and Best First Search

จากตารางที่ 5.9 สามารถนำไปสร้างกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของพื้นที่การทับซ้อนที่มีต่อค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีกับภาพลักษณะต่างๆ ประกอบด้วยภาพ Simple แสดงได้ดังรูปที่ 5.15 ภาพ Detail แสดงได้ดังรูปที่ 5.16 และภาพ Complex แสดงได้ดังรูปที่ 5.17

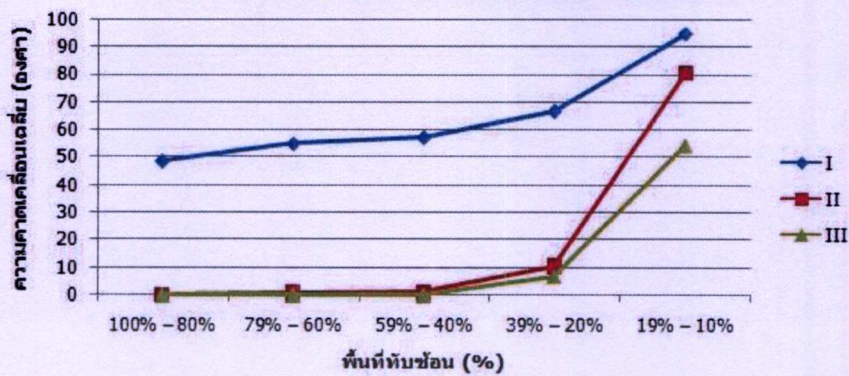


**รูปที่ 5.15** กราฟแสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย  
ของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Simple เมื่อภาพมีพื้นที่ทับซ้อนแตกต่างกัน



**รูปที่ 5.16** กราฟแสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย  
ของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Detail เมื่อภาพมีพื้นที่ทับซ้อนแตกต่างกัน

กราฟแสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธี  
กับภาพแบบ Complex เมื่อภาพมีพื้นที่ทับซ้อนแตกต่างกัน



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย

ของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Complex เมื่อภาพมีพื้นที่ทับซ้อนแตกต่างกัน

จากกราฟค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการที่แสดงดังรูปที่ 5.15 – 5.17 พบว่าวิธีการที่นำเสนอให้ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่าวิธีการที่ I และวิธีการที่ II และสังเกตว่าค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยนั้นแปรผกผันกับค่าความถูกต้องเฉลี่ย

ตารางที่ 5.10 แสดงเวลาประมวลผลเฉลี่ยของแต่ละวิธีการสำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ (วินาที)

	100% – 80%			79% – 60%			59% – 40%		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	11.74	1.58	7.82	11.96	1.75	8.10	11.08	1.48	8.48
Detail	11.85	1.60	7.95	12.06	1.46	7.84	12.33	1.57	8.10
Complex	11.53	1.43	8.01	11.91	1.67	8.18	12.58	1.40	7.94
	39% – 20%			19% – 10%					
	I	II	III	I	II	III			
Simple	12.13	1.67	8.54	11.46	1.77	8.36			
Detail	12.51	1.78	8.45	12.38	1.74	8.51			
Complex	12.20	1.72	8.47	12.42	1.51	8.45			

I. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search [14]

II. Log Polar Grid and Phase Correlation [15]

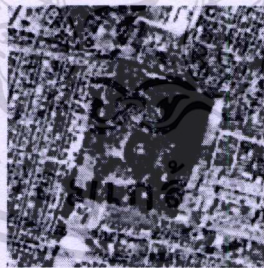
III. Log Polar Grid, Phase Correlation and Best First Search

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

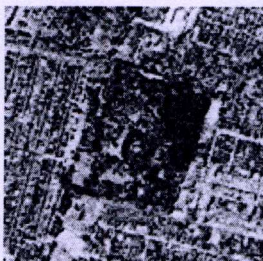
จากตารางที่ 5.10 แสดงเวลาประมวลผลเฉลี่ยของแต่ละวิธี พบว่าวิธีการที่ II ใช้เวลาน้อยที่สุดเพราะเทคนิคการจัดเรียงอยู่บน โดเมนความถี่ทั้งหมดซึ่งใช้เวลาการประมวลผลน้อย ตามมาด้วยวิธีการที่นำเสนอ III ที่ใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นจากเทคนิคการเลือกโหนดเริ่มต้นด้วยค่า  $Cor(x, y)$  รวมกับเทคนิคการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน และวิธีการที่ใช้เวลาการประมวลผลมากที่สุดคือวิธีการที่ I ที่ใช้เวลาส่วนใหญ่ไปกับเทคนิคการหาโหนดเริ่มต้นด้วยค่า RMSE และวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน

#### 5.4.7 การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอ

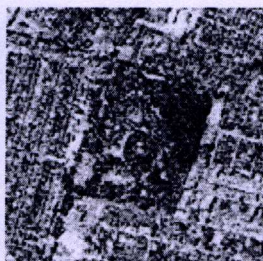
การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอ III ในงานวิจัยนี้ เป็นการทดลองนำภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน ไปทำการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบ Gaussian ซึ่งเป็นการทดลองนำภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน ไปทำการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบ Gaussian ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่พบได้ทั่วไปในทางปฏิบัติ เข้าไปในภาพโดยให้ค่ากลาง (Mean) เท่ากับ 0 และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความแปรปรวน (Variance) เป็น 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.18 ต่อมานำภาพที่เพิ่มสัญญาณรบกวนมาทำการจัดเรียงภาพเพื่อวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยเปรียบเทียบกับงานวิจัย [14] และ [15] การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนที่นำมาทดลองประกอบด้วย การเลื่อนในแนวนอน การเลื่อนแนวตั้ง และการหมุนเนื่องจากงานวิจัย [14] ไม่สามารถรองรับการขยายหรือลดขนาดของภาพอินพุตได้ ดังนั้นจึงเลือกชุดข้อมูลภาพที่นำมาทดลองคือชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนแนวนอน การเลื่อนแนวตั้ง และการหมุน ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.11



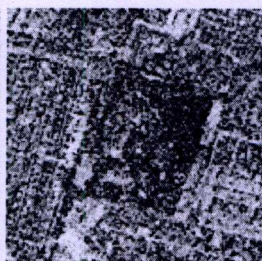
(a) Variance = 0.00



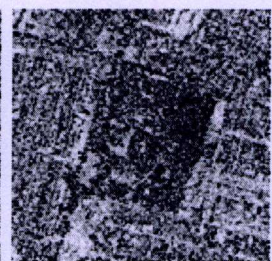
(b) Variance = 0.05



(c) Variance = 0.10



(d) Variance = 0.15



(e) Variance = 0.20

รูปที่ 5.18 แสดงภาพหลังจากถูกสัญญาณรบกวนที่ค่าความแปรปรวนต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพ (%)

	Variance = 0.05			Variance = 0.10		
	I	II	III	I	II	III
Simple	32.15	41.17	55.94	15.10	38.23	47.12
Detail	26.70	40.78	52.01	10.37	36.50	44.45
Complex	15.11	39.12	51.76	7.64	35.12	42.89
	Variance = 0.15			Variance = 0.20		
	I	II	III	I	II	III
Simple	12.54	37.41	46.17	4.16	23.53	38.59
Detail	8.44	36.34	42.88	2.52	18.22	36.87
Complex	3.12	31.10	39.23	1.07	17.84	36.04

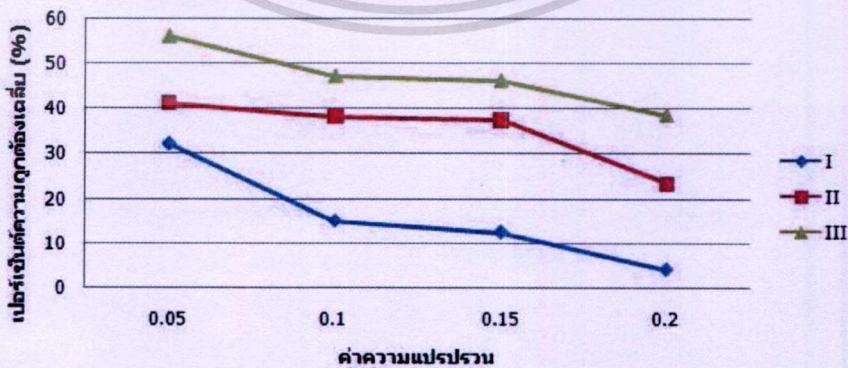
I. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search [14]

II. Log Polar Grid and Phase Correlation [15]

III. Log Polar Grid, Phase Correlation and Best First Search

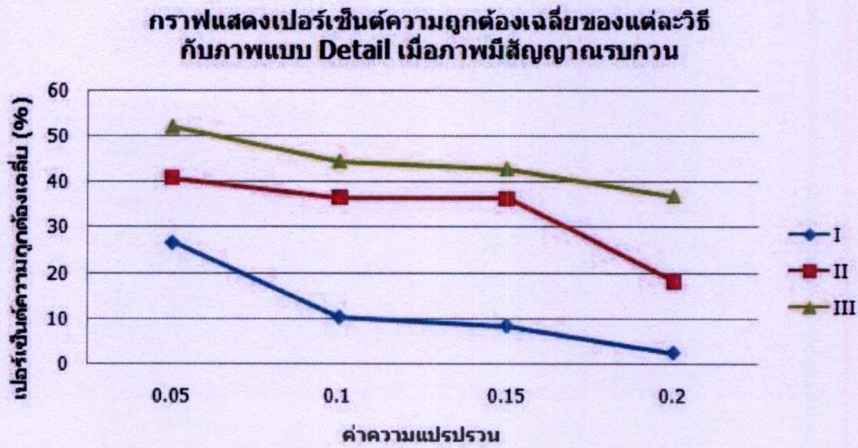
จากตารางที่ 5.11 สามารถนำไปสร้างกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสัญญาณรบกวนที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพลักษณะต่างๆ ประกอบด้วยภาพ Simple แสดงได้ดังรูปที่ 5.19 ภาพ Detail แสดงได้ดังรูปที่ 5.20 และภาพ Complex แสดงได้ดังรูปที่ 5.21

กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Simple เมื่อภาพมีสัญญาณรบกวน

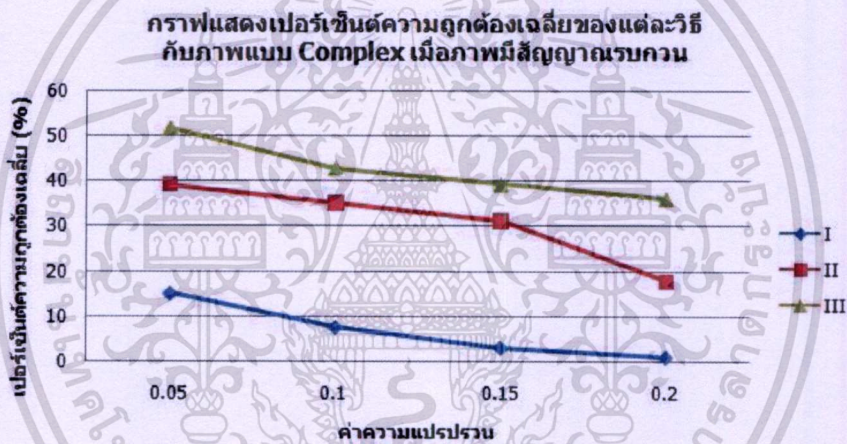


รูปที่ 5.19 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Simple เมื่อภาพมีสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.20** กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง  
ของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Detail เมื่อภาพมีสัญญาณรบกวน



**รูปที่ 5.21** กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง  
ของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Complex เมื่อภาพมีสัญญาณรบกวน

จากกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีการที่แสดงดังรูปที่ 5.19 – 5.21 พบว่าสัญญาณรบกวนแบบ Gaussian ส่งผลต่อความถูกต้องของการจัดเรียงภาพทั้ง 3 วิธี โดยแปรผกผันตามค่าการแปรปรวน (Variance) ของสัญญาณรบกวนคือ เมื่อค่าการแปรปรวนน้อยความถูกต้องของการจัดเรียงภาพมาก และเมื่อค่าการแปรปรวนเพิ่มมากขึ้นความถูกต้องของการจัดเรียงภาพก็จะลดลง พบว่าความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีที่ I และ II นั้นให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า แต่ก็ยังทนทานต่อสัญญาณรบกวนแบบ Gaussian ได้ไม่มากนัก

#### 5.4.8 การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอ

การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอ III ในงานวิจัยนี้เป็น การทดลองนำภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน ทำการปรับความสว่างในภาพทั้งปรับให้มีดลยและสว่าง ขึ้น โดยทำการปรับทั้งสิ้น 6 ลำดับ คือ -90 , -60 , -30 , +30 , +60 , +90 แสดงดังรูปที่ 5.22 แล้วทำ การวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยเปรียบเทียบกับงานวิจัย [14] และ [15] การเปลี่ยนแปลงการ เลื่อนที่นำมาทดลองประกอบด้วยการเล่นในแนวนอน การเลื่อนแนวตั้งและการหมุนเนื่องจาก งานวิจัย [14] ไม่สามารถรองรับการขยายหรือลดขนาดของภาพอินพุตได้ ดังนั้นจึงเลือกชุด ข้อมูลภาพที่นำมาทดลองคือชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการเล่นแนวนอน การเลื่อนแนวตั้ง และการหมุน สำหรับชุดข้อมูลภาพที่นำมาทดลองคือชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการเล่น แนวนอน การเลื่อนแนวตั้งและการหมุน ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.12



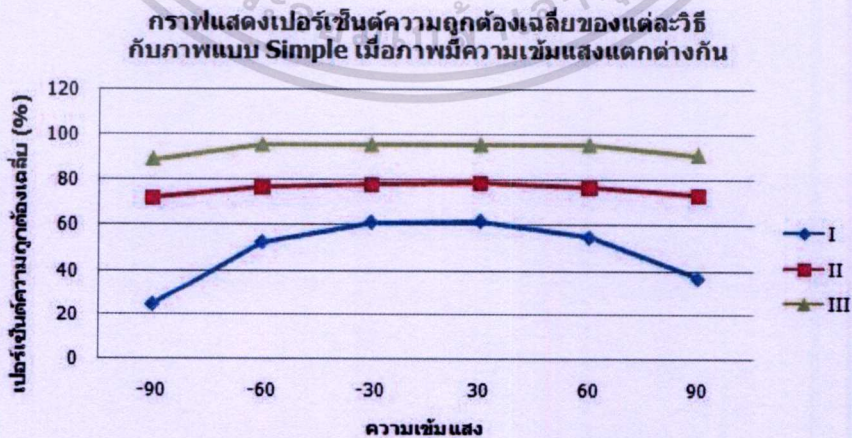
รูปที่ 5.22 แสดงภาพหลังจากถูกปรับความเข้มแสงที่ค่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 5.12 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในภาพ (%)

	Brightness = -90			Brightness = -60			Brightness = -30		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	24.51	72.31	89.08	52.59	77.01	95.31	61.15	78.12	95.31
Detail	15.13	71.94	88.14	38.73	76.65	94.46	42.81	76.30	94.46
Complex	8.40	70.45	87.74	20.94	76.04	92.82	24.11	75.81	92.82
	Brightness = +30			Brightness = +60			Brightness = +90		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	61.70	78.68	95.31	54.78	76.71	95.31	36.80	73.40	91.10
Detail	41.53	77.15	94.46	38.50	75.12	94.46	28.06	72.11	90.44
Complex	24.46	76.33	92.82	21.44	74.79	92.82	17.34	71.78	89.76

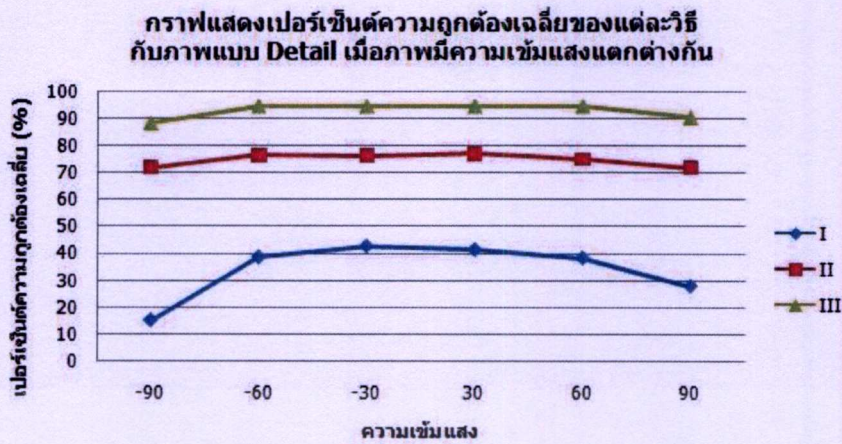
- I. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search [14]
- II. Log Polar Grid and Phase Correlation [15]
- III. Log Polar Grid, Phase Correlation and Best First Search

จากตารางที่ 5.11 สามารถนำไปสร้างกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของความเข้มแสงที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพลักษณะต่างๆ ประกอบด้วยภาพ Simple แสดงได้ดังรูปที่ 5.23 ภาพ Detail แสดงได้ดังรูปที่ 5.24 และภาพ Complex แสดงได้ดังรูปที่ 5.25

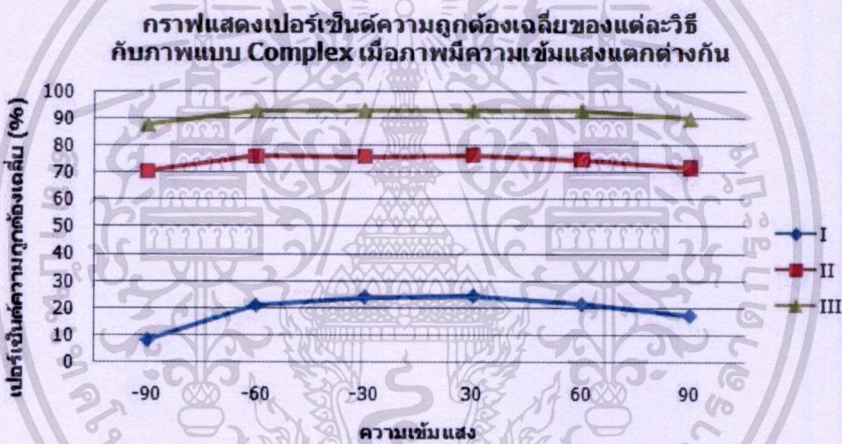


รูปที่ 5.23 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Simple เมื่อภาพมีความเข้มแสงแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.24** กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง  
ของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Detail เมื่อภาพมีความเข้มแสงแตกต่างกัน



**รูปที่ 5.25** กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง  
ของแต่ละวิธีกับภาพแบบ Complex เมื่อภาพมีความเข้มแสงแตกต่างกัน

จากกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของแต่ละวิธีการที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 5.23 – 5.25 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของภาพลงผลต่อความถูกต้องของการจัดเรียงภาพทั้ง 3 วิธี โดยแปรผกผันตามค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง คือ เมื่อค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น ความถูกต้องของการจัดเรียงภาพจะลดลง สรุปได้ว่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของภาพของวิธีการที่นำเสนอ III และวิธีการที่ II นั้นอยู่ในระดับที่ดี และมีความทนทานมากกว่าวิธีการที่ I เนื่องจากวิธีการที่ I นั้นความถูกต้องของการจัดเรียงภาพขึ้นตรงกับความชัดเจนของเส้นตรงภายในภาพค่อนข้างมาก เมื่อความเข้มแสงของภาพเปลี่ยนแปลงไป ความชัดเจนของเส้นตรงเหล่านั้นก็มีย่าน้อยลงตามมา

#### 5.4.9 การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบการจัดเรียงภาพที่นำเสนอ ในกรณีมุมการหมุน การเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งมีความละเอียดระดับทศนิยม

การทดลองเพื่อหามุมการหมุน การเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งระดับทศนิยมเนื่องจากงานวิจัยนี้สามารถหามุมการหมุน การเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งในระดับจำนวนเต็มเท่านั้น เมื่อนำภาพอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงในระดับทศนิยม มาทำการจัดเรียงด้วยอัลกอริทึมที่งานวิจัยนี้ นำเสนอจะทำให้มุมการหมุน การเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งที่ได้จากเทคนิคเฟสคอลลีเลชัน ถูกปรับเข้าสู่ค่าที่ใกล้เคียงในระดับจำนวนเต็มแสดงในตารางที่ 5.13 เนื่องจากผลของการปรับค่ามุมการหมุน การเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้ง เมื่อนำมาภาพมาจัดเรียงนั้น ไม่ใช่ค่ามุมการหมุน การเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งจริง จึงได้ทำการวัดค่า Root Mean Square Error (RMSE) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดความแตกต่างกันของความเข้มแสงในบริเวณทับซ้อนของภาพอินพุตและภาพอ้างอิง เพื่อแสดงถึงความกลมกลืนระหว่างภาพสองภาพ เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อระบบการจัดเรียงภาพที่นำเสนอมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้อยู่ในระดับจำนวนเต็ม แสดงดังตารางที่ 5.13 – 5.14

ตารางที่ 5.13 แสดงค่า RMSE เมื่อนำมุมการหมุนจริง และมุมการหมุนที่คำนวณได้มาจัดเรียงภาพ

	การหมุนจริง		ผลจากการหมุนที่คำนวณได้	
	มุมการหมุนจริง	RMSE <sub>Real</sub>	มุมที่คำนวณได้	RMSE <sub>estimate</sub>
1	0.3	0.041	0	0.048
2	0.7	0.062	1	0.065
3	5.3	0.088	5	0.116
4	5.7	0.066	6	0.074
5	10.3	0.062	10	0.062
6	10.7	0.066	11	0.074
7	30.3	0.062	30	0.068
8	30.7	0.074	31	0.092
	RMSE <sub>Real</sub> เฉลี่ย	0.065	RMSE <sub>estimate</sub> เฉลี่ย	0.075

จากตารางที่ 5.13 จะเห็นว่าผลลัพธ์จากระบบการจัดเรียงภาพที่นำเสนอ เมื่อมุมการหมุนที่คำนวณได้ถูกปรับค่าจากระดับทศนิยมเป็นระดับจำนวนเต็มนั้น มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อมุมการหมุนจริงมีขนาดเท่ากับ 0.1 - 0.4 ผลลัพธ์ที่คำนวณได้จะเป็นการปัดค่าลงหาจำนวนเต็มที่

ใกล้เคียงและเมื่อมีขนาดเท่ากับ 0.5 – 0.9 จะทำการปิดค่าขึ้นหาจำนวนเต็มที่ใกล้เคียงเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ภาพอินพุตมีมุมการหมุนที่เปลี่ยนแปลงจากภาพอ้างอิงเท่ากับ 10.3 องศา เมื่อผ่านขั้นตอนทำเฟสคอลลีเลชั่น มุมการหมุนที่ได้คือ 10 องศา

จะเห็นว่าจากผลการทดลอง ผลลัพธ์ของการจัดเรียงภาพด้วยค่ามุมจริงเมื่อเทียบกับ การจัดเรียงภาพด้วยระบบการจัดเรียงภาพที่นำเสนอให้ผลลัพธ์แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยสามารถดูได้จากค่า RMSE ที่แสดงในตาราง  $RMSE_{estimate}$  เฉลี่ยให้ค่าสูงกว่า  $RMSE_{Real}$  เฉลี่ยเท่ากับ 0.01 หรือสูงกว่า 15.37 เปอร์เซ็นต์ของ  $RMSE_{Real}$  แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการปรับมุมการหมุนจากระดับ ทศนิยมเป็นจำนวนเต็ม นั้น ทำให้ภาพที่ได้หลังจากการจัดเรียงมีความกลมกลืนลดลง ไม่มากนัก ถึงแม้ว่าค่า  $RMSE_{estimate}$  จากการปรับมุมการหมุนสูงขึ้น แต่เมื่อจัดเรียงภาพแล้วยังคงให้ภาพที่ค่อนข้างชัดเจน

ตารางที่ 5.14 แสดงค่า RMSE เมื่อนำการเลื่อนจริง และการเลื่อนที่คำนวณได้มาจัดเรียงภาพ

	การเลื่อนจริง		ผลจากการเลื่อนที่คำนวณได้	
	การเลื่อนจริง	$RMSE_{Real}$	การเลื่อนที่คำนวณได้	$RMSE_{estimate}$
1	0.3	0.020	0	0.020
2	0.7	0.022	1	0.022
3	30.3	0.019	30	0.019
4	30.7	0.021	31	0.022
5	60.3	0.022	60	0.026
6	60.7	0.022	61	0.024
7	90.3	0.016	90	0.017
8	90.7	0.017	91	0.019
	$RMSE_{Real}$ เฉลี่ย	0.020	$RMSE_{estimate}$ เฉลี่ย	0.021

จากตารางที่ 5.14 จะเห็นว่าผลลัพธ์เมื่อการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งถูกปรับค่าจากระดับทศนิยมเป็นระดับจำนวนเต็ม นั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดียวกับมุมการหมุน คือ การเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งมีขนาดเท่ากับ 0.1 – 0.4 จะทำการปิดค่าลงหาจำนวนเต็มที่ใกล้เคียงและเมื่อมีขนาดเท่ากับ 0.5 – 0.9 จะทำการปิดค่าขึ้นหาจำนวนเต็มที่ใกล้เคียงเช่นกัน

ตัวอย่างเช่น ภาพอินพุตมีการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งขนาด 30.7 พิกเซล เมื่อผ่านขั้นตอนทำเพสคอลลีเรชั่น การเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งที่ได้คือ 31 พิกเซล

จากค่า RMSE ที่ได้จากราย RMSE<sub>estimate</sub> เปรียบให้ค่าสูงกว่า RMSE<sub>Real</sub> เปรียบเท่ากับ 0.001 หรือสูงกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของ RMSE<sub>Real</sub> แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการปรับการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งจากระดับทศนิยมเป็นจำนวนเต็มนั้น ทำให้ภาพที่ได้หลังจากการจัดเรียงมีความกลมกลืนลดลงเล็กน้อย ซึ่งมีอัตราการลดลงของค่า RMSE น้อยกว่าการปรับมุมการหมุน



## สรุปผลการวิจัย และแนวทางการพัฒนา

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการจัดเรียงภาพสำหรับใช้ในการจัดเรียงภาพย่อยหลายภาพเพื่อประกอบกันเป็นภาพใหญ่ภาพใหม่ โดยนำได้รวมเทคนิคการแปลงฟาสฟูเรียร์ เฟสคอลลีเรชัน ระบบพิกัดแบบลอก โพลาหรือลอก โพลาและวิธีการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน ทั้งยังนำเทคนิคการเลือกโหนดเริ่มต้นมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน

งานวิจัยที่นำเสนอนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงเทคนิคการจัดเรียงภาพให้สามารถหาการเลื่อนตำแหน่งทั้ง 4 ลักษณะ ได้แก่ การเลื่อนในแนวแกนอนและแกนตั้ง การหมุน การขยายหรือลดขนาด ผลของค่ามุมการหมุนและการขยายหรือลดขนาดที่ได้รับให้มีความถูกต้องสูงสุดเมื่อภาพที่นำมาจัดเรียงมีพื้นที่ทับซ้อนขนาดเล็ก รวมถึงลดระยะเวลาการประมวลผลลง โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การแปลงข้อมูลแบบลอก โพลาครีด ซึ่งให้ผลลัพธ์ถูกต้องมากกว่าเมื่อนำไปใช้ในภาพลักษณะต่างๆ และแทนการแปลงข้อมูลแบบฮัพเคิม และปรับปรุงเทคนิคของมุมแข่งขัน (Candidate Angle) โดยการลดจำนวนมุมแข่งขันลงจาก  $\theta$ ,  $(90 + \theta)$ ,  $(180 + \theta)$  และ  $(270 + \theta)$  เหลือเพียง  $\theta$ ,  $(180 + \theta)$  แต่ทำการเพิ่มการพิจารณาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่ได้จากค่าคอลลีเรชันสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 10 ลำดับแทนการพิจารณาเพียง 5 ลำดับแบบเดิม เนื่องจากการทดลองพบว่าจำนวนมุมการหมุนและให้เวลาการประมวลผลที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 10 ลำดับ ช่วยเพิ่มความถูกต้องให้ระบบมากขึ้น รวมถึงเพิ่มเติมเทคนิคการเลือกโหนดเริ่มต้นของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน จากค่า  $Cor(x, y)$  แทนการใช้ค่า RMSE เดิม ส่งผลให้เวลาการประมวลผลของระบบลดลงมาอย่างมาก โดยทำการทดลองพบว่าค่า RMSE และ  $Cor(x, y)$  ให้ความถูกต้องใกล้เคียงกันแต่ค่า  $Cor(x, y)$  ใช้เวลาประมวลผลน้อยกว่ามาก

การทดลองเพื่อเปรียบเทียบวิธีการค้นหาระหว่างการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนกับการค้นหาแบบทำซ้ำ การนำเทคนิคการค้นหาเข้ามาช่วยในการหาการเลื่อนที่ถูกต้องนั้นทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเลือกการเลื่อนที่ให้ค่าคอลลีเรชันมากที่สุดที่ได้จากเทคนิคเฟสคอลลีเรชันเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอ เพราะภาพอ้างอิงและภาพอินพุตอาจมีสัญญาณรบกวนและบริเวณส่วนที่ทับซ้อนกันน้อยเกินไป จนส่งผลให้ค่าคอลลีเรชันมากที่สุดนั้นไม่ใช่ค่าการเลื่อนที่ถูกต้องจริงๆ ดังนั้นการนำค่าคอลลีเรชันลำดับอื่นมาพิจารณาด้วยจึงเพิ่มโอกาสในการหาการเลื่อนที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น เทคนิคการค้นหาจึงถูกนำมาช่วยสำหรับหาค่าการเลื่อนที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น จากผลการทดลองการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อนนั้นให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการค้นหาแบบทำซ้ำ เพราะได้มีการนำทั้งค่าคอลลีเรชันและ RMSE ในการตัดสินใจค่าการเลื่อนใดถูกต้องที่สุด

การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอสำหรับหาค่าการขยายหรือลดขนาด พบว่าจากการทดลองการหาการเลื่อนแบบขยายหรือลดขนาดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการหาการเลื่อนแบบหมุน คือเมื่อนำเทคนิคการค้นหามาช่วยในการหาค่าการขยายหรือลดขนาดทำให้ความถูกต้องสูงขึ้นจากเดิม โดยเทคนิคที่ช่วยเพิ่มความถูกต้องของการจัดเรียงภาพของวิธีที่นำเสนออย่างชัดเจนได้แก่ เทคนิคการเลือก โหนดเริ่มต้นของการค้นหา ช่วยเพิ่มความถูกต้องขึ้นจากวิธีดั้งเดิมที่ไม่มีการนำเทคนิคการค้นหามาใช้

สำหรับการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้มีการทดลองเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ [14] และ [15] โดยได้ทำการทดลองกับภาพในหลากหลายลักษณะและแบ่งการวัดผลการทดลองออกเป็นการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย และเวลาในการประมวลผล ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า วิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยมากกว่าและให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่างานวิจัยของ [14] และ [15] สำหรับภาพในทุกๆ ลักษณะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อภาพที่นำมาจัดเรียงภาพมีส่วนทับซ้อนมันน้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ จะพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของวิธีที่นำเสนอสูงกว่าวิธีการที่นำมาเปรียบเทียบทั้งสองอย่างชัดเจน

สัญญาณรบกวนในภาพอาจส่งผลกระทบต่อค่าถูกต้องเฉลี่ย เนื่องจากอาจไปรบกวนเส้นตรงและรายละเอียดในภาพที่ทำการจัดเรียงให้มีความแตกต่างกันมากขึ้น ซึ่งในกรณีนี้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยจะมีค่าลดลง การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อภาพมีสัญญาณรบกวนมีค่าความแปรปรวนไม่มากนัก วิธีการที่นำเสนอนี้สามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อภาพมีสัญญาณรบกวนที่มีความแปรปรวนมากค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยจะลดลงอย่างรวดเร็ว

การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอพบว่าวิธีการที่นำเสนอ เมื่อค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นหรือลดลง ความถูกต้องของการจัดเรียงภาพจะลดลงในอัตราไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง

สุดท้ายเป็นการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบการจัดเรียงภาพที่นำเสนอในกรณีมุมการหมุนการเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งมีความละเอียดระดับทศนิยม เนื่องจากงานวิจัยนี้สามารถหามุมการหมุน การเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งในระดับจำนวนเต็มเท่านั้นเมื่อนำภาพอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับทศนิยมมาทำการจัดเรียงทำให้ค่ามุมการหมุน การเลื่อนในแนวนอนและแนวตั้งจะถูกปรับเข้าสู่ค่าใกล้เคียงในระดับจำนวนเต็ม ผลของการปรับค่าทำให้ภาพที่ได้หลังการจัดเรียงมีความกลมกลืนลดลง แต่ยังคงให้ภาพที่ชัดเจน

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

การจัดเรียงภาพในงานวิจัยนี้รองรับได้เฉพาะการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนในแนวแกนตั้งและแกนนอน การเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนและการขยายหรือลดขนาดระหว่างภาพเท่านั้น โดยการเปลี่ยนแปลงเลื่อนในแนวแกนตั้งและแกนนอนสามารถหาได้จากเทคนิคเฟสคอลลีเรชั่น ส่วนการเปลี่ยนแปลงการหมุนและการขยายหรือลดขนาดจำเป็นต้องนำเทคนิคการแปลงพิกัดแบบลอกโพลามาใช้ร่วมกับเทคนิคเฟสคอลลีเรชั่น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่ การบิดการยัด การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของภาพ ต้องพัฒนาเทคนิคอื่นๆ เข้าช่วย

การเปลี่ยนแปลงการเลื่อนของภาพที่นำมาจัดเรียงในงานวิจัยนี้อยู่ในขอบเขตที่เป็นจำนวนเต็มเท่านั้น เมื่อนำเทคนิคที่นำเสนอไปจัดเรียงกับภาพที่มีการเลื่อนในขอบเขตทศนิยม ค่าการเลื่อนที่หาได้ถูกปรับให้เป็นจำนวนเต็มที่มีค่าใกล้เคียงที่สุด ดังนั้นเทคนิคการจัดเรียงภาพแบบ Sub-pixel สามารถนำมาช่วยในการทำงานเพื่อให้สามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนที่อยู่ในขอบเขตทศนิยมได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

อีกส่วนหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับการจัดเรียงภาพสำหรับเทคนิคที่นำเสนอ โดยการนำเทคนิคอื่นๆ เข้ามาใช้ เนื่องจากได้อธิบายข้างต้นแล้วว่าการนำเทคนิคการเลือกโหนดเริ่มต้นของการค้นหาทำให้ความถูกต้องของการจัดเรียงสูงขึ้น แต่จำนวนของค่าคอลลีเรชั่นที่นำมาใช้ในการหาโหนดเริ่มต้นมีจำนวนมาก เวลาที่ใช้ในการเลือกโหนดเริ่มต้นจะมากตาม ดังนั้นถ้าสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของจำนวนของค่าคอลลีเรชั่นที่เหมาะสมในแต่ละภาพอย่างอัตโนมัติ สามารถช่วยให้ลดเวลาในการประมวลผลที่ไม่จำเป็นลงไปได้มาก

## เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Zitová and J. Flusser, “**Image registration methods: A survey**”, *Image Vision Comput.*, vol. 21, pp. 977–1000, Nov. 2003.
- [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] 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
- [15] B. S. Reddy and B. N. Chatterji, “**An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration**”, *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 5, no. 8, pp. 1266–1271, Aug. 1996.
- [16] Hanzhou Liu , Baolong Guo and Zongzhe Feng “**Pseudo-Log-Polar Fourier Transform for Image Registration**”, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 13 , No. 1 , January 2006.
- [17] S.J. Russell and P. Norvig, “**Artificial Intelligence: A Modern Approach**”, 2nd edition. Pearson Education, Inc, 2003. pp. 94 and 95 (note 3).
- [18] 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.

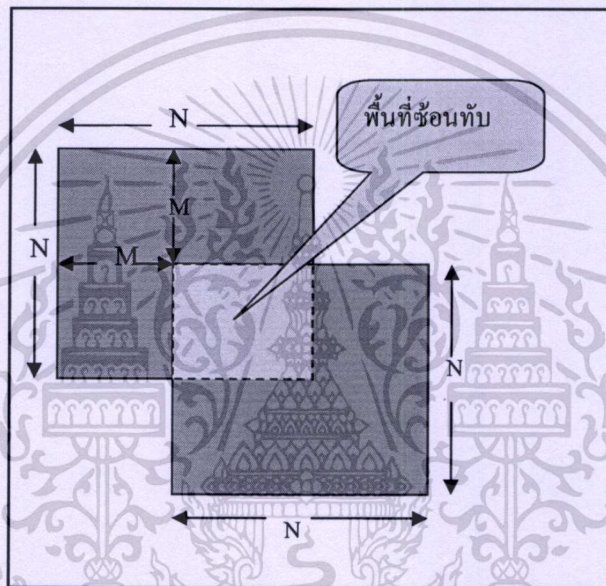


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของพื้นที่ซ้อนทับกันน้อยที่สุด

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

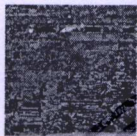

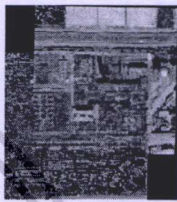
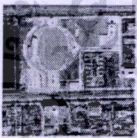

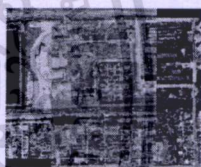





รูปที่ ก.1 แสดงพื้นที่ที่ทับซ้อนของภาพขนาด  $N \times N$  ใดๆ

เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับในที่นี้คำนวณได้จาก  $\frac{(N-M)^2}{N^2} \times 100$  และเปอร์เซ็นต์การทับซ้อนที่น้อยที่สุดที่สามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้จึงเกิดการการเลื่อนระยะไปในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้แล้วยังสามารถใช้วิธีการที่นำเสนอหาระยะการเลื่อนตำแหน่งที่เกิดขึ้นได้นั่นเอง

ตัวอย่างการเลื่อนตำแหน่งไปในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ด้วยระยะ  $M$  ใดๆ ให้มากที่สุดโดยยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ และการเลื่อนตำแหน่งไปในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ด้วยระยะ  $M$  ใดๆ ที่มากเกินกว่าจะสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้สามารถแสดงได้ในตารางที่ ก.1 โดยแสดงตัวอย่างของภาพ Simple , Detail , Complex ขนาด  $300 \times 300$  พิกเซล ของภาพภาพดาวเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง และเขตถนนอุททยาน

ตารางที่ ก.1 แสดงภาพตัวอย่างการเลื่อนตำแหน่งด้วยระยะ M ใดๆ ที่มากที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ และภาพที่เกิดจากการเลื่อนตำแหน่งด้วยระยะ M ที่มากเกินไปที่จะสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้

	ภาพดั้งเดิม M=0	ภาพการจัดเรียงภาพที่สามารถหา ระยะการเลื่อน M มากที่สุดได้	ภาพการจัดเรียงภาพที่ไม่สามารถ หาระยะการเลื่อน M ได้
Simple	M=0 	M=245  เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 3.36%	M=246  เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 3.24%
Detail	M=0 	M=243  เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 3.60 %	M=244  เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 3.48%
Complex	M=0 	M=220  เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 7.11%	M=221  เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับ = 6.98%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกันคือ ภาพ Simple , Detail , Complex ซึ่งได้มาจากภาพภาพถ่ายเทียมในบริเวณเขตลาดกระบัง

	300x300
Simple	4.46
Detail	5.90
Complex	7.02

ตารางที่ ก.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกันคือ ภาพ Simple , Detail , Complex ซึ่งได้มาจากภาพภาพถ่ายเทียมในบริเวณถนนอุทยาน

	300x300
Simple	3.72
Detail	4.86
Complex	6.40

ตารางที่ ก.4 แสดงเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของพื้นที่ซ้อนทับน้อยที่สุดที่ยังสามารถหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนตำแหน่งได้ของภาพลักษณะต่างๆกัน ทั้งเขตลาดกระบัง ถนนอุทยาน

	300x300
Simple	4.09
Detail	5.38
Complex	6.71

## ภาคผนวก ข.

# การทดลองเปรียบเทียบเทคนิคการดึงลักษณะเด่นจากภาพ ระหว่างเทคนิคการกรองความถี่สูงผ่านและเทคนิคการกรอง ขอบภาพของแคนนี่ที่เหมาะสมกับงานวิจัย

ลักษณะเด่นในช่วงความถี่สูงของภาพคือบริเวณที่เป็นขอบภายในภาพเป็นส่วนที่ถูกนำมาใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างภาพตั้งต้นและภาพอินพุต ในการจัดเรียงภาพ ซึ่งในการทดลองนี้ได้พิจารณาเทคนิคการดึงลักษณะเด่นจากภาพระหว่างเทคนิคการกรองความถี่สูงผ่าน (HPF) และเทคนิคการกรองขอบภาพของแคนนี่ (CED) เพื่อหว่าเทคนิคใดเหมาะสมกับเทคนิคส่วนอื่นๆของงานวิจัย โดยภาพที่นำมาทดลองเป็นภาพถ่ายดาวเทียม ในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง ถนนอุทยาน ผลการทดลองแสดงในตารางที่ ข.1 – ข.2

### I. บริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ ข.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาประมวลผลเฉลี่ยด้วย HPF และ CED สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตลาดกระบัง

	<i>precision</i> (%)		<i>error</i> (องศา)		<i>Time</i> (วินาที)	
	HPF	CED	HPF	CED	HPF	CED
Simple	80.20	34.87	18.40	80.19	1.68	1.60
Detail	81.61	31.56	18.87	81.43	1.65	1.56
Complex	81.53	28.40	20.89	105.00	1.50	1.40

### II. บริเวณเขตถนนอุทยาน

ตารางที่ ข.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาประมวลผลเฉลี่ยด้วย HPF และ CED สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตถนนอุทยาน

	<i>precision</i> (%)		<i>error</i> (องศา)		<i>Time</i> (วินาที)	
	HPF	CED	HPF	CED	HPF	CED
Simple	86.42	36.23	15.80	73.05	1.62	1.58
Detail	83.89	35.10	15.55	72.49	1.61	1.42
Complex	82.75	30.84	16.21	94.22	1.70	1.50

## ภาคผนวก ก.

# การทดลองเปรียบเทียบค่าอิวิริสติกฟังก์ชันระหว่าง RMSE และ $Cor(x, y)$ สำหรับการเลือกโหนดเริ่มต้น

อิวิริสติกฟังก์ชันคือฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ในการวัดขนาดของความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหา ซึ่งถูกแสดงด้วยตัวเลขซึ่งค่านี้ได้ถูกใช้ในการเลือกผลลัพธ์ที่ดีที่สุดด้วย สำหรับงานวิจัยนี้นำอิวิริสติกฟังก์ชันมาใช้พิจารณาการเลือกมุมการเลี้ยว เพื่อใช้เป็นโหนดเริ่มต้นของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดต่อไป การเลือกโหนดเริ่มต้นที่ดีส่งผลต่อประสิทธิภาพของการจัดเรียงภาพ ดังนั้นการทดลองนี้จึงทำการเปรียบเทียบอิวิริสติกฟังก์ชันระหว่าง RMSE และ  $Cor(x, y)$  สำหรับเลือกโหนดเริ่มต้นของการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน โดยภาพที่นำมาทดลองเป็นภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง ถนนอุทยาน ผลการทดลองแสดงในตารางที่ ก.1 – ก.2

### I. บริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ ก.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาประมวลผลเฉลี่ย โดยใช้อิวิริสติกฟังก์ชัน RMSE และ CED สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตลาดกระบัง

	precision		error (องศา)		Time	
	RMSE	$Cor(x, y)$	RMSE	$Cor(x, y)$	RMSE	$Cor(x, y)$
Simple	91.28	92.93	12.05	12.76	21.48	6.44
Detail	88.64	89.73	17.44	11.29	23.53	6.04
Complex	88.92	89.98	12.51	14.52	21.34	6.25

### II. บริเวณเขตถนนอุทยาน

ตารางที่ ก.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและเวลาประมวลผลเฉลี่ย โดยใช้อิวิริสติกฟังก์ชัน RMSE และ CED สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตถนนอุทยาน

	precision		error (องศา)		Time	
	RMSE	$Cor(x, y)$	RMSE	$Cor(x, y)$	RMSE	$Cor(x, y)$
Simple	94.42	92.15	9.01	12.20	22.58	5.84
Detail	93.60	92.73	10.26	14.81	21.97	6.40
Complex	90.78	89.10	16.55	14.44	22.32	6.11

## ภาคผนวก ง.

### การทดลองเพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสม

จำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสม คือ มุมการหมุนเริ่มต้นที่มีจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยสูงสุดที่สุด ซึ่งในการทดลองนี้ได้พิจารณามุมการหมุนเริ่มต้นของภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง ถนนอุทยาน ผลการทดลองเพื่อหาจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับแต่ละบริเวณ แสดงในตารางที่ ง.1- ง.4

#### I. บริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ ง.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย สำหรับภาพลักษณะต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ บริเวณเขตลาดกระบัง

Log Polar Grid, Phase Correlation (%)							
	N=1	N=2	N=4	N=6	N=8	N=10	N=12
Simple	81.40	84.33	86.11	87.95	88.24	91.80	91.97
Detail	80.22	83.50	83.88	84.90	87.74	90.33	90.93
Complex	79.58	82.41	83.22	83.85	85.20	89.25	89.60

ตารางที่ ง.2 แสดงเวลาประมวลผลเฉลี่ย สำหรับภาพลักษณะต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุนเริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ บริเวณเขตลาดกระบัง

Log Polar Grid, Phase Correlation (วินาที)							
	N=1	N=2	N=4	N=6	N=8	N=10	N=12
Simple	1.63	2.13	3.30	3.85	5.21	6.03	7.32
Detail	1.58	2.31	3.15	4.10	4.94	6.10	7.29
Complex	1.68	2.14	3.29	4.04	5.02	6.23	7.05

## II. บริเวณนอุทยาน

ตารางที่ ง.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย สำหรับภาพลักษณะต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุม การหมุนเริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ บริเวณเขตถนนอุทยาน

Log Polar Grid, Phase Correlation (%)							
	N=1	N=2	N=4	N=6	N=8	N=10	N=12
Simple	85.22	87.15	87.31	86.89	89.20	93.28	94.11
Detail	85.28	87.16	88.52	88.94	89.56	92.03	91.53
Complex	84.70	86.35	88.20	88.79	89.00	89.83	89.92

ตารางที่ ง.4 แสดงเวลาประมวลผลเฉลี่ย สำหรับภาพลักษณะต่างๆ เมื่อกำหนดจำนวนมุมการหมุน เริ่มต้นเป็น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มุมตามลำดับ บริเวณเขตถนนอุทยาน

Log Polar Grid, Phase Correlation (วินาที)							
	N=1	N=2	N=4	N=6	N=8	N=10	N=12
Simple	1.64	1.99	2.84	4.23	4.85	6.25	6.96
Detail	1.68	1.99	3.47	4.14	4.98	6.34	6.75
Complex	1.52	2.18	3.25	4.76	5.22	6.13	7.47

## ภาคผนวก จ.

# การทดลองเปรียบเทียบวิธีการค้นหาระหว่างการค้นหาแบบเลือก ค่าที่ดีที่สุดก่อนกับการค้นหาแบบทำซ้ำ

การทดลองนี้ทำเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการค้นหาที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยที่นำเสนอ โดยการทดลองนำภาพลักษณะต่างๆมาทำการจัดเรียงภาพที่ใช้วิธีการค้นหาที่แตกต่างกันคือการค้นหาแบบเลือกค่าที่ดีที่สุดก่อน (BFS) และการค้นหาแบบทำซ้ำ (ITS) โดยภาพที่นำมาทดลองเป็นภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง ถนนอุทยาน ผลการทดลองแสดงในตารางที่ จ.1 – จ.2

### I. บริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ จ.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เวลาเฉลี่ยที่ใช้ประมวลผลของเทคนิคการค้นหาแบบต่างๆ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน บริเวณเขตลาดกระบัง (%)

	<i>precision</i>		<i>error</i>		<i>Time</i>	
	I	II	I	II	I	II
Simple	94.12	85.44	12.75	18.80	8.10	4.34
Detail	92.58	84.20	13.77	17.31	8.35	4.60
Complex	92.10	83.68	13.54	19.74	8.03	4.15

### II. บริเวณเขตถนนอุทยาน

ตารางที่ จ.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เวลาเฉลี่ยที่ใช้ประมวลผลของเทคนิคการค้นหาแบบต่างๆ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน บริเวณเขตถนนอุทยาน (%)

	<i>precision</i>		<i>error</i>		<i>Time</i>	
	I	II	I	II	I	II
Simple	96.50	90.04	8.13	9.92	8.42	4.50
Detail	96.34	88.26	8.31	11.49	7.99	4.42
Complex	93.54	88.40	10.84	10.72	8.39	4.81

### I. Log Polar Grid , Phase Correlation and **Iteration Search**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน II. Log Polar Grid , Phase Correlation and **Best First Search** ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ.

# การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ สำหรับหาค่าการขยายหรือลดขนาด

การทดลองนี้ทำเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอสำหรับการหาค่าการขยายหรือลดขนาด การทดลองนำภาพลักษณะต่างๆ จากชุดข้อมูลภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงการหมุนและการย่อหรือขยายขนาดมาทำการจัดเรียงภาพ มาทำการหาการเปลี่ยนแปลงการเลื่อนแบบขยายหรือลดขนาด ซึ่งในการทดลองทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ [15] ที่ทำการวิจัยเรื่องการจัดเรียงภาพโดยใช้เทคนิคการแปลงฟาสฟูเรียร์ เฟสคอลลีเรชัน การแปลงพิกัดแบบลอคโพล่า และการจัดเรียงภาพด้วยเทคนิคการค้นหาแบบทำซ้ำ (ITS) โดยภาพที่นำมาทดลองเป็นภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง ถนนอุทยาน ผลการทดลองแสดงในตารางที่ ฉ.1 – ฉ.2

### I. บริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ ฉ.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เวลาเฉลี่ยที่ใช้ประมวลผลของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตลาดกระบัง (%)

	<i>precision</i>			<i>error</i>			<i>Time</i>		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	79.45	83.08	93.55	0.071	0.069	0.034	1.84	4.81	7.34
Detail	79.01	82.46	93.64	0.064	0.067	0.040	1.79	4.89	8.35
Complex	77.23	82.11	93.04	0.097	0.069	0.043	1.81	5.12	7.98

## II. บริเวณเขตถนนอุทยาน

ตารางที่ ๓.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย เวลาเฉลี่ยที่ใช้ประมวลผลของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันบริเวณเขตถนนอุทยาน (%)

	<i>precision</i>			<i>error</i>			<i>Time</i>		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	79.45	83.08	93.55	0.071	0.069	0.034	1.84	4.81	7.34
Detail	79.01	82.46	93.64	0.064	0.067	0.040	1.79	4.89	8.35
Complex	77.23	82.11	93.04	0.097	0.069	0.043	1.81	5.12	7.98

I. Log Polar Grid , Phase Correlation [15]

II. Log Polar Grid , Phase Correlation and **Iteration Search**

III. Log Polar Grid , Phase Correlation and **Best First Search**

## ภาคผนวก ข.

# การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองกับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน โดยวัดผลในเรื่องของค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย และเวลาที่ใช้ประมวลผล โดยแบ่งแยกผลลัพธ์ตามขนาดของส่วนที่ทับซ้อนกันของภาพตั้งต้นและภาพอินพุตด้วยต่างๆ ประกอบด้วยเปอร์เซ็นต์การทับซ้อนดังนี้ ( 100% - 80% , 79% - 60% , 59% - 40% , 39% - 20% , 19% - 10% ) ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัย [14] ที่ทำการวิจัยเรื่องการจัดการเรียงภาพโดยใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลแบบฮัฟเฟิลสคอลลีเรชั่น ร่วมกับการค้นหาค่าที่ดีที่สุดก่อนและเปรียบเทียบกับงานวิจัย [15] ที่ทำการวิจัยเรื่องการจัดการเรียงภาพโดยใช้เทคนิคการแปลงฟาสฟูเรียร์ เฟสคอลลีเรชั่น การแปลงพิกัดแบบลอกโปลา โดยภาพที่นำมาทดลองเป็นภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง ถนนอุทยาน ผลการทดลองแสดงในตารางที่ ข.1 - ข.6

### I. บริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ ข.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ บริเวณเขตลาดกระบัง (%)

	100% - 80%			79% - 60%			59% - 40%		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	84.38	100	100	81.04	97.62	100	74.30	96.06	100
Detail	70.85	100	100	63.84	97.10	100	34.85	96.22	100
Complex	26.90	100	100	28.12	97.01	100	27.64	95.87	100
	39% - 20%			19% - 10%					
	I	II	III	I	II	III			
Simple	61.59	78.20	97.30	30.24	42.12	77.84			
Detail	27.84	78.43	96.78	25.42	37.59	73.18			
Complex	25.70	77.01	97.12	24.88	37.35	66.20			

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ บริเวณเขตลาดกระบัง (องศา)

	100% – 80%			79% – 60%			59% – 40%		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	9.64	0	0	9.78	0.87	0	13.72	1.60	0
Detail	22.31	0	0	29.30	0.45	0	63.84	1.26	0
Complex	49.14	0	0	55.44	1.04	0	58.30	1.05	0
	39% – 20%			19% – 10%					
	I	II	III	I	II	III			
Simple	24.70	10.10	4.88	81.02	75.09	48.90			
Detail	71.23	9.38	7.31	86.44	75.23	49.12			
Complex	66.80	11.20	7.85	95.01	81.02	54.86			

ตารางที่ ข.3 แสดงเวลาประมวลผลเฉลี่ยของแต่ละวิธีการสำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ บริเวณเขตลาดกระบัง (วินาที)

	100% – 80%			79% – 60%			59% – 40%		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	11.32	1.48	8.12	11.80	1.62	7.82	11.15	1.50	8.35
Detail	11.41	1.59	8.34	12.32	1.52	7.96	12.10	1.45	8.14
Complex	11.97	1.53	7.98	12.31	1.63	8.21	12.22	1.47	8.05
	39% – 20%			19% – 10%					
	I	II	III	I	II	III			
Simple	12.43	1.58	8.46	11.68	1.80	8.57			
Detail	12.20	1.62	8.54	12.14	1.68	8.62			
Complex	12.35	1.84	8.67	12.02	1.47	8.55			

I. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search [14]

II. Log Polar Grid and Phase Correlation [15]

III. Log Polar Grid, Phase Correlation and Best First Search

### I. บริเวณเขตถนนอุทยาน

ตารางที่ ข.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ บริเวณเขตถนนอุทยาน (%)

	100% – 80%			79% – 60%			59% – 40%		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	85.86	100	100	83.86	98.98	100	74.60	95.30	100
Detail	71.99	100	100	64.72	99.96	100	36.57	98.26	100
Complex	30.24	100	100	28.74	97.61	100	28.80	99.03	100
	39% – 20%			19% – 10%					
	I	II	III	I	II	III			
Simple	62.91	78.94	99.44	31.88	43.66	78.52			
Detail	29.30	80.43	99.26	28.18	39.51	75.38			
Complex	26.90	79.59	97.68	26.46	37.93	67.20			

ตารางที่ ข.5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ บริเวณเขตถนนอุทยาน (องศา)

	100% – 80%			79% – 60%			59% – 40%		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	8.10	0	0	8.90	0.15	0	10.44	1.24	0
Detail	19.79	0	0	26.94	0.23	0	62.40	0.88	0
Complex	48.00	0	0	54.26	0.48	0	56.12	0.87	0
	39% – 20%			19% – 10%					
	I	II	III	I	II	III			
Simple	23.34	8.74	3.90	78.20	73.21	46.72			
Detail	69.93	8.34	6.21	84.66	73.07	47.76			
Complex	66.34	9.98	5.77	93.83	79.86	53.42			

ตารางที่ ข.6 แสดงเวลาประมวลผลเฉลี่ยของแต่ละวิธีการสำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อภาพทั้งสองทับซ้อนด้วยขนาดต่างๆ บริเวณเขตถนนอุทยาน (วินาที)

	100% – 80%			79% – 60%			59% – 40%		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	12.16	1.68	7.52	12.12	1.88	8.38	11.01	1.46	8.61
Detail	12.29	1.61	7.56	11.80	1.40	7.72	12.56	1.69	8.06
Complex	11.09	1.33	8.04	11.51	1.71	8.15	12.94	1.33	7.83
	39% – 20%			19% – 10%					
	I	II	III	I	II	III			
Simple	11.83	1.76	8.62	11.24	1.74	8.15			
Detail	12.82	1.94	8.36	12.62	1.80	8.40			
Complex	12.05	1.60	8.27	12.82	1.55	8.35			

I. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search [14]

II. Log Polar Grid and Phase Correlation [15]

III. Log Polar Grid, Phase Correlation and Best First Search

## ภาคผนวก ข.

# การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวน ของวิธีการที่นำเสนอ

การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็น การทดลองนำภาพที่มีลักษณะแตกต่างกันไปทำการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบ Gaussian ซึ่งเป็น สัญญาณรบกวนที่พบได้ทั่วไปในทางปฏิบัติ เข้าไปในภาพโดยให้ค่ากลาง (Mean) เท่ากับ 0 และทำ การเปลี่ยนแปลงค่าความแปรปรวน (Variance) เป็น 0.05 , 0.10 , 0.15 , 0.20 ตามลำดับ ต่อมานำ ภาพที่เพิ่มสัญญาณรบกวนมาทำการจัดเรียงภาพเพื่อวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ย โดยภาพที่ นำมาทดลองเป็นภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง ถนนอุทยาน ผลการทดลองแสดง ในตารางที่ ข.1 – ข.2

### I. บริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ ข.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่าง กัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพบริเวณเขตลาดกระบัง (%)

	Variance = 0.05			Variance = 0.10		
	I	II	III	I	II	III
Simple	30.84	40.96	55.10	14.55	37.33	46.48
Detail	25.50	38.81	51.66	9.51	35.79	43.32
Complex	13.25	38.74	50.40	7.17	34.71	40.60
	Variance = 0.15			Variance = 0.20		
	I	II	III	I	II	III
Simple	11.90	36.12	45.81	3.88	22.65	38.08
Detail	7.72	35.46	41.40	2.20	17.55	36.12
Complex	2.84	30.66	38.84	0.51	16.20	35.79

## II. บริเวณเขตถนนอุทยาน

ตารางที่ ข.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อมีสัญญาณรบกวนในภาพบริเวณเขตถนนอุทยาน (%)

	Variance = 0.05			Variance = 0.10		
	I	II	III	I	II	III
Simple	33.46	41.38	56.78	15.65	39.13	47.76
Detail	27.90	42.75	52.36	11.23	37.21	45.58
Complex	16.97	39.50	53.12	8.11	35.53	45.18
	Variance = 0.15			Variance = 0.20		
	I	II	III	I	II	III
Simple	13.18	38.70	46.53	4.44	24.41	39.10
Detail	9.16	37.22	44.36	2.84	18.89	37.62
Complex	3.40	31.54	39.62	1.63	19.48	36.29

I. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search [14]

II. Log Polar Grid and Phase Correlation [15]

III. Log Polar Grid, Phase Correlation and Best First Search

## ภาคผนวก ฉ.

# การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ของวิธีการที่นำเสนอ

การทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองนำภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน ไปทำการปรับความสว่างในภาพทั้งปรับให้มีดลงและสว่างขึ้น ขึ้น โดยทำการปรับทั้งสิ้น 6 ลำดับ คือ -90 , -60 , -30 , +30 , +60 , +90

ในการทดลองนี้ได้ใช้ภาพตั้งต้นจากภาพถ่ายดาวเทียมในบริเวณเขตพื้นที่ลาดกระบัง ถนนอุทยาน ผลการทดลองเพื่อวัดความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของวิธีการที่นำเสนอ แสดงในตารางที่ ฉ.1- ฉ.2

### I. บริเวณเขตลาดกระบัง

ตารางที่ ฉ.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในภาพบริเวณเขตลาดกระบัง (%)

	Brightness = -90			Brightness = -60			Brightness = -30		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	22.60	70.85	88.04	51.10	76.29	93.97	60.38	78.04	94.68
Detail	14.78	70.23	88.59	36.83	75.20	94.15	41.88	75.46	93.06
Complex	8.14	68.26	86.65	19.42	74.11	91.18	22.79	75.37	92.20
	Brightness = +30			Brightness = +60			Brightness = +90		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	60.85	77.24	94.60	54.14	75.09	94.57	35.10	72.21	90.88
Detail	40.83	75.78	93.72	37.30	73.92	94.01	27.86	71.94	89.50
Complex	23.66	74.59	92.51	20.70	74.63	91.89	16.80	70.34	88.13

## II. บริเวณเขตถนนอุทยาน

ตารางที่ ๓.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเฉลี่ยของแต่ละวิธีการ สำหรับภาพที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในภาพบริเวณเขตถนนอุทยาน (%)

	Brightness = -90			Brightness = -60			Brightness = -30		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	26.42	73.77	90.12	54.08	77.73	96.65	61.92	78.20	95.94
Detail	15.48	73.65	87.69	40.63	78.10	94.77	43.74	77.14	95.86
Complex	8.66	72.64	88.83	22.46	77.97	94.46	25.43	76.25	93.44
	Brightness = +30			Brightness = +60			Brightness = +90		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Simple	62.55	80.12	96.02	55.42	78.33	96.05	38.50	74.59	91.32
Detail	42.23	78.52	95.20	39.70	76.32	94.91	28.26	72.28	91.38
Complex	25.26	78.07	93.13	22.18	74.95	93.75	17.88	73.22	91.39

I. Hough Transform, Phase Correlation and Best First Search [14]

II. Log Polar Grid and Phase Correlation [15]

III. Log Polar Grid, Phase Correlation and Best First Search

ภาคผนวก ฉ.

## ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] Olan Samritjarapon and Orachat Chitsobhuk , “An FFT-Based Technique and Best-first Search for Image Registration”, *International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2008)*, pp. 364-367, 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

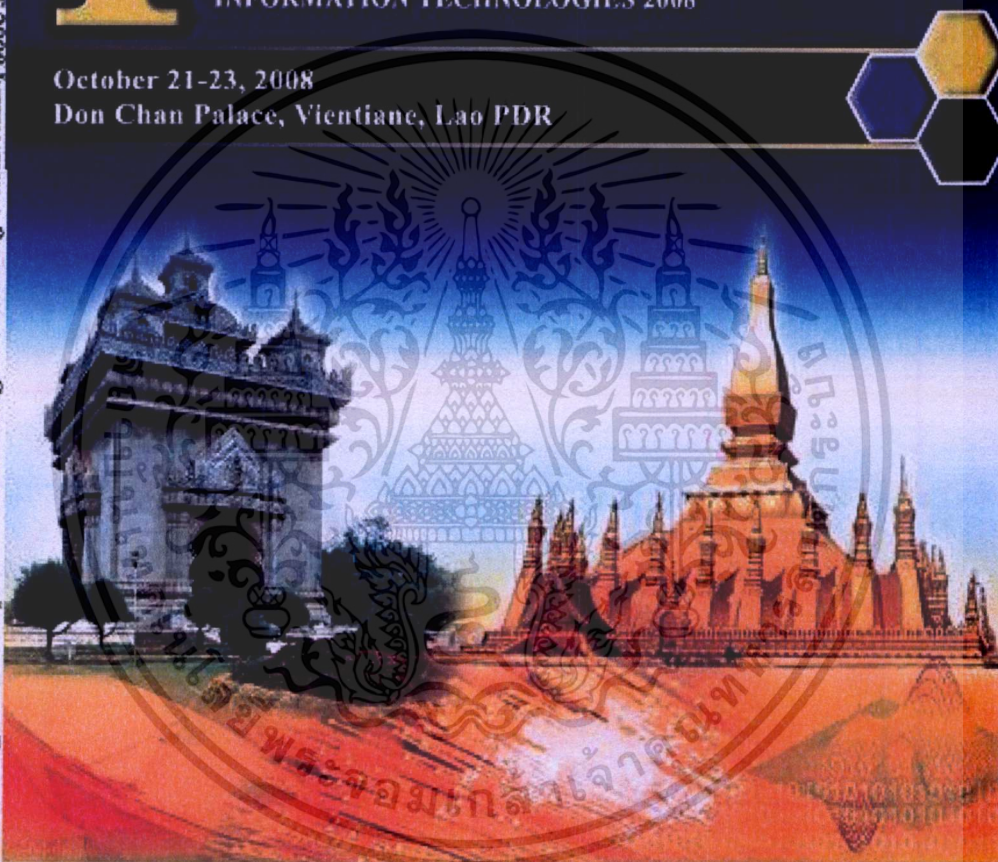


# ISCIT 2008

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMMUNICATIONS AND  
INFORMATION TECHNOLOGIES 2008

October 21-23, 2008  
Don Chan Palace, Vientiane, Lao PDR

ISCIT 2008 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGIES



**PROGRAM AND ABSTRACT BOOK**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# An FFT-Based Technique and Best-first Search for Image Registration

Olan Samritjarapon  
Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang,  
Bangkok, Thailand  
notskill100@hotmail.com

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

**Abstract** – The image registration is a fundamental task in image processing used to match two or more pictures taken, for example, at different time, from different sensors, or from different viewpoints. One of the major challenges related to image registration is the estimation of large motion, when input images contain small overlapped area. Common image registration using the search algorithm can accurately finds large motion but requires high computation cost due to large search space. Fourier-based technique is an alternative approach since it can rapidly achieve the registration results through its FFT algorithm. However, only Fourier-based technique cannot produce the correct results in the case of large translation. Thus, this paper presents a Fourier-based technique cooperated with best-first search algorithm to analyze the correct translation between two input images. The Fourier-based technique is used to estimate the candidate translations to decrease searching space while best-first search algorithm is used to further search for the correct translation. The proposed technique can estimate large translations, scalings, and rotations in images by an extension of well-known phase correlation technique. The experimental results using various image details show the accuracy of the proposed technique to detect large translations compared to the other techniques in frequency domain.

**Keywords** – image registration, phase correlation, best-first search

## 1. INTRODUCTION

Image registration is an important area of computer vision and image processing to overlay two or more images. The process of image registration is to take a pair of images and register them to create a new image with details of all images in the correct position. This problem was analyzed by various features, such as control point, gradient, spatial correlation, mutual information, and discrete Fourier transform coefficients [1].

The Fourier domain technique derives the optimal match according to information in the frequency domain while other techniques search for the corresponding features in spatial domain. Searching in spatial domain involves in a large search space and requires high computational time even though it can guarantee the correct results. Due to the benefit of FFT algorithm, the Fourier domain technique is a competitive approach used to match images that are translated, rotated, and scaled with less amount of registration time. The basic notion

related to the Fourier-based scheme is the shifting properties of the Fourier transform [2], which allows robust estimation of the translations using phase correlation [3]. In order to account for rotation and scaling, the image is transformed into a uniform polar grid or log-polar grid. However, only phase correlation is not sufficient since the registration results usually contain errors in the case of large translations with small overlapped area between the input images.

In this paper, we proposed a FFT-based image registration algorithm cooperated with best-first search algorithm to increase the performance of the image registration process. The Fourier phase correlation technique is used to estimate the candidate translations in order to decrease searching space. The best-first search algorithm is then applied to obtain the best translation of angle and scale from candidate translations obtained from phase correlation [4].

## II. FUNDAMENTAL THEORY

### A. PHASE CORRELATION TECHNIQUE

The phase correlation technique is based on the Fourier Shift Theorem. This method can deal with only translation between two images in x-y axis.

Let  $f_1$  and  $f_2$  be the two images that differ only by a displacement  $(\Delta x, \Delta y)$  i.e.

$$f_2(x, y) = f_1(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (1)$$

Their corresponding Fourier transform  $F_1$  and  $F_2$  will be related by

$$F_2(u, v) = e^{-j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)} * F_1(u, v) \quad (2)$$

and

$$\frac{F_2(u, v)}{F_1(u, v)} = e^{-j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)} \quad (3)$$

Further robustness to intensity differences between the image is achieved using the normalized phase correlation due to  $F_1(u, v)$  can be zero.

$$\frac{F_1(u,v)F_2^*(u,v)}{|F_1(u,v)||F_2^*(u,v)|} = e^{-j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)} \quad (4)$$

by  $F_2^*(u,v)$  is complex conjugate of  $F_2(u,v)$

Thus, the translation parameters  $(\Delta x, \Delta y)$  can be estimated translation in x-y axis, by computing the Inverse FFT of (4)

$$\begin{aligned} \text{Corr}(x,y) &= \mathcal{F}^{-1}\{e^{j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)}\} \\ &= \delta(x + \Delta x, y + \Delta y) \end{aligned} \quad (5)$$

and finding the position of the maximum value of the correlation function  $\text{Corr}(x,y)$

**B. POLAR GRID**

If  $f_2$  is a translation and rotated replica of  $f_1$  with translation  $(\Delta x, \Delta y)$  and rotation  $\theta_0$

$$\begin{aligned} f_2(x,y) &= f_1(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0 + \Delta x, \\ &\quad -x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0 + \Delta y) \end{aligned} \quad (6)$$

According to the Fourier translation and rotation properties, transformation of  $f_1$  and  $f_2$  are related by

$$\begin{aligned} F_2(u,v) &= e^{-j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)} \\ &\quad * F_1(u \cos \theta_0 - v \sin \theta_0, u \sin \theta_0 + v \cos \theta_0) \end{aligned} \quad (7)$$

$$|F_2(u,v)| = |F_1(u \cos \theta_0 - v \sin \theta_0, u \sin \theta_0 + v \cos \theta_0)| \quad (8)$$

This means  $|F_2|$  is also a rotated replica of  $|F_1|$  with rotation  $\theta_0$  and without translation. The rotation can be obtained by representing the  $|F_2|$  and  $|F_1|$  with polar grid as shown in (8) and Fig. 1.

$$|F_2(r,\theta)| = |F_1(r,\theta + \theta_0)| \quad (9)$$

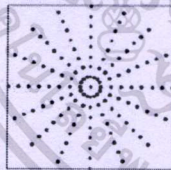


Fig. 1. Polar grid or Polar Coordinate

Then, the angle  $\theta_0$  can be obtained using phase correlation in the direction of  $\theta$ .

**C. LOG POLAR GRID**

If  $f_2$  is a translated, rotated, and scaled replica of  $f_1$  with translation  $(\Delta x, \Delta y)$ , rotation  $\theta_0$ , and scale  $s$ , then

$$\begin{aligned} f_2(x,y) &= f_1(s \cdot x \cdot \cos \theta_0 + s \cdot y \cdot \sin \theta_0 + \Delta x, \\ &\quad -s \cdot x \cdot \sin \theta_0 + s \cdot y \cdot \cos \theta_0 + \Delta y) \end{aligned} \quad (10)$$

The Fourier transform of (10) in polar grid system is

$$F_2(r,\theta) = e^{j(\omega_x x_0 + \omega_y y_0)} * s^{-2} F_1(s^{-1}r, \theta + \theta_0) \quad (11)$$

$$|F_2(r,\theta)| = s^{-2} |F_1(s^{-1}r, \theta + \theta_0)| \quad (12)$$

The rotation and scale can be obtained by representing with log-polar grid as shown in (13) to (15) and Fig. 2.

$$|F_2(\log r, \theta)| = s^{-2} |F_1(\log r - \log s, \theta + \theta_0)| \quad (13)$$

$$|F_2(\xi, \theta)| = s^{-2} |F_1(\xi - c, \theta + \theta_0)| \quad (14)$$

$$|F_2(\xi, \theta)| = |F_1(\xi - c, \theta - \theta_0)| \quad (15)$$

where  $\xi = \log r, c = \log s$

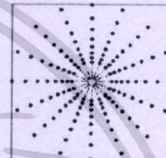


Fig. 2. Log-polar grid or Log-polar Coordinate

Then angle  $\theta_0$  and scale  $s$  can be obtained by using 2D phase correlation in the direction of  $\xi$  and  $\theta$ .

**D. BEST-FIRST SEARCH**

Best-first search is an instance of the general tree-search or graph-search algorithm in which a node is selected for expansion based on a Heuristic function  $h(n)$ . Traditionally, the node with the lowest evaluation is selected for expansion, since the evaluation measures distance to the goal [5].

In this paper, log-polar grid and phase correlation are adopted to estimate rotation and scale between two input images. In any case, if the input images contain noise or large translation, the results of rotation and scale parameters may be errors. Therefore, best-first search algorithm is proposed to further explore the most correct angles used to de-rotate the input image.

The RMSE (root-mean-square-error) is chosen for the heuristic function to determine the node selected for expanding and the position to finish the search. The angles, which give the most value of  $\text{Corr}(x,y)$  values, are chosen as the start nodes of best-first search. The RMSE can be calculated as followed

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_1 - f_2)^2}{n}} \quad (16)$$

where  $f_1$  and  $f_2$  are two input images and  $n$  is the amount of overlapped area of two input images.

The start node is expanded then the selected path (left or right) is decided by the next node, which gives the least value of RMSE. Fig. 3 shows that the selected path is the left one - because the next node in left (node 45) of the start node has RMSE less than the right node and start node. The search is finished when the next node (node 44) has the value of RMSE greater than the current node (node 45). Finally, the current node is the goal of this search.

Although best-first search algorithm does not guarantee that the result is the best solution from all possible candidate angles [5] and [6]. However, it generally gives accurate results while requires less amount of searching time.

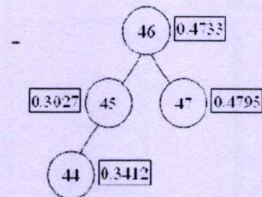


Fig. 3. Example of best-first search

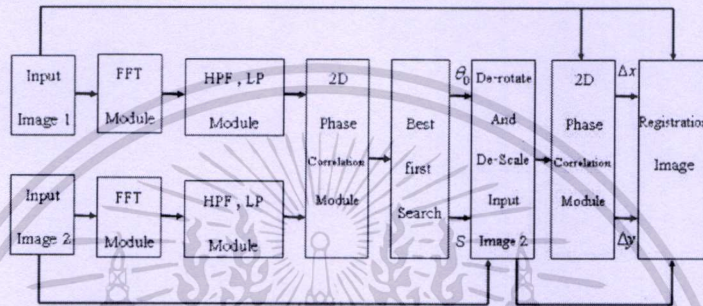


Fig. 4. Block diagram presents the proposed registration algorithm

III. THE PROPOSED REGISTRATION TECHNIQUES

The proposed image registration technique is presented in Fig. 4. The beginning of the process is to transform input images from spatial domain to frequency domain by FFT Module. Then, HPF (High-pass filter) Module is used to filter noise. The input images are mapped to log-polar grid at LP (Log-polar) Module so that phase correlation can be applied to detect an angle and scale as the translation in log-polar grid.

$$|F_2(\log r, \theta)| = s^{-2} |F_1(\log r - \log s, \theta + \theta_0)|$$

$$|F_2(\xi, \theta)| = |F_1(\xi - c, \theta - \theta_0)|$$

where  $\xi = \log r$ ,  $c = \log s$

Each of the best ten angles and scales obtained from the most ten value of phase correlation is expanded according to its associated angles are  $\theta_0$  and  $(\theta_0 + 180)$ . These angles, which gives the most value of  $Corr(x, y)$  is chosen to be the start node of best-first search. The best-first search acquire appropriate angle and use it to de-rotate the input image. The next step is to compute the translation in x-y axis using phase correlation. Finally, the input images are registered using translation parameter and create a new image with details of all images shown Fig. 6.



Fig. 5. Two input images (a) and (b)



Fig. 6. A new image that contains details of two input images

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

This section presents the performance of the proposed registration algorithm for satellite images with various types of image details in the database. Examples of the satellite images from the database are shown in Fig 7.

To show the registration performance of the proposed techniques, 126 combinations of 14 rotation parameters ( 0 , 3 , 32 . 45 , 87 , 90 , 135 , 180 , 187 , 225 , 270 , 315 , 339 and 353 degrees) and 9 scaling parameters ( 0.4 , 0.6 , 0.8 , 1.0 , 1.2 , 1.4 , 1.6 , 1.7 , 1.9 ) are examined.

The efficiency of the proposed algorithm is measured using precision, average error (*error*) and average processing time (*Time*), which can be calculated as followed:

$$\text{precision} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \times 100 \quad (17)$$

where  $X_i$  is equal 1 if the estimated angle is correct but equal 0 when the computed angle is false.  $N$  is the number of experiment images.

$$\text{error} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i - y_i| \quad (18)$$

where  $Y_i$  is correct angle,  $y_i$  is received angle.

$$\text{Time} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (19)$$

where  $T_i$  is the processing time of  $i^{\text{th}}$  image.

Experimental results are shown in Table 1 and Table 2. Both experiments were performed on a 2.33 GHz Intel Core 2 Duo computer for a Matlab implementation. Table 1 presents the efficiency of the proposed algorithm (III) compared to other algorithms in frequency domain; (I) Hough Transform, Phase Correlation and Best-first Search [4], (II) FFT-Based Technique and Phase Correlation [7] in the case of small translation with the overlapped area greater than 50% of the image. Table 2 illustrates the registration performance in the case of large translation with the overlapped area less than 50% of the image. From Table 1 and 2, it can be seen that the proposed registration algorithm using a FFT-based technique cooperated with the best-first search algorithm can significantly help increasing the precision of the registration results especially in the case of large translation with the overlapped area less than 50%. The deviation of the results (average error) obtained from the proposed algorithm is greatly lower than the other techniques.

## V. CONCLUSION

In this paper, an image registration technique using the FFT-based technique cooperated with the best first search algorithm is proposed. The Fourier phase correlation technique is used to estimate the candidate translations while the best-first search algorithm is applied to analyze the candidates and finally determine the best translation of angle and scale parameters. It is proven to efficiently recover large rotations and scaling factors with superior precision and significantly low average error compared to the other techniques. The experimental results demonstrate the robustness, efficiency and accuracy of the proposed algorithm. Since the proposed registration

algorithms at this time consider only the translations at full pixel resolution, the registration performance could further be improved to sub-pixel resolution.

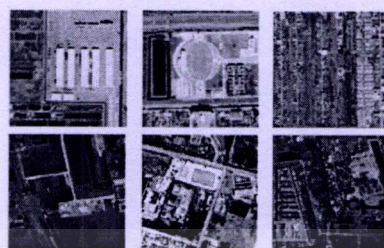


Fig. 7. Examples of satellite images from the database

Table 1  
A comparison of the registration efficiency with small translation

	precision	error	Time
I	56.54	35.98	28.05
II	77.25	0.78	3.42
III	100.00	0.00	9.28

Table 2  
A comparison of the registration efficiency with large translation

	precision	error	Time
I	35.73	72.27	30.24
II	75	66.86	3.66
III	93.75	9.5	9.15

- I. Hough Transform, Phase Correlation and Best-first Search  
 II. FFT-Based Technique and Phase Correlation  
 III. The proposed FFT-based Technique, Phase Correlation and Best-first Search

## REFERENCES

- [1] B. Zitová and J. Flusser, "Image registration methods: A survey," *Image Vision Comput.*, vol. 21, pp. 977-1000, Nov. 2003.
- [2] C. D. Kuglin and D. C. Hines, "The phase correlation image alignment method," in *Proc. IEEE Conf. Cybernetics Society*, Sep. 1975, pp.163-165.
- [3] Q. S. Chen, M. Defrise, and F. Deconinck, "Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transform for image registration and recognition," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 16, no.12, pp. 1156-1168, Dec. 1994.
- [4] Siwaphon Chunhavitayatera 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
- [5] J. Pearl, "Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving", Addison-Wesley, 1984, p. 48.
- [6] S.J. Russell and P. Norvig, "Artificial Intelligence: A Modern Approach", 2nd edition, Pearson Education, Inc, 2003, pp. 94 and 95 (note 3).
- [7] B. S. Reddy and B. N. Chatterji, "An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 5, no. 8, pp. 1266-1271, Aug. 1996.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย โอฟาร สัมฤทธิ์เจียรผล
วัน เดือน ปีเกิด	11 พฤศจิกายน 2527
การศึกษา	ปีการศึกษา 2539-2541 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนศรีวิกรม์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ปีการศึกษา 2542-2544 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนศรีวิกรม์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ปีการศึกษา 2545-2548 ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่จำกัดสิทธิ์อื่น ๆ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้