

บทที่ 2

หลักการทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและเอกสาร

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหาความเหมาะสมของการใช้กล้องดิจิทัลในการวัดแบบจำลองรถยนต์ อาศัยการเปรียบเทียบแบบจำลองรถยนต์ที่ได้จากวิธีการที่แตกต่างกัน โดยที่วิธีการแรกเป็นวิธีการทางงานสำรวจด้วยกล้องวัดมุมในการวัดแบบจำลองซึ่งให้ความถูกต้องสูง กับ การวัดแบบจำลองรถยนต์ด้วยกล้องภาพถ่ายดิจิทัลที่กำหนดตัวแปรในการถ่ายภาพที่เปลี่ยนไป เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรนั้นๆ ในการหาความเหมาะสมของการวัดในระดับมิลลิเมตร ทั้งนี้ยังคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ อันส่งผลให้การวัดแบบจำลองมีความถูกต้องลดลง

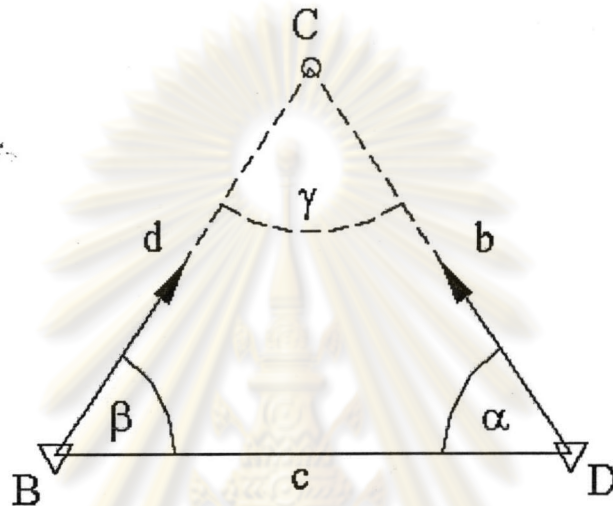
การวัดแบบจำลองรถยนต์ด้วยวิธีการทางงานสำรวจด้วยกล้องวัดมุมกระทำในลักษณะของการรังวัดแบบเล็งสกัด (Intersection Method) ซึ่งเป็นการวัดมุมราบและมุมตั้งจากจุดที่ทราบค่าพิกัดสองจุดไปยังจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด ด้วยวิธีการดังกล่าวเงื่อนไขที่สำคัญเกี่ยวกับความถูกต้องของแบบจำลองขึ้นตรงต่อความละเอียดในการวัดมุมทั้งทางราบและทางตั้ง โดยสามารถควบคุมได้ด้วยการใช้กล้องวัดมุมที่มีความละเอียดในการอ่านค่ามุมที่พอเพียงกับความถูกต้องที่ต้องการ อีกทั้งในปัจจุบันเทคโนโลยีเกี่ยวกับงานเครื่องมือสำรวจพัฒนาไปอยู่ในรูปแบบที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้การทำงานรังวัดภาคสนามมีความสะดวกมากขึ้น อีกทั้งยังลดข้อผิดพลาดอันเกิดเนื่องจากผู้รังวัด ซึ่งค่าพิกัดของแบบจำลองรถยนต์ด้วยวิธีการรังวัดแบบเล็งสกัด จะเป็นค่าที่ใช้เป็นจุดควบคุมภาพถ่าย (Control Point) สำหรับแบบจำลองด้วยวิธีการทางภาพถ่ายต่อไป

สำหรับการวัดแบบจำลองด้วยวิธีการทางภาพถ่ายจำเป็นต้องอาศัยหลักการของการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ ในการประมวลผลเพื่อการวัดแบบจำลองสามมิติ โดยลำดับของการวัดแบบจำลองรถยนต์ด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลนั้น สามารถเริ่มจากการวัดสอบกล้องถ่ายภาพที่ใช้ในการวัดซึ่งเป็นการหาค่าองค์ประกอบภาพในของกล้องถ่ายภาพ $(f, x_0, y_0, k_1, k_2, p_1, p_2)$ การหาองค์ประกอบภายนอก (Exterior Orientation) $(X_0, Y_0, Z_0, K, \phi, \omega)$ ซึ่งต้องอาศัยค่าพิกัดสามมิติของจุดควบคุมภาพถ่ายในการประมวลผลแบบจำลองตามสภาวะร่วมเส้น (Colinearity Conditions) และการวิเคราะห์บล็อกลำแสง

2.1 การรังวัดแบบเล็งสกัด

2.1.1 เรขาคณิตของพิกัดทางราบ (Geometry of Horizontal Coordinates)

ค่าพิกัดทางราบของการรังวัดแบบเล็งสกัด โดยการรังวัดมุมราบและมุมตั้งจากตำแหน่งที่ทราบค่าพิกัดแล้วสองจุดและระยะทางราบระหว่างจุดที่ทราบค่าทั้งสอง ตามรูปภาพที่ 2.1



รูปภาพที่ 2.1 เรขาคณิตของพิกัดทางราบโดยการเล็งสกัด

จากรูปพิจารณาตำแหน่งรังวัด C ด้วยการเล็งสกัด ระยะทางราบ c และทิศทาง A_{BD} เขียนตามสมการที่ (2.1)

$$c = [(X_D - X_B)^2 + (Y_D - Y_B)^2]^{1/2} \quad (2.1)$$

$$\tan A_{BD} = \frac{X_D - X_B}{Y_D - Y_B}$$

ในสามเหลี่ยม DBC , $\gamma = 180^\circ - (\alpha + \beta)$ ดังนั้น

$$d = \frac{c \sin \beta}{\sin \gamma} \quad \text{and} \quad b = \frac{c \sin \alpha}{\sin \gamma} \quad (2.2)$$

การคำนวณพิกัดทางราบของจุด C อาศัยมุมราบ α , β และระยะทางราบ C เป็นเส้นฐานซึ่งคำนวณจากพิกัดของจุดรังวัดที่ทราบค่าแล้วสองจุด D, B ในสามเหลี่ยม BCD สำหรับสมการที่ (2.1) และ (2.2) เป็น

$$Y_C = Y_D + b \cos A_{DC} = Y_D + \frac{c \sin \beta}{\sin \gamma} \cos(A_{DB} + \beta) \quad (2.3)$$

$$Y_C = Y_D + \frac{c \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \cos(A_{DB} + \beta)$$

จาก

$$\cos(A_{DB} + \beta) = \cos A_{DB} \cos \beta - \sin A_{DB} \sin \beta$$

ดังนั้น

$$\sin A_{DB} = \frac{X_B - X_D}{c} \quad \text{and} \quad \cos A_{DB} = \frac{Y_B - Y_D}{c} \quad (2.4)$$

$$\cos(A_{DB} + \beta) = \frac{Y_B - Y_D}{c} \cos \beta - \frac{X_B - X_D}{c} \sin \beta$$

แทนสมการ (2.4) ในสมการที่ (2.3) จะได้ว่า

$$Y_C = Y_D + (Y_B - Y_D) \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} - (X_B - X_D) \frac{\sin \beta \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$= Y_D + \frac{(Y_B - Y_D) \cot \beta}{\cot \alpha + \cot \beta} - \frac{(X_B - X_D)}{\cot \alpha + \cot \beta} \quad (2.5)$$

$$= \frac{(X_D - X_B) + Y_D \cot \alpha + Y_B \cot \beta}{\cot \alpha + \cot \beta}$$

ในทำนองเดียวกันค่าพิกัด X_C เป็น

$$X_C = \frac{(Y_D - Y_B) + X_D \cot \alpha + X_B \cot \beta}{\cot \alpha + \cot \beta} \quad (2.6)$$

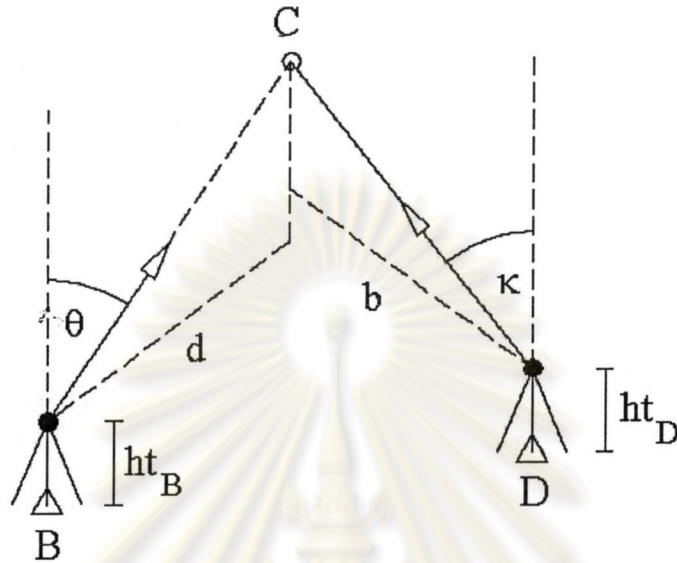
2.1.2 เรขาคณิตของพิกัดทางตั้ง

จากค่าพิกัดทางราบของตำแหน่งรังวัด C สามารถคำนวณหาค่าของระยะราบ d , b ได้ด้วยสมการ

$$d = [(X_C - X_B)^2 + (Y_C - Y_B)^2]^{1/2} \quad (2.7)$$

$$b = [(X_C - X_D)^2 + (Y_C - Y_D)^2]^{1/2}$$

เมื่อพิจารณารูปภาพที่ 2.2 แสดงค่ารั้ววัดมุมตั้ง θ , κ ค่าระดับ ณ. ตำแหน่งที่เล็งสกัด
คำนวณได้จากสมการ



รูปภาพที่ 2.2 เรขาคณิตของพิกัดทางตั้งโดยการเล็งสกัด

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_B + ht_B + d \cot \theta \\ Z_2 &= Z_D + ht_D + b \cot \kappa \end{aligned} \quad (2.8)$$

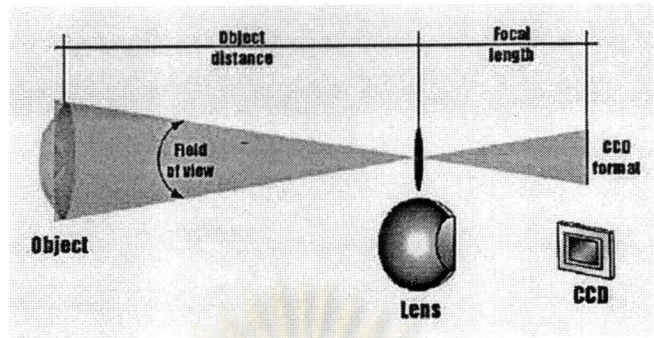
เมื่อ ht_B และ ht_D เป็นค่าความสูงของการตั้งกล้อง ณ.ตำแหน่ง B และ D ตามลำดับ
ค่าระดับของตำแหน่งเล็งสกัด C เป็น

$$Z_C = \frac{Z_1 + Z_2}{2} \quad (2.9)$$

2.2 แบบจำลองด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล

2.2.1 เรขาคณิตของการฉาย

โดยหลักการการฉายเป็นระบบผ่านจุดศูนย์กลางในระนาบภาพถ่าย คือลำแสงจาก
แหล่งกำเนิดเดินทางเป็นเส้นตรงตกกระทบวัตถุและสะท้อนเข้าหาจากรับภาพ ซีซีดี จะทำการแปลง
ข้อมูลความเข้มของแสงและสีให้เป็นข้อมูลภาพถ่ายดิจิทัลที่แสดงด้วยตัวเลข

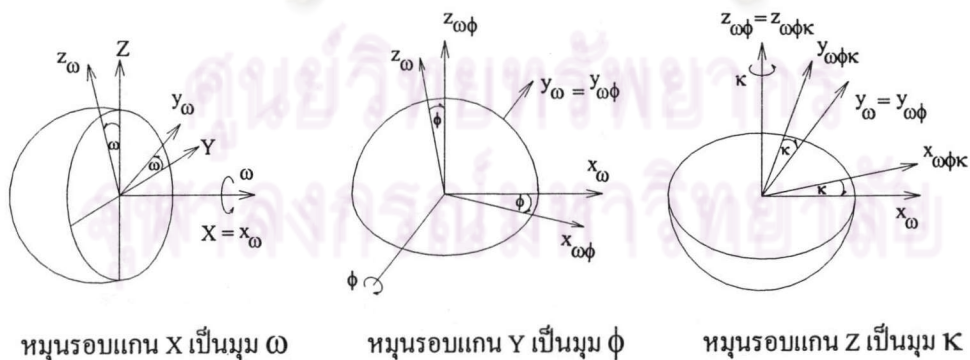


รูปภาพที่ 2.3 หลักการฉายของภาพถ่าย

ตำแหน่งต่างๆบนภาพถ่ายดิจิทัลแสดงด้วยค่าของแถวและหลัก(Row and Column)ที่เรียงกันของชิ้นส่วน ซีซีดี ซึ่งเป็นข้อมูลรั้วัดบนภาพถ่ายสำหรับการประมวลผลเพื่อหาค่าของพิกัดสามมิติของแบบจำลอง

2.2.2 องค์ประกอบของการหมุน

หลักการหมุนของระบบพิกัดจากสามมิติทั้งสามแกนเป็นอิสระต่อกัน แกนของระบบพิกัดก่อนการหมุนจะต้องขนานกันทั้งสองระบบคือระบบ xyz และระบบ XYZ โดยค่าการหมุนจะถือว่าการหมุนทวนเข็มนาฬิกาเป็นค่าบวกและการหมุนตามเข็มนาฬิกาเป็นลบ ลักษณะของการหมุนแกนพิกัดแสดงตามรูปภาพที่ 2.4



หมุนรอบแกน X เป็นมุม ω

หมุนรอบแกน Y เป็นมุม ϕ

หมุนรอบแกน Z เป็นมุม κ

รูปภาพที่ 2.4 ลักษณะของการหมุนแกนพิกัด

$$\begin{aligned}
 X &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & -\sin(\omega) \\ 0 & \sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\omega \\ y_\omega \\ z_\omega \end{bmatrix} = R_\omega \cdot x_\omega & \begin{aligned} X &= x_\omega \\ Y &= y_\omega \cos(\omega) - z_\omega \sin(\omega) \\ Z &= y_\omega \sin(\omega) + z_\omega \cos(\omega) \end{aligned} \\
 x_\omega &= \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & \sin(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\omega\phi} \\ y_{\omega\phi} \\ z_{\omega\phi} \end{bmatrix} = R_\phi \cdot x_{\omega\phi} & \begin{aligned} x_\omega &= x_{\omega\phi} \cos(\phi) + z_{\omega\phi} \sin(\phi) \\ y_\omega &= y_{\omega\phi} \\ z_\omega &= -x_{\omega\phi} \sin(\phi) + z_{\omega\phi} \cos(\phi) \end{aligned} \\
 x_{\omega\phi} &= \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & -\sin(\kappa) & 0 \\ \sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\omega\phi\kappa} \\ y_{\omega\phi\kappa} \\ z_{\omega\phi\kappa} \end{bmatrix} = R_\kappa \cdot x & \begin{aligned} x_{\omega\phi} &= x_{\omega\phi\kappa} \cos(\kappa) - y_{\omega\phi\kappa} \sin(\kappa) \\ y_{\omega\phi} &= x_{\omega\phi\kappa} \sin(\kappa) + y_{\omega\phi\kappa} \cos(\kappa) \\ z_{\omega\phi} &= z_{\omega\phi\kappa} \end{aligned}
 \end{aligned}$$

รูปภาพที่ 2.5 สมการของการหมุนในระบบพิกัดสามมิติ

จากลักษณะของการหมุนแกนพิกัดทั้งสาม สามารถเขียนค่าของการเปลี่ยนค่าพิกัดอันเนื่องจากการหมุนของระบบแกนพิกัดด้วยเมตริกซ์ของการหมุน (Rotation Matrix) แสดงค่าของเมตริกซ์ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Rotation Matrix } R_{\omega\phi\kappa} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

เมื่อ

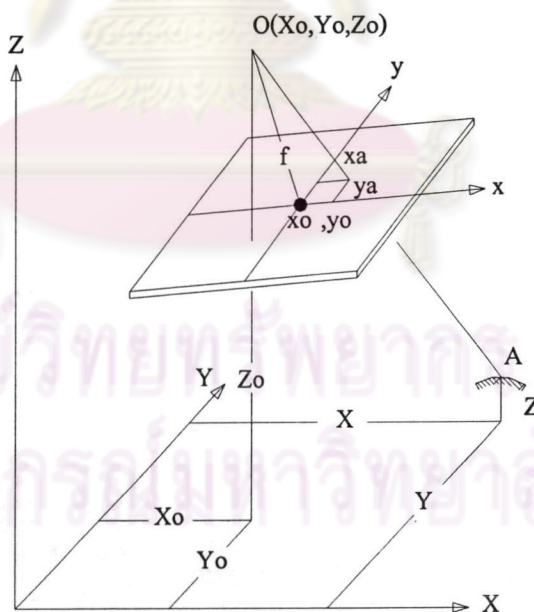
$$\begin{aligned}
 r_{11} &= \cos \phi \cdot \cos \kappa \\
 r_{12} &= \sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \kappa \\
 r_{13} &= -\cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa + \sin \omega \cdot \sin \kappa \\
 r_{21} &= -\cos \phi \cdot \cos \kappa \\
 r_{22} &= -\sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa + \cos \omega \cdot \cos \kappa \\
 r_{23} &= \cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \cos \kappa \\
 r_{31} &= \sin \phi \\
 r_{32} &= -\sin \omega \cdot \cos \phi \\
 r_{33} &= \cos \omega \cdot \cos \phi
 \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.2.3 เงื่อนไขสภาวะร่วมเส้น (Colinearity Condition)

สภาวะร่วมเส้นเกิดขึ้นตามเงื่อนไขที่ตำแหน่งเปิดถ่าย(Exposure Station)ของภาพถ่ายวัตถุ และภาพของวัตถุอยู่บนแนวของเส้นตรงเดียวกันตามรูปภาพที่ 2.6 โดยที่เส้นตรงที่กล่าวนี้คือแนวของแสงที่เดินทางจากวัตถุไปปรากฏบนภาพนั่นเอง สมการที่ใช้บรรยายเงื่อนไขนี้เรียกว่าสมการสภาวะร่วมเส้น (Colinearity Condition Equation)

จากองค์ประกอบของการหมุนระบบพิกัดทั้งสามแกน ตำแหน่งของจุดภาพ a มีค่าพิกัดเป็น (x_a, y_a, f) ซึ่งลักษณะการหมุนเพื่อให้แกนของระบบพิกัดภาพถ่ายขนานกันแกนของระบบพิกัดอ้างอิงเขียนได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}x_a &= r_{11}x'_a + r_{12}y'_a + r_{13}z'_a \\y_a &= r_{21}x'_a + r_{22}y'_a + r_{23}z'_a \\z_a &= r_{31}x'_a + r_{32}y'_a + r_{33}z'_a\end{aligned}\tag{2.12}$$



รูปภาพที่ 2.6 เงื่อนไขสภาวะร่วมเส้น

สมการเงื่อนไขของสภาวะร่วมเส้นได้จากหลักการของสามเหลี่ยมคล้ายดังรูปภาพที่

2.7 สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{x'_a}{X_A - X_O} = \frac{y'_a}{Y_A - Y_O} = \frac{z'_a}{Z_A - Z_O} \quad (2.13)$$

$$x'_a = \left(\frac{X_A - X_O}{Z_A - Z_O} \right) z'_a \quad (2.14)$$

$$y'_a = \left(\frac{Y_A - Y_O}{Z_A - Z_O} \right) z'_a \quad (2.15)$$

$$z'_a = \left(\frac{Z_A - Z_O}{Z_A - Z_O} \right) z'_a \quad (2.16)$$

แทนค่าสมการที่ (2.14), (2.15) และสมการที่ (2.16) ในสมการที่ (2.12) ได้ว่า

$$x_a = r_{11} \left(\frac{X_A - X_O}{Z_A - Z_O} \right) z'_a + r_{12} \left(\frac{Y_A - Y_O}{Z_A - Z_O} \right) z'_a + r_{13} \left(\frac{Z_A - Z_O}{Z_A - Z_O} \right) z'_a \quad (2.17)$$

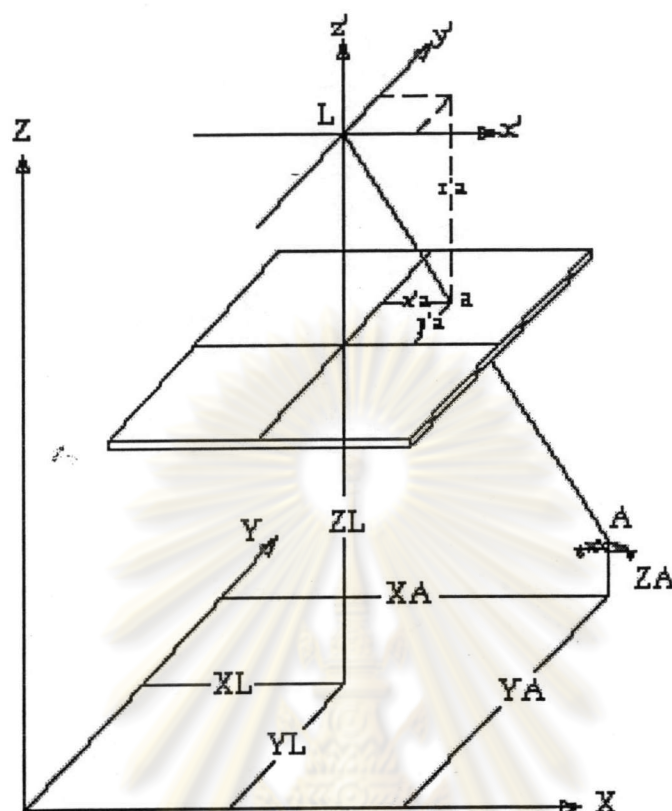
$$y_a = r_{21} \left(\frac{X_A - X_O}{Z_A - Z_O} \right) z'_a + r_{22} \left(\frac{Y_A - Y_O}{Z_A - Z_O} \right) z'_a + r_{23} \left(\frac{Z_A - Z_O}{Z_A - Z_O} \right) z'_a \quad (2.18)$$

$$z_a = r_{31} \left(\frac{X_A - X_O}{Z_A - Z_O} \right) z'_a + r_{32} \left(\frac{Y_A - Y_O}{Z_A - Z_O} \right) z'_a + r_{33} \left(\frac{Z_A - Z_O}{Z_A - Z_O} \right) z'_a \quad (2.19)$$

คี่งเทอมของ $z'_a / (Z_A - Z_O)$ จากสมการที่ (2.17) ถึงสมการที่ (2.19) ทำการหารสมการที่ (2.17) และ (2.18) ด้วยสมการที่ (2.19) และแทนค่าของ z'_a ด้วยค่าของ f จะทำให้ได้สมการเงื่อนไขสภาวะร่วมเส้นดังนี้

$$x_a = -f \left[\frac{r_{11}(X_A - X_O) + r_{12}(Y_A - Y_O) + r_{13}(Z_A - Z_O)}{r_{31}(X_A - X_O) + r_{32}(Y_A - Y_O) + r_{33}(Z_A - Z_O)} \right] \quad (2.20)$$

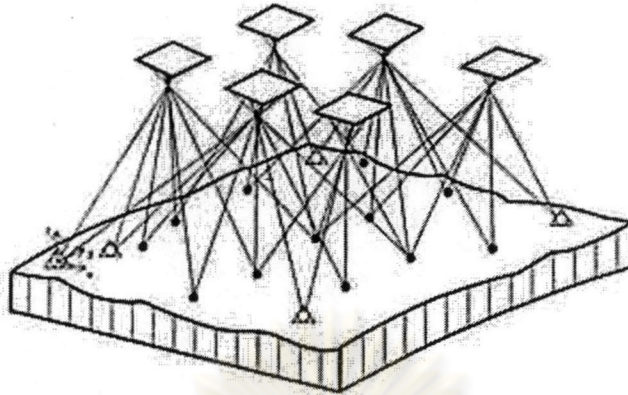
$$y_a = -f \left[\frac{r_{21}(X_A - X_O) + r_{22}(Y_A - Y_O) + r_{23}(Z_A - Z_O)}{r_{31}(X_A - X_O) + r_{32}(Y_A - Y_O) + r_{33}(Z_A - Z_O)} \right] \quad (2.21)$$



รูปภาพที่ 2.7 ระบบพิกัดจากภาพถ่ายซึ่งถูกหมุนให้ขนานกับระบบพิกัดจริง

2.2.4 การปรับแก้บล็อกลำแสง (Bundle Block Adjustment)

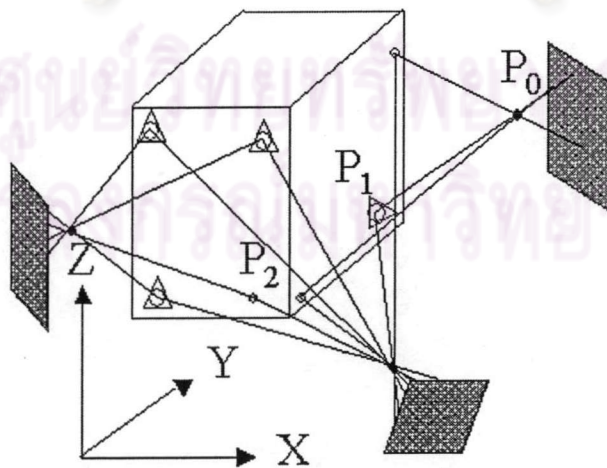
จากสมการสภาวะร่วมเส้นสามารถสร้างชุดของสมการตำแหน่งรังวัดบนภาพถ่ายที่ทับซ้อนกันต่อเนื่องไปเรื่อยๆ โดยที่ข้อมูลจากการรังวัดร่วม(Tie Point) บนภาพถ่ายเพื่อคำนวณหาค่าพิกัดจริงในสามมิติของวัตถุ (X, Y, Z) รวมทั้งค่าของการจัดองค์ประกอบภายนอก $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ และสำหรับจุดควบคุมสมการที่เขียนขึ้น เพื่อใช้ในการหาค่าขององค์ประกอบภายนอกเพียงอย่างเดียว รูปแบบของสมการสภาวะร่วมเส้นจำนวนมากของทั้งจุดรังวัดร่วมและจุดควบคุมถูกประมวลผลโดยอาศัยวิธีการคำนวณปรับแก้(Least Square Adjustment Computation)



รูปภาพที่ 2.8 บล๊อคลำแสงของภาพถ่ายทางอากาศ

สำหรับการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้แล้ว การปรับแก้บล๊อคลำแสงเป็นลักษณะเดียวกับวิธีการของภาพถ่ายทางอากาศเพียงแต่มุมที่ตัดกันของลำแสงโดยมากมักเป็นมุมแคบ ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมมองของภาพถ่ายนั้น เนื่องจากเงื่อนไขของการถ่ายภาพจากระยะใกล้โดยปกติมักไม่กำหนดตำแหน่งถ่ายภาพที่แน่นอนแตกต่างจากภาพถ่ายทางอากาศที่ต้องการส่วนซ้อนคงที่ จึงทำให้การกำหนดจุดรวมและจุดควบคุมเปลี่ยนแปลงไปตามรูปร่างของวัตถุที่ต้องการรังวัด โดยปกติมักให้การรังวัดจุดรวมปรากฏบนภาพถ่ายสามภาพ ในการปรับแก้บล๊อคลำแสงอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณทั้งปัญหาของภาพถ่ายทางอากาศและภาพถ่ายระยะใกล้ สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งแสดงด้วยเมตริกซ์ของโคแฟกเตอร์ (Cofactor Matrices) ของตัวแปรที่ทำการปรับแก้มีค่าเป็นส่วนกลับของเมตริกซ์ของสมการปกติ (Normal Equation Matrix)

$$Q_{x_0} = I \cdot Q_x \cdot I = N^{-1} \quad (2.22)$$



รูปภาพที่ 2.9 บล๊อคลำแสงของภาพถ่ายระยะใกล้

2.3 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

(Jurgen Dold , 1996) วิจัยศึกษาอิทธิพลของจุดสัญญาณ (Target) ขนาดใหญ่สำหรับผลลัพธ์ของการปรับแก้ทางภาพถ่าย เพื่อต้องการประมาณขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดสัญญาณวงกลม สำหรับการรังวัดทางภาพถ่ายความละเอียดสูง ในการรังวัดด้วยภาพถ่ายขนาดของจุดสัญญาณที่เล็กที่สุดและใหญ่ที่สุดมีผลต่อความถูกต้องทางตำแหน่ง โดยทางทฤษฎีต้องการให้จุดสัญญาณปรากฏบนภาพขนาด 3 จุดภาพ ในทางปฏิบัติมักให้เป็น 5 จุดภาพหรือมากกว่านั้น การประมาณขนาดของจุดสัญญาณเป็นดังนี้

$$d \cdot \left(\frac{h}{c}\right) = (pn * ps) \left(\frac{h}{c}\right) = D \quad (2.23)$$

$$(5 * ps) \left(\frac{h}{c}\right) \leq D_{\min}$$

เมื่อ ps เป็นขนาดจริงของจุดภาพ , pn เป็นจำนวนจุดภาพที่ต้องการให้ปรากฏบนภาพถ่าย , h เป็นระยะห่างของการเปิดถ่าย , c เป็นความยาวโฟกัส สำหรับจุดสัญญาณขนาดใหญ่จะพิจารณาอิทธิพลของการที่ตำแหน่งศูนย์กลางจริงกับตำแหน่งศูนย์กลางของการรังวัดบนภาพถ่าย ที่เกิดการเอียงของระนาบภาพถ่ายทำให้จุดสัญญาณเป็นรูปวงรีโดยที่ระยะดังกล่าวแสดงดังสมการ

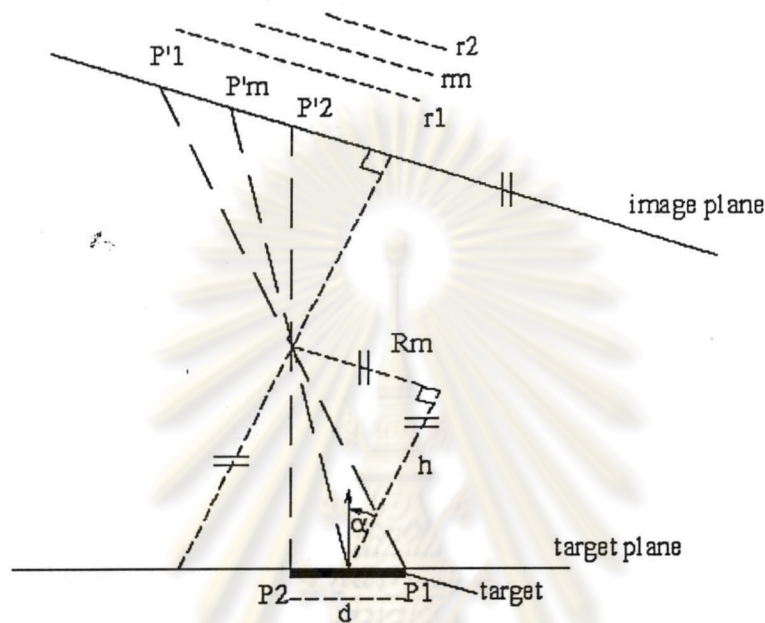
$$\varepsilon = r_m - \frac{(r_1 - r_2)}{2}$$

$$\varepsilon = r_m - \frac{c}{2} \left(\frac{R_m + \frac{d}{2} \cdot \sin(90 - \alpha)}{h - \frac{d}{2} \cdot \cos(90 - \alpha)} + \frac{R_m - \frac{d}{2} \cdot \sin(90 - \alpha)}{h + \frac{d}{2} \cdot \cos(90 - \alpha)} \right) \quad (2.24)$$

เมื่อ

- ε เป็นระยะออฟเซตระหว่างศูนย์กลางจริงกับศูนย์กลางรังวัด
- d ขนาดศูนย์กลางของจุดสัญญาณ
- r_1 รัศมีบนภาพถ่าย ณ ตำแหน่ง P'_1
- r_2 รัศมีบนภาพถ่าย ณ ตำแหน่ง P'_2
- r_m รัศมีบนภาพถ่าย ณ ตำแหน่ง P'_m (ศูนย์กลางจริง)

- α ทิศทางของการถ่ายภาพ
 R_m ระยะระหว่างศูนย์กลางจุดสัญญาณกับแกนทัศนของกล้องถ่ายภาพ
 h ระยะระหว่างตำแหน่งถ่ายภาพกับจุดสัญญาณ
 c ความยาวโฟกัส



รูปภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดสัญญาณและภาพของจุดสัญญาณ (Jurgen Dold , 1996)

การตรวจสอบอิทธิพลจากขนาดของจุดสัญญาณที่มีต่อการคำนวณปรับแก้ทางภาพถ่าย ได้จากการกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของจุดสัญญาณวงกลมเป็น 5 , 10 , 15 และ 20 มิลลิเมตร บันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพโกดักดีซีเอส ขนาดเลนส์ 15 และ 25 มิลลิเมตร กับกล้องถ่ายภาพโกดักดีซีเอส 460 ด้วยเลนส์ขนาด 18 มิลลิเมตร ระยะห่างของการเปิดถ่ายภาพเป็น 2 และ 5 เมตร พิจารณาค่าออฟเซตของศูนย์กลางจริงบนระนาบเทียบกับศูนย์กลางที่ปรากฏบนภาพถ่ายซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำการรังวัดค่าพิกัดภาพถ่าย

กำหนดโครงข่ายของภาพถ่ายประกอบด้วยภาพจำนวน 20 ภาพ สำหรับ 5 ตำแหน่งถ่ายภาพ จุดที่ใช้รังวัดจำนวน 51 จุดมีลักษณะดังนี้ (25 จุดที่ระยะห่าง 4.6 เมตร , 25 จุดที่ระยะห่าง 2.6 เมตร , 1 จุดที่ระยะห่าง 1.6 เมตร) โดยการปรับแก้โครงข่ายแบบอิสระ (Free Network Adjustment) ที่มี การกำหนดค่าวัดสอบกล้องถ่ายภาพและแบบที่ไม่มีการกำหนดค่าวัดสอบกล้องถ่ายภาพ

ผลของการปรับแก้แสดงให้เห็นว่าระยะห่างของศูนย์กลางจริงกับศูนย์กลางรังวัดมีค่าประมาณ 20 ไมครอน ในกรณีที่ไม่มีการวัดสอบกล้องถ่ายภาพและมีค่าประมาณ 10 ไมครอน ในกรณีที่มีการวัดสอบกล้องถ่ายภาพ กล่าวโดยสรุปว่าขนาดของจุดสัญญาณที่เหมาะสมโดยไม่ต้องการให้เกิดผลกระทบทางด้านตำแหน่งเนื่องจากขนาดของจุดสัญญาณควรเป็นขนาดที่เล็กสุด ยิ่งขนาดของจุดสัญญาณใหญ่อิทธิพลที่เกิดขึ้นย่อมมากไปด้วย

(Alex SORIA MEDINA , Silvio Jacks dos Anjos GARNES , Simone de SILVA , 2000)
ศึกษาการรังวัดจุดควบคุมสำหรับการรังวัดด้วยภาพถ่าย พิจารณาความสำคัญของงานรังวัดภูมิประเทศในการสร้างจุดควบคุมซึ่งใช้ในงานรังวัดด้วยภาพถ่าย โดยใช้กล้องประมวลผลรวมที่มีความถูกต้องของการวัดมุมเป็น 1" ความถูกต้องของการวัดระยะทางเป็น 1 มิลลิเมตร \pm 1 พีพีเอ็ม (ppm) (Leica TC-2002) เปรียบเทียบกับเครื่องมือสำรวจที่ราคาต่ำกว่าคือกล้องวัดมุมอิเล็กทรอนิกส์ความถูกต้องของการวัดมุม 10" (Leica T-100)

ทำการรังวัดจุดควบคุมซึ่งจะนำไปใช้ในงานรังวัดด้วยภาพถ่าย ในบริเวณพิพิธภัณฑสถานประวัติศาสตร์ประเทศบราซิลด้วยวิธีการคำนวณตำแหน่งที่แตกต่างกัน จากข้อมูลรังวัดแบบเล็งสกัดจากกล้องวัดมุมทั้งสอง การรังวัดแบบเล็งสกัดจากเส้นฐานซึ่งข้อมูลรังวัดมุมราบ , มุมตั้ง และความยาวของเส้นฐาน ใช้ประมวลผลตำแหน่งด้วยวิธีทางเรขาคณิต , วิธีทางเวกเตอร์ และวิธีการคำนวณปรับแก้ผลลัพธ์ทางด้านตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายจากกล้องวัดมุมที่มีความละเอียดแตกต่างกัน แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของการประมวลผลตำแหน่งผลลัพธ์ที่ได้ไม่แตกต่างกัน ในทางปฏิบัติขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการนำไปใช้งานของแต่ละบุคคล

(Bahadir Ergun , Sitki Kulur , 2000) ศึกษาการประยุกต์ใช้การรังวัดภาพถ่ายดิจิทัลสำหรับแบบจำลองพื้นผิวรถยนต์ จากความต้องการข้อมูลสามมิติในงานอุตสาหกรรมที่อยู่ในรูปแบบดิจิทัล รถยนต์ถูกเลือกให้เป็นวัตถุที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของแบบจำลองที่สร้างด้วยวิธีการทางภาพถ่ายระยะใกล้ ในกรณีนี้ให้รถยนต์เรโนลต์ 11 จุดควบคุม 40 จุดจากจำนวนนับร้อยถูกสร้างด้วยวิธีการรังวัดแบบเล็งสกัดจากตำแหน่งที่ทราบค่าน้อยจำนวน 3 จุด โดยกล้องวัดมุมอิเล็กทรอนิกส์ T-2002 คำนวณตำแหน่งและความถูกต้องด้วยวิธีการทางลีสท์แอสควาร์ ให้ความคลาดเคลื่อนสูงสุดเป็น 2 มิลลิเมตร ในทิศทาง x , y และมีค่าเป็น 2 มิลลิเมตรในทิศทาง z เช่นกัน

กระบวนการทางภาพถ่ายใช้กล้องถ่ายภาพโกดัก คีซีเอส 200 และกล้องถ่ายภาพ Rollei 6008 ใช้สำหรับภาพพื้นผิวรถยนต์ ประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม PICTRAN D และ PICTRAN B ข้อมูลภาพถ่ายประกอบด้วย 39 ภาพสำหรับการปรับแก้บล็อกแสง, 20 ภาพในการสร้างพื้นผิว และ 16 ภาพในการเขียนรายละเอียดของพื้นผิวรถยนต์ ด้วยความต้องการคุณภาพของชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรมทำให้โปรแกรมด้าน CAD มีความสำคัญ ข้อมูลตำแหน่งถูกแสดงด้วยโปรแกรม AUTOCAD R12 ทำการสร้างพื้นผิวด้วยวิธีการของ TIN, GRID และ CONTOUR จากนั้นข้อมูลพื้นผิวถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบจำลองพื้นผิวรถยนต์ในโปรแกรม 3D STUDIO MAX 2.0 เพื่อทำการวิเคราะห์ที่เกี่ยวกับพื้นผิวต่อไป



รูปภาพที่ 2.11 แบบจำลองพื้นผิวรถยนต์ในลักษณะของ TIN (Bahadir Ergun , Sitki Kulur , 2000)

โดยสรุปเทคนิคการวัดแบบจำลองมีความยืดหยุ่น ด้วยการพัฒนาแบบของรถยนต์ ข้อมูลสามมิติจากวิธีการรังวัดด้วยภาพถ่ายดิจิทัลเป็นอีกก้าวหนึ่งของการเพิ่มความต้องการตรวจสอบคุณลักษณะของยานยนต์และส่วนประกอบ ด้วยเหตุนี้ระบบการควบคุมแบบจำลองของพื้นผิวโดยการมองเห็นจึงถูกพัฒนาขึ้น

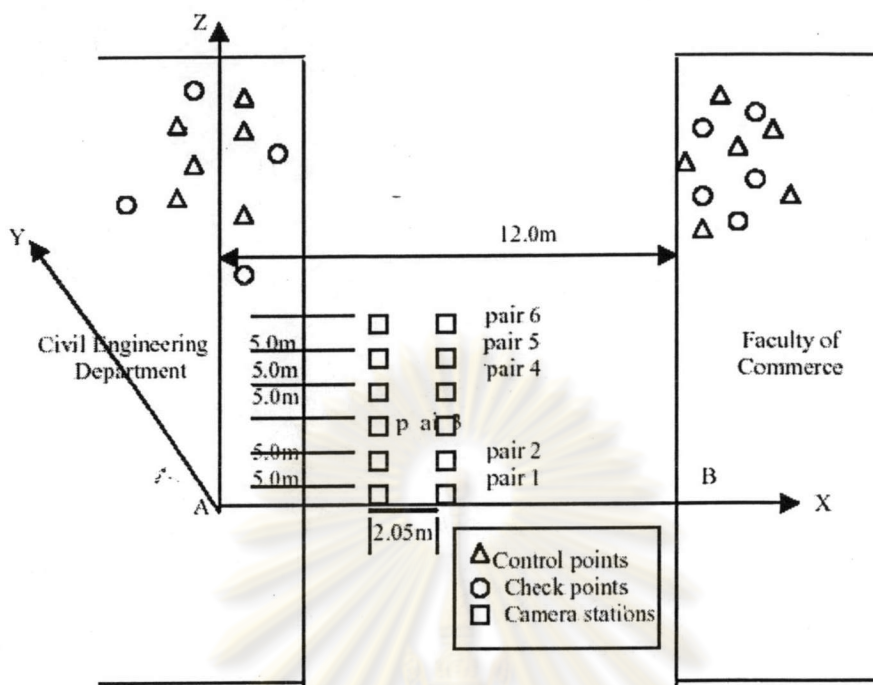
(W. Faig , H. El-Habrouk , X.P. Li , M. Hosny , 1996) ศึกษาเปรียบเทียบกล้องถ่ายภาพดิจิทัลกับกล้องถ่ายภาพแบบทั่วไปในการประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรม ในที่นี้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกล้องถ่ายภาพ A Fujix DS-100 ความยาวโฟกัสระหว่าง 8-24 มิลลิเมตร ขนาดภาพ 720 x 488 จุดภาพ ขนาดของจุดภาพ 8.5 x 9.7 ไมครอนในรูปแบบดิจิทัล กับกล้องถ่ายภาพ Olympus

OM-100 ความยาวโฟกัสปกติ 28 มิลลิเมตร ขนาดภาพ 36 x 24 มิลลิเมตร บันทึกภาพด้วยฟิล์มสีภาพจริง (Diapositive) Kodak Elite 400 แบบจำลองโครงสร้างหลังคาน้ำหนักเบาประกอบด้วยกรอบไม้ยาว 94 เซนติเมตร กว้าง 63 เซนติเมตร ขอบด้านข้างสูง 15 และ 26 เซนติเมตร โยงด้วยสายเคเบิลเป็นโครงข่ายจำนวน 11 x 17 เส้นแต่ละเส้นวางห่างกัน 5 เซนติเมตร ปรากฏจุดตัดของโครงข่ายสายเคเบิลจำนวน 187 จุด ใช้ในการหาการเคลื่อนตัวของโครงสร้างพื้นผิวหลังคา

ตำแหน่งจุดควบคุม 180 จุดที่ความสูงต่ำต่างกันโดยรอบของแบบจำลอง ความถูกต้องของจุดควบคุมซึ่งส่งผลต่อความถูกต้องของแบบจำลอง ได้จากการรังวัดด้วยกล้องวัดมุมอิเล็กทรอนิกส์ Kern E2 จำนวน 2 ตัว ความละเอียดของการวัดมุมเป็น 1" เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ การรังวัดแบบเล็งสกัดด้วยการวัดมุมราบและมุมดิ่งจำนวน 2 ชุดข้อมูล ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยสำหรับค่าพิทักเป็น 0.03, 0.025 และ 0.02 มิลลิเมตร ในทิศทาง X, Y และ Z ตามลำดับ การประมวลผลภาพถ่ายด้วยโปรแกรม Leica DVP (Digital Video Plotter) ผลสรุปกล่าวได้ว่ากล้องถ่ายภาพดิจิทัลมีศักยภาพเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรม

(Dr. Mahmoud El-Nokrashy O. ALI , Dr. Mohamed Ashraf ELIWA , Dr. Ahmed Abdelreheem MOHAMMED , Eng. Abbas Mohammed ABBAS , 2000) วิเคราะห์ความถูกต้องสำหรับระบบการรังวัดด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ ถูกสร้างขึ้นเป็นระบบการทำแผนที่ด้วยรถโมบาย (Mobile Mapping System) นิยมนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในงานสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) การวิเคราะห์ความถูกต้องเป็นการพิจารณาค่าต่างระหว่างค่าพิทักสามมิติที่ได้จากงานสำรวจกับวิธีทางภาพถ่าย โดยกำหนดจุดที่ต้องการรังวัดซึ่งอยู่ระหว่างอาคาร 2 หลังในพื้นที่กว้างประมาณ 12 เมตร ยาวประมาณ 100 เมตร เป็นพื้นที่ศึกษา พิกัดที่ใช้ตรวจสอบได้จากการรังวัดแบบเล็งสกัดด้วยกล้องวัดมุมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดในการวัดมุมเป็น 1" ความยาวเส้นฐาน 13.04 เมตร จำนวนจุดทั้งหมด 24 จุดซึ่งใช้เป็นทั้งจุดควบคุมและจุดตรวจสอบเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทางภาพถ่าย

กระบวนการทางภาพถ่ายใช้กล้องถ่ายภาพ Voigtlander ขนาด 35 มิลลิเมตร บนขาตั้งกล้องที่รักษาระดับและถ่ายภาพด้วยฟิล์มขาวดำ พิกัดบนภาพถ่ายวัดด้วยคอมพารเตอร์ (Comparator) ความถูกต้องระดับ 2-3 ไมครอน ประมวลผลด้วยโปรแกรมปรับแก้บล็อกแสงที่มีการวัดสอบกล้อง (A Bundle Adjustment with Self-Calibration BSC) การเก็บข้อมูลภาพถ่ายเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของสนามทดสอบตามรูปภาพที่ 2.11



รูปภาพที่ 2.12 สนามทดสอบของการวิเคราะห์ความถูกต้องสำหรับการรังวัดด้วยภาพถ่ายระยะใกล้
(Dr. Mahmoud El-Nokrashy O. ALI , Dr. Mohamed Ashraf ELIWA , Dr. Ahmed Abd-Elreheem
MOHAMMED , Eng. Abbas Mohammed ABBAS , 2000)

วิเคราะห์ความถูกต้องทางด้านหนึ่งแสดงด้วยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในทิศทาง X , Y และ Z ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสำหรับทิศทาง X เป็นดังสมการ

$$S_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ABS(X_{fi} - X_{pi}) \quad (2.25)$$

ในทำนองเดียวกันค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในทิศทาง Y และ Z เป็นดังสมการ

$$S_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ABS(Y_{fi} - Y_{pi}) \quad (2.26-27)$$

$$S_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ABS(Z_{fi} - Z_{pi})$$

ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในทิศทางรวมแสดงด้วยสมการ

$$S_T = \sqrt{S_X^2 + S_Y^2 + S_Z^2} \quad (2.28)$$

เมื่อ	S_X, S_Y, S_Z, S_T	เป็นค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในทิศทาง X, Y, Z และทิศทางรวมตามลำดับ
	X_{fi}, Y_{fi}, Z_{fi}	เป็นค่าพิสัยของวัตถุจากวิธีการรังวัดแบบเล็งสกัด
	X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi}	เป็นค่าพิสัยของวัตถุจากวิธีการทางภาพถ่าย
	n	เป็นจำนวนของจุดตรวจสอบ

โดยกำหนดเงื่อนไขอื่นๆเพิ่มเติมเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความถูกต้อง ด้วยการเพิ่มจำนวนจุดควบคุมที่ใช้ในการคำนวณแต่ละครั้งจากจำนวน 3 – 12 จุดควบคุม , วิเคราะห์เปรียบเทียบระยะทางจากจุดถ่ายภาพกับวัตถุเป็นระยะเฉลี่ยตั้งแต่คู่ภาพที่ 1 – 6 , วิเคราะห์อิทธิพลของความยาวเส้นฐานที่ใช้ถ่ายภาพจากความยาว 1.8 เมตร เพิ่มทีละ 0.25 เมตร จนกระทั่งเส้นฐานมีความยาวเป็น 3.05 เมตร , วิเคราะห์อิทธิพลจากระยะห่างจากจุดเปิดถ่ายของแต่ละจุดตรวจสอบ , วิเคราะห์อิทธิพลจากการเพิ่มตัวแปรในการปรับแก้ , วิเคราะห์อิทธิพลของการใช้ภาพถ่ายจากด้วยข้าง , วิเคราะห์อิทธิพลของการเพิ่มจำนวนภาพถ่าย

ผลสรุปดังนี้

- มีความเป็นไปได้สำหรับความถูกต้อง 10 เซนติเมตร เมื่อระยะทางจากวัตถุถึงตำแหน่งถ่ายภาพเป็น 55 เมตร
- การเพิ่มขึ้นของความยาวเส้นฐานถ่ายภาพเพิ่มความถูกต้องในทิศทาง Z อาจถึง 40 เปอร์เซ็นต์
- ระยะทางระหว่างวัตถุถึงตำแหน่งถ่ายภาพมีผลต่อความถูกต้อง การเปลี่ยนแปลงระยะทางตั้งแต่ 53 – 30 เมตร มีผลทำให้ความถูกต้องเพิ่มขึ้นโดยในทิศทาง Z เพิ่มขึ้น 40%
- การเพิ่มตัวแปรในการปรับแก้ทำให้ความถูกต้องมีระดับน้อยสำคัญเพิ่มขึ้น อาจถึง 33% , 24% และ 41% ในทิศทาง X, Y, Z ตามลำดับ

- การเปลี่ยนแปลงทิศทางของภาพถ่ายสำหรับรถโมบายในทิศทางตั้งฉาก ทำให้ความถูกต้องเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีนี้ความยาวเส้นฐาน 2.05 เมตร ระยะห่างของวัตถุเฉลี่ย 35 เมตร ความถูกต้องเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้ภาพถ่ายด้านข้างเป็น 30% , 32% , 42% ในทิศทาง X , Y ,Z ตามลำดับ
- การเพิ่มขึ้นของจำนวนภาพถ่ายที่ความสูงต่างกัน มีผลต่อระดับนัยสำคัญของความถูกต้องในทิศทาง Y ร้อยละของความถูกต้องที่เพิ่มขึ้นจากภาพถ่ายจำนวน 6 ภาพเป็น 31% , 60% และ 28% ในทิศทาง X , Y ,Z ตามลำดับและเป็น 14% , 35% และ 15% ในทิศทาง X , Y ,Z ตามลำดับ สำหรับภาพถ่ายจำนวน 4 ภาพ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย