

การต่อภาพและการวิเคราะห์องค์ประกอบของภาพถ่ายความเข้มที่มีค่า  
ความละเอียดต่างกัน

THE MOSAICING AND PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS FOR  
MULTI-RESOLUTION SATELLITE IMAGES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-688-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การต่อภาพและการวิเคราะห์องค์ประกอบของภาพถ่ายดาวเทียมที่มีค่า  
ความละเอียดต่างกัน

THE MOSAICING AND PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS FOR  
MULTI-RESOLUTION SATELLITE IMAGES



นฤพร หินสมุทร

NARUEPORN HINSAMOOH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย


สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 35431  
วัน, เดือน, ปี..... 25 ๒๕.๒. 2543

ISBN 974-622-688-6

**THE MOSAICING AND PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS FOR  
MULTI-RESOLUTION SATELLITE IMAGES**



**NARUEPORN HINSAMOOH**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
2000

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ISBN 974-622-688-6**

บัณฑิตวิทยาลัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ศูนย์วิจัยเทคโนโลยี

ชื่อเรื่อง

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงเส้นและค่าลักษณะเฉพาะของภาพ  
การกระจายของภาพ

THE MEASURING AND PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS  
FOR THE DISTRIBUTION OF THE IMAGES

ชื่อผู้แต่ง

นาย

ชื่อผู้พิมพ์

นาย

ปริญญา

ศาสตราจารย์

สาขาวิชา

สาขาวิชา



สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่หนังสือ 10/2543

ชื่อเรื่อง: การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงเส้นและค่าลักษณะเฉพาะของภาพการกระจายของภาพ

บัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณี **SCHOOL OF GRADUATE STUDIES** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การต่อภาพและการวิเคราะห์องค์ประกอบของภาพถ่ายดาวเทียมที่มีค่าความละเอียดต่างกัน
นักศึกษา	นายณฤพร หินสมุทร
รหัสประจำตัว	40061090
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. พุศศักดิ์ ชีวสุวิทย์

### บทคัดย่อ

การต่อภาพถ่ายดาวเทียมถือได้ว่าเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากสำหรับการที่จะอธิบายความหมายของพื้นที่ภายในภาพถ่ายที่กำลังให้ความสนใจอยู่นั้น ขณะที่ข้อมูลภาพถ่ายระยะไกลในภาพๆ หนึ่งจะได้อาจมาจากการโคจรรอบโลกของดาวเทียมหนึ่งรอบ ซึ่งภาพถ่ายที่ได้นั้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งของบริเวณพื้นที่ทั้งหมดของภาพที่ต้องการในบริเวณกว้าง กระบวนการต่อภาพจึงถูกนำมาใช้กับบริเวณพื้นที่ดังกล่าว ทั้งนี้ ภาพถ่ายที่มีพื้นที่ติดต่อกันได้มาจากดาวเทียมดวงเดียวกันวนถ่ายภาพรอบโลกหลายๆ รอบ หลังจากนั้นจึงจะนำภาพมาต่อรวมกันให้เป็นภาพขนาดใหญ่ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ ถึงอย่างไรในบางครั้งภาพถ่ายที่มีพื้นที่ติดต่อกันซึ่งถ่ายจากดาวเทียมดวงเดียวกันนั้นก็ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ เพราะเนื่องมาจากมีกลุ่มเมฆและหมอก มาปกคลุมพื้นที่บางส่วนไว้หรือในกรณีที่ภาพนั้นถ่ายในเวลาที่แตกต่างกันก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการแสดงผลและการประมวลผลลดลง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องนำภาพถ่ายจากดาวเทียมต่างดวงกันและมีค่าความละเอียดแตกต่างกันมาทำการต่อเข้าด้วยกันเพื่อที่จะครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ ซึ่งวิธีการต่อภาพถ่ายดาวเทียมที่มีค่าความละเอียดต่างกัน มีการปรับแก้ค่าความผิดพลาดเชิงเรขาคณิตโดยการใช้อัตราส่วนทางภาคพื้นที่ยุติกัน การแทรกค่าของข้อมูลที่หายไปภายหลังจากการปรับแก้ค่าความผิดพลาดเชิงเรขาคณิตให้มีค่าความละเอียดของภาพเหมือนกัน ต่อไปเป็นกระบวนการปรับค่าความสว่างในระดับสีเทาของภาพให้สอดคล้องกันทั้งภาพ และสุดท้ายเป็นการลบรอยตะเข็บที่บริเวณขอบภาพที่เกิดจากการต่อภาพให้หายไป โดยใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้น

ส่วนที่สองเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทและการแปลความหมายในการนำเสนอข้อมูลภาพ ด้วยเทคนิคในการวิเคราะห์องค์ประกอบของภาพถ่ายดาวเทียมที่มีค่าความละเอียดต่างกัน ซึ่งได้อาศัยคุณสมบัติที่ว่า วัตถุแต่ละชนิดจะให้ค่าความยาวช่วงคลื่นในการสะท้อนคลื่นสนามแม่เหล็กที่ต่างกัน

<b>Thesis Title</b>	The Mosacing and Principal Component Analysis for Multi-Resolution Satellite Images
<b>Student</b>	Mr. Narueporn Hinsamooth
<b>Student ID.</b>	40061090
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2000
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Fusak Cheevasuvit

## ABSTRACT

The mosaicing image is very useful for assisting to interpret simultaneously a whole interested area. Since each scene of remote sensing image, obtained from one orbit, is performed a subset of total area. The mosaicing process are employed to obtain the whole area. Then, several contiguous images obtained from many orbits of the same satellite are merged together. However, some contiguous images from the same satellite cannot use because of the existence of cloud or the time of degradation of interpretation efficiency. Therefore, another satellite images with the different resolution must be used for mosaicing. To performed the multi-resolution satellite mosaicing, first these images are geometrically registered to another by using the common ground control points in the areas of overlap. The interpolation is applied for resampling the images in order to obtain the same resolution of picture element. The next step is to adjust the brightness of each image by gray scale matching procedure. Final step, the seams appear over the joint area between the adjacent images will be removed by using linear weighting function.

The second part of this thesis presents an increase the efficiency of image classification and interpretation with principal component analysis (PCA) technique to multi-resolution satellite images. For the different objects can be given high reflectance in difference wavelength of electromagnetic spectral.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ก็ด้วยความอนุเคราะห์และช่วยเหลือในการทำวิจัยจาก ท่านรองศาสตราจารย์ ดร. พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์ ซึ่งอาจารย์ได้กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำงานวิจัยด้วยดีตลอดมา กระทั่งทำให้ผู้เขียนสามารถทำงานวิจัยได้อย่างดีและประสบผลสำเร็จในที่สุด

อาจารย์ศักดิ์กริยา ชิตวงศ์ และ คุณอาโมทย์ สมบูรณ์แก้ว ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือต่างๆ ในการทำงานวิจัยนี้

สำคัญที่สุดขอกราบขอบพระคุณพ่อและคุณแม่ของผู้เขียนที่ได้ให้อุปการะและให้กำลังใจอย่างมากตลอดเวลาในขณะที่ศึกษาอยู่และในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายขอขอบคุณท่านอาจารย์และเพื่อนๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับทุกท่านซึ่งคอยเป็นกำลังใจให้โดยตลอดมา

นฤพร หินสมุทร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 พื้นฐานของการสำรวจระยะไกล.....	5
2.1 ความเป็นมาของรีโมตเซนซิง.....	5
2.2 พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.2.1 ทฤษฎีคลื่น.....	6
2.2.2 ทฤษฎีอนุภาพ.....	9
2.3 การสะท้อนแสงของผิวโลก.....	10
2.3.1 การสะท้อนกลับ.....	10
2.3.2 การดูดกลืน.....	11
2.3.3 การส่งผ่าน.....	12
2.4 อุปกรณ์สำรวจบนดาวเทียม.....	13
2.5 อุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสง.....	18
2.6 กล้องถ่ายภาพสำหรับการสำรวจระยะไกล.....	21
2.7 ยานสำรวจ.....	22

บทที่ 3 ความเพี้ยนของข้อมูลภาพและการปรับแก้.....	28
--	----

3.1 บทนำ.....	28
---------------	----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 ความเพี้ยนเชิงคลื่น.....	28
3.3 การปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่น.....	29
3.4 ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต.....	30
3.5 การปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต.....	33
3.6 การช้อนภาพ.....	34
3.7 ผลการทดลอง.....	46
บทที่ 4 การจัดข้อมูลภาพและแทรกค่า.....	48
4.1 บทนำ.....	48
4.2 การชักตัวอย่างข้อมูลใหม่.....	48
4.3 การชักตัวอย่างข้อมูลภาพจากพิกัดใกล้เคียง.....	49
4.4 การแทรกค่า.....	50
4.5 โพลีโนเมียลการแทรกค่าของนิวตัน.....	51
4.5.1 การแทรกค่าแบบเชิงเส้น.....	51
4.5.2 การแทรกค่าแบบควอดราติก.....	53
4.5.3 การแทรกค่าแบบคิวบิก.....	55
4.6 การแทรกค่าแบบสไปน์.....	59
4.6.1 การแทรกค่าคิวบิกสไปน์.....	60
4.7 ผลการทดลอง.....	75
บทที่ 5 การต่อภาพ.....	76
5.1 บทนำ.....	76
5.2 การปรับค่าความสว่างของภาพ.....	76
5.2.1 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	76
5.3 การหาค่าสหสัมพันธ์.....	78
5.4 ขั้นตอนการต่อภาพแบบสหสัมพันธ์.....	78
5.5 ฟังก์ชันพื้นฐานการสหสัมพันธ์.....	79
5.6 การลบขอบภาพโดยวิธีการเฉลี่ยค่าระดับสีเทา.....	80
5.7 ผลการทดลอง.....	82
บทที่ 6 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบหลักร่วมของข้อมูลที่มีค่าความละเอียดที่ต่างกัน.....	84
6.1 บทนำ.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีข้อควรระวังเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.2 ทฤษฎีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก.....	84
6.3 วิธีการประยุกต์ทฤษฎีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลังกับงานรีโมตเซนซิง.....	90
6.3.1 นิยามของตัวแปร.....	90
6.3.2 วิธีการจำแนกประเภทและการแปลความหมายข้อมูลภาพ.....	90
6.3.3 วิธีการแปลงข้อมูลภาพ.....	91
6.3.4 วิธีการคำนวณหาค่าเมตริกซ์ Covariance.....	91
6.3.5 วิธีการคำนวณหา Eigenvalue และ Eigenvector.....	93
6.3.6 วิธีการโปรเจกชัน.....	96
6.3.7 วิธีการสเกลลิง.....	97
6.4 ผลการทดลอง.....	98
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	99
7.1 บทสรุป.....	99
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	101
เอกสารอ้างอิง.....	102
ภาคผนวก.....	104
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	104
ภาคผนวก ข. รายละเอียดเพิ่มเติมของการสำรวจระยะไกล.....	105
ภาคผนวก ค. ตารางแสดงรายละเอียดของดาวเทียม ADEOS JERS – 1 และ MOS – 1.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีถารนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า.....	7
2.2 ความยาวคลื่นที่ใช้ในเครื่องวัดหลายๆ.....	16
2.3 คำจำกัดความของลักษณะของเครื่องวัดเชิงแสง.....	17
2.4 คุณลักษณะของอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสง.....	20
2.5 ประเภทของยานสำรวจและวัตถุที่สังเกต.....	22
2.6 คุณลักษณะส่วนประกอบต่างๆ ของดาวเทียม.....	26
3.1 สาเหตุของความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตและชนิดของความเพี้ยน.....	32
3.2 ตัวอย่างพิกัดควบคุมบนพื้นดินจากดาวเทียมทั้ง 3 ประเภท.....	42
3.3 ตัวอย่างพิกัดข้อมูลภาพภายหลังการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตของดาวเทียม ทั้ง 3 ประเภท.....	45
4.1 ข้อมูลในแต่ละส่วนโค้งของกราฟดินฉบับ.....	52
4.2 ตัวอย่างการประมาณค่าอนุพันธ์อันดับที่ 1 ถึง อันดับที่ 3.....	55
4.3 ตัวอย่างการคำนวณแบบคิวบิก.....	57
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนโค้งที่ 1.....	68
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนโค้งที่ 2.....	69
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนโค้งที่ 3.....	69
4.7 ค่าความลาดเอียงของจุดต่อของส่วนโค้ง.....	69
4.8 ค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนโค้งที่ 1.....	73
4.9 ค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนโค้งที่ 2.....	73
4.10 ค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนโค้งที่ 3.....	74
6.1 ตัวอย่างความแตกต่างของระหว่างตัวแปรเดิมลำดับที่ 1 และ ลำดับที่ 2.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการเก็บข้อมูลโดยการสำรวจระยะไกล.....	6
2.2 คุณสมบัติของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าตามทฤษฎีคลื่น.....	6
2.3 ประเภทของการสำรวจระยะไกลที่สัมพันธ์กับย่านความยาวทั้ง 3 ประเภท.....	9
2.4 เปรียบเทียบปรากฏการณ์การสะท้อนแสงในลักษณะของการสะท้อนกลับหมด การสะท้อนแบบกระจายและการสะท้อนแบบผสม.....	11
2.5 เส้นทางเดินของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าการสำรวจระยะไกลแบบพาสซีฟ.....	12
2.6 การเปรียบเทียบลายเซ็นเชิงเส้นของทรัพยากรหลัก.....	13
2.7 การจำแนกประเภทของอุปกรณ์วัด.....	15
2.8 องค์ประกอบของคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดเชิงแสง.....	16
2.9 การจำแนกประเภทของอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสง.....	18
2.10 ความไวในการตอบสนองของหลอดแสง.....	19
2.11 ความไวของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบอิเล็กทรอนิกส์.....	19
2.12 ระบบกล้อง Zeiss RMK.....	21
2.13 ดาวเทียม JERS - 1 ของญี่ปุ่น.....	24
2.14 องค์ประกอบหลักของดาวเทียม JERS - 1.....	25
2.15 รูปร่างและส่วนประกอบต่างๆ ของดาวเทียม ADEOS.....	26
2.16 รายละเอียดของดาวเทียม MOS - 1.....	27
2.17 ลักษณะโครงสร้างของระบบ MESSR ของดาวเทียม MOS - 1.....	27
3.1 ลักษณะตัวอย่างภาพความเพี้ยนเชิงคลื่น.....	29
3.2 ขั้นตอนวิธีการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่น.....	30
3.3 ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตภายใน.....	31
3.4 ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตภายนอก.....	31
3.5 ขั้นตอนการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต.....	33
3.6 ขั้นตอนการปรับแก้ความเพี้ยนที่ใช้งานจริง.....	37
3.7 ภาพถ่ายระดับสีเทาจากดาวเทียม ADEOS (ภาพต้นฉบับ).....	38
3.8 ภาพถ่ายระดับสีเทาจากดาวเทียม JERS-1.....	39
3.9 ภาพถ่ายระดับสีเทาจากดาวเทียม MOS-1.....	40
3.10 ภาพตัวอย่างการกำหนดพิกัดควบคุมบนพื้นดินของภาพถ่ายดาวเทียมทั้ง 3 ประเภท.....	41
3.11 ภาพผลลัพธ์จากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตจากดาวเทียม JERS-1 ในแบนด์ที่ 1.....	46

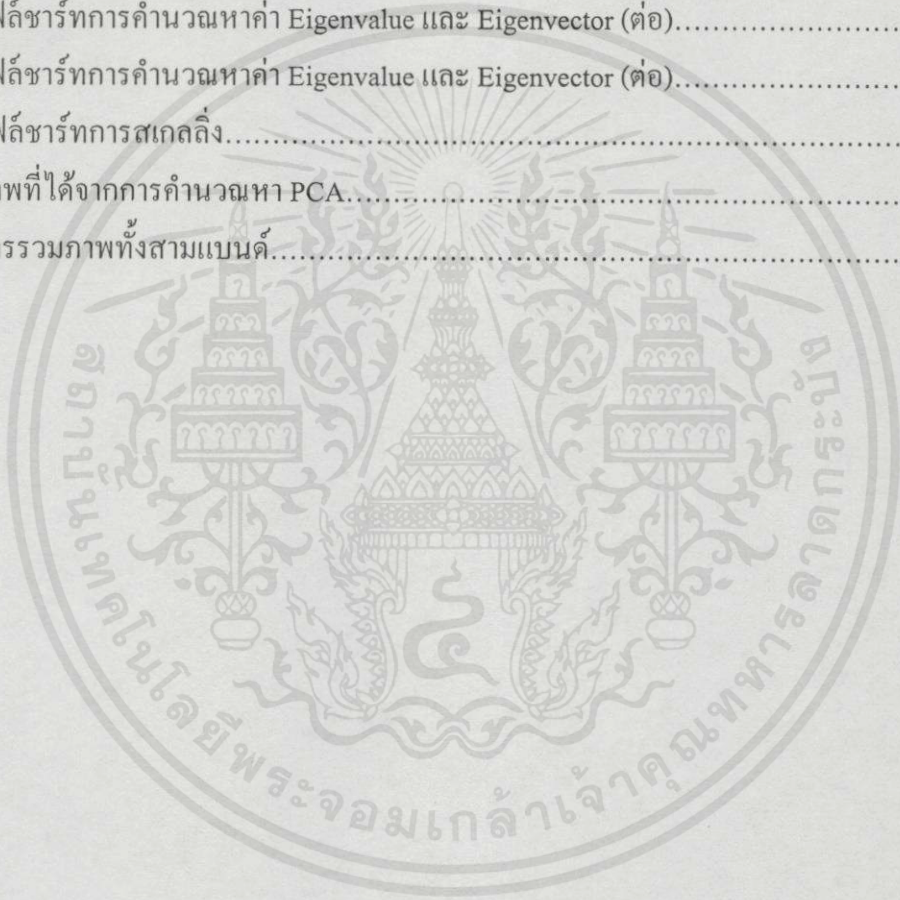
## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 ภาพผลลัพธ์จากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตจากดาวเทียม MOS-1 ในแบนด์ที่ 1.....	46
4.1 เปรียบเทียบเมตริกซ์ทั้งก่อนและภายหลังจากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต.....	48
4.2 ลักษณะการแทรกค่าภายหลังจากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต.....	48
4.3 การชักตัวอย่างข้อมูลภาพจากพิกัดที่ใกล้เคียง.....	49
4.4 ตัวอย่างการแทรกค่าแบบ โพลีโนเมียล.....	50
4.5 การแทรกค่าแบบเชิงเส้นพื้นที่เรเงาแสดงให้เห็นถึงที่มาของสมการ.....	51
4.6 กราฟต้นฉบับที่จะใช้ในการเปรียบเทียบการแทรกค่าของแต่ละวิธี.....	53
4.7 ผลที่ได้จากการแทรกค่าแบบเชิงเส้น.....	53
4.8 ผลที่ได้จากการแทรกค่าแบบควอดราติก.....	55
4.9 ผลที่ได้จากตัวอย่างการคำนวณ.....	59
4.10 ผลที่ได้จากการแทรกค่าแบบคิวบิก.....	59
4.11 ลักษณะการแทรกค่าของสมการ โพลีโนเมียลในอันดับที่สูงต่างกัน.....	60
4.12 ค่าความลาดเอียงของแต่ละส่วน โค้ง.....	70
4.13 กราฟต้นฉบับ.....	74
4.14 กราฟที่ได้จากการคำนวณการแทรกค่าโดยวิธีคิวบิกสไปน์แบบ Natural spline.....	74
4.15 กราฟที่ได้จากการคำนวณการแทรกค่าโดยวิธีคิวบิกสไปน์แบบ Clamped spline.....	74
4.16 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตและภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการแทรกค่าด้วยวิธีคิวบิกสไปน์แบบ Natural spline ในภาพ JERS – 1 แบนด์ที่ 1.....	75
4.17 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตและภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการแทรกค่าด้วยวิธีคิวบิกสไปน์แบบ Clamped spline ในภาพ MOS – 1 แบนด์ที่ 1.....	75
5.1 พื้นที่ที่ต้องการจะนำมาต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ข้อมูลภาพขนาดใหญ่ที่สุด.....	79
5.2 ส่วนที่ซ้อนทับของภาพที่ต้องการหาค่าสหสัมพันธ์.....	80
5.3 ลักษณะการซ้อนทับของข้อมูลภาพ.....	81
5.4 ภาพก่อนและหลังการปรับค่าความสว่างของภาพจากดาวเทียม JERS-1 ในแบนด์ที่ 1.....	82
5.5 ภาพก่อนและหลังการปรับค่าความสว่างของภาพจากดาวเทียม MOS-1 ในแบนด์ที่ 1.....	82
5.6 การต่อข้อมูลภาพของภาพจากดาวเทียม ADEOS ดาวเทียม JERS – 1 และ ดาวเทียม MOS – 1.....	83
5.7 การต่อข้อมูลภาพภายหลังจากการปรับค่าความสว่างและลบตะขีบภาพ.....	83
6.1 การหมุนของแกนในสองมิติ.....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2 Eigenvector และ Eigenvalue ในสองมิติ.....	88
6.3 การวิเคราะห์ห้อยค์ประกอบหลักของข้อมูลที่มีค่าสหสัมพันธ์สูง.....	89
6.4 การวิเคราะห์ห้อยค์ประกอบหลักลำดับแรกของข้อมูลที่มีค่าสหสัมพันธ์ต่ำ.....	89
6.5 บล็อกโคอะแกรมของระบบ.....	90
6.6 ขั้นตอนการแปลงข้อมูลภาพ.....	91
6.7 โพลีชาร์ทการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector.....	94
6.8 โพลีชาร์ทการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector (ต่อ).....	95
6.9 โพลีชาร์ทการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector (ต่อ).....	96
6.10 โพลีชาร์ทการสเกลลิ่ง.....	97
6.11 ภาพที่ได้จากการคำนวณหา PCA.....	98
6.12 การรวมภาพทั้งสามแบบค้.....	98



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

# บทที่ 1

## บทนำ

การสำรวจระยะไกล หรือรีโมตเซนซิง เป็นเทคโนโลยีแขนงหนึ่ง ที่ใช้เพื่อการ บ่งบอก จำแนก และ วิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุต่างๆ บนพื้นผิวของโลก ซึ่งปราศจากการสัมผัสโดยตรง แต่อาศัยพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนหรือแผ่ออกจากวัตถุ ที่สามารถหาคุณลักษณะของวัตถุได้จากลักษณะการสะท้อนหรือการแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากวัตถุนั้นๆ กล่าวคือ “วัตถุแต่ละชนิดจะมีลักษณะการสะท้อนแสงหรือการแผ่รังสีที่มีคุณลักษณะเฉพาะตัวและแตกต่างกัน ถ้าวัตถุหรือสภาพแวดล้อมเป็นคนละประเภทกัน” การสำรวจระยะไกลจึงเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการจำแนก และเข้าใจ สภาพแวดล้อมต่างๆ จากคุณลักษณะเฉพาะตัวของการสะท้อนแสงหรือแผ่รังสี ในขณะที่ลักษณะของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการสำรวจระยะไกลจะอยู่ในรูปของข้อมูลภาพดิจิทัล แผ่นฟิล์ม และอื่นๆ โดยอาศัยเครื่องถ่ายภาพ และ/หรือ เครื่องวัดที่อยู่บนเครื่องบินสำรวจระยะไกล หรือ ดาวเทียมที่อยู่นอกโลก ขณะที่สถานีรับสัญญาณดาวเทียมบนพื้น โลกจะทำหน้าที่รับสัญญาณและบันทึกข้อมูลต่างๆ เก็บไว้เพื่อการใช้งาน รวมถึงการควบคุมการโคจรรอบ โลกของดาวเทียมนั้นๆ ให้เป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็นทางด้าน อุทกวิทยา ธรณีวิทยา อุตุนิยมวิทยา ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ สังคม วิศวกรรม และอื่นๆ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมบนภาคพื้นดินที่มีอยู่ในประเทศไทย สถานีรับสัญญาณดังกล่าวจะรับสัญญาณจากดาวเทียมทั้งที่เป็นของประเทศอเมริกา ญี่ปุ่น และประเทศทางทวีปยุโรป เช่น LANDSAT, SPOT, ADIOS, MOS-1 และ JERS-1 เป็นต้น ข้อมูลภาพที่ได้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์และจำแนกคุณลักษณะข้อมูลตามความต้องการอย่างเหมาะสม การวิเคราะห์ข้อมูลภาพในปัจจุบันจะเป็นการวิเคราะห์กันในลักษณะการนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจากดาวเทียมเพียงหนึ่งดวงมาทำการวิเคราะห์ เนื่องมาจากข้อมูลภาพที่ได้จากดาวเทียมแต่ละดวงจะมีความสามารถในการเก็บข้อมูลภาพที่ครอบคลุมพื้นที่ไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องวัดหรือเครื่องถ่ายภาพที่นำมาใช้ และการที่จะใช้ข้อมูลภาพจากดาวเทียมที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้มากมาวิเคราะห์ก็มักจะมีปัญหา ในกรณีที่ต้องการข้อมูลภาพที่มีความละเอียดและความถูกต้องมากๆ ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูลภาพที่มีบริเวณกว้างออกไปจากข้อมูลภาพหนึ่งภาพจะสามารถเกิดขึ้นได้ จึงต้องเป็นการนำภาพอีกชุดหนึ่งในบริเวณที่ใกล้เคียงกันมาประกอบการพิจารณา ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีการดังกล่าวอาจจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นเพื่อที่จะช่วยลดอุปสรรคดังกล่าว จึงได้เสนอให้มีการนำข้อมูลภาพที่อยู่บริเวณที่ใกล้เคียงมา

ต่อกันให้ได้ภาพเดียวกันที่มีปริมาณของข้อมูลภาพมากขึ้น เพื่อสะดวกในการนำไปวิเคราะห์และเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ให้สูงขึ้นในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การวิเคราะห์ข้อมูลภาพในหนึ่งกระบวนการจะประกอบไปด้วยขั้นตอนมากมายสำหรับหนึ่งข้อมูลภาพที่ต้องการ ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมหากจำเป็นต้องใช้ข้อมูลภาพที่มากกว่าหนึ่งภาพ ต้องเสียเวลาในการวิเคราะห์มากพอสมควร เนื่องจากข้อมูลภาพจากดาวเทียมเพียงหนึ่งข้อมูลภาพไม่อาจจะครอบคลุมบริเวณที่ต้องการศึกษาได้ครบถ้วน จึงต้องนำข้อมูลภาพในบริเวณใกล้เคียงทำการวิเคราะห์ร่วม ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ก็คือ

- เพื่อต้องการศึกษาข้อมูลภาพทั้งที่ได้จากดาวเทียมดวงเดียวกันและต่างดวงกัน
- เพื่อต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ค่าความละเอียดต่างนำมาต่อเข้าด้วยกัน
- เพื่อต้องการศึกษาข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ภายหลังจากการปรับแก้ค่าความละเอียดของข้อมูลภาพให้เท่ากันเปรียบเทียบกับภาพเดิม
- เพื่อต้องการศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของภาพถ่ายดาวเทียมที่ภายหลังจากการปรับแก้ค่าความละเอียดของภาพถ่ายดาวเทียม
- เพื่อต้องการกำจัดกลุ่มเมฆและหมอกที่ปกคลุมในบริเวณซึ่งต้องการจะศึกษาข้อมูลภาพ

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในการนำเสนอภาพถ่ายดาวเทียมที่มีบริเวณกว้างหรือขนาดใหญ่ เช่น ภาพของประเทศไทยทั้งประเทศ ข้อมูลภาพเพียงภาพเดียวไม่สามารถที่แสดงได้ครอบคลุมพื้นที่ได้ทั้งหมด จึงจำเป็นที่จะต้องนำข้อมูลภาพจำนวนมากมาต่อกันเพื่อที่จะได้ภาพของประเทศไทยทั้งประเทศ ซึ่งข้อมูลภาพที่ได้ในบางภาพจะมีก้อนเมฆหรือหมอก มาปิดบังพื้นที่บางส่วนไว้ ทำให้ไม่สามารถมองเห็นพื้นที่ภายใต้ก้อนเมฆนั้นได้ และจะมีภาพบางส่วนที่ถ่ายจากเวลาหรือฤดูกาลที่ต่างกันทำให้ลักษณะข้อมูลภาพ(สีของภาพ)แตกต่างกัน ทำให้เกิดความคิดว่าน่าเป็นไปได้ที่จะนำข้อมูลภาพเฉพาะในบริเวณที่ต้องการมาต่อกันเพื่อจะได้ข้อมูลภาพที่ต้องการจากดาวเทียมดวงเดียวกัน ถ้าข้อมูลภาพจากดาวเทียมดวงเดียวกัน ไม่มีก็น่าจะสามารถนำข้อมูลภาพที่เกิดจากดาวเทียมคนละดวงมาต่อเข้าด้วยกันได้ แต่จะต้องผ่านขั้นตอนการปรับค่าความละเอียดให้เท่ากันและขั้นตอนอื่นๆ เสียก่อน ทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ทฤษฎีแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีที่ใช้ประกอบการวิจัยในงานวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย การปรับค่าความละเอียดของข้อมูลภาพให้เท่ากันในกรณีที่ข้อมูลภาพที่ใช้ มาจากดาวเทียมคนละดวงกัน โดยการปรับแก้ค่าความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต(Geometric correction) การซัดตัวอย่างข้อมูลภาพ(Resampling)และการแทรกค่าข้อมูล(Interpolation)ที่หายไปภายหลังจากการปรับแก้ค่าความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ปรับค่าความสว่างของข้อมูลภาพให้สอดคล้องกัน(Gray Scale Matching) การลบรอยตะเข็บของภาพ(Seam removal) ที่เกิดจากการนำภาพมาต่อกัน การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของข้อมูลภาพ

## 1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการต่อภาพถ่ายดาวเทียมและการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของภาพถ่ายดาวเทียม โดยข้อมูลภาพที่ใช้ในการทดลองนี้ได้มาจากดาวเทียมดาวเทียม ADEOS มีค่าความละเอียด 16 เมตร กว้าง 16 เมตร จากดาวเทียม JERS-1 มีค่าความละเอียด 18 เมตร กว้าง 24 เมตร และจากดาวเทียม MOS-1 มีค่าความละเอียด 50 เมตร กว้าง 50 เมตร ตามลำดับ ในขั้นตอนของการต่อภาพได้อาศัยเทคนิคการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตเพื่อการปรับแก้ค่าความละเอียดของข้อมูลภาพให้มีค่าเท่ากันทั้งสามภาพ และการคำนวณหาข้อมูลภาพที่ขาดหายไประหว่างการปรับแก้ค่าความละเอียดด้วยวิธีการแทรกค่าในแบบต่างๆ รวมทั้งการปรับค่าความสว่างของข้อมูลภาพจากดาวเทียมให้มีค่าใกล้เคียงกันก่อนที่จะนำภาพที่ได้มาต่อเข้าด้วยกันและลบตะเข็บที่บริเวณขอบภาพที่นำมาต่อ ซึ่งผลที่ได้จะเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยในการกำจัดกลุ่มเมฆและหมอกที่มาปิดบังพื้นที่บางส่วนของพื้นที่ที่ต้องการพิจารณาออกไป โดยเป็นผลมาจากการถ่ายภาพในเวลาและฤดูกาลที่ต่างกันทำให้ได้ข้อมูลต่างกันไป สุดท้ายเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักร่วมของข้อมูลภาพภายหลังจากการปรับแก้ค่าความละเอียดของทั้งสามให้เท่ากัน

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 1 บทนำ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตวิทยานิพนธ์ และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 หลักการของการสำรวจจากระยะไกลทั่วไป ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ความเพี้ยนของข้อมูลภาพและการปรับแก้ความเพี้ยน การปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตโดยอาศัยหลักการของการซ้อนภาพ ที่สำคัญคือการกำหนดจุดควบคุมภาพพื้นดินให้สัมพันธ์กันทั้งสองภาพ

บทที่ 4 การชักตัวอย่างข้อมูลใหม่และการแทรกค่าข้อมูล ภายหลังจากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต เพื่อเป็นการแก้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับพิกัดของข้อมูลภาพ อันเนื่องมาจากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตนั้น ให้อยู่ในตำแหน่งที่เป็นจำนวนเต็มและหาข้อมูลภาพที่ขาดหายไป เพื่อที่จะสามารถนำไปแสดงผลทางจอของคอมพิวเตอร์และนำไปประมวลผลต่อไป

บทที่ 5 การปรับแก้ค่าความสว่างของข้อมูลภาพให้สอดคล้องกับภาพต้นฉบับ การคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ในตำแหน่งที่ต้องการจะต่อภาพที่มีลักษณะทางภูมิประเทศใกล้เคียงกัน และสุดท้ายการลบรอยตะเข็บบนขอบภาพอันเนื่องมาจากการต่อภาพทั้งสามภาพเข้าด้วยกัน

บทที่ 6 การวิเคราะห์ห่อองค์ประกอบหลักร่วมของข้อมูลภาพที่มีค่าความละเอียดต่างกัน ภายหลังจากการปรับแก้ค่าความละเอียดของข้อมูลภาพให้มีค่าเท่ากัน

บทที่ 7 บทสรุป เป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะต่างๆ ที่น่าจะเป็นประโยชน์เพื่อการศึกษาในอนาคต

สุดท้ายจะเป็นภาคผนวกประกอบได้ด้วยความหมายของคำที่น่าสนใจเพื่อช่วยในการทำ ความเข้าใจมากขึ้นในการอ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

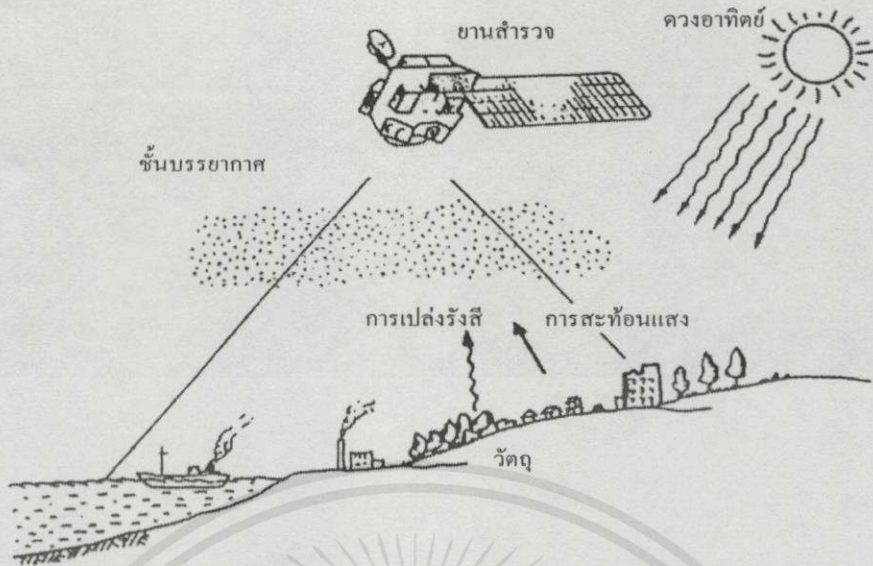
## บทที่ 2

# พื้นฐานของการสำรวจระยะไกล

### 2.1 ความหมายของรีโมตเซนซิง[1,2]

โดยคำจำกัดความ รีโมตเซนซิง(Remote sensing) หมายถึงการสำรวจจากระยะไกล ที่ปราศจากการสัมผัสโดยตรงระหว่างอุปกรณ์สำรวจและเป้าหมายที่ต้องการสำรวจ แท้จริงแล้วรู้จักรูปแบบของรีโมตเซนซิงในทางธรรมชาติที่มีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ เช่น การได้กลิ่น การได้ยิน และการมองเห็น การมองเห็นด้วยตาของมนุษย์มีลักษณะเทียบเคียงกับรีโมตเซนซิงที่ได้จากการประดิษฐ์มากที่สุด โดยที่มีร่างกายเปรียบเสมือนฐานของเครื่องสำรวจ และมีดวงตาเป็นอุปกรณ์สำรวจที่มีความสามารถในการมองเห็นสิ่งต่างๆ จากการตกกระทบของแสงที่วัตถุแล้วสะท้อนเข้าสู่ตา ซึ่งมีความไวต่อทั้งระดับความเข้มและความถี่ของคลื่นแสง ทำให้สามารถแยกแยะระดับความมืด หรือความสว่าง ตลอดจนสีต่างๆ ได้

ทั้งนี้ถือได้ว่ารีโมตเซนซิงเป็นวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแขนงหนึ่ง ที่ใช้ในการบ่งบอกจำแนก หรือ วิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุต่างๆ โดยปราศจากการสัมผัสโดยตรง แต่จะอาศัยพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อน หรือแผ่ออกมาจากวัตถุ เป็นต้นกำเนิดของข้อมูลที่สำรวจจากระยะไกล อย่างไรก็ดี ตัวอย่างอื่นๆ เช่น ความโน้มถ่วง หรือสนามแม่เหล็ก ก็อาจนำมาใช้ในการสำรวจระยะไกลได้เช่นกัน เครื่องมือที่ใช้วัดค่าพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสะท้อน หรือแผ่ออกจากวัตถุ เรียกว่า อุปกรณ์วัดจากระยะไกล(Remote sensor) หรือ อุปกรณ์วัด(Sensor) ตัวอย่าง เช่น กล้องถ่ายภาพ หรือเครื่องกวาดภาพ(Scanner) สามารถหาคุณลักษณะของวัตถุได้จากลักษณะการสะท้อนหรือการแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากวัตถุนั้นๆ กล่าวคือ “วัตถุแต่ละชนิดจะมีลักษณะการสะท้อนแสงหรือการแผ่รังสีที่เฉพาะตัวและแตกต่างกัน ถ้าวัตถุหรือสภาพแวดล้อมเป็นคนละประเภทกัน” การสำรวจจากระยะไกลจึงเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการจำแนก วิเคราะห์คุณลักษณะและเข้าใจวัตถุหรือสภาพแวดล้อมต่างๆ จากลักษณะเฉพาะตัวในการสะท้อนแสงหรือแผ่รังสี การสำรวจระยะไกลโดยทั่วไปสามารถแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 2.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการสำรวจจากระยะไกลเหล่านี้จะผ่านกระบวนการอัตโนมัติด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์และการแปลด้วยสายตา จากนั้นจึงนำไปประยุกต์ใช้ในด้านเกษตร การใช้ที่ดิน ป่าไม้ ธรณีวิทยา สภาพแวดล้อม ฯลฯ จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับรีโมตเซนซิงทั้งส่วนที่เป็นธรรมชาติ และส่วนที่ได้จากการประดิษฐ์ขึ้น นั่นก็คือ คลื่นแสง ทำหน้าที่เสมือนสื่อกลางระหว่างอุปกรณ์สำรวจและเป้าหมาย คลื่นแสงเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอยู่แล้วทางธรรมชาติ เช่น พลังงานที่ได้จากดวงอาทิตย์หรือที่แผ่ออกจากพื้นผิวโลก ขณะเดียวกันความสามารถที่จะสร้างพลังงานนี้กล่าวได้ เพื่อช่วยในการสำรวจในกรณีที่พลังงานธรรมชาติไม่เอื้ออำนวย หรือยังมีจุดบอด เช่น ไม่สามารถผ่านก้อนเมฆที่บดบังเป้าหมายได้



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเก็บข้อมูลโดยการสำรวจระยะไกล

## 2.2 พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า

พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่ง ในหลายๆ รูปแบบของพลังงาน เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานเคมี และพลังงานกล พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดไปยังเป้าหมายต่างๆ ได้ โดยการแผ่รังสี การอธิบายปรากฏการณ์ที่ค่อนข้างจะซับซ้อนสามารถกระทำได้โดยอาศัยทฤษฎี 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีคลื่น และทฤษฎีอนุภาค

### 2.2.1 ทฤษฎีคลื่น

พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า ทิศทางของสนามแม่เหล็ก ทิศทางของสนามไฟฟ้า และทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังรูปที่ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีรูปที่ 2.2 คุณสมบัติของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าตามทฤษฎีคลื่นของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

โดยที่  $c$  ค่าคงที่ของความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า  $3 \times 10^8$  เมตร / วินาที ในสุญญากาศ  
ย่านความยาวคลื่นของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ รังสีแกมมา (Gamma) รังสีเอกซ์ (X - Ray) รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV - Ultraviolet) แสงที่ตามองเห็น (Vision light) รังสีอินฟราเรด (IR - Infrared) จนถึงคลื่นวิทยุ (Radio wave) โดยเรียงลำดับจากความยาวคลื่นสั้นไปจนถึงความยาวคลื่นยาวตามลำดับ ดังในตาราง 2.1 แสดงชื่อ และย่านความถี่ต่างๆ ของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า มีสิ่งที่น่าสนใจก็คือ การแยกประเภทของรังสีอินฟราเรด และคลื่นวิทยุอาจจะแตกต่างกันไปขึ้นกับสาขาวิชาการนั้นๆ ตามที่แสดงในตารางเป็นตัวอย่างที่ใช้กันทั่วไป

ตารางที่ 2.1 การจำแนกพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า

ประเภท		ความยาวคลื่น		ความถี่		
อัลตราไวโอเล็ต		100 ~ 0.4	$\mu\text{m}$	750 ~ 3000	THz	
แสงที่ตามองเห็น		0.4 ~ 0.7	$\mu\text{m}$	430 ~ 750	THz	
อินฟราเรด	อินฟราเรดใกล้	0.7 ~ 1.3	$\mu\text{m}$	230 ~ 730	THz	
	อินฟราเรดคลื่นสั้น	1.3 ~ 3	$\mu\text{m}$	100 ~ 230	THz	
	อินฟราเรดคลื่นกลาง	3 ~ 8	$\mu\text{m}$	38 ~ 100	THz	
	อินฟราเรดความร้อน	8 ~ 14	$\mu\text{m}$	22 ~ 38	THz	
	อินฟราเรดไกล	14 ~ 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	kHz
คลื่นยาวมาก	(VLF)	10 ~ 100	km	3 ~ 30	kHz	

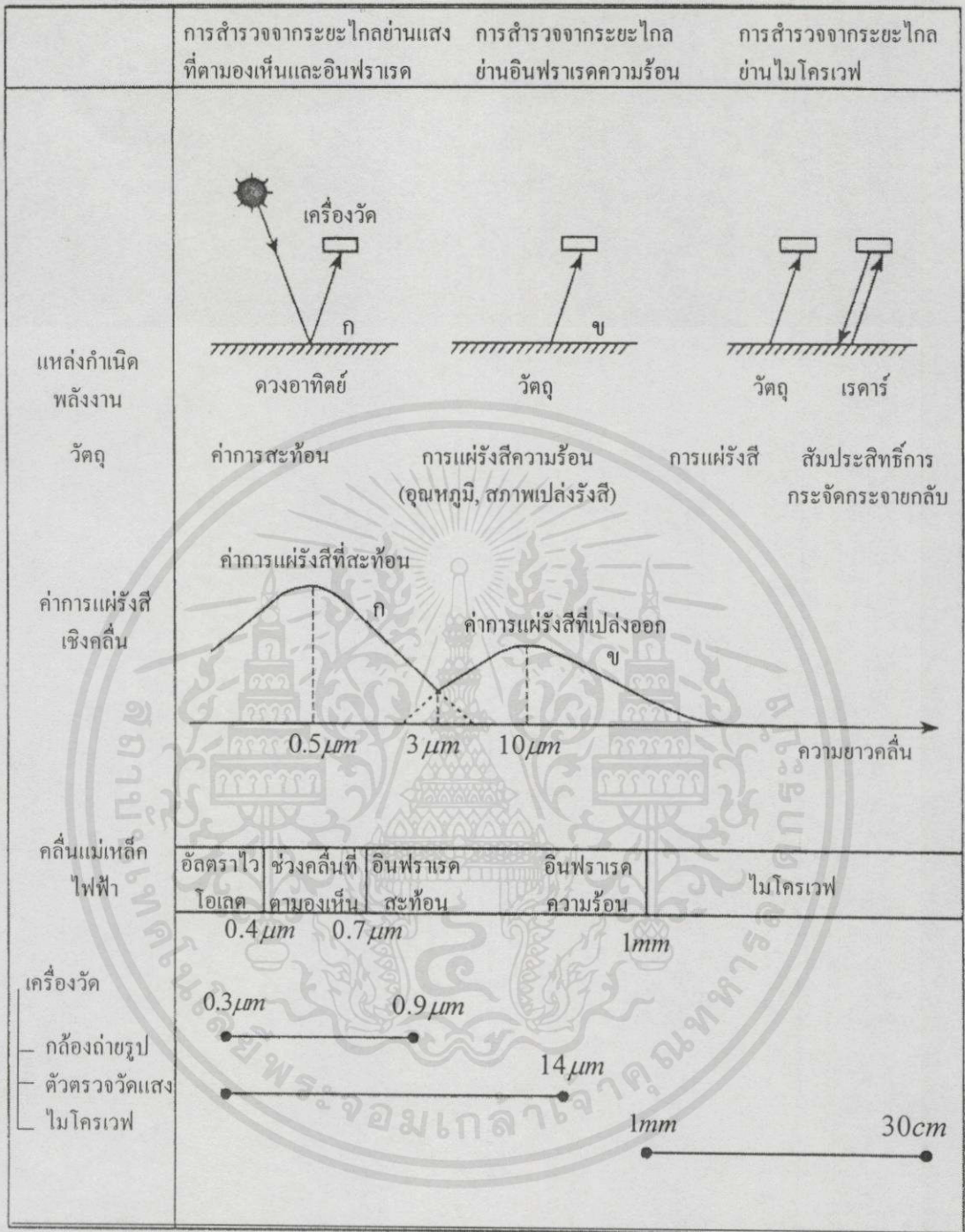
ย่านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการสำรวจจากระยะไกลได้แก่ คลื่นอัลตราไวโอเลตใกล้ (ความยาวคลื่น 0.3 ~ 0.4 ไมโครเมตร) คลื่นที่ตามองเห็น(ความยาวคลื่น 0.4 ~ 0.7 ไมโครเมตร) ประกอบไปด้วยแถบสีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง คลื่นอินฟราเรดใกล้(Near infrared) อินฟราเรดคลื่นสั้น(Short wave infrared) อินฟราเรดความร้อน(Thermal infrared) (ความยาวคลื่น 0.7 ~ 14 ไมโครเมตร) และช่วงคลื่นไมโครเวฟ(Microwave)(ความยาวคลื่น 1 มิลลิเมตร ~ 1 เมตร) ซึ่งย่านแสงในช่วงอินฟราเรดใกล้ และอินฟราเรดคลื่นสั้นนั้น ในบางครั้งจะเรียกว่าอินฟราเรดช่วงสะท้อน (ความยาวคลื่น 0.7 ~ 3 ไมโครเมตร) เพราะเป็นย่านที่ได้รับอิทธิพลจากการสะท้อนของพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าที่จะเกิดจากการแผ่รังสีจากพื้นโลก ในย่านอินฟราเรดความร้อน พลังงานส่วนใหญ่จะได้อมาจากการแผ่รังสีของพื้นผิว โดยที่ได้รับอิทธิพลจากการสะท้อนของพลังงานแสงอาทิตย์น้อยมาก

ในขณะที่ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่มีการแผ่พลังงานไฟฟ้าสูงสุดนั้นคือ ความยาวคลื่น 0.5 ไมโครเมตร ซึ่งจะเป็นแหล่งพลังงานสำหรับการสำรวจระยะไกลย่านความถี่ที่ตามองเห็น และย่านอินฟราเรดสะท้อน โดยข้อมูลที่ได้จากการสำรวจระยะไกลในย่านแสงที่ตามองเห็น และอินฟราเรดสะท้อน ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับค่าการสะท้อน(Reflectance) ของวัตถุต่างๆบนผิวโลกโดยที่แหล่งกำเนิดพลังงานที่ใช้ในการสำรวจจากระยะไกลย่านอินฟราเรดจะได้จากตัววัตถุเอง เนื่องจากวัตถุใดๆ ก็ตามที่มีอุณหภูมิในระดับปกติ จะมีความสามารถในการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 10 ไมโครเมตร การสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟ สามารถแยกได้เป็น 2 ประเภท คือ การสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟแบบพาสซีฟ(Passive) และการสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟแบบแอคทีฟ(Active) ในการสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟแบบพาสซีฟจะสามารถวัดค่าการแผ่รังสีไมโครเวฟ(Microwave radiation)ได้จากวัตถุ ในขณะที่การสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟแบบแอคทีฟจะสามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระเจากลับ(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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ประเภทของการสำรวจระยะไกลที่สัมพันธ์กับย่านความยาวคลื่นทั้ง 3 ประเภท

### 2.2.2 ทฤษฎีอนุภาค

อธิบายถึงพฤติกรรมของคลื่นแสงที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิด ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคย่อยที่เรียกว่า ควอนตัมหรือโฟตอน อนุภาคย่อยเหล่านี้มีคุณสมบัติเหมือนอนุภาคอื่นๆ ที่ประกอบด้วยพลังงานและโมเมนตัม แต่ต่างกันตรงที่โฟตอนมีมวลเป็นศูนย์เมื่ออยู่นิ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของโฟตอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับความถี่ดังสมการที่ (2.2)

$$E = h \cdot f \quad (2.2)$$

กำหนดให้

$E$  คือพลังงานของโฟตอน

$h$  คือค่าคงที่ Planck

$f$  คือความถี่คลื่น

จากสมการที่ (2.1) คูณด้วย  $\frac{h}{h}$

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

นั่นคือ พลังงานของโฟตอนเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวคลื่น หรือ ก็คือแปรตรงกับ ความถี่คลื่น หมายความว่า ยิ่งคลื่นแสงมีความยาวคลื่นมาก พลังงาน โฟตอนจะมีค่าน้อย และในทาง กลับกัน หากคลื่นแสงมีความถี่สูงระดับพลังงานก็จะสูงตาม ความสัมพันธ์เหล่านี้เป็นพื้นฐานที่ สำคัญของพฤติกรรมของพลังงานกับแม่เหล็กไฟฟ้า

### 2.3 การสะท้อนแสงของผิวโลก

ปฏิกริยาระหว่างพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าและพื้นผิวโลกเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการสำรวจ ระยะไกล เพราะเป็นค่าที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์สำรวจในลักษณะของพลังงาน ซึ่งจะสะท้อนจากพื้น ผิวโลกในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นกับคุณสมบัติของแต่ละพื้นผิวในการสะท้อนแสงหรือการแผ่รังสี ความร้อน ดังนั้นจึงต้องเข้าใจปรากฏการณ์ดังกล่าวเพื่อประโยชน์ในการแปลความหมายจากภาพ

#### 2.3.1 การสะท้อนกลับ

เป็นปรากฏการณ์เมื่อแสงตกกระทบพื้นผิวโลกแล้วสะท้อนกลับ ปริมาณแสงที่สะท้อนจะ มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิว เป็นลักษณะราบเรียบ หรือขรุขระ มุมตกกระทบของแสง ความสามารถหรืออัตราการสะท้อนแสงของพื้นผิวโลก และโพลาไรเซชัน ของแสงที่ตกกระทบ การสะท้อนกลับเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะคือ

1. การสะท้อนกลับหมดในทิศทางตรงข้าม เกิดในกรณีที่พื้นผิวมีลักษณะราบเรียบ โดยที่มุมของความขรุขระที่ผิวมีค่าน้อยกว่า 1 ใน 10 ของความยาวคลื่น โดยแสงที่ตกกระทบทั้ง หมดยังสะท้อนกลับในทิศทางที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ มักจะเกิดกับแสงที่มีความยาว คลื่นค่อนข้างยาว การสะท้อนในลักษณะนี้นอกจากจะไม่เกิดประโยชน์ต่อการสำรวจระยะไกลแล้ว

ยังบดบังสภาพพื้นผิวแท้จริงที่ปรากฏบนภาพด้วย ลักษณะนี้เรียกว่า “ประกายแดด” โดยที่ปรากฏการณ์เช่นนี้มักเกิดกับบริเวณผิวน้ำ ดินบางประเภท และหินที่โผล่เหมือนผิวดิน

2. การสะท้อนแบบกระจาย เป็นการสะท้อนจากพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระ แต่อยู่ในลักษณะที่สม่ำเสมอ และเกิดในย่านแสงที่ตามองเห็นเป็นส่วนใหญ่

3. การสะท้อนแบบผสม เป็นลักษณะที่มักเกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติ 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 แบบรูปกรวยหรือแบบคลุมซีกโลก จึงมีลักษณะผสมผสานกันได้ถึง 9 แบบ ค่าการสะท้อนเชิงคลื่นของสิ่งปกคลุมดินที่แตกต่างกันออกไปทำให้สามารถจำแนกประเภทของสิ่งปกคลุมดิน โดยวิธีสำรวจจากระยะไกลได้ด้วยการสังเกตค่าการสะท้อนเชิงคลื่นหรือค่าการแผ่รังสีเชิงคลื่นจากพื้นผิวนั้นๆ

### 2.3.2 การดูดกลืน

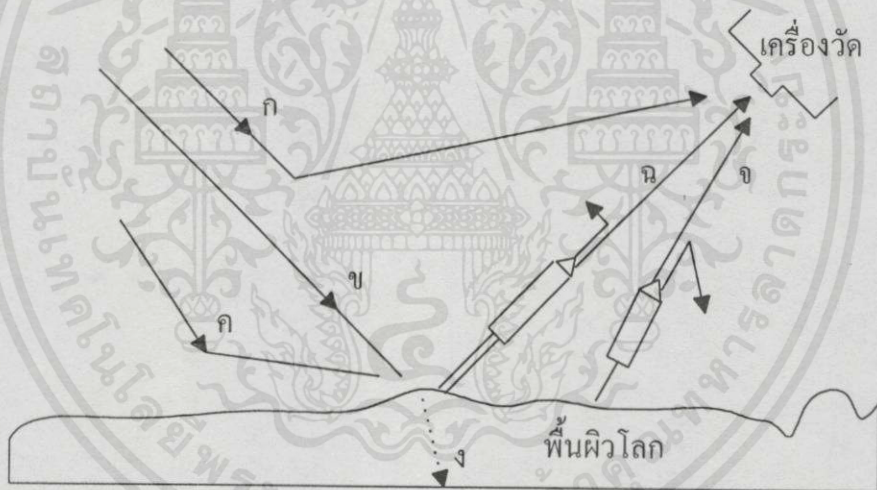
ปรากฏการณ์นี้เป็นเช่นเดียวกับการดูดกลืนในชั้นบรรยากาศ เมื่อพลังงานตกกระทบพื้นผิวโลก บางส่วนจะสะท้อนกลับ ในขณะที่บางส่วนจะถูกดูดกลืน ปริมาณการดูดกลืนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของพื้นผิว ตลอดจนขนาดหรือความหนา นอกจากนี้ การดูดกลืนยังจะเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละความยาวคลื่น บางพื้นผิวจะดูดกลืนได้ดีในช่วงคลื่นสั้น และพื้นผิวบางประเภทก็จะดูดกลืนได้ดีในช่วงคลื่นยาว อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานบางส่วนเกิดขึ้น พลังงานนี้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของความร้อน อุณหภูมิของวัตถุจะเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวมันเองกลาย

เป็นต้นกำเนิดพลังงาน ดังเช่นการแผ่พลังงานไกลเพราะสามารถใช้อุปกรณ์ตรวจรับได้ทั้งกลางวันและกลางคืน และเป็นย่านหนึ่งของหน้าต่างบรรยากาศที่ไม่ถูกรบกวนโดยอนุภาคในชั้นบรรยากาศ

### 2.3.3 การส่งผ่าน

การส่งผ่านพลังงาน เป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องกับการดูดกลืนพลังงานของพื้นผิว โดยพลังงานส่วนที่ได้รับการดูดกลืนจะถูกถ่ายทอดไปยังส่วนที่อยู่ถัดไป ค่าการส่งผ่านรังสีของวัตถุใดๆ ก็คือสัดส่วนของปริมาณพลังงาน ณ จุดซึ่งพลังงานได้เคลื่อนที่ไป ต่อพลังงานที่ตกกระทบทั้งหมด โดยทั่วไปแล้วค่าการส่งผ่านจะแตกต่างกันไป ขึ้นกับคุณสมบัติของพื้นผิวและสำหรับพื้นผิวหนึ่งๆ จะเกิดการส่งผ่านได้ดีในบางช่วงคลื่นเท่านั้น

รูปที่ 2.5 แสดงภาพสรุปเส้นทางเดินของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดผ่านชั้นบรรยากาศไปกระทบยังพื้นผิวโลก แล้วสะท้อนกลับเข้ามาสู่อุปกรณ์ตรวจจับ สำหรับระบบที่แสดงนี้เป็นระบบพาสซีฟ แหล่งกำเนิดพลังงาน คือ ดวงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยเส้นทางเดินดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.5 เส้นทางเดินของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าการสำรวจระยะไกลแบบพาสซีฟ

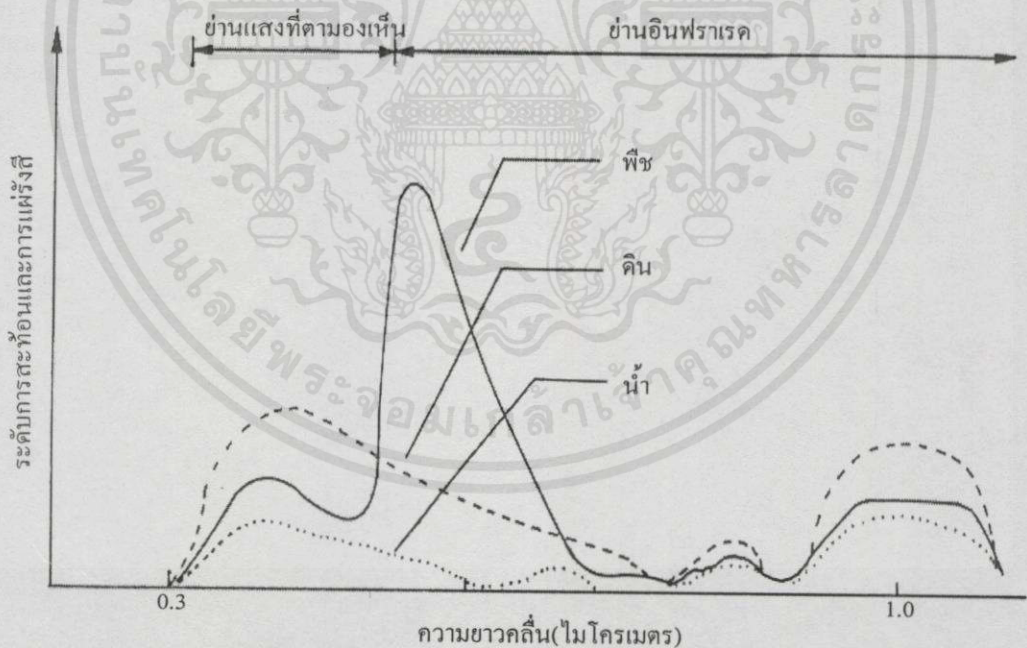
ก. รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ส่องทางผ่านชั้นบรรยากาศและจะเกิดการสูญเสียไปบางส่วน โดยส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนและส่วนหนึ่งจะเกิดการกระจายโดยอนุภาคต่างๆในชั้นบรรยากาศ แล้วสะท้อนเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับ โดยมีได้ตกกระทบพื้นผิวโลก ปรากฏการณ์นี้จะทำให้เกิดลักษณะคล้าย “หมอก” บนภาพถ่ายจากดาวเทียมและเกิดความไม่คมชัดของภาพ

ข. รังสีส่วนที่เหลือจากการดูดกลืนและการกระจายในชั้นบรรยากาศ จะตกกระทบพื้นผิวโลกแล้วสะท้อนเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับ

ค. แสงจากท้องฟ้าที่เกิดการกระจายในชั้นบรรยากาศ ตกกระทบพื้นผิวโลกแล้วสะท้อนเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับรวมกับข้อ (ข.)

- ง. รังสีบางส่วนที่ตกกระทบพื้นผิวโลกที่ถูกดูดกลืนและส่งผ่านสู่ระดับลึกเบื้องล่าง  
 จ. รังสีที่แผ่จากพื้นผิวโลกแล้วเดินทางสู่อุปกรณ์ตรวจจับ  
 ฉ. การกระจายของรังสีที่สะท้อนหรือแผ่จากพื้นผิวโลก บางส่วนสะท้อนออกนอกทิศทางของอุปกรณ์ตรวจจับ บางส่วนสะท้อนเข้าเครื่องสำรวจและบางส่วนสะท้อนกลับสู่พื้นผิวโลกอีก

สิ่งที่ต้องการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจจับ คือ รังสีในส่วนของ (ข.) และ (จ.) ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติทางแสงของแต่ละพื้นผิว แม้ว่า (ง.) จะแสดงคุณสมบัติดังกล่าวด้วยก็ตาม แต่โดยที่ (ง.) มีความสัมพันธ์กับ (ข.) ในเชิงกลับกัน ดังนั้น จึงเป็นการเพียงพอที่จะดูจากค่าการสะท้อนเป็นส่วนใหญ่ ค่าการสะท้อนหรือแผ่รังสีที่วัดได้ ณ ความยาวคลื่นต่างๆ ของแถบพลังงาน หรือสิ่งที่เรียกว่าลายเซ็นเชิงคลื่น(Spectral signature) จะเป็นลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละพื้นผิว ค่าเหล่านี้ สามารถวัดได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการหรือจากการสำรวจในสนาม ภายใต้สภาวะที่ปราศจากการรบกวนของชั้นบรรยากาศ การรวบรวมลายเซ็นเชิงคลื่นของพื้นผิวประเภทต่างๆ จะมีประโยชน์สำหรับการออกแบบอุปกรณ์สำรวจให้บันทึกภาพด้วยช่วงคลื่นที่เหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภทและช่วยในการแปลความหมายของภาพถ่ายจากดาวเทียม



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบลายเซ็นเชิงคลื่นของทรัพยากรหลัก

เอกสารนี้ **2.4 อุปกรณ์สำรวจบนดาวเทียม** เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ความหมายของอุปกรณ์สำรวจบนดาวเทียมหมายถึงเครื่องมือที่ใช้วัดค่าการสะท้อนของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ช่วงคลื่นใดช่วงคลื่นหนึ่งหรือหลายช่วงคลื่นของแถบพลังงานที่ครอบคลุม

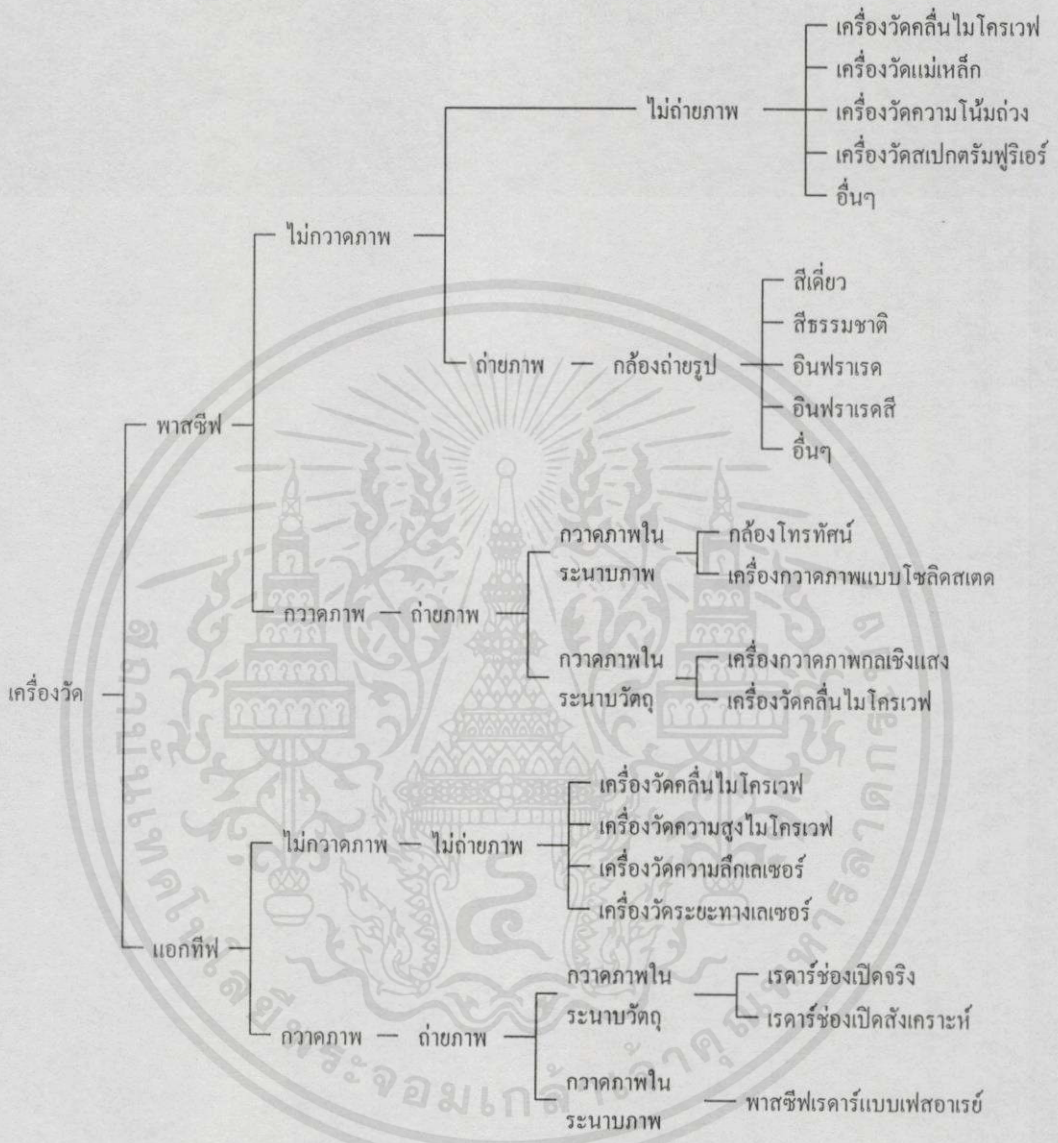
จากช่วงคลื่นที่ตามองเห็นจนถึงช่วงคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจากพื้นผิวโลก พลังงานที่สะท้อนเข้าอุปกรณ์วัดนี้ อาจจะมาจากการที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติ เช่น จากดวงอาทิตย์ ในกรณีนี้ อุปกรณ์สำรวจจะเป็นแบบพาสซีฟ(Passive) สำหรับระบบอุปกรณ์ที่ผลิตพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อที่จะส่งไปกระทบยังพื้นผิวโลกโดยไม่ต้องอาศัยธรรมชาติ แล้วจึงวัดค่าการสะท้อนของพลังงานที่ส่งกลับมาก็คือหนึ่งเป็นระบบที่เรียกว่า แอกทีฟ(Active) หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า เรดาร์ นั้นเอง ระบบพาสซีฟมักจะเป็นระบบที่ใช้สำหรับคลื่นสั้น คือช่วงที่ตามองเห็นจนถึงอินฟราเรดใกล้และช่วงคลื่นความร้อน ส่วนระบบเรดาร์มักจะใช้สำหรับช่วงคลื่นที่ยาว เช่น ไมโครเวฟ ดังเช่น เครื่องอัลติมิเตอร์ สเตจเทอโรมิเตอร์ และซินธิติก-อเพอร์เจอร์เรดาร์ เป็นต้น

จากอุปกรณ์วัดที่สามารถสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้เองนั้น จะส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระทบวัตถุที่ต้องการนั้นๆ ให้สะท้อนพลังงานออกมาอีกครั้งเพื่อการตรวจวัดและบันทึกผลที่ได้ ตัวอย่างอุปกรณ์วัดชนิดนี้ ได้แก่ ระบบเรดาร์ ซึ่งมีอยู่กัน 2 ประเภท ดังนี้ ระบบกวาดภาพ (Scanning system) และระบบไม่กวาดภาพ(Non-scanning system) โดยอุปกรณ์วัดที่จัดอยู่ในประเภทพาสซีฟ ที่รวมเอาลักษณะของระบบไม่กวาดภาพ และเป็นวิธีแบบไม่ถ่ายภาพ(Non-imaging method) เรียกว่า เครื่องบันทึกในแนวตั้ง(Profile radiometer) ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์วัดคลื่นไมโครเวฟ เรียกว่า ไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์(Microwave radiometer) ส่วนพาสซีฟเซนเซอร์ชนิดไม่กวาดภาพแต่ใช้วิธีถ่ายภาพ(Imaging method) ได้แก่ กล้องถ่ายภาพทางอากาศที่ใช้บนเครื่องบิน หรือกล้องถ่ายภาพบนดาวเทียม ตัวอย่างเช่นกล้องที่ใช้บนดาวเทียม COSMOS ของรัสเซีย เป็นต้น พาสซีฟเซนเซอร์ที่เป็นทั้งระบบที่มีลักษณะการกวาดภาพ และบันทึกออกมาเป็นภาพ แบ่งออกได้เป็นอุปกรณ์วัดชนิดกวาดสร้างภาพจากระนาบภาพ(Image plane scanning sensor) เช่น กล้องโทรทรรศน์ หรือชนิดที่เรียกว่าเครื่องกวาดภาพแบบโซลิดสเตต(Solid state scanner) และอุปกรณ์วัดชนิดกวาดสร้างภาพจากระนาบวัตถุ(Object plane scanning sensor) เช่น เครื่องกวาดภาพหลายช่วงคลื่น (Multi-spectral scanner หรือ Optical mechanical scanner) และ อุปกรณ์วัดคลื่นไมโครเวฟชนิดกวาดภาพ(Scanning microwave radiometer)

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

จากรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงชนิดของอุปกรณ์วัดที่มีใช้ในปัจจุบันและกำลังได้รับการพัฒนาขึ้นในอนาคตสำหรับเทคโนโลยีการสำรวจจากระยะไกล เป็นที่คาดหมายว่าในอนาคตจะมีการพัฒนาอุปกรณ์วัดชนิดใหม่ขึ้นมาเพื่อการใช้งานเฉพาะประเภทต่างๆ กันออกไป มีทั้งพาสซีฟเซนเซอร์(Passive sensor) คือ อุปกรณ์วัดที่สามารถตรวจจับ และบันทึกสัญญาณ ข้อมูล ซึ่งสะท้อน

หรือเปล่งจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ และแอคทีฟเซนเซอร์(Active sensor) ที่สามารถรับและบันทึกสัญญาณ ข้อมูล ซึ่งสะท้อนจากวัตถุที่ต้องการศึกษา

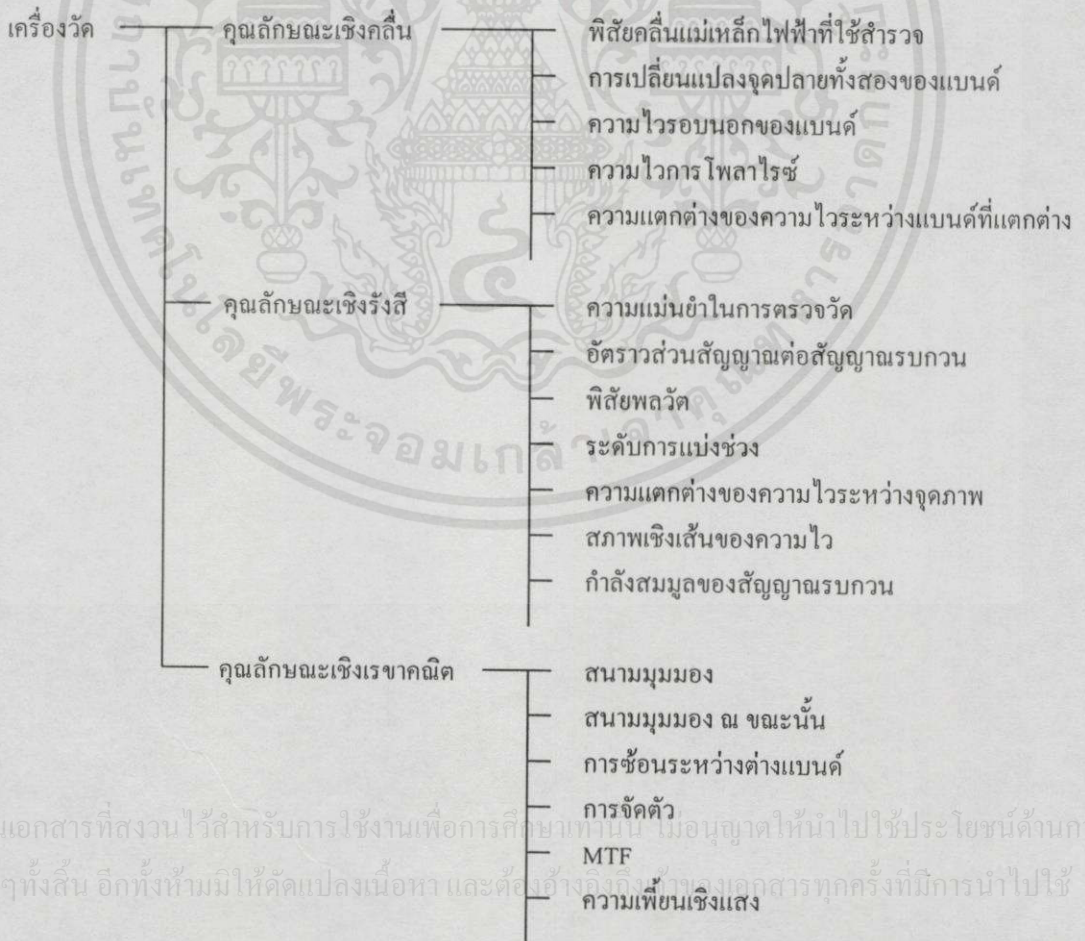


รูปที่ 2.7 การจำแนกประเภทของอุปกรณ์วัด

ในตารางที่ 2.2 แสดงอุปกรณ์วัดที่ใช้้อย่างแพร่หลายพร้อมช่วงคลื่น อุปกรณ์วัดที่ใช้เลนส์ในสเปกตรัมแสงที่ตามองเห็นและสเปกตรัมอินฟราเรดสะท้อน เรียกว่า อุปกรณ์วัดเชิงแสง (Optical sensor) ซึ่งมีคุณลักษณะที่กำหนดโดยความสามารถเชิงคลื่น เชิงแสง และเชิงรูปร่างทางเอกสารนี้ **เรขาคณิต** ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 'ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า' ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ความยาวคลื่นที่ใช้ในอุปกรณ์วัดหลักๆ

ความยาวคลื่น ( $\mu m$ )	UV		อินฟราเรด							คลื่นวิทยุ		
	แสงที่ตามองเห็น		ใกล้	คลื่น	กลาง	ความร้อน	ไกล	คลื่นสั้น	ไมโครเวฟ			
เครื่องมือวัด	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	1.5	5.5	8.0	14.0	1000	10000	100000
กล้องถ่ายรูป (ฟิล์มขาวดำ)	██████████											
(ฟิล์มสี)	██████████											
(ฟิล์มอินฟราเรด)				██████████								
(ฟิล์มอินฟราเรดสี)		██████████										
เครื่องกวาดภาพ โพลิดสเทด					██████████							
(SPOT HRV)		██████████			██████████							
(Thermal Video)							██████████		██████████			
กล้องโทรทัศน์	██████████											
เครื่องกวาดภาพแบบกลเชิงแสง												
(Airborne MSS)	██████████								██████████			
(LANDSAT MSS)	██████████								██████████			
(LANDSAT TM)	██████████						██████████		██████████			
เรดาร์												
เครื่องวัดคลื่นไมโครเวฟ										██████████	██████████	



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบของคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดเชิงแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 ความเพี้ยนเชิงแสง

คุณลักษณะเชิงคลื่น(Spectral characteristics) ได้แก่ ย่านของความยาวคลื่น และความกว้างของช่วงคลื่นนั้นๆ ความยาวคลื่น ณ ตำแหน่ง(จุดกลาง)ของช่วงคลื่น ความไวต่อสัญญาณ ณ จุดปลายของช่วงคลื่น ความไวต่อสัญญาณของช่วงคลื่นที่รอบนอก และความไวของการเปลี่ยนระนาบคลื่นที่ใช้

ตารางที่ 2.3 คำจำกัดความของคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดเชิงแสง

รายการ	คำนิยาม
พิสัยของแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	ความกว้างของช่วงคลื่นที่ใช้ในหนึ่งแบนด์
ความยาวคลื่น ณ ศูนย์กลาง	ความยาวคลื่น ณ จุดศูนย์กลางของแบนด์ที่ใช้
การตอบสนองที่จุดปลายทั้งสองของแบนด์	เส้นโค้งคุณลักษณะที่ช่วงปลายทั้งสองของคลื่น
ความไวของแบนด์	ความไวของแบนด์หนึ่งๆ
ความไวภายนอกแบนด์	ความไวของช่วงคลื่นภายนอกแบนด์นั้น
ความแตกต่างความไวระหว่างแบนด์ที่แตกต่าง	อัตราส่วนของความไวระหว่างแบนด์ที่ต่างกัน
อัตราส่วน S/N	อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน
พิสัยพลวัต	พิสัยของความไวของอุปกรณ์วัดในรูปของอัตราส่วนของความต่างสูงสุดและต่ำสุดของค่าการแผ่รังสี
ความแตกต่างความไวระหว่างจุดภาพ	อัตราส่วนของระดับข้อมูลขาออกสูงสุดต่อข้อมูลขาออกต่ำสุดของจุดภาพ
สภาพเชิงเส้นของคุณลักษณะข้อมูลขาเข้า-ขาออกของอุปกรณ์วัด	ระดับข้อมูลขาเข้าต่อระดับข้อมูลขาออกในระดับข้อมูลขาเข้าที่มีกำลังสูงกว่า
กำลังสมมูลของสัญญาณรบกวน	กำลังสัญญาณข้อมูลขาเข้าที่สามารถให้ข้อมูลขาออกเทียบเท่ากับกำลังสัญญาณรบกวน
สนามมุมมอง	พื้นที่หรือภาพที่ครอบคลุมด้วยวัดจากระยะไกล(สนามเชิงมุมของกล้องถ่ายภาพ ความกว้างของการวาดภาพ)
สนามมุมมอง ณ ขณะนั้น	สนามของมุมที่ตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัด 1 ตัว
การซ้อนทับระหว่างต่างแบนด์	ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ระหว่างแบนด์มาตรฐานและแบนด์อื่นๆ
MTF	ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแปรเปลี่ยนของอุปกรณ์วัด ซึ่งจะเป็นตัวกำหนด IFOV
ความเพี้ยนเชิงแสง	ความเพี้ยนของภาพอันเนื่องมาจากส่วนประกอบเชิงแสงของอุปกรณ์วัด เช่น ความคลาดของเลนส์
มุมมองการมองภาพสามมิติ	ความแตกต่างของมุมมองของอุปกรณ์วัดแบบสเตอริโอ
ความถี่การถ่ายภาพ	เวลาที่ใช้ในการกวาดภาพ 1 เส้น

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

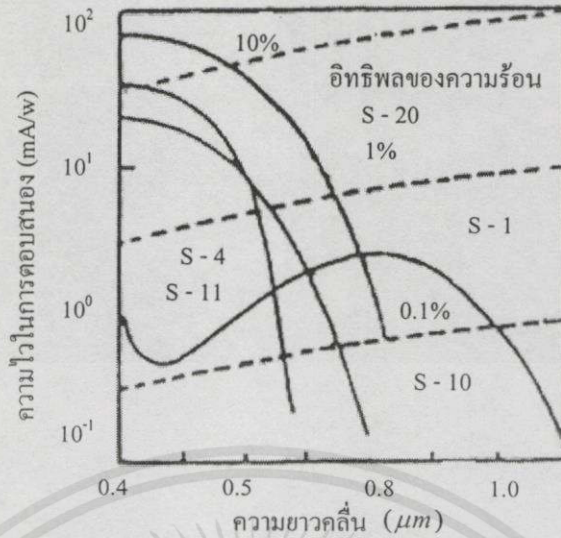
### 2.5 อุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสง

อุปกรณ์ตรวจวัดแสง(Detector) คืออุปกรณ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์ตรวจวัดมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับความสามารถที่จะตรวจวัดช่วงคลื่น ซึ่งมีความยาวคลื่นต่างกันออกไป รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นอุปกรณ์ตรวจวัด 3 ชนิดคือ ชนิดเปล่งแสง (Photo emission) กระตุ้นเชิงแสง(Optical excitation) และอาศัยความร้อน(Thermal effect)



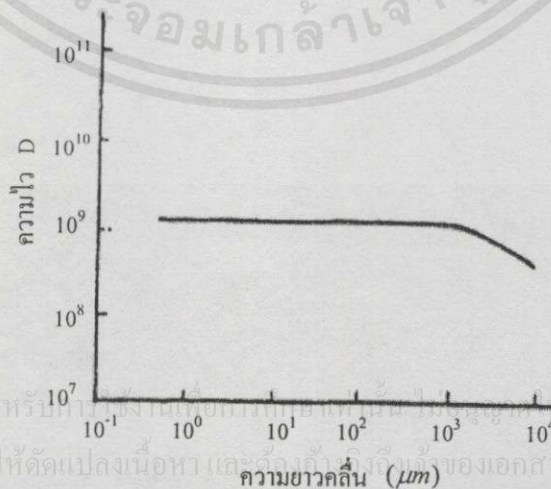
รูปที่ 2.9 การจำแนกประเภทของอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสง

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



รูปที่ 2.10 ความไวในการตอบสนองของหลอดแสง

ตัวอย่างของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระตุ้นแสง ซึ่งมีความไวในช่วงอินฟราเรด ได้แก่ ไดโอดเปล่งแสง(Photo-diode) ตัวเปล่งแสง(Photo-transistor) อุปกรณ์ตรวจวัดแบบนำไฟฟ้าพลังงานแสง(Photo conductive detector) และอุปกรณ์วัดแบบเชิงเส้น(Linear array sensor) เป็นต้น อุปกรณ์ตรวจวัดแบบไดโอดพลังงานแสง ได้รับแรงดันไฟฟ้าจากการกระตุ้นของอิเล็กตรอน ส่วนอุปกรณ์วัดแบบตัวเปล่งแสง และอุปกรณ์ตรวจแบบนำไฟฟ้าพลังงาน ใช้กระแสไฟฟ้า(Electric current) เป็นตัวที่ทำให้ทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดอาศัยความร้อน ซึ่งมีความไวต่อพลังงานในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ จนถึงอินฟราเรดไกลนั้น ได้แก่ ประเภทอุปกรณ์วัดความกดอากาศแบบเทอร์โมคัปเปิล(Thermocouple barometer) และอุปกรณ์วัดความกดอากาศแบบไพโรอิเล็กทริก(Pyroelectric barometer) เป็นต้น รูปที่ 2.11 แสดงเส้นโค้งของสภาพตรวจวัดได้ของอุปกรณ์วัดความกดอากาศแบบไพโรอิเล็กทริก



รูปที่ 2.11 ความไวของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบไพโรอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณลักษณะของอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสงซึ่งจะขึ้นอยู่กับ ชนิด อุณหภูมิ ช่วงความยาวคลื่น ความยาวคลื่นสูงสุด ความไวในการตรวจวัด ในรูป  $D^*$  สภาพตรวจวัดได้ (Detectivity) และระยะเวลาในการตอบสนอง

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของตัวตรวจวัดเชิงแสง

ตัวตรวจวัด	ชนิด	ช่วงคลื่น ( $\lambda$ m)	สภาพตรวจวัดได้ $D^*$	จุดตัดของความถี่ (Hz)	อุณหภูมิขณะทำงาน
Pt-S	PV	0.35 - 0.6	30	$10^8$	295.0
Si p-n PD	PV	0.4 - 1.0	50	$10^7$	295.0
Si p-i-n PD	PV	0.4 - 1.1	80	$10^8$	295.0
Si APD	PV	0.4 - 0.8	80	$10^{10}$	295.0
Ge p-n PD	PV	0.6 - 1.8	50	$10^7$	295.0
InSb p-n PD	PV	3.0 - 6.2	8	$5 \times 10^2$	77.0
PbSnTe p-n PD	PV	5.0 - 11.4	>15-60V/W	$10^7$	77.0
PbS	PC	0.5 - 3.8	15.00	300	196.0
PbSe	PC	0.8 - 4.6	3.00	$3 \times 10^3$	196.0
PbTe	PC	0.8 - 5.5	0.16	$3 \times 10^3$	196.0
p-InSb	PC	2.0 - 6.7	2.00	$3 \times 10^3$	77.0
n-InSb	PC	1.0 - 3.6	30.00	$3 \times 10^3$	195.0
PbSnTe	PC	5.0 - 11.0	1.70	$3 \times 10^3$	4.2
CdHgTe	PC	5.0 - 16.0	3.00	$10^4$	4.2
Ge : Au	PC	2.0 - 9.5	0.02	$10^4$	77.0
Ge : Zn, Au	PC	5.0 - 40.0	1.00	$10^3$	4.2
Ge : Cu	PC	5.0 - 30.0	3.00	$10^3$	4.2
Si : Al	PC	2.0 - 16.0	1.00	$10^4$	27.0
Si : Sb	PC	2.0 - 31.5	1.80	$10^4$	4.0
ATGS	TC	1 - 1000	0.030	10	295.0
(Ba,Sr) TiO <sub>3</sub>	TC	1 - 1000	0.011	100	295.0

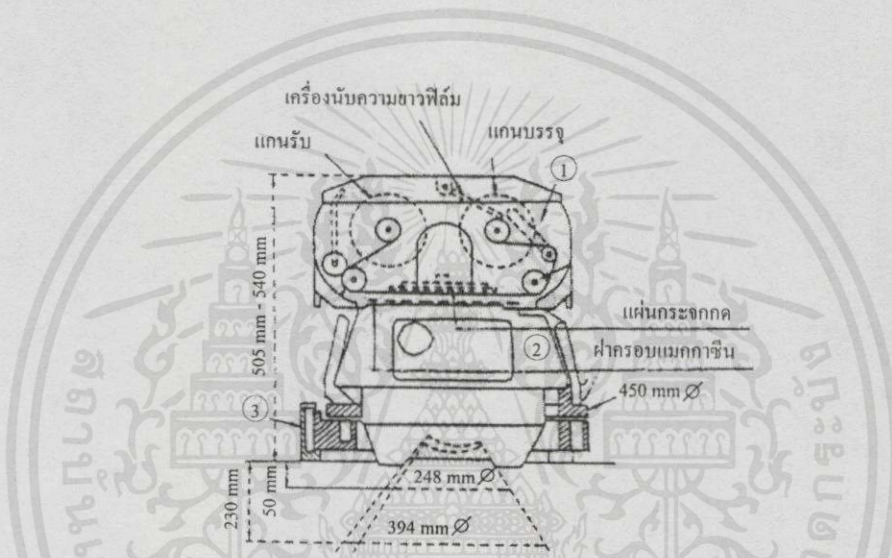
PV ชนิดตัวแปลงแสง

PC ชนิดตัวตรวจวัดแบบนำไฟฟ้าพลังงานแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 TC ชนิดตัวตรวจวัดแกลไฟโรอิเล็กทรอนิกส์  
 $10^{10} \text{ cm}^2 \text{ Hz}^{-1} \text{ W}^{-1}$  ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 กล้องถ่ายภาพสำหรับการสำรวจระยะไกล

กล้องถ่ายภาพเหล่านี้ ได้แก่ กล้องสำรวจทางอากาศ(Aerial survey camera) กล้องถ่ายภาพหลายช่วงคลื่น(Multispectral camera) และกล้องถ่ายภาพจอกว้าง(Panoramic camera) เป็นต้น กล้องสำรวจอากาศ บางที่รู้จักในชื่อวากล้องถ่ายภาพแบบเมตริกซ์ ซึ่งใช้ถ่ายภาพจากเครื่องบินหรือยานอวกาศ เพื่อทำแผนที่ภูมิประเทศโดยอาศัยการถ่ายภาพเหลื่อมกันทำให้เกิดระบบสามมิติ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันมากได้แก่ กล้อง RMK แสดงได้ในรูปที่ 2.12 แสดงกลไกของกล้อง Zeiss RMK กล้องถ่ายภาพจากอวกาศ(Space camera) รู้จักดีคือ กล้องถ่ายภาพแบบเมตริกซ์(Metric camera) ที่ใช้บนกระสวยอวกาศ



รูปที่ 2.12 ระบบกล้อง Zeiss RMK

เนื่องจากกล้องถ่ายภาพแบบเมตริกซ์ ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในการสำรวจภูมิประเทศอย่างละเอียดและมีความถูกต้องสูง ดังนั้น ข้อกำหนดต่างๆในระบบแสงและคุณสมบัติเชิงเรขาคณิตต้องเป็นไปตามกฎเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ดังนี้

- 1) ความเพี้ยนของเลนส์ต้องมีค่าน้อยที่สุด
- 2) เลนส์ควรให้รายละเอียดสูงและภาพที่ได้ควรมีความคมชัดสม่ำเสมอ แม้บริเวณมุมภาพ
- 3) ความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตระหว่างกรอบภาพ และแนวแกนของระบบเลนส์ ควรให้มีเป็นบรรทัดฐาน โดยใช้เครื่องหมาย Fiducial หรือ Reseau
- 4) แนวแกนของเลนส์กับระนาบของฟิล์มควรตั้งฉากกันและกัน
- 5) ความเบบราบของแผ่นฟิล์มควรให้คงไว้ตลอดเวลาโดยอาศัยระบบแผ่นสูญญากาศ
- 6) ความยาวโฟกัสของเลนส์ควรได้รับการวัดและปรับเทียบอย่างแม่นยำ
- 7) การถ่ายภาพต่อเนื่องหลายๆภาพควรใช้ชัตเตอร์ที่มีความเร็วสูงและใช้การเลื่อนฟิล์มอัตโนมัติ

- 8) ควรใช้ระบบชดเชยการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเพื่อป้องกันภาพไหวในขณะที่ถ่ายภาพวัตถุเคลื่อนที่เร็ว โดยเฉพาะในกรณีของกล้องถ่ายภาพจากอวกาศ

## 2.7 ยานสำรวจ

โดยทั่วไปยานสำรวจ ได้แก่ ดาวเทียม(Satellite) และยานอวกาศ(Aircraft) นอกจากนี้ยังอาจหมายถึง เครื่องบินที่บังคับวิทยุ บัลลูนที่ใช้ในการสำรวจในระดับความสูงไม่มาก รวมทั้งรถที่ติดบันไดสูง(Ladder truck) หรือรถกระเช้าเก็บผลไม้(Cherry picker) ที่ใช้ในการสำรวจในระดับพื้นดิน ตารางที่ 2.5 แสดงประเภทต่างๆของยานสำรวจ ระดับความสูง และวัตถุประสงค์ที่ต้องการสำรวจ

ตารางที่ 2.5 ประเภทของยานสำรวจและวัตถุประสงค์

ยานสำรวจ	ระดับความสูง	การสังเกตการณ์	หมายเหตุ
ดาวเทียมค้างฟ้า	36,000 กม.	จุดสังเกตการณ์คงที่	GMS
ดาวเทียมวงโคจรกลม (สำรวจโลก)	500 – 1,000 กม.	สังเกตการณ์แบบประจำ	LANDSAT, SPOT, MOS-1, ฯลฯ
กระสวยอวกาศ	240 – 350 กม.	สังเกตการณ์แบบไม่ประจำการ ทดลองในอวกาศ	
เครื่องตรวจอากาศด้วยวิทยุ	100 ม. – 100 กม.	การศึกษาค้นคว้าด้านต่างๆ	
เครื่องบินไอพ่นระดับสูง	10 – 12 กม.	การสำรวจ การศึกษาในพื้นที่กว้างๆ	
เครื่องบินความสูงระดับต่ำ ถึงระดับกลาง	500 – 8,000 ม.	การศึกษาค้นคว้าด้านต่างๆ การสำรวจอวกาศ	
เครื่องลอยบนอากาศ	500 – 3,000 ม.	การสำรวจ การศึกษาค้นคว้าต่างๆ	
เฮลิคอปเตอร์	100 – 2,000 ม.	การศึกษาค้นคว้าด้านต่างๆ การสำรวจทางอากาศ	
เครื่องบินบังคับวิทยุ	ต่ำกว่า 500 ม.	การศึกษาค้นคว้าด้านต่างๆ การสำรวจทางอากาศ	เครื่องบิน เฮลิคอปเตอร์
เครื่องบินลอยนึ่ง	50 – 500 ม.	การศึกษาค้นคว้าด้านต่างๆ การสำรวจทางอากาศ	เครื่องร่อนลอยนึ่ง ร่มชูชีพลอยนึ่ง
บัลลูนลอยนึ่ง	800 ม.	การศึกษาค้นคว้าด้านต่างๆ	
สายเคเบิล	10 – 40 ม.	การสำรวจด้านโบราณคดี	
รถกระเช้า	5 – 50 ม.	การสำรวจพิสัยใกล้	
รถตรวจวัดภาคพื้นดิน	0 – 30 ม.	ข้อมูลภาคพื้นดิน	รถกระเช้าเก็บผลไม้

ยานสำรวจที่ใช้ปฏิบัติงานในระดับสูงสุด คือ ดาวเทียมสัมพันธ์กับโลก(Geosynchronous satellite) เช่น ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา GMS ของญี่ปุ่นที่มีชื่อเต็มว่า Geostationary Meteorological Satellite ที่อยู่ที่ระดับความสูง 36,000 กิโลเมตร เหนือเส้นศูนย์สูตร สำหรับดาวเทียมสำรวจพิภพอาติ LANDSAT, SPOT และ MOS 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 10,000 เมตร เครื่องบินที่มีระดับเพดานบินปานกลางหรือต่ำ คือ ประมาณ 500 - 8,000 เมตร และเครื่องบินที่บังคับวิทยุซึ่งบินอยู่ในระดับความสูงต่ำกว่า 500 เมตร เป็นต้น

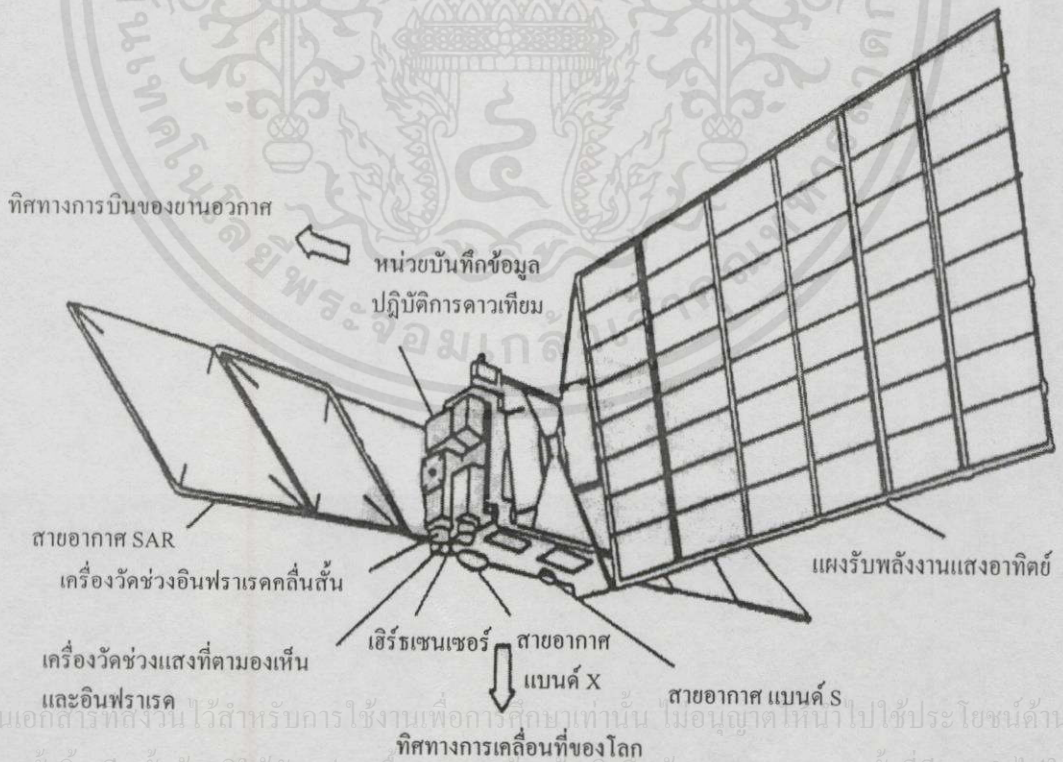
ปัจจัยหลักที่ต้องพิจารณาในการเลือกชนิดของยานสำรวจ คือ ระดับความสูงที่เหมาะสมที่เครื่องมือจะสามารถจำแนกรายละเอียดภาคพื้นดินได้ ในกรณีที่สนามมุมมอง ณ ขณะนั้นคงที่ และยังคงคำนึงถึงความมุ่งหมายของการปฏิบัติงาน ซึ่งในบางครั้งได้มีการกำหนดไว้เช่น การสำรวจทางอากาศต้องการระดับความสูงคงที่ ในขณะที่การสำรวจการกระจายของบรรยากาศในแนวตั้งจำเป็นต้องสำรวจในระดับความสูงที่แตกต่างกันหลายระดับ เป็นต้น ในการทำแผนที่โดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศ ต้องมีการควบคุมแนวการบินอย่างเข้มงวด เพื่อให้มีความแม่นยำเชิงเรขาคณิตที่เป็นไปตามข้อกำหนด อย่างไรก็ตาม ได้มีการใช้เฮลิคอปเตอร์หรือเครื่องบินที่บังคับวิทยุ บินในแนวบินอิสระเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ในการติดตามสังเกตการณ์สภาพความเสียหายจากภัยธรรมชาติ เป็นต้น

ดาวเทียมที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดจากระยะไกลเพื่อสำรวจพื้นโลก เรียกว่า ดาวเทียมสำรวจจากระยะไกลหรือดาวเทียมสำรวจโลก สำหรับดาวเทียมอุตุนิยมวิทยานั้น บางครั้งถูกจัดแยกประเภทต่างหากจากดาวเทียมสำรวจจากระยะไกลอื่นๆ ดาวเทียมสำรวจระยะไกล มีคุณลักษณะพิเศษจำเพาะที่แตกต่างกันตามลักษณะวงโคจร ระดับความสูงและลักษณะอุปกรณ์วัด วัดดูประสงค์หลักของดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาวงโคจรค้างฟ้า GMS ซึ่งโคจรในระดับความสูง 36,000 กิโลเมตร คือเพื่อการสำรวจทางด้านอุตุนิยมวิทยา ในขณะที่ดาวเทียม LANDSAT ซึ่งมีวงโคจรผ่านขั้วโลก ที่ระดับความสูงประมาณ 700 กิโลเมตร มีวัตถุประสงค์เพื่อการสำรวจพื้นดิน ในอนาคตดาวเทียมสำรวจจากระยะไกลจะมีสัมภาระบรรทุกของดาวเทียมขนาดใหญ่ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดหลายประเภทเพื่อใช้งานในลักษณะเอนกประสงค์ ดังเช่นในโครงการขยายสำรวจโคจรขั้วโลก(Polar Orbit Platform - POP) ภายใต้อาณัติของสหรัฐอเมริกา กลุ่มประชาคมยุโรป ญี่ปุ่น และแคนาดา นอกจากนี้แล้วยังมีโครงการเฉพาะเรื่อง ซึ่งใช้ดาวเทียมขนาดเล็ก เพิ่มจำนวนมากขึ้นในอนาคตอีกด้วย

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม 3 ดวง ประกอบไปด้วย JERS-1 ADEOS และ MOS-1 ซึ่งมีค่าความละเอียดข้อมูลภาพแตกต่างกันตามลำดับดังนี้ 18 เมตร x 24 เมตร 16 เมตร x 16 เมตร และ 50 เมตร x 50 เมตร ฉะนั้นจึงขอแนะนำเสนอข้อมูลรายละเอียดดังต่อไปนี้

### ดาวเทียม JERS-1

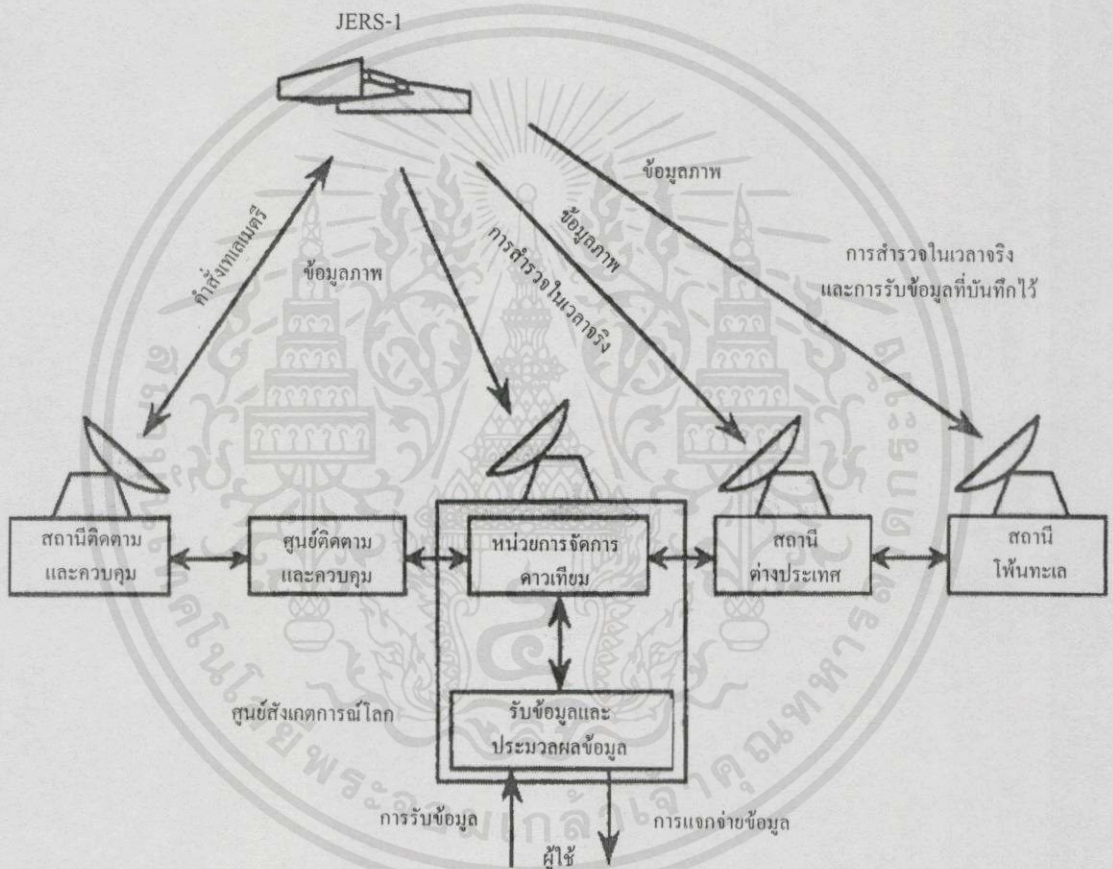
ดาวเทียม JERS-1 เป็นดาวเทียมที่พัฒนาโดยประเทศญี่ปุ่น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการสำรวจแหล่งแร่และพลังงาน ตลอดจนทรัพยากรและสภาพแวดล้อม ด้วยการโคจรในลักษณะสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ที่ระดับความสูง 568 กิโลเมตร โดยอุปกรณ์สำรวจมีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบ คือ ระบบ SAR ซึ่งถ่ายภาพที่ความถี่ 1,275 เมกะเฮิร์ตซ์ ด้วยรายละเอียด 18 เมตร และแนวถ่ายภาพกว้าง 75 กิโลเมตร และระบบ OPS(Optical Sensor) ซึ่งถ่ายภาพในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นถึงอินฟราเรดใกล้ 3 ช่วงคลื่น และช่วงคลื่นอินฟราเรดความยาวคลื่นสั้น อีก 4 ช่วงคลื่น นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการถ่ายภาพในลักษณะ 3 มิติ อีก 1 ช่วงคลื่น ภาพเหล่านี้มี แนวถ่ายภาพกว้าง 75 กิโลเมตร และรายละเอียดภาพประมาณ 18 เมตร x 24 เมตร รูปที่ 2.13 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 2.13 ดาวเทียม JERS-1 ของญี่ปุ่น

ระบบดาวเทียมสำรวจจากระยะไกล ประกอบด้วย 3 ระบบ หลักที่สำคัญ ดังนี้

- ก. ระบบติดตามและควบคุม : การวางแผนโคจรดาวเทียม ควบคุมวงโคจร ดำเนินกรรมวิธีโปรแกรมแม่บ้าน ฯลฯ
- ข. ระบบควบคุมการปฏิบัติงาน : วางแผนการปฏิบัติของดาวเทียม ประเมินผลข้อมูลจากการสำรวจฐานข้อมูล ฯลฯ
- ค. ระบบรับข้อมูล : การรับสัญญาณ การบันทึกสัญญาณ กรรมวิธีข้อมูล การเก็บและแจกจ่ายข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ

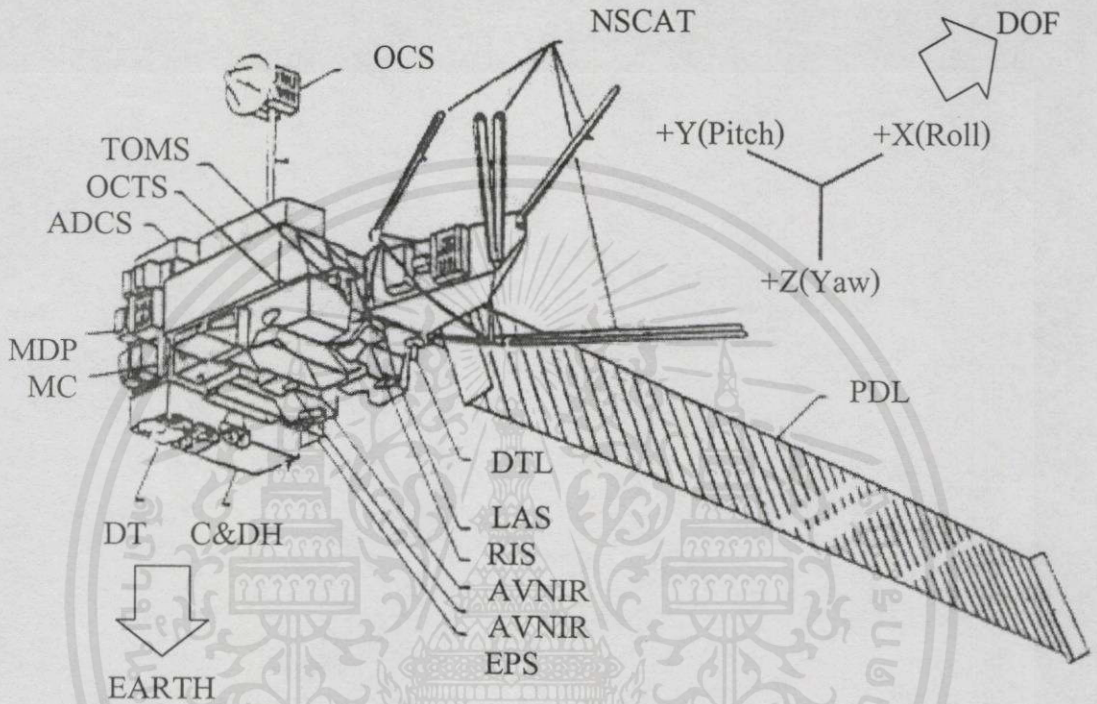


รูปที่ 2.14 องค์ประกอบหลักของระบบดาวเทียม JERS-1

### ดาวเทียม ADEOS

ดาวเทียม ADEOS เป็นดาวเทียมอีกดวงหนึ่งของประเทศญี่ปุ่น มีวงโคจรอยู่ที่ระดับความสูง 800 กิโลเมตร ในลักษณะสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ด้วยมุมเอียง  $98.6^{\circ}$  มีรอบการโคจร 41 วัน โดยรอบการโคจรย่อย 3 วัน ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 2 ชนิด คือ OCTS (Ocean Colour and Temperature Scanner) ถ่ายภาพ 12 ช่วงคลื่น จากช่วงคลื่นตามองเห็นจนถึงคลื่นความร้อน คือ 0.43 ถึง 12.5 ไมโครเมตร รายละเอียดภาพ 700 เมตร จากแนวถ่ายภาพ 1,500 กิโลเมตร และ AVNIR (Advanced

Visible and Near IR Radiometer) ถ่ายภาพ 4 ช่วงคลื่น จาก 0.40 ถึง 0.92 ไมโครเมตร ในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นถึงอินฟราเรดใกล้ให้ภาพที่มีรายละเอียด 16 เมตร สำหรับแนวถ่ายภาพ 80 กิโลเมตร จากอุปกรณ์ทั้ง 2 ระบบ ดังกล่าว ทำให้ประโยชน์ของดาวเทียมดวงนี้เป็นไปในลักษณะผสมผสาน ทั้งการสำรวจทรัพยากรทางทะเล และทรัพยากรแผ่นดินในขณะเดียวกัน



รูปที่ 2.15 รูปร่างและส่วนประกอบต่างๆ ของดาวเทียม ADEOS

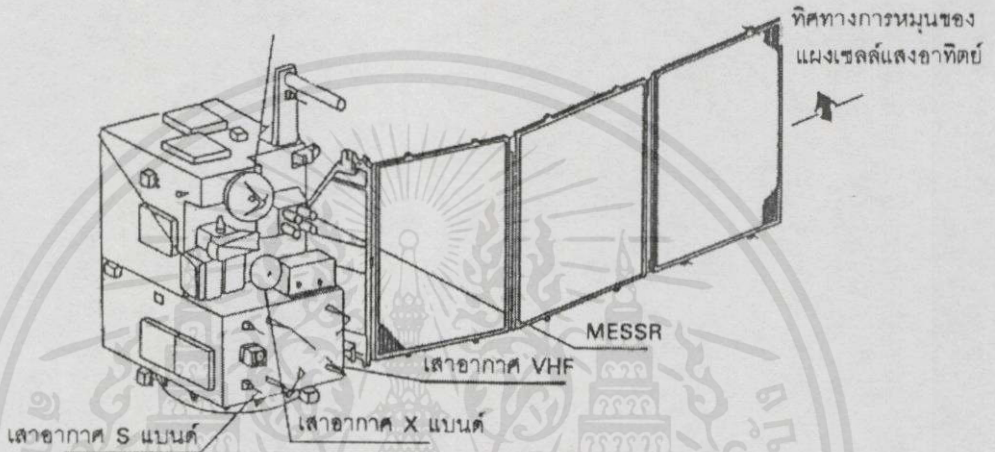
ตารางที่ 2.6 คุณลักษณะหลักของดาวเทียม ADEOS

รูปร่าง	แบบ โมดูล(Module) ที่มีแผงรับแสงอาทิตย์แบบขยาย(1 แผง) ขนาดประมาณ 4x4x5 ม. (ตัวดาวเทียม, อุปกรณ์ต่างๆ) แผงรับแสงอาทิตย์ 3x13 ม.
น้ำหนัก	ประมาณ 3.2 ตัน(ขณะส่งขึ้น)
การควบคุมการทรงตัว	3 แกนที่มั่นคง(โมเมนตัมมีค่าเป็นศูนย์)
ตัวยานในการส่ง	H-II(5 ม. ตรง)
วงโคจร	ชนิด โคจรสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ โคจรสูง ประมาณ 800กม. มุมเอียง ประมาณ 98.6 องศา ระยะเวลา 1 รอบ ประมาณ 101 นาที
การส่งข้อมูล	กลับมายังที่เดิม 41 วัน เวลาท้องถิ่นใน โหนดขาลง 10:15 – 10:45 น. การสื่อสาร โดยตรงและระหว่างวงโคจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ...  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัด...  
การสื่อสาร โดยตรงและระหว่างวงโคจร

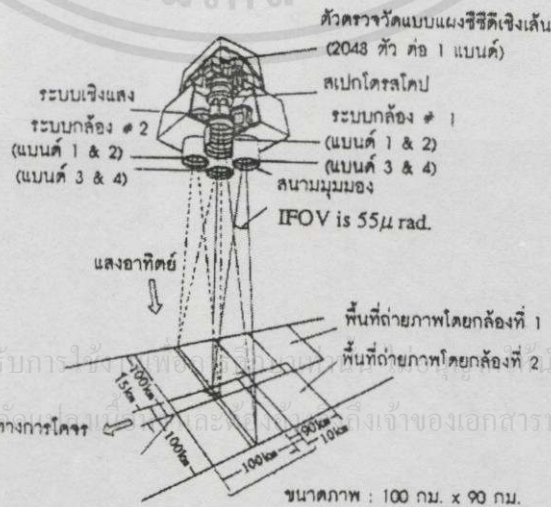
ดาวเทียม MOS-1

ดาวเทียม MOS-1(Marine Observation Satellite - 1) เป็นดาวเทียมของประเทศญี่ปุ่น ที่ทำ การศึกษาด้านสมุทรศาสตร์ โดยมีตัวตรวจวัดภาพเชิงแสง 2 แบบ คือ MESSR(Multispectrum Electronic Self Scanning Radiometer) และ VTIR(Visible and Thermal Infrared Radiometer) ใน การสำรวจข้อมูลภาพพื้นดิน อีกทั้ง MSR(Microwave Scanning Radiometer) เพื่อการศึกษากลุ่ม หมอก หิมะ และ น้ำแข็ง



รูปที่ 2.16 รายละเอียดของดาวเทียม MOS-1

รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะอุปกรณ์วัดระบบ MESSR ของดาวเทียม MOS-1 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ วัดแบบแผงเชิงเส้น(Linear array sensor) เป็นเครื่องกวาดภาพที่ไม่ใช้กระจกกวาดเชิงกล แต่ใช้แผง เชิงเส้นของสารกึ่งตัวนำแบบของแข็ง โดยในระบบ MESSR ในดาวเทียม MOS-1 จะมีอุปกรณ์ ตรวจวัดรวม 2,048 ตัว ทุกๆ 14 มม.



รูปที่ 2.17 ลักษณะโครงสร้างของระบบ MESSR ของดาวเทียม MOS-1

### บทที่ 3

## ความเพี้ยนของข้อมูลภาพและการปรับแก้

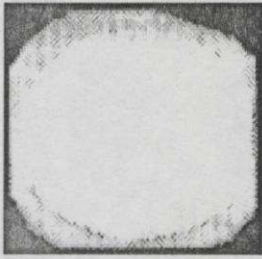
### Distortion and Correction

#### 3.1 บทนำ

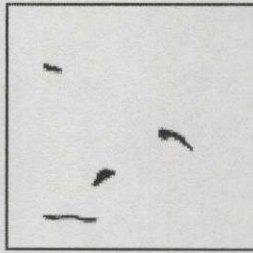
ในบทนี้จะเป็นการพิจารณาถึงธรรมชาติของความเพี้ยนเชิงคลิ่น และความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตของข้อมูลภาพจากการสำรวจระยะไกลโดยอุปกรณ์บันทึกภาพบนดาวเทียม ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงการเก็บรวบรวมข้อมูลภาพด้วยอุปกรณ์ตรวจจับบนดาวเทียม โดยจะอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดความเพี้ยนของทั้ง 2 กรณี รวมทั้งกระบวนการปรับแก้ค่าความเพี้ยนที่เกิดขึ้นกับข้อมูลภาพทั้งความเพี้ยนเชิงคลิ่นและเชิงเรขาคณิต เมื่อใดก็ตามที่มีการบันทึกข้อมูลผ่านอุปกรณ์ตรวจจับภาพที่อยู่บนดาวเทียมหรือเครื่องบินสำรวจระยะไกล ในขณะที่เดียวกันอุปกรณ์ตรวจวัดนั้นจะเก็บค่าความผิดพลาดต่างๆ เป็นเหตุให้เกิดความเพี้ยนเชิงคลิ่น อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศ(Atmosphere) และสัญญาณรบกวนต่างๆ ที่เกิดขึ้นขณะนั้นรวมถึงความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตสามารถที่เกิดขึ้นได้หลายทาง ทั้งที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของดาวเทียม เครื่องกวาดหรือสแกนเนอร์(Scanner) และส่วนโค้งของโลก วิธีการปรับแก้ค่าความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตในที่นี้ เพื่อการปรับแก้ค่าความละเอียดของข้อมูลภาพที่มีค่าความละเอียดแตกต่างกันจากดาวเทียมทั้ง 3 ดวง จนมีค่าความละเอียดของภาพเท่ากัน เพื่อประโยชน์ในการต่อภาพต่อไป

#### 3.2 ความเพี้ยนเชิงคลิ่น(Radiometric distortion)[9,12]

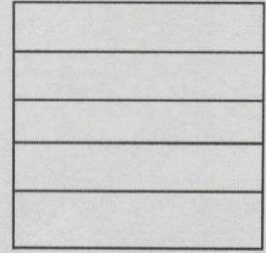
ความเพี้ยนเชิงคลิ่นเป็นความผิดพลาดที่เกี่ยวข้องกับคลิ่นความถี่ที่ถูกส่งออกจากอุปกรณ์เครื่องส่งบนดาวเทียมหรือยานสำรวจไปยังวัตถุต่างๆ ที่ต้องการบนพื้นผิวโลก และคลิ่นความถี่ดังกล่าวก็จะสะท้อนกลับมายังเครื่องวัดบนยานสำรวจในลักษณะที่มีความผิดพลาดไปจากที่ควรจะเป็นตามความจริง ซึ่งลักษณะของความเพี้ยนเชิงคลิ่นเป็นสาเหตุให้เกิดความผิดพลาดต่างๆ ในข้อมูลภาพดังตัวอย่าง เช่น ความเข้มของการกระจายคลิ่นที่ไม่เหมาะสม การกรองความถี่เชิงพื้นที่ของข้อมูลภาพ รอยดำหนิบนภาพ แบนด์ของข้อมูลภาพ และอื่นๆ ความผิดพลาดดังกล่าวเนื่องมาจาก สาเหตุการเปลี่ยนแปลงเกณฑ์ของเครื่องวัด ชั้นบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงและตัวกรองความถี่ของอุปกรณ์ตรวจวัด ความเข้มของช่องของอุปกรณ์ตรวจวัด ความผิดพลาดที่เกณฑ์ของอุปกรณ์ตรวจวัดในเครื่องวัด ตัวอย่างของไม่ว่าการ ความเพี้ยนเชิงคลิ่นส่วนหนึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.1



เงาของภาพ



รอยดำหนีบนภาพ



แบนด์ของภาพ

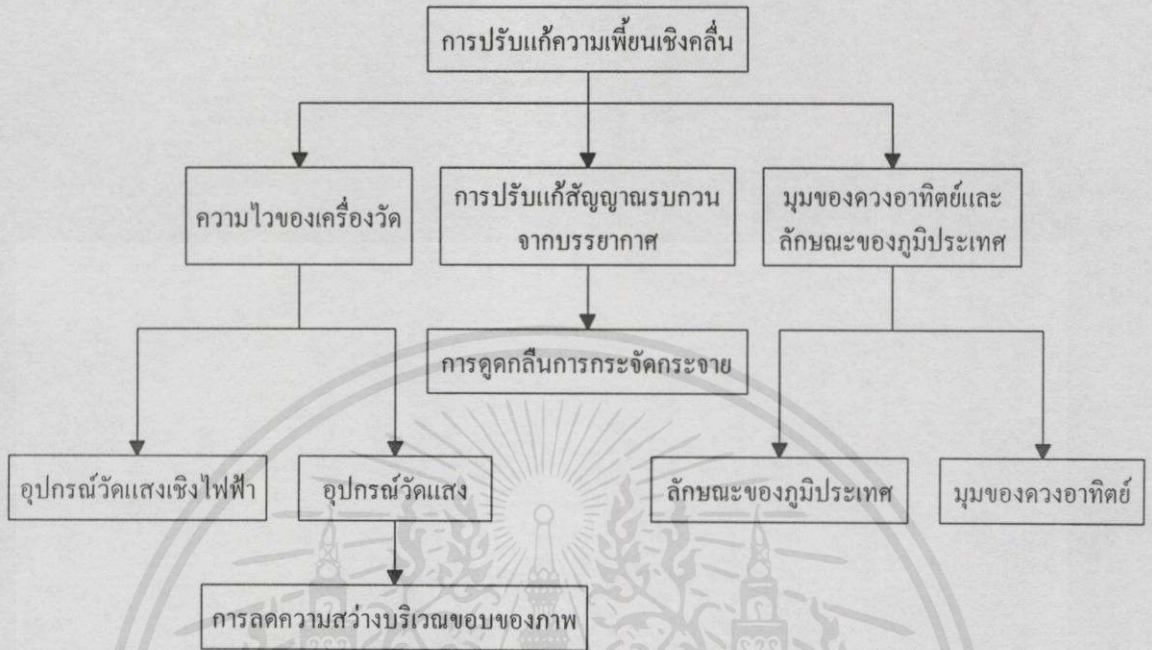
รูปที่ 3.1 ลักษณะตัวอย่างภาพที่เกิดจากความเพี้ยนเชิงคลื่น

### 3.3 การปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่น

ในขณะที่ภาพถ่ายดาวเทียมทุกภาพอาจจะมีทั้งความเพี้ยนเชิงคลื่นและความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต สิ่งใดสิ่งหนึ่งหรืออาจจะมีทั้งสองสิ่งหรืออาจจะไม่ปรากฏอยู่ก็ได้ ซึ่งค่าความผิดพลาดเหล่านี้ต้องได้รับการปรับแก้เพื่อที่จะสามารถแสดงผลได้ถูกต้อง ในเมื่อการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่น (Radiometric correction) นั้น เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดหรือความเพี้ยนเชิงคลื่นที่จะทำให้ข้อมูลภาพที่แสดงไม่สมบูรณ์ เช่น เกิดรอยดำหนีบนภาพที่ไม่พึงประสงค์แสดงอยู่บนภาพ ในขณะที่การปรับแก้เชิงเรขาคณิตนั้นเป็นการจัดค่าความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่ทำให้ข้อมูลภาพที่แสดงผิดรูปร่างไปจากที่ควรเป็น จากพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาหรือสะท้อนกลับของวัตถุ จะถูกวัดโดยเครื่องวัดที่ติดตั้งไว้บนเครื่องบินสำรวจหรือยานสำรวจ พลังงานที่วัดได้นั้นจะไม่เหมือนกับพลังงานที่เปล่งหรือสะท้อนกลับจากวัตถุเดียวกันเมื่อเทียบกับการวัดจากระยะใกล้ เนื่องจากมุมทิศ (Azimuth) และมุมยก (Elevation) ของดวงอาทิตย์ สภาพบรรยากาศ เช่น หมอก หรือละอองลอย การตอบสนองของเครื่องวัด ฯลฯ ซึ่งมีอิทธิพลกับพลังงานที่วัดได้ ดังนั้น เพื่อที่จะได้ค่าพลังงานรังสีตกกระทบ หรือค่าการสะท้อนที่แท้จริงจึงจำเป็นต้องปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่นเหล่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่นแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ดังรูปที่ 3.2



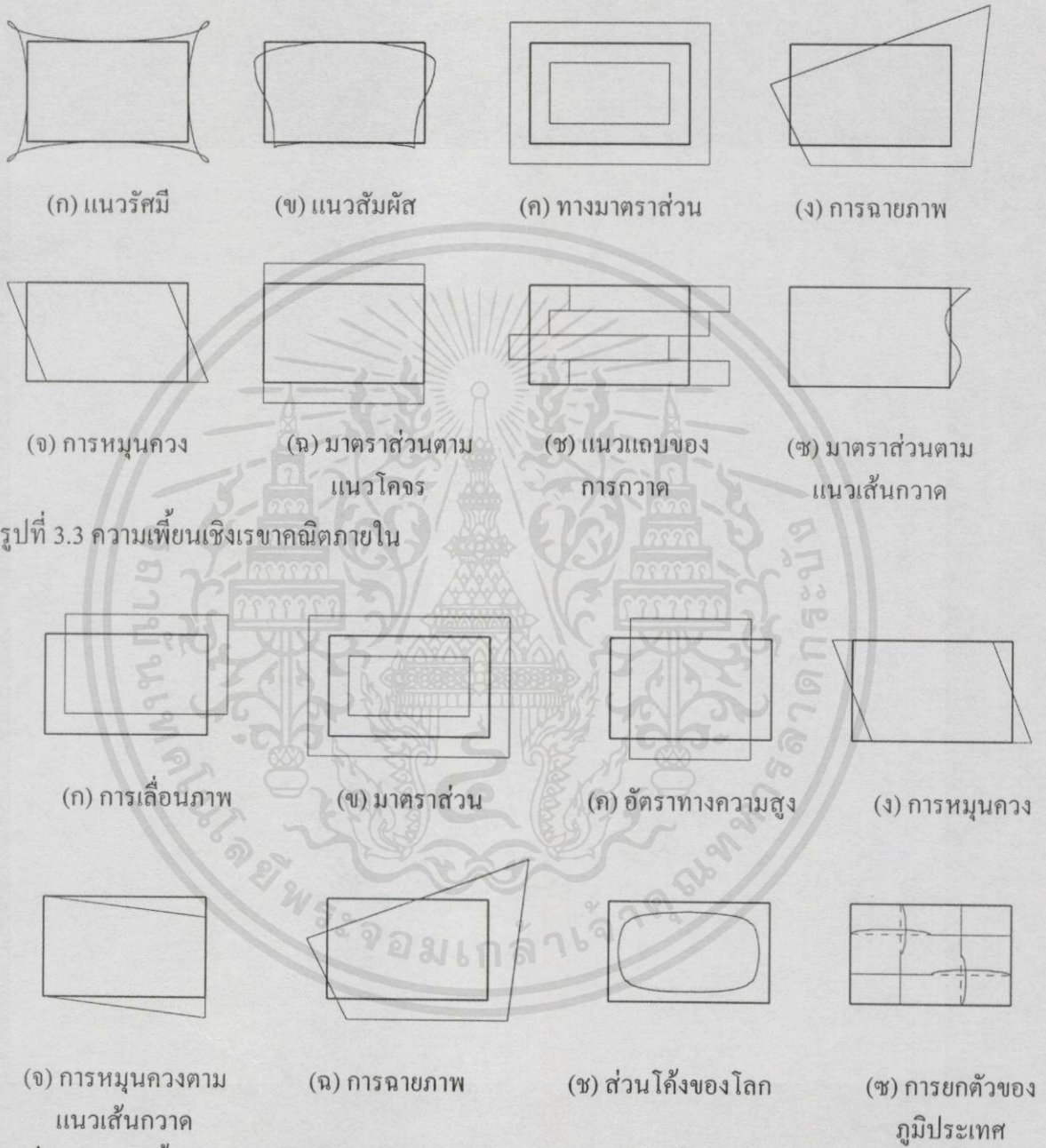
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนวิธีการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่น

จากขั้นตอนการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่นที่ได้แสดงในรูปที่ 3.2 เป็นการยากที่จะแสดงให้เห็นได้ในการทดลองนี้ เนื่องจากการปรับแก้ความเพี้ยนดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นที่การปรับแก้ที่อุปกรณ์ตรวจจับ อุปกรณ์บันทึกภาพและอื่นๆ ขณะที่การทดลองนี้ไม่สามารถที่จะทำได้ ฉะนั้น จึงได้นำเสนอการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่สามารถแสดงให้เห็นได้ง่ายและสะดวกกว่าการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงคลื่น

### 3.4 ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต(Geometric distortion)[9,12]

ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต หรือความเพี้ยนทางตำแหน่ง คือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลภาพระหว่างพิกัดภาพที่เป็นจริงและพิกัดภาพที่ได้ ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตทำให้เกิดความบิดเบี้ยวหรือความเพี้ยนทางรูปร่าง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการหมุนรอบตัวเองของโลกขณะที่ดาวเทียมกำลังถ่ายภาพ รวมทั้งความไม่สม่ำเสมอในการทรงตัวของดาวเทียมเองในลักษณะของการโคจร การส่ายตัว ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของระดับความสูงและความเร็วในการโคจร ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตได้ถูกแบ่งออกเป็น ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่เกิดขึ้นภายใน(Internal image distortion) ซึ่งเป็นผลจากการทรงตัวของเครื่องวัดหรือรูปร่างของวัตถุ ดังในรูปที่ 3.3 ในขณะที่รูปแบบของความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่เกิดขึ้น

ภายนอก(External image distortion) แสดงในรูปที่ 3.4 และสาเหตุของความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตทั้ง 2 ประเภท แสดงใน ตารางที่ที่ 3.1



รูปที่ 3.4 ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สาเหตุของความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตและชนิดของความเพี้ยน

สาเหตุของความเพี้ยน	เครื่องวัด			
	ชนิดของการฉายจากศูนย์กลาง			พิสัยเพียง 4)
	เครื่องวัด	เครื่องวัด	เครื่องวัด	
	แบบกรอบ 1)	แบบกรอบ 2)	แบบกรอบ 3)	
ความเพี้ยนภายใน				
ความเพี้ยนรัศมีของเลนส์	ก	ก	ก	-
ความเพี้ยนในแนวสัมผัสเลนส์	ข	ข	ข	-
ความผิดพลาดของความยาวโฟกัส	ค	ค	ค	-
การเอียงของระนาบรับภาพ	ง	ง	ง	-
ความไม่เรียบของระนาบรับภาพ	ไม่เป็นเชิง เส้น	ไม่เป็นเชิง เส้น	ไม่เป็นเชิง เส้น	-
ความผิดพลาดทางการจัดแนวของแผงรับภาพ	-	จ	ช	-
ความเปลี่ยนแปลงของอัตราการซูมตัวอย่าง	-	ฉ	ซ	ฉ, ซ
ความผิดพลาดของเวลาในการซูมตัวอย่าง	-	-	ซ	-
การเปลี่ยนแปลงของความเร็วของกระจกกวาด	-	-	ซ	-
ความเพี้ยนภายนอก				
ความผิดพลาดเชิงระนาบของยาน	ก	ก	ก	ก
ความผิดพลาดทางระดับความสูงของยาน	ข	ข	ข	ข
การเคลื่อนที่ของตำแหน่งวงโคจร	-	ค, ง	ค, ง, จ	ค, ง, จ
ระดับความสูงของยาน	ฉ	ฉ	ฉ	ฉ
การเปลี่ยนแปลงของการทรงตัว	-	ฉ	ฉ	ฉ
การหมุนของโลก	-	ง	ง	ง
ความโค้งของโลก	ซ	ซ	ซ	ซ
ความสูงของพื้นผิว	ซ	ซ	ซ	ซ
การหักเหของชั้นบรรยากาศ	ไม่เป็นเชิง เส้น	ไม่เป็นเชิง เส้น	ไม่เป็นเชิง เส้น	ไม่เป็นเชิง เส้น

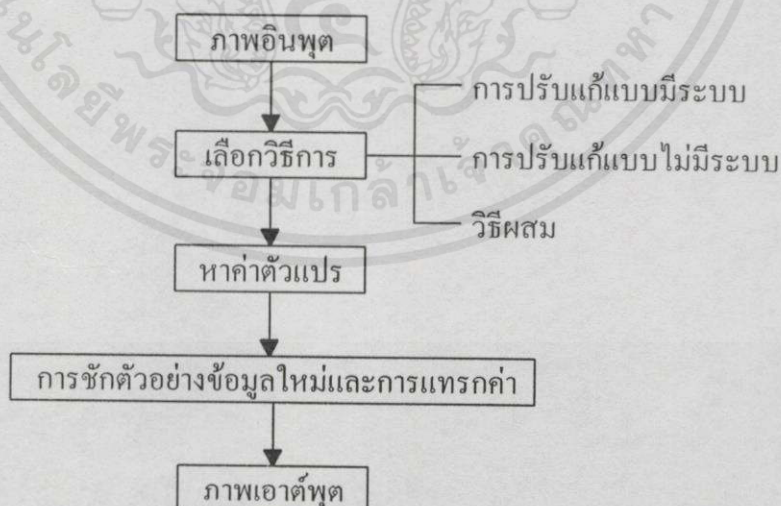
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต[1]

ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลเป็นข้อมูลที่ได้โดยการตรวจจับของเครื่องวัดจากกระบวนการ สุ่มตัวอย่างและการแบ่งช่วงของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็นช่วงๆ ตั้งแต่ช่วงอัลตราไวโอเลตจนถึง ช่วงคลื่นวิทยุ เนื่องจากการที่อุปกรณ์ตรวจจับเหล่านี้ติดตั้งในตำแหน่งที่แตกต่างกันเล็กน้อย และทาง เคนแสงของความยาวคลื่นที่แตกต่างกันนั้นจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้น ภาพของข้อมูลหลาย ช่วงคลื่นจะมีตำแหน่งเชิงเรขาคณิตที่ไม่ตรงกัน การปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตเป็นการปรับแก้ ความคลาดเคลื่อนทางด้านรูปทรงและขนาด หรือมาตราส่วนของภาพ อันเนื่องมาจากการหมุนของโลก ความไม่สม่ำเสมอในการทรงตัวของดาวเทียม ตลอดจนความไม่สม่ำเสมอของระบบกวาดภาพ

ขั้นตอนสำหรับการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี ดังนี้

- 1) การเลือกวิธีการ : ควรพิจารณาคูณลักษณะของความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตร่วมกับข้อมูลภาพ อ้างอิงที่มีอยู่ จากนั้นจึงเลือกวิธีการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่เหมาะสม
- 2) การหาค่าตัวแปร : แสดงตัวแปรที่ไม่ทราบค่าซึ่งเป็นตัวกำหนดสมการคณิตศาสตร์ระหว่าง ระบบพิกัดภาพต้นฉบับและระบบพิกัดต้องการปรับนั้น สามารถหาค่าได้จากข้อมูลปรับ เทียบ และ/หรือ จุดควบคุมบนพื้นดิน(Ground control point)
- 3) การซัดตัวอย่างข้อมูลใหม่(Resampling)และการแทรกค่า(Interpolation) : ข้อมูลภาพใน ระบบพิกัดภูมิศาสตร์จะถูกผลิตขึ้นจากเทคนิคการซัดตัวอย่างข้อมูลใหม่และการแทรกค่า



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของกรมการแผนที่ทหารบก. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี ในการเลือกวิธีการใดเพื่อนำมาใช้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและปัจจัยหลายประการ

การปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตแบ่งออกได้ 3 วิธี ดังนี้

การปรับแก้แบบมีระบบ(Systematic correction)

ในกรณีที่ข้อมูลอ้างอิงเชิงเรขาคณิต หรือเรขาคณิตของเครื่องวัดได้กำหนด หรือทำการวัดไว้แล้ว ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตสามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้อย่างมีระบบหรือตามทฤษฎี เช่น เรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพชนิดเลนส์จะถูกกำหนดโดย สมการร่วมเชิงเส้น ด้วยความยาวโฟกัสที่ปรับเทียบแล้ว ค่าตัวแปรต่างๆ ของความเพี้ยนของเลนส์ พิกัดของจุดดัชนี ฯลฯ การปรับแก้เชิงสัมผัสผิว(Tangent correction) เป็นแบบหนึ่งของการปรับแก้แบบมีระบบ สำหรับเครื่องกวาดภาพแบบกลเชิงแสง โดยทั่วไปแล้วการปรับแก้แบบมีระบบจะเพียงพอสำหรับการขจัดความผิดพลาดได้ทั้งหมด

การปรับแก้แบบไม่มีระบบ(Non-systematic correction)

สมการโพลีโนเมียล สำหรับการแปลงจากระบบพิกัดภูมิศาสตร์ไปเป็นระบบพิกัดภาพ หรือในทางกลับกันนั้น จะหาได้จากค่าพิกัดของจุดควบคุมบนพื้นดินที่รู้ค่า โดยใช้วิธีการกำลังสองค่าน้อย (Least square method) ความแม่นยำนั้นขึ้นอยู่กับลำดับ(Order) ของสมการโพลีโนเมียล จำนวน และการกระจายของจุดควบคุมบนพื้นดิน

การปรับแก้แบบผสม(Combined correction)

เริ่มต้นโดยการประยุกต์ใช้การปรับแก้แบบมีระบบ และต่อจากนั้นใช้สมการโพลีโนเมียลที่มีลำดับยกกำลังต่ำๆ เพื่อลดความผิดพลาดที่คงเหลืออยู่ โดยปกติแล้วจุดมุ่งหมายของการปรับแก้เชิงเรขาคณิตนั้น เพื่อที่จะยอมให้มีความผิดพลาดแฝงอยู่ไม่เกินบวกหรือลบหนึ่งจุดภาพของตำแหน่งจริงของจุดๆ นั้น

### 3.6 การซ้อนภาพ(Image registration)[9,10]

เทคนิคการซ้อนภาพ เป็นเทคนิคที่นำมาใช้เพื่อการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ในขณะที่เดียวกันนั้นการซ้อนภาพยังมีส่วนทำให้ค่าความละเอียดของข้อมูลภาพเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นได้เช่นกัน

ดังนั้น ในการทดลองนี้จึงได้นำคุณสมบัติดังกล่าวมาใช้เพื่อการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตและค่าความละเอียดของข้อมูลภาพให้ได้ตามที่ต้องการ ในหลักการของการซ้อนภาพมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอยู่ด้วยกัน 2 ประการ ดังนี้ ประการที่หนึ่ง การซ้อนภาพจะต้องอาศัยข้อมูลภาพตั้งแต่สองภาพหรือมากกว่า

ขึ้นไป โดยที่ ข้อมูลภาพทั้งสองนั้นจะต้องมีลักษณะภูมิประเทศที่ครอบคลุมพื้นที่เดียวกันหรือคล้ายกัน  
 ประการที่สอง การกำหนดพิกัดควบคุมบนพื้นดินของข้อมูลภาพทั้งสามให้สัมพันธ์กันโดยการอาศัย  
 ลักษณะของ บริเวณที่เป็นมุมตึก จุดตัดของถนน จุดแยกแม่น้ำ สะพาน หรือลักษณะเด่นอื่นๆ ที่สามารถ  
 มองเห็นได้อย่างชัดเจน จากการกำหนดลักษณะดังกล่าวเรียกว่า จุดควบคุมบนพื้นดิน(Ground control  
 points; GCP) ซึ่งหลักการของการซ้อนภาพจะได้อาศัยสมการ โพลีโนเมียลซึ่งมีความสัมพันธ์ดังแสดง  
 ในสมการที่ (3.1)

$$g(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_Nx^{N-1} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ (3.1) จะต้องแก้สมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_N$  จากพิกัด  
 $x, x^2, \dots, x^{N-1}$  ที่ทราบค่า

สามารถหาค่าเบี่ยงเบนจากพิกัดของภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการปรับ ได้ดังนี้

$$r_i = y_i - g(x), \quad i = 1, 2, 3, \dots, L \quad (3.2)$$

กำหนดให้  $L$  เป็นจำนวนของข้อมูลภาพ

หาผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนจากพิกัดของภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการปรับ คือ

$$R = \sum_{i=1}^L (r_i)^2 \quad (3.3)$$

หาค่า Partial derivatives ของ  $R$  ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียล และกำหนดให้มีค่าเป็น  
 ศูนย์

$$\frac{\partial R}{\partial a_k} = 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N \quad (3.4)$$

เอกสารนี้ยังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเทียบเคียงในสมการที่ (3.5) ก่อนญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{n=0}^N \left[ \sum_{i=1}^L x_i^{n+k} \right] a_n = \sum_{i=1}^L x_i^k y_i \quad ; k = 0, 1, 2, \dots, N \quad (3.5)$$

จากสมการเทียบเคียงสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_N$  ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} L & \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^N \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \dots & \sum x_i^{N+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^N & \sum x_i^{N+1} & \sum x_i^{N+2} & \dots & \sum x_i^{2N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \vdots \\ \sum x_i^N y_i \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.1) สามารถแสดงสมการใช้งานจริง โดยจะเป็นการพิจารณาที่ข้อมูลภาพสองมิติดังสมการโพลิโนเมียลที่แสดงข้างล่าง ซึ่งเรียกว่า วิธีกำลังสองค่าน้อย (Least square method)

$$u = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 x^2 + a_5 y^2 \quad (3.7a)$$

$$v = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy + b_4 x^2 + b_5 y^2 \quad (3.7b)$$

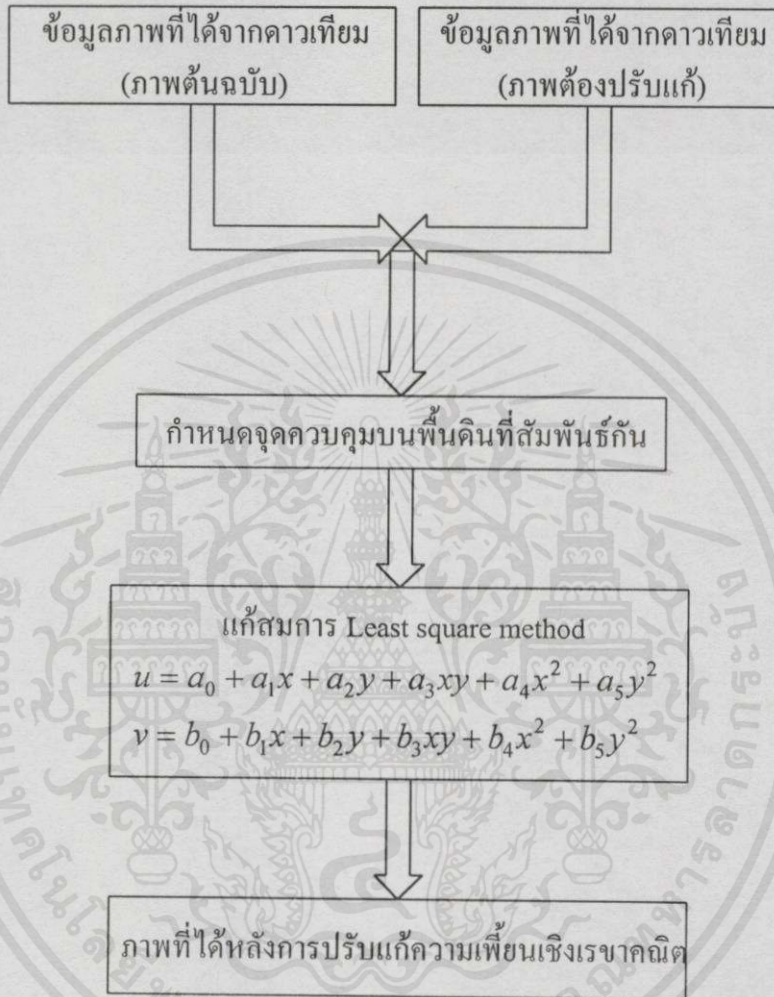
การทดลองในครั้งนี้จะใช้สมการ โพลิโนเมียลกำลังสองสำหรับเพื่อการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ดังแสดงในสมการที่ (3.7a, 3.7b) หาค่าสัมประสิทธิ์  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  และ  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  ที่เหมาะสมเพื่อที่จะได้ปรับพิกัดภาพที่ต้องการให้มีพิกัดอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกับข้อมูลภาพต้นฉบับ

กำหนดให้

$u, v$	เป็นพิกัดจุดควบคุมบนพื้นดิน (GCP) ที่ได้จากภาพต้นฉบับ
$x, y$	เป็นพิกัดจุดควบคุมบนพื้นดินในภาพที่บริเวณเดียวกันบนภาพต้นฉบับ
$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$	เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้องการหาเพื่อประโยชน์การปรับแก้
$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$	
	ความเพี้ยนของพิกัด

ในรูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการปรับแก้ความเพี้ยนที่ใช้งานจริงในการทดลองนี้ จนกระทั่งได้ข้อมูลภาพที่ได้รับการปรับแก้แล้วจากข้อมูลภาพที่ได้จากดาวเทียม เมื่อได้รับข้อมูลภาพที่เป็นภาพสีมา

ให้แยกภาพสีเป็นภาพระดับสีเทาเป็น 3 แบนด์ จนกระทั่งทำการประมวลผลเสร็จเรียบร้อยนำภาพทั้ง 3 แบนด์ มารวมกันให้เป็นภาพสีตามเดิมก็จะได้ภาพที่ผ่านกระบวนการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการปรับแก้ความเพี้ยนที่ใช้งานจริง

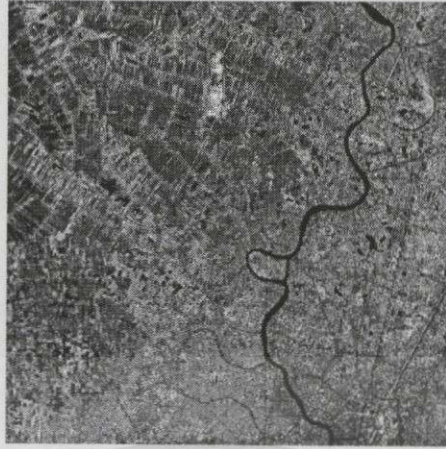
ในการทดลองนี้ได้นำข้อมูลภาพจากดาวเทียมที่มีค่าความละเอียดแตกต่างกันถึง 3 ดวง ดังนี้

ข้อมูลภาพจากดาวเทียม ADEOS มีค่าความละเอียด 16 เมตร x 16 เมตร

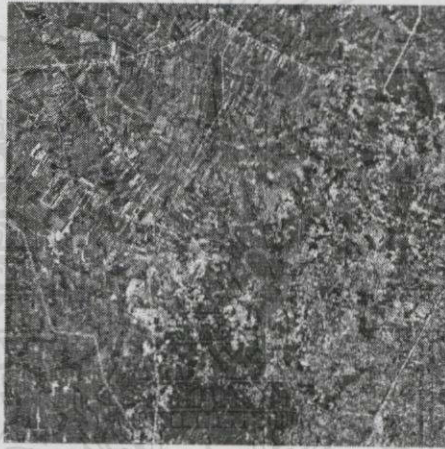
ข้อมูลภาพจากดาวเทียม JERS - 1 มีค่าความละเอียด 18 เมตร x 24 เมตร

ข้อมูลภาพจากดาวเทียม MOS - 1 มีค่าความละเอียด 50 เมตร x 50 เมตร

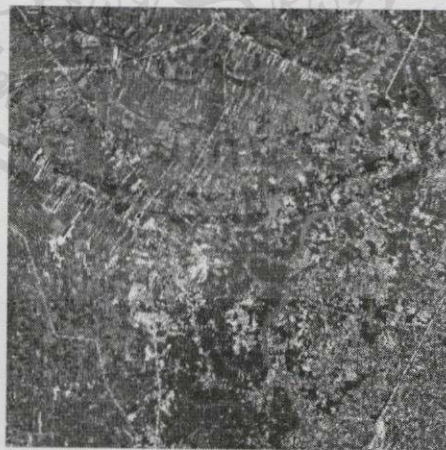
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบนด์ที่ 1



แบนด์ที่ 2

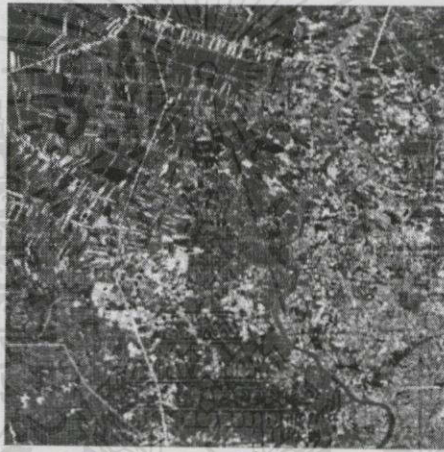


แบนด์ที่ 3

รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายระดับสีเทาจากดาวเทียม ADEOS (ภาพต้นฉบับ)  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอ้างอิงแบบเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบนด์ที่ 1

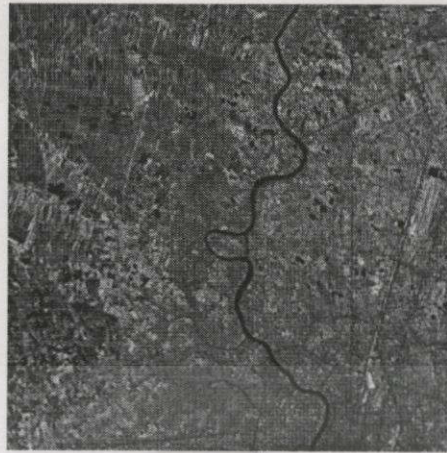


แบนด์ที่ 2

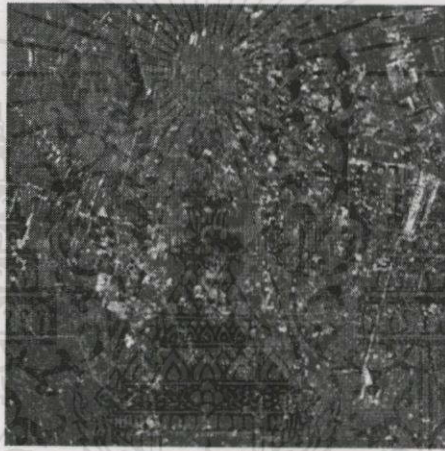


แบนด์ที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายระดับสปีเทาจากดาวเทียม JERS-1  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบนด์ที่ 1



แบนด์ที่ 2



แบนด์ที่ 3

รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายระดับสีเทาจากราวเทียม MOS-1

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ADEOS (ภาพต้นฉบับ) แบนด์ 2



JERS - 1 แบนด์ 2



MOS - 1 แบนด์ 2

รูปที่ 3.10 ภาพตัวอย่างการกำหนดพิกัดควบคุมบนพื้นดินของภาพถ่ายดาวเทียมทั้ง 3 ประเภท

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ไม่ขอสงวนสิทธิ์ในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างการกำหนดพิกัดควบคุมบนพื้นดินของภาพถ่ายดาวเทียม ADEOS JERS - 1 และ MOS - 1 โดยจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของการกำหนดพิกัดควบคุมบนพื้นดิน (Ground control points) จะต้องมีความสัมพันธ์กับข้อมูลภาพทั้งสามภาพที่ได้แสดงไว้

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างพิกัดจุดควบคุมบนพื้นดินจากดาวเทียมทั้ง 3 ประเภท

อันดับที่	พิกัดของ ADEOS		พิกัดของ JERS-1		พิกัดของ MOS-1	
	X	Y	X	Y	X	Y
1	406	80	372	54	275	378
2	435	97	419	66	358	46
3	412	195	413	166	337	152
4	478	178	495	146	395	126
5	464	253	493	214	394	199
6	326	296	330	177	275	264
7	374	489	440	460	360	444
8	248	62	172	57	150	48
9	245	127	185	118	163	105
10	56	381	7	384	38	387
11	102	388	663	66	80	387
12	184	195	136	240	128	230

ภายหลังจากการกำหนดพิกัดของภาพต้นฉบับและภาพต้องการปรับเรียบร้อย ให้นำพิกัดที่ได้แทนค่าตัวแปร  $x$  และ  $y$  ในสมการที่ (3.7a) และ (3.7b) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  และ  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  เขียนให้อยู่ในสมการเชิงเส้นได้เป็น

$$g_u(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$$

และสามารถหาค่าการเบี่ยงเบนจากสมการที่ (3.2) โดยการแทนค่าของสมการที่ (3.7a) และ (3.7b) ในสมการที่ (3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_i = f(x_i, y_i) - g(x_i, y_i) \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, L$$

$$r_i = f(x_i, y_i) - (a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2)$$

สามารถหาค่าการเบี่ยงเบนกำลังสองจากสมการที่ (3.3) ได้เป็น

$$R = \sum_{i=0}^L (r_i)^2 = \sum_{i=0}^L \left\{ f_{u_i}(x_i, y_i) - (a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2) \right\}^2$$

$$R = \sum_{i=0}^L \left\{ f_{v_i}(x_i, y_i) - (a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2) \right\}^2$$

ภายหลังจากได้จัดรูปแบบให้อยู่ในรูปของสมการสำหรับหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกำลังสอง ต่อไปเป็นการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  และ  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  โดยวิธีการทำ Partial Differential Equation  $\frac{\partial R}{\partial a_i}$  แล้วให้มีค่าเท่ากับศูนย์ "0" เมื่อ  $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  จะได้ตั้งสมการที่ (3.4)

$$\sum_{i=0}^L \left\{ f(x_i, y_i) - (a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2) \right\} = 0$$

$$\sum_{i=0}^L \left\{ f(x_i, y_i) - (a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2) \right\} x_i = 0$$

$$\sum_{i=0}^L \left\{ f(x_i, y_i) - (a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2) \right\} y_i = 0$$

$$\sum_{i=0}^L \left\{ f(x_i, y_i) - (a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2) \right\} x_i y_i = 0$$

$$\sum_{i=0}^L \left\{ f(x_i, y_i) - (a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2) \right\} x_i^2 = 0$$

$$\sum_{i=0}^L \left\{ f(x_i, y_i) - (a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4x_i^2 + a_5y_i^2) \right\} y_i^2 = 0$$

จากผลที่ได้ให้จัดรูปสมการเทียบเคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{i=0}^L a_0 + \sum_{i=0}^L a_1 x_i + \sum_{i=0}^L a_2 y_i + \sum_{i=0}^L a_3 x_i y_i + \sum_{i=0}^L a_4 x_i^2 + \sum_{i=0}^L a_5 y_i^2 = \sum_{i=0}^L f(x_i, y_i)$$

$$\sum_{i=0}^L a_0 x_i + \sum_{i=0}^L a_1 x_i^2 + \sum_{i=0}^L a_2 x_i y_i + \sum_{i=0}^L a_3 x_i^2 y_i + \sum_{i=0}^L a_4 x_i^3 + \sum_{i=0}^L a_5 x_i y_i^2 = \sum_{i=0}^L f(x_i, y_i) x_i$$

$$\sum_{i=0}^L a_0 y_i + \sum_{i=0}^L a_1 x_i^2 y_i + \sum_{i=0}^L a_2 y_i^2 + \sum_{i=0}^L a_3 x_i y_i^2 + \sum_{i=0}^L a_4 x_i^2 y_i + \sum_{i=0}^L a_5 y_i^3 = \sum_{i=0}^L f(x_i, y_i) y_i$$

$$\sum_{i=0}^L a_0 x_i y_i + \sum_{i=0}^L a_1 x_i^2 y_i + \sum_{i=0}^L a_2 x_i y_i^2 + \sum_{i=0}^L a_3 x_i^2 y_i^2 + \sum_{i=0}^L a_4 x_i^3 y_i + \sum_{i=0}^L a_5 x_i y_i^3 = \sum_{i=0}^L f(x_i, y_i) x_i y_i$$

$$\sum_{i=0}^L a_0 x_i^2 + \sum_{i=0}^L a_1 x_i^3 + \sum_{i=0}^L a_2 x_i^2 y_i + \sum_{i=0}^L a_3 x_i^3 y_i + \sum_{i=0}^L a_4 x_i^4 + \sum_{i=0}^L a_5 x_i^2 y_i^2 = \sum_{i=0}^L f(x_i, y_i) x_i^2$$

$$\sum_{i=0}^L a_0 y_i^2 + \sum_{i=0}^L a_1 x_i y_i^2 + \sum_{i=0}^L a_2 y_i^3 + \sum_{i=0}^L a_3 x_i y_i^3 + \sum_{i=0}^L a_4 x_i^2 y_i^2 + \sum_{i=0}^L a_5 y_i^4 = \sum_{i=0}^L f(x_i, y_i) y_i^2$$

จากสมการข้างต้นเราสามารถจัดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ เพื่อง่ายต่อการแก้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} L & \sum_{i=0}^L x_i & \sum_{i=0}^L y_i & \sum_{i=0}^L x_i y_i & \sum_{i=0}^L x_i^2 & \sum_{i=0}^L y_i^2 \\ \sum_{i=0}^L x_i & \sum_{i=0}^L x_i^2 & \sum_{i=0}^L x_i y_i & \sum_{i=0}^L x_i^2 y_i & \sum_{i=0}^L x_i^3 & \sum_{i=0}^L x_i y_i^2 \\ \sum_{i=0}^L y_i & \sum_{i=0}^L x_i y_i & \sum_{i=0}^L y_i^2 & \sum_{i=0}^L x_i y_i^2 & \sum_{i=0}^L x_i^2 y_i & \sum_{i=0}^L y_i^3 \\ \sum_{i=0}^L x_i y_i & \sum_{i=0}^L x_i^2 y_i & \sum_{i=0}^L x_i y_i^2 & \sum_{i=0}^L x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=0}^L x_i^3 y_i & \sum_{i=0}^L x_i y_i^3 \\ \sum_{i=0}^L x_i^2 & \sum_{i=0}^L x_i^3 & \sum_{i=0}^L x_i^2 y_i & \sum_{i=0}^L x_i^3 y_i & \sum_{i=0}^L x_i^4 & \sum_{i=0}^L x_i^2 y_i^2 \\ \sum_{i=0}^L y_i^2 & \sum_{i=0}^L x_i y_i^2 & \sum_{i=0}^L y_i^3 & \sum_{i=0}^L x_i y_i^3 & \sum_{i=0}^L x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=0}^L y_i^4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^L u_i \\ \sum_{i=0}^L u_i x_i \\ \sum_{i=0}^L u_i y_i \\ \sum_{i=0}^L u_i x_i y_i \\ \sum_{i=0}^L u_i x_i^2 \\ \sum_{i=0}^L u_i y_i^2 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่าจะโดยทางใดก็ตามหากมีข้อสงสัยประการใด กรุณาติดต่อขอทราบและติดต่ออ้างอิงถึงเจ้าหน้าที่เอกสารทุกครั้งที่มี  
เอกสารฉบับนี้

$$\text{โดยที่ } \sum_{i=0}^L u_i = \sum_{i=0}^L f(x_i, y_i)$$

จากสมการเมตริกซ์ที่ได้สามารถที่จะแก้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  ได้ และจากวิธีดังกล่าวยังสามารถที่จะใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ของ  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  ได้เช่นกัน เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์เรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนต่อไป ให้แทนค่า  $x$  และ  $y$  ในสมการที่ (3.7a) และ (3.7b) ด้วยพิกัดของภาพที่ต้องปรับทุกๆ พิกัดภาพ ก็จะได้ข้อมูลภาพที่ได้รับการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต ซึ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับข้อมูลภาพต้นฉบับ ดังภาพที่ได้แสดงในรูปที่ 3.12 แสดงภาพของดาวเทียม JERS - 1 ภายหลังจากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต และรูปที่ 3.13 แสดงภาพของดาวเทียม MOS-1 ภายหลังจากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต

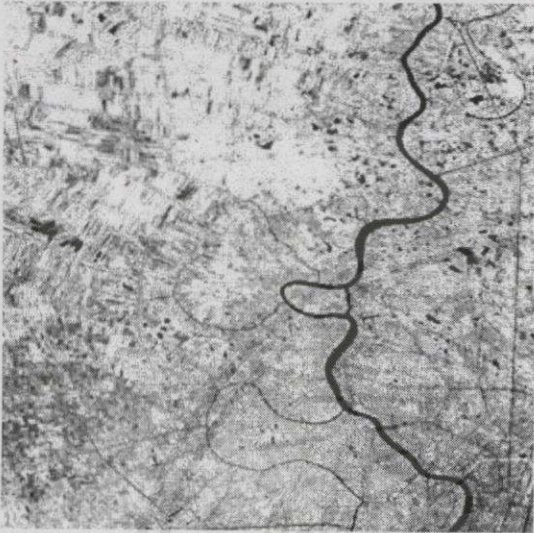
ตารางที่ที่ 3.3 ตัวอย่างพิกัดข้อมูลภาพภายหลังจากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตของดาวเทียมทั้ง 3 ประเภท

อันดับที่	พิกัดของ ADEOS		พิกัดของ JERS-1		พิกัดของ MOS-1	
	x	Y	x	y	x	Y
1	406	80	406	80	406	80
2	435	97	435	97	435	97
3	412	195	412	195	412	195
4	478	178	478	178	478	178
5	464	253	464	253	464	253
6	326	296	326	296	326	296
7	374	489	374	489	374	489
8	248	62	248	62	248	62
9	245	127	245	127	245	127
10	56	381	56	381	56	381
11	405	299	405	299	405	299
12	184	242	184	242	184	242

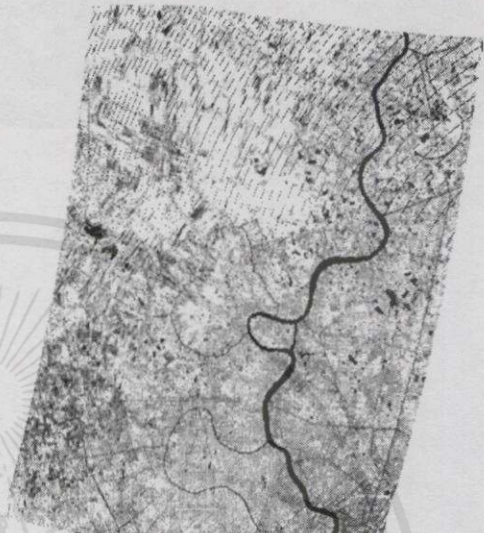
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 ผลการทดลอง

ในรูปที่ 3.11 และ 3.12 ซึ่งลักษณะของข้อมูลภาพที่ได้สังเกตจากลักษณะของแม่น้ำจะเอียงไปจากข้อมูลภาพเดิม ทำให้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับข้อมูลภาพต้นฉบับ



ก่อนการปรับแก้

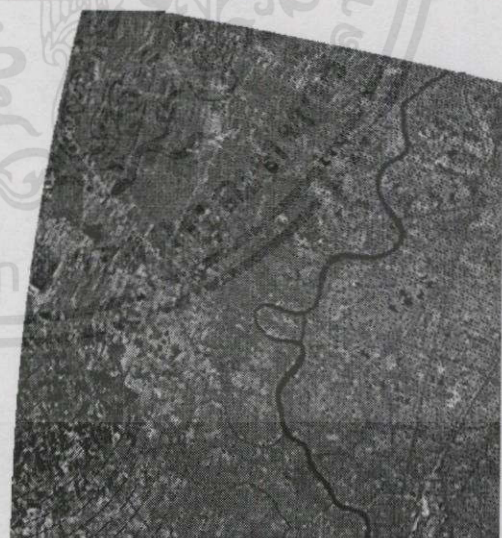


หลังการปรับแก้

รูปที่ 3.11 ภาพผลลัพธ์ก่อนและหลังการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตจากดาวเทียม JERS-1 ในแบนด์ที่ 1



ก่อนการปรับแก้



หลังการปรับแก้

รูปที่ 3.12 ภาพผลลัพธ์ก่อนและหลังการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตจากดาวเทียม MOS-1 ในแบนด์ที่ 1

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การชักตัวอย่างข้อมูลใหม่และการแทรกค่าข้อมูล

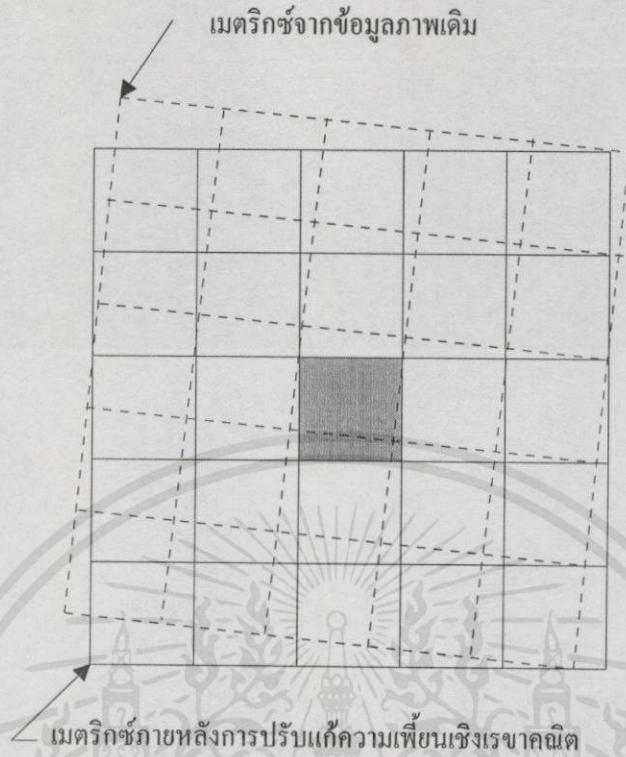
## Resampling and Interpolation

### 4.1 บทนำ

ภายหลังจากที่ได้มีการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตในข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมด้วย สมการ โพลีโนเมียล อันดับที่ 2 ดังแสดงในบทที่ 3 ที่จะต้องมีการกำหนดพิกัดควบคุมบนพื้นดิน (Ground control points) ของภาพหลักและภาพที่ต้องปรับแก้ให้สอดคล้องหรือสัมพันธ์กันในแต่ละตำแหน่งของ ข้อมูลภาพ ซึ่งผลที่ได้ทำให้จุดภาพจำนวนมากมีพิกัดของข้อมูลอยู่ในตำแหน่งเป็น ทศนิยม ไม่สามารถ ที่จะแสดงผลออกทางจอภาพได้ และในพิกัดที่เป็นจำนวนเต็มบางตำแหน่งกลับไม่มีข้อมูลอยู่เลยและ ด้วยเหตุดังกล่าวจึงต้องนำข้อมูลภาพที่ได้มาทำการชักตัวอย่างข้อมูลภาพใหม่ (Resampling) เพื่อที่จะได้ ปรับพิกัดของข้อมูลภาพให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม กล่าวคือ ได้พิกัดภาพที่เป็นจำนวนเต็ม จนกระทั่ง สามารถแสดงผลทางจอภาพได้ แต่การจัดข้อมูลภาพดังกล่าวจะต้องอาศัยวิธีการแทรกค่า (Interpolation) ของข้อมูล ในตำแหน่งที่ไม่มีข้อมูลภาพปรากฏอยู่ เพื่อให้ได้ภาพที่สมบูรณ์มากขึ้น ถือได้ว่าเป็นสิ่งที่ จำเป็นวิธีการหนึ่งภายหลังจากการปรับแก้ความเพี้ยนของข้อมูลภาพในเชิงเรขาคณิตที่ใช้กันโดยทั่วไป

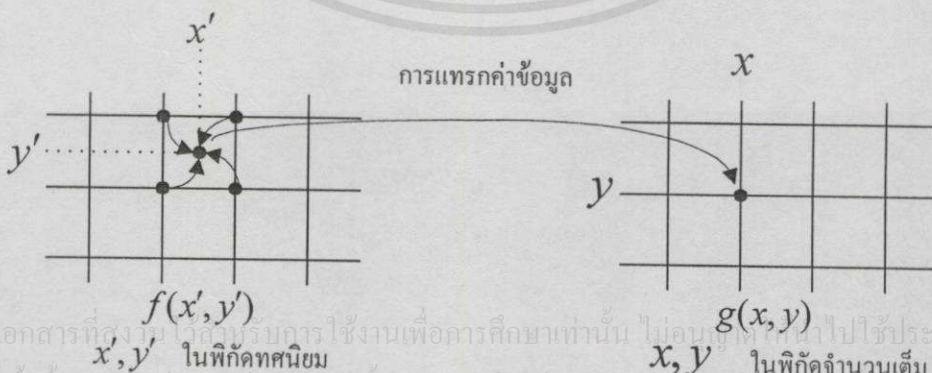
### 4.2 การชักตัวอย่างข้อมูลใหม่ (Resampling) [1]

เพื่อให้ได้ข้อมูลภาพที่สามารถแสดงผลทางจอภาพและเพิ่มเติมข้อมูลภาพบางส่วนที่ขาดหายไป ภายหลังจากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตของข้อมูลภาพเพื่อให้ได้ลักษณะข้อมูลภาพเหมือนกับ ภาพต้นฉบับมากที่สุด ซึ่งในการชักตัวอย่างข้อมูลภาพสามารถที่จะกระทำได้หลายวิธีด้วยกัน ตัวอย่าง เช่น การชักตัวอย่างข้อมูลภาพโดยพิจารณาจากพิกัดภาพที่ใกล้เคียง (Nearest neighbour) และการแทรก ค่าข้อมูล (Interpolation) ให้กับข้อมูลภาพที่มีค่าแน่นอนสองค่า ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 แสดงการชัก ตัวอย่างข้อมูล (Resampling) ภาพ สังกะสีจากเมตริกซ์เส้นทึบซึ่งเกิดจากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิง เรขาคณิตสมการ โพลีโนเมียล อันดับที่ 2 ที่ได้วางซ้อนทับอยู่บนเมตริกซ์เส้นประซึ่งเป็นเมตริกซ์เดิม ก่อนที่จะมีการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต จะสังเกตเห็นว่าตำแหน่งของพิกัดภาพที่แสดงในภาพทั้งสองนั้น ไม่ได้ทับกันพอดีแต่จะเป็นลักษณะเหลื่อมกัน และพิกัดภาพในส่วนที่ได้เรแกนนั้นจะซ้อนทับอยู่ บนพิกัดภาพเดิมที่เป็นเส้นประทั้ง 4 จุดภาพ เป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ในกรณีที่จะต้องการนำภาพ ดังกล่าวไปพิจารณาต่อในอนาคต หรือเพื่อการแสดงผลออกทางจอภาพ



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบเมตริกซ์ทั้งก่อนและภายหลังจากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต

เพื่อที่จะสามารถเข้าใจถึงประโยชน์ของการแทรกค่าได้กล่าวไว้ในข้างต้น จึงได้แสดงรูปเปรียบเทียบลักษณะตำแหน่งข้อมูลภาพที่ได้จากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งพิกัดของข้อมูลภาพที่เปลี่ยนไปและอยู่ระหว่างพิกัดจำนวนเต็มทั้ง 4 พิกัด ดังในรูปที่ 4.2(ก) จากนั้น จึงได้แก้ไขพิกัดในรูปที่ 4.2(ก) เพื่อให้ได้พิกัดและข้อมูลภาพใหม่ที่มีพิกัดเป็นจำนวนเต็มโดยการพิจารณาพิกัด โดยรอบทั้ง 4 มาคำนวณหาพิกัดและข้อมูลภาพที่สอดคล้องกับข้อมูลภาพอ้างอิง ดังรูปที่ 4.2(ข)



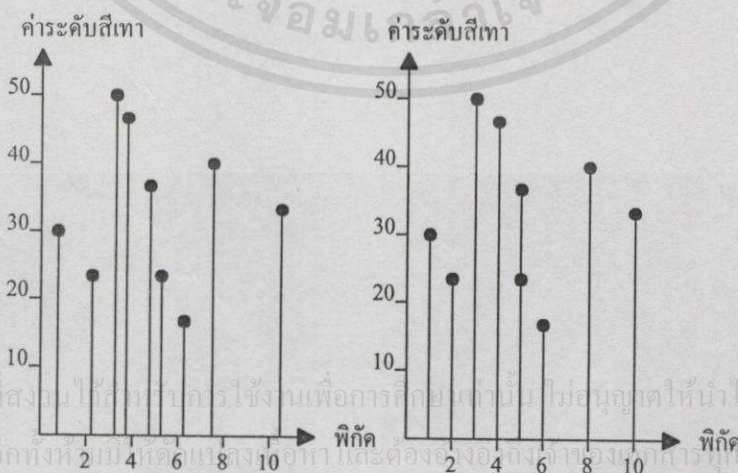
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากล่าวถึงลิขสิทธิ์อื่นที่ปรากฏในเอกสารนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 รูปที่ 4.2 ลักษณะการแทรกค่าภายหลังจากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต

แต่เนื่องจากการแทรกค่าที่มีใช้ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในลักษณะการนำไปใช้งาน ดังในบทนี้จะได้นำเสนอการแทรกค่าโดยวิธีการ โพลีโนเมียลการแทรกค่าของนิวตัน(Newton's Interpolation Polynomials) ประกอบไปด้วยการแทรกแบบเชิงเส้น(Linear interpolation) แบบควอดราติก(Quadratic interpolation) และแบบคิวบิก(Cubic interpolation) รวมถึงการแทรกค่าแบบคิวบิกสไปน์(Cubic spline interpolation) ทั้งนี้เพื่อที่จะได้แสดงผลเปรียบเทียบการแทรกค่าในแต่ละวิธี

#### 4.3 การซักรูปตัวอย่างข้อมูลภาพจากพิกัดใกล้เคียง(Nearest neighbour)[1, 9]

การซักรูปตัวอย่างข้อมูลภาพจากพิกัดใกล้เคียงถือได้ว่าเป็นวิธีการซักรูปตัวอย่างข้อมูลแบบง่ายที่สุดในบรรดากการซักรูปตัวอย่างข้อมูลภาพที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากที่กระทำได้โดยง่าย กล่าวคือ ภายหลังจากที่ได้มีการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตในข้อมูลภาพเรียบร้อยแล้ว ผลของพิกัดใหม่ที่ได้จะอยู่ในรูปของทศนิยม ซึ่งไม่สามารถนำมาแสดงผลบนจอภาพได้ แต่การซักรูปตัวอย่างข้อมูลภาพนั้นจะเป็นการสุ่มเอาพิกัดของภาพที่อยู่ใกล้ที่สุดมาแทนพิกัดที่เป็นจำนวนทศนิยมหรือพิกัดที่ขาดหายไปเท่านี้ก็จะถือได้ว่าเป็นการซักรูปตัวอย่างข้อมูลภาพใหม่ได้ ทั้งยังสามารถนำมาแสดงผลบนจอภาพได้ จากรูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างค่าพิกัดที่ได้จากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่อยู่ในรูปของทศนิยม นำมาทำการปรับค่าในอยู่รูปจำนวนเต็ม

แต่ด้วยวิธีดังกล่าวมีข้อด้อยที่ควรพิจารณาคือ ระหว่างที่ทำการซักรูปตัวอย่างข้อมูลในพิกัดนั้นๆ อาจจะทำให้พิกัดที่ได้จะเป็นพิกัดเดียวกันแต่ข้อมูลภาพเป็นคนละข้อมูลกัน ซึ่งจะทำให้เกิดความสับสนว่าควรจะเลือกนำข้อมูลใดมาพิจารณา เพื่อแสดงผลออกทางจอภาพและทำให้ยังคงมีพิกัดภาพที่ไม่มีข้อมูลภาพแสดงในภาพ โดยพิกัดดังกล่าวเพียงแต่เปลี่ยนตำแหน่งไปเท่านั้น



รูปที่ 4.3 การซักรูปตัวอย่างข้อมูลภาพจากพิกัดที่ใกล้เคียง(Nearest neighbour)

#### 4.4 การแทรกค่า(Interpolation)[3, 7, 16]

บ่อยครั้งที่พบว่าในการคำนวณหรือประมวลผลทางคณิตศาสตร์จะต้องมีการประมาณค่าในช่วงกลางระหว่างข้อมูลที่มีค่าแน่นอนสองค่า เนื่องจากข้อมูลทั้งสองค่าที่มีอยู่นั้นไม่ใช่ข้อมูลที่ต้องการจะนำมาพิจารณา ซึ่งการคำนวณหาข้อมูลที่อยู่ระหว่างข้อมูลทั้งสองได้มีใช้ทั้งในด้านวิศวกรรม วิทยาศาสตร์ และอื่นๆ ตัวอย่างที่เห็นได้ง่ายที่สุดคือ การคำนวณหาค่ากลาง(Mean) ระหว่างข้อมูลทั้งสอง ดังตัวอย่างข้างล่าง

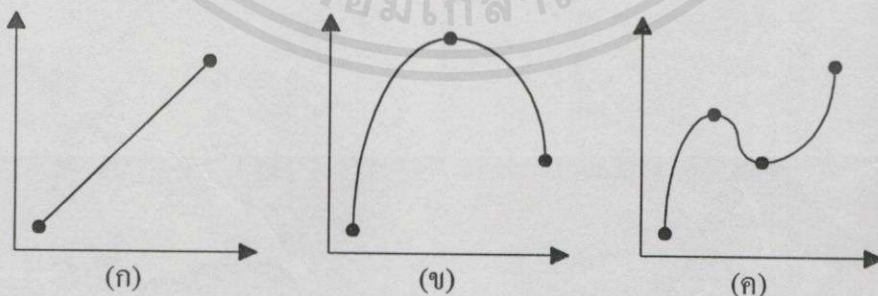
$$f(x) = \frac{5+10}{2} = 7.5$$

จากการตัวอย่างการคำนวณดังกล่าวจะเห็นว่าค่ากลางระหว่าง 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ก็คือ 7.5

ในการแทรกค่าที่จะได้แสดงต่อไปนี้คือ สมการโพลิโนเมียลการแทรกค่า(Interpolation Polynomials) ย้อนกลับไปดูรูปแบบของสูตรโดยทั่วไปซึ่งเป็นโพลิโนเมียล อันดับที่  $n$  ดังนี้

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (4.1)$$

สำหรับข้อมูลจุดจำนวน  $n+1$  จะมีเพียงสมการโพลิโนเมียลเดียว อันดับที่  $n$  เท่านั้น ที่จะสามารถผ่านพิกัดข้อมูลทุกๆ ข้อมูลได้ เช่น มีเส้นตรงเพียง 1 เส้นเท่านั้น(โพลิโนเมียลอันดับที่ 1)ที่จะลากผ่านระหว่างจุดสองจุด(รูปที่ 4.4ก) ในขณะเดียวกันมีเพียงเส้นพาราโบลาเดียวเท่านั้นที่จะลากผ่านระหว่างจุดสามจุด(รูปที่ 4.4ข) และถ้าต้องการเส้นพาราโบลาที่ต่อเนื่องกันของจุดทั้งสี่จุด(รูปที่ 4.4ค)



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการแทรกค่าแบบโพลิโนเมียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1. การต่อพิกัดสองพิกัดด้วยสมการอันดับที่ 1(เชิงเส้น)
2. การต่อพิกัดสามพิกัดด้วยสมการอันดับที่ 2 (ควอดราติกหรือพาราโบลา)
3. การต่อพิกัดสี่พิกัดด้วยสมการอันดับที่ 3 (คิวบิก)

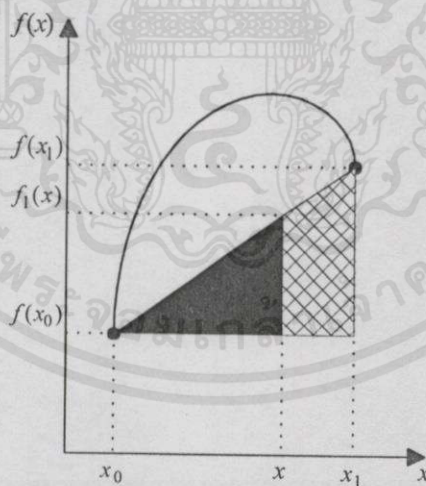
ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.4 การที่จะนำวิธีการแทรกค่าไปใช้กับลักษณะข้อมูลของแต่ละประเภทนั้นจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและความสามารถในการไปใช้งานให้มีประสิทธิภาพสูง เพื่อที่จะให้ได้ผลซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลเดิมที่มีอยู่แล้ว และเพื่อประโยชน์ของการประมวลผลในโอกาสต่อไป ซึ่งรายละเอียดของวิธีที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อที่จะแทรกเข้าไประหว่างค่าคงที่ในความสัมพันธ์เป็นแบบโพลิโนเมียล โดยวิธีโพลิโนเมียลการแทรกค่าของนิวตัน(Newton's interpolation polynomials)

#### 4.5 โพลิโนเมียลการแทรกค่าของนิวตัน (Newton's interpolation polynomials)

ปัจจุบันโพลิโนเมียลการแทรกค่ามีหลายวิธีแตกต่างกันตามแต่จะอ้างอิงทฤษฎีของใคร ในขณะที่โพลิโนเมียลการแทรกค่าของนิวตันเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมใช้กันมากและเป็นวิธีที่มีประโยชน์ ก่อนที่จะแสดงให้เห็นถึงสมการทั่วไปจะแสดงในส่วนของสมการโพลิโนเมียลอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 เพราะว่าเป็นวิธีการแทรกค่าในแบบง่ายๆ

##### 4.5.1 การแทรกค่าแบบเชิงเส้น (Linear interpolation)

เป็นสมการการแทรกค่าง่ายๆ ที่ใช้เพื่อการเชื่อมต่อระหว่างข้อมูลทั้งสองด้วยเส้นตรง ซึ่งเทคนิคนี้เป็นการแทรกค่าแบบเชิงเส้น(Linear interpolation) ที่นิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่ ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การแทรกค่าแบบเชิงเส้นพื้นที่แรเงาแสดงให้เห็นถึงที่มาของสมการ

โดยความสัมพันธ์ของรูปสามเหลี่ยมแสดงได้ดังสมการที่ (4.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม  $\frac{f_1(x) - f(x_0)}{x - x_0} = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$  เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (4.2)

จากสมการข้างบนสามารถจัดรูปใหม่ได้

$$f_1(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x_1 - x_0) \quad (4.3)$$

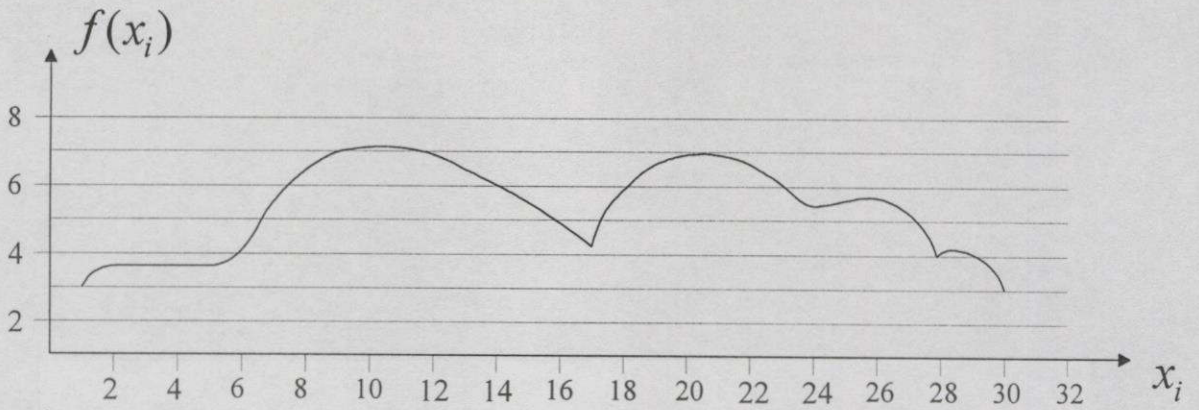
จากสมการการแทรกค่าแบบเชิงเส้นที่ (4.3) สังเกตเห็นว่า  $f_1(x)$  ในที่นี้เป็นสมการพหุนามเชิงเส้นการแทรกค่าอันดับที่ 1 สามารถจะแสดงรูปแบบสมการง่ายๆ คือ  $f_1(x) = a + bx$  นอกจากนี้จะได้แสดงความลาดเอียงของเส้นตรงที่ต่อระหว่างพิกัดแล้ว ในเทอมของ  $\frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$  คือการประมาณค่าของอนุพันธ์อันดับที่ 1 (Approximation of the first derivative) โดยทั่วไปจะใช้การแบ่งช่วงระยะสั้นๆ ระหว่างพิกัดข้อมูล

เพื่อจะแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของการแทรกค่าในแต่ละวิธีซึ่งจะให้ผลที่แตกต่างกัน จึงกำหนดกราฟต้นฉบับให้และใช้วิธีการแทรกค่าในแต่ละวิธีมาแสดงผลมาเปรียบเทียบกับกราฟต้นฉบับและกราฟของแต่ละวิธีดังรูปที่ 4.6 โดยอาศัยข้อมูลที่กำหนดไว้ในแต่ละตำแหน่งตามตารางที่ 4.1

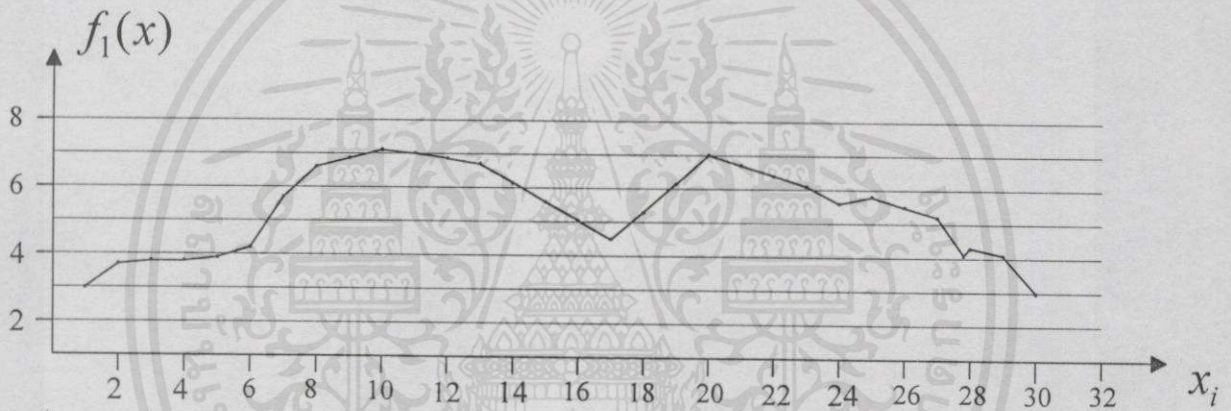
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลในแต่ละส่วนโค้งของกราฟต้นฉบับ

ส่วนโค้งที่ 1			ส่วนโค้งที่ 2			ส่วนโค้งที่ 3		
$i$	$x_i$	$f(x_i)$	$i$	$x_i$	$f(x_i)$	$i$	$x_i$	$f(x_i)$
0	1	3.0	0	17	4.5	0	27.7	4.1
1	2	3.7	1	20	7.0	1	28	4.3
2	5	3.9	2	23	6.1	2	29	4.1
3	6	4.2	3	24	5.6	3	30	3.0
4	7	5.7	4	25	5.8			
5	8	6.6	5	27	5.2			
6	10	7.1	6	27.7	4.1			
7	13	6.7						
8	17	4.5						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟต้นฉบับที่จะใช้ในการเปรียบเทียบการแทรกค่าของแต่ละวิธี



รูปที่ 4.7 ผลที่ได้จากการแทรกค่าแบบเชิงเส้น

#### 4.5.2 การแทรกค่าแบบควอดราติก(Quadratic interpolation)

จากการแทรกค่าแบบเชิงเส้นยังมีข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมาณส่วนของเส้นโค้งด้วยเส้นตรง กล่าวคือ ในกรณีที่ต้องการส่วนของเส้นที่จะแสดงเป็นส่วนโค้งกลับได้เส้นตรงแทน ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงวิธีการประมาณข้อมูลให้ดีขึ้นด้วยการใช้ส่วนของเส้นโค้งในการเชื่อมต่อระหว่างพิกัดข้อมูล ด้วยสมการโพลีโนเมียล อันดับที่ 2 สามารถทำได้โดยการลากผ่านพิกัดทั้ง 3 พิกัด ในเวลาเดียวกันจึงทำให้เกิดเส้นโค้งแบบพาราโบลา ซึ่งลักษณะเฉพาะของสูตรอย่างง่ายแสดงได้ดังนี้

$$f_2(x) = b_0 + b_1(x - x_0) + b_2(x - x_0)(x - x_1) \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สังกัดว่าถึงสมการที่ (4.4) จะต่างไปจากสมการโพลีโนเมียลโดยทั่วไปในสมการที่ (4.1) แต่ทั้งสองไม่จำกัดจำนวนตัว อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ สมการคล้ายกัน และสมการที่ (4.4) สามารถเขียนในรูปของการคูณได้เป็น

$$f_2(x) = b_0 + b_1x - b_1x_0 + b_2x^2 - b_2x_0x_1 - b_2xx_0 - b_2xx_1 \quad (4.5)$$

และในเทอมของสมการเทียบเคียงจะได้

$$f_2(x_i) = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (4.6)$$

โดยที่

$$a_0 = b_0 - b_1x_0 + b_2x_0x_1$$

$$a_1 = b_1 - b_2x_0 - b_2x_1$$

$$a_2 = b_2$$

ในขั้นตอนของการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สำหรับ  $b_0$  สมการที่ (4.4) ให้  $x = x_0$  ดังนั้น

$$b_0 = f(x_0) \quad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.7) แทนค่าในสมการที่ (4.4) และให้  $x = x_1$  ได้

$$b_1 = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.7) และ (4.8) แทนค่าในสมการ (4.4) ให้  $x = x_2$  และสามารถแก้สมการได้ดังในสมการที่ (4.9)

$$b_2 = \frac{\left\{ \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \right\} - \left\{ \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \right\}}{x_2 - x_0} \quad (4.9)$$

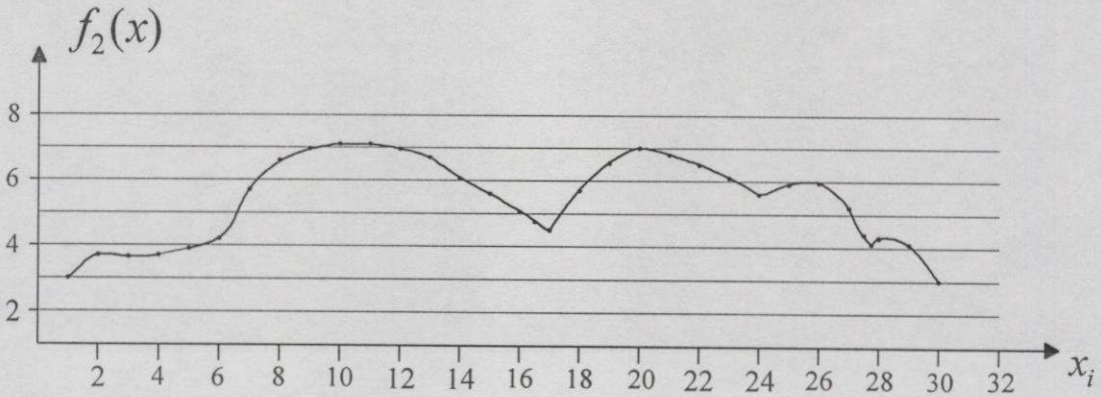
สังเกตว่าในกรณีนี้ยังใช้การแทรกค่าแบบเชิงเส้นโดยที่  $b_1$  แสดงค่าความลาดเอียงของพิกัดต่อ

ระหว่าง  $x_0$  และ  $x_1$  ดังนั้นในสองเทอมแรกของสมการที่ (4.4) เทียบเคียงกับการแทรกค่าแบบเชิงเส้น

จาก  $x_0$  และ  $x_1$  ของสมการที่ (4.3) ในเทอมสุดท้าย  $b_2(x - x_0)(x - x_1)$  จะนำมาใช้ในสูตรส่วนโค้ง

อันดับที่ 2 ซึ่งคล้ายกับการประมาณค่าอนุพันธ์อันดับที่ 2 (Approximation of the second order

derivative) ก่อนที่จะแสดงว่าจะใช้สมการที่ (4.4) ได้อย่างไร จะต้องคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์  $b_2$



รูปที่ 4.8 ผลที่ได้จากการแทรกค่าแบบควอดราติก

**4.5.3 การแทรกค่าแบบคิวบิก(Cubic interpolation)**

ในการแทรกค่าด้วยวิธีคิวบิกหรือโพลีโนเมียลอันดับที่ 3 มีลักษณะที่คล้ายกับการแทรกค่าด้วยวิธีควอดราติก แต่จะแตกต่างกันตรงที่การแทรกค่าด้วยวิธีควอดราติกจะใช้ข้อมูลจำนวน 3 ข้อมูล คือ  $[x_0, f(x_0)], [x_1, f(x_1)]$  และ  $[x_2, f(x_2)]$  ในขณะที่การแทรกค่าด้วยวิธีคิวบิกนั้นต้องใช้ข้อมูลทั้ง 4 ข้อมูล คือ  $[x_0, f(x_0)], [x_1, f(x_1)], [x_2, f(x_2)]$  และ  $[x_3, f(x_3)]$  เพื่อที่จะให้ได้ผลที่ต้องการ ทำให้การคำนวณครอบคลุมข้อมูลมากขึ้น เนื่องจากการแทรกค่าด้วยวิธีคิวบิกนั้นมีความสัมพันธ์กับการแทรกค่าแบบเชิงเส้นและแบบควอดราติก จึงเห็นควรที่ต้องกล่าวย้อนกลับไปถึงลักษณะรูปแบบโพลีโนเมียลการแทรกค่าแบบทั่วไป(General interpolation polynomial)

ตารางที่ที่ 4.2 ตัวอย่างการประมาณค่าอนุพันธ์อันดับที่ 1 ถึง อันดับที่ 3

$i$	$x_i$	$f(x)$	First Order	Second Order	Third Order
0	$x_0$	$f[x_0]$	$f[x_1, x_0]$	$f[x_2, x_1, x_0]$	$f[x_3, x_2, x_1, x_0]$
1	$x_1$	$f[x_1]$	$f[x_2, x_1]$	$f[x_3, x_2, x_1]$	
2	$x_2$	$f[x_2]$	$f[x_3, x_2]$		
3	$x_3$	$f[x_3]$			

กระบวนการวิเคราะห์โดยทั่วไปสามารถที่จะสร้างความสัมพันธ์ของสมการ โพลีโนเมียลอันดับที่  $n$  เพื่อที่จะสามารถให้ส่วนของเส้นนั้นลากผ่านข้อมูลได้จำนวน  $n + 1$  ข้อมูล ซึ่งสมการโพลีโนเมียลอันดับที่  $n$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$f_n(x) = b_0 + b_1(x - x_0) + b_2(x - x_0)(x - x_1) + \dots + b_n(x - x_0)(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_{n-1}) \tag{4.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตามก็สงวนไว้ได้คือแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อก่อนหน้าเป็นการแทรกค่าแบบเชิงเส้นและควอดราติก ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้สามารถจะนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$  ได้ เพื่อนำมาใช้กับโพลิโนเมียลอันดับที่  $n$  ของข้อมูลจำนวน  $n+1$  ที่ต้องการความสัมพันธ์แบบ  $[x_0, f(x_0)], [x_1, f(x_1)], [x_2, f(x_2)]$  ถึง  $[x_n, f(x_n)]$  โดยที่จะใช้ข้อมูลและสมการในการหาค่าสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$\begin{aligned} b_0 &= f[x_0] \\ b_1 &= f[x_1, x_0] \\ b_2 &= f[x_2, x_1, x_0] \\ &\vdots \\ b_n &= f[x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1, x_0] \end{aligned} \quad (4.11)$$

ในขณะที่

$$f[x_i, x_{i-1}] = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \quad (4.12)$$

ในลักษณะเดียวกันสามารถหาการประมาณค่าอนุพันธ์อันดับที่ 2 ได้จากผลต่างของการประมาณค่าอนุพันธ์อันดับที่ 1 ดังนี้

$$f[x_i, x_{i-1}, x_{i-2}] = \frac{f[x_i, x_{i-1}] - f[x_{i-1}, x_{i-2}]}{x_i - x_{i-2}} \quad (4.13)$$

และเช่นกันสามารถหาการประมาณค่าอนุพันธ์อันดับที่  $n$  ได้ด้วย

$$f[x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1, x_0] = \frac{f[x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1] - f[x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0]}{x_n - x_0} \quad (4.14)$$

จากผลของสมการที่ (4.12) ถึง (4.14) เป็นการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ (4.11) ซึ่งผลที่ได้นำไปแทนในสมการที่ (4.10) เป็นสมการโพลิโนเมียลการแทรกค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$f_n(x) = f(x_0) + (x - x_0)f[x_1, x_0] + (x - x_0)(x - x_1)f[x_2, x_1, x_0] + \dots + (x - x_0)(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_{n-1})f[x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1, x_0] \quad (4.15)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการใช้

ซึ่งเรียกสมการข้างต้นว่า Newton's divided difference interpolation polynomials และความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ (4.10) ถึง (4.15) สามารถที่จะนำมาคำนวณหาข้อมูลการแทรกค่าด้วยวิธีคิวบิกได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$f_3(x_i) = b_0 + b_1(x - x_0) + b_2(x - x_0)(x - x_1) + b_3(x - x_0)(x - x_1)(x - x_2) \quad (4.16)$$

ตารางที่ที่ 4.3 ตัวอย่างการคำนวณแบบคิวบิก

$i$	$x_i$	$f(x_i)$
0	1	0.0
1	4	1.386294
2	6	1.791759
3	9	1.609438

จากสมการที่ (4.12) การประมาณค่าอนุพันธ์อันดับที่ 1 จะได้

$$f[x_1, x_0] = \frac{1.386294 - 0}{4 - 1} = 0.4620981$$

$$f[x_2, x_1] = \frac{1.791759 - 1.386294}{6 - 4} = 0.2027326$$

$$f[x_3, x_2] = \frac{1.609438 - 1.791759}{9 - 6} = -0.0607737$$

จากสมการที่ (4.13) การประมาณค่าอนุพันธ์อันดับที่ 2 จะได้

$$f[x_2, x_1, x_0] = \frac{0.2027326 - 0.4620981}{6 - 1} = -0.05187311$$

$$f[x_3, x_2, x_1] = \frac{(-0.0607737) - 0.2027326}{9 - 4} = -0.05272126$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.14) การประมาณค่าอนุพันธ์อันดับที่ 3 จะได้

$$f[x_3, x_2, x_1, x_0] = \frac{(-0.05272126) - (-0.05187311)}{9-1} = -0.000103518$$

และจากผลที่ได้สามารถแทนด้วยสัมประสิทธิ์  $b$  ดังนี้

$$b_0 = f[x_0] = 0$$

$$b_1 = f[x_1, x_0] = 0.4620981$$

$$b_2 = f[x_2, x_1, x_0] = -0.05187311$$

$$b_3 = f[x_3, x_2, x_1, x_0] = -0.000103518$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้แทนค่า  $b_0, b_1, b_2$  และ  $b_3$  ในสมการที่ (4.16) และคำนวณหาข้อมูลที่  $x_i = 3, 5, 7, 8.6$  ตามลำดับ

$$f(x_i) = 0.0 + 0.4620981(x_i - x_0) - 0.05187311(x_i - x_0)(x_i - x_1) - 0.000103518(x_i - x_0)(x_i - x_1)(x_i - x_2)$$

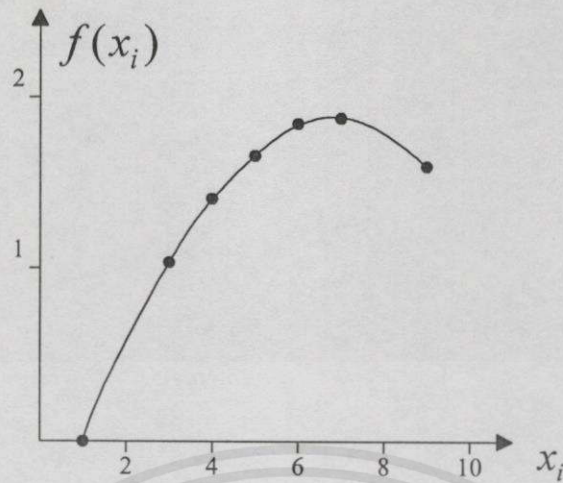
$$\begin{aligned} f(3) &= 0.0 + 0.4620981(3-1) - 0.05187311(3-1)(3-4) - \\ & 0.000103518(3-1)(3-4)(3-6) \\ &= 1.027321312 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(5) &= 0.0 + 0.4620981(5-1) - 0.05187311(5-1)(5-4) - \\ & 0.000103518(5-1)(5-4)(5-6) \\ &= 1.641314032 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(7) &= 0.0 + 0.4620981(7-1) - 0.05187311(7-1)(7-4) - \\ & 0.000103518(7-1)(7-4)(7-6) \\ &= 1.837009296 \end{aligned}$$

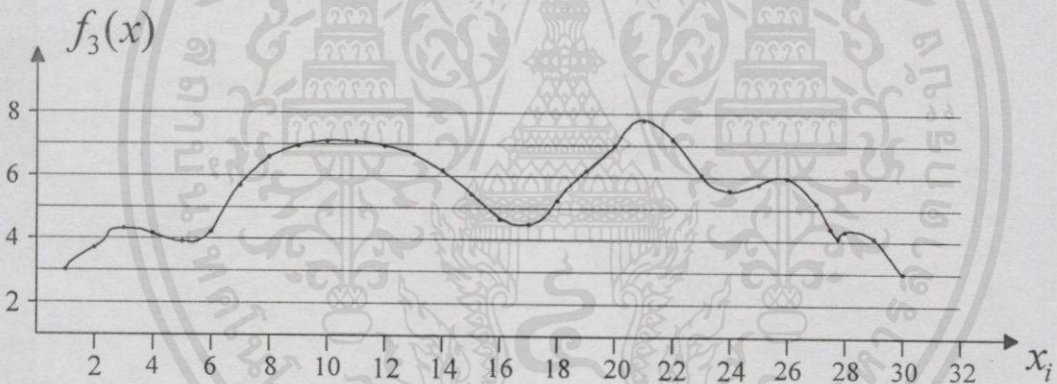
$$\begin{aligned} f(8.6) &= 0.0 + 0.4620981(8.6-1) - 0.05187311(8.6-1)(8.6-4) - \\ & 0.000103518(8.6-1)(8.6-4)(8.6-6) \\ &= 2.1641805411 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลที่ได้จากตัวอย่างการคำนวณ

จากผลตัวอย่างที่ได้สามารถที่จะนำมาทำการหาข้อมูลการแทรกค่าด้วยวิธีคิวบิกตามรูปที่ 4.10 ได้ดังนี้

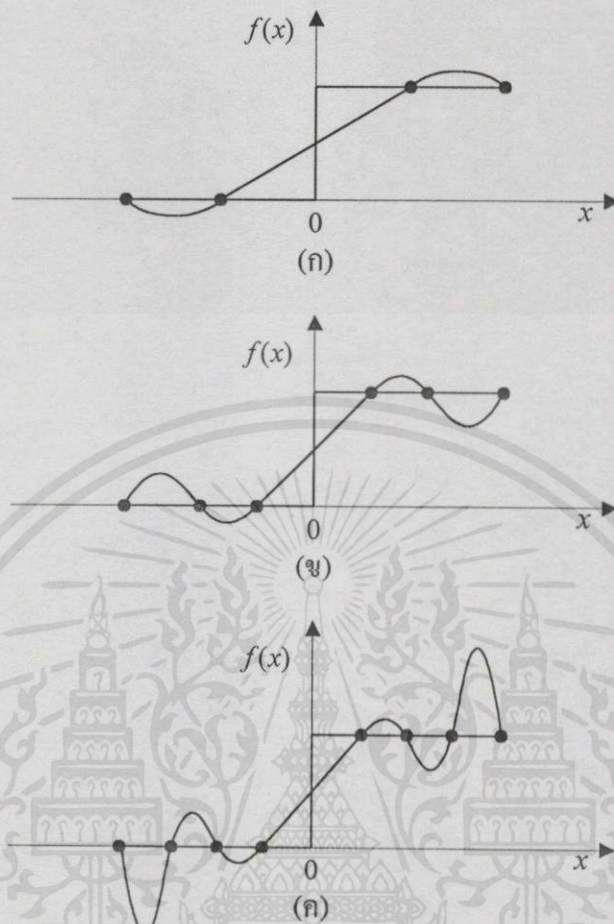


รูปที่ 4.10 ผลที่ได้จากการแทรกค่าแบบคิวบิก

จะสังเกตเห็นว่า จากวิธีการของ Newton's divided difference interpolating polynomials จะให้ผลการแทรกค่าของแต่ละวิธีที่แตกต่างกัน

#### 4.6 การแทรกค่าแบบสไปน์(Spline interpolation)[7, 8]

ดังจะเห็นได้จากการใช้ความสัมพันธ์ของ Newton's Divided Difference Interpolating polynomials ถ้าต้องการให้เส้นกราฟลากผ่านข้อมูลจำนวน  $n+1$  จุด จะต้องกำหนดให้สมการโพลีโนเมียลมีอันดับที่  $n$  ตัวอย่างเช่น มีข้อมูลทั้งหมด 8 ค่า ก็จะต้องใช้สมการโพลีโนเมียลอันดับที่ 7 ลักษณะของข้อมูลที่ได้จะกวานไปมาไม่เป็นลักษณะที่ต้องการซึ่งมีอยู่หลายกรณีที่มีเมื่อนำลักษณะของฟังก์ชันดังกล่าวมาใช้ แต่เนื่องจากผลที่ได้จะผิดพลาดไป เนื่องมาจากการกระโดดข้ามข้อมูลในบางพิภพ ดังในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ลักษณะการแทรกค่าของสมการ โพลีโนเมียลในอันดับที่สูงต่างกัน

แนวความคิดของการแทรกค่าแบบสไปน์ได้มาจากลักษณะเทคนิคการร่างแบบ(Drafting) ที่ต้องใช้เส้นบางๆ และโค้งงอได้ตามความต้องการหรือเรียกว่า สไปน์(Spline) ซึ่งจะลากผ่านเซตของพิกัดข้อมูลทั้งหมด ในสมการของสไปน์ประกอบด้วยโพลีโนเมียลย่อย(Polynomial pieces) บนจุดต่อในช่วงย่อยๆ โดยปกติข้อมูลจำนวน  $n+1$  ที่  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  มีเงื่อนไขว่า  $x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n$  ซึ่งพิกัด ดังกล่าวนั้นเรียกว่า นอต(Knots)

#### 4.6.1 การแทรกค่าคิวบิกสไปน์(Cubic spline interpolation)

จากลักษณะการแทรกค่าด้วยความสัมพันธ์ตามทฤษฎีของ Newton's divided difference interpolation polynomial พบว่าหากจำนวนของข้อมูลมีมากขึ้นอันดับที่ของโพลีโนเมียลก็จะต้องสูงขึ้นตาม เพื่อที่จะสามารถให้ได้สมการที่ผ่านข้อมูลทั้งหมด ซึ่งจะเป็นการประมาณฟังก์ชันช่วงปิดที่อาศัยความสัมพันธ์โพลีโนเมียล โดยปกติแล้วโพลีโนเมียลที่มีอันดับสูงนั้นจะเกิดการแกว่งของข้อมูลมาก แต่ก็ได้มีวิธีการหนึ่งซึ่งให้ผลที่น่าพอใจก็คือ การแบ่งช่วงภายในของช่วงย่อยๆ และสร้างสมการ

โพลีโนเมียลที่ต่างกันในแต่ละช่วงย่อย ซึ่งจะเป็นการประมาณค่าโดยฟังก์ชันที่เรียกว่า การประมาณค่าโพลีโนเมียลย่อย(Piece polynomial approximation) และตัวอย่างแบบง่ายๆ ของโพลีโนเมียลการประมาณค่าในส่วนย่อยก็คือ การแทรกค่าส่วนย่อยในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มของข้อมูลที่ต่อเข้าด้วยกันดังสมการข้างล่าง

$$\{(x_0, f(x_0)), (x_1, f(x_1)), (x_2, f(x_2)), \dots, (x_n, f(x_n))\}$$

โดยจะเป็นการต่อของเส้นตรงในลักษณะอนุกรมดังรูปที่ 4.11 การแทรกค่าดังกล่าวจะได้นำไปใช้ในการศึกษาทางเดินของเส้นในฟังก์ชันของตรีโกณเมตริกซ์หรือโลการิทึม เพื่อต้องการที่จะประมาณค่าจากตารางที่ค่า

**นิยาม** กำหนดให้  $f$  เป็นฟังก์ชันที่จะครอบคลุมข้อมูลตั้งแต่  $a$  ถึง  $b$  หรือ  $[a, b]$  และเซตของจำนวนที่เรียกว่า นอต(Knots) ที่  $a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n = b$  และให้การแทรกค่าแบบ คิวบิกซึ่งแทนด้วย  $S$  โดยมีเงื่อนไขของฟังก์ชัน  $f$  ดังต่อไปนี้

- (ก) กำหนดให้  $S$  คือโพลีโนเมียลแบบคิวบิก(Cubic polynomial) และให้  $S_j$  เป็นฟังก์ชันย่อยในช่วงระหว่าง  $[x_j, x_{j+1}]$
- (ข)  $S(x_j) = f(x_j)$  เมื่อ  $j = 0, 1, 2, \dots, n$
- (ค)  $S_{j+1}(x_{j+1}) = S_j(x_{j+1})$  เมื่อ  $j = 0, 1, 2, \dots, n-2$
- (ง)  $S'_{j+1}(x_{j+1}) = S'_j(x_{j+1})$  เมื่อ  $j = 0, 1, 2, \dots, n-2$
- (จ)  $S''_{j+1}(x_{j+1}) = S''_j(x_{j+1})$  เมื่อ  $j = 0, 1, 2, \dots, n-2$
- (ฉ) ลักษณะเงื่อนไขพิเศษอื่นๆ
- $S''(x_0) = S''(x_n) = 0$  เรียกว่า ฟรีบาวนารี หรือ เนเจอร์ลบาวนารี(Free boundary or Natural boundary)
  - $S'(x_0) = f'(x_0), S'(x_n) = f'(x_n)$  เรียกว่า แคลมปีบาวนารี(Clamped boundary)

แม้ว่าคิวบิกสไปนนั้นอาจจะถูกกำหนดด้วยเงื่อนไขที่แยกประเภทในแบบอื่นๆ อีกที่นอกเหนือไปจากนี้ แต่ด้วยเงื่อนไขที่กำหนดให้ก็ถือว่าพอเพียงที่จะนำมาใช้คำนวณหาที่ข้อมูลที่ต้องการได้ เมื่อใดก็ตามที่เกิดเงื่อนไข ฟรีบาวนารีขึ้น สไปนนั้นจะถูกเรียกว่า เนเจอร์ลสไปน(Natural spline)

ถึงแม้โครงสร้างการแทรกค่าแบบคิวบิกสไปน์จะกำหนดโดยฟังก์ชัน  $f$  แต่เงื่อนไขในนิยามก็นำมาใช้กับคิวบิกโพลีโนเมียลได้ดังนี้

$$S_j(x) = a_j + b_j(x - x_j) + c_j(x - x_j)^2 + d_j(x - x_j)^3 \quad (4.17)$$

เมื่อ  $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$

และให้  $x = x_j$

จะได้

$$S_j(x) = a_j = f(x_j) \quad (4.18)$$

จากข้อกำหนดในข้อ (ค) ว่า  $S_{j+1}(x_{j+1}) = S_j(x_{j+1})$  เมื่อ  $j = 0, 1, 2, \dots, n-2$

จะได้

$$a_{j+1} = S_{j+1}(x_{j+1}) = S_j(x_{j+1})$$

$$a_{j+1} = a_j + b_j(x_{j+1} - x_j) + c_j(x_{j+1} - x_j)^2 + d_j(x_{j+1} - x_j)^3 \quad (4.19)$$

เมื่อ  $j = 0, 1, 2, \dots, n-2$

จากเทอมของ  $x_{j+1} - x_j$  เป็นเทอมที่จะต้องนำมาใช้ซ้ำๆ กันหลายครั้ง เพื่อให้การคำนวณเป็นไปได้อย่างสะดวก จึงเห็นควรที่จะกำหนดให้ลดรูปเหลือเพียง

$$h_j = x_{j+1} - x_j \quad \text{เมื่อ } j = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (4.20)$$

จะได้สมการเทียบเคียงเป็น

$$a_{j+1} = a_j + b_j h_j + c_j h_j^2 + d_j h_j^3 \quad j = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (4.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_n = f(x_n) \quad (4.22)$$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ (4.17) หากค่า  $S'_j(x)$  จะได้

$$S'_j(x) = b_j + 2c_j(x - x_j) + 3d_j(x - x_j)^2 \quad (4.23)$$

ให้  $x = x_j$

จะได้

$$S'_j(x_j) = b_j \quad \text{เมื่อ } j = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (4.24)$$

จากข้อกำหนดข้อ (ง) ให้  $S'_{j+1}(x_{j+1}) = S'_j(x_{j+1})$  เมื่อ  $j = 0, 1, 2, \dots, n-2$

$$b_{j+1} = S'_{j+1}(x_{j+1}) = S'_j(x_{j+1})$$

$$b_{j+1} = b_j + 2c_j(x_{j+1} - x_j) + 3d_j(x_{j+1} - x_j)^2 \quad \text{เมื่อ } j = 0, 1, 2, \dots, n-2$$

จะได้สมการเทียบเคียงเป็น

$$b_{j+1} = b_j + 2c_j h_j + 3d_j h_j^2 \quad \text{เมื่อ } j = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (4.25)$$

$$b_n = S'(x_n) \quad (4.26)$$

และจากเงื่อนไขเดียวกัน จากสมการที่ (4.17) หากค่า  $S''_j(x)$  จะได้

$$S''_j(x) = 2c_j + 6d_j(x - x_j) \quad (4.27)$$

ให้  $x = x_j$

จะได้

$$\frac{S''_j(x)}{2} = c_j \quad \text{เมื่อ } j = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (4.28)$$

จากข้อกำหนดข้อ (จ)  $S''_{j+1}(x_{j+1}) = S''_j(x_{j+1})$  เมื่อ  $j = 0, 1, 2, \dots, n-2$

จะได้

$$c_{j+1} = \frac{S''_{j+1}(x_{j+1})}{2} = \frac{S''_j(x_{j+1})}{2} = c_j + 3d_j(x_{j+1} - x_j) \quad \text{เมื่อ } j = 0, 1, 2, \dots, n-2$$

จะได้สมการเทียบเคียงเป็น

$$c_{j+1} = c_j + 3d_j h_j \quad \text{เมื่อ} \quad j = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (4.29)$$

$$\text{และ} \quad c_n = S''(x_n) \quad (4.30)$$

จากสมการที่ (4.29) สามารถหา  $d_j$  ได้จาก

$$d_j = \frac{c_{j+1} - c_j}{3h_j} \quad (4.31)$$

แทนค่า  $d_j$  จากสมการที่ (4.31) ในสมการที่ (4.21) และ (4.25) จะได้

$$\begin{aligned} a_{j+1} &= a_j + b_j h_j + c_j h_j^2 + (c_{j+1} - c_j) \frac{h_j^3}{3h_j} \\ a_{j+1} &= a_j + b_j h_j + c_j h_j^2 + (c_{j+1} - c_j) \frac{h_j^2}{3} \\ a_{j+1} &= a_j + b_j h_j + (c_{j+1} + 2c_j) \frac{h_j^2}{3} \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} b_{j+1} &= b_j + 2c_j h_j + (c_{j+1} - c_j) \frac{3h_j^2}{3h_j} \\ b_{j+1} &= b_j + 2c_j h_j + (c_{j+1} - c_j) h_j \\ b_{j+1} &= b_j + (c_{j+1} + c_j) h_j \end{aligned} \quad (4.33)$$

$$\text{เมื่อ} \quad j = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

จากสมการที่ (4.32) จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\begin{aligned} b_j &= (a_{j+1} - a_j) \frac{1}{h_j h_j} - (c_{j+1} + 2c_j) \frac{h_j^2}{3h_j} \\ b_j &= (a_{j+1} - a_j) \frac{1}{h_j} - (c_{j+1} + 2c_j) \frac{h_j}{3} \end{aligned} \quad (4.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.34) ลดค่าดัชนีลงหนึ่งค่าเหลือ  $b_{j-1}$  จะได้

$$b_{j-1} = (a_j - a_{j-1}) \frac{1}{h_{j-1}} - (c_j + 2c_{j-1}) \frac{h_{j-1}}{3} \quad (4.35)$$

แทนค่า  $b_j$  ในสมการที่ (4.33) ด้วยสมการที่ (4.34) จะได้

$$\begin{aligned} b_{j+1} &= (a_{j+1} - a_j) \frac{1}{h_j} - (c_{j+1} + 2c_j) \frac{h_j}{3} + (c_{j+1} + c_j) h_j \\ b_{j+1} &= (a_{j+1} - a_j) \frac{1}{h_j} + (2c_{j+1} + c_j) \frac{h_j}{3} \end{aligned} \quad (4.36)$$

ลดค่าดัชนีลงหนึ่งค่าเหลือ  $b_j$  จะได้

$$b_j = (a_j - a_{j-1}) \frac{1}{h_{j-1}} + (2c_j + c_{j-1}) \frac{h_{j-1}}{3} \quad (4.37)$$

จากสมการที่ (4.34) และ (4.37) จะได้ ผลจากการทำให้อยู่ระบบเชิงเส้นดังนี้

$$\begin{aligned} (a_j - a_{j-1}) \frac{1}{h_{j-1}} + (2c_j + c_{j-1}) \frac{h_{j-1}}{3} &= (a_{j+1} - a_j) \frac{1}{h_j} - (c_{j+1} + 2c_j) \frac{h_j}{3} \\ (2c_j + c_{j-1}) \frac{h_{j-1}}{3} + (c_{j+1} + 2c_j) \frac{h_j}{3} &= (a_{j+1} - a_j) \frac{1}{h_j} - (a_j - a_{j-1}) \frac{1}{h_{j-1}} \\ c_{j-1} h_{j-1} + 2c_j (h_{j-1} + h_j) + c_{j+1} h_j &= (a_{j+1} - a_j) \frac{3}{h_j} - (a_j - a_{j-1}) \frac{3}{h_{j-1}} \end{aligned} \quad (4.38)$$

เมื่อ  $j = 1, 2, 3, \dots, n-1$

จากสมการที่ (4.38) มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเฉพาะ  $\{c_j\}_{j=0}^n$  เท่านั้น ในขณะที่ตัวแปร  $\{h_j\}_{j=0}^{n-1}$  และ  $\{a_j\}_{j=0}^n$  นั้นจะกำหนดโดยช่วงห่างระหว่างนอต  $\{x_j\}_{j=0}^n$  และ ค่า  $f$  ที่นอตนั้นๆ ตามลำดับ

**ข้อสังเกต** เมื่อทราบค่าของตัวแปร  $\{c_j\}_{j=0}^n$  ก็จะเป็นการง่ายที่จะสามารถหาค่า  $\{b_j\}_{j=0}^{n-1}$  ที่เหลือจากสมการที่ (4.34) และ ค่าตัวแปร  $\{d_j\}_{j=0}^{n-1}$  จากสมการที่ (4.32) จนกระทั่งจะหาโครงสร้างคิวบิกโพลีโนเมียล  $\{S_j\}_{j=0}^{n-1}$  ได้

ตามที่นิยามได้กำหนดให้มีเงื่อนไขพิเศษในข้อกำหนดข้อ (ฉ) จะแสดงให้เห็นตามวิธีดังต่อไปนี้ เพื่อที่จะเป็นการขึ้นชั้นคำตอบที่จะเกิดขึ้นกับทั้งสองกรณี และเปรียบเทียบผลที่ได้

**ข้อที่ 1** Natural boundary ถ้ากำหนดให้ฟังก์ชัน  $f$  ที่มี  $a = x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_n = b$  แล้ว ฟังก์ชัน  $f$  จะเป็น Natural spline interpolant เดียวบนนอก  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$  ที่เป็นไปตามเงื่อนไข  $S''(a) = 0$  และ  $S''(b) = 0$

พิสูจน์ เงื่อนไขในกรณีที่  $c_n = \frac{S''(x_n)}{2} = 0$  ก็จะได้

$$0 = S''(x_n) = 2c_0 + 6d_0(x_0 - x_0)$$

ดังนั้น  $c_0 = 0$

จากทั้งสองสมการ  $c_0 = 0, c_n = 0$  จะสามารถแสดงผลสมการที่ (4.39) เป็นระบบเชิงเส้นได้ โดยสมการเวกเตอร์  $Ax = b$  ซึ่ง  $A$  เป็นเมทริกซ์  $(n+1) \times (n+1)$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ h_0 & 2(h_0 - h_1) & h_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_1 & 2(h_1 - h_2) & h_2 & \dots & 0 \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \vdots & \vdots & h_{n-2} & 2(h_{n-2} - h_{n-1}) & h_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ (a_2 - a_1)\frac{3}{h_1} - (a_1 - a_0)\frac{3}{h_0} \\ \vdots \\ \vdots \\ (a_n - a_{n-1})\frac{3}{h_{n-1}} - (a_{n-1} - a_{n-2})\frac{3}{h_{n-2}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad x = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_{n-1} \\ c_n \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลกอริทึมของการแทรกค่าแบบคิวบิกสไปน์ตามข้อ(ฉ) Natural boundary ดังนี้

ในการสร้างความสัมพันธ์ของการแทรกค่าแบบคิวบิกสไปน์ของ  $S$  ขณะที่กำหนดให้ฟังก์ชัน  $f$  เป็นของจำนวนอยู่ในช่วง  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$  และ  $S''(x_0) = S''(x_n) = 0$

INPUT  $n; x_0, x_1, x_2, \dots, x_n; a = f(x_0), a_1 = f(x_1), \dots, a_n = f(x_n)$

OUTPUT  $a_j, b_j, c_j, d_j$  for  $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$

(Note:  $S(x) = S_j(x) = a_j + b_j(x-x_j) + c_j(x-x_j)^2 + d_j(x-x_j)^3$  for  $x_j \leq x \leq x_{j+1}$ )

Step 1 For  $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$  Set  $h_i = x_{i+1} - x_i;$

Step 2 For  $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$

Set 
$$\alpha_i = \frac{3[a_{i+1}h_{i-1} - a_i(x_{i+1} - x_{i-1}) + a_{i-1}h_i]}{h_{i-1}h_i}$$

Step 3 Set

$$l_0 = 1;$$

$$\mu_0 = 0;$$

$$z_0 = 0;$$

Step 4 For  $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$

Set 
$$l_i = 2(x_{i+1} - x_{i-1}) - h_{i-1}\mu_{i-1};$$

$$\mu_i = \frac{h_i}{l_i};$$

$$z_i = \frac{(\alpha_i - h_{i-1}z_{i-1})}{l_i};$$

Step 5 Set  $l_n = 1;$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Step 6 For  $j = n-1, n-2, n-3, \dots, 0$

Set 
$$c_j = z_j - \mu_j c_{j+1};$$

$$b_j = \frac{(a_{j+1} - a_j)}{h_j} - \frac{h_j(c_{j+1} + 2c_j)}{3};$$

$$d_j = \frac{(c_{j+1} - c_j)}{3h_j};$$

Step 7 OUTPUT  $(a_j, b_j, c_j, d_j \text{ for } j=0, 1, 2, \dots, n-1)$   
STOP.

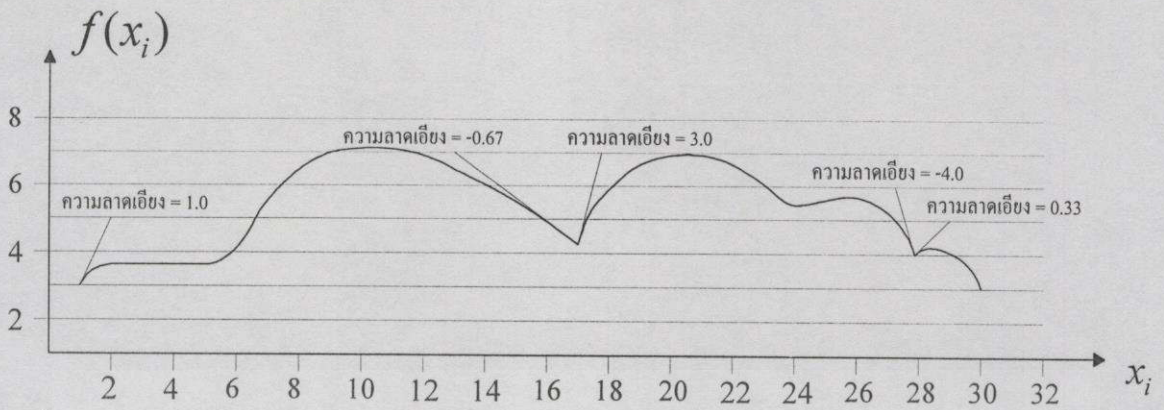
ภายหลังการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ตามอัลกอริทึมในแบบ Natural boundary จะได้ค่าของแต่ละค่าสัมประสิทธิ์ดังแสดงในตารางที่ 4.4 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนโค้งที่ 1

สไปน์					
$j$	$x_i$	$a_j = f(x_j)$	$b_j$	$c_j$	$d_j$
0	1	3.0	0.786	0.0	-0.086
1	2	3.7	0.59	-0.257	0.034
2	5	3.9	-0.086	0.052	0.334
3	6	4.2	1.019	1.053	-0.572
4	7	5.7	1.408	-0.664	0.156
5	8	6.6	0.547	-0.197	0.024
6	10	7.1	0.049	-0.052	-0.003
7	13	6.7	-0.342	-0.078	0.007
8	17	4.5			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.12 ค่าความลาดเอียงของแต่ละส่วนโค้ง

**ข้อที่ 2** Clamped boundary ถ้ากำหนดให้ฟังก์ชัน  $f$  ที่  $a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n = b$  และแยกกันที่  $a$  และ  $b$  จากนั้น ฟังก์ชัน  $f$  จะเป็น Clamped spline interpolant บนนอต  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$  จะใช้สไปน์เงื่อนไข  $S'(a) = f'(a)$  และ  $S'(b) = f'(b)$

**พิสูจน์** กำหนดให้  $S'(a) = S'(b) = b_0$  ในสมการที่ (4.38) เมื่อ  $j = 0$  แทน  $b_j$  ด้วย  $f'(a)$  จะได้

$$f'(a) = \frac{a_1 - a_0}{h_0} - (2c_0 + c_1) \frac{h_0}{3}$$

หรือจัดรูปใหม่ได้

$$2c_0 h_0 + c_1 h_0 = (a_1 - a_0) \frac{3}{h_0} - 3f'(a)$$

ทำนองเดียวกัน ในสมการที่ (4.37) เมื่อ  $j = n-1$  จะได้

$$f'(b) = b_n = b_{n-1} + (c_{n-1} + c_n) h_{n-1}$$

แทนใน  $b_{n-1}$  ในสมการที่ (4.38) ลงในสมการข้างบนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f'(b) = \frac{a_n - a_{n-1}}{h_{n-1}} - (2c_{n-1} + c_n) \frac{h_{n-1}}{3} + (c_{n-1} + c_n) h_{n-1}$$

$$f'(b) = \frac{a_n - a_{n-1}}{h_{n-1}} + (c_{n-1} + 2c_n) \frac{h_{n-1}}{3}$$

และ

$$c_{n-1}h_{n-1} + 2c_n h_{n-1} = 3f'(b) - (a_n - a_{n-1}) \frac{3}{h_{n-1}}$$

เมื่อเทียบกับสมการที่ (4.39) ด้วยสมการต่อไปนี้

$$2c_0h_0 + c_1h_0 = (a_1 - a_0) \frac{3}{h_0} - 3f'(a) \quad (4.40)$$

และ

$$c_{n-1}h_{n-1} + 2c_n h_{n-1} = 3f'(b) - (a_n - a_{n-1}) \frac{3}{h_{n-1}} \quad (4.41)$$

สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับ Natural spline ระบบเชิงเส้น  $Ax = b$  แต่อยู่ในรูปของ Clamped spline

$$A = \begin{bmatrix} 2h_0 & h_0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ h_0 & 2(h_0 + h_1) & h_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & h_1 & 2(h_1 + h_2) & h_2 & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & h_{n-2} & 2(h_{n-2} + h_{n-1}) & h_{n-1} \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & h_{n-1} & 2h_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} (a_1 - a_0) \frac{3}{h_0} - 3f'(a) \\ (a_2 - a_1) \frac{3}{h_1} - (a_1 - a_0) \frac{3}{h_0} \\ \vdots \\ \vdots \\ (a_n - a_{n-1}) \frac{3}{h_{n-1}} - (a_{n-1} - a_{n-2}) \frac{3}{h_{n-2}} \\ 3f'(b) - (a_n - a_{n-1}) \frac{3}{h_{n-1}} \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad x = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_{n-1} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติมและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลกอริทึมของการแทรกค่าแบบคิวิบิสไปน์ตามข้อ(ฉ) Clamped boundary ดังนี้

โครงสร้างในการแทรกคิวิบิสไปน์  $S$  สำหรับฟังก์ชัน  $f$  ที่จำนวน  $x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n$  ให้  $S''(x_0) = S''(x_n) = 0$

INPUT  $n; x_0, x_1, x_2, \dots, x_n; a_0 = f(x_0), a_1 = f(x_1), \dots, a_n = f(x_n);$   
 $FPO = f'(x_0); FPN = f'(x_n);$

OUTPUT  $a_j, b_j, c_j, d_j$  for  $j = 0, 1, 2, \dots, n-1;$

(Note :  $S(x) = a_j + b_j(x - x_j) + c_j(x - x_j)^2 + d_j(x - x_j)^3$  for  $x_j \leq x \leq x_{j+1}$ )

Step 1 For  $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$  Set  $h_i = x_{i+1} - x_i;$

Step 2 Set  $\alpha_0 = \frac{3(a_1 - a_0)}{h_0 - 3FPO};$

$$\alpha_n = 3FPN - \frac{3(a_n - a_{n-1})}{h_{n-1}};$$

Step 3 For  $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$

Set  $\alpha_i = \frac{3[a_{i+1}h_{i-1} - a_i(x_{i+1} - x_{i-1}) + a_{i-1}h_i]}{h_{i-1}h_i}$

Step 4 Set  $l_o = 2h_0;$

$$\mu_0 = 0.5;$$

$$z_0 = \frac{\alpha_0}{l_o};$$

Step 5 For  $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$

Set  $l_i = 2(x_{i+1} - x_{i-1}) - h_{i-1}\mu_{i-1};$

$$\mu_i = \frac{h_i}{l_i};$$

$$z_i = \frac{(\alpha_i - h_{i-1}z_{i-1})}{l_i};$$

Step 6 Set  $l_n = h_{n-1}(2 - \mu_{n-1});$

$$z_n = \frac{(\alpha_n - h_{n-1}z_{n-1})}{l_n};$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่  $c_n = z_n$ ; สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่า Step 7 For ลึกลับ  $j = n-1, n-2, n-3, \dots, 0$  จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Set  $c_j = z_j - \mu_j c_{j+1};$

$$b_j = \frac{(a_{j+1} - a_j)}{h_j} - \frac{h_j(c_{j+1} + 2c_j)}{3};$$

$$d_j = \frac{(c_{j+1} - c_j)}{3h_j};$$

Step 8 OUTPUT  $(a_j, b_j, c_j, d_j \text{ for } j = 0, 1, 2, \dots, n-1)$

STOP.

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนโค้งที่ 1

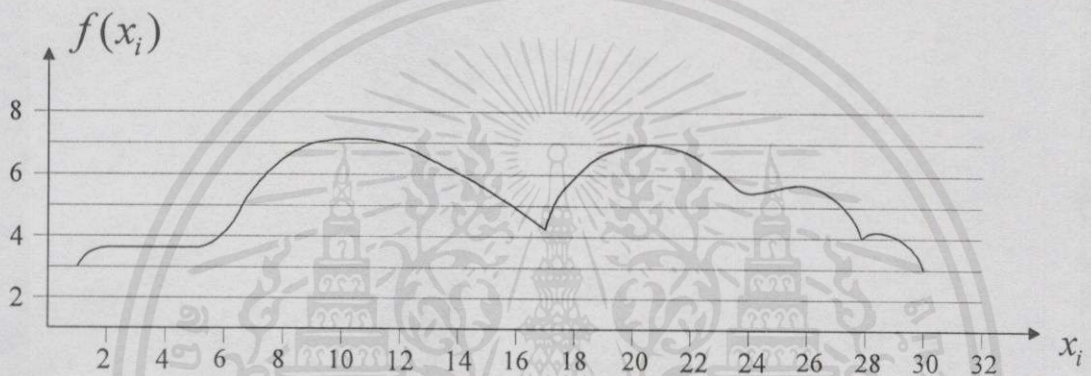
สไปน์						
$j$	$x_j$	$a_j = f(x_j)$	$b_j$	$c_j$	$d_j$	$f'(x_j)$
0	1	3.0	1.0	-0.347	0.049	1.0
1	2	3.7	0.447	-0.206	0.027	
2	5	3.9	-0.074	0.033	0.342	
3	6	4.2	1.016	1.058	-0.575	
4	7	5.7	1.409	-0.665	0.156	
5	8	6.6	0.547	-0.196	0.024	
6	10	7.1	0.048	-0.053	-0.003	
7	13	6.7	-0.339	-0.076	0.006	-0.67
8	17	4.5				

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนโค้งที่ 2

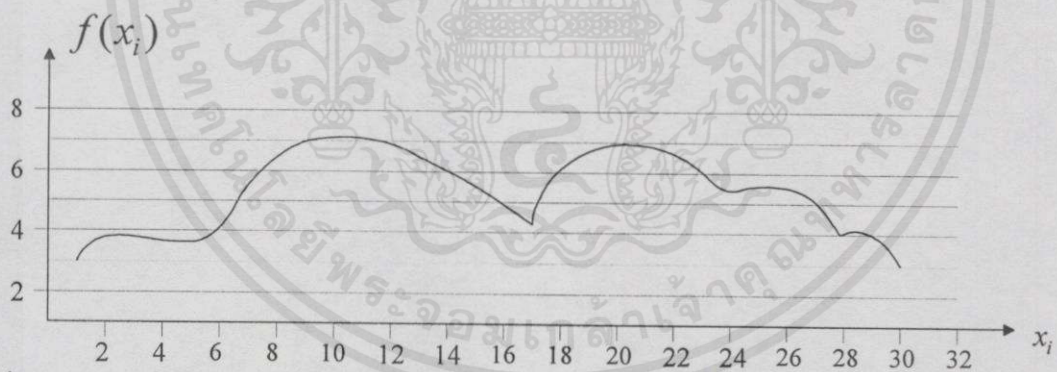
สไปน์						
$j$	$x_j$	$a_j = f(x_j)$	$b_j$	$c_j$	$d_j$	$f'(x_j)$
0	17	4.5	3.0	-1.101	0.126	3.0
1	20	7.0	-0.198	0.035	-0.023	
2	23	6.1	-0.609	-0.172	0.280	
3	24	5.6	-0.111	0.669	-0.357	
4	25	5.8	0.154	-0.403	0.088	
5	27	5.2	-0.401	0.126	-2.568	-4.0
6	27.7	4.1				

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนโค้งที่ 3

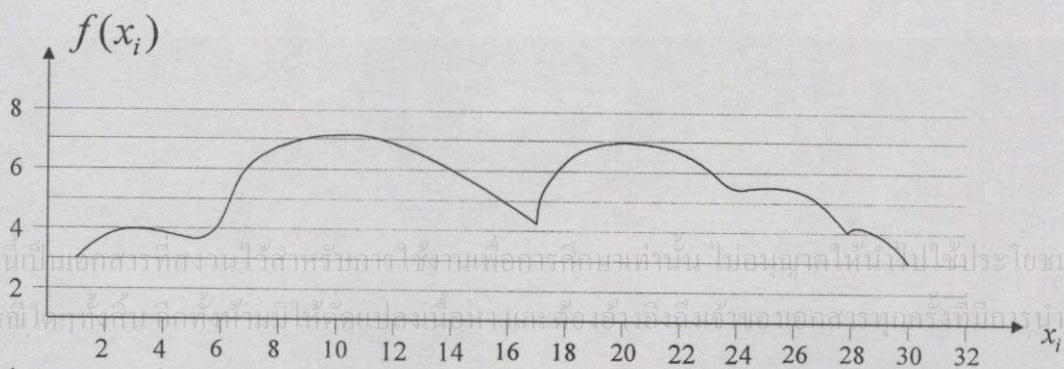
สไปน์						
$j$	$x_j$	$a_j = f(x_j)$	$b_j$	$c_j$	$d_j$	$f'(x_j)$
0	27.7	4.1	0.330	2.262	-3.800	0.33
1	28	4.3	0.661	-1.157	0.296	
2	29	4.1	-0.765	-0.269	-0.065	-1.5
3	30	3.0				



รูปที่ 4.13 กราฟต้นฉบับ



รูปที่ 4.14 กราฟที่ได้จากการคำนวณการแทรกค่าโดยวิธีคิวบิกสไปน์แบบ Natural spline

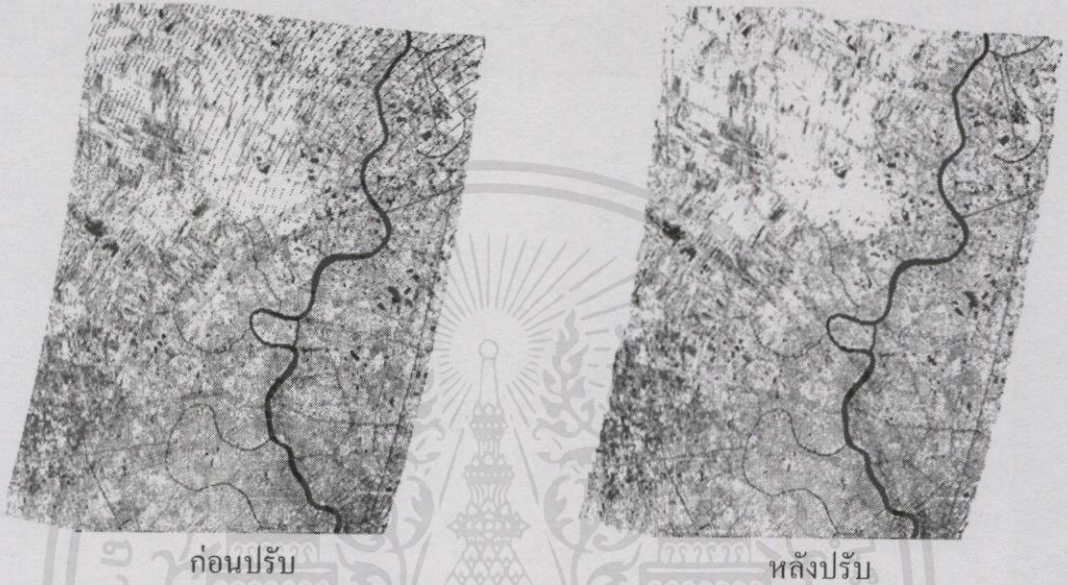


รูปที่ 4.15 กราฟที่ได้จากการคำนวณการแทรกค่าโดยวิธีคิวบิกสไปน์แบบ Clamped spline

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปทำแปลงเป็นภาษาและสื่ออื่นๆ จะต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสไปใช้

### 4.7 ผลการทดลอง

รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงผลที่ได้ภายหลังจากการซัดตัวอย่างข้อมูลภาพด้วยวิธีการแทรกค่าแบบคิวบิกสไปน์ ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลภาพที่สมบูรณ์ขึ้นหลังจากทำการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตแล้ว



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตและภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการแทรกค่าด้วยวิธีคิวบิกสไปน์แบบ Natural boundary ในภาพ JERS-1 แบนด์ที่ 1



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตและภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการแทรกค่าด้วยวิธีคิวบิกสไปน์แบบ Clamped boundary ในภาพ MOS-1 แบนด์ที่ 1

## บทที่ 5

### การต่อภาพ

#### Mosaicing of images

##### 5.1 บทนำ

ภาพหลังจากผ่านขั้นตอนการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตและการชักตัวอย่างข้อมูลใหม่แล้ว ในขั้นตอนต่อไปนี้จะเป็นการนำข้อมูลภาพที่ได้มาต่อเข้ากันเพื่อที่จะได้ข้อมูลภาพที่ต้องการมีขนาดของพื้นที่มากขึ้น แต่ขั้นตอนในการต่อข้อมูลภาพนั้น ไม่ใช่ว่าจะสามารถนำข้อมูลภาพที่ได้นำมาต่อเข้ากันได้ทันที แต่ควรที่จะต้องผ่านขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ คือ การปรับค่าความสว่างของภาพ เพื่อให้ได้คุณภาพของค่าความสว่างของข้อมูลภาพทั้งสองที่ใกล้เคียงหรือเหมือนกันมากที่สุด เพื่อให้ได้พิกัดของข้อมูลภาพที่ตรงภาพต้นฉบับ และการลบรอยตะเข็บที่บริเวณขอบของข้อมูลภาพภายหลังจากนำข้อมูลภาพทั้งสองมาต่อเข้าด้วยกันแล้ว เพื่อให้ได้ข้อมูลภาพที่กลมกลืนกันทั้งข้อมูลภาพ

##### 5.2 การปรับค่าความสว่างของภาพ(Brightness matching)[4, 10, 11, 13]

การปรับค่าความสว่างของข้อมูลภาพถือได้ว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการต่อภาพ เพราะโดยปกติภาพถ่ายดาวเทียมที่จะนำมาต่อเข้าด้วยกันนั้นจะต้องมีพื้นที่บางส่วนของภาพซ้อนทับ(Overlaped)กัน แต่เนื่องจากการต่อข้อมูลภาพที่ผ่านมาก่อนหน้าเป็นการต่อข้อมูลภาพโดยตรง ซึ่งไม่คำนึงถึงความแตกต่างที่เกิดขึ้นกับค่าความสว่างที่สัมพันธ์ของข้อมูลภาพ เช่น ข้อมูลภาพที่ได้จากเวลาบันทึกแตกต่างกันจะให้ค่าความสว่างของข้อมูลภาพที่ต่างกันและฤดูกาลที่เปลี่ยนไปทำให้คุณลักษณะของข้อมูลภาพเปลี่ยนไป เช่น ลักษณะต้นไม้ที่เปลี่ยนไป จึงเป็นสาเหตุให้ข้อมูลภาพที่ได้ภายหลังการต่อมีลักษณะที่ไม่มีความต่อเนื่องกลมกลืนกันจนสามารถมองเห็นได้ชัดเจน ทำให้สังเกตเห็นรอยตะเข็บที่เกิดจากการต่อข้อมูลภาพได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอขั้นตอนการปรับค่าความสว่างของข้อมูลภาพให้สอดคล้องกันเพื่อที่จะลดความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างข้อมูลภาพได้ ก่อนที่จะนำข้อมูลภาพมาต่อกันและลบรอยตะเข็บของข้อมูลภาพต่อไป

##### 5.2.1 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(Mean and Standard Deviation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารค่าเฉลี่ย(Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(Standard deviation) สามารถที่จะคำนวณหาได้จากค่าของข้อมูลใดๆ ที่รวบรวมได้ หรือแม้แต่นำมาใช้กับข้อมูลภาพก็ยังคงใช้วิธีการเดียวกันนี้ ซึ่งค่าเฉลี่ยก็คือค่าความสว่างของข้อมูลภาพในระดับสีเทา(Gray scale) ทุกๆ ข้อมูลที่สามารถอ่านได้

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I(i) \quad (5.1)$$

กำหนดให้

- $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลภาพ  
 $I$  คือ ค่าความสว่างของข้อมูลภาพในพิกัดภาพที่ซ้อนทับ  
 $n$  คือ จำนวนของข้อมูลภาพทั้งหมด

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของภาพคือ จำนวนซึ่งเป็นค่าที่แสดงคุณลักษณะเฉพาะของจุดภาพซึ่งลักษณะเฉพาะของจุดภาพที่จะเปลี่ยนแปลงต่างไปจากค่าเฉลี่ย สำหรับในภาพระดับสีเทาที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงแล้วความคมชัดของภาพก็จะสูงตาม แต่ก็ยังมีส่วนทำให้ภาพมีข้อมูลที่เป็นสัญญาณรบกวนมากขึ้นด้วย ซึ่งสมการของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงได้ในสมการที่ (5.2)

$$\sigma = \sqrt{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I^2(i) \right) - \mu^2} \quad (5.2)$$

กำหนดให้

- $\sigma$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลภาพ

ความน่าเชื่อถือของทั้งค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในความเป็นจริงจะมีข้อจำกัดอยู่ที่จำนวนข้อมูลที่นำมาพิจารณานั้น ไม่มีค่าที่จำกัดแน่นอนซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับข้อมูลภาพที่นำมาพิจารณาจากสมการที่ (5.1) และ (5.2) สามารถจะนำไปใช้ในการพิจารณาเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความสว่างระหว่างข้อมูลภาพทั้งสองได้ จากความสัมพันธ์ของสมการข้างล่างดังนี้

$$B_n = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} B_o + \mu_1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \mu_2 \quad (5.3)$$

$$\mu_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I_1(i) \quad , \quad \mu_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I_2(i)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม หากท่านมีให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_1 = \sqrt{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I_1^2(i) \right) - \mu_1^2} \quad , \quad \sigma_2 = \sqrt{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I_2^2(i) \right) - \mu_2^2}$$

โดยกำหนดให้

- $B_n$  คือระดับค่าสีเทาของข้อมูลภาพใหม่
- $B_0$  คือระดับค่าสีเทาของข้อมูลภาพเดิม
- $\sigma_1$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลภาพอ้างอิงจากพื้นที่ส่วนบริเวณซ้อนทับ
- $\sigma_2$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลภาพที่ต้องการปรับค่าความสว่างจากพื้นที่บริเวณซ้อนทับ
- $\mu_1$  คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลภาพอ้างอิงจากพื้นที่ส่วนบริเวณซ้อนทับ
- $\mu_2$  คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลภาพที่ต้องการปรับค่าความสว่างจากพื้นที่บริเวณซ้อนทับ

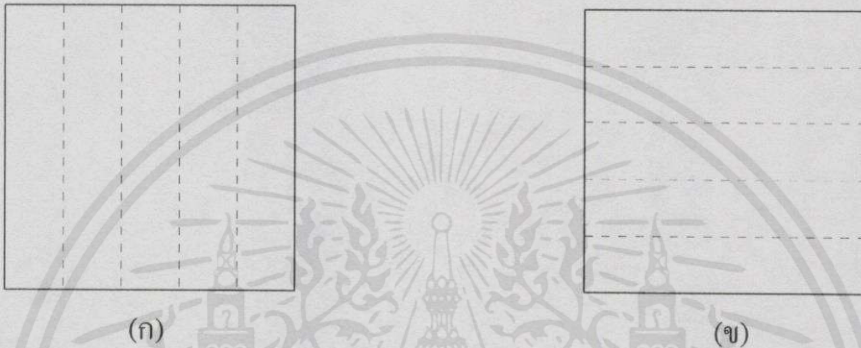
### 5.3 การหาค่าสหสัมพันธ์[4, 19]

ในการต่อภาพถ่ายความเทียมทั้งสองภาพเข้าด้วยกันจำเป็นจะต้องหาค่าที่แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลภาพในบริเวณที่ซ้อนทับ เพื่อให้ได้บริเวณที่ต่อกันแล้วกลมกลืนได้ดี โดยดูจากลักษณะที่สอดคล้องหรือเหมือนกันของภาพทั้งสอง ซึ่งในการสังเกตด้วยตาเปล่า ถ้าบริเวณที่ต้องการหามีสัญลักษณ์คล้ายกับบริเวณอื่นๆ ในภาพที่ไม่ต้องการก็อาจจะทำให้เกิดการผิดพลาดได้ง่าย ดังนั้น เพื่อให้ได้บริเวณข้อมูลภาพที่สัมพันธ์กันมากที่สุดในการต่อข้อมูลภาพจึงได้อาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วย โดยที่จะดูจากค่าตัวเลขที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการจะนำมาต่อกัน ซึ่งเรียกว่า ค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลภาพ(Image correlation) ลักษณะของสมการที่จะได้แสดงต่อไปนี้เป็นการหาค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลภาพโดยการอาศัยการเปรียบเทียบบริเวณที่ต้องการของข้อมูลภาพทั้งสองแบบ กล่าวคือพิกัดภาพต่อพิกัดภาพหรือทีละพิกัดภาพ โดยจะกำหนดให้บริเวณที่ต้องการจะสัมพันธ์มีลักษณะเป็นหน้ากาก(Mask) มีขนาดตามต้องการ และเคลื่อนที่ไปบนข้อมูลภาพต้นฉบับจนกระทั่งพบบริเวณที่สัมพันธ์กันก็จะแสดงค่าความสัมพันธ์ออกมาเป็นตัวเลข ค่าของตัวเลขที่มากจะแสดงถึงความสัมพันธ์ของภาพมีลักษณะที่ใกล้เคียงหรือเหมือนกันมากที่สุดแต่ทั้งนี้จะไม่เกิน “1”

### 5.4 ขั้นตอนการต่อภาพแบบสหสัมพันธ์

การหาพิกัดที่ซ้อนทับกันของข้อมูลภาพที่ต้องการ โดยทั่วไปข้อมูลภาพที่จะนำมาต่อเข้าด้วยกันนั้นจะต้องมีพื้นที่บางส่วนที่เหลื่อมทับกันระหว่างข้อมูลภาพทั้งสองไม่น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ หรือ 1 ใน 5 ส่วน ดังนั้นการกำหนดรอยต่อก็จะหาได้จากบริเวณที่พิกัดของข้อมูลภาพมีการซ้อนทับกัน ซึ่งในการต่อข้อมูลภาพนั้นจะไม่คำนึงว่าค่าระดับสีเทาของข้อมูลภาพทั้งสองจะแตกต่างกันหรือเหมือนกัน เพราะว่ามีใช้อุปสรรคที่ต้องนำมาคิด แต่ในการพิจารณาจะคำนึงถึงเพียงลักษณะของทางภูมิประเทศของภาพเท่านั้น

ในการหาพิคัดซ้อนทับของข้อมูลภาพสามารถทำได้โดย การกำหนดพื้นที่ขนาดเล็กที่ได้ตัดมาจากข้อมูลภาพใหญ่ในข้อมูลภาพต้นฉบับ แต่มีข้อกำหนดว่าควรที่จะกำหนดจากบริเวณขอบของข้อมูลภาพด้านใดด้านหนึ่งก่อนเพื่อที่จะให้ได้ข้อมูลภาพที่ใหญ่ที่สุดเมื่อต่อกันได้แล้วและเพื่อลดจำนวนครั้งในการต่อ จากนั้นกำหนดให้เป็นหน้าฉากเพื่อที่จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับอีกข้อมูลภาพหนึ่งที่จะนำมาต่อด้วยกัน ซึ่งขนาดของข้อมูลภาพที่ตัดมาควรมีขนาดที่เหมาะสม ลักษณะของการกำหนดบริเวณที่นำมาต่อกันจะแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 พื้นที่ที่ต้องการจะนำมาต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ข้อมูลภาพขนาดใหญ่ที่สุด

### 5.5 ฟังก์ชันพื้นฐานการสหสัมพันธ์[4]

ในการคำนวณค่า  $E(i, j)$  มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 1 แต่จะต้องไม่เกิน 1 หมายความว่า ข้อมูลภาพที่นำมาเปรียบเทียบมีลักษณะที่เหมือนกันทุกประการ

$$E(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \{w(n, m) - \bar{w}\} \{s(i+n-1, j+m-1) - \bar{s}\}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \{w(n, m) - \bar{w}\}^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \{s(i+n-1, j+m-1) - \bar{s}\}^2}} \quad (5.4)$$

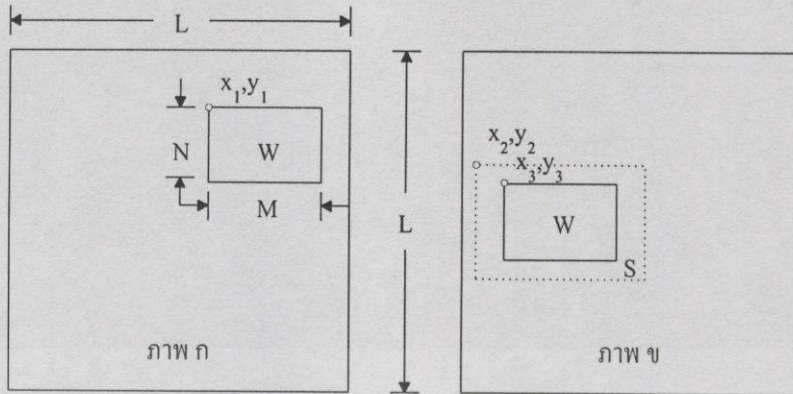
กำหนดให้

$w(n, m)$  ข้อมูลภาพย่อย

$$\bar{w} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w(m, n) \quad \text{ค่าเฉลี่ยข้อมูลภาพ}$$

$s(i+n-1, j+m-1)$  ข้อมูลภาพใหญ่ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด  $\bar{s} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N s(i+n-1, j+m-1)$  ค่าเฉลี่ยข้อมูลภาพ



รูปที่ 5.2 ส่วนที่ซ้อนทับของภาพที่ต้องการหาค่าสหสัมพันธ์

### 5.6 การลบขอบภาพโดยวิธีการเฉลี่ยค่าระดับสีเทา[4]

ภายหลังการคำนวณหาฟังก์ชันซ้อนทับที่เหมือนกันได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการต่อข้อมูลภาพเข้าด้วยกัน ซึ่งในการต่อข้อมูลภาพจะเป็นการนำข้อมูลภาพมาเชื่อมต่อกันด้วยการซ้อนทับ โดยอาศัยฟังก์ชันต่างๆ ที่ได้จากการสหสัมพันธ์ดังในรูปที่ 5.2(ก) จากนั้นประยุกต์ใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นดังรูปที่ 5.2(ข) จะเห็นว่าผลรวมของน้ำหนักของฟังก์ชัน  $f_a$  และ  $f_b$  ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 1 เสมอ วิธีนี้เป็นการเฉลี่ยค่าระดับสีเทาโดยฟังก์ชันดังกล่าว จะแบ่งข้อมูลภาพออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนของข้อมูลที่อยู่ระหว่าง  $y_1$  ถึง  $y_2$  และ  $y_3$  ถึง  $y_4$  กำหนดให้ส่วนของข้อมูลภาพไม่ได้ซ้อนทับกันฟังก์ชันมีค่าเท่ากับ  $g_a(x, y)$  และ  $g_b(x, y)$  ตามลำดับ หรือค่าของข้อมูลภาพไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนของข้อมูลภาพซ้อนทับอยู่ระหว่าง  $y_2$  ถึง  $y_3$  กำหนดให้ฟังก์ชันมีเงื่อนไข  $f_a(y) + f_b(y) = 1$  ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 5.2(ข)

$$g(x, y) = \begin{cases} g_a(x, y) & ; y_1 < y \leq y_2 \\ f_a(y)g_a(x, y) + f_b(y)g_b(x, y) & ; y_2 < y \leq y_3 \\ g_b(x, y) & ; y_3 < y \leq y_4 \end{cases} \quad (5.9)$$

เมื่อให้

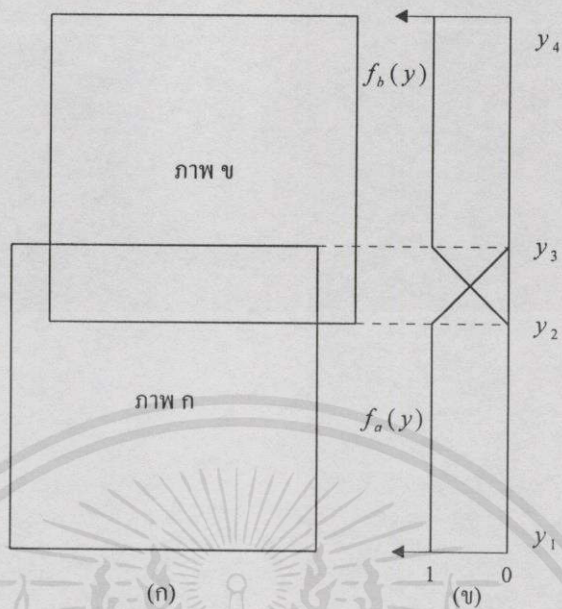
$g(x, y)$  คือ ค่าระดับสีเทาของข้อมูลที่ได้จากการเฉลี่ย

$g_a(x, y)$  คือ ค่าระดับสีเทาของข้อมูลภาพ ก

$g_b(x, y)$  คือ ค่าระดับสีเทาของข้อมูลภาพ ข

$f_a(y), f_b(y)$  คือ ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้



รูปที่ 5.3 ลักษณะการซ้อนทับของข้อมูลภาพ

(ก) ลักษณะการวางซ้อนทับของข้อมูลภาพ ก และ ภาพ ข

(ข) ฟังก์ชันน้ำหนักแบบเชิงเส้น  $f_a(y)$  และ  $f_b(y)$  สำหรับภาพ ก และ ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก่อนปรับ

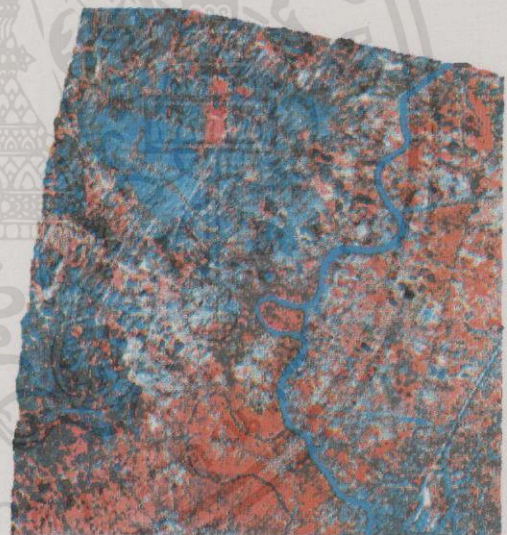


หลังปรับ

รูปที่ 5.4 ภาพก่อนและหลังการปรับค่าความสว่างของภาพจากคามเทียม JERS-1 ในแบนด์ที่ 1



ก่อนปรับ



หลังปรับ

รูปที่ 5.5 ภาพก่อนและหลังการปรับค่าความสว่างของภาพจากคามเทียม MOS - 1 ในแบนด์ที่ 1

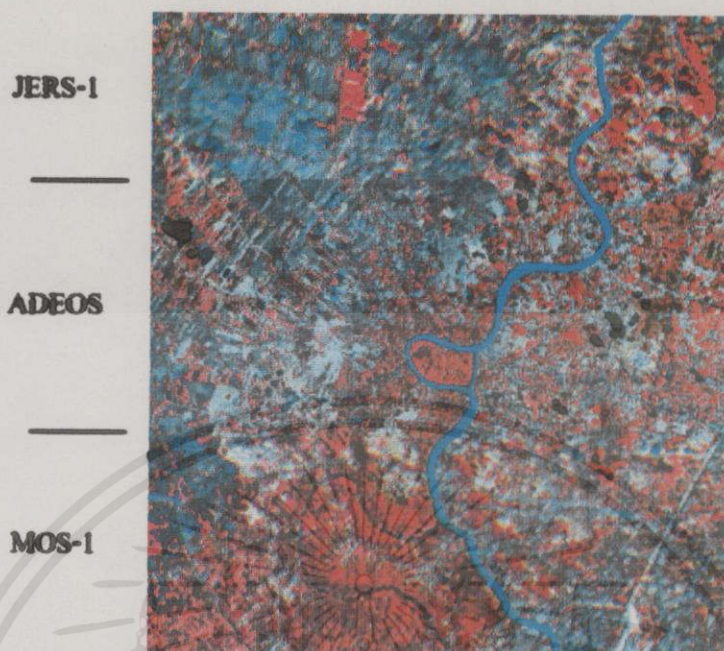
### 5.7 ผลการทดลอง

ภายหลังการปรับค่าความสว่างของข้อมูลภาพให้ใกล้เคียงแล้วจะได้ผลลัพธ์ในรูปที่ 5.6 และ

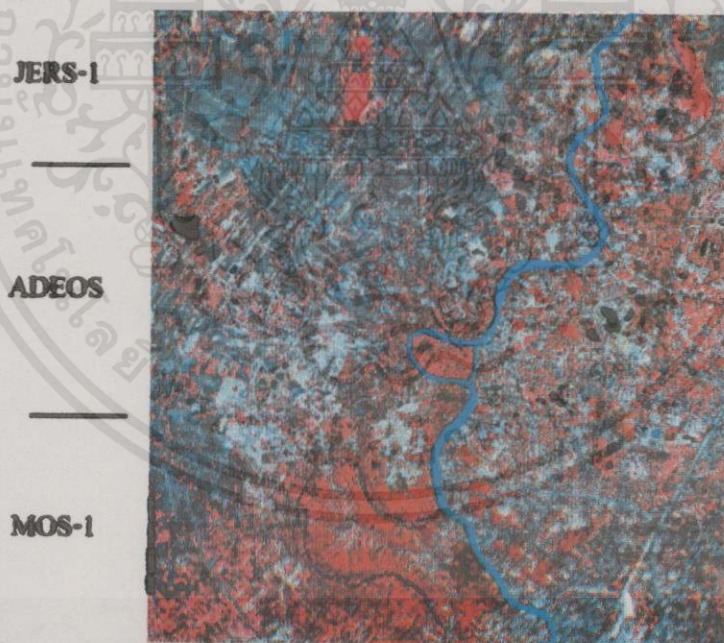
รูปที่ 5.7 เป็นข้อมูลภาพภายหลังการลบรอยตะเข็บขอบของภาพโดยวิธีการผนังค้ำระดับสีเทาทำให้

ข้อมูลภาพที่ได้มีความกลมกลืนกันมากขึ้นจนเป็นภาพเดียวกันและให้ผลที่มีพื้นที่มากกว่าข้อมูลภาพ

เดิม



รูปที่ 5.6 การต่อข้อมูลภาพของภาพจากดาวเทียม ADEOS ดาวเทียม JERS - 1 และ ดาวเทียม MOS - 1



รูปที่ 5.7 การต่อข้อมูลภาพภายหลังที่ผ่านการปรับค่าความสว่างและลบตะเข็บภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักร่วมของข้อมูล ที่มีค่าความละเอียดต่างกัน

## Principal Component Analysis for Multi-Resolution Images

### 6.1 บทนำ

ในการจำแนกประเภทของข้อมูลภาพและการแปลความหมายของข้อมูลภาพด้วยสายตานั้น สามารถที่จะกระทำได้ในกรณีที่เป็นข้อมูลภาพสี ที่ได้มาจากการนำข้อมูลภาพทั้ง 3 แบนด์ ซึ่งมีความยาวคลื่นที่ต่างกันมารวมเข้าด้วยกัน อย่างไรก็ตาม จะพบว่าข้อมูลภาพในบางแบนด์มีค่าสหสัมพันธ์สูงมาก เป็นผลให้ประสิทธิภาพของการนำข้อมูลภาพไปใช้งานลดลง เนื่องจากวัตถุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการสะท้อนช่วงคลื่นสนามแม่เหล็กที่มีความยาวคลื่นสูงต่างกัน ดังนั้นเพื่อที่จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทและการแปลความหมายของข้อมูลภาพ โดยข้อมูลของการสะท้อนทั้งหมดจากข้อมูลภาพที่มีช่วงคลื่นต่างกันและดาวเทียมจะเก็บข้อมูลภาพในลักษณะที่เป็นภาพสี เพื่อให้การจำแนกประเภทและการแปลความหมายข้อมูลภาพของวัตถุที่ต่างชนิดกันในเวลาเดียวกันทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้เสนอวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของข้อมูลภาพเพื่อใช้ในการลดมิติของข้อมูลภาพ ในขณะที่ข้อมูลภาพซึ่งมีช่วงคลื่นที่ต่างกันนั้นจะถูกแปลงไปและผลของข้อมูลภาพองค์ประกอบที่ได้จะถูกนำมาใช้เพียง 2 หรือ 3 องค์ประกอบเท่านั้นก็จะให้ค่าผลรวมความแปรปรวนทั้งหมดที่เกือบจะเท่ากับภาพต้นฉบับ จะอย่างไรก็ตาม ระบบข้อมูลภาพจากดาวเทียมของแต่ละดวงนั้นจะให้ค่าความละเอียดที่ต่างกันออกไปจากดาวเทียมดวงอื่นๆ ก่อนที่จะนำวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักมาใช้ แต่ก่อนอื่นจะต้องปรับแก้ความพี้ยนเชิงเรขาคณิตระหว่างข้อมูลภาพที่จะนำมาใช้โดยการใช้อนุกรมฟูรีเยร์อันดับที่ 2 และชักตัวอย่างข้อมูลภาพด้วยวิธีการแทรกค่าเพื่อให้ได้ข้อมูลภาพที่มีค่าความละเอียดเท่ากันทั้งหมดทุกข้อมูลภาพสุดท้ายจะเป็นการปรับค่าสว่างของข้อมูลภาพทั้งหมดให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด

### 6.2 ทฤษฎีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก[5, 6, 15, 17]

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก เป็นวิธีการวิเคราะห์แบบ Linear combination ของข้อมูลภาพที่จะรักษาไว้ซึ่งค่าความแปรปรวน(Variance) ของแกนเดิม(Original axis) ในขณะที่แกนใหม่ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตามก็ยังคงต้องมีให้ลดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ จะถูกสร้างขึ้นมา โดยมีการสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลภาพจากแกนเดิมต่างๆ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของตัวแปร  $X$  จะเป็นการแปลงเชิงเส้น(Linear transformation) ของค่าความแปร

ปรวนจากข้อมูลเดิมสู่ตัวแปรใหม่  $Y$  โดยที่  $Y$  นั้น จะไม่มีค่าสหสัมพันธ์ ถึงแม้ว่าข้อมูลในตัวแปร  $X$  จะมีค่าสหสัมพันธ์สูงก็ตาม การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักนี้ เป็นเทคนิคทางสถิติที่อยู่บนพื้นฐานของ Variance และ Covariance ของกลุ่มข้อมูล ค่า Variance นี้เป็นการแตกกระจาย(Scatter) ที่ได้ ปรากฏอยู่ในหนึ่งตัวแปรของกลุ่มข้อมูล ส่วน Covariance จะเป็นการวัดการแตกกระจาย ในระหว่างกลุ่มตัวแปร

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของตัวแปร  $X$  ทั้งหมด  $n$  ตัว เป็นการกำหนดการแปลงเชิงเส้นของทุกๆ การแปรเปลี่ยนในตัวแปรเดิม สู่ตัวแปรใหม่  $Y$  ทั้งหมด  $n$  ตัว ในการแปลงนี้ กำหนดให้ตัวแปรลำดับแรก (คือ องค์ประกอบแรก) ของกลุ่มตัวแปร  $Y$  มีค่าความแปรปรวนสูงสุด จากความแปรปรวนทั้งหมด ส่วนตัวแปรลำดับที่สองของกลุ่มของตัวแปร  $Y$  จะมีความแปรปรวนสูงสุดจากความแปรปรวนที่เหลือและไล่ลงไปสำหรับตัวแปรถัดไป จุดประสงค์หลักของทฤษฎีในการแปลงก็คือ การได้คืนมาของการแปรเปลี่ยนทั้งหมด เพื่อที่จะรักษาเอาไว้ซึ่งการแปรเปลี่ยนทุกอย่างที่ต้องการ ดังนั้น จำนวนการแปรเปลี่ยนที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในตัวแปรหลายๆ นั้น จะมีค่าความแปรปรวนน้อย จนอาจจะพิจารณาได้ว่า มีค่าน้อยมากและสามารถตัดทิ้งได้ ถ้าหากมีการตัดเอาตัวแปรหลายๆ ดังกล่าวทิ้งไป ก็จะเป็นการลดขนาดมิติของภาพ

ตัวแปรที่ได้หลังจากการแปลงคือกลุ่มตัวแปร  $Y$  ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก จะไม่ให้ค่าสหสัมพันธ์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของการแปลง เรียกว่า Orthogonality หรือการขาดหายไปของค่าสหสัมพันธ์ของแกน ภายหลังจากการแปลง จะเกิดจากผลของการแปลงนั่นเอง แม้ว่าในกลุ่มตัวแปร  $X$  เดิมจะมีค่าสหสัมพันธ์สูงก็ตาม โดยปกติแล้ว จำนวนตัวแปรหลังจากการแปลงจะน้อยลงเมื่อตัวแปร  $X$  เดิมจะมีค่าสหสัมพันธ์สูงขึ้น ข้อมูลที่มีค่าสหสัมพันธ์สูง เป็นข้อมูลสำหรับการใช้ค่าของตัวแปรหนึ่ง ในการทำนายค่าที่สอดคล้องในตัวแปรอื่นๆ ส่วนเกินของข้อมูลดังกล่าวนี้ จะไม่ปรากฏในกลุ่มตัวแปรที่ขาดความสัมพันธ์กัน ดังนั้น ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กัน สามารถแสดงได้ด้วยกลุ่มของตัวแปรที่ไม่สัมพันธ์กัน ได้กระชับกว่ากลุ่มตัวแปรที่สัมพันธ์กัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเป็นการแปลงเชิงเส้น คือ

$$Y = CX + B \quad (6.1)$$

เมื่อกำหนดให้

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_q \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_p \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่เนื้อหา, และต้อง X ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \cdots & c_{1p} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & \cdots & c_{2p} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & \cdots & c_{3p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{q1} & c_{q2} & c_{q3} & \cdots & c_{qp} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_q \end{bmatrix}$$

โดยที่  $q \leq p$  มีเงื่อนไขกำหนดว่าการแปลงนั้นต้องได้ซึ่ง Geometric orthogonality นั่นคือ  $CC' = I$  โดย  $C'$  เป็นทรานสโพสของ  $C$  และ  $I$  เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ และที่เพิ่มขึ้นมา คือ ตัวแปรหลังการแปลง  $Y$  ต้องตั้งฉากกัน นั่นคือ ไม่มีความสัมพันธ์กัน การกำหนดเงื่อนไขนี้ให้พิจารณาจาก

$E(X) = m_x$ , เมื่อ  $m_x$  เป็นเวกเตอร์ของค่าเฉลี่ยของตัวแปร  $X$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} E(Y) &= E(CX + B) \\ &= CE(X) + B \\ &= Cm_x + B \\ &= m_y \end{aligned} \tag{6.2}$$

เนื่องจากไม่มีข้อกำหนดจำกัดในการเลื่อนของ  $Y$  ไปยังจุดกำเนิดใหม่ ดังนั้น จึงสามารถเลือกให้  $m_y = 0$  จากสมการที่ (6.2) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Cm_x + B &= 0 \\ \text{หรือ} \quad -Cm_x &= B \end{aligned} \tag{6.3}$$

แทนสมการที่ (6.3) ลงใน (6.1) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Y &= CX + (-Cm_x) \\ Y &= C(X - m_x) \end{aligned} \tag{6.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปัญหาคือ ให้คำนวณหา  $C$  ภายใต้เงื่อนไขของ  $CC' = I$

เนื่องจาก  $m_x = 0$  ดังนั้นเมตริกซ์ Covariance  $Y$  หาได้จาก

$$\begin{aligned} E(Y Y') &= E\{[C(X - m_x)][C(X - m_x)]'\} \\ &= CE[(X - m_x)(X - m_x)']C' \\ &= C \Sigma C' \end{aligned} \quad (6.5)$$

เมื่อ  $\Sigma$  เป็นเมตริกซ์ Covariance ขนาด  $p * p$  ของตัวแปร  $X$

ในการบังคับให้ได้เงื่อนไขที่ตัวแปร  $Y$  ไม่มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้น ความสัมพันธ์ที่ได้มาคือ

$$C \Sigma C' = \Lambda \quad (6.6)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{33} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \lambda_{qq} \end{bmatrix}$$

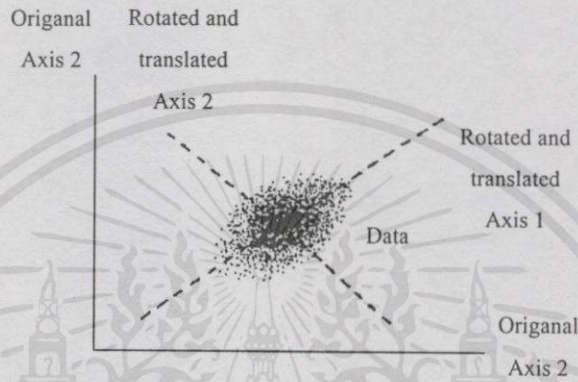
$\Lambda$  คือ เมตริกซ์ Covariance ของตัวแปร  $Y$  ซึ่งเป็นเมตริกซ์

$\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{33}, \dots, \lambda_{qq}$  เป็นทอมในแนวทแยง โดยสมาชิกที่ไม่อยู่ในแนวทแยงจะเป็นศูนย์ทั้งหมด ดังนั้นค่า Covariance ต่างที่เป็นศูนย์ ซึ่งหมายความว่า  $Y$  ต่างๆ ไม่มีความสัมพันธ์กัน  $\lambda_{11}$  เป็นค่าความแปรปรวนของตัวแปร  $Y$  หรือองค์ประกอบแรกของตัวแปร  $Y$  ส่วน  $\lambda_{22}$  เป็นค่าความแปรปรวนของตัวแปร  $Y$  หรือองค์ประกอบหลักที่ 2 และอื่นๆ

จากสมการที่ (6.6) จะเห็นว่า  $\Lambda$  คือ เมตริกซ์ Eigenvalue สำหรับ  $\Sigma$  และ  $C$  เป็นเมตริกซ์ Eigenvector ที่สอดคล้อง ดังนั้น จึงต้องทำการคำนวณหา Eigenvalue ต่างๆ โดยจะพบว่า  $\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{33}, \dots, \lambda_{qq}$  เหล่านี้ ใช้แสดงแทนจำนวนค่าความแปรปรวนทั้งหมดที่อยู่บนแกนของตัวแปร  $Y$  เงื่อนไขของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักคือ ค่าความแปรปรวนทั้งหมดของกลุ่มข้อมูลเดิม(ผลบวกของของสมาชิกในแนวทแยง  $\Sigma$ ) เท่ากับค่าความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล หลังผ่านการแปลง (ผลบวกของสมาชิกในแนวทแยง  $\Lambda$ )

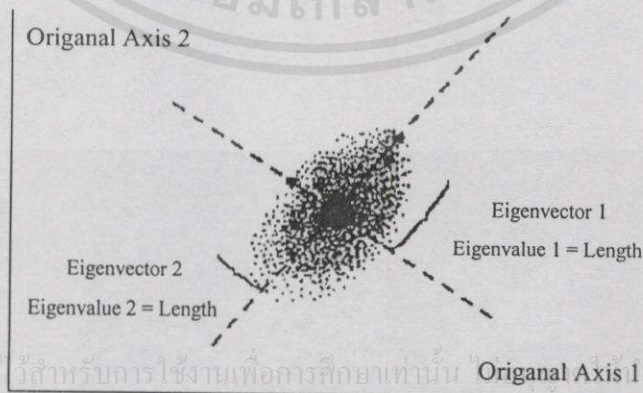
การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักที่นำมาใช้กับข้อมูลรีโมทเซนซิง สามารถอธิบายให้เข้าใจได้ง่าย เมื่อโดยใช้รูปเชิงเรขาคณิต กระบวนการของการแปลงแบบเชิงเส้นเมื่อตัวแปรเดิมมีการเลื่อน

และการหมุน ดังรูปที่ 6.1 ตำแหน่งของแกนต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลแล้วถูกเปลี่ยนไป ตำแหน่งของกลุ่มข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับกลุ่มข้อมูลอื่นจะไม่เปลี่ยน ตัวอย่างของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักนั้น เปรียบเทียบได้กับหลอดที่บรรจุลูกปิงปองหลายๆ ลูก ถ้ามองจากปลายข้างหนึ่งของหลอดปรากฏว่า จะเห็นลูกปิงปองริมสุดเพียงลูกเดียว ถ้าพลิกดูด้านข้างหลอดจะเห็นปิงปองทุกลูก ซึ่งก็เหมือนกับการมองภาพขององค์ประกอบหลักต่างๆ



รูปที่ 6.1 การหมุนของแกนในสองมิติ

ค่า Eigenvalue และ Eigenvector มีความสัมพันธ์กับการแตกกระจายของข้อมูลในรูปที่ 6.2 Eigenvector นั้น จะอยู่บนแกนที่แปลงไปแล้ว และความยาวของ Eigenvector ต่างๆ คือ ค่า Eigenvalue ดังนั้น Eigenvector ที่ยาวที่สุด ถูกเลือกเป็นแกนแรกของการแปลง หรือองค์ประกอบหลักลำดับที่ 1 ส่วนความยาวที่ 2 ก็ถูกเลือกเป็นองค์ประกอบหลักลำดับที่ 2 และอื่นๆ ถัดไป สำหรับกรณีที่มีตัวแปรเพียง 2 ตัวนั้น คู่ของ Eigenvector - Eigenvalue จะสอดคล้องกับแกนยาวสุดของวงรีที่ล้อมรอบข้อมูลทั้งหมด

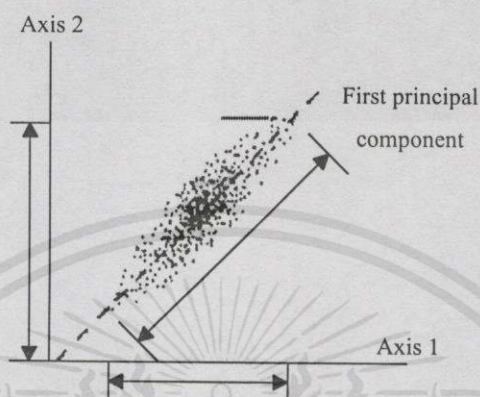


รูปที่ 6.2 Eigenvector และ Eigenvalue ในสองมิติ

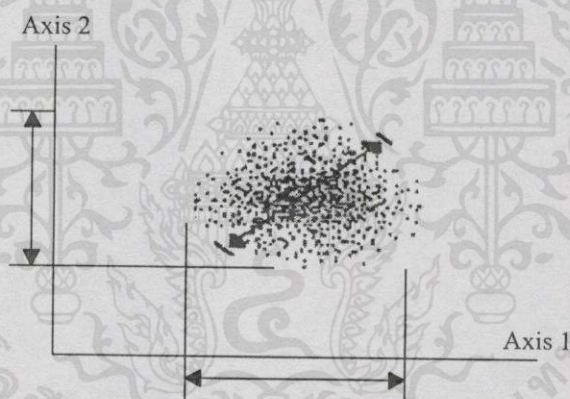
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "Original Axis 1" ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ ไม่สามารถรับประกันความถูกต้องของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของสเก็ตเตอร์แกรม แสดงให้เห็นถึงค่าองศาของสหสัมพันธ์ที่ปรากฏในข้อมูล ถ้า สเก็ตเตอร์แกรมที่ยาว และแคบ โดยไม่ขนานกับแกนเดิม แสดงว่าข้อมูลมีค่าสหสัมพันธ์สูง ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของข้อมูลที่มีค่าสหสัมพันธ์สูง



รูปที่ 6.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักลำดับแรกของข้อมูลที่มีค่าสหสัมพันธ์ต่ำ

สเก็ตเตอร์แกรมที่มีลักษณะเป็นวงกลม ดังรูปที่ 6.4 แสดงให้เห็นถึงข้อมูลที่มีค่าสหสัมพันธ์ต่ำ องค์ประกอบหลักต่างๆ ของข้อมูลที่ไม่สัมพันธ์กันนี้ จะไม่มีแกนใดที่ลากผ่านวงกลม แล้วได้ข้อมูลมากกว่าการโปรเจกชันข้อมูลลงบนแกนเดิม สมาชิกต่างๆ ในเมตริกซ์ โคลดคิง ในตารางที่ 6.1 เป็นการแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างตารางของโคลดคิงสำหรับ 3 ตัวแปร โดยที่คอลัมน์แรกของโคลดคิงในตารางที่ 6.1 แสดงให้เห็นถึงตัวแปรหลังจากการแปลงเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีค่าความแปรปรวนที่ได้จากตัวแปรทั้ง 3 ของข้อมูลเดิม ในจำนวนค่าเกือบเท่ากับค่าความแปรปรวนทั้งหมดของตัวแปรเดิม ในกรณีที่ค่าโคลดคิงเป็นลบนั้น แสดงให้เห็นถึงการรวมในทางตรงกันข้าม คอลัมน์ที่ 2 ของตารางที่ 6.1 จึงแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างตัวแปรเดิมลำดับที่ 1 (ค่าโคลดคิง = 0.8) กับตัวแปรเดิมลำดับที่ 2 (ค่าโคลดคิง = 0.9) เป็นต้น

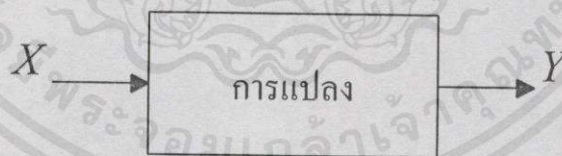
ตารางที่ 6.1 ตัวอย่างความแตกต่างของระหว่างตัวแปรเดิมลำดับที่ 1 และ ลำดับที่ 2  
ตัวแปรหลังการเปลี่ยนแปลง

		1	2	3
ตัวแปรเดิม	1	0.7	0.8	-0.1
	2	0.5	-0.9	0.3
	3	0.6	0.2	0.5

### 6.3 วิธีการประยุกต์ทฤษฎีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักกับงานรีโมทเซนซิง

#### 6.3.1 นิยามของตัวแปร

จากทฤษฎีของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักในหัวข้อที่ 6.2 เมื่อ  $X$  เป็นข้อมูลเดิม นำมาแปลงเพื่อให้ได้ข้อมูลใหม่ คือ  $Y$  สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรม ได้ดังรูปที่ 6.5 ในทางรีโมทเซนซิง ข้อมูลเดิม  $X$  ที่จะทำให้การวิเคราะห์คือ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ประกอบด้วย แบนด์ที่ 1, แบนด์ที่ 2 และ แบนด์ที่ 3 (สมมติว่าดาวเทียมดวงนั้นมีข้อมูล 3 แบนด์) นั้น หมายความว่า ข้อมูล  $X$  ประกอบด้วย ตัวแปร 3 ตัว คือ  $x_1, x_2$  และ  $x_3$  โดยกำหนดให้เป็นข้อมูลแบนด์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ เมื่อ  $X$  ผ่านการแปลงแล้ว จะได้ข้อมูลใหม่ คือ  $Y$  ซึ่งประกอบด้วย  $y_1, y_2$  และ  $y_3$  เช่นกัน จากทฤษฎีจะได้ว่า  $y_1$  คือ องค์ประกอบหลักที่ 1 ให้ค่าความแปรปรวนสูงสุด  $y_2$  คือ องค์ประกอบหลักที่ 2 ให้ค่าความแปรปรวนต่ำลงมา และเรียงไปจนถึง  $y_3$  คือ องค์ประกอบหลักที่ 3 ให้ค่าความแปรปรวนต่ำสุด



รูปที่ 6.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบ

#### 6.3.2 วิธีการจำแนกประเภทและการแปลความหมายข้อมูลภาพ

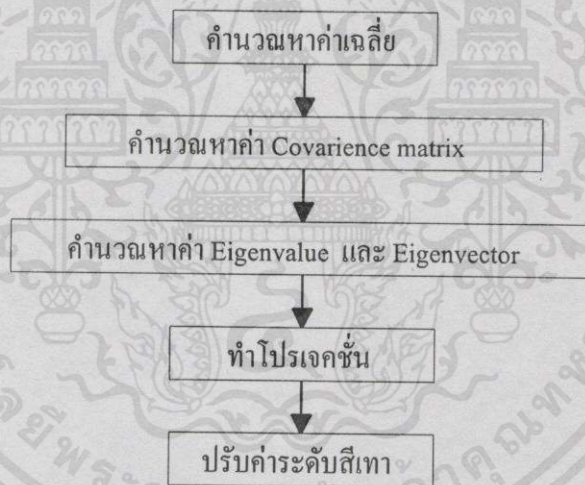
ในการที่จะทำการจำแนกและการแปลความหมายของข้อมูลภาพบนพื้นดินโดยอาศัยภาพถ่ายดาวเทียมด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักที่นำมาใช้ในที่นี้ ได้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจากดาวเทียมถึง 3 ดวง รวมมีข้อมูลภาพจำนวน 9 ภาพ โดยมีเงื่อนไขว่า เป็นข้อมูลที่ได้จากพื้นที่เดียวกัน แต่เวลาต่างกันออกไป ดังนั้น สำหรับการจำแนกประเภทและการแปลความหมายของข้อมูลภาพโดย 3 แบนด์แรก เป็นภาพถ่ายดาวเทียมวันหนึ่ง(ADEOS) อีก 3 แบนด์ เป็นภาพถ่ายดาวเทียมของอีกวันหนึ่ง(JERS - 1) ส่วนที่เหลือ 3 แบนด์หลัง เป็นภาพถ่ายดาวเทียมของวันที่ 3

(MOS-1) รวมทั้งหมดจะเป็น ข้อมูล 9 แบนด์ หรือ 9 ภาพ ในการแปลงจะได้ข้อมูลใหม่ 9 ภาพ หรือ 9 องค์ประกอบหลักนั่นเอง จะเห็นว่า จำนวนแบนด์ของข้อมูลภาพ เป็นปัจจัยกำหนดจำนวนองค์ประกอบทั้งหมด ที่จะได้หลังผ่านการแปลงแล้ว

### 6.3.3 วิธีการแปลงข้อมูลภาพ

ในการแปลงด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก จะมีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ขั้นที่ 1 คำนวณหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลแต่ละแบนด์
- ขั้นที่ 2 คำนวณหาเมตริกซ์ Covariance
- ขั้นที่ 3 คำนวณหา Eigenvalue
- ขั้นที่ 4 คำนวณหา Digenvector
- ขั้นที่ 5 การทำโปรเจกชัน
- ขั้นที่ 6 ทำการปรับระดับข้อมูลใหม่ให้อยู่ในช่วง 0 - 255 ระดับ



รูปที่ 6.6 ขั้นตอนการแปลงข้อมูลภาพ

### 6.3.4 วิธีการคำนวณหาเมตริกซ์ Covariance

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$\Sigma = (X - \bar{X})(X - \bar{X})' \quad (6.7)$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลเดิม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำ หัดดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(X - \bar{X})'$  คือ ทรานสโพซของ  $(X - \bar{X})$

จากนิยามในหัวข้อที่ 6.3.1 จะได้

$$\bar{X} = \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5, \bar{x}_6, \bar{x}_7, \bar{x}_8, \bar{x}_9$$

โดย

$\bar{X}$  = ค่าเฉลี่ยของข้อมูลเดิมในแต่ละแบนด์

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \bar{x}_3 \\ \bar{x}_4 \\ \bar{x}_5 \\ \bar{x}_6 \\ \bar{x}_7 \\ \bar{x}_8 \\ \bar{x}_9 \end{bmatrix}$$

จะได้

$$(X - \bar{X}) = [(x_1 - \bar{x}_1)(x_2 - \bar{x}_2)(x_3 - \bar{x}_3)(x_4 - \bar{x}_4)(x_5 - \bar{x}_5) \dots (x_8 - \bar{x}_8)(x_9 - \bar{x}_9)]$$

จะรูปสมการใหม่

$$(x_i - \bar{x}_i) = \begin{bmatrix} x_{i,1} - \bar{x}_i \\ x_{i,2} - \bar{x}_i \\ x_{i,3} - \bar{x}_i \\ \vdots \\ x_{i,j} - \bar{x}_i \end{bmatrix}$$

เมื่อ

$x_{i,j}$  = ข้อมูลภาพตำแหน่งที่  $j$  ของภาพแบนด์ที่  $i$

โดยข้อมูลภาพทั้ง 3 ภาพ ทุกแบนด์ควรจะมีขนาดเท่ากัน ในที่นี้ได้กำหนดให้ใช้ขนาดของข้อมูลภาพ เพื่อความสะดวกในการใช้งานกับภาพขนาดต่างๆ ได้ ในที่นี้ สมมติข้อมูลภาพมีขนาด  $256 \times 256$  จุดภาพ มีลำดับตำแหน่งของข้อมูลภาพ ดังนี้  $i$  ถึง  $j$  ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_i = \begin{bmatrix} x_{i,1} & x_{i,2} & x_{i,3} & \cdots & x_{i,256} \\ x_{i,257} & x_{i,258} & x_{i,259} & \cdots & x_{i,512} \\ x_{i,513} & x_{i,514} & x_{i,515} & \cdots & x_{i,768} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,65281} & x_{i,65282} & x_{i,65283} & \cdots & x_{i,65536} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (6.7) เขียนเทอม  $(X - \bar{X})'$  และ  $(X - \bar{X})$  ได้เป็น

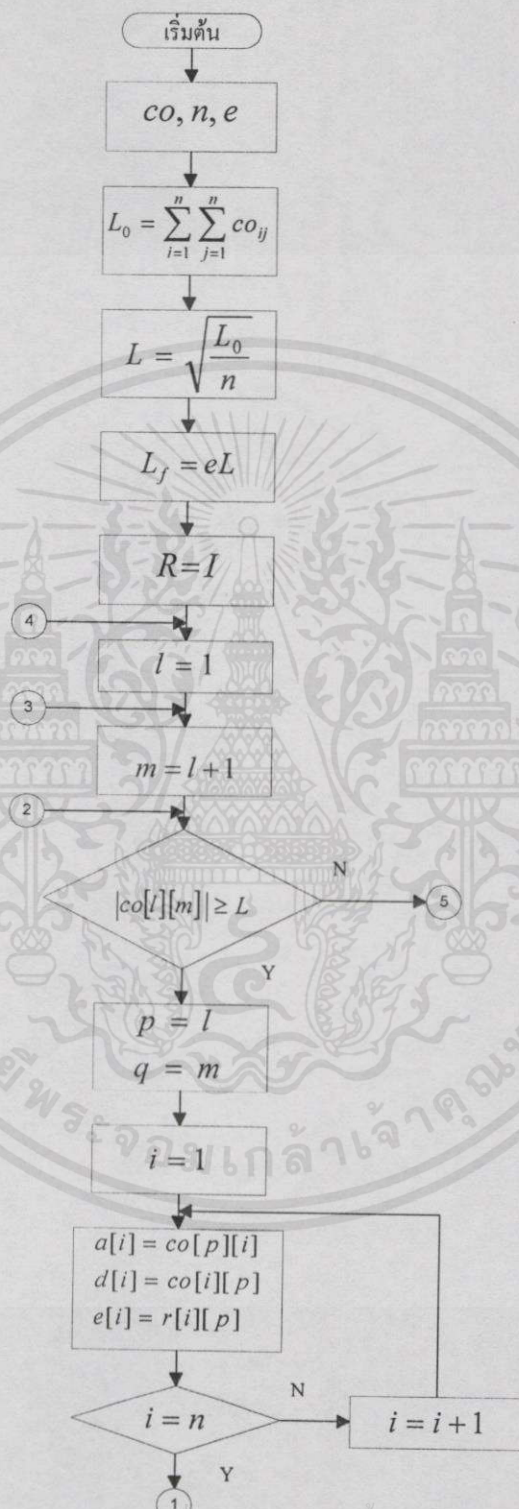
$$\begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & \cdots & x_{1,65536} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & \cdots & x_{2,65536} \\ x_{3,1} & x_{3,2} & x_{3,3} & \cdots & x_{3,65536} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{9,1} & x_{9,2} & x_{9,3} & \cdots & x_{9,65536} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} & x_{3,1} & \cdots & x_{9,1} \\ x_{1,2} & x_{2,2} & x_{3,2} & \cdots & x_{9,2} \\ x_{1,3} & x_{2,3} & x_{3,3} & \cdots & x_{9,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1,65536} & x_{2,65536} & x_{3,65536} & \cdots & x_{9,65536} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \Sigma_{1,1} & \Sigma_{1,2} & \Sigma_{1,3} & \cdots & \Sigma_{1,9} \\ \Sigma_{2,1} & \Sigma_{2,2} & \Sigma_{2,3} & \cdots & \Sigma_{2,9} \\ \Sigma_{3,1} & \Sigma_{3,2} & \Sigma_{3,3} & \cdots & \Sigma_{3,9} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Sigma_{9,1} & \Sigma_{9,2} & \Sigma_{9,3} & \cdots & \Sigma_{9,9} \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

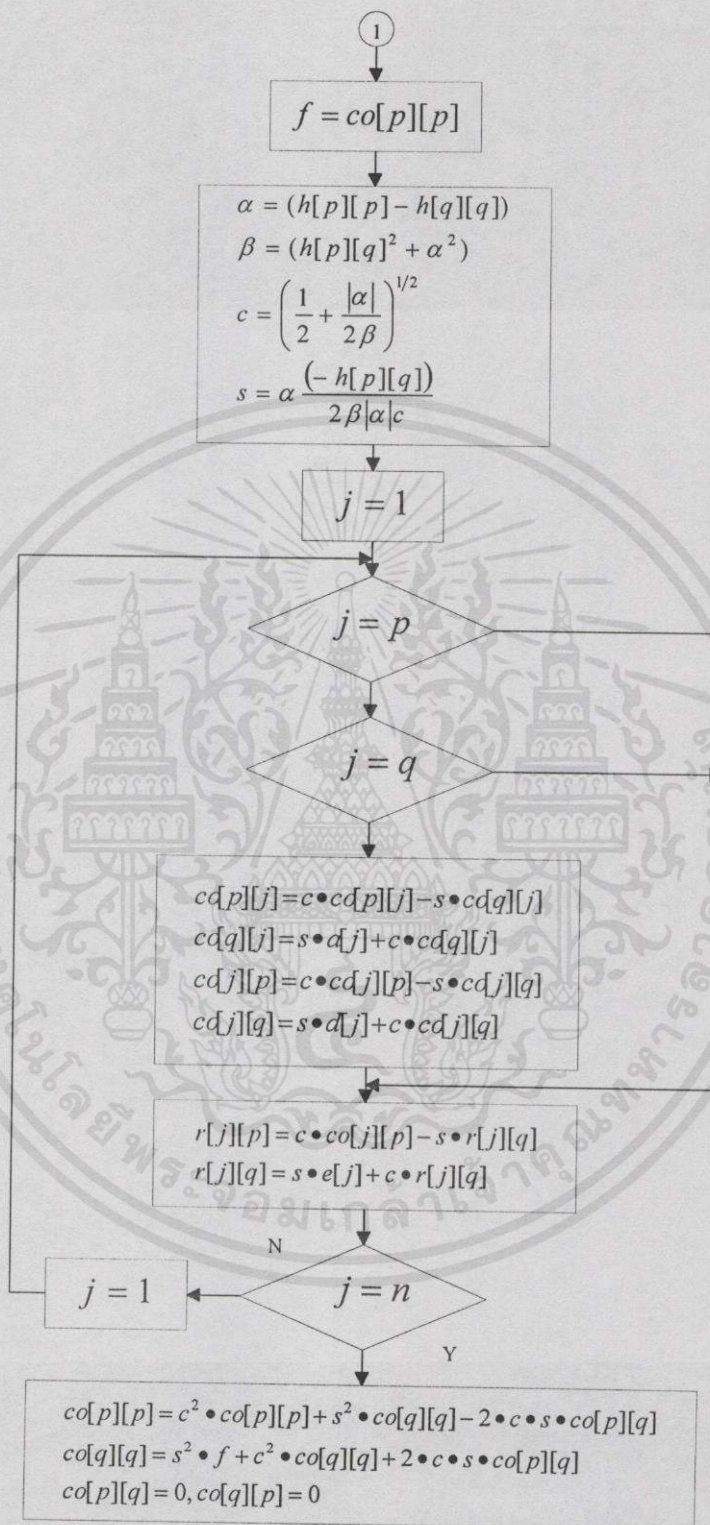
### 6.3.5 วิธีการคำนวณหา Eigenvalue, Eigenvector

ค่า Eigenvalue และ Eigenvector ขององค์ประกอบหลักต่างๆ คำนวณหาได้จากเมตริกซ์ Covariance ที่ได้จากข้อมูลเดิม โดยวิธีการของ Jacobi [15, 16] ซึ่งแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 6.7 ภายหลังจากหาค่าผลรวมของเมตริกซ์ Covariance และนำค่าสมบูรณ์ของเมตริกซ์ Covariance มาเปรียบเทียบกับค่า  $L$  ถ้าเงื่อนไขเป็นจริงจึงทำการกำหนดเวกเตอร์เมตริกซ์จาก Covariance จนครบทุกข้อมูล แล้วทำขั้นที่ 1 ต่อไปในรูปที่ 6.8 แต่ถ้าเงื่อนไขไม่เป็นจริงให้ทำในขั้นตอนที่ 5 ทางขวามือ ภายหลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนที่ 1 แล้วให้ไปตรวจสอบเงื่อนไขในขั้นตอนที่ 6 ต่อ และถ้าเงื่อนไขเป็นจริงทั้งหมดจึงเสร็จการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector จากหลักการของ Jacobi

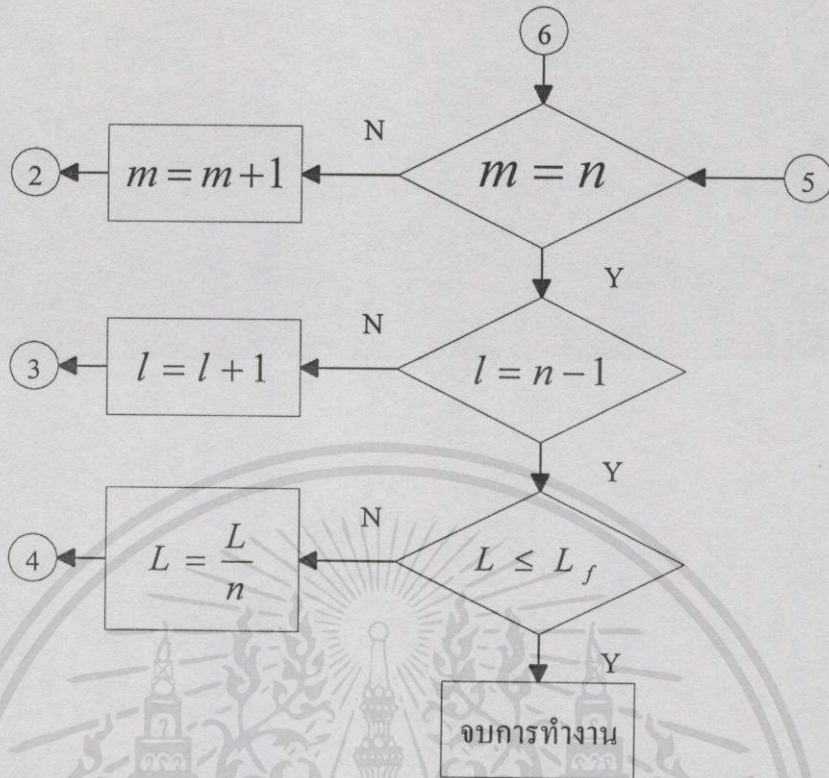
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 6.7 โพลีชาร์ทการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 6.8 โฟลว์ชาร์ตการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector (ต่อ)



รูปที่ 6.9 โฟลว์ชาร์ทการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector (ต่อ)

### 6.3.6 วิธีการโปรเจกชัน

โดยทั่วไปการใช้ค่า Eigenvector ของแต่ละองค์ประกอบหลักมาคูณกับข้อมูลเดิม ( $X$ ) จะได้ข้อมูลใหม่ ( $Y$ ) ดังนี้

สูตรการคำนวณข้อมูลใหม่ ( $Y_i$ ) ดังตัวอย่าง

$$Y_i = \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \end{bmatrix} * X \tag{6.9}$$

โดยที่

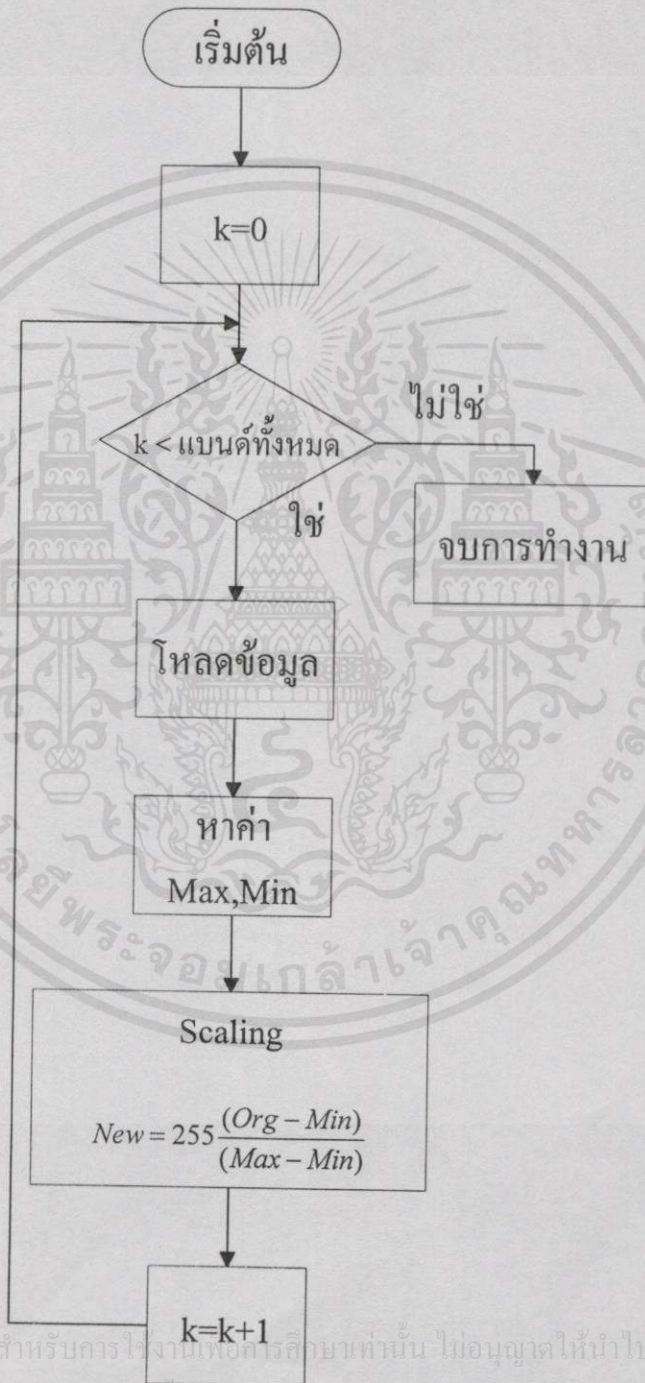
$$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \end{bmatrix}$$

คือเมตริกซ์ Eigenvector ขององค์ประกอบใหม่ที่ได้จากการคำนวณหลักการของ Jacobi

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

### 6.3.7 การสเกลลิง

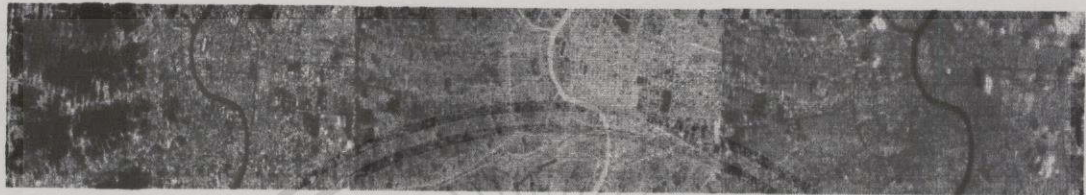
ข้อมูลที่ได้จากการทำโปรเจกชัน จะมีระดับสีเทาที่ไม่ได้อยู่ในช่วง 0 – 255 ระดับ ซึ่งจะทำให้การใช้ข้อมูลไม่มีความหมาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับค่าระดับสีเทาของแต่ละองค์ประกอบหลักใหม่ทั้งหมดให้อยู่ในช่วง 0 – 255 ระดับ มีวิธีการดังแสดงในโฟลว์ชาร์ทรูปที่ 6.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีรูปที่ 6.10 โฟลว์ชาร์ทการสเกลลิง เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6.4 ผลการทดลอง

จากการนำข้อมูลภาพจากดาวเทียมทั้ง 9 แบนด์ ของดาวเทียม 3 ดวง คือ จากดาวเทียม ADEOS จากดาวเทียม JERS - 1 และ จากดาวเทียม MOS - 1 มาผ่านการปรับแก้ให้มีค่าความละเอียดของข้อมูลภาพเท่ากัน แล้วนำมาผ่านการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก จนได้ข้อมูลภาพผลลัพธ์ดังในรูปที่ 6.11



Component 1 ( $\lambda = 3.8203$ )

Component 2 ( $\lambda = 2.0670$ )

Component 3 ( $\lambda = 1.1901$ )



Component 4 ( $\lambda = 0.4765$ )

Component 5 ( $\lambda = 0.2628$ )

Component 6 ( $\lambda = 0.2486$ )



Component 7 ( $\lambda = 0.2082$ )

Component 8 ( $\lambda = 0.0535$ )

Component 9 ( $\lambda = 0.0267$ )

รูปที่ 6.11 ภาพที่ได้จากการคำนวณหา PCA



รูปที่ 6.12 การรวมภาพทั้งสามแบนด์

## บทที่ 7

# บทสรุปและข้อเสนอแนะ

### 7.1 บทสรุป

จากวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 เพื่อต้องการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมที่ต่างประเภทกันนำมาต่อเข้าด้วยกัน และเพื่อต้องการศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ในการทดลองนี้ ได้นำข้อมูลภาพมาจาก ดาวเทียมต่างๆ กันดังนี้ ADEOS มีความละเอียด 16 เมตร x 16 เมตร JERS - 1 มีความละเอียด 18 เมตร x 24 เมตร และ MOS - 1 มีความละเอียด 50 เมตร x 50 เมตร ตามลำดับ โดยกำหนดให้ข้อมูลภาพจากดาวเทียม ADEOS เป็นข้อมูลภาพอ้างอิงหรือต้นฉบับ และให้ข้อมูลภาพจากดาวเทียม JERS - 1 และ MOS - 1 เป็นข้อมูลภาพที่จะต้องทำการนำมาต่อ แต่ในความเป็นจริงแล้วสามารถที่จะกำหนดให้ข้อมูลภาพของภาพใดเป็นข้อมูลภาพต้นฉบับก็ได้โดยข้อมูลภาพที่จะได้นำมาใช้ในการทดลองนั้น ได้พิจารณาจากพื้นที่ของกรุงเทพมหานคร ลักษณะของข้อมูลภาพจากดาวเทียม JERS - 1 และ MOS - 1 เมื่อสังเกตจะเห็นว่าลักษณะของแม่น้ำจะเบี่ยงเบนไปจากแนวตั้งเมื่อเทียบกับแม่น้ำของข้อมูลภาพ ADEOS

ในขั้นตอนการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตนั้น ได้ใช้หลักการของการซ้อนภาพ (Registration images) ที่อาศัยการคำนวณแบบโพลีโนเมียล อันดับที่ 2 ที่เรียกว่า Least Square method สิ่งที่สำคัญในการนำหลักการนี้มาใช้คือการกำหนดจุดควบคุมบนพื้นดิน (Ground Control Points) บนข้อมูลภาพทั้งสามให้มีจำนวนจุดที่สัมพันธ์กันมากที่สุดและจุดควบคุมบนพื้นดินควรที่จะกระจายตลอดทั้งภาพด้วย ยิ่งกำหนดให้มีจำนวนจุดควบคุมบนพื้นดินให้สัมพันธ์กันมากเท่าไรก็จะยิ่งทำให้ผลที่ได้จากการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตของข้อมูลภาพนั้นจะได้ข้อมูลภาพมีความใกล้เคียงกับข้อมูลภาพต้นฉบับมากขึ้น และจากข้อมูลภาพผลลัพธ์จะสังเกตเห็นว่ามีพิกัดที่เป็นจุดสีดำกระจายอยู่ทั่วไปบนข้อมูลภาพของภาพจากดาวเทียม JERS - 1 และ MOS - 1 ซึ่งเป็นผลมาจากพิกัดดังกล่าวไม่มีข้อมูลใดแสดงอยู่ถึงแม้ค่าพิกัดที่ได้จากการคำนวณจะเป็นจำนวนเต็มก็ตาม อีกทั้งโดยความเป็นจริงแล้วพิกัดที่ได้จากการคำนวณสมการโพลีโนเมียล อันดับที่ 2 จะอยู่ในลักษณะจำนวนทศนิยมซึ่งไม่สามารถที่จะแสดงผลออกทางจอภาพได้ แต่เพื่อที่จะให้แสดงผลให้เห็นผลจากการทดลองจึงได้ทำการปิดเศษพิกัดที่เป็นจำนวนทศนิยมดังกล่าวให้อยู่ในจำนวนเต็ม ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.12 เพื่อที่จะให้ได้ข้อมูลภาพจากดาวเทียมทั้ง 3 ประเภท ที่มีความละเอียดเท่ากันและเพื่อที่จะได้ข้อมูลภาพที่ขาดหายไปในช่วงการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตในพิกัดที่เป็นจำนวนเต็ม จึงต้องทำการชักตัวอย่างข้อมูลภาพใหม่ (Resampling) ด้วยวิธีการคำนวณในแบบการแทรกค่าข้อมูล (Interpolation) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการแทรกค่าในแบบคิวบิกสไปน์ เนื่องจากในการคำนวณนั้นจะได้ค่าจำนวนข้อมูลภาพโดย

รอบจากพิกัดที่ต้องการถึง 4 ข้อมูล ในเวลาเดียวกันเพื่อประโยชน์ในการหาค่าข้อมูลที่สอดคล้องกับข้อมูลโดยรอบ สำหรับการแทรกค่าข้อมูลสามารถที่จะนำมาใช้นั้นทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของข้อมูลและประโยชน์ที่จะได้นำไปใช้ ภายหลังจากได้ข้อมูลภาพที่มีความละเอียดที่เท่ากันแล้วในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำข้อมูลภาพนั้นๆ มาต่อเข้าด้วยกัน แต่ในขั้นตอนการต่อข้อมูลภาพนั้นประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ คือ ขั้นตอนที่หนึ่ง การปรับค่าความสว่างของข้อมูลภาพทั้ง 3 ให้สัมพันธ์หรือสอดคล้องกันทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลภาพที่จะนำมาต่อเข้าด้วยกันนั้นมีค่าความสว่างที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจนและวิธีการปรับค่าความสว่างที่ได้นำมาใช้ในที่นี้อาศัยความสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลในบริเวณข้อมูลภาพที่จะนำมาต่อกันในลักษณะซ้อนทับ ขั้นตอนที่สอง การหาความสัมพันธ์ของข้อมูลภาพที่จะนำมาต่อโดยวิธีการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ ซึ่งค่าสหสัมพันธ์ที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ทั้งนี้ ยิ่งค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับ 1 มากเท่าไร ยิ่งแสดงในเห็นว่าพื้นที่นั้นๆ มีความสัมพันธ์กันและมีลักษณะที่เหมือนกัน และขั้นตอนที่สาม การลบรอยตะเข็บบริเวณขอบของข้อมูลภาพที่นำมาต่อเข้าด้วยกันซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนภายหลังจากข้อมูลภาพทั้งสามมาต่อกัน โดยวิธีการเฉลี่ยระดับค่าสีเทาและเงื่อนไขว่า  $f_a + f_b = 1$  ซึ่งผลที่ได้ทำให้ข้อมูลภาพที่นำมาต่อเป็นภาพเดียวกันนั้นมีความต่อเนื่องและกลมกลืนกัน รวมทั้งสามารถที่จะทำการพิจารณาข้อมูลภาพได้ในบริเวณที่กว้างกว่าเดิมจากข้อมูลภาพเพียงภาพเดียวเท่านั้นดังในรูปที่ 5.6 และ 5.7

ในการจำแนกประเภทและการแปลความหมายของข้อมูลภาพด้วยสายตาดูข้อมูลภาพสีที่ได้จากการรวมเอาข้อมูลภาพระดับสีเทาทั้ง 3 แบนด์ หรือ 3 ภาพ ไว้ด้วยกัน สามารถที่ทำได้ง่ายกว่าการพิจารณาจากข้อมูลภาพระดับสีเทาที่ละแบนด์ ทั้งนี้ เนื่องมาจากวัตถุในแต่ละชนิดจะมีการสะท้อนในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกันทำให้ยากต่อการพิจารณาข้อมูลทั้งหมด และถ้าเป็นการพิจารณาข้อมูลภาพจากดาวเทียมคนละดวงและยังทำให้เสียเวลาในการพิจารณามากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ในการทดลองนี้จึงได้เสนอวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก(Principal Component Analysis) เพื่อที่จะให้การจำแนกและการแปลความหมายของข้อมูลภาพจากดาวเทียมทั้งสามดวงมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการนำเอาลักษณะที่สำคัญบนข้อมูลภาพทั้งหมด 9 ภาพ หรือ 9 แบนด์ ในช่วงคลื่นที่ต่างๆ กัน มารวมไว้ในภาพสีเพียงภาพเดียวเท่านั้น กล่าวคือ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของข้อมูลภาพเป็นการนำเอาประโยชน์ของการลดมิติของข้อมูลภาพให้มาแสดงบนภาพเพียงบางภาพจากของทั้งหมด เดิมทีข้อมูลภาพที่จะนำมาทดลองนั้นเป็นข้อมูลภาพที่มีค่าความละเอียดที่ต่างกัน ดังนั้น จึงต้องนำข้อมูลภาพมาผ่านกระบวนการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต การชักตัวอย่างข้อมูลภาพด้วยวิธีการแทรกค่า และสุดท้ายการปรับแก้ค่าความสว่างให้เท่ากันเสียก่อน ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 6.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการกำหนดพิกัดควบคุมบนพื้นดินสำหรับการปรับแก้ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตในหลักการของการซ้อนภาพนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญมาก ปัญหาที่พบในทดลองนี้คือ นอกจากการกำหนดจำนวนพิกัดควบคุมบนพื้นดินให้ได้มากที่สุดแล้วยังต้องคำนึงด้วยว่าพิกัดต่างๆ ของข้อมูลภาพทั้งหมดจะต้องสัมพันธ์กัน ซึ่งในความเป็นจริงในการกำหนดพิกัดต่างๆ นั้นจะพิจารณาจากลักษณะที่สำคัญบนข้อมูลภาพดังเช่น มุมตึก ทางแยกของแม่น้ำ จุดตัดระหว่างถนนสองสาย และอื่นๆ และในการกำหนดพิกัดของข้อมูลภาพควรที่จะต้องทำการขยายข้อมูลภาพให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อที่จะได้กำหนดพิกัดได้อย่างถูกต้องหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งในขั้นตอนนี้ยังเป็นการกำหนดด้วยมือทำให้เสียเวลามาก ซึ่งในภายหน้าอาจจะมีวิธีการกำหนดพิกัดที่สะดวกกว่าและเสียเวลาในการทำงานน้อยกว่า

ในการแทรกค่าข้อมูลนั้นมีอยู่ด้วยหลายวิธีการขึ้นอยู่กับว่าวิธีการนั้นจะเหมาะสมกับข้อมูลที่กำลังพิจารณาหรือไม่ ซึ่งมีทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น และทั้งหนึ่งมิติและสองมิติ จนสามมิติ แต่ในการแทรกค่าข้อมูลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้อมูลภาพมีลักษณะเป็นแบบสองมิติเพื่อให้สะดวกจึงได้ใช้การแทรกค่าข้อมูลแบบสองมิติ หรือถ้าใช้การแทรกค่าข้อมูลในแบบหนึ่งมิติจะต้องการทำการคำนวณค่าถึงสองครั้ง จากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ยระหว่างข้อมูลทั้งสองค่าที่เพื่อให้ได้ค่าข้อมูลที่ถูกต้อง ในขั้นการต่อข้อมูลภาพเข้าด้วยกัน การปรับแก้ค่าความสว่างของข้อมูลภาพให้เหมาะสมนั้นมีส่วนทำให้รอยตะเข็บบริเวณขอบของภาพหายไป แต่ถ้าค่าความสว่างเดิมของข้อมูลภาพของทั้งสองไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ข้อมูลภาพมีค่าความสว่างที่ต่างกันมากจึงทำให้การต่อข้อมูลภาพเกิดรอยตะเข็บขึ้น ดังนั้น จึงจะต้องใช้วิธีการลบรอยตะเข็บเข้าช่วย ซึ่งในที่นี้ได้อาศัยวิธีการลบรอยตะเข็บแบบเชิงเส้น โดยการถ่วงน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. คำบรรยายเรื่องการสำรวจระยะไกล. กรุงเทพฯ : กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. 2540.
- [2] คาราศรี ดาวเรือง. 2533. รีโมทเซนซิงพื้นฐาน. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2533.
- [3] D. F. Rogers, J. A. Adams. **Mathematical Elements for Computer Graphics.** 2<sup>nd</sup> Edition. McGraw-Hill Publishing Company, 1989.
- [4] F. Cheevasuvit, K. Dejhan, S. Chitwong. "Seam Removal from Colour mosaicking of MOS-1 MESSR Images." Proceeding of the 13<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing, Ulaanbaatar, Mongolia, pp. Q-5-1 - Q-5-6, 7-11 Oct, 1992.
- [5] F. Cheevasuvit, K. Dejhan, S. Chitwong. "Monitoring Land-Cover Change by Principle Component Analysis of Multitemporal MOS-1 MESSR Data." Proc. of the South East Asian Regional Conference on Education and Research in Remote Sensing, Johor Bahru, Malaysia, Session 6, June, 1993.
- [6] Floyd E. Sabins, Jr. "Remote Sensing Principles and Interpretation." W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1978.
- [7] J.H. Ahlberg, E.N. Nilson, J.L. Walsh. "The Theory of Splines and their Applications." Academic Press, 1967.
- [8] J. Douglass Fairs. "Numerical Analysis." Thomson Information Publishing Group, 1997.
- [9] John A. Richards. "Remote Sensing Digital Image Analysis." 2<sup>nd</sup> Edition, Springer-Verlag, 1993.
- [10] N. Hinsamooth, F. Cheevasuvit, K. Dejhan, S. Mitatha, A. Somboonkeaw. "Mosaicing of Multi-Resolution Satellite Images." The 1998 IEEE Asian-Pacific Conference on Circuits and Systems, Chaingmai, Thailand, pp. FT22.1-1 - FT22.1-4, November 24-27, 1998.
- [11] R. C. Gonzalez, Richard E. Woods. "Digital Image Processing." Second Edition, Addison Wesley Publishing Inc, 1992.
- [12] R. Bernstein. "Digital image processing for remote sensing." The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1978.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คิดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีเว็บไซต์

- [13] R. Lewis. **"Practical digital image processing."** Ellis Horwood Limited, England, 1990.
- [14] R. A. Schowengerdt. **"Remote Sensing Models and Methods for Image Processing."** Second Edition, Academic Press, 1997.
- [15] R.W. Hornbeek. **"Numerical Methods."** Engelwood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1975.
- [16] S. Phasomkusolsil, N. Hinsamooth, F.Cheevasuvit, K. Dejhan, S. Mitatha, S. Chitwong and Somboonkeaw. **"Principle Component Analysis Image for Multi-Resolution Images."** Pro. of the 19<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing, Traders Hotel, Manila, pp. R18-1 - R18-6, 16-20 November, 1998.
- [17] S. C. Chapra, Raymond P. Canale. **"Numerical Methods for Engineeis."** 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw-Hill International Editions, 1998.
- [18] T. Fung, E. Le Frew. **"Application of Principle Component Analysis to Change Detection."** Photogrammetry. Eng. Remote Sensing, Vol.53, No.12, pp. 1649-1658, 1987.
- [19] William K. Pratt. **"Digital Image Processing."** A Wiley-Interscience Publish, 1978.
- [20] Thomas M. Lillesand, Ralph W. Kiefer. **"Remote sensing and image interpolation."** John Wiley & Sons, Inc, 1979.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- (1) N. Hinsamooth, F.Cheevasuvit, K. Dejhan, S. Mitatha and A. Somboonkaew ,” Mosaicing of Multi-Resolution Satellite Images ”, Proc. of The 1998 IEEE Asia – Pacific Conference on Circuits and Systems”, Chiangmai, Thailand, pp. 583 – 586, November 24 – 27, 1998.
- (2) S. Phasomkusolsil, N. Hinsamooth, F. Cheevasuvit, K. Dejhan, S. Mitatha, S. Chitwong and A. Somboonkaew. ” **Principal Component Analysis Image for Multi – Resolution Images.**” Proc. of The 19<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing, Traders Hotel, Manila, pp. R-18-1 – R-18-6, November 16-20, 1998.
- (3) อาโมทย์ สมบูรณ์แก้ว พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์ วีรศักดิ์ คุรุรัช คำรณ สุนด์ิ และ นฤพร หินสมุทร. ” การรู้จำชนิดวัตถุโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและตัวอธิบายฟูเรียร์.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 โรงแรมโซลทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร, หน้า 132 – 136, 2540.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## รายละเอียดเพิ่มเติมของการสำรวจระยะไกล

1. วงโคจรแบบสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ (Sun - synchronous) ซึ่งเป็นลักษณะการโคจรที่สอดคล้องกับการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ โดยโคจรในแนวเหนือใต้และผ่านแนวละติจูดต่างๆ ที่เวลาท้องถิ่นเดียวกัน การโคจรในลักษณะนี้มีข้อดี คือภาพที่ถ่ายในแนวละติจูดเดียวกันจะอยู่ภายใต้สภาพการส่องสว่างจากดวงอาทิตย์ที่ใกล้เคียงกัน และสามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อดูรูปแบบต่างๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาพของบริเวณเดียวกันแต่ถ่ายคนละช่วงเวลา นอกจากนี้ วงโคจรเป็นแบบใกล้ขั้วโลก คือ เอียงทำมุมกับแนวเหนือใต้ของโลกน้อยมาก ปกติจะไม่เกิน  $9^\circ$  ทำให้การถ่ายภาพครอบคลุมได้เกือบทั่วโลก จะมีช่องโหว่อยู่บ้างก็เฉพาะบริเวณขั้วโลกเหนือและใต้เป็นส่วนน้อย ดาวเทียมประเภทนี้มักจะมีระดับวงโคจรอยู่ความสูงระหว่าง 300 ถึง 1,500 กิโลเมตร และสามารถถ่ายภาพได้ครอบคลุมบริเวณกว้าง เช่น ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาและดาวเทียมสำรวจทรัพยากรทั่วไป

2. วงโคจรแบบอยู่กับที่ (Geo - synchronous และ Geostationary) เป็นการโคจรในลักษณะที่สอดคล้องกับการหมุนรอบตัวของโลกโดยที่ความเร็วในการหมุนรอบโลกของดาวเทียมเท่ากับความเร็วที่โลกหมุนรอบตัวเอง ทำให้ดูเหมือนว่าดาวเทียมลอยนิ่งอยู่เหนือตำแหน่งหนึ่งๆ บนผิวโลก จึงเป็นดาวเทียมที่ใช้ประโยชน์ในการสื่อสาร หรือใช้ในการอุตุนิยมวิทยา หรือภูมิอากาศใดภูมิภาคหนึ่งโดยเฉพาะ โดยปกติดาวเทียมแบบอยู่กับที่จะมีตำแหน่งอยู่เหนือแนวศูนย์สูตรและมีระยะห่างกันประมาณ  $70^\circ$  ในปัจจุบันมีทั้งดาวเทียมที่เป็นของสหรัฐอเมริกา องค์การอวกาศยุโรป และญี่ปุ่น

3. อุปกรณ์สำรวจไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (Microwave radiometer) เป็นระบบพาสซีฟ ใช้สำหรับตรวจวัดค่าการแผ่รังสีของผิวโลกในช่วงคลื่นไมโครเวฟหรือค่าอุณหภูมิความกระจ่าย ที่อยู่ในรัศมีการทำงานของเสาอากาศที่ใช้ตรวจวัด เป็นระบบที่ทำงานได้ทั้งกลางวันและกลางคืน และในทุกสภาวะอากาศ เพราะสามารถทะลุเมฆและหมอกได้ การเลือกใช้ความถี่ที่เหมาะสมประกอบกับวิธีการโพลาไรเซชัน จะทำให้สามารถแยกแยะค่าการแผ่รังสีจากพื้นผิวต่างๆ ออกจากกันได้ เช่น จากพื้นผิวน้ำทะเล ฟองคลื่น อากาศชื้น และละอองน้ำในบรรยากาศ อุปกรณ์เหล่านี้ได้แก่ ระบบ SMMR, MSU และ MSR

4. อุปกรณ์สำรวจเพื่อหยั่งตรวจอากาศ ได้แก่ ระบบอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิและไอน้ำ ตามระดับในชั้นบรรยากาศ ช่วงคลื่นที่วัดอาจอยู่ในย่านความร้อน คือ 3.8 ถึง 15 ไมโครเมตร รังสีที่มีการนำไปใช้

5. อุปกรณ์สำรวจไมโครเวฟเรดาร์(Microwave radar) ระบบเรดาร์ เป็นระบบแอกทีฟ ซึ่งผลิตพลังงานในย่านไมโครเวฟ เพื่อส่งไปกระทบพื้นผิวโลก แล้วทำการตรวจวัดค่าพลังงานที่สะท้อนกลับสู่เครื่องรับ ซึ่งจะมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นกับลักษณะพื้นผิว การทำงานของระบบเรดาร์มีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ เช่น ในลักษณะการถ่ายภาพ(ซินธิติก - อเพอร์เจอร์เรดาร์) หรือการถ่ายภาพระดับสูง(อัลติมิเตอร์) ตลอดจนการวัดความเร็วลม(สเก็ทเทอโรมิเตอร์) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้พลังงานไมโครเวฟในควมถี่ที่เหมาะสม ตลอดจนการจัดรูปแบบของอุปกรณ์เพื่อวัดพลังงานที่สะท้อนในทิศทางต่างๆ กัน

6. ซินธิติก - อเพอร์เจอร์เรดาร์(Synthetic-aperture radar) เป็นระบบที่ให้ภาพของผิวหน้าของทะเลหรือแผ่นดินทั้งกลางวันและกลางคืน และทุกสภาวะอากาศ ด้วยรายละเอียดที่ค่อนข้างสูง

7. การวัดความสูง(Altimeter) เป็นเครื่องวัดระดับความสูงระหว่างดาวเทียมกับพื้นผิวโลก วัดค่าความสูงต่ำของพื้นผิว หรือ ความสูงของคลื่นผิวน้ำทะเลนั่นเอง โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## ตารางแสดงรายละเอียดของดาวเทียม ADEOS, JERS - 1 และ MOS - 1

ตารางแสดงรายละเอียดของดาวเทียม JERS-1 และ MOS-1

ประเภทดาวเทียม	องค์ประกอบวงโคจร	เครื่องวัดในการสำรวจ					
		ชื่อเครื่องวัด	ช่วงคลื่น/ความถี่	มุมมองสนาม ณ ขณะนั้น	ความกว้างของแนวถ่ายภาพ		
JERS-1	สัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ ระดับสูง : 568 ก.ม. มุมเอียง : 98° โคจรกลับมาที่จุดเดิม : 44 วัน	OPS(Optical Sensor) VINR (Visible and Near Infrared Radiometer) เครื่องวัดคลื่นที่ตามองเห็นและอินฟราเรดใกล้	0.52 – 0.60 ไมโครเมตร 0.63 – 0.69 ไมโครเมตร 0.76 – 0.86 ไมโครเมตร	18 x 24 ม.	75 กม.		
		SWIR(Short Wavelength Infrared Radiometer) เครื่องวัดคลื่นอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น	1.60 – 1.71 ไมโครเมตร 2.01 – 2.12 ไมโครเมตร 2.13 – 2.25 ไมโครเมตร 2.27 – 2.40 ไมโครเมตร			18 x 24 ม.	75 กม.
		SAR(Synthetic Aperture Radar) HH polarization (3 look) เรดาร์แบบช่องเปิดสังเคราะห์โพลาไรเซชันแบบ HH(3 ลูก)	1.275 กิกะเฮิรตซ์				
MOS-1	สัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ ระดับสูง : 909 ก.ม. มุมเอียง : 99° โคจรกลับมาที่จุดเดิม : 17 วัน	MESSR(Multiapertural Electronic self Scanning Radiometer) เครื่องวัดคลื่นที่ตามองเห็นและอินฟราเรดใกล้	0.51 – 0.59 ไมโครเมตร 0.61 – 0.69 ไมโครเมตร 0.72 – 0.80 ไมโครเมตร 0.80 – 1.10 ไมโครเมตร	50 ม.	100 กม. x 2		
		VTIR(Visible and Thermal IR Radiometer) เครื่องวัดคลื่นที่ตามองเห็นและอินฟราเรดความร้อน	0.5 - 0.7 ไมโครเมตร 6.0 – 7.0 ไมโครเมตร 10.5 – 11.5 ไมโครเมตร 11.5 – 12.5 ไมโครเมตร			0.9 กม. 2.7 กม.	1,500 กม.
		MSR(Microwave Soundar Radiometer) เครื่องวัดห้วงคลื่นไมโครเมตร	23.8 กิกะเฮิรตซ์ 31.4 กิกะเฮิรตซ์	31 กม. 23 กม.	317 กม.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงรายละเอียดของดาวเทียม ADEOS

ดาวเทียม	องค์ประกอบวงโคจร	เครื่องวัดในการสำรวจ			
		ชื่อเครื่องวัด	ช่วงคลื่น/ความถี่	มุมมอง สนาม ม ขณะนั้น	ความกว้าง ของแนว ถ่ายภาพ
ADEOS	สัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ ระดับสูง : 797 กม. มุมเอียง : 99° โคจรกลับมาที่จุดเดิม : 41 วัน	OCT(Ocean Color and Temperature Scanner) เครื่องกวาดวัดอุณหภูมิและ สีน้ำทะเล	0.402 - 0.422 ไมโครเมตร	700 ม.	1,400 กม.
			0.433 - 0.453 ไมโครเมตร		
			0.480 - 0.500 ไมโครเมตร		
			0.510 - 0.530 ไมโครเมตร		
			0.555 - 0.575 ไมโครเมตร		
			0.655 - 0.675 ไมโครเมตร		
			0.745 - 0.785 ไมโครเมตร		
			0.845 - 0.885 ไมโครเมตร		
			3.55 - 3.85 ไมโครเมตร		
		AVNIR(Advanced Visible and Near Infrared Radiometer) เครื่องวัดคลื่น ที่ตามองเห็นและอินฟราเรด ใกล้แบบก้าวหน้า	0.40 - 0.50 ไมโครเมตร 0.52 - 0.62 ไมโครเมตร 0.62 - 0.72 ไมโครเมตร 0.82 - 0.92 ไมโครเมตร	16 ม.	80 กม. มุมมอง
NSCAT(NASA Scatterometer) เครื่องวัดการ กระจายของนาซา	0.52 - 0.72 ไมโครเมตร	8 ม.	± 40°		
TOMS(Total Ozone Mapping) เครื่องวัด สเปกตรัมที่ใช้เครื่องวัด โอโซนร่วม	13.995 ไมโครเมตร	25 กม.	1,200 กม.		
IMG(Interferometric Monitor for Greehouse Gases) เครื่องวัดแสงแทรก สอดสำหรับก๊าซเรือน กระจก	304.0, 312.5 ไมโครเมตร 325.0, 317.5 ไมโครเมตร 332.6, 360.0 ไมโครเมตร	42 กม.	2,795 กม.		
POLDER(Polarization and Directionality of the Earth's Reflectance) การ โพลาไรเซชันและสภาพทิศ ทางของการสะท้อนของ โลก	3 - 15 ไมโครเมตร	8 กม.	20 กม.		
ILAS(Improved Limb Atmospheric Sounder) เครื่องหยั่งบรรยากาศแนว เฉียงนอกโลกแบบปรับปรุง	0.433 - 0.453 ไมโครเมตร 0.480 - 0.500 ไมโครเมตร 0.510 - 0.530 ไมโครเมตร 0.555 - 0.575 ไมโครเมตร 0.660 - 0.680 ไมโครเมตร 0.760 - 0.770 ไมโครเมตร	5 กม.	1,440 กม. X 1,920กม.		
	0.753 - 0.784 ไมโครเมตร 6.0 - 6.8 ไมโครเมตร 7.3 - 11.8 ไมโครเมตร				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในท้องถิ่นเท่านั้น ไม่สามารถนำออกนอกพื้นที่ได้  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก ตัดต่อ และดัดแปลงข้อมูล และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายณฤพร หินสมุทร สถานที่เกิด โรงพยาบาลพลพลพยุหเสนา อำเภอเมือง  
จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชา  
เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม จากสถาบันเทคโนโลยีพระเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี  
2540 สำเร็จการศึกษาระดับอนุปริญญาในหลักสูตรประโยควิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง จาก  
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ ในปี พ.ศ. 2537



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้