

# การหาตำแหน่งของจุดดัชนีโดยอัตโนมัติด้วยเทคนิคการจับคู่ภาพ

ไพศาล สันติธรรมนนท์<sup>1</sup> และ ชีระ ลิลิตวารังกูร<sup>2\*</sup>

*Santitamanon, P.<sup>1</sup> and Lilitwarangkul, T.<sup>2\*</sup> (2004). Automatic Position of Fiducial Marks by the Image - Matching Technique. Suranaree J. Sci. Technol. 11:81-90*

*Received: Aug 27, 2003; Revised: Nov 12, 2003; Accepted: Dec 9, 2003*

## Abstract

The paper was a study of automatically positioning of 8 fiducial marks on the digital aerial photograph using image matching technique. Four methods of finding center of fiducial marks were summarized and evaluated, namely, manual locating, center of gravity, correlation coefficient, and least square methods. All methods were then implemented and tested on 8-bit gray-scale images with the pixel size of 15, 30 and 60 micron. The positions given from those method were integer and decimal. The research was also to develop a computer program using C language to calculate the coordinate by center of gravity, correlation coefficient, and least square methods. Then the performances of each were compared considering of precision, time consuming, and reliability. The results revealed that when using implemented program to calculate the fiducial marks on the digital photo. By using center of gravity method as reference the center of fiducial marks from least square methods were within 0.2 pixel. The method of correlation coefficient with sub-pixel accuracy type were within 0.4 pixel. For time consumption, the center of gravity method took 1.5 second per 8 fiducial marks which was the fastest, while the correlation coefficient method and least square methods needed 1.7 and 4.2 seconds, respectively. In term of reliability, the coordinate calculated from center of gravity method was mostly closed to those from manual locating method and was assumed to be the most reliable.

## บทคัดย่อ

การหาตำแหน่งจุดดัชนีโดยอัตโนมัติด้วยเทคนิคการจับคู่ภาพ เป็นการศึกษาเพื่อหาตำแหน่งศูนย์กลางของจุดดัชนีทั้ง 8 จุดบนภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขด้วยวิธีต่าง ๆ 4 วิธีคือ วิธีการกำหนดเองด้วยมือ, วิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางวง วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และวิธีการลีสท์สแควร์ โดยใช้วัดจุดศูนย์กลางของจุดดัชนีของภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขชนิดภาพขาวดำ 8 บิต โดยภาพที่ใช้มีความละเอียดของจุดภาพเป็น 15, 30 และ 60 ไมครอน ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าตำแหน่งซึ่งมีทั้งแบบจำนวนเต็มและแบบจำนวนทศนิยมของจุดภาพ ในการวิจัยได้ทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณหาตำแหน่งจากวิธี

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

<sup>2\*</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

\* ผู้เขียนที่ให้การติดต่อ

วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 11:81-90

การวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลาง วิธีกรหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และวิธีการดิฟเฟอเรนเชียลด้วยภาษาซี ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดดัชนีด้วยวิธีจุดศูนย์กลาง และมีการเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการต่าง ๆ ในแง่ของความถูกต้องทางตำแหน่ง เวลาในการประมวลผลและความน่าเชื่อถือของโปรแกรม ผลจากการทดสอบพบว่า เมื่อใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อคำนวณหาค่าพิกัดที่เป็นตำแหน่งศูนย์กลางของจุดดัชนีโดยอัตโนมัติกับภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลข พบว่า ความแตกต่างของค่าพิกัดที่ได้จากวิธีการดิฟเฟอเรนเชียลมีความใกล้เคียงกับวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลาง โดยมีความแตกต่างเท่ากับ 0.2 จุดภาพ รองลงมาคือวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Sub pixel มีความแตกต่างเท่ากับ 0.4 จุดภาพ ในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางใช้เวลาที่น้อยที่สุด รองลงมาคือวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และวิธีการดิฟเฟอเรนเชียล โดยเวลาที่ใช้สำหรับแต่ละวิธีเป็น 1.5, 1.7 และ 4.2 วินาทีต่อทั้ง 8 จุดดัชนีบนภาพถ่ายทางอากาศ ตามลำดับ ในแง่ของความน่าเชื่อถือค่าพิกัดของจุดดัชนีที่ได้จากวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลาง มีความใกล้เคียงกับวิธีการกำหนดด้วยมือมากกว่าวิธีอื่น ๆ

## บทนำ

จากเดิมการสำรวจด้วยภาพถ่ายที่ใช้ภาพถ่ายจากฟิล์มและทำการร่างเป็นแผนที่โดยเครื่องร่างแผนที่โดยมนุษย์ ปัจจุบันก็เปลี่ยนเป็นงานสำรวจภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลข (digital photogrammetry) โดยอาศัยภาพถ่ายเชิงเลข (digital image) แสดงรูปลักษณะวัตถุและพื้นผิวของภาพตามค่าความสว่างภาพที่ได้จากการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ คล้ายกับการกระทำของมนุษย์ด้านการมองเห็น (vision) และการรับรู้ (recognition) (Kraus and Waldhaust, 1993) ซึ่งค่าความสว่างของภาพถ่ายเชิงเลขเป็นค่าที่จัดเก็บในจุดภาพ (pixel) แต่ละจุดไปตามแนวนอนและแนวตั้งที่มีลักษณะเป็นภาพแบบราสเตอร์ (raster) (Jensen, 1980)

จากเทคโนโลยีที่ทันสมัยนี้ ทำให้การสำรวจด้วยภาพถ่ายสามารถใช้ภาพถ่ายเชิงเลขในรูปแบบดิจิทัลทำการวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงเลขเพื่อทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพกับพิกัดภาพเชิงเลข จะทำให้การทำงานสามารถแปลงค่าพิกัดภาพเชิงเลขไปเป็นพิกัดภาพได้อย่างถูกต้องบนภาพถ่ายจากจุดดัชนี (fiducial mark) ที่กำหนดอยู่ตามบริเวณมุมและขอบของภาพที่จะแตกต่างกันไป

ตามกล้องแต่ละแบบ โดยที่จุดดัชนีมักจะมีรูปร่างและตำแหน่งที่ง่ายต่อการค้นหาและทำการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพกับพิกัดภาพเชิงเลข (Schickler et al., 1996) ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ของภาพสองภาพโดยวิธีการจับคู่จะทำให้เราสามารถ หาตำแหน่งของจุดดัชนีได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาการหาค่าพิกัดและตำแหน่งของจุดดัชนีจากกลุ่มของจุดภาพโดยอัตโนมัติ จากจุดดัชนีที่มีคุณสมบัติ คือ 1) มีลักษณะที่แน่นอนในแต่ละภาพถ่ายของกล้องแต่ละชนิด 2) มีความชัดเจนบนจุดง่ายต่อการทดสอบด้วยทฤษฎีต่าง ๆ เพื่อหาตำแหน่งค่าพิกัดของจุดดัชนีโดยวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลาง วิธีสหสัมพันธ์ และวิธีดิฟเฟอเรนเชียล

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อหาตำแหน่งค่าพิกัดของจุดดัชนีโดยวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลาง วิธีสหสัมพันธ์ และวิธีดิฟเฟอเรนเชียล
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการจับคู่ภาพเชิงสมรรถนะ
3. เพื่อตรวจสอบการคำนวณโดยการประเมิน

ผลเปรียบเทียบจากการใช้วิธีต่าง ๆ ในการจับคู่ภาพถ่าย

### ลักษณะของจุดดัชนี

ในส่วนของภาพที่ใช้ในการทำการวิจัยจะมีอยู่ 2 แบบคือ ภาพ Target matrix และภาพ Search matrix โดยรูปภาพที่เป็นตำแหน่งของจุดดัชนีที่เป็นเป้าหมายในการหาค่าพิกัดเรียกว่า Search matrix ส่วนรูปภาพที่เป็นบริเวณที่มีลักษณะคล้ายกับภาพ Search matrix ของจุดดัชนีที่มีขนาดภาพเล็กกว่าเรียกว่า Target matrix (รูปที่ 1)

### อุปกรณ์และวิธีการ

ในการวิจัยนี้ทำการเขียนโปรแกรมโดยภาษาซีเพื่อที่จะใช้ในการประมวลผลเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างภาพถ่ายเชิงเลขทั้งสองภาพที่จะทำการจับคู่เพื่อหาระดับศูนย์กลางของจุดดัชนีของภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขจากวิธีการทางทฤษฎีแบบต่าง ๆ (Schickler *et al.*, 1996) ดังนี้

- 1) การวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางถ่วง (Center of gravity methods, cg)
- 2) การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r)
- 3) การคำนวณโดยวิธีการลีสทส์แควร์ (Least Square Method, LSM)

เพื่อให้เราได้ตำแหน่งของจุดดัชนีที่ดีที่สุดโดยวิธีการคำนวณแต่ละวิธี ซึ่งจะทำให้เราทราบผลออกมาเป็นตัวเลขที่แสดงตำแหน่งเป็นค่าของจุดภาพทางแนวนอนและแนวตั้งของภาพถ่ายทางอากาศ



Target matrix



Search matrix

**Figure 1. Target matrix and Search matrix.**

เชิงเลข จากจุดดัชนีของภาพถ่ายที่อยู่บริเวณรอบ ๆ ของภาพถ่ายทางอากาศเพื่อนำไปใช้ในการหาค่าพิกัดบนภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขต่อไป

### อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบไปด้วย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ในการเขียนโปรแกรมและทำประมวลผลจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างภาพทั้งสองจะใช้แบบที่มีความเร็วของซีพียูระดับ Pentium III 500 MHz ขึ้นไปมีหน่วยความจำอย่างน้อย 256 Mbyte

2. ซอฟต์แวร์ในการเขียนโปรแกรมและประมวลผล

3. ตำราและเอกสารที่ใช้ในการอ้างอิงทฤษฎีที่จะใช้เขียนโปรแกรม

4. ภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขที่มีความเทา 256 ระดับ (8 บิต) ที่อยู่ในไฟล์รูปแบบ Bitmap (BMP) โดยมีความละเอียด 15 ไมครอน ขนาดของภาพ 15,232 x 15,232 จุดภาพ 30 ไมครอน ขนาดของภาพ 7,680 x 7,680 จุดภาพ และ 60 ไมครอน ขนาดของภาพ 3,840 x 3,840 จุดภาพ อีกทั้งภาพ Target matrix มีความละเอียด 15 ไมครอนขนาดของภาพ 19 x 19 จุดภาพ 30 ไมครอนขนาดของภาพ 9 x 9 จุดภาพ และ 60 ไมครอนขนาดของภาพ 5 x 5 จุดภาพ (รูปที่ 2-3)

วิธีการหาค่าตำแหน่งของจุดดัชนีโดยการประมวลผลด้วยโปรแกรม (Jinag *et al.*, 2001)

1. ทำการกำหนดขอบเขตของจุดดัชนีทั้ง 8 จุดบนภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขที่ทำการ Search จากขนาดของภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขที่ทราบโดยประมาณ ซึ่งตำแหน่งของจุดดัชนีที่อยู่บริเวณมุมของภาพถ่ายจะใช้ขนาดของภาพถ่ายที่เริ่มต้นศูนย์กลางและขนาดทั้งหมดมากำหนดตำแหน่งโดยประมาณ ส่วนจุดดัชนีที่อยู่บริเวณกึ่งกลางภาพจะใช้ขนาดของภาพหารสองมากำหนดตำแหน่งโดยประมาณ (รูปที่ 4)

โดยที่

$m, n$  = ขนาดของภาพถ่ายทางอากาศ  
เชิงเลข

$a, b$  = ขนาดของภาพ Search matrix

2. นำภาพ Target matrix มาทำการค้นหาจากขอบเขตของจุดที่กำหนดโดยวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ก่อน เพื่อหาค่าสหสัมพันธ์มากที่สุดของจุดที่เป็นตำแหน่งพิกัดของจุดดัชนี (รูปที่ 5)

3. หลังจากนั้นทำการหาค่าพิกัดของจุดดัชนีโดยวิธีการวัดจุดศูนย์กลาง

4. จากนั้นก็ทำการหาค่าพิกัดโดยวิธีการลิสต์สแควร์โดยการหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 8 ค่าแล้วนำมาหาค่าพิกัดของจุดดัชนี

### ทฤษฎีการจับคู่ภาพ

ภาพที่เป็นบริเวณจุดดัชนีที่สนใจทั้งสองภาพ คือ Target matrix และ Search matrix ที่มีลักษณะ



Figure 2. Image for test.

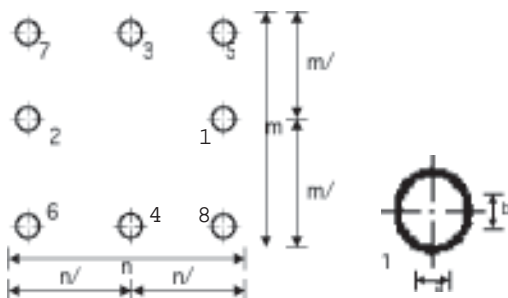


Figure 4. Limits area of fiducial marks for search matrix.

คล้ายคลึงกันและความสว่างใกล้เคียงกันแต่มีขนาดต่างกัน ก็สามารถที่จะนำมาหาความสัมพันธ์ของตำแหน่งค่าพิกัดจากภาพ Target matrix เพื่อหาตำแหน่งที่เป็นศูนย์กลางของจุดดัชนีได้จากมี 2 วิธีคือ

### การหาตำแหน่งของจุดดัชนีโดยการกำหนดเอง (Manual location)

การกำหนดตำแหน่งศูนย์กลางของจุดดัชนีโดยการกำหนดเอง จะทำโดยการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยในการแสดงภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ทำให้การแสดงผลออกมาอาจมีความละเอียดที่ดีหรือไม่ดีขึ้นอยู่กับความละเอียดของภาพและความละเอียดของจอภาพที่แสดงผล การหาตำแหน่งทำได้โดยการแสดงตำแหน่งภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขออกมาให้เห็นบนจอภาพแล้วจึงทำการซูมไปที่ตำแหน่งของจุดดัชนีจนเข้าใกล้จุดกึ่งกลาง เมื่อเห็นเด่นชัดแล้วจึงทำการชี้ไปยังตำแหน่งกึ่งกลางของจุดดัชนีเพื่อ



Figure 3. Target matrix for test resolution at 60, 30 and 15  $\mu\text{m}$ .

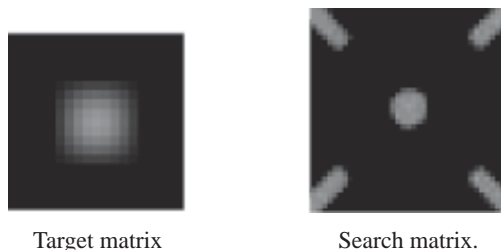


Figure 5. Fiducial mark in target matrix and search matrix.

กำหนดตำแหน่งของจุดที่ใช้เป็นตำแหน่งศูนย์กลางของจุดคั่นนี้โดยประมาณ

**การหาค่าตำแหน่งของจุดคั่นนี้โดยอัตโนมัติ (Automatic location)** (Jinag et al., 2001)

เป็นการหาค่าตำแหน่งศูนย์กลางของจุดคั่นนี้จากภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขอัตโนมัติ จากการคำนวณโดยใช้สูตรซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประมวลผลโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้การคำนวณมีความรวดเร็วและถูกต้องยิ่งขึ้น เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าตำแหน่งศูนย์กลางของจุดคั่นนี้ โดยค่าตำแหน่งศูนย์กลางของจุดคั่นนี้ที่ได้จะมีทั้งที่เป็นค่าจำนวนเต็มและค่าที่เป็นทศนิยม ขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ในการคำนวณซึ่งมี 3 วิธีคือ

การวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางถ่วง (Center of gravity methods, cg)

เป็นการหาค่าตำแหน่งศูนย์กลางของจุดคั่นนี้จากภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขที่ตำแหน่งศูนย์กลางของจุดคั่นนี้เพียงภาพเดียวบนภาพ Search Matrix บริเวณที่เป็นกึ่งกลางของจุดคั่นนี้ ซึ่งวิธีการคำนวณก็คือนำความสว่างของจุดภาพและระยะทางแนวนอนและแนวตั้งของตำแหน่งจุดภาพแต่ละจุดที่สัมพันธ์กับความสว่างในพิกเซลนั้นมาคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของจุดคั่นนี้ดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{x} = \frac{\sum_{r=0}^R \sum_{c=0}^C g(r, c) \times x(r, c)}{\sum_{r=0}^R \sum_{c=0}^C g(r, c)}, \bar{y} = \frac{\sum_{r=0}^R \sum_{c=0}^C g(r, c) \times y(r, c)}{\sum_{r=0}^R \sum_{c=0}^C g(r, c)}$$

โดยที่

$g(r, c)$  = ค่าระดับความเข้มของสีที่จุดภาพใด

$x(r, c), y(r, c)$  = ค่าตำแหน่งของจุดภาพที่อ้างอิงจากแกนพิกัด

$\bar{x}, \bar{y}$  = ค่าตำแหน่งของจุดภาพที่เป็นตำแหน่งศูนย์กลางของจุดคั่นนี้ที่อ้างอิงจากแกนพิกัดทางแนวนอนและแนวตั้ง

$r, c$  = จำนวนแถวและคอลัมน์ของ

Target matrix

ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางถ่วงนี้จะทำให้ได้ตำแหน่งของศูนย์กลางของจุดคั่นนี้เป็นค่าทศนิยม (floating point) ทั้งทางแนวตั้งและแนวนอน

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r)

การคำนวณหาความสัมพันธ์ของภาพ Target matrix และ Search matrix จากค่าความสว่างแต่ละจุดภาพ โดยที่ภาพ Target matrix จะมีขนาดความกว้างยาวของภาพเล็กกว่าภาพ Search matrix ผลที่ได้จะแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากความสว่างของแต่ละภาพในจุดภาพของทั้ง 2 นำมาคำนวณในรูปแบบของค่า standard deviation ( $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$ ) และค่า covariance ( $\sigma_{12}$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$r = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \sigma_2} = \frac{\sum_{r=0}^R \sum_{c=0}^C (g_1(r, c) - \bar{g}_1) \times (g_2(r, c) - \bar{g}_2)}{\sqrt{\sum_{r=0}^R \sum_{c=0}^C (g_1(r, c) - \bar{g}_1)^2 \times \sum_{r=0}^R \sum_{c=0}^C (g_2(r, c) - \bar{g}_2)^2}}; -1 \leq r \leq 1$$

โดยที่ค่า

$g_1(r, c), g_2(r, c)$  = เป็นค่าระดับความเข้มของสีบนจุดภาพบน Target matrix และ Search matrix ตามลำดับ

$\bar{g}_1, \bar{g}_2$  = เป็นค่าเฉลี่ยของกลุ่มจุดภาพของจุดคั่นนี้ของ Target matrix และ Search matrix

$r, c$  = จำนวนแถวและคอลัมน์ของ Template matrix

หลังจากการคำนวณ ผลที่ได้ทำให้สามารถทราบตำแหน่งศูนย์กลางของจุดคั่นนี้จากค่าสหสัมพันธ์สูงสุด (r) ที่มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 จากภาพถ่ายทั้งสองภาพ โดยค่าของตำแหน่งศูนย์กลางของจุดคั่นนี้ที่มีค่าเป็นจำนวนเต็ม (integer)

จากวิธีการหาค่าสหสัมพันธ์ดังกล่าวที่ให้ผลของค่าตำแหน่งศูนย์กลางของจุดคั่นเป็นจำนวนเต็ม ดังนั้นเพื่อให้ตำแหน่งของค่าศูนย์กลางของจุดคั่นนี้ โดยวิธีการหาค่าสหสัมพันธ์มีความละเอียดยิ่งขึ้น ซึ่งมีผลลัพธ์เป็นทศนิยม ก็อาจจะทำการขยายภาพให้มีจำนวนจุดภาพเพิ่มขึ้นบริเวณจุดคั่น โดยวิธีการหาค่าสหสัมพันธ์ เช่น เดิมบริเวณดังกล่าวมีขนาด  $100 \times 100$  จุดภาพ เมื่อทำการขยาย 8 เท่าจะทำให้ 1 จุดภาพเพิ่มขึ้นเป็น 8 จุดภาพ ดังนั้น ก็จะทำให้บริเวณดังกล่าวมีขนาดเป็น  $800 \times 800$  จุดภาพ ซึ่งทำให้บริเวณที่ทำการขยายต้องมีการสุ่มระดับสีขึ้นมาใหม่เรียกว่า resampling (Del Poz et al., 1996); Nearest neighbour, Bilinear interpolation, Bicubic spline

*การคำนวณโดยวิธีการลีสท์สแควร์  
(Least Square Matching, LSM)*

เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างภาพ 2 ภาพที่ต้องการจับคู่ เพื่อหาตำแหน่งของบริเวณที่มีความสว่างใกล้เคียงกัน ซึ่งจะประกอบไปด้วยความสัมพันธ์ 2 ด้าน คือ ความสัมพันธ์ทางด้านเรขาคณิต (geometric model) จากตัวแปรทั้ง 6 ตัวที่ได้จากสมการ Affine Transformation และทางด้านความสว่าง (radiometric model) จากตัวแปรทั้ง 2 ตัว ซึ่งความสว่างของภาพที่หนึ่งหรือที่เป็นภาพ Targer matrix ให้เป็นค่าสังเกต (observation) ส่วนความสว่างในภาพที่เป็นภาพ Search matrix ให้เป็นค่าคงที่ และขนาดของภาพที่ทำการหาตำแหน่งค่าพิกัดของจุดคั่นของทั้ง 2 ภาพจะมีขนาดเท่ากัน อีกทั้งมีค่าความสว่างของภาพที่ใกล้เคียงกัน เพื่อที่จะทำการคำนวณหาตำแหน่งของศูนย์กลางของจุดคั่นนี้ ให้ได้ผลลัพธ์เป็นค่าตัวแปรของสมการ Affine Transformation ทั้ง 6 ค่าที่จะนำมาคำนวณหาตำแหน่งของศูนย์กลางของจุดคั่นที่มีค่าเป็นทศนิยม ซึ่งการหาความสัมพันธ์ของภาพทั้งสองจะได้รับการปรับแก้สมการดังต่อไปนี้

$$\bar{X} = a_0 \cdot x + a_1 \cdot y + a_2 \quad \text{และ} \quad \bar{Y} = b_0 \cdot x + b_1 \cdot y + b_2$$

โดยที่

$a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  = ค่าพารามิเตอร์ของสมการ Affine Transformation

$\bar{X}, \bar{Y}$  = ตำแหน่งของจุดภาพใหม่

$x, y$  = ตำแหน่งของจุดภาพเดิม

อีกทั้งถ้าภาพทั้งสองมีความสว่างไม่เท่ากันก็จะทำการปรับค่าความสว่างของภาพจากสมการ

$$\text{ทำการ} \quad \bar{g}_2 = r_0 + r_1 g_2$$

โดยที่

$r_0, r_1$  = ค่าพารามิเตอร์ในการปรับแก้ความสว่างของภาพ

$g_2$  = ความสว่างของภาพเดิม

$\bar{g}_2$  = ความสว่างของภาพใหม่

### ผลการทดลอง

นำผลที่ได้จากการวิจัยมาทำการทดสอบ โดยการรันโปรแกรมเพื่อประมวลผล ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบคือค่าตำแหน่งศูนย์กลางของจุดคั่นบนภาพถ่ายเชิงเลขทั้ง 8 จุดบนภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขที่มีความเทา 256 ระดับ (8 บิต) และมีความละเอียด 15, 30 และ 60 ไมครอน โดยค่าพิกัดของจุดคั่นนี้ได้จากการกำหนดเองด้วยมือบนภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลข และการเขียนโปรแกรมโดยภาษาซี โดยวิธีการจับคู่ภาพ 3 วิธี คือ วิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางวง วิธีการหาค่าสัมพันธ์สหสัมพันธ์ และวิธีการลีสท์สแควร์ ซึ่งแต่ละวิธีจะทำการประมวลผลโดยอัตโนมัติจนเสร็จแล้วจึงทราบผลจากการคำนวณโดยดูไฟล์ที่ได้ทำการบันทึกผลการทดสอบนั้นไว้ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าตำแหน่งศูนย์กลางของจุดคั่นบนภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขในโปรแกรมก็จะทำการคำนวณหาตำแหน่งค่าพิกัดของศูนย์กลางจุดคั่นจากภาพที่เป็น Target matrix ที่ได้กำหนดไว้เอง และภาพ Search matrix ที่ใช้เป็นกลุ่มตัวอย่างเพื่อให้ได้ค่าพิกัดของจุดศูนย์กลางของจุดคั่นออกมา เมื่อได้ค่าตำแหน่งศูนย์กลางของจุดคั่นนี้พิกัดของแต่ละจุด ก็จะนำมา

เปรียบเทียบเพื่อหาความแตกต่างของค่าความผิดพลาดของค่าพิกัดของจุดดัชนีทั้ง 8 จุดบนภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลข

ผลที่ได้จากการประมวลผลหาค่าตำแหน่งศูนย์กลางของจุดดัชนีโดยวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลาง ได้ค่าพิกัดของจุดดัชนีแต่ละจุดบนภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขเป็นค่าทศนิยม (Sub pixel) ทั้ง 8 จุด ดังแสดงในตารางที่ 1 และผลที่ได้จากการประมวลผลหาค่าตำแหน่งศูนย์กลางของจุดดัชนีโดยวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ค่าพิกัดของแต่ละจุดที่ได้เป็นค่าจำนวนเต็ม (Full pixel) ทั้ง 8 จุด จากค่าความสัมพันธ์ที่มากที่สุดที่พบจะให้ตำแหน่งศูนย์กลางของจุดดัชนี ดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อทำการขยายภาพ Search matrix ที่เป็นตำแหน่งของจุดดัชนีบนภาพถ่ายทั้ง 8 จุดให้มีขนาด 4 เท่าของขนาดเดิมของภาพที่ได้หาค่าพิกัดจากวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ แล้วจึงทำการหาค่าตำแหน่งศูนย์กลางของจุดดัชนีโดยวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อีกครั้ง (ตารางที่ 3)

ผลจากการประมวลผลหาค่าตำแหน่งศูนย์กลางของจุดดัชนีโดยวิธีลิสต์สแควร์ค่าพิกัดของจุดดัชนีแต่ละจุดที่ได้เป็นค่าทศนิยม (Sub pixel) ทั้ง 8 จุด

จากการปรับแก้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 8 ค่าแล้ว นำมาคำนวณหาค่าพิกัดของจุดดัชนีทั้ง 8 จุด ผลดังแสดงในตารางที่ 4

ผลของจุดดัชนีโดยวิธีการกำหนดด้วยมือเอง จากภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขนั้นจะทำให้เราทราบค่าพิกัดเป็นจำนวนเต็ม (Full pixel) ผลดังแสดงในตารางที่ 5

ผลจากการคำนวณหาค่าพิกัดของจุดดัชนีทั้ง 8 จุดบนภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลข ที่ความละเอียด 15, 30 และ 60 ไมครอน พบว่าการคำนวณตำแหน่งศูนย์กลางของจุดดัชนีที่ให้ค่าพิกัดแบบ Sub pixel ให้ผลที่ถูกต้องมากกว่าแบบ Full pixel ซึ่งวิธีการที่เป็นแบบ Sub pixel จะใช้วิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลาง วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Sub pixel และวิธีการลิสต์สแควร์มาเปรียบเทียบกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางมีค่าใกล้เคียงกันมากกับวิธีการลิสต์สแควร์ในภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขที่ความละเอียด 15 และ 30 ไมครอน โดยจะมีความแตกต่างที่จุดดัชนีทั้ง 8 จุด เมื่อเทียบกับวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0 - 0.01 จุดภาพ และที่ความละเอียด 60 ไมครอนเมื่อเปรียบเทียบวิธีการลิสต์สแควร์จะ

**Table 1. Result coordinate of fiducial marks by center of gravity method.**

Position of fiducial marks	Coordinate of fiducial mark (pixel)					
	Resolution 15 $\mu\text{m}$		Resolution 30 $\mu\text{m}$		Resolution 60 $\mu\text{m}$	
	Row	Column	Row	Column	Row	Column
7	33.02	32.82	16.28	16.22	8.45	8.35
3	31.67	7,561.15	15.63	3,780.36	7.80	1,890.07
5	32.83	15,088.47	16.29	7,544.09	8.78	3,772.49
2	7,560.39	33.59	3,780.02	16.70	1,890.04	8.21
1	7,560.22	15,088.34	3,780.03	7,544.03	1,890.03	3,771.91
6	15,088.14	33.29	7,544.04	16.56	3,772.34	8.58
4	15,088.34	7,561.49	7,543.86	3,780.12	3,771.90	1,890.01
8	15,088.05	15,087.94	7,543.73	7,543.91	3,772.68	3,772.66

มีความแตกต่างของค่าพิกัดที่จุดดัชนีทั้ง 8 จุดเมื่อเทียบกับวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางถ่วงอยู่ในช่วงระหว่าง 0-0.20 จุดภาพ ส่วนผลของค่าพิกัดจากวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Sub pixel จะมีความแตกต่างของค่าพิกัดที่จุดดัชนีทั้ง 8 จุดเมื่อเทียบกับวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางถ่วงในช่วงระหว่าง 0-0.40 จุดภาพ ที่ความละเอียด 15, 30 และ 60 ไมครอน

## บทสรุป

ผลจากการศึกษาวิจัยพบว่า จากการประมวลผลด้วย

โปรแกรมต่าง ๆ เพื่อหาตำแหน่งของจุดดัชนีทั้ง 8 จุด ความถูกต้องของตำแหน่งศูนย์กลางของจุดดัชนีที่ได้จากวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางถ่วงและวิธีการลีสทส์แควร์ จะมีค่าพิกัดของจุดดัชนีใกล้เคียงกันและมีความแตกต่างกันน้อยมาก โดยผลจากการเปรียบเทียบมีความผิดพลาดของค่าพิกัดของจุดดัชนีทั้ง 8 จุด บนภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขในแต่ละวิธีเมื่อเทียบกับวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางถ่วงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0-0.5 จุดภาพ ที่มีความละเอียด 15 ไมครอน ส่วนที่ความละเอียด 30 และ 60 ไมครอน จะมีความผิดพลาดของค่าพิกัด

**Table 2. Result coordinate of fiducial marks by correlation coefficient method.**

Position of fiducial marks	Coordinate of fiducial mark (pixel)								
	Resolution 15 $\mu\text{m}$			Resolution 30 $\mu\text{m}$			Resolution 60 $\mu\text{m}$		
	Row	Column	r	Row	Column	r	Row	Column	r
7	33	33	0.8	17	17	0.8	9	9	0.8
3	32	7,561	0.7	17	3,781	0.8	9	1,891	0.7
5	33	15,088	0.7	17	7,545	0.8	9	3,773	0.8
2	7,560	34	0.7	3,781	17	0.7	1,891	9	0.9
1	7,560	15,088	0.8	3,781	7,544	0.7	1,891	3,773	0.8
6	15,087	34	0.7	7,544	17	0.7	3,773	9	0.7
4	15,087	7,561	0.7	7,544	3,781	0.7	3,773	1,891	0.7
8	15,087	15,088	0.7	7,544	7,544	0.7	3,773	3,773	0.7

\*r = Correlation coefficient

**Table 3. Result coordinate of fiducial marks by correlation coefficient type sub pixel method.**

Position of fiducial marks	Coordinate of fiducial mark (pixel)								
	Resolution 15 $\mu\text{m}$			Resolution 30 $\mu\text{m}$			Resolution 60 $\mu\text{m}$		
	Row	Column	r	Row	Column	r	Row	Column	r
7	33.25	32.75	0.8	16.75	16.50	0.8	8.75	8.50	0.8
3	31.75	7,561.25	0.8	15.75	3,780.75	0.8	8.75	1,890.25	0.7
5	32.75	15,087.75	0.8	16.75	7,544.50	0.8	8.75	3,772.50	0.8
2	7,560.25	33.50	0.8	3,780.50	16.75	0.7	1,891.25	8.50	0.8
1	7,560.50	15,088.25	0.7	3,780.25	7,544.50	0.8	1,891.25	3,772.75	0.7
6	15,088.25	33.25	0.8	7,544.25	16.75	0.8	3,772.50	8.75	0.8
4	15,088.25	7,56.50	0.7	7,544.25	3,780.25	0.8	3,772.50	1,890.25	0.8
8	15,088.25	15,087.75	0.8	7,543.75	7,544.25	0.7	3,772.50	3,772.75	0.8

\*r = Correlation coefficient



เมื่อเทียบกับวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางด้วย โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.2-1 จุฑภาพ และความถูกต้องของค่าพิกัดของจุดศูนย์กลางทั้ง 8 จุด ที่ประมวลผลโดยใช้โปรแกรมจะมีความถูกต้องมากเมื่อค่าพิกัดที่ได้เป็นแบบ Sub pixel ซึ่งได้จากวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางและวิธีการลิสท์สแควร์ โดยมีความแตกต่างของค่าพิกัดเฉลี่ยไม่เกิน 0.1 จุฑภาพเมื่อภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขมีความละเอียดที่ 15 และ 30 ไมครอน อีกทั้งเวลาที่ใช้ในการประมวลผลก็ไม่มีแตกต่างกันมากนัก แต่เวลาที่ใช้ในการอ่านค่าความสว่างของภาพ Target matrix และ Search matrix ขึ้นอยู่กับความละเอียดของภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลข ซึ่งในการประมวลผลบนภาพถ่ายทางอากาศเชิงเลขที่มีความละเอียด 15 ไมครอน ใช้เวลาในการอ่านค่าความสว่างของภาพ Target matrix และ Search matrix เท่ากับ 16 นาที ความละเอียดที่ 30 ไมครอน ใช้เวลา 3 นาที และที่ความละเอียด 15 ไมครอน ใช้เวลา 0.30 นาที ในการอ่านค่าความสว่างภาพก่อนทำการประมวลผลหาค่าตำแหน่งศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางนี้ เมื่อสรุปเวลาที่ใช้ในการประมวลผลหาค่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางนี้ แต่ละวิธีในโปรแกรมมีค่าดังนี้ วิธีการกำหนดด้วย

Table 4. Result coordinate of fiducial marks by least square method.

Position of fiducial marks	Coordinate of fiducial mark (pixel)					
	Resolution 15 $\mu\text{m}$		Resolution 30 $\mu\text{m}$		Resolution 60 $\mu\text{m}$	
	Row	Column	Row	Column	Row	Column
7	33.14	33.34	16.57	16.39	8.56	7.89
3	32.15	7,561.09	15.88	3,780.31	8.04	1,889.98
5	33.12	15,088.05	16.46	7,544.04	8.47	3,772.12
2	7,560.33	33.99	3,780.06	16.83	1,890.38	8.29
1	7,560.16	15,088.03	3,780.06	7,543.85	1,890.29	3,771.77
6	15,087.65	33.86	7,543.75	16.88	3,772.29	8.59
4	15,087.52	7,560.76	7,543.68	3,780.20	3772.02	1,890.03
8	15,087.38	15,088.20	7,543.71	7,543.95	3772.67	3,772.58

Table 5. Result coordinate of fiducial marks by manual method.

Position of fiducial marks	Coordinate of fiducial mark (pixel)					
	Resolution 15 $\mu\text{m}$		Resolution 30 $\mu\text{m}$		Resolution 60 $\mu\text{m}$	
	Row	Column	Row	Column	Row	Column
7	33	33	16	16	8	8
3	32	7,561	16	3,781	8	1,890
5	33	15,089	16	7,544	8	3,772
2	7,560	33	3,780	16	1,890	8
1	7,560	15,088	3,780	7,544	1,890	3,772
6	15,088	33	7,544	17	3,772	8
4	15,088	7,561	7,544	3,780	3,772	1,890
8	15,088	15,088	7,544	7,544	3,772	3,772

มือที่ความละเอียด 15 ไมครอน ใช้เวลา 3.43 นาที ที่ความละเอียด 30 ไมครอน ใช้เวลา 2.40 นาที และที่ความละเอียด 60 ไมครอน ใช้เวลา 2.06 นาที ตามลำดับ วิธีการกำหนดด้วยมือแบบ sub pixel เริ่มที่ความละเอียด 15 ไมครอน ใช้เวลา 4.23 นาที ความละเอียดที่ 30 ไมครอน ใช้เวลา 3.30 นาที และที่ความละเอียด 60 ไมครอน ใช้เวลา 2.56 นาที ตามลำดับ วิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางและวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะใช้เวลาในการประมวลผลหาตำแหน่งของจุดดัชนีทั้ง 8 จุด เท่ากับ 1.5 และ 1.7 วินาที ตามลำดับ และวิธีการลิสต์สแควร์จะใช้เวลาในการประมวลผล 4.2 วินาที เพื่อหาตำแหน่งของจุดดัชนีทั้ง 8 จุดบนภาพถ่ายเชิงเลข

ดังนั้น จากผลของค่าพิกัดที่ได้ในแต่ละวิธี และระยะเวลาที่ใช้จะพบว่า ถ้าไม่คำนึงถึงผลจากการเปิดภาพ Target matrix และ Search matrix อ่านค่าความสว่างเพื่อใช้งานโปรแกรมในการประมวลผลพบว่าวิธีการคำนวณแบบการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางจะให้ผลของค่าพิกัดที่มีความถูกต้องและรวดเร็วกว่าวิธีการกำหนดด้วยมือ โดยค่าพิกัดของตำแหน่งของจุดดัชนีทั้ง 8 จุดที่ได้จะเป็น

ค่าทศนิยม ส่วนวิธีที่รองลงมาคือวิธีการลิสต์สแควร์ก็มีความถูกต้องและรวดเร็วกว่าวิธีการกำหนดด้วยมือเช่นกัน แต่ใช้เวลามากกว่าเล็กน้อย เมื่อเทียบกับวิธีการวัดศูนย์กลางของจุดศูนย์กลาง

## เอกสารอ้างอิง

- Aluir Porfirio Del Poz, Autonio Maria Garcia Tommaselli and Jorge Dimental Cintra. (1996). Relational matching applied to automatic extraction of ground control in digital image. IAPRS. (B3):131-134.
- Jiang, W., Zhang, Guo. and Deren, LI. (2001). A self-adaptive of automatic interior orientation for metric images. Geoinformatic&DMGIS. p. 23-25.
- John R. Jensen. (1980). Introduction digital image processing. Prentice-Hall, New Jersey. p. 1-10.
- Kraus, K. and Waldhausl P. (1993). Photogrammetry. WB-Druck, Germany. 1:352-357
- Schickler, W., Doth, Z., and Ziess, C. (1996). The automatic interior orientation and its daily. IAPRS. (B3):746-751.