

หลักและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการแปลงข้อมูลเชิงวิเคราะห์ด้วยการวัดสอบในตัว

2.1 คำนำ

เนื่องจากกล้องถ่ายภาพแบบทั่วไป มีข้อเสียอยู่หลายประการ อันประกอบด้วย ความเพี้ยนของเลนส์มีมาก และเป็นไปในลักษณะไม่ปรกติ ไม่มีเครื่องช่วยทำให้ฟิล์มแบนราบ และไม่มีจุดศูนย์กลางถ่ายภาพ ทำให้การแปลงข้อมูลเชิงอุปมาน (analog approach) เป็นไปไต่ยาก ถ้าต้องการผลที่มีความละเอียดถูกต้องสูง วิธีการแปลงข้อมูลที่เหมาะสม และให้ผลของความละเอียดถูกต้องดีที่สุด คือ วิธีการแปลงข้อมูลเชิงวิเคราะห์ด้วยการวัดสอบในตัว โดยการปรับแก้ลดอคติด้วยลำแสง (Simultaneous selfcalibration bundle adjustment method) ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผล (วิชาและปริษา, 2523, Amer, 1974, Karara, 1980)

1. สามารถจัดการความคลาดเคลื่อนอย่างมีระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การยืดหดของฟิล์ม ความเพี้ยนของเลนส์ เป็นต้น

2. เป็นอิสระจากขีดจำกัดเชิงกล หรือเชิงทัศน ที่ถูกกำหนดโดยเครื่องร่างแผนที่ เช่น สามารถใช้ภาพถ่าย ขนาดความยาวของโฟกัส มุมเอียง และมาตราส่วนใด ๆ ก็ได้

วิธีการดังกล่าวข้างต้น เป็นวิธีการแปลงข้อมูล โดยสร้างรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้แทนความสัมพันธ์ระหว่างจุดในระนาบวัตถุ (object space) จุดศูนย์กลางทิวทัศน์ (perspective center) ของกล้องถ่ายภาพและจุดบนภาพถ่าย (Doyle, 1966) โดยเพิ่มรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อชดเชยสาเหตุต่าง ๆ ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นด้วยวิธีการนี้ นอกจากค่าพิกัดของการจัดภาพภายใน (interior orientation) ค่าพิกัดของการจัดภาพภายนอก (exterior orientation) แล้ว ค่าพารามิเตอร์ที่เพิ่มเข้าไปในรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนมีระบบ ก็สามารถหาได้ ทราบเท่าที่มีจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายพอเพียงและเหมาะสม สำหรับการแปลงข้อมูล

2.2 ผลงานวิจัยการวัดสอบกล้องถ่ายภาพภาคพื้นดินที่ผ่านมา

นักวิจัยหลายท่านได้เสนอวิธีการวัดสอบกล้องถ่ายภาพภาคพื้นดิน โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ กัน วิธีการเหล่านี้ได้มีการหารูปจำลองทางคณิตศาสตร์ในหลายรูปแบบ เพื่อนำมาชดเชยความเพี้ยนอย่างมีระบบของจุดภาพ (systematic image distortion) อันเนื่องมาจากสาเหตุต่าง ๆ ซึ่งสามารถแยกความแตกต่างของการวิจัย จากลักษณะของรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ออกได้ 2 ประเภท คือ (Moniwa, 1980)

2.2.1 แยกประเภทของรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ชดเชยความเพี้ยนมีระบบของจุดภาพ จากสาเหตุต่าง ๆ ออกเป็นพวก ๆ ที่คาดว่าจะมีผลต่อความเพี้ยนอย่างมีระบบของจุดภาพ และมีความสลับซับซ้อนของรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ กันออกไป เช่น

Brown (1969,1971) และ Karara (1980)

$$\begin{aligned} \Delta x &= (x-y_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + \\ &\quad [P_1(r^2 + 2(x-x_0)^2) + 2P_2(x-x_0)(y-y_0)][1 + P_3 r^2 + P_4 r^4 + \dots] \\ \Delta y &= (y-y_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + \dots\dots\dots(2.1) \\ &\quad [2P_1(x-x_0)(y-y_0) + P_2(r^2 + 2(y-y_0)^2)][1 + P_3 r^2 + P_4 r^4 + \dots] \end{aligned}$$

Faig and Moniwa (1973), Moniwa (1980)

$$\begin{aligned} \Delta x &= (x-x_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + \\ &\quad [P_1(r^2 + 2(x-x_0)^2) + 2P_2(x-x_0)(y-y_0)][1 + P_3 r^2 + P_4 r^4 + \dots] \\ &\quad + A(y-y_0) \dots\dots\dots(2.2) \\ \Delta y &= (y-y_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + \\ &\quad [2P_1(x-x_0)(y-y_0) + P_2(r^2 + 2(y-y_0)^2)][1 + P_3 r^2 + P_4 r^4 + \dots] \\ &\quad + B(y-y_0) \end{aligned}$$

Brown (1974)

$$\begin{aligned} \Delta x &= a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 + a_6 x^2 y + a_7 xy^2 \\ &\quad + (x/r)(c_1 x^2 + c_2 xy + c_3 y^2 + c_4 x^3 + c_5 x^2 y + c_6 xy^2 + c_7 y^3) \\ &\quad + x(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1(y^2 + 3x^2) + 2P_2 xy + \delta x p + \frac{(x)}{c} \cdot \delta_c \\ \Delta y &= b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2 + b_6 x^2 y + b_7 xy^2 \dots\dots\dots(2.3) \\ &\quad + (y/r)(c_1 x^2 + c_2 xy + c_3 y^2 + c_4 x^3 + c_5 x^2 y + c_6 xy^2 + c_7 y^3) \\ &\quad + y(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + 2P_1 xy + P_2(x^2 + 3y^2) - \delta y p + \frac{(y)}{c} \delta_c \end{aligned}$$

$\Delta x, \Delta y$ คือค่าปรับแต่งค่าพิกัดที่ใช้สำหรับชดเชยความคลาดเคลื่อนมีระบบต่าง ๆ

x, y คือพิกัดภาพถ่าย

K_1, K_2, K_3 คือสัมประสิทธิ์ของความเพี้ยนตามแนวเส้นสัมผัส

P_1, P_2, P_3, P_4 คือสัมประสิทธิ์ของ decentering distortion

A, B คือพารามิเตอร์ของความต่างมาตราส่วน (Scale difference) ระหว่างแกนของเครื่องวัดพิกัดภาพถ่าย และสวเหตุนที่อาจเป็นไปได้ของการไม่ตั้งได้จากกันของแกนของเครื่องวัดพิกัด

$$r = [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]^{\frac{1}{2}}$$

a_1, a_2, \dots, a_7
 b_1, b_2, \dots, b_7 } คือสัมประสิทธิ์ของการบิดรูปของฟิล์ม

c_1, c_2, \dots, c_7 คือสัมประสิทธิ์ของความไม่แม่นยำของพื้นรับภาพ

K_1, K_2, K_3 คือสัมประสิทธิ์ของความเพี้ยนตามแนวรัศมี

P_1, P_2 คือสัมประสิทธิ์ของ decentering distortion

$\delta_x, \delta_y, \delta_c$ คือจำนวนแก้ค่าพิกัดของจุดมูขยสำคัญและระยะมูขยสำคัญ

Fraser (1980)

$$\Delta x = x(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1(3x^2 + y^2) + 2P_2 xy + (-x/c)dc - x_0 + a_1 xy + a_2 y^2 + a_3 x^2 y + a_4 xy^2 \dots \dots \dots (2.4)$$

$$\Delta y = y(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1(x^2 + 3y^2) + 2P_2 xy + (-y/c)dc - y_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy + b_4 x^2 + b_5 x^2 y + b_6 xy^2$$

$$x = \acute{x} - x_0$$

$$y = \acute{y} - y_0$$

$$r = (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}$$

\acute{x}, \acute{y} คือค่าพิกัดภาพถ่ายที่ได้จากเครื่องวัดพิกัดภาพถ่าย

x_0, y_0 คือค่าพิกัดของจุดมูขยสำคัญ

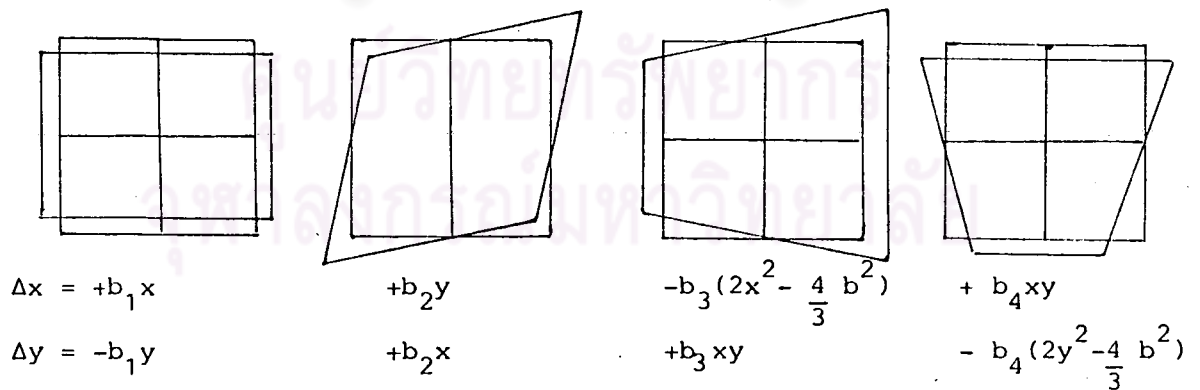
c คือการระยะมูขยสำคัญ

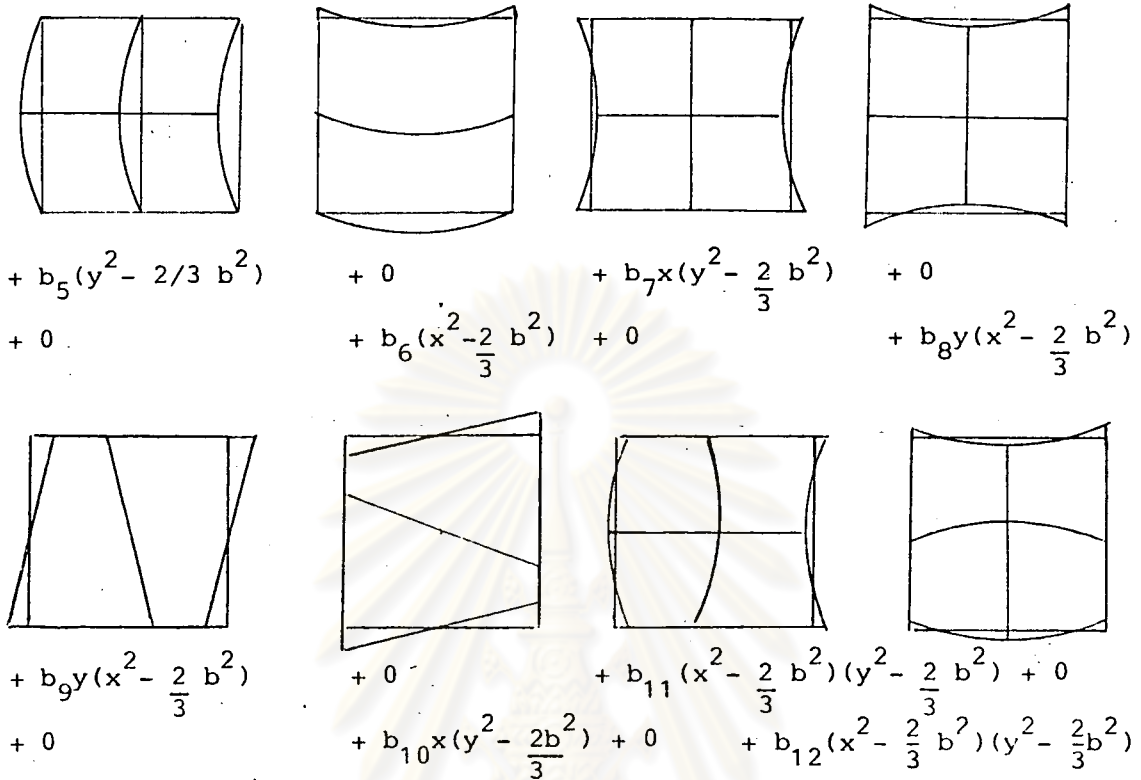
dc คือจำนวนแถว c

$$\left. \begin{matrix} a_1, a_2, \dots, a_4 \\ b_1, b_2, \dots, b_6 \end{matrix} \right\} \text{ คือสัมประสิทธิ์ของความต่างของมาตราส่วนระหว่างแกน}$$
 ของเครื่องวัดพิคคิภาพถ่าย และการไม่ตั้งฉากจากของแกนทั้งสอง

สมการของค่าปรับแต่งค่าพิคคิเหล่านี้ จะนำเข้าไปรวมในสมการสภาวะร่วมเส้น และใช้เทคนิคของลีสต์สแควร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เพิ่มเข้าไป (additional parameter) ยกเว้นวิธีการของ Brown (1971) ใช้วิธีการ Plumb Line method โดยใช้หลักการว่า เส้นตรงในระวางวัตถุ (แทนด้วยเส้นดิ่ง) เมื่อปรากฏบนภาพถ่าย ย่อมจะต้องเป็นเส้นตรง ถ้าระบบของการบันทึกภาพปราศจากความเพี้ยน ในรูปแบบต่าง ๆ การเบี่ยงเบนของจุดบนเส้นตรงที่ปรากฏบนภาพ จะเป็นผลเนื่องมาจากความเพี้ยนของระบบการบันทึก

2.2.2 ไม่แยกประเภทของความเพี้ยนมีระบบของจุดภาพ ใช้วิธีการหารูปจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ชดเชยความเพี้ยนของจุดภาพเป็นผลรวมของสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมด เช่น วิธีการของ Ebner (1976) รูปจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ชดเชยความเพี้ยนของจุดภาพ สามารถแสดงให้เห็นภาพดังรูป 2.1





รูปที่ 2.1 ความเพี้ยนมีระบบของจุดภาพในลักษณะต่าง ๆ

จากสาเหตุรวมทั้งหมด ดังรูป 2.1 จะได้

$$\Delta x = b_1x + b_2y - b_3(2x^2 - \frac{4}{3}b^2) + b_4xy + b_5(y^2 - \frac{2}{3}b^2) + b_7x(y^2 - \frac{2}{3}b^2) + b_9y(x^2 - \frac{2}{3}b^2) + b_{11}(x^2 - \frac{2}{3}b^2)(y^2 - \frac{2}{3}b^2) + \dots \dots \dots (2.5)$$

$$\Delta y = -b_1y + b_2x + b_3xy - b_4(2y^2 - \frac{4}{3}b^2) + b_6(x^2 - \frac{2}{3}b^2) + b_8y(x^2 - \frac{2}{3}b^2) + b_{10}x(y^2 - \frac{2}{3}b^2) + b_{12}(x^2 - \frac{2}{3}b^2)(y^2 - \frac{2}{3}b^2)$$

วิธีการแปลงข้อมูลที่ได้รับการยอมรับว่าประสิทธิภาพมากที่สุด เมื่อคำนึงถึงเวลา ค่าใช้จ่าย และความละเอียดถูกต้องของผลลัพธ์ คือวิธีการปรับแก้ด้วยลำแสง ของการวัด สอบในตัว โดยเพิ่มรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ ตามที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อ 2.2.1 และ 2.2.2 เข้าไปในระบบของการปรับแก้

2.3 ประเภทของการปรับแก้ลอคด้วยลำแสงของการวัดสอบในตัว

Moniwa (1980) ได้จำแนกประเภทของการปรับแก้ลอคด้วยลำแสงของการวัดสอบในตัว ออกเป็น 2 วิธีการ คือ

1. Block-invariant selfcalibration วิธีการนี้กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเพี้ยนมีระบบของจุดภาพ มีค่าเดียวกัน (common compensation parameters) ทุก ๆ ภาพภายในบล็อก วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ใช้กันแพร่หลายกับกล้องถ่ายภาพเชิงคณิต โดยที่กล้องชนิดนี้ มีเสถียรภาพสูงที่จะสามารถกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแต่ละภาพในบล็อกเป็นค่าเดียวกัน

2. Photo-variant selfcalibration มีวิธีการที่ตรงกันข้ามกับ Block-invariant ค่าพารามิเตอร์ของรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละภาพภายในบล็อกมีค่าเป็นอิสระจากกัน วิธีการนี้เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับใช้กับกล้องถ่ายภาพแบบทั่วไป ทั้งนี้เพราะกล้องถ่ายภาพชนิดนี้ขาดเสถียรภาพของการจัดภาพภายใน ตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 1

Moniwa (1980) ได้กล่าวถึงข้อดีของวิธีการ Photo-variant พอสรุปได้ดังนี้

ก. ภาพที่ใช้แต่ละภาพในบล็อก อาจได้มาในลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น ใช้กล้องถ่ายภาพหลายกล้อง ถ่าย ณ ระยะโฟกัสต่างกัน จะมีผลทำให้พารามิเตอร์ของการจัดภาพภายในมีค่าแตกต่างกัน

ข. มีความยืดหยุ่นสูงกว่า ในการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณ โดยสามารถใช้ได้กับกล้องถ่ายภาพภาคพื้นดินทั้ง 2 แบบ หรือสามารถใช้ได้กับกล้องถ่ายภาพทางอากาศ

2.4 วิธีการปรับแก้และรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเพี้ยนมีระบบของจุดภาพ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ในการทำวิจัยนี้ ใช้วิธีการปรับแก้แบบ Photo-variant selfcalibration และใช้ image correction model ตามสมการ 2.2 โดยตัดเทอม P_3 และ P_4 ออก ทั้งนี้ได้มีการทดลองใช้มาแล้วว่าพอเพียงและมีประสิทธิภาพ (Moniwa, 1980) นั่นคือ

$$\Delta x = (x-x_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1 (r^2 + 2(x-x_0)^2)$$

$$+ 2P_2(x-x_0)(y-y_0) + A(y-y_0) \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\Delta y = (y-y_0)(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_2(r^2 + 2(y-y_0)^2) + 2P_1(x-x_0)(y-y_0) + B(y-y_0)$$

2.5 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ของการแปลงข้อมุลเชิงวิเคราะห์ด้วยการวัดสอบในตัว

การแปลงข้อมุลเชิงวิเคราะห์ของการวัดสอบในตัว เป็นวิธีการปรับแก้ของภาพถ่าย โดยอาศัยเรขาคณิตของลำแสงที่ออกมาจากจุดศูนย์กลางทิวทัศน์ ผ่านจุดต่าง ๆ ที่ปรากฏบนภาพถ่ายในมัลติ ให้ไปตัดกัน ณ จุด ๆ เดียวกัน ของจุดที่ตรงกันในระวางวัตถุ เรขาคณิตของลำแสงกำหนดโดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดภาพถ่ายที่ปราศจากความคลาดเคลื่อน มีระบบในรูปแบบต่าง ๆ กับค่าระยะมุขยสำคัญ (Moffitt and Mikhail, 1980)

ด้วยวิธีการปรับแก้โดยลำแสงสมการสภาวะร่วมเส้น (Colinearity condition equation) ที่เป็นไปไคทั้งหมดในมัลติของภาพถ่าย จะถูกสร้างและแก้พร้อมกันทีเดียว (วิชาและปรีชา, 2523) นั่นคือ

$$(x_{ij} - x_{0j}) = -c_j \frac{M_{1j}}{M_{3j}} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$(y_{ij} - y_{0j}) = -c_j \frac{M_{2j}}{M_{3j}}$$

$$[M_1, M_2, M_3]_j^T = [R]_j \cdot [x_i - x_{0j}, (z_i - z_{0j}), (y_{0j} - y_i)]^T$$

โดยที่ $(x, y, z)_i$ คือพิกัดของจุดควบคุมหรือพิกัดของจุดที่ไม่ทราบค่าพิกัด (unknown coordinates) ของจุดในระวางวัตถุจุดที่ i

$(x_0, y_0, z_0)_j$ คือ พิกัดของจุดศูนย์กลางทิวทัศน์ของภาพ j ในระบบระวางวัตถุ.

R_j คือ เมทริกซ์การหมุน (rotation matrix) ขนาด 3×3 ซึ่งอยู่ในฟังก์ชันของมุมหมุนรอบแกนทั้ง 3 คือ โอเมกา (ω), ฟี (ϕ) และ แกมมา (χ) ของภาพ j

$(x_0, y_0, c)_j$ คือ ค่าพิกัดข้อมุลของการจัดภาพภายในของภาพ j x_0, y_0 คือ พิกัดของจุดมุขยสำคัญ c คือ ระยะมุขยสำคัญ



$(x_i, y_i)_j$ คือ พิกัดภาพถ่ายของจุด i บนภาพ j

ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องถ่ายภาพแบบทั่วไป ไม่มีจุดศูนย์กลางภาพถ่าย เพื่อใช้สร้างแกนอ้างอิงในระบบพิกัดจาก จึงกำหนดให้ระบบแกนอ้างอิงของระบบพิกัดจากบนภาพถ่าย ขนานกับแกนของเครื่องวัดพิกัดภาพถ่าย โดยมีศูนย์กลางกำเนิด (origin) อยู่ที่จุดศูนย์กลางสำคัญ นั่นคือ พิกัดของจุดศูนย์กลางสำคัญเป็นพิกัดจากที่อยู่ในระบบของเครื่องวัดพิกัดภาพถ่าย

สมการ (2.7) จะเป็นจริงได้ ถ้าจุดวัตถุ จุดศูนย์กลางทิวทัศน์ และจุดภาพเรียงอยู่บนเส้นตรงเส้นเดียวกัน จากผลของความเพี้ยนของเลนส์ ความบิดรูปของฟิล์ม ทำให้ตำแหน่งของวัตถุที่ไปปรากฏบนภาพถ่ายเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรง จึงจำเป็นต้องหาจำนวนแก้เพื่อมาชดเชย ทำให้สมการสภาวะรวมเส้น (สมการ 2.7) ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด นอกจากนี้แล้ว ค่าพิกัดของภาพถ่ายที่ได้จากเครื่องวัดพิกัด อาจมีความคลาดเคลื่อน อันเนื่องจากแกนของเครื่องวัดพิกัดไม่ตั้งฉากกันจริง ๆ ทำให้ค่าพิกัดที่วัดได้ ไม่ถูกต้อง จำนวนแก้ดังกล่าว รวมเรียกว่า ค่าปรับแต่งค่าพิกัด (image refinement) โดยเป็นความคลาดเคลื่อนมีระบบที่สามารถสร้างเป็นรูปจำลองทางคณิตศาสตร์ นำไปแก้ในสมการ (2.7) นั่นคือ

$$(x_{ij} - x_{0j}) + \Delta x_{ij} = -c_j \frac{M_{1j}}{M_{3j}} \dots \dots \dots (2.8)$$

$$(y_{ij} - y_{0j}) + \Delta y_{ij} = -c_j \frac{M_{2j}}{M_{3j}}$$

$\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}$ คือค่าปรับแต่งค่าพิกัดทางแกน x และแกน y ของจุด i บนภาพ j

รูปจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนจำนวนแก้ความคลาดเคลื่อนมีระบบของค่าปรับแต่งค่าพิกัด ประกอบด้วย

2.5.1 ความเพี้ยนของเลนส์ ความเพี้ยนของเลนส์จะทำลายเงื่อนไขสภาวะรวมเส้นของภาพถ่าย โดยที่ลำแสงเมื่อผ่านเลนส์ จะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรง ความเพี้ยนของเลนส์เป็นปริมาณเวกเตอร์ สามารถแยกออกได้เป็นความเพี้ยนตามแนวรัศมี (radial distortion) ทำให้จุดภาพเพี้ยนไปตามแนวรัศมี จากแกนทัศนและความเพี้ยนนอสมมาตร (decentering distortion) เกิดในแนวตั้งฉากกับรัศมีจากแกนทัศน สาเหตุของความเพี้ยน

ดังกล่าว เกิดจากความพลากของการชักผิวเลนส์ และเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการตั้งศูนย์ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเลนส์ประกอบ (วิชาและปรีชา, 2523) รูปจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนความเพี้ยนของเลนส์ คือ

1. ความเพี้ยนตามแนวรัศมี

ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี สามารถแทนด้วยสมการโพลีโนเมียลกำลังที่ ๓ โดยมีสมมติฐานว่าความเพี้ยนตามแนวรัศมีมีความสมมาตรรอบจุดศูนย์กลาง (วิชาและปรีชา, 2523)

$$\delta r_{ij} = K_{1j} \cdot r_{ij}^3 + K_{2j} \cdot r_{ij}^5 + K_{3j} \cdot r_{ij}^7 \dots\dots\dots(2.9)$$

δr_{ij} คือความเพี้ยนตามแนวรัศมีของจุด i ที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางสำคัญของภาพ j เป็นระยะ r_{ij} โดยที่ $r_{ij} = [(x_{ij}-x_{0j})^2 + (y_{ij}-y_{0j})^2]^{1/2}$

$(K_1, K_2, K_3)_j$ คือพารามิเตอร์ ของความเพี้ยนตามแนวรัศมีของภาพ j

ความเพี้ยนตามแนวรัศมีของสมการ (2.9) เป็นปริมาณเวกเตอร์ซึ่งสามารถแยกออกเป็นเวกเตอร์ทางแกน x และแกน y เพื่อนำไปแก้โดยตรงในสมการ (2.7) นั่นคือ

$$\begin{aligned} dr_{x_{ij}} &= (x_{ij} - x_{0j}) (K_{1j} \cdot r_{ij}^2 + K_{2j} \cdot r_{ij}^4 + K_{3j} \cdot r_{ij}^6) \dots\dots(2.10) \\ dr_{y_{ij}} &= (y_{ij} - y_{0j}) (K_{1j} \cdot r_{ij}^2 + K_{2j} \cdot r_{ij}^4 + K_{3j} \cdot r_{ij}^6) \end{aligned}$$

$dr_{x_{ij}}, dr_{y_{ij}}$ คือปริมาณทางแกน x และแกน y ของจำนวนแก้ความเพี้ยนตามแนวรัศมีของจุด i บนภาพ j

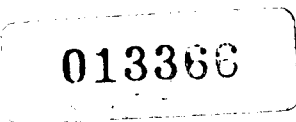
2. ความเพี้ยนอสมมาตร

รูปจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนความเพี้ยนอสมมาตร (Moriwa, 1980, Faig and Moriwa, 1973) โดยนำไปแก้ในสมการ (2.7) คือ

$$\begin{aligned} dp_{x_{ij}} &= P_{1j} (r_{ij}^2 + 2(x_{ij} - x_{0j})^2) + 2P_{2j} (x_{ij} - x_{0j})(y_{ij} - y_{0j}) \dots\dots(2.11) \\ dp_{y_{ij}} &= P_{2j} (r_{ij}^2 + 2(y_{ij} - y_{0j})^2) + 2P_{1j} (x_{ij} - x_{0j})(y_{ij} - y_{0j}) \end{aligned}$$

$dp_{x_{ij}}, dp_{y_{ij}}$ คือปริมาณทางแกน x และแกน y ของจำนวนแก้ความเพี้ยนอสมมาตรของจุด i บนภาพ j

$(P_1, P_2)_j$ คือพารามิเตอร์ของความเพี้ยน อสมมาตรของภาพ j



2.5.2 การบิดรูปของฟิล์ม

การบิดรูปของฟิล์ม มีสาเหตุมาจากการหดหรือขยายตัวของวัสดุฐานที่รองรับสารเคลือบไวแสงและเนื่องจากฟิล์มไม่แบนราบขณะถ่ายภาพ Faig and Moniwa (1973) ได้รวมจำนวนแก๊นเนื่องจากการไม่ตั้งฉากกันของแกนเครื่องวัดพิกัดภาพถ่ายและการบิดรูปของฟิล์มเป็นจำนวนแก๊นเดียวกัน คือ

$$\begin{aligned}dq_{x_{ij}} &= A_j (y_{ij} - y_{0j}) \\dq_{y_{ij}} &= B_j (y_{ij} - y_{0j})\end{aligned}\dots\dots\dots(2.12)$$

$dq_{x_{ij}}$, $dq_{y_{ij}}$ เป็นปริมาณทางแกน x และแกน y ของจำนวนแก๊นเนื่องจากการบิดรูปของฟิล์มและแกนของเครื่องวัดพิกัด ไม่ตั้งฉากกันของจุด i บนภาพ j

$(A, B)_j$ คือพารามิเตอร์ของความต่างมาตราส่วน (scale difference) ระหว่างแกนของเครื่องวัดพิกัดและการไม่ตั้งฉากกันบนภาพ j

ค่าปรับแต่งค่าพิกัดทางแกน x และแกน y คือ ผลรวมของสมการ (2.10), (2.11) และ (2.12) นั่นคือ

$$\begin{aligned}\Delta x_{ij} &= dr_{x_{ij}} + dp_{x_{ij}} + dq_{x_{ij}} \\ \Delta y_{ij} &= dr_{y_{ij}} + dp_{y_{ij}} + dq_{y_{ij}}\end{aligned}\dots\dots\dots(2.13)$$

สมการ (2.8) ประกอบด้วยพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายในของแต่ละภาพ (ภาพที่ j) คือ x_{0j} , y_{0j} , c_j พารามิเตอร์ของรูปจำลองทางคณิตที่ใช้แทนจำนวนแก๊นความคลาดเคลื่อนมีระบบคือ K_{1j} , K_{2j} , K_{3j} , P_{1j} , P_{2j} , A_j และ B_j พารามิเตอร์ 2 ชุดนี้ต่อไปจะรวมเรียกว่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายในและพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายนอกประกอบด้วย x_{0j} , y_{0j} , z_{0j} , x_j , φ_j และ ω_j รวมทั้งสิ้น 16 ตัวในแต่ละภาพ นอกจากนี้ยังประกอบด้วยค่าพิกัดในระวางวัตถุของจุดที่ไม่ทราบค่า (unknown coordinates) ที่จัดไว้เป็นจุดสำหรับตรวจสอบผลการคำนวณ

การแปลงข้อมูลเชิงวิเคราะห์ของการวัดสอบในตัว ค่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายใน (x_0, y_0, c) และค่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายนอก (x_0, y_0, z_0) มีสหสัมพันธ์กันอย่างสูง (highly correlate) (Brown, 1971, Merchant, 1973) ในกรณีของภาพถ่ายในลักษณะปกติ (normal case) และความลึกของตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายมีไม่มากพอ

และในบางกรณี ค่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายในและการจัดภาพภายนอก เป็นค่าที่ทราบมาล่วงหน้า พร้อมทั้งค่าความแปรปรวนของมัน รวมทั้งค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่าย ยังมีความละเอียดถูกต้องไม่สูงพอที่จะกำหนดให้เป็นค่าปลอดความคลาดเคลื่อน (error free) เพื่อให้การสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เกิดความยืดหยุ่นและขจัดปัญหาของการมีสหสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายในและพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายนอก ดังที่กล่าวมาแล้ว จึงต้องเพิ่มชุดของสมการค่าสังเกตของพารามิเตอร์เหล่านี้เข้าไปร่วมกับสมการ (2.8)

จากสมการ (2.8) โดยแทนค่า Δx และ Δy จากสมการ (2.13) จะได้

$$x_{ij} = x_{0j} - dr_{x_{ij}} - dp_{x_{ij}} - dq_{x_{ij}} - c_j \frac{M_{1j}}{M_{3j}} \dots \dots \dots (2.14)$$

$$y_{ij} = x_{0j} - dr_{y_{ij}} - dp_{y_{ij}} - dq_{y_{ij}} - c_j \frac{M_{2j}}{M_{3j}}$$

สมการเชิงเส้นของสมการ (2.14)

$$V = A_1 X_1 + A_2 X_2 + L \dots \dots \dots (2.15)$$

$V_{2mn,1}$ คือเวกเตอร์ค่าเศษคงเหลือ (residual) ของค่าพิกัดภาพถ่าย

$A_1_{2mn,16m}$ คือสัมประสิทธิ์เมทริกซ์ได้จากพาร์เซียลเดอริเวทีฟส์ สมการ (2.14) เทียบ

กับพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายในและพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายนอก $(x_0, y_0, c, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, A, B, X_0, Y_0, Z_0, \alpha, \phi, \omega)_j$

$A_2_{2mn,3n}$ คือสัมประสิทธิ์เมทริกซ์ได้จากพาร์เซียลเดอริเวทีฟส์ สมการ (2.14) เทียบ

กับจุดควบคุมภาพถ่าย หรือพิกัดของจุดที่ไม่ทราบค่า

$X_1_{16m,1}$ คือเวกเตอร์ค่าตรวจแก้ (correction) ค่าประมาณของพารามิเตอร์จัดภาพภายในและภายนอก

$X_2_{3n,1}$ คือเวกเตอร์ค่าตรวจแก้ค่าประมาณของจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดที่ไม่ทราบค่าพิกัด

$L_{2mn,1}$ คือเวกเตอร์ค่าแยงของสมการ (2.14)

m คือจำนวนภาพถ่าย

n คือจำนวนจุดที่ปรากฏบนภาพถ่าย

จาก Merchant (1973) สมการค่าสังเกตของพารามิเตอร์การจัดภาพภายในและ

ภายนอก ในรูปสมการเชิงเส้น

$$V_1 = X_1 + L_1 \dots\dots\dots(2.16)$$

V_1 คือเวกเตอร์เศษคงเหลือของสมการคำสั่งเกตุของพารามิเตอร์การจัดภาพภายใน และภายนอก $16m, 1$

L_1 คือเวกเตอร์ค่าแย้ง เกิดจากความต่างระหว่างค่าปรับแก้และคำสั่งเกตุของพารามิเตอร์ในแต่ละรอบของการคำนวณซ้ำ $16m, 1$

สมการคำสั่งเกตุของจุดควบคุมภาพภายในรูปสมการเชิงเส้น

$$V_2 = X_2 + L_2 \dots\dots\dots(2.17)$$

V_2 คือเวกเตอร์เศษคงเหลือของคำสั่งเกตุจุดควบคุมภาพภายใน $3n, 1$

L_2 คือเวกเตอร์เศษคงเหลืออันเนื่องมาจากความต่างระหว่างค่าปรับแก้กับคำสั่งเกตุ $3n, 1$

ของพิกัดของจุดควบคุมในแต่ละรอบของการคำนวณซ้ำ

สมการ (2.9), (2.10) และ (2.11) รวมเข้าด้วยกัน จะได้

$$\bar{V} = \bar{A} \bar{X} + \bar{L} \dots\dots\dots(2.18)$$

$$\bar{V} = (V, V_1, V_2)^T, \bar{A} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$$

$$\bar{X} = (X_1, X_2)^T, \bar{L} = (L, L_1, L_2)^T$$

I = Unit matrix

จากวิชา(2524) โดยวิธีการลิสต์แควร์ สมการปรกติของสมการ (2.18) คือ

$$N\bar{X} + U = 0 \dots\dots\dots(2.19)$$

$$N = \bar{A}^T P \bar{A}, U = \bar{A}^T P \bar{L}$$

P คือเมทริกซ์น้ำหนักของคำสั่งเกตุ (weight matrix) ของสมการ (2.15) (2.16) และ (2.17) ประกอบด้วยเมทริกซ์ย่อย

$$P = \begin{bmatrix} w & \beta \\ & w_1 \\ \beta & & w_2 \end{bmatrix}$$

โดยกำหนดให้คำสั่งเกตุแต่ละค่าไม่มีสหสัมพันธ์กัน ดังนั้น P จึงอยู่ในรูปของเมทริกซ์ทะแยงมุม (diagonal matrix) แต่ละค่าเป็นส่วนกลับของค่าความแปรปรวน

ในการปรับแก้ตลอดโดยลำแสง น้ำหนักของคำสั่งเกตุของพิกัดของจุดภาพ (image coordinates) กำหนดให้เป็น Unit weight (w)(Amer, 1975)

$$U_2 = A_2^T W L + W_2 L_2$$

3n,1

แกสมการด้วยวิธีการแบ่งส่วนของเมทริกซ์ (partition) โดยจัดเมทริกซ์ย่อย N_2 ซึ่งเป็นส่วนของจุดควบคุมภาพถ่าย และจุดไม่ทราบค่าพิกัด (วิชา, 2524)

$$X_1 = - (N_1 - N_{12} N_2^{-1} N_{12}^T)^{-1} (U_1 - N_{12} N_2^{-1} U_2) \dots\dots\dots(2.21)$$

$$X_2 = - N_2^{-1} (U_2 + N_{12}^T X_1) \dots\dots\dots(2.22)$$

จากสมการ (2.21) จะได้เวกเตอร์ค่าตรวจแก้ x_1 เมื่อแทนค่า x_1 ลงในสมการ (2.22) จะได้เวกเตอร์ตรวจแก้ x_2

ถ้ากำหนดให้ \bar{x}_a คือค่าปรับแก้ของพารามิเตอร์ทั้งหมดในสมการ (2.19) และ \bar{x}_0 คือค่าประมาณ จะได้

$$\bar{x}_a = \bar{x}_0 + \bar{x} \dots\dots\dots(2.23)$$

เมทริกซ์ N_2 มีลักษณะเป็นบล็อกทแยงมุม แต่ละบล็อกมีขนาด 3×3 ในการหาส่วนกลับ (inverse) ของเมทริกซ์ N_2 ก็คือหาส่วนกลับของแต่ละบล็อกขนาด 3×3 ต่อเนื่องกันไป

ค่าเมทริกซ์ของความแปรปรวน (M) ของพารามิเตอร์

$$M = \frac{\Lambda^2}{\sigma_0^2} N^{-1} \dots\dots\dots(2.24)$$

N^{-1} ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ของการจัดภาพถ่ายในและภายนอก คือ $(N_1 - N_{12} N_2^{-1} N_{12}^T)^{-1}$ และในส่วนของจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดที่ไม่ทราบค่าพิกัด คือ $(N_2^{-1} + N_2^{-1} - N_{12}^T (N_1 - N_{12} N_2^{-1} N_{12}^T)^{-1} N_{12} N_2^{-1})$

2.6 การทดสอบความแปรปรวนของน้ำหนักหนึ่งหน่วยหลังการปรับแก้

การทดสอบความแปรปรวนเป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งของการปรับแก้ เพื่อเป็นการยืนยันว่า ผลการปรับแก้มีความน่าเชื่อถือเพียงใด โดยใช้วิธีการทางสถิติ

จาก Mikhail (1976) การทดสอบทางสถิติของข้อมูลหลังการปรับแก้ โดยการทดสอบเกี่ยวกับความแปรปรวนของน้ำหนักหนึ่งหน่วยก่อนการปรับแก้ ($\sigma_0^2 = a \text{ priori variance of unit weight}$) และหลังการปรับแก้ ($\hat{\sigma}_0^2 = \text{posteriori variance of unit weight}$) โดยใช้ χ^2 - test (chi-square test)

ค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบ คือ

$$X_r^2 = r \cdot \frac{\Lambda^2}{\sigma_0^2} / \sigma_0^2 \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

โดยที่

$$\frac{\Lambda^2}{\sigma_0^2} = \frac{\bar{V}^T P \bar{V}}{r} \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

r คือลำดับขั้นของความเป็นอิสระ (degree of freedom)

มีค่าเท่ากับ $c-u$ (= redundancy(r))

c คือจำนวนสมการค่าสังเกต

u คือจำนวนพารามิเตอร์

กำหนดการทดสอบ เป็นแบบ one-tail upper-bound test ใช้ระดับนัยสำคัญ

(α) เท่ากับ 0.05 ในการตัดสินใจสมมติฐาน

สมมติฐานที่เลือกใช้ในการทดสอบ คือ

$$H_0: \frac{\Lambda^2}{\sigma_0^2} = \sigma_0^2; H_1: \frac{\Lambda^2}{\sigma_0^2} > \sigma_0^2$$

ปฏิเสธ H_0 เมื่อ

$$X_r^2 > X_{\alpha, r}^2$$

เนื่องจาก $P(r \cdot \frac{\Lambda^2}{\sigma_0^2} / \sigma_0^2 > X_{\alpha, r}^2) = \alpha$

การทดสอบทางสถิติของค่า $\frac{\Lambda^2}{\sigma_0^2}$ เป็นการบอกความน่าจะเป็นของการปรับแก้ ถ้าผลของการปรับแก้ไม่ผ่านการทดสอบตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ จำเป็นต้องหาสาเหตุซึ่งเป็นไปได้หลายทาง อาทิ

1. ตรวจสอบการคำนวณตามขั้นตอนต่าง ๆ ว่าถูกต้องหรือไม่
2. ตรวจสอบรูปจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมหรือไม่ บางครั้งความคลาดเคลื่อนมีระบบ (systematic effects) ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น สะท้อนให้เห็นการเลือกรูปจำลองไม่เหมาะสม (model deficiencies)
3. ตรวจสอบจำนวนสมการเงื่อนไขที่สร้างขึ้นว่ามีพอเพียงหรือไม่ ในการแก้ปัญหา ซึ่งสมการดังกล่าวต้องมีเพียงพอในการแก้ปัญหาในทางกายภาพและสถานการณ์ทางเรขาคณิต

2.7 การแสดงโค้งของความเพี้ยนในรูปของกราฟ

2.7.1 การแสดงโค้งความเพี้ยนตามแนวรัศมี

ค่าความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมีในเชิงตัวเลขสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.9) โดยกำหนดให้แกน x เป็นระยะตามแนวรัศมี จากจุดमुख्यสำคัญ แกน y เป็นค่าความเพี้ยนตามแนวรัศมี ค่าคำนวณจากสมการ (2.9) ค่าความเพี้ยนของเลนส์จะขึ้นอยู่กับค่าของระยะमुख्यสำคัญ (c) (Zorn, 1971) ผลจากการแปลงข้อมูลตามวิธีการที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5 จะได้อาของ c ที่เรียกว่าความยาวโฟกัสสมมูล (equivalent focal length) โดยจะมีค่าของความเพี้ยนเป็น 0 หรือใกล้ 0 ใกล้เคียง จุดमुख्यสำคัญ ค่าความเพี้ยนจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อจุดที่พิจารณามีระยะห่างจากจุดमुख्यสำคัญเพิ่มมากขึ้น การเลือกค่า c เพื่อให้ได้โค้งความเพี้ยนของเลนส์ที่เหมาะสม นิยมใช้กันมากคือ เลือกค่า c ในลักษณะที่ให้ค่าความเพี้ยนสูงสุดทางบวก (maximum positive distortion) เท่ากับค่าความเพี้ยนสูงสุดทางลบ (maximum negative distortion) ค่า c ที่ได้จากวิธีการนี้เรียกว่าความยาวโฟกัสวัดสอบ (calibrated focal length) โดยที่

$$C.F.L = E.F.L + \Delta c \quad \dots\dots\dots(2.27)$$

C.F.L คือ calibrated focal length

E.F.L คือ Equivalent focal length

(จาก Brown (1969))

$$\Delta c = - \frac{c}{r_0 + \delta_{r_0}} \cdot \delta_{r_0} \quad \dots\dots\dots(2.28)$$

r_0 และ δ_{r_0} สามารถคำนวณหาได้โดยวิธีการกราฟิก ดังนี้

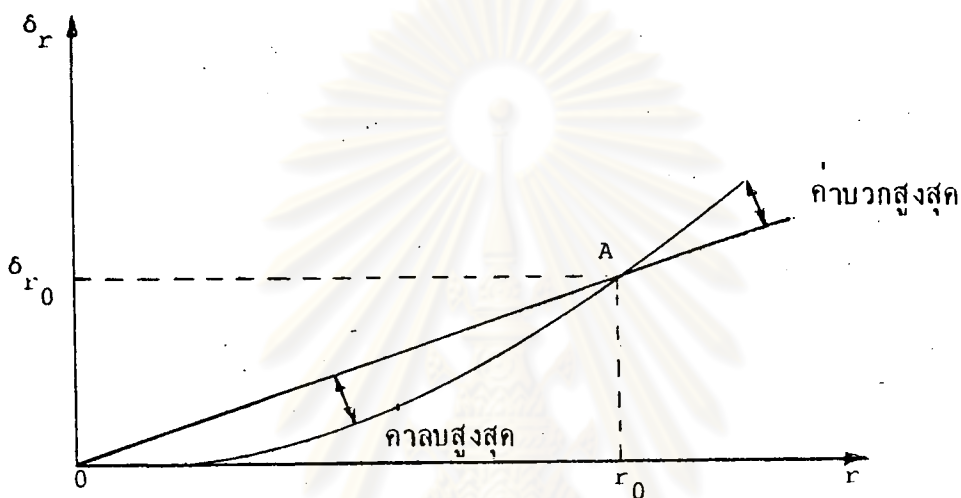
จากรูป 2.2 โค้งความเพี้ยนของเลนส์ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ(2.9) ลากเส้นตรงแบ่งโค้งความเพี้ยนในลักษณะที่ให้ค่าสูงสุดทางบวกของความเพี้ยนเท่ากับค่าสูงสุดทางลบ โดยวิธีการลองแล้วปรับ เส้นตรงเส้นนี้จะตัดโค้งความเพี้ยนที่จุด A ลากเส้นตรงจากจุด A ให้ขนานกับแกน x และแกน y และตัดแกนทั้งสอง จะได้อา r_0 และ δ_{r_0} ดังรูป การปรับโค้งความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี มีผลทำให้ระยะमुख्यสำคัญเปลี่ยนไป ซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่าความเพี้ยน ๆ และสามารถคำนวณได้จาก (Brown, 1969)

$$\delta_r = K_0 r + K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \dots\dots\dots, (2.29)$$

โดยที่

$$K_0 = \Delta c/c ; K_1 = (1 + K_0) \cdot K_1$$

$$K_2 = (1 + K_0) \cdot K_2 ; K_3 = (1 + K_0) \cdot K_3$$



รูปที่ 2.2 แสดงวิธีการปรับโค้งความเพี้ยนตามแนวรัศมี

2.7.2 การแสดงโค้งความเพี้ยนอสมมาตร

ค่าของความเพี้ยนอสมมาตรสามารถหาค่าเชิงตัวเลขได้จาก (Brown, 1969)

$$P_r = r^2 (P_1^2 + P_2^2)^{1/2} \dots\dots\dots (2.30)$$

โดยที่

r คือระยะจากจุดศูนย์กลาง

P_r คือค่าความเพี้ยนอสมมาตร

P_1 และ P_2 คือสัมประสิทธิ์ความเพี้ยนตามแนวเส้นสัมผัสที่ได้จากการปรับแก้ตามวิธีการในหัวข้อ 2.5 โดยกำหนดค่าให้แกน x แทนระยะจากจุดศูนย์กลาง แกน y แทนขนาดของความเพี้ยน (P_r) คำนวณจากสมการ (2.30).

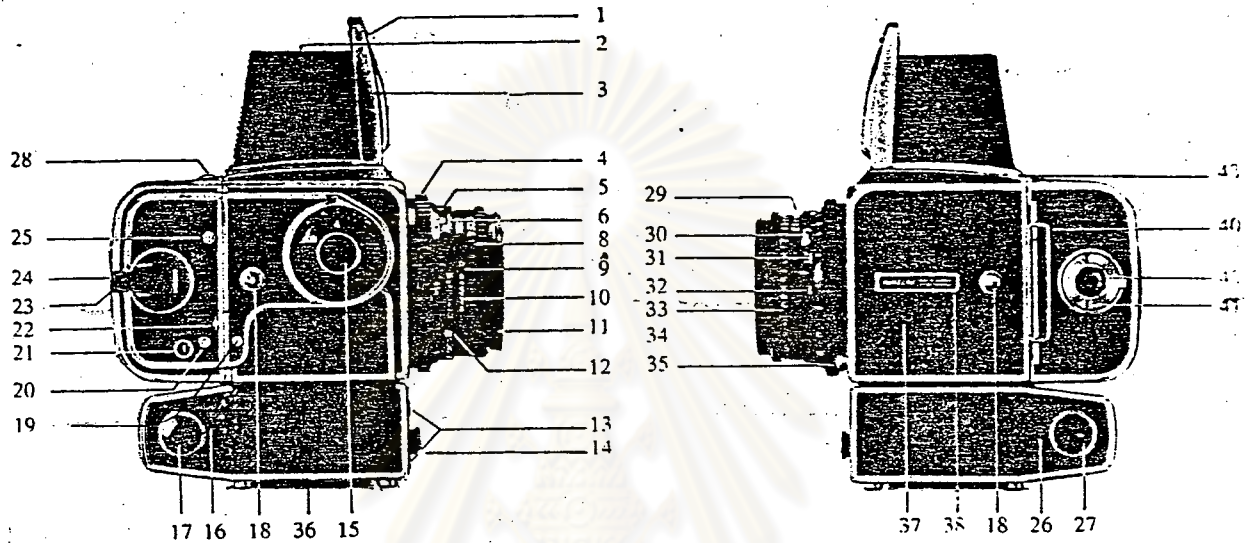
2.8 หลักการทั่วไปของการถ่ายภาพและลักษณะสมบัติของกล้อง

2.8.1 หลักการทั่วไปของการถ่ายภาพ วิชาและปริษา (2523) ใ้กล่าวถึงหลักการถ่ายภาพ โดยสรุปได้ดังนี้

ในการถ่ายภาพแต่ละภาพ ตัวประกอบที่เกี่ยวข้องของ ประกอบด้วย ปริมาณความส่องสว่าง (illumination) ที่ได้รับจากวัตถุและเวลาเปิดหน้ากล้อง (exposure time) ปริมาณความส่องสว่างและเวลาเปิดหน้ากล้องที่ถูกต้อง หาได้จากมาตรวัดแสง (light meter) ความส่องสว่าง ควบคุมโดยการเปลี่ยน เอฟ-สตอป (f-stop) ขณะที่เวลาเปิดหน้ากล้อง ควบคุมโดยการเปลี่ยนความเร็วชัตเตอร์ (shutter speed) การเปลี่ยน เอฟ-สตอป ก็คือการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของกระบัง (diaphragm) ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปกลม ๆ สามารถขยายหรือหดลง ทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางของรูเปิดเลนส์เปลี่ยนขนาดได้ การเพิ่มหรือลดความเร็วชัตเตอร์ มีส่วนสัมพันธ์กับ เอฟ-สตอป กล่าวคือ ถ้าเวลาเปิดหน้ากล้องลดลงครึ่งหนึ่ง ขนาดของรูกระบังจะต้องเป็นสองเท่า ปริมาณของแสงที่ได้รับจะคงเดิม ในการถ่ายภาพสถานที่ที่มีระยะวัตถุต่าง ๆ กัน และต้องการให้ภาพมีความชัดทุก ๆ จุด นั่นคือ ความชัดลึกของวัตถุ (depth of field) มาก ๆ ความชัดลึกของวัตถุ ขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของกระบัง กล่าวคือเพื่อให้ได้ความชัดลึกของวัตถุมากที่สุด จะต้องตั้งเอฟ-สตอปสูง ซึ่งก็คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของรูเปิดเลนส์เล็ก และต้องถ่ายด้วยความเร็วชัตเตอร์ต่ำ จากความสัมพันธ์ระหว่างความชัดลึก เอฟ-สตอปและความเร็วชัตเตอร์ ทำให้สามารถนำไปพิจารณาในการหาขนาดของการเปิดหน้ากล้องที่ถูกต้อง

2.8.2 ลักษณะสมบัติของกล้อง Hasselblad 500 EL/M โดยทั่วไป

1. เป็นกล้องถ่ายภาพชนิด single lens reflect camera
2. ควบคุมการเลื่อนฟิล์มและขึ้นชัตเตอร์ด้วยระบบไฟฟ้า
3. สามารถถ่ายภาพได้ครั้งละรูปหรือถ่ายเป็นชุดติดต่อกัน (single or series)
4. สามารถถอดเปลี่ยนชุดของเลนส์ที่ใช้ถ่ายได้
5. ใช้กับฟิล์มม้วน (roll film) ขนาด 55 mm. รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะและส่วนประกอบต่าง ๆ ของกล้อง Hasselblad 500 EL/M



1. Focusing hood and magnifier
2. Fine-focus magnifier
3. Focusing hood
4. Focusing ring with distance scale and grip ring
5. Central index (for shutter speed, aperture and distance settings)
6. Depth-of-field indicator
8. Exposure value scale
9. Exposure value index
10. Cross-coupling release
11. External and internal bayonet mounts
12. Depth-of-field preview catch
13. Front release sockets
14. Release button
15. Selector dial
16. Time exposure, locking and charging lever
17. Side socket for exposure and battery charging
18. Strap fastener
19. Exposure reminder window
20. Film-wind reminder window
21. Frame counter

22. Film plane marker
23. Film winding crank
24. Film indicator
25. Magazine designation
26. Battery compartment
27. Battery cover catch
28. Magazine catch
29. Aperture scale on aperture ring
30. Synchronization terminal
31. Synchronization and self-timer selector
32. Catch for synchronization and self-timer selector (31)
33. Shutter speed scale on shutter speed ring
34. Grip ring for setting shutter speed, f/stop and light value
35. Lens lock release
36. Tripod plate
37. Cable-hook socket
38. Accessory rail
40. Magazine slide
41. Roll holder key
42. Film consumption indicator
43. Focusing screen

รูปที่ 2.3 กล้องถ่ายรูป Hasselblad 500 EL/M