

เทคนิคการปรับแก้กล้องดิจิตอลสำหรับงานสำรวจด้วยภาพถ่ายภาคพื้นดิน

ธีระ ลาภิตชยางกุล*

Theera Laphitchayangkul. (2007). Adjustment Digital Camera Technique for Terrestrial Photogrammetry. Suranaree J. Sci. Technol. 14(2):205-214.*

Received: Oct 31, 2006; Revised: Jan 25, 2007; Accepted: Jan 29, 2007

Abstract

Terrestrial photogrammetry techniques are part of photogrammetry surveying for 3-D model or mapping from digital cameras. Nowadays, digital cameras are developed with high capability at low cost. Its accuracy is in the allowable level of surveying. This paper present adjustment technique for geometric correction for normal digital camera. By this technique, accuracy as well as confidence of work is improved.

Keywords: Photogrammetry surveying, terrestrial photogrammetry, digital cameras

บทคัดย่อ

การสำรวจด้วยภาพถ่ายภาคพื้นดินเป็นเทคนิคหนึ่งของการสำรวจด้วยภาพถ่ายสำหรับสร้างแบบจำลองสามมิติหรือแผนที่จากกล้องดิจิตอล ในปัจจุบัน กล้องดิจิตอลก็ได้ถูกพัฒนาให้มีความสามารถเพิ่มขึ้นและราคาถูกลง ทำให้งานที่ได้มีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้สำหรับงานสำรวจ ซึ่งบทความนี้กล่าวถึงการนำเทคนิคการปรับแก้กล้องดิจิตอลที่จำหน่ายทั่วไปเพื่อปรับแก้ความถูกต้องทางด้านเรขาคณิตของกล้องสำหรับนำไปใช้ในงานสำรวจด้วยภาพถ่ายได้อย่างถูกต้อง และเกิดความเชื่อมั่นในการทำงาน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา 126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ จังหวัดสมุทรปราการ 10140 E-mail: theera.lil@kmutt.ac.th

* ผู้เขียนที่ให้การติดต่อ

บทนำ

การสำรวจด้วยภาพถ่ายภาคพื้นดินเป็นส่วนหนึ่งของการสำรวจด้วยภาพถ่าย ที่ทำการถ่ายภาพด้วยการตั้งกล้องอยู่บนพื้นผิวโลก โดยที่ภาพถ่ายพื้นดินแตกต่างไปจากกรณีของภาพถ่ายทางอากาศตรงที่สามารถเข้าไปวัดหาตำแหน่งถ่ายภาพได้โดยตรง (วิชา จิวาลัย และ ปรีชา วงศ์วิวัฒน์, 2531) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากภาพถ่ายภาคพื้นดินมีอยู่สองลักษณะคือ ข้อมูลภาพแบบอนาล็อกได้จากกล้องถ่ายภาพและฟิล์มร่วมกัน โดยข้อมูลจะปรากฏเป็นภาพถ่ายที่อยู่บนฟิล์มและข้อมูลภาพแบบดิจิทัล ได้จากตัวแปลงสัญญาณของ CCD (Charge Couple Device) เช่น กล้องถ่ายภาพดิจิทัลและสแกนเนอร์ ซึ่งข้อมูลจะปรากฏเป็นภาพถ่ายที่อยู่บนคอมพิวเตอร์ จึงทำให้การนำเข้าข้อมูลแบบภาพดิจิทัล (Digital Image) สามารถจัดเก็บบันทึกข้อมูล แก๊ซข้อมูล และประมวลผลได้รวดเร็วในคอมพิวเตอร์ ดังนั้น ความละเอียดถูกต้องของงานรังวัดด้วยภาพถ่ายจึงขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ในการถ่ายภาพ และวิธีการประมวลผล อีกทั้งการสำรวจด้วยภาพถ่ายภาคพื้นดินในปัจจุบันเป็นที่นิยมมากขึ้น เนื่องจากอุปกรณ์แบบดิจิทัล เช่น กล้องดิจิทัล เครื่องสแกนมีราคาถูกลงและมีความละเอียดและศักยภาพของอุปกรณ์สูงขึ้น จึงเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้การทำงานด้วยกล้องดิจิทัลมีความสำคัญมากขึ้นในการทำงานยุคปัจจุบันที่ต้องการความถูกต้องในระดับของผู้ใช้งานและความรวดเร็วในด้านการประมวลผล โดยจะเห็นได้ว่าการนำการสำรวจภาพถ่ายภาคพื้นดินไปประยุกต์ใช้ในการทำงานด้านอุบัตินิเทศ การทำแผนที่อาคารแบบสามมิติและบันทึกความเร็วรถยนต์ เป็นต้น

กล้องถ่ายภาพภาคพื้นดิน (Terrestrial Cameras)

กล้องถ่ายภาพที่ใช้ในการสำรวจด้วยภาพถ่ายเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลและมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป ซึ่ง

สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท (ถนนศักดิ์ ช่อธนาวงศ์, 2544; Kraus and Waldhausl, 1993) คือ

1. กล้องถ่ายภาพสำหรับงานรังวัด (Metric Camera) เป็นกล้องถ่ายภาพที่ได้รับการออกแบบมาใช้ในงานสำรวจ โดยให้ทราบค่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายใน (Interior orientation) ซึ่งได้แก่ระยะมุขยสำคัญ (Principal Distance) ตำแหน่งของจุดดัชนี (Fiducial Marks) ความผิดเพี้ยนของเลนส์ (Lens Distortion) ที่วัดสอบไว้ และคำนึงถึงความถูกต้องทางเรขาคณิต กล้องถ่ายภาพประเภทนี้จึงมีเสถียรภาพในการใช้งานด้านสำรวจ

2. กล้องถ่ายภาพชนิดไม่ใช้สำหรับงานรังวัด (NonMetric Camera) เป็นกล้องถ่ายภาพที่ไม่ได้รับการออกแบบมาสำหรับงานสำรวจด้วยภาพถ่ายโดยเฉพาะ จึงไม่ทราบค่าการจัดภาพภายในบางส่วนหรือทั้งหมด ไม่มีเครื่องหมายดัชนี ความผิดเพี้ยนของเลนส์มีมาก และมักจะไม่มีความไม่เสถียรของกล้องถ่ายภาพสูง ดังนั้น การที่จะนำกล้องถ่ายภาพชนิดนี้ไปใช้กับงานสำรวจด้วยภาพถ่ายทางภาคพื้นดิน จึงจำเป็นต้องมีการวัดสอบหาค่าพารามิเตอร์เพิ่ม เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการทำงานสำรวจได้ผลที่ต้องการแต่อย่างไรก็ตาม เมื่อต้องการความถูกต้องทางเรขาคณิตสูง ควรใช้กล้องแบบรังวัด

องค์ประกอบการปรับแก้กล้อง (Elements of Camera Calibration)

ในการปรับแก้กล้องถ่ายภาพจะต้องพิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ ของกล้องที่มีผลต่อภาพถ่ายบนพื้นดินสำหรับการนำไปใช้ในการทำงานเพื่อให้กล้องถ่ายภาพมีเสถียรภาพและมีความน่าเชื่อถือ โดยองค์ประกอบในการปรับแก้กล้องประกอบไปด้วย 2 องค์ประกอบ คือ

1. องค์ประกอบการจัดภาพภายใน (Interior Orientation) ประกอบด้วยความยาวโฟกัส (Focal Length or Principal Distance) (f) จุดมุขยสำคัญ (Principal Point) (x_0, y_0) เป็นความสัมพันธ์ของ

จุดศูนย์กลางเครื่องหมายดัชนี (Fiducial Center) กับจุดกึ่งกลางระนาบโฟกัส (Focal Plane) จะเป็นแนวตั้งฉากกับแนวจากจุดรวมแสงของกล้องถ่ายภาพดังรูปที่ 1 โดยที่ค่าความผิดของกล้องจากองค์ประกอบจากการจัดภาพภายในจะเป็นค่าความผิดเพี้ยนของเลนส์ ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน (Wolf and Dewitt, 2000) คือ ความผิดเพี้ยนตามแนวรัศมี (Radial Lens Distortion) จะเกิดตามแนวเส้นรัศมีจากจุดมุกขสำคัญ ซึ่งค่าความผิดจะเกิดขึ้นเสมอแม้ว่าเลนส์ออกแบบมาอย่างสมบูรณ์ โดยมีขนาดและทิศทางเข้าหาหรือออกจากศูนย์กลางก็ได้ ถ้ากล้องมีค่าความผิดเพี้ยนตามแนวรัศมีอย่างเดียวจะมีลักษณะดังรูปที่ 2(a) และความผิดเพี้ยนตามแนวเส้นสัมผัสหรือ

ความผิดเพี้ยนของเลนส์ออกจากศูนย์กลาง (Tangential or Decentering Lens Distortion) เกิดจากเลนส์มีความบิดเบี้ยวที่ไม่มีความสมบูรณ์ ทำให้เกิดขนาดของความผิดดังรูปที่ 2(b) แต่ถ้าเป็นความผิดที่ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนเสียรูปแบบสมมาตร ซึ่งเกิดจากความผิดเพี้ยนตามแนวรัศมีและความผิดเพี้ยนตามแนวเส้นสัมผัสผสมกัน จะมีลักษณะดังรูปที่ 2(c) โดยค่าความผิดที่เกิดขึ้นของกล้องถ่ายภาพแบบทั่วไป จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามลักษณะเฉพาะของกล้องแต่ละตัว ซึ่งมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ดังนั้น จึงต้องจำลองรูปแบบสมการสำหรับหาความผิดเพี้ยนของเลนส์และองค์ประกอบด้วยสมการโพลิโนเมียล (Polynomial Equation)

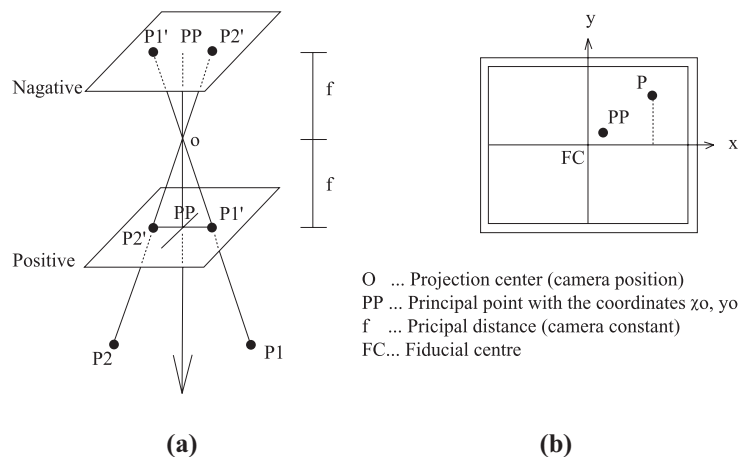


Figure 1. a) Positive and negative positions, b) Photogrammetric photograph (Kraus and Waldhausl, 1993)

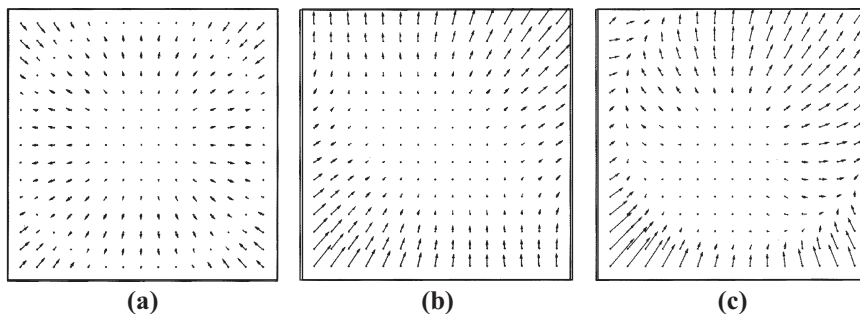


Figure 2. Lens distortion patterns: a) symmetric radial b) decentering and c) combined symmetric radial and decentering (Wolf and Dewitt, 2000)

2. องค์ประกอบการจัดภาพภายนอก (Exterior Orientation) (ω , ϕ , K , X_o , Y_o , Z_o) ประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบคือ

2.1) องค์ประกอบการหมุนของภาพถ่าย (Rotation Matrix) (ω , ϕ , K) รอบวัตถุที่ทำการถ่ายภาพจะประกอบด้วยการวางตัวของระนาบภาพถ่ายเพื่อคำนวณหาองค์ประกอบการหมุนจะต้องสร้างระบบแกนพิกัดของภาพถ่ายให้ขนานระบบแกนพิกัดของวัตถุที่มีจุดกำเนิดระบบแกนพิกัดเดียวกันและกำหนดให้การหมุนทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเป็นบวก

2.2) องค์ประกอบของตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพ (Exposure Point) (X_o , Y_o , Z_o) เป็นพิกัดตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพที่มีความสัมพันธ์กับวัตถุและ

2.3) องค์ประกอบของจุดควบคุมภาพถ่าย (Control Point) (X , Y , Z) เป็นจุดควบคุมภาพถ่ายในสนามวัดสอบและมีความถูกต้องสูงเนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่ใช้หาค่าตัวแปรอื่นในแบบจำลอง

จากรายละเอียดของทั้ง 2 องค์ประกอบจะนำมาเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์(Mathematic Model) แทนองค์ประกอบทั้งหมดที่กล่าวถึง เพื่อกำหนดตำแหน่งของกล้องและวัตถุบนภาพที่สัมพันธ์กับตำแหน่งในการถ่ายภาพ โดยการคำนวณจะใช้วิธีการคำนวณปรับแก้แบบลีสท์สแควร์ด้วยสมการค่าสังเกตุ (Least Squares Adjustment by Method of Observation Equations) ทำการประมวลผล ซึ่งจะทำให้ได้ตำแหน่งหรือพิกัดของจุดที่พิจารณาบนภาพถ่ายที่มีความถูกต้องตามความเป็นจริงของวัตถุ สำหรับนำไปสร้างแบบจำลองสามมิติหรือแผนที่ได้อย่างถูกต้อง

แบบจำลองของสมการในการปรับแก้กล้อง

จากองค์ประกอบการจัดภาพภายในและองค์ประกอบการจัดภาพภายนอกที่ประกอบไปด้วยรายละเอียด

ต่าง ๆ เช่น องค์ประกอบการหมุน องค์ประกอบจุดควบคุมถ่ายภาพ สามารถนำไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพถ่ายและพิกัดวัตถุได้ดังรูปที่ 3 โดยจะอยู่ในรูปแบบของสมการที่เรียกว่า สมการสภาวะร่วมเส้น (Colinearity Equation)

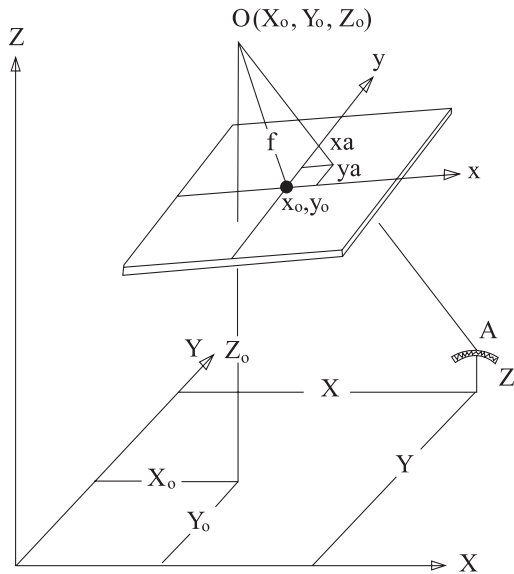


Figure 3. Relation between image and object coordinates (Kraus and Waldhausl, 1993)

จากความสัมพันธ์ของพิกัดภาพถ่ายกับพิกัดวัตถุสามารถเขียนเป็นสมการสภาวะร่วมเส้นได้ดังสมการที่ 1

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda R(\omega, \phi, \kappa) \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

แทนค่า ω , ϕ , κ ด้วยเมตริกซ์การหมุนรอบแกน x , y , z ได้สมการใหม่ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

ทั้งนี้ เพราะเมตริกซ์การหมุน

$$(\text{rotation matrix, } M) M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ 2 สามารถคำนวณหาค่า x , y , $-f$ ได้ดังนี้

$$x = \lambda[m_{11}(X - X_o) + m_{12}(Y - Y_o) + m_{13}(Z - Z_o)] \quad (3)$$

$$y = \lambda[m_{21}(X - X_o) + m_{22}(Y - Y_o) + m_{23}(Z - Z_o)] \quad (4)$$

$$-f = \lambda[m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)] \quad (5)$$

จากนั้นนำสมการที่ 5 หาสมาการที่ 3 และ 4 จะได้สมการที่ 6 และ 7 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพถ่าย พิกัดวัตถุและความยาวโฟกัส (Kraus and Waldhausl, 1993; Wolf and Dewit, 2000; Mikhail *et al.*, 2001) ดังนี้

$$x = -f \frac{m_{11}(X - X_o) + m_{12}(Y - Y_o) + m_{13}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)} \quad (6)$$

$$y = -f \frac{m_{21}(X - X_o) + m_{22}(Y - Y_o) + m_{23}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)} \quad (7)$$

โดยที่

- f = ความยาวโฟกัส
- x, y = ค่าพิกัดบนภาพถ่ายของจุดที่ต้องการ
- X, Y, Z = ค่าพิกัดบนพื้นดินที่ตำแหน่งเดียวกับภาพถ่าย
- X_o, Y_o, Z_o = ค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดถ่ายภาพ

$$m_{11} = \cos \varphi \times \cos \kappa$$

$$m_{12} = -\cos \varphi \times \sin \kappa$$

$$m_{13} = \sin \varphi$$

$$m_{21} = \cos \varphi \times \sin \kappa + \sin \omega \times \sin \varphi \times \cos \kappa$$

$$m_{22} = \cos \omega \times \cos \kappa - \sin \omega \times \sin \varphi \times \sin \kappa$$

$$m_{23} = \sin \omega \times \cos \varphi$$

$$m_{31} = \sin \omega \times \sin \kappa - \cos \omega \times \sin \varphi \times \cos \kappa$$

$$m_{32} = \sin \omega \times \cos \kappa + \cos \omega \times \sin \varphi \times \sin \kappa$$

$$m_{33} = \cos \omega \times \cos \varphi$$

ดังนั้น ในสมการที่ 6 และ 7 จึงจำเป็นต้องทราบค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายบนภูมิประเทศ (X, Y, Z) ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายบนภาพ (x, y) และความยาวโฟกัส (f) อย่างน้อย 4 จุดเพื่อนำไปคำนวณหาองค์ประกอบการจัดภาพ ส่วนภาพถ่ายที่ทำการถ่ายคู่กันและมีพื้นที่ซ้อนทับระหว่างภาพ 60 เปอร์เซ็นต์ก็จะใช้สมการนี้ได้เช่นกัน โดยใช้หลักการอินเตอร์เซกชันของภาพคู่สามมิติดังรูปที่ 4 จากจุดเปิดถ่ายแต่ละภาพ จะทำให้จุดบนวัตถุที่ถ่ายภาพแต่ละภาพมีการตัดกัน ซึ่งสมการสภาวะร่วมเส้นของแต่ละจุดบนภาพทั้งสองจะถูกนำไปปรับแก้ แม้ว่าจะไม่รู้ค่าความสูงของวัตถุแต่จากการถ่ายภาพอย่างน้อย 2 ภาพที่ซ้อนทับบริเวณเดียวกัน ก็จะสามารถคำนวณในลักษณะพิกัดจากสามมิติได้

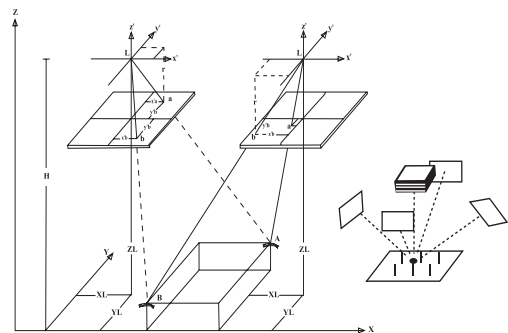


Figure 4. Space intersection with stereo-pair of aerial photo (Kraus and Waldhausl, 1993)

ส่วนการหาค่าความผิดเพี้ยนของเลนส์ที่เกิดจากการขีดผิวเลนส์และความคลาดเคลื่อนในการตั้งศูนย์ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเลนส์ ไม่ได้ลดคุณภาพของภาพถ่าย แต่จะทำให้คุณภาพทางเรขาคณิตผิดเพี้ยนไป โดยจะแบ่งเป็นความผิดเพี้ยนตามแนวรัศมี (Radial Lens Distortion) และความผิดเพี้ยนตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential Lens Distortion) ดังรูปที่ 5

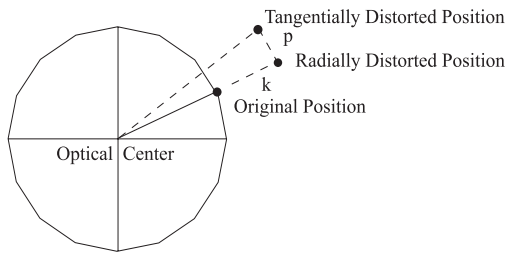


Figure 5. Radial distortion and decentering lens distortion (Kraus and Waldhausl, 1993)

โดยสมการรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนความผิดเพี้ยนของเลนส์ จะต้องทำการเพิ่มเข้าไปในรูปแบบจำลองของสมการสภาวะร่วมเส้น แล้วทำการปรับแก้หาค่าประกอบทั้งหมดในรูปแบบจำลองนั้น โดยสมการความผิดเพี้ยนของเลนส์ (กนกศักดิ์ ชื่อธานุวงศ์, 2544; Kraus and Waldhausl, 1993; Wolf and Dewit, 2000; Mikhail *et al.*, 2001) จะมีรูปแบบสมการ โพลีโนเมียล ดังนี้

สมการความผิดเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี

$$dkx = (x - x_o)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \quad (8)$$

$$dky = (y - y_o)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \quad (9)$$

$$dk = \sqrt{dkx^2 + dky^2} \quad (10)$$

โดยที่

dkx, dky = ความผิดเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมีทางแกน x, y

dk = ผลรวมความผิดเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมีแกน x และ y
 x, y = ค่าพิกัดบนภาพถ่ายของจุดที่ต้องการ
 x_o, y_o = ค่าพิกัดของจุดमुख्यสำคัญ
 $k_1, k_2, \dots$ = ค่าสัมประสิทธิ์ของความผิดเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี
 r = ระยะของเลนส์ตามแนวรัศมี

สมการความผิดเพี้ยนของเลนส์ตามแนวเส้นสัมผัส

$$dtx = p_1(r^2 + 2(x - x_o)^2) + 2p_2(x - x_o)(y - y_o) \quad (11)$$

$$dty = (1 + p_3 r^2 + p_4 r^4)[p_2(r^2 + 2(y - y_o)^2) + 2p_1(x - x_o)(y - y_o)] \quad (12)$$

$$dp = \sqrt{(dtx^2 + dty^2)} \quad (13)$$

โดยที่

dtx, dty = ความผิดเพี้ยนของเลนส์ตามแนวเส้นสัมผัสทางแกน x, y
 dp = ผลรวมความผิดเพี้ยนของเลนส์ตามแนวเส้นสัมผัสทางแกน x, y
 x, y = ค่าพิกัดบนภาพถ่ายของจุดที่ต้องการ
 x_o, y_o = ค่าพิกัดของจุดमुख्यสำคัญ
 p_1, p_2, p_3 = ค่าสัมประสิทธิ์ของความผิดเพี้ยนของเลนส์ตามแนวเส้นสัมผัส
 r = ระยะของเลนส์ตามแนวรัศมี

เพราะฉะนั้นผลรวมความผิดเพี้ยนของเลนส์เขียนได้เป็น

$$r = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2} \quad (14)$$

$$dr = \sqrt{(dk^2 + dp^2)} \quad (15)$$

จากสมการในการปรับแก้กล้องทั้งหมดที่กล่าวมา จะนำมาเขียนเป็นรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการปรับแก้แบบ Photo-variant self calibration โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละภาพถ่ายมีค่าเป็นอิสระจากกัน วิธีการนี้เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับใช้กับกล้องถ่ายภาพแบบทั่วไป ทั้งนี้ เพราะกล้องถ่ายภาพชนิดนี้ขาดเสถียรภาพของการจัดภาพภายใน ซึ่งข้อดีของวิธีการนี้คือ ภาพถ่ายที่ใช้แต่ละภาพในบล็อคอาจได้มาในลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น ใช้กล้องถ่ายภาพหลายกล้อง หรือถ่ายภาพ ณ ระยะโฟกัสต่างกัน จะมีผลทำให้พารามิเตอร์ของการจัดภาพภายในมีค่าแตกต่างกัน และมีความยืดหยุ่นกว่าในการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณในรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

รูปแบบที่ 1 การหาองค์ประกอบของความยาวโฟกัส (f), เมตริกซ์การหมุน (ω, ϕ, K), ค่าพิกัดของจุดเปิดถ่าย (X_o, Y_o, Z_o) (กนกศักดิ์ ชื้อธานุวงศ์, 2544; Wolf and Dewitt, 2000; Mikhail *et al.*, 2001)

$$x = -f \left[\frac{m_{11}(X - X_o) + m_{12}(Y - Y_o) + m_{13}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)} \right] \quad (16)$$

$$y = -f \left[\frac{m_{21}(X - X_o) + m_{22}(Y - Y_o) + m_{23}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)} \right] \quad (17)$$

รูปแบบที่ 2 เป็นการเพิ่มพารามิเตอร์เข้าไปในรูปแบบจำลองที่ 1 เพื่อทำการหาค่าพิกัดของจุดมูขยสำคัญ (x_o, y_o) (กนกศักดิ์ ชื้อธานุวงศ์, 2544; Wolf and Dewitt, 2000; Mikhail *et al.*, 2001)

$$x = -f \left[\frac{m_{11}(X - X_o) + m_{12}(Y - Y_o) + m_{13}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)} \right] + x_o \quad (18)$$

$$y = -f \left[\frac{m_{21}(X - X_o) + m_{22}(Y - Y_o) + m_{23}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)} \right] + y_o \quad (19)$$

รูปแบบที่ 3 การหาองค์ประกอบความผิดเพี้ยนของเลนส์ (k_1, k_2, p_1, p_2) (กนกศักดิ์ ชื้อธานุวงศ์, 2544; Wolf and Dewitt, 2000; Mikhail *et al.*, 2001)

$$x = -f \left[\frac{m_{11}(X - X_o) + m_{12}(Y - Y_o) + m_{13}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)} \right] \quad (20)$$

$$+ x_o + dkx + dtx$$

$$y = -f \left[\frac{m_{21}(X - X_o) + m_{22}(Y - Y_o) + m_{23}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)} \right] \quad (21)$$

$$+ y_o + dky + dty$$

กระบวนการปรับแก้กล้อง

ในการปรับแก้กล้องจะมีขั้นตอนสำหรับการทำงานทั่วไป ๆ ในการปรับแก้ ดังนี้

1. ทำการกำหนดค่าของพารามิเตอร์เบื้องต้นก่อนทำการปรับแก้ ซึ่งจะประกอบไปด้วยความยาวโฟกัส ความผิดเพี้ยนของเลนส์ ค่าพิกัดของจุดเปิดถ่าย และค่าพิกัดของจุดมูขยสำคัญ
2. ติดตั้งสนามวัดสอบเพื่อทำการถ่ายภาพจากกล้องที่ต้องการปรับแก้ โดยมีแบบที่แบนราบตามมาตรฐานขนาดกระดาษ A4 ดังรูปที่ 6 หรืออาจจะสร้างขึ้นเองก็ได้ ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นตามที่กำหนดดังรูปที่ 7
3. กำหนดจุดควบคุมบนภาพที่ทำการถ่ายภาพอย่างน้อย 4 จุดและทำการออกแบบให้จุดควบคุมบนภาพสามารถเห็นได้ชัดเจนหลังจากทำการถ่ายภาพแล้ว ซึ่งจุดควบคุมบนภาพควรมีความถูกต้องทางราบเท่ากับ 0.01 (Waisurasingha, 2004)

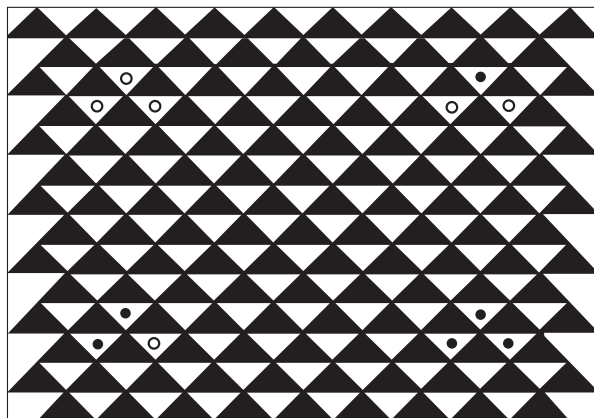


Figure 6. Test field for calibration size A4 (ถนนศักดิ์ ช่อธนาวงศ์, 2544)

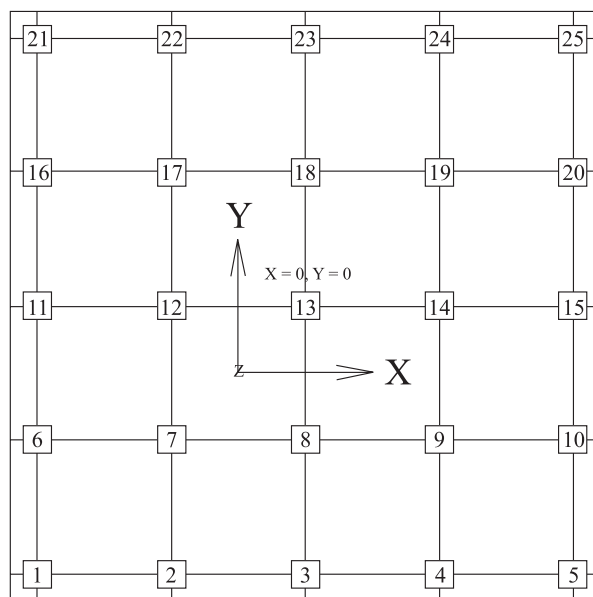


Figure 7. Test field for calibration size 40 × 40 cm (ถนนศักดิ์ ช่อธนาวงศ์, 2544)

4. ทำการถ่ายภาพทุกทิศทางของแผ่นวัดสอบเพื่อที่จะนำไปคำนวณหาองค์ประกอบของกล้องทั้งหมดประกอบการจัดภาพ การวางตัวของภาพถ่าย และลักษณะความผิดเพี้ยนรอบทิศทางของการถ่ายภาพ โดยการถ่ายภาพถ่ายทั้งหมด 4, 6 หรือ 8 ภาพ เพื่อให้ภาพครอบคลุมวัตถุและเห็นมุมควบคุมบนวัตถุอย่างชัดเจน

5. ทำการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ของภาพถ่ายจากกล้องตามแต่ละรูปแบบจำลองของสมการที่ได้นำเสนอข้างต้น โดยการเขียนเป็นโปรแกรมหรืออาจจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเช่น PhotoModeler Pro ที่มีฟังก์ชันนี้อยู่แล้วทำการปรับแก้

6. ทำการตรวจสอบผลของการปรับแก้แต่ละค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยที่ค่าความผิดพลาด

ของพารามิเตอร์แต่ละค่าไม่ควรมากกว่า 80 ไมครอน หรือ 0.08 มิลลิเมตร (Waisurasingha, 2004)

เอกสารอ้างอิง

กนกศักดิ์ ช่อธนาวงศ์. (2544). การวัดสอบกล้องถ่ายภาพดิจิทัล โกดัก ดีซี 240 ขยาย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. หน้า 1-34.

วิชา จิวาลัย และ ปรีชา วงศ์วิวัฒน์. (2531). หลักเบื้องต้นของการสำรวจด้วยภาพถ่าย. ครั้งที่ 2. บ. แอวก้าอินเตอร์เนชั่นแนล จก. กรุงเทพฯ. หน้า 423-458.

Kraus, K. and Waldhausl, P. (1993). Photogrammetry. 1st ed. WB-Druck, Germany, p. 215-229.

Mikhail, E.M., Bethe, J.S., and McGlone, J.C. (2001). Introduction to Modern Photogrammetry. 1st ed. John Wiley & Sons, Inc. USA, p. 301-312.

Waisurasingha, C. (2004). Investigated study of close range photogrammetry for high precision measurement. KKU Engineering J., 31(4):377-394.

Wolf, P.R. and Dewitt, B.A. (2000). Elements of Photogrammetry with Applications in GIS. 3rd ed. McGraw-Hill, USA, p. 233-235.