

## บทที่ 2

### หลักการทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและเอกสาร

#### 2.1 คำนำ

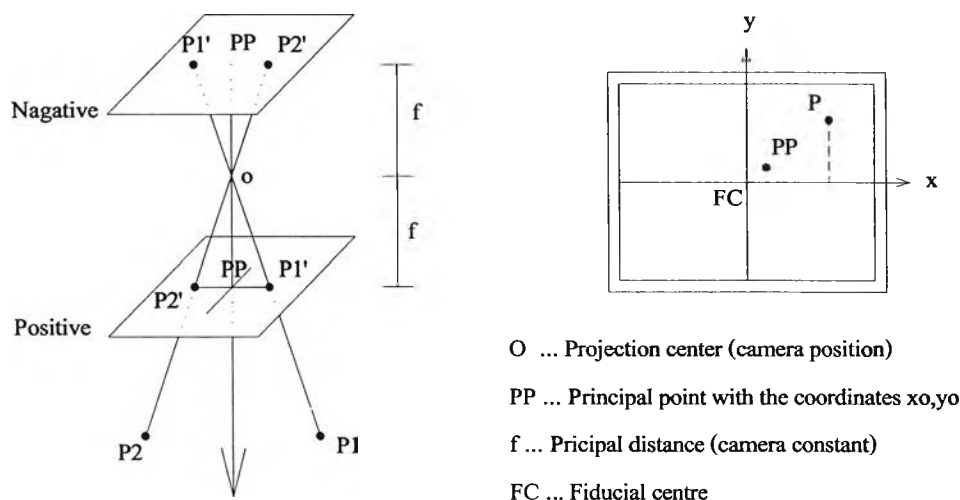
หลักการและทฤษฎี ที่ใช้ในการวัดสอบของกล้องถ่ายภาพดิจิทัล โกดัก คีซี 240 ขยายใช้สมการหลักคือ สมการสถานะร่วมเส้น(Colinearity Equation) และสมการตัวแปรเพิ่มในสมการหลัก สมการสถานะร่วมเส้น ประกอบด้วย องค์ประกอบการการจักษภาพภายนอกและความยาวโฟกัส( $\omega$  ,  $\phi$  ,  $K$  ,  $X_o$  ,  $Y_o$  ,  $Z_o$  ,  $f$  ) สมการตัวแปรเพิ่ม ประกอบด้วย จุดมูขยสำคัญ และสมการโพลิโนเมียลของความเพี้ยนเลนส์ ค่าขององค์ประกอบทั้งหมดจะนำปรับแก้พร้อมกัน โดยใช้ทฤษฎีการปรับแก้ด้วยวิธีสแควร์ของสมการค่าสังเกต(Least Squares Adjustment by Method of Observation Equations) ความละเอียดขององค์ประกอบการจักษภาพแต่ละตัวได้หลังจากการปรับแก้ และการคำนวณเศษเหลือของการประยุกต์หาค่าตำแหน่งพิกัดบนสนามวัดสอบ

องค์ประกอบการจักษภาพภายใน(Inerior Orientation)(  $f$  ,  $x_o$  ,  $y_o$  ,  $k_1$  ,  $k_2$  ,  $p_1$  ,  $p_2$  ) ประกอบด้วย ความยาวโฟกัส(Focal Length or Principal Distance)(  $f$  ) จุดมูขยสำคัญ(Principal Point) ( $x_o,y_o$ ) เป็นความสัมพันธ์ของจุดศูนย์กลางเครื่องหมายดัชนี(Fiducial Center) กับจุดกึ่งกลางระนาบโฟกัส(Focal Plane) เป็นแนวตั้งฉากกับแนวจากจุดรวมแสงของกล้องถ่ายภาพ ความผิดเพี้ยนของเลนส์ (Lens Distortions) ประกอบด้วย ความผิดเพี้ยนตามแนวรัศมี(Radial Distortion)(  $k_1$  ,  $k_2$  ) ความผิดเพี้ยนตามแนวเส้นตั้งฉาก(Tangential or Decentering Lens Distortion)(  $p_1$  ,  $p_2$  ) โดยกล้องถ่ายภาพแบบทั่วไปมีความผิดเพี้ยนของเลนส์และมีการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามลักษณะไม่ปกติ รูปแบบจำลองที่ใช้หาความผิดเพี้ยนของเลนส์ใช้สมการ โพลิโนเมียล(Polynomial Equation)

องค์ประกอบการจักษภาพภายนอก(Exterior Orientation)(  $\omega$  ,  $\phi$  ,  $K$  ,  $X_o$  ,  $Y_o$  ,  $Z_o$  ) ประกอบด้วย การหมุนของภาพถ่าย(Rotation Matrix)(  $\omega$  ,  $\phi$  ,  $K$  ) เป็นองค์ประกอบการวางตัวของระนาบภาพถ่าย การคำนวณหองค์ประกอบการหมุนจะต้องสร้างระบบแกนพิกัดของภาพถ่ายให้ขนานระบบแกนพิกัดของวัตถุที่มีจุดกำเนิดระบบแกนพิกัดเดียวกันและกำหนดให้การหมุนทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเครื่องหมายเป็นบวก ตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพ(Exposure Point)(  $X_o$  ,  $Y_o$  ,  $Z_o$  ) เป็นองค์ประกอบพิกัดตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพที่มีความสัมพันธ์กับสนามวัดสอบ องค์ประกอบของจุดควบคุมภาพถ่าย (Control Point)( $X$  ,  $Y$  ,  $Z$ ) เป็นจุดควบคุมภาพถ่ายในสนามวัดสอบและมีค่าความถูกต้องสูง เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่ใช้หาค่าตัวแปรอื่นในแบบจำลอง

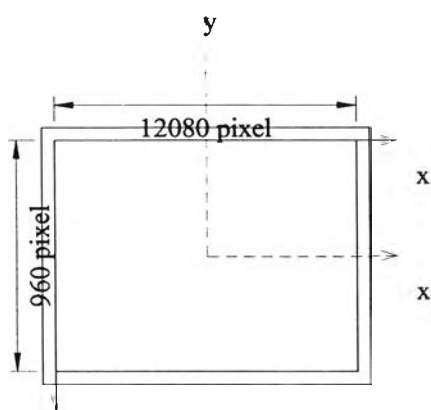
## 2.2 หลักการและทฤษฎีขององค์ประกอบการจัดภาพถ่าย

2.2.1. เรขาคณิตของระบบการฉายภาพ โดยหลักการเป็นระบบการฉายผ่านจุดศูนย์ในระนาบภาพถ่าย คือลำแสงเป็นเส้นตรงตกกระทบบัววัตถุและสะท้อนเข้าหาจากรับภาพ(CCD) ตัวซีซีดีจะทำการแปลงข้อมูลวัตถุให้เป็นข้อมูลภาพถ่ายดิจิทัล



รูปภาพที่ 2.1 ลักษณะของระบบการฉายภาพ และภาพถ่าย

กล้องถ่ายภาพดิจิทัลจะให้ภาพถ่ายดิจิทัลในลักษณะของการฉายภาพแบบ Positive แทนพิกัดข้อมูลภาพถ่ายดิจิทัลอยู่บนซ้าย ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีขนาด 1280x960 pixel ค่าพิเซลมีขนาด 4.2  $\mu\text{m}$  การรังวัดค่าพิกัดบนภาพถ่ายดิจิทัลจะได้ค่าระบบแทนพิกัดบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะต้องทำการแปลงให้เป็นระบบพิกัดของภาพถ่ายที่มีความสัมพันธ์กับสนามวัดสอบก่อนนำไปประมวลผล



$$x_p = (\text{column} - 640) * 4.2 * 10^{-6}$$

$$y_p = (\text{row} - 480) * 4.2 * 10^{-6}$$

โดยให้

column เป็นค่ารังวัดทางแกนหลัก(pixel)

row เป็นค่ารังวัดทางแกนแนว(pixel)

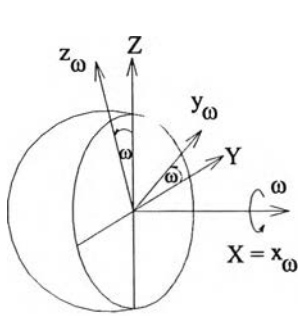
$x_p$  เป็นค่าพิกัดภาพถ่ายทางแกน x

$y_p$  เป็นค่าพิกัดภาพถ่ายทางแกน y

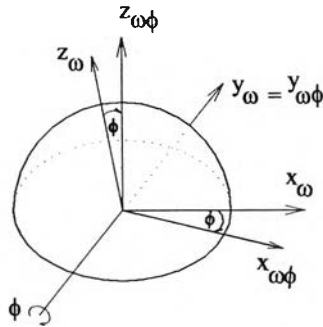
ขนาดของค่าพิเซล 1 pixel = 4.2  $\mu\text{m}$

รูปภาพที่ 2.2 ภาพถ่ายดิจิทัลและการแปลงค่าพิกัดภาพถ่าย

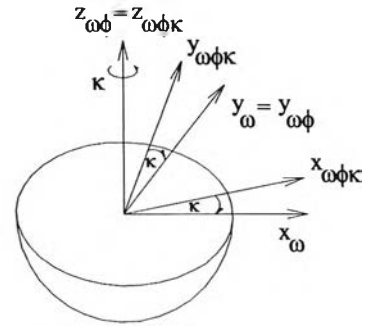
2.2.2. องค์ประกอบการหมุน(Rotation Matrix)(  $\omega$  ,  $\phi$  ,  $K$  ) หลักการหมุนของมุมทั้งสามเป็นอิสระต่อกัน ระบบแกนพิกัดของการหมุนจะต้องขนานกันทั้งสองระบบคือ xyz และ XYZ โดยการหมุนจะถือว่าการหมุนทวนเข็มนาฬิกาเป็นค่าบวก



หมุนรอบแกน X เป็นมุม  $\omega$



หมุนรอบแกน y เป็นมุม  $\phi$



หมุนรอบแกน X เป็นมุม K

รูปภาพที่ 2.3 การหมุนระบบพิกัดฉากสามมิติ

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & -\sin(\omega) \\ 0 & \sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\omega} \\ y_{\omega} \\ z_{\omega} \end{bmatrix} = R_{\omega} \cdot x_{\omega}$$

$$\begin{aligned} X &= x_{\omega} \\ Y &= y_{\omega} \cos(\omega) - z_{\omega} \sin(\omega) \\ Z &= y_{\omega} \sin(\omega) + z_{\omega} \cos(\omega) \end{aligned}$$

$$x_{\omega} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & \sin(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\omega\phi} \\ y_{\omega\phi} \\ z_{\omega\phi} \end{bmatrix} = R_{\phi} \cdot x_{\omega\phi}$$

$$\begin{aligned} x_{\omega} &= x_{\omega\phi} \cos(\phi) + z_{\omega\phi} \sin(\phi) \\ y_{\omega} &= y_{\omega\phi} \\ z_{\omega} &= -x_{\omega\phi} \sin(\phi) + z_{\omega\phi} \cos(\phi) \end{aligned}$$

$$x_{\omega\phi} = \begin{bmatrix} \cos(K) & -\sin(K) & 0 \\ \sin(K) & \cos(K) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\omega\phi K} \\ y_{\omega\phi K} \\ z_{\omega\phi K} \end{bmatrix} = R_K \cdot x$$

$$\begin{aligned} x_{\omega\phi} &= x_{\omega\phi K} \cos(K) - y_{\omega\phi K} \sin(K) \\ y_{\omega\phi} &= x_{\omega\phi K} \sin(K) + y_{\omega\phi K} \cos(K) \\ z_{\omega\phi} &= z_{\omega\phi K} \end{aligned}$$

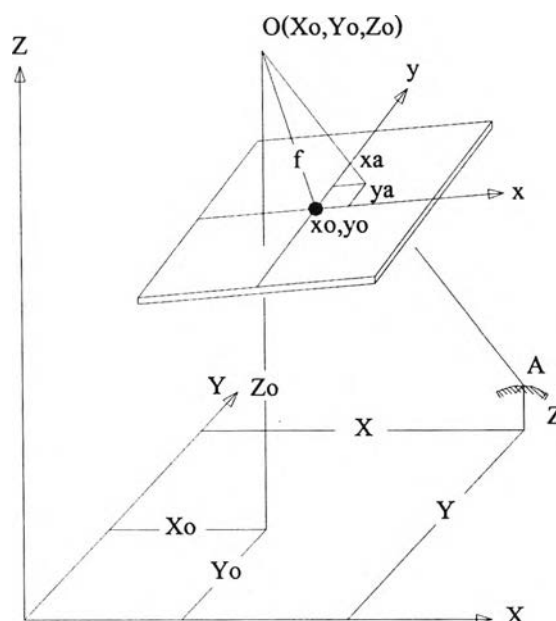
รูปภาพที่ 2.4 สมการการหมุนในระบบพิกัดฉากสามมิติ

$$\text{Rotation Matrix} = \begin{bmatrix} r11 & r12 & r13 \\ r21 & r22 & r23 \\ r31 & r32 & r33 \end{bmatrix}$$

ตารางที่ 2.1 เมทริกซ์การหมุนของภาพถ่าย

$r11 = \cos(\phi) \cdot \cos(K)$	$r12 = \sin(\omega) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(K) + \cos(\omega) \cdot \sin(K)$	$r13 = -\cos(\omega) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(K) + \sin(\omega) \cdot \sin(K)$
$r21 = -\cos(\phi) \cdot \sin(K)$	$r22 = -\sin(\omega) \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(K) + \cos(\omega) \cdot \cos(K)$	$r23 = \cos(\omega) \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(K) + \sin(\omega) \cdot \cos(K)$
$r31 = \sin(\phi)$	$r32 = -\sin(\omega) \cdot \cos(\phi)$	$r33 = \cos(\omega) \cdot \cos(\phi)$

2.2.3. ความสัมพันธ์ภาพถ่ายเดี่ยวขององค์ประกอบการจัดภาพภายใน องค์ประกอบการหมุน องค์ประกอบการจัดภาพภายนอก องค์ประกอบจุดควบคุมถ่ายภาพ สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง พิกัดภาพถ่ายและพิกัดวัตถุเขียนเป็น สมการสภาวะร่วมเส้น (Colinearity Equation) ได้ การคำนวณหา องค์ประกอบการจัดภาพจำเป็นต้องทราบค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่าย (X, Y, Z) อย่างน้อย 4 จุด และทำการวัดพิกัดภาพถ่ายทั้ง 4 จุดบนภาพถ่าย ก็สามารถคำนวณหาองค์ประกอบการจัดภาพ



รูปภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพถ่าย และพิกัดวัตถุของภาพถ่ายเดี่ยว

จากความสัมพันธ์ของพิกัดภาพถ่ายกับพิกัดวัตถุสามารถเขียนเป็นสมการสภาวะร่วมเส้นได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda R(\omega, \phi, \kappa) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

$$x = \lambda [r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)] \quad \dots(1)$$

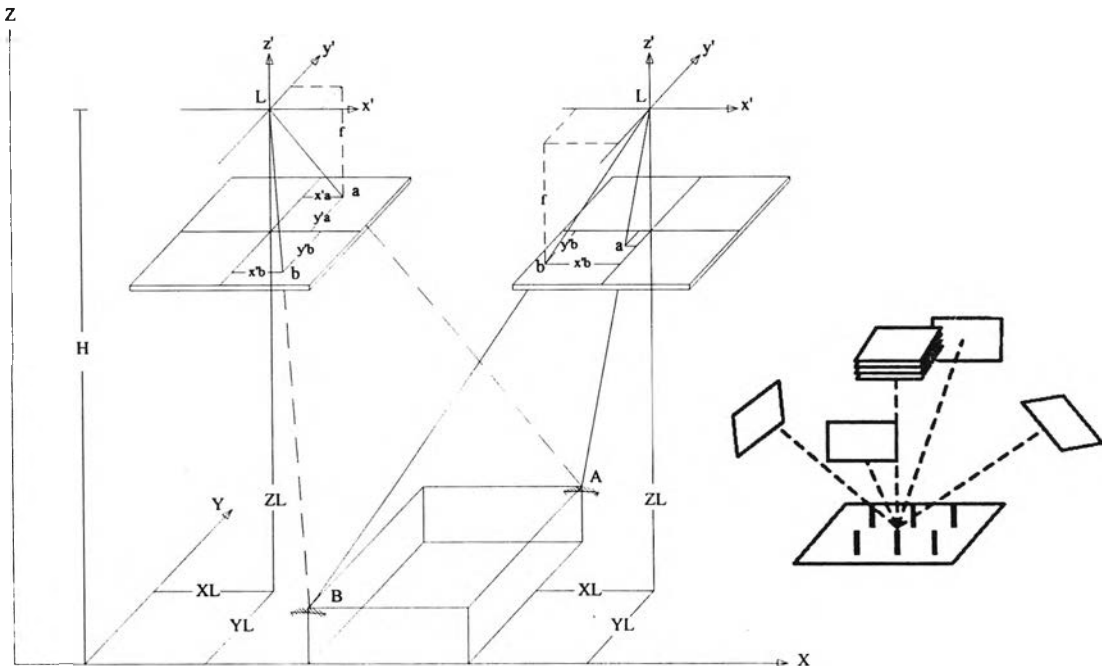
$$y = \lambda [r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)] \quad \dots(2)$$

$$-f = \lambda [r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)] \quad \dots(3)$$

สมการที่ 1 / 3 
$$x = -f \frac{[r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)]}{[r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)]} \quad \dots(2.1)$$

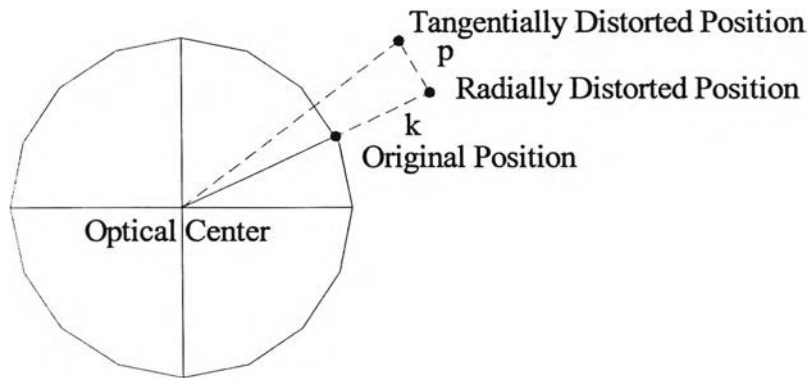
สมการที่ 2 / 3 
$$y = -f \frac{[r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)]}{[r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)]} \quad \dots(2.2)$$

หลักการใช้อินเตอร์เซกชันของภาพคู่สามมิติ โดยใช้สมการสภาวะร่วมเส้นของแต่ละภาพตัดกัน ซึ่งถ้าสนามวัดสอบไม่รู้ค่าความสูงจะต้องถ่ายภาพอย่างน้อย 2 จึงจะคำนวณในลักษณะพิกัดจากสามมิติได้



รูปภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ภาพคู่สามมิติกับวัตถุ และวิธีการถ่ายภาพ

2.2.5. องค์ประกอบความผิดเพี้ยนของเลนส์(Lens Distortions) ความเพี้ยนเลนส์ของกล้องถ่ายภาพแบบทั่วไปเกิดจากการหักเหของเลนส์และความคลาดเคลื่อนในการตั้งศูนย์ชิ้นส่วนต่างๆ ของเลนส์ ความเพี้ยนของเลนส์ไม่ได้ลดคุณภาพของภาพถ่ายแต่จะทำให้คุณภาพทางเรขาคณิตผิดเพี้ยนไป ซึ่งแบ่งเป็นความเพี้ยนตามแนวรัศมี(Radial Distortion) และความเพี้ยนตามแนวเส้นตั้งฉากรัศมี(Decentering Distortion) ดังรูป



รูปภาพที่ 2.7 ลักษณะความผิดเพี้ยนของเลนส์

สมการรูปแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนความเพี้ยนของเลนส์ ต้องทำการเพิ่มเข้าไปในรูปแบบจำลองของสมการสภาวะร่วมเส้น แล้วทำการปรับแก้หาค่าองค์ประกอบทั้งหมดในรูปแบบจำลองนั้น สมการความผิดเพี้ยนของเลนส์ได้จาก สมการ โพลีโนเมียล(Brown,1966)

สมการความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี

$$dkx = (x-x_0)(k_1r^2 + k_2r^4 + \dots) \quad \dots(2.3)$$

$$dky = (y-y_0)(k_1r^2 + k_2r^4 + \dots) \quad \dots(2.4)$$

$$dk = \sqrt{(dkx^2 + dky^2)} \quad \dots(2.5)$$

สมการความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวเส้นสัมผัส

$$dtx = p_1(r^2 + 2(x-x_0)^2) + 2p_2(x-x_0)(y-y_0) \quad \dots(2.6)$$

$$dty = (1 + p_3r^2 + p_4r^4)[p_2(r^2 + 2(y-y_0)^2) + 2p_1(x-x_0)(y-y_0)] \quad \dots(2.7)$$

$$dp = \sqrt{(dtx^2 + dty^2)} \quad \dots(2.8)$$

เพราะฉะนั้นผลรวมความผิดเพี้ยนของเลนส์เขียนได้เป็น

$$r = \sqrt{((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2)}$$

$$dr = \sqrt{(dk^2 + dp^2)} \quad \dots(2.9)$$

2.2.6. รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำวิจัยในการทำวิจัยนี้ ใช้วิธีการปรับแก้แบบ Photo-variant Selfcalibration ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของรูปจำลองทางคณิตศาสตร์แต่ละภาพถ่ายในบล็อกมีค่าเป็นอิสระจากกัน วิธีการนี้เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับใช้กับกล้องถ่ายภาพแบบทั่วไป ทั้งนี้เพราะกล้องถ่ายภาพชนิดนี้ขาดเสถียรภาพของการจัดภาพภายใน ซึ่งมีข้อคือ ภาพถ่ายที่ใช้แต่ละภาพในบล็อก อาจได้มาในลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น ใช้กล้องถ่ายภาพหลายกล้อง หรือ ถ่ายภาพ ณ. ระยะโฟกัสต่างกัน จะมีผลทำให้พารามิเตอร์ของการจัดภาพภายในมีค่าแตกต่างกัน และมีความยืดหยุ่นกว่า ในการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการคำนวณ

รูปแบบที่ 1 การหาองค์ประกอบของ Focal Length(f) , Rotation Matrix( $\omega$  ,  $\phi$  ,  $K$  ) , Exposure Point(  $X_o$  ,  $Y_o$  ,  $Z_o$  )

$$x = -f \frac{[r_{11} \cdot (X - X_o) + r_{12} \cdot (Y - Y_o) + r_{13} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{31} \cdot (X - X_o) + r_{32} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]} \quad \dots(2.10)$$

$$y = -f \frac{[r_{21} \cdot (X - X_o) + r_{22} \cdot (Y - Y_o) + r_{23} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{31} \cdot (X - X_o) + r_{32} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]} \quad \dots(2.11)$$

รูปแบบที่ 2 เป็นการเพิ่มพารามิเตอร์เข้าไปในรูปแบบจำลองที่ 1 เพื่อทำการหาองค์ประกอบของจุด Principal Point(  $x_o$ ,  $y_o$  )

$$x = -f \frac{[r_{11} \cdot (X - X_o) + r_{12} \cdot (Y - Y_o) + r_{13} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{31} \cdot (X - X_o) + r_{32} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]} + x_o \quad \dots(2.12)$$

$$y = -f \frac{[r_{21} \cdot (X - X_o) + r_{22} \cdot (Y - Y_o) + r_{23} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{31} \cdot (X - X_o) + r_{32} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]} + y_o \quad \dots(2.13)$$

รูปแบบที่ 3 การหาองค์ประกอบความเพี้ยนของเลนส์ Lens Distortion(  $k_1, k_2, p_1, p_2$  )

$$x = -f \frac{[r_{11} \cdot (X - X_o) + r_{12} \cdot (Y - Y_o) + r_{13} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{31} \cdot (X - X_o) + r_{32} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]} + x_o + dkx + dtx \quad \dots(2.14)$$

$$y = -f \frac{[r_{21} \cdot (X - X_o) + r_{22} \cdot (Y - Y_o) + r_{23} \cdot (Z - Z_o)]}{[r_{31} \cdot (X - X_o) + r_{32} \cdot (Y - Y_o) + r_{33} \cdot (Z - Z_o)]} + y_o + dky + dty \quad \dots(2.15)$$

### 2.3 หลักการและทฤษฎีของการปรับแก้ลิสต์สแควร์

2.3.1 การคำนวณปรับแก้ของรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สมการสถานะร่วมเส้น และสมการโพลีโนเมียล ใช้เทคนิคลิสต์สแควร์ด้วยสมการค่าสังเกต ซึ่งค่าสังเกตจะต้องเพียงพอที่จะใช้หาแบบจำลองของตัวแปรได้ หลักการของลิสต์สแควร์ เป็นการคาดคะเนตัวแปรของแบบจำลองที่ตั้งขึ้นภายหลังจากคำนวณปรับแก้แล้วความสัมพันธ์แบบจำลองของตัวแปรเข้ากันได้กับค่าการคาดคะเนเทคนิคลิสต์สแควร์ด้วยสมการค่าสังเกต เป็นการใช้ค่าสังเกตให้เป็นฟังก์ชันของตัวแปร เขียนเป็นสมการค่าสังเกตได้ดังนี้

$$L_a = F(X_a) \quad \dots(2.16)$$

วิธีการของสมการค่าสังเกต ใช้ค่าสังเกตเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์  $L_a = F(X_a)$  ซึ่งรูปแบบจำลองที่ใช้แบ่งออกเป็น ฟังก์ชันเชิงเส้น(Linear Model) และ ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น(Nonlinear Model) การใช้เทคนิคลิสต์สแควร์จะต้องทำให้ฟังก์ชันเป็นเชิงเส้นก่อน โดยการกระจายเทอมแบบอนุกรมเทเลอร์

2.3.1.1 สมการค่าสังเกตแบบเชิงเส้น ให้  $l_1^a, l_2^a, l_3^a, \dots, l_n^a$  เป็นค่าถูกของปริมาณค่าสังเกต ให้  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_u$  เป็นค่าตัวแปร และ ให้  $(n)$  เป็นปริมาณของค่าสังเกต  $(u)$  เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า การปรับแก้จะต้องให้ข้อมูลค่าสังเกตมากกว่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า( $n > u$ ) และให้  $l_1^b, l_2^b, l_3^b, \dots, l_n^b$  เป็นค่าสังเกต ให้  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$  เป็นค่าความผิด

สมการค่าสังเกตเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์	สมการค่าสังเกตแบบเชิงเส้น
$l_1^a = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1u}x_u$	$v_1 + l_1^b = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1u}x_u$
$l_2^a = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2u}x_u$	$v_2 + l_2^b = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2u}x_u$
.	.
.	.
$l_n^a = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nu}x_u$	$v_n + l_n^b = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nu}x_u$

สมการเชิงเส้น  $[ \quad_n V_1 + \quad_n L_1^b = \quad_n A_{uu} X_1 ] \quad \dots(2.17)$



2.3.1.2 สมการค่าสังเกตแบบไม่เชิงเส้น จากวิธีการของสมการค่าสังเกต ใช้ค่ารั้งวัด เป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์  $L_a = F(X_a)$  ให้  $L_b + V = F(X_a)$  และ  $F(X + X_0)$  จะต้องทำให้เป็น สมการค่าสังเกตเป็นแบบเชิงเส้นก่อน โดยใช้การกระจายอนุกรมของ Taylor series และจะต้องสมมุติ ค่าประมาณของตัวแปรขึ้นก่อนการปรับแก้

$$L_b + V = F(X_0) + \left( \frac{\partial F}{\partial X_a} \right) X + \dots, X_a = X_0$$

$$\text{ให้ } \left( \frac{\partial F}{\partial X_a} \right) = A \quad \text{และ} \quad F(X_0) = L_0$$

$$L_b + V = F(X_0) + AX$$

$$L_b + V = L_0 + AX$$

$$V = AX + (L_0 - L_b)$$

$$\text{ให้ } L_0 - L_b = L$$

$$V = AX + L$$

2.3.2. น้ำหนักของค่าสังเกต (Weight matrix of Observations) น้ำหนักของค่าสังเกตได้จาก ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ( $\sigma$ ) หรือ ค่าความแปรปรวน (variance) ( $\sigma^2$ ) ในรูปของ (variance-covariance matrix for observed quantities)

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & \sigma_{i2} & \dots & \sigma_{in} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \dots & \sigma_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad \sigma_i^2 = \text{variance}(L_b^i) \quad \text{และ} \quad \sigma_{ij} = \text{covariance}(L_b^i, L_b^j)$$

ให้  $P$  เป็นเมทริกซ์น้ำหนักของค่าสังเกต  $P = Q^{-1}$  ใช้หลักของลีสท์สแควร์  $\phi = VPV \rightarrow \text{minimum}$

$$P_i = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1^2 & & & \\ & 1/\sigma_2^2 & & \\ & & \cdot & \\ & & & 1/\sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad Q \text{ เป็นโคแฟกเตอร์เมทริกซ์}$$

จาก  $\phi = V'PV \rightarrow \text{minimum}$  ให้  $V = AX+L$  ในรูปของสมการเชิงเส้น

$$\begin{aligned} V'PV &= (AX+L)'P(AX+L) \\ &= (X'A'+L')P(AX+L) \\ &= X'A'PAX + X'A'PL + L'PAX + L'PL \end{aligned}$$

ค่า  $X$  และ  $L$  เป็นเวกเตอร์  $X'A'PL = L'PAX$  กฎของการทรานสโพส

$$\begin{aligned} \text{ให้ } N &= A'PA \quad \text{และ} \quad U &= A'PL \\ \phi &= X'NX + 2X'U + L'PL \end{aligned} \quad \dots(2.18)$$

หลักการลิสต์สแควร์สมการ (2.18) จะต้องมีค่าน้อยที่สุด โดยการ Partial derivative เทียบตัวแปร  $X$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial X} &= X'N' + U' = 0 \\ NX + U &= 0 \end{aligned}$$

$$X = -N^{-1}.U = -(A'PA)^{-1}.(A'PL) \quad \dots(2.19)$$

2.3.3. ความละเอียดในการปรับแก้ของค่าตัวแปร (Precision in adjustment for parameter) การหาความละเอียดของตัวแปรจะอยู่ในรูปของโคแฟกเตอร์เมทริกซ์ของความแปรปรวน(variance and covariance matrices)

$$\begin{aligned} Q_x &= (A'PA)^{-1} \\ \Sigma_x &= \sigma_0^2 Q_x \end{aligned}$$

$\sigma_0^2$  คือความแปรปรวนอ้างอิง (Reference variance) ให้เป็น 1

หลังจากการคำนวณปรับแก้ในการวนซ้ำจนกระทั่ง  $V'PV$  คงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง สามารถคำนวณค่าของความแปรปรวนหลังการปรับแก้ได้

$$\sigma_0^2 \Rightarrow \text{a posteriori variance of unit weight} \quad \hat{\sigma}_0^2 = \frac{V'PV}{n-u}$$

เพราะฉะนั้นความละเอียดของตัวแปร

$$\Sigma_x = \hat{\sigma}_0^2 Q_x \quad \dots(2.20)$$

## 2.4 การคำนวณหาองค์ประกอบการจัดภาพ

การคำนวณหาองค์ประกอบการจัดภาพโดยทั้งหมดใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด การถ่ายภาพทั้งหมด 8 ภาพ โดยถ่ายข้างบน 4 ภาพ และเอียงทำมุมประมาณ 45 องศา 4 ภาพรอบสนามวัดสอบ ดังรูป

### 2.4.1 กำหนดให้

ภาพบน 4 ภาพ

$$\text{Photo1} = F1(\omega_1, \phi_1, K1, X_{o1}, Y_{o1}, Z_{o1})$$

$$\text{Photo2} = F2(\omega_2, \phi_2, K2, X_{o2}, Y_{o2}, Z_{o2})$$

$$\text{Photo3} = F3(\omega_3, \phi_3, K3, X_{o3}, Y_{o3}, Z_{o3})$$

$$\text{Photo4} = F4(\omega_4, \phi_4, K4, X_{o4}, Y_{o4}, Z_{o4})$$

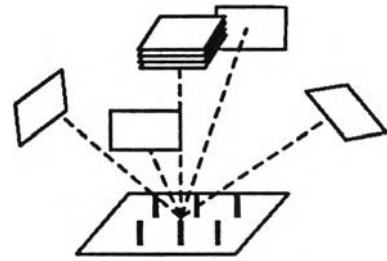
ภาพเอียง 4 ภาพ

$$\text{Photo5} = F5(\omega_5, \phi_5, K5, X_{o5}, Y_{o5}, Z_{o5})$$

$$\text{Photo6} = F6(\omega_6, \phi_6, K6, X_{o6}, Y_{o6}, Z_{o6})$$

$$\text{Photo7} = F7(\omega_7, \phi_7, K7, X_{o7}, Y_{o7}, Z_{o7})$$

$$\text{Photo8} = F8(\omega_8, \phi_8, K8, X_{o8}, Y_{o8}, Z_{o8})$$



### 2.4.2 ต้องการหาค่าองค์ประกอบการจัดภาพในแต่ละแบบจำลอง

แบบจำลอง 1 ภาพถ่าย 8 ภาพ 48 ตัวแปร และความยาวโฟกัส 1 ตัวแปร รวม 49 ตัวแปร

แบบจำลอง 2 ภาพถ่าย 8 ภาพ 48 ตัวแปร และความยาวโฟกัส 1 ตัวแปร และสมการเพิ่มของจุดमुख्यสำคัญ 2 ตัวแปร รวม 51 ตัวแปร

แบบจำลอง 3 ภาพถ่าย 8 ภาพ 48 ตัวแปร และความยาวโฟกัส 1 ตัวแปร สมการเพิ่มของจุดमुख्यสำคัญ 2 ตัวแปรและความเพี้ยนของเลนส์ 4 ตัวแปร รวม 55 ตัวแปร

### 2.4.3 ข้อมูลภาพถ่ายเป็นค่าสังเกต

โดยวัดข้อมูลภาพถ่ายของจุดควบคุมอย่างน้อย 4 จุดในหนึ่งภาพ สามารถเขียนเป็นสมการได้  $4 \times 2 \times 8 = 64$  สมการ ซึ่งเพียงพอกับตัวแปรที่ต้องการหาทั้งสามแบบจำลอง

เวกเตอร์ของค่าสังเกตให้เป็น  $L_b$  โดยมีขนาด  $n=64$

$$L_{b1}[x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ x_3 \ y_3 \ x_4 \ y_4]^t$$

$$L_{b3}[x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ x_3 \ y_3 \ x_4 \ y_4]^t$$

$$L_{b5}[x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ x_3 \ y_3 \ x_4 \ y_4]^t$$

$$L_{b7}[x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ x_3 \ y_3 \ x_4 \ y_4]^t$$

$$L_{b2}[x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ x_3 \ y_3 \ x_4 \ y_4]^t$$

$$L_{b4}[x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ x_3 \ y_3 \ x_4 \ y_4]^t$$

$$L_{b6}[x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ x_3 \ y_3 \ x_4 \ y_4]^t$$

$$L_{b8}[x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ x_3 \ y_3 \ x_4 \ y_4]^t$$

เวกเตอร์ของค่าประมาณของค่าสังเกต ได้จากการประมาณค่าเริ่มต้นของตัวแปรและค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายบนสนามวัดสอบ เข้าไปคำนวณในแบบจำลองให้เป็น  $L_0$

ค่าประมาณขององค์ประกอบ  $X^0 = (\omega, \phi, K, X_0, Y_0, Z_0, f, x_0, y_0, k_1, k_2, p_1, p_2)$  รวมทั้งหมด 8 ภาพ

ค่าพารามิเตอร์  $x = (\omega, \phi, K, X_0, Y_0, Z_0)$  ของแต่ละภาพ

จุดควบคุมที่รู้ค่าพิกัด  $(X, Y, Z)$

$L_{01}[F_{1x}(\omega_1, \phi_1, K_1, X_{01}, Y_{01}, Z_{01}), F_{1y}(\omega_1, \phi_1, K_1, X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$

$F_{2x}(\omega_1, \phi_1, K_1, X_{01}, Y_{01}, Z_{01}), F_{2y}(\omega_1, \phi_1, K_1, X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$

$F_{3x}(\omega_1, \phi_1, K_1, X_{01}, Y_{01}, Z_{01}), F_{3y}(\omega_1, \phi_1, K_1, X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$

$F_{4x}(\omega_1, \phi_1, K_1, X_{01}, Y_{01}, Z_{01}), F_{4y}(\omega_1, \phi_1, K_1, X_{01}, Y_{01}, Z_{01})]$

ในการทำงานเดียวกัน  $L_{02}, L_{03}, L_{04}, L_{05}, L_{06}, L_{07}, L_{08}$  ก็เช่นกัน

#### 2.4.4 วิธีการปรับแก้หาองค์ประกอบ

2.4.4.1 การหา Matrix A ในแต่ละรูปแบบจำลอง นำค่าตัวพารามิเตอร์ใส่ในรูปแบบจำลองที่ใช้แต่ละรูปแบบจำลอง จากนั้นกระจายเทอมแบบอนุกรมเทเลอร์ของแต่ละภาพ

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{1x}}{\partial x} \\ \frac{\partial F_{1y}}{\partial x} \\ \frac{\partial F_{1x}}{\partial y} \\ \frac{\partial F_{1y}}{\partial y} \end{bmatrix} \text{ ในทำงานองเดียวกัน } A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8 \text{ ก็จะกระจายเป็นเชิงเส้นก่อน}$$

เพราะฉะนั้น Matrix A จะเป็นบล็อกของภาพถ่ายทั้งหมด 8 ภาพ

$$\begin{bmatrix} \text{Photo} & \Lambda & \text{Photo} & f & x_0 & y_0 & k_1 & k_2 & p_1 & p_2 \\ A_1 & M & 0 & A_1 & A_1 & A_1 & A_1 & A_1 & A_1 & A_1 \\ 0 & M & 0 & A_2 & A_2 & A_2 & A_2 & A_2 & A_2 & A_2 \\ 0 & M & 0 & A_3 & A_3 & A_3 & A_3 & A_3 & A_3 & A_3 \\ 0 & M & 0 & A_4 & A_4 & A_4 & A_4 & A_4 & A_4 & A_4 \\ 0 & M & 0 & A_5 & A_5 & A_5 & A_5 & A_5 & A_5 & A_5 \\ 0 & M & 0 & A_6 & A_6 & A_6 & A_6 & A_6 & A_6 & A_6 \\ 0 & M & 0 & A_7 & A_7 & A_7 & A_7 & A_7 & A_7 & A_7 \\ 0 & M & A_8 & A_8 & A_8 & A_8 & A_8 & A_8 & A_8 & A_8 \end{bmatrix}$$

$$L = L_0 - L_b$$

$$N = A' P A \quad U = A' P L$$

$$x = -N^{-1} U \quad V = Ax + L$$

$$X^1 = X^0 + x \text{ (ทำการวนลูปจน } V' P V \text{ เท่าเดิม)}$$

## 2.5 การคำนวณวัตถุจากองค์ประกอบภาพถ่ายที่คำนวณได้

จากการคำนวณปรับแก้หาองค์ประกอบการจัดภาพ ภายหลังจากปรับแก้สามารถบอกความละเอียดถูกต้องขององค์ประกอบที่คำนวณได้มีความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง การตรวจสอบอีกอย่างหนึ่งที่สามารถบอกได้ว่าองค์ประกอบที่คำนวณได้มีความถูกต้อง คือ การย้อนกลับไปคำนวณวัตถุจากองค์ประกอบที่คำนวณได้ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด เช่นกัน

2.5.1. วิธีการ กำหนดให้ทราบค่าองค์ประกอบการจัดภาพที่คำนวณได้ ต้องการหาค่าพิกัดวัตถุบนสนามวัดสอบที่ทราบค่าพิกัด (X,Y,Z)

แบบจำลองทราบค่า  $(\omega, \phi, K, X_o, Y_o, Z_o, f, x_o, y_o, k_1, k_2, p_1, p_2)$

ค่าประมาณของวัตถุ  $X^0 = (X_1, Y_1, Z_1)$

ค่าสังเกตให้เป็น  $L_b$  โดยมีขนาด  $n=16$

$$L_{b1}[x_1 \ y_1]^t \qquad L_{b2}[x_1 \ y_1]^t$$

$$L_{b3}[x_1 \ y_1]^t \qquad L_{b4}[x_1 \ y_1]^t$$

$$L_{b5}[x_1 \ y_1]^t \qquad L_{b6}[x_1 \ y_1]^t$$

$$L_{b7}[x_1 \ y_1]^t \qquad L_{b8}[x_1 \ y_1]^t$$

ค่าประมาณของค่าสังเกต  $L_0$

$$L_{01}[F_{1x}(\omega_1, \phi_1, K_1, X_{o1}, Y_{o1}, Z_{o1}, X_1, Y_1, Z_1), F_{1y}(\omega_1, \phi_1, K_1, X_{o1}, Y_{o1}, Z_{o1}, X_1, Y_1, Z_1)]$$

$$L_{02}[F_{2x}(\omega_2, \phi_2, K_2, X_{o2}, Y_{o2}, Z_{o2}, X_1, Y_1, Z_1), F_{2y}(\omega_2, \phi_2, K_2, X_{o2}, Y_{o2}, Z_{o2}, X_1, Y_1, Z_1)]$$

$$L_{03}[F_{3x}(\omega_3, \phi_3, K_3, X_{o3}, Y_{o3}, Z_{o3}, X_1, Y_1, Z_1), F_{3y}(\omega_3, \phi_3, K_3, X_{o3}, Y_{o3}, Z_{o3}, X_1, Y_1, Z_1)]$$

$$L_{04}[F_{4x}(\omega_4, \phi_4, K_4, X_{o4}, Y_{o4}, Z_{o4}, X_1, Y_1, Z_1), F_{4y}(\omega_4, \phi_4, K_4, X_{o4}, Y_{o4}, Z_{o4}, X_1, Y_1, Z_1)]$$

$$L_{05}[F_{5x}(\omega_5, \phi_5, K_5, X_{o5}, Y_{o5}, Z_{o5}, X_1, Y_1, Z_1), F_{5y}(\omega_5, \phi_5, K_5, X_{o5}, Y_{o5}, Z_{o5}, X_1, Y_1, Z_1)]$$

$$L_{06}[F_{6x}(\omega_6, \phi_6, K_6, X_{o6}, Y_{o6}, Z_{o6}, X_1, Y_1, Z_1), F_{6y}(\omega_6, \phi_6, K_6, X_{o6}, Y_{o6}, Z_{o6}, X_1, Y_1, Z_1)]$$

$$L_{07}[F_{7x}(\omega_7, \phi_7, K_7, X_{o7}, Y_{o7}, Z_{o7}, X_1, Y_1, Z_1), F_{7y}(\omega_7, \phi_7, K_7, X_{o7}, Y_{o7}, Z_{o7}, X_1, Y_1, Z_1)]$$

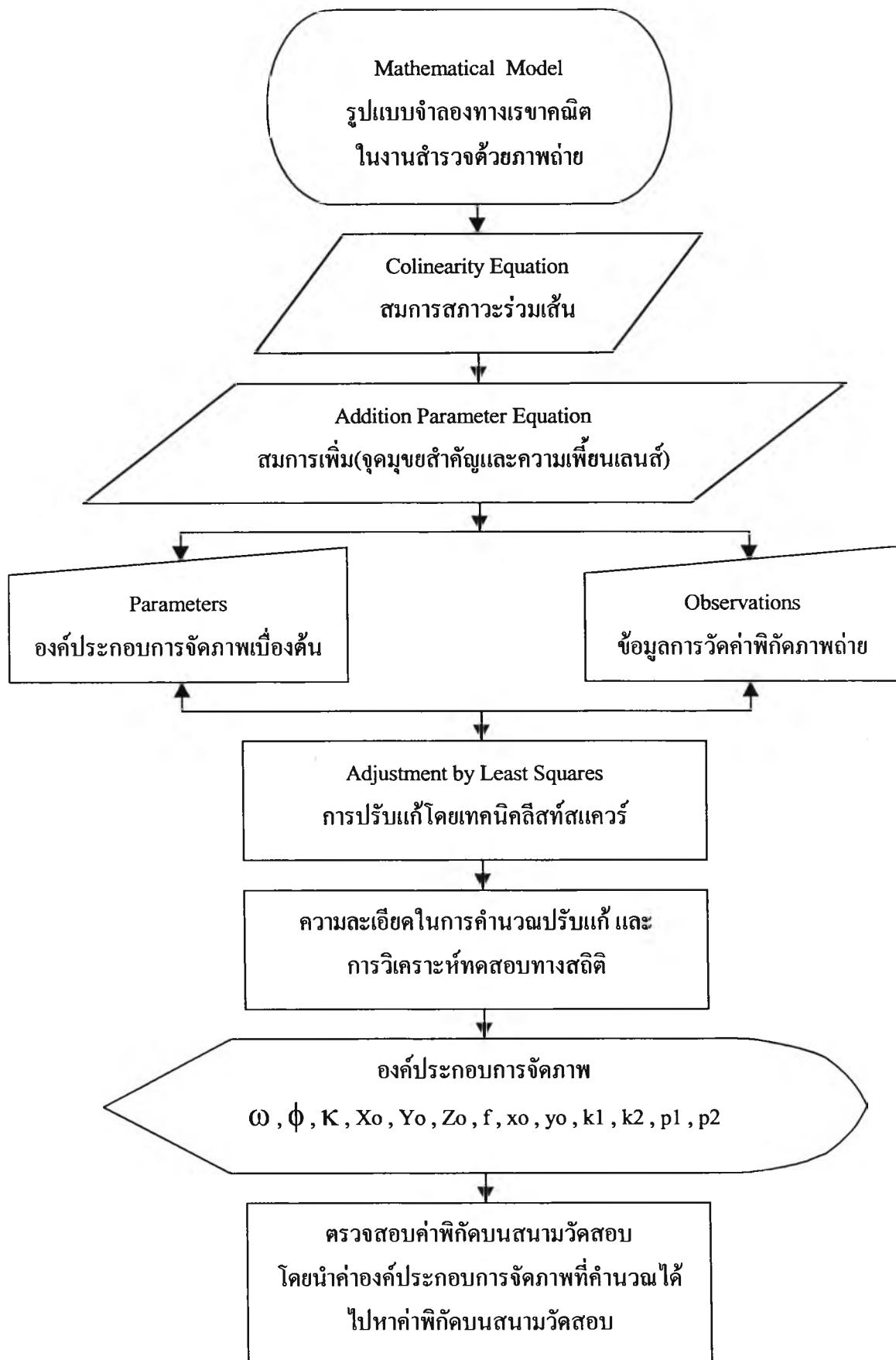
$$L_{08}[F_{8x}(\omega_8, \phi_8, K_8, X_{o8}, Y_{o8}, Z_{o8}, X_1, Y_1, Z_1), F_{8y}(\omega_8, \phi_8, K_8, X_{o8}, Y_{o8}, Z_{o8}, X_1, Y_1, Z_1)]$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} \end{bmatrix} \qquad L = L_0 - L_b$$

$$N = A^t A \qquad U = A^t L \qquad x = -N^{-1} U$$

$$X^1 = X^0 + x \quad (\text{ทำการวนลูปจน } V^t V \text{ เท่าเดิม})$$

คำนวณหาเศษเหลือ = ค่าพิกัดบนสนามวัดสอบ - ค่าพิกัดที่คำนวณจากองค์ประกอบ



รูปภาพที่ 2.8 ลำดับขั้นตอนของหลักการและทฤษฎีการวิจัย

## 2.6 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

(Kerry McIntosh,1996) เป็นงานวิจัย ให้เป็นความรู้เกี่ยวกับการวัดสอบกล้องถ่ายภาพหลายๆ ตัว ตลอดจนสามารถนำกล้องถ่ายภาพไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือในการวัดความละเอียด หลักการขององค์ประกอบการวัดสอบ คือ การปรับแก้ด้วยวิธีการคำนวณของการวัดบนสนามวัดสอบ การปฏิบัติ การวัดสอบใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัล ซึ่งเป็นกล้องถ่ายภาพระยะใกล้ทั้งหมด 4 ตัว

รูปแบบจำลองของการตรวจแก้

1. ความเพี้ยนตามแนวรัศมี (Fryer & Brown ,1986 and Karara , 1989)

$$\delta r = k_1.r^3 + k_2.r^5 + k_3.r^7 + \dots$$

$$r^2 = (x-x_p)^2 + (y-y_p)^2$$

2. ความเพี้ยนตามแนวเส้นตั้งฉาก (Fryer & Brown , 1986)

$$\Delta x = [ P_1.(r^2 + 2x^2) + 2.P_2xy][1 + P_3.r^2 + \dots]$$

$$\Delta y = [ P_2.(r^2 + 2y^2) + 2.P_1xy][1 + P_3.r^2 + \dots]$$

(DongBin Chen and Yidong Huang,2000) เป็นงานขบวนการวัดสอบโดยอัตโนมัติและผลการวัดสอบของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลแบบขยาย ทำให้เกิดความน่าเชื่อถือของพารามิเตอร์การจับภาพภายใน และการจับภาพภายนอกกับการวัดค่าพิกัดด้วยกล้องประมวลผลรวม(Total-Station) ทำการวัดสอบ 5 ชุดของแต่ละครั้งในการตั้งค่าความยาวโฟกัส ผลลัพธ์ทำให้เกิดความถูกต้องและความน่าเชื่อถือสำหรับการวิเคราะห์ผลในการวัดสอบ กล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่ใช้ Sony EVI-371D โดยการตั้งค่าความยาวโฟกัสจาก 5.4 มิลลิเมตร ถึง 64.8 มิลลิเมตร โดยใช้โฟกัสอัตโนมัติ 12xzoom

การคำนวณค่าพิกัดสามมิติ

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} -\cos(v_0) \cdot \sin(h - h_0) \\ \sin(v) \cdot \sin(v_0) + \cos(v) \cdot \cos(v_0) \cdot \cos(h - h_0) \\ \cos(v) \cdot \sin(v_0) - \sin(v) \cdot \cos(v_0) \cdot \cos(h - h_0) \end{bmatrix}$$

รูปแบบจำลองของความเพี้ยน

$$\delta x = A \cdot x + x(k_1.r^2 + k_2.r^4 + k_3.r^6) + p_1.(r^2 + 2x^2) + p_2.(2xy)$$

$$\delta y = A \cdot y + y(k_1.r^2 + k_2.r^4 + k_3.r^6) + p_1.(2xy) + p_2.(r^2 + 2y^2)$$

(H.EI-Habrouk and W.Faig,1996) กล้องถ่ายภาพดิจิทัลเป็นสิ่งที่ประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมและวิศวกรรม การวัดสอบกล้องถ่ายภาพทำให้เกิดความสำเร็จของผลความละเอียดถูกต้อง การวัดสอบกล้องถ่ายภาพดิจิทัลคำนึงกับข้อมูลภาพถ่ายดิจิทัลในโปรแกรม อย่างไรก็ตามตัวแปรที่มีอยู่เป็นสิ่งที่ยากหรือไม่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม งานวิจัยแสดงให้เห็นการใช้การวัดสอบในตัวของการกำหนดคุณลักษณะของกล้องถ่ายภาพดิจิทัล Fujix DS-100 ผลการศึกษาของการปรับแก้พร้อมกันกับข้อมูลภาพถ่ายดิจิทัล โดยวิธีการวัดสอบในตัว ซึ่งเป็นทางออกที่ดีมากในการวัดสอบกล้องถ่ายภาพดิจิทัล

โปรแกรมที่ใช้ UNBASC2 ซึ่งใช้แบบจำลองความเพี้ยน(Moniwa,1977 and Faig etal,1990)

1. ความเพี้ยนตามแนวรัศมี

$$dr = k1.r^3 + k2.r^5 + k3.r^7 + \dots$$

$$dr_x = (x-xo)( k1.r^2 + k2.r^4 + k3.r^6 + \dots)$$

$$dr_y = (y-yo)( k1.r^2 + k2.r^4 + k3.r^6 + \dots)$$

2. ความเพี้ยนตามแนวเส้นตั้งฉาก

$$dp_x = (1+p3.r^2 + p4.r^4 + \dots).[p1.\{r^2+2.(x-xo)\}^2+2.p2.(x-xo).(y-yo)]$$

$$dp_y = (1+p3.r^2 + p4.r^4 + \dots).[p2.\{r^2+2.(y-yo)\}^2+2.p1.(x-xo).(y-yo)]$$

(CIPA,1999) เป็นการประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลในการเก็บรายละเอียดของสถาปัตยกรรม Zurich City Hall โดยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล 2 ตัว คือ Olympus C1400L และ Fuji DS300 การเกิดพารามิเตอร์การจัดภาพภายใน กำหนดโดยการวัดสอบในสนาม ได้ค่าความเพี้ยน ดังรูป

โค้งความเพี้ยนของเลนส์ Olympus C1400L

โค้งความเพี้ยนของเลนส์ Fuji DS300

