

การปรับปรุงวิธีลงทะเบียนภาพบนพื้นฐานฟาสต์ฟูเรียร์ด้วยเทคนิค  
แอฟฟายน์ทรานฟอร์ม

IMAGE REGISTRATION IMPROVEMENT BASED-ON FFT  
TECHNIQUES WITH THE AFFINE TRANSFORM

ศัญชัยะ พสมกุศลศิลป์  
SANCHAIYA PASOMKUSOLSIL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2780-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงรีจิสเตอร์ชั้นภาพบนพื้นฐานฟาสต์ฟูเรียร์ด้วยเทคนิค  
แอฟฟายน์ทรานฟอร์ม

IMAGE REGISTRATION IMPROVEMENT BASED - ON FFT  
TECHNIQUES WITH THE AFFINE TRANSFORM



สัชชัยยะ พสมกุลศิลป์

SANCHAIYA PASOMKUSOLSIL

จพ.

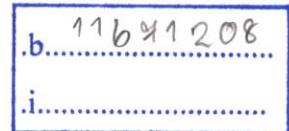
ล 553 ก

2549

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน...67459.....

วัน,เดือน,ปี...15 S.A. 2549



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2780-2

**COPYRIGHT 2006**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงรีจิสเตอร์ชั้นภาพบนพื้นฐานฟาสต์ฟูเรียร์ด้วยเทคนิคแอฟฟายน์ทรานฟอร์ม
นักศึกษา	นายสัญญาชัยะ ผสมภูสกลสีล
รหัสประจำตัว	45061094
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ

### บทคัดย่อ

วิธีการลดความผิดพลาดทางเรขาคณิต (Geometric Distortion) หลากหลายวิธี ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยเฉพาะกับภาพบริเวณหรือวัตถุเดียวกันแต่ต่างภาพกัน ในวิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีการแก้ไขความผิดพลาดทางเรขาคณิตวิธีใหม่ซึ่งมีขั้นตอนต่าง ๆ สามารถสรุป ได้ดังนี้ ขั้นตอนแรกเริ่มจากการในภาพอ้างอิงและภาพที่ต้องการปรับแก้ความผิดพลาดทางเรขาคณิต มาทำการแปลงฟูเรียร์ แบบ 2 มิติ (2-dimension Fourier transforms) จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์แบบ affine transform ระหว่างภาพสองภาพบนโดเมนความถี่ที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์ข้างต้น ด้วยเทคนิคการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนบนแบบจำลองจากข้อมูลทางความถี่ จากนั้นจึงทำการ registration ด้วยการประยุกต์เทคนิค FFT (Fast Fourier transform) บนผลของการ cross correlation เพื่อทำการหาระยะที่เลื่อน ไปของภาพทั้งสอง ในขั้นตอนนี้ผลของ cross correlation อาจจะถูกวางและไม่เด่นชัดนัก การประยุกต์ใช้ขบวนการ cross correlation แบบพิเศษสามารถช่วยลดผลดังกล่าวได้ และทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยวิธีการทำ registration จะกล่าวโดยละเอียดต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์, รศ.ดร.ฟูศักดิ์ ชิวสุวิทย์ และอาจารย์สมปอง วิเศษพานิชกิจ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสามท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สัตย์ชัยยะ ผสมกุลศิลป์

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การรีจิสเตรชันภาพแบบละเอียด (Fine image registration).....	57
4.2.1 คุณสมบัติและการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน.....	58
4.2.2 การวัดค่าสหสัมพันธ์ (Correlation).....	59
4.2.3 การปรับปรุงวิธีการวัดค่า Cross correlation.....	60
4.2.4 การถ่ายโอนเชิงระนาบ.....	62
4.2.5 Resampling และ Gray-Level Interpolation.....	64
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	68
5.1 การรีจิสเตรชันภาพอย่างหยาบ (Coarse image registration).....	68
5.2 การรีจิสเตรชันภาพอย่างละเอียด (Fine image registration) .....	72
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	77
บรรณานุกรม.....	79
ภาคผนวก.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	87

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า.....	7
2.2 ความยาวคลื่นที่ใช้ในอุปกรณ์วัดหลักๆ.....	15
2.3 คำจำกัดความของคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดเชิงแสง.....	16
2.4 คุณลักษณะของตัวตรวจวัดเชิงแสง.....	19
2.5 ประเภทของยานสำรวจและวัตถุที่สังเกต.....	22
2.6 แบบชนิดเครื่องมือตรวจวัดการทรงตัว.....	24
2.7 ค่าการแผ่รังสีต่ำสุดและสูงสุดของดาวเทียม LANDSAT ระบบ TM .....	31
2.8 ค่าการแผ่รังสีต่ำสุดและสูงสุดของดาวเทียม LANDSAT ระบบ MSS.....	31
3.1 สาเหตุของความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตและชนิดของความเพี้ยน .....	40
3.2 การแปลงพิกัด.....	46

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงจุดตรงที่ตรงกันระหว่างภาพทั้งสอง.....	63
4.6 เปรียบเทียบเมตริกซ์ทั้งก่อนและหลังการปรับแก้ความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต.....	65
4.7 การชักตัวอย่างข้อมูลภาพจากพิกัดโกลล์เคียง.....	66
4.8 Gray level interpolation บนพื้นฐานของหลักการพิกัดโกลล์เคียง.....	67
5.1 ภาพถ่ายดาวเทียม Spot รับสัญญาณวันที่ 24 พฤศจิกายน ค.ศ.1998 (ภาพอ้างอิง).....	69
5.2 ภาพถ่ายดาวเทียม Spot รับสัญญาณวันที่ 16 พฤศจิกายน ค.ศ.1998 (ภาพที่ต้องการปรับแก้).....	69
5.3 ภาพอ้างอิง (รูปที่ 5.1) ในพิกัด polar.....	70
5.4 ภาพที่ต้องการปรับแก้ (รูปที่ 5.2) ในพิกัด polar.....	70
5.5 ภาพที่ได้รับการปรับแก้เรียบร้อยแล้ว .....	71
5.6 ภาพที่ใช้ในการค้นหา (Search image) หรือภาพจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP).....	72
5.7 ผลการรีจิสเตรชันด้วยวิธี phase correlation ระหว่าง รูปที่ 5.1 และ 5.2.....	73
5.8 ผลการรีจิสเตรชันด้วยวิธี phase correlation บริเวณจุดควบคุมภาคพื้นดิน.....	73
5.9 ผลการรีจิสเตรชันด้วยวิธี normalized cross correlation ระหว่าง รูปที่ 5.1 และ 5.2.....	74
5.10 ผลการรีจิสเตรชันด้วยวิธี normalized cross correlation บริเวณจุดควบคุม ภาคพื้นดิน.....	74
5.11 ผลการรีจิสเตรชันแบบละเอียด (phase correlation) ระหว่างรูป 5.1 และ 5.5.....	75
5.12 ผลการรีจิสเตรชันแบบละเอียด (phase correlation) บริเวณจุดควบคุมภาคพื้นดิน.....	75
5.13 ผลการปรับแก้ไขความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต.....	76

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบประมวลผลภาพ การรีจิสเตอร์ชั้นภาพ (Image registration) เป็นขั้นตอนพื้นฐานที่สำคัญและเป็นองค์ประกอบของเครื่องมือสำหรับระบบวิเคราะห์ภาพ โดยจะทำการวางซ้อนภาพ (over lay) ภาพตั้งแต่ 2 ภาพขึ้นไปเพื่อหาความสัมพันธ์ เช่นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ (motion analysis) การเหนี่ยวนำภาพเพื่อความชัดเจน (image enhancement) และ image restoration นอกจากนี้ Image registration ยังเป็นขั้นตอนต้น ๆ ที่สำคัญสำหรับการทำงานทางด้านการตรวจวัดระยะไกลเช่นงานด้านการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางอากาศ และ ภาพถ่ายดาวเทียม โดยถูกนำมาใช้ในการปรับแก้ไขความผิดพลาดทางเรขาคณิต (geometric distortion) อันเกิดจากหลายสาเหตุซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นความผิดพลาดเชิงระบบ (systematic distortion) และ ความผิดพลาดแบบสุ่มที่ไม่ได้เกิดขึ้นจากระบบ (non-systematic distortion) ซึ่งต่างต้องมีการปรับแก้ไขความผิดพลาดเชิงเรขาคณิตก่อนการนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อความถูกต้องของข้อมูล

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิธีปรับแก้ความผิดพลาดทางเรขาคณิตแบบละเอียดเที่ยงตรง (high precision geometric correction) มักกระทำโดยการนำภาพที่ต้องการปรับแก้ไขความผิดพลาดทางเรขาคณิตมาทำการกำหนดจุดอ้างอิงบนภาพอ้างอิงเช่น แผนที่ หรือ ภาพถ่ายที่มีการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องทางภาคพื้นดินเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นความถูกต้องแม่นยำของการปรับแก้ไขความผิดพลาด จึงขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการหาจุดที่สอดคล้องกันบนภาพที่ต้องการปรับแก้กับ จุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP: Ground Control Point) หรือจุดอ้างอิงบนภาพอ้างอิง ซึ่งเริ่มต้นตั้งแต่การเลือกจุดควบคุมภาคพื้นดินที่เหมาะสม โดยปรากฏเด่นชัดทั้งบนภาพอ้างอิงและภาพที่ต้องการปรับแก้ นอกจากนี้จุดอ้างอิงภาคพื้นดินที่เลือกนี้ยังควรมีคุณสมบัติที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (time invariant) และที่สำคัญคือต้องกระจายครอบคลุมตลอดทั้งภาพที่ต้องการปรับแก้ไข ซึ่งกระบวนการนี้มักต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญและประสบการณ์ในการพิจารณาจุดควบคุมภาคพื้นดิน (จุดอ้างอิง) การกำหนดจุดสอดคล้องบนภาพต้องการปรับแก้และจุดควบคุมภาคพื้นดินนั้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อปรับปรุงและพัฒนาวิธีปรับแก้ความผิดพลาดทางเรขาคณิตของภาพ ให้มีประสิทธิภาพ ซึ่งจะสามารถช่วยเสริมในการนำข้อมูลไปใช้มีความถูกต้องละเอียดชัดเจนมากขึ้น

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดข้างต้นแล้ว วิธีการต่างๆ ได้ถูกปรับปรุงและพัฒนาขึ้น เช่นวิธีการรีจิสเตรชันภาพโดยวิธีการแบ่งส่วนภาพ (segmentation based registration) หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นแบบการรีจิสเตรชันแบบภาพสู่ภาพ (image to image registration) โดยวิธีการคือการนำภาพบางบริเวณที่ครอบคลุมบางบริเวณที่มีคุณลักษณะตรงกับจุดควบคุมภาพพื้นดินบนภาพอ้างอิง นำไปหาจุดที่สัมพันธ์กันบนภาพที่ต้องการปรับแก้ ซึ่งมีหลากหลายวิธีในการประมวลผลภาพสำหรับขั้นตอนนี้ วิธีหนึ่งคือ Cross-correlation ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแต่ก็มีข้อจำกัดคือ ภาพทั้งสองต้องมีรายละเอียดของภาพเหมือนกัน และจะแย่งอย่างมากเมื่อภาพทั้งสองมีความแตกต่างกันเช่น สเตลของภาพ การหมุนไปของภาพ และการผิดไปของรายละเอียดภาพ อันเนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา การรบกวนจากสัญญาณรบกวน และการผิดพลาดของตัวตรวจจับของระบบเอง ดังนั้นก่อนที่จะนำภาพทั้งสองมาทำการ cross-correlation จึงต้องทำการปรับแก้เบื้องต้นเสียก่อน

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์จึงได้ทำการแบ่งขั้นตอนการทำการรีจิสเตรชันภาพออกเป็นสอง ขั้นตอนย่อย ๆ เพื่อประสิทธิภาพในการจัดการการประมวลผลภาพ คือ การรีจิสเตรชันภาพแบบหยาบ (coarse image registration) และ การรีจิสเตรชันภาพแบบละเอียด (fine image registration)

การรีจิสเตรชันภาพแบบหยาบจะถูกกระทำก่อน เพื่อหาความสัมพันธ์ของภาพทั้งภาพระหว่างภาพที่ต้องการปรับแก้และภาพอ้างอิง โดยกำหนดให้ความผิดพลาดเชิงเรขาคณิตมีรูปแบบ Affine transform ดังนั้นขั้นตอนนี้จะทำการหาแบบจำลองการแปลงภาพในลักษณะ Affine transform

การรีจิสเตรชันภาพแบบละเอียด จะถูกกระทำเมื่อการรีจิสเตรชันภาพแบบหยาบเสร็จสิ้นลงโดยภาพทั้งภาพโดยรวมระหว่างภาพที่ต้องการปรับแก้และภาพอ้างอิงจะถูกปรับแก้เบื้องต้นให้มีค่าการปรับลดขนาดและมุมของภาพตรงกัน จากนั้นการรีจิสเตรชันภาพแบบละเอียดจึงเริ่มขึ้น โดยการกำหนดส่วนของภาพที่ครอบคลุมบริเวณที่มีคุณสมบัติเดียวกันกับจุดควบคุมภาพ (Ground Control Point) คือมีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ปรากฏเด่นชัดบนภาพทั้งสอง และมีการกระจายไปทั่วบริเวณภาพทั้งหมด เมื่อได้ภาพย่อยที่มีลักษณะดังกล่าวแล้ว จึงทำการรีจิสเตรชันภาพย่อยนี้บนภาพที่ต้องการปรับแก้ ตำแหน่งที่ได้จากการรีจิสเตรชันภาพส่วนย่อยนี้จะถูกนำไปหาความสัมพันธ์ของการแปลงภาพเพื่อทำการปรับแก้ทางเรขาคณิต

### 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

วิธีการปรับปรุงรีจิสเตรชันภาพบนพื้นฐานฟาสต์ฟูเรียร์ด้วยเทคนิคแอฟฟายน์ทรานฟอร์มเมื่อเปรียบเทียบกับหลักการในแบบต่างๆ ไปแล้ว จะมีข้อดีคือค่าการปรับลดขนาด (scaling factor) และมุมที่หมุนไป (rotation angle) จะไม่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการกระทำบนข้อมูลเชิงความถี่อื่น

ได้จากการแปลงแบบฟูเรียร์ (Fast Fourier transform) ซึ่งค่าการปรับลดขนาดและมุมที่หมุนไปจะถูกหาด้วยกระบวนการ phase-correlation และการแปลงพิกัดภาพเป็นแบบ log-polar กระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้จะกล่าวโดยละเอียดต่อไป

## 1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงรีจิสเตรชันภาพและทดสอบกระบวนการวิธีแก้ไขความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต (Geometric distortion) โดยแบ่งเป็นสองส่วนคือ การปรับแก้ไขความผิดพลาดเชิงเรขาคณิตแบบหยาบ จากนั้นจึงทำการรีจิสเตรชันบนบริเวณจุดควบคุมภาคพื้นดินในขั้นตอนการปรับแก้แบบละเอียดตามที่ได้กล่าวไว้แล้ว ทั้งนี้เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและความถูกต้องแม่นยำในการแก้ไขภาพด้วยกระบวนการวิธีที่นำเสนอ ขั้นตอนทั้งหมดจะถูกโปรแกรมด้วย MATLAB โดยจะแสดงผลการทดสอบจริงกับภาพถ่ายทางดาวเทียมระหว่างภาพอ้างอิงซึ่งเป็นภาพที่ได้รับการปรับแก้ไขแล้ว และภาพภายใต้การทดสอบซึ่งต้องการปรับแก้ไขให้ถูกต้อง

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

- วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ
- บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา
  - บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการสำรวจระยะไกล
  - บทที่ 3 กล่าวถึงความผิดพลาดบนภาพสัญญาณดาวเทียม ซึ่งมีทั้งความเพี้ยนเชิงคลื่น (Radiometric Distortion) และความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตรวมทั้งการรีจิสเตรชันภาพ
  - บทที่ 4 กล่าวถึงการปรับแก้ความผิดพลาดเชิงเรขาคณิตบนภาพสัญญาณดาวเทียม โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ การรีจิสเตรชันภาพแบบหยาบ (coarse image registration) และการรีจิสเตรชันภาพแบบละเอียด (fine image registration)
  - บทที่ 5 เป็นผลการทดลองของการรีจิสเตรชันภาพแบบหยาบ และการรีจิสเตรชันภาพแบบละเอียด
  - บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# พื้นฐานของการสำรวจระยะไกล

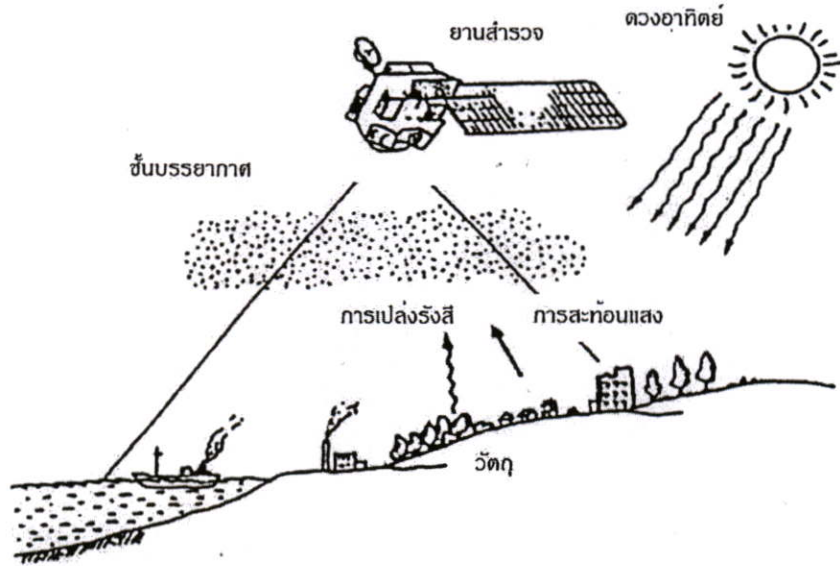
รีโมตเซนซิงเป็นวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแขนงหนึ่ง ที่ใช้ในการบ่งบอก จำแนก หรือวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุต่างๆ โดยปราศจากการสัมผัสโดยตรง แต่จะอาศัยพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อน หรือแผ่ออกมาจากวัตถุ เป็นต้นกำเนิดของข้อมูลที่สำรวจจากระยะไกล อย่างไรก็ตาม วัตถุกลางอื่นๆ เช่น ความโน้มถ่วง หรือ สนามแม่เหล็ก ก็อาจนำมาใช้ในการสำรวจระยะไกลได้เช่นกัน เครื่องมือที่ใช้วัดค่าพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสะท้อน หรือแผ่ออกจากวัตถุ เรียกว่า อุปกรณ์ตรวจจับจากระยะไกล (Remote sensor) หรืออุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) ตัวอย่างเช่นกล้องถ่ายภาพ หรือ เครื่องกวาดภาพ (Scanner) สามารถหาคุณลักษณะของวัตถุได้จากลักษณะการสะท้อนหรือการแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากวัตถุนั้นๆ กล่าวคือ “วัตถุแต่ละชนิดจะมีลักษณะการสะท้อนแสงหรือการแผ่รังสีที่เฉพาะตัวและแตกต่างกัน ถ้าวัตถุหรือสภาพแวดล้อมเป็นคนละประเภทกัน” การสำรวจระยะไกลจึงเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการจำแนก วิเคราะห์คุณลักษณะ และเข้าใจวัตถุหรือสภาพแวดล้อมต่างๆ จากลักษณะเฉพาะตัวในการสะท้อนแสงหรือแผ่รังสี

### 2.1 ความหมายของรีโมตเซนซิง (Remote Sensing)

โดยคำจำกัดความ รีโมตเซนซิง (Remote sensing) หมายถึงการสำรวจจากระยะไกลที่ปราศจากการสัมผัสโดยตรงระหว่างอุปกรณ์สำรวจและเป้าหมายที่ต้องการสำรวจ แท้จริงแล้วรูปแบบของรีโมตเซนซิงในทางธรรมชาติมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ เช่น การได้ยิน การได้กลิ่น และการมองเห็น การมองเห็นด้วยตาของมนุษย์มีลักษณะเทียบเคียงกับรีโมตเซนซิงที่ได้จากการประดิษฐ์มากที่สุด โดยที่มีร่างกายเปรียบเสมือนฐานของเครื่องสำรวจ และมีดวงตาเป็นอุปกรณ์สำรวจที่มีความสามารถในการมองเห็นสิ่งต่างๆจากการตกกระทบของแสงที่วัตถุแล้วสะท้อนเข้าสู่ตา ซึ่งมีความไวต่อทั้งระดับความเข้มและความถี่ของคลื่นแสง ทำให้สามารถแยกแยะระดับความมืด หรือ ความสว่าง ตลอดจนสีต่างๆได้

การสำรวจระยะไกลโดยทั่วไปสามารถแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 2.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการสำรวจจากระยะไกลเหล่านี้จะผ่านกระบวนการอัตโนมัติด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ และการแปลด้วยสายตา จากนั้นจึงนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการศึกษา การใช้ที่ดิน ป่าไม้ ธรณีวิทยา สภาพแวดล้อม เป็นต้น จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับรีโมตเซนซิงทั้งส่วนที่เป็นธรรมชาติและส่วนที่ได้จากการประดิษฐ์ขึ้น นั่นก็คือ คลื่นแสง ทำหน้าที่เสมือนสื่อกลางระหว่างอุปกรณ์สำรวจและเป้าหมาย คลื่นแสงเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอยู่แล้วทางธรรมชาติ เช่นพลังงานที่ได้จากดวงอาทิตย์หรือที่แผ่ออกจากพื้นผิวโลก ขณะเดียวกันสามารถที่จะสร้างพลังงานนี้ได้ เพื่อช่วย

ในการสำรวจในกรณีที่พลังงานธรรมชาติไม่เอื้ออำนวยหรือยังมีจุดบอดเช่น ไม่สามารถผ่านก้อนเมฆที่บังเป้าหมายได้



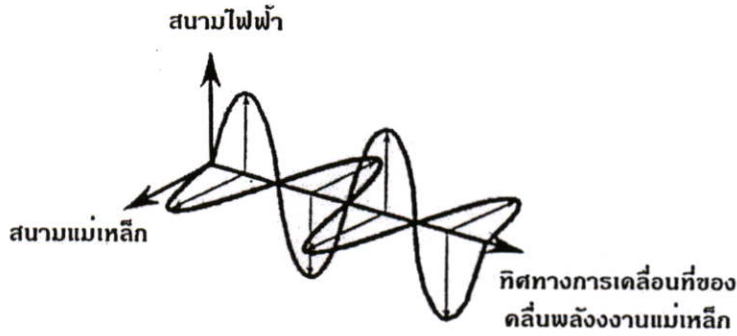
รูปที่ 2.1 ลักษณะการเก็บข้อมูลโดยการสำรวจระยะไกล

## 2.2 คุณลักษณะของการแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า

การแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (electro-magnetic radiation) เป็นการนำพาพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการส่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอวกาศหรือสารอื่น ๆ การส่งผ่าน (transmission) พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้างดงกล่าวเป็นไปตามสมการแมกซ์เวล (Maxwell equation) การแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีคุณลักษณะที่เป็นทั้งการเคลื่อนที่ในลักษณะคลื่น และในอนุภาค ดังนั้น พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งในหลายๆรูปแบบของพลังงาน เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานเคมี และพลังงานกล พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดไปยังเป้าหมายต่างๆ ได้โดยการแผ่รังสี การอธิบายปรากฏการณ์ที่ค่อนข้างจะซับซ้อนสามารถกระทำได้โดยอาศัยทฤษฎี 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีคลื่น และทฤษฎีอนุภาค

### 2.2.1 คุณลักษณะการเคลื่อนที่แบบคลื่น

พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า ทิศทางของสนามแม่เหล็ก ทิศทางของสนามไฟฟ้า และทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าตามทฤษฎีคลื่น

การเคลื่อนที่ของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นไปในลักษณะของคลื่น จึงสามารถที่จะกำหนดความแตกต่างของพลังงานได้ สืบเนื่องจากความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) คือ ระยะจากยอดคลื่นหนึ่งถึงอีกยอดคลื่นหนึ่ง และความถี่ ( $f$ ) ซึ่งก็คือจำนวนยอดคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านจุดๆหนึ่งต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น ความถี่ และความเร็วแสง ( $c$ ) ดังสมการที่ (2.1)

$$c = \lambda f \quad (2.1)$$

โดยที่  $c$  คือ ค่าคงที่ของความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า  $3 \times 10^8$  เมตร / วินาทีในสุญญากาศ

ย่านความยาวคลื่นของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ รังสีแกมมา (Gamma) รังสีเอ็กซ์ (X-Ray) รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-Ultraviolet) แสงที่ตามองเห็น (Vision light) รังสีอินฟราเรด (IR-Infrared) จนถึงคลื่นวิทยุ (Radio wave) โดยเรียงลำดับจากความยาวคลื่นสั้นไปจนถึงความยาวคลื่นยาวตามลำดับ ดังในตาราง 2.1 แสดงชื่อ และย่านความถี่ต่างๆ ของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า มีสิ่งที่น่าสังเกตคือ การแยกประเภทของรังสีอินฟราเรด และคลื่นวิทยุอาจจะแตกต่างกันไปขึ้นกับสาขาวิชาการนั้นๆ ตามที่แสดงในตารางเป็นตัวอย่างที่ใช้กันทั่วไป

ย่านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการสำรวจจากระยะไกล ได้แก่ คลื่นอัลตราไวโอเล็ตใกล้ (ความยาวคลื่น 0.3-0.4 ไมโครเมตร) คลื่นที่ตามองเห็น (ความยาวคลื่น 0.4-0.7 ไมโครเมตร) ประกอบไปด้วยแถบสีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง คลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near infrared) อินฟราเรดคลื่นสั้น (Short wave infrared) อินฟราเรดความร้อน (Thermal infrared) (ความยาวคลื่น 0.7-14 ไมโครเมตร) และช่วงคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) (ความยาวคลื่น 1 มิลลิเมตร – 1 เมตร) ซึ่งย่านแสงในช่วงอินฟราเรดใกล้ และอินฟราเรดคลื่นสั้นนั้น ในบางครั้งจะเรียกว่าอินฟราเรดช่วงสะท้อน (ความยาวคลื่น 0.7 – 3 ไมโครเมตร) เพราะเป็นย่านที่ได้รับอิทธิพลจากการสะท้อนของพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าที่จะเกิดจากการแผ่รังสีจากพื้นโลก ในย่านอินฟราเรดความร้อน

พลังงานส่วนใหญ่จะได้อาจจากการแผ่รังสีของพื้นผิว โดยที่ได้รับอิทธิพลจากการสะท้อนของพลังงาน แสงอาทิตย์น้อยมาก

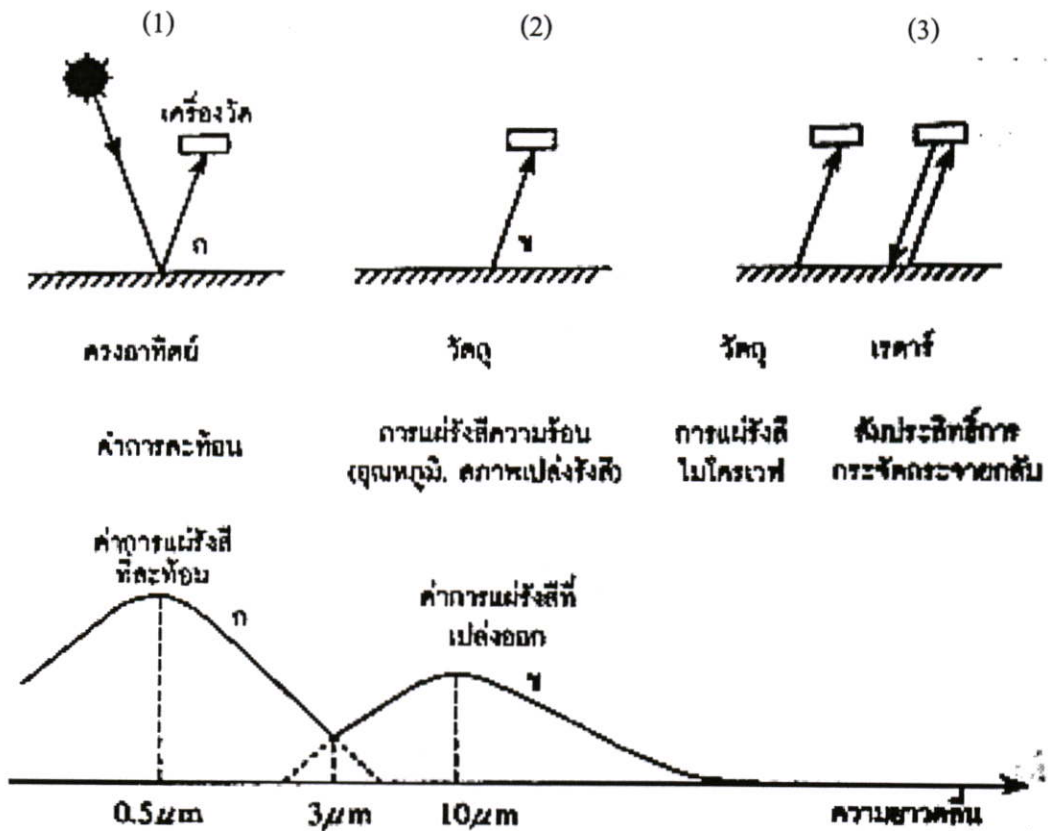
ตารางที่ 2.1 การจำแนกพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า

ประเภท		ความยาวคลื่น	ความถี่
อัลตราไวโอเล็ต		100Å ~ 0.4 μm	750 ~ 3000 THz
แสงที่ตามองเห็น		0.4 ~ 0.7 μm	430 ~ 750 THz
อินฟราเรด	อินฟราเรดใกล้	0.7 ~ 1.3 μm	230 ~ 730 THz
	อินฟราเรดคลื่นสั้น	1.3 ~ 3 μm	100 ~ 230 THz
	อินฟราเรดคลื่นกลาง	3 ~ 8 μm	38 ~ 100 THz
	อินฟราเรดความร้อน	8 ~ 14 μm	22 ~ 38 THz
	อินฟราเรดไกล	14 m ~ 1 mm	0.3 ~ 22 THz
คลื่นวิทยุ	มิลลิเมตรย่อย		0.1 ~ 1 mm 0.3 ~ 3 THz
	ไมโครเวฟ	มิลลิเมตร (EHF)	1 ~ 10 mm 30 ~ 300 GHz
		เซนติเมตร (SHF)	1 ~ 10 cm 3 ~ 30 GHz
		เดซิเมตร (UHF)	0.1 ~ 1 mm 0.3 ~ 3 GHz
	คลื่นสั้นมาก (VHF)	1 ~ 10 m 30 ~ 300 MHz	
	คลื่นสั้น (HF)	10 ~ 100 m 3 ~ 30 MHz	
	คลื่นกลาง (MF)	0.1 ~ 1 km 0.3 ~ 3 MHz	
	คลื่นยาว (LF)	1 ~ 10 km 30 ~ 300 MHz	
	คลื่นยาวมาก (VLF)	10 ~ 100 km 3 ~ 30 MHz	

ในขณะที่ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่มีการแผ่พลังงานไฟฟ้าสูงสุด นั่นคือมีค่า ความยาวคลื่น 0.5 ไมโครเมตร ซึ่งจะเป็นแหล่งพลังงานสำหรับการสำรวจระยะไกลย่านความถี่ที่ตามองเห็น และย่านอินฟราเรดสะท้อน โดยข้อมูลที่ได้จากการสำรวจระยะไกลในย่านแสงที่ตามองเห็น และอินฟราเรดสะท้อน ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับค่าการสะท้อน (Reflectance) ของวัตถุต่างๆ บนผิวโลก โดยที่แหล่งกำเนิดพลังงานที่ใช้ในการสำรวจระยะไกลย่านอินฟราเรดจะได้จากตัววัตถุเอง เนื่องจากวัตถุใดๆ ก็ตามที่มีอุณหภูมิในระดับปกติ จะมีความสามารถในการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 10 ไมโครเมตร การสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟ สามารถแยกได้เป็น 2 ประเภท คือ การสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟแบบพาสซีฟ (Passive) และการสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟแบบแอคทีฟ (Active) ในการสำรวจระยะไกลผ่านไมโครเวฟแบบพาสซีฟจะสามารถวัดค่าการแผ่รังสีไมโครเวฟ (Microwave radiation) ได้จากวัตถุ ในขณะที่การสำรวจระยะไกลแบบแอคทีฟจะสามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายกลับ (Back scattering coefficient) ได้

ในรูปที่ 2.3 แสดงการจำแนกการสำรวจระยะไกลออกได้เป็น 3 ประเภท ตามย่านความยาวคลื่นดังนี้

- (1) การสำรวจระยะไกลย่านแสงที่ตามองเห็นและอินฟราเรดสะท้อน (Visible and Reflective Infrared Remote Sensing)
- (2) การสำรวจระยะไกลย่านอินฟราเรดความร้อน (Thermal Infrared Remote Sensing)
- (3) การสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟ (Microwave Remote Sensing)



รูปที่ 2.3 ประเภทของการสำรวจระยะไกลที่สัมพันธ์กับย่านความยาวคลื่นทั้ง 3 ประเภท

### 2.2.2 คุณลักษณะการเคลื่อนที่เชิงอนุภาค

อธิบายถึงพฤติกรรมของคลื่นแสงที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิด ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคย่อยที่เรียกว่า ควอนตัมหรือโฟตอน อนุภาคย่อยเหล่านี้มีคุณสมบัติเหมือนอนุภาคอื่นๆ ที่ประกอบด้วยพลังงานและโมเมนตัม แต่ต่างกันตรงที่โฟตอนมีมวลเป็นศูนย์เมื่ออยู่นิ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของโฟตอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับความถี่ดังสมการที่ (2.2)

$$E = hf \quad (2.2)$$

กำหนดให้

$E$  คือพลังงานของโฟตอน; eV

$h$  คือค่าคงที่ Planck;  $6.626 \times 10^{-34}$  J.s

$f$  คือความถี่คลื่น; Hz

แทนค่า  $f$  ด้วย  $\frac{c}{\lambda}$  ในสมการที่ (2.2) จะได้

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3)$$

นั่นคือ พลังงานของโฟตอนเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวคลื่น หรือ แปรตรงกับความถี่คลื่น หมายความว่า ยิ่งคลื่นแสงมีความยาวคลื่นมาก พลังงานโฟตอนจะมีค่าน้อย และในทางกลับกัน หากคลื่นแสงมีความถี่สูงระดับพลังงานก็จะสูงตาม ความสัมพันธ์เหล่านี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญของพฤติกรรมของพลังงานและแม่เหล็กไฟฟ้า

## 2.3 การสะท้อนแสงของผิวโลกและค่าการสะท้อน

ปฏิกริยาระหว่างพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าและพื้นผิวโลกเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการสำรวจระยะไกล เพราะเป็นค่าที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์สำรวจในลักษณะของพลังงาน ซึ่งจะสะท้อนจากพื้นผิวโลกในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นกับคุณสมบัติของแต่ละพื้นผิวในการสะท้อนแสงหรือการแผ่รังสีความร้อน ในขณะที่ค่าการสะท้อน ตามคำจำกัดความ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ที่ตกกระทบบนพื้นผิใด ๆ กับฟลักซ์ที่สะท้อนจากพื้นผิวนั้น ค่าการสะท้อนจะอยู่ระหว่าง 0 และ 1 แต่เดิมค่าการสะท้อน ได้รับการกำหนดให้เป็นอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์แสงสีขาวที่ตกกระทบกับ ฟลักซ์ที่สะท้อนในทิศทางคลุ่มซีกโลก อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าการสะท้อน เรียกว่า เครื่องวัดสเปกตรัม (spectrometer) ดังนั้นการศึกษางานรีโมทเซนซิง จึงต้องเข้าใจปรากฏการณ์ดังกล่าวเพื่อประโยชน์ในการแปลความหมายจากภาพ

### 2.3.1 การสะท้อนกลับ

เป็นปรากฏการณ์เมื่อแสงตกกระทบพื้นผิวโลกแล้วสะท้อนกลับ ปริมาณแสงที่สะท้อนจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิว เป็นลักษณะราบเรียบ หรือขรุขระ มุมตกกระทบของแสง ความสามารถหรืออัตราการสะท้อนแสงของพื้นผิวโลก และโพลาไรเซชันของแสงที่ตกกระทบ การสะท้อนกลับเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะ คือ

1. การสะท้อนกลับหมดในทิศทางตรงข้าม เกิดในกรณีที่พื้นผิวมีลักษณะราบเรียบ โดยที่มุมของความขรุขระที่ผิวมีค่าน้อยกว่า 1 ใน 10 ของความยาวคลื่น โดยแสงที่ตกกระทบทั้งหมดจะสะท้อนกลับในทิศทางที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ มักจะเกิดกับแสงที่มีความยาว

คลื่นค่อนข้างยาว การสะท้อนในลักษณะนี้ นอกจากจะไม่เกิดประโยชน์ต่อการสำรวจระยะไกลแล้ว ยังบดบังสภาพพื้นผิวที่แท้จริงที่ปรากฏบนภาพด้วย ลักษณะนี้เรียกว่า “ประกายแดด” โดยที่ปรากฏการณ์เช่นนี้มักเกิดขึ้นกับบริเวณผิวน้ำ ดินบางประเภท และหินที่โผล่เหมือนผิวดิน

2. การสะท้อนแบบกระจาย เป็นการสะท้อนจากพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระ แต่อยู่ในลักษณะที่สม่ำเสมอและเกิดในแสงที่ตามองเห็นเป็นส่วนใหญ่

3. การสะท้อนกลับแบบผสม เป็นลักษณะที่มีชกเกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติ โดยรวมเอาลักษณะการสะท้อนกลับหมด และการสะท้อนแบบกระจายเข้าไว้ด้วยกัน รูปที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบการสะท้อนแสงทั้ง 3 ลักษณะ



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบปรากฏการณ์การสะท้อนแสงในลักษณะการสะท้อนกลับหมด การสะท้อนแบบกระจาย และการสะท้อนแบบผสม

ค่าการสะท้อนตามความยาวคลื่นเรียกว่า ค่าการสะท้อนเชิงคลื่น (Spectral reflectance) สมมติฐานของการสำรวจระยะไกลมีว่า “ค่าการสะท้อนเชิงคลื่นจะมีลักษณะเฉพาะตัว และแตกต่างกันเมื่อสะท้อนจากวัตถุหนึ่งไปยังวัตถุหนึ่ง” ค่าการสะท้อนของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสงที่มีทิศทางตกกระทบและสะท้อนที่แน่นอนจะเรียกว่า ค่าการสะท้อนเชิงทิศทาง (Directional reflectance) ทิศทางของแสงที่ตกกระทบและที่สะท้อนนี้อาจเป็นแบบเชิงทิศทาง แบบรูปกรวย หรือแบบคลุมซีกโลก จึงมีลักษณะผสมผสานกันไปได้ถึง 9 แบบ ค่าการสะท้อนเชิงคลื่นของสิ่งปกคลุมดินที่แตกต่างกันออกไป ทำให้สามารถจำแนกประเภทของสิ่งปกคลุมดิน โดยวิธีการสำรวจจากระยะไกลได้ด้วยสังเกต ค่าการสะท้อนเชิงคลื่นหรือค่าการแผ่รังสีเชิงคลื่นจากพื้นผิวนั้นๆ

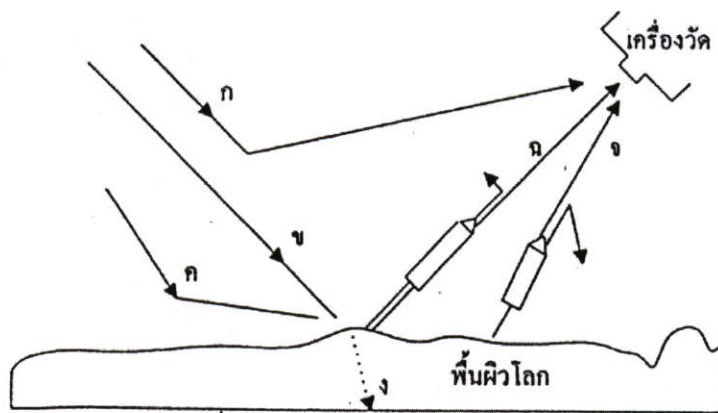
### 2.3.2 การดูดกลืน

ปรากฏการณ์นี้เป็นเช่นเดียวกับการดูดกลืนในชั้นบรรยากาศ เมื่อพลังงานตกกระทบพื้นผิวโลก บางส่วนจะสะท้อนกลับ ในขณะที่บางส่วนจะถูกดูดกลืน ปริมาณการดูดกลืนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของพื้นผิว ตลอดจนขนาดและความหนา นอกจากนี้ การดูดกลืนยังจะเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละความยาวคลื่น บางพื้นผิวจะดูดกลืนได้ดีในช่วงคลื่นสั้น และพื้นผิวบาง

ประเภทก็จะดูดกลืนได้ดีในช่วงคลื่นยาว อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานบางส่วนเกิดขึ้น พลังงานนี้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของความร้อน อุณหภูมิของวัตถุจะเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวมันเองกลายเป็นต้นกำเนิดพลังงาน ดังเช่นการแผ่พลังระยะไกลเพราะสามารถใช้อุปกรณ์ตรวจจับได้ทั้งกลางวันและกลางคืน และเป็นย่านของหน้าต่างบรรยากาศที่ไม่รบกวนโดยอนุภาคในชั้นบรรยากาศ

### 2.3.3 การส่งผ่าน

การส่งผ่านพลังงาน เป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องกับการดูดกลืนพลังงานของพื้นผิว โดยพลังงานส่วนต่ำได้รับการดูดกลืนจะถูกถ่ายทอดไปยังส่วนที่อยู่ลึกลงไป ค่าการส่งผ่านรังสีของวัตถุใดๆ ก็คือสัดส่วนของปริมาณพลังงาน ณ จุดซึ่งพลังงานได้เคลื่อนที่ไป ต่อพลังงานที่ตกกระทบทั้งหมด โดยทั่วไปแล้วค่าการส่งผ่านจะแตกต่างกันไป ขึ้นกับคุณสมบัติของพื้นผิวและสำหรับพื้นผิวหนึ่งๆ จะเกิดการส่งผ่านได้ดีในบางช่วงคลื่นเท่านั้น



รูปที่ 2.5 เส้นทางเดินของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าการสำรวจระยะไกลแบบพาสซีฟ

รูปที่ 2.5 แสดงภาพสรุปเส้นทางเดินของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดผ่านชั้นบรรยากาศไปกระทบยังพื้นผิวโลก แล้วสะท้อนกลับเข้ามาสู่อุปกรณ์ตรวจจับ สำหรับระบบที่แสดงนี้เป็นแบบพาสซีฟ แหล่งกำเนิดพลังงานคือดวงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยเส้นทางเดินดังต่อไปนี้

ก. รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ส่องผ่านชั้นบรรยากาศและจะเกิดการสูญเสียไปบางส่วน โดยส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนและส่วนหนึ่งจะเกิดการกระจายโดยอนุภาคต่างๆ ในชั้นบรรยากาศ แล้วสะท้อนเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับโดยมิได้ตกกระทบพื้นผิวโลก ปฏิกิริยารังสีนี้จะทำให้เกิดลักษณะคล้าย “หมอก” บนภาพถ่ายดาวเทียมและเกิดความไม่คมชัดของภาพ

ข. รังสีส่วนที่เหลือจากการดูดกลืนและการกระจายในชั้นบรรยากาศ จะตกกระทบพื้นผิวโลก แล้วสะท้อนเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับ

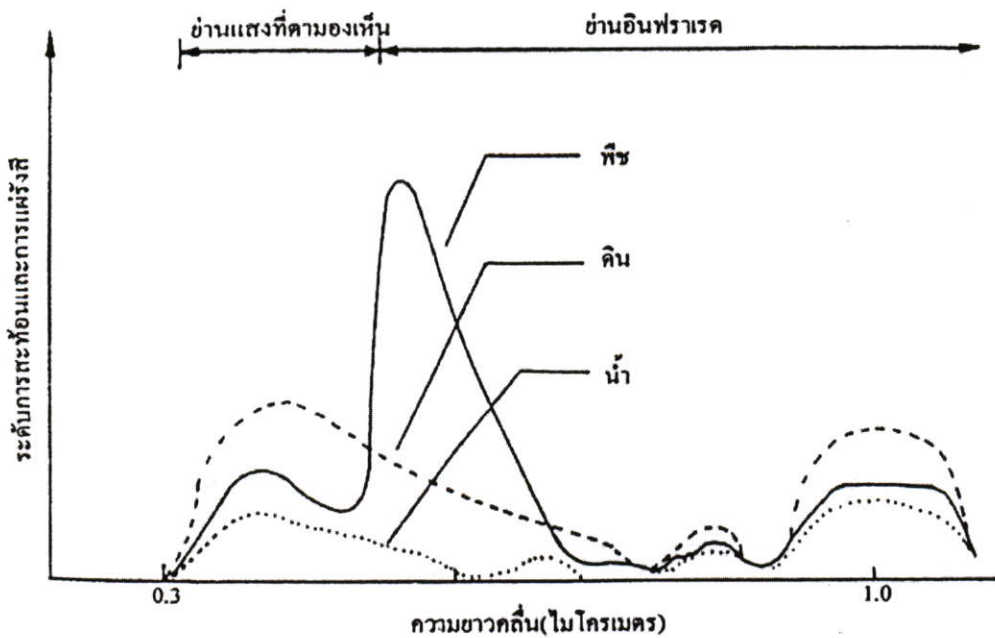
ค. แสงจากท้องฟ้าที่เกิดการกระจายในชั้นบรรยากาศ ตกกระทบพื้นผิวโลกแล้วสะท้อนเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับรวมกับข้อ (ข.)

ง. รังสีบางส่วนตกกระทบพื้นผิวโลกที่ถูกดูดกลืนและส่งผ่านสู่ระดับลึกเบื้องล่าง

จ. รังสีที่แผ่จากพื้นผิวโลกแล้วเดินทางสู่อุปกรณ์ตรวจจับ

ฉ. การกระจายของรังสีที่สะท้อนหรือแผ่จากพื้นผิวโลกบางส่วนสะท้อนออกนอกทิศทางของอุปกรณ์ตรวจจับ บางส่วนสะท้อนเข้าเครื่องสำรวจและบางส่วนสะท้อนกลับสู่ผิวโลกอีก

สิ่งที่ต้องการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจจับคือรังสีในส่วนของ (ข.) และ (จ.) ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติทางแสงของแต่ละพื้นผิว แม้ว่า (ง.) จะแสดงคุณสมบัติดังกล่าวด้วยก็ตาม แต่โดยที่ (ง.) มีความสัมพันธ์กับ (ข.) ในเชิงกลับกัน ดังนั้น จึงเป็นการเพียงพอที่จะดูจากค่าการสะท้อนเป็นส่วนใหญ่ ค่าการสะท้อนหรือแผ่รังสีที่วัดได้ ณ ความยาวคลื่นต่างๆของแถบพลังงาน หรือสิ่งที่เรียกว่า ลายเซ็นเชิงคลื่น (Spectral signature) จะเป็นลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละพื้นผิว ค่าเหล่านี้สามารถวัดได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการหรือจากการสำรวจในสนาม ภายใต้สภาวะที่ปราศจากการรบกวนของชั้นบรรยากาศ การรวบรวมลายเซ็นเชิงคลื่นของพื้นผิวประเภทต่างๆ จะมีประโยชน์สำหรับการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับให้บันทึกภาพด้วยช่วงคลื่นที่เหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภท และช่วยในการแปลความหมายของภาพถ่ายดาวเทียม



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบลายเซ็นเชิงคลื่นของทรัพยากรหลัก

## 2.4 อุปกรณ์สำรวจบนดาวเทียม

อุปกรณ์ตัวจับบนดาวเทียมมีหลากหลายประเภท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะหรือคุณสมบัติของสัญญาณที่ต้องการตรวจวัด โดยความหมายของอุปกรณ์สำรวจบนดาวเทียมหมายถึง เครื่องมือที่ใช้วัดค่าการสะท้อนของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ช่วงคลื่นช่วงใดช่วงหนึ่ง หรือหลายช่วงคลื่นของแถบพลังงานที่ครอบคลุมจากช่วงคลื่นที่ตามองเห็น จนถึงช่วงคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจากพื้นผิวโลก

พลังงานที่สะท้อนเข้าอุปกรณ์วัดนี้ อาจจะมาจกสิ่งที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติ เช่นจากดวงอาทิตย์ ในกรณีนี้ อุปกรณ์สำรวจจะเป็นแบบพาสซีฟ (Passive) สำหรับระบบอุปกรณ์ที่ผลิตพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อที่จะส่งไปกระทบยังพื้นผิวโลกโดยไม่ต้องอาศัยธรรมชาติ แล้วจึงวัดค่าการสะท้อนของพลังงานที่ส่งกลับมาอีกต่อหนึ่งเป็นระบบที่เรียกว่าแอคทีฟ (Active) หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า เรดาร์นั่นเอง ระบบพาสซีฟมักจะเป็นระบบที่ใช้สำหรับคลื่นสั้น คือช่วงที่ตามองเห็นจนถึงอินฟราเรดไกลและช่วงคลื่นความร้อน ส่วนระบบเรดาร์มักจะใช้สำหรับช่วงคลื่นที่ยาว เช่น ไมโครเวฟ ดังเช่น เครื่องอัลติมิเตอร์ สเตกเทอโรมิเตอร์ และ ซินธิติกอเพอเรเจอร์เรดาร์ เป็นต้น

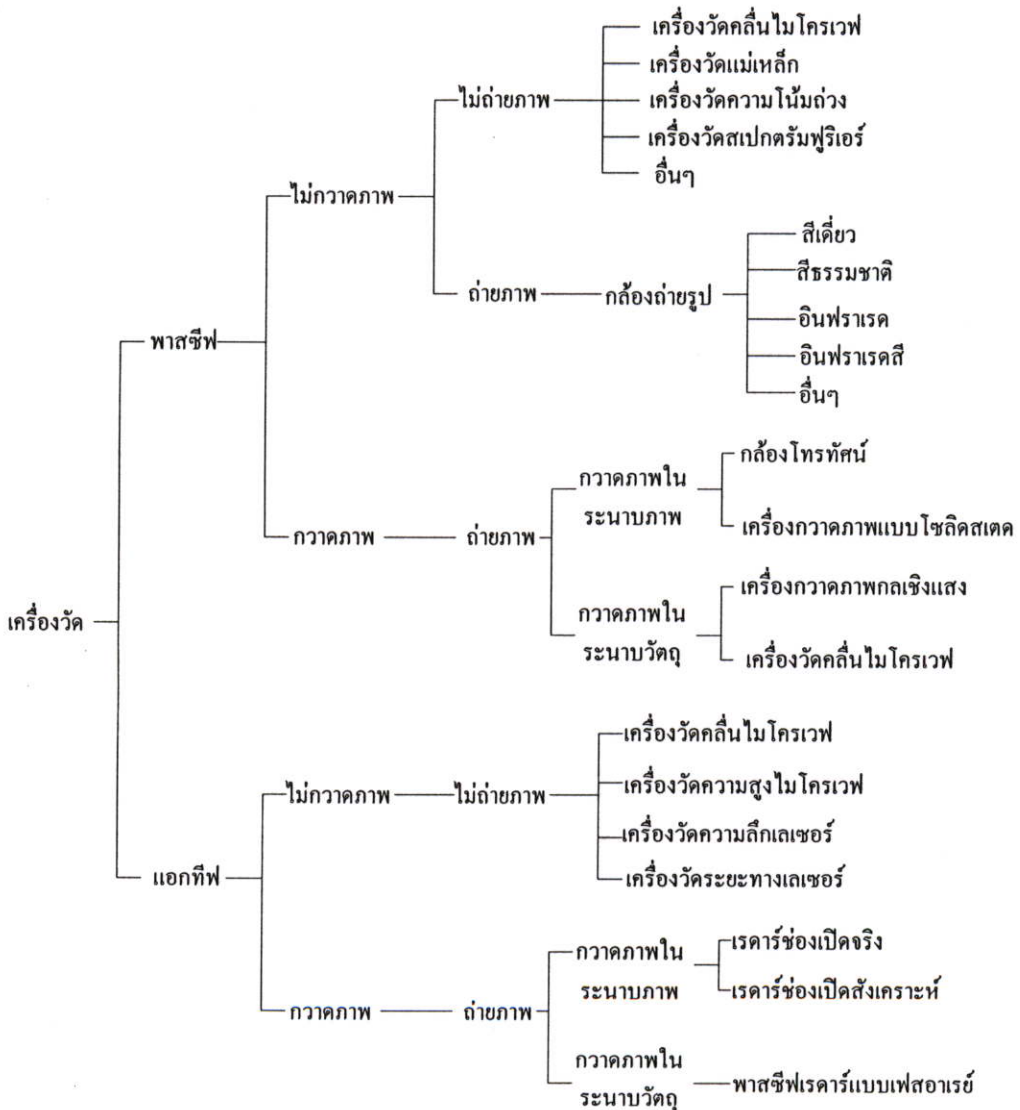
จากอุปกรณ์วัดที่สามารถสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้เองนั้น จะส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระทบวัตถุที่ต้องการนั้นๆ ให้สะท้อนพลังงานออกมาอีกครั้งเพื่อการตรวจวัดและบันทึกผลที่ได้ตัวอย่างอุปกรณ์วัดชนิดนี้ ได้แก่ระบบเรดาร์ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท ดังนี้ ระบบกวาดภาพ (Scanning system) และระบบไม่กวาดภาพ (Non-scanning system) โดยอุปกรณ์วัดที่จัดอยู่ในประเภทพาสซีฟ ที่รวมเอาลักษณะของระบบไม่กวาดภาพ และเป็นวิธีแบบไม่ถ่ายภาพ (Non-imaging system) เรียกว่า เครื่องบันทึกในแนวตั้ง (Profile radiometer) ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์วัดคลื่นไมโครเวฟ เรียกว่า ไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (Microwave radiometer) ส่วนพาสซีฟเซนเซอร์ชนิดไม่กวาดภาพแต่ใช้วิธีถ่ายภาพ (Imaging Method) ได้แก่ กล้องถ่ายภาพทางอากาศที่ใช้บนเครื่องบินหรือ กล้องถ่ายภาพบนดาวเทียม ตัวอย่างเช่นกล้องที่ใช้บนดาวเทียม COSMOS ของรัสเซีย เป็นต้น พาสซีฟเซนเซอร์ที่เป็นทั้งระบบที่มีลักษณะการกวาดภาพและบันทึกออกมาเป็นภาพ แบ่งออกได้เป็นอุปกรณ์ชนิดกวาดสร้างภาพจากระนาบภาพ (Image plane scanning sensor) เช่น กล้องโทรทรรศน์หรือชนิดที่เรียกว่าเครื่องกวาดภาพแบบโซลิดสเตต (Solid state scanner) และอุปกรณ์วัดชนิดกวาดสร้างภาพจากระนาบวัตถุ (Object plane scanning sensor) เช่นเครื่องกวาดภาพหลายช่วงคลื่น(Multi- spectral scanner หรือ Optical mechanical scanner) และอุปกรณ์วัดคลื่นไมโครเวฟชนิดการกวาดภาพ (Scanning microwave radiometer)

อุปกรณ์วัดที่ได้รับความนิยมมากในการสำรวจจากระยะไกล ได้แก่ กล้องถ่ายภาพ เครื่องกวาดภาพแบบอุปกรณ์สถานะของแข็ง (Solid state) เช่น ซีซีดี (CCD-Charge Coupled Device) เครื่องกวาดภาพหลายช่วงคลื่นประเภทเลเซอร์นั้น ได้รับความนิยมในการนำไปใช้ตรวจมลภาวะในอากาศโดยการใช้อุปกรณ์วัดสเปกตรัมแบบเลเซอร์ และใช้อุปกรณ์วัดความสูงแบบเลเซอร์ ในการวัดความสูง เป็นต้น

จากรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงชนิดของอุปกรณ์วัดที่มีใช้กันในปัจจุบันและกำลังได้รับการพัฒนาขึ้นในอนาคต สำหรับเทคโนโลยีการสำรวจจากระยะไกล เป็นที่คาดหมายว่าในอนาคตจะมีการพัฒนาอุปกรณ์วัดชนิดใหม่ขึ้นมาเพื่อการใช้งานเฉพาะประเภทต่างๆ กันออกไป มีทั้งพาสซีฟเซนเซอร์ (Passive sensor) คืออุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับและบันทึกสัญญาณ ข้อมูล ซึ่งสะท้อนหรือเปล่งจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ และแอคทีฟเซนเซอร์ (Active sensor) ที่สามารถรับและบันทึกสัญญาณข้อมูล ซึ่งสะท้อนจากวัตถุที่ต้องการศึกษา

นอกจากเครื่องวัดชนิดดังกล่าวแล้ว ยังมีเครื่องวัดบางชนิด เช่นเครื่องวัดประเภทแอกทีฟแบบไม่กวาดภาพและไม่ถ่ายภาพ ได้แก่ เครื่องบันทึกในแนวตั้ง เช่นเครื่องวัดสเปกตรัมแบบเลเซอร์ (Laser spectrometer) และเครื่องวัดความสูงแบบเลเซอร์ (Laser altimeter) ในขณะที่เครื่องวัดแบบแอกทีฟเซนเซอร์กวาดภาพและถ่ายภาพ ได้แก่ เรดาร์ เช่น ซินธิติกอะพอร์เจอร์เรดาร์ (Synthetic aperture Rader : SAR) ซึ่งสามารถให้รายละเอียดภาพสูง สามารถทำงานได้ทั้งกลางวัดและกลางคืน แม้ในขณะที่มีเมฆปกคลุม

สังเกตว่าเครื่องวัดประเภทเลเซอร์นั้น ได้รับความนิยมในการนำไปใช้ตรวจมลภาวะในอากาศโดยการใช้เครื่องมือวัดสเปกตรัมแบบเลเซอร์ และใช้เครื่องวัดความสูงแบบเลเซอร์ ในการวัดความสูงเป็นต้น



รูปที่ 2.7 การจำแนกประเภทของอุปกรณ์วัด

ในตารางที่ 2.2 แสดงอุปกรณ์วัดที่ใช้้อย่างแพร่หลายพร้อมช่วงคลื่น อุปกรณ์วัดที่ใช้เลนส์ในสเปกตรัมแสงที่ตามองเห็นและสเปกตรัมอินฟราเรดสะท้อน เรียกว่า อุปกรณ์วัดเชิงแสง (Optical sensor) ซึ่งมีคุณลักษณะที่กำหนดโดยความสามารถเชิงคลื่น เชิงแสง และเชิงรูปร่างทางเรขาคณิต

ตารางที่ 2.2 ความยาวคลื่นที่ใช้ในอุปกรณ์วัดหลักๆ

เครื่องวัด	ความยาวคลื่น ( $\mu m$ )		อินฟราเรด						คลื่นวิทยุ			
	UV	แสงที่ตามองเห็น	ไกล		กลาง		ความร้อน ไกล		คลื่นสั้น		ไมโครเวฟ	
			0.4	0.5	0.7	0.9	1.5	5.5	8.0	14.0		1000
กล้องถ่ายภาพ (ฟิล์มขาวดำ)		0.4 - 0.7										
ฟิล์มสี		0.4 - 0.7										
ฟิล์มอินฟราเรด				0.7 - 0.9								
ฟิล์มอินฟราเรดสี			0.5 - 0.7	0.7 - 0.9								
เครื่องกวาดภาพโซลิตสแตต (SPOT HRV) (Thermal Video)						1.5 - 5.5	8.0 - 14.0					
กล้องโทรทัศน์		0.4 - 0.7										
เครื่องกวาดภาพแบบกลเชิงเส้น (Airborne MSS)					0.4 - 0.7			8.0 - 14.0				
(LANDSAT MSS)					0.4 - 0.7							
(LANDSAT TM)					0.4 - 0.7	1.5 - 5.5	8.0 - 14.0					
ดาวเทียม									1000 - 100000			
เครื่องวัดคลื่นไมโครเวฟ										10000 - 100000		



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบของคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดเชิงแสง

คุณลักษณะเชิงคลื่น (Spectral characteristics) ได้แก่ ย่านของความยาวคลื่น และความกว้างของช่วงคลื่นนั้นๆ ความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งจุดกลางของช่วงคลื่น ความไวต่อสัญญาณ ณ จุดปลายของช่วงคลื่นความไวต่อสัญญาณของช่วงคลื่นที่รอบนอก และความไวของการเปลี่ยนระนาบคลื่นที่ใช้

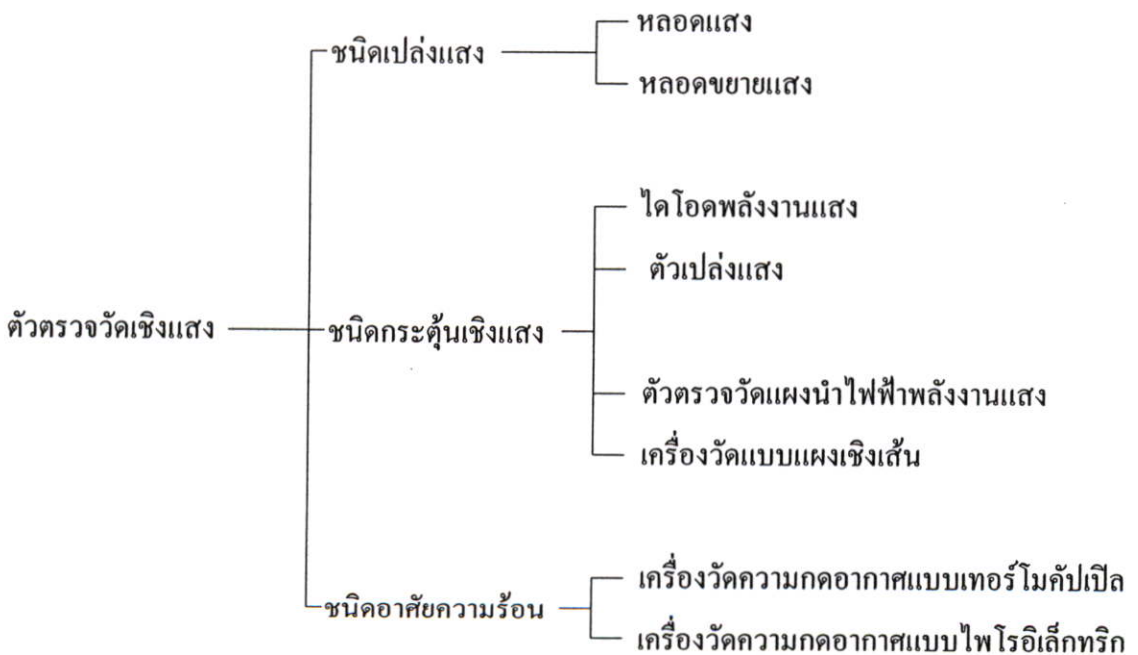
ตารางที่ 2.3 คำจำกัดความของคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดเชิงแสง

รายการ	คำนิยาม
พิสัยของแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	ความกว้างของช่วงคลื่นที่ใช้ในหนึ่งแบนด์
ความยาวคลื่น ณ ศูนย์กลาง	ความยาวคลื่น ณ จุดศูนย์กลางของแบนด์ที่ใช้
การตอบสนองที่ปลายจุดทั้งสองของแบนด์	เส้นโค้งคุณลักษณะที่ช่วงปลายทั้งสองของคลื่น
ความไวของแบนด์	ความไวของแบนด์หนึ่ง ๆ
ความไวภายนอกแบนด์	ความไวของช่วงคลื่นภายนอกแบนด์นั้น
ความแตกต่างความไวระหว่างแบนด์ที่แตกต่าง	อัตราส่วนของความไวระหว่างแบนด์ที่ต่างกัน
อัตราส่วน S/N	อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน
พิสัยพลวัต	พิสัยของความไวของอุปกรณ์วัดในรูปของอัตราส่วนของความต่างสูงสุดและต่ำสุดของค่าการแผ่รังสี
ความแตกต่างความไวระหว่างจุดภาพ	อัตราส่วนของระดับข้อมูลขาออกสูงสุดต่อข้อมูลขาออกต่ำสุดของจุดภาพ
สภาพเชิงเส้นของคุณลักษณะข้อมูลขาเข้า ขาออก	ระดับข้อมูลขาเข้าต่อระดับข้อมูลขาออกในระดับข้อมูลขาเข้าที่มีกำลังสูงกว่า
กำลังสมมูลของสัญญาณรบกวน	กำลังสัญญาณข้อมูลขาเข้าที่สามารถให้ข้อมูลขาออกเทียบเท่ากับกำลังสัญญาณรบกวน
สนามมุมมอง	พื้นที่หรือภาพที่ครอบคลุมด้วยเครื่องวัดจากระยะไกล (สนามเชิงมุมของกล้องถ่ายภาพ ความกว้างของการกวาดภาพ)
การซ้อนทับระหว่างต่างแบนด์	ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ระหว่างแบนด์มาตรฐานและแบนด์อื่น ๆ
MTF	ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแปรเปลี่ยนของอุปกรณ์วัด ซึ่งจะเป็นตัวกำหนด IFOV
ความเพี้ยนเชิงแสง	ความเพี้ยนของภาพอันเนื่องมาจากส่วนประกอบเชิงแสงของอุปกรณ์วัด เช่น ความคลาดของเลนส์
มุมของการมองภาพ 3 มิติ	ความแตกต่างของมุมมองของอุปกรณ์วัดแบบสเตอริโอ
ความถี่การถ่ายภาพ	เวลาที่ใช้ในการกวาดภาพ 1 เส้น

อุปกรณ์วัดซึ่งใช้ฟิล์มถ่ายภาพเป็นตัวบันทึกนั้น จะคุณลักษณะได้จากความไวของฟิล์ม คุณสมบัติส่งผ่านพลังงานของตัวกรอง (filter) และคุณภาพของเลนส์ที่ใช้ อุปกรณ์วัดชนิดกวาดภาพ คูได้ที่คุณลักษณะเชิงคลื่นของตัวตรวจจับ (Detector) และตัวแยกเชิงคลื่น (Spectral splitter) และยิ่งไปกว่านั้น ความคลาดสี (Chromatic aberration) ก็มีส่วนสำคัญที่ต้องได้รับการพิจารณาคุณลักษณะเชิงรังสีของอุปกรณ์ของอุปกรณ์วัดเชิงแสงนั้นดูจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านระบบแสงนั้น ได้แก่ ความสามารถในการวัดคลื่นของระบบ ความไวต่อพลังงาน ได้แก่ กำลังสมมูลของสัญญาณรบกวน (Noise Equivalent Power ; NEP) พิสัยพลวัต(Dynamic range) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise ratio;S/N ratio) และสัญญาณรบกวนอื่นๆ รวมทั้งสัญญาณรบกวนเชิงปริมาณ

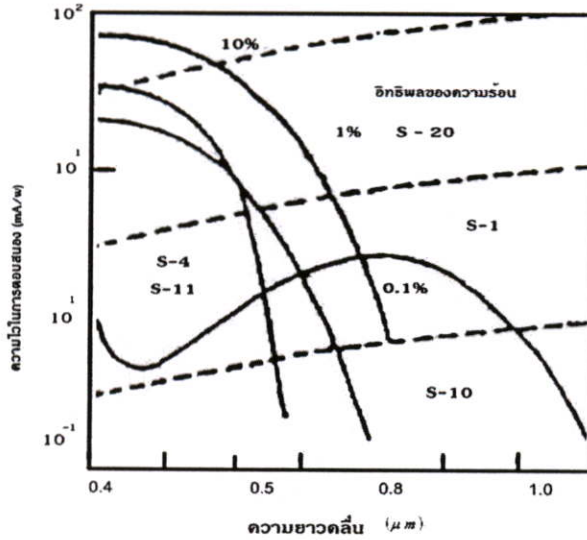
### 2.5 คุณลักษณะของเครื่องวัดเชิงแสง

อุปกรณ์ตรวจวัดแสง (Detector) คืออุปกรณ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์ตรวจวัดมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับความสามารถที่จะตรวจวัดช่วงคลื่น ซึ่งมีความยาวคลื่นต่างกันออกไป รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงอุปกรณ์ตรวจวัด 3 ชนิด คือ ชนิดเปล่งแสง (Photo emission) กระตุ้นเชิงแสง (Optical excitation) และอาศัยความร้อน (Thermal effect)



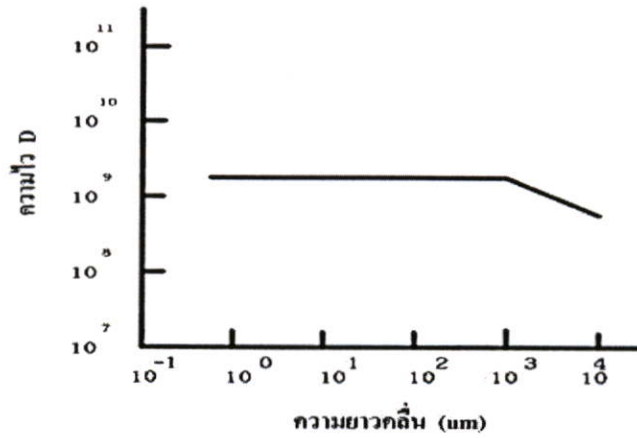
รูปที่ 2.9 การจำแนกประเภทของอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสง

ตัวอย่างของอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดเปล่งแสง ซึ่งจะมีความไวต่อพลังงานแสงในย่านอัลตราไวโอเลตจนถึงแสงที่มองเห็น ได้แก่ หลอดแสง (Photo tube) และหลอดขยายแสง (photo multiplier tube) เป็นต้น รูปที่ 2.10 แสดงเส้นโค้งความไวในการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดหลอดแสงชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.10 ความไวในการตอบสนองของหลอดแสง

ตัวอย่างของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระตุ้นแสง ซึ่งมีความไวในย่านอินฟราเรด ได้แก่ ไดโอดพลังแสง (Photo diode) ตัวเปล่งแสง (Photo transistor) อุปกรณ์ตรวจวัดแบบนำไฟฟ้าพลังงานแสง (Photo conductive detector) และอุปกรณ์วัดแบบเชิงเส้น (Linear array sensor) เป็นต้น อุปกรณ์ตรวจวัดแบบไดโอดพลังแสง ได้รับแรงดันไฟฟ้าจากการกระตุ้นของอิเล็กตรอน ส่วนอุปกรณ์วัดแบบตัวเปล่งแสง และอุปกรณ์ตรวจแบบนำไฟฟ้าพลังงาน ใช้กระแสไฟฟ้า (Electric current) เป็นตัวที่ทำให้ทำงานของอุปกรณ์ของอุปกรณ์ตรวจวัดอาศัยความร้อน ซึ่งมีความไวต่อพลังงานในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ จนถึงอินฟราเรดไกลนั้น ได้แก่ ประเภทอุปกรณ์วัดความกดอากาศแบบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple barometer) และอุปกรณ์วัดความกดอากาศแบบไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric barometer) เป็นต้น รูปที่ 2.11 แสดงเส้นโค้งของสภาพตรวจวัดได้ของอุปกรณ์วัดความกดอากาศแบบไพโรอิเล็กทริก



รูปที่ 2.11 ความไวของอุปกรณ์ตรวจจับแบบโฟโรอิเล็กทริก

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณลักษณะของอุปกรณ์ตรวจจับเชิงแสงซึ่งจะขึ้นอยู่กับ ชนิด อุณหภูมิ ช่วงความยาวคลื่น ความยาวคลื่นสูงสุด ความไวในการตรวจจับ ในรูป  $D^*$  สภาพตรวจจับได้ (Detectivity) และระยะเวลาในการตอบสนอง

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของตัวตรวจจับเชิงแสง

ตัวตรวจจับ	ชนิด	ช่วงคลื่น ( $\lambda m$ )	สภาพตรวจจับได้ $D^*$	จุดตัดของความถี่ (Hz)	อุณหภูมิขณะทำงาน
Pt-s	PV	0.35-0.6	30	$10^8$	295
Si p-n PD	PV	0.4-1.0	50	$10^7$	295
Si p-i-n PD	PV	0.4-1.1	80	$10^8$	295
Si APD	PV	0.4-0.8	80	$10^{10}$	295
Ge p-n PD	PV	0.6-1.8	50	$10^7$	295
InSb p-n PD	PV	3.0-6.2	8	$5 \times 10^2$	77
PbSnTe p-n PD	PV	5.0-11.4	>15-60 V/W	$10^7$	77
PbS	PC	0.5-3.8	15	300	196
PbSe	PC	0.8-4.6	3	$3 \times 10^3$	196
PbTe	PC	0.8-5.5	0.16	$3 \times 10^3$	196
p-InSb	PC	2.0-6.7	2	$3 \times 10^3$	77
n-InSb	PC	1.0-3.6	30	$3 \times 10^3$	195
PbSnTe	PC	5.0-11.0	1.7	$3 \times 10^3$	4.2
CdHgTe	PC	5.0-16.0	3	$10^4$	4.2
Ge: Au	PC	2.0-9.5	0.02	$10^4$	77
Ge: Zn, Au	PC	5.0-40.0	1	$10^3$	4.2
Ge: Cu	PC	5.0-30.0	3	$10^3$	4.2

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

ตัวตรวจวัด	ชนิด	ช่วงคลื่น ( $\lambda m$ )	สภาพตรวจวัดได้ D*	จุดตัดของความถี่ (Hz)	อุณหภูมิขณะทำงาน
Si:Al	PC	2.0-16.0	1	$10^4$	27
Si:Sb	PC	2.0-31.5	1.8	$10^4$	4
ATGS	TC	1-1000	0.03	10	295
(Ba,Sr)TiO <sub>3</sub>	TC	1-1000	0.011	100	295

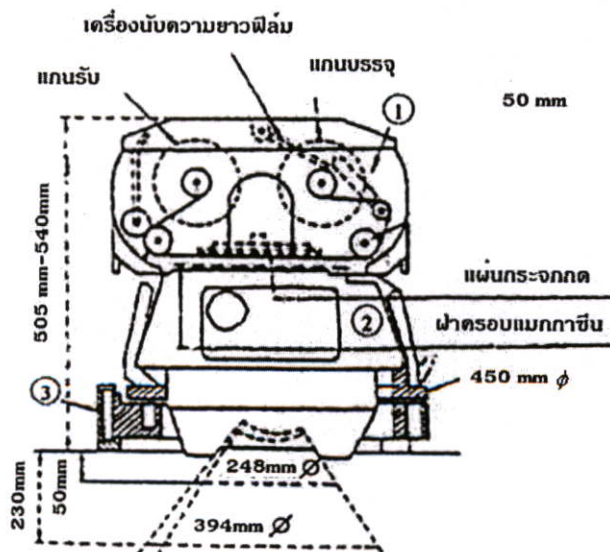
PV ชนิดตัวแปลงแสง

PC ชนิดตัวตรวจวัดแบบนำไฟฟ้าพลังงานแสง

TC ชนิดตัวตรวจวัดแบบไพโรอิเล็กทริก

## 2.6 อุปกรณ์ตรวจจับระยะไกลประเภทกล้องถ่ายภาพ

กล้องถ่ายภาพเหล่านี้ ได้แก่ กล้องสำรวจทางอากาศ (Aerial survey camera) กล้องถ่ายภาพหลายช่วงคลื่น (Multispectral camera) และกล้องถ่ายภาพจอกว้าง (Panoramic camera) เป็นต้น กล้องสำรวจทางอากาศ บางที่รู้จักในชื่อกล้องถ่ายภาพแบบเมตริกซ์ ซึ่งใช้ถ่ายภาพจากเครื่องบินหรือยานอวกาศ เพื่อทำแผนที่ภูมิประเทศ โดยอาศัยการถ่ายภาพเหลื่อมกันทำให้เกิดระบบสามมิติ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันมากได้แก่ กล้อง RMK แสดงได้ในรูปที่ 2.12 แสดงกลไกของกล้อง Zeiss RMK กล้องถ่ายภาพจากอวกาศ (Space camera) รู้จักกันดีคือ กล้องถ่ายภาพแบบเมตริกซ์ (Metric camera) ที่ใช้บนกระสวยอวกาศ



รูปที่ 2.12 ระบบกล้อง Zeiss RMK

เนื่องจากกล้องถ่ายภาพแบบเมตริกซ์ ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในการสำรวจภูมิประเทศอย่างละเอียดและมีความถูกต้องสูง ดังนั้น ข้อกำหนดต่างๆ ในระบบแสงและคุณสมบัติเชิงเรขาคณิตต้องเป็นไปตามกฎเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ดังนี้

- 1) ความเพี้ยนของเลนส์ต้องมีค่าน้อยที่สุด
- 2) เลนส์ควรให้รายละเอียดสูงและภาพที่ได้ควรมีความคมชัดสม่ำเสมอ แม้บริเวณมุมภาพ
- 3) ความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตระหว่างกรอบภาพ และแนวแกนของระบบเลนส์ ควรให้มี

เป็นบรรทัดฐาน

- 4) แนวแกนของเลนส์กับระนาบของฟิล์มควรตั้งฉากกัน
- 5) ความแบนราบของแผ่นฟิล์มควรให้คงไว้ตลอดเวลาโดยอาศัยระบบแผ่นสูญญากาศ
- 6) ความยาวโฟกัสของเลนส์ควรได้รับการวัดและปรับเทียบอย่างแม่นยำ
- 7) การถ่ายภาพต่อเนื่องหลายๆ ภาพควรใช้ชัตเตอร์ที่มีความเร็วสูง และใช้การเลื่อนฟิล์มอัตโนมัติ
- 8) ควรใช้ระบบการชดเชยการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เพื่อป้องกันภาพไหวในขณะที่ถ่ายภาพวัตถุเคลื่อนที่เร็ว โดยเฉพาะในกรณีของกล้องถ่ายภาพจากอวกาศ

## 2.7 ยานสำรวจ

ยานพาหนะ หรือ เครื่องลำเลียงที่ติดตั้งเครื่องวัดจากระยะไกล (remote sensor) เรียกว่า ยานสำรวจ (Platform) โดยทั่วไปแบบชนิดยานสำรวจเหล่านี้ ได้แก่ ดาวเทียม (Satellite) และ อากาศยาน (aircraft) นอกจากนี้ยังอาจหมายรวมถึง เครื่องบินที่บังคับด้วยวิทยุ บัลลูนและวาล์วที่ใช้ในการสำรวจในระดับความสูงไม่มาก รวมทั้งรถที่ติดบันไดสูง (Ladder truck) หรือรถกระเช้าเก็บผลไม้ (Cherry picker) ที่ใช้ในการสำรวจในระดับพื้นดินด้วย

ตารางที่ 2.5 แสดงประเภทต่างๆ ของยานสำรวจ ระดับความสูง และวัตถุที่ต้องการสำรวจ ยานสำรวจที่ใช้ปฏิบัติงานในระดับสูงสุดคือดาวเทียมสัมพันธ์กับโลก (geosynchronous satellite) เช่นดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา GMS ของญี่ปุ่นที่มีชื่อเต็มว่า Geostationary Meteorological Satellite ที่อยู่ที่ระดับความสูง 36,000 กิโลเมตรเหนือเส้นศูนย์สูตร สำหรับดาวเทียมสำรวจพิภพ อาทิ MOS , LANDSAT และ SPOT นั้น ส่วนใหญ่จะมีลักษณะการโคจรสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ ในระดับความสูงประมาณ 900 กิโลเมตร

ยานสำรวจที่มีวงโคจรอยู่ในระดับความสูงลดต่ำลงมา ได้แก่ กระสวยอวกาศ (Space shuttle) ซึ่งอยู่ในระดับความสูง 240 – 280 กิโลเมตร เครื่องตรวจสอบอากาศในที่สูงโดยวิทยุ (radiosonde) ซึ่งอยู่ในระดับความสูงต่ำกว่า 100 กิโลเมตร เครื่องบินไอพ่นระดับสูง (High altitude jet-plane) มีระดับเพดานบิน 10000 เมตร เครื่องบินที่มีระดับเพดานบินปานกลางหรือต่ำ คือประมาณ 500-8000 เมตร และเครื่องบินที่บังคับด้วยวิทยุ ซึ่งบินอยู่ในระดับความสูงต่ำกว่า 500 เมตร เป็นต้น

ปัจจัยหลักที่ต้องพิจารณาในการเลือกชนิดของยานสำรวจ คือระดับความสูงที่เหมาะสมที่เครื่องมือจะสามารถจำแนกรายละเอียดภาคพื้นดินได้

การเลือกชนิดของยานสำรวจ ยังต้องคำนึงถึงความมุ่งหมายของการปฏิบัติงาน ซึ่งในบางครั้ง ได้มีการกำหนดไว้เช่น การสำรวจทางอากาศต้องการระดับความสูงที่คงที่ ในขณะที่การสำรวจการกระจายของบรรยากาศในแนวตั้งจำเป็นต้องสำรวจในระดับความสูงที่แตกต่างกันหลายระดับเป็นต้น

ในการทำแผนที่โดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศ ต้องมีการควบคุมแนวการบินอย่างเข้มงวด เพื่อให้มีความแม่นยำเชิงเรขาคณิตที่เป็นไปตามข้อกำหนด อย่างไรก็ตาม โดยมีการใช้เฮลิคอปเตอร์หรือเครื่องบินที่บังคับด้วยวิทยุ บินในแนวบินอิสระเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ในการติดตามสังเกตการณ์สภาพความเสียหายจากภัยธรรมชาติ เป็นต้น

ตารางที่ 2.5 ประเภทของยานสำรวจและวัตถุที่สังเกต

ยานสำรวจ	ระดับความสูง	การสังเกตการณ์	หมายเหตุ
ดาวเทียมค้างฟ้า	36,000 กม.	จุดสังเกตการณ์คงที่	GMS
ดาวเทียมวงโคจรกลม (สำรวจโลก)	500 กม. - 1,000 กม.	สังเกตการณ์แบบประจำ	LANDSAT, SPOT MOS-1
กระสวยอวกาศ	240 กม. - 350 กม.	สังเกตการณ์แบบไม่ประจำ การทดลองในอวกาศ	
เครื่องตรวจอากาศด้วยวิทยุ	100 ม. - 100 กม.	การศึกษาค้นคว้าด้านต่างๆ (อุตุนิยมวิทยา)	
เครื่องบินไอพ่นระดับสูง	10 กม. - 12 กม.	การสำรวจ การศึกษาในพื้นที่กว้างๆ	
เครื่องบินความสูงระดับต่ำ ถึงระดับกลาง	500 ม. - 8,000 ม.	การศึกษาค้นคว้าด้านต่างๆ การสำรวจทางอากาศ	
เครื่องลอยบนอากาศ	500 ม. - 3,000 ม.	การศึกษาค้นคว้าด้านต่างๆ	
เฮลิคอปเตอร์	100 ม. - 2,000 ม.	การศึกษาค้นคว้าด้านต่างๆ การสำรวจทางอากาศ	
เครื่องบินบังคับด้วยวิทยุ	ต่ำกว่า 500 ม.	การศึกษาค้นคว้าด้านต่างๆ การสำรวจทางอากาศ	
เครื่องบินลอยนิ่ง	50 - 500 ม.	การศึกษาค้นคว้าด้านต่างๆ การสำรวจทางอากาศ	
บอลลูนลอยนิ่ง	800 ม.	การศึกษาค้นคว้าด้านต่างๆ	
สายเคเบิล	10 - 40 ม.	การสำรวจด้าน โบราณคดี	
รถกระเช้า	5 - 50 ม.	การสำรวจพิสัยใกล้	
รถตรวจวัดภาคพื้นดิน	0 - 30 ม.	ข้อมูลภาคพื้นดิน	

## 2.8 การทรงตัวของยานสำรวจ

ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตไม่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของเครื่องวัดเท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับ การทรงตัวของยานสำรวจด้วย ดังนั้น จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องวัดการทรงตัวของยานสำรวจ เพื่อการปรับแก้เชิงเรขาคณิตในภายหลัง

การทรงตัวของยานสำรวจ จำแนกโดย 2 องค์ประกอบคือ

ก. มุมหมุนรอบ 3 แกน คือ การโคลง (roll) การกระดก (pitch) และการส่าย (yaw)

ข. ภาพเดิน (jitter) ได้แก่ การสั่นสะเทือน ที่ไม่เป็นระบบซึ่งไม่สามารถจะวัดได้

มุมหมุน อันได้แก่ การโคลง ( $\omega$ ) การกระดก ( $\phi$ ) และการส่าย ( $\chi$ ) หมายถึง มุมหมุนรอบ ทิศทางแนวการบินรอบปีกหลัก และรอบแนวตั้งฉาก ตามลำดับ

สำหรับกล้องถ่ายรูปแบบกรอบภาพ มุมหมุนต่างๆมีเพียงค่าเดียว ซึ่งเป็นค่าร่วมของภาพถ่าย ทางอากาศเต็มทั้งภาพ ในขณะที่เครื่องกวาดภาพเชิงเส้นนั้น การเปลี่ยนแปลงของการทรงตัวจะเป็น ฟังก์ชันของลำดับเส้นหรือเวลา ในกรณีของดาวเทียม การผันแปรของตำแหน่ง และการทรงตัวจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องแต่ในกรณีของอากาศยานการผันแปรจะไม่ราบเรียบสม่ำเสมอ การปรับแก้เชิง เรขาคณิต จึงทำได้ยากกว่า

แบบชนิดเครื่องวัดการทรงตัว (attitude sensor) ของอากาศยานต่างๆ ไป มีดังต่อไปนี้

- เครื่องวัดความเร็ว (speedometer)
- เครื่องวัดความสูง (altimeter)
- เข็มทิศใจโร (gyro compass) สำหรับวัดการทรงตัว
- เรดาร์แบบดอปเปลอร์ (Doppler rader) สำหรับวัดความสูง
- จีพีเอส (ระบบดาวเทียมบอกพิกัด - GPS) สำหรับวัดตำแหน่งพิกัด
- เครื่องวัดแนวระดับของฟ้าใจโร (gyro horizon)
- กล้องโทรทัศน์
- เครื่องบันทึกการบิน

การควบคุมการทรงตัวของดาวเทียมจำแนกได้ 2 วิธี คือ การควบคุมการหมุนอยู่กับที่ (Spin control) และการควบคุมในสามแนวแกน (three-axis control) สำหรับวิธีแรกนั้น ปกติใช้กับ ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา วงโคจรค้างฟ้า (geosynchronous meteorological Satellite) ซึ่งตัวดาวเทียม จะหมุนรอบตัวเองไปพร้อมๆกับการหมุนของเครื่องกวาด ส่วนวิธีหลังนั้น ส่วนมากใช้กับดาวเทียม สำรวจทรัพยากรโลก เช่นดาวเทียม LANDSAT ซึ่งต้องการความแม่นยำของมุมมองในทิศทางสู่โลก

การควบคุมการหมุนอยู่กับที่ เป็นวิธีที่ค่อนข้างง่าย แต่มีค่าอัตราส่วน S/N ต่ำ ในขณะที่การ ควบคุมในสามแนวแกนซับซ้อนมากกว่า แต่มีค่า S/N สูง

ในตารางที่ 2.6 แสดงชนิดของเครื่องวัดการทรงตัวที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.6 แบบชนิดเครื่องมือตรวจวัดการทรงตัว

เครื่องวัดเชิงมุม	เครื่องวัดแม่เหล็ก	เครื่องวัดเชิงมุมตาม กำหนดเวลา	เครื่องวัดการ เปลี่ยนแปลงเชิงมุม
-เอิร์ธเซ็นเซอร์ -ซันเซ็นเซอร์ -เครื่องวัดตำแหน่งดาว	-เครื่องวัดแม่เหล็ก	-เข็มทิศใจโร -เข็มทิศใจโรแบบเรด อินทิกรัล	-ADS

เข็มทิศใจโร ใช้ในการวัดความผันแปรของการทรงตัวในช่วงเวลาสั้นๆ ส่วนเครื่องเอิร์ธเซ็นเซอร์ (earth sensor) ใช้ตรวจวัดการแผ่รังสีของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปล่งออกจากขอบผิวโลก ในช่วงคลื่น 14 –16 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้สามารถวัดการทรงตัวของ 2 แนวแกน คือ การโคลงและการกระดก โดยมีความแม่นยำ 0.3 – 1 องศา และถ้าหากใช้เอิร์ธเซ็นเซอร์ร่วมกับซันเซ็นเซอร์ (sun sensor) และเข็มทิศใจโรแล้ว จะสามารถวัดการทรงตัวของทั้ง 3 แนวแกนได้โดยมีความแม่นยำมากขึ้นเป็น 0.1 – 0.3 องศา เครื่องวัดแม่เหล็ก (magnetic sensor) ก็เป็นอีกเครื่องมือหนึ่งที่สามารถวัดการทรงตัวของทั้ง 3 แนวแกนได้ แต่จะมีความละเอียดแม่นยำต่ำกว่าโดยการตอบสนองของเครื่องมือนี้มีค่าความถี่สูงสุด 2 Hz ถ้าต้องการวัดค่าการทรงตัวที่มีความถี่สูงเช่นการวัดภาพเดิน จำเป็นต้องใช้เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงเชิงมุม (angular displacement sensor ; ADS)

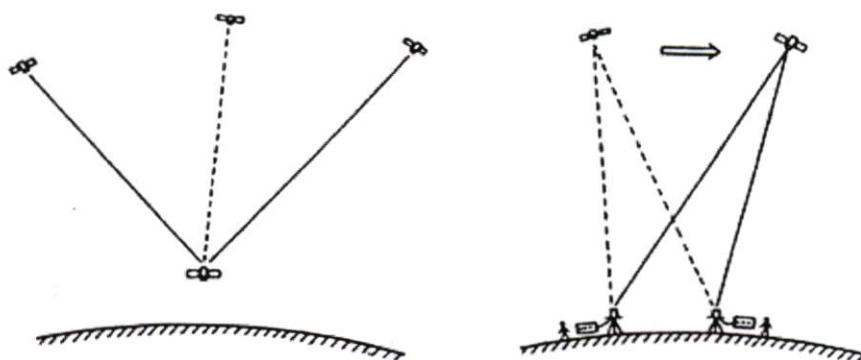
เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงเชิงมุมของดาวเทียม LANDSAT-4 และ 5 มีความสามารถที่จะตอบสนองสัญญาณในระดับความถี่ 2-18 Hz การวัดการทรงตัวของดาวเทียมให้ได้ความแม่นยำสูงสุดคือ การวัดโดยใช้เครื่องวัดตำแหน่งดาว (star sensor) ตัวอย่างเช่น เครื่องกำหนดตำแหน่งโดยอาศัยดวงดาวแบบมาตรฐาน (standard star tracker; SST) ที่ติดตั้งไว้ที่ดาวเทียม LANDSAT-4 และ 5 สามารถวัดการทรงตัวได้อย่างแม่นยำจากภาพดวงดาว ซึ่งได้มาโดยการทำงานของตัวจำแนกภาพ (image dissector) ทั้งนี้ เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ติดบนยานได้บรรจุข้อมูลอ้างอิงดวงดาว จนถึงระดับ 6 ไร่ถึง 300 ชุด ในกรณีของกระสวยอวกาศ เครื่องวัดตำแหน่งดาวมีความแม่นยำต่ำกว่าโดยมีเพียงประมาณ 50 ชุดภาพดวงดาว เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง SST เนื่องจากกระสวยอวกาศไม่ต้องการการควบคุมการทรงตัวที่สูงนัก ในขณะที่กลับคืนสู่บรรยากาศในชั้นโทรโปสเฟียร์

## 2.9 ระบบกำหนดตำแหน่งดาวเทียม

การกำหนดตำแหน่งดาวเทียมมี 2 วิธี วิธีแรก โดยการวัดระยะทาง จากสถานีภาคพื้นดิน วิธีที่ 2 โดยระบบดาวเทียมบอกพิกัด (GPS) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 วิธีการวัดระยะทางเพื่อกำหนดตำแหน่งดาวเทียมนั้น เรียกว่า ระบบพิสัยและอัตราพิสัย (range and range rate system) ซึ่งเป็นการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียมโดยการวัดระยะเวลาที่คลื่นวิทยุเดินทางระหว่างสถานีภาคพื้นดิน กับเครื่องตอบรับสัญญาณซึ่งติดตั้งอยู่บนดาวเทียม ด้วยความถี่คอปเพลอร์ ซึ่งทำให้สามารถวัดระยะทาง

หรือพิสัยและอัตราพิสัยได้ โดยมีความแม่นยำในพิสัยและอัตราพิสัย ประมาณ 2 – 3 เมตรต่อวินาที ความถูกต้องแม่นยำในการกำหนดตำแหน่งจะมีมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับตัวแปรความถี่ สัญญาณ ตำแหน่งของสถานีภาคพื้นดิน ระบบพิกัด ระบบการวัดระยะเวลา การสะท้อนในชั้นโทรโพสเฟียร์ และ ไอโอโนสเฟียร์ เป็นต้น

การกำหนดตำแหน่งของดาวเทียมโดยใช้วิธีพิสัยและอัตราพิสัย ใช้จำกัดเฉพาะดาวเทียมที่อยู่ในตำแหน่งใกล้สถานีภาคพื้นดิน และเป็นการวัดที่ไม่ต่อเนื่อง เพื่อที่จะสามารถบ่งบอกถึงวงโคจรของดาวเทียมในลักษณะฟังก์ชันตามลำดับเวลา ซึ่งจำเป็นที่จะต้องสร้างแบบจำลองขึ้น แบบจำลองดั้งเดิมเป็นแบบเส้นโค้งพาราโบลา ตามทฤษฎี ที่ 3 ของเคปเลอร์ (Third theory of Kepler) ซึ่งจำแนกการเคลื่อนที่ของวัตถุ 2 ชนิดในอวกาศ ภายใต้กฎแรงโน้มถ่วงจักรวาล ที่เรียกว่า ปัญหาการเคลื่อนที่ของวัตถุ 2 ชนิดในอวกาศ (two-body problem) โดยเส้นโค้งพาราโบลาสามารถแสดงได้ด้วย 6 องค์ประกอบของวงโคจรเคปเลอร์ อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริง ยังมีอิทธิพลของดาวเคราะห์ดวงอื่นๆ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนจากเส้นโค้งพาราโบลา ซึ่งเรียกว่า ภาวะแปรปรวน (perturbation)



ก) กำหนดตำแหน่งโดย GPS

ข) การวัดพิสัยและอัตราพิสัยจากสถานีพื้นดิน

### รูปที่ 2.13 วิธีการวัดตำแหน่งดาวเทียม

มีวิธีการ 2 วิธีในการหาความเที่ยงตรงสำหรับปัญหาการเคลื่อนที่ของวัตถุ  $n$  ชนิดในอวกาศ ( $n > 2$ ) ได้แก่ การคำนวณแบบอินทิเกรตเชิงตัวเลข ซึ่งมีความแม่นยำสูง แต่ต้องใช้เวลามาก และวิธีวิเคราะห์ซึ่งมีความแม่นยำน้อยกว่า วิธีแรก แต่ใช้เวลาคำนวณเร็วกว่า

จะมีการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียมในวงโคจรในทุกช่วงเวลาที่ยาวนานขึ้น ซึ่งจะสามารถหาวงโคจร ณ เวลาหนึ่งๆ ได้จากการประมาณค่าในช่วงซึ่งจะมีการแบ่งเวลาโคจรของดาวเทียมด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด สำหรับค่าโพลีโนเมียลลำดับสูง หรือโดยวิธีประมาณค่าในช่วงแบบลากรานจ์ (Lagrange's interpolation method)

## 2.10 ดาวเทียมสำรวจจากระยะไกล

ดาวเทียมที่ติดตั้งเครื่องวัดจากระยะไกลเพื่อสำรวจพื้นโลก เรียกว่าดาวเทียมสำรวจจากระยะไกล หรือดาวเทียมสำรวจโลก สำหรับดาวเทียมอูดุณิยมนิยมนั้น บางครั้งถูกจัดประเภทแยกต่างหากจากดาวเทียมสำรวจระยะไกลอื่นๆ

ดาวเทียมสำรวจจากระยะไกล มีคุณลักษณะพิเศษจำเพาะที่แตกต่างกันตามลักษณะวงโคจร ระดับความสูงและลักษณะเครื่องวัด วัตถุประสงค์หลักของดาวเทียมอูดุณิยมนิยมนิยมนั้น บางครั้งถูกจัดประเภทแยกต่างหากจากดาวเทียมสำรวจระยะไกลอื่นๆ

ดาวเทียมสำรวจจากระยะไกล มีคุณลักษณะพิเศษจำเพาะที่แตกต่างกันตามลักษณะวงโคจร ระดับความสูงและลักษณะเครื่องวัด วัตถุประสงค์หลักของดาวเทียมอูดุณิยมนิยมนิยมนั้น บางครั้งถูกจัดประเภทแยกต่างหากจากดาวเทียมสำรวจระยะไกลอื่นๆ

GMS ซึ่งโคจรในระดับความสูง 36000 กิโลเมตร คือเพื่อการสำรวจทางด้านอูดุณิยมนิยมนิยมนั้น บางครั้งถูกจัดประเภทแยกต่างหากจากดาวเทียมสำรวจระยะไกลอื่นๆ

ที่ดาวเทียม LANDSAT ซึ่งมีวงโคจรผ่านขั้วโลก ที่ระดับความสูงประมาณ 700 กิโลเมตร มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อสำรวจพื้นแผ่นดิน ดาวเทียม NOAA โคจรสูง 850 กิโลเมตร แบบวงโคจรผ่านขั้วโลก ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในการสำรวจทางอูดุณิยมนิยมนิยมนั้น บางครั้งถูกจัดประเภทแยกต่างหากจากดาวเทียมสำรวจระยะไกลอื่นๆ

แต่ก็สามารถใช้ในการสำรวจติดตามด้านพืชพรรณได้เป็นอย่างดีด้วย

ในอนาคต ดาวเทียมสำรวจจากระยะไกล จะมีสัมภาระบรรทุกของดาวเทียมขนาดใหญ่ ประกอบด้วยเครื่องวัดหลายประเภท เพื่อใช้งานในลักษณะเอนกประสงค์ ดังเช่นในโครงการยานสำรวจวงโคจรผ่านขั้วโลก (polar orbit platform; POP) ภายใต้ความร่วมมือระหว่างประเทศของสหรัฐอเมริกา กลุ่มประชาคมยุโรป ญี่ปุ่น และแคนาดา นอกจากนี้แล้วยังจะมีโครงการพิเศษเฉพาะเรื่อง ซึ่งใช้ดาวเทียมขนาดเล็ก เพิ่มจำนวนมากขึ้นในอนาคตอีกด้วย

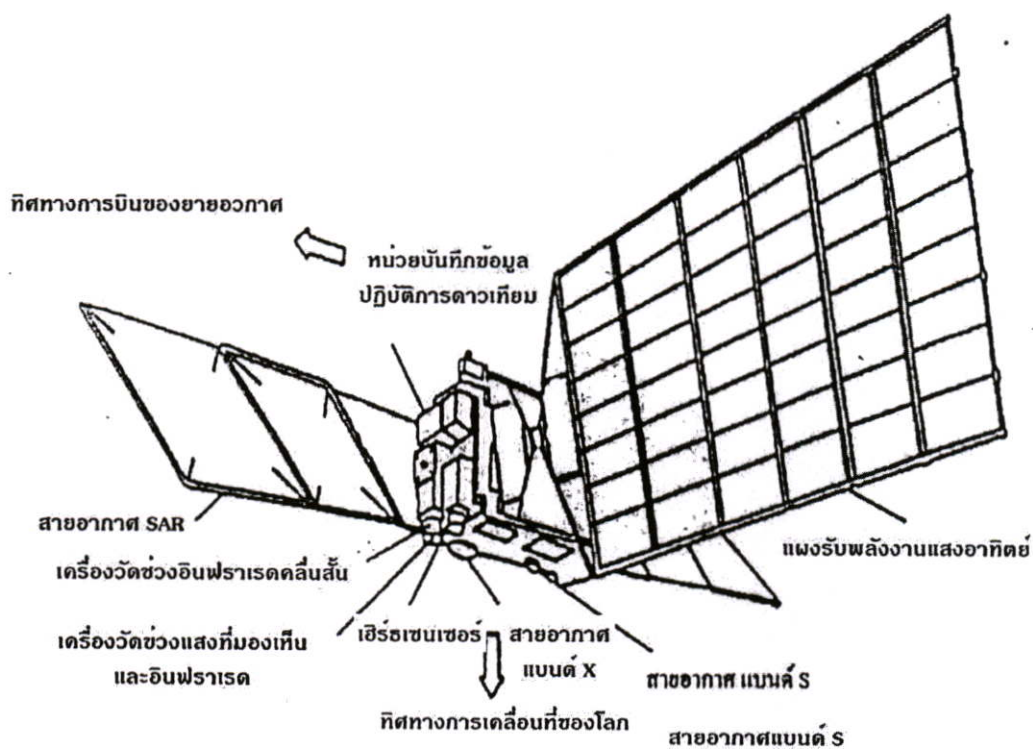
ระบบดาวเทียมสำรวจจากระยะไกล ประกอบด้วย 3 ระบบหลักที่สำคัญ ดังนี้

- ก. ระบบติดตามและควบคุม เช่นการหาวงโคจรดาวเทียม ควบคุมวงโคจร ดำเนินกรรมวิธีโปรแกรมแม่บ้าน
- ข. ระบบควบคุมการปฏิบัติงาน เช่น วางแผนการปฏิบัติของดาวเทียม ประเมินผลข้อมูลจากการสำรวจฐานข้อมูล
- ค. ระบบรับข้อมูล เช่นการรับสัญญาณ การบันทึกสัญญาณ กรรมวิธีข้อมูล การเก็บและการแจกจ่ายข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ

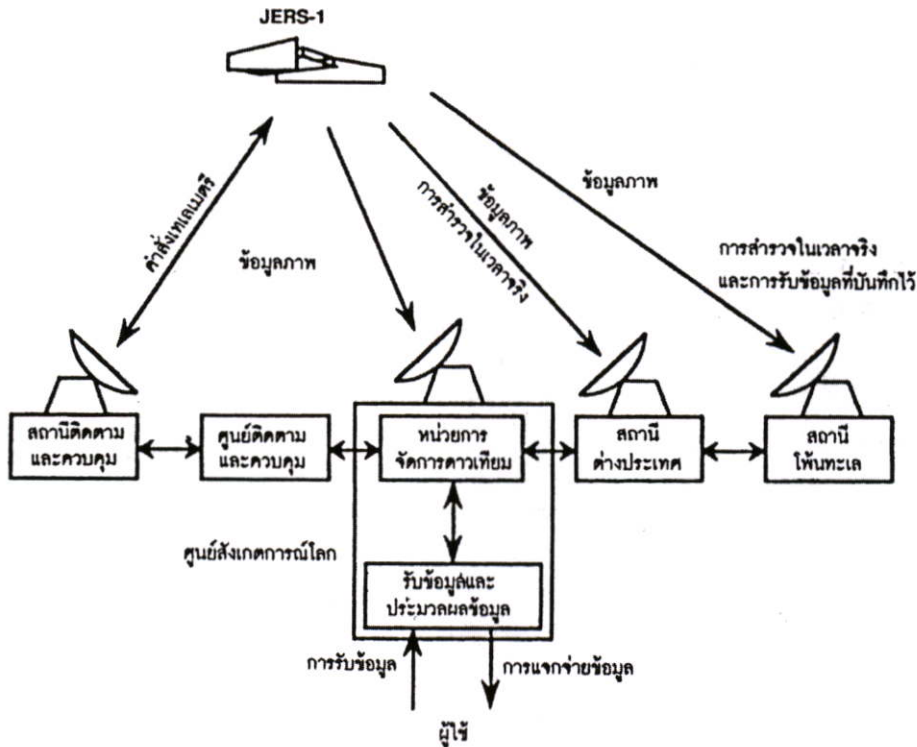
### ดาวเทียม JERS-1

ดาวเทียม JERS-1 เป็นดาวเทียมที่พัฒนาโดยประเทศญี่ปุ่น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการสำรวจแหล่งแร่และพลังงาน ตลอดจนทรัพยากรและสภาพแวดล้อม ด้วยการโคจรในลักษณะสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ที่ระดับความสูง 568 กิโลเมตร โดยอุปกรณ์สำรวจมีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบ คือ ระบบ SAR ซึ่งถ่ายภาพที่ความถี่ 1,275 เมกะเฮิรตซ์ ด้วยรายละเอียด 18 เมตรและแนวถ่ายภาพกว้าง 75 กิโลเมตร และระบบ OPS (Optical Sensor) ซึ่งถ่ายภาพในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นถึงอินฟราเรดใกล้ 3 ช่วงคลื่น และช่วงคลื่นอินฟราเรดความยาวคลื่นสั้นอีก 4 ช่วงคลื่น นอกจากนี้ ยังมีความสามารถในการถ่ายภาพในลักษณะ 3 มิติ อีก 1 ช่วงคลื่น ภาพเหล่านี้มีแนวถ่ายภาพกว้าง 75 กิโลเมตร และ

รายละเอียดภาพประมาณ 18 เมตร X 24 เมตร รูปที่ 2.14 แสดงดาวเทียมสำรวจโลก JERS-1 ของประเทศญี่ปุ่น (Japanese Earth Resources Satellite-1; JERS-1) ซึ่งมีอุปกรณ์วัดระบบ SAR , Visible and Near Infrared Radiometer(VNIR) และ Short Wavelength Infrared Radiometer (SWIR)



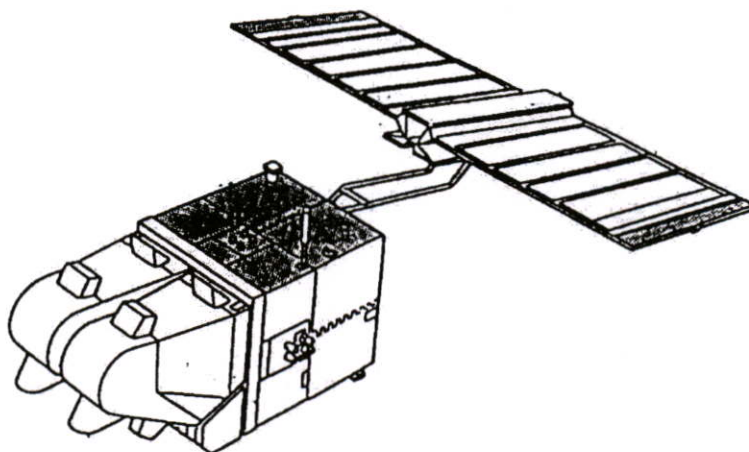
รูปที่ 2.14 ดาวเทียม JERS-1 ของญี่ปุ่น



รูปที่ 2.15 องค์ประกอบหลักของระบบดาวเทียม JERS-1

### ดาวเทียม SPOT

ดาวเทียม SPOT ของประเทศฝรั่งเศสดวงแรกถูกส่งขึ้นโคจรเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ 2529 และดวงที่ 2 เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ 2533 ซึ่งปัจจุบันกำลังปฏิบัติงานอยู่ ส่วนดวงที่ 3 ส่งขึ้นเมื่อเดือนกันยายน 2536 ระบบบันทึกภาพของดาวเทียม SPOT เป็นกล้อง HRV (High Resolution Visible) สองตัว ซึ่งสามารถปรับมุมมองให้ถ่ายภาพคู่สเตอริโอและภาพเฉียงได้ รูปที่ 2.16 แสดงรูปร่างของดาวเทียม SPOT

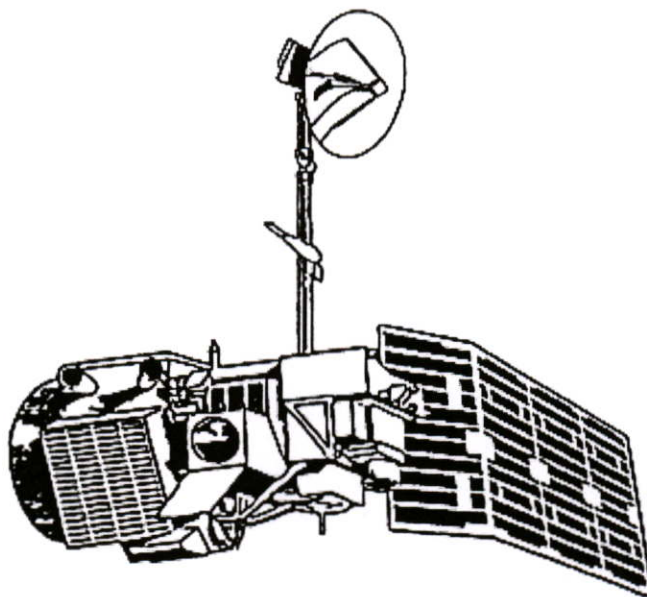


รูปที่ 2.16 แสดงรูปร่างของดาวเทียม SPOT

ดาวเทียม SPOT มีวงโคจรแบบสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ และกึ่งหมุนเวียนกลับมาที่เดิม การโคจรกลับมาที่เดิมทุก 26 วัน หรือ 4-5 วัน ถ้าถ่ายภาพในแนวเฉียง ข้อมูลจากดาวเทียม SPOT รับผิดชอบที่สถานีภาคพื้นดิน โดยการใช้งานดาวเทียม SPOT นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจพื้นแผ่นดิน และการทำแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 และมาตราส่วนที่เล็กกว่า

#### ดาวเทียม LANDSAT

ดาวเทียม LANDSAT-1 ถูกส่งขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2515 โดยประเทศสหรัฐอเมริกา นับเป็นดาวเทียมสำรวจโลกดวงแรกของโลก และเป็นจุดเริ่มต้นของความก้าวหน้าทางการสำรวจจากระยะไกล จนปัจจุบันได้มีการส่งดาวเทียม LANDSAT ไปแล้วรวมทั้งสิ้น 5 ดวง โดยขณะนี้เฉพาะ LANDSAT-5 เท่านั้นที่ยังคงปฏิบัติงานอยู่



รูปที่ 2.17 แสดงรูปร่างของดาวเทียม LANDSAT-4 และ 5

ก. วงโคจร

โคจรสูง 705 กิโลเมตร เอียง 98 องศา

วงโคจรแบบสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์และกึ่งหมุนเวียนกลับมาที่เดิม

โคจรผ่านเส้นศูนย์สูตรเวลา 09 : 39 น.

โคจรกลับมาที่เดิมในเวลา 16 วัน

ความกว้างของแนวภาพถ่าย 185 กิโลเมตร

ข. เครื่องวัด (กล้องบันทึกภาพ)

(1) MSS (Multi Spectral Scanner)

(2) TM (Thematic Mapper)

เครื่องมือวัดทั้งสองเป็นเครื่องกวาดภาพแบบกลเชิงแสง

ตารางที่ 2.7 และ 2.8 แสดงแบนด์ต่างๆ ของความยาวคลื่น และรายละเอียดภาพของ MSS และ TM ส่วนดาวเทียม LANDSAT-6 จะมีเฉพาะระบบ ETM (Enhanced Thematic Mapper) ซึ่งถ่ายภาพแบบแพนโครมาติก ด้วยรายละเอียด 15 เมตร

ค. ข้อมูล

ข้อมูล MSS และ TM จะอยู่ในลักษณะเป็นภาพมีขนาด 185 กิโลเมตร X 170 กิโลเมตร แต่ละภาพมีหมายเลขแนว (path) และแถว (row) ตามระบบอ้างอิงโลก (world reference system ; WRS) ตัวอย่างเช่นภาพประเทศไทยทั้งประเทศ ครอบคลุมโดยภาพรวมประมาณ 40 ภาพ ของแนวที่ 125 - 132 และแถวที่ 46 - 57 ข้อมูลภาพจะถูกบันทึกโดยแต่ละจุดภาพมีค่าตัวเลข (V) เป็น 8 บิต (0 - 255) ซึ่งสามารถคำนวณค่าการแผ่รังสีสัมบูรณ์  $R$  ( $mW/cm^2 \cdot sr$ ) โดยสูตรดังนี้

$$R = V \left[ \frac{(R_{\max} - R_{\min})}{D_{\max}} \right] + R_{\min} \quad (2.4)$$

โดย  $R_{\max}$  : ค่าการแผ่รังสีสูงสุด

$R_{\min}$  : ค่าการแผ่รังสีต่ำสุด

$D_{\max}$  : มีค่า 255 สำหรับ TM และมีค่า 127 สำหรับ MSS

ตารางที่ 2.7 และ 2.8 แสดงค่า  $R_{\min}$  และ  $R_{\max}$  ของ TM และ MSS ตามลำดับ ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าคงที่วัดบนดาวเทียม ไม่ใช่วัดบนพื้นดิน เพราะฉะนั้นจึงมีอิทธิพลต่างๆ ของบรรยากาศผนวกอยู่ในค่าการวัดเหล่านี้ด้วย

ง. การใช้ประโยชน์ข้อมูล

สถานีรับสัญญาณดาวเทียม LANDSAT มีอยู่ทั้งหมด 15 สถานีทั่วโลก ซึ่งข้อมูลจะถูกแจกจ่ายให้แก่ผู้ใช้ เพื่อการจัดการทรัพยากร และเฝ้าตรวจสภาวะแวดล้อม

ตารางที่ 2.7 ค่าการแผ่รังสีต่ำสุดและสูงสุดของดาวเทียม LANDSAT ระบบ TM

แบนด์	ค่าเปล่งรังสี ต่ำสุด/สูงสุด	ความกว้างของแบนด์ (ไมโครเมตร)
1	-0.0099/1.004	0.07
2	-0.0227/2.404	0.08
3	-0.0083/1.410	0.06
4	-0.0194/2.660	0.14
5	-0.00799/0.5873	0.20
6	-0.00375/0.3595	2.10
7	0.1534/1.896	0.27

(หน่วย  $\text{mW/cm}^2 \cdot \text{sr}$ )

ตารางที่ 2.8 ค่าการแผ่รังสีต่ำสุดและสูงสุดของดาวเทียม LANDSAT ระบบ MSS

แบนด์	LANDSAT-2	LANDSAT-3	LANDSAT-4	LANDSAT-5	ความกว้าง (ไมโครเมตร)
4	0.08/2.63	0.04/2.50	0.04/2.38	0.04/2.38	0.1
5	0.06/1.76	0.03/2.00	0.04/1.64	0.04/1.64	0.1
6	0.06/1.52	0.03/1.65	0.05/1.42	0.05/1.42	0.1
7	0.11/3.91	0.03/4.50	0.12/3.49	0.04/2.38	0.3

(หน่วย  $\text{mW/cm}^2 \cdot \text{sr}$ )

### ดาวเทียม SPOT

ดาวเทียม SPOT ของประเทศฝรั่งเศสดวงแรกถูกส่งขึ้นโคจรเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ 2529 และดวงที่ 2 เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ 2533 ซึ่งปัจจุบันกำลังปฏิบัติงานอยู่ ส่วนดวงที่ 3 ส่งขึ้นเมื่อเดือนกันยายน 2536 ระบบบันทึกภาพของดาวเทียม SPOT เป็นกล้อง HRV ( High Resolution Visible ) สองตัว ซึ่งสามารถปรับมุมมองให้ถ่ายภาพคู่สเตอริโอและภาพเฉียงได้ รูปที่ 2.16 แสดงรูปร่างของดาวเทียม SPOT

#### ก. วงโคจร

โคจรสูง 830 กิโลเมตร เอียง 98.7 องศา

โคจรแบบสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ และกึ่งหมุนเวียนกลับมาที่เดิม

โคจรผ่านเส้นศูนย์สูตรเวลา 10:30 น.

โคจรกลับมาที่เดิมทุก 26 วัน หรือ 4-5 วัน ถ้าถ่ายภาพในแนวเอียง

#### ข. เครื่องวัด

ระบบ HRV ไม่ใช่เครื่องวัดแบบกลเชิงแสง แต่เป็นกล้องถ่ายภาพซีซีดีเชิงเส้น (Linear CCD) ที่มีระบบกวาดภาพแบบอิเล็กทรอนิกส์

กล้อง HRV สามารถเปลี่ยนมุมมองสูงสุดได้ 27 องศา โดยการเปลี่ยนมุมมองของกระจกทำให้กล้องสามารถมองมายังตำแหน่งเดียวกันได้จากสองวงโคจร แต่ละมุมมองทำให้ได้ภาพคู่สเตอริโอ โดยมีอัตราส่วนเส้นฐานต่อความสูง ( B/H ratio ) มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งสามารถวัดความสูงของภูมิประเทศได้

#### ค. ข้อมูล

ภาพจากกล้อง HRV ในแนวตั้งล่างครอบคลุมพื้นที่ 60 กิโลเมตร X 60 กิโลเมตร ในขณะที่ภาพเฉียงที่มุมมองสูงสุด ครอบคลุมพื้นที่ 81 กิโลเมตร X 81 กิโลเมตร ภาพแต่ละภาพจึงมีรหัสกำหนดด้วยหมายเลขแนว K และแถว J ตามระบบอ้างอิงกริดของ SPOT ( Grid reference system ; GRS) ภาพที่มองในแนวตั้งล่างจะมีจุดศูนย์กลางกำหนดด้วย K ที่เป็นเลขคู่สำหรับกล้อง HRV ตัวแรก ส่วนภาพถ่ายในแนวเฉียง จุดที่อยู่ใกล้ศูนย์กลางที่สุดจะถือเป็นจุดศูนย์กลางภาพ

#### ง. การใช้ประโยชน์ข้อมูล

ข้อมูลจากดาวเทียม SPOT รับผิดชอบที่สถานีภาคพื้นดิน 14 แห่ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจพื้นแผ่นดิน และการทำแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1 : 50,000 และมาตราส่วนที่เล็กกว่า

ภาพถ่ายดาวเทียม SPOT แพนโครมาติกรายละเอียด 10 เมตร และภาพถ่ายดาวเทียม LANDSAT ระบบ TM รายละเอียด 30 เมตร เมื่อนำมาผสมกันเป็นภาพสีผสมจะทำให้ได้รายละเอียดสำหรับการแปลภาพดีขึ้น นอกจากนี้มักจะมีการนำภาพถ่ายจากดาวเทียม SPOT ระบบหลายช่วงคลื่นและแพนโครมาติกมาซ้อนกันทำให้ช่วยในการแปลภาพ

### ดาวเทียม NOAA

ชุดดาวเทียม NOAA เป็นดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา รุ่นที่ 3 ขององค์การบริหารสมุทรศาสตร์และบรรยากาศแห่งชาติ (National Oceanic and Atmospheric Administration ; NOAA) ของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยดาวเทียมรุ่นแรกได้แก่ ชุดดาวเทียม TIROS (ระหว่างปี 2503-2508) รุ่นที่ 2 คือ ชุดดาวเทียม ITOS (ระหว่างปี 2513-2519) และชุดดาวเทียม NOAA เป็นรุ่นที่ 3

ดาวเทียม NOAA มีวงโคจร แบบสัมพันธ์ กับดวงอาทิตย์ NOAA-1 โคจรสูง 870 กิโลเมตร เอียง 98.7 องศา ส่วน NOAA-12 โคจรสูง 833 กิโลเมตร เอียง 98.9 องศา การโคจรรอบหนึ่งรอบใช้เวลา 101.4 นาที

ดาวเทียม NOAA เป็นดาวเทียม สำรวจอุตุนิยมวิทยาเชิงปฏิบัติการ ซึ่งปัจจุบันดาวเทียม NOAA-11 และ 12 กำลังปฏิบัติการกิจ โดยสามารถสังเกตการณ์บริเวณเดิม 2 ครั้งต่อวัน คือ กลางวัน และ กลางคืน ดังนั้น ดาวเทียม NOAA สองดวง จึงสามารถผ่านพื้นที่เดิม 4 ครั้ง ต่อวัน

เครื่องวัดบนดาวเทียม NOAA ได้แก่ AVHRR/2 (Advanced Very High Resolution Radiometer Model 2) มีแนวถ่ายภาพ 2800 กิโลเมตร และรายละเอียดภาพ IFOV 1.1 กิโลเมตร TOVS (TIROS operational vertical sounder) รวมทั้ง HIRS/2 (High Resolution Infrared Sounder; model 2) ที่มีรายละเอียดภาพ 20 กิโลเมตร และแนวถ่ายภาพ 2200 กิโลเมตร SSU (Stratospheric Sounding Unit) รายละเอียด 147 กิโลเมตร แนวถ่ายภาพ 736 กิโลเมตร และ MSU (Microwave Sounding Unit) รายละเอียดภาพ 110 กิโลเมตร แนวถ่ายภาพ 2347 กิโลเมตร

### ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาวงโคจรค้างฟ้า

ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาวงโคจรค้างฟ้า (Geostationary meteorological satellite) ถูกส่งขึ้นโคจรภายใต้โครงการเฝ้าตรวจอากาศโลก (World Weather Watch: WWW) ขององค์การอุตุนิยมวิทยาโลก ที่ครอบคลุมทั่วโลกด้วยดาวเทียม 5 ดวง ได้แก่ ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาวงโคจรค้างฟ้าขององค์การอวกาศยุโรป METEOSAT ดาวเทียม INSAT ของประเทศอินเดีย ดาวเทียม GMS ของประเทศญี่ปุ่น และดาวเทียม GOES-E และ GOES-W ของประเทศสหรัฐอเมริกา

ปี 2534 ดาวเทียมที่ปฏิบัติการกิจ ได้แก่ ดาวเทียม METEOSAT-5 ดาวเทียม INSAT-1D ดาวเทียม GMS-4 และดาวเทียม GOES-7

ดาวเทียม GMS-4 มีเครื่องวัดที่เรียกว่า เครื่องกวาดสัญญาณช่วงแสงที่ตามองเห็น และอินฟราเรดใกล้ (Visible and Infrared Spain Scan Radiometer) ประกอบด้วย 2 แบนด์ คือ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็น และอินฟราเรดความร้อน โดยการกวาดจำนวน 4 เส้นในช่วงแสงที่ตามองเห็น และ 1 เส้นในช่วงคลื่นความร้อนไปพร้อมๆ กัน จากเหนือลงใต้ซึ่งใช้เวลา 25 นาที ครอบคลุมครึ่งโลก

ดาวเทียม GMS มีสถานีเก็บข้อมูล (Data collection platform: DCP) ซึ่งเป็นระบบเก็บข้อมูลต่างๆ ทั้งจากพื้นดินและในทะเล ข้อมูลภาพถูกส่งไปยังสถานีภาคพื้นดินด้วยสัญญาณรายละเอียดสูงโดย S-VISSR ตลอดจนรายละเอียดค่าแบบ WEFAX ซึ่งสามารถรับได้ด้วยเครื่องรับแบบธรรมดา

และราคาถูก ข้อมูลสถิติต่างๆ เช่น ฮิสโตแกรม ปริมาตรเมฆ อุณหภูมิผิวน้ำทะเล การกระจายของลม และอื่นๆ ได้รับการบันทึกเก็บรวบรวมไว้ในระบบเก็บข้อมูลพร้อมด้วยชุดข้อมูล ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project)

### ยานสำรวจวงโคจรผ่านขั้วโลก

ยานสำรวจวงโคจรผ่านขั้วโลก หรือเรียกว่า POP (Polar Orbit Platform) เป็นระบบที่ออกแบบขึ้นเพื่อมีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทางอวกาศ เพื่อประโยชน์แบบเอนกประสงค์อย่างยาวนาน โดยประกอบด้วยเครื่องวัดหลายแบบเมื่อเปรียบเทียบกับดาวเทียมที่มีอยู่ในปัจจุบันที่มีข้อจำกัดด้านเวลาและวัตถุประสงค์

POP ประกอบด้วยสถานีอวกาศหลัก กระจายอวกาศ และยานติดต่อกายในวงโคจร ซึ่งเอื้ออำนวยต่อการแลกเปลี่ยนอุปกรณ์ และการซ่อมบำรุง

ยานสำรวจ POP ทำด้วยโครงสร้างชุดอุปกรณ์ ซึ่งประกอบด้วยหน่วยทดแทนวงโคจร (ORU-Orbital Replacement Unit) สำหรับการเปลี่ยนชิ้นส่วนและแบตเตอรี่ ด้วยฟังก์ชันดังกล่าว ระบบ POP จึงมีขนาดและสัมภาระบรรทุกใหญ่ แต่จะมีอายุการทำงานยาวนาน

ดาวเทียม ADEOS (Advanced Earth Observation Satellite) ของประเทศ ไม่ใช่ระบบ POP แต่ถูกออกแบบเป็นขยสำรวจ ในอนาคตสำหรับดาวเทียมสำรวจโลกที่มีระบบถ่ายทอดข้อมูล ดาวเทียม ADEOS ประกอบด้วยเครื่องวัดหลายชนิด ได้แก่ OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner) ขององค์การ NASDA AVNIR (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer) และเครื่องวัด AO (Applications of Opportunity) อาทิ NSCAT, TOMS, IMG, POLDER และ ILAS

ปัจจุบัน โครงการสถานีอวกาศเกิดความล่าช้า และเปลี่ยนเป็นระบบขนาดเล็กลง โดยไม่มีการบริการซ่อมในวงโคจร ตัวอย่างเช่น NASA EOS-a และ b, ESA POEM-1 และ 2 ซึ่งจะถูกส่งขึ้นไปเพื่อใช้ในการเฝ้าตรวจสิ่งแวดล้อมโลก

## บทที่ 3

# ความผิดเพี้ยนบนภาพสัญญาณดาวเทียม

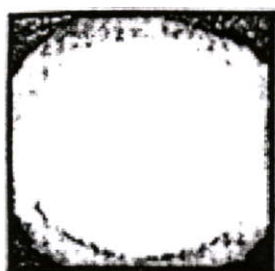
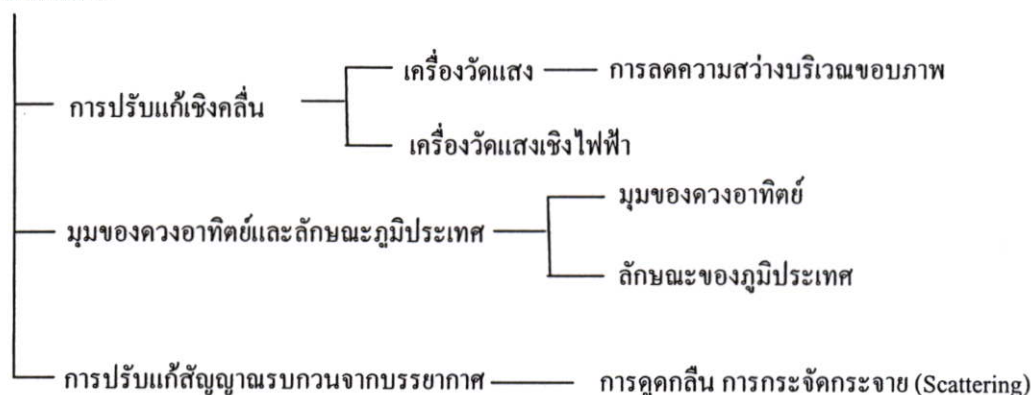
### 3.1 ความผิดเพี้ยนบนภาพถ่ายดาวเทียม

ภาพทุก ๆ ภาพจะมีทั้งความผิดพลาดเชิงคลื่น และความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต ซึ่งค่าความผิดพลาดเหล่านี้ต้องได้รับการปรับแก้ การปรับแก้เชิงคลื่น (Radiometric correction) นั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดหรือความเพี้ยนเชิงคลื่น ในขณะที่การปรับแก้เชิงเรขาคณิตนั้นเป็นการขจัดความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ในบทนี้จะเป็นการพิจารณาถึงธรรมชาติของความเพี้ยนเชิงคลื่น และความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตของข้อมูลภาพจากการสำรวจระยะไกล โดยอุปกรณ์บันทึกภาพบนดาวเทียมที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการเก็บรวบรวมข้อมูลภาพด้วยอุปกรณ์ตรวจจับบนดาวเทียม โดยจะอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดความเพี้ยนของทั้ง 2 กรณี รวมทั้งกระบวนการปรับแก้ค่าความเพี้ยนที่เกิดขึ้นกับข้อมูลภาพทั้งความเพี้ยนเชิงคลื่น และความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต เมื่อใดก็ตามที่มีการบันทึกข้อมูลผ่านอุปกรณ์ตรวจจับภาพที่อยู่บนดาวเทียม หรือเครื่องบินสำรวจระยะไกล ในขณะเดียวกัน อุปกรณ์ตรวจจับนั้นจะเก็บค่าความผิดพลาดต่างๆ เป็นเหตุให้เกิดความเพี้ยนเชิงคลื่น อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศ (Atmosphere) และสัญญาณรบกวนต่างๆ ที่เกิดขึ้นขณะนั้น รวมถึงความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่สามารถเกิดขึ้นได้หลายทาง ทั้งนี้เกิดจาก การเคลื่อนที่ของดาวเทียม เครื่องกวาดหรือสแกนเนอร์(Scanner) และส่วนโค้งของโลก

### 3.2 ความเพี้ยนเชิงคลื่น (Radiometric Distortion)

ความเพี้ยนเชิงคลื่นเป็นความผิดพลาดที่เกี่ยวข้องกับ คลื่นความถี่ที่ถูกส่งออกจากอุปกรณ์เครื่องส่งบนดาวเทียมหรือยานสำรวจไปยังวัตถุต่างๆ ที่ต้องการบนพื้นผิวโลก และคลื่นความถี่ดังกล่าวก็จะสะท้อนกลับมายังเครื่องวัดบนยานสำรวจในลักษณะที่มีความผิดพลาดไปจากที่ควรจะเป็นตามความจริง ซึ่งลักษณะของความเพี้ยนเชิงคลื่นเป็นสาเหตุให้เกิดความผิดพลาดต่างในข้อมูลภาพ ดังตัวอย่างเช่น ความเข้มของการกระจายคลื่นที่ไม่เหมาะสม การกรองความถี่เชิงพื้นที่ของข้อมูลภาพ รอยดำหนึบบนภาพ หรือแถบของข้อมูลภาพและอื่นๆ ความผิดพลาดดังกล่าวเนื่องมาจาก สาเหตุการเปลี่ยนแปลงเกณฑ์ของเครื่องวัด ชั้นบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงและตัวกรองความถี่ของอุปกรณ์ตรวจวัด ความบกพร่องของอุปกรณ์ตรวจวัด ความผิดพลาดที่เกณฑ์ของอุปกรณ์ตรวจวัดในเครื่องวัด ตัวอย่างของความเพี้ยนเชิงคลื่นส่วนหนึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

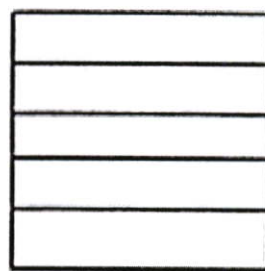
## การปรับแก้เชิงคลื่น



เงาของภาพ



รอยตำหนิบนภาพ



แถบภาพ

รูปที่ 3.1 ลักษณะตัวอย่างภาพที่เกิดจากความเพี้ยนเชิงคลื่น

## 3.3 การปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่น

ในขณะที่ภาพถ่ายดาวเทียมทุกภาพอาจจะมีทั้งความเพี้ยนเชิงคลื่นและความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต สิ่งใดสิ่งหนึ่งหรืออาจจะมีทั้งสองสิ่งหรืออาจจะไม่ปรากฏอยู่ก็ได้ ซึ่งค่าความผิดพลาดเหล่านี้ต้องได้รับการปรับแก้เพื่อที่จะสามารถแสดงผลได้ถูกต้อง ในเมื่อการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่น (Radiometric correction) นั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดหรือความเพี้ยนเชิงคลื่นที่จะทำให้ข้อมูลภาพที่แสดงไม่สมบูรณ์ เช่น เกิดรอยตำหนิหรือเงาที่ไม่พึงประสงค์แสดงอยู่บนภาพ ในขณะที่การปรับแก้เชิงเรขาคณิตนั้นเป็นการขจัดค่าความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่ทำให้ข้อมูลภาพแสดงผิดรูปร่างไปจากที่ควร

จากพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปล่งออกหรือสะท้อนกลับของวัตถุ จะถูกวัดโดยเครื่องวัดที่ติดตั้งไว้บนอากาศยานหรือยานอวกาศ พลังงานที่วัดได้นั้นจะไม่เหมือนกับพลังงานที่เปล่งหรือสะท้อนกลับจากวัตถุเดียวกัน เมื่อเทียบกับการวัดจากระยะใกล้ เนื่องมาจากมุมทิศ (azimuth) และมุมยก (elevation) ของดวงอาทิตย์ สภาพบรรยากาศ เช่น หมอก หรือ ละอองลอย การตอบสนองของเครื่องวัด เป็นต้น ซึ่งมีอิทธิพลกับพลังงานที่วัดได้ ดังนั้น เพื่อที่จะได้ค่าพลังงานรังสีตกกระทบ หรือค่าการสะท้อนที่แท้จริง จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้เชิงคลื่นเหล่านั้น

การจำแนกการปรับแก้เชิงคลื่น ออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

### 3.3.1 การปรับแก้เชิงคลื่นของผลเนื่องจากความไวของเครื่องวัด

ในกรณีของเครื่องวัดเชิงแสงที่ใช้เลนส์นั้น บริเวณขอบตรงมุมของภาพจะมีค่าน้อยกว่าบริเวณกลางภาพ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การลดความสว่างบริเวณขอบภาพ (vignetting) การลดความสว่างบริเวณขอบภาพ สามารถแสดงโดย  $\cos^2 \theta$  โดยที่  $\theta$  คือ มุมของแสงเมื่อเทียบกับแกนของระบบแสง (optical axis) และ  $n$  ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเลนส์ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เป็น 4 ในกรณีของเครื่องวัดแสงเชิงไฟฟ้า (electro-optical sensor) มีการวัดข้อมูลปรับเทียบระหว่างค่าพลังงานรังสีตกกระทบ และสัญญาณข้อมูลขาออกของเครื่องวัด ซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับการปรับแก้เชิงคลื่นได้

### 3.3.2 การปรับแก้เชิงคลื่นสำหรับมุมของดวงอาทิตย์และลักษณะภูมิประเทศ

#### ก. จุดแสงอาทิตย์

รังสีสุริยะจะถูกสะท้อนกลับอย่างกระจายบนผิวพื้นดิน ซึ่งมีผลทำให้เกิดบริเวณที่สว่างกว่าในภาพที่เรียกว่า จุดแสงอาทิตย์ (sun spot) ผลที่เกิดจากจุดแสงอาทิตย์รวมกับการลดความสว่างบริเวณขอบภาพสามารถปรับแก้ได้โดยการประมาณเส้นโค้งแรเงา (shading curve) ซึ่งหาได้จากการวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ (fourier analysis) เพื่อสกัดค่าองค์ประกอบความถี่ต่ำ (low frequency component)

#### ข. การแรเงา

การเกิดการแรเงา (shading) เนื่องจากความสูงต่างของภูมิประเทศ สามารถปรับแก้ได้โดยใช้มุมระหว่างทิศทางของรังสีสุริยะ และเวกเตอร์ตั้งฉากกับผิวดิน

### 3.3.3 การปรับแก้สัญญาณรบกวนจากบรรยากาศ

อิทธิพลต่างๆ ของบรรยากาศก็เป็นสาเหตุให้เกิดการดูดกลืน และการกระจัดกระจายของรังสีสุริยะ จึงควรที่จะปรับแก้คลื่นที่สะท้อนกลับหรือเปล่งออกจากวัตถุ ตลอดจนค่าการกระจายแสงในเส้นทางผ่าน (path radiance) รังสีจะถูกดูดกลืนหรือกระจัดกระจายโดยบรรยากาศ ระหว่างการเดินทางสู่ผิวดิน ในขณะที่พลังงานที่สะท้อนหรือเปล่งออกจากวัตถุเป้าหมาย ก็จะถูกดูดกลืนหรือกระจัดกระจายโดยบรรยากาศก่อนที่จะถึงเครื่องวัด ผิวดินไม่เพียงแต่ได้รับรังสีสุริยะโดยตรงเท่านั้น แต่ยังได้รับแสงจากท้องฟ้า หรือคลื่นที่กระจัดกระจายจากบรรยากาศอีกด้วย ในทำนองเดียวกันเครื่องวัดได้รับไม่เพียงแต่คลื่นที่สะท้อนหรือเปล่งออกโดยตรงจากวัตถุเป้าหมายเท่านั้น ยังได้รับคลื่นที่กระจัดกระจายจากวัตถุเป้าหมาย และคลื่นที่กระจัดกระจายจากบรรยากาศอีกด้วย ที่เรียกว่า การกระจายแสงในเส้นทางผ่าน การปรับแก้สัญญาณรบกวนจากบรรยากาศก็เพื่อขจัดผลต่างๆ เหล่านี้ การปรับแก้สัญญาณรบกวนจากบรรยากาศนั้นสามารถแบ่งได้เป็น วิธีการที่ใช้สมการถ่ายเทรังสี วิธีการที่ใช้ข้อมูลจริงภาคพื้นดิน และวิธีการอื่นๆ

### ก. วิธีการที่ใช้สมการถ่ายเทรังสี

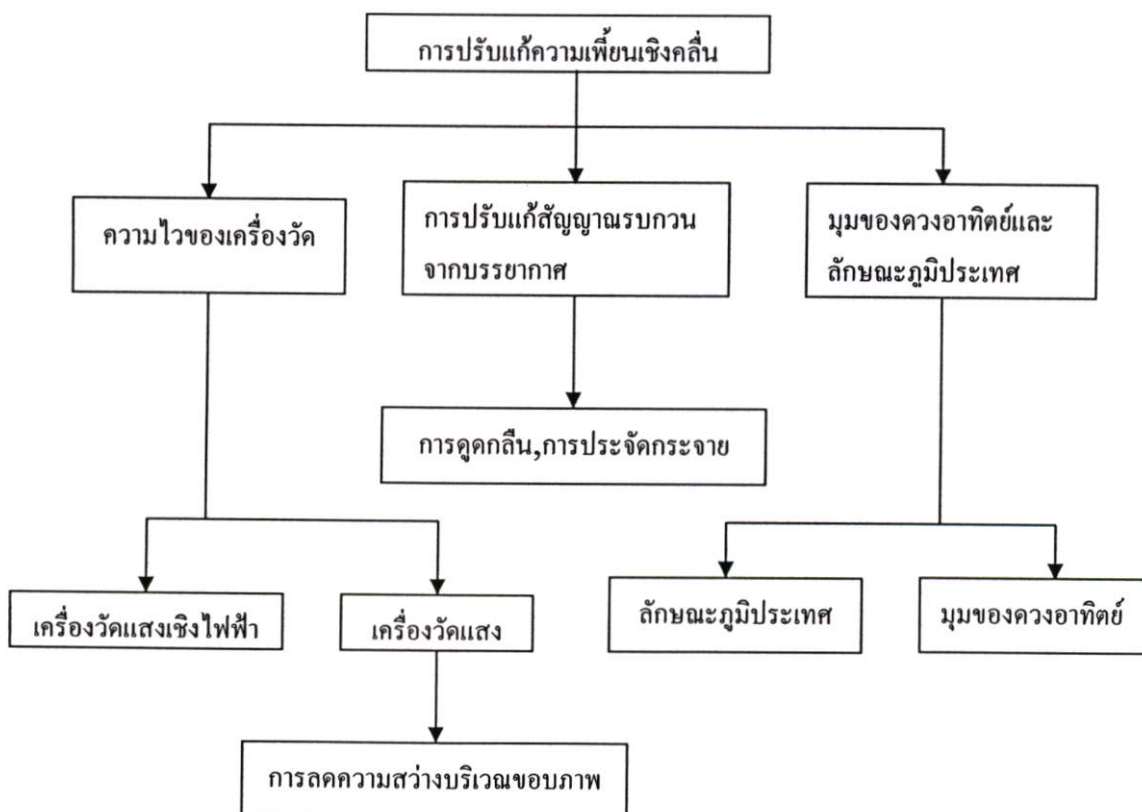
โดยปกติแล้วผลลัพธ์โดยประมาณจะถูกกำหนดขึ้นสำหรับ สมการถ่ายเทรังสี (radiative transfer equation) สำหรับการปรับแก้สัญญาณรบกวนจากบรรยากาศนั้น จะต้องทำการประมาณค่าความหนาแน่นของละอองลอย ในช่วงคลื่นแสงที่ตามองเห็นและอินฟราเรดใกล้ และความหนาแน่นของไอน้ำ (water vapor) ในช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อน เนื่องจากค่าเหล่านี้ไม่สามารถหาจากข้อมูลภาพได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่แน่นอนได้

### ข. วิธีการที่ใช้ข้อมูลจริงภาคพื้นดิน

ณ เวลาที่ถ่ายภาพ จะมีการกำหนดวัตถุเป้าหมายในภาพที่ทราบค่าการสะท้อนหรือที่ทำการวัดค่าการสะท้อนพร้อมๆการถ่ายภาพ การปรับแก้สัญญาณรบกวนจากบรรยากาศสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าพลังงานสะท้อนกลับที่ทราบมาแล้วของวัตถุเป้าหมายกับข้อมูลภาพ (สัญญาณขาออก) แต่วิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้กับพื้นที่ที่ทดลองเฉพาะที่มีวัตถุเป้าหมายหรือในจุดเฉพาะเท่านั้น

### ค. วิธีการอื่นๆ

เครื่องวัดชนิดพิเศษเพื่อวัดความหนาแน่นของละอองลอยหรือความหนาแน่นของไอน้ำจะนำมาใช้ร่วมกับเครื่องถ่ายภาพ สำหรับการปรับแก้สัญญาณรบกวนจากบรรยากาศ ตัวอย่างเช่น ดาวเทียม NOAA ไม่ได้มีเพียงเครื่องถ่ายภาพระบบ AVHRR แต่มีระบบ HIRS สำหรับการปรับแก้สัญญาณรบกวนจากบรรยากาศอีกด้วย

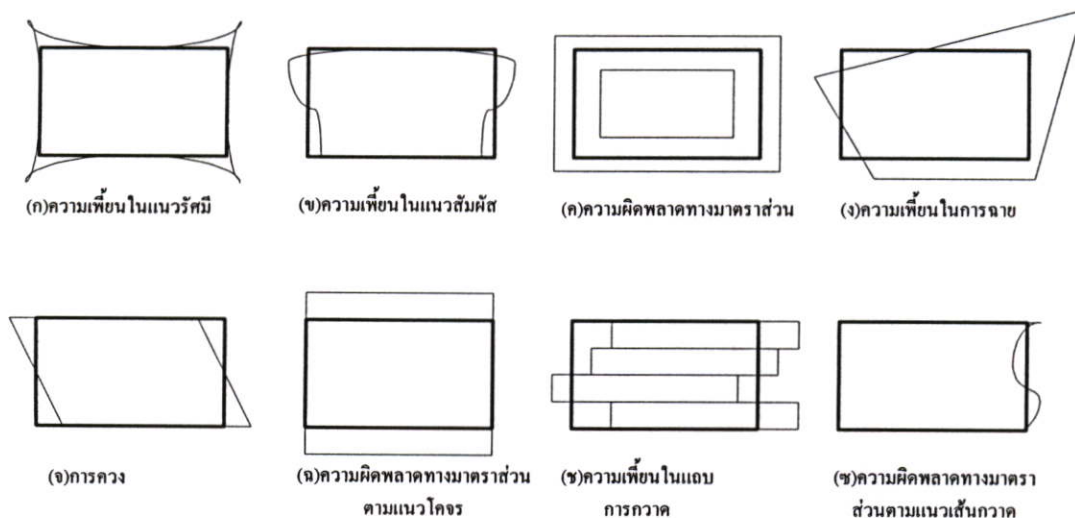


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนวิธีการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่น

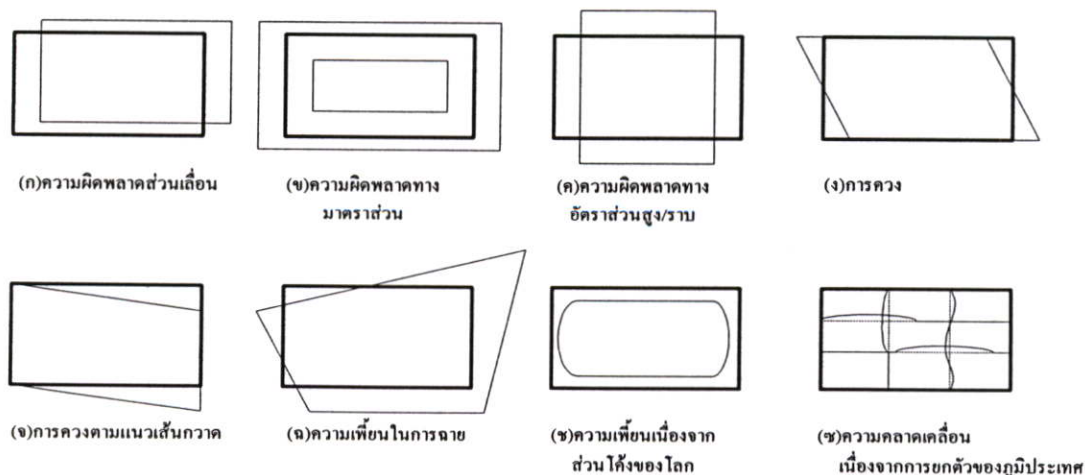
จากขั้นตอนการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่นที่ได้แสดงในรูปที่ 3.2 เป็นการยากที่จะแสดงให้เห็นได้ในการทดลองนี้ เนื่องจากการปรับแก้ความเพี้ยนดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นการปรับแก้ที่อุปกรณ์ตรวจจับ อุปกรณ์บันทึกภาพและอื่นๆ ขณะที่การทดลองไม่สามารถที่จะทำได้ ดังนั้นจึงได้นำเสนอ การปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่สามารถแสดงให้เห็นได้ง่ายและสะดวกกว่าการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่น

### 3.4 ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต (Geometric Distortion)

ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต หรือความเพี้ยนทางตำแหน่ง คือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลภาพระหว่างพิกัดภาพที่เป็นจริงกับพิกัดภาพที่ได้ ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตทำให้เกิดความบิดเบี้ยวหรือความเพี้ยนทางรูปร่าง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการหมุนรอบตัวเองของโลกขณะที่ดาวเทียมกำลังถ่ายภาพรวม ทั้งความไม่สม่ำเสมอในการทรงตัวของดาวเทียมเอง ในลักษณะของการโคจร การส่ายตัวตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของระดับความสูง และความเร็วในการ โคจร



รูปที่ 3.3 ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตภายใน



รูปที่ 3.4 ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตภายนอก

การผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายระยะไกล อาจเกิดขึ้นได้จาก 2 กรณี คือ ความผิดเพี้ยนภายใน (ความผิดเพี้ยนที่เป็นระบบ) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความกว้างของ beam และการสุ่มตัวอย่างของตัวตรวจจับ ส่วนความผิดเพี้ยนภายนอก (ความผิดเพี้ยนที่ไม่เป็นระบบ) นั้น หมายถึงการเปลี่ยนแปลงของสถานที่ ความสูง ตำแหน่งและความเร็วของดาวเทียม ความโค้งงอของผิวโลก และการหมุนรอบตัวของโลก

ตารางที่ 3.1 สาเหตุของความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตและชนิดของความเพี้ยน

สาเหตุของความเพี้ยน	เครื่องวัด			พิสัยเชิง
	ชนิดของการฉายจากศูนย์กลาง			
	เครื่องวัดแบบกรอบ	เครื่องวัดแบบเส้น	เครื่องวัดแบบจุด	
ความเพี้ยนภายใน				
ความเพี้ยนในรัศมีของเลนส์	ก	ก	ก	-
ความเพี้ยนในแนวสัมผัสของเลนส์	ข	ข	ข	-
ความผิดพลาดของความยาวโฟกัส	ก	ก	ก	-
การเอียงของระนาบรับภาพ	ง	ง	ง	-
ความไม่เรียบของระนาบรับภาพ	ไม่เป็นเชิงเส้น	ไม่เป็นเชิงเส้น	ไม่เป็นเชิงเส้น	-
ความผิดพลาดทางการจัดแนวของแผงรับภาพ	-	จ	ช	-
ความเปลี่ยนแปลงของอัตราการสุ่มตัวอย่าง	-	ฉ	ช	ฉ,ช
ความผิดพลาดของเวลาในการสุ่มตัวอย่าง	-	-	ช	-
การเปลี่ยนแปลงของความเร็วของกระจกกวาด	-	-	ช	-
ความเพี้ยนภายนอก				
ความผิดพลาดเชิงระนาบของยาน	ก	ก	ก	ก
ความผิดพลาดทางระดับความสูงของยาน	ข	ข	ข	ข
การเคลื่อนที่ของตำแหน่งของวงโคจร	-	ค,ง	ค,ง,จ	ค,ง,จ
ระดับความสูงของยาน	ฉ	ฉ	ฉ	ฉ
การเปลี่ยนแปลงของการทรงตัว	-	ฉ	ฉ	ฉ
การหมุนของโลก	-	ง	ง	ง
ความโค้งของโลก	ช	ช	ช	ช
ความสูงของพื้นผิว	ช	ช	ช	ช
การหักเหของชั้นบรรยากาศ	ไม่เป็นเชิงเส้น	ไม่เป็นเชิงเส้น	ไม่เป็นเชิงเส้น	ไม่เป็นเชิงเส้น

### 3.5 การแก้ไขความความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต

ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลเป็นข้อมูลที่ได้โดยการตรวจจับของเครื่องวัดจากกระบวนการ สุ่มตัวอย่างและการแบ่งช่วงของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็นช่วงๆ ตั้งแต่ช่วงอัลตราไวโอเล็ต จนถึงช่วงคลื่นวิทยุ เนื่องจากการที่อุปกรณ์ตรวจจับเหล่านี้ติดตั้งในตำแหน่งที่แตกต่างกันเล็กน้อย และทางเดินแสงของความยาวคลื่นที่แตกต่างกันนั้นจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้น ภาพของ ข้อมูลหลายช่วงคลื่นจะมีตำแหน่งเชิงเรขาคณิตที่ไม่ตรงกัน การปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต เป็นการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนทางด้านรูปทรงและขนาด หรือมาตราส่วนของภาพ อันเนื่องมาจากการหมุนของโลก ความไม่สม่ำเสมอในการทรงตัวของดาวเทียม ตลอดจนความไม่สม่ำเสมอของ ระบบกวาดภาพ การปรับแก้เชิงเรขาคณิตนั้น มีวัตถุประสงค์ เพื่อขจัดความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ของภาพ ซึ่งกระทำได้โดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดภาพ กับระบบพิกัดภูมิศาสตร์ โดยใช้ข้อมูลเปรียบเทียบของเครื่องวัด ข้อมูลตำแหน่ง และข้อมูลการทรงตัวที่มีการวัดไว้ จุดควบคุม ภาคพื้นดิน สภาพบรรยากาศ เป็นต้น

ขั้นตอนต่างๆ สำหรับการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต มี 3 วิธีดังนี้

#### 1) การเลือกวิธีการ

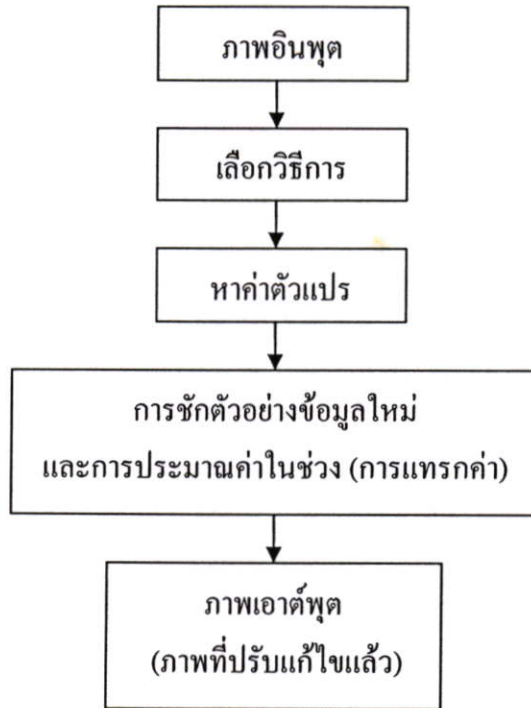
ควรพิจารณาคูณลักษณะของความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิตร่วมกับข้อมูลอ้างอิงที่มีอยู่แล้วจึง ทำการเลือกวิธีการปรับแก้เชิงเรขาคณิตที่เหมาะสม

#### 2) การหาค่าตัวแปร

ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าซึ่งเป็นตัวกำหนดสมการคณิตศาสตร์ระหว่าง ระบบพิกัดภาพและระบบพิกัด ภูมิศาสตร์นั้น จะสามารถหาค่าได้จากข้อมูลเปรียบเทียบและ/หรือจุดควบคุมภาคพื้นดิน

#### 3) การประมาณค่าในช่วง (interpolation) และการซัดตัวอย่างข้อมูลใหม่ (resampling)

ภาพในระบบพิกัดภูมิศาสตร์ (geo-coded image) จะถูกผลิตขึ้นจากเทคนิคการซัดตัวอย่างข้อมูลใหม่ และการประมาณค่าในช่วง



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต

การปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่สำคัญ มีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี ในการเลือกวิธีการใดเพื่อนำมาใช้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและปัจจัยหลายประการ ซึ่งทั้ง 3 วิธีอธิบายได้ดังต่อไปนี้

### 3.5.1 การปรับแก้จากความผิดเพี้ยนเชิงระบบ (Systematic correction)

ในกรณีที่ข้อมูลอ้างอิงเชิงเรขาคณิต หรือเรขาคณิตของเครื่องวัดได้กำหนด หรือทำการวัดไว้แล้ว ความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้อย่างมีระบบหรือตามทฤษฎี ตัวอย่างเช่น เรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพชนิดเลนส์จะถูกกำหนดโดย สมการร่วมเชิงเส้น (Linear combination equation) ด้วยความยาวโฟกัสที่ปรับเทียบแล้ว ค่าตัวแปรต่างๆ ของความเพี้ยนของเลนส์ พิกัดของจุดคั่น เป็นต้น การปรับแก้เชิงสัมผัส (Tangent correction) เป็นแบบหนึ่งของการปรับแก้แบบมีระบบ สำหรับเครื่องกวาดภาพแบบกลเชิงแสง โดยทั่วไปแล้วการปรับแก้แบบมีระบบจะเพียงพอสำหรับการจัดความผิดเพี้ยนทั้งหมด

### 3.5.2 การปรับแก้จากความผิดเพี้ยนแบบไม่มีระบบ (Non-systematic correction)

สมการโพลีโนเมียล สำหรับการแปลงจากระบบพิกัดภูมิศาสตร์ ไปเป็นระบบพิกัดภาพ หรือในทางกลับกันนั้น จะหาได้จากค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินที่รู้ค่า โดยความแม่นยำนั้นขึ้นอยู่กับลำดับยกกำลัง (order) ของสมการโพลีโนเมียล และขึ้นอยู่กับจำนวนและการกระจายของจุดควบคุมภาคพื้นดิน

### 3.5.3 วิธีผสม (Combined method)

เริ่มต้นด้วยการประยุกต์ใช้การปรับแก้แบบมีระบบ และต่อจากนั้นใช้สมการโพลีโนเมียลที่มีลำดับยกกำลังต่ำๆ เพื่อลดความผิดพลาดที่คงเหลืออยู่ โดยปกติแล้วจุดมุ่งหมายของการปรับแก้เชิงเรขาคณิตนั้น เพื่อที่จะยอมให้มีความผิดพลาดแฝงอยู่ไม่เกินบวกหรือลบหนึ่งจุดภาพของตำแหน่งจริงของจุดๆ นั้น

## 3.6 การรีจิสเตรชันภาพ (Image registration)

เทคนิคการรีจิสเตรชันภาพหรือการซ้อนภาพ เป็นเทคนิคที่นำมาใช้เพื่อการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ในหลักการของการซ้อนภาพมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอยู่ 2 ประการคือ ประการที่หนึ่ง การซ้อนภาพจะต้องอาศัยข้อมูลภาพตั้งแต่สองภาพหรือมากกว่าขึ้นไป โดยที่ข้อมูลภาพทั้งสองนั้นจะต้องมีลักษณะภูมิประเทศที่ครอบคลุมพื้นที่เดียวกันหรือคล้ายกัน ประการที่สอง การกำหนดพิกัดจุดควบคุมบนพื้นดินของข้อมูลภาพทั้งสองให้สัมพันธ์กัน โดยการอาศัยลักษณะของบริเวณที่เป็นมุมตึก จุดตัดของถนน จุดแยกแม่น้ำ สะพาน หรือลักษณะเด่นอื่นๆ ที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนจากการกำหนดดังกล่าวเรียกว่า จุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points : GCPs)

ในการวิจัยนี้เปลี่ยนรูปแบบ bilinear ถูกพิจารณาเพื่อใช้ในการเปลี่ยนรูปเชิงเรขาคณิตสำหรับการสร้างภาพกลับคืนมา ภาพถ่าย (f) ถูกกำหนดด้วยพิกัดจุดภาพ (x, y) ภายใต้วความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต เพื่อทำให้เกิดภาพ (g) ที่มีพิกัด ( $\hat{x}, \hat{y}$ ) การเปลี่ยนรูปนี้สามารถแสดงโดย

$$\hat{x} = r(x, y) \quad \text{และ} \quad \hat{y} = s(x, y)$$

เมื่อ  $r(x, y)$  และ  $s(x, y)$  แสดงการเปลี่ยนรูปแบบ Spatial ที่จะสร้างภาพที่ถูกต้องเชิงเรขาคณิต  $g(\hat{x}, \hat{y})$  สมมติว่ากระบวนการความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นภายในขอบเขตของรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งจำลองแบบโดยสมการ bilinear คู่หนึ่ง คือ

$$r(x, y) = C_1x + C_2y + C_3xy + C_4 \quad (3.1)$$

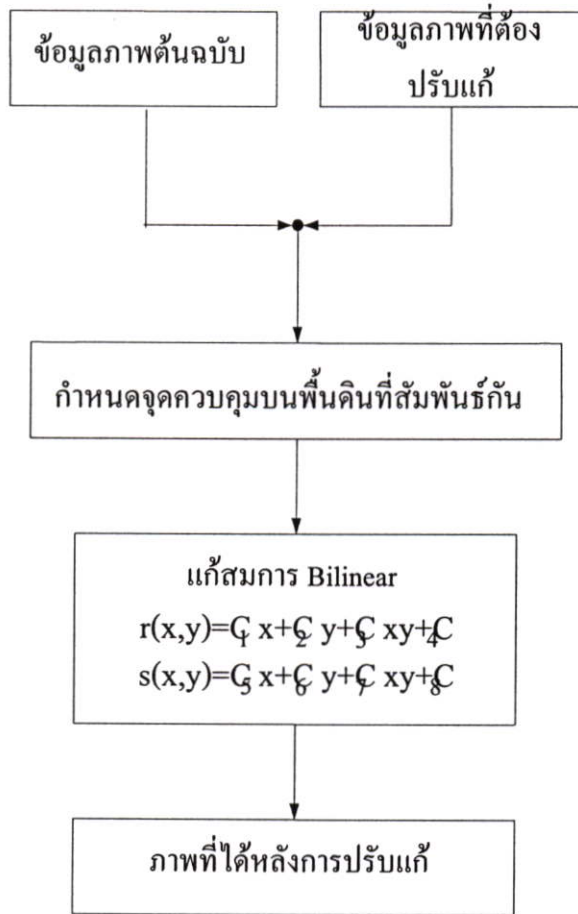
และ

$$s(x, y) = C_5x + C_6y + C_7xy + C_8 \quad (3.2)$$

การถอดกลับสัญญาณสุ่มสำหรับค่าที่ไม่ใช่จำนวนเต็มของ  $\hat{x}$  และ  $\hat{y}$  ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์  $C_i$  ในการหาค่า Gray Level ณ ตำแหน่งดังกล่าวควรจะใช้ bilinear interpolation สามารถแสดงได้ด้วย

$$v(\hat{x}, \hat{y}) = ax + by + cxy + d \quad (3.3)$$

ในรูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่ใช้ทั่วไป



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตแบบทั่วไป

### 3.6.1 การแปลงพิกัด

เทคนิคของการแปลงพิกัด (coordinate transformation) นั้น มีประโยชน์สำหรับการปรับแก้เชิงเรขาคณิต ด้วยจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Point ; GCP) ขั้นตอนใหญ่จะอยู่ที่การเลือกทั้ง 2 แบบ ต่อไปนี้

#### ก. การเลือกจุดควบคุมภาคพื้นดิน

จำนวนและการกระจายของจุดควบคุมภาคพื้นดิน จะมีอิทธิพลต่อความแม่นยำของการปรับแก้เชิงเรขาคณิต จำนวนของจุดควบคุมภาคพื้นดินควรมีมากกว่าจำนวนของตัวแปรไม่ทราบค่า ทั้งนี้เพราะความผิดพลาดต่างๆ จะถูกปรับแก้โดยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด

#### ข. การเลือกสูตรการแปลง

สูตรการแปลงจะถูกกำหนดจากลักษณะความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นกับภาพ โดยความผิดเพี้ยนที่มากขึ้นจะเป็นตัวกำหนดความซับซ้อนของการแปลง และสัมพันธ์กับจำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดินด้วยเช่นกัน เช่น สำหรับการแปลงแบบโพลิโนเมียล ลำดับของโพลิโนเมียลจะถูกกำหนด

โดยขึ้นอยู่กับความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต โดยปกติแล้วสูงสุดเพียงสมการโพลิโนเมียลลำดับกำลังสาม จะเพียงพอสำหรับภาพจากการสำรวจระยะไกลที่มีอยู่ สมการการแปลงสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

### Linear Conformal

เหมาะสำหรับการแปลงภาพเมื่อรูปร่างของวัตถุภายในภาพไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เกิดการผิดเพี้ยนเพียงเฉพาะจากการ เลื่อนไปของภาพ (image translation) การหมุนของภาพ (image rotation) การเปลี่ยนไปของขนาดภาพ (image scaling) คุณสมบัติการแปลงชนิดนี้คือ เส้นตรงยังคงความเป็นเส้นตรงและ เส้นขนานยังคงความเป็นเส้นขนานกัน มุมฉากยังคงความเป็นมุมฉาก

### Affine

การแปลงนี้นอกจากภาพจะเกิดการเลื่อน หมุน และปรับขนาดไป ภาพยังสามารถเกิดการบิด (image shearing) โดยคุณสมบัติการแปลงชนิดนี้ เส้นตรงยังคงเป็นเส้นตรง เส้นขนานยังคงความเป็นเส้นขนาน ไม่สามารถคงความเป็นมุมฉากของภาพได้ ดังนั้นรูปเหลี่ยมมุมฉาก อาจกลายเป็นรูปเหลี่ยมด้านขนาน

### Projection

การแปลงชนิดนี้ เหมาะกับภาพที่เกิดการบิดเอียง (tilted image) ของภาพ โดยเส้นตรงยังคงคุณสมบัติความเป็นเส้นตรง แต่เส้นขนานอาจจะไม่ขนานกันอีกต่อไปแต่จะถูเจ้าจุดใดจุดหนึ่ง ซึ่งอาจปรากฏหรือไม่ปรากฏบนจุดภาพก็ได้

### Polynomial

การแปลงแบบพหุนามนี้ เหมาะกับภาพที่เกิดการบิดโค้ง (curved image) โดยอันดับของพหุนามจะเป็นตัวกำหนดความถูกต้องหลังการแปลง อย่างไรก็ตามอันดับของพหุนามยังเป็นตัวกำหนดจุดหัก โค้งที่ได้จากการแปลงเส้นตรงด้วยเช่นกัน

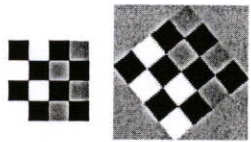

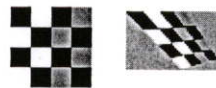

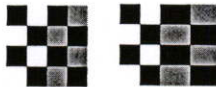
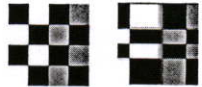
### Piecewise linear

การแปลงชนิดนี้เหมาะสำหรับภาพที่เกิดการผิดเพี้ยนเฉพาะที่ ซึ่งแต่ละส่วนของภาพเกิดการผิดเพี้ยนต่างกัน

### Local weighted mean

การแปลงชนิดนี้ มักใช้การการผิดเพี้ยนของภาพที่เกิดเฉพาะที่และซึ่งการแปลงแบบ piecewise linear ไม่สามารถแก้ไขความผิดพลาดชนิดนี้ได้

### ตารางที่ 3.2 การแปลงพิกัด

ชนิดการแปลงพิกัด	จำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดิน ขั้นต่ำ (จุด)	ตัวอย่างการแปลงภาพ
Linear Conformal	2	
Affine	3	
Projection	4	
Polynomial	6 (สำหรับ พหุนามอันดับ 2), 10 (สำหรับ พหุนามอันดับ 3) และ 16 จุด (สำหรับพหุนาม อันดับ 4)	
Piecewise linear	4	
Local weighted mean	6 ~12 จุด	

#### 3.6.2 การประมาณค่าในช่วง (Interpolation)

เป็นกระบวนการใช้ในการประมาณค่าของจุดภาพในตำแหน่งหรือบริเวณระหว่างจุดภาพ (pixels) เช่นในกรณีที่ต้องการปรับขนาดของภาพ (image resizing) ซึ่งทำให้จุดภาพมีจำนวนมากกว่าภาพเดิม กระบวนการการประมาณในช่วง (interpolation) จะถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าของจุดภาพที่เพิ่มขึ้นจากเดิมนี ในการประมวลผลภาพเช่น การปรับขนาด (Image resizing) หรือการหมุนภาพ (Image rotation) จะให้การประมาณค่าในช่วงแบบ 2 มิติ (2-dimension interpolation) เป็นส่วนหนึ่งของการประมวลผลภาพด้วยเสมอ

### วิธีการประมาณค่าในช่วง (Interpolation method)

ในการประมาณค่าในช่วงแบบ 2 มิติ ที่ใช้ในการประมวลผลภาพแบ่งได้เป็นหลายวิธีเช่น

- การประมาณค่าโดยกำหนดค่าจากจุดภาพข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด (Nearest-neighbor interpolation)
- การประมาณค่าแบบไบลิเนียร์หรือการประมาณค่าแบบเส้นตรงสองเส้น (Bilinear interpolation)
- การประมาณค่าแบบไบคิวบิกหรือการประมาณค่าแบบสองลูกบาศก์ (Bicubic interpolation)

วิธีการประมาณค่าในช่วงข้างต้นต่างมีวิธีการคล้ายคลึงกัน โดยแต่ละวิธีจะกำหนดค่าของจุดภาพที่ได้จากการประมาณค่าในช่วง โดยเริ่มจากการหาตำแหน่งจุดภาพเอาต์พุต (output pixel) ที่สอดคล้องกันบนภาพอินพุต (input image) จากนั้นทำการกำหนดค่าของจุดภาพเอาต์พุต (output pixel) โดยการคำนวณค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก (weighted average) บนเซตของจุดภาพในบริเวณนั้น ๆ โดยค่าถ่วงน้ำหนักจะขึ้นกับระยะห่างระหว่าง จุดภาพบนภาพอินพุต (input image) ที่นำมาคำนวณ กับจุดภาพเอาต์พุตที่สอดคล้องบนภาพอินพุตนั้น ๆ

แต่ละวิธีอาจแตกต่างกันเล็กน้อยขึ้นกับการกำหนดชุดหรือเซตของจุดภาพอินพุตบน ภาพอินพุตที่จะมาใช้ในการประมาณค่าจุดภาพเอาต์พุตนั้น ซึ่งอาจพิจารณาได้ดังนี้

- วิธีการประมาณค่าแบบ Nearest-neighbor interpolation ค่าของจุดภาพเอาต์พุตจะถูกกำหนดจากค่าของจุดภาพในเซตของจุดภาพที่นำมาคำนวณที่ใกล้ที่สุด จุดที่อยู่ใกล้ที่สุดจะถูกสุ่มขึ้นมา โดยไม่นำจุดภาพอื่นในเซตจุดภาพนั้นมาคำนวณ ความผิดพลาดเชิงเรขาคณิตจะสูงสุดเพียงครั้งจุดภาพ ข้อดีของวิธีการนี้คือเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว

- วิธีการประมาณค่าแบบ bilinear ค่าของจุดภาพเอาต์พุตจะถูกกำหนดจากการหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก โดยจุดภาพข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด จำนวน 4 จุดภาพ (คือ 2x2 จุดภาพ) ข้อมูลเชิงคลื่นจะเรียบหรือต่อเนื่องหลังจากการประมาณค่าในช่วง

- วิธีการประมาณค่าแบบ bicubic ค่าของจุดภาพเอาต์พุต จะถูกกำหนดจากการหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก โดยจุดภาพข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดจำนวน 16 จุดภาพ (คือ 4x4 จุดภาพ) การประสานเชิงลูกบาศก์ให้ผลที่ดีทั้งในด้านความคมชัด และการต่อเนื่อง ถึงแม้ว่าการคำนวณจะใช้เวลามากกว่าเมื่อเทียบกับวิธีอื่น

จำนวนจุดภาพที่นำมาคำนวณจะมีผลโดยตรงต่อความซับซ้อนในการคำนวณ เช่นการประมาณค่าแบบ bicubic จะมีความซับซ้อนและใช้เวลาในการคำนวณนานกว่าการประมาณค่าแบบ bilinear และการประมาณค่าแบบ bilinear ก็ซับซ้อนและใช้เวลานานกว่าแบบ nearest-neighbor ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม จำนวนจุดภาพที่ใช้ในการคำนวณนี้ก็เป็นตัวกำหนดความถูกต้องเช่นเดียวกัน ดังนั้นในการเลือกวิธีการประมาณค่าในช่วงแบบใด จึงขึ้นกับความต้องการของผู้ใช้งานโดยขึ้นกับความถูกต้องและความซับซ้อน

## บทที่ 4

# การปรับแก้ความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิตบนภาพสัญญาณดาวเทียม

ในระบบประมวลผลภาพ (image processing system) ภาพที่ได้จากการตรวจจับ (detected image) มักมีรูปทรงหรือรูปร่างผิดเพี้ยนไป หรือ เรียกว่า ความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต (Geometric distortion) ซึ่งอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากกลไกการตรวจจับภาพเอง ทำให้มุมมองที่ได้ผิดไปจากความเป็นจริง (perspective irregularities) เมื่อทำการวางตำแหน่งกล้องหรืออุปกรณ์การตรวจจับภาพโดยมุ่งที่จะให้ได้ภาพวัตถุ (object) บนภาพ หรือ (scene) มีความชัดเจนที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อภาพ และ/หรือ วัตถุมีการเลื่อนไป การเคลื่อนไปจากเดิมที่ตั้งเครื่องจับภาพไว้ ทำให้มิติของวัตถุที่ปรากฏในภาพแตกต่างไปจากความเป็นจริง ซึ่งจะเกิดลักษณะของความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิตหรือรูปร่าง ด้วยเหตุนี้ในระบบประมวลผลภาพใด ๆ จึงมักมีการปรับแก้ความผิดพลาดเชิงเรขาคณิตนี้ด้วยเสมอ และวิธีในการปรับแก้หรือการแปลงภาพวิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมคือการแปลงแบบ affine transform วิธีการแปลงนี้ จะถูกนำมาใช้จัดการแก้ไขภาพที่มีปัญหาเรื่องความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต (Geometric correction) ที่เกิดจากมุมมองของภาพ (perspective distortion) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยจุดพิกัดที่วัดได้จริง เพื่อใช้ในการหาค่าพิกัดบนภาพที่ถูกต้อง เช่นการปรับแก้ความผิดเพี้ยนของภาพถ่ายดาวเทียมโดยอาศัย พิกัดอ้างอิงบนโลก หรือจากแผนที่ที่สำรวจจริง เป็นต้น วิธีปรับแก้ความผิดพลาดทางเรขาคณิตโดยทั่วไป มักกระทำโดยการนำภาพที่ต้องการปรับแก้ไขความผิดพลาดทางเรขาคณิตมาทำการกำหนดจุดอ้างอิงบนภาพอ้างอิงเช่น แผนที่ หรือ ภาพถ่ายที่มีการตรวจพิสูจน์ความถูกต้องทางภาคพื้นดินเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นความถูกต้องแม่นยำของการปรับแก้ไขความผิดพลาด จึงขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการหาจุดที่สอดคล้องกันบนภาพที่ต้องการปรับแก้กับจุดควบคุมภาคพื้นดิน หรือจุดอ้างอิงบนภาพอ้างอิง ซึ่งเริ่มต้นตั้งแต่การเลือกจุดควบคุมภาคพื้นดินที่เหมาะสม โดยปรากฏเด่นชัดทั้งบนภาพอ้างอิงและภาพที่ต้องการปรับแก้ นอกจากนี้จุดอ้างอิงภาคพื้นดินที่เลือกนี้ยังควรมีคุณสมบัติที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (time invariant) และที่สำคัญคือต้องกระจายครอบคลุมตลอดทั้งภาพที่ต้องการปรับแก้ไข ซึ่งกระบวนการนี้มักต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญและประสบการณ์ ในการพิจารณาจุดควบคุมภาคพื้นดิน (จุดอ้างอิง) การกำหนดจุดสอดคล้องบนภาพต้องการปรับแก้และจุดควบคุมภาคพื้นดินนั้น

นอกจากกระบวนการปรับแก้ไขความผิดเพี้ยนด้วยวิธีการกำหนดจุดควบคุมบนพื้นดินแล้ว เทคนิคการประมวลผลภาพด้วยวิธีการรีจิสเตรชันภาพ หรือการซ้อนภาพ (Image registration) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการหาจุดพิกัดที่สอดคล้องกัน ระหว่างภาพที่ต้องการปรับแก้และภาพอ้างอิง ทั้งนี้เพื่อให้การกำหนดพิกัดอ้างอิงเป็นอิสระต่อผู้กระทำการและมีความเป็นระบบมากขึ้น วิธีการรีจิสเตรชันภาพโดยการแบ่งส่วนภาพ (segmentation based registration) หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นแบบ การรีจิสเตรชันแบบภาพสู่ภาพ (image to image registration) โดยวิธีการคือการนำภาพบาง

บริเวณที่ครอบคลุมบางบริเวณที่มีคุณลักษณะตรงกับจุดควบคุมภาพพื้นดินบนภาพอ้างอิง นำไปหาจุดที่สัมพันธ์กันบนภาพที่ต้องการปรับแก้ ความถูกต้องของคู่อักขระจะขึ้นกับปัจจัยต่าง เช่น เทคนิคและความซับซ้อนของการรีจิสเตอร์ชั้นภาพ คุณภาพของภาพที่ต้องการปรับแก้ ลักษณะการผิดเพี้ยนของภาพเอง ปัจจัยเหล่านี้ทำให้เกิดการปรับปรุงและพัฒนาเทคนิคใหม่เพื่อขจัดปัญหาข้างต้น เช่น วิธี Cross-correlation ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแต่ก็มีข้อจำกัดคือ ภาพทั้งสองต้องมีรายละเอียดของภาพเหมือนกัน และจะแย่งอย่างมาเมื่อภาพทั้งสองมีความแตกต่างกันเช่น สเกลของภาพ การหมุนไปของภาพ และการผิดไปของรายละเอียดภาพ อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา การรบกวนจากสัญญาณรบกวน และการผิดพลาดของตัวตรวจจับของระบบเอง ดังนั้นก่อนที่จะนำภาพทั้งสองมาทำการ cross-correlation จึงต้องทำการปรับแก้เบื้องต้นเสียก่อน ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการแบ่งขั้นตอนการทำการปรับแก้เชิงเรขาคณิตออกเป็นสองขั้นตอนย่อย ๆ เพื่อประสิทธิภาพในการจัดการการประมวลผลภาพ คือ การรีจิสเตอร์ชั้นภาพแบบหยาบ (coarse image registration) และ การรีจิสเตอร์ชั้นภาพแบบละเอียด (fine image registration)

เริ่มจากการรีจิสเตอร์ชั้นภาพแบบหยาบจะถูกกระทำก่อน เพื่อหาความสัมพันธ์ของภาพทั้งภาพระหว่างภาพที่ต้องการปรับแก้และภาพอ้างอิง โดยกำหนดให้ความผิดพลาดเชิงเรขาคณิตมีรูปแบบ Affine transform โดยจะทำการแมป (map) ค่าของจุดภาพ (ในที่นี้คือค่าความเข้มแสง ณ ตำแหน่งของจุดภาพ  $(x_1, y_1)$  ในภาพอินพุตไปเป็นค่าของจุดภาพในภาพเอาต์พุตที่พิกัด  $(x_2, y_2)$  โดยวิธีการ linear combination ระหว่างการเลื่อนของภาพ (translation) การหมุนภาพ (rotation) และการปรับขนาด (scaling) รวมทั้งการบิดไปของภาพ (shearing) ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของภาพแบบไม่สมมาตรในแต่ละมิติหรือในแต่ละแนวแกน ดังนั้นขั้นตอนนี้จะทำการหาแบบจำลองการแปลงภาพในลักษณะ Affine transform ข้อดีของแบบจำลองนี้คือค่าการปรับลดขนาด (scaling factor) และมุมที่หมุนไป (rotation angle) จะไม่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการกระทำบนข้อมูลเชิงความถี่อันได้จากการแปลงแบบฟูเรียร์ (Fast Fourier transform) ซึ่งค่าการปรับลดขนาดและมุมที่หมุนไปจะถูกหาด้วยกระบวนการ phase-correlation และการแปลงพิกัดภาพเป็นแบบ log-polar กระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้จะกล่าวโดยละเอียดต่อไป

การรีจิสเตอร์ชั้นภาพแบบละเอียด จะถูกกระทำเมื่อการรีจิสเตอร์ชั้นภาพแบบหยาบเสร็จสิ้นลงโดยภาพทั้งภาพโดยรวมระหว่างภาพที่ต้องการปรับแก้และภาพอ้างอิงจะถูกปรับแก้เบื้องต้นให้มีค่าการปรับลดขนาดและมุมของภาพตรงกัน จากนั้นการรีจิสเตอร์ชั้นภาพแบบละเอียดจึงเริ่มขึ้น โดยการกำหนดส่วนของภาพที่ครอบคลุมบริเวณที่มีคุณสมบัติเดียวกันกับจุดควบคุมภาพ (Ground Control Point) คือมีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ปรากฏเด่นชัดบนภาพทั้งสอง และมีการกระจายไปทั่วบริเวณภาพทั้งหมด เมื่อได้ภาพย่อยที่มีลักษณะดังกล่าวแล้ว จึงทำการรีจิสเตอร์ชั้นภาพย่อยนี้บนภาพที่ต้องการปรับแก้ ตำแหน่งที่ได้จากการรีจิสเตอร์ชั้นภาพส่วนย่อยนี้จะถูกนำไปหาความสัมพันธ์ของการแปลงภาพเพื่อทำการปรับแก้ทางเรขาคณิต ในขั้นตอนประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อย คือ การแปลงภาพ (Image transformation) หรือการหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของจุดภาพใหม่

ความถูกต้องของการแปลงภาพจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของแบบจำลองการแปลงที่กำหนด เช่น การแปลงแบบไบลิเนียร์ (Bilinear) และการแปลงแบบเพอร์สเปกทีฟ (perspective) ซึ่งเป็นตัวกำหนดจำนวนสัมประสิทธิ์การแปลงหรือการถ่ายโอนเช่นกัน จำนวนสัมประสิทธิ์นี้จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนคู่พิกัดที่ได้จากการรีจิสเตอร์ชั้นภาพอ้างอิง (Reference image) และภาพย่อยที่มีจุดควบคุมภาคพื้นดิน เมื่อได้ความสัมพันธ์การแปลงหรือการถ่ายโอนแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการกำหนดค่าของจุดภาพใหม่ เนื่องจากเมื่อทำการแปลงแล้วพิกัดภาพย่อมไม่ตกลงในตำแหน่งที่สามารถระบุได้ในพิกัดเดิม ขั้นตอนการกำหนดค่าของจุดภาพใหม่นี้จะเรียกว่าการรีแซมปลิง (Resampling) ในกระบวนการนี้ขั้นตอนหลักจะขึ้นอยู่กับการประมาณค่าในช่วงโดยกำหนดจากค่าของจุดภาพรอบ ๆ จุดภาพที่กำลังพิจารณา การประมาณค่าในช่วงอาจทำได้ทั้งวิธีที่ง่ายและสะดวกที่สุดคือการกำหนดค่าของจุดภาพจากค่าของจุดภาพเดิมที่ใกล้ที่สุด หรือการกำหนดจุดภาพจากการประมาณค่าในช่วงแบบ Bilinear หรือ Bicubic เป็นต้น

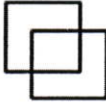
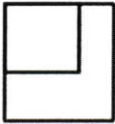


#### 4.1 การรีจิสเตอร์ชั้นภาพแบบหยาบ (Coarse image registration)

ความคิดพื้นฐานของภาพเชิงเรขาคณิตสามารถแบ่งเป็นองค์ประกอบต่าง ๆ คือ จากการปรับขนาด (scaling) การหมุนไปของภาพ (rotation) การบิดไปของภาพ (skew) และ การเลื่อนไปทางพิกัด (displacement) ซึ่งสามารถสร้างเป็นแบบจำลองจากการแปลงภาพ แบบ affine transform

##### 4.1.1 การแปลงแบบ Affine transform

ในการแปลงแบบ Affine transform ซึ่งเป็นแบบหนึ่งของการแปลงแบบ spatial transform ผลของการแปลงแบบ affine นี้ แบ่งได้เป็น

- การเลื่อนไปของภาพ (image translation)
- การหมุนภาพ (image rotation)
- การปรับขนาดภาพ (image scaling)
- การขึงตึงภาพ (image stretching)
- การบิดเอียงภาพ (image shearing)

Affine Transform	Example
Translation	
Scale	
Shear	
Rotation	

รูปที่ 4.1 คุณสมบัติการแปลงแบบ Affine transform

คุณสมบัติที่ได้จากการแปลงแบบ affine ข้างต้นนี้ สามารถสรุปเป็นคุณสมบัติได้คือ เมื่อทำการแปลงเส้นตรงด้วย affine transform เส้นตรงนั้นจะยังคงเป็นเส้นตรง และเมื่อแปลงเส้นขนานก็จะยังคงความขนานกันอยู่ อย่างไรก็ตามหากทำการแปลงรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งประกอบด้วยเส้นตรงขนานกัน 2 ชุด เมื่อทำการแปลงแบบ affine แล้ว อาจได้ภาพสองสี่เหลี่ยมด้านขนาน

การแปลงแบบ affine ยังสามารถประยุกต์เข้ากับการประมวลผลภาพแบบ box โดยแต่ละ box หรือแต่ละบริเวณย่อยของภาพจะถูกแปลงแบบ affine อย่างเป็นอิสระต่อกัน ข้อดีของการแปลงวิธีนี้คือ แต่ละ box สามารถกำหนดตัวแปรในการแปลงได้อย่างอิสระทำให้ภาพที่แปลงมีความถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามหลังจากการแปลงแล้วเมื่อนำภาพมาประกอบกัน อาจเกิดการเลื่อน(shifting) และมีค่าการปรับขนาด (scaling) ต่างกัน ทำให้ภาพรวมที่ได้ไม่มีความต่อเนื่อง

การแปลงแบบ affine ยังสามารถนำไปใช้ร่วมกับการแปลง spatial transform แบบอื่น ๆ เช่น projective transform ซึ่งทำให้การแปลงมีอิสระมากขึ้นและได้ผลถูกต้องมากขึ้น วิธีการนี้เรียกว่า composite transform

#### 4.1.2 แบบจำลองการแปลงแบบ Affine transform

ความผิดเพี้ยนของภาพเชิงเรขาคณิตสามารถแบ่งเป็นองค์ประกอบต่าง ๆ คือ จากการปรับขนาด (scaling) การหมุนไปของภาพ (rotation) การบิดไปของภาพ (skew) และ การเลื่อนไปทางพิคัด (displacement) ซึ่งสามารถสร้างเป็นแบบจำลองจากการแปลงภาพ แบบ affine transform โดย จะทำการแบ่งความผิดเพี้ยนเป็นสองส่วนคือ

1. ความผิดเพี้ยนในระบบการแปลงแบบเชิงเส้น (linear system transformation) คือ จากการปรับขนาด (scaling) และการบิดไปของภาพ (skew)
2. ความผิดเพี้ยนจากการเลื่อนไปบนระบบพิคัดภาพ (The displacement of the coordinate systems.) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{t} \quad (4.1)$$

โดย เมตริก  $\mathbf{A}$  จะเป็นตัวกำหนดความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต โดยมีคุณสมบัติเป็น non-singular matrix

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

เวกเตอร์  $\mathbf{t}$  จะเป็นตัวกำหนดการเลื่อนไปทางพิคัด

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix}$$

เวกเตอร์  $\mathbf{x}$  และ  $\mathbf{y}$  แสดงพิคัดบนภาพก่อนและหลังจากการแปลงแบบ affine

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \text{ และ } \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

ก่อนที่จะทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การแปลง  $\mathbf{A}$  และ  $\mathbf{t}$  ในแบบจำลองข้างต้น

จากการแปลงฟูเรียร์ 2 มิติ กำหนดให้  $F(\mathbf{u})$  เป็นฟูเรียร์ทรานฟอร์มของ  $f(\mathbf{x})$  โดยที่

$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$  และ  $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$  เป็นพิคัดทางด้านความถี่และพิคัดคาร์ทีเซียนตามลำดับ

$$F(\mathbf{u}) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\mathbf{x}) e^{-j2\pi(\mathbf{u}, \mathbf{x})} d\mathbf{x} \quad (4.2)$$

$$f(\mathbf{x}) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(\mathbf{u}) e^{j2\pi(\mathbf{u}, \mathbf{x})} d\mathbf{u} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $(\mathbf{u}, \mathbf{x})$  หมายถึง ผลคูณภายใน (inner product) ระหว่าง  $\mathbf{u}$  และ  $\mathbf{x}$

และกำหนดให้  $G(v)$  เป็นฟูรีเยร์ทรานฟอร์มของ  $g(y)$  โดยที่  $v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$  และ  $y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$  เป็นฟังก์ชันทางด้านความถี่และฟังก์ชันที่เขียนตามลำดับบนภาพที่เกิดความผิดเพี้ยนจากการแปลงแบบ affine เมื่อ  $y = \mathbf{Hx} = \mathbf{Ax} + \mathbf{t}$

$$G(v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(y) e^{-j2\pi(v,y)} dy \quad (4.4)$$

$$g(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(v) e^{j2\pi(v,y)} dv \quad (4.5)$$

#### 4.1.3 คุณสมบัติการแปลงแบบ affine transform

เนื่องจาก  $y$  ซึ่งเกิดจากความผิดเพี้ยนทางเรขาคณิตแบบ affine บนฟังก์ชัน  $x$  ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ทำให้เกิดคุณสมบัติการถ่ายโอนดังนี้

1. คุณสมบัติความคล้ายคลึงกัน (Similarity property)

กำหนดให้  $x$  เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการแปลงแบบ affine ด้วยฟังก์ชัน

ถ่ายโอน  $H$

$$f(x) \xrightarrow{H} f(\mathbf{Hx}) = g(y)$$

ดังนั้นเมื่อทำการแปลงฟูรีเยร์จะได้

$$G(v) = F\{f(\mathbf{Hx})\} = \frac{1}{|J|} e^{j2\pi(u, \mathbf{A}^{-1}t)} F\{(\mathbf{A}^{-1})^T \mathbf{u}\} \quad (4.6)$$

เมื่อ  $J$  คือ จาคอบีเนียนของการแปลง (The Jacobian of transform)

$$\mathbf{J} = \frac{\partial(y_1, y_2)}{\partial(x_1, x_2)}$$

2. ความสัมพันธ์เชิงระบบพิกัด (Relation of Coordinate Systems)

จากความสัมพันธ์เชิงพิกัดที่เขียนระหว่างพิกัด  $x$  ก่อนการแปลงแบบ affine และพิกัด  $y$  หลังการแปลงแบบ affine (ตามแบบจำลองความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต)  $y = \mathbf{Hx} = \mathbf{Ax} + \mathbf{t}$  ดังนั้นความสัมพันธ์เชิงพิกัดความถี่คือ

$$\mathbf{v} = (\mathbf{A}^{-1})^T \mathbf{u} \quad (4.7)$$

3. สเปกตรัมพลังงาน และ โมดูลัส (Energy Spectrum and Modulus)

สเปกตรัมความหนาแน่นพลังงานของฟังก์ชัน  $f(x)$  คือ

$$E(\mathbf{u}) = F(\mathbf{u})F(\mathbf{u})^* = |F(\mathbf{u})|^2 \quad (4.8)$$

ที่ซึ่ง \* หมายถึงค่าคอนจูเกตเชิงซ้อน (complex conjugate)

ในขณะที่เทอมที่แสดงเฟสเชิงเส้น  $e^{j2\pi(\mathbf{u}, \mathbf{A}^{-1}\mathbf{t})}$  ถูกหักล้างไป ซึ่งแสดงถึงความเป็นอิสระต่อค่าการเลื่อนตำแหน่ง  $\mathbf{t}$  และดังนั้นค่าโมดูลัส คือ

$$M(\mathbf{u}) = \left\{ |F(\mathbf{u})|^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.9)$$

#### 4. ความสมมาตรของโมดูลัส (Symmetry of the Modulus)

สำหรับสัญญาณที่เป็นค่าจริง ดังนั้น

$$F(-\mathbf{u}) = F^*(\mathbf{u}) \quad (4.10)$$

ที่ซึ่ง \* หมายถึงค่าคอนจูเกตเชิงซ้อน (complex conjugate)

#### 5. คุณสมบัติการเลื่อนไปของตำแหน่ง (Translation property, $\mathbf{t}$ ) และ cross-power spectrum

คุณสมบัติการเลื่อนตำแหน่งของข้อมูลเมื่อทำการแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่ด้วยฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม สามารถอธิบายได้โดยคุณสมบัติการเลื่อนไปของฟูเรียร์ (Fourier shift theorem) กำหนดให้  $f(\mathbf{x})$  และ  $g(\mathbf{y})$  เป็นภาพสองภาพที่แตกต่างกันเนื่องมาจากการเลื่อนไปของตำแหน่ง (displacement,  $\mathbf{t}$ ) และ จากการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบ affine ( $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{t}$ ) ดังนั้น

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ และ}$$

$$G(\mathbf{v}) = \mathbf{F}\{f(\mathbf{H}\mathbf{x})\} = e^{j2\pi(\mathbf{u}, \mathbf{t})} F\{\mathbf{u}\} \quad (4.11)$$

และจากความสัมพันธ์เชิงระบบพิกัด (Relation of Coordinate Systems) คือ  $\mathbf{v} = (\mathbf{A}^{-1})^T \mathbf{u}$  ดังนั้น

$$\mathbf{v} = \mathbf{u} \quad (4.12)$$

ในกรณีค่า cross-power spectrum ของภาพทั้งสอง ( $f$  และ  $g$ ) คือ

$$\frac{F(\mathbf{u})G^*(\mathbf{u})}{|F(\mathbf{u})G(\mathbf{u})|} = e^{j2\pi(\mathbf{u}, \mathbf{t})} \quad (4.13)$$

เมื่อ  $F$  และ  $G$  คือผลการแปลงฟูเรียร์ของภาพ  $f$  และ  $g$  ตามลำดับ และ  $G^*$  เป็นค่าคอนจูเกตเชิงซ้อนของ  $G$

นอกจากนี้เฟสของ cross-power spectrum ซึ่งคือค่าความต่างเฟสระหว่างภาพทั้งสองบนโดเมนความถี่ เมื่อทำการอินเวอร์สฟูเรียร์ทรานสฟอร์มทำให้ได้ค่าการเลื่อนไปของตำแหน่ง ( $\mathbf{t}$ ) ได้จาก

ตำแหน่งอิมพลัสของ cross-power spectrum ซึ่งเป็นเทคนิคของสหสัมพันธ์ทางเฟส (phase correlation technique)

#### 4.1.4 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์เมตริกการลดทอน (Estimation of distortion matrix coefficients)

- การหาเวกเตอร์การลดทอนเนื่องจากการเลื่อนไปของภาพ (Displacement)

สมมุติให้การลดทอนจากการแปลงแบบ affine เกิดจากการเลื่อนขนาดเพียงอย่างเดียว ดังนั้น สมการการแปลงพิกัดสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{H}\mathbf{x} \\ &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{t} \\ &= \mathbf{x} + \mathbf{t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

โดยที่  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

เมื่อทำการแปลงพิกัดให้อยู่ในโดเมนความถี่ด้วยฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม โดยกำหนดให้  $\mathbf{v}$  และ  $\mathbf{u}$  เป็นพิกัดบนโดเมนความถี่ของ  $\mathbf{y}$  และ  $\mathbf{x}$  ตามลำดับ ดังนั้น

$$\mathbf{v} = \mathbf{u}$$

โดยเวกเตอร์การเลื่อน  $\mathbf{t}$  สามารถหาได้จากเทคนิค phase correlation

$$\frac{F(\mathbf{u})G^*(\mathbf{u})}{|F(\mathbf{u})G(\mathbf{u})|} = e^{j2\pi(\mathbf{u},\mathbf{t})}$$

- การหาเมตริกการลดทอนเนื่องจากการเปลี่ยนขนาด (Scaling)

ในกรณีที่เมตริกการลดทอน  $\mathbf{A}$  ถูกลดรูปให้เหลือเพียงการเปลี่ยนขนาด (Scaling) ดังนั้นเมตริกการลดทอนมีรูปแบบดังนี้

$$\mathbf{A}_{scal} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

โดยกำหนดให้การปรับขนาดเกิดขึ้นตามแนวแกนพิกัด ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพและพิกัดทางด้านความถี่คือ

$$\mathbf{v} = (\mathbf{A}_{scal}^{-1})^T \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_{11}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_{22}} \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (4.16)$$

เมื่อทำการแปลงมาตราส่วนของแกนพิกัดให้เป็นแบบลอการิทึม (logarithmic scaling) เมตริกการลดทอน  $A$  สามารถลดรูปไปเป็นค่าการเลื่อนตำแหน่ง เมื่อทำการละลายเทอมผลคูณ  $1/|A_{scal}|$

$$\log(\mathbf{v}) = \log((\mathbf{A}_{scal}^{-1})^T \mathbf{u}) = \log \mathbf{u} - \log(\text{diag}(\mathbf{A}_{scal})) \quad (4.17)$$

เมตริกการเลื่อนตำแหน่ง  $\log(A)$  สามารถหาได้จากเทคนิคสหสัมพันธ์ทางเฟส (phase correlation technique) จากนั้นจึงทำการแปลงค่าพิกัดซึ่งแสดงถึงค่า  $\log(A)$  กลับเพื่อให้ได้ค่าเมตริกการลดทอน  $A$  ตามลำดับ

- การหาเมตริกการลดทอนเนื่องจากการหมุนไปของภาพ (The rotation distortion matrix)

เมตริกการลดทอนสำหรับการหมุนไปของภาพสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\mathbf{A}_{rot} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพและพิกัดความถี่สามารถหาได้ ดังนี้

$$\mathbf{v} = (\mathbf{A}_{rot}^{-1})^T \mathbf{u} = \mathbf{A}_{rot} \mathbf{u} \quad (4.19)$$

จากสมการข้างต้น สังเกตว่าเมื่อพิกัดทางภาพถูกรบกวนให้เกิดการหมุนไปด้วยมุมเท่ากับ  $\theta$  เมื่ออยู่ในพิกัดความถี่ พิกัดความถี่ก็ถูกรบกวนด้วยการหมุนไปด้วยมุมที่เท่ากัน เพื่อจะหามุมที่หมุนไป หรือในที่นี้คือ เมตริกการลดทอนจากการหมุน ต้องทำการแปลงพิกัดความถี่ให้อยู่ในแนวแกนเชิงมุม (Polar coordinate) เสียก่อน

กำหนดให้  $\mathbf{v}_p$  เป็นพิกัดบนแกนเชิงมุม

$$\mathbf{v}_p = \begin{bmatrix} \rho_v \\ \theta_v \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

ซึ่ง  $\rho_v$  คือระยะห่างจากจุดกำเนิดถึงจุด  $\mathbf{v}$  บนพิกัดภาพ (ในที่นี้ กำหนดให้จุดกำเนิดอยู่ ณ ตำแหน่งมุมบนซ้ายของภาพ)

$$\rho_v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (4.21)$$

และ  $\theta_v$  คือมุมของเส้นเชื่อมต่อระหว่างจุดกำเนิดถึงจุด  $\mathbf{v}$  เทียบกับแกนนอน

$$\theta_v = \text{atan}(v_2 / v_1) \quad (4.22)$$

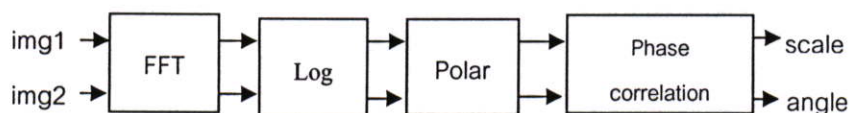
ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพก่อนและหลังการแปลงสามารถสรุปจาก  $\mathbf{v} = \mathbf{A}_{rot} \mathbf{u}$  เป็นการเลื่อนไปทางพิกัด เมื่อทำการแปลงพิกัดให้อยู่ในพิกัดแบบเชิงมุม

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{u}_p - \begin{bmatrix} 0 \\ \theta \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

จากนี้จึงใช้เทคนิคสหสัมพันธ์เชิงมุม (phase correlation technique) เพื่อหามุม  $\theta$  ที่ทำให้เกิดการลดทอนเนื่องจากการหมุนไป

การหาเมตริกการลดทอน (A) ทำได้โดยการคูณกันระหว่างองค์ประกอบการลดทอนจากการปรับขนาดและจากการหมุน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_{rot} \mathbf{A}_{scal} \quad (4.24)$$



รูปที่ 4.2 ไคอะแกรมแสดงขั้นตอนการหาค่าลดทอนจากการปรับขนาดและมุมการหมุน

ส่วนการหาค่าการลดทอนอันเนื่องจากการเลื่อนตำแหน่ง เนื่องจากค่าโมดูลัสของการแปลงฟูเรียร์แบบ 2 มิติไม่ขึ้นกับค่าการเลื่อนตำแหน่ง  $t$  ซึ่งไม่มีผลในขั้นตอนการหาค่าการปรับขนาดและมุมหมุน

#### 4.2 การรีจิสเตอร์ชั้นภาพแบบละเอียด (Fine image registration)

การรีจิสเตอร์ชั้นภาพแบบละเอียด จะทำถูกหลังจากการรีจิสเตอร์ชั้นภาพแบบหยาบเสร็จสิ้นลง ค่าการปรับขนาดและมุมหมุนของภาพที่หาได้จากวิธีการรีจิสเตอร์ชั้นแบบหยาบข้างต้น จะถูกนำมาใช้ในการปรับแก้ไขความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิตเบื้องต้น ตามสมการที่ 4.14 และ สมการที่ 4.24

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{H}\mathbf{x} \\ &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{t} \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_{rot} \mathbf{A}_{scal} \quad (4.24)$$

เมื่อ 
$$\mathbf{A}_{scal} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{rot} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

โดยการแทนค่า scaling factor และ rotating angle ในสมการที่ 4.15 และ 4.18 ตามลำดับ ในที่นี้สามารถละเลยค่าการเลื่อนตำแหน่ง  $t$  (displacement) เนื่องจาก ค่าการเลื่อนตำแหน่ง  $t$  สามารถหาได้อย่างละเอียดและอิสระเป็นบริเวณย่อย ด้วยขั้นตอนการรีจิสตรชันแบบละเอียดต่อไป

เมื่อผ่านกระบวนการข้างต้นแล้ว ภาพทั้งภาพโดยรวมระหว่างภาพที่ต้องการปรับแก้ และภาพอ้างอิงจะถูกปรับแก้เบื้องต้นให้มีค่าการปรับลดขนาดและมุมของภาพตรงกัน การรีจิสตรชันภาพแบบละเอียดจะเริ่มตั้งแต่จุดนี้ไป ขั้นตอนการรีจิสตรชันแบบละเอียดก็คือการรีจิสตรชันแบบทั่วไปที่ได้กล่าวถึงแล้วในบทที่ 3 ซึ่งสามารถสรุปได้โดยย่อดังนี้

1. การกำหนดส่วนของภาพที่ครอบคลุมบริเวณที่มีคุณสมบัติเดียวกันกับจุดควบคุมภาพ (Ground Control Point) คือมีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ปรากฏเด่นชัดบนภาพทั้งสอง และมีการกระจายไปทั่วบริเวณภาพทั้งหมด เมื่อได้ภาพย่อยที่มีลักษณะดังกล่าวแล้ว

2. ทำการรีจิสตรชันภาพภาพย่อยนี้ซึ่งเป็นส่วนของภาพที่ต้องการปรับแก้บนภาพอ้างอิง คู่พิกัดหรือตำแหน่งที่ได้จากการรีจิสตรชันภาพส่วนย่อยนี้ จะถูกนำไปหาความสัมพันธ์ของการแปลงภาพเพื่อทำการปรับแก้ทางเรขาคณิต

3. ขั้นตอนการปรับแก้ไขความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ในขั้นตอนประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อย คือ การแปลงภาพ (Image transformation) หรือการหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของจุดภาพใหม่ ความถูกต้องของการแปลงภาพจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของแบบจำลองการแปลงที่กำหนดในงานวิจัยนี้ใช้การแปลงแบบแบบไบลิเนียร์ (Bilinear) จำนวนสัมประสิทธิ์นี้จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนคู่พิกัดที่ได้จากการรีจิสตรชันภาพอ้างอิง (Reference image) และภาพย่อยที่มีจุดควบคุมภาคพื้นดิน เมื่อได้ความสัมพันธ์การแปลงหรือการถ่ายโอนแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการกำหนดค่าของจุดภาพใหม่ เนื่องจากเมื่อทำการแปลงแล้วพิกัดภาพย่อมไม่ตกลงในตำแหน่งที่สามารถระบุได้ในพิกัดเดิม ขั้นตอนการกำหนดค่าของจุดภาพใหม่นี้จะเรียกว่าการรีแซมปลิง (Resampling) ในกระบวนการนี้ขั้นตอนหลักจะขึ้นอยู่กับประมาณค่าในช่วงโดยกำหนดจากค่าของจุดภาพรอบ ๆ จุดภาพที่กำลังพิจารณา การประมาณค่าในช่วงอาจทำได้ทั้งวิธีที่ง่ายและสะดวกที่สุดคือการกำหนดค่าของจุดภาพจากค่าของจุดภาพเดิมที่ใกล้ที่สุด อย่างไรก็ตามเพื่อความถูกต้องมากยิ่งขึ้นในขณะที่ยังการคำนวณที่ซับซ้อนขึ้นเล็กน้อย งานวิจัยนี้จึงใช้การกำหนดค่าจุดภาพจากการประมาณค่าในช่วงแบบ Bilinear

#### 4.2.1 คุณสมบัติและการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน

จำนวนและการกระจายของจุดควบคุมภาคพื้นดิน จะมีอิทธิพลต่อความแม่นยำของการปรับแก้ความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต จำนวนของจุดควบคุมภาคพื้นดินควรมีมากกว่าจำนวนของตัวแปรไม่ทราบค่า ทั้งนี้เพราะว่าความผิดพลาดต่างๆ จะถูกปรับแก้โดยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด การกระจายของจุดควบคุมภาคพื้นดิน ควรเป็นแบบคละ แต่มีระยะห่างค่อนข้างเท่ากัน รวมถึงบริเวณมุมพื้นที่ด้วย ควรเลือกจุดควบคุมที่สามารถกำหนดได้อย่างชัดเจนทั้งบนภาพและแผนที่ มี

ความคมชัดของภาพ เป็นจุดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา มีขนาดพอเหมาะ และเป็นจุดจากระดับความสูงใกล้เคียงกัน เช่น รอยตัดของถนน มุมของทุ่งนา เกาะเล็กๆ หรือแม่น้ำ ลักษณะพิเศษของที่สำคัญของจุดควบคุมภาคพื้นดิน

#### 4.2.2 การวัดค่าสหสัมพันธ์ (Correlation)

เป็นเทคนิคในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างสองสิ่งเพื่อวัดความคล้ายคลึงกัน (Similarity) กำหนดให้  $f(x,y)$  เป็นภาพที่มีบริเวณที่สนใจ หรือวัตถุที่สนใจในภาพนั้น ๆ และให้  $h(x,y)$  เป็นภาพย่อยเป็นภาพบริเวณที่สนใจหรือภาพวัตถุที่สนใจ ซึ่งเป็นคนละภาพกันภาพแรกเพียงแต่มีวัตถุหรือบริเวณสนใจร่วมกัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า  $h(x,y)$  เป็นภาพ template ที่ใช้วางทับกับภาพ  $f(x,y)$  จากนั้นทำการเลื่อนตำแหน่งไปเรื่อย ๆ เมื่อที่ตำแหน่งใดที่ภาพทั้งสองสอดคล้องมากที่สุด ณ ตำแหน่งนี้ก็จะให้ค่าสหสัมพันธ์สูงสุด

การหา Cross correlation สามารถหาได้ดังนี้

กำหนดให้  $F(u,v)$  และ  $H(u,v)$  เป็นผลจากการแปลงฟูเรียร์ของภาพ  $f(x,y)$  และ  $h(x,y)$  ตามลำดับ ดังนั้น

$$f(x,y) \circ h(x,y) \Leftrightarrow F^*(u,v)H(u,v)$$

$$f(x,y) \circ h(x,y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f^*(m,n)h(x+m,y+n) \quad (4.25)$$

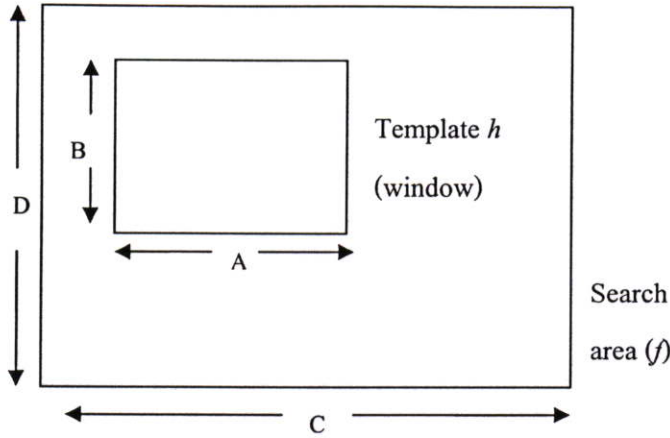
ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ค่า cross correlation ในพิกัดเชิงภาพ จะมีค่าเท่ากับผลคูณคอนจูเกตระหว่างภาพในโดเมนความถี่ และ เพื่อหลีกเลี่ยงผลความผิดพลาดจากผลของ wrap-around error สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยเพิ่ม 0 เข้ากับภาพ  $f(x,y)$  และ  $h(x,y)$  ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$f_e(x,y) = \begin{cases} f(x,y) & 0 \leq x \leq A-1 \text{ and } 0 \leq y \leq B-1 \\ 0 & A \leq x \leq P \text{ and } B \leq x \leq Q \end{cases}$$

$$h_e(x,y) = \begin{cases} h(x,y) & 0 \leq x \leq C-1 \text{ and } 0 \leq y \leq D-1 \\ 0 & C \leq x \leq P \text{ and } D \leq x \leq Q \end{cases} \quad (4.26)$$

เมื่อ  $A \times B$  เป็นขนาดภาพของ  $h(x,y)$

$C \times D$  เป็นขนาดภาพของ  $f(x,y)$



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Search area และ Window area (Template)

และเพื่อให้ค่า cross correlation อยู่ระหว่าง 0 และ 1 เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบกับ ภาพอื่น ๆ ก็ สามารถหาได้จาก normalized cross correlation แสดงตามสมการที่ 4.27

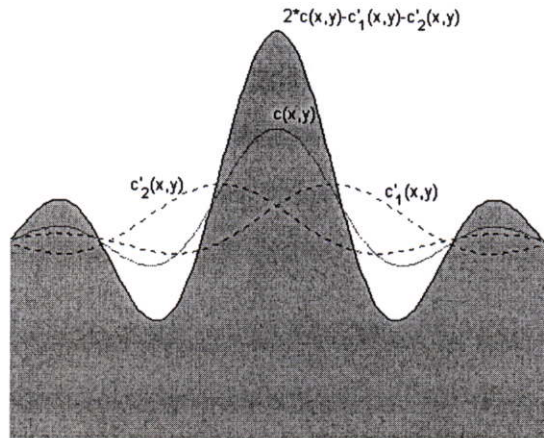
$$R(x, y) = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} h^*(m, n) f(x+m, y+n)}{\left[ \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} h^*(m, n) h(m, n) \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f^*(x+m, y+n) f(x+m, y+n) \right]^{1/2}} \quad (4.27)$$

โดยที่ตัว  $(m, n)$  คือพิกัดของภาพ template หรือพื้นที่ของหน้าต่าง (Window area : W) มีขนาด  $A \times B$  จุด ซึ่งวางอยู่บนภาพหรือพื้นที่ที่ต้องการค้นหา (Search area : S) ซึ่งมีขนาด  $C \times D$  จุด ดังรูป 4.3

#### 4.2.3 การปรับปรุงวิธีการวัดค่า Cross correlation

ในกรณีที่ภาพ  $f(x, y)$  และ  $h(x, y)$  มีค่าสหสัมพันธ์ (correlation) เป็นไปอย่างกว้าง อันเนื่องมาจาก ความคล้ายคลึงกันมากของภาพทั้งสอง หรือภาพทั้งสองมีความละเอียดต่อจุดพิกัดมาก จุดสูงสุด หรือค่าสูงสุดของค่า cross correlation ก็จะหาได้ลำบากมากขึ้นจากขนาดของค่า Cross correlation ที่มีขนาดพอ ๆ กันกับค่า Cross correlation ที่จุดสูงสุด ในการเพิ่มความเด่นชัดของจุดสูงสุด หรือ ค่า Cross correlation สูงสุด ที่จุดภาพนั้น ๆ สามารถทำได้โดยง่าย ลดขนาดของค่า Cross correlation รอบ ๆ บริเวณค่าสูงสุด โดยการหาค่า Cross correlation รอบ ๆ จุดสูงสุดจากการสร้าง ภาพจำลองด้วยการเลื่อนเฟสไปของภาพ  $h(x, y)$  ภาพจำลอง  $h'(x, y)$  ซึ่งจะมีข้อมูลคล้ายคลึงกับภาพ  $h(x, y)$  แต่จะไม่เหมือนกันเลยทีเดียวนั้น ดังนั้นค่า cross correlation ที่ได้จาก  $f(x, y)$  และ  $h'(x, y)$  จึงให้ จุดสูงสุดของค่า cross correlation เลื่อนไปด้วย

กำหนดให้  $c(x, y)$  เป็น cross correlation ระหว่าง  $f(x, y)$  และ  $h(x, y)$  และ กำหนดให้  $c'(x, y)$  เป็นค่า cross correlation ระหว่าง  $f(x, y)$  และ  $h'(x, y)$  ดังนั้นการเพิ่มความชัดเจนของ cross correlation สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเพิ่มความเด่นชัดของ Cross correlation ในขั้นตอน Image registration อย่างละเอียด

ในการสร้างภาพจำลอง  $h'(x,y)$  สามารถสร้างได้หลากหลายวิธี วิธีที่ง่ายวิธีหนึ่งคือใช้วิธีการเลื่อนตำแหน่งของภาพ  $h(x,y)$  ไปใน 4 ทิศทางคือ บน ล่าง ซ้าย และ ขวา ทั้งนี้เพื่อจะลดค่า cross correlation ในตำแหน่งอื่น ๆ ทั้ง 4 ทิศทาง ดังนั้น ค่า 2- Cross correlation เมื่อถูกเหนี่ยวนำสามารถแสดงได้ดังนี้

$$c_{enhanced}(x,y) = 4c(x,y) - c'_{up}(x,y) - c'_{down}(x,y) - c'_{left}(x,y) - c'_{right}(x,y) \quad (4.28)$$

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากต้องสร้างภาพจำลอง  $h'(x,y)$  ขึ้นถึง 4 ภาพทำให้ขั้นตอนการหาค่า  $c'(x,y)$  เพิ่มขึ้น 4 เท่าด้วยเช่นกัน เพื่อลดขั้นตอนการประมวลผลวิทยานิพนธ์นี้ เสนอวิธีการการสร้างภาพจำลองด้วยวิธีอื่น คือการกลับภาพ  $h(x,y)$  ในแนวนอนและ ซ้ายขวา โดยสมมติว่า ภาพ  $h(x,y)$  มีความคล้ายคลึงบนบริเวณหนึ่ง ๆ อย่างกว้างของภาพ  $f(x,y)$  ดังนั้นการเพิ่มความเด่นชัดค่า cross correlation สามารถหาได้ดังนี้

$$c_{enhanced}(x,y) = 2c(x,y) - c'_{up \rightarrow down}(x,y) - c'_{left \rightarrow right}(x,y) \quad (4.29)$$

เมื่อ  $c'_{up \rightarrow down}(x,y) = f(x,y) \circ h_{up \rightarrow down}(x,y) = F^{-1}(F(u,v) \cdot H^*(u,v)_{up-down})$ ,

$$c'_{left \rightarrow right}(x,y) = f(x,y) \circ h_{left \rightarrow right}(x,y) = F^{-1}(F(u,v) \cdot H^*(u,v)_{left-right})$$

$$H(u,v)_{up-down} = H(u,v) \cdot \exp\left(\frac{j\pi v}{v_{max}}\right)$$

$$H(u,v)_{left-right} = H(u,v) \cdot \exp\left(\frac{j\pi u}{u_{max}}\right)$$

และ  $F^{-1}$  เป็นค่า 2-D inverse Fourier transform.

นอกจากนี้ เนื่องจาก  $h_{up \rightarrow down}$  และ  $h_{left \rightarrow right}$  ซึ่งเกิดจากการกลับภาพจากบนไปล่าง และจากซ้ายไปขวา ทำให้ผลการแปลงฟูเรียร์มีค่า Magnitude ที่เหมือนกันกับภาพเดิม แต่ต่างกันเพียงเฟสที่กลับไป 180 องศาในแต่ละแนวแกน ค่าความต่างเฟสนี้จะเป็นตัวกำกับให้เกิดการลดทอนลงของค่า cross correlation มากน้อยเพียงใด

#### 4.2.4 การถ่ายโอนเชิงระนาบ

Geometric Transformation บางครั้งจะถูกเรียกว่าเป็น Rubber sheet transformation เพราะสามารถกระบวนการการทำงานคล้ายกันกับการพิมพ์ภาพบนแผ่นยางแล้วทำการตรึงแผ่นยางนี้ไว้ การทำงานทางด้านดิจิทัลอลิมเมจโปรเซสซึ่ง Geometric Transformation ประกอบด้วยการทำงานพื้นฐาน 2 ส่วนคือ 1 Spatial Transformation ที่ซึ่งอธิบายการจัดการของจุดภาพบนภาพแนวราบใหม่ และส่วนที่ 2 คือ Gray Level Interpolation ซึ่งเป็นการกำหนด gray level ของจุดภาพบนภาพ spatial transformation

##### Spatial Transformation

สมมติให้ภาพ  $f$  ที่มีพิกัด  $(x, y)$  เกิดความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ทำให้เกิดภาพ  $g$  ที่มีพิกัด  $(x', y')$  สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$x' = r(x, y) \quad (4.30)$$

และ

$$y' = s(x, y) \quad (4.31)$$

เมื่อ  $r(x, y)$  และ  $s(x, y)$  เป็น spatial transformation ที่ทำให้เกิดภาพที่ผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต  $g(x', y')$  ถ้า  $r(x, y) = x/2$  และ  $s(x, y) = y/2$  ความผิดเพี้ยนจะทำให้ขนาดของ  $f(x, y)$  หดตัวลงเท่าครึ่งใน spatial ทั้งสอง

ถ้ารู้การวิเคราะห์  $r(x, y)$  และ  $s(x, y)$  การชดเชย  $f(x, y)$  จากภาพที่ผิดเพี้ยน  $g(x', y')$  โดยการใช้ส่วนกลับของการถ่ายโอนอาจจะเป็นไปได้ แต่ในทางปฏิบัติ การคำนวณหาค่าเซ็ทของฟังก์ชัน  $r(x, y)$  และ  $s(x, y)$  ที่อธิบายกระบวนการผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิตบนภาพที่ได้รับอาจเป็นไปได้ วิธีการที่ถูกใช้บ่อยครั้งเพื่อแก้ปัญหานี้ คือการกำหนดตำแหน่ง spatial ของจุดภาพใหม่โดยใช้จุดตรึง (tie point) ซึ่งเป็น subset ของจุดภาพที่รู้ตำแหน่งที่แน่นอน โดยจะกำหนดในภาพอินพุตที่ผิดเพี้ยนกับภาพเอ้าท์พุตที่ได้รับการแก้ไขแล้ว รูปที่ 4.5 แสดงพื้นที่ของสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าในภาพที่เกิดการผิดเพี้ยนกับตำแหน่งเดียวกันในภาพที่ได้รับการแก้ไข มุมของสี่เหลี่ยมจะ

เป็นตำแหน่งของจุดตรึงที่ตรงกัน สมมุติว่ากระบวนการการผิเค้นเชิงเรขาคณิต ภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมถูกจำลองด้วยสมการ bilinear คู่หนึ่ง ดังนี้

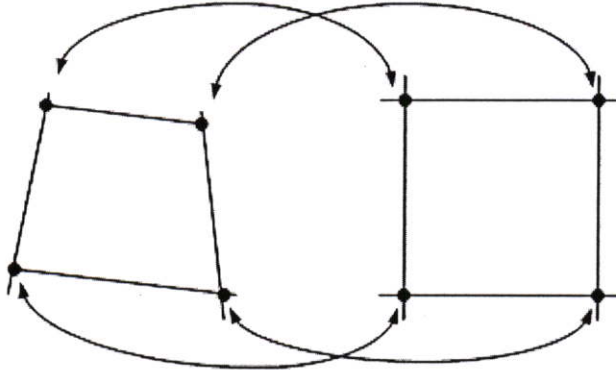
$$r(x, y) = C_1x + C_2y + C_3xy + C_4 \quad (4.32)$$

และ 
$$s(x, y) = C_5x + C_6y + C_7xy + C_8 \quad (4.33)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 4.30 และ 4.31 จะได้

$$x' = C_1x + C_2y + C_3xy + C_4 \quad (4.34)$$

$$y' = C_5x + C_6y + C_7xy + C_8 \quad (4.35)$$



รูปที่ 4.5 แสดงจุดตรึงที่ตรงกันระหว่างภาพทั้งสอง

จะพบว่าจะมีตำแหน่งของจุดตรึงทั้งหมด 8 ค่า ซึ่งสมการนี้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 8 ค่าได้ ซึ่งสัมประสิทธิ์จะประกอบขึ้นเป็นแบบจำลองความผิเค้นเชิงเรขาคณิตเพื่อใช้ถ่ายโอนจุดภาพทั้งหมดภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมซึ่งกำหนดโดยจุดตรึง โดยทั่วไปจำนวนของจุดตรึงที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่จำเป็นในการสร้างขอบเขตรูปทรงสี่เหลี่ยมซึ่งครอบคลุมภาพที่ได้รับทั้งหมด ซึ่งแต่ละกรอบสี่เหลี่ยมก็จะมีสัมประสิทธิ์เฉพาะของตัวเอง

หลังจากที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์แล้ว กระบวนการที่จะใช้เพื่อสร้างภาพที่ถูกต้องจะไม่ยุ่งยาก ถ้าเราต้องการหาค่าของภาพที่ไม่ผิเค้นที่จุดใดๆ  $(x_0, y_0)$  เราจำเป็นที่จะต้องรู้ตำแหน่งบนภาพ  $f(x_0, y_0)$  ที่ผิเค้นที่ตรงกัน ซึ่งทำได้โดยการแทน  $(x_0, y_0)$  ในสมการที่ 4.34 และ 4.35 เพื่อให้ได้พิกัดของภาพที่ผิเค้นเชิงเรขาคณิต  $(x'_0, y'_0)$  และค่าของจุดบนภาพที่ผิเค้นที่ตรงกันกับ  $(x'_0, y'_0)$  ก็คือ  $g(x'_0, y'_0)$  ดังนั้นเราสามารถที่จะหาค่าของภาพที่สร้างกลับคืนได้โดยการให้  $\hat{f}(x_0, y_0) = g(x'_0, y'_0)$  ดังตัวอย่างเช่น เมื่อต้องการสร้าง  $\hat{f}(0,0)$  เราแทนที่  $(x, y)$  ด้วย

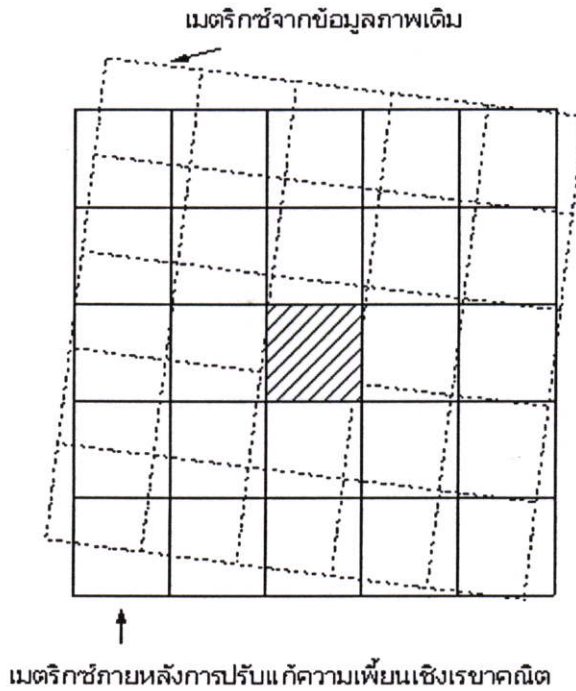
$(0,0)$  ในสมการที่ 4.34 และ 4.35 เพื่อให้ได้ คู่ของพิกัด  $(x', y')$  จากนั้นเราให้  $f'(0,0) = g(x', y')$  ที่ซึ่ง  $x'$  และ  $y'$  คือค่าพิกัดที่เพิ่งได้มา ขั้นตอนต่อมาคือแทนที่  $(x, y) = (0,1)$  ในสมการที่ 4.34 และ 4.35 ก็จะได้คู่ของพิกัด  $(x', y')$  อีกค่าหนึ่ง และให้  $f'(0,1) = g(x', y')$  เป็นค่าของพิกัดเหล่านั้น กระบวนการนี้จะต่อเนื่องในรูปแบบจุดภาพต่อจุดภาพและแถวต่อแถว จนกว่าจะได้อะเรย์ ซึ่งจะมีความยาวที่ไม่ใหญ่กว่าขนาดของภาพ  $g$  ส่วนการสแกนในแนวคอลัมน์ก็จะให้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันอย่างไรก็ตาม การปฏิบัติตามขั้นตอนที่ระบุไว้เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อที่จะรักษากรอบสี่เหลี่ยม เพื่อให้ได้ตำแหน่งของจุดภาพในกรณีที่ต้องการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ถูกต้อง จุดตรงใจจะมีความมั่นคงและแน่นอน ด้วยจำนวนของเทคนิคที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน ตัวอย่างเช่นระบบการเกิดภาพบางอย่างมีลักษณะทางกายภาพเป็นสิ่งที่มนุษย์สร้างขึ้น (เช่นจุดที่เป็นโลหะ) ทำให้เกิดกลุ่มของจุดที่ทราบค่าแน่นอน โดยตรงบนภาพที่ได้รับมานั้น หากภาพเกิดความผิดเพี้ยนด้วยกระบวนการใดๆ ก็ตามหลังจากนั้น เช่นกระบวนการการแสดงผลภาพหรือกระบวนการสร้างภาพกลับคืน ภาพก็จะสามารถได้รับการแก้ไขเชิงเรขาคณิต ด้วยการใช้นิยามที่ได้อธิบายข้างต้น

#### 4.2.5 Resampling และ Gray-Level Interpolation

ภายหลังจากที่ได้มีการกำหนดพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points) ทั้งของภาพหลักและภาพที่ต้องปรับแก้ให้สอดคล้องหรือสัมพันธ์กันในแต่ละตำแหน่งของข้อมูลภาพ เพื่อการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ซึ่งผลที่ได้ทำให้จุดภาพจำนวนมากมีพิกัดของข้อมูลอยู่ในตำแหน่งเป็นทศนิยมไม่สามารถที่จะแสดงผลออกทางจอภาพได้ และในพิกัดที่เป็นจำนวนเต็มบางตำแหน่งกลับไม่มีข้อมูลอยู่เลยและด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงต้องนำข้อมูลภาพที่ได้มาทำการซัดตัวอย่างข้อมูลภาพใหม่ (Resampling) เพื่อที่จะได้ปรับพิกัดของข้อมูลภาพให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม กล่าวคือได้พิกัดภาพที่เป็นจำนวนเต็ม จนกระทั่งแสดงผลหน้าจอได้ แต่การจัดข้อมูลภาพดังกล่าวจะต้องอาศัยวิธีการแทรกค่า (Interpolation) ของข้อมูล ในตำแหน่งที่ไม่มีข้อมูลภาพปรากฏอยู่ เพื่อให้ได้ภาพที่สมบูรณ์มากขึ้น ถือได้ว่าเป็นสิ่งที่จำเป็นวิธีการหนึ่งภายหลังการปรับแก้ความผิดเพี้ยนของข้อมูลภาพเชิงเรขาคณิตที่ใช้กันทั่วไป

เพื่อให้ได้ข้อมูลภาพที่สามารถแสดงผลทางจอภาพและเพิ่มเติมข้อมูลภาพบางส่วนที่ขาดหายไป ภายหลังจากการปรับแก้ความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิตของข้อมูลภาพเพื่อให้ได้ลักษณะข้อมูลภาพเหมือนกับต้นฉบับมากที่สุด ซึ่งในการซัดตัวอย่างข้อมูลภาพสามารถที่จะกระทำได้หลายวิธีด้วยกัน ตัวอย่างเช่น การซัดตัวอย่างข้อมูลภาพโดยพิจารณาจากพิกัดภาพใกล้เคียง (Nearest neighbor) และการแทรกค่าข้อมูล (Interpolation) ให้กับข้อมูลภาพที่มีค่าแน่นอนสองค่า ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แสดงการซัดตัวอย่างข้อมูลภาพ สังกัดจากเมตริกซ์เส้นทึบซึ่งเกิดจากการปรับแก้ความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ที่ได้วางซ้อนทับอยู่บนเมตริกซ์เส้นประซึ่งเป็นเมตริกซ์เดิมก่อนที่จะมีการปรับแก้ความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต จะสังเกตเห็นว่าตำแหน่งของพิกัดภาพที่แสดงในภาพทั้งสองนั้น ไม่ได้ทับกัน

พอดี แต่จะเป็นลักษณะเหลี่ยมกัน และพิกัดภาพในส่วนที่ได้แรงงานั้นจะซ้อนทับอยู่บนพิกัดภาพเดิมที่เป็นเส้นประทั้ง 4 จุดภาพ เป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ในกรณีที่จะต้องการนำภาพดังกล่าวไปพิจารณาต่อในอนาคตหรือเพื่อการแสดงผลออกทางจอภาพ

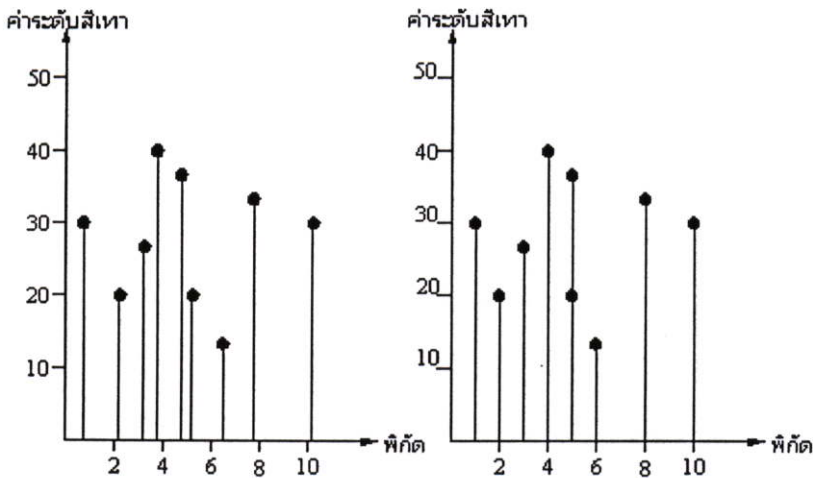


รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบเมตริกซ์ทั้งก่อนและหลังการปรับแก้ความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต

การชักตัวอย่างภาพข้อมูลจากพิกัดใกล้เคียงถือได้ว่าเป็นวิธีการชักตัวอย่างภาพข้อมูลแบบง่ายที่สุด เนื่องจากกระทำได้ง่าย กล่าวคือ ภายหลังจากที่มีการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตในข้อมูลภาพเรียบร้อยแล้ว ผลของพิกัดใหม่ที่ได้จะอยู่ในรูปของทศนิยม ซึ่งไม่สามารถแสดงผลบนจอภาพได้ แต่การชักตัวอย่างข้อมูลภาพนั้นจะเป็นการสุ่มเอาพิกัดของภาพที่อยู่ใกล้ที่สุดมาแทนพิกัดที่เป็นจำนวนทศนิยมหรือพิกัดที่ขาดหายไป เหนือนี้ก็จะถือได้ว่าเป็นการชักตัวอย่างข้อมูลภาพใหม่ได้ ทั้งยังสามารถนำภาพมาแสดงบนจอภาพได้ จากรูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างค่าพิกัดที่ได้จากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่อยู่ในรูปของทศนิยม นำมาทำการปรับค่าให้อยู่ในรูปของจำนวนเต็ม

วิธีการที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้นี้เป็นขั้นตอนในกรณีที่ค่าของพิกัด  $(x, y)$  เป็นจำนวนเต็ม เพื่อให้เกิดการสร้างภาพ  $f(x, y)$  แต่อย่างไรก็ตาม ขึ้นอยู่กับค่าของสัมประสิทธิ์  $C$ ; จากสมการที่ 4.34 และ 4.35 สามารถให้ค่าของ  $x'$  และ  $y'$  ที่ไม่เป็นจำนวนเต็มได้ เนื่องจากภาพที่เกิดความผิดเพี้ยน  $g$  เป็นแบบดิจิตอลซึ่งค่าของจุดภาพจะถูกกำหนดให้เป็นพิกัดจำนวนเต็ม ดังนั้นการใช้ค่า  $x'$  และ  $y'$  ที่ไม่เป็นจำนวนเต็ม จะเป็นเหตุให้การซ้อนภาพในภาพ  $g$  ที่ไม่มี gray level เป็นเรื่องที่

ถูกจำกัด นั่นแสดงว่าค่าของ gray level ที่ควรจะเป็นที่ตำแหน่งนั้น ขึ้นอยู่กับค่าของจุดภาพที่พิกัดจำนวนเต็ม ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็น เทคนิคที่ใช้เรียกว่า gray level interpolation



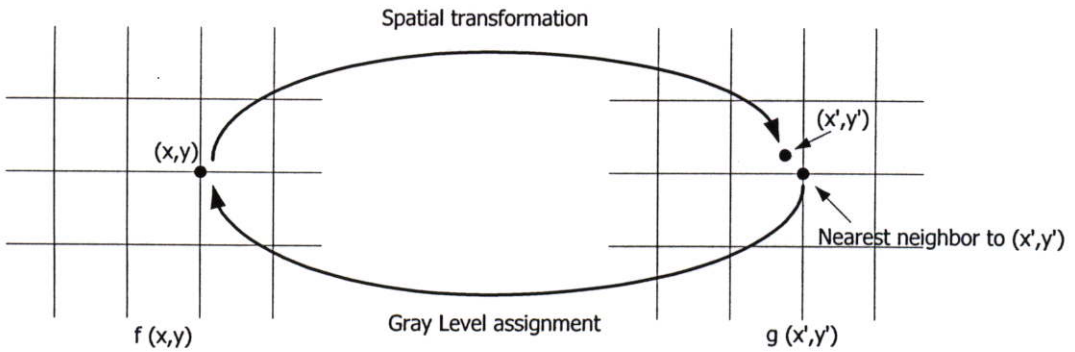
รูปที่ 4.7 การชักตัวอย่างข้อมูลภาพจากพิกัดใกล้เคียง

รูปแบบอย่างง่ายของ gray level interpolation มีพื้นฐานบนค่าความใกล้เคียง วิธีการนี้อาจเรียกว่า Zero order interpolation ซึ่งแสดงตามรูปที่ 4.7 จากรูปจะเห็น การซ้อนของพิกัดจำนวนเต็ม  $(x, y)$  กับพิกัดที่เป็นเศษส่วน  $(x', y')$  ด้วยสมการที่ 4.34 และ 4.35 การเลือกพิกัดจำนวนเต็มที่ใกล้เคียงกับ  $(x', y')$  และการทำงานของ gray level ที่เป็นพิกัดใกล้เคียงกับจุดภาพบน  $(x, y)$

ถึงแม้ว่าการแทรกค่าจากพิกัดใกล้เคียงเป็นรูปแบบที่ไม่ซับซ้อนมาก แต่วิธีนี้ก็มิอุปสรรคในเรื่องของการเกิดภาพที่ไม่ต้องการ เช่นการผิดเพี้ยนของขอบเส้นตรงในภาพที่มีความละเอียดสูง การใช้เทคนิคอื่นจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า เช่นการใช้ cubic convolution interpolation ที่ซึ่งเหมาะสมกับพื้นผิวของชนิด  $(z)/z$  ด้วยจำนวนของพิกัดใกล้เคียงที่มากขึ้น ในกรณีที่ต้องการได้ค่าการประมาณ gray level ที่เรียบที่จุดใดๆที่ต้องการ พื้นที่ทั่วไปที่ต้องการการประมาณค่าที่เรียกว่า เช่น ภาพ 3 มิติ หรือภาพที่เกี่ยวกับทางการแพทย์ แต่ค่าใช้จ่ายสำหรับวิธีการนี้ก็สูงเช่นกัน ดังนั้นสำหรับ งานทางด้านอิมเมจโปรเซสซึ่งต่างๆ ไป วิธีการของ bilinear interpolation จะมีลักษณะของการใช้ค่าของพิกัดใกล้เคียง 4 ตำแหน่ง ซึ่งพอเพียงสำหรับงานทั่วไป ซึ่งวิธีการนี้จะมีลักษณะตรงไปตรงมา เพราะว่าจะทราบค่าของค่า gray level ของแต่ละพิกัดใกล้เคียงของคู่พิกัดที่ไม่เป็นจำนวนเต็ม ค่าของ gray level ที่พิกัดเหล่านี้  $(x', y')$  สามารถถูกแทรกค่าจากค่าของตำแหน่งใกล้เคียงตัวมันเองโดยการใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$v(x', y') = ax' + by' + cx'y' + d \quad (4.36)$$

จากสมการพบว่า การคำนวณหาความสัมพันธ์ทั้ง 4 จะเป็นเรื่องง่ายจาก 4 สมการใน 4 ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่สามารถเขียนโดยการใช้ พิกัดที่ทราบค่า 4 ตัวของ  $(x', y')$  เมื่อคำนวณหาความสัมพันธ์ทั้งหมดได้แล้ว ค่าของ  $g(x', y')$  จะถูกคำนวณและค่าที่ได้จะถูกระบุตำแหน่งในภาพ  $f(x, y)$  ที่ซึ่งมีการให้ spatial mapping ในตำแหน่ง  $(x', y')$  เป็นเรื่องง่ายที่จะนึกภาพของกระบวนการนี้ด้วยรูปที่ 4.8 โดยยกเว้น แทนที่จะใช้ค่าของ gray level ของพิกัดใกล้เคียงใน  $(x', y')$  ที่จริงเราใช้การแทรกค่าที่ตำแหน่ง  $(x', y')$  และใช้ค่านี้สำหรับการกำหนด gray level ที่ตำแหน่ง  $(x, y)$



รูปที่ 4.8 Gray level interpolation บนพื้นฐานของหลักการพิกัดใกล้เคียง

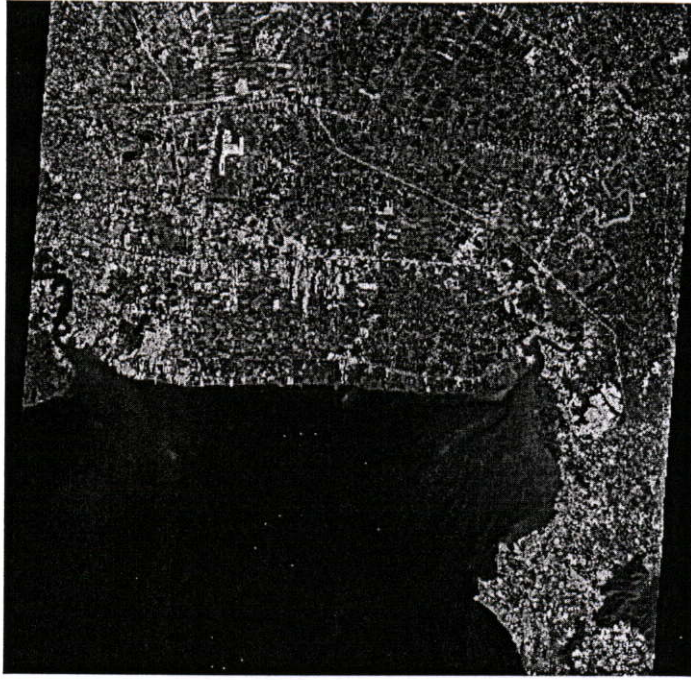
## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบกระบวนการวิธีแก้ไขความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต (Geometric distortion) โดยแบ่งเป็นสองส่วนคือ การปรับแก้ไขความผิดพลาดเชิงเรขาคณิตแบบหยาบ จากนั้นจึงทำการรีจิสเตอร์ชั้นบนบริเวณจุดควบคุมภาคพื้นดินในขั้นตอนการปรับแก้แบบละเอียดตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทก่อนหน้า ทั้งนี้เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและความถูกต้องแม่นยำในการแก้ไขภาพด้วยกระบวนการวิธีที่นำเสนอ ขั้นตอนทั้งหมดจะถูกโปรแกรมด้วย MATLAB โดยจะแสดงผลการทดสอบจริงกับภาพถ่ายดาวเทียมระหว่างภาพอ้างอิงซึ่งเป็นภาพที่ได้รับการปรับแก้ไขแล้ว และภาพภายใต้การทดสอบซึ่งต้องการปรับแก้ไขให้ถูกต้อง

#### 5.1 การรีจิสเตอร์ชั้นภาพอย่างหยาบ (Coarse image registration)

ในกระบวนการแก้ไขความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต ขั้นตอนแรกที่กระบวนการปรับแก้แบบหยาบซึ่งทำได้โดยการรีจิสเตอร์ชั้นภาพอย่างหยาบ สิ่งที่ได้จากขั้นตอนนี้ คือ ค่าการปรับขนาด (scaling factor) และ มุมการหมุน (rotating angle) จากนั้นจึงนำค่าเหล่านี้ไปทำแก้ไขภาพอย่างหยาบ โดยสมมติว่าภาพการบิดเบี้ยวของภาพโดยรวมเกิดจากถ่ายโอนแบบ affine ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของภาพ และภาพเกิดการหมุนไป ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทก่อนหน้าแล้ว ในการศึกษาเพื่อทดสอบวิธีที่นำเสนอ จะใช้ภาพถ่ายดาวเทียม SPOT ซึ่งรับสัญญาณเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน ค.ศ. 1998 เป็นภาพอ้างอิงที่ได้ทำการปรับแก้ไขเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และในการศึกษานี้จะใช้ภาพถ่ายดาวเทียมที่รับสัญญาณในวันที่ 16 พฤศจิกายน ค.ศ. 1998 (รูปที่ 5.2) เป็นภาพที่ต้องการปรับแก้ไขความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต ที่เกิดจากองค์ประกอบหลักคือ การหมุนของโลก การเคลื่อนที่ขึ้นลงของดาวเทียม และมุมของตัวตรวจจับ ซึ่งทั้งหมดเป็นการรบกวนเชิงระบบ ภาพทั้งสองเป็นภาพพื้นที่เดียวกันที่ครอบคลุมบริเวณภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย โดยภาพสองภาพนี้จะถูกนำมาประมวลตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4



รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายดาวเทียม Spot รับสัญญาณวันที่ 24 พฤศจิกายน ค.ศ.1998 (ภาพอ้างอิง)



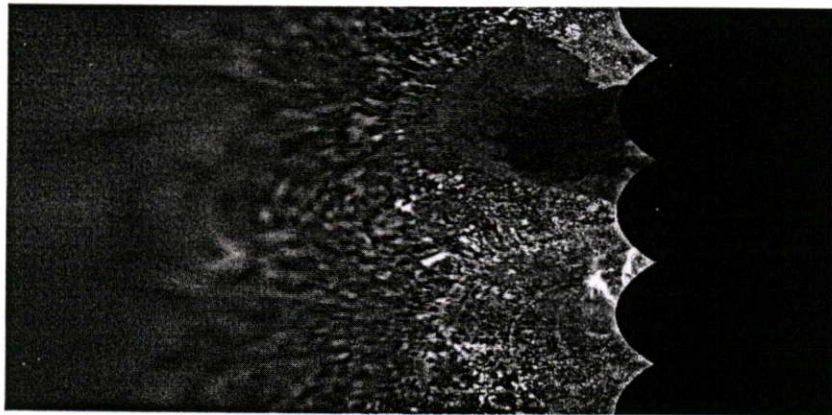
รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายดาวเทียม Spot รับสัญญาณวันที่ 16 พฤศจิกายน ค.ศ.1998 (ภาพที่ต้องการปรับแก้)

กำหนดให้  $\mathbf{v}_p$  เป็นพิกัดบนแกนเชิงมุม  $\mathbf{v}_p = \begin{bmatrix} \rho_v \\ \theta_v \end{bmatrix}$

ซึ่ง  $\rho_v$  คือระยะห่างจากจุดกำเนิดถึงจุด  $\mathbf{v}$  บนพิกัดภาพ (ในที่นี้ กำหนดให้จุดกำเนิดอยู่ ณ ตำแหน่งมุมบนซ้ายของภาพ)  $\rho_v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$  และ  $\theta_v$  คือมุมของเส้นเชื่อมต่อระหว่างจุดกำเนิดถึงจุด  $\mathbf{v}$  เทียบกับแกนนอน  $\theta_v = \text{atan}(v_2 / v_1)$  รูปที่ 5.3 และ 5.4 แสดงผลที่ได้จากการแปลงให้อยู่ในพิกัด polar ของภาพอ้างอิง (รูปที่ 5.1) และ ภาพที่ต้องการปรับแก้ (รูปที่ 5.2) ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 ภาพอ้างอิง (รูปที่ 5.1) ในพิกัด polar



รูปที่ 5.4 ภาพที่ต้องการปรับแก้ (รูปที่ 5.2) ในพิกัด polar

จากนั้นอาศัยเทคนิค phase correlation โดยเริ่มจากการแปลงฟูเรียร์ในรูปที่ 5.3 และ 5.4 จากนั้นใช้ความสัมพันธ์

$$\frac{F(\mathbf{u})G^*(\mathbf{u})}{|F(\mathbf{u})G(\mathbf{u})|} = e^{j2\pi(\mathbf{u},\mathbf{t})} \quad (5.1)$$

ซึ่งในขั้นตอนนี้ค่า scaling factor และ rotating angle จะอยู่ในลักษณะการเลื่อนพิกัด (บนพิกัด logarithm) จุดพิกัดที่ให้ค่า phase correlation สูงสุด จะถูกแปลงกลับด้วยความสัมพันธ์

$$\log(\mathbf{v}) = \log((\mathbf{A}_{scal}^{-1})^T) \mathbf{u} = \log \mathbf{u} - \log(\text{diag}(\mathbf{A}_{scal})) \quad (5.2)$$

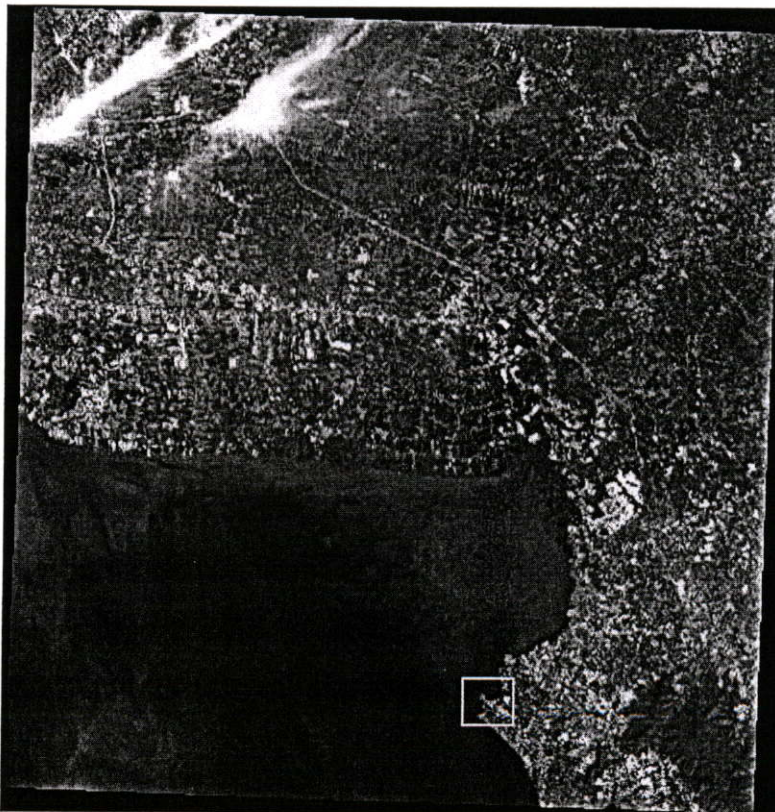
โดย  $\log(\text{diag}(\mathbf{A}_{scal}))$  แสดงการเลื่อนไปของพิกัด เมื่อทำการแปลงให้อยู่ในสเกลแบบ logarithm

ในขณะเดียวกันมุมการหมุนของภาพก็สามารถหาได้จากการเลื่อนพิกัด (บนพิกัด polar) ได้โดย

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{u}_p - \begin{bmatrix} 0 \\ \theta \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

เมื่อ  $\theta$  แสดงการหมุนไปของมุมของภาพ

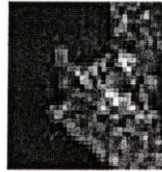
จากผลการทดสอบพบว่าค่า scaling factor มีค่าเท่ากับ 1.12 และ มุมการหมุน Rotate angle ( $\theta$ ) เท่ากับ 1.8



รูปที่ 5.5 ภาพที่ได้รับการปรับแก้อย่างหยาบแล้ว

## 5.2 การรีจิสเตรชันภาพอย่างละเอียด (Fine image registration)

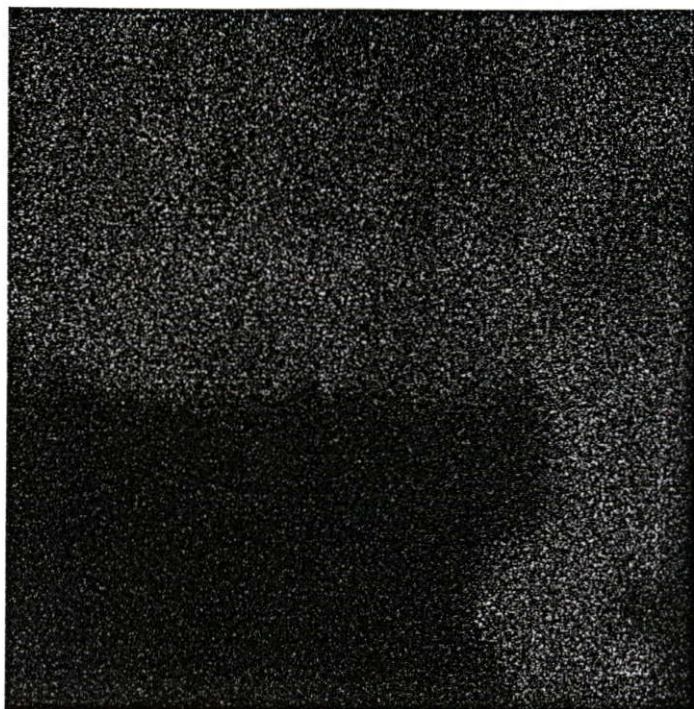
เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการรีจิสเตรชันภาพอย่างหยาบแล้ว ซึ่งผลที่ได้ ภาพทั้งสองจะมีอัตราการจัดขนาด (Scaling factor) ที่เท่ากัน และวางตัวในมุมมองเดียวกัน จากนั้น จึงเข้าสู่กระบวนการรีจิสเตรชันภาพอย่างละเอียด โดยขั้นตอนนี้เป็นรีจิสเตรชันภาพแบบภาพคู่ภาพ เริ่มแรกจะทำการเลือกบริเวณภาพย่อย (sub image) ในภาพที่ต้องการปรับแก้ไขความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต ซึ่งภาพย่อยนี้จะต้องครอบคลุมบริเวณที่สำคัญทางกายภาพที่เด่นชัดและมีคุณสมบัติที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งเป็นคุณสมบัติของจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Point: GCP) จากนั้นจึงนำไปรีจิสเตรชันกับภาพอ้างอิง กรอบสี่เหลี่ยมในรูปที่ 5.5 (หรือ รูปที่ 5.6) แสดงบริเวณภาพย่อยที่กำหนดให้เป็นจุดควบคุมภาคพื้นดิน เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เด่นชัดและไม่เปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลา อีกทั้งยังปรากฏเด่นชัดบนภาพทั้งสองภาพ (ภาพอ้างอิง และภาพที่ต้องการปรับแก้ไขความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต)



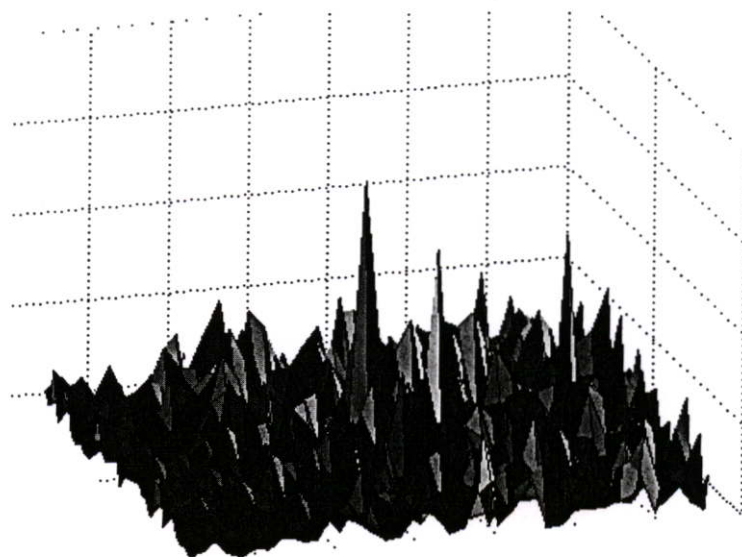
รูปที่ 5.6 ภาพที่ใช้ในการค้นหา (Search image) หรือภาพจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP)

ในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบการรีจิสเตรชันภาพ 3 แบบด้วยกัน เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

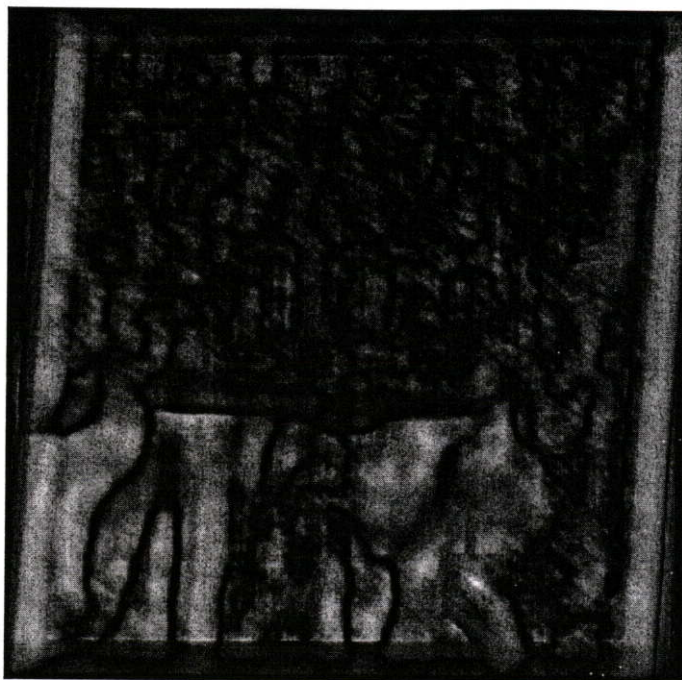
- วิธีแรกเป็นวิธี phase correlation ระหว่างภาพอ้างอิง (รูป 5.1) และภาพที่ต้องการปรับแก้ (รูป 5.2) ผลของ phase correlation แสดงในรูปที่ 5.7 และ บริเวณจุดควบคุมภาคพื้นดินแสดงในรูปที่ 5.8
- วิธีที่สองเป็นวิธี Normalized cross correlation ระหว่างภาพอ้างอิง (รูป 5.1) และภาพที่ต้องการปรับแก้ (รูป 5.2) ผลของ Normalized cross correlation แสดงในรูปที่ 5.9 และ บริเวณจุดควบคุมภาคพื้นดินแสดงในรูปที่ 5.10
- วิธีที่สามเป็นวิธีที่นำเสนอ คือการรีจิสเตรชันแบบหยาบและต่อด้วยการรีจิสเตรชันแบบละเอียด (phase correlation) ระหว่างภาพอ้างอิง (รูป 5.1) และ ภาพที่ปรับแก้เรียบร้อยแล้ว (รูป 5.5) ผลของ phase correlation แสดงในรูปที่ 5.11 และ บริเวณจุดควบคุมภาคพื้นดินแสดงในรูปที่ 5.12



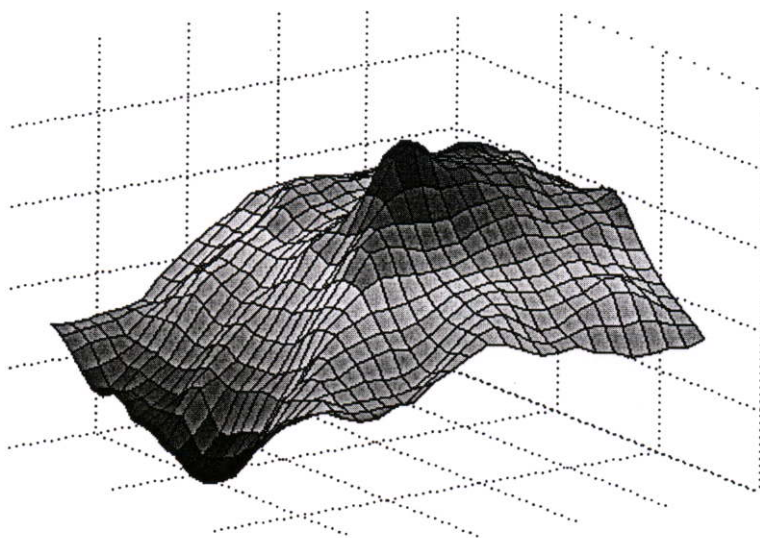
รูปที่ 5.7 ผลการรีจิสเตรชันด้วยวิธี phase correlation ระหว่าง รูปที่ 5.1 และ 5.2



รูปที่ 5.8 ผลการรีจิสเตรชันด้วยวิธี phase correlation บริเวณจุดควบคุมภาคพื้นดิน



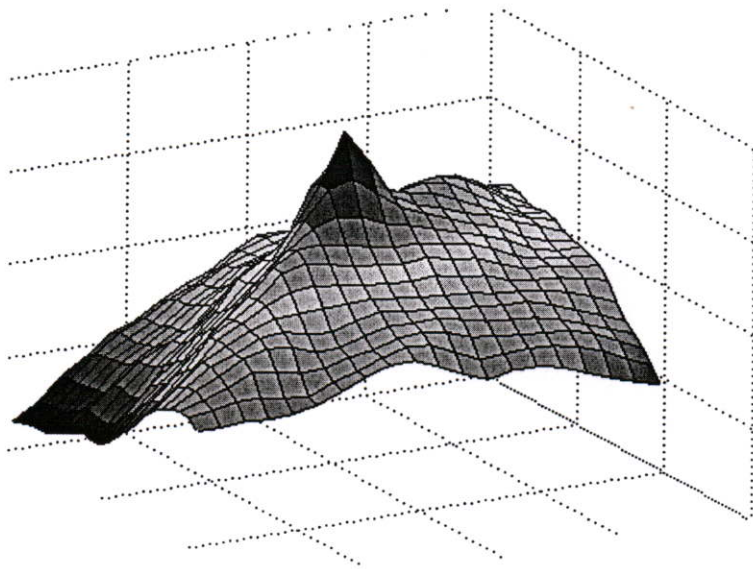
รูปที่ 5.9 ผลการรีจิสเตอร์ด้วยวิธี normalized cross correlation ระหว่าง รูปที่ 5.1 และ 5.2



รูปที่ 5.10 ผลการรีจิสเตอร์ด้วยวิธี normalized cross correlation บริเวณจุดควบคุมภาคพื้นดิน



รูปที่ 5.11 ผลการรีจิสเตอร์ชั้นแบบละเอียด (phase correlation) ระหว่างรูป 5.1 และ 5.5

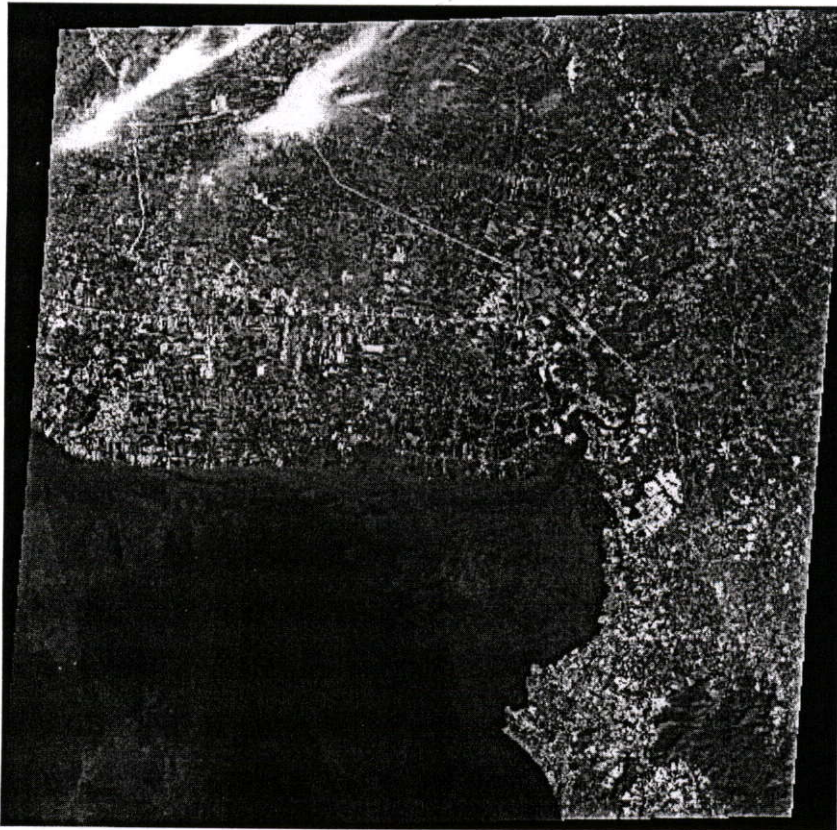


รูปที่ 5.12 ผลการรีจิสเตอร์ชั้นแบบละเอียด (phase correlation) บริเวณจุดควบคุมภาคพื้นดิน

จากผลการทดสอบพบว่า วิธี phase correlation จะให้ผลดีต่อเมื่อ ภาพที่นำมากระทำกัน ต้องมีขนาด (scaling) และ วางมุมใกล้เคียงกันในทางกลับกัน วิธีการนี้จะให้ผลผิดพลาดเนื่องจาก เกิดจุดยอด (peak) มากมายทำให้เกิดการรีจิสเตอร์ชั้นผิดพลาดได้ง่าย ส่วนวิธี normalized cross

correlation กลับให้ผลสวนทางกันคือ จะให้จุดยอดเพียงเล็กน้อยและมีลักษณะกระจายกว้างออก เมื่อภาพที่นำมากระทำกันมีความสอดคล้องกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอจึงเป็นการแก้ไขปัญหา phase correlation ด้วยการปรับแก้อย่างหยาบเสียก่อน

เพื่อทำการแก้ไขความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต และด้วยวิธีที่นำเสนอทำการเลือกภาพย่อยหรือจุดควบคุมภาคพื้นดินอื่น ๆ ให้กระจายทั่วบริเวณภาพจากนั้นจึงทำการรีจิสเตอร์ชั้นภาพ เมื่อได้พิกัดที่สอดคล้องกันระหว่างภาพอ้างอิง และภาพที่ต้องการปรับแก้ไขความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิตแล้ว จึงทำการแปลงภาพโดยการ resampling เพื่อหาค่าพิกัดภาพใหม่จากการแปลง และ ประมาณค่าในช่วงเพื่อใช้ในการกำหนดความเข้มแสงในพิกัดภาพใหม่ด้วยวิธี bilinear interpolation ในกระบวนการนี้จะทำทั้ง 3 band เพื่อให้ได้ภาพสีที่ต้องการผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ผลการปรับแก้ไขความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการและกระบวนการต่าง ๆ ในการ registration ภาพสองภาพ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญเบื้องต้นในการประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพ ได้แก่ การตรวจจับวัตถุ การตรวจการเคลื่อนที่ ตลอดจนถึงการบีบอัดข้อมูลภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพถ่ายระยะไกล เช่นภาพถ่ายดาวเทียม และภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งโดยธรรมชาติของการตรวจจับและคุณลักษณะของตัวตรวจจับ (sensor) ทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของข้อมูลทั้งทางเรขาคณิตและทางรังสี เพื่อให้การนำข้อมูลไปใช้มีความถูกต้องแม่นยำและเกิดประสิทธิผลสูงสุด จึงหลีกเลี่ยงมิได้ที่ต้องดำเนินการปรับแก้ความผิดเพี้ยนข้างต้นเสียก่อน ขั้นตอนในการปรับแก้แบบเดิมจะเริ่มจากการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) จากนั้นความสัมพันธ์ของพิกัดระหว่างภาพที่ต้องการปรับแก้ และภาพอ้างอิงเช่น ภาพแผนที่ หรือภาพถ่ายที่มีการพิสูจน์และปรับแก้แล้วก่อนหน้านี้ ดังนั้น ความถูกต้องในการแก้ไขความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของภาพควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) ที่ทำการเลือกกับภาพอ้างอิง การกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground control points) ซึ่งควรจะมีคุณสมบัติที่ดีได้แก่ ปรากฏเด่นชัด ไม่เปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา กระจายทั่วบริเวณ เป็นต้น ขั้นตอนนี้แม้จะกำหนดเงื่อนไขประกอบต่าง ๆ เพื่อให้การแก้ไขความผิดเพี้ยนนี้เป็นไปได้โดยอัตโนมัติ แต่ก็ยังนิยมจะกระทำโดยมนุษย์ ทั้งนี้เนื่องจาก ความเชื่อถือและความซับซ้อนในการคำนวณตามเงื่อนไขเป็นไปด้วยความยุ่งยากและให้ผลไม่ดีเท่าที่ควร คือ จุดควบคุมภาคพื้นดินมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสม นอกจากนี้ในกรณีที่ต้องการให้การรีจิสเตอร์ภาพเป็นไปโดยอัตโนมัติไม่ขึ้นอยู่กับบุคคลที่มีความชำนาญในการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน การทำการปรับแก้เชิงเรขาคณิตสามารถทำได้โดยการรีจิสเตอร์ภาพแบบภาพสู่ภาพ โดยการกำหนดพื้นที่บริเวณที่มีลักษณะเด่นเช่นเดียวกับจุดควบคุมภาคพื้นดินจากนั้นจึงทำการรีจิสเตอร์ภาพย่อยนี้บนภาพอ้างอิงอีกทีหนึ่ง โดยอาศัยการวัดความคล้ายคลึงของภาพ ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี ดังนั้นประสิทธิภาพการรีจิสเตอร์ภาพ หรือความถูกต้องในการหาคู่พิกัดที่สัมพันธ์กันขึ้นกับเทคนิคการวัดความคล้ายคลึงกัน หรือการรีจิสเตอร์ภาพ เช่น การรีจิสเตอร์ภาพด้วยวิธี phase correlation จะให้ผลการรีจิสเตอร์ถูกต้อง แต่ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะภาพทั้งสองที่จะนำมาทำรีจิสเตอร์กัน คือต้องขนาดสเกลและวางตัวอยู่ในมุมเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามหากภาพทั้งสองเกิดความแตกต่างกันในขนาดสเกลและมุมของภาพเพียงเล็กน้อย เทคนิคนี้จะใช้ไม่ได้ผลเลย ดังนั้นขั้นตอนการเตรียมภาพจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญ

วิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนากระบวนการ registration ให้มีความสะดวก รวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น โดยผู้ดำเนินการ เพียงกำหนดบริเวณที่เหมาะสมในการกำหนดให้เป็นจุดควบคุมภาคพื้นดิน จากนั้นภาพย่อยซึ่งครอบคลุมบริเวณจุดควบคุมจะใช้ในการค้นหาตำแหน่งที่สอดคล้องกันมากที่สุด ในภาพที่ต้องการปรับแก้ กระบวนการนี้เรียกว่า image-to-image registration การวัดความสอดคล้อง

ตรงกัน (Similarity measurement) มีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งวิธีที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งคือการวัด สหสัมพันธ์ระหว่างภาพทั้งสอง (Correlation) ซึ่งจะให้ที่ถูกต้องแม่นยำอย่างจำกัดภายใต้เงื่อนไขที่ สำคัญคือ ภาพที่ทำการค้นหาและภาพอ้างอิงต้องมีลักษณะใกล้เคียงกันมากทั้งการวางตัว (alignment) การสเกล (scaling) และจะให้ผลดีที่สุดเมื่อภาพที่ทำการค้นหาเป็นส่วนหนึ่งของภาพอ้างอิง ในขณะที่ ในทางปฏิบัติแล้ว ภาพย่อยของจุดควมคุมภาคพื้นดินจะได้จากภาพอ้างอิงซึ่งมีการปรับแก้ความ ผิดเพี้ยนแล้ว และเป็นคนละภาพกับภาพที่ต้องการปรับแก้ไขความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ประกอบ กับการวัดสหสัมพันธ์ซึ่งมีลักษณะการดำเนินการจุดภาพต่อจุดภาพ ทำให้ผลที่ได้ผิดพลาดไม่แม่นยำ จนอาจจะทำให้การปรับแก้ไขความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิตล้มเหลว และเพื่อให้การ registration มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น เมื่อภาพทั้งสองมีความสัมพันธ์ตรงกันในลักษณะกระจาย เช่นภาพภูเขา ทางน้ำหรือเขตเพาะปลูก ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งของการวัดความสอดคล้อง (Similarity measurement) ด้วยวิธีสหสัมพันธ์ (correlation) คือ ความคงทนต่อความผิดเพี้ยนของภาพ และเมื่อถูกนำมาใช้กับ การปรับแก้ไขความผิดเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ซึ่งเป็นข้อจำกัดโดยต่อ ทำให้เสี่ยงต่อการ registration ที่ ผิดพลาดได้

วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอวิธีการหนึ่งคือการแบ่งระดับการปรับแก้เป็นสองระดับ คือ การรีจิสเตอร์ชั้นภาพแบบหยาบเพื่อเตรียมภาพให้เหมาะกับการ รีจิสเตอร์ชั้นภาพในขั้นละเอียดต่อไป อย่างไรก็ตามแม้ว่าวิธีที่นำเสนอจะให้ผลลัพธ์ในการรีจิสเตอร์ชั้นภาพที่ดีและถูกต้อง แต่ก็ต้องใช้เวลา ในการเตรียมภาพด้วยเช่นกัน วิธีการที่นำเสนอจึงเหมาะกับภาพที่เกิดการผิดเพี้ยนมากในลักษณะ ของสเกลของภาพและมุมของภาพที่ต่างกัน ซึ่งเป็นข้อบกพร่องทางระบบของการตรวจจับภาพระยะไกล เช่น ภาพถ่ายดาวเทียมและ ภาพถ่ายทางอากาศ นอกจากนี้วิธีการนี้ยังเหมาะกับการประยุกต์ใช้กับ การจดจำลายมือและการจดจำหน้าตา เป็นต้น ซึ่งสามารถประยุกต์ให้เป็นแบบอัตโนมัติ หรือกึ่งอัตโนมัติ สำหรับแต่ละภาพจะช่วยให้การ registration สะดวกมากขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องวิจัยและพัฒนาต่อไป

## บรรณานุกรม

- [1] W.F. Webber, **“Techniques for Image Registration,”** IEEE Conf. on Machine Processing of Remotely Sensed Data, pp. 1B.1 - 1B.7, Oct. 16-17, 1973.
- [2] W.K. Pratt, **“ Correlation Techniques of Image Registration,”** IEEE Trans. Aerosp. Electron.Syst. 1, Vol. AES-10, pp. 353-358, May 1974.
- [3] R.C. Gonzalez and R.E. Woods, **Digital Image Processing,** Addison-Wesley Publishing Company, USA, Sep. 1993.
- [4] R.A. Emmert and C.D. McGillem, **“Multitemporal geometric distortion correction utilizing the affine transform,”** Proc. IEEE Conf. on Machine Processing of Remotely Sensed Data, pp. 1B-24-1B-32, Oct. 1973.
- [5] G. Wolberg and S. Zokai **“Robust image registration using log-polar transform,”** Proc. on Conference on International Image Process 2000, pp. 493 -496 , Vol. 1, Sept. 2000.
- [6] B. Srinivasa Reddy and B.N. Chatterji, **“An FFT-Based Technique for Translation, Rotatation, and Scale-Invariant Image Registration,”** IEEE Trans. Image Processing, Vol.5, No.8, Aug. 1996.
- [7] A. Averbuch and Y. Keller, **“FFT based image registration,”** Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, (ICASSP '02), Vol.4, pp. IV-3608 -IV-3611, May 2002.

**ภาคผนวก**

The 24th Asian Conference on Remote Sensing &  
2003 International Symposium on Remote Sensing

Korean Society of Remote Sensing (KSRS)

Asian Association on Remote Sensing (AARS)

Executive Committee of Environmental Monitoring  
from Space of East Asia (EMSEA)

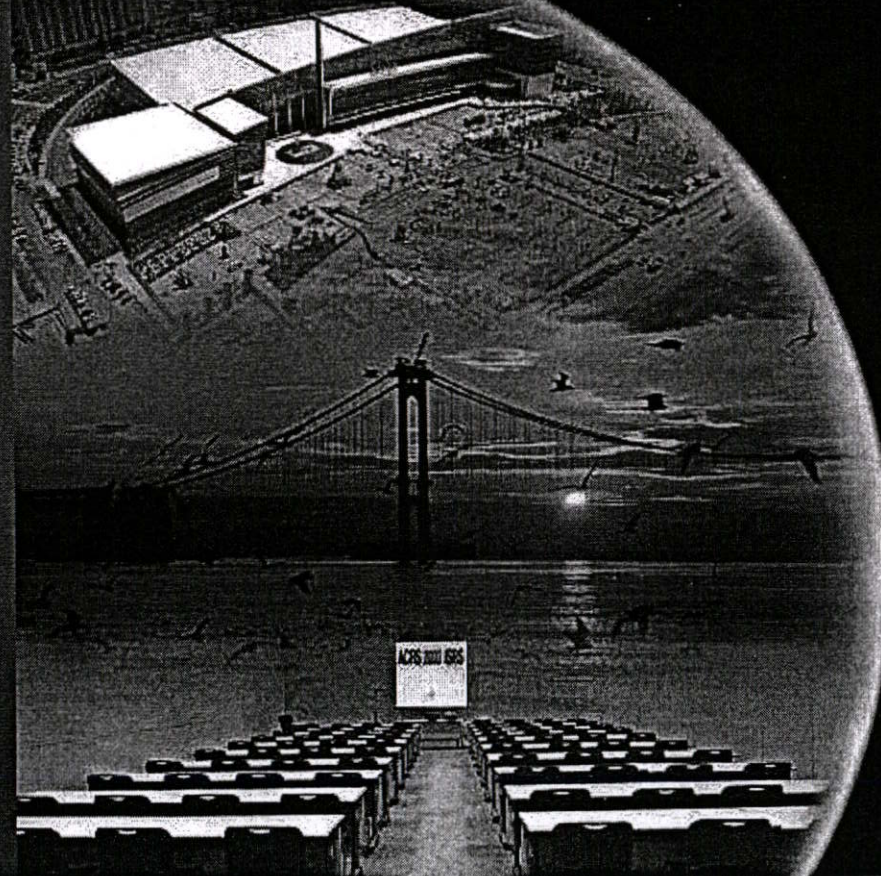
Welcome

Sessions

Authors

# ACRS 2003 ISRS

The 24th Asian Conference on Remote Sensing & 2003 International Symposium on Remote Sensing



Copyright 2003 KSRS and AARS

All rights reserved. Personal use of this material is permitted.  
However, reproduction of this material or  
any parts thereof without a written permission of KSRS,  
and AARS is strictly forbidden.

## ACRS 2003 ISRS

The 24th Asian Conference  
on Remote Sensing &  
2003 International Symposium  
on Remote Sensing

Main Menu



Authors



### Parvatham V.

- GRAM++ - AN INDIAN GIS SUITE WITH DECISION SUPPORT APPLICATIONS

### Pasomkusolsil S.

- IMAGE REGISTRATION IMPROVEMENT BASED-ON FAST FOURIER TRANSFORM TECHNIQUES WITH THE AFFINE TRANSFORM ESTIMATION.

### Paudel J. R.

- ASSESSMENT OF ACCURACIES OF IKONOS IMAGE MAP TRADITIONAL ORTHOPHOTO MAP AND CONVENTIONAL LINE MAP OF KATHMANDU VALLEY: A PILOT PROJECT

### Penaflo E.

- KOH CHANG ISLAND ECO-TOURISM MAPPING: BY BALLOON-BORN REMOTE SENSING IMAGERY SYSTEM

### Peng S.

- TOWARDS AN OPERATIONAL SYSTEM FOR REGIONAL SCALE RICE YIELD ESTIMATION

### Petchprayoon P.

- APPLICATION OF REMOTE SENSING AND GIS TO FLOOD MAPPING AND MITIGATION

### Piao C.

- HYDROGEOLOGICAL SURVEY AND SATELLITE REMOTE SENSING IN THE DUNHUANG AREA
- SPREAD OF BAMBOO STANDS IN THE KINKI REGION





## ACRS 2003 ISRS

The 24th Asian Conference  
on Remote Sensing &  
2003 International Symposium  
on Remote Sensing

Main Menu



# Tuesday

## ACRS 2003 ISRS

### Morning

### Afternoon

TA1-Image Classification 1

TA2- Video Imaging

TA3-Airbone Sensing 1

TA4-Atmosphere

TA5-Image Registration

TA6-Public Health

TB1-GPS Application 1

TB2-Urban Application 1

TB3-Environmental Monitoring 1

TB4-Ocean Monitoring 1

TB5-DEM Generation

TB6-Visualization

TC1-Image Fusion

TC2-Automatic Feature Extraction 1

TC3-Coastal Zone Mapping

TC4-Student Forum

TC5-Decision Support System 1

TC6-Change Detection

TD1-Forestry 1

TD2-Integration of GIS and remote sensing 1

TD3-Agriculture 1

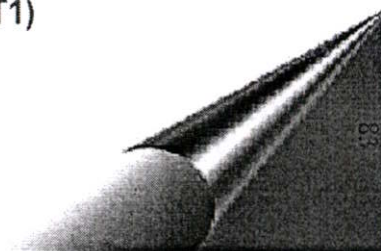
TD4-Land Cover/Land Use 1

TD5-Geology 1

TD6-Interferometric and

Polarimetric SAR 1

Interactive Session (TINT1)



# Image Registration Improvement Based-on FFT Techniques with the Affine Transform Estimation

Sompong WISETPHANICHKIJ, Sanchaiya PASOMKUSOLSIL, Kobchai DEJHAN,  
Fusak CHEEVASUVIT, Somsak MITATHA and Napat SRA-IUM

Faculty of Engineering and Research Center for Communication and Information Technology,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Tel: 66-2-3264238, 66-2-3264242, Fax : 66-2-3264554

Email: [kobchai@telecom.kmitl.ac.th](mailto:kobchai@telecom.kmitl.ac.th)

Vinai VORRAWAT

National Research Council of Thailand (NRCT)

Chanchai PIENVIJARNPONG

Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (GISTDA), Thailand.

## Abstract

New Image registration techniques are developed for determining geometric distortions between two images of the same scene. First, the properties of the Fourier transform of a two dimensional function under the affine transformation are given. As a result, techniques for the estimation of the coefficients of the distortion model using the spectral frequency information are developed. Image registration can be achieved by applying the fast Fourier transform (FFT) technique for cross correlation of misregistered imagery to determine spatial distances. The correlation results may be rather broad, making detection of the peak difficult, what can be suppressed by enhancing cross-correlation technique. Yield greatly improves the delectability and high precision of image misregistration.

**Keywords:** image registration, affine transforms, FFT.

## 1. Introduction

Image registration is a fundamental in many images processing to overlay two or more images, especially for remote sensed image application. The geometric distortion can be occurred according to many reasons that need to correct before used. The precision of geometric correction depends on the efficiency of image registration of each ground control points (GCPs). The conventional correlation technique will be poor when these two images different in detail due to noise corrupted, and sensor variation. One method to solve such problem is dividing process into two steps. First, the coarse correction serves the global image registration that models the distortion problem to be the affine transformation. The advantage of this model is invariant on FFT transformation; therefore, the scaling factor and rotation angle can be extract from log-polar coordinate and phase correlation technique that mentioned in section 2. The fine registration will be consecutively performed; sub-image set will be selected as GCPs to get the precision registration and local geometric transformation correction. In section 3, induced search images set will be generated and enhance cross-correlation method is performed to get the precision registration. Finally, the geometric transformation and interpolation will be performed to achieve the image registration.

## 2. Affine transform theory and its parameter estimation for coarse image registration

For many data sets regional misregistration can be represented as having the following for components: (1) scale, (2) rotation, (3) skew, and (4) displacement. Such misregistration can be completely characterized by means of the affine transformation is given by

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{t} \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} \text{ and } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

The usefulness of the affine model results from the fact that the misregistration can be interpreted as consisting of the geometrical distortion by a linear model, and the displacement of the coordinate systems. The Fourier transforms of these data.

$$F(\mathbf{u}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\mathbf{x}) e^{-j2\pi(\mathbf{u},\mathbf{x})} d\mathbf{x} \quad (2)$$

The spectral domain coordinate relation is  $\mathbf{v} = (\mathbf{A}^{-1})^T \mathbf{u}$ .

The non-singular matrix  $\mathbf{A}$  characterizes the geometrical components of the misregistration.

$$\mathbf{A}_{scal} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{rot} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

For special case of the same aspect ratio ( $a_{11} = a_{22} = a$ ), the overall distortion matrix  $\mathbf{A}$  is some combination of these component distortions

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_{rot} \mathbf{A}_{scal}$$

$$\mathbf{v}_{\log-polar} = \mathbf{u}_{\log-polar} - \begin{bmatrix} \log(a) \\ \theta_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Where,  $\mathbf{v}_{\log-polar} = \begin{bmatrix} \log(\rho_v) \\ \theta_v \end{bmatrix}$  is a polar representation of

$\mathbf{v}$  and  $\rho_v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$  and  $\theta_v = \tan^{-1}(v_2 / v_1)$



Fig.1 Rotation and scaling factor extraction by Log-Polar coordinate phase correlation

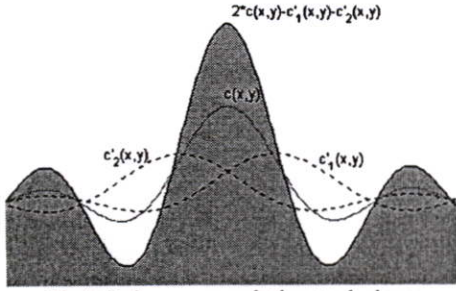


Fig.2 Enhance correlation technique

### 3. Enhanced cross correlation for fine image registration

If two image,  $f(x,y)$  and  $h(x,y)$ , broadly correlate, the maximum peak of conventional correlation hardly detect correctly. To enhance the correlation peak, induced image set were generated to suppress the adjacent correlation. The induced image  $h'(x,y)$  should contain the same content of image  $h(x,y)$ , but do not exactly same as  $h(x,y)$ . Let  $c(x,y)$  is a correlation of  $f(x,y)$  and  $h(x,y)$ , and  $c'(x,y)$  is a correlation of  $f(x,y)$  and induced image  $h'(x,y)$ . The 1-D enhanced correlation peak can be shown in fig.2.

The induced image can be easily generated by shifting the search image to left and right for horizontal and shifting up and down for vertical correlation peak enhancement. This process is straight-forward but also drastically increasing the computation cost and do not practically use. To simplify and limit the computation cost, new induced image set  $h'(x,y)$  will be generated by flip the search image  $h(x,y)$  up-to-down and left-to-right. The enhancement scheme will be changed to

$$c_{enhanced}(x,y) = 2c(x,y) - c'_{up \rightarrow down}(x,y) - c'_{left \rightarrow right}(x,y) \quad (4)$$

$$c'_{up \rightarrow down}(x,y) = f(x,y) \circ h_{up \rightarrow down}(x,y) = F^{-1}(F(u,v) \cdot H^*(u,v)_{up-down})$$

$$c'_{left \rightarrow right}(x,y) = f(x,y) \circ h_{left \rightarrow right}(x,y) = F^{-1}(F(u,v) \cdot H^*(u,v)_{left-right})$$

$$H(u,v)_{up-down} = H(u,v) \cdot \exp\left(\frac{j\pi v}{v_{max}}\right)$$

$$H(u,v)_{left-right} = H(u,v) \cdot \exp\left(\frac{j\pi u}{u_{max}}\right)$$

and  $F^{-1}$  is 2-D inverse Fourier transform.

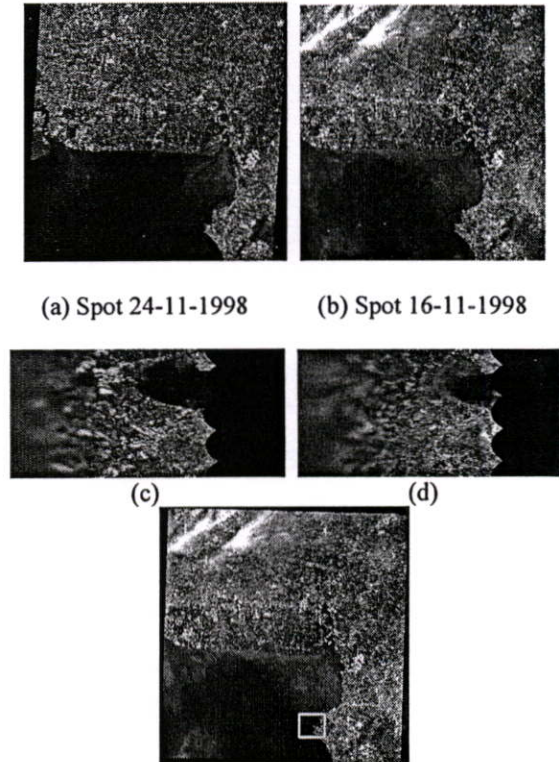
The shifted version of  $h(x,y)$  have a same the magnitude response of Fourier transform but phase response linearly increasing up to 180 degree along each orientation. Therefore, a few modify of  $H(u,v)$  is needed for generate the induced search image ( $H'(u,v)$ ). The

$H(-u,-v)$  can be also added to account for further enhance.

### 4. Test and results

To completely the geometric correction, the first step is estimation of scaling factor and rotation angle, when coarsely assume the geometric distortion between reference image and unregistered image is affine transformation. In this study uses the SPOT image acquired on 24-11-1998 and 16-11-1998 to be a reference and unregistered image, respectively. These two images are performed sequentially as mention in section 2. The results are shown in fig.3.

After coarse registration, sub-images will be selected as a set of ground control point. Then, each GCP image will be fine registered to referenced image. Figure 4 shows three methods of correlation (only one GCP was shown). The results clearly show the proposed method (enhanced cross-correlation) efficiently improved the image registration when compare with the others method. After all GCP were registered and the geometric transformation was extracted, yield the accuracy image registration and show in fig.5.



(e) Rotate angle ( $\theta$ ) = 1.8 and Scaling factor ( $a$ ) = 1.12

Fig.3 Multitemporal Spot image central area of Thailand  
 (a) Reference image (Spot image acquired 24-11-1998)  
 (b) Unregistered image (Spot image acquired 16-11-1998)  
 (c) log-polar coordinate version of (a)  
 (d) log-polar coordinate version of (b)  
 (e) Coarse registered image of (b)

## 5. Conclusion

Phase correlation given the best result when search image is a part or exactly same a part of reference image, otherwise, will generate multiple correlation peak and lead to mis-registration. The pre-processing is very important and the necessary for phase correlation. For normalizing cross-correlation, the context in the search image (GCP) is a main factor to determine the correlation result. If the context broadly distributes, the correlation peak will be blurred and results a poor image registration. The proposed method (enhanced cross-correlation) utilizes the search image to suppress the adjacent and enhance the correlation peak. The efficiency trade off to computation cost.

## 6. Reference

- [1] *W. F. Webber*, 1973. Techniques for Image Registration, IEEE Conf. on Machine Processing of Remotely Sensed Data, pp. 1B.1 - 1B.7.
- [2] *R. A. Emmert and C .D. McGillem*, 1973. Multitemporal geometric distortion correction utilizing the affine transform, Proc.IEEE Conf. Machine Processing of Remotely Sensed Data, pp.1B-24-1B-32.
- [3] *G. Wolberg and S. Zokai*, 2000. Robust image registration using log-polar transform, Proc. on Conference on International Image Process 2000, pp. 493 -496.
- [4] *B. S. Reddy and B. N. Chatterji*, 1996. An FFT-Based Technique for Translation, Rotation, and Scale-Invariant Image Registration, IEEE Trans. Image Processing, Vol.5, No.8.
- [5] *A. Averbuch and Y. Keller*, 2002. FFT based image registration, Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, (ICASSP '02), Vol.4, pp.IV-3608 -IV-3611.

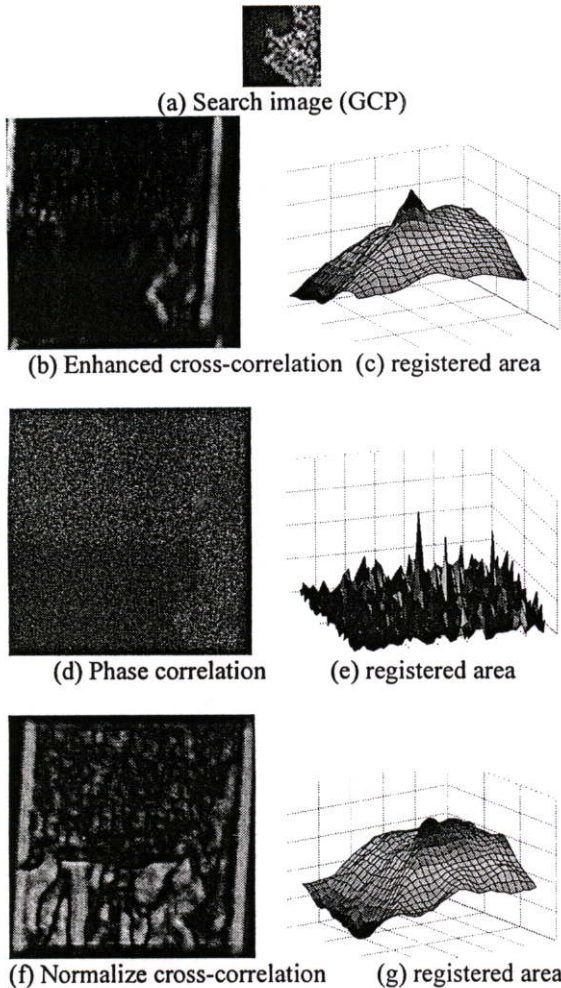


Fig.4 Fine imager registration

- (a) Selected GCP from Fig.3 (e)
- (b) and (c) Enhanced cross-correlation (propose method) and its registered area
- (d) and (e) Phase-correlation and its registered area
- (f) and (g) Normalize cross-correlation and its registered area.

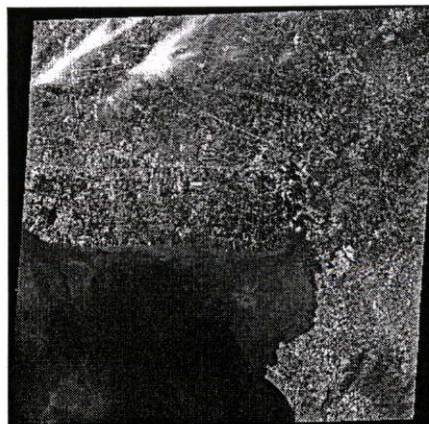


Fig. 5 Completed image registration

## ประวัติผู้เขียน

นายสัตย์ชัยยะ ผสมกุลคีต เกิดเมื่อวันที่ 14 มกราคม พ.ศ. 2514 ได้รับปริญญา  
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ปัจจุบันดำรง  
ตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต