

การศึกษาเทคนิคการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติระหว่างภาพถ่ายดาวเทียมธีออส  
กับภาพถ่ายออร์โธจากภาพถ่ายทางอากาศ

เรืออากาศเอกพงศธร อ่อนสำลี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาระบบสารสนเทศปริภูมิทางวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

STUDY OF AUTOMATED IMAGE MATCHING TECHNIQUES FOR THEOS IMAGERY  
AND AERIAL ORTHOPHOTO

Flight Lieutenant Pongtorn Onsamlee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Spatial Information System in Engineering

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเทคนิคการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติระหว่าง  
ภาพถ่ายดาวเทียมรีออสกับภาพถ่ายออร์โธจาก  
ภาพถ่ายทางอากาศ

โดย

เรืออากาศเอกพงศธร อ่อนสำลี

สาขาวิชา

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

พันเอก ดร.กนก วีรวงศ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชรินทร์ ทินนโชติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(พันเอก ดร.กนก วีรวงศ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล สันติธรรมนนท์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ปกรณ์ อภาพันธุ์)

พงศักร อ่อนสำลี : การศึกษาเทคนิคการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติระหว่างภาพถ่ายดาวเทียมธีออสกับ ภาพถ่าย ออร์โธ จาก ภาพถ่ายทาง อากาศ . (STUDY OF AUTOMATED IMAGE MATCHING TECHNIQUES FOR THEOS IMAGERY AND AERIAL ORTHOPHOTO) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : พ.อ. ดร.กนก วีรวงศ์ , 131 หน้า.

ในการผลิตข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมธีออสเพื่อให้ความถูกต้องทางตำแหน่งสูงขึ้น จำเป็นต้องใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน (ground control points, GCPs) การหาค่าพิกัดบนพื้นดินของ GCPs สามารถใช้ ภาพออร์โธ เป็นภาพอ้างอิงโดยการระบุจุดที่เหมือนกันจากภาพถ่ายออร์โธและภาพถ่ายดาวเทียมธีออส นำค่าพิกัดบนพื้นดินของจุด ภาพบนภาพถ่ายออร์โธเป็นพิกัดบนพื้นดิน จุดภาพบนภาพถ่ายดาวเทียมธีออสและใช้จุดภาพดังกล่าวเป็น GCP ซึ่งวิธีการดังกล่าว สามารถประหยัดงบประมาณในการผลิตได้ อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้การหาจุดที่เด่นชัดบนภาพถ่ายและการจับคู่ภาพถ่ายมาพัฒนาเป็นวิธีการ จับคู่จุดภาพอัตโนมัติซึ่งสามารถลดเวลาในการผลิตได้อีกด้วย โดยทั่วไปการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักคือ การหาจุดเด่นชัดบนภาพ การจับคู่ภาพและการตรวจหาจุดคู่ที่จับคู่ผิด แต่เนื่องจากคุณสมบัติที่แตกต่างกันของทั้งสองภาพจึงทำให้ผลการทดสอบไม่ดีเท่าที่ควร

เพื่อปรับปรุงวิธีการดังกล่าว งานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคนิค จับคู่จุดภาพ อัตโนมัติ อัตโนมติบน ภาพถ่ายดาวเทียมธีออสโดยใช้ ภาพออร์โธ สีเชิงเลขของกรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์เป็นภาพอ้างอิง และพัฒนาวิธีการรังวัด GCPs อัตโนมัติ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอน การเตรียมภาพก่อนการประมวลผล การหาจุดเด่นชัดในภาพถ่าย การจับคู่ภาพและการตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิด

ผลการศึกษาพบว่าค่า RMSE ของ GCP หลังจากการคำนวณปรับแก้ เชนิเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมธีออสโดยวิธีการระบุ GCP โดยผู้ปฏิบัติงานมีค่า RMSE = 1.2605 จุดภาพ และวิธีการรังวัดอัตโนมัติมีค่า RMSE = 1.2798 จุดภาพ ซึ่งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการระบุ GCP โดยผู้ปฏิบัติงาน

ภาควิชา..... วิศวกรรมสำรวจ..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ทางวิศวกรรม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา..... 2554.....

## 5270401021 : MAJOR SPATIAL INFORMATION SYSTEM IN ENGINEERING

KEYWORDS: THEOS IMAGERY / IMAGE MATCHING / AUTOMATIC POINT MEASUREMENT

PONGTORN ONSAMLEE: STUDY OF AUTOMATED IMAGE MATCHING TECHNIQUES FOR THEOS IMAGERY AND AERIAL ORTHOPHOTO. ADVISOR: KANOK WEERAWONG Ph.D., 131 pp.

In creating an accurate orthophoto from a THEOS image, a set of ground control points (GCPs) are required. The cost of obtaining these GCPs can greatly be reduced by deriving them from orthophotos instead of obtaining them directly from ground survey. Moreover, the deriving of GCPs from orthophotos enables the process of automatic point measurement which results in reducing of processing time. Automatic point measurement can be divided into three stages, i.e., interest point detection, image matching, and outlier detection. Due to the difference of picture condition, the result in this study is not good enough.

The purpose of this research is to present the result from a study of automated point measurement techniques for THEOS imagery and digital orthophoto from Land Development Departure and to develop automated GCPs measurement method that can be divided into four stages, i.e., image pre-processing, interest point detection, image matching, and outlier detection.

The method developed from the study shows the root mean square error (RMSE) of 1.2798 pixels comparable to the RMSE of 1.2605 pixels from manual measurement.

Department:.....Survey Engineering..... Student's Signature .....

Field of Study: Spatial Information System in Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year:.....2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ พันเอก ดร.กนก วีรวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาและข้อขัดข้องต่างๆ ที่เกิดขึ้นและตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้กับข้าพเจ้าและขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. ชรินทร์ ทินนโชติ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล สันติธรรมนนท์และ ดร. ปกรณ์ อาภาพันธุ์ กรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำในการศึกษาวิจัยครั้งนี้และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อย โดยสมบูรณ์รวมทั้งคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คุณจุฑามาศ ปานกลิ่น และนิสิตภาควิชาวิศวกรรมสำรวจทุกท่านที่ช่วยให้ข้อมูล คำแนะนำและแลกเปลี่ยนความรู้ในระหว่างศึกษาครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ระหว่างศึกษาครั้งนี้

ท้ายสุดนี้ขอมอบความดีของวิทยานิพนธ์เพื่อเป็นกตเวทิตาคุณแด่บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และคณาจารย์ทุกท่าน พร้อมกันนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะก่อเกิดประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติสืบไป

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย .....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 การเตรียมภาพก่อนการประมวลผล .....	7
2.1.1 การแปลงภาพสีเป็นภาพระดับเทา .....	8
2.1.2 การลดรายละเอียดของภาพถ่าย .....	9
2.1.3 การปรับแก้การวางตัวของภาพถ่ายดาวเทียมรีออส .....	11
2.2 การหาจุดเด่นชัดในภาพถ่าย.....	17
2.2.1 Förstner operator .....	17
2.2.2 Harris operator .....	23
2.2.3 SUSAN operator .....	26
2.2.4 FAST operator .....	29
2.3 การจับคู่ภาพ .....	32
2.3.1 การจับคู่ภาพแบบ Area-based matching .....	32
2.3.2 การจับคู่ภาพแบบ Feature-based matching .....	34
2.4 การตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิด .....	35
บทที่ 3 การทดสอบวิธีหาจุดเด่นชัดในภาพและวิธีการจับคู่ภาพ.....	40

3.1 การทดสอบวิธีหาจุดเด่นชัดในภาพ .....	40
3.1.1 การหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย Förstner operator .....	42
3.1.2 การหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย Harris operator .....	43
3.1.3 การหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย SUSAN operator.....	44
3.1.4 การหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย FAST-9 operator.....	46
3.2 การทดสอบวิธีการจับคู่ภาพแบบ ABM และ FBM .....	48
3.2.1 การทดสอบวิธีการจับคู่ภาพแบบ ABM.....	48
3.2.2 การทดสอบวิธีการจับคู่ภาพแบบ FBM .....	49
บทที่ 4 การดำเนินงาน.....	51
4.1 การเตรียมภาพก่อนการประมวลผล .....	52
4.2 การหาจุดเด่นชัดในภาพถ่าย.....	55
4.3 การจับคู่ภาพ .....	60
4.3.1 การจับคู่ภาพถ่ายด้วยวิธีการ FBM.....	60
4.3.2 การคัดเลือกคู่จุดเพื่อนำมาใช้เป็น GCPs.....	62
4.3.3 การจับคู่ภาพถ่ายโดยวิธีการ ABM.....	65
4.4 การตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิด .....	66
4.4.1 การหาค่าพิกัดบนพื้นดินจากจุดภาพบนภาพออร์โธรีทิคัล.....	66
4.4.2 การหาค่าพิกัดภาพบนภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส .....	66
4.4.3 การตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิด .....	67
บทที่ 5 ผลการดำเนินงาน .....	68
5.1 ผลการวิเคราะห์หาขนาดของ template ที่เหมาะสมในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่าย แบบ FBM.....	68
5.2 ผลการวิเคราะห์หาขนาดของ template ที่เหมาะสมในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่าย แบบ ABM .....	72
5.3 ผลการทดสอบการรังวัด GCPs อัตโนมัติ.....	74
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....	76
6.1 สรุปผลการศึกษา .....	76
6.1.1 การหาจุดเด่นชัดบนภาพ.....	76



6.1.2 การจับคู่ภาพ.....	77
6.1.3 การตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิด .....	77
6.1.4 การพัฒนาวิธีร้งวัด GCPs อัตโนมัติ .....	77
6.2 ปัญหาที่พบในการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....	78
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก.....	83
ภาคผนวก ข .....	115
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	131

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณค่า USAN.....	45
ตารางที่ 3.2 การคำนวณหาจุดเด่นชัดบนภาพโดย FAST-9 operator .....	47
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่า RMSE ที่ได้จากการปรับแก้โดยใช้ GCPs จากผู้ปฏิบัติงานและ วิธีรังวัดอัตโนมัติ.....	74

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1	ภาพถ่ายดาวเทียมธีออสที่ใช้ในการศึกษา .....	3
ภาพที่ 1.2	ขอบเขตของภาพที่ใช้ในการศึกษา .....	4
ภาพที่ 2.1	ขั้นตอนการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติที่ใช้ในการศึกษา .....	7
ภาพที่ 2.2	การเตรียมภาพก่อนการประมวลผลของภาพออร์โธรีซิซิงเลขแลภาพถ่ายดาวเทียมธีออส.....	8
ภาพที่ 2.3	ตัวอย่างตัวกรองภาพ .....	10
ภาพที่ 2.4	ค่าพิกคบนพื้นดินโดยประมาณของจุดภาพทั้ง 4 มุม ของภาพถ่ายดาวเทียมธีออส .	11
ภาพที่ 2.5	การวางตัวของภาพถ่ายดาวเทียมธีออสในระบบพิกัดภาพและระบบพิกัดแผนที่ .....	12
ภาพที่ 2.6	การกำหนดค่าพิกคบนพื้นดินของกรอบภาพผลลัพธ์.....	13
ภาพที่ 2.7	การระบุตำแหน่งของจุดภาพในภาพผลลัพธ์ .....	14
ภาพที่ 2.8	ตำแหน่งบนพื้นดินของจุดภาพในภาพตั้งต้นและภาพผลลัพธ์ .....	15
ภาพที่ 2.9	การประมาณค่าของจุดภาพด้วยวิธี bilinear.....	16
ภาพที่ 2.10	พัฒนาการของวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพถ่าย .....	17
ภาพที่ 2.11	derivative masks ( $dx$ ), $\sigma_d = 0.7$ .....	18
ภาพที่ 2.12	ผลการคำนวณค่า $I_{x(i,j)}^2$ , $I_{y(i,j)}^2$ และ $I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)}$ ( $\sigma_d = 0.7$ ) .....	19
ภาพที่ 2.13	การหาจุดเด่นชัดด้วย Förstner operator ( $w_{\min} = 1.5 \times \bar{w}$ และ $q_{\min} = 0.75$ ) .....	22
ภาพที่ 2.14	derivative masks ( $dx$ ), $\sigma_d = 1$ .....	23
ภาพที่ 2.15	ผลการคำนวณค่า $I_{x(i,j)}^2$ , $I_{y(i,j)}^2$ และ $I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)}$ ( $\sigma_d = 1$ ).....	24
ภาพที่ 2.16	การหาจุดเด่นชัดด้วย Harris operator .....	25
ภาพที่ 2.17	ตัวอย่างการคำนวณค่า $c(\vec{r}, \vec{r}_0)$ .....	27
ภาพที่ 2.18	ค่า USAN ของแต่ละจุดภาพในพื้นที่ทดสอบ .....	28
ภาพที่ 2.19	การหาจุดเด่นชัดด้วย SUSAN operator ( $t = 25$ ).....	29
ภาพที่ 2.20	แนวคิดการหาจุดเด่นชัดด้วย FAST operator .....	29
ภาพที่ 2.21	ขั้นตอนการคำนวณค่า $S_{p \rightarrow x}$ .....	31
ภาพที่ 2.22	การหาจุดเด่นชัดด้วย FAST-9 operator ( $t = 30$ ).....	32
ภาพที่ 2.23	แนวคิดการจับคู่ภาพแบบ ABM.....	33
ภาพที่ 3.1	ตัวอย่างภาพขยายบริเวณที่เด่นชัดในภาพ .....	41

ภาพที่ 3.2	พื้นที่ตรวจสอบวิธีการหาจุดเด่นชัดบนภาพ .....	41
ภาพที่ 3.3	ผลการหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย Förstner operator ในพื้นที่ตรวจสอบ .....	42
ภาพที่ 3.4	ขนาดของ error ellipse และค่าความกลมของพื้นที่ตรวจสอบที่ 1 .....	43
ภาพที่ 3.5	ผลการหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย Harris operator ในพื้นที่ตรวจสอบ .....	43
ภาพที่ 3.6	ค่าความเป็นมุมของพื้นที่ตรวจสอบ .....	44
ภาพที่ 3.7	ผลการหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย SUSAN operator ในพื้นที่ตรวจสอบ .....	45
ภาพที่ 3.8	ผลการหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย FAST-9 operator ในพื้นที่ตรวจสอบ .....	46
ภาพที่ 3.9	ผลการทดสอบการจับคู่ภาพด้วยวิธี ABM เบื้องต้น .....	48
ภาพที่ 3.10	ผลการทดสอบการจับคู่ภาพด้วยวิธี FBM เบื้องต้น .....	49
ภาพที่ 4.1	วิธีการรังวัดอัตโนมัติที่ใช้ในการศึกษา .....	51
ภาพที่ 4.2	การเตรียมภาพก่อนการประมวลผลของภาพออร์โธสตีเชิงเลข .....	53
ภาพที่ 4.3	การเตรียมภาพก่อนการประมวลผลของภาพถ่ายดาวเทียมธีออส .....	54
ภาพที่ 4.4	แนวคิดในการกำหนดพื้นที่ซ้อนทับระหว่างภาพออร์โธสตีเชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมธีออส .....	55
ภาพที่ 4.5	การเปรียบเทียบตำแหน่งของจุดภาพในภาพออร์โธสตีเชิงเลขก่อนและหลังการลดรายละเอียดของภาพ .....	58
ภาพที่ 4.6	ผลการกำหนดพื้นที่ซ้อนทับระหว่างภาพออร์โธสตีเชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมธีออส .....	60
ภาพที่ 4.7	แนวคิดการสร้างพื้นที่ค้นหาบนภาพถ่ายดาวเทียมธีออส .....	61
ภาพที่ 4.8	ภาพทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์หาขนาด template ที่เหมาะสมภาพที่ 1 .....	64
ภาพที่ 4.9	ภาพทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์หาขนาด template ที่เหมาะสมภาพที่ 2 .....	64
ภาพที่ 4.10	ภาพทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์หาขนาด template ที่เหมาะสมภาพที่ 3 .....	65
ภาพที่ 5.1	ผลเปรียบเทียบค่า RMSE และค่า $m_{FBM}$ .....	68
ภาพที่ 5.2	ผลการจับคู่ภาพถ่ายแบบ FBM และการคัดเลือกจุดเพื่อนำมาใช้ เป็น GCPs โดยใช้ค่า $m_{FBM} = 33$ จุดภาพ .....	70
ภาพที่ 5.3	ตำแหน่งของคู่จุดบนภาพออร์โธสตีเชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมธีออส .....	71
ภาพที่ 5.4	ผลเปรียบเทียบค่า RMSE และค่า $m_{ABM}$ .....	72
ภาพที่ 5.5	ผลการจับคู่ภาพถ่ายแบบ ABM โดยใช้ค่า $m_{FBM} = 31$ จุดภาพ .....	73

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การรังวัดจุดบนภาพถ่ายที่ได้จากการสำรวจจากระยะไกล เป็นขั้นตอนที่สำคัญในงานด้านการรังวัดด้วยภาพ เช่น การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของภาพถ่ายโดยใช้สมการสภาวะร่วมเส้น จะต้องใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points, GCPs) ที่ทราบค่าพิกัดบนพื้นดินและนำค่าพิกัดดังกล่าวเป็นข้อมูลในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของภาพถ่ายเป็นต้น วิธีการเพื่อให้ได้มาซึ่งพิกัดบนพื้นดินของ GCPs นั้นสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การสำรวจรังวัดภาคสนาม วิธีนี้ทำให้ได้ GCPs ที่มีคุณภาพดี ความถูกต้องทางตำแหน่งสูง แต่จะใช้เวลาและงบประมาณมาก อีกวิธีหนึ่งของการได้มาซึ่งพิกัดบนพื้นดินของ GCPs คือ การกำหนดจุดที่เหมือนกันจาก ภาพอ้างอิงและภาพถ่าย ประมวลผล โดยผู้ปฏิบัติงานและใช้พิกัดบนพื้นดินของจุด ภาพบนภาพถ่ายอ้างอิงเป็นพิกัดบนพื้นดินของ GCPs บนภาพประมวลผล วิธีนี้จะใช้งบประมาณน้อยกว่าการสำรวจรังวัดภาคสนาม อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้ วิธีการหาจุดเด่นชัดบนภาพและการจับคู่ภาพมาพัฒนาเป็นวิธีการรังวัดจุดภาพอัตโนมัติเพื่อเป็นการลดเวลาในการผลิตได้อีกด้วย

ในการผลิตข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมหรือสเพื่อให้ความถูกต้องทางตำแหน่งสูงขึ้น จำเป็นต้องใช้ GCPs ในการประมวลผลซึ่งค่าพิกัดบนพื้นดินของ GCPs นั้นสามารถใช้ภาพออร์โธในการอ้างอิงได้ แหล่งของภาพออร์โธที่สำคัญในประเทศไทยคือ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ จากโครงการจัดทำแผนที่เพื่อการบริหารทรัพยากรธรรมชาติและทรัพย์สินของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ในปี พ.ศ.2547 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) ซึ่งหนึ่งในผลผลิตที่สำคัญของโครงการนี้คือ ภาพออร์โธสีเชิงเลข มาตราส่วน 1:4000 ความละเอียดจุดภาพ (Ground sample distance, GSD) 0.5 เมตร ความถูกต้องทางตำแหน่ง 1 เมตรหรือดีกว่า (ซึ่งในครั้งต่อไปจะใช้คำว่า ภาพออร์โธสีเชิงเลข) โดยครอบคลุมพื้นที่เกือบทั้งประเทศ ยกเว้น บริเวณ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ คือ ยะลา ปัตตานี นราธิวาส พื้นที่บางส่วนของจังหวัดสงขลา บริเวณแนวชายแดน ไทย-ลาว และพื้นที่บางส่วนของที่ไม่สามารถผลิตแผนที่ให้ได้มาตรฐานตามข้อกำหนดทางเทคนิคของโครงการได้

โดยทั่วไป การรังวัดจุดภาพอัตโนมัตินั้น ขั้นแรกจะทำการตรวจหาจุด เค้นชัดบนภาพ จากนั้นนำจุดที่ได้มาทำการทดสอบและเปรียบเทียบหาจุดที่เหมือนในทั้ง 2 ภาพ โดยใช้เทคนิคการจับคู่ภาพและ ขั้นตอนสุดท้ายจะ ทำการตรวจหา และกำจัด จุดที่จับคู่ผิด คู่จุดที่ได้จะนำไปใช้ เป็นข้อมูลในการประมวลผลต่อไป เช่น ใช้ ในลักษณะเป็น จุดควบคุมภาพหรือ นำค่าพิกัดบนพื้นดิน

ของจุดบนภาพอ้างอิงมาใช้เป็นค่าพิกัดของ GCPs บนภาพประมวลผลเป็นต้น ขั้นตอนดังกล่าวถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในด้านต่างๆ เช่น computer vision หรือการรังวัดด้วยภาพเป็นต้น และได้มีการพัฒนา ปรับปรุงและนำเสนอวิธีการใหม่ๆ ออกมาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

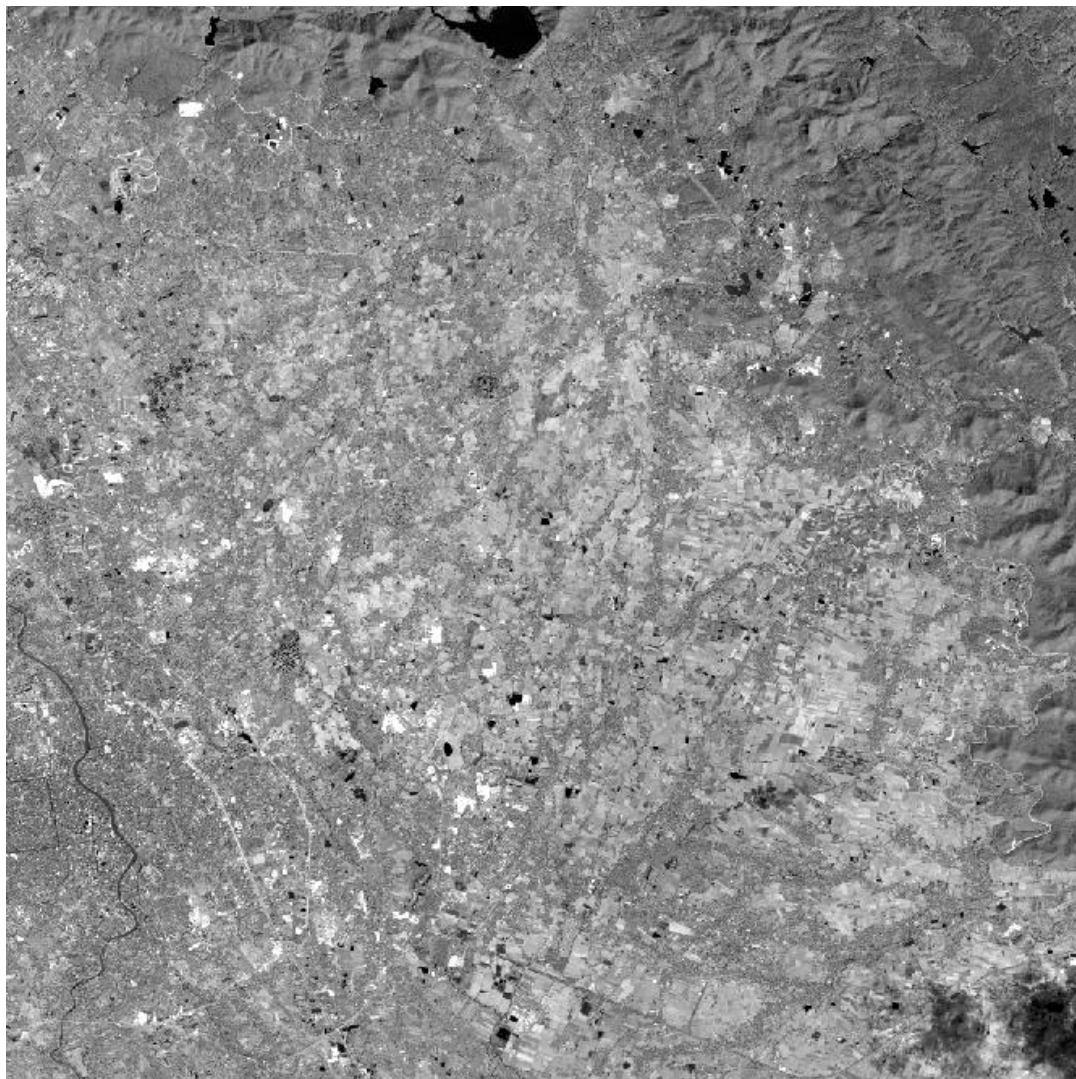
จากที่กล่าวมาข้างต้น การใช้วิธีการ รังวัดจุดภาพ อัตโนมัตินี้เพื่อหาค่าพิกัดบนพื้นดินของ GCPs ในการประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส สามารถช่วยประหยัดเวลาและงบประมาณในการผลิต อีกทั้งภาพออร์โธรีเฟสซึ่งใช้เป็นภาพอ้างอิงมีพื้นที่ครอบคลุมทั่วประเทศทำให้มีความสะดวกในการใช้งาน แต่เนื่องจากเทคนิคและวิธีการที่ใช้ในการรังวัดจุดภาพอัตโนมัตินั้นได้ถูกพัฒนาและนำเสนอวิธีการใหม่ๆ ออกมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน เช่น การหาจุดเด่นชัดในภาพด้วย FAST operator มีข้อดีคือ ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องทางตำแหน่งสูง ด้านทานต่อการหมุนและ ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยแต่มีข้อจำกัดคือ อ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวน หรือ การหาจุดเด่นชัดในภาพด้วย Förstner operator มีข้อดีคือ ด้านทานต่อการหมุนและสัญญาณรบกวน แต่มีข้อจำกัดคือ ใช้เวลาในการประมวลผลนานและไม่ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงมาตราส่วน เป็นต้น ในงานวิจัยครั้งนี้ จึงทำการศึกษาเทคนิคและวิธี ในการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติระหว่างภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสและ ภาพออร์โธ จากภาพถ่ายทางอากาศ ที่เหมาะสม โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสเป็นภาพประมวลผลและใช้ ภาพออร์โธรีเฟสเชิงเลขของกรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เป็นภาพอ้างอิงเพื่อนำคู่จุดที่ได้ไปใช้เป็น GCPs ในการผลิตข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการตรวจหาจุดเด่นชัดในภาพที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการจับคู่ จุดภาพอัตโนมัติบนภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสและภาพออร์โธรีเฟสเชิงเลข
- 1.2.2 ศึกษาวิธีการจับคู่จุดภาพที่เหมือนกันบนภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส และภาพออร์โธรีเฟสเชิงเลข
- 1.2.3 ศึกษาวิธีการตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิด
- 1.2.4 พัฒนารังวัด GCPs อัตโนมัตินบนภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสโดยใช้ภาพออร์โธรีเฟสเชิงเลขเป็นภาพอ้างอิง และทำการเปรียบเทียบผลการประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสระหว่างการใช้ GCPs ที่ได้จากรังวัด GCPs อัตโนมัตินี้และวิธีระบุ GCPs โดยผู้ปฏิบัติงาน
- 1.2.5 ประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสที่ได้จากการประมวลผล

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมธีออสระ ดับ 1A แบบ panchromatic GSD ประมาณ 2 เมตร บันทึกข้อมูลเมื่อวันที่ 2 ธันวาคม 2552 บริเวณจังหวัด เชียงใหม่ เป็นภาพประมวลผลดังแสดงในภาพที่ 1.1

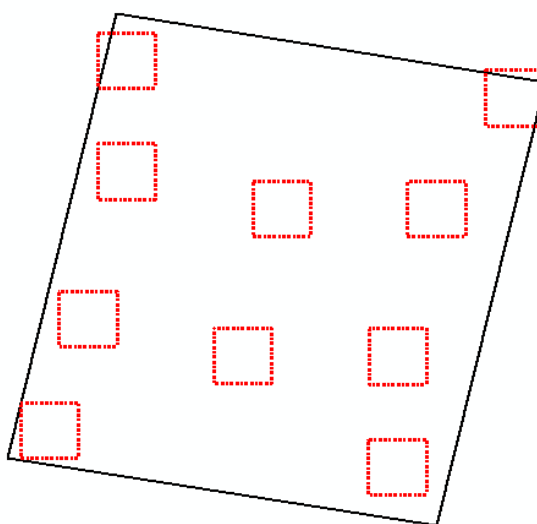


ภาพที่ 1.1 ภาพถ่ายดาวเทียมธีออสที่ใช้ในการศึกษา

จากภาพที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าภาพถ่ายดาวเทียมธีออสที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ครอบคลุมพื้นที่ลักษณะ หลากหลาย เช่น ชุมชน เกษตรกรรม ป่าไม้และภูเขา เป็นต้น ลักษณะพื้นที่ที่ หลากหลายนี้ส่งผลกับการจับคู่ภาพกล่าวคือ พื้นที่ชุมชนนั้นจุดเด่นชัดที่ปรากฏในภาพโดยส่วน ใหญ่เกิดจากสิ่งก่อสร้างของมนุษย์ เช่น จุดตัดของถนน สะพาน หรืออาคาร เป็นต้น ซึ่งลักษณะ ดังกล่าว มีความเด่นชัดและมีการเปลี่ยนแปลงน้อย จึงทำให้การจับคู่ภาพค่อนข้าง ง่ายกว่าพื้นที่

เกษตรกรรม ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ในบริเวณกว้างและพื้นที่ ป่าไม้และภูเขาซึ่งมีลักษณะเด่นชัดค่อนข้างน้อย

1.3.2 ใช้ภาพออร์โธ รีโมทีเซนซ์ ซึ่งมีการจัดเก็บในรูปแบบ geotiff ระบุพิกัดบนพื้นดินด้วยระบบพิกัดฉาก UTM พื้นหลักฐาน WGS 84 GSD = 0.5 เมตร ความถูกต้องทางตำแหน่ง 1 เมตร และมีส่วนซ้อนทับกับภาพถ่ายดาวเทียมรีออสจำนวน 10 ภาพเป็นภาพอ้างอิง



ภาพที่ 1.2 ขอบเขตของภาพที่ใช้ในการศึกษา

จากภาพที่ 1.2 แสดงถึง เขตของภาพที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้โดยเส้นประสีแดงแสดงถึงขอบเขตของ ภาพออร์โธ รีโมทีเซนซ์และเส้นสีดำแสดงถึงขอบเขตของภาพถ่ายดาวเทียมรีออสซึ่งแสดงผลในระบบพิกัดแผนที่ เพื่อให้สังเกตเห็นส่วนซ้อนทับของ ภาพทั้งสองได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น และจะสังเกตเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกับ ภาพที่ 1.1 ซึ่งแสดงผลในระบบพิกัดภาพ ลักษณะที่แตกต่างกันนี้จะอธิบายในหัวข้อ 2.1.3 ต่อไป

1.3.3 ไม่คำนึงถึงปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการประมวลผล

#### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ทดสอบวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพถ่ายและเลือกวิธีการที่เหมาะสมกับงานวิจัย
- 1.4.3 ทดสอบวิธีการจับคู่ภาพที่เหมาะสมกับงานวิจัย
- 1.4.4 ทดสอบวิธีการตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิด



1.4.5 พัฒนารีวิววิธีการรังวัด GCPs อัตราโนมิติบนภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสโดยใช้ ภาพออร์โธ จากภาพถ่ายทางอากาศเป็นภาพอ้างอิง

1.4.6 ทดสอบวิธีการรังวัด GCPs อัตราโนมิติ

1.4.7 เปรียบเทียบ GCPs ที่ได้จากการรังวัดจุดภาพอัตรา โนมิตินิและวิธีการระบุ GCPs โดยผู้ปฏิบัติงาน

1.4.8 สรุปผลการศึกษาร่วมข้อเสนอแนะ เรายเรียงและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงวิธีการหาจุดเด่นชัดบนภาพ ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการจับคู่จุดภาพอัตรา โนมิตินิบนภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสและภาพออร์โธสีเชิงเลข

1.5.2 ทราบ ถึงวิธี การจับคู่จุด ภาพ ที่เหมือนกันใน ภาพออร์โธ สีเชิงเลขและภาพถ่าย ดาวเทียมหรือออส

1.5.3 ทราบถึงวิธีการตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิด

1.5.4 ได้จุดที่เหมือนกันใน ภาพออร์โธ สีเชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส เพื่อนำไป ประยุกต์ใช้เป็น GCPs หรืองานในด้านอื่นที่เกี่ยวข้อง

1.5.5 ได้วิธีรังวัด GCPs อัตราโนมิติบนภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสโดยใช้ ภาพออร์โธสีเชิงเลข เป็นภาพอ้างอิง

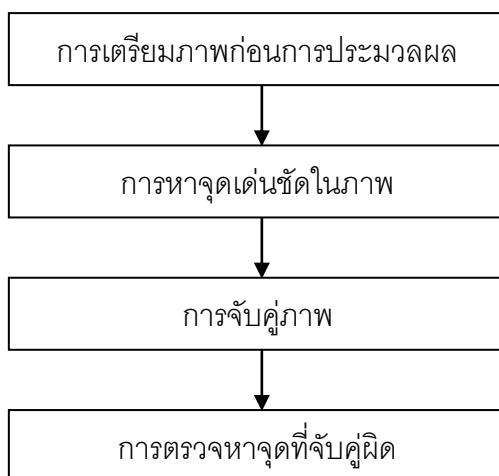
1.5.6 ทราบความถูกต้องทางตำแหน่งของภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสที่ใช้ GCPs จากการ ประมวลผลรังวัดจุดภาพอัตรา โนมิตินิ

## บทที่ 2

### แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การรังวัด GCPs บนภาพถ่ายดาวเทียมหรือสไลด์โดยใช้ ภาพออร์โธ เป็นภาพอ้างอิงนั้น โดยทั่วไปขั้นตอนแรกจะทำการระบุจุดเด่นชัดที่ปรากฏ ในทั้ง 2 ภาพ และใช้จุดเด่นชัดบนภาพถ่ายดาวเทียมหรือสไลด์เป็น GCPs ขั้นตอนต่อไปจะทำการคำนวณค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดเด่นชัดบนภาพออร์โธ ประมาณค่าความสูงระดับด้วยแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข ขั้นตอนสุดท้ายจะใช้ค่าพิกัดบนพื้นดิน ดังกล่าวเป็นค่าพิกัดบนพื้นดินของ GCPs จากขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น สามารถประยุกต์ใช้เทคนิคการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติช่วยในการประมวลผล โดยมีขั้นตอนการทำงานคล้ายกับการระบุจุดที่เหมือนกันในทั้ง 2 ภาพ โดยผู้ปฏิบัติงาน โดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะทำการระบุจุดเด่นชัดในภาพ โดยใช้เทคนิคการหาจุดเด่นชัดในภาพ ขั้นตอนต่อมาจะทำการจับคู่จุดที่เหมือนกันใน ทั้งสองภาพโดยใช้เทคนิคการจับคู่จุดภาพ และขั้นตอนสุดท้ายจะทำการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้โดยใช้เทคนิคการตรวจหาจุดที่จับคู่ผิด

สำหรับในกรณีการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติระหว่าง ภาพออร์โธ สีเชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมหรือสไลด์นั้น ภาพทั้งสองมีรูปแบบการจัดเก็บที่แตกต่างกันคือ ภาพออร์โธ สีเชิงเลขมีการจัดเก็บค่าความเข้มแสงของจุดภาพแบบ 3 ช่วงสี คือ สีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน ( $RGB$ )  $GSD = 0.5$  เมตร ในส่วนของภาพถ่ายดาวเทียมหรือสไลด์นั้นมีการจัดเก็บค่าความเข้มแสงของจุดภาพเป็นแบบภาพระดับเทา (gray scale)  $GSD$  ประมาณ 2 เมตร และมีการวางตัวของภาพที่แตกต่างจากภูมิประเทศจริง รูปแบบการจัดเก็บ และการวางตัว ที่แตกต่างกันของภาพทั้งสอง นั้นส่งผลกระทบโดยตรงกับข้อจำกัดของวิธีการที่ใช้ในการประมวลผล (รายละเอียดในหัวข้อ 2.2 และ 2.3) และทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อลดผลกระทบดังกล่าว จึงต้องทำการเตรียมภาพก่อนการประมวลผลและนำภาพดังกล่าวเข้าสู่ขั้นตอนการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติ ต่อไป ขั้นตอนหลักของการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ดังแสดงในภาพที่ 2.1

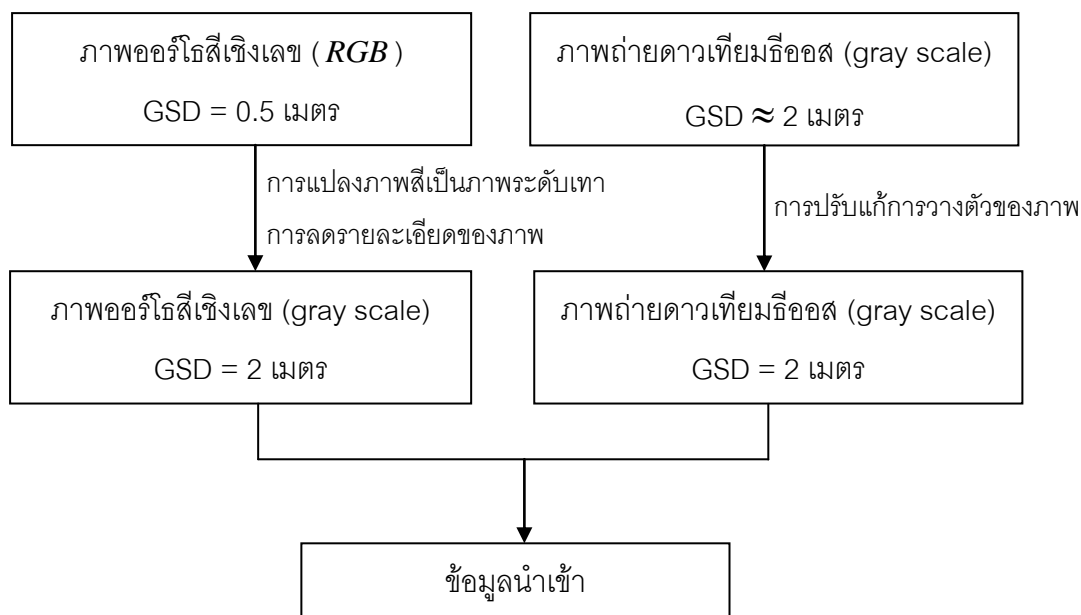


ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติที่ใช้ในการศึกษา

ภาพที่ 2.1 แสดงถึงขั้นตอนหลักที่ใช้ในการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติที่ใช้ในการศึกษารังนี้ซึ่งในแต่ละขั้นตอนประกอบด้วยแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการศึกษา โดยในหัวข้อ 2.1 อธิบายถึงแนวคิดและทฤษฎีที่ใช้ในการเตรียมภาพก่อนการประมวลผล หัวข้อ 2.2 อธิบายแนวคิดและทฤษฎีการหาจุดเด่นชัดในภาพ หัวข้อ 2.3 อธิบายแนวคิดและทฤษฎี การจับคู่ภาพ และในหัวข้อ 2.4 อธิบายแนวคิดและทฤษฎีการตรวจหาจุดที่จับคู่ผิด

## 2.1 การเตรียมภาพก่อนการประมวลผล

ขั้นตอนการหาจุดเด่นชัดในภาพและการจับคู่ภาพนั้นจะทำการประมวลผลจากค่าความเข้มแสงของจุดภาพในภาพระดับเทา (รายละเอียดในหัวข้อ 2.2 และ 2.3) อีกทั้งจากข้อจำกัดในขั้นตอนการจับคู่ภาพในด้านอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงมุม อัตราส่วน และการวางตัวของภาพ (รายละเอียดในหัวข้อ 2.3) ก่อนประมวลผล การจับคู่จุดภาพอัตโนมัติ จึงต้องทำการเตรียมข้อมูลนำเข้าให้สอดคล้องกับวิธีการที่ใช้ในการประมวลผลดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ขั้นตอนการเตรียมภาพก่อนการประมวลผลของภาพถ่ายดาวเทียมสีและภาพถ่ายดาวเทียมสี

ในขั้นตอนการเตรียมภาพก่อนการประมวลผล จึงทำการแปลง ภาพถ่ายดาวเทียมสีจากภาพสีให้เป็นภาพระดับเทาและลดรายละเอียดภาพจาก  $GSD = 0.5$  เมตร เป็น  $GSD = 2$  เมตร ในส่วนของภาพถ่ายดาวเทียมสี นั้น สามารถปรับแก้การวางตัวของภาพในเบื้องต้นได้โดยใช้ค่าพิกัดบนพื้นดินโดยประมาณของมุมภาพทั้ง 4 มุม เพื่อลดข้อจำกัดในขั้นตอนการจับคู่ภาพ จึงทำการ resampling ภาพถ่ายดาวเทียมสีให้มีการวางตัวใกล้เคียงกับความเป็นจริง ซึ่งขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นมีแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1.1 การแปลงภาพสีเป็นภาพระดับเทา (*RGB to gray scale conversion*) เป็นการแปลงภาพถ่ายเชิงสีที่จัดเก็บค่าของจุดภาพเป็น 3 ช่วงคือ สีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน (*RGB*) ให้เป็นภาพระดับเทาซึ่งมีวิธีการแปลงหลายวิธีเช่น การคำนวณค่าของจุดภาพจากการเฉลี่ยความเข้มแสงทั้ง 3 ช่วงเท่าๆกัน คำนวณจากการเฉลี่ยความเข้มแสงในช่วงสีแดงและสีเขียว หรือใช้เฉพาะความเข้มแสงช่วงสีแดงช่วงเดียวเป็นต้น อีกวิธีที่นิยมใช้คือการใช้ค่า  $Y$  ในแบบจำลองของสีแบบ  $YIQ$  (Platt, 2001) ซึ่งถูกพัฒนาโดย National Television System Committee (NTSC) ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อใช้ในการส่งสัญญาณโทรทัศน์ของประเทศสหรัฐอเมริกา ประกอบด้วย 3 ค่า คือ  $Y$ ,  $I$  และ  $Q$  โดยที่  $Y$  คือ ค่าความสว่าง (luminance),  $I$  และ  $Q$  คือค่า chroma ซึ่งใช้อธิบายข้อมูลของสีในภาพ ซึ่งแบบจำลองสีแบบ  $YIQ$  สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองสี *RGB* ดังสมการที่ (2.1)

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.29889531 & 0.58662247 & 0.11448223 \\ 0.59597799 & -0.27417610 & -0.32180189 \\ 0.21147017 & -0.52261711 & 0.31114964 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

โดยที่

$R$  คือ ค่าความเข้มแสงของจุดภาพในช่วงแสงสีแดง

$G$  คือ ค่าความเข้มแสงของจุดภาพในช่วงแสงสีเขียว

$B$  คือ ค่าความเข้มแสงของจุดภาพในช่วงแสงสีน้ำเงิน

การคำนวณค่า  $Y$  ในแบบจำลองสีแบบ  $YIQ$  นั้นถูกนิยามใช้เป็นสมการพื้นฐานในการแปลงภาพสีเป็นภาพระดับเทาหรือเรียกว่าสมการ NTSC (สมการที่ (2.2))

$$Gray = 0.289R + 0.587G + 0.114B \quad (2.2)$$

โดยที่

$Gray$  คือ ค่าความเข้มแสงของจุดภาพในภาพระดับเทา

ในการแปลงภาพสีเป็นภาพระดับเทาโดยใช้สมการ NTSC นั้น ในซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลภาพเชิงเลข ส่วนใหญ่จะมี ฟังก์ชัน สำเร็จรูปให้ใช้งาน เช่น ซอฟต์แวร์ MATLAB หรือ openCV เป็นต้น จึงสามารถใช้งาน ใช้งานฟังก์ชัน สำเร็จรูปดังกล่าว ในขั้นตอน การแปลงภาพสีเป็นภาพระดับเทาได้สะดวกยิ่งขึ้น

2.1.2 การลดรายละเอียดของภาพ (Decimation, Downsampling) เป็นเทคนิคที่ถูกใช้ในกรณีเช่น การแสดงผลภาพถ่ายดิจิทัลให้มีขนาดเหมาะสมกับความละเอียดของจอแสดงผล การปรับขนาดของภาพดิจิทัลให้เหมาะสมกับเครื่องพิมพ์ หรือเพื่อลดเนื้อที่จัดเก็บข้อมูล เป็นต้น สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ เพื่อลดข้อจำกัดในขั้นตอนการจับคู่ภาพจึงทำการลดรายละเอียดของ ภาพออร์โธ สีเชิงเลขลง วิธีการทั่วไปจะทำการประมาณค่าของจุดภาพด้วยตัวกรองภาพซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.3)

$$g(i, j) = \sum_{k,l} f(k,l)h(ri-k, ri-l) \quad (2.3)$$

โดยที่

$g(i, j)$  คือภาพผลลัพท์

$f(k, l)$  คือตัวกรองภาพ

$h(i, j)$  คือภาพเริ่มต้น

$r$  คือค่าคงที่

ตัวอย่างตัวกรองภาพดังแสดงในภาพที่ 2.3 เช่น box-3, box-5, linear หรือ binomial เป็นต้น

$\frac{1}{9}$	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 60px; height: 60px;"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	$\frac{1}{25}$	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100px; height: 100px;"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1																																			
1	1	1																																			
1	1	1																																			
1	1	1	1	1																																	
1	1	1	1	1																																	
1	1	1	1	1																																	
1	1	1	1	1																																	
1	1	1	1	1																																	
ก. box-3		ข. box-5																																			
$\frac{1}{16}$	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 60px; height: 60px;"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	1	2	1	2	4	2	1	2	1	$\frac{1}{256}$	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100px; height: 100px;"> <tr><td>1</td><td>4</td><td>6</td><td>4</td><td>1</td></tr> <tr><td>4</td><td>16</td><td>24</td><td>16</td><td>4</td></tr> <tr><td>6</td><td>24</td><td>36</td><td>24</td><td>6</td></tr> <tr><td>4</td><td>16</td><td>24</td><td>16</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td>4</td><td>6</td><td>4</td><td>1</td></tr> </table>	1	4	6	4	1	4	16	24	16	4	6	24	36	24	6	4	16	24	16	4	1	4	6	4	1
1	2	1																																			
2	4	2																																			
1	2	1																																			
1	4	6	4	1																																	
4	16	24	16	4																																	
6	24	36	24	6																																	
4	16	24	16	4																																	
1	4	6	4	1																																	
ค. linear		ง. binomial																																			

ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างตัวกรองภาพ

การใช้ตัวกรองภาพ box-3 หรือ box-5 อาจทำให้บริเวณเส้นขอบของภาพผลลัพท์ไม่ราบเรียบ โดยทั่วไปจึงนิยมใช้ตัวกรองแบบ low-pass เช่น linear หรือ binomial เป็นต้น สำหรับการลดรายละเอียดของภาพออร์โธสีเชิงเลข จาก GSD = 0.5 เมตร เป็น GSD = 2 เมตร นั้นสามารถประยุกต์ใช้เทคนิค การสร้าง image pyramid ได้ โดยใช้สมการที่ (2.3) กำหนดค่า  $r = 2$  และใช้ตัวกรองภาพ binomial ซึ่งถูกนำเสนอโดย Burt และ Adelson (1983) ซึ่งเป็นตัวกรองภาพที่นิยมใช้ในการสร้าง image pyramids (Szeliski, 2010)

ในการลดรายละเอียดของ ภาพโดยใช้สมการที่ (2.3) ซึ่งเป็นเทคนิคเดียวกับการ สร้าง image pyramids นั้น ในซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลภาพเชิงเลขส่วนใหญ่จะมี ฟังก์ชันสำเร็จรูปให้ใช้งาน เช่น ซอฟต์แวร์ MATLAB หรือ openCV เป็นต้น จึงสามารถใช้งานใช้ งานฟังก์ชันสำเร็จรูปดังกล่าว ในขั้นตอนการลดรายละเอียดของภาพได้สะดวกยิ่งขึ้น

2.1.3 การปรับแก้การวางตัวของภาพถ่ายดาวเทียมรีออส ภาพถ่ายดาวเทียมรีออสนั้น สามารถปรับแก้การวางตัวของภาพในเบื้องต้นได้โดยใช้ค่าพิกัดบนพื้นดินโดยประมาณของมุม ภาพทั้ง 4 มุม ค่าพิกัดบนพื้นดินโดยประมาณของจุดภาพทั้ง 4 มุม ของภาพถ่ายดาวเทียมรีออส สามารถทราบ ได้จากข้อมูล THEOS-1 DIMAP product data-sheet ในส่วนของ Dataset framing ดังแสดงตัวอย่างใน ภาพที่ 2.4 หรือใช้ซอฟต์แวร์ที่สามารถเรียกดูข้อมูลในส่วนของ geotiff tags ของภาพถ่ายดาวเทียมรีออสได้เช่นกัน

Dataset framing				
Corner	Longitude (DEG)	Latitude (DEG)	Line	Pixel
#1	E99°01' 24"	N18°57' 07"	1	1
#2	E99°14' 01"	N18°55' 07"	1	12000
#3	E98°58' 11"	N18°44' 05"	12000	1
#4	E99°10' 48"	N18°42' 05"	12000	12000
Center	E99°06' 05"	N18°49' 36"	6000	6000

ภาพที่ 2.4 ค่าพิกัดบนพื้นดินโดยประมาณของจุดภาพทั้ง 4 มุม ของภาพถ่ายดาวเทียมรีออส

ในการคำนวณค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดภาพใดๆ ในภาพถ่ายดาวเทียมรีออส โดยทั่วไปจะ ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดภาพและค่าพิกัดบนพื้นดินเป็นแบบ affine ประกอบด้วยค่าคงที่ 6 ค่า

$$\begin{aligned} X &= Ax + By + C \\ Y &= Dx + Ey + F \end{aligned} \quad (2.4)$$

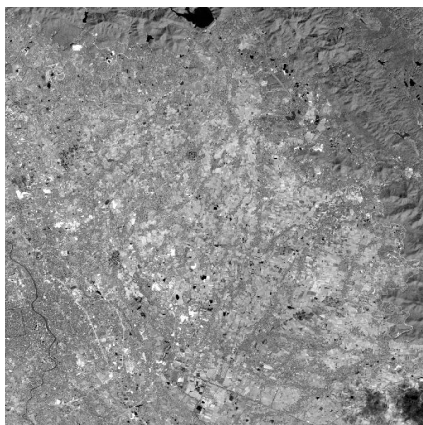
โดยที่

$(X, Y)$  คือ ค่าพิกัดบนพื้นดิน

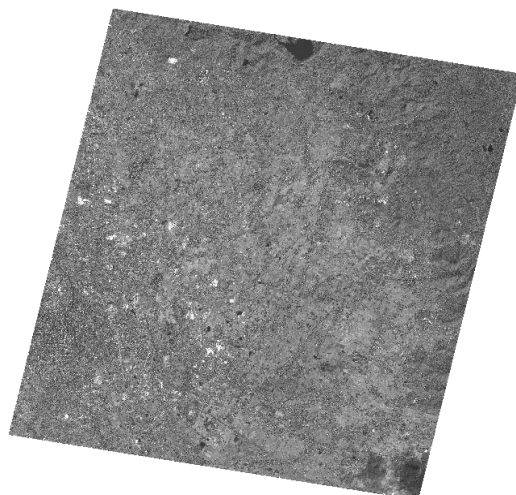
$(x, y)$  คือ ค่าพิกัดภาพ

$A B C D E$  และ  $F$  คือค่าคงที่

จุดภาพที่ทราบค่าพิกัดบน พื้นดินทั้ง 4 จุดภาพนั้นเพียงพอต่อการคำนวณค่าคงที่ 6 ค่าในสมการที่ (2.4) และเมื่อสามารถคำนวณค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดภาพใดๆ ในภาพถ่ายดาวเทียมธีออสได้ จึงสามารถแสดงผลภาพถ่ายดาวเทียมธีออสในระบบพิกัดแผนที่ได้อีกด้วย



ก. การแสดงผลในระบบพิกัดภาพ



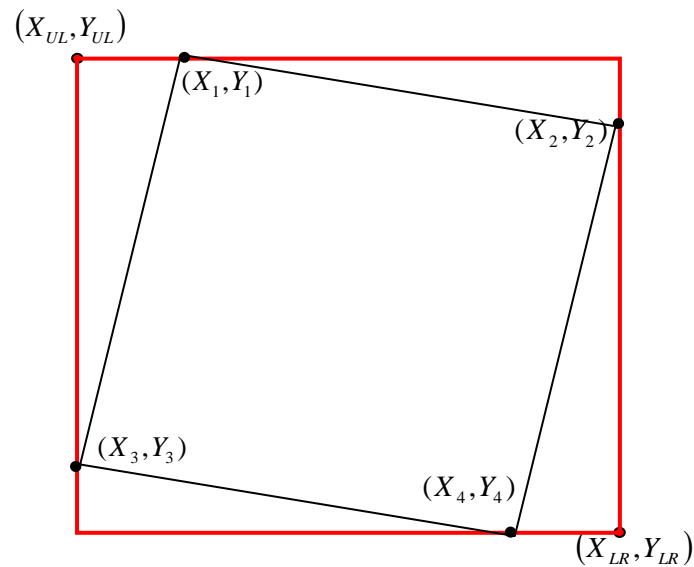
ข. การแสดงผลในระบบพิกัดแผนที่

ภาพที่ 2.5 การวางตัวของภาพถ่ายดาวเทียมธีออสในระบบพิกัดภาพและระบบพิกัดแผนที่

ภาพที่ 2.5 ก. แสดงให้เห็นถึงการแสดงผลภาพถ่ายดาวเทียมธีออสใน ระบบพิกัดภาพ ภาพที่ 2.5 ข. แสดงให้เห็นถึงการแสดงผลภาพถ่ายดาวเทียมธีออสในระบบพิกัดแผนที่ จะสังเกตได้ว่าทั้ง 2 ภาพ มีการวางตัวที่แตกต่างกัน โดยที่การแสดงผลในระบบพิกัด แผนที่จะมีการวางตัวใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าการแสดงผลในระบบพิกัดภาพ แต่เนื่องจากภาพที่ 2.5 ข. เป็นภาพที่ใช้ในการแสดงผล จึงไม่สามารถนำมาใช้ในการประมวลผลภาพเชิงเลขได้และเพื่อลดข้อจำกัดในขั้นตอนการจับคู่ภาพ จึงทำการ resampling ภาพถ่ายดาวเทียมธีออสให้มีการวางตัวใกล้เคียงกับความเป็นจริง หลักการ resampling นั้นมีขั้นตอนการทำงานคือ

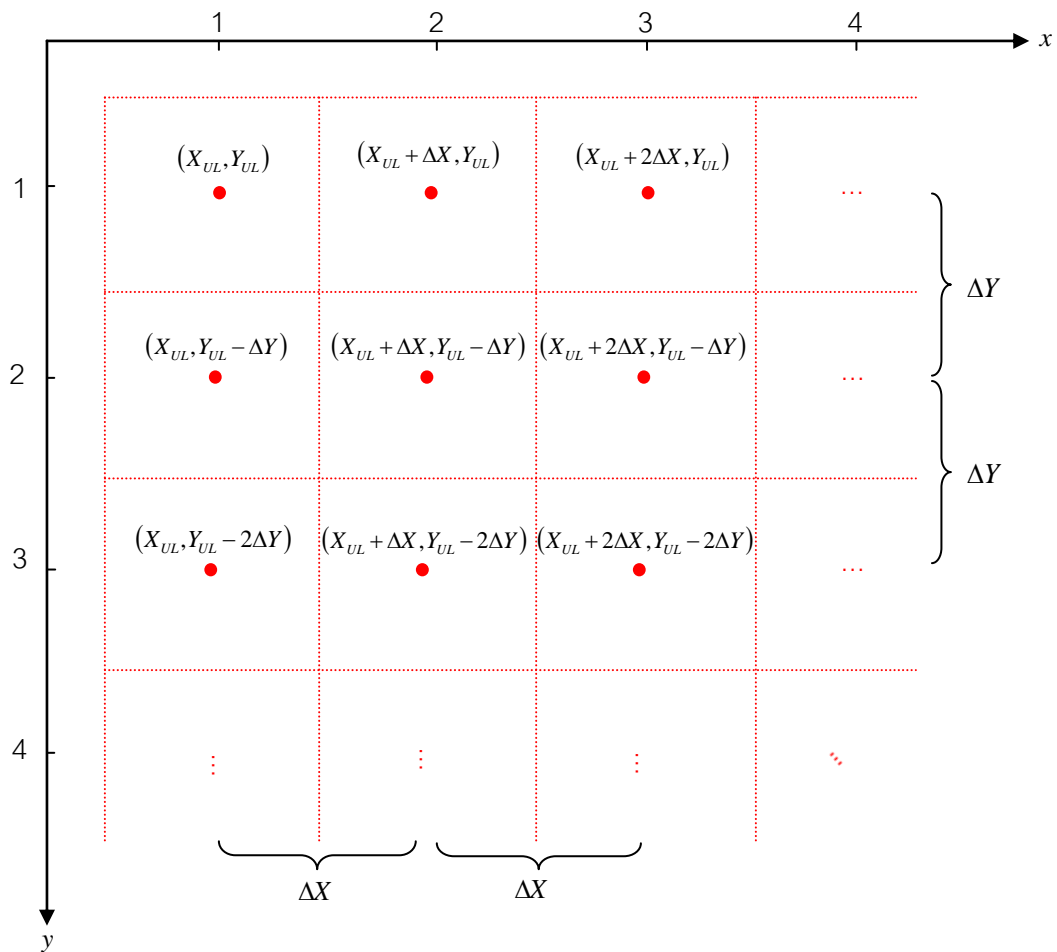


1) กำหนดกรอบพิกัดภาพและตำแหน่งของจุดภาพ โดยจะทำการกำหนด ค่าพิกัดบนพื้นดินของ กรอบภาพผลลัพธ์บริเวณมุมบนซ้ายและล่างขวาของภาพและทำการกำหนดขนาดของจุดภาพดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การกำหนดค่าพิกัดบนพื้นดินของกรอบภาพผลลัพธ์

จากภาพที่ 2.6 เส้นกรอบสีแดงแสดงถึงกรอบภาพผลลัพธ์ เส้นกรอบสีดำคือกรอบภาพของภาพถ่ายดาวเทียมหรือสที่ปรับแก้การวางตัวของภาพแล้ว ค่า  $(X_i, Y_i)$  คือค่าพิกัดบนพื้นดินทั้ง 4 มุม ของภาพถ่ายดาวเทียมหรือส  $(X_{UL}, Y_{UL})$  และ  $(X_{LR}, Y_{LR})$  คือค่าพิกัดบนพื้นดินบริเวณมุมบนซ้ายและมุมล่างขวาตามลำดับ จากภาพที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า  $(X_{UL}, Y_{UL}) = (X_3, Y_3)$  และ  $(X_{LR}, Y_{LR}) = (X_2, Y_4)$  เมื่อทำการสร้างกรอบภาพผลลัพธ์เรียบร้อยแล้วจะทำการ ระบุตำแหน่งของจุดภาพซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องกำหนดขนาดของจุดภาพโดยผู้ใช้งาน ตัวอย่างการระบุตำแหน่งของจุดภาพในภาพผลลัพธ์ดังแสดงในภาพที่ 2.7

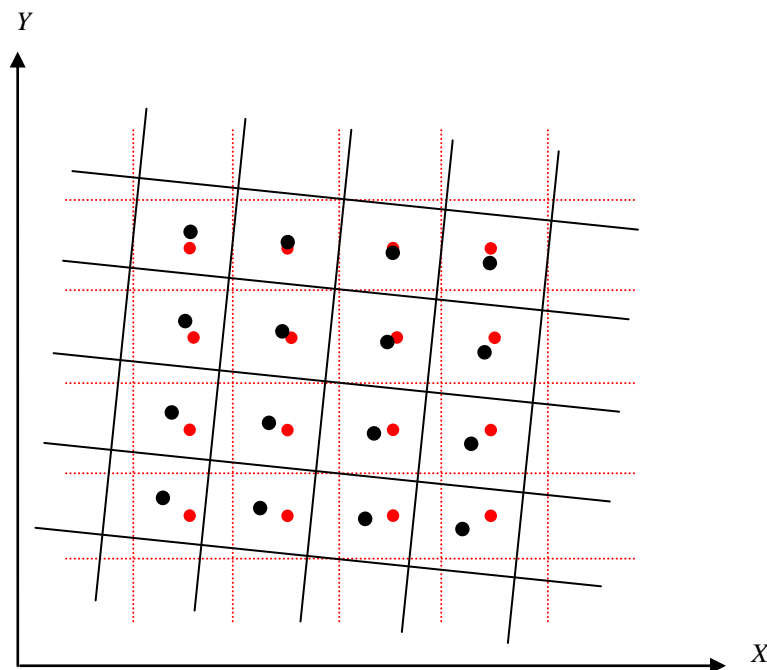


ภาพที่ 2.7 การระบุตำแหน่งของจุดภาพในภาพผลลัพท์

จากภาพที่ 2.7 ให้จุดภาพที่อยู่ตำแหน่งบนซ้ายของภาพมีพิกัดภาพเป็น  $(1, 1)$  มีพิกัดบนพื้นดินเป็น  $(X_{UL}, Y_{UL})$  และมีขนาด  $(m \times n)$  จุดภาพ  $\Delta X$  และ  $\Delta Y$  คือระยะห่างระหว่างจุดภาพ (ขนาดของจุดภาพ) เมื่อพิจารณาจุดภาพในแถวที่ 1 จุดภาพตำแหน่ง  $(2, 1)$  จะมีพิกัดบนพื้นดินคือ  $(X_{UL} + \Delta X, Y_{UL})$  จุดภาพตำแหน่ง  $(3, 1)$  จะมีพิกัดบนพื้นดินคือ  $(X_{UL} + 2\Delta X, Y_{UL})$  ทำการคำนวณเช่นนี้ไปจนกระทั่งจุดภาพตำแหน่ง  $(m, 1)$  มีพิกัดบนพื้นดินคือ  $(X_{LR}, Y_{UL})$  และทำขั้นตอนดังกล่าวกับจุดภาพทุกแถวจนกระทั่งจุดภาพ  $(m \times n)$  มีพิกัดบนพื้นดินคือ  $(X_{LR}, Y_{RL})$

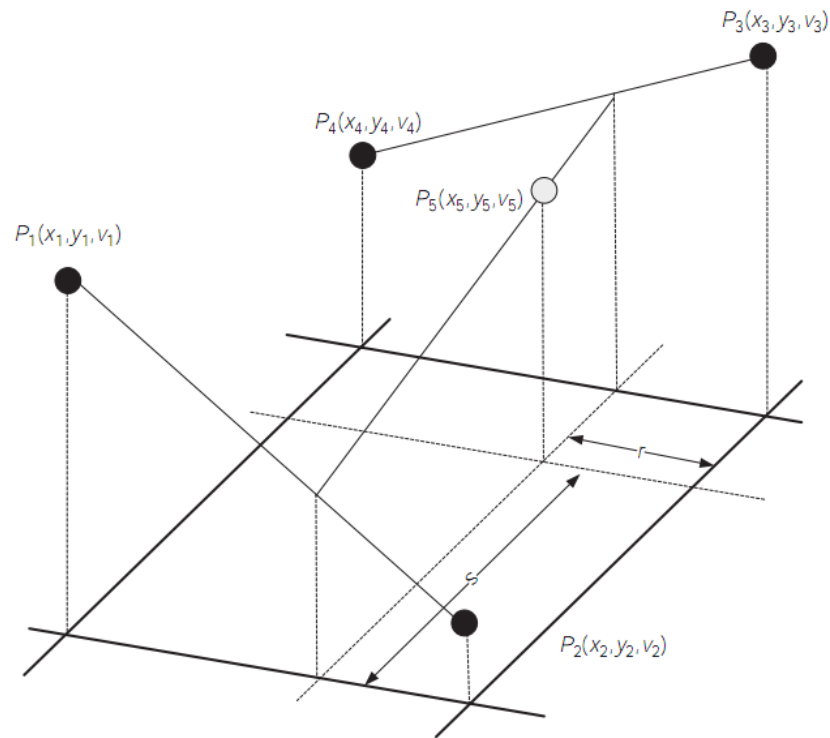
2) การประมาณค่าของจุดภาพ เมื่อทำการกำหนดกรอบพิกัดภาพและ ค่าพิกัดบนพื้นดินของ จุดภาพ ในภาพผลลัพท์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการกำหนดค่าความเข้มแสงของจุดภาพผลลัพท์ โดยเปรียบเทียบจากค่าความเข้มแสงของจุดภาพบนภาพตั้งต้นที่มีค่าพิกัดบน

พื้นดินเดียวกัน โดยทั่วไปค่าพิกัดบนพื้นดินจุดภาพในภาพทั้งสองมักจะไม่ใช้ตำแหน่งเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ตำแหน่งบนพื้นดินของจุดภาพในภาพตั้งต้นและภาพผลลัพธ์

จาก ภาพที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งบนพื้นดินของจุดภาพในภาพผลลัพธ์ (แสดงผลด้วยสีแดง) โดยส่วนใหญ่ จะไม่ตรงกับตำแหน่งบนพื้นดินของจุดภาพในภาพตั้งต้น (แสดงผลด้วยสีดำ) ดังนั้นการกำหนดค่าความเข้มแสงของจุดภาพผลลัพธ์จึงต้องทำการประมาณจากค่าความเข้มแสงของจุดภาพตั้งต้น วิธีประมาณจากค่าความเข้มแสงของจุดภาพนั้นมีหลายวิธีเช่น การประมาณค่าของจุดภาพแบบ nearest neighbourhood วิธีนี้จะใช้ค่าความเข้มแสงของจุดภาพตั้งต้นที่อยู่ใกล้กับจุดภาพผลลัพธ์ที่สุดเป็นค่าความเข้มแสงของจุดภาพผลลัพธ์ วิธีนี้จะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยแต่ภาพผลลัพธ์ที่ได้โดย เฉพาะบริเวณเส้นขอบ ไม่ราบเรียบ อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้โดยทั่วไปในการประมาณค่าของจุดภาพและใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือการประมาณค่าของจุดภาพแบบ bilinear (Gonzalez, 2002) วิธีนี้จะใช้ค่าความเข้มแสงของจุดภาพตั้งต้น 4 จุดภาพ รอบจุดภาพผลลัพธ์ และคำนวณค่าความเข้มแสงของจุดภาพผลลัพธ์ ดังแสดงใน ภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การประมาณค่าของจุดภาพด้วยวิธี bilinear (Cyganek and Paul, 2009)

จากภาพที่ 2.9 จุด  $P_1, P_2, P_3$  และ  $P_4$  คือจุดภาพของภาพตั้งต้นที่ตำแหน่ง  $(x_i, y_i)$  และมีค่าความเข้มแสง  $v_i$ ; จุด  $P_5$  คือจุดภาพที่ต้องการต้องการประมาณค่าความเข้มแสงของจุดภาพ ( $v_5$ ) ในการประมาณค่า  $v_5$  มีขั้นตอนคือ

- คำนวณค่า  $r$  และ  $s$  โดยใช้สมการที่ (2.5)

$$r = \frac{x_5 - x_1}{x_2 - x_1}, \quad s = \frac{y_5 - y_3}{y_2 - y_3} \quad (2.5)$$

- คำนวณค่า  $v_5$  โดยใช้สมการที่ (2.6)

$$v_5 = (1 - r)(1 - s) v_4 + r(1 - s) v_3 + (1 - r) s v_1 + r s v_2 \quad (2.6)$$

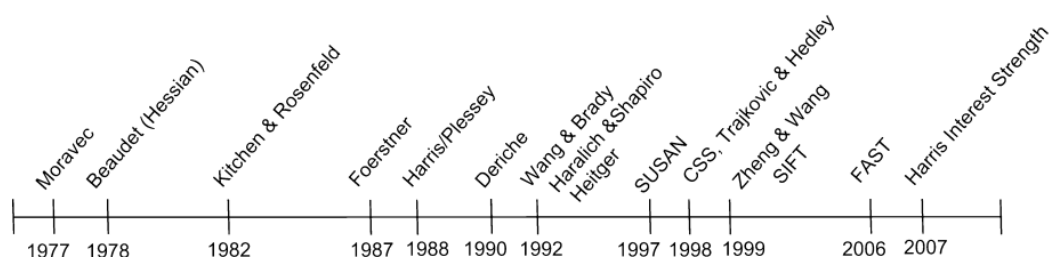
ทำการคำนวณค่าความเข้มแสงของจุดภาพในภาพผลลัพธ์โดยใช้ขั้นตอนดังกล่าวจนครบทุกจุดภาพในภาพผลลัพธ์

ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการ resampling นี้ในแต่ละจุดภาพจะทราบค่าพิกัดบนพื้นดิน จึงสามารถจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบ geotiff ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกในการประมวลผลเชิงภูมิศาสตร์

อีกทั้งในซอฟต์แวร์ Erdas Imagine มีฟังก์ชันสำเร็จรูปสำหรับขั้นตอน resampling จึงช่วยเพิ่มความสะดวกในการประมวลผลยิ่งขึ้น

## 2.2 การหาจุดเด่นชัดในภาพถ่าย

การหาจุดเด่นชัดในภาพถ่าย ได้ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 1970 (Jazayeri and Fraser, 2010) โดย Moravec ได้เผยแพร่แนวคิดเรื่อง “point of interest” และพัฒนาวิธีการหาจุดเด่นชัดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ.1977 (Schmid, 2000) หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาปรับปรุง วิธีการต่างๆ ออกมาจำนวนมากดังภาพที่ 2.10 ซึ่งวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพถ่าย วิธีการใดวิธีการหนึ่งไม่สามารถประยุกต์ใช้งานได้ทุกกรณี เช่น ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติควรใช้วิธีการที่สามารถตรวจหาจุดเด่นชัดจุดเดียวกันในภาพ 2 ภาพ ที่มีสภาวะแตกต่างกัน เช่น การวางตัว การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง รวมถึงผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (noise) ได้ดี หรือเรียกว่า repeatability rate สูงหรือในการวัดสอบกลับควรใช้ วิธีการที่มีความแม่นยำทางตำแหน่ง เป็นต้น (Schmid, 2000)



ภาพที่ 2.10 พัฒนาการของวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพถ่าย (Jazayeri and Fraser, 2010)

การศึกษาครั้งนี้จะทำการพิจารณาคัดเลือกวิธีหาจุดเด่นชัดในภาพ จากวิธีที่นิยมใช้งานในด้านการรังวัดด้วยภาพ ได้แก่ Förstner operator, Harris operator, SUSAN operator และ FAST operator ซึ่งแต่ละวิธีมีหลักการและขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

### 2.2.1 Förstner operator

Förstner operator (Förstner และ Gulch, 1978; Förstner, 1994) เป็นวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในด้าน การรังวัดด้วยภาพ computer vision และการสร้างแบบจำลองสามมิติ (Jazayeri and Fraser, 2010) มีลักษณะเด่นคือ ด้านทนต่อการหมุน การ

เปลี่ยนแปลงความเข้มแสง สัญญาณรบกวน และมี repeatability rate สูง มีแนวคิดพื้นฐานจากการวิเคราะห์ autocorrelation matrix ซึ่งการสร้าง autocorrelation matrix นั้น มีขั้นตอนดังนี้

1) คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  จากสมการที่ (2.7) และ (2.8) ตามลำดับ

$$I_{x(i,j)} = h(i,j) \otimes dx \quad (2.7)$$

$\otimes = \text{convolution operator}$

$$I_{y(i,j)} = h(i,j) \otimes dy, \quad dy = dx^T \quad (2.8)$$

โดยที่

$I_{x(i,j)}$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในแนวแกน  $x$

$I_{y(i,j)}$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในแนวแกน  $y$

$h(i,j)$  คือภาพเริ่มต้น

$dx$  คือ derivative masks

การคำนวณ  $dx$  ที่ใช้ในการสร้าง autocorrelation matrix นั้นโดยทั่วไปคำนวณจากการหาอนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของเกาส์เซียนฟังก์ชัน 1 มิติ ( $G(\sigma_d)$ )

$$G(\sigma_d, x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \times e^{-\frac{x^2}{2\sigma_d^2}} \quad (2.9)$$

สำหรับ Förstner operator นั้นค่า  $\sigma_d$  ที่แนะนำคือ  $\sigma_d = 0.7$  (Schmid, 2000) เมื่อทำการคำนวณ  $dx$  โดยใช้ค่า  $\sigma_d = 0.7$  ให้ผลลัพธ์ดังแสดงภาพที่ 2.11

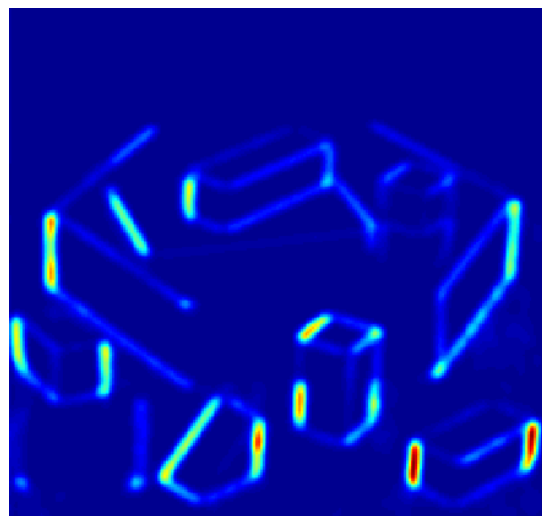
-0.0393	-0.4192	0	0.4192	0.0393
---------	---------	---	--------	--------

ภาพที่ 2.11 derivative masks ( $dx$ ),  $\sigma_d = 0.7$

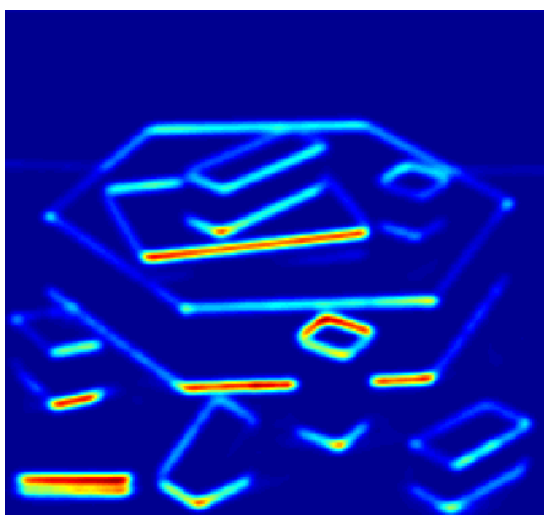
เมื่อได้ค่า  $I_{x(i,j)}$  และ  $I_{y(i,j)}$  แล้ว ทำการคำนวณค่า  $I_{x(i,j)}^2$ ,  $I_{y(i,j)}^2$  และ  $I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)}$  โดยใช้การคูณในระดับสมาชิก (element - wise multiplication) เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป ตัวอย่างผลการคำนวณค่า  $I_{x(i,j)}^2$ ,  $I_{y(i,j)}^2$  และ  $I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)}$  ดังแสดงในภาพที่ 2.12



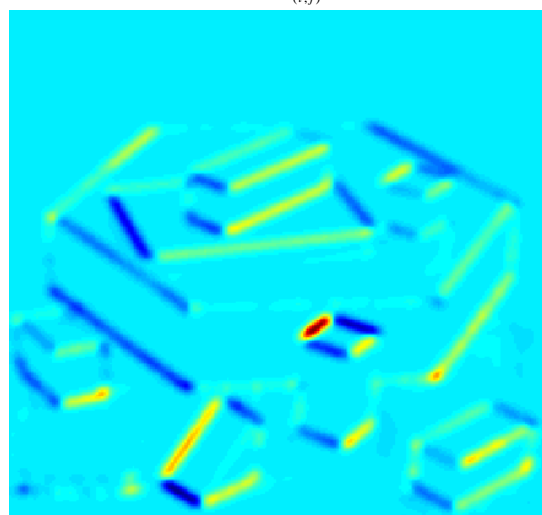
ก. ภาพตั้งต้น



ข.  $I_{x(i,j)}^2$



ค.  $I_{y(i,j)}^2$



ง.  $I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)}$



ต่ำ

สูง

จ. แถบระดับสี (color bar)

ภาพที่ 2.12 ผลการคำนวณค่า  $I_{x(i,j)}^2$ ,  $I_{y(i,j)}^2$  และ  $I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)}$  ( $\sigma_d = 0.7$ )

จากภาพที่ 2.12 แสดงถึงผลการคำนวณค่า  $I_{x(i,j)}^2$ ,  $I_{y(i,j)}^2$  และ  $I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)}$  โดยใช้ค่า  $\sigma_d = 0.7$  ภาพที่ 2.12 ก. แสดงถึงภาพตัวอย่างที่ใช้ในการคำนวณ ภาพที่ 2.12 ข. และภาพที่ 2.12 ค. แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ สังเกตได้

ว่าบริเวณที่เป็นเส้นขอบ ที่มีลักษณะ ตั้งฉาก หรือขนาน กับแนวแกน  $x$  หรือ  $y$  จะมีอัตรา การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง สูงกว่าบริเวณอื่นโดยเทียบกับแถบระดับสีใน ภาพที่ 2.12 จ. ซึ่งแถบระดับสีนี้จะใช้ในการเปรียบเทียบค่าต่างๆ ในทั้งเอกสาร ภาพที่ 2.12 ง. แสดงถึงค่า  $I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)}$  จะสังเกตได้ว่าในบริเวณเส้นขอบจะมีค่า  $I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)}$  สูงกว่าหรือต่ำกว่าบริเวณอื่น

2) นำค่า  $I_{x(i,j)}^2$ ,  $I_{y(i,j)}^2$  และ  $I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)}$  ที่คำนวณได้ใน ขั้นตอนที่ 1) มาใช้ในการสร้าง autocorrelation matrix ของแต่ละจุดภาพตามสมการที่ (2.10)

$$A_{(i,j)} = \begin{bmatrix} \langle I_{x(i,j)}^2 \rangle & \langle I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)} \rangle \\ \langle I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)} \rangle & \langle I_{y(i,j)}^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

เครื่องหมาย  $\langle \dots \rangle$  หมายถึงการ convolution ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ( $G(\sigma_w)$ ) ค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการสร้าง autocorrelation matrix นั้นจะช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวกรองเกาส์เซียน 2 มิติ (Rockett, 2003)

$$G(\sigma_w, x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_w^2} \times e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_w^2}} \quad (2.11)$$

สำหรับ Förstner operator นั้น ค่า  $\sigma_w$  ที่แนะนำคือ  $\sigma_w = 2$  (Schmid, 2000)

การหาจุดเด่นชัดในภาพด้วย Förstner operator นั้นจะทำการวิเคราะห์จากขนาดและ รูปทรงของ error ellipse ของแต่ละจุดภาพ โดยสามารถคำนวณได้จาก autocorrelation matrix โดยขนาดของ error ellipse สามารถใช้สมการที่ (2.12) ช่วยในการวิเคราะห์ได้

$$w = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{\det(A)}{\text{trace}(A)}, w > 0 \quad (2.12)$$

โดยที่

$\lambda$  คือ ค่า eigenvalues ของเมทริกซ์ผกผัน  $A$

$\det(A)$  คือ ดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์  $A$

$\text{trace}(A)$  คือ ผลรวมของสมาชิกบนเส้นทแยงมุมของเมทริกซ์  $A$

ค่า  $w$  จะแปรผกผันกับขนาดของ error ellipse หากค่า  $w$  มีค่ามากแสดงถึง error ellipse ที่มีขนาดเล็ก ในส่วนของ รูปทรงของ error ellipse สามารถคำนวณจาก สมการค่าความกลม (roundness,  $q$ ) ดังแสดงในสมการที่ (2.13) โดยค่า  $q$  จะแปรผันตรงกับความเป็นวงกลม



คือ หากจุดภาพใดมีค่า  $q$  มาก รูปทรงของ error ellipse จะมีลักษณะเป็นวงกลมมาก และหากจุดภาพใดมีค่า  $q$  น้อย รูปทรงของ error ellipse จะมีลักษณะเป็นวงรีมาก

$$q = 1 - \left( \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right)^2 = \frac{4 \times \det(A)}{\text{trace}(A)^2}, 0 \leq q \leq 1 \quad (2.13)$$

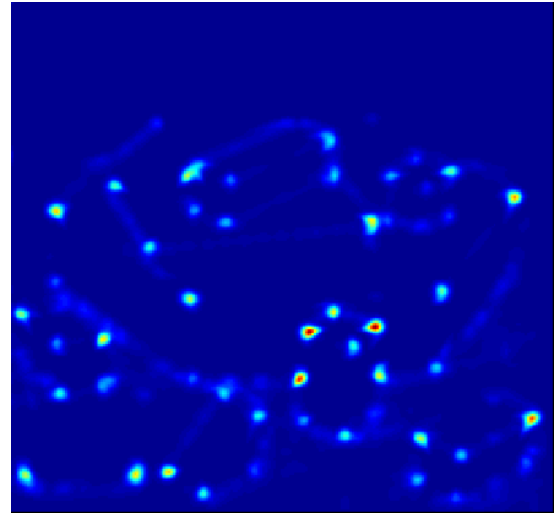
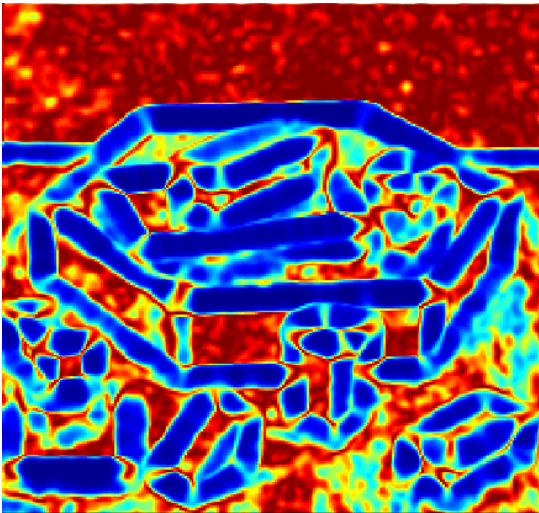
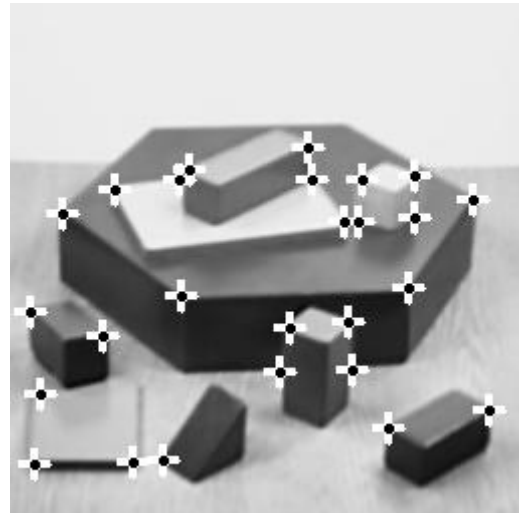
การหาจุดเด่น ขัดในภาพด้วย Förstner operator นั้นจะทำการวิเคราะห์จากขนาดและรูปทรงของ error ellipse ของแต่ละจุดภาพโดยแบ่งเป็น 3 กรณี คือ

- 1) Small circular ellipses จะระบุเป็นจุดที่เด่นชัด
- 2) Elongated error ellipses จะเป็นบริเวณเส้นขอบ (edge)
- 3) Large ellipses จะถูกระบุเป็นพื้นที่

ตำแหน่งของจุดเด่นชัดจะหาได้จากการ threshold ค่า  $w$  โดยที่  $w > w_{\min}$  และเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงจุดเด่นชัดที่มีตำแหน่งในบริเวณเส้นขอบจึงทำการ Threshold ค่า  $q$  โดยที่  $q > q_{\min}$  ค่า  $w_{\min}$  และ  $q_{\min}$  ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง  $w_{\min} = 0.5 \times \bar{w}$  ถึง  $1.5 \times \bar{w}$  ( $\bar{w}$  = ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของ  $w$ ) และ  $q_{\min} = 0.5$  ถึง  $0.75$  (Rodhorst and Koschan, 2006) ค่า  $w$  หากมีค่ามากย่อมแสดงถึงความเด่นชัด หรือเรียกว่า corner response ที่มากขึ้นด้วย ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่า  $w_{\min} = 1.5 \times \bar{w}$  ซึ่งเป็นค่าสูงสุดในช่วงที่แนะนำ เนื่องจากจุดเด่นชัดที่ได้จะนำไปใช้ในการจับคู่ภาพ จึงควรใช้จุดที่มีความเด่นชัดมากที่สุด สำหรับค่า  $q$  นั้นสามารถช่วยระบุตำแหน่งของ จุดภาพที่อยู่บริเวณเส้นขอบ ซึ่ง หากจุดเด่นชัดอยู่ใกล้บริเวณเส้นขอบเมื่อนำ ไปใช้ในการจับคู่ภาพอาจส่งผลให้เกิดการจับคู่ผิดได้ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่า  $q_{\min} = 0.75$  ซึ่งเป็นค่าสูงสุดในค่าแนะนำ ตัวอย่างการหาจุดเด่นชัดด้วย Förstner operator โดยกำหนดค่า  $w_{\min} = 1.5 \times \bar{w}$  และ  $q_{\min} = 0.75$  ดังแสดงในภาพที่ 2.13



ก.ภาพตั้งต้น

ข.ค่า  $w$ ค.ค่า  $q$ 

ง.ตำแหน่งของจุดเด่นชัด

ภาพที่ 2.13 การหาจุดเด่นชัดด้วย Förstner operator ( $w_{\min} = 1.5 \times \bar{w}$  และ  $q_{\min} = 0.75$ )

จากภาพที่ 2.13 ข. แสดงให้เห็นถึงจุดภาพที่มีค่า  $w$  สูงกว่าบริเวณอื่นซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 2.13 ก. จะเห็นได้ว่าจุดภาพที่มีค่า  $w$  สูงกว่าบริเวณอื่นนั้นส่วนใหญ่เป็นจุดที่เด่นชัดในภาพ แต่จะมีบางจุดภาพที่มีค่า  $w$  สูงกว่าบริเวณอื่นและอยู่บริเวณเส้นขอบดังเปรียบเทียบระหว่างภาพที่ 2.13 ข. และภาพที่ 2.13 ค. จุดภาพที่อยู่บริเวณเส้นขอบจะมีค่า  $q$  ต่ำกว่าบริเวณอื่น ซึ่งจุดภาพดังกล่าวจะไม่ถูกระบุเป็นจุดเด่นชัดในภาพดังแสดงผลลัพธ์ในภาพที่ 2.13 ง.

### 2.2.2 Harris operator

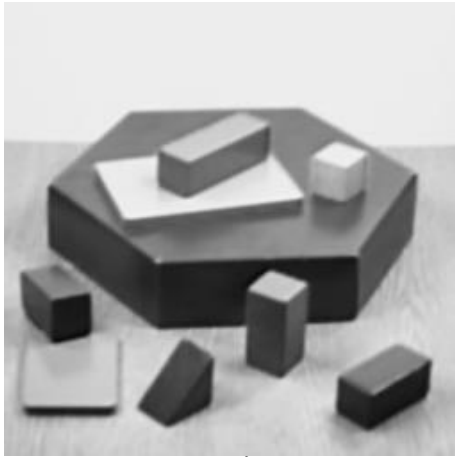
Harris operator (Harris and Stephens, 1988) ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อลดข้อจำกัดในวิธีการหาจุดเด่นชัดของ Moravec ในด้านไม่ต้านทานต่อการหมุน โดยมีแนวคิดพื้นฐานจากการวิเคราะห์ autocorrelation matrix เช่นเดียวกับ Förstner operator จึงทำให้วิธีการนี้มีลักษณะเด่นคือ ต้านทานต่อการหมุน การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง สัญญาณรบกวน (noise) และมี repeatability rate สูง แต่มีขั้นตอนการทำงานแตกต่างกัน ซึ่งขั้นตอนการทำงานของ Harris operator มีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนแรกจะทำการสร้าง autocorrelation matrix โดยใช้วิธีการสร้าง เช่นเดียวกับ Förstner operator แต่จะใช้ค่าคงที่ในส่วนสมการที่ (2.7) และค่าถ่วงน้ำหนักในสมการที่ (2.10) ที่แตกต่างกันโดยในสมการที่ (2.7) ค่า  $\sigma_d$  ที่แนะนำคือ  $\sigma_d = 1$  (Deriche, 1993) เมื่อทำการคำนวณ  $dx$  โดยใช้ค่า  $\sigma_d = 1$  ให้ผลลัพธ์ดังแสดงในภาพที่ 2.14 และในสมการที่ (2.10) นั้นค่า  $\sigma_w$  ที่แนะนำคือ  $\sigma_w = 2$  (Schmid C., 2000)

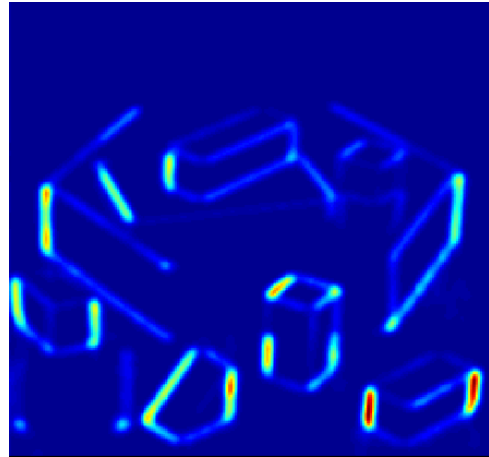
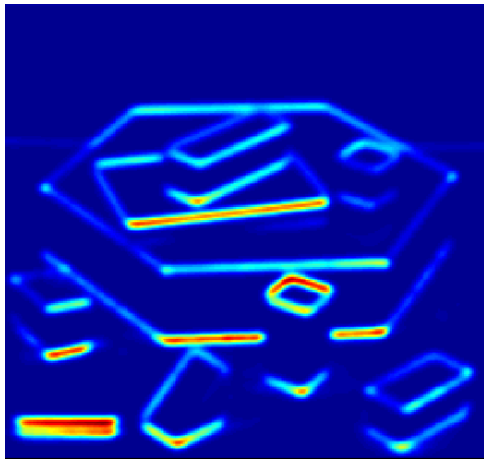
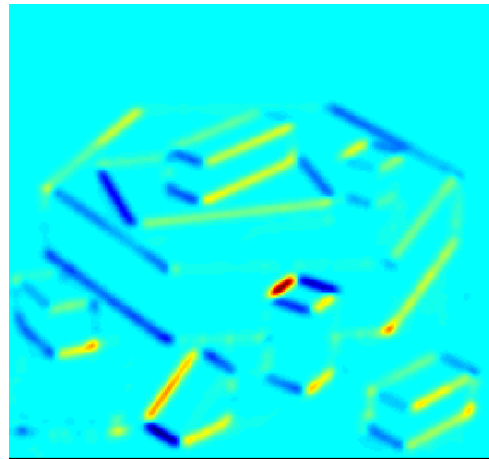
-0.0133	-0.1080	-0.2420	0	0.2420	0.1080	0.0133
---------	---------	---------	---	--------	--------	--------

ภาพที่ 2.14 derivative masks ( $dx$ ),  $\sigma_d = 1$

เมื่อใช้  $dx(\sigma_d=1)$  ทำการคำนวณค่า  $I_{x(i,j)}^2$ ,  $I_{y(i,j)}^2$  และ  $I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)}$  โดยใช้การคูณในระดับสมาชิก (element - wise multiplication) ให้ผลดังแสดงในภาพที่ 2.15



ก. ภาพตั้งต้น

ข.  $I_{x(i,j)}^2$ ค.  $I_{y(i,j)}^2$ ง.  $I_{x(i,j)} I_{y(i,j)}$ 

ภาพที่ 2.15 ผลการคำนวณค่า  $I_{x(i,j)}^2$ ,  $I_{y(i,j)}^2$  และ  $I_{x(i,j)} I_{y(i,j)}$  ( $\sigma_d=1$ )

จากภาพที่ 2.15 แสดงถึงผลการคำนวณค่า  $I_{x(i,j)}^2$ ,  $I_{y(i,j)}^2$  และ  $I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)}$  โดยใช้ค่า  $\sigma_d=1$  ภาพที่ 2.15 ก. แสดงถึงภาพตัวอย่างที่ใช้ในการคำนวณ ภาพที่ 2.15 ข. ถึง ง. แสดงผลการคำนวณค่า  $I_{x(i,j)}^2$ ,  $I_{y(i,j)}^2$  และ  $I_{x(i,j)} \times I_{y(i,j)}$  ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับภาพที่ 2.12

เมื่อทำการสร้าง autocorrelation matrix ของแต่ละจุดภาพ โดยใช้ค่าคงที่สำหรับ Harris operator แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการคำนวณค่าความเป็นมุม (cornerness,  $c$ ) ของแต่ละจุดภาพจาก autocorrelation matrix โดยใช้สมการที่ (2.14)

$$c = \det(A) - \alpha(\text{trace}(A))^2 = \lambda_1 \lambda_2 - \alpha(\lambda_1 + \lambda_2)^2 \quad (2.14)$$

โดยที่

$\alpha$  คือค่าคงที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 0.25

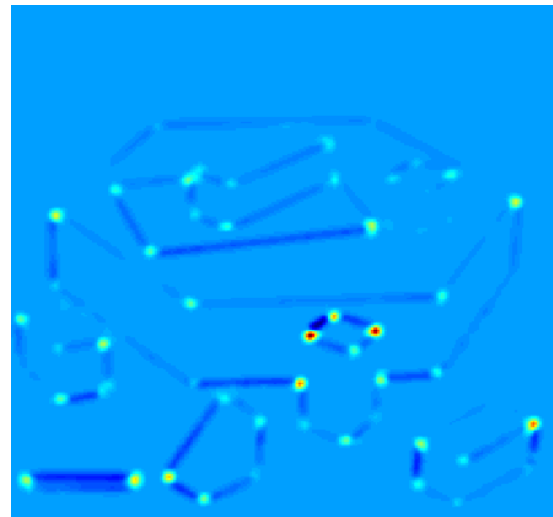
ค่า  $\alpha$  เป็นค่าคงที่ที่กำหนดขึ้นจากการทดลอง (empirical constant) โดยทั่วไปนิยมใช้ค่า  $\alpha = 0.04$  (Rockett, 2003) ลักษณะของค่า  $c$  นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ

- 1)  $c > 0$  จะถูกระบุเป็นจุดเด่นชัด
- 2)  $c \approx 0$  จะถูกระบุเป็นพื้นที่
- 3)  $c < 0$  จะถูกระบุเป็นเส้นขอบ

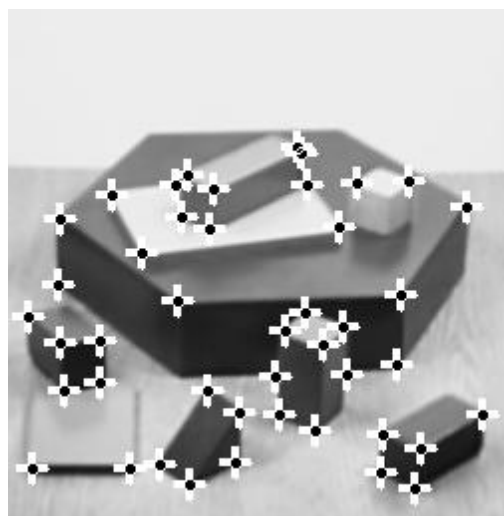
ตำแหน่งของจุดเด่นชัดในภาพ จะหาได้จากการ threshold จากค่า  $c$  โดยที่  $c > c_t$  สำหรับค่า  $c_t$  นั้นโดยทั่วไปนิยมใช้ค่า  $c_t = 0.01 \times c_{\max}$  (Schmid, 2000) ตัวอย่างการหาจุดเด่นชัดด้วย Harris operator ดังแสดงในภาพที่ 2.16



ก. ภาพดั้งเดิม



ข. ค่า  $c$



ค. ตำแหน่งของจุดเด่นชัด

ภาพที่ 2.16 การหาจุดเด่นชัดด้วย Harris operator

จากภาพที่ 2.16 ข. เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 2.16 ก. จะเห็นได้ว่าบริเวณที่เป็นจุดเด่นชัดในภาพจะมีค่า  $c$  สูงกว่าจุดภาพอื่นโดยเฉพาะบริเวณภาพที่มีลักษณะเป็นมุม ในภาพตั้งต้นที่มีลักษณะไม่เด่นชัด จะเห็นได้ว่าค่า  $c$  มีค่าใกล้เคียง 0 (ในภาพที่ 2.16 ข. สีฟ้าอ่อนแสดงค่าประมาณ 0) และในภาพตั้งต้นที่มีลักษณะ เป็นเส้นขอบจะเห็นได้ว่าค่า  $c$  มีค่าน้อยกว่า 0 เมื่อทำการ threshold ค่า  $c$  โดยใช้ค่า  $c_t$  ที่กำหนดเป็นค่า ให้ผลลัพธ์ดังแสดงในภาพที่ 2.16 ค.

Förstner operator และ Harris operator ใช้แนวคิดพื้นฐานจากการวิเคราะห์ autocorrelation matrix เหมือนกันจึงทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ต้านทานต่อการหมุน การเปลี่ยนแปลง ความเข้มแสง และสัญญาณรบกวน แต่มีข้อจำกัดคือใช้เวลาในการประมวลผลนานและไม่ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงมาตราส่วน (scale)

### 2.2.3 SUSAN operator

SUSAN operator: Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus (Smith and Brady, 1997) เป็นวิธีการหาจุดที่เด่นชัดในภาพถ่ายสำหรับการประมวลผลระดับ low-level image processing มีความแม่นยำ ต้านทานต่อสัญญาณรบกวนและใช้เวลาในการประมวลผลน้อย วิธีการนี้ถูกพัฒนามาบนแนวคิดพื้นฐานคือ ค่าความเข้มแสงของ จุดที่เด่นชัดในภาพจะมี ความสัมพันธ์กับค่าความเข้มแสงของจุดภาพ โดยรอบ ในพื้นที่ที่กำหนด ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถช่วยในการหาลักษณะเด่นเช่น มุมหรือเส้นขอบในภาพได้ วิธีการนี้จะทำการทดสอบจุดภาพโดยกำหนดพื้นที่รอบจุดภาพทดสอบโดยใช้ template ทรงกลม รัศมี 3 จุดภาพ โดยเรียกจุดภาพทดสอบว่า นิวเคลียส (nucleus) และทำการ คำนวณเปรียบเทียบ ค่าความเข้มแสงของ นิวเคลียส และจุดภาพใน template ทรงกลม เพื่อหาจุดภาพที่มีค่าความเข้มแสงเท่ากับนิวเคลียส โดยใช้สมการที่ (2.15)

$$c(\vec{r}, \vec{r}_0) = \begin{cases} 1 & \text{if } |I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)| \leq t \\ 0 & \text{if } |I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)| > t \end{cases} \quad (2.15)$$

โดยที่

$\vec{r}_0$  คือตำแหน่งของนิวเคลียส

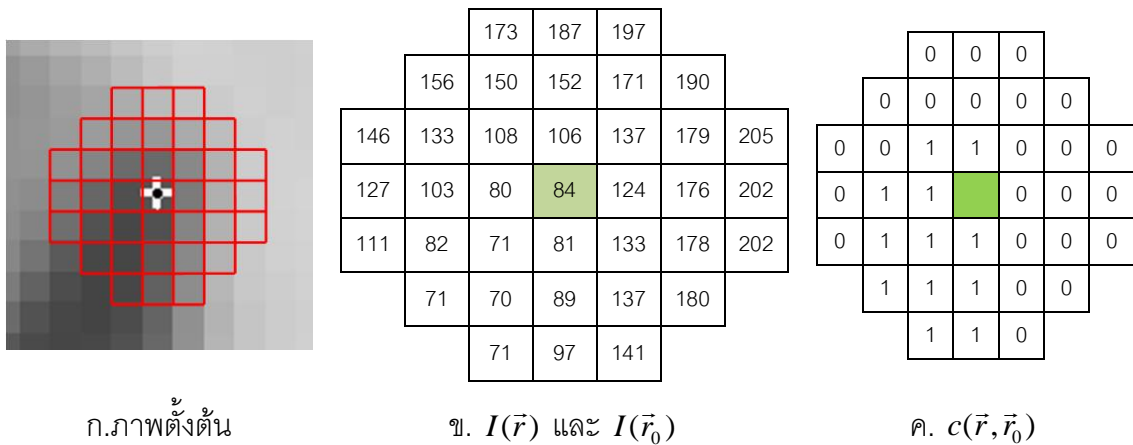
$\vec{r}$  คือตำแหน่งของจุดภาพที่อยู่ใน template

$I(\vec{r})$  คือความเข้มแสงที่ตำแหน่ง  $r$

$I(\vec{r}_0)$  คือความเข้มแสงที่ตำแหน่ง  $r_0$

$t$  คือค่าคงที่โดยทั่วไปนิยมใช้ค่า  $t = 25$

จุดภาพที่มีผลต่างของค่าความเข้มแสงเมื่อเทียบกับนิวเคลียสน้อยกว่าค่า  $t$  จะถือว่าเป็นจุดที่มีความเข้มแสงเหมือนกับนิวเคลียสและให้มีค่าเท่ากับ 1 ตัวอย่างการคำนวณดังแสดงใน ภาพที่ 2.17

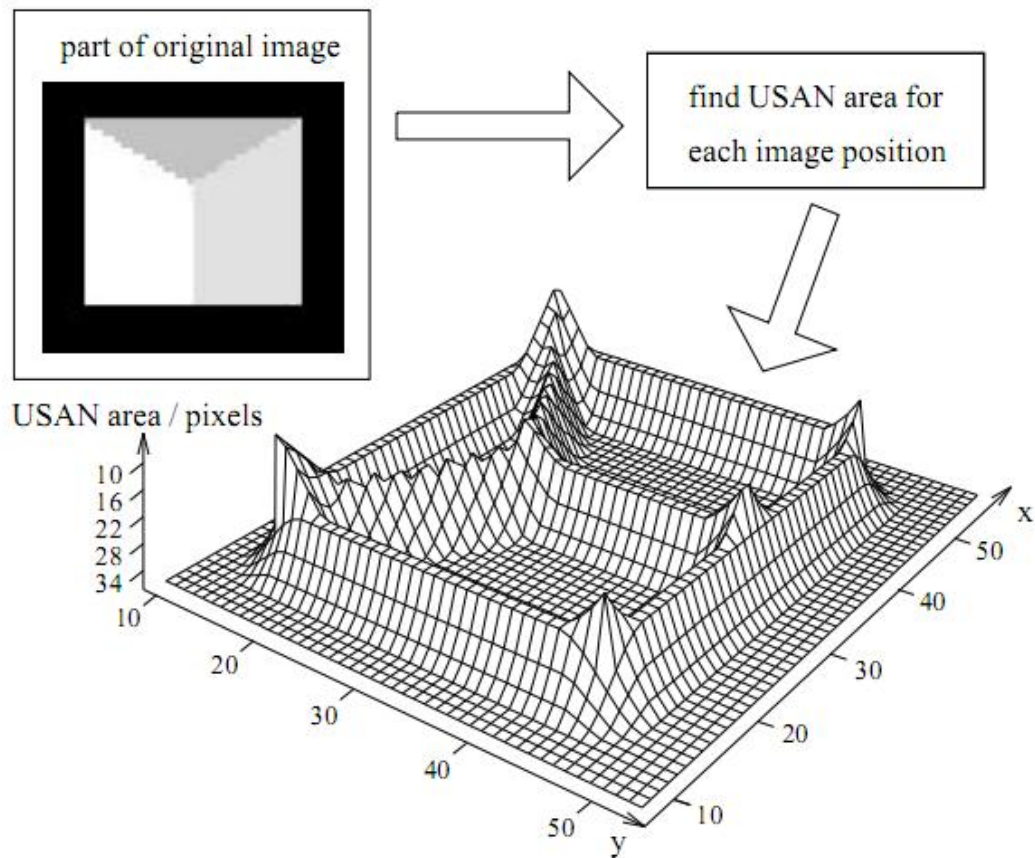


ภาพที่ 2.17 ตัวอย่างการคำนวณค่า  $c(\vec{r}, \vec{r}_0)$

ภาพที่ 2.17 ก. แสดงตำแหน่งของนิวเคลียส (กากบาทสีขาว) และจุดภาพใน template ทรงกลมในภาพตั้งต้น ภาพที่ 2.17 ข. แสดงถึงค่าความเข้มแสงของนิวเคลียส (พื้นหลังสีเขียว) และจุดภาพที่อยู่ใน template ทรงกลม ภาพที่ 2.17 ค. แสดงถึงผลการคำนวณค่า  $c(\vec{r}, \vec{r}_0)$  ตามสมการที่ (2.15) จากนั้นทำการรวมผลลัพธ์ที่คำนวณได้ ตามสมการที่ (2.16) และเรียกค่าดังกล่าวว่า USAN (Univalued Segment Assimilating Nucleus)

$$n(\vec{r}_0) = \sum_{\vec{r}} c(\vec{r}, \vec{r}_0) \quad (2.16)$$

ขั้นตอนต่อไป  $n(\vec{r}_0)$  จะถูกเปรียบเทียบกับค่า geometric threshold,  $g$  โดยทั่วไปจุดภาพที่มีลักษณะไม่เด่นชัดจะมีค่า  $n(\vec{r}_0)$  มากกว่าครึ่งของค่าสูงสุดของ  $n(\vec{r}_0)$  ที่สามารถเป็นไปได้ (ในกรณีที่ใช้ template ทรงกลมรัศมี 3 จุดภาพ  $n(\vec{r}_0)_{\max} = 36$ ) จุดภาพที่อยู่บริเวณเส้นขอบจะมีค่า  $n(\vec{r}_0)$  ครึ่งหนึ่งของค่า  $n(\vec{r}_0)_{\max}$  และจุดเด่นชัดในภาพจะมีค่า  $n(\vec{r}_0)$  น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่า  $n(\vec{r}_0)_{\max}$  ดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ค่า USAN ของแต่ละจุดภาพในพื้นที่ทดสอบ (Smith and Brady, 1997)

จากภาพที่ 2.18 แสดงถึงขั้นตอนโดยรวมของ SUSAN operator โดยเริ่มภาพตั้งต้นซึ่งเป็นภาพที่สร้างขึ้นเพื่อการทดสอบ ทำการหาค่า USAN ในแต่ละจุดภาพและเมื่อนำค่า USAN ในแต่ละจุดภาพมาทำการวาดกราฟ 3 มิติโดยให้แกน  $x$  และ  $y$  เป็นค่าพิกัดภาพ แกน  $z$  แสดงค่า USAN โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อย เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบค่า USAN จะสังเกตเห็นได้ว่าจุดภาพที่ไม่เด่นชัดจะมีค่า USAN = 36 จุดภาพที่อยู่บริเวณเส้นขอบจะมีค่า USAN = 18 จุดภาพที่เด่นชัดจะมีค่า USAN น้อยกว่า 18 ดังนั้นในการหาจุดเด่นชัดในภาพนั้นจะใช้ค่า  $g$  เท่ากับครึ่งของค่า  $n(\vec{r}_0)_{\max}$  โดยจุดภาพใดที่  $n(\vec{r}_0) < g$  จะถูกระบุเป็นจุดที่เด่นชัด SUSAN operator มีข้อได้เปรียบคือมีความถูกต้องทางตำแหน่งสูงและต้านทานต่อสัญญาณรบกวน แต่มีข้อจำกัดคือไม่ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงมาตราส่วน ตัวอย่าง การหาจุดเด่นชัดด้วย SUSAN operator ดังแสดงในภาพที่ 2.19



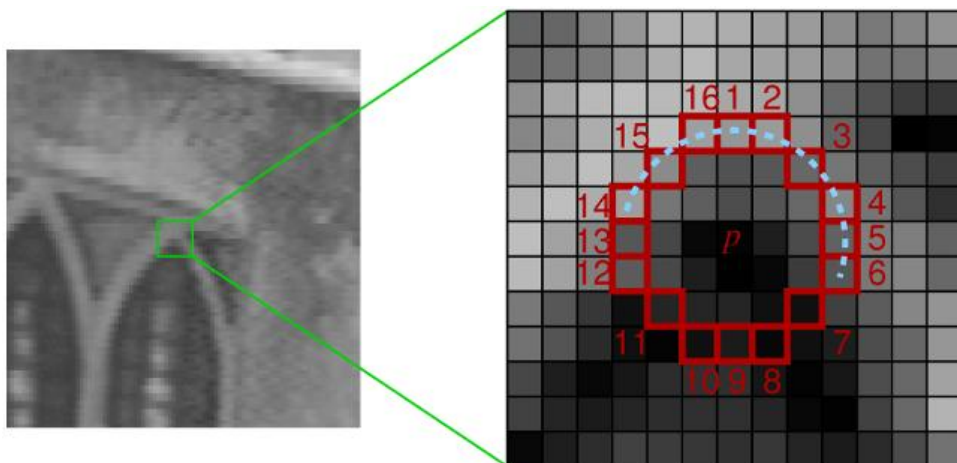


ภาพที่ 2.19 การหาจุดเด่นชัดด้วย SUSAN operator ( $t = 25$ )

การหาจุดเด่นชัดด้วย SUSAN operator นั้น สามารถดาวน์โหลด รหัสต้นฉบับ (source code) ได้ที่ [users.fmrib.ox.ac.uk/~steve/susan/susan2l.c](http://users.fmrib.ox.ac.uk/~steve/susan/susan2l.c)

#### 2.2.4 FAST operator

FAST operator: Features from Accelerated Segment Test (Rosten and Drummond, 2006) ถูกพัฒนาขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการตรวจหาจุดที่เด่นชัดได้อย่างรวดเร็ว สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานด้านการรังวัดด้วยภาพดิจิทัลแบบ real time frame-rate และในด้าน computer vision (Jazayeri and Fraser, 2010) โดยมีแนวคิดคล้ายกับวิธีการ SUSAN คือสร้าง template ทรงกลมรัศมี 3 จุดภาพ โดยให้จุดภาพ  $p$  เป็นจุดศูนย์กลางและจุดภาพ  $x$  เป็นจุดจุดภาพที่อยู่บนเส้นขอบของ template ทรงกลมโดยที่  $x \in \{1 \dots 16\}$  ดังแสดงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 แนวคิดการหาจุดเด่นชัดด้วย FAST operator (Rosten and Drummond, 2006)

จากภาพที่ 2.20 ทำการคำนวณเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงที่จุดภาพ  $p$  และจุดภาพ  $x$  ทั้ง 16 จุดภาพ โดยรอบจุดภาพ  $p$  เพื่อหาจุดภาพ  $x$  ที่มีความเข้มแสงมากกว่า เท่ากัน หรือน้อยกว่าจุดภาพ  $p$  โดยใช้สมการที่ (2.17)

$$S_{p \rightarrow x} = \begin{cases} d, I_{p \rightarrow x} < I_p - t & \text{(darker)} \\ s, I_p - t \leq I_{p \rightarrow x} \leq I_p + t & \text{(similar)} \\ b, I_{p \rightarrow x} > I_p + t & \text{(brighter)} \end{cases} \quad (2.17)$$

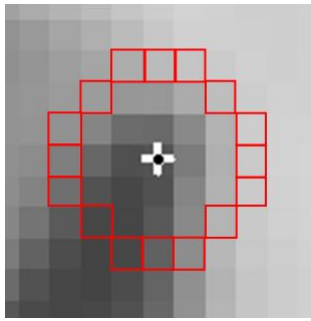
โดยที่

$I_{p \rightarrow x}$  คือค่าความเข้มแสงที่จุดภาพ  $x$

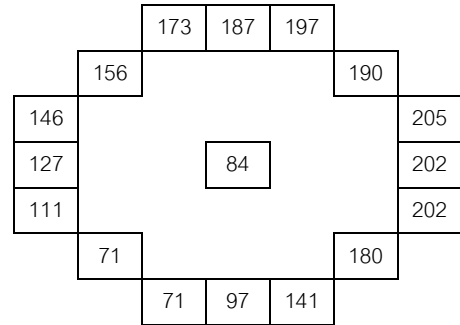
$I_p$  คือความเข้มแสงที่จุดภาพ  $p$

$t$  คือค่า threshold ซึ่งกำหนดโดยผู้ใช้งาน

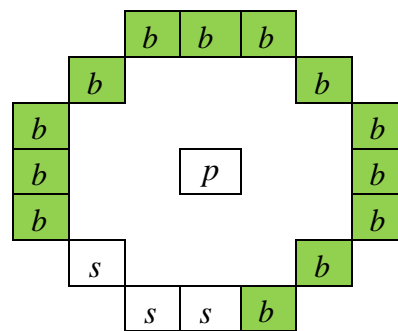
ตำแหน่งของจุดเด่นชัดจะถูกระบุเมื่อจุดภาพ  $p$  มีจุดภาพ  $x$  อย่างน้อย  $N$  จุดต่อเนื่องกัน มีค่าความเข้มแสงมากกว่าหรือน้อยกว่าค่าความเข้มแสงที่จุด  $p + t$  (ค่า  $S_{p \rightarrow x}$ ) และเพื่อหลีกเลี่ยงจุดเด่นชัดที่อยู่บริเวณเส้นขอบจึงนิยมใช้ค่า  $N = 9, 10, \dots, 16$  สำหรับจำนวนจุดที่ต่อเนื่องกัน  $N$  จุดนั้น Rosten และ Drummond (2006) ได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่า  $N$  ที่เหมาะสม โดยใช้ค่า  $N = 9, 10, \dots, 16$  และใช้ค่า repeatability rate เป็นเกณฑ์ในการทดสอบ ผลการทดสอบพบว่า ค่า  $N = 9$  (FAST-9) มีความเหมาะสมในการใช้งานมากที่สุดเนื่องจากให้ค่า repeatability rate สูงที่สุด ตัวอย่างการคำนวณค่า  $S_{p \rightarrow x}$  ( $t=30$ ) ดังแสดงในภาพที่ 2.21



ก. ภาพดั้งเดิม



ข.  $I_p$  และ  $I_{p \rightarrow x}$

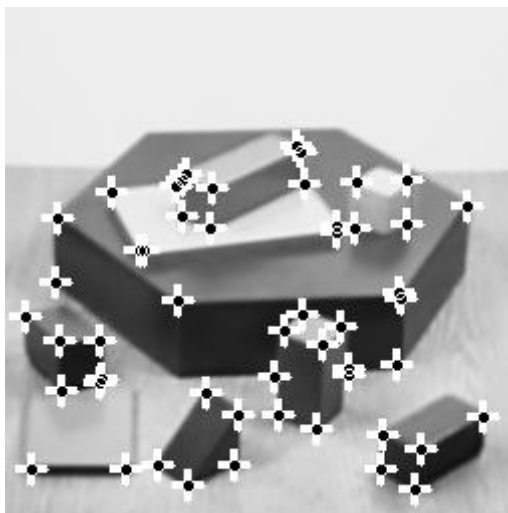


ค.  $S_{p \rightarrow x}$

ภาพที่ 2.21 ขั้นตอนการคำนวณค่า  $S_{p \rightarrow x}$

ภาพที่ 2.21 แสดงถึงขั้นตอนการหาจุดเด่นชัดในภาพด้วย FAST-9 operator ภาพที่ 2.21 ก. แสดงถึงตำแหน่งของจุดภาพ  $p$  (กากบาทสีขาว) และจุดภาพ  $x$  ทั้ง 16 จุดภาพ (จุดภาพสีแดง) เมื่ออ่านค่าความเข้มแสงของจุดภาพ  $p$  และ  $x$  ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 2.21 ข. นำค่าความเข้มแสงดังกล่าวไปใช้ในการคำนวณตามสมการที่ (2.17) ได้ผลดังแสดงใน ภาพที่ 2.21 ค. จากภาพที่ 2.21 ค. จะเห็นได้ว่ามีจุดภาพ  $x$  จำนวน 13 จุดภาพ (จุดภาพสีเขียว) ต่อเนื่องกันมีความสว่างมากกว่าค่าความเข้มแสงที่จุด  $p + t$  ดังนั้นจุดภาพ  $p$  จึงถูกระบุเป็นจุดเด่นชัดในภาพ

ถึงแม้ว่า FAST-9 operator จะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยเนื่องจากการคำนวณเปรียบเทียบความเข้มแสงกับจุด ภาพอยู่บนวินโดว์ทรงกลมจำนวน 16 จุดภาพ แต่วิธีการดังกล่าวจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ค่อนข้างต่อสัญญาถูกรบกวน และการกำหนดค่า threshold,  $t$  ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ใช้งาน ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ค่า  $t = 30$  เนื่องจากเป็นค่าพื้นฐานในซอฟต์แวร์ของผู้พัฒนา FAST-9 operator ตัวอย่างการหาจุดเด่นชัดด้วย FAST-9 operator ดังแสดงในภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 การหาจุดเด่นชัดด้วย FAST-9 operator ( $t = 30$ )

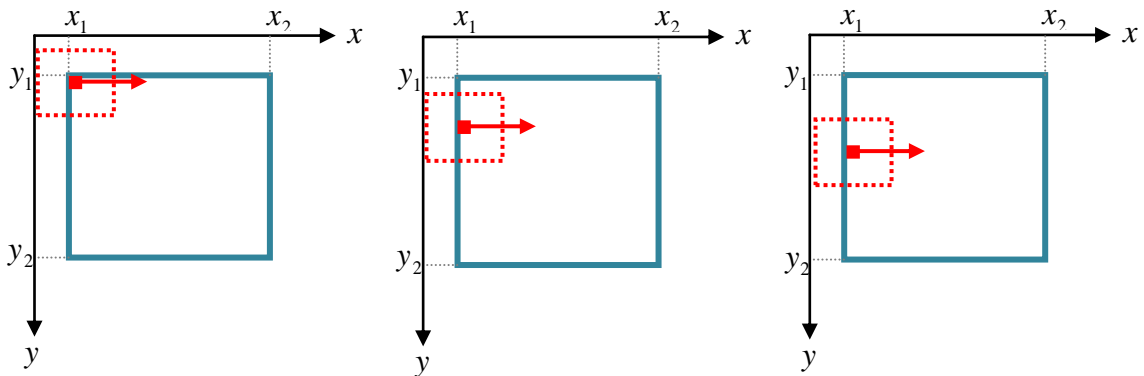
การหาจุดเด่นชัดด้วย FAST-9 operator นั้น สามารถดาวน์โหลด รหัสต้นฉบับ (source code) ได้ที่ <http://www.edwardrosten.com/work/fast.html>

## 2.3 การจับคู่ภาพ

การจับคู่ภาพเป็นเทคนิคการหาลักษณะเด่น ชัดที่เหมือนกัน ในภาพอ้างอิงและภาพประมวลผลโดย Zitova และ Flusser (2003) ได้ทำการศึกษาและรวบรวมเทคนิคการจับคู่ภาพ และได้แบ่งวิธีการจับคู่ภาพออกเป็น 2 กลุ่มคือ Area-based matching และ Feature-based matching ซึ่งมีคุณสมบัติและขั้นตอนการทำงานดังนี้

### 2.3.1 การจับคู่ภาพแบบ Area-based matching

การจับคู่ภาพแบบ Area-based matching (ABM) บางครั้งอาจเรียกว่า template matching โดยจะทำการจับคู่ระหว่างภาพโดยไม่ต้องใช้ส่วนที่เด่นชัดในภาพถ่าย แต่ใช้การสร้าง template จากภาพอ้างอิง และใช้ template ดังกล่าว เปรียบเทียบหาส่วนที่เหมือนกันในภาพประมวลผล ตัวอย่างแนวคิดการจับคู่ภาพแบบ ABM ดังแสดงในภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 แนวคิดการจับคู่ภาพแบบ ABM

จากภาพที่ 2.23 กรอบภาพเส้นประสีแดงคือ template จากภาพอ้างอิง จุดภาพสีแดงคือจุดศูนย์กลางของ template จากภาพอ้างอิง กรอบภาพเส้นทึบสีน้ำเงินคือพื้นที่ค้นหาในภาพประมวลผล การจับคู่ภาพแบบ ABM นั้น template จากภาพอ้างอิงจะทำการวัดความเหมือนของจุดภาพในพื้นที่ค้นหาโดยเริ่มจากจุดภาพ  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_1 + r, y_1)$ ,  $(x_1 + 2r, y_1)$ , ...,  $(x_2, y_1)$  เมื่อสิ้นสุดจุดภาพในแถวแรก ทำการทดสอบกับจุดภาพในแถวถัดมาโดยเริ่มจาก  $(x_1, y_1 + r)$ ,  $(x_1 + r, y_1 + r)$ ,  $(x_1 + 2r, y_1 + r)$ , ...,  $(x_2, y_1 + r)$  และทำขั้นตอนดังกล่าวซ้ำจนกระทั่งถึงจุดภาพ  $(x_2, y_2)$  ค่า  $r$  จะแสดงถึงระยะห่างในการค้นหาโดยทั่วไปนิยมใช้  $r = 1$  ซึ่งหมายถึงการวัดความเหมือนในทุกจุดภาพของพื้นที่ค้นหา

การจับคู่ภาพแบบ ABM นั้นมีข้อจำกัดคือ การสร้าง template จากภาพอ้างอิงนั้นในบางกรณีอาจไม่ปรากฏลักษณะเด่นชัดที่เพียงพอต่อการจับคู่ภาพ โดยทั่วไปจึงนิยมหาลักษณะเด่นชัดในภาพอ้างอิงก่อนและสร้าง template ให้ครอบคลุมลักษณะเด่นดังกล่าว ในกรณีที่ใช้การจับคู่ภาพแบบ ABM กับภาพที่มีการบันทึกข้อมูลโดยใช้ตัวรับรู้และช่วงเวลาในการบันทึกข้อมูลที่แตกต่างกัน อาจทำให้ข้อมูลที่บันทึก ได้มีความแตกต่างกันและเป็นสาเหตุเกิดการจับคู่ผิดพลาดได้ อีกข้อจำกัดหนึ่งของการจับคู่ภาพแบบ ABM คือหากภาพทั้งสองมีการวางตัวที่แตกต่างกันมาก ทำให้ลักษณะที่ปรากฏในทั้งสองภาพมีความแตกต่างกัน ทำให้ผลของการจับคู่ภาพผิดพลาดได้

เทคนิคที่ใช้ในการเปรียบเทียบ หาส่วนที่เหมือนกันในภาพทั้งสอง ซึ่งเป็นที่นิยมและเป็นตัวแทนของการจับคู่ภาพถ่ายแบบ ABM คือ Cross-correlation template matching (Platt, 2001) โดยจะทำการคำนวณค่า cross-correlation (CC) ระหว่าง template จากภาพอ้างอิงและพื้นที่ซ้อนทับบนภาพประมวลผล (template ประมวลผล) บริเวณใดมีค่า CC สูงสุดจะถือว่าเป็นบริเวณเดียวกันกับ template จากภาพอ้างอิง ค่า CC สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.18)

$$CC = \frac{C_{PQ}}{\sqrt{C_{PP} \times C_{QQ}}} \quad (2.18)$$

โดยที่

$$C_{PQ} = \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N (p(x-i, y-j) - \bar{p})(q(x'-i, y'-j) - \bar{q})$$

$$C_{PP} = \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N (p(x-i, y-j) - \bar{p})^2$$

$$C_{QQ} = \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N (q(x'-i, y'-j) - \bar{q})^2$$

$p(x, y)$  คือความเข้มแสงของภาพ  $P$  ที่ตำแหน่ง  $(x, y)$

$q(x', y')$  คือความเข้มแสงของภาพ  $Q$  ที่ตำแหน่ง  $(x', y')$

$\bar{p}$  คือค่าเฉลี่ยเลขคณิตของค่าความเข้มแสงใน template บนภาพ  $P$

$\bar{q}$  คือค่าเฉลี่ยเลขคณิตของค่าความเข้มแสงใน template บนภาพ  $Q$

### 2.3.2 การจับคู่ภาพแบบ Feature-based matching

การจับคู่ภาพแบบ Feature-based matching (FBM) นั้นจะทำการเปรียบเทียบและจับคู่จุดเด่นชัดที่ตรวจจับได้ในภาพ ประมวลผล และภาพอ้างอิง ด้วยเทคนิคเช่น spatial relation วิธีการนี้จะใช้ความสัมพันธ์เชิงตำแหน่ง ช่วยในการจับคู่ จุดเด่นชัดที่ตรวจหาได้ในภาพอ้างอิงและภาพประมวลผล โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของภาพจะประกอบด้วย การเลื่อนแกน (translation,  $T_r$ ) การหมุน (rotation,  $R_o$ ) และการเปลี่ยนแปลงมาตราส่วน (scaling,  $S$ ) หรือเรียกว่าฟังก์ชันของการแปลงระบบพิกัดภาพถ่าย (image transformation function,  $F(T_r, R_o, S)$ ) จุดเด่นชัดในภาพอ้างอิงและภาพประมวลผลจะถูกระบุว่าเป็นจุดที่เหมือนกันก็ต่อเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (2.19)

$$| F(T_r, R_o, S, x, y) - (x', y') | < \varepsilon \quad (2.19)$$

โดยที่

$(x, y)$  คือค่าพิกัดภาพของภาพอ้างอิง

$(x', y')$  คือค่าพิกัดภาพของภาพประมวลผล

$\varepsilon$  คือค่าคงที่

อีกเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้ในการจับคู่ภาพแบบ FBM คือ invariant descriptor วิธีการนี้จะทำการจับคู่จุดภาพโดยอาศัยจุดภาพโดยรอบจุดเด่นชัดในพื้นที่ที่กำหนดหรือเรียกว่า a การสร้าง descriptor จุดภาพที่เหมือนกันในทั้งสองภาพจะต้องมี descriptor ที่เหมือนกัน ตัวอย่างการสร้าง descriptor อย่างง่ายคือ ค่าความเข้มแสงของจุดภาพโดยรอบจุดเด่นชัดในพื้นที่ที่กำหนด สำหรับการหาค่าความเข้มแสงของจุดภาพในการสร้าง descriptor นั้นนิยมวัดความเหมือนของจุดภาพด้วยค่า CC (สมการที่ (2.18)) โดยที่จุดเด่นชัดในภาพอ้างอิงและภาพประมวลผลคู่ใดมีค่า CC สูงสุดจะถือว่าเป็นจุดที่เหมือนกันในทั้งสองภาพ

วิธีการจับคู่ภาพแบบ FBM นี้มีข้อจำกัดคือ หากภาพถ่ายทั้งสองบันทึกในช่วงเวลาและใช้ตัวรับรู้ที่ต่างกัน จุดเด่นชัดที่ตรวจหาได้อาจแตกต่างกันซึ่งจะนำไปสู่การจับคู่ที่ผิดพลาดได้

## 2.4 การตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิด

ในการรังวัดแต่ละครั้งย่อมมีความคลาดเคลื่อนแฝงมากับค่าที่รังวัดได้ ค่าความคลาดเคลื่อนนี้เกิดขึ้นจากหลายสาเหตุเช่น ความผิดพลาด าดของผู้บันทึกข้อมูล หรือความถูกต้อง (accuracy) ของเครื่องมือวัด เป็นต้น เพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูลและผลลัพธ์ของการประมวลผลข้อมูล จึงนิยมเก็บข้อมูลมากเกินไปจนความจำเป็นและทำการคำนวณปรับแก้เพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นเอกภาพ (unique solution) วิธีการคำนวณปรับแก้โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square) คือ

$$\hat{l}_i = l_i + v_i \quad (2.20)$$

โดยที่

$\hat{l}_i$  คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณ

$l_i$  คือ ค่าที่ได้จากการวัด

$v_i$  คือ ค่าเศษเหลือ (residual)

หลักการพื้นฐานของ least square คือ ผลรวมของค่าเศษเหลือยกกำลังสองจะต้องมีค่าน้อยที่สุดตามสมการที่ (2.21)

$$\text{Minimize} \sum_{i=1}^n v_i^2 \quad (2.21)$$

ในส่วนของการปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมรีโอสโดยใช้ GCPs ที่ได้จากการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติ นั่นคือจุดที่ได้จากขั้นตอนดังกล่าวประกอบด้วยจุดที่มีตำแหน่งคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงและจุดที่จับคู่ผิดจำนวนหนึ่ง ซึ่งเป็นผลกระทบจากการใช้ตัวรับรู้และช่วงเวลาในการบันทึกข้อมูลที่แตกต่างกัน เพื่อความน่าเชื่อถือของผลการปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมรีโอส จึงใช้ GCPs จำนวนมากเกินความจำเป็นและทำการคำนวณปรับแก้ด้วยวิธี least square ค่าเศษเหลือ (residuals,  $v_i$ ) ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาข้อมูลที่ผิดได้ด้วยวิธีการ standardized residuals ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.22)

$$\text{standardized residual} = \frac{v_i}{s^0}, \quad s^0 = \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (2.22)$$

โดยที่

$n$  = จำนวนข้อมูล

$r$  คือค่า redundancy

ข้อมูลใดมีค่าสัมบูรณ์ของ standardized residuals มากกว่าค่าคงที่ที่กำหนด ( $t$ ) จะถือว่าเป็นข้อมูลที่ผิดดังสมการ ที่ (2.23) โดยทั่วไปนิยมใช้ค่า  $t = 2.5$  (Rosseeuw and Leroy, 1987)

$$\left| \frac{v_i}{s^0} \right| \geq t \quad (2.23)$$

วิธีการคำนวณปรับแก้แบบ least square นั้นให้ผลลัพธ์ที่ดีในกรณีที่ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณเป็นข้อมูลที่ถูกต้อง (clean data) แต่หากข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ประกอบด้วยข้อมูลที่ผิดจำนวนหนึ่ง (dirty data) จะส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ในระบบสมการ ( $\hat{\theta}$ ,  $\hat{\theta} = \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_j$ ) และ  $v_i$  ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง เนื่องจากข้อมูลที่ผิดนั้นจะมีค่า  $v_i$  ขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลกระทบกับการค่า  $\sum v^2$  และผลจากความคลาดเคลื่อนนี้ทำให้ ข้อมูลที่ผิดบางข้อมูลไม่สามารถตรวจหาได้ด้วยวิธีการ standardized residuals จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาแนวคิดในการคำนวณปรับแก้ เพื่อลดผลกระทบจากค่า  $v_i$  ขนาดใหญ่โดยการ ใช้ค่ามัธยฐาน (median) ของชุดข้อมูล  $v_i^2$  ซึ่งมีแนวคิดพื้นฐานตามสมการที่ (2.24) และเรียกวิธีการนี้ว่า least median of squares



$$\text{Minimize } med(v_i^2) \quad (2.24)$$

การคำนวณค่า  $\hat{\theta}$  ที่ทำให้ค่ามัธยฐานของ  $v^2$  มีค่าน้อยที่สุดนั้นโดยทั่วไปจะประยุกต์ใช้วิธีสุ่มข้อมูลจากค่าที่ได้จากการวัด (random sampling) โดยมีขั้นตอนคือ สุ่มข้อมูลจากค่าที่ได้จากการวัดให้เพียงพอกับการคำนวณ ค่า  $\hat{\theta}$  เมื่อคำนวณค่า  $\hat{\theta}$  แล้ว ให้ใช้ค่า  $\hat{\theta}$  ดังกล่าวทำการคำนวณค่า  $\hat{I}_i$ ,  $v_i^2$  และค่ามัธยฐานของ  $v^2$  ทำการคำนวณซ้ำตามขั้นตอนดังกล่าวจนกระทั่งได้ค่า  $\hat{\theta}$  ที่ทำให้ค่ามัธยฐานของชุดข้อมูล  $v_i^2$  มีค่าน้อยที่สุด

ขั้นตอนต่อไปจะนำค่า  $v_i$  ที่คำนวณได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาข้อมูลที่ผิดได้ด้วยวิธีการ standardized residuals โดยใช้สมการที่ (2.22) และ (2.23) โดยในสมการที่ (2.22) นั้นให้ใช้ค่า  $s^0$  ที่คำนวณจากสมการที่ (2.25)

$$s^0 = 1.4826 \times (1 + \frac{5}{r}) \sqrt{med(v^2)} \quad (2.25)$$

Kanazawa และ Kanatani (2004) ได้ทำการศึกษาการสร้างภาพโมเสคอัตโนมัติ โดยมีขั้นตอนคือ หาจุดเด่นชัดในภาพจับคู่ภาพถ่ายด้วยวิธี FBM โดยให้ภาพถ่ายแต่ละภาพมีความสัมพันธ์แบบ homography ซึ่งประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงระบบ พิกัดภาพจำนวน 9 ค่า ดังแสดงในสมการที่ (2.26) และ (2.31) ตรวจหาจุดที่จับคู่ผิด และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงระบบพิกัดภาพด้วยการประยุกต์ใช้วิธี least median of squares ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานคือ

1) สุ่มคู่จุดจำนวนหนึ่งซึ่งเพียงพอกับการคำนวณค่าเมตริกซ์  $R$  ในสมการที่ (2.26) และคำนวณค่าเมตริกซ์  $R$

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = R \times \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$(x_p, y_p)$  และ  $(x_q, y_q)$  คือ ค่าพิกัดภาพของคู่จุดที่ได้จากการจับคู่ภาพถ่ายบนภาพ  $P$  และ  $Q$  ตามลำดับและ  $R$  คือ เมตริกซ์ของการแปลงระบบพิกัดภาพมีขนาด  $3 \times 3$

2) นำเมตริกซ์  $R$  มาคำนวณค่า  $v$  จากสมการที่ (2.27) และคำนวณค่ามัธยฐานของ  $v^2$

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = R \times \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ 1 \end{bmatrix} = v \quad (2.27)$$

3) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1) โดยการสุ่มคู่จุดใหม่ และทำการคำนวณค่า  $v$  ในขั้นตอนที่ 2) จนกระทั่งได้ค่าเมตริกซ์  $R$  ที่ทำให้ค่ามัธยฐานของ  $v^2$  มีค่าน้อยที่สุดและคำนวณค่า  $v$  ของข้อมูลทั้งหมด

4) นำค่า  $v$  ที่ได้มาทำการตรวจหาจุดที่จับคู่ผิดด้วยสมการที่ (2.23) โดยใช้ค่า  $s^0$  ที่คำนวณจากสมการที่ (2.25)

เมื่อทำการประมวลผลด้วยวิธีดังกล่าวพบว่า มีจุดที่จับคู่ผิดหลงเหลืออยู่ Kanazawa และ Kanatani จึงได้ปรับปรุงขั้นตอนตรวจหาจุดที่จับคู่ผิด โดยนำเสนอเทคนิคการจับคู่ภาพถ่ายแบบ stratified มีหลักการคือ แบ่งความสัมพันธ์ของภาพถ่ายทั้งสองออกเป็นความ สัมพันธ์ย่อยจากนั้น จึงคำนวณหาความสัมพันธ์ของการแปลงระบบพิกัดภาพถ่ายและกำจัดข้อมูลที่ผิดออกตามลำดับ โดยมีขั้นตอนคือ

1) กำหนดความสัมพันธ์ของภาพถ่ายเป็นแบบ translation ตามสมการที่ (2.28)

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = R_T \times \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ 1 \end{bmatrix}, \quad R_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & a_T \\ 0 & 1 & b_T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$R_T$  คือ เมตริกซ์ของการแปลงระบบภาพถ่ายแบบ translation นำคู่จุดที่ได้จากการจับคู่ภาพมาทำการตรวจหาจุดที่จับคู่ผิดด้วยวิธี least median of squares

2) กำหนดความสัมพันธ์ของภาพถ่ายเป็นแบบ similarity ตามสมการที่ (2.29)

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = R_S \times \begin{bmatrix} x_q \\ y_q \\ 1 \end{bmatrix}, \quad R_S = \begin{bmatrix} a_s & b_s & c_s \\ -b_s & a_s & d_s \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$R_S$  คือ เมตริกซ์ของการแปลงระบบภาพถ่ายแบบ similarity นำคู่จุดที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาทำการตรวจหาจุดที่จับคู่ผิดด้วยวิธี least median of squares

3) กำหนดความสัมพันธ์ของภาพถ่ายเป็นแบบ affine ตามสมการที่ (2.30)

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ 1 \end{bmatrix} = R_A \times \begin{bmatrix} x_Q \\ y_Q \\ 1 \end{bmatrix}, \quad R_A = \begin{bmatrix} a_A & b_A & c_A \\ d_A & e_A & f_A \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$R_A$  คือ เมตริกซ์ของการแปลงระบบภาพถ่ายแบบ affine นำคู่จุดที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 มาทำการตรวจหาจุดที่จับคู่ผิดด้วยวิธี least median of squares

4) กำหนดความสัมพันธ์ของภาพถ่ายเป็นแบบ homography ตามสมการที่ (2.31)

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ 1 \end{bmatrix} = R_H \times \begin{bmatrix} x_Q \\ y_Q \\ 1 \end{bmatrix}, \quad R_H = \begin{bmatrix} a_H & b_H & c_H \\ d_H & e_H & f_H \\ g_H & h_H & t_H \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$R_H$  คือ เมตริกซ์ของการแปลงระบบภาพถ่ายแบบ homography นำคู่จุดที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 มาทำการตรวจหาจุดที่จับคู่ผิดด้วยวิธี least median of squares

จากผลการศึกษาพบว่า การแบ่งความสัมพันธ์ของภาพถ่ายทั้งสองออกเป็นความสัมพันธ์ย่อยจากนั้นจึงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงระบบพิกัดภาพและคัดกรองข้อมูลที่ผิดออกตามลำดับ ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงระบบพิกัดและกำจัดข้อมูลที่ผิดจากความสัมพันธ์ของภาพถ่ายทั้งสองแบบ homography โดยตรง

## บทที่ 3

### การทดสอบวิธีหาจุดเด่นชัดในภาพและวิธีการจับคู่ภาพ

การจับคู่จุดภาพอัตโนมัติที่ใช้ในการศึกษา ครั้งนี้ประกอบด้วยขั้นตอน ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งในขั้นตอนการหาจุดเด่นชัดในภาพและการจับคู่ภาพนั้น มีวิธีการและเทคนิคที่ใช้งานหลายวิธี จึงต้องทำการทดสอบและประเมินผลการทดสอบเพื่อเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสมในการศึกษาค้างนี้ เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการทดสอบและประเมินผลวิธีหาจุดเด่นชัดในภาพและวิธีการจับคู่ภาพประกอบด้วยหัวข้อ 3.1 การทดสอบวิธีหาจุดเด่นชัดในภาพ และหัวข้อ 3.2 การทดสอบวิธีการจับคู่ภาพแบบ ABM และ FBM แต่ละหัวข้อมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 การทดสอบวิธีหาจุดเด่นชัดในภาพ

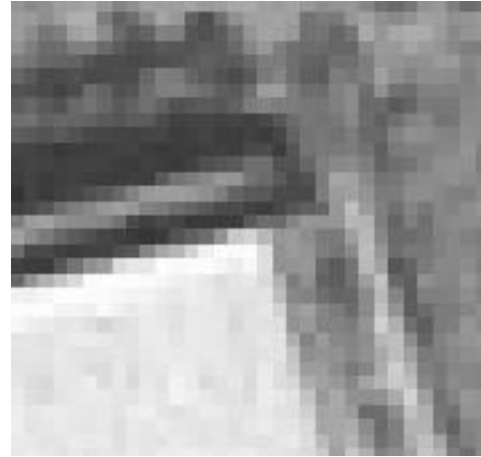
จุดเด่นชัดในภาพจะถูกใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นในขั้นตอนการจับคู่ภาพหากจุดที่ตรวจหาได้มีลักษณะที่ไม่ดีต่อการนำไปใช้ในการจับคู่ภาพ เช่น อยู่บนเส้นขอบหรืออยู่บนพื้นที่ที่มีความเข้มแสงใกล้เคียงกัน ย่อมจะส่งผลให้การจับคู่ภาพถ่ายเกิดการคลาดเคลื่อนได้ จึงต้องทำการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพถ่ายเพื่อที่จะนำมาใช้ในการรังวัดอัตโนมัติต่อไป โดยวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพ ถ่ายที่ใช้ในการประเมินได้แก่ Harris operator, Förstner operator, SUSAN operator และ FAST-9 operator ซึ่งวิธีการดังกล่าวนิยมใช้ในการรังวัดด้วยภาพ

การประเมินประสิทธิภาพของวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพถ่ายนั้น ส่วนใหญ่จะทำการประเมินจากภาพถ่ายที่ทราบตำแหน่งของจุด ที่เด่นชัดอยู่แล้ว เช่น Jazayeri และ Fraser (2010) ได้ทำการเลือกวิธีการหาจุดที่เด่นชัดในภาพถ่ายด้วยการทดสอบกับพื้นที่กริด  $11 \times 11$  ในภาพทดสอบ โดยมีเกณฑ์การตัดสินใจคือ ความถูกต้องทางตำแหน่งของจุดเด่นชัด อัตราส่วนของจำนวนจุดเด่นชัดจริงกับจำนวนจุดเด่นชัดที่ตรวจ หาได้และระยะเวลาในการประมวลผล นอกจากนี้ Rockett (2003) ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพถ่าย ด้วยการสร้างภาพทดสอบที่ทราบตำแหน่งของจุดที่เด่นชัด โดยใช้ภาพถ่ายตั้งต้นมาทำการลดความคมชัดของภาพ แปลงภาพโดยใช้ความสัมพันธ์แบบ affine แปลงมาตราส่วน resampling และเพิ่มสัญญาณรบกวน (noise) โดยใช้เกณฑ์การตัดสินใจคือพื้นที่ใต้กราฟ Receiver Operator Characteristic (ROC) เป็นต้น

สำหรับ ภาพออร์โธ สีเชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมรีออสนั้นเป็นการเก็บข้อมูลจากภูมิประเทศจริง การระบุตำแหน่งของจุดที่เด่นชัดจึงเป็นเรื่องที่ยุ้งยากและซับซ้อนกว่าภาพถ่ายที่สร้างขึ้นเพื่อการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ก. ภาพดั้งต้น



ข. ภาพขยายบริเวณที่เด่นชัดในภาพ

ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างภาพขยายบริเวณที่เด่นชัดในภาพ

ภาพที่ 3.1 ข. แสดงการขยายภาพบริเวณที่เด่นชัดในพื้นที่เส้นกรอบสีแดงใน ภาพที่ 3.1 ก. เห็นได้ว่าการระบุจุดภาพบริเวณมุมของอาคารที่แสดงใน ภาพที่ 3.1 ข. นั้นเป็นเรื่องที่ยุ้งยากและซับซ้อนเนื่องจากภาพออร์โธสีเชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมรีออสนั้น บันทึกข้อมูลจากภูมิประเทศจริงและจากขั้นตอนเตรียมภาพก่อนการประมวลผลทำให้ภาพทั้งสองมี  $GSD = 2$  เมตร จึงทำให้จุดที่เด่นชัดในภาพไม่ชัดเจนพอที่จะระบุตำแหน่งที่แน่นอนได้

ในการศึกษาครั้งนี้ จึงทำการทดสอบวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพกับบางส่วนของภาพที่ใช้ในการศึกษาที่มีลักษณะภูมิประเทศที่ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ก. พื้นที่ตรวจสอบที่ 1



ข. พื้นที่ตรวจสอบที่ 2

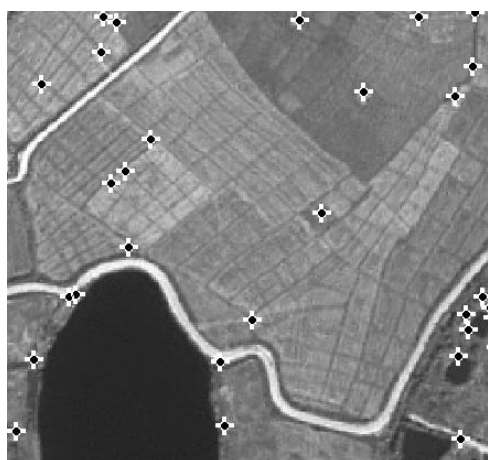
ภาพที่ 3.2 พื้นที่ตรวจสอบวิธีการหาจุดเด่นชัดบนภาพ

ภาพที่ 3.2 แสดงถึงพื้นที่ตรวจสอบวิธีการหาจุดเด่นชัดบนภาพโดยที่ ภาพที่ 3.2 ก. ประกอบด้วยลักษณะภูมิประเทศที่เป็นเส้นขอบชัดเจนและภาพที่ 3.2 ข. ประกอบด้วยลักษณะภูมิประเทศที่ไม่เด่นชัด บริเวณพื้นที่เกษตรกรรมกลางภาพ การทดสอบวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพจะทำการตรวจสอบจุดเด่นชัดที่มีลักษณะไม่เหมาะสม ในการใช้งานจับคู่ภาพเช่น จุดเด่นชัดที่มีตำแหน่งอยู่ในบริเวณเส้นขอบ หรือจุดที่มีลักษณะที่ไม่เด่นชัดที่ตรวจหาได้ในแต่ละวิธีโดยละเอียด เพื่อเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อด้อยของวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพแต่ละวิธีเมื่อทำการประมวลผลกับภาพที่ใช้ในการศึกษาและทำการเลือกวิธีหาจุดเด่นชัดที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการศึกษาต่อไป

เมื่อทำการประมวลผลหาจุดเด่นชัดบนภาพ ด้วยวิธีหาจุดเด่นชัด บนภาพ ทั้ง 4 วิธี นำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการตรวจสอบ ได้ผลดังนี้

### 3.1.1 การหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย Förstner operator

เมื่อทำการประมวลผลหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย Förstner operator ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในภาพที่ 3.3



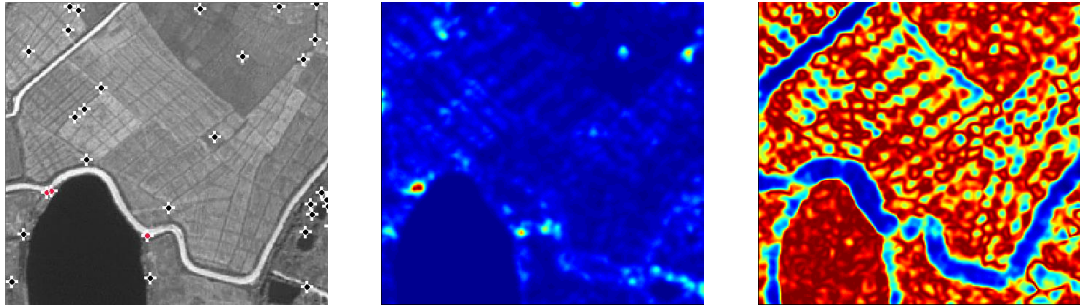
ก. พื้นที่ตรวจสอบที่ 1



ข. พื้นที่ตรวจสอบที่ 2

ภาพที่ 3.3 ผลการหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย Förstner operator ในพื้นที่ตรวจสอบ

เมื่อทำการตรวจสอบพบว่าจุดเด่นชัดที่มีลักษณะไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานจับคู่ภาพจำนวนค่อนข้างน้อย ซึ่งจุดดังกล่าวส่วนใหญ่ถูกตรวจพบบริเวณพื้นที่ลักษณะเส้นขอบในพื้นที่ตรวจสอบที่ 1 และเมื่อทำการตรวจสอบขนาดของ error ellipse และค่าความกลม ในพื้นที่ตรวจสอบที่ 1 ให้ผลดังภาพที่ 3.4



ก. พื้นที่ตรวจสอบที่ 1

ข. ขนาดของ error ellipse

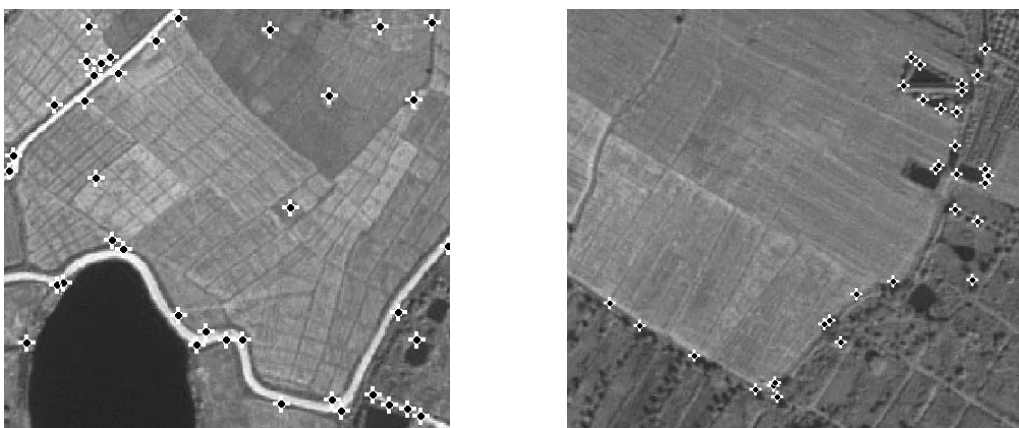
ค. ค่าความกลม

ภาพที่ 3.4 ขนาดของ error ellipse และค่าความกลมของพื้นที่ตรวจสอบที่ 1

จากภาพที่ 3.4 ก. จะเห็นได้ว่าในบริเวณที่เป็นเส้นขอบนั้นปรากฏจุดเด่นชัดที่ได้จาก Fröstner operator จำนวนค่อนข้างน้อย เนื่องจาก Fröstner operator นั้นมีการระบุตำแหน่งของจุดเด่นชัดโดยการ threshold จากขนาดของ error ellipse และค่าความกลม เมื่อเปรียบเทียบภาพที่ 3.4 ข. และภาพที่ 3.4 ค. จะเห็นได้ว่าขนาดของ error ellipse ที่มีค่าสูงแต่อยู่ใกล้บริเวณเส้นขอบจะไม่ถูกระบุเป็นจุดที่เด่นชัด แต่ในบริเวณที่เส้นขอบ 2 เส้นหรือมากกว่ามาบรรจบกัน ค่าความกลมค่อนข้างสูง จึงทำให้จุดภาพที่อยู่ใกล้ บริเวณเส้นขอบและอยู่ในบริเวณดังกล่าวถูกระบุว่าเป็นจุดเด่นชัดในภาพดังแสดงด้วยจุดสีแดงในภาพที่ 3.4 ก.

### 3.1.2 การหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย Harris operator

เมื่อทำการประมวลผลหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย Harris operator ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในภาพที่ 3.5

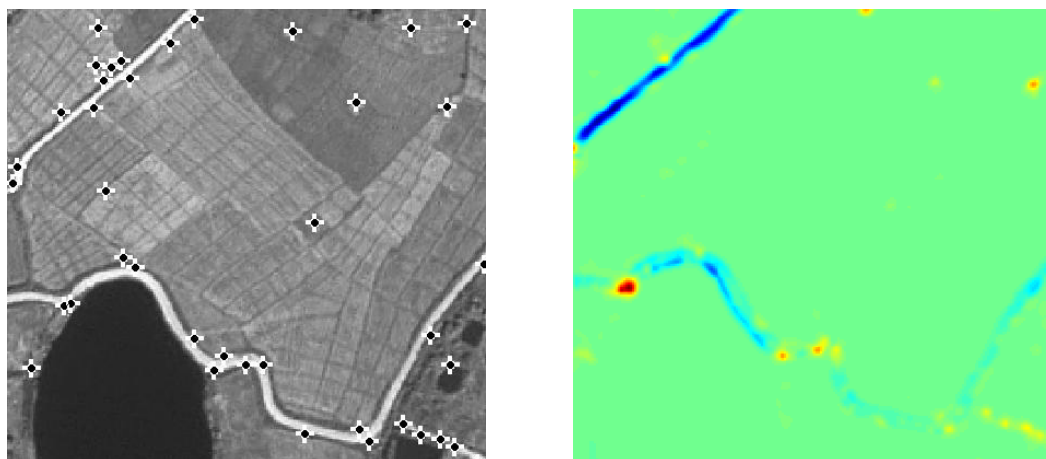


ก. พื้นที่ตรวจสอบที่ 1

ข. พื้นที่ตรวจสอบที่ 2

ภาพที่ 3.5 ผลการหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย Harris operator ในพื้นที่ตรวจสอบ

เมื่อทำการตรวจสอบพบว่า มีจุดเด่นชัดที่ได้มีลักษณะไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานจับคู่ภาพจำนวนหนึ่ง ซึ่งจุดดังกล่าวส่วนใหญ่ถูกตรวจพบบริเวณพื้นที่ลักษณะเส้นขอบใน พื้นที่ตรวจสอบที่ 1 เมื่อนำพื้นที่ดังกล่าวมาทำการตรวจสอบค่าความเป็นมุมตามสมการที่ (2.14) ให้ผลดังภาพที่ 3.6



ก. พื้นที่ตรวจสอบที่ 1

ข. ค่าความเป็นมุม ( $c$ )

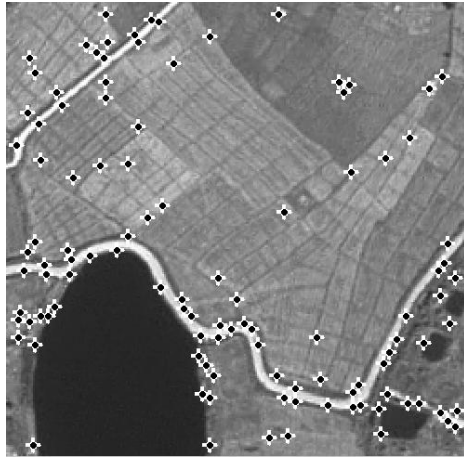
ภาพที่ 3.6 ค่าความเป็นมุมของพื้นที่ตรวจสอบที่ 1

จากภาพที่ 3.6 โดยทั่วไปจุดภาพบริเวณเส้นขอบจะมีค่า  $c < 0$  ดังแสดงในภาพที่ 3.6 ข. (ในภาพที่ 3.6 ข. สีเขียวอ่อนแสดงค่าประมาณ 0) การคำนวณค่าความเป็นมุมนั้นมีพื้นฐานมาจากการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของจุดภาพนั้น จุดภาพบริเวณเส้นขอบจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในแนวแกน  $x$  มากกว่าหรือน้อยกว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในแนวแกน  $y$  และจะมีค่าความเป็นมุมน้อยกว่าศูนย์ ในบริเวณเส้นขอบที่ไม่คมชัดหรือมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง จุดภาพบริเวณดังกล่าวจะ มีความแตกต่างระหว่าง อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในแนวแกน  $x$  และ  $y$  น้อยกว่าจุดภาพ ในภาพที่ ที่ความคมชัด หรือเส้นขอบที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงและทำให้ค่าความเป็นมุมนี้น้อยกว่าค่า threshold ที่กำหนดจึงทำให้จุดภาพที่อยู่บริเวณเส้นขอบบางจุดถูกระบุเป็นจุดที่เด่นชัดดังแสดงในภาพที่ 3.6 ก.

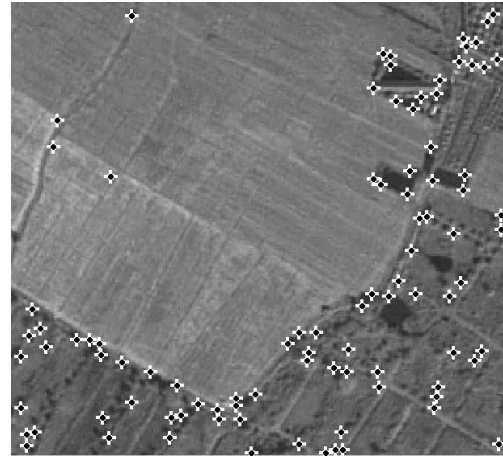
### 3.1.3 การหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย SUSAN operator

เมื่อทำการประมวลผลหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย SUSAN operator ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในภาพที่ 3.7





ก. พื้นที่ตรวจสอบที่ 1

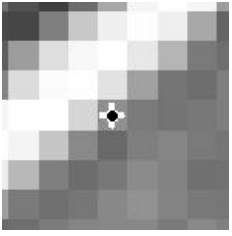
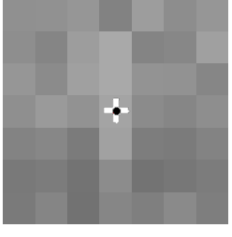


ข. พื้นที่ตรวจสอบที่ 2

ภาพที่ 3.7 ผลการหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย SUSAN operator ในพื้นที่ตรวจสอบ

จากผลการทดสอบพบว่าจุดเด่นชัดที่มีลักษณะไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานจับคู่ภาพจำนวนหนึ่งโดยเฉพาะบริเวณ เส้นขอบ เมื่อนำจุดเด่นชัดที่มีลักษณะดังกล่าวมาทำการตรวจสอบตามวิธี SUSAN ให้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.1

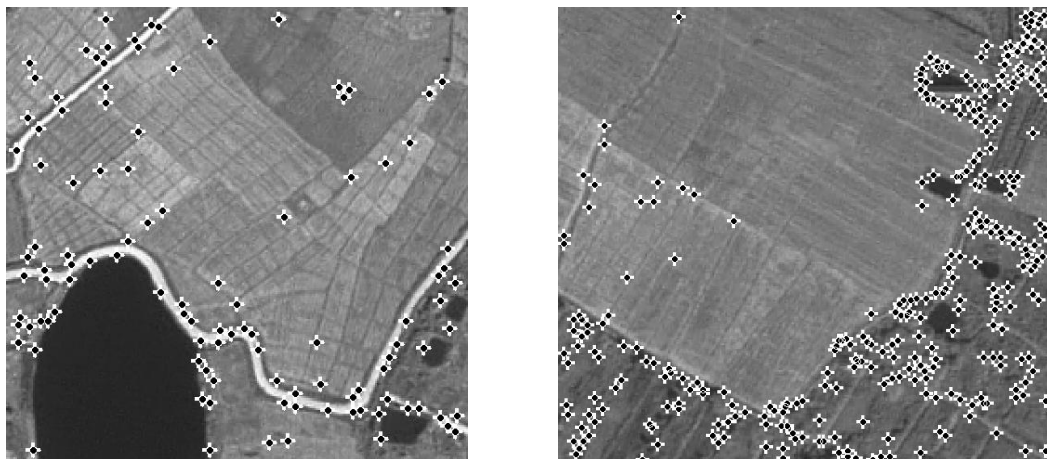
ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณค่า USAN

ลำดับที่	ภาพตั้งต้น	ค่าของจุดภาพ	$c(\vec{r}, \vec{r}_0)$	USAN
1		200 240 254 223 248 255 232 181 220 252 255 226 161 117 110 133 220 214 144 123 116 120 244 197 137 106 127 134 122 127 109 120 139 131 119 136 146	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1	13
2		150 130 158 133 158 169 132 135 150 140 160 169 147 146 134 143 154 146 164 139 134 142 131 135 123 161 125 123 131 124 115 140 115 119 114 134 127	1 0 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0	15

SUSAN operator นั้นจุดภาพที่ถูกระบุว่าเป็นจุดเด่นชัดในภาพจะมีค่า USAN น้อยกว่า ครึ่งหนึ่งของค่า  $USAN_{MAX}$  ( $USAN_{MAX} = 36$ ) จุดภาพที่อยู่บริเวณเส้นขอบจะมีค่า USAN ครึ่งหนึ่งของค่า  $USAN_{MAX}$  และจุดภาพที่ไม่เด่นชัดจะมีค่า USAN มากกว่าครึ่งหนึ่งของค่า  $USAN_{MAX}$  ในพื้นที่บริเวณเส้นขอบที่ไม่คมชัด ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ลำดับที่ 1 ลักษณะดังกล่าวเป็นสาเหตุให้ค่า USAN ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่า  $USAN_{MAX}$  อีกทั้งบางจุดภาพที่มีลักษณะไม่เด่นชัดแต่เมื่อคำนวณค่า USAN พบว่ามีค่าน้อยกว่าค่า  $USAN_{MAX}$  เนื่องจากลักษณะของภาพที่ไม่คมชัดและสัญญาณรบกวนแสดงในตารางที่ 3.1 ลำดับที่ 2

### 3.1.4 การหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย FAST-9 operator

เมื่อทำการประมวลผลหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย FAST-9 operator ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในภาพที่ 3.8



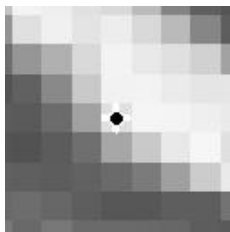
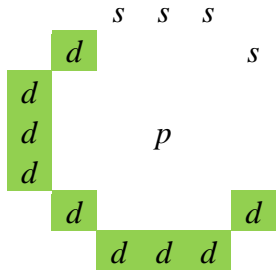
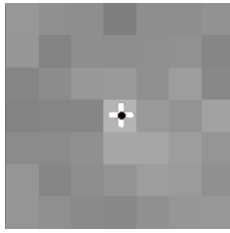
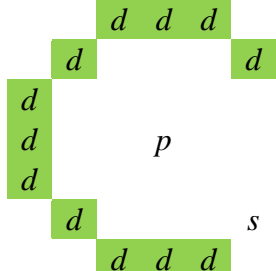
ก. พื้นที่ตรวจสอบที่ 1

ข. พื้นที่ตรวจสอบที่ 2

ภาพที่ 3.8 ผลการหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย FAST-9 operator ในพื้นที่ตรวจสอบ

จากผลการทดสอบพบว่า FAST-9 ตรวจพบจุดเด่นชัดได้จำนวนมากกว่าวิธีอื่น แต่เมื่อทำการตรวจสอบจุดเด่นชัดที่ได้ พบว่ามีจุดเด่นชัดที่มีลักษณะไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานจับคู่ภาพจำนวนมาก ดังแสดงในภาพที่ 3.8 โดยเฉพาะพื้นที่บริเวณเส้นขอบ เมื่อนำจุดเด่นชัดที่มีลักษณะไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานจับคู่ภาพบางส่วนมาทำการตรวจสอบ ให้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การคำนวณหาจุดเด่นชัดบนภาพโดย FAST-9 operator

ลำดับ ที่	ภาพตั้งต้น	ค่าของจุดภาพ	$S_{p \rightarrow x}$
1		228 237 217 176                    224 97                            229 90                    224                    239 82                            246 93                            160 94 88 88	
2		142 126 142 131                    145 133                            136 131                    180                    162 139                            149 134                            155 138 137 144	

FAST-9 operator นั้นจะทำการทดสอบจุดภาพกับจุดภาพโดยรอบเพียง 16 จุดภาพ จึงทำให้อ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวน อีกทั้งการบันทึกข้อมูล ลจากภูมิประเทศจริงโดยใช้ GSD ประมาณ 2 เมตร นั้นทำให้บริเวณเส้นขอบไม่คมชัด เท่าที่ควรดังแสดงในตารางที่ 3.2 ลำดับที่ 1 อีกทั้งผลกระทบจากสัญญาณรบกวนดังแสดงในตารางที่ 3.2 ลำดับที่ 2 จึงทำให้การหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย FAST-9 operator ปรากฏจุดเด่นชัดที่ไม่เหมาะสมในการใช้งานจับคู่ภาพจำนวนมาก

จุดเด่นชัดในภาพนั้นจะถูกใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นในขั้นตอนการจับคู่ภาพ หากจุดเด่นชัดที่ได้มีลักษณะไม่เหมาะสม ที่จะนำไปใช้งานจับคู่ภาพ จะส่งผลให้เกิดการ จับคู่ผิดได้ จากผลการตรวจสอบที่กล่าวมาข้างต้น FAST-9 operator และ SUSAN operator นั้นให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากความไม่คมชัดและ GSD ของภาพ ทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจหาจุดเด่นชัดในทั้ง 2 วิธีลดลงและการต้านทานต่อสัญญาณรบกวนใน SUSAN operator นั้นไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ในส่วนของ Harris operator และ Fröstner operator มีพื้นฐานการคำนวณมาจากการวิเคราะห์ autocorrelation matrix ซึ่งต้านทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดี จึงไม่ปรากฏจุดเด่นชัดใน

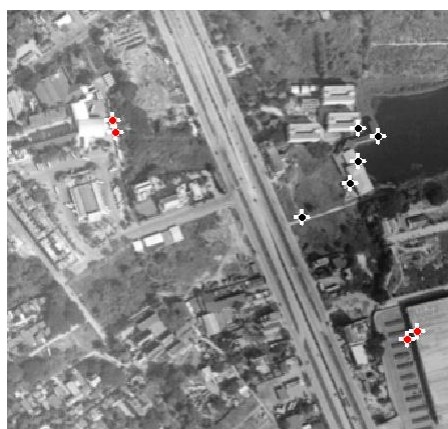
บริเวณกลางภาพของพื้นที่ตรวจสอบที่ 2 ซึ่งมีลักษณะไม่เด่นชัด แต่ใน Harris operator จุดเด่นชัดที่ตรวจหาได้บางส่วนอยู่ใกล้บริเวณเส้นขอบซึ่งเนื่องจากความไม่คมชัด และ GSD ของภาพ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้ Fröstner operator ในขั้นตอนการหาจุดเด่นชัดบนภาพเนื่องจากต้านทานต่อสัญญาณรบกวนและระบุบริเวณเส้นขอบได้ดี จึงทำให้ได้จุดเด่นชัดที่มีลักษณะไม่เหมาะสมในการใช้งานจับคู่ภาพน้อยกว่าวิธีอื่น

### 3.2 การทดสอบวิธีการจับคู่ภาพแบบ ABM และ FBM

ภาพออร์โธรีซิเทอริกและภาพถ่ายดาวเทียมมีข้อสับสนันบันทึกข้อมูลในช่วงเวลาและใช้ตัวรับรู้ที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลให้ผลลัพธ์ของการจับคู่ภาพถ่ายแบบ ABM หรือ FBM เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบวิธีการจับคู่ภาพถ่ายทั้งสอง โดยใช้บางส่วนของภาพออร์โธรีซิเทอริกและภาพถ่ายดาวเทียมที่มีย่านซ้อนทับกันเพื่อประเมินความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นต้นและออกแบบขั้นตอนการจับคู่ภาพในวิธีจริงวัด GCPs อัตโนมัติต่อไป

#### 3.2.1 การทดสอบวิธีการจับคู่ภาพแบบ ABM

การทดสอบวิธีการจับคู่ภาพแบบ ABM มีขั้นตอนคือ หาจุดที่เด่นชัดในภาพออร์โธรีซิเทอริกสร้าง template โดยให้จุดที่เด่นชัดบนภาพออร์โธรีซิเทอริกเป็นจุดศูนย์กลางและให้เป็น template อ้างอิง ทำการจับคู่ภาพด้วยวิธี ABM โดยกำหนดพื้นที่ค้นหาคือ ภาพถ่ายดาวเทียมที่มีย่านที่ใช้ในการทดสอบทั้งภาพ และทำการคัดเลือกจุดจุดเพื่อใช้เป็น GCPs (อธิบายในหัวข้อ 4.3.2) ผลลัพธ์ที่ได้เมื่อทำการตรวจสอบเบื้องต้นด้วยสายตาพบว่ามีย่านจำนวน 4 ย่าน (เครื่องหมายกากบาทสีแดง) จากจำนวนจุดจุดทั้งหมด 9 จุด ไม่ใช่จุดที่เหมือนกันในทั้งสองภาพ ดังแสดงในภาพที่ 3.9



ภาพออร์โธรีซิเทอริก



ภาพถ่ายดาวเทียม

ภาพที่ 3.9 ผลการทดสอบการจับคู่ภาพด้วยวิธี ABM เบื้องต้น

จากผลการทดสอบดังกล่าวได้ข้อสังเกตคือ

1) จากการที่ภาพทั้งสองนั้นบันทึกข้อมูลในช่วงเวลาและใช้ตัวรับรู้ที่แตกต่างกัน ภาพทั้งสองถึงแม้ว่าจะครอบคลุมบริเวณเดียวกัน แต่ข้อมูลที่บันทึกได้มีค่าความเข้มแสงของจุดภาพแตกต่างกันและจุดเด่นชัดบางจุดที่ปรากฏใน ภาพออร์โธรีซิเชิงเลข ไม่ปรากฏในภาพถ่ายดาวเทียมรีออส จึงส่งผลให้จุดภาพที่มีค่า CC สูงสุดในพื้นที่ค้นหาในภาพถ่ายดาวเทียมรีออสไม่ใช่จุดที่เหมือนกันกับจุดเด่นชัดในภาพออร์โธรีซิเชิงเลข

2) เมื่อทำการตรวจสอบค่า CC ของจุดภาพในภาพถ่ายดาวเทียมรีออสที่คาดว่าจะ เป็นจุดเดียวกันกับจุดเด่นชัดใน ภาพออร์โธรีซิเชิงเลขและจุดภาพโดยรอบ พบว่าจุดภาพดังกล่าวมีค่า CC สูงกว่าบริเวณโดยรอบแต่ไม่ใช่จุดภาพที่มีค่า CC สูงสุดในพื้นที่ค้นหา

### 3.2.2 การทดสอบวิธีการจับคู่ภาพแบบ FBM

การทดสอบวิธีการจับคู่ภาพแบบ FBM มีขั้นตอนคือ หาจุด ที่เด่นชัดในภาพทั้ง 2 ภาพ จับคู่จุดภาพด้วยวิธี FBM (อธิบายในหัวข้อ 4.3.1) และทำการคัดเลือกคู่จุดเพื่อใช้เป็น GCPs เช่นเดียวกับการทดสอบวิธีการจับคู่ภาพถ่ายแบบ ABM ผลลัพธ์ที่ได้เมื่อทำการตรวจสอบเบื้องต้น ด้วยสายตาพบว่า มีคู่จุดจำนวน 1 คู่จุด (เครื่องหมายกากบาทสีแดง) จากจำนวนคู่จุดทั้งหมด 9 คู่จุด ไม่ใช่จุดที่เหมือนกันในทั้งสองภาพ ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพออร์โธรีซิเชิงเลข

ภาพถ่ายดาวเทียมรีออส

ภาพที่ 3.10 ผลการทดสอบการจับคู่ภาพด้วยวิธี FBM เบื้องต้น

จากผลการทดสอบดังกล่าวได้ข้อสังเกตคือ

1) การที่ภาพทั้งสองบันทึกข้อมูลในช่วงเวลาและใช้ตัวรับรู้ที่แตกต่างกัน จุดเด่นชัดบางจุดที่ตรวจหาได้ในภาพออร์โธรีซิเชิงเลขจึงไม่ปรากฏในภาพถ่ายดาวเทียมรีออส จึงส่งผลให้เกิดการจับคู่ผิดได้ ซึ่งจากผลการทดสอบ จุดดังกล่าวถือว่าเป็นข้อมูลส่วนนี้ อยเมื่อนำไปใช้เป็น GCPs

ในการคำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมหรืออส น่าจะสามารถถูกตรวจพบโดยวิธีการตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิดได้

2) จากข้อจำกัดของวิธีการจับคู่ภาพด้วยวิธี FBM ในด้านของการบันทึกข้อมูลในช่วงเวลาและใช้ตัวรับรู้ที่แตกต่างกันและการทดสอบความเหมือนของจุดภาพ ซึ่งจะทำการทดสอบเฉพาะจุดเด่นชัด ที่ตรวจหาได้ ในทั้ง 2 ภาพ การนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้เป็น GCPs ในการคำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมหรืออสอาจเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้

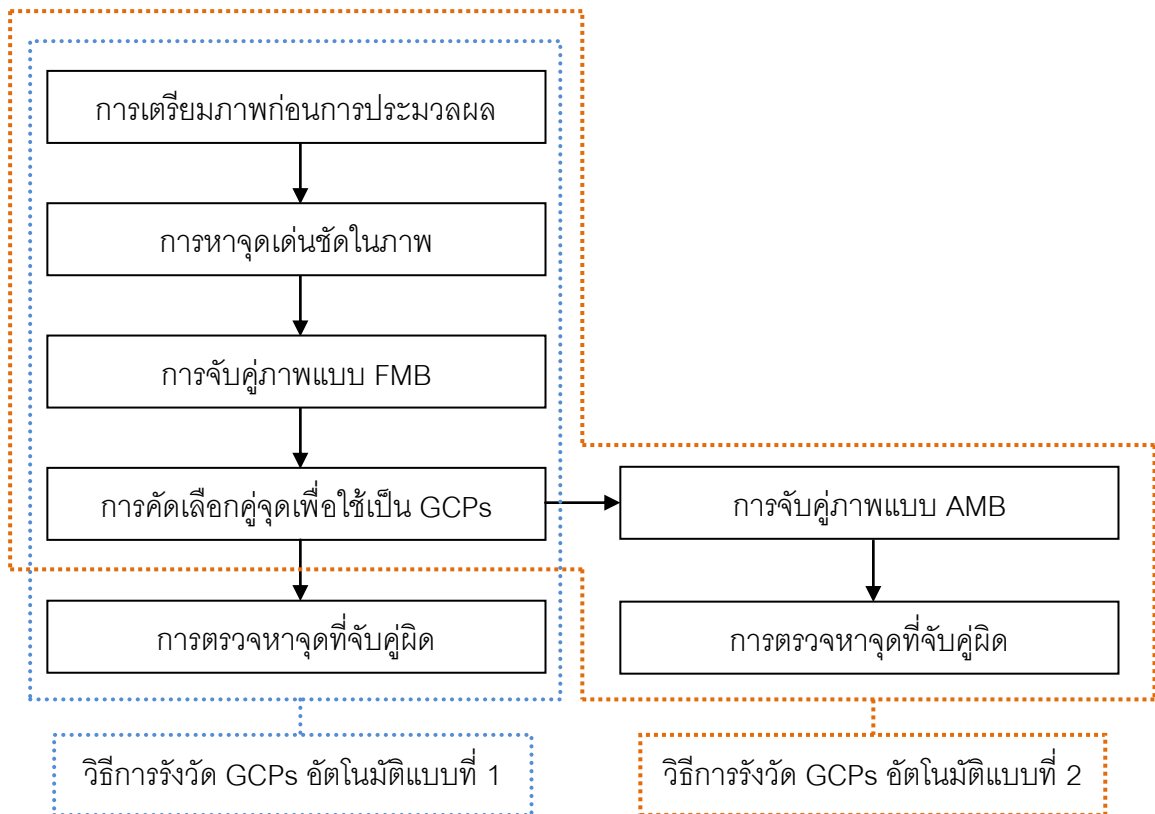
วิธีการจับคู่ภาพแบบ ABM จะทำการทดสอบกับจุดภาพทุกจุดในพื้นที่ค้นหา ซึ่งน่าจะได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีการจับคู่ภาพถ่ายแบบ FBM ที่ทำการทดสอบเฉพาะจุดเด่นชัดที่ตรวจหาได้ในทั้งสองภาพ แต่จากผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่าวิธีการจับคู่ภาพถ่ายแบบ ABM ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากช่วงเวลาที่ทำการบันทึกข้อมูล การใช้ตัวรับรู้ที่แตกต่างกันและพื้นที่ค้นหาที่มีขนาดใหญ่เกินไปดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อสังเกตที่ได้จากการทดสอบวิธีการจับคู่ภาพแบบ ABM ในส่วนของวิธีการจับคู่ภาพแบบ FBM ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบเบื้องต้นให้ผลเป็นที่น่าพอใจแต่จากข้อจำกัดของวิธีการจับคู่ภาพด้วยวิธี FBM ดังกล่าวไว้ในข้อสังเกตที่ 2 อาจทำให้การคำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมหรืออสได้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้น หากนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจับคู่ภาพถ่ายแบบ FBM และการคัดเลือกจุดด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการจับคู่ภาพถ่ายแบบ stratified มาใช้เป็นข้อมูลตั้งต้น ในการจับคู่ภาพแบบ ABM และกำหนดพื้นที่ค้นหาบนภาพถ่ายดาวเทียมหรืออสให้มีขนาดเล็กลง น่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของขั้นตอนการจับคู่ภาพที่ใช้ในวิธีการรังวัด GCPs อัตโนมัติได้

การศึกษาครั้งนี้จึงแบ่งขั้นตอนการจับคู่ภาพออกเป็น 2 แบบ (ดังแสดงในภาพที่ 4.1) คือแบบที่ 1 ประกอบด้วยขั้นตอนการจับคู่ภาพแบบ FBM และการคัดเลือกจุดเพื่อใช้เป็น GCPs โดยเรียกการรังวัด GCPs อัตโนมัติที่ใช้วิธีดังกล่าวว่า การรังวัดอัตโนมัติ 1 และแบบที่ 2 ประกอบด้วยขั้นตอนการจับคู่ภาพแบบ FBM การคัดเลือกจุดเพื่อใช้เป็น GCPs และการจับคู่ภาพแบบ ABM โดยเรียกการรังวัด GCPs อัตโนมัติที่ใช้วิธีดังกล่าวว่า การรังวัดอัตโนมัติ 2

## บทที่ 4

### การดำเนินงาน

ในการพัฒนาวิธีการรังวัด GCPs อัดโนมัตินั้นโดยทั่วไปจะใช้ขั้นตอนพื้นฐานเช่นเดียวกับการจับคู่จุดภาพอัดโนมัติ แต่เนื่องจากจำนวนจุดเด่นชัดที่ตรวจหาได้ใน ภาพออร์โธ สี่เชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมธีออสนั้น มีจำนวนมากเกินความจำเป็น และจุดเด่นชัดที่ตรวจหาได้บางจุดไม่ปรากฏในทั้งสองภาพ ซึ่งทำให้เกิดการจับคู่จุดภาพผิดได้ เพื่อเป็นการแก้ไข ปัญหาดังกล่าว ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้พัฒนา วิธีการรังวัด GCPs อัดโนมัติขึ้นมา 2 แบบดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 คือวิธีการรังวัด GCPs อัดโนมัติแบบที่ 1 และ 2 ดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 วิธีการรังวัดอัดโนมัติที่ใช้ในการศึกษา

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดและ ขั้นตอนการดำเนินงานวิธีการรังวัด GCPs อัดโนมัติที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จากขั้นตอนการรังวัดอัดโนมัติ แสดงในภาพที่ 4.1 โดยในหัวข้อ 4.1 จะกล่าวถึงการเตรียม ภาพออร์โธ สี่เชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมธีออสก่อนการประมวลผล หัวข้อ 4.2

จะกล่าวถึงการหาจุดเด่นชัดในภาพ หัวข้อ 4.3 จะกล่าวถึงรายละเอียดวิธีการจับคู่ภาพแบบ FBM การคัดเลือกคู่จุดเพื่อใช้เป็น GCPs และการจับคู่ภาพแบบ ABM และหัวข้อ 4.4 จะกล่าวถึงการคำนวณหาค่าพิกัดบนพื้นดินบนภาพออร์โธรีโธซีเชิงเลขและค่าพิกัดภาพบนภาพถ่ายดาวเทียมรีออสของคู่จุดที่ตรวจหาได้และการกำจัดจุดที่จับคู่ผิด

#### 4.1 การเตรียมภาพก่อนการประมวลผล

เนื่องจากวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพและการจับคู่ภาพนั้น คำนวณจากค่าความเข้มแสงของจุดภาพในภาพระดับเทาและเพื่อ ลดข้อจำกัดของการจับคู่ภาพด้านการเปลี่ยนแปลงมาตราส่วนและการวางตัวของภาพ จึงต้องทำการเตรียมภาพออร์โธรีโธซีเชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมรีออสก่อนการประมวลผล โดยแปลงภาพออร์โธรีโธซีเชิงเลข ซึ่งจัดเก็บค่าของจุดภาพเป็น 3 ช่วงคือ สีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน (*RGB*) ให้เป็นภาพระดับเทาโดยใช้สมการ NTSC (สมการที่ (2.2)) และลดรายละเอียดของภาพจาก  $GSD = 0.5$  เมตร เป็น  $GSD = 2$  เมตรโดยใช้สมการที่ (2.3) การลดรายละเอียดของภาพนั้น เพื่อเป็นการรักษารายละเอียดของภาพจึงนิยมใช้ค่า  $r$  ในสมการที่ (2.3) เท่ากับ 2 เมื่อใช้ค่าดังกล่าวในการลดรายละเอียดของ ภาพออร์โธรีโธซีเชิงเลขจาก  $GSD = 0.5$  เมตร จะทำให้ภาพผลลัพธ์มี  $GSD = 1$  เมตร จึงต้องทำการลดรายละเอียดของภาพออร์โธรีโธซีเชิงเลขอีกครั้งจาก  $GSD = 1$  เมตร เป็น  $GSD = 2$  เมตร เพื่อให้  $GSD$  ของภาพออร์โธรีโธซีเชิงเลขมีขนาดใกล้เคียงกับ  $GSD$  ของภาพถ่ายดาวเทียมรีออส ตัวอย่างการเตรียมภาพก่อนการประมวลผลของภาพออร์โธรีโธซีเชิงเลขดังแสดงในภาพที่ 4.2





ก.ภาพดั้งเดิม



ข.ภาพระดับเทา GSD = 0.5 เมตร



ค.ภาพระดับเทา GSD = 1 เมตร

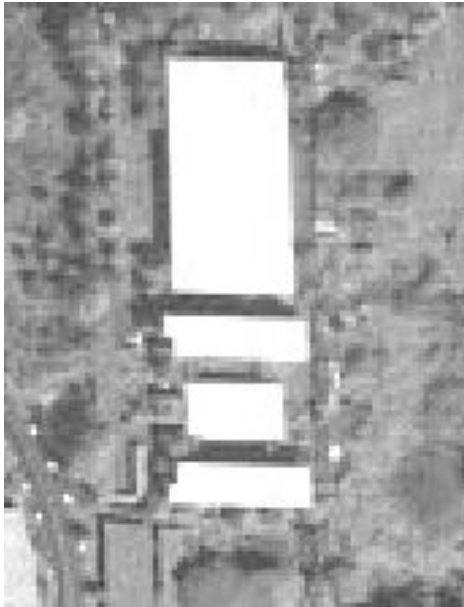


ง.ภาพระดับเทา GSD = 2 เมตร

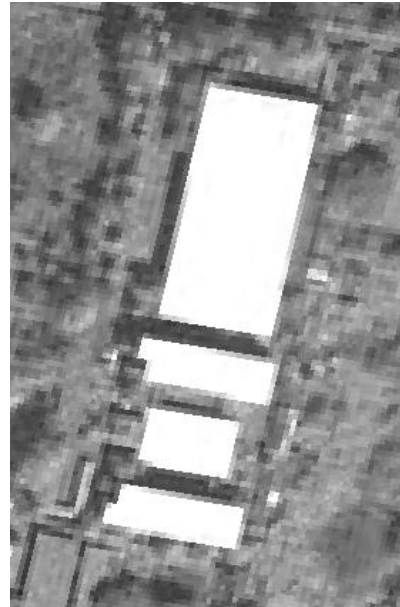
#### ภาพที่ 4.2 การเตรียมภาพก่อนการประมวลผลของภาพออร์โธรีโสีเชิงเลข

ภาพที่ 4.2 ก. แสดงถึงบางส่วนของภาพออร์โธรีโสีเชิงเลขดั้งเดิม GSD = 0.5 เมตร ภาพที่ 4.2 ข. แสดงถึงผลการแปลงภาพ จากภาพสี (*RGB*) เป็นภาพระดับเทา GSD = 0.5 เมตร ภาพที่ 4.2 ค. และภาพที่ 4.2 ง. แสดงถึงผลการลดรายละเอียดภาพจาก GSD = 0.5 เมตร เป็น GSD = 1 เมตร และ GSD = 2 เมตร ตามลำดับ

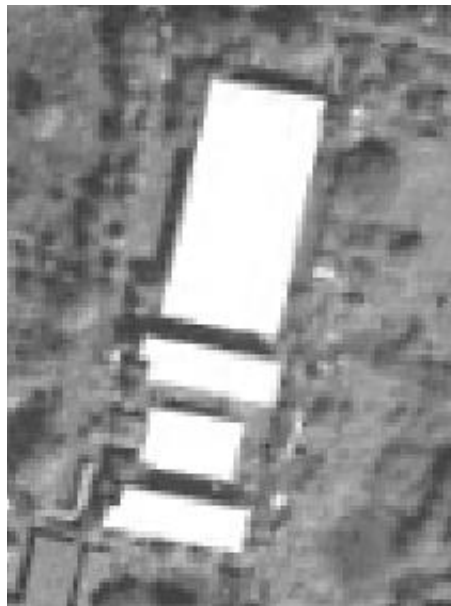
ในส่วนของการถ่ายภาพดาวเทียมที่ออกสนั้น ได้มีการระบุค่าพิกัดบนพื้นดินที่บริเวณมุมภาพทั้ง 4 มุม จึงสามารถแสดงผลภาพในระบบพิกัดแผนที่ได้ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ข. และเพื่อลดข้อจำกัดของการจับคู่ภาพด้านการอ่อนไหวต่อการวางตัวของภาพ จึงทำการปรับแก้การวางตัวของภาพ โดยทำการ *resampling* และกำหนด GSD = 2 เมตร เพื่อให้ใกล้เคียงกับ GSD ของภาพเดิม ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 4.3



ก. การแสดงผลในระบบพิกัดภาพ



ข. การแสดงผลในระบบพิกัดแผนที่



ค. ภาพผลลัพธ์จากการ resampling ให้มีค่า GSD = 2 เมตร

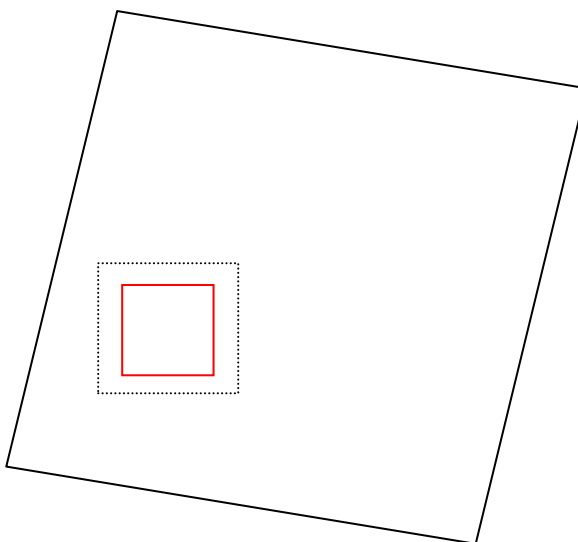
ภาพที่ 4.3 การเตรียมภาพก่อนการประมวลผลของภาพถ่ายดาวเทียมธีออส

จากภาพที่ 4.3 ก. และภาพที่ 4.3 ข. จะสังเกตเห็นได้ว่า อาคารที่ปรากฏในภาพมีการวางตัวที่แตกต่างกันและเมื่อเปรียบเทียบภาพทั้งสองกับภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์ ดังแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่า ภาพที่ 4.3 ข. มีการวางตัวใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่า ภาพที่ 4.3 ก. ในส่วนของภาพที่

4.3 ค. แสดงถึงภาพผลลัพธ์จาก ปรับแก้การวางตัวของภาพ สังเกตได้ว่าภาพที่ 4.3 ข.และภาพที่ 4.3 ค. นั้นมีการวางตัวใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่า ภาพที่ 4.3 ก. แต่เนื่องจากภาพที่ 4.3 ข. เป็นการปรับแก้การวางตัวของภาพในลักษณะการแสดงผล จึงไม่สามารถใช้ในการประมวลผล จับคู่จุดภาพอัตโนมัติได้

#### 4.2 การหาจุดเด่นชัดในภาพ

เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการเตรียมภาพก่อนการประมวลผล ขั้นตอนต่อไปคือการนำ ภาพออร์โธรีซิซิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมธีออสมาทำการหาจุดเด่นชัดในภาพด้วย Förstner operator ภาพถ่ายดาวเทียมธีออสนั้น มีขนาดใหญ่และครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างกว่า ภาพออร์โธรีซิซิงเลข การประมวลผลหาจุดเด่นชัดในภาพถ่ายดาวเทียมธีออสทั้งภาพทำให้ได้ข้อมูลมากเกินไป ความเป็นและใช้เวลาในการประมวลผลนานขึ้น จากการทำภาพออร์โธรีซิซิงเลขตั้งต้นและภาพถ่ายดาวเทียมธีออสที่ ผ่านขั้นตอนการเตรียมภาพก่อนการประมวลผล มีการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบ geotiff จึงสามารถคำนวณค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดภาพใดๆ ในภาพ ได้และสามารถ กำหนดขอบเขตบนภาพถ่ายดาวเทียมธีออส ที่ครอบคลุมบริเวณเดียวกับภาพออร์โธรีซิซิงเลขโดยประมาณ ได้อีกด้วย



ภาพที่ 4.4 แนวคิดในการกำหนดพื้นที่ซ้อนทับระหว่างภาพออร์โธรีซิซิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมธีออส

จากภาพที่ 4.4 เส้นทึบสีแดงแสดงถึงขอบเขตของภาพออร์โธรีซิંગเลข เส้นทึบสีดำแสดงถึงขอบเขตของภาพถ่ายดาวเทียมธีออส เนื่องจากภาพถ่ายดาวเทียมธีออสที่ใช้ในการประมวลผลมีความถูกต้องทางตำแหน่งของภาพไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำการขยายขอบเขตของ ภาพออร์โธรีซิ้งเลข ดังแสดงด้วยเส้นประสีดำและกำหนดเป็นพื้นที่ซ้อนทับ ระหว่างภาพออร์โธรีซิ้งเลขและภาพถ่ายดาวเทียมธีออส จากขั้นตอนที่กล่าวมานั้นจำเป็นต้องทราบค่าพิกัดภาพของภาพถ่ายดาวเทียมธีออสที่มีค่าพิกัดบนพื้นดินเดียวกับมุมภาพบนซ้ายและล่างขวาของภาพออร์โธรีซิ้งเลข

การคำนวณค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดภาพ ในภาพเชิงเลขที่จัดเก็บในรูปแบบ geotiff โดยทั่วไปจะคำนวณโดยใช้เมทริกซ์อ้างอิง (reference matrix,  $R$ ) ขนาด  $3 \times 2$  ประกอบด้วยค่าคงที่ 6 ค่า ซึ่งถูกจัดเก็บไว้ในส่วนของ geotiff tags ตามสมการที่ (4.1) (affine tranfomation)

$$[X \ Y] = [x \ y \ 1] \times \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \\ R_{31} & R_{32} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

โดยที่

$$(X, Y) = \text{ค่าพิกัดบนพื้นดิน}$$

$$(x, y) = \text{ค่าพิกัดภาพ}$$

จากสมการที่ (4.1) เห็นได้ว่าเมื่อทราบค่าพิกัดภาพของภาพที่มีการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบ geotiff สามารถคำนวณค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดภาพนั้นได้ สำหรับในกรณีที่ทราบค่าพิกัดบนพื้นดินสามารถคำนวณค่าพิกัดภาพได้เช่นกัน โดยใช้สมการที่ (4.2) (ใช้สัญลักษณ์เดียวกับสมการที่ (4.1))

$$[x \ y] = [X \ Y \ 1] \times \begin{bmatrix} R'_{11} & R'_{12} \\ R'_{21} & R'_{22} \\ R'_{31} & R'_{32} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

สมาชิกของเมทริกซ์  $R'$  นั้นสามารถคำนวณได้จากค่าเมทริกซ์  $R$  ในสมการที่ (4.1) (invert affine tranfomation) โดยที่สมาชิกแต่ละตัวในเมทริกซ์  $R'$  มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}
R'_{11} &= \frac{R_{22}}{(R_{11} \times R_{22}) - (R_{21} \times R_{12})} \\
R'_{12} &= \frac{-R_{12}}{(R_{11} \times R_{22}) - (R_{21} \times R_{12})} \\
R'_{21} &= \frac{-R_{21}}{(R_{11} \times R_{22}) - (R_{21} \times R_{12})} \\
R'_{22} &= \frac{-R_{11}}{(R_{11} \times R_{22}) - (R_{21} \times R_{12})} \\
R'_{31} &= \frac{-((R_{31} \times R_{22}) - (R_{21} \times R_{33}))}{(R_{11} \times R_{22}) - (R_{21} \times R_{12})} \\
R'_{32} &= \frac{(R_{31} \times R_{12}) - (R_{11} \times R_{33})}{(R_{11} \times R_{22}) - (R_{21} \times R_{12})}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

ภาพออร์โธรีเฟสเชิงเลขนั้น ได้ผ่านการลดรายละเอียดของภาพในขั้นตอนการเตรียมภาพก่อนการประมวลผล จึงต้องทำการคำนวณ เมทริกซ์  $R$  ของภาพออร์โธรีเฟสเชิงเลขใหม่ โดยทั่วไปสมาชิกของเมทริกซ์  $R$  จะประกอบด้วยค่าดังนี้

$$\begin{bmatrix} 0 & -S_y \\ S_x & 0 \\ T_x & T_y \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

โดยที่

$S_x$  คือ pixel scale ในแนวแกน  $x$

$S_y$  คือ pixel scale ในแนวแกน  $y$

$T_x = X_{TP} - (x_{TP} \times S_x)$

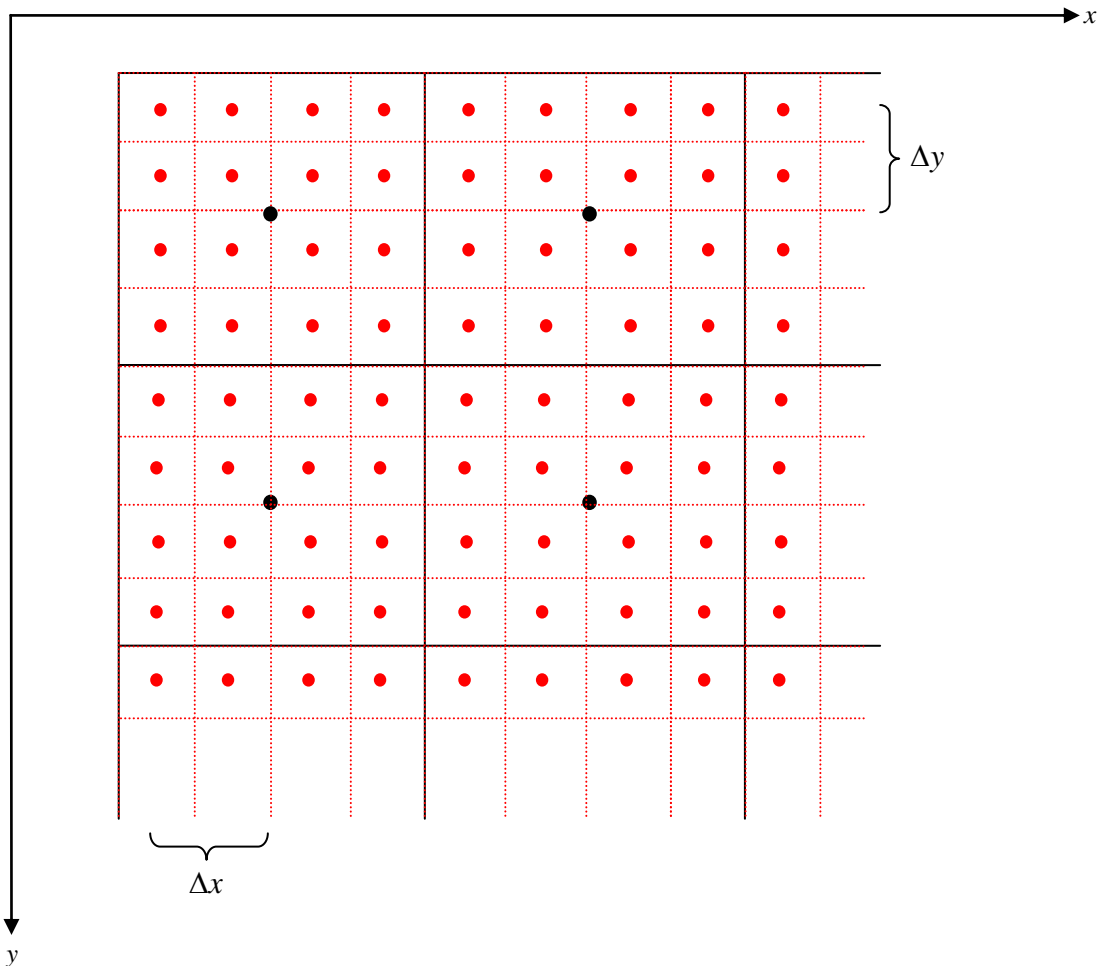
$T_y = Y_{TP} + (y_{TP} \times S_y)$

$(X_{TP}, Y_{TP})$  คือ ค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดโยงยึด (tie point,  $TP$ )

$(x_{TP}, y_{TP})$  คือ ค่าพิกัดภาพของ  $TP$

ค่า  $S_x$  และ  $S_y$  คืออัตราส่วนระหว่าง ระยะบนพื้นดินตามแนวแกน / จำนวนจุดภาพตามแนวแกน ซึ่งมีค่าเท่ากับ GSD คือ  $S_x$  และ  $S_y$  มีค่าเท่ากับ 2 เมตร

สำหรับ  $TP$  ในภาพออร์โธสรีเชิงเลขที่ผ่านขั้นตอนเตรียมภาพก่อนการประมวลผลนั้น สามารถกำหนดได้จากจุดภาพที่ตำแหน่งบนซ้ายของภาพ โดยเปรียบเทียบกับ ภาพออร์โธสรีเชิงเลขตั้งต้นดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบตำแหน่งของจุดภาพในภาพออร์โธสรีเชิงเลขก่อนและหลังการลดรายละเอียดของภาพ

จากภาพที่ 4.5 เส้นทึบและจุดสีดำแสดงถึงขอบเขตและตำแหน่งของจุดภาพใน ภาพออร์โธสรีเชิงเลขหลังลดรายละเอียดของภาพและให้ค่าพิกัดภาพบริเวณมุมบนซ้ายเท่ากับ  $P(1, 1)$  และกำหนดให้เป็น  $TP$  เส้นประและจุดสีแดงแสดงถึงขอบเขตและตำแหน่งของจุดภาพในภาพออร์โธสรีเชิงเลขก่อนลดรายละเอียดของภาพและให้ค่าพิกัดภาพบริเวณมุมบนซ้ายเท่ากับ  $Q(1, 1)$  จะเห็นได้ว่า จุดภาพในภาพออร์โธสรีเชิงเลขหลังลดรายละเอียดของภาพจะประกอบด้วยจุดภาพของภาพ

ตั้งต้นจำนวน 16 จุดภาพ และที่ตำแหน่ง  $P(1, 1)$  เมื่อเปรียบเทียบกับภาพออร์โธสีเชิงเลขก่อนลดรายละเอียดของภาพจะอยู่ที่ตำแหน่ง  $Q(1 + \Delta x, 1 + \Delta y)$   $\Delta x$  และ  $\Delta y$  มีค่าเท่ากับ 1.5 จุดภาพ หรือมีระยะทางจริง 0.75 เมตร อีกทั้งค่าพิกัดบนพื้นดินของ  $Q(1, 1)$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1) ดังนั้นค่าพิกัดบนพื้นดินของ  $P(1, 1)$  จึงมีค่าเท่ากับ  $(X_{Q(1,1)} + 0.75, Y_{Q(1,1)} - 0.75)$  และมีค่าเท่ากับ  $(X_{TP}, Y_{TP})$

ทำการแทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ (4.4) เมทริกซ์  $R$  ของภาพออร์โธสีเชิงเลขหลังลดรายละเอียดของภาพ ( $R_{\text{downsampling}}$ ) จะมีค่าดังสมการที่ (4.5)

$$R_{\text{downsampling}} = \begin{bmatrix} 0 & -2 \\ 2 & 0 \\ X_{TP} - 2 & Y_{TP} + 2 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

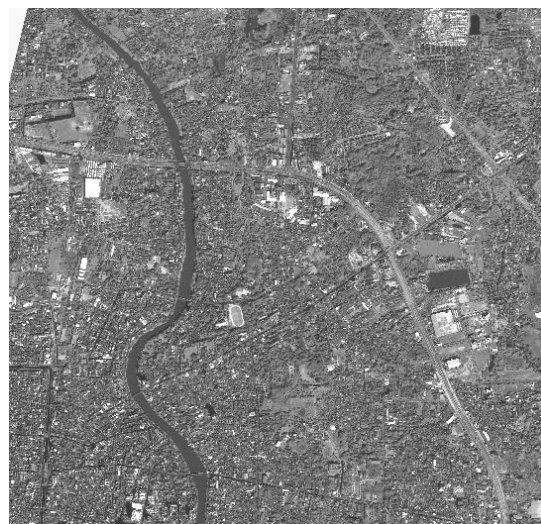
การกำหนดพื้นที่ซ้อนทับระหว่าง ภาพออร์โธสีเชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมธีออส จึงมีขั้นตอนดังนี้

1) ทำการคำนวณค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดภาพตำแหน่งมุมบนซ้ายและล่างขวาของภาพออร์โธสีเชิงเลข โดยใช้สมการที่ (4.5) และทำการหาค่าพิกัดภาพของภาพถ่ายดาวเทียมธีออสที่มีค่าพิกัดบนพื้นดินเดียวกันกับจุดภาพตำแหน่งมุมบนซ้ายและล่างขวาของ ภาพออร์โธสีเชิงเลขโดยใช้สมการที่ (4.2)

2) จากค่าพิกัดภาพที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 1) ทำการขยายขอบเขตภาพออกด้านละ 200 จุดภาพและกำหนดให้เป็นพื้นที่ซ้อนทับระหว่าง ภาพออร์โธสีเชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมธีออส ดังตัวอย่างแสดงในภาพที่ 4.6



ก. ภาพออร์โธรีโสีเชิงเลข



ข. ภาพถ่ายดาวเทียมรีออส

ภาพที่ 4.6 ผลการกำหนดพื้นที่ซ้อนทับระหว่างภาพออร์โธรีโสีเชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมรีออส

เมื่อทำการกำหนดพื้นที่ซ้อนทับ ระหว่างภาพออร์โธรีโสีเชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมรีออส เรียบร้อยแล้ว นำ ภาพออร์โธรีโสีเชิงเลขและพื้นที่ซ้อนทับที่กำหนด มาทำการประมวลผลหาจุดเด่น ซัดบนภาพด้วย Förstner operator และนำจุดเด่นซัดที่ได้ไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

### 4.3 การจับคู่ภาพ

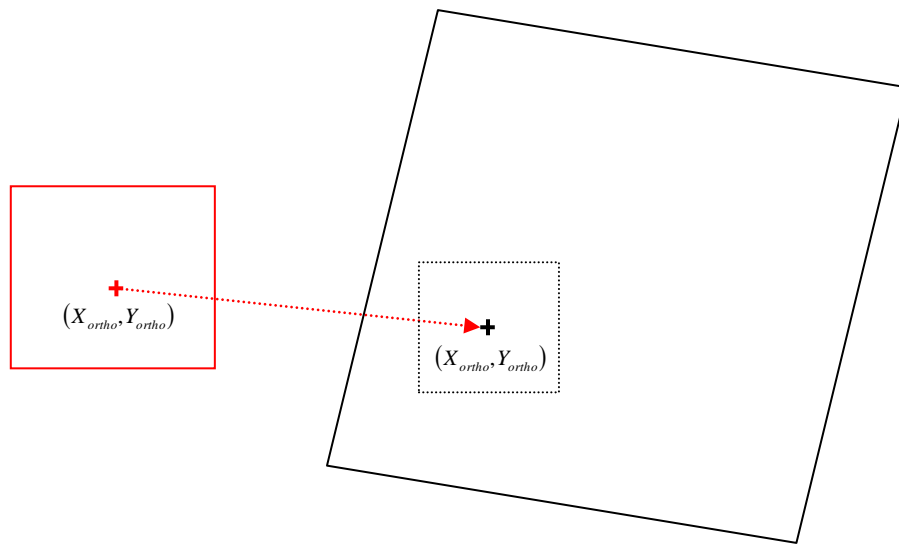
การจับคู่ภาพในวิธีรังวัด GCPs อัตราชนิดที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้แบ่งได้เป็น 2 แบบ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการจับคู่ภาพแบบ FBM การคัดเลือกคู่จุดเพื่อใช้เป็น GCPs และการจับคู่ภาพแบบ ABM แต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.3.1 การจับคู่ภาพถ่ายด้วยวิธีการ FBM

ในการจับคู่ภาพแบบ FBM เป็นการทดสอบจุดภาพที่ตรวจหาได้ในทั้ง 2 ภาพเพื่อตรวจหาจุดที่คาดว่าจะเป็จุดที่เหมือนกันขึ้นต้นโดยใช้เทคนิค invariant descriptor และวัดความเหมือนของจุดภาพด้วยค่า CC โดยทำการทดสอบจุดเด่นซัดใน ภาพออร์โธรีโสีเชิงเลขกับทุกจุดเด่นซัดในภาพถ่ายดาวเทียมรีออสซึ่งอาจทำให้เกิดการจับคู่ผิดได้ เนื่องจากภาพถ่ายดาวเทียมรีออสครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง จากการที่ภาพออร์โธรีโสีเชิงเลขตั้งต้นและภาพถ่ายดาวเทียมรีออสที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมภาพก่อนการประมวลผลมีการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบ geotiff จึงสามารถคำนวณค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดภาพใดๆ ในภาพได้ จึงสามารถระบุพิกัดบนพื้นดินของ ภาพออร์



โธสีเชิงเลขและจุดภาพในภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสที่มีค่าพิกัดบนพื้นดินเดียวกันได้และสามารถกำหนดพื้นที่ค้นหาบนภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสให้มีขนาดเล็กกลงได้อีกด้วย



ภาพที่ 4.7 แนวคิดการสร้างพื้นที่ค้นหาบนภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส

จากภาพที่ 4.7 เส้นกรอบสีแดงแสดงถึงขอบเขตของ ภาพออร์โธ สีเชิงเลข เส้น กรอบสีดำ แสดงถึงขอบเขตของภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส ในการกำหนดพื้นที่ค้นหาบนภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส จำเป็นต้องทราบค่าพิกัดบนพื้นดิน  $(X_{ortho}, Y_{ortho})$  ของจุดเด่นชัดบน ภาพออร์โธ สีเชิงเลข (แสดงผลด้วยกากบาทสีแดง) และค่าพิกัดภาพของ ภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส ที่มีค่าพิกัดบนพื้นดินเดียวกับจุดเด่นชัดบนภาพออร์โธสีเชิงเลข เมื่อทราบค่าพิกัดภาพดังกล่าว (แสดงผลด้วยกากบาทสีดำ) ให้ทำการกำหนดพื้นที่ค้นหาโดยใช้จุดภาพดังกล่าวเป็นจุดศูนย์กลางของพื้นที่ค้นหา (แสดงด้วยเส้นประสีดำ)

ดังนั้นในการจับคู่ภาพถ่ายด้วยวิธีการ FBM โดยใช้เทคนิค invariant descriptor และวัดความเหมือนของจุดภาพด้วยค่า CC มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1) เลือกจุดเด่นชัดบนภาพออร์โธสีเชิงเลขมา 1 จุด ทำการคำนวณค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดภาพดังกล่าวโดยใช้ สมการที่ (4.5) และทำการหาค่าพิกัดภาพของภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสที่มีค่าพิกัดบนพื้นดินเดียวกันกับจุดเด่นชัดบนภาพออร์โธสีเชิงเลขโดยใช้สมการที่ (4.2)

2) กำหนดพื้นที่ค้นหาขนาด  $401 \times 401$  จุดภาพ โดยให้จุดภาพที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 1) บนภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส เป็นจุดศูนย์กลางของพื้นที่ค้นหา

3) สร้าง template ขนาด  $m_{FBM} \times m_{FBM}$  จุดภาพ ( $m_{FBM} = 3, 5, 7, \dots$ ) โดยให้จุดเด่นชัดในขั้นตอนที่ 1) และจุดเด่นชัดในพื้นที่ค้นหาบนภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส เป็นจุดศูนย์กลาง ของ template กำหนดให้ template ที่ได้จากภาพออร์โธรีซิเชิงเลขเป็น template อ้างอิงและ template ที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสเป็น template เป้าหมาย

4) ทำการคำนวณค่า CC ระหว่าง template อ้างอิงและ template เป้าหมาย template คู่ใดมีค่า CC สูงสุดจะถือว่าจุดศูนย์กลางของ template คู่ นั้นเป็นจุดที่คาดว่าเป็นจุดที่เหมือนกันในทั้ง 2 ภาพ

5) ทำซ้ำขั้นตอนแรกจนกระทั่งครบทุกจุดเด่นชัดบนภาพออร์โธรีซิเชิงเลข

ขนาดของ template ที่ใช้ในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่ายแบบ FBM ( $m_{FBM}$ ) นั้น จำเป็นต้องกำหนดขนาดให้เหมาะสมกับการใช้งาน เนื่องจากการวัดความเหมือนของจุดเด่นชัดกระทำโดยอาศัยจุดภาพโดยรอบ หากกำหนดขนาด template ที่ไม่เหมาะสมจะนำไปสู่ผลการจับคู่ที่ผิดพลาดได้ การวิเคราะห์หาขนาดของ template ที่เหมาะสมจะอธิบายในหัวข้อ 4.3.2 ต่อไป

#### 4.3.2 การคัดเลือกคู่จุดเพื่อนำมาใช้เป็น GCPs

คู่จุดที่ได้จากการจับคู่ภาพถ่ายด้วยวิธีการ FBM นั้นมีจำนวนมากเกินความจำเป็น อีกทั้งยังประกอบด้วยคู่จุดที่จับคู่ ผิดอีกจำนวนหนึ่งด้วย ดังนั้นจึงต้องกำจัดจุดที่จับคู่ผิดเบื้องต้นและทำการคัดเลือกคู่จุดเพื่อนำมาใช้เป็น GCPs โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1) ทำการกำจัดคู่จุดที่จับคู่ผิดเบื้องต้นในกรณีที่จุดในภาพออร์โธรีซิเชิงเลขมากกว่า 1 จุด จับคู่กับจุดในภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส 1 จุด (many to one) ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในความเป็นจริง ผลการจับคู่ลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากภาพทั้งสองบันทึกข้อมูลในช่วงเวลาที่ต่างกัน จุดเด่นชัดในภาพออร์โธรีซิเชิงเลขบางจุดจึงไม่ปรากฏในภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส ดังนั้นในกรณีนี้จึงทำการเลือกคู่จุดที่มีค่า CC สูงสุดเพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป

2) เมื่อได้คู่จุดที่คาดว่าจะจะเป็นจุดที่เหมือนกันในทั้งสองภาพ นำคู่จุดดังกล่าวมาทำการคัดเลือกเพื่อนำมาใช้เป็น GCPs ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการจับคู่ภาพถ่ายแบบ stratified โดยประมาณความสัมพันธ์ของทั้งสองภาพเป็นแบบ affine โดยมีขั้นตอนดังนี้

- คัดเลือกคู่จุดมาจำนวนหนึ่งเพื่อใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นของเทคนิคการจับคู่ภาพถ่ายแบบ stratified เพื่อให้ได้คู่จุดที่ได้มีการกระจายตัวรอบภาพ จึงทำการแบ่งภาพออร์โธรีซิเชิงเลขเป็น 9 ส่วน ในแต่ละส่วนเลือกคู่จุดที่มีค่า CC สูงสุดมา 8 คู่จุด รวมทั้งสิ้น 72 คู่จุด

- ทำการคัดกรองคู่จุดทั้ง 72 คู่จุด ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการจับคู่ภาพถ่ายแบบ stratified โดยแบ่งความสัมพันธ์ของภาพถ่ายเป็นความสัมพันธ์ย่อยคือ translation (สมการ

ที่ (2.28)) similarity (สมการที่ (2.29)) และ affine (สมการที่ (2.30)) ตามลำดับ โดยแต่ละขั้นตอนทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงระบบพิกัดภาพถ่ายด้วยวิธี least median of squares สำหรับการตรวจหาจุดที่จับคู่ผิดนั้นโดยทั่วไปจะคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.22) แต่ในกรณีคู่จุดที่ได้จากภาพออร์โธ สี่เชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมหรืออื่นนั้น ประกอบด้วยคู่จุดที่จับคู่ผิดจำนวนมาก อีกทั้งคู่จุดที่ได้จากขั้นตอนนี้ จะถูกตรวจสอบความถูกต้องอีกครั้งในขั้นตอนการตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิด (อธิบายในหัวข้อ 3.5) ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงเลือกใช้ประสิทธิภาพสูงสุดของวิธี least median of squares คือ คัดเลือกข้อมูลที่มีค่า  $v_i^2 \geq \text{med}(v^2)$  ออก เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนดังกล่าว ในภาพออร์โธสี่เชิงเลข 1 ภาพ จะได้คู่จุดจำนวน 9 คู่จุด โดยประมาณเพื่อนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป

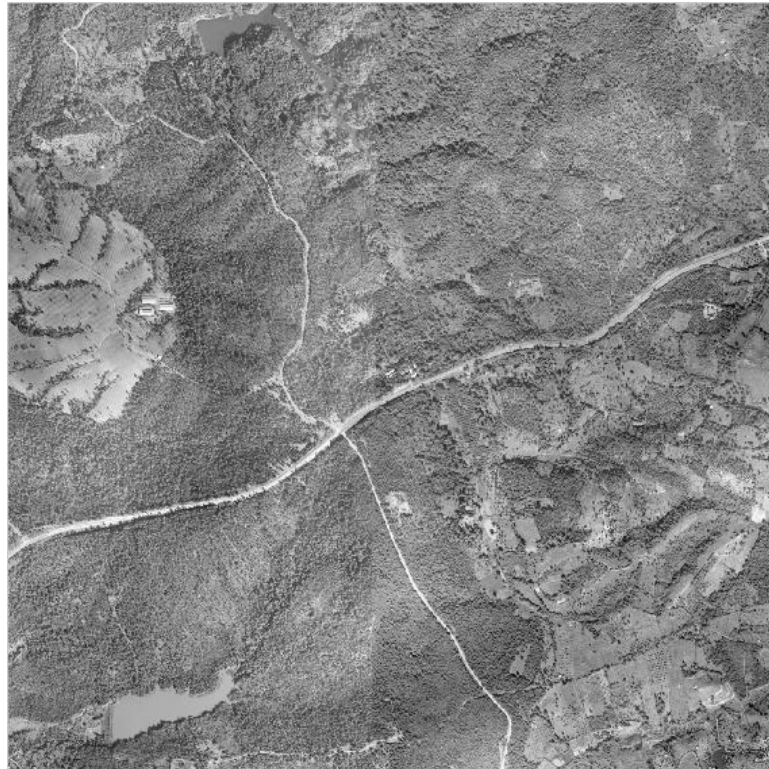
การวิเคราะห์หาขนาด template ( $m_{\text{FBM}}$ ) ในขั้นตอนการจับคู่ภาพแบบ FBM ที่เหมาะสมนั้น สามารถทำได้โดยนำค่าพิกัดภาพของคู่จุดที่ได้ในขั้นตอน 3.4.2 มาคำนวณปรับแก้ด้วยวิธี least square โดยใช้ความสัมพันธ์ของทั้งสองภาพแบบ affine และทำซ้ำขั้นตอน 3.4.1 และ 3.4.2 โดยใช้ค่า  $m_{\text{FBM}}$  ตั้งแต่ 7 ถึง 41 จุดภาพ ทำการเปรียบเทียบค่า RMSE ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้ในแต่ละค่า  $m_{\text{FBM}}$  และเลือกใช้ค่า  $m_{\text{FBM}}$  ที่ให้ค่า RMSE เริ่มคงที่ การทดสอบนี้ใช้ ภาพออร์โธ สี่เชิงเลขจำนวน 3 ภาพ โดยที่ภาพทดสอบที่ 1 พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นพื้นที่เกษตรกรรม ดังแสดงในภาพที่ 4.8 ภาพทดสอบที่ 2 พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นพื้นที่ชุมชนดังแสดงในภาพที่ 4.9 และภาพทดสอบที่ 3 พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นพื้นที่ภูเขาและป่าไม้ ดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.8 ภาพทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์หาขนาด template ที่เหมาะสมภาพที่ 1



ภาพที่ 4.9 ภาพทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์หาขนาด template ที่เหมาะสมภาพที่ 2



ภาพที่ 4.10 ภาพทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์หาขนาด template ที่เหมาะสมภาพที่ 3

#### 4.3.3 การจับคู่ภาพถ่ายโดยวิธีการ ABM

การจับคู่ภาพถ่ายโดยวิธีการ ABM นั้นจะใช้คู่จุดที่ได้จากขั้นตอน 4.3.2 มาเป็นข้อมูลตั้งต้นในการจับคู่ภาพถ่ายด้วยวิธีการ ABM โดยมีขั้นตอนการทำงานคือ

- 1) เลือกคู่จุดที่ได้จากขั้นตอน 4.3.2 มา 1 คู่จุด
- 2) สร้าง template ขนาด  $m_{ABM} \times m_{ABM}$  จุดภาพ ( $m_{ABM} = 3, 5, 7, \dots$ ) จากจุดเด่นชัดบนภาพออร์โธรีเชิงเลข โดยให้จุดเด่นชัดบนภาพออร์โธรีเชิงเลขเป็นจุดศูนย์กลาง
- 3) กำหนดเป็นพื้นค้นหาบนภาพถ่ายดาวเทียมรีออสขนาด  $11 \times 11$  จุดภาพ โดยให้จุดเด่นชัดบนภาพถ่ายดาวเทียมรีออสเป็นจุดศูนย์กลาง
- 4) ทำการหาจุดภาพที่เหมือนกันในพื้นที่ค้นหาที่กำหนดบนภาพถ่ายดาวเทียมรีออสด้วยวิธีการ ABM โดยวัดความเหมือนของจุดด้วยค่า CC จุดภาพใดในพื้นที่ค้นหามีค่า CC สูงสุดจะถือว่าเป็นจุดที่เหมือนกัน
- 5) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1) จนครบทุกคู่จุด

การวิเคราะห์หาค่า  $m_{ABM}$  ที่เหมาะสมในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่ายโดยวิธีการ ABM นั้นสามารถทำได้โดยนำคู่จุดที่ได้ในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่ายแบบ ABM มาใช้เป็น GCPs ในการ

คำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมธีออส โดยใช้ค่า  $m_{ABM}$  ตั้งแต่ 7 ถึง 41 จุดภาพเปรียบเทียบค่า RMSE ที่ได้ในจากการคำนวณปรับแก้ในแต่ละค่า  $m_{ABM}$  และเลือกใช้ค่า  $m_{ABM}$  ที่ให้ค่า RMSE เริ่มคงที่โดยในการทดสอบนี้ใช้ภาพทดสอบเดียวกับหัวข้อ 4.3.2

#### 4.4 การตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิด

เมื่อทำการประมวลผลเพื่อหาจุดที่เหมือนกันใน ภาพออร์โธ รีเฟอเรนซ์ และ ภาพถ่ายดาวเทียมธีออสตามขั้นตอนการรังวัด GCPs อัตโนมัตินี้ทั้ง 2 แบบ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าพิกัดภาพของภาพออร์โธ รีเฟอเรนซ์และภาพถ่ายดาวเทียมธีออสที่ผ่านการเตรียมภาพก่อนการประมวลผล การนำผลลัพธ์ดังกล่าวไปใช้เป็น GCPs ในการประมวลผลปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมธีออส จึงต้องทำการคำนวณค่าพิกัดบนพื้นดินจากค่าพิกัดภาพของภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์และทำการแปลงค่าพิกัดภาพของภาพถ่ายดาวเทียมธีออสที่ผ่านการเตรียมภาพก่อนการประมวลผล เป็นค่าพิกัดภาพของภาพถ่ายดาวเทียมธีออสตั้งต้น อีกทั้งผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการรังวัด GCPs อาจประกอบด้วยคู่จุดที่จับคู่ผิดจำนวนหนึ่ง ซึ่งหากนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการประมวลผลเพื่อ ปรับแก้เชิงเรขาคณิต ของภาพถ่ายดาวเทียมธีออส อาจทำให้ได้ผลไม่ดีเท่าที่ควร จึงต้องทำการตรวจสอบผล การจับคู่ ดังกล่าวเพื่อกำจัดจุดที่จับคู่ผิดออกก่อน จากขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.4.1 การหาค่าพิกัดบนพื้นดินจากจุดภาพบนภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์

ภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์มีการจัดเก็บในรูปแบบ geotiff การคำนวณค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดเด่นชัดในภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์ สามารถทำได้ โดยสมการที่ (4.5) เมื่อได้ค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดเด่นชัดในภาพจะทำการประมาณค่าความสูงระดับ โดยใช้แบบจำลองระดับสูงเชิงเลข SRTM และใช้ข้อมูลดังกล่าวเป็นค่าพิกัดบนพื้นดินของ GCPs ต่อไป

##### 4.4.2 การหาค่าพิกัดภาพบนภาพถ่ายดาวเทียมธีออส

ค่าพิกัดภาพบนภาพถ่ายดาวเทียมธีออสที่ได้จากการ รังวัด GCPs อัตโนมัตินั้นเป็นค่าพิกัดของภาพที่ ที่ผ่านการเตรียมภาพก่อนการประมวลผล จึงมีความคลาดเคลื่อนจาก ภาพถ่ายดาวเทียมธีออส ตั้งต้น จึงต้องทำการ แปลงค่าพิกัดภาพ ดังกล่าวให้เป็น ค่าพิกัดภาพ ของภาพถ่ายดาวเทียมธีออสตั้งต้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) นำค่าพิกัดบนพื้นดินทั้ง 4 มุม ของภาพถ่ายดาวเทียมธีออสมาทำการคำนวณหาค่าพิกัดภาพ ในภาพถ่ายดาวเทียมธีออสที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมภาพก่อนการประมวลผลโดยใช้สมการที่ (4.2)

2) ใช้ค่าพิกัดภาพที่ได้จากขั้นตอนที่ 1) และค่าพิกัดภาพทั้ง 4 มุม ของภาพถ่ายดาวเทียมธีออส เป็น จุดควบคุม ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในการแปลงระบบภาพถ่ายแบบ affine (สมการที่ (2.30)) ด้วยวิธี least square

3) แทนค่าสัมประสิทธิ์ในการแปลงระบบภาพถ่ายแบบ affine ลงในสมการที่ (2.30) และทำการคำนวณค่า พิกัดภาพ ในภาพถ่ายดาวเทียมธีออส และใช้ค่าพิกัดภาพดังกล่าวเป็นค่า พิกัดภาพของ GCPs ต่อไป

#### 4.4.3 การตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิด

เมื่อได้ค่าพิกัดบนพื้นดิน บนภาพออร์โธ รีเฟอเรนซ์และค่าพิกัดภาพบนภาพถ่ายดาวเทียมธีออสของคู่จุดที่ได้จากการจับคู่ภาพและนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้เป็น GCPs ในการประมวลผลเพื่อปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่าย ดาวเทียมธีออส โดยใช้ซอฟต์แวร์ Leica Photogrammetry Suite 9.2 โดยในส่วนของแบบจำลองของตัวรับรู้ นั้น เลือกใช้แบบจำลอง THEOS-1 และใช้ค่าตัวแปรพื้นฐานของซอฟต์แวร์ ผลการคำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมธีออสนั้น จะได้ค่า residual ของแต่ละ GCP ซึ่งค่า residuals นี้สามารถนำมาใช้ใน ตรวจหาและกำจัดคู่จุดที่จับคู่ผิดด้วยวิธี standardized residuals (สมการที่ (2.22)) โดยกำหนดค่า  $t$  ในสมการที่ (2.23) เท่ากับ 2.5 GCPs ใดที่มีค่า standardized residuals มากกว่า 2.5 จะถือว่าเป็นจุดที่จับคู่ผิด

เมื่อสิ้นสุดการประมวลผลการรังวัด GCPs อัตโนมัตินี้ทั้ง 2 แบบ นำ GCPs ที่ได้ไปใช้ในการปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมธีออสและทำการเปรียบเทียบประสิทธิ ภาพของ วิธีรังวัดอัตโนมัติทั้ง 2 แบบ ต่อไป

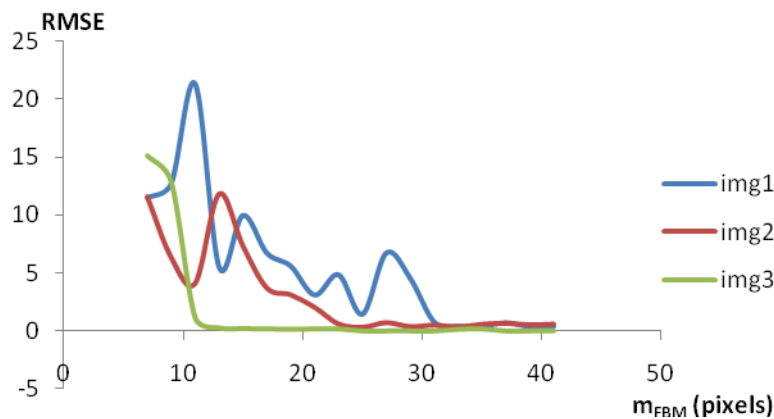
## บทที่ 5

### ผลการดำเนินงาน

การศึกษาเทคนิคการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติระหว่างภาพถ่ายดาวเทียมธีออสกับ ภาพออร์โธ จากภาพถ่ายทางอากาศเพื่อนำจุดที่ได้มาใช้เป็น GCP ในการประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียมธีออส ได้ผลการวิจัยดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 5.1 ผลการวิเคราะห์หาขนาดของ template ที่เหมาะสมในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่ายแบบ FBM

เมื่อทำทดสอบเพื่อหาขนาดของ template ที่เหมาะสมในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่ายแบบ FBM ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.2 นำค่า RMSE และ  $m_{FBM}$  มาวาดกราฟ ให้ผลดังแสดงในภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 ผลเปรียบเทียบค่า RMSE และค่า  $m_{FBM}$

จากผลการทดสอบ ภาพที่ 5.1 แสดงถึงแนวโน้มของค่า RMSE เมื่อเพิ่มขนาดของ template จะเห็นได้ว่าภาพทดสอบที่ 1 ค่า RMSE ที่ได้จากการปรับแก้ด้วยวิธี least square ดังแสดงด้วยเส้นสีน้ำเงิน เริ่มคงที่ที่ template ขนาด 33 x 33 จุดภาพ ภาพทดสอบที่ 2 ค่า RMSE ดังแสดงด้วยเส้นสีแดง เริ่มคงที่ที่ template ขนาด 25 x 25 จุดภาพ และภาพทดสอบที่ 3 ค่า RMSE ดังแสดงด้วยเส้นสีเขียวเริ่มคงที่ที่ template ขนาด 13 x 13 จุดภาพ

ภาพทดสอบที่ 1 ค่า RMSE เริ่มคงที่ที่ template ขนาด 33 x 33 จุดภาพ ซึ่งใหญ่กว่าขนาดของ template จากภาพทดสอบที่ 2 และ 3 เนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่ของภาพทดสอบที่ 1 เป็นพื้นที่เกษตรกรรม การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่จึงเกิดขึ้นค่อนข้างบ่อยและมีบริเวณกว้าง จึงส่งผล

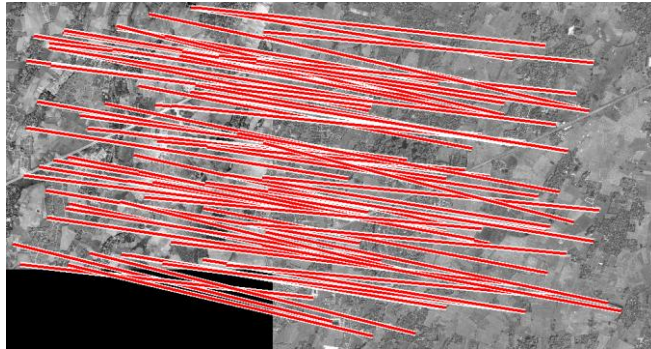


กระทบกับการวัดความเหมือนของจุดเด่นชัดในทั้งสองภาพถ่ายซึ่งอาศัยจุดภาพโดยรอบ ทำให้เมื่อมีการเพิ่มขนาดของ template ค่า RMSE จึงมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูง และมีแนวโน้มไม่แน่นอนจนกระทั่งค่า RMSE เริ่มคงที่ที่ template ขนาด  $33 \times 33$  จุดภาพ

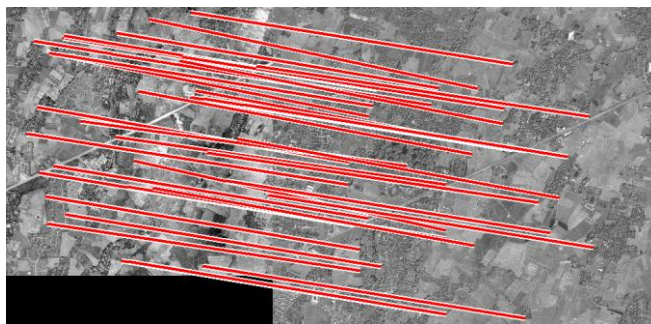
ภาพทดสอบที่ 2 พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นเขตชุมชน การเปลี่ยนแปลงในพื้นที่ดังกล่าวส่วนใหญ่จะเกิดจากการขยายชุมชนเช่น การก่อสร้างอาคารใหม่หรือการตัดถนนเพิ่ม เป็นต้น สิ่งก่อสร้างที่ปรากฏในภาพถ่ายออร์โธรีซิเิงเลขส่วนใหญ่จะปรากฏในภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสด้วยเช่นกัน จึงส่งผลให้เมื่อเพิ่มขนาดของ template ค่า RMSE จึงมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยและมีแนวโน้มลดลงจนเริ่มคงที่ที่ template ขนาด  $25 \times 25$  จุดภาพ

สำหรับภาพทดสอบที่ 3 พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นบริเวณภูเขาและป่าไม้ การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ดังกล่าวเกิดขึ้นน้อยกว่าบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมและชุมชนจึงส่งผลให้ จึงส่งผลให้เมื่อเพิ่มขนาดของ template ค่า RMSE จึงลดลงอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่ที่ template ขนาด  $13 \times 13$  จุดภาพ

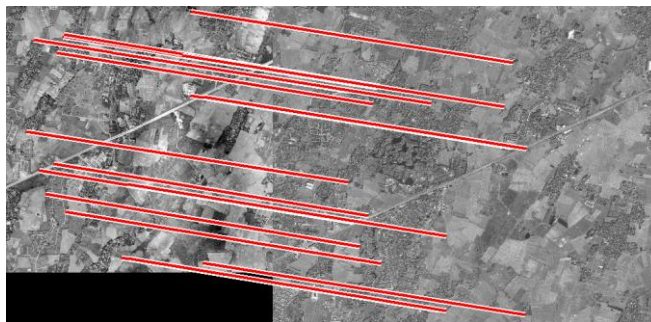
ภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส 1 ภาพ มีพื้นที่ครอบคลุมโดยประมาณ  $22 \times 22$  ตารางกิโลเมตร ซึ่งอาจครอบคลุมลักษณะพื้นที่หลายประเภทเช่น ชุมชน เกษตรกรรม ป่า ไม้หรือภูเขา เป็นต้น จากเหตุผลดังกล่าว ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ขนาดของ template,  $m_{ABM} = 33$  จุดภาพ ในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่ายแบบ FBM เมื่อใช้ค่าดังกล่าวในขั้นตอนการจับคู่ ภาพถ่ายแบบ FBM และการคัดเลือกจุดเพื่อนำมาใช้เป็น GCPs ให้ผลดังแสดงใน ภาพที่ 5.2 โดยที่ ภาพที่ 5.2 ก. คือจุดเริ่มต้นจำนวน 72 จุด ภาพที่ 5.2 ข. ถึงภาพที่ 5.2 ง. คือผลการคัดเลือกจุดโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการจับคู่ภาพถ่ายแบบ stratified และภาพที่ 5.3 แสดงตำแหน่งของจุดบนภาพออร์โธรีซิเิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส



ก. คู่จุดเริ่มต้นจำนวน 72 คู่จุด



ข. translation



ค. similarity



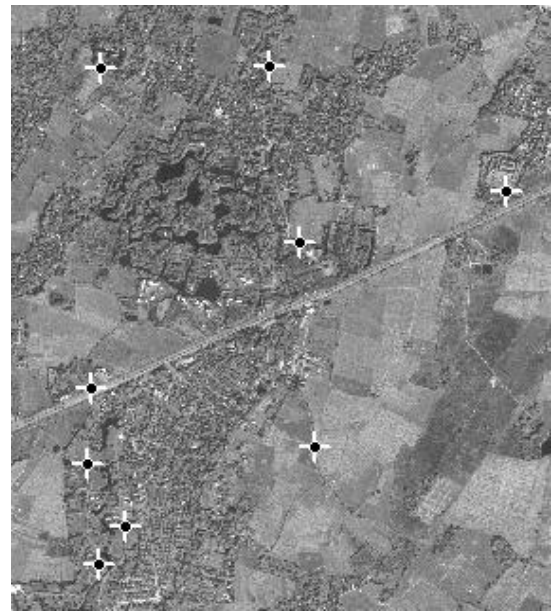
ง. affine

ภาพที่ 5.2 ผลการจับคู่ภาพถ่ายแบบ FBM และการคัดเลือกคู่จุดเพื่อนำมาใช้ เป็น GCPs โดยใช้  
ค่า  $m_{FBM} = 33$  จุดภาพ

ภาพที่ 5.2 แสดงถึงการลากเส้นเชื่อมระหว่างคู่จุดในขั้นตอนการคัดเลือกคู่จุดเพื่อนำมาใช้เป็น GCPs เส้นเชื่อมเหล่านี้สามารถใช้ประเมินความถูกต้องของคู่จุดเบื้องต้นได้โดยสังเกตได้จากแนวโน้มของการวางตัวของเส้นเชื่อม ดังกล่าว ภาพที่ 5.2 ก. ประกอบด้วยเส้นเชื่อม 72 เส้นซึ่งไม่ปรากฏแนวโน้มการวางตัวที่ชัดเจน ภาพที่ 5.2 ข. ถึง ง. เริ่มปรากฏแนวโน้มการวางตัวของเส้นเชื่อมที่ชัดเจนขึ้นตามลำดับ และเมื่อทำระบุดำแหน่งของคู่จุดลงในภาพออร์โธสีเชิงเลข (ภาพที่ 5.3 ก.) และภาพถ่ายดาวเทียมธีออส (ภาพที่ 5.3 ข.) จากการตรวจสอบเบื้องต้นพบว่าคู่จุดดังกล่าวมีแนวโน้มจะเป็นจุดที่เหมือนกันในทั้ง 2 ภาพ



ก. ภาพออร์โธสีเชิงเลข

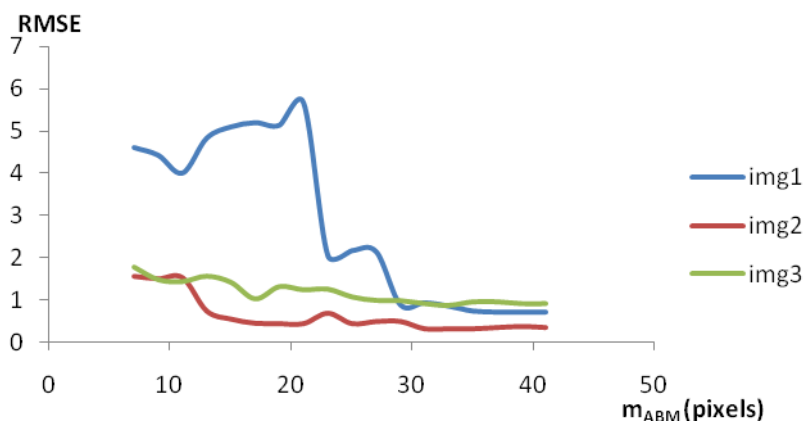


ข. ภาพถ่ายดาวเทียมธีออส

ภาพที่ 5.3 ตำแหน่งของคู่จุดบนภาพออร์โธสีเชิงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมธีออส

## 5.2 ผลการวิเคราะห์หาขนาดของ template ที่เหมาะสมในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่ายแบบ ABM

เมื่อทำการวิเคราะห์หาขนาดของ template ที่เหมาะสมในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่ายแบบ ABM ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.3 นำค่า RMSE และ  $m_{ABM}$  มาวาดกราฟให้ผลดังแสดงใน ภาพที่ 5.4



ภาพที่ 5.4 ผลเปรียบเทียบค่า RMSE และค่า  $m_{ABM}$

จากผลการทดสอบ ภาพที่ 5.4 แสดงถึงแนวโน้มของค่า RMSE เมื่อเพิ่มขนาดของ template จะเห็นได้ว่าภาพทดสอบที่ 1 ค่า RMSE ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมธีออส ดังแสดงด้วยเส้นสีน้ำเงิน เริ่มคงที่ที่ template ขนาด 37 x 37 จุดภาพ ภาพทดสอบที่ 2 ค่า RMSE ดังแสดงด้วยเส้นสีแดง เริ่มคงที่ที่ template ขนาด 31 x 31 จุดภาพ และภาพทดสอบที่ 3 ค่า RMSE ดังแสดงด้วยเส้น สีเขียว เริ่มคงที่ที่ template ขนาด 35 x 35 จุดภาพ

ภาพทดสอบที่ 1 ค่า RMSE เริ่มคงที่ที่ template ขนาด 37 x 37 จุดภาพ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าภาพทดสอบอื่นเนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่ของภาพทดสอบที่ 1 เป็นพื้นที่เกษตรกรรม การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่จึงเกิดขึ้นค่อนข้างบ่อยและมีบริเวณกว้าง จึงส่งผลกระทบต่อความเหมือนของจุดเด่นชัดในทั้งสองภาพถ่าย ซึ่งอาศัยจุดภาพโดยรอบและสอดคล้องกับผลการทดสอบเพื่อหาขนาดของ template ที่เหมาะสมในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่ายแบบ FBM

ภาพทดสอบที่ 2 ค่า RMSE เริ่มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง  $m_{ABM} = 13$  จุดภาพ และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจนเริ่มคงที่ที่  $m_{ABM} = 31$  จุดภาพ เนื่องจากภาพทดสอบที่ 2 ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นเขตชุมชน การเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่จะเกิดจากการขยายชุมชนดังที่กล่าวไว้ในผลการ

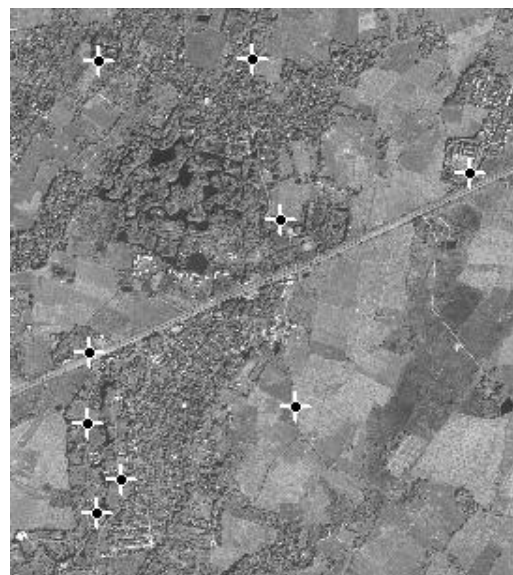
ทดสอบเพื่อหาขนาดของ template ที่เหมาะสมในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่ายแบบ FBM เมื่อทำการเพิ่มขนาดของ template ค่า RMSE จึงมีแนวโน้มลดลงและเริ่มคงที่

ภาพทดสอบที่ 3 ค่า RMSE มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยและมีแนวโน้มลดลงจนเริ่มคงที่ที่ template ขนาด 35 x 35 จุดภาพ เนื่องจากภาพทดสอบที่ 3 พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นบริเวณภูเขาและป่าไม้ จึงทำให้ลักษณะเด่นชัดที่ปรากฏในทั้งสองภาพมีรายละเอียดไม่ชัดเจนซึ่งแตกต่างกับภาพทดสอบที่ 1 และ 2 การเพิ่มขนาดของ template จึงส่งผลให้ค่า RMSE เปลี่ยนแปลงทีละน้อยจนคงที่

จากผลการทดสอบและแนวคิดในการเลือกใช้ขนาด template ที่เหมาะสมในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่ายแบบ ABM ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ขนาดของ template,  $m_{ABM} = 37$  จุดภาพ ในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่ายแบบ ABM เนื่องจากค่า RMSE ของภาพทดสอบทั้ง 3 ภาพเริ่มคงที่ เมื่อใช้ค่าดังกล่าวในขั้นตอนการจับคู่ภาพถ่ายแบบ ABM ให้ผลลัพธ์ดังแสดงในภาพที่ 5.5



ก. ภาพออร์โธรีโธสีเชิงเลข



ข. ภาพถ่ายดาวเทียมธีออส

ภาพที่ 5.5 ผลการจับคู่ภาพถ่ายแบบ ABM โดยใช้ค่า  $m_{FBM} = 31$  จุดภาพ

ภาพที่ 5.5 ก. แสดงถึงจุดเด่นชัดบน ภาพออร์โธรีโธสีเชิงเลข และภาพที่ 5.5 ข. แสดงถึงจุดเด่นชัดบนภาพถ่ายดาวเทียมธีออส จากการตรวจสอบเบื้องต้นพบว่าคู่จุดดังกล่าวมีแนวโน้มจะเป็นจุดที่เหมือนกันในทั้ง 2 ภาพ

### 5.3 ผลการทดสอบการรังวัด GCPs อัตโนมัติ

การทดสอบผลการรังวัด GCPs อัตโนมนั้นจะทำการเปรียบเทียบจากค่า RMSE ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมธีออส ระหว่างการใช้ GCPs ที่ได้จากวิธีรังวัดอัตโนมัติแบบที่ 1 แบบที่ 2 และ GCPs ที่ได้จากการระบุโดยผู้ปฏิบัติงาน การระบุ GCPs โดยผู้ปฏิบัติงานมีขั้นตอนการทำงานคือ เลือกรูปภาพออร์โธ สี่เชิงเลขที่มีพื้นที่ซ้อนทับกับภาพถ่ายดาวเทียมธีออส หากจุดที่เด่นชัดและเหมาะสมในการใช้เป็น GCPs ที่ปรากฏในทั้งสองภาพ กำหนดค่าพิกัดบนพื้นดินจาก ภาพออร์โธ สี่เชิงเลขเป็นค่าพิกัดบนพื้นดินของ GCPs และประมาณค่าความสูงโดยใช้แบบจำลองระดับสูงเชิงเลข SRTM

เมื่อทำการทดสอบ วิธีการรังวัด GCP อัตโนมนั้นทั้ง 2 แบบได้จุดที่เหมือนกันในทั้งสองภาพดังแสดงในผนวก ก . นำ GCP ที่ได้มาทำการคำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมธีออส ได้ผลการคำนวณปรับแก้และการตรวจหาจุดที่จับคูผิด ดังแสดงในผนวก ข. เมื่อเปรียบเทียบค่า RMSE ที่ได้ระหว่างวิธีการรังวัด GCP อัตโนมนั้นแบบที่ 1 แบบที่ 2 และการระบุ GCP โดยผู้ปฏิบัติงาน ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบ ค่า RMSE ที่ได้จากการปรับแก้โดยใช้ GCPs จากผู้ปฏิบัติงานและวิธีการรังวัดอัตโนมัติ

	จำนวนคู่จุด	outliers	จำนวน GCPs	RMSE (pixels)
automatic 1	92	7	85	1.6500
automatic 2	92	7	85	1.2798
manual	-	-	30	1.2605

จากตารางที่ 5.1 เมื่อเปรียบเทียบ ค่า RMSE ที่ได้ระหว่างการใช่วิธีรังวัด GCP อัตโนมนั้นแบบที่ 1 และ 2 พบว่าวิธีการรังวัด GCP อัตโนมนั้นแบบที่ 2 ให้ผลการคำนวณปรับแก้ที่ดีกว่าวิธีการรังวัด GCP อัตโนมนั้นแบบที่ 1 และเมื่อเปรียบเทียบค่า RMSE ที่ได้ระหว่างการใช่วิธีรังวัด GCP อัตโนมนั้นแบบที่ 2 และการระบุ GCPs โดยผู้ปฏิบัติงานพบว่าทั้ง 2 วิธีมีผลการคำนวณปรับแก้ใกล้เคียงกัน ในส่วนของคู่จุดที่จับคูผิดนั้นมีลักษณะ เช่น ต้นไม้ขนาดใหญ่ เงาของต้นไม้หรือพื้นที่ที่รกร้าง เป็นต้น ดังแสดงในผนวก ก. ซึ่งลักษณะดังกล่าวจุดภาพโดยรอบมีลักษณะเด่นชัดไม่เพียงพอหรือมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่บันทึกข้อมูลจึงทำให้ผลการจับคูภาพเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น

ในการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมที่ออกสนั้น จำเป็นต้องใช้จุดตรวจสอบ ซึ่งจุดตรวจสอบนี้มีคุณสมบัติ คือ เป็นจุดที่ทราบค่าพิกัดบนพื้นดินและสามารถระบุตำแหน่งของจุดดังกล่าวในภาพได้ การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการรวบรวมจุดตรวจสอบมาจำนวนหนึ่ง แต่เมื่อทำการระบุตำแหน่งของจุดตรวจสอบลงในภาพผลลัพธ์ พบว่าจุดตรวจสอบส่วนใหญ่ไม่สามารถระบุตำแหน่งในภาพผลลัพธ์ได้และจุดตรวจสอบที่สามารถระบุตำแหน่งในภาพได้มีการกระจายตัวไม่ดีพอ จากเหตุผลดังกล่าวในการศึกษาครั้งนี้ จึงไม่สามารถประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของภาพผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีรังวัด GCPs อัตโนมัติได้

## บทที่ 6

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาเทคนิคการจับคู่จุดภาพอัตโนมัติระหว่างภาพถ่ายดาวเทียมรี ออสกับภาพ ออร์โธจากภาพถ่ายทางอากาศ โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมรีออสเป็นภาพประมวลผลและใช้ ภาพ ออร์โธสีเชิงเลขเป็นภาพอ้างอิง เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้เป็น GCPs ในการผลิตภาพถ่ายดาวเทียม รีออสสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

##### 6.1.1 การหาจุดเด่นชัดบนภาพ

การหาจุดเด่นชัดบนภาพด้วย Harris operator และ Fröstner operator ซึ่งมีพื้นฐานจาก การวิเคราะห์ autocorrelation matrix นั้นมีคุณสมบัติต้านทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดีเนื่องจากการให้ค่าน้ำหนัก ( $G(\sigma_w)$ ) ในขั้นตอนการสร้าง autocorrelation matrix แต่เนื่องจาก Harris operator ได้พัฒนาสมการการหาจุดเด่นชัดและเส้นขอบเป็นสมการเดียว กันเพื่อความสะดวกในการใช้งาน คือ สมการค่าความเป็นมุม (สมการที่ (2.14)) เมื่อทำการประมวลผลกับภาพที่มี GSD = 2 เมตร ลักษณะภูมิประเทศที่ปรากฏบนภาพจึงไม่คมชัด จึงทำให้จุดเด่นชัดบางจุดมีตำแหน่งอยู่ ใกล้เคียงบริเวณเส้นขอบ ซึ่งจุดดังกล่าวไม่เหมาะสมในการใช้งานจับคู่ภาพ ในส่วนของ Fröstner operator นั้นมีการคำนวณขนาดของ error ellipse ซึ่งระบุตำแหน่งของจุดเด่นชัดและ ค่าความ กลม ซึ่งช่วยระบุตำแหน่งของเส้นขอบ จึงทำให้จุดเด่นชัดที่ ได้จาก Fröstner operator มีลักษณะ เหมาะสมในการใช้งานจับคู่ภาพ

SUSAN operator และ FAST-9 operator มีแนวคิดพื้นฐานโดยการทดสอบจุดภาพกับ จุดภาพโดยรอบจึงใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่า Harris operator และ Fröstner operator เนื่องจากมีขั้นตอนในการคำนวณน้อยกว่า แต่ เนื่องจากภาพที่ทำการประมวลผลมีลักษณะไม่ คมชัดโดยเฉพาะบริเวณเส้นขอบ จึงส่งผลให้จุดเด่นชัดบางจุดที่ได้จากวิธีทั้งสองมีตำแหน่งอยู่ ใน บริเวณเส้นขอบและบางจุดมีลักษณะที่ไม่เด่นชัด ซึ่งหากภาพที่ใช้ในการประมวลผลเป็นภาพถ่าย รายละเอียดสูงและมีความชัดเจน การใช้ SUSAN operator หรือ FAST-9 operator ในการหา จุดเด่นชัด น่าจะได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า Harris operator และ Fröstner operator



### 6.1.2 การจับคู่ภาพ

วิธีจับคู่ภาพแบบ ABM จะทำการทดสอบกับจุดภาพทุกจุดภาพในพื้นที่ค้นหา ซึ่งน่าจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการจับคู่ภาพแบบ FBM ซึ่งทำการทดสอบเฉพาะจุดภาพที่ตรวจหาได้ในทั้ง 2 ภาพ แต่เนื่องจากความแตกต่างในเรื่องตัวรับรู้ และช่วงเวลาในการบันทึกข้อมูล ที่แตกต่างกัน อีกทั้งการกำหนดพื้นที่ค้นหาที่มีขนาดใหญ่เกินไปจึงทำให้วิธีจับคู่ภาพแบบ ABM ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีเท่าที่ควร อีกปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อผลการจับคู่ภาพทั้ง 2 วิธี ที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้คือ การกำหนดขนาดของ template ที่ใช้ในขั้นตอนจับคู่ภาพ เนื่องจากการวัดความเหมือนของจุดเด่นชัดนั้นจำเป็นต้องอาศัยจุดภาพโดยรอบ การกำหนดขนาดของ template ที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ผลการจับคู่ผิดพลาดได้

### 6.1.3 การตรวจหาและกำจัดจุดที่จับคู่ผิด

วิธี standardized residuals นั้นจะทำการหาข้อมูลที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่า residuals ที่แตกต่างจากข้อมูลส่วนใหญ่ ซึ่งค่า residuals นี้เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีการปรับแก้แบบ least square ในกรณีที่ข้อมูลที่ใช้ในการปรับแก้ประกอบด้วยข้อมูลที่ผิด ซึ่งข้อมูลที่ผิดนั้นจะมีค่า residuals สูงและจะทำให้ผลการปรับแก้แบบ least square และค่า residuals ของข้อมูลที่ถูกต้องคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ส่งผลให้วิธี standardized residuals ให้ผลลัพธ์ได้ไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อลดปัญหาดังกล่าว จึงควรทำการคัดกรองข้อมูลที่ผิดออกด้วยวิธี least median of squares และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณปรับแก้ด้วยวิธี least square ต่อไป

### 6.1.4 การพัฒนาวิธีรังวัด GCPs อัตโนมติ

จากผลการดำเนินงาน การใช้เทคนิคการรังวัด GCPs อัตโนมติแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้เทคนิคการรังวัด GCPs อัตโนมติแบบที่ 1 เนื่องจากเทคนิคการรังวัด GCPs อัตโนมติแบบที่ 2 นั้น ได้ทำการเพิ่มขั้นตอนการจับคู่ภาพแบบ ABM ซึ่งทำการทดสอบความเหมือนของจุดภาพทุกจุดภาพในพื้นที่ค้นหา และเมื่อทำการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพระหว่าง เทคนิคการรังวัด GCPs อัตโนมติแบบที่ 2 และการระบุ GCPs โดยผู้ปฏิบัติงานพบว่าเทคนิคการรังวัด GCPs อัตโนมติแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการระบุ GCPs โดยผู้ปฏิบัติงาน โดยค่า RMSE ที่ได้จากการใช้เทคนิคการรังวัด GCPs อัตโนมติแบบที่ 2 มีค่ามากกว่าค่า RMSE ที่ได้จากการระบุ GCPs โดยผู้ปฏิบัติงานเล็กน้อยซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ค่า RMSE ที่เกิดขึ้นจากการใช้ GCPs ที่ได้จากการใช้เทคนิคการรังวัด GCPs อัตโนมตินั้นเป็นผลมาจากสาเหตุหลักคือช่วงเวลาในการ

บันทึกข้อมูลและการใช้ตัวรับรู้ที่แตกต่างกัน ทำให้ข้อมูลในบริเวณพื้นที่เดียวกันที่บันทึกได้ในทั้ง 2 ภาพ มีความแตกต่างกัน ทำให้วิธีการรังวัด GCPs อัตโนมัติเกิดความคลาดเคลื่อน อีกทั้งขั้นตอนการหาจุดเด่นชัดในภาพและการจับคู่ภาพที่ใช้ในเทคนิคการรังวัด GCPs อัตโนมัติเป็นการประมวลผลจากค่าความเข้มแสงของจุดภาพ ค่าพิกัดภาพของผลลัพธ์ที่ได้ จึงมีความละเอียดในระดับ 1 จุดภาพ ซึ่งแตกต่างจากการระบุ GCPs โดยผู้ปฏิบัติงานคือ ผู้ปฏิบัติงานสามารถระบุตำแหน่งของจุดเด่นชัดที่เหมือนกันบนภาพทั้งสองได้ในระดับความละเอียดที่ดีกว่า 1 จุดภาพ (sub-pixel) จากสาเหตุดังกล่าวจึงส่งผลให้ค่า RMSE ที่ได้จากการใช้เทคนิคการรังวัด GCPs อัตโนมัติมีค่ามากกว่าค่า RMSE ที่ได้จากการระบุ GCPs โดยผู้ปฏิบัติงานเช่นกัน

## 6.2 ปัญหาที่พบในการศึกษาและข้อเสนอแนะ

1) การลดรายละเอียดของ ภาพออร์โธรีเฟอริงเลขจาก GSD = 0.5 เมตร เป็น GSD = 2 เมตร เพื่อลดข้อจำกัดในขั้นตอนการจับคู่ภาพในด้านอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงมาตราส่วนนั้น ทำให้ค่าพิกัดบนพื้นดินของ GCPs ที่ได้จากการรังวัด GCPs อัตโนมัติมีความถูกต้องทางตำแหน่งลดลง ในส่วนของภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสได้มีการ ปรับแก้การวางตัวของภาพเพื่อ ลดข้อจำกัดในขั้นตอนการจับคู่ภาพ จึงทำให้พิกัดภาพของภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสที่ได้จากการรังวัด GCPs อัตโนมัติมีความคลาดเคลื่อนจากภาพตั้งต้น หากสามารถ พัฒนาเทคนิคการจุดเด่นชัดและ การจับคู่ภาพที่ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงมาตราส่วนและการ วางตัวของภาพ เพื่อใช้งานกับ ภาพออร์โธรีเฟอริงเลขและภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสได้ น่าจะทำให้การคำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสมีผลลัพธ์ที่ดีขึ้น

2) คู่จุดที่จับคู่นั้นส่วนใหญ่พื้นที่โดยรอบจุดดังกล่าวมีค่าความเข้มแสงของจุดภาพใกล้เคียงกันหรือไม่ปรากฏลักษณะเด่นชัดที่เพียงพอ จึงทำให้ผลการจับคู่เกิดความคลาดเคลื่อนมากจนถูกระบุเป็นจุดที่จับคูผิด หากพื้นที่ ส่วนใหญ่ในภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสเป็นบริเวณป่าไม้หรือภูเขา จะทำให้ผลการจับคู่ภาพถ่ายส่วนใหญ่เกิดความคลาดเคลื่อนมาก การตรวจหาและ กำหนดจุดที่จับคูผิดด้วยวิธี standardized residuals ซึ่งตรวจหาข้อมูลที่ผิดโดยการวิเคราะห์ค่า residuals ที่แตกต่างจากข้อมูลส่วนใหญ่ อาจให้ผลที่ไม่ดีเท่าที่ควรและส่งผลให้ค่า RMSE ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสมีค่าสูงอีกด้วย

ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นถือเป็นกรณีเฉพาะที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนจำเป็นต้อง ทำการศึกษาเพิ่มเติมแต่เนื่องจากข้อจำกัดในด้านข้อมูลและระยะเวลา ที่ใช้ในการทำวิจัยจึงทำให้ ไม่สามารถระบุข้อเสนอแนะสำหรับปัญหาดังกล่าวได้

3) ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการพัฒนา ฟังก์ชันที่ใช้ในการประมวลผล โดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB R2009b เว้นแต่ในบางขั้นตอนที่มี ฟังก์ชันสำเร็จรูปในการใช้งาน ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งฟังก์ชันที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมา มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีรึงวัดอัตโนมัติทั้ง 2 แบบ จึงยังไม่ได้คำนึงถึง ปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการประมวลผล และความสะดวกในการใช้งาน เช่น สามารถนำเข้าภาพถ่ายออร์โธสตีเชิงเลขได้ครั้งละ 1 ภาพ เป็นต้น ในการนำฟังก์ชันดังกล่าวไปใช้งานจริง จึงควรทำการปรับปรุงโดยคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานให้ดียิ่งขึ้น

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

พัฒนาที่ดิน, กรม. งานสำรวจรังวัดและผลิตแผนที่. สำนักพัฒนาเทคโนโลยีการสำรวจและทำแผนที่ กรมพัฒนาที่ดิน. [ออนไลน์]. 2547. แหล่งที่มา: [http://osm.idd.go.th/cds/ortho\\_photo.html](http://osm.idd.go.th/cds/ortho_photo.html) [2554, พ.ย. 26]

### ภาษาอังกฤษ

Burt, P. J. and Adelson, E. H. The Laplacian pyramid as a compact image code. IEEE Transactions on Communications, COM-31(4) 1983: 532–540.

Cyganek and Paul, J. An Introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms, 1 st ed. New York: John Wiley & Sons, 2009

Förstner, W. and Gulch, E. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features. Proceedings of ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, Switzerland. 437 1987: 281–305.

Förstner, W. A Framework for low level feature extraction. Computer vision - ECCV '94, J.O.Eklundh eds, LNCS 802, Springer, vol. II 1994: 383-394.

Gonzalez, R. and Woods, R. Digital image processing, 2nd ed. Prentice Hall, 2002.

Harris, C. and Stephens, M. A combined corner and edge detector. Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference, Manchester, UK. 302 1988: 147–151.

Jazayeri, I. and Fraser, C.S. Interest operators for feature-base matching in close-range photogrammetry. The Photogrammetric Record 25(129) March 2010: 24–41.

Kanazawa, Y. and Kanatani, K. Image mosaicing by stratified matching. Image and Vision Computing 22 2004: 93–103.

Pratt, W.K. Digital Image Processing. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2001

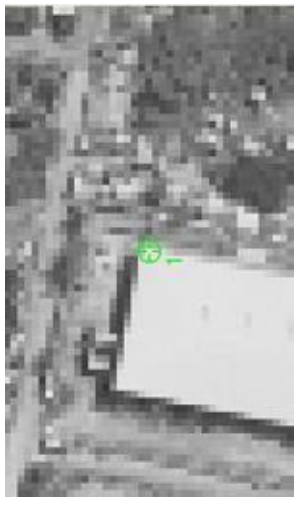
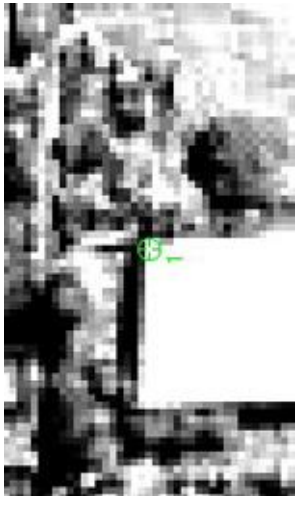
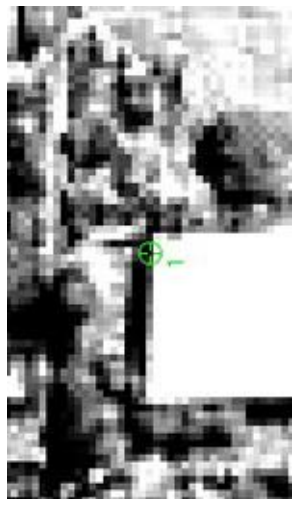
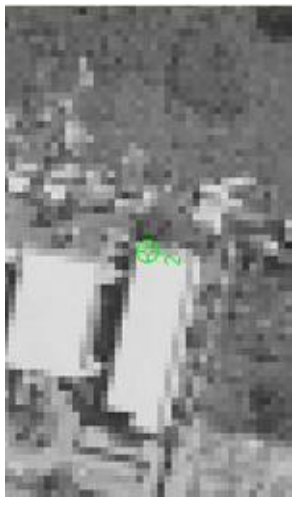
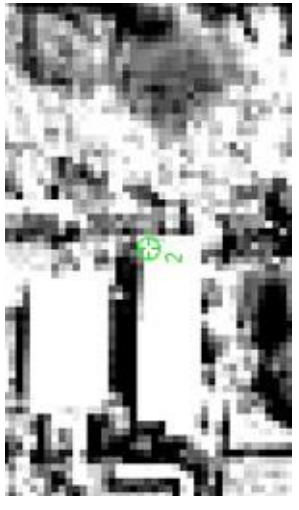
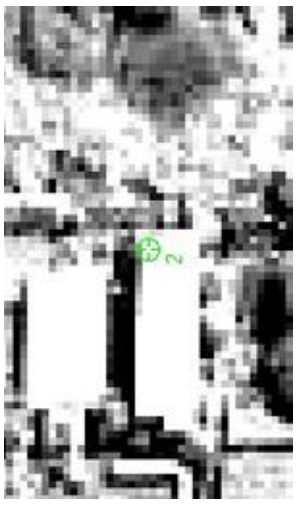
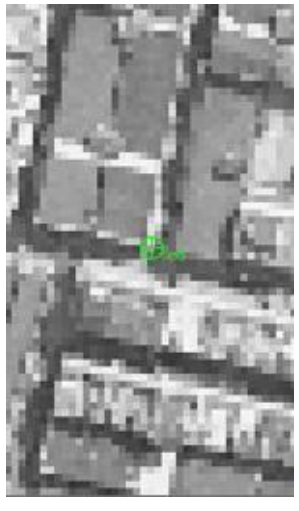
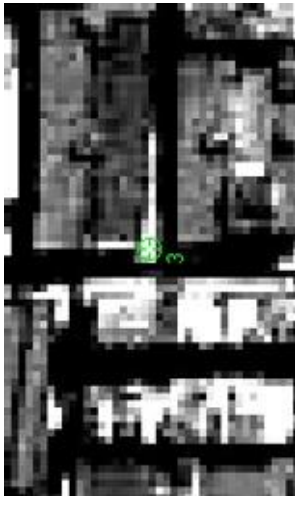
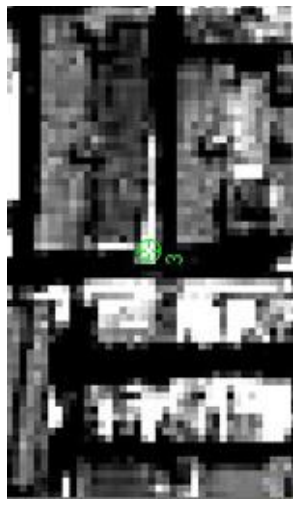
Rockett, P.I. Performance assessment of feature detection algorithms: a methodology and case study on corner detectors. IEEE Transactions on Image Processing, 12 (12) 2003: 1668 - 1676.

- Rodehorst, V. and Koschan, A. Comparison and evaluation of feature point detections. Proceedings of 5th Turkish–German Joint Geodetic Days (Eds. L. Gruendig & M.O. Altan). Technical University of Berlin, Germany 2006
- Rosseeuw, P.J. and Leroy, A.M. Robust regression and outlier detection. New York: John Wiley & Sons, 1987
- Rosten, E. and Drummond, T. Machine learning for high-speed corner detection. Proceedings of the European Conference on Computer Vision, Graz, Austria. 639 2006: 430–443.
- Smith, S. M. and Brady, J. M. SUSAN-a new approach to low level image processing. International Journal of Computer Vision, 23(1) 1997: 45–78.
- Schmid, C., Mohr, R. and Bauckhage, C. Evaluation of interest point detectors. International Journal of Computer Vision, 37(2) 2000: 151-172.
- Szeliski, R. Computer Vision Algorithms and Applications. Springer, 2010.
- Zitova, B. and Flusser, J. Image registration methods: a survey. Image and Vision Computing 21 2003: 977–1000.

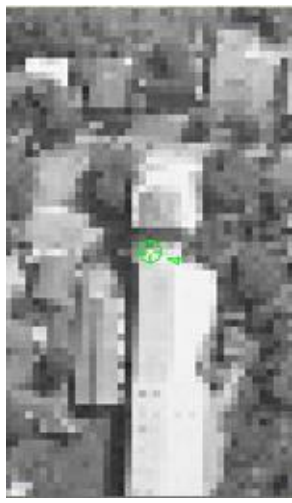
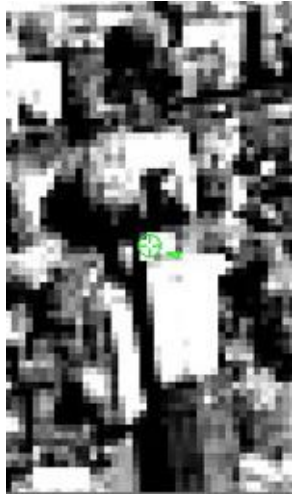

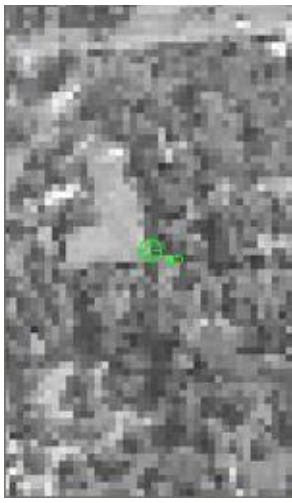
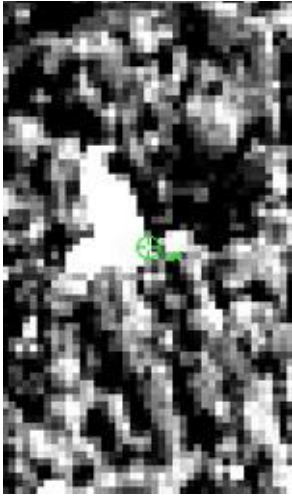
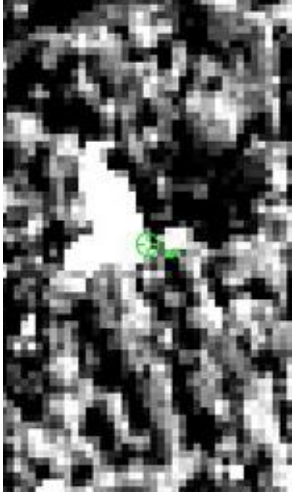
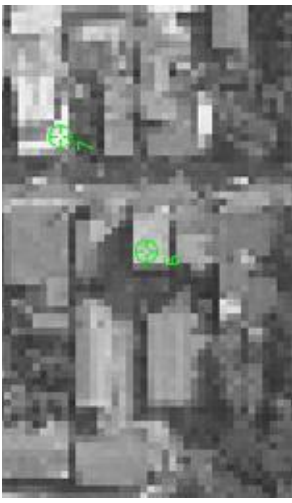
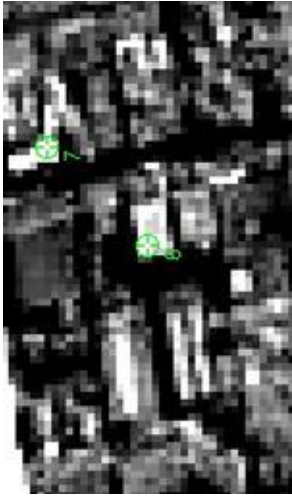
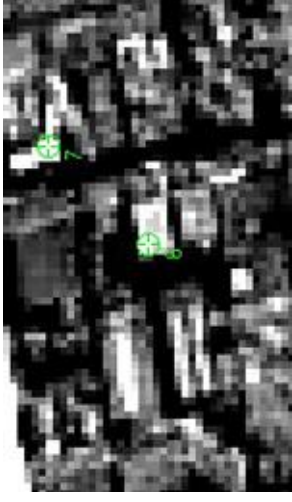
ภาคผนวก

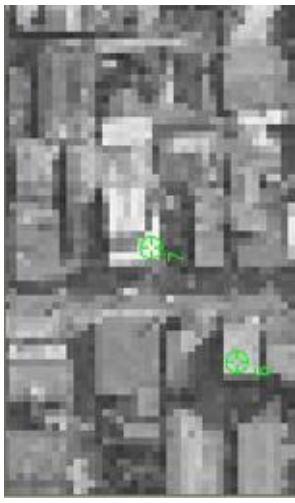
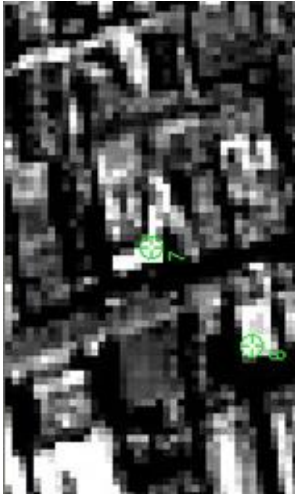
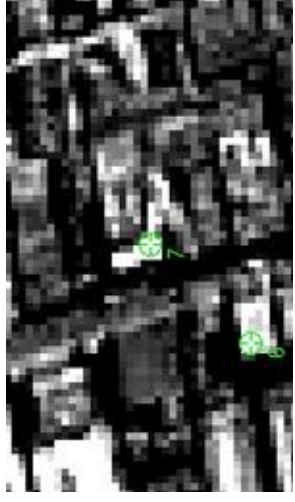
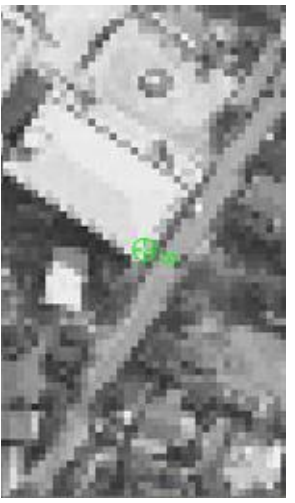
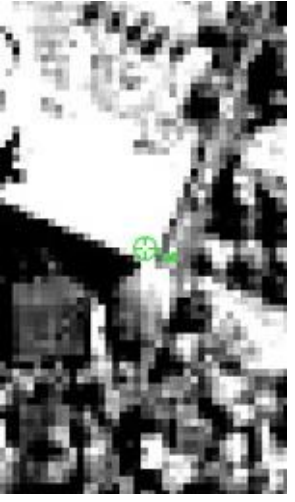

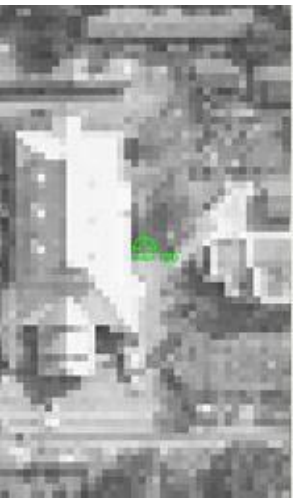
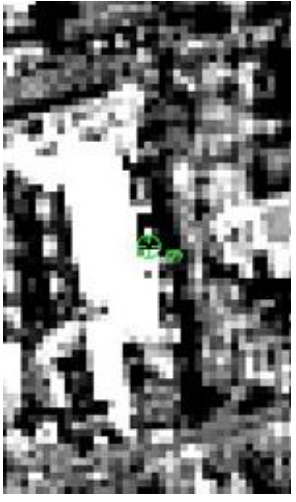
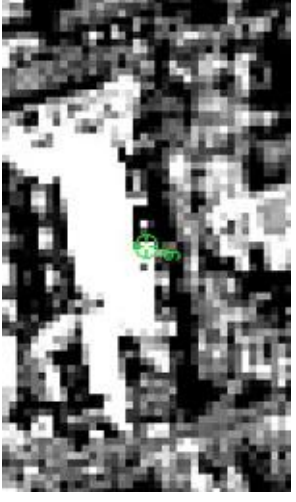
ภาคผนวก ก

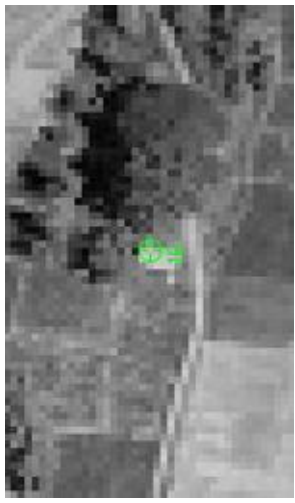
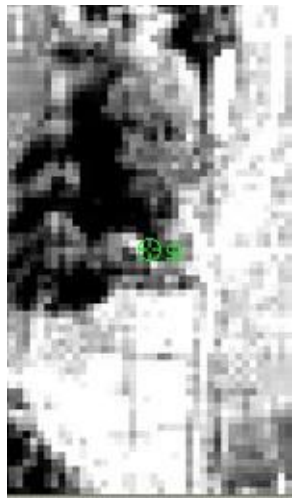
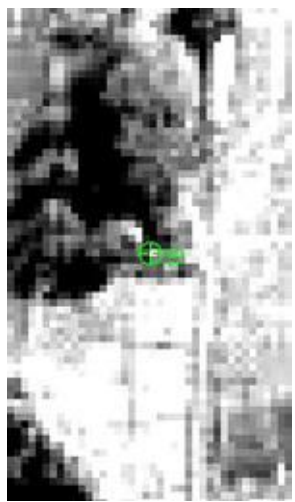
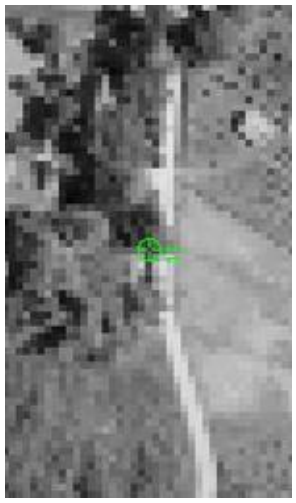
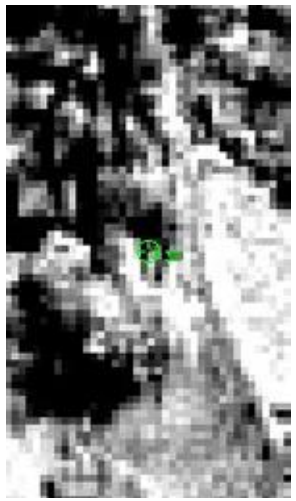
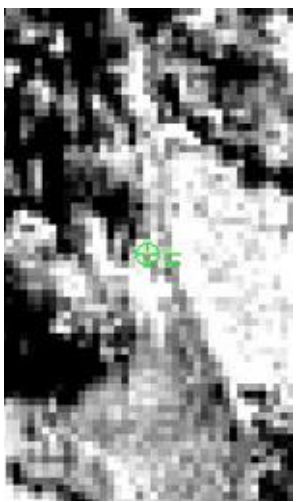
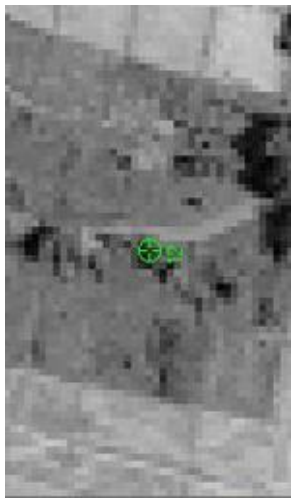
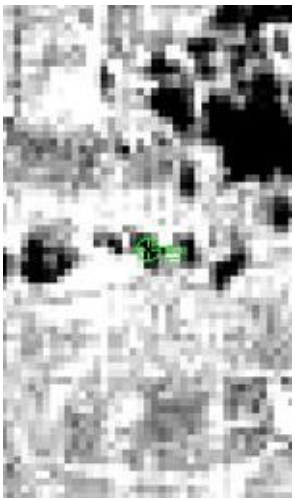
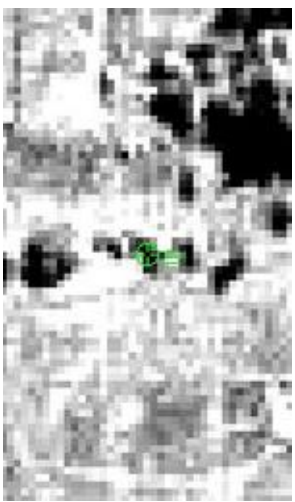
ผลการจับคู่จุดภาพด้วยวิธีรังวัด GCPs อัตโนมัติ

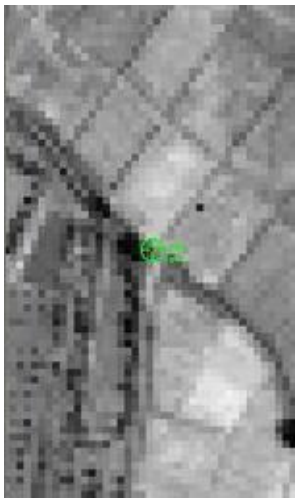
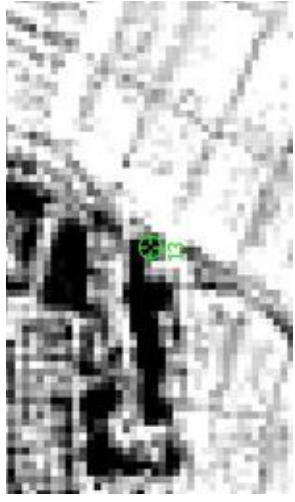

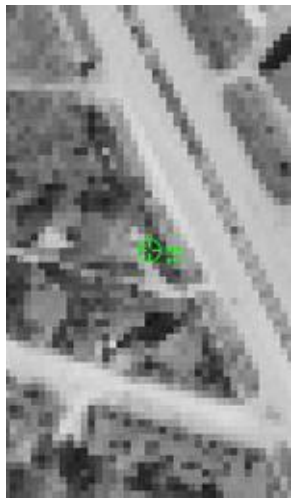
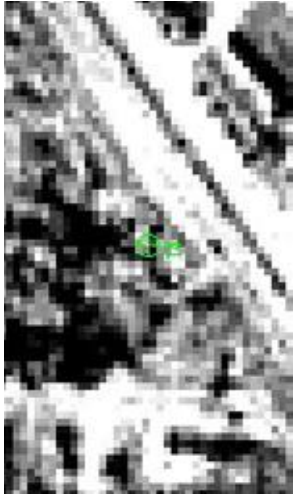
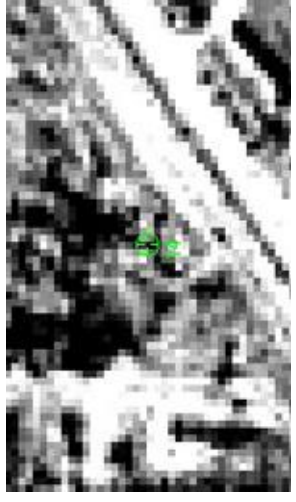
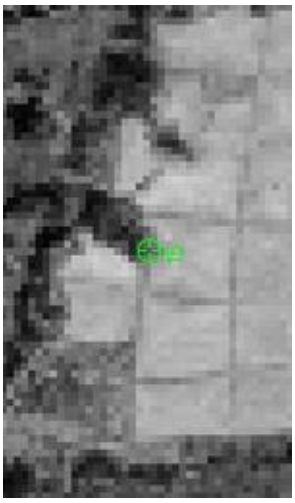
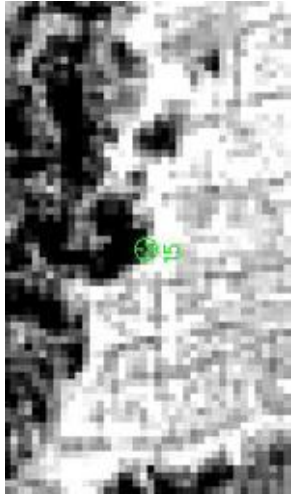
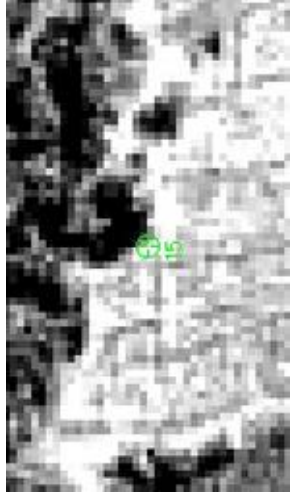
Point ID	จุดเด่นชัดบนภาพออร์โธรีทิคัล	จุดเด่นชัดบนภาพถ่ายดาวเทียมรีดอลด์โดยวิธีรีดักต์ GCPs ชัดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นชัดบนภาพถ่ายดาวเทียมรีดอลด์โดยวิธีรีดักต์ GCPs ชัดใหม่แบบที่ 2
1			
2			
3			

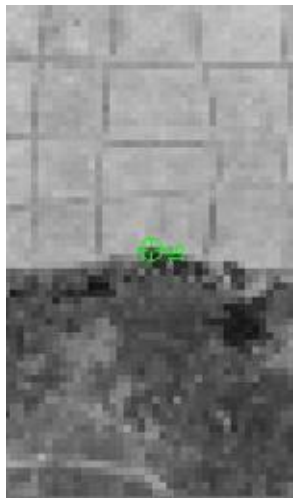
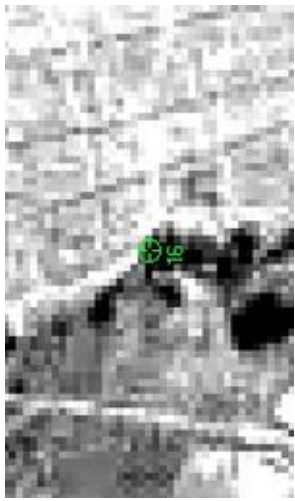
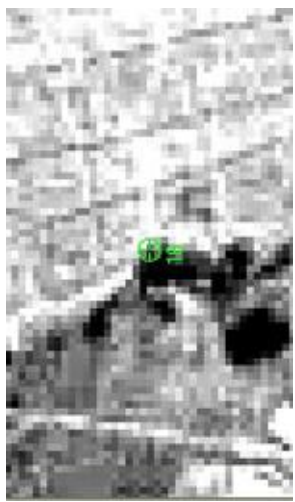
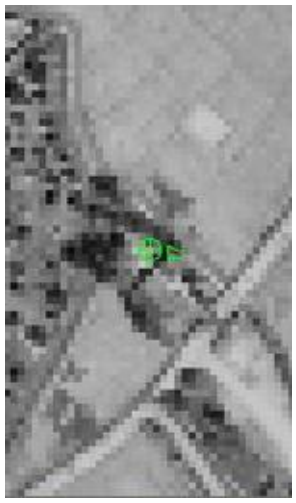

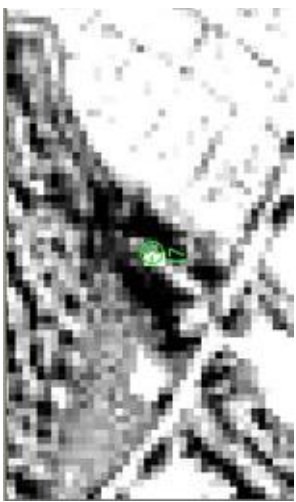
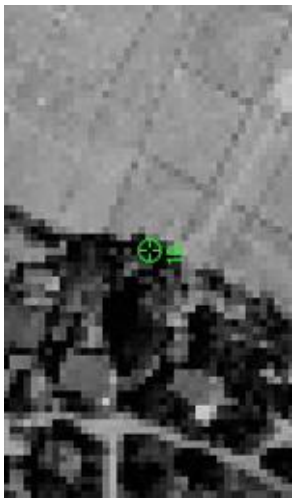
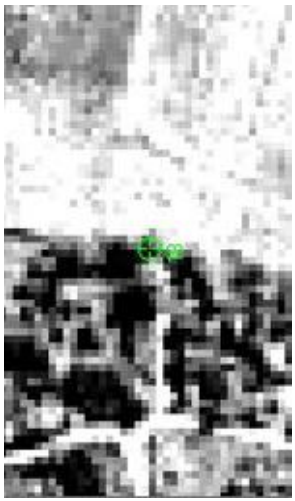
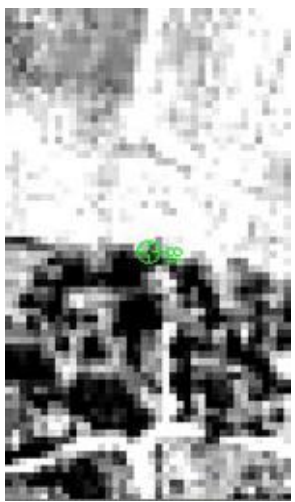


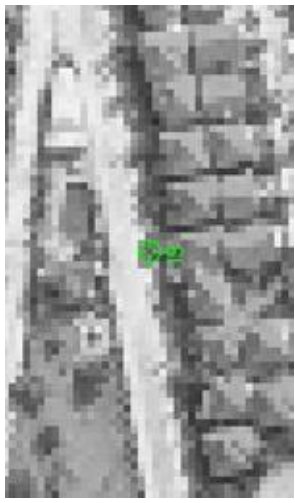
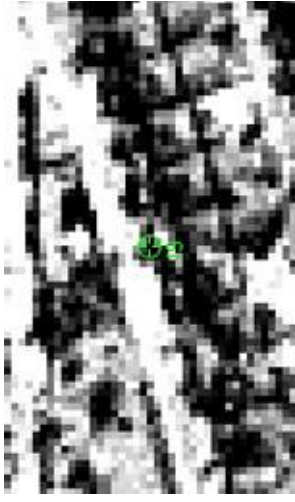
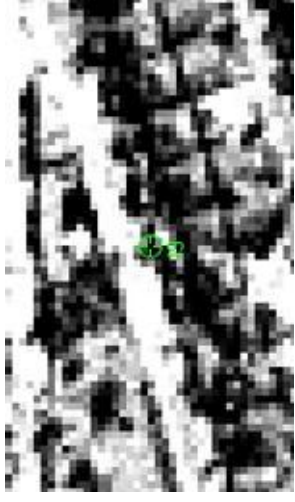
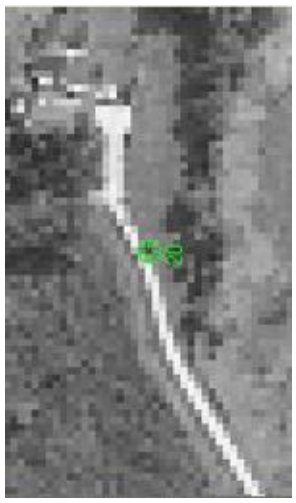
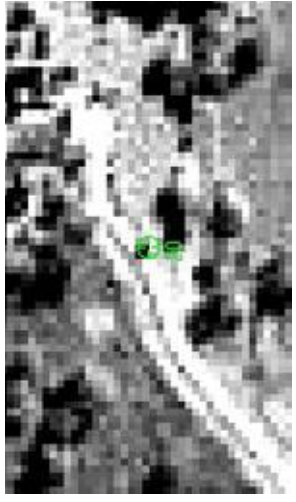
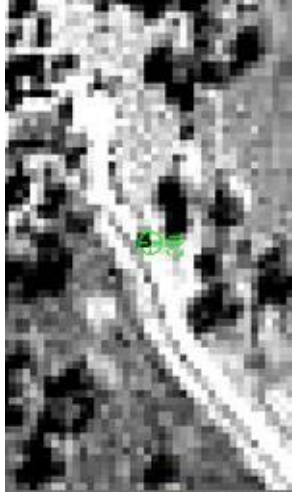
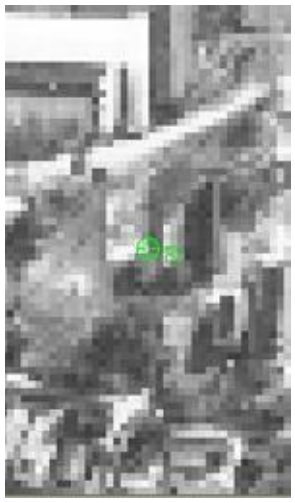
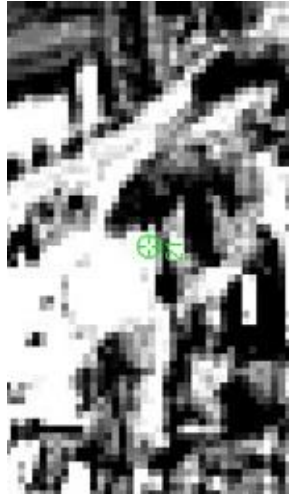
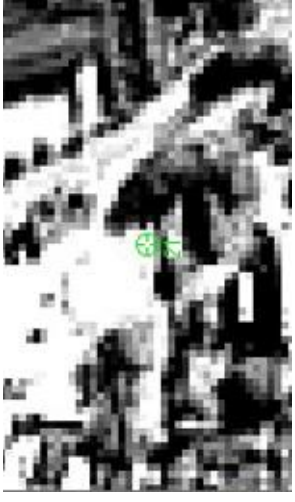
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรีเวิร์ด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรีเวิร์ด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
4			
5			
6			

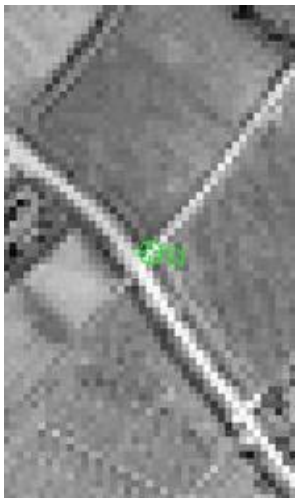
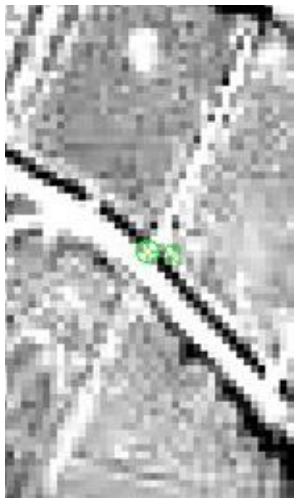
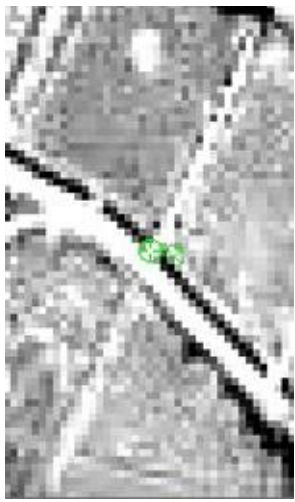
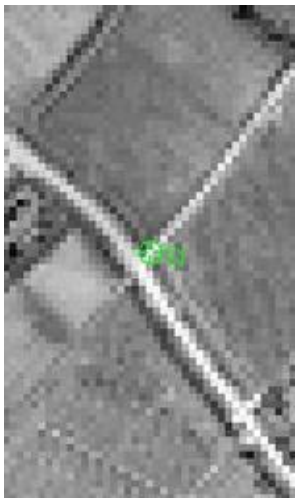
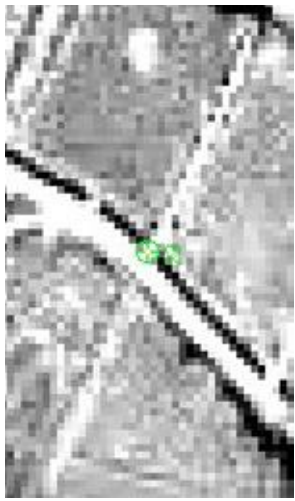
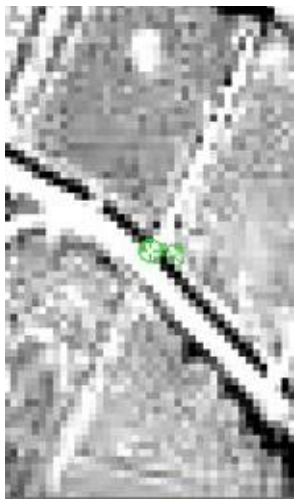
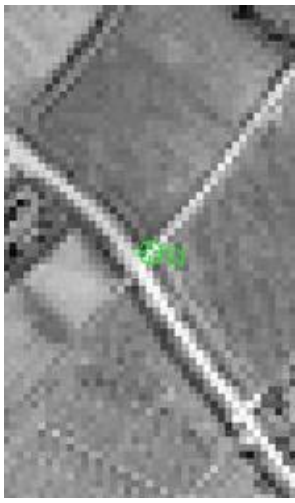
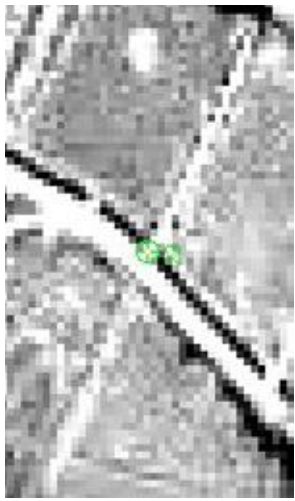
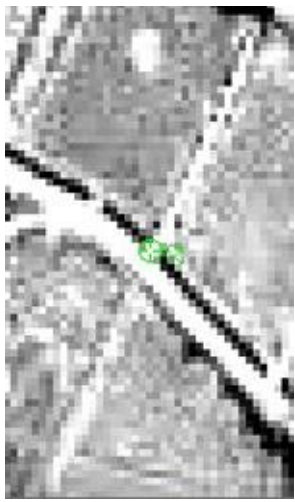
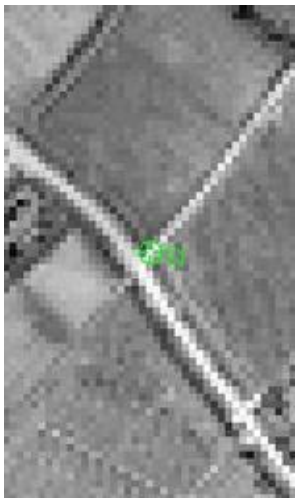
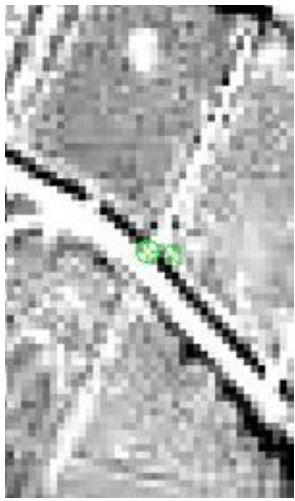
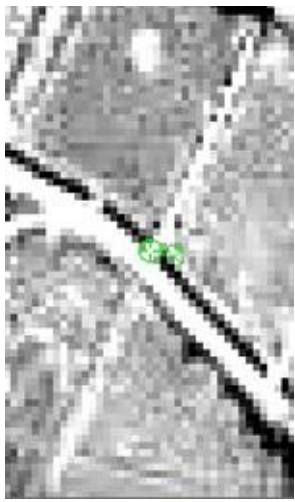
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดได้โดยวิธีรีเวิร์ด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดได้โดยวิธีรีเวิร์ด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
7			
8			
9			

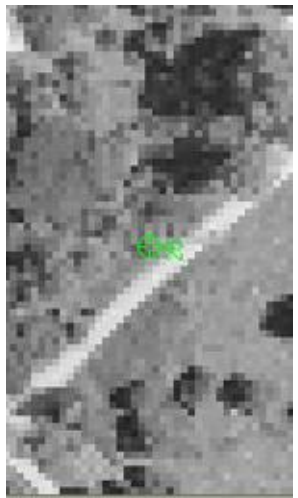
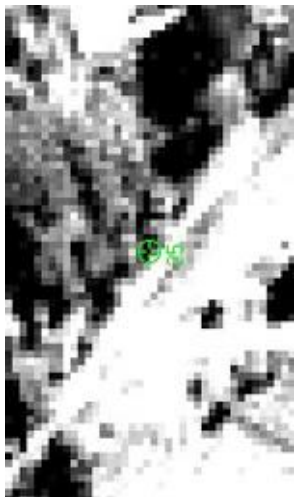
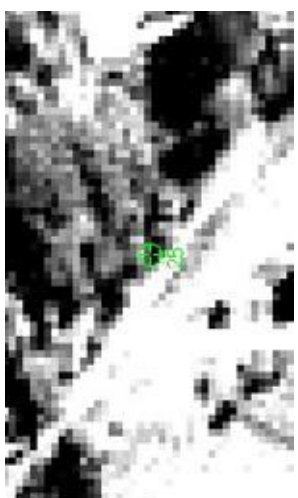
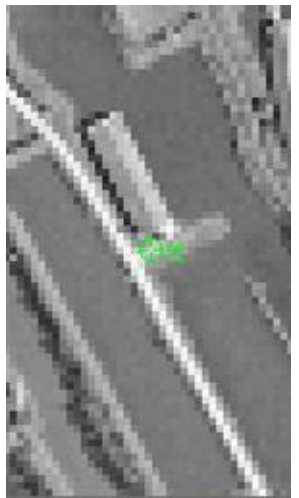
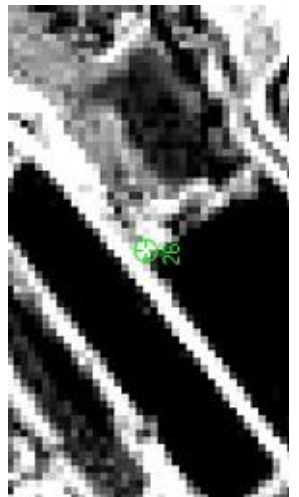

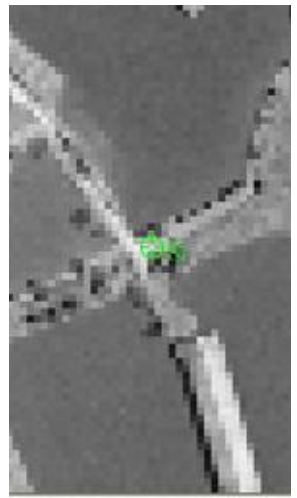
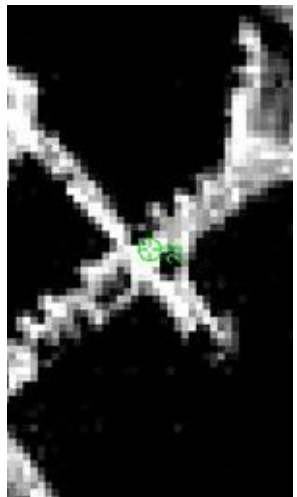
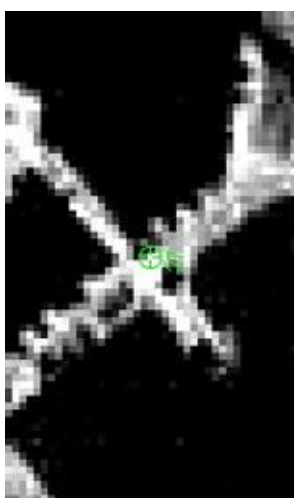
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดรหัสโดยวิธีรีจิวด์ GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดรหัสโดยวิธีรีจิวด์ GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
10			
11			
12			

Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดรหัสโดยวิธีรีจิวด์ GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดรหัสโดยวิธีรีจิวด์ GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
13			
14			
15			

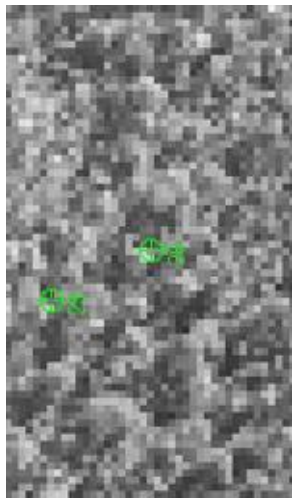
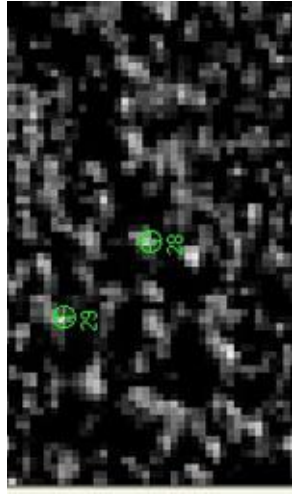
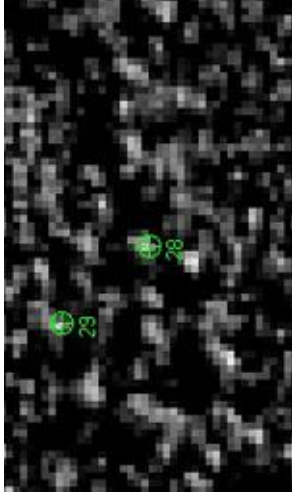
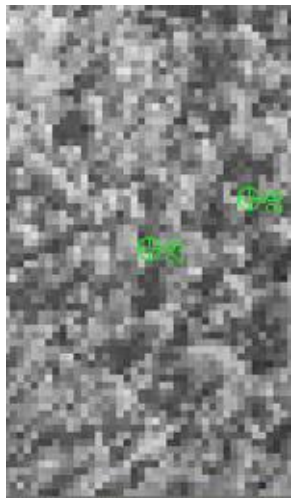
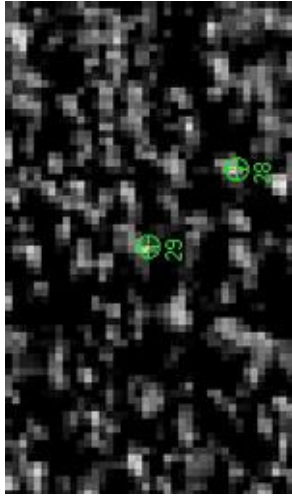
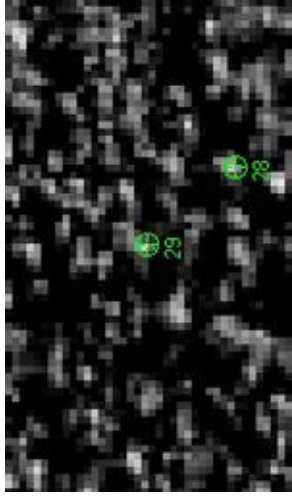
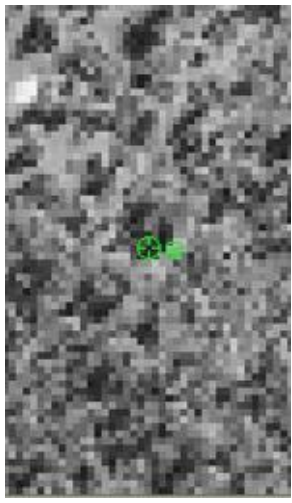
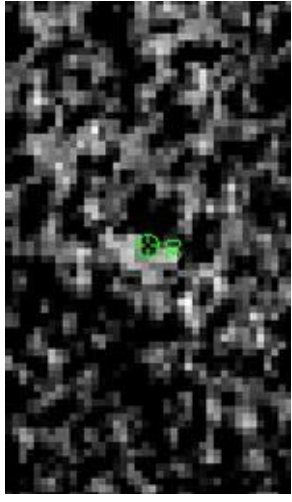
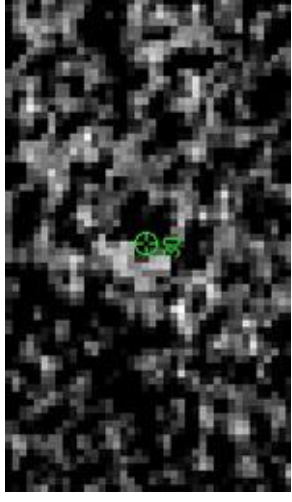
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
16			
17			
18			

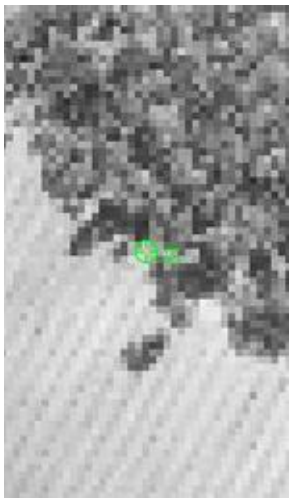
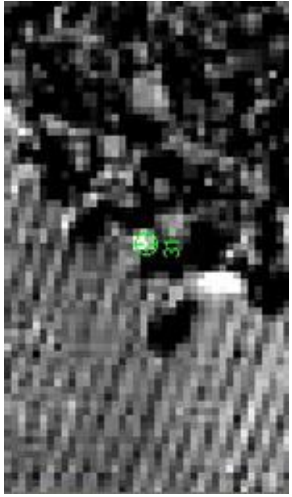
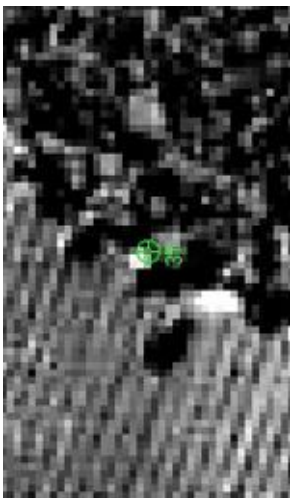
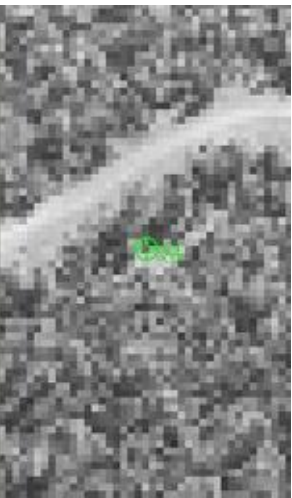
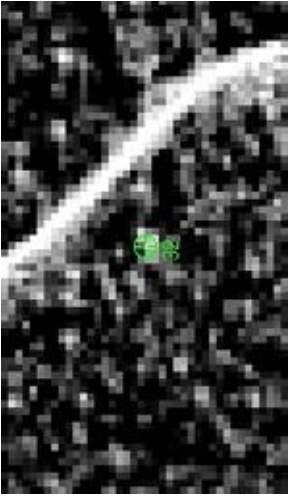
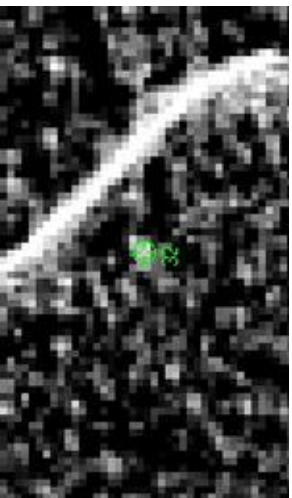
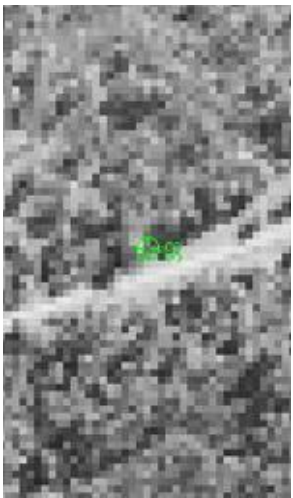
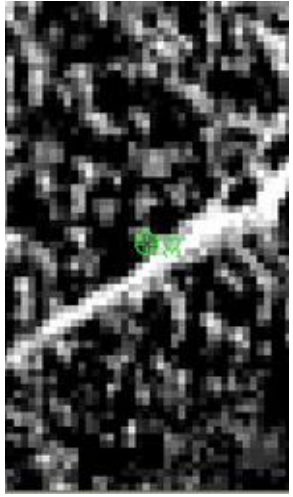
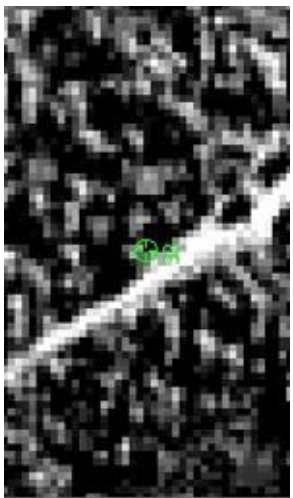
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดได้โดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดได้โดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
19			
20			
21			

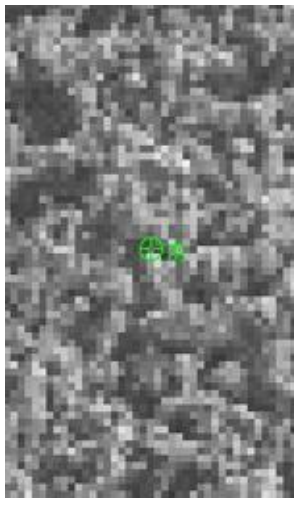
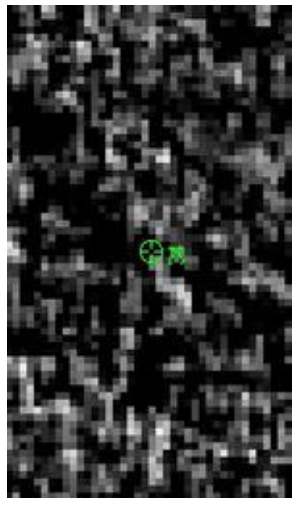
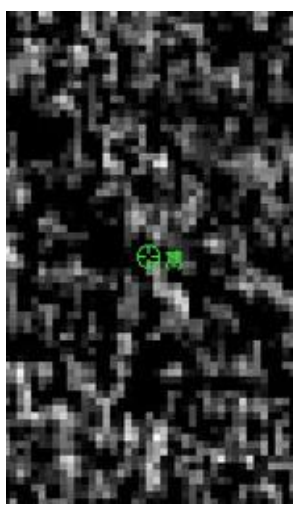
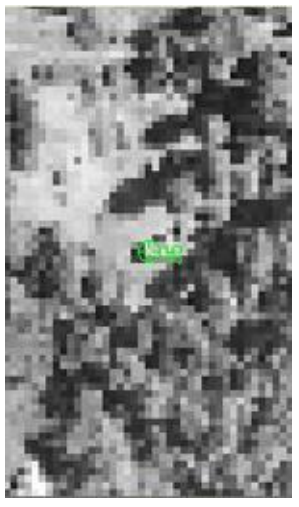
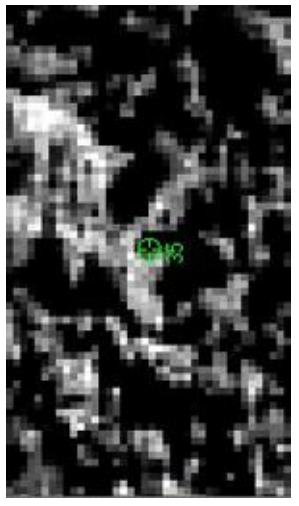
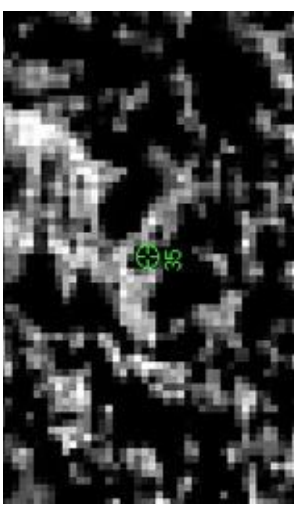
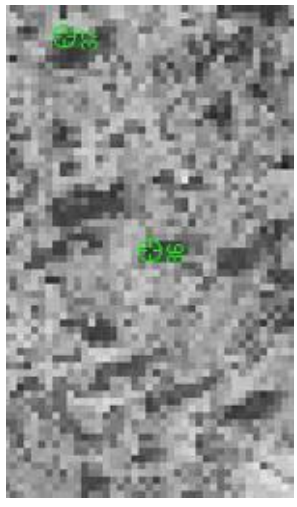
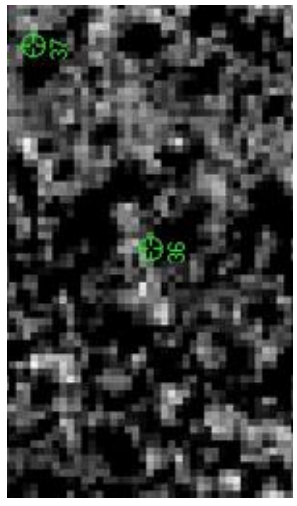
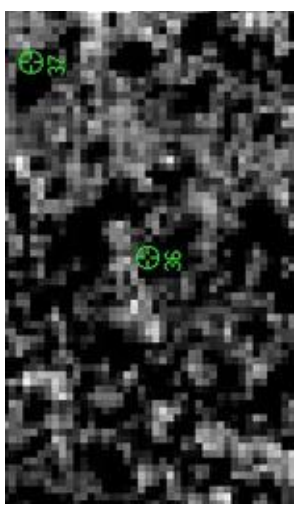
<p>Point ID</p>	<p>จุดเด่นรูปภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์</p> 	<p>จุดเด่นรูปภาพถ่ายดาวเทียมรีโอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชัดในมิติแบบที่ 1</p> 	<p>จุดเด่นรูปภาพถ่ายดาวเทียมรีโอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชัดในมิติแบบที่ 2</p> 
<p>22</p>	<p>จุดเด่นรูปภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์</p> 	<p>จุดเด่นรูปภาพถ่ายดาวเทียมรีโอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชัดในมิติแบบที่ 1</p> 	<p>จุดเด่นรูปภาพถ่ายดาวเทียมรีโอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชัดในมิติแบบที่ 2</p> 
<p>23</p>	<p>จุดเด่นรูปภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์</p> 	<p>จุดเด่นรูปภาพถ่ายดาวเทียมรีโอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชัดในมิติแบบที่ 1</p> 	<p>จุดเด่นรูปภาพถ่ายดาวเทียมรีโอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชัดในมิติแบบที่ 2</p> 
<p>24</p>	<p>จุดเด่นรูปภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์</p> 	<p>จุดเด่นรูปภาพถ่ายดาวเทียมรีโอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชัดในมิติแบบที่ 1</p> 	<p>จุดเด่นรูปภาพถ่ายดาวเทียมรีโอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชัดในมิติแบบที่ 2</p> 

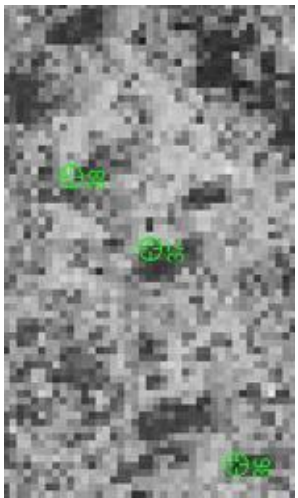
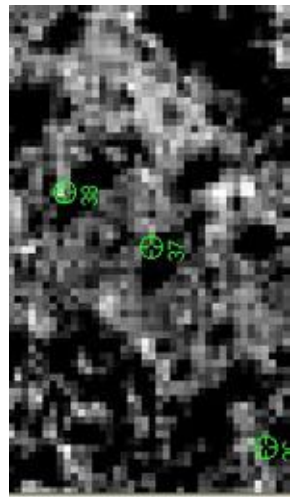
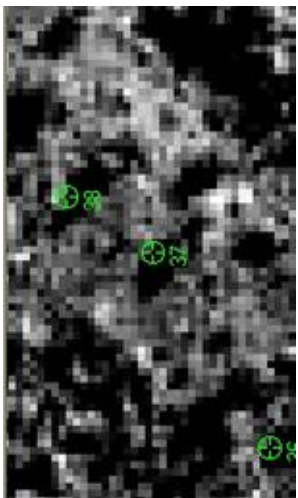
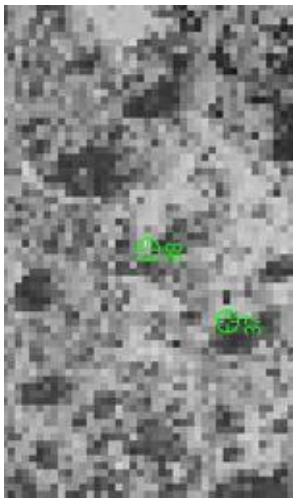
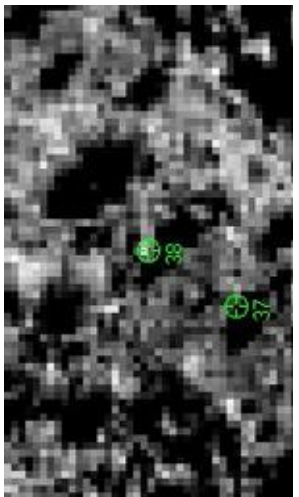
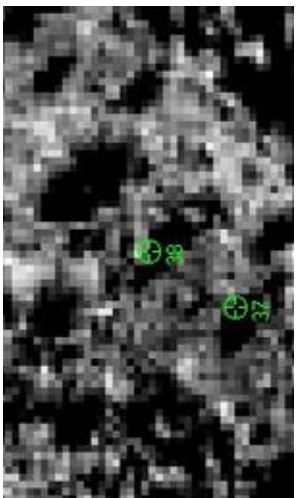
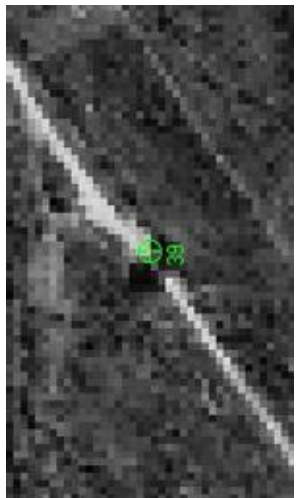
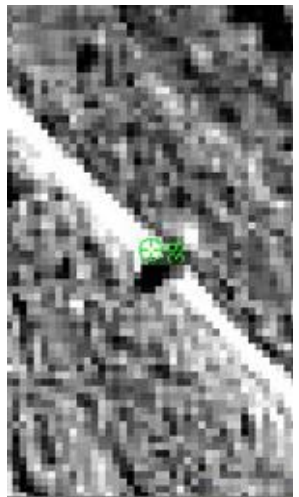
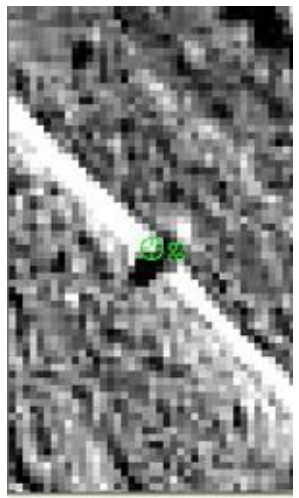
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
25			
26			
27			

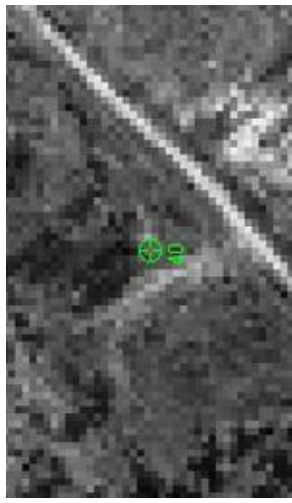
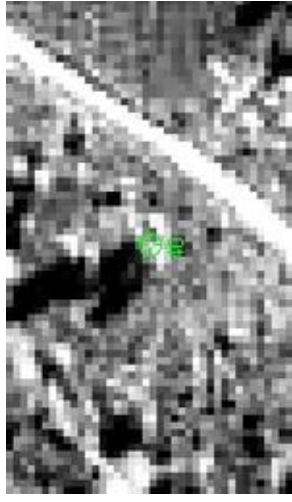
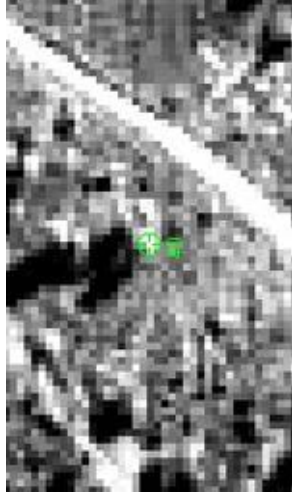
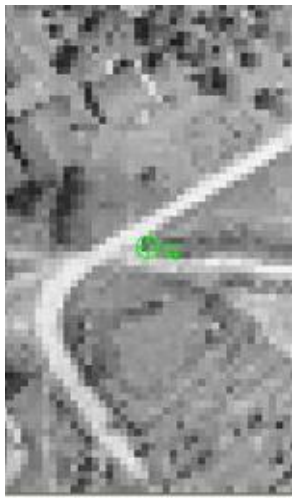
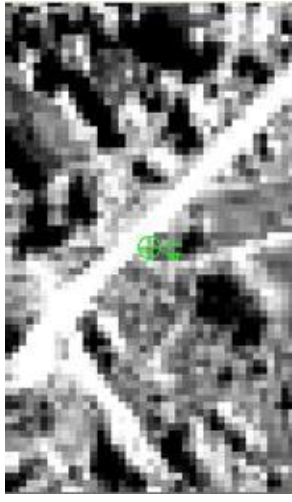
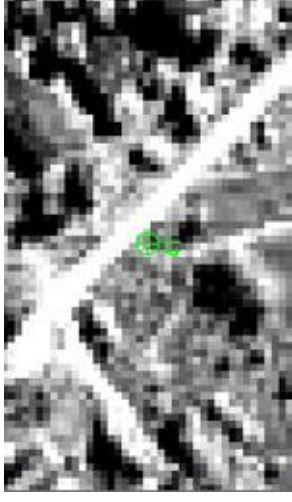
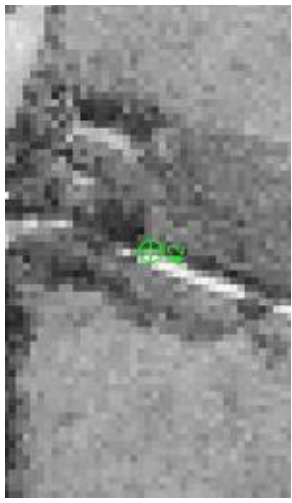




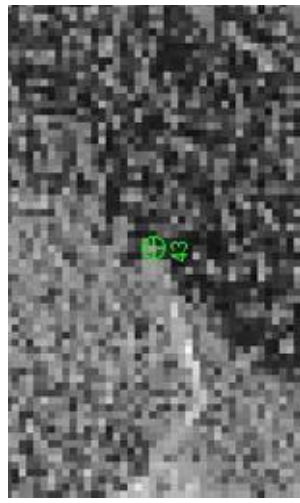
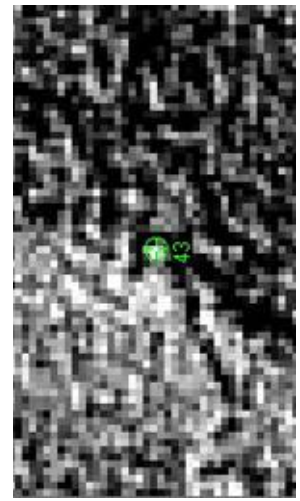
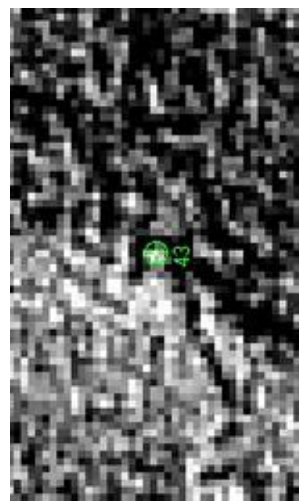
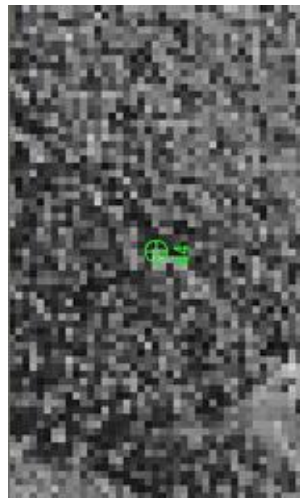
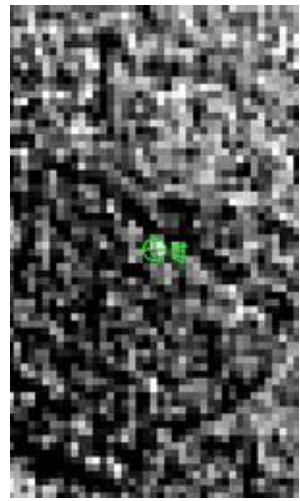
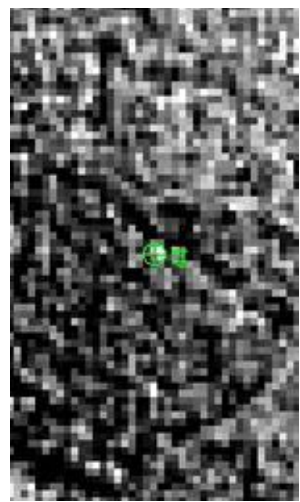
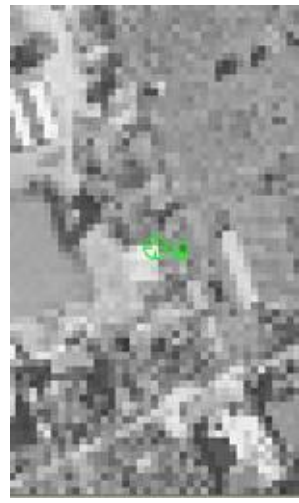
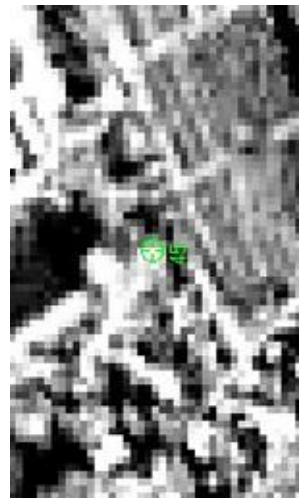
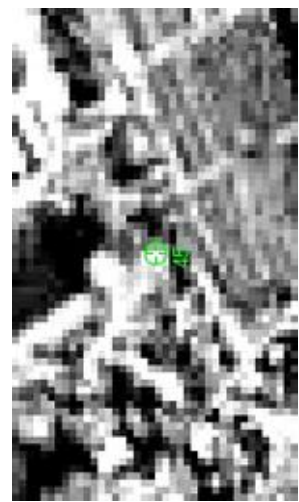
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออริจินัล	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสเกลโดยวิธีจัวด์ GCPs ชัดในมิติแบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสเกลโดยวิธีจัวด์ GCPs ชัดในมิติแบบที่ 2
28			
29			
30			

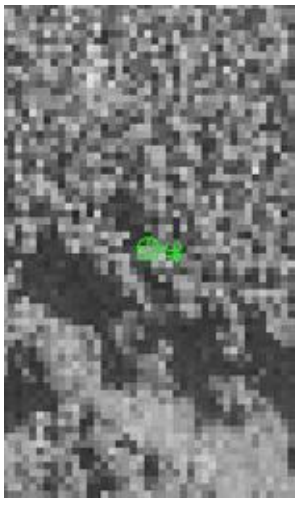
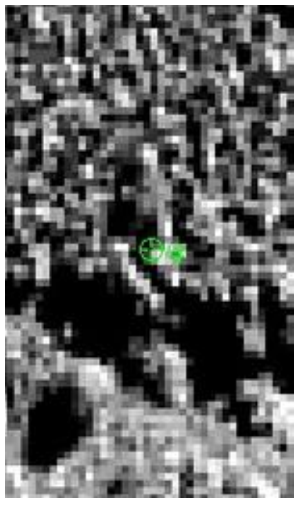
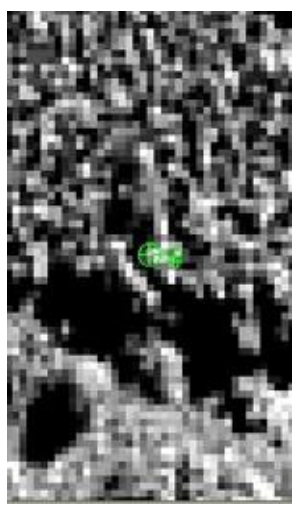
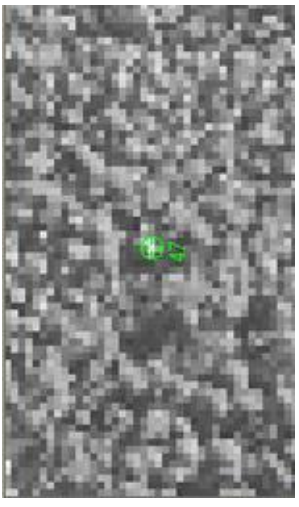
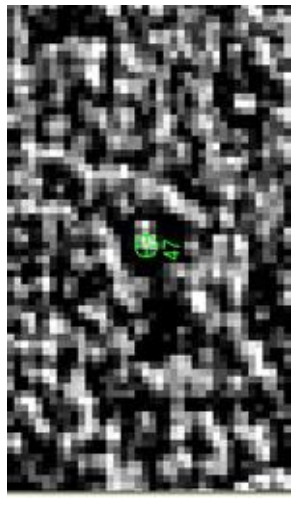
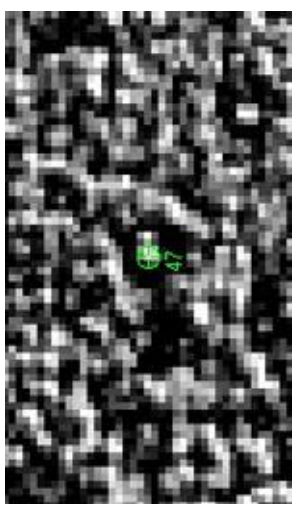
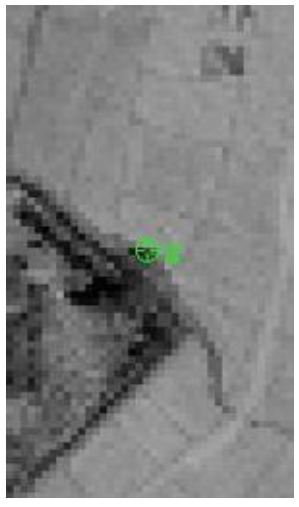
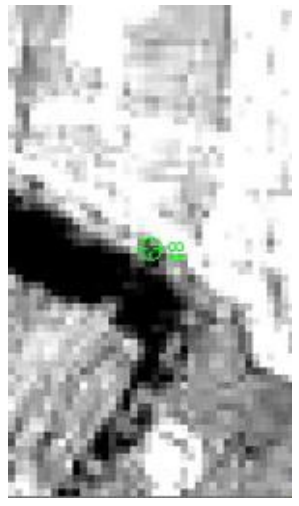
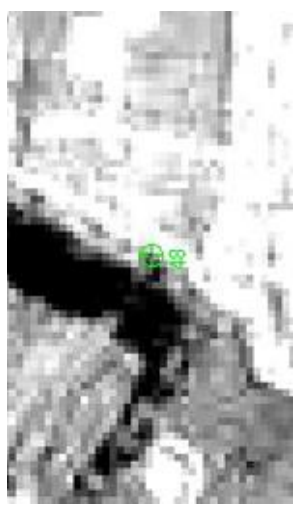
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดรหัสโดยวิธีรีเวิร์ด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดรหัสโดยวิธีรีเวิร์ด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
31			
32			
33			

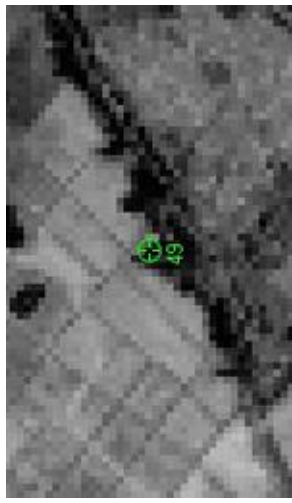
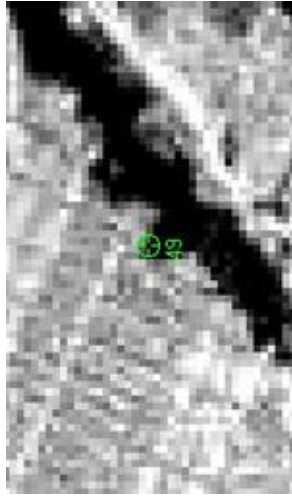
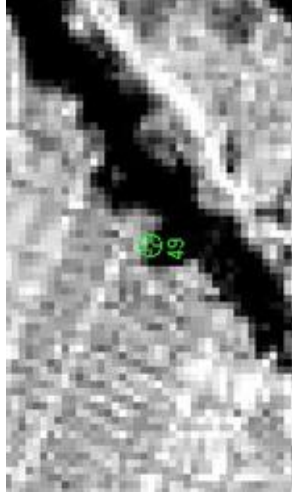
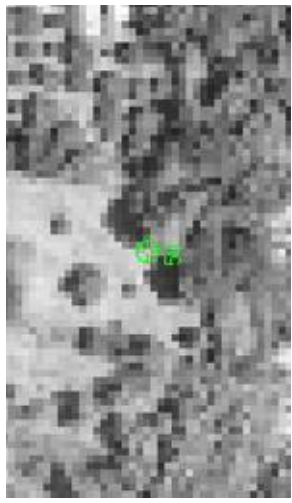
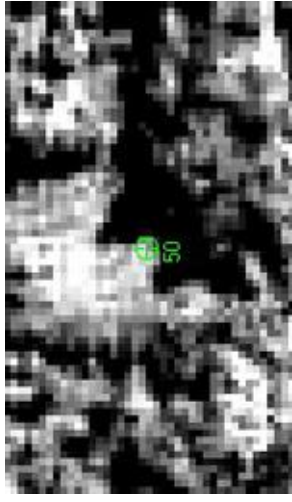
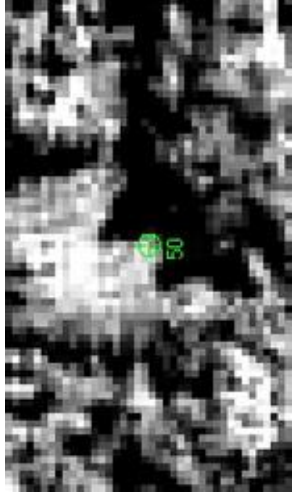
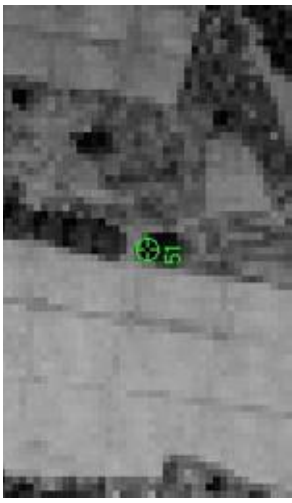
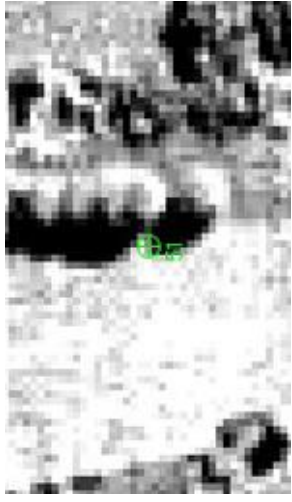
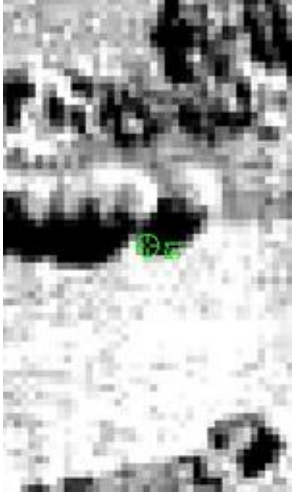
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธสีเชิงเฉย	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
34			
35			
36			

Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟนนิ่งเลข	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดรหัสโดยวิธีรังกวด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดรหัสโดยวิธีรังกวด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
37			
38			
39			


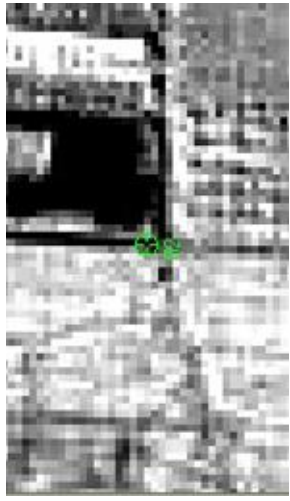
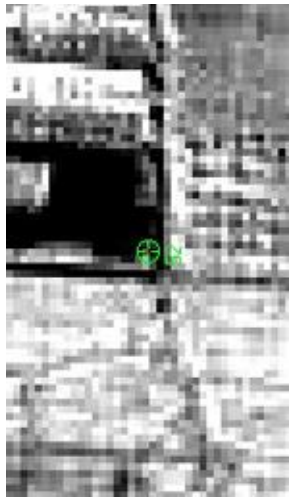
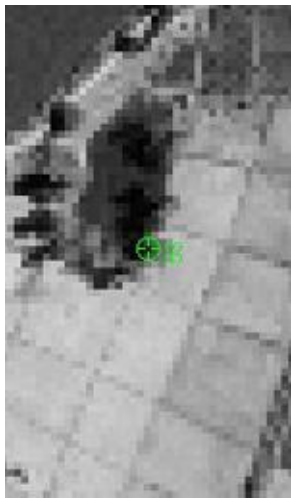
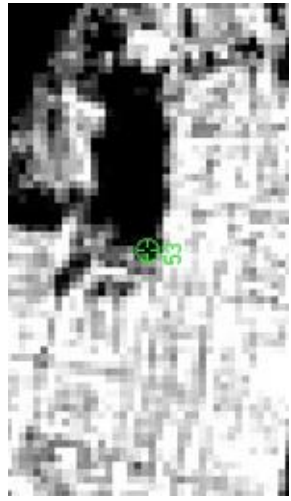
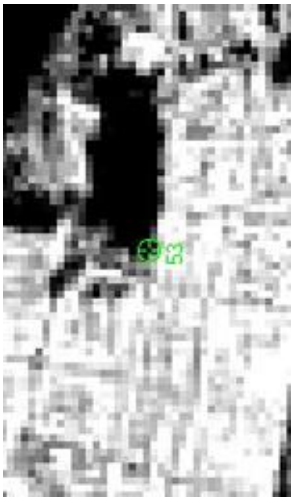
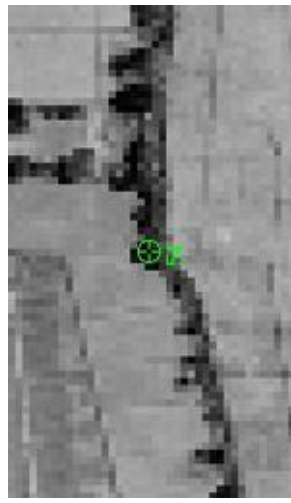
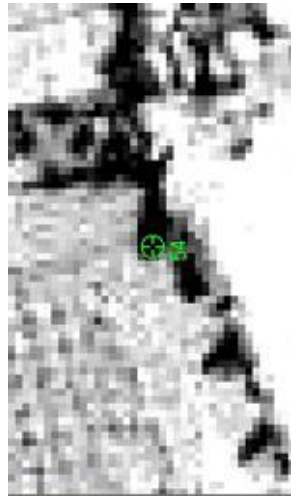
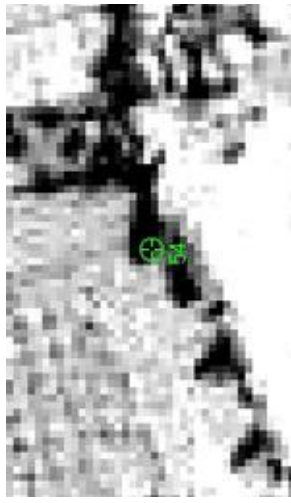
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
40			
41			
42			

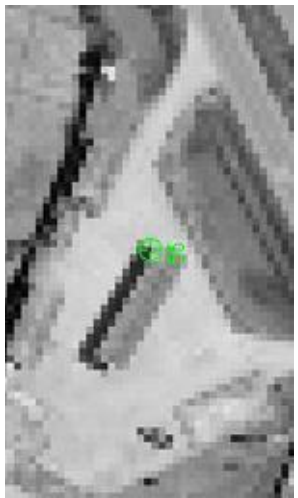
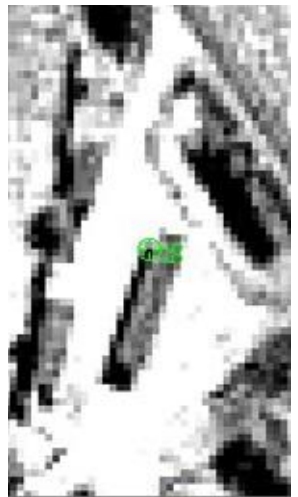
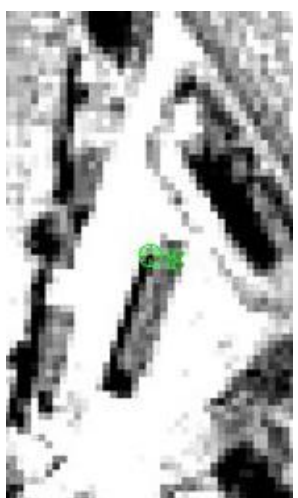
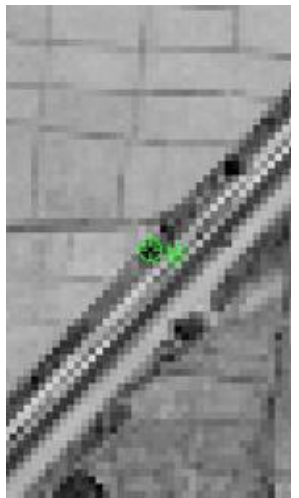
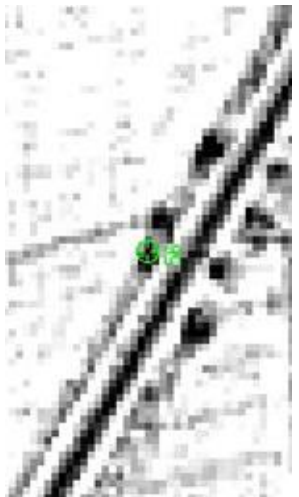
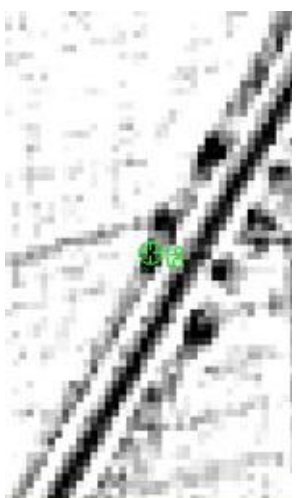
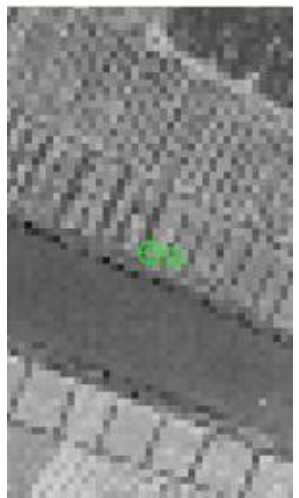
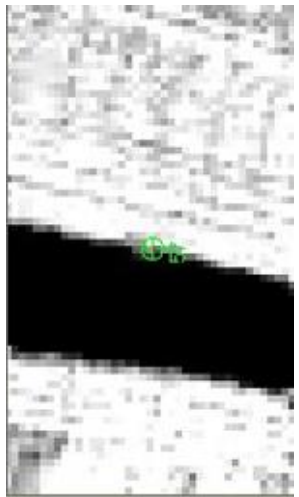
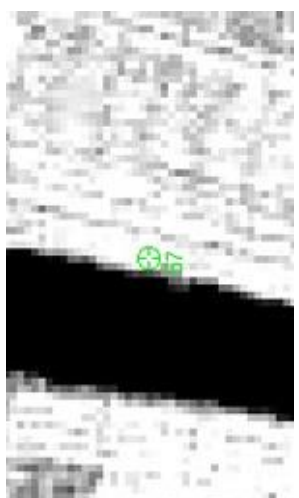
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออริจินัลสีเทา	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายภาพดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชนิดใหม่ตีแบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายภาพดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชนิดใหม่ตีแบบที่ 2
43			
44			
45			

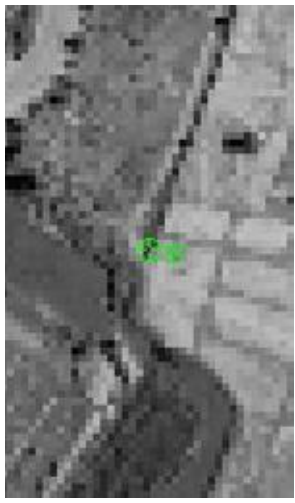

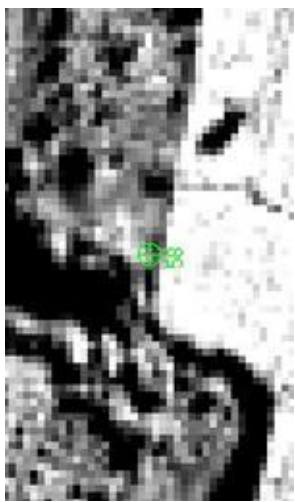
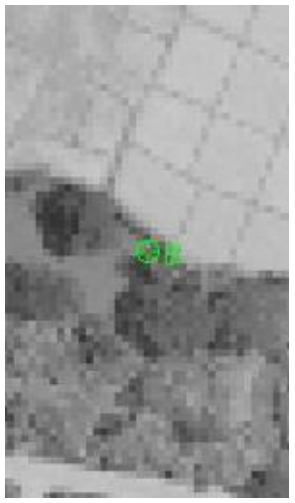
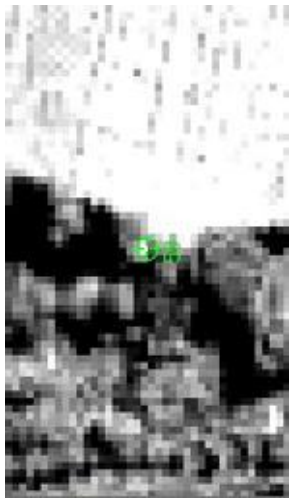
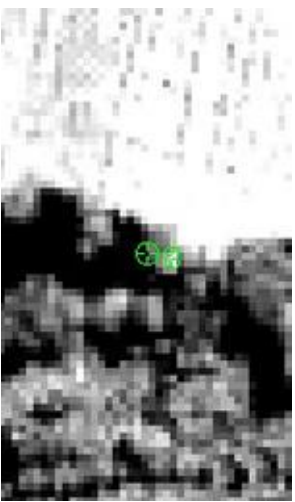
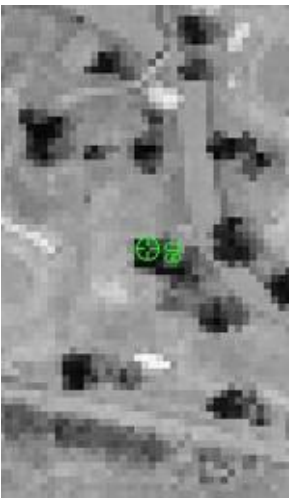
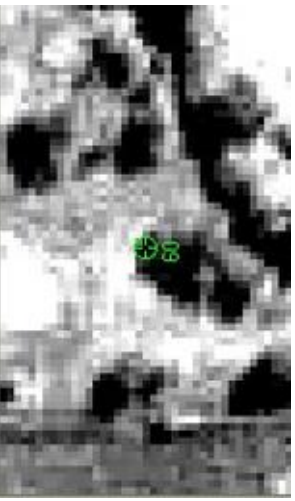
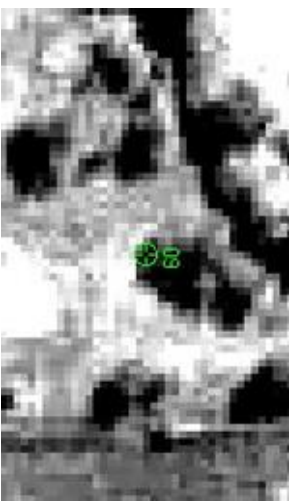
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
46			
47			
48			

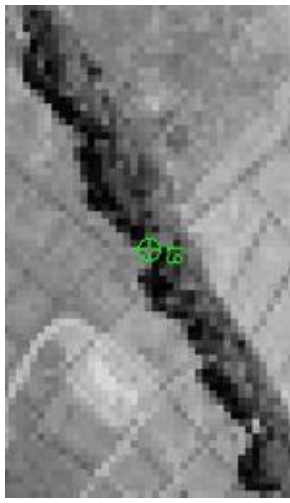
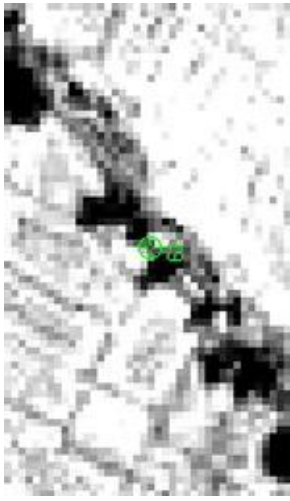
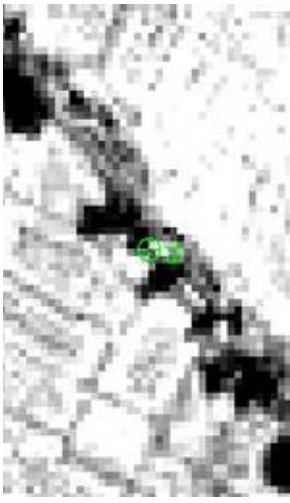
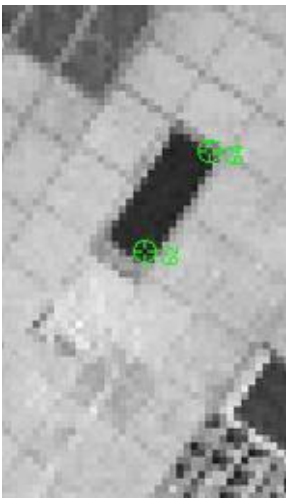
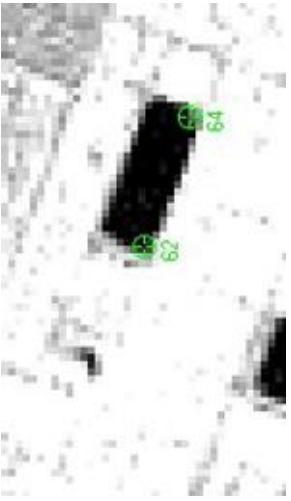
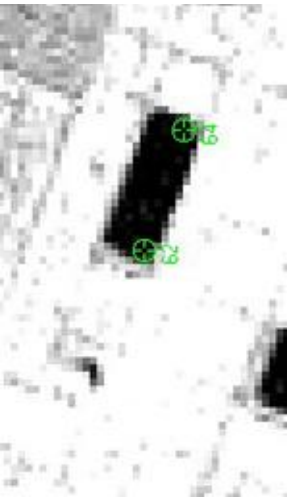
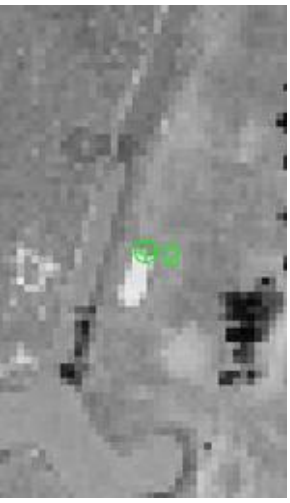
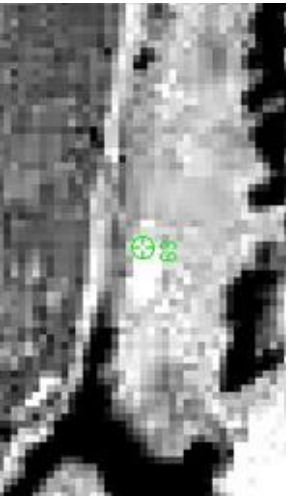
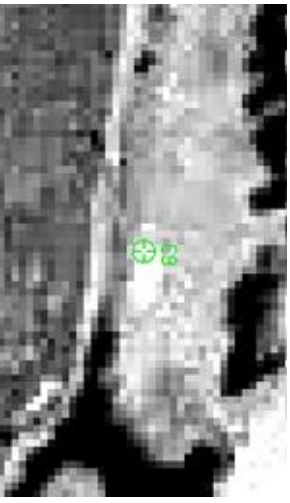
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
49			
50			
51			

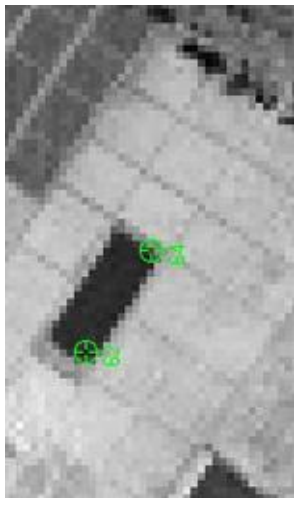
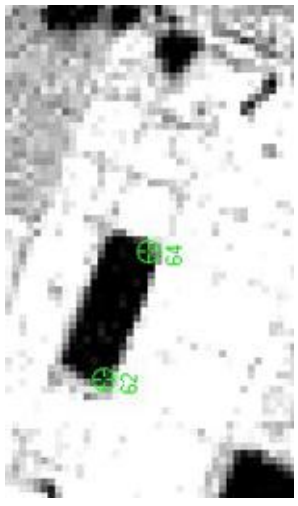
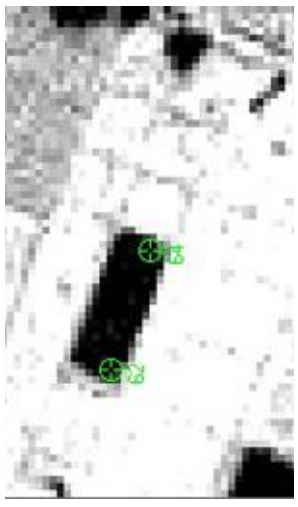
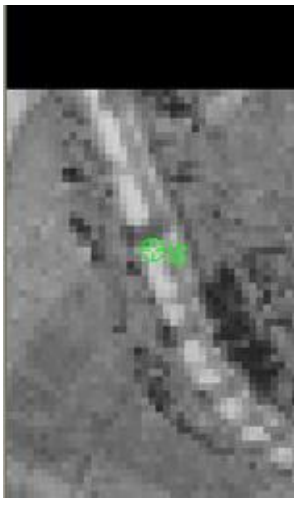
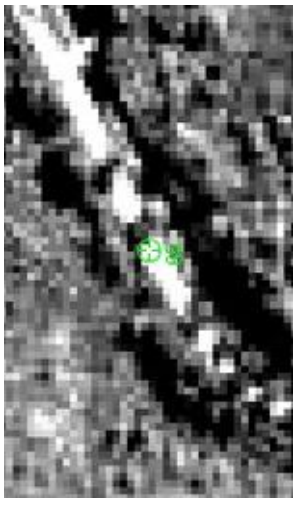
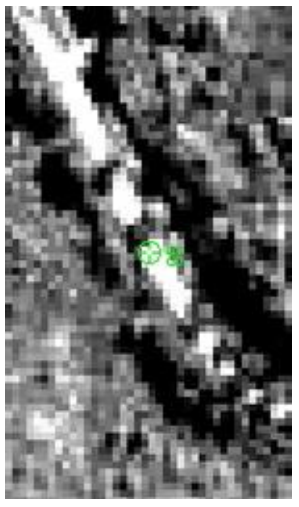
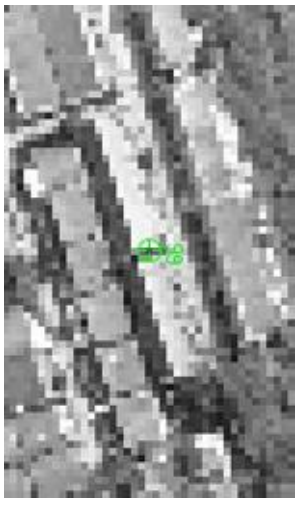
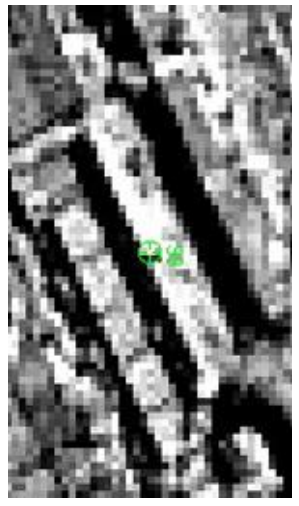
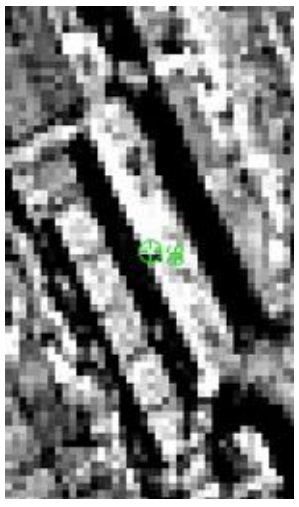


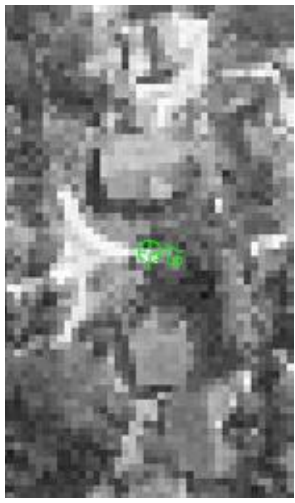
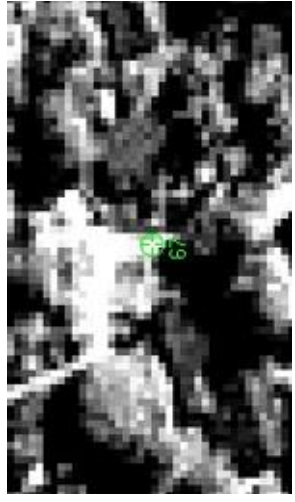
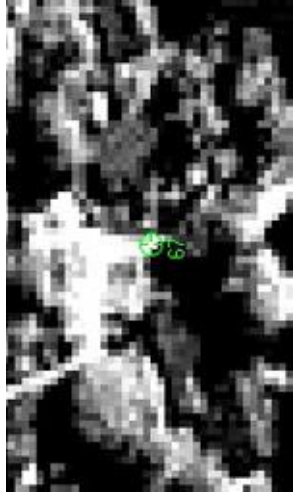
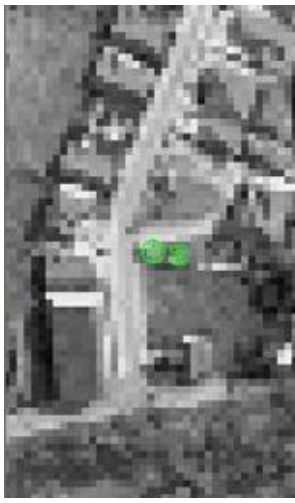

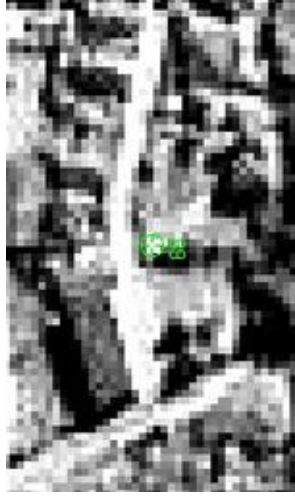

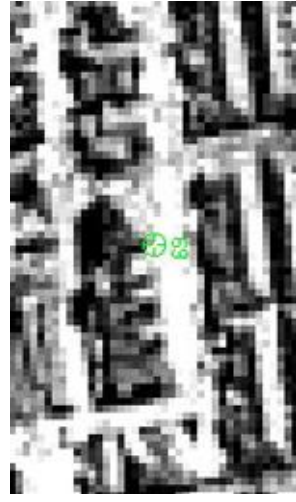

Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสไลด์โดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสไลด์โดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
52			
53			
54			

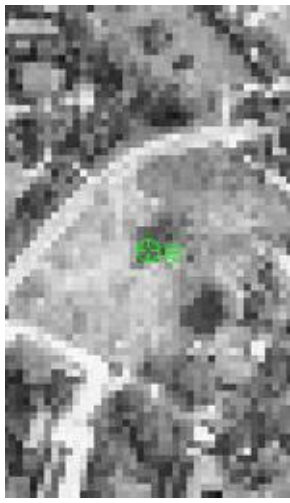
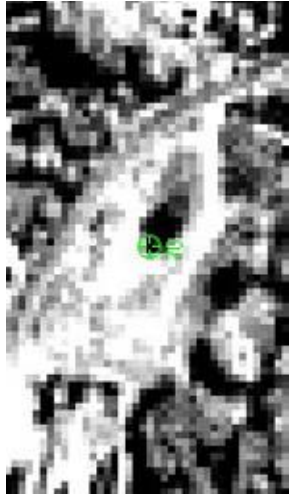
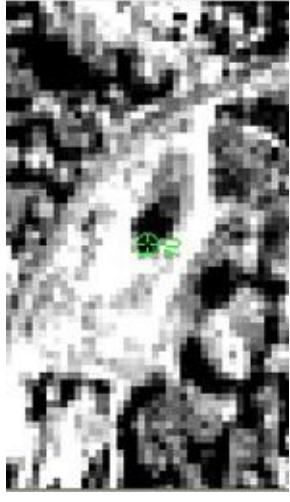
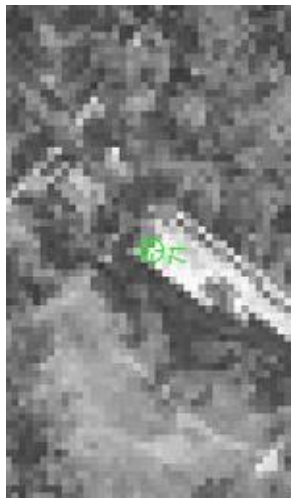
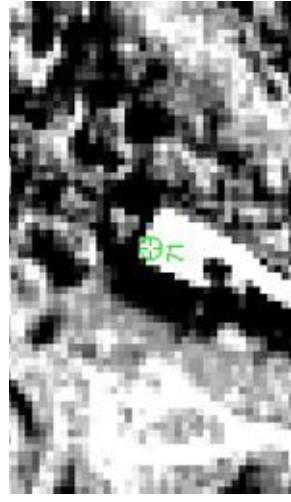

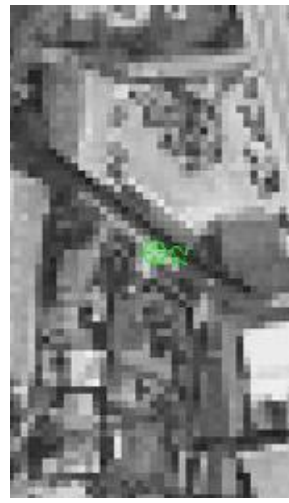
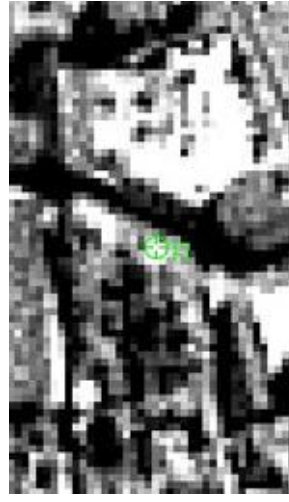

Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
55			
56			
57			

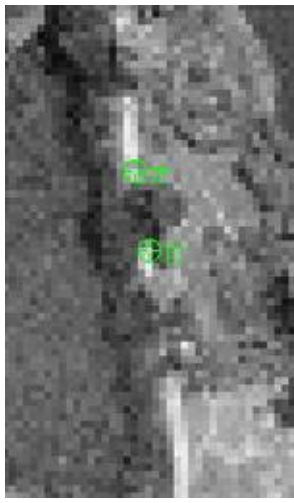
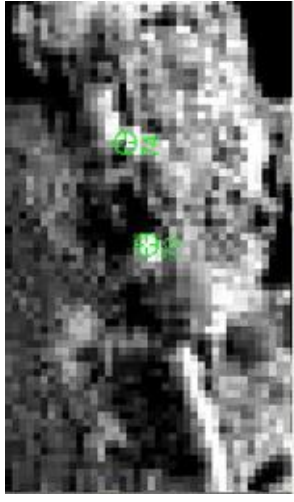
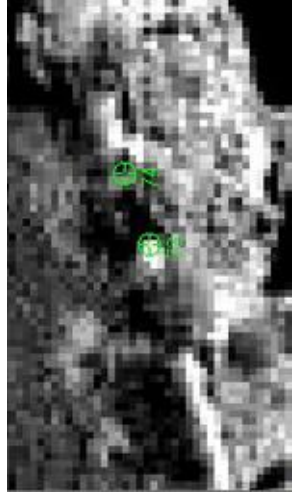
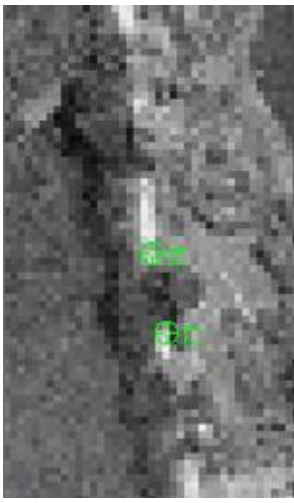
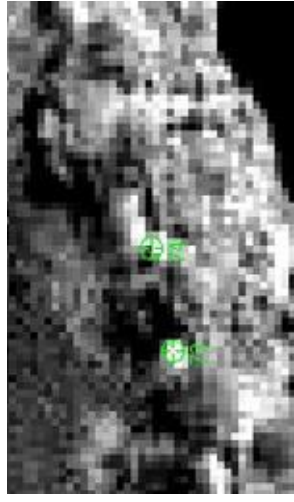
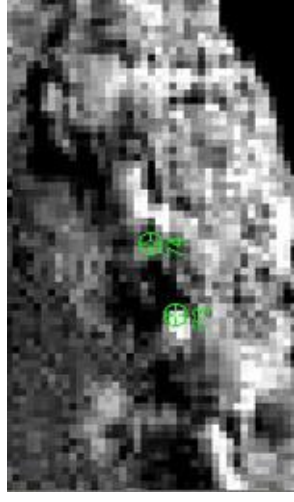
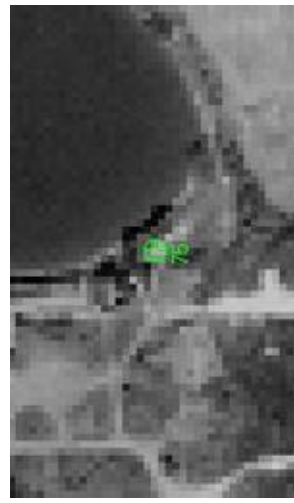
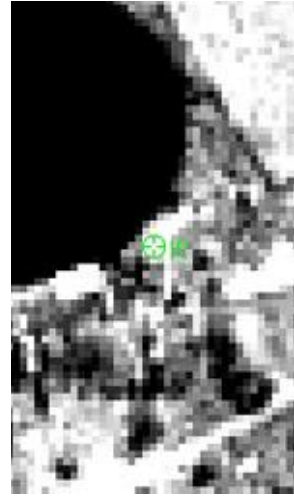
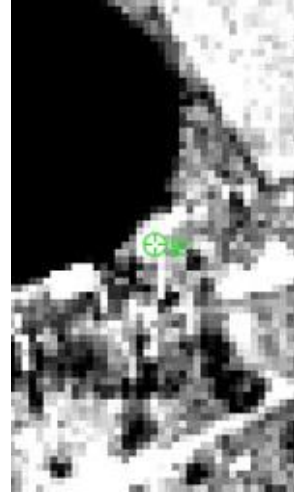
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโตนโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโตนโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
58			
59			
60			

Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
61			
62			
63			

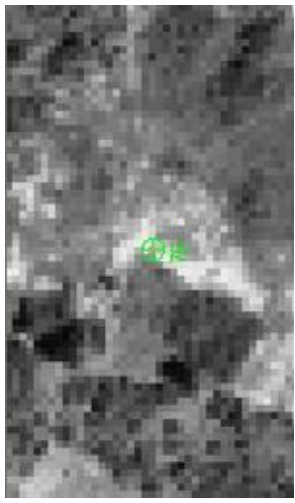
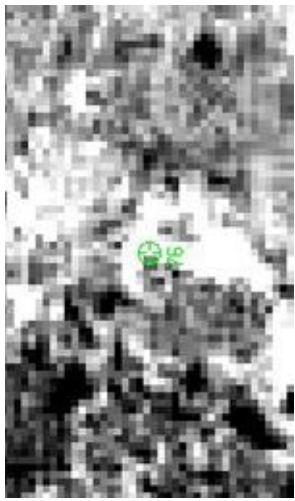
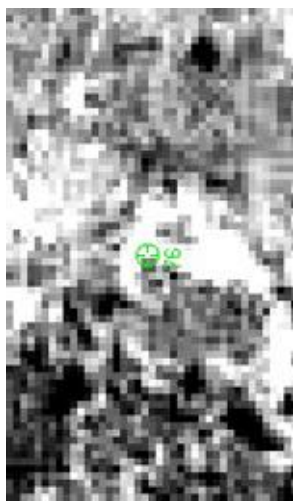
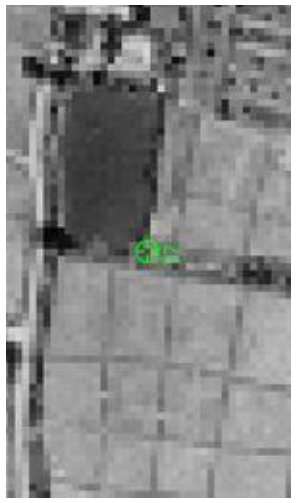
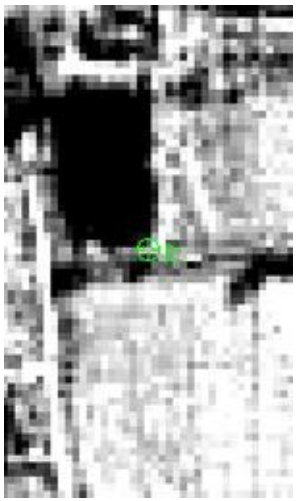
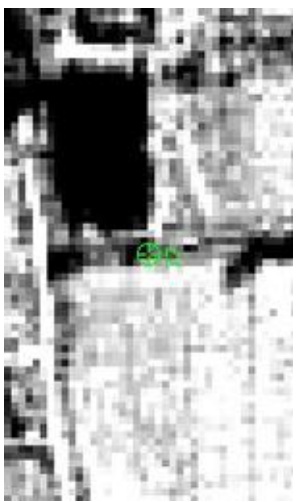
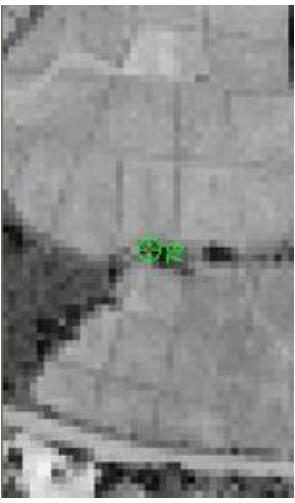
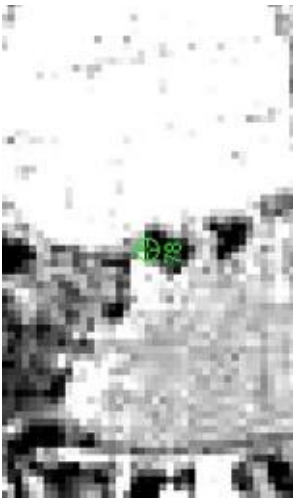
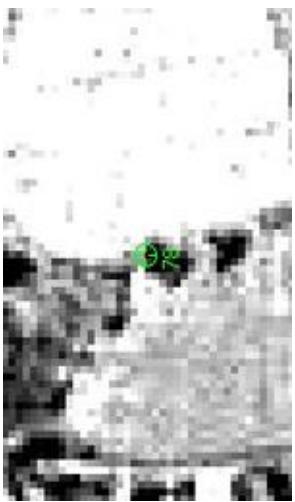
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟนนิ่งเลข	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
64			
65			
66			

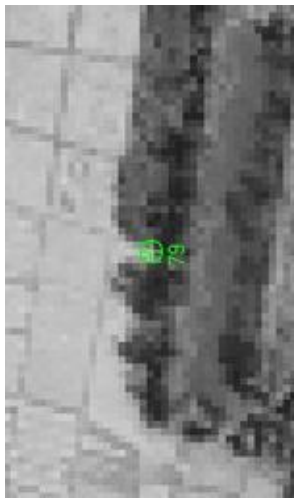
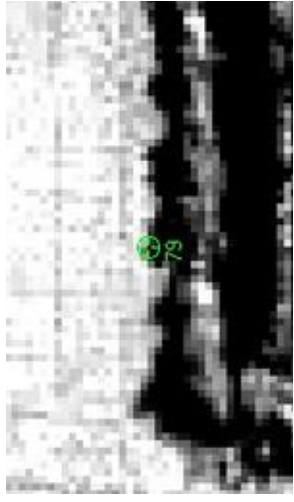
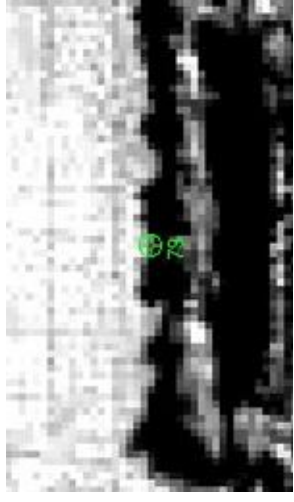
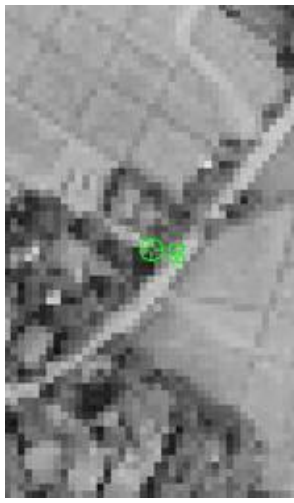
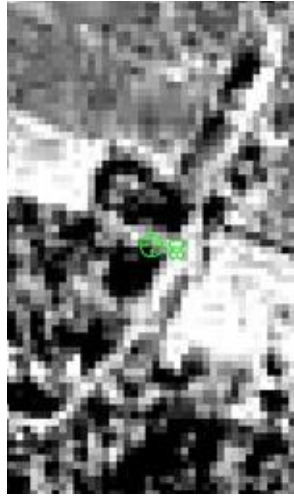
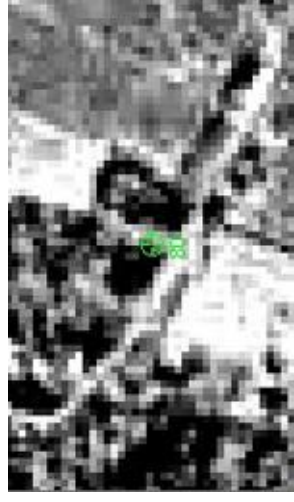
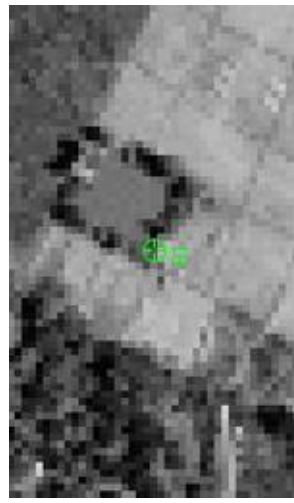
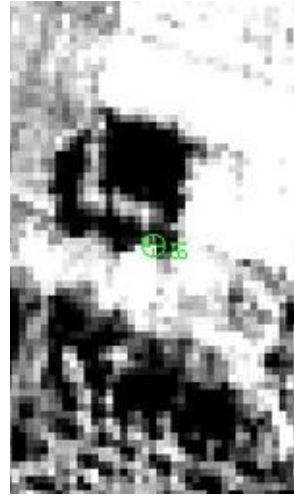

Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
67			
68			
69			

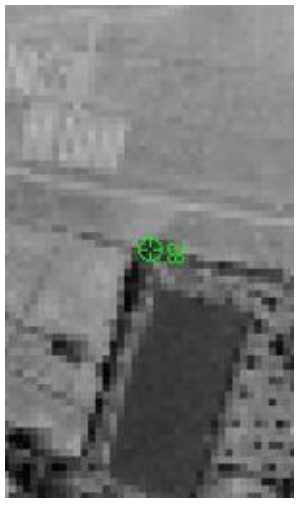
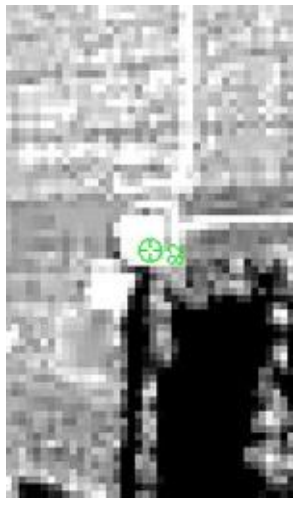
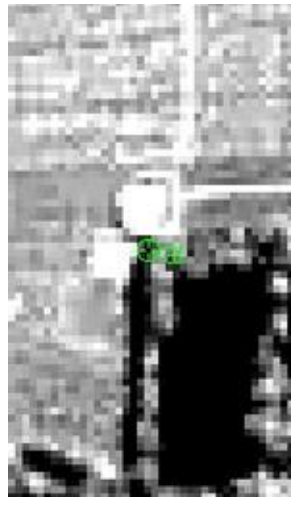
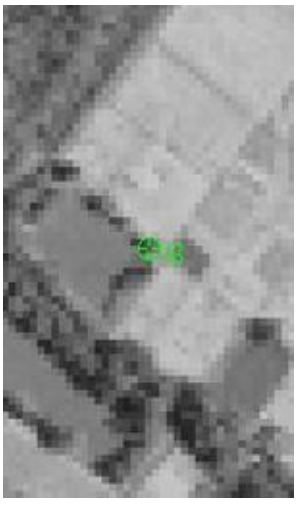
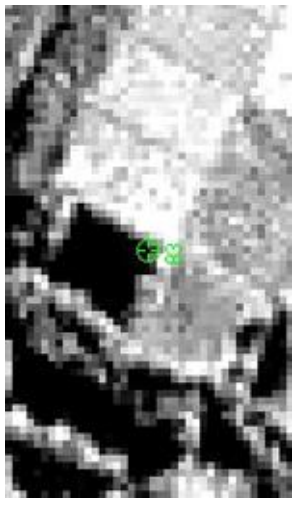
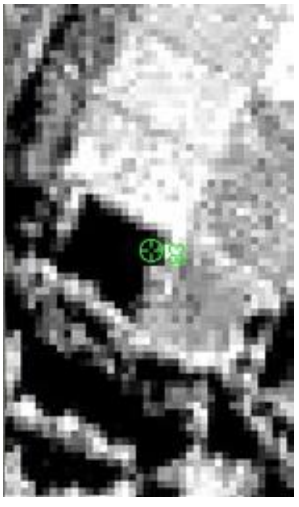
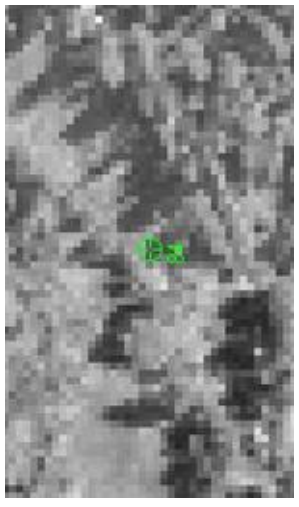
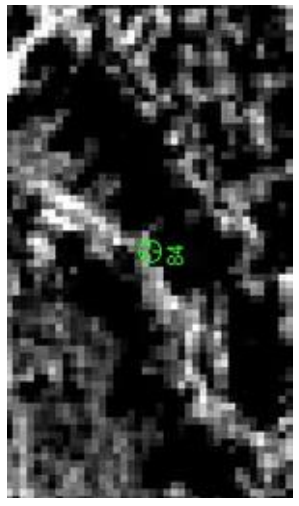
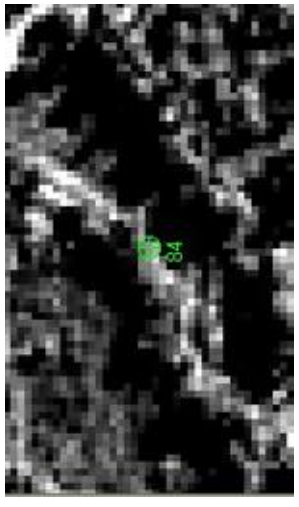
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
70			
71			
72			

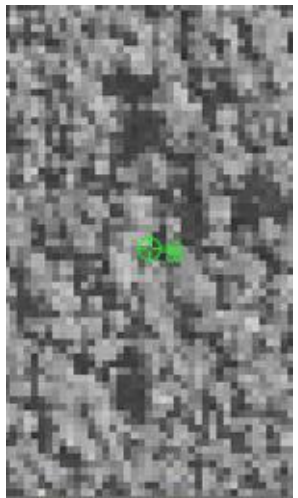
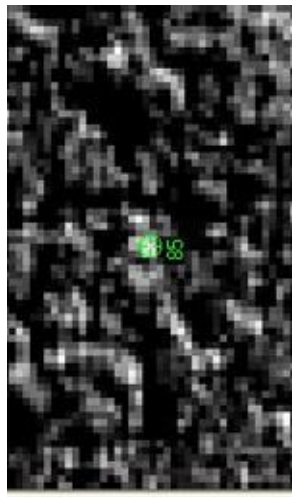
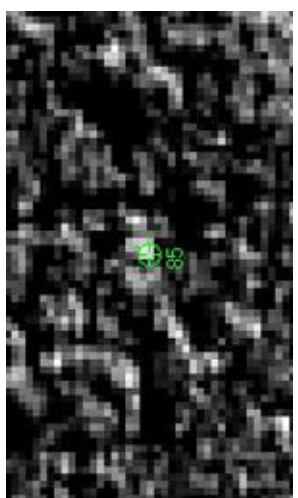
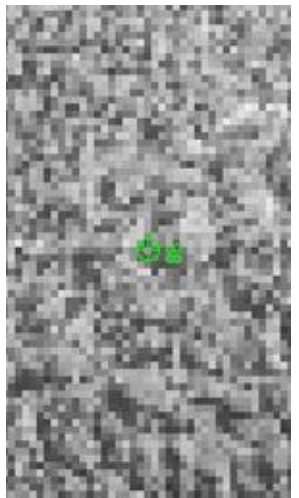
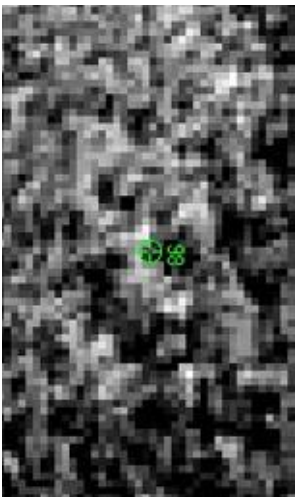
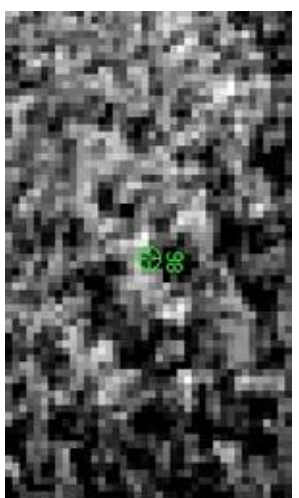
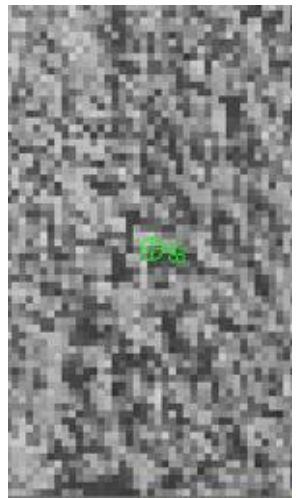
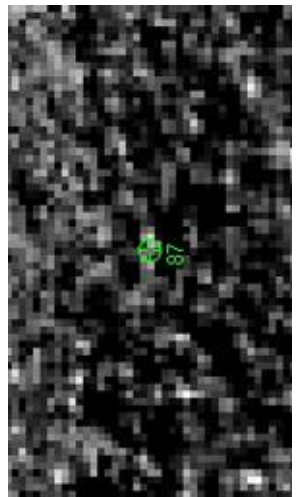
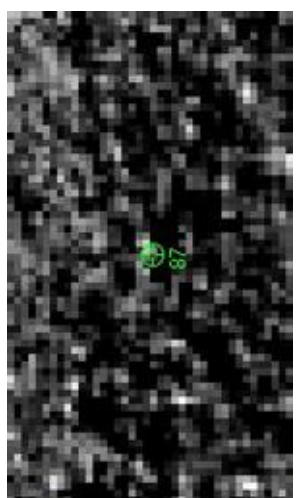
Point ID	จุดเด่นรูปภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นรูปภาพถ่ายดาวเทียมหรือภาพถ่ายโดยวิธีรังวัด GCPs ชนิดโมติแบบที่ 1	จุดเด่นรูปภาพถ่ายดาวเทียมหรือภาพถ่ายโดยวิธีรังวัด GCPs ชนิดโมติแบบที่ 2
73			
74			
75			

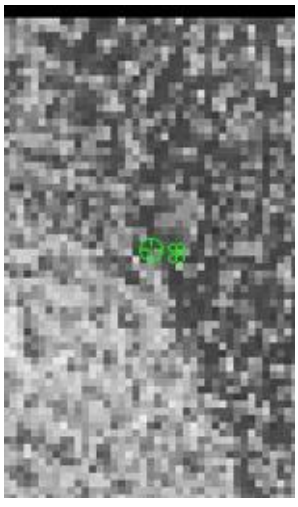
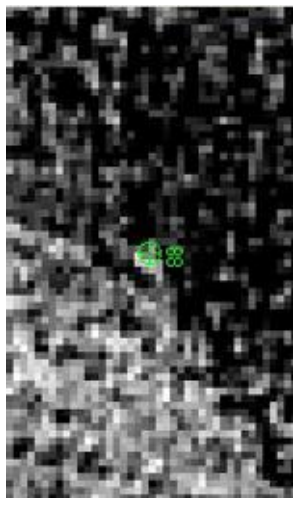
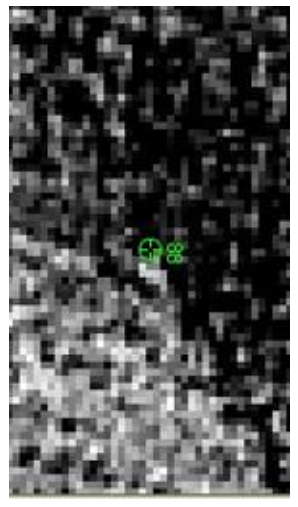
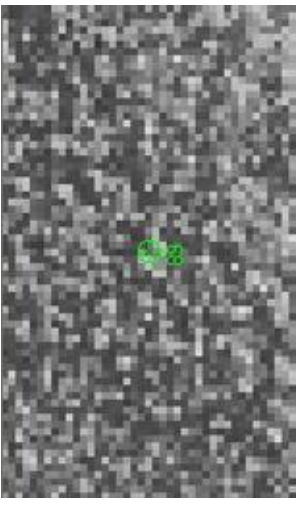
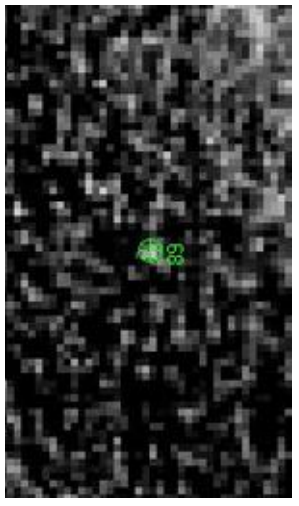
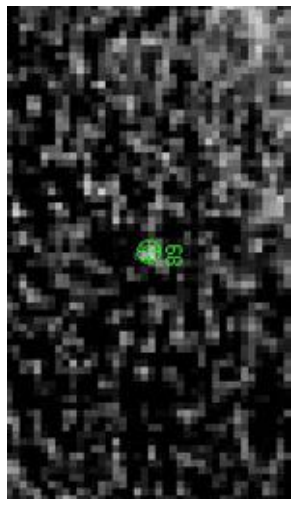
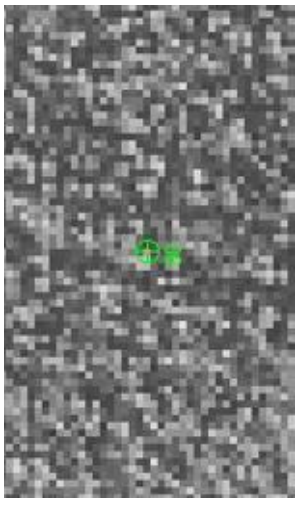
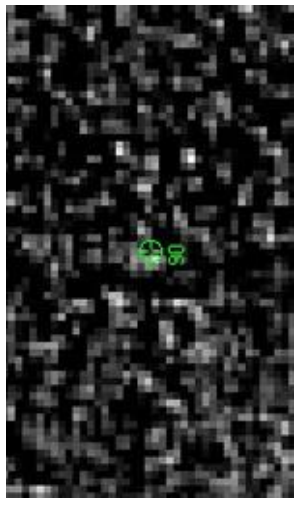
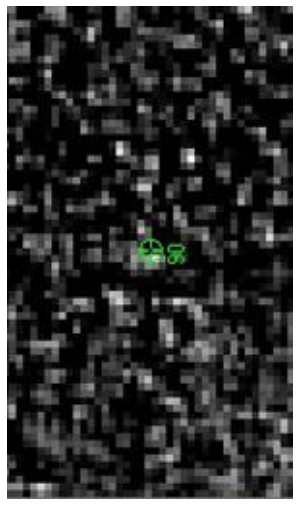


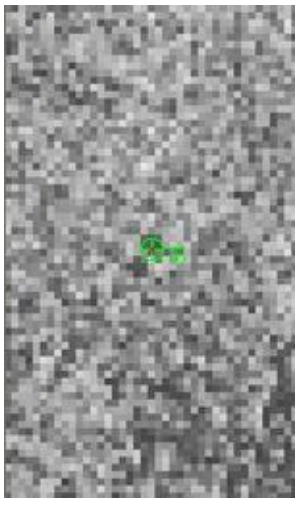
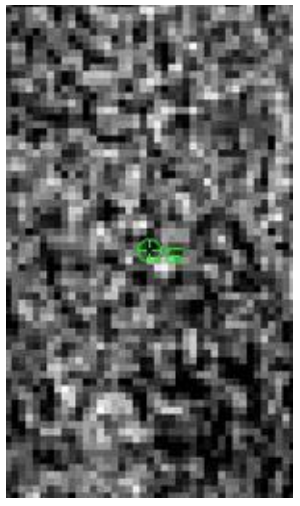
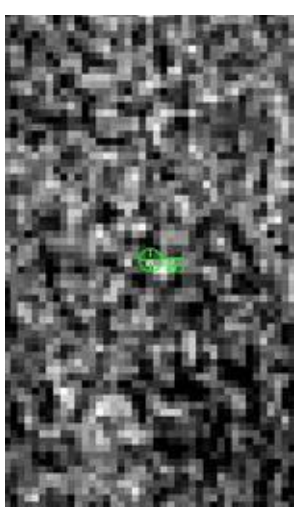
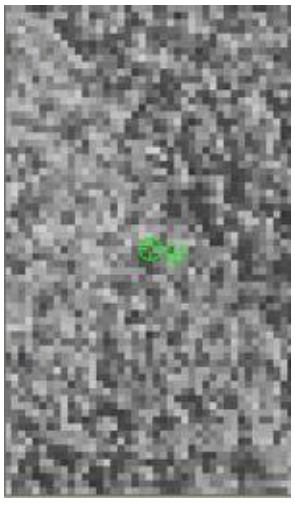
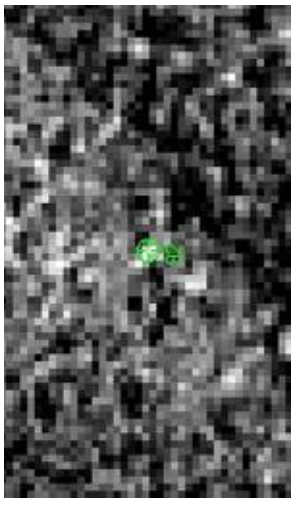
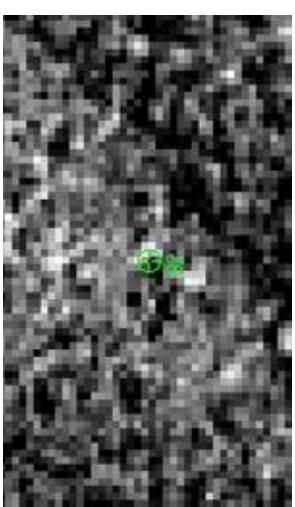
Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดได้โดยวิธีรีเวิร์ด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดได้โดยวิธีรีเวิร์ด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
76			
77			
78			

Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธสีเชิงเลข	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดรหัสโดยวิธีรังกวด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดรหัสโดยวิธีรังกวด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
79			
80			
81			

<p>Point ID</p>	<p>จุดเด่นรูปภาพออร์โธรีเฟอเรนซ์</p>	<p>จุดเด่นรูปภาพถ่ายดาวเทียมเรโซลูชันโดยวีธีร์วัด GCPs ชัดใหม่ตีแบบที่ 1</p>	<p>จุดเด่นรูปภาพถ่ายดาวเทียมเรโซลูชันโดยวีธีร์วัด GCPs ชัดใหม่ตีแบบที่ 2</p>
<p>82</p>			
<p>83</p>			
<p>84</p>			

Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธสีเชิงเลข	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
85			
86			
87			

Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธสีเชิงเทา	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
88			
89			
90			

Point ID	จุดเด่นที่พบภาพออร์โธสตีเรอิก	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 1	จุดเด่นที่พบภาพถ่ายดาวเทียมที่ถอดสโคปโดยวิธีรังวัด GCPs ชุดใหม่แบบที่ 2
91			
92			

ภาคผนวก ข

ผลการปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมธีออส

ในการคำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมธีออส โดยใช้ GCPs ที่ได้จากวิธีรังวัดอัตโนมัติได้ผลดังนี้

1. ผลการตรวจหาจุดที่จับคู่ผิดด้วยวิธี standardize residual จากคู่จุดที่ได้จากวิธีรังวัด GCPs อัตโนมัติ แบบที่ 1

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)	$\left  \frac{v_x}{s^0} \right $	$\left  \frac{v_y}{s^0} \right $	remark
	X (pixels)	Y (pixels)					
1	484.9512	8136.0162	-3.1341	-0.4330	2.1372	0.2953	
2	489.6692	8214.1508	-2.9339	-0.4055	2.0007	0.2765	
3	685.3759	8459.6144	-2.3353	-0.2084	1.5925	0.1421	
4	831.5059	8088.8248	-2.6373	-0.3801	1.7984	0.2592	
5	1235.1171	8500.0231	-1.6956	0.0109	1.1563	0.0074	
6	1318.7942	8662.8490	-0.6730	0.0556	0.4589	0.0379	
7	1332.5417	8648.7625	-0.6359	0.0494	0.4336	0.0337	
8	1420.4473	8743.0657	-1.2265	0.2187	0.8364	0.1491	
9	1857.8318	8593.1106	-0.6322	0.2844	0.4311	0.1939	
10	5108.0178	4434.3982	2.0224	-0.5431	1.3791	0.3703	
11	5091.6009	3977.7320	0.9344	3.4016	0.6372	2.3196	
12	5371.1197	3790.2118	2.3706	-0.0506	1.6165	0.0345	
13	5786.3223	5027.2915	0.6606	1.6840	0.4505	1.1483	
14	6085.5207	4009.3358	-1.2332	-0.7558	0.8409	0.5154	
15	6229.6008	4985.4269	0.6681	1.3217	0.4556	0.9013	
16	6211.4104	5016.1542	1.6432	1.1746	1.1205	0.8010	
17	6173.6605	4057.7410	1.4379	-1.2170	0.9805	0.8299	
18	6255.6137	4307.7301	1.0014	-2.0587	0.6829	1.4039	
19	526.3087	3885.9326	1.1709	-0.2159	0.7985	0.1472	
20	574.0563	4052.3059	0.1391	0.0025	0.0949	0.0017	
21	970.4365	4511.5622	0.9163	0.4962	0.6248	0.3384	
22	1236.4723	4207.2446	1.0084	0.4279	0.6876	0.2918	
23	1072.0730	4306.3253	0.9359	-0.6061	0.6382	0.4133	



Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)	$\left  \frac{v_x}{s^0} \right $	$\left  \frac{v_y}{s^0} \right $	remark
	X (pixels)	Y (pixels)					
24	1599.6862	3556.5731	1.1707	-1.6891	0.7983	1.1518	
25	1701.1938	3870.4386	1.2130	-1.5624	0.8272	1.0654	
26	1821.4567	4436.9300	1.3982	-0.1537	0.9535	0.1048	
27	1968.8733	4024.0365	1.6950	-0.3869	1.1558	0.2638	
28	10527.1660	841.6392	0.1672	0.5021	0.1140	0.3424	
29	10516.4486	829.2996	-0.0589	0.4966	0.0402	0.3386	
30	10779.8180	185.3016	0.2419	0.4882	0.1650	0.3329	
31	10695.4923	591.4230	1.0425	0.4861	0.7109	0.3315	
32	10946.9661	284.6037	0.0180	0.4337	0.0123	0.2957	
33	10879.2194	214.0747	-0.1299	0.4542	0.0886	0.3097	
34	11155.1843	818.8020	2.0728	0.4095	1.4135	0.2792	
35	11418.9103	773.6266	0.0584	0.2862	0.0398	0.1952	
36	11659.0403	183.0817	1.3677	0.3023	0.9327	0.2061	
37	11687.4066	166.7809	0.8669	0.2839	0.5912	0.1936	
38	11695.1544	154.6202	0.6664	0.2788	0.4544	0.1901	
39	231.6703	1589.8792	0.4339	0.7487	0.2959	0.5105	
40	293.0885	1507.5895	-0.1247	0.8777	0.0850	0.5985	
41	478.3778	1579.9733	1.4355	0.8430	0.9789	0.5749	
42	394.5211	1650.7324	2.3439	0.7357	1.5983	0.5017	
43	638.1121	444.3853	-0.0760	-1.0430	0.0518	0.7112	
44	658.4491	473.2128	-0.5280	-1.0665	0.3601	0.7273	
45	882.1894	1122.7257	0.3891	0.4129	0.2653	0.2816	
46	1038.5483	497.7497	-0.9954	-1.0305	0.6788	0.7027	
47	1155.7697	805.2213	0.0035	-0.0824	0.0024	0.0562	
48	9778.1279	10126.4433	0.6099	0.5850	0.4159	0.3989	
49	9742.3610	10087.9772	3.9045	1.0755	2.6625	0.7334	outlier
50	9878.7790	10424.5276	2.9064	0.1969	1.9819	0.1343	
51	10047.5390	11306.0684	4.1130	1.7848	2.8047	1.2171	outlier
52	10261.7096	10490.8902	1.3608	0.2707	0.9280	0.1846	

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)	$\left  \frac{v_x}{s^0} \right $	$\left  \frac{v_y}{s^0} \right $	remark
	X (pixels)	Y (pixels)					
53	10677.7711	10393.4887	0.2422	0.3858	0.1652	0.2631	
54	10563.3719	10629.5403	0.6263	1.2922	0.4271	0.8812	
55	10654.4536	10924.0732	-0.4788	-0.5856	0.3265	0.3993	
56	10904.4217	10445.7613	-1.3889	-0.5070	0.9471	0.3457	
57	9052.1449	7255.4376	3.0029	-5.2155	2.0477	3.5565	outlier
58	9738.3168	8408.4050	-0.3296	1.0902	0.2248	0.7434	
59	9769.3691	7443.4854	0.4149	-4.3249	0.2829	2.9492	outlier
60	10123.1443	8298.7878	0.3637	0.8574	0.2480	0.5847	
61	10232.3047	7909.8611	0.8141	-1.3497	0.5551	0.9204	
62	10378.4238	7973.4002	-0.5729	-1.2007	0.3907	0.8188	
63	10227.7494	8309.7720	-1.4883	0.0308	1.0149	0.0210	
64	10396.2614	7979.6610	-1.5567	-1.0406	1.0615	0.7096	
65	10668.6580	8126.7267	-0.1633	-1.1917	0.1114	0.8126	
66	67.9736	10640.9563	0.0857	0.0364	0.0584	0.0248	
67	591.9529	11665.5543	2.1246	0.9171	1.4488	0.6254	
68	1105.5876	11683.5161	0.7348	-0.4591	0.5011	0.3131	
69	1234.6631	11658.7096	-0.2228	-1.2738	0.1519	0.8686	
70	1165.3020	10768.9828	1.0662	0.9234	0.7271	0.6297	
71	1323.8506	10383.2436	-1.7104	0.5225	1.1663	0.3563	
72	1465.8089	10511.2019	0.2119	0.3169	0.1445	0.2161	
73	1601.8308	11522.4918	1.0486	-0.1107	0.7151	0.0755	
74	1616.1797	11519.2907	-2.2960	-0.5910	1.5657	0.4030	
75	4898.9858	8343.2467	-1.9495	0.4427	1.3294	0.3019	
76	5030.7688	8695.3977	-1.0083	0.3612	0.6876	0.2463	
77	5532.1689	8307.2428	-1.6622	0.0955	1.1335	0.0651	
78	5562.7517	8725.7822	0.8756	0.8347	0.5971	0.5692	
79	5977.4268	8473.6802	-0.2628	1.7321	0.1792	1.1811	
80	6128.5331	8518.4320	1.0625	0.4572	0.7245	0.3118	
81	6095.4432	8665.2299	2.4202	1.2882	1.6504	0.8784	

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)	$\left  \frac{v_x}{s^0} \right $	$\left  \frac{v_y}{s^0} \right $	remark
	X (pixels)	Y (pixels)					
82	6128.7259	7888.5253	-3.7892	-0.0391	2.5839	0.0267	outlier
83	6366.8699	8254.3766	-0.9988	0.5430	0.6811	0.3703	
84	9522.7278	3183.6153	-1.9405	0.2883	1.3233	0.1966	
85	10076.0668	3408.6581	-4.7275	-1.2956	3.2238	0.8835	outlier
86	10342.8301	3537.6564	-2.2121	-0.2601	1.5085	0.1774	
87	10257.2240	3477.8479	-1.2210	-0.4327	0.8326	0.2951	
88	10604.3088	3624.5340	1.8439	-0.9221	1.2574	0.6288	
89	10583.6250	3679.5937	-2.3550	-0.8280	1.6059	0.5646	
90	10606.2342	4054.4298	-2.8961	0.2894	1.9749	0.1973	
91	10681.4297	4098.8499	-3.3108	0.4784	2.2577	0.3262	
92	10688.8962	4243.4258	-3.8077	1.3007	2.5965	0.8870	outlier
RMSE				1.7034	1.1222		
ผลรวม RMSE				2.0398			

2. ผลการคำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมธีออสโดยใช้ GCPs ที่ได้ จากวิธีรังวัดอัตโนมัติแบบที่ 1

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)
	x (pixels)	y (pixels)		
1	484.9512	8136.0162	-3.0711	-0.4148
2	489.6692	8214.1508	-2.8662	-0.3820
3	685.3759	8459.6144	-2.2518	-0.1805
4	831.5059	8088.8248	-2.5746	-0.3958
5	1235.1171	8500.0231	-1.6045	0.0099
6	1318.7942	8662.849	-0.5709	0.0712
7	1332.5417	8648.7625	-0.5345	0.0637
8	1420.4473	8743.0657	-1.1189	0.2328

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)
	x (pixels)	y (pixels)		
9	1857.8318	8593.1106	-0.5275	0.2844
10	5108.0178	4434.3982	1.9265	-0.6721
11	5091.6009	3977.732	0.8122	3.2697
12	5371.1197	3790.2118	2.2394	-0.1932
13	5786.3223	5027.2915	0.6058	1.5497
14	6085.5207	4009.3358	-1.3457	-0.9116
15	6229.6008	4985.4269	0.6140	1.1633
16	6211.4104	5016.1542	1.5905	1.0134
17	6173.6605	4057.741	1.3288	-1.3779
18	6255.6137	4307.7301	0.9077	-2.2177
19	526.3087	3885.9326	1.0071	-0.2495
20	574.0563	4052.3059	-0.0161	-0.0401
21	970.4365	4511.5622	0.7916	0.4553
22	1236.4723	4207.2446	0.8567	0.3863
23	1072.073	4306.3253	0.8014	-0.6617
24	1599.6862	3556.5731	0.9968	-1.7555
25	1701.1938	3870.4386	1.0561	-1.6384
26	1821.4567	4436.93	1.2743	-0.2116
27	1968.8733	4024.0365	1.5494	-0.4562
28	10527.166	841.6392	-0.0986	0.4193
29	10516.449	829.2996	-0.3255	0.4080
30	10779.818	185.3016	-0.0596	0.4022
31	10695.492	591.423	0.7673	0.4179
32	10946.966	284.6037	-0.2769	0.3379

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)
	x (pixels)	y (pixels)		
33	10879.219	214.0747	-0.4298	0.3572
34	11155.184	818.802	1.8158	0.3518
35	11418.91	773.6266	-0.2038	0.1702
36	11659.04	183.0817	1.0707	0.2071
37	11687.407	166.7809	0.5680	0.1755
38	11695.154	154.6202	0.3665	0.1653
39	231.6703	1589.8792	0.1501	0.7088
40	293.0885	1507.5895	-0.4123	0.8357
41	478.3778	1579.9733	1.1528	0.8009
42	394.5211	1650.7324	2.0641	0.7120
43	638.1121	444.3853	-0.4112	-0.9590
44	658.4491	473.2128	-0.8628	-1.0002
45	882.1894	1122.7257	0.0832	0.3844
46	1038.5483	497.7497	-1.3326	-1.0218
47	1155.7697	805.2213	-0.3149	-0.0750
48	9778.1279	10126.443	0.9206	0.4165
49	9742.361	10087.977	outlier	
50	9878.779	10424.528	3.2239	0.0529
51	10047.539	11306.068	outlier	
52	10261.71	10490.89	1.7026	0.0990
53	10677.771	10393.489	0.5851	0.2100
54	10563.372	10629.54	0.9822	1.1204
55	10654.454	10924.073	-0.1054	-0.7453
56	10904.422	10445.761	-1.0523	-0.6787

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)
	x (pixels)	y (pixels)		
57	9052.1449	7255.4376	outlier	
58	9738.3168	8408.405	-0.1336	0.8805
59	9769.3691	7443.4854	outlier	
60	10123.144	8298.7878	0.5587	0.6451
61	10232.305	7909.8611	0.9860	-1.5644
62	10378.424	7973.4002	-0.3952	-1.4234
63	10227.749	8309.772	-1.2920	-0.1944
64	10396.261	7979.661	-1.3782	-1.2618
65	10668.658	8126.7267	0.0292	-1.4070
66	67.9736	10640.956	0.2767	0.0918
67	591.9529	11665.554	2.3850	0.9705
68	1105.5876	11683.516	0.9966	-0.4089
69	1234.6631	11658.71	0.0388	-1.2371
70	1165.302	10768.983	1.2801	0.9653
71	1323.8506	10383.244	-1.5154	0.5539
72	1465.8089	10511.202	0.4162	0.3511
73	1601.8308	11522.492	1.3093	-0.0726
74	1616.1797	11519.291	-2.0354	-0.5536
75	4898.9858	8343.2467	-1.8220	0.3541
76	5030.7688	8695.3977	-0.8585	0.2773
77	5532.1689	8307.2428	-1.5287	-0.0084
78	5562.7517	8725.7822	1.0344	0.7397
79	5977.4268	8473.6802	-0.1132	1.6257
80	6128.5331	8518.432	1.2167	0.3476

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)
	x (pixels)	y (pixels)		
81	6095.4432	8665.2299	2.5826	1.1787
82	6128.7259	7888.5253	outlier	
83	6366.8699	8254.3766	-0.8573	0.4224
84	9522.7278	3183.6153	-2.0730	0.0750
85	10076.067	3408.6581	outlier	
86	10342.83	3537.6564	-2.3101	-0.4101
87	10257.224	3477.8479	-1.3238	-0.5840
88	10604.309	3624.534	1.7687	-0.9550
89	10583.625	3679.5937	-2.4409	-0.9237
90	10606.234	4054.4298	-2.9577	0.1734
91	10681.43	4098.8499	-3.3691	0.3779
92	10688.896	4243.4258	outlier	
RMSE			1.4645	0.8538
ผลรวม RMSE			1.6952	

3. ผลการตรวจหาจุดที่จับคู่ผิดด้วยวิธี standardize residual จากคู่จุดที่ได้จาก วิธีรังวัด GCPs อัตราโนมิติ แบบที่ 2

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)	$\left  \frac{v_x}{s^0} \right $	$\left  \frac{v_y}{s^0} \right $	remark
	x (pixels)	y (pixels)					
1	483.6642	8135.2155	-2.1689	0.2859	1.7602	0.2320	
2	488.6267	8214.3108	-2.2801	-0.6515	1.8504	0.5287	
3	685.3759	8459.6144	-2.6241	-0.2963	2.1296	0.2405	
4	831.5059	8088.8248	-1.9481	-0.4256	1.5810	0.3454	
5	1235.1171	8500.0231	-1.5755	-0.0653	1.2786	0.0530	
6	1318.7942	8662.8490	-1.0607	-0.0414	0.8608	0.0336	
7	1332.5417	8648.7625	-1.0034	-0.0465	0.8143	0.0377	

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)	$\left  \frac{v_x}{s^0} \right $	$\left  \frac{v_y}{s^0} \right $	remark
	x (pixels)	y (pixels)					
8	1419.4048	8743.2256	-0.5542	-0.0401	0.4498	0.0325	
9	1856.7893	8593.2706	0.3045	0.0432	0.2471	0.0351	
10	5105.9322	4434.7173	4.0585	-0.7711	3.2937	0.6258	outlier
11	5088.4066	3982.2138	4.2876	-0.9633	3.4797	0.7818	outlier
12	5371.1197	3790.2118	2.2739	0.0642	1.8454	0.0521	
13	5785.5237	5028.4117	1.0223	0.6226	0.8297	0.5053	
14	6084.2336	4008.5344	0.0214	0.1590	0.0174	0.1290	
15	6227.5152	4985.7459	2.9075	1.0834	2.3596	0.8792	
16	6213.7402	5016.7958	-0.4445	0.6145	0.3607	0.4987	
17	6174.4592	4056.6206	0.7254	0.0187	0.5887	0.0152	
18	6256.4123	4306.6098	0.2895	-0.8317	0.2349	0.6750	
19	526.3087	3885.9326	0.6084	-0.1485	0.4938	0.1205	
20	573.0135	4052.4658	0.8136	-0.0915	0.6603	0.0743	
21	970.4365	4511.5622	0.3320	0.5390	0.2694	0.4374	
22	1236.4723	4207.2446	0.4860	0.4988	0.3944	0.4048	
23	1071.8286	4305.3646	0.8051	0.4118	0.6534	0.3342	
24	1599.4418	3555.6122	1.3250	-0.6257	1.0753	0.5078	
25	1700.9494	3869.4778	1.7198	-0.4999	1.3957	0.4057	
26	1823.2978	4435.6495	-1.0493	1.1770	0.8516	0.9552	
27	1969.9161	4023.8766	0.2566	-0.1530	0.2082	0.1242	
28	10527.1660	841.6392	0.6655	0.8637	0.5401	0.7009	
29	10516.4486	829.2996	0.5438	0.8605	0.4413	0.6983	
30	10781.1051	186.1037	-1.0109	0.0569	0.8204	0.0462	
31	10696.7794	592.2249	-0.8573	0.0210	0.6958	0.0170	
32	10947.2101	285.5647	0.2544	-0.1462	0.2065	0.1187	
33	10880.5065	214.8768	-0.7817	0.0401	0.6344	0.0325	
34	11155.1843	818.8020	1.1650	0.7379	0.9455	0.5989	
35	11420.1973	774.4285	-0.5045	-0.1468	0.4094	0.1191	
36	11660.3274	183.8838	-0.1493	-0.1278	0.1212	0.1037	



Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)	$\left  \frac{v_x}{s^0} \right $	$\left  \frac{v_y}{s^0} \right $	remark
	x (pixels)	y (pixels)					
37	11687.6506	167.7419	0.3957	-0.3088	0.3211	0.2506	
38	11695.3984	155.5812	0.2344	-0.3139	0.1902	0.2547	
39	230.8718	1590.9999	0.7663	-0.2086	0.6219	0.1693	
40	291.2471	1508.8702	1.3915	-0.2293	1.1293	0.1861	
41	477.3349	1580.1333	2.5720	0.8761	2.0873	0.7110	
42	395.5640	1650.5724	0.7879	1.0622	0.6394	0.8620	
43	638.1121	444.3853	-1.5437	-0.8249	1.2528	0.6695	
44	658.4491	473.2128	-1.3553	-0.8290	1.0999	0.6728	
45	882.1894	1122.7257	0.4267	0.6113	0.3463	0.4961	
46	1037.5054	497.9097	-0.5781	-0.9610	0.4692	0.7799	
47	1155.7697	805.2213	-0.4980	0.1394	0.4042	0.1131	
48	9779.1705	10126.2843	-0.0005	0.6679	0.0004	0.5420	
49	9743.4037	10087.8181	3.3975	1.1626	2.7573	0.9435	outlier
50	9878.7790	10424.5276	3.5016	0.1346	2.8418	0.1092	outlier
51	10047.7832	11307.0292	4.2728	0.7124	3.4676	0.5782	outlier
52	10265.0817	10491.3740	-1.4340	-0.2928	1.1638	0.2376	
53	10678.0153	10394.4497	0.5284	-0.6479	0.4288	0.5258	
54	10563.6161	10630.5012	0.9324	0.2492	0.7567	0.2022	
55	10654.4536	10924.0732	0.0109	-0.6756	0.0088	0.5483	
56	10904.4217	10445.7613	-0.4066	-0.5655	0.3300	0.4589	
57	9055.0951	7249.9958	-0.7805	0.2072	0.6334	0.1682	
58	9739.6036	8409.2066	-0.9718	0.2762	0.7887	0.2242	
59	9770.4781	7439.3232	-0.1870	-0.1405	0.1518	0.1140	
60	10123.1443	8298.7878	0.7481	0.8450	0.6071	0.6858	
61	10233.3474	7909.7020	0.0481	-1.1897	0.0390	0.9655	
62	10379.4666	7973.2411	-1.2418	-1.0408	1.0078	0.8447	
63	10227.7494	8309.7720	-0.6838	0.0297	0.5549	0.0241	
64	10396.0174	7978.7002	-0.9964	-0.0804	0.8086	0.0652	
65	10668.6580	8126.7267	0.5635	-1.1777	0.4573	0.9558	

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)	$\left  \frac{v_x}{s^0} \right $	$\left  \frac{v_y}{s^0} \right $	remark
	x (pixels)	y (pixels)					
66	67.9736	10640.9563	-0.1994	-0.1397	0.1618	0.1134	
67	592.1974	11666.5149	1.6561	-0.2501	1.3440	0.2030	
68	1106.6300	11683.3561	-0.5471	-0.5053	0.4440	0.4101	
69	1234.4186	11657.7490	0.1829	-0.5049	0.1484	0.4098	
70	1165.5465	10769.9435	0.4259	-0.2146	0.3456	0.1742	
71	1323.6061	10382.2827	-1.5934	1.3315	1.2931	1.0806	
72	1466.8514	10511.0419	-1.1360	0.3152	0.9219	0.2558	
73	1602.8732	11522.3317	-0.3998	-0.1552	0.3245	0.1260	
74	1612.8081	11518.8102	0.7090	-0.3134	0.5754	0.2543	
75	4899.2301	8344.2075	-1.8719	-0.5639	1.5192	0.4576	
76	5030.7688	8695.3977	-0.9458	0.2941	0.7676	0.2387	
77	5529.0410	8307.7214	1.7018	-0.4277	1.3811	0.3471	
78	5563.7943	8725.6226	-0.0464	0.9315	0.0377	0.7560	
79	5983.1284	8474.8041	-5.9040	0.5552	4.7915	0.4506	outlier
80	6128.5331	8518.4320	1.1764	0.4054	0.9547	0.3290	
81	6096.9742	8666.9919	1.0248	-0.5314	0.8317	0.4313	
82	6124.3110	7888.2026	0.8829	0.2584	0.7165	0.2097	
83	6365.5831	8253.5753	0.3439	1.3006	0.2791	1.0555	
84	9519.5989	3184.0926	1.0672	-0.0152	0.8661	0.0123	
85	10075.0238	3408.8173	-3.1707	-1.2565	2.5732	1.0197	outlier
86	10342.8301	3537.6564	-1.6641	-0.0411	1.3505	0.0334	
87	10257.4681	3478.8088	-1.6806	-1.2009	1.3639	0.9746	
88	10606.3946	3624.2158	-0.8470	-0.3759	0.6874	0.3051	
89	10583.6250	3679.5937	-1.5853	-0.5791	1.2866	0.4700	
90	10606.2342	4054.4298	-2.0416	0.5184	1.6569	0.4207	
91	10680.3868	4099.0090	-1.4581	0.5516	1.1833	0.4477	
92	10686.8105	4243.7440	-0.9730	1.1888	0.7897	0.9648	

RMSE	1.5983	0.6188
ผลรวม RMSE	1.7139	

4. ผลการคำนวณปรับแก้เชิงเรขาคณิตของภาพถ่ายดาวเทียมรีโอสโดยใช้ GCPs ที่ได้  
จากวิธีรังวัดอัตโนมัติแบบที่ 2

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)
	x (pixels)	y (pixels)		
1	483.6642	8135.2155	2.0666	0.3070
2	488.6267	8214.3108	2.1756	0.6269
3	685.3759	8459.6144	2.5107	0.2611
4	831.5059	8088.8248	1.8443	0.4038
5	1235.1171	8500.0231	1.4535	0.0333
6	1318.7942	8662.8490	0.9324	0.0047
7	1332.5417	8648.7625	0.8754	0.0102
8	1419.4048	8743.2256	0.4220	0.0014
9	1856.7893	8593.2706	0.4369	0.0808
10	5105.9322	4434.7173	outlier	
11	5088.4066	3982.2138	outlier	
12	5371.1197	3790.2118	2.2989	0.0163
13	5785.5237	5028.4117	1.1029	0.5664
14	6084.2336	4008.5344	0.0697	0.0839
15	6227.5152	4985.7459	2.9966	1.0269
16	6213.7402	5016.7958	0.3544	0.5580
17	6174.4592	4056.6206	0.7777	0.0557
18	6256.4123	4306.6098	0.3529	0.8999
19	526.3087	3885.9326	0.5703	0.2292
20	573.0135	4052.4658	0.7820	0.1711
21	970.4365	4511.5622	0.3232	0.4646
22	1236.4723	4207.2446	0.4660	0.4192
23	1071.8286	4305.3646	0.7910	0.3305
24	1599.4418	3555.6122	1.2839	0.7103
25	1700.9494	3869.4778	1.6906	0.5781
26	1823.2978	4435.6495	1.0561	1.1051

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)
	x (pixels)	y (pixels)		
27	1969.9161	4023.8766	0.2368	0.2329
28	10527.1660	841.6392	0.6841	0.8462
29	10516.4486	829.2996	0.5622	0.8408
30	10781.1051	186.1037	1.0117	0.0280
31	10696.7794	592.2249	0.8439	0.0012
32	10947.2101	285.5647	0.2627	0.1709
33	10880.5065	214.8768	0.7788	0.0148
34	11155.1843	818.8020	1.2017	0.7277
35	11420.1973	774.4285	0.4583	0.1666
36	11660.3274	183.8838	0.1204	0.1543
37	11687.6506	167.7419	0.4268	0.3433
38	11695.3984	155.5812	0.2658	0.3509
39	230.8718	1590.9999	0.6508	0.3341
40	291.2471	1508.8702	1.2727	0.3539
41	477.3349	1580.1333	2.4538	0.7632
42	395.5640	1650.5724	0.6722	0.9485
43	638.1121	444.3853	1.7162	0.9022
44	658.4491	473.2128	1.5269	0.9050
45	882.1894	1122.7257	0.2780	0.5208
46	1037.5054	497.9097	0.7379	1.0674
47	1155.7697	805.2213	0.6489	0.0444
48	9779.1705	10126.2843	0.4007	0.7307
49	9743.4037	10087.8181	outlier	
50	9878.7790	10424.5276	outlier	
51	10047.7832	11307.0292	outlier	
52	10265.0817	10491.3740	1.0002	0.2178
53	10678.0153	10394.4497	0.9745	0.5723
54	10563.6161	10630.5012	1.3834	0.3298
55	10654.4536	10924.0732	0.4711	0.5779

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)
	x (pixels)	y (pixels)		
56	10904.4217	10445.7613	0.0380	0.4703
57	9055.0951	7249.9958	0.5148	0.1907
58	9739.6036	8409.2066	0.6432	0.2947
59	9770.4781	7439.3232	0.1033	0.1411
60	10123.1443	8298.7878	1.0867	0.8614
61	10233.3474	7909.7020	0.3748	1.1809
62	10379.4666	7973.2411	0.9065	1.0325
63	10227.7494	8309.7720	0.3407	0.0459
64	10396.0174	7978.7002	0.6602	0.0719
65	10668.6580	8126.7267	0.9133	1.1536
66	67.9736	10640.9563	0.0183	0.0610
67	592.1974	11666.5149	1.8867	0.1589
68	1106.6300	11683.3561	0.3198	0.4004
69	1234.4186	11657.7490	0.4110	0.4001
70	1165.5465	10769.9435	0.6235	0.1310
71	1323.6061	10382.2827	1.4074	1.4094
72	1466.8514	10511.0419	0.9436	0.3953
73	1602.8732	11522.3317	0.1701	0.0571
74	1612.8081	11518.8102	0.9387	0.2150
75	4899.2301	8344.2075	1.6912	0.5396
76	5030.7688	8695.3977	0.7488	0.3242
77	5529.0410	8307.7214	1.8965	0.4066
78	5563.7943	8725.6226	0.1644	0.9631
79	5983.1284	8474.8041	outlier	
80	6128.5331	8518.4320	1.3940	0.4319
81	6096.9742	8666.9919	1.2473	0.5025
82	6124.3110	7888.2026	1.0773	0.2690
83	6365.5831	8253.5753	0.5585	1.3184
84	9519.5989	3184.0926	1.1747	0.0946

Point ID	ค่าพิกัดภาพ		Residual x (pixels)	Residual y (pixels)
	x (pixels)	y (pixels)		
85	10075.0238	3408.8173	outlier	
86	10342.8301	3537.6564	1.5289	0.0555
87	10257.4681	3478.8088	1.5477	1.2293
88	10606.3946	3624.2158	0.7154	0.3244
89	10583.6250	3679.5937	1.4436	0.5556
90	10606.2342	4054.4298	1.8801	0.5370
91	10680.3868	4099.0090	1.2948	0.5807
92	10686.8105	4243.7440	0.7945	1.1906
RMSE			1.1361	0.5892
ผลรวม RMSE			1.2798	

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ: เรืออากาศเอก พงศ์ธร อ่อนสำลี

วันเดือนปีเกิด: 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2521

คุณวุฒิทางการศึกษา:  
พ.ศ. 2545 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) โรงเรียนนายเรืออากาศ

ประสบการณ์ทำงาน:  
พ.ศ. 2545 - ปัจจุบัน นายทหารถ่ายภาพทางอากาศ แผนกถ่ายภาพทางอากาศ กองปฏิบัติการ กองการลาดตระเวนทางอากาศ กรมควบคุมการปฏิบัติทางอากาศ

### ผลงานทางวิชาการ: บทความตีพิมพ์

พงศ์ธร อ่อนสำลี และกนก วีรวงศ์. การศึกษาเทคนิคการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินอัตโนมัติบนภาพถ่ายดาวเทียมธีออสโดยใช้ภาพออร์โธเชิงเลข. วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย. 13 (1) 2555