บทที่ 1

บทนำ

การเกิดของภาพ

เครื่องมือที่ใช้ในทางแสงมีอยู่หลายชนิด แต่ที่สำคัญและใช้ประโยชน์มาก ก็คือเลนซ์ กระจกโค้ง ปริซึม เกรทติ้ง (grating) แต่อุปกรณ์ที่จะนำมาทดสอบในที่นี้ คือ เลนซ์ซึ่งใช้สำหรับรวมแสงให้เกิดภาพใด ๆ ที่ต้องการ หน้าที่โดยทั่วไปของเลนซ์ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในกล้องชนิดต่าง ๆ เช่น กล้องถ่ายรูป กล้องจุลทัศน์ กล้องโทรทัศน์ ฯลฯ หน้าที่ของเลนซ์เหล่านี้ก็คือ ทำให้ภาพของวัตถุที่อยู่ห่างออกไปให้เกิดบนระนาบ ที่วางตั้งฉากกับแนวแกนของแสง ดังนั้น ภาพที่ไม่มีความโค้ง (Flat field) จึงเป็นเรื่องสำคัญสำหรับการถ่ายภาพ โดยปกติเลนซ์ใกล้วัตถุของกล้องโทรทัศน์ (Telescope objective) หรือของกล้องจุลทัศน์ (Microscope objective) ใช้ดูของไกลสุดและใกล้สุดตามลำดับ ตาของเราสามารถเปลี่ยนทางยาวโฟคัสได้โดยที่ภาพไม่มีความคลาดโค้ง (Curvature of field) มากเกินไป เมื่อถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทัศน์ หรือโทรทัศน์ต้องใช้เลนซ์ใกล้ตา (eye piece) ช่วยด้วยในการที่จะให้ภาพที่ไม่มีความโค้ง (Flat field) เลนซ์ใกล้วัตถุของกล้องโทรทัศน์มีมุมกว้าง $2^{\circ} - 6^{\circ}$ เลนซ์ใกล้วัตถุของกล้องจุลทัศน์มีมุมกว้าง $3\frac{1}{2}^{\circ}$ แต่ทั้งกล้องโทรทัศน์และกล้องจุลทัศน์ทำงานได้ดีที่ระยะสังยุคจำกัด (definite conjugate) เลนซ์ถ่ายรูปต้องดีพอสำหรับทุกจุดที่แสงมารวมกันเกิดภาพ รวมทั้งภาพนอกแกน ซึ่งต้องถ่ายภาพได้ชัดถึง $25^{\circ} - 45^{\circ}$ นอกแกน ในกรณีของเลนซ์มุมกว้าง (wide angle lenses) ตามทฤษฎีเลนซ์ถ่ายรูปไม่ควรมีความคลาดทรงกลม (Spherical aberration) ความคลาดสี (Chromatic aberration) ความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน (Coma) แอสติคมาติซึม (Astigmatism) ความบิดเบี้ยว (Distortion) และภาพต้องไม่โค้ง ต้องใช้เวลาถ่ายสั้นมีความลึกชัดของภาพและวัตถุ (Depth of focus, depth of field) มาก มุมของการมองเห็นกว้าง เลนซ์ที่ใช้งานจริง ๆ ที่มีคุณสมบัติเหล่านี้ทุกประการหาได้ยากมาก อาจจะมีข้อบกพร่องข้อใดข้อหนึ่ง การแก้ไขข้อบกพร่องเหล่านี้ ทำให้ภาพที่ได้ดีขึ้น

ส่วนพวกชื่อทางเทคนิค (Technical term) ที่กล่าวมาแล้ว มีรายละเอียดดังนี้

หน้ากล้อง (Aperture ratio)

ตัวเลขที่เขียนไว้บนเลนซ์ของกล้องถ่ายรูป เช่น 2, 4, 5.6, 8,... นั้น เป็นความสัมพันธ์ระหว่างรูรับแสง (Aperture) กับทางยาวโฟคัสของกล้อง หรือคืออัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของรูรับแสงกับทางยาวโฟคัส เช่น F/2, F/5.6 , F/11 หมายถึงเส้นผ่าศูนย์กลางของรูรับแสง เป็น $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{5.6}$, $\frac{1}{11}$ ของทางยาวโฟคัส หรือบางที่เรียก stop number ค่านี้อาจจะตรวจสอบได้โดยการวัดทางยาวโฟคัสของเลนซ์ทั้งระบบกับเส้นผ่าศูนย์กลางของรูรับแสงที่ค่าหน้ากล้องต่าง ๆ

เวลาเปิดหน้ากล้อง (Time of exposure)

เราวัดเป็นเศษส่วนของวินาที เช่น $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{25}$, $\frac{1}{60}$,... $\frac{1}{1000}$ เพื่อให้ได้ความเข้มบนฟิล์มหรือฉาก เหมาะสมกับชนิดของฟิล์ม และให้ได้รูปชัดเจนสวยงาม ฉะนั้นหน้ากล้องและเวลาเปิดหน้ากล้องต้องพิจารณาพร้อมกันจากหน้ากล้อง (f - นัมเบอร์) เช่น f/22 , f/16 , f/11, f/8 , f/5.6 นั้น

f/22 คือ $\frac{\text{ทางยาวโฟคัส}}{22}$ = เส้นผ่าศูนย์กลางของรูรับแสง

หรือ $\frac{\text{เส้นผ่าศูนย์กลางของรูรับแสง}}{\text{ทางยาวโฟคัส}} = \frac{1}{22}$

จาก exposure = ความเข้มแสง $\times$ เวลา

ใช้ exposure เมื่อ f/11 เวลา $\frac{1}{25}$ วินาที

ถ้าใช้ f/8 เวลาต้อง = $\frac{1}{50}$ วินาที

ซึ่งอาจพิสูจน์ได้ดังนี้

มีเลนซ์อันหนึ่งทางยาวโฟคัส f มีแสงขนานเข้ามาได้ภาพของดวงอาทิตย์ ถ้าหากดวงอาทิตย์มีเส้นผ่าศูนย์กลาง = x ห่างจากโลก y ภาพที่เกิดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง = d

จาก $\frac{\text{ขนาดภาพ}}{\text{ขนาดของดวงอาทิตย์}} = \frac{\text{ระยะภาพ}}{\text{ระยะของดวงอาทิตย์}}$

$$\frac{d}{x} = \frac{f}{y}$$

$$d = \frac{x}{y} f$$

จาก f - นัมเบอร์ แสงที่ผ่านเลนซ์จะแปรตามพื้นที่ของรูรับแสงที่เปิด เช่น $\frac{\pi D^2}{4}$ ค่า $\frac{\pi}{4}$ คงที่ จึงเป็นสัดส่วนกับเส้นผ่าศูนย์กลางกำลังสอง

แทนค่า พ.ท. $A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi}{4} \frac{x^2}{y^2} f^2 = kf^2$

ความเข้มแสงที่ตกลงบนภาพ โดยคิดว่าต้นแสงมาจาก ∞ ขึ้นกับระยะทางระหว่างเลนซ์และฟิล์ม นั่นคือทางยาวโฟคัสนั่นเอง ฉะนั้นพื้นที่ของภาพที่เกิด, ขึ้นอยู่กับทางยาวโฟคัสกำลังสอง

ถ้าเลนซ์มีทางยาวโฟคัส ยาว จะได้ภาพใหญ่

ถ้าเลนซ์มีทางยาวโฟคัส สั้น จะได้ภาพเล็ก

ถ้าให้เส้นผ่าศูนย์กลางของรูรับแสงที่ใช้ = D เมื่อเปิดรูรับแสงกว้าง , ปริมาณ ลูเมนซ์ (lumens) ที่ผ่านเข้าไปถึงฟิล์มก็มาก ฉะนั้นปริมาณ Q Lumens ขึ้นอยู่กับพื้นที่ของรูรับแสง

$$Q = K, D^2$$

ความเข้มแสง = ปริมาณลูเมนซ์ / พ.ท.

$$I = \frac{Q}{A}$$

แต่ $A = kf^2$

$$I = \frac{Q}{kf^2} = \frac{k, D^2}{kf^2} = K \frac{D^2}{f^2}$$

$$\text{Exposure} = I \times T$$

เช่น $f/8 = \frac{f}{8} = D$

$$\frac{f^2}{D^2} = 64$$

$$\frac{D^2}{f^2} = \frac{1}{64}$$

หรือ $f/11$, $f \frac{f^2}{D^2} = 121$

$$\frac{D^2}{f^2} = \frac{1}{121}$$

ถ้าใช้ f/11 ใช้เวลา $\frac{1}{25}$ วินาที

$$\text{exposure} = k \frac{1}{121} \times \frac{1}{25}$$

ถ้า f/8 ใช้เวลา = ? $= k \frac{1}{64} \times t$

$$\therefore k \frac{1}{121} \times \frac{1}{25} = k \cdot \frac{1}{64} \times t$$

$$t = \frac{1}{50} \text{ วินาที}$$

ความลึกชัดของภาพ (Depth of focus)

ความลึกชัดของภาพ เป็นระยะที่ฟิล์มเลื่อนไปมาได้ โดยที่ภาพยังชัดไม่มีความคลาด จากรูป (1.2) คือ เส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุดที่จะเป็นไปได้ของวัตถุ u' เป็นมุมทางด้านภาพ และ D เป็นความลึกชัดของภาพทั้งหมด

$$\therefore \tan u' = \frac{x/2}{D/2} = \frac{x}{D}$$

$$D = \frac{x}{\tan u'}$$

สมมติว่าความคมของดวงตา (visual acuity) เป็น 1 minute of arc หรือ 0.0003 เรเดียน แต่ภาพถ่ายแสดงที่ระยะชัด (10 นิ้วหรือ 25 ซ.ม.)

$$\therefore \frac{x}{10} = 0.0003 \text{ เรเดียน}$$

$$x = 0.003 \text{ นิ้ว}$$

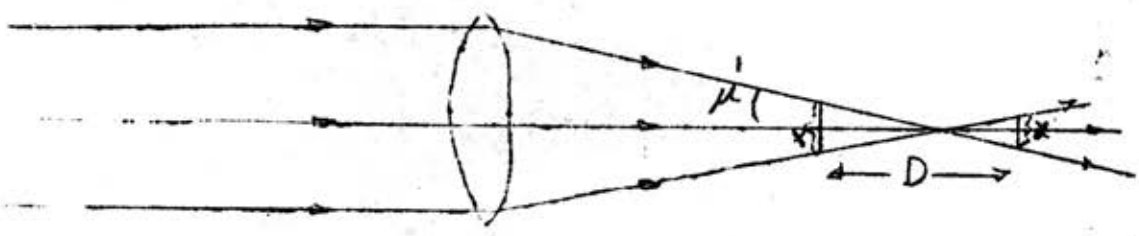
$$D = \frac{0.003}{\tan u}$$

แต่ $$\tan u' = \frac{1}{2 \times \text{aperture ratio}}$$

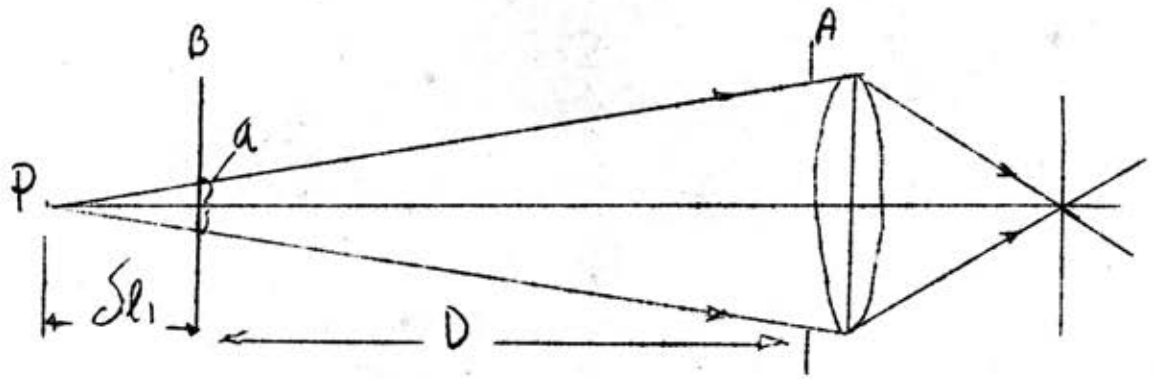
$$D = 0.006 \text{ aperture ratio นิ้ว}$$

ยกตัวอย่างเช่น F/5.6 จะมีความลึกชัดของภาพ = 0.006×5.6

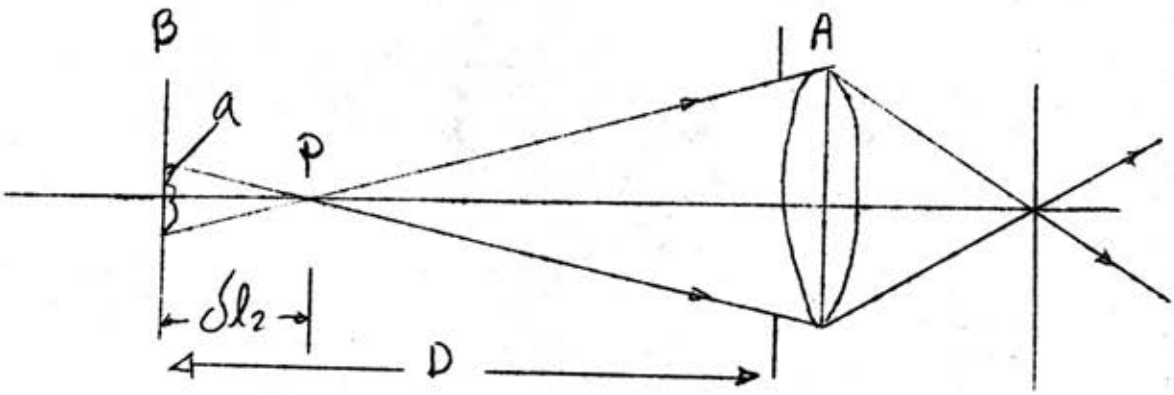
$$= 0.0336 \text{ "}$$



รูปที่ 1.2 ความลึกชัดของภาพ



รูปที่ 1.3 ความลึกชัดของวัตถุ



รูปที่ 1.4 ความลึกชัดของวัตถุ

ความลึกชัดของวัตถุ (Depth of field)

เป็นระยะที่เปลี่ยนแปลงได้ของวัตถุ โดยที่ยังให้ภาพชัดเจนอยู่ จากรูป (1.3) a เป็นพื้นที่ของวัตถุที่ปรากฏบนระนาบ B และเลนซ์ โฟคัสบนพื้นที่นี้วัตถุเป็นจุดอยู่ที่ P จะปรากฏในภาพมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{a}{m}$ เมื่อ m เป็นกำลังขยาย และ $\frac{a}{m} > 0.003$ นิ้ว A เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนซ์ จากรูปโดยใช้ Δ คล้าย

$$\frac{A}{a} = \frac{D + \delta l_1}{\delta l_1}$$

$$\therefore \quad \delta l_1 A = a D + a \delta l_1$$

$$\therefore \quad \delta l_1 = \frac{a D}{(A - a)} \qquad \ldots\ldots\ldots (1)$$

$$\frac{A}{a} = \frac{D + \delta l_2}{\delta l_2}$$

$$= \frac{a D}{(A + a)} \qquad \ldots\ldots\ldots (2)$$

$$\therefore \quad \text{ความลึกชัดของวัตถุ} = \delta l_1 + \delta l_2$$

$$= \frac{a D}{(A - a)} + \frac{a D}{(A + a)}$$

$$= \frac{2 a D A}{(A^2 - a^2)}$$

เช่น เลนซ์ F/8 มีทางยาวโฟคัส 2 นิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลางของรูรับแสง 0.25นิ้ว ระยะวัตถุ 10 ฟุต

$$\therefore \quad \text{กำลังขยาย} = \frac{2}{10 \times 12} = \frac{1}{60}$$

$$\therefore \quad a = \frac{0.003}{m} = \frac{0.003}{1/60}$$

$$= 0.18$$

$$\therefore \quad \text{ความลึกชัดของวัตถุ} = \frac{2a\,AD}{(A^2-a^2)} = \frac{2 \times 0.25 \times 0.18 \times 120}{.0625 - .0324}$$

$$= 358.4 \text{ นิ้ว}$$

กำลังแยกของเลนซ์ (Resolving power of the lenses)

จากปรากฏการเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction) ภาพของวัตถุที่เป็นจุดจะไม่เป็นจุด แต่จะเกิดเป็นวงดังรูป 1.6 มีเส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{1.22\lambda}{n' \sin u'}$ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นของแสง n' เป็นดัชนีหักเหของตัวกลางที่ภาพอยู่ u' เป็นมุมที่รังสีลู่เข้ากระทำมุมโตที่สุดกับแกนในฝั่งภาพรูป 1.5 เป็นที่ยอมรับกันแล้วว่า ภาพของวัตถุที่เป็นจุดสองจุดที่อยู่ติดกัน ถือว่าแยกกันได้เมื่อจุดศูนย์กลางของภาพอยู่ห่างกันเท่ากับรัศมีของ Airy disc $= \frac{0.61\lambda}{n' \sin u'}$ สำหรับเลนซ์ถ่ายภาพ $\sin u'$ มีค่าใกล้เคียง $= \frac{1}{2 \text{ aperture ratio}}$ เช่นเลนซ์ F/8 รัศมีของ Airy disc

$$= \frac{0.61 \times 0.00055}{1 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{8}} \text{ ม.ม.}$$

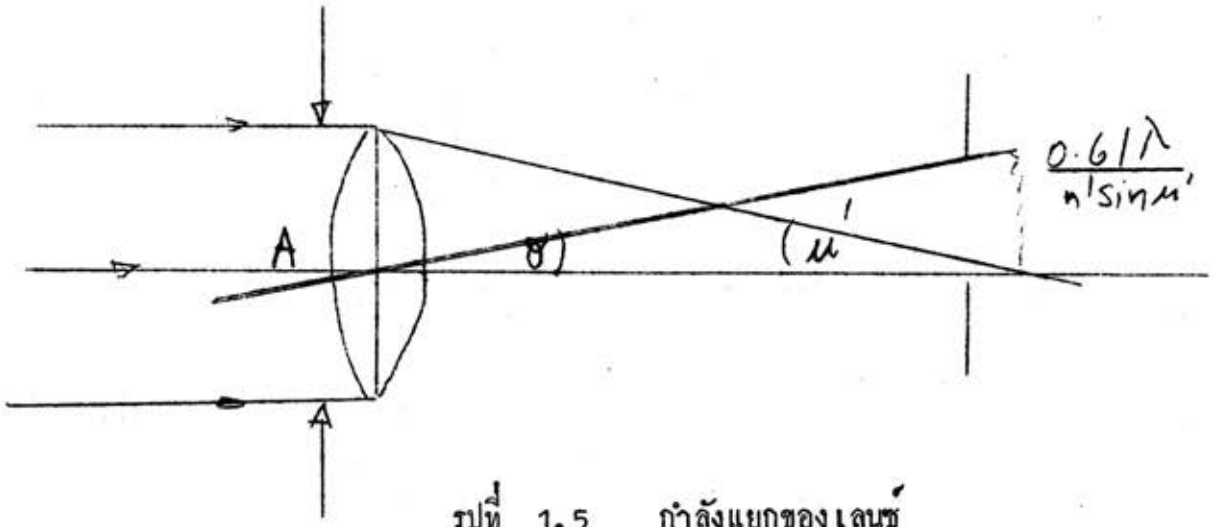
$$= 0.0054 \text{ ม.ม.}$$

เมื่อตัวกลางในฝั่งภาพเป็นอากาส ดัชนีหักเห = 1

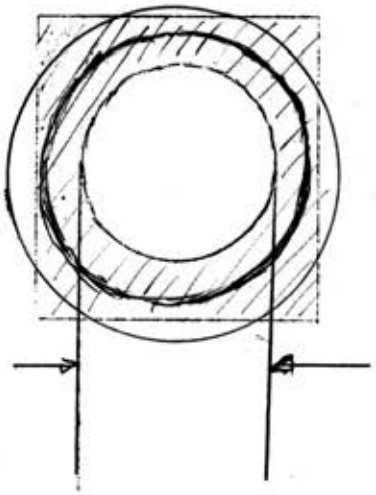
กำลังแยกตามทฤษฎีวัดด้วยมุม ที่จุดสองจุดรองรับที่เลนซ์ สำหรับเลนซ์ถ่ายรูป

$$= \frac{1.22\lambda}{A}$$

เมื่อ A เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของรูรับแสง



รูปที่ 1.5 กำลังแยกของเลนซ์



รูปที่ 1.6 Airy Disc.

ความคลาดของเลนซ์ (Lens aberrations)

ความคลาดในทัศนอุปกรณ์ที่ใช้งานมากก็มี เลนซ์และกระจกมีอยู่หลายชนิด เนื่องจากรูปร่างของมัน ความสัมพันธ์ของตำแหน่งของช่องปรับแสง (stop) หรือตำแหน่งของวัตถุ ความคลาดที่มักจะเกิดขึ้น เช่น ความคลาดทรงกลม (spherical aberration) ความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน (Coma) ความบิดเบี้ยว (Distortion) ความคลาดโค้ง (Curvature of image field) แอสติคมาติซึม (Astigmatism) ถ้าเป็นพวกเลนซ์ก็มีความคลาดสี (Chromatic aberration) ด้วย เมื่อรูรับแสงของเลนซ์กว้างก็จะเกิดความคลาดทรงกลม และความคลาดสีตามแนวแกน (Longituginal chromatic aberration) เมื่อบริเวณที่เกิดภาพ (field) กว้าง ความคลาดสี ความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน ความเอียง ความคลาดโค้ง ความบิดเบี้ยว จะเกิดขึ้น ความบกพร่องประการแรกเกี่ยวกับรูรับแสง อันต่อมาเกี่ยวกับบริเวณที่รับภาพ ความบกพร่องเหล่านี้ ได้พิจารณากันว่าทำให้ภาพที่ได้รับผิดความจริงไปอย่างไรบ้าง และแก้ไขให้ลดน้อยลงหรือหมดไป และได้พบว่าความคลาดทรงกลมของเลนซ์ธรรมดา อาจควบคุมได้โดยการเปลี่ยนรูปร่างของเลนซ์ (bending) และเมื่อระบบทัศนะเป็นอะพลานาติค (Aplanatic) ทั้งความคลาดทรงกลมและความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกนจะหายไป เมื่อลองจัดให้มีเลนซ์ 2 ชนิดประกอบกัน ทำด้วยแก้วชนิดที่เหมาะหรือวางเลนซ์ทั้งสองให้ห่างกันได้ระยะก็จะลดความคลาดสีตามแนวแกนได้ โดยทั่วไปแล้วน้อยมากที่ระบบแสงจะให้ภาพออกมาโดยไม่มีความบกพร่อง แต่โดยที่ความบกพร่องบางประการ ก็ยอมให้มีได้โดยไม่ทำให้คุณภาพของภาพเลวจนเกินไปนัก ซึ่งผู้ออกแบบจะควบคุมความบกพร่องที่สำคัญ ๆ โดยเลือกเลนซ์ที่เป็นส่วนประกอบ หรือโดยตำแหน่งของช่องปรับแสง หรือโดยการเลือกชนิดของแก้ว ความหนา ระยะระหว่างเลนซ์ เพื่อกำจัดความคลาดสี ส่วนประกอบที่เป็นกระจกนั้นจะไม่มีความคลาดสี แต่มักจะมีความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกนอย่างมาก ในการถ่ายภาพของเส้นสเปคตรัม มักเกิดแอสติคมาติซึม ซึ่งก็ไม่สำคัญนัก แม้ว่าบริเวณที่เกิดภาพราบ (large flat field) จะเป็นสิ่งสำคัญในเรื่องกล้องโดยทั่วไป แต่ในระบบทัศนะนี้ต้องการบริเวณเกิดภาพไม่กว้างนัก และความบกพร่องเกิดจากบริเวณที่เกิดภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับที่เกิด

จากรูรับแสงก็ไม่สู้กระไรนัก แต่ในเลนซ์ถ่ายรูปต้องไม่มีความบิดเบี้ยวเลย แต่ยอมให้มีความคลาดสีบ้าง เพราะว่าเลนซ์ชนิดนี้อาจจะให้ผลดีพอสมควร แม้ว่าจะมีความคลาดสีบ้าง จะเห็นว่าในระบบทัศนะผู้ออกแบบ ก็อาจจะเลือกให้เหมาะกับความประสงค์ที่จะไปใช้งานได้ ความบกพร่องของเลนซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความคลาด มีอยู่หลายประการดังนี้

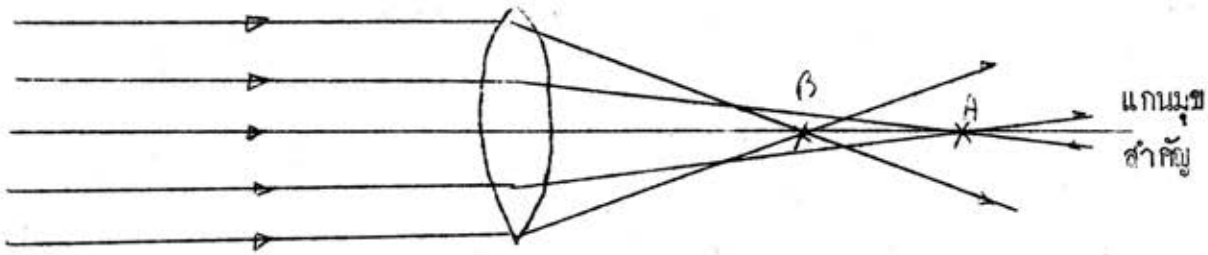
<u>ความคลาดปกติของเลนซ์</u> (Common aberrations)

ความคลาดของเลนซ์แบ่งออกได้ดังนี้

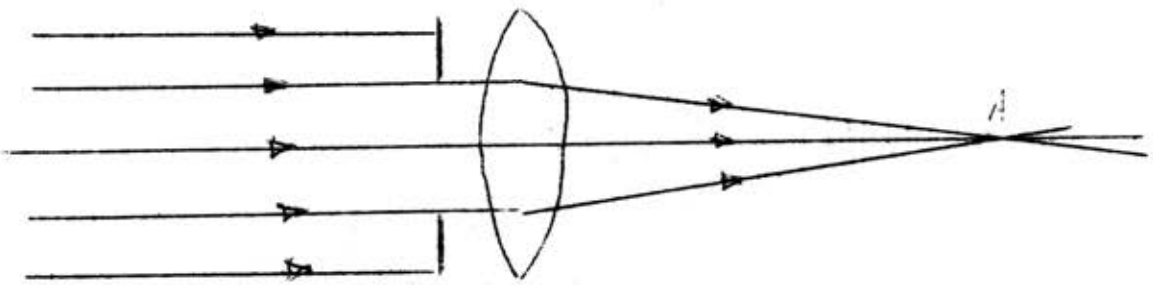
1. ความคลาดทรงกลม (Spherical aberration)
2. ความคลาดเมื่อวัตถุอยู่นอกแกน (Coma)
3. ความบิดเบี้ยว (Distortion)
4. ความคลาดโค้ง (Curvature of image field)
5. แอสติคมาติซึม (Astigmatism)
6. ความคลาดสี (Chromatic aberration)
7. แสงพร่าและภาพซ้อนผิดปกติ (Flare and ghost image)
8. การส่องสว่างไม่สม่ำเสมอของภาพ (Unequal Illumination)

<u>ความคลาดทรงกลม</u> (Spherical aberration)

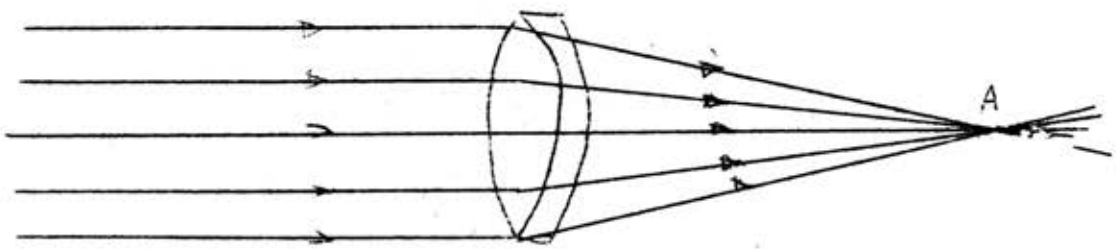
ในการตรวจสอบภาพของวัตถุที่อยู่ไกลที่หักเหผ่านเลนซ์ ที่มีรูรับแสงเปิดกว้าง ก็มีพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้น แต่จากรูป (1.7) จะเห็นว่าแสงขนานกับแกนไปพบกันที่จุดโฟคัสด้วยมุมตกที่ใหญ่เมื่อแสงออกจากขอบเลนซ์ และทำมุมเล็กเมื่อแสงตกออกจากบริเวณกลาง ๆ เลนซ์ ซึ่งความบกพร่องนี้เรียกว่าความคลาดทรงกลม การที่ทางยาวโฟคัสเปลี่ยน เนื่องจากแสงตกผ่านกลางและขอบเลนซ์เช่นนี้ ถ้าเป็นเลนซ์ที่ไม่ได้แก้ความคลาด อาจจะสังเกตได้ง่าย โดยการให้ภาพที่เกิดจากแสงตกเกือบกลางเลนซ์ โดยให้ผ่านช่องปรับแสงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่เปิดประมาณ $\frac{1}{3}$ ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนซ์ และให้ภาพที่เกิดจากแสงตกตรงขอบเลนซ์ โดยใช้แผ่นวงกลมบังตรงกลางเลนซ์ไว้ประมาณ $\frac{2}{3}$ ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนซ์ จะเห็นว่าต้องเลื่อนฉากเข้ามาใกล้เลนซ์ยิ่งขึ้น การแก้ไขโดยมาก



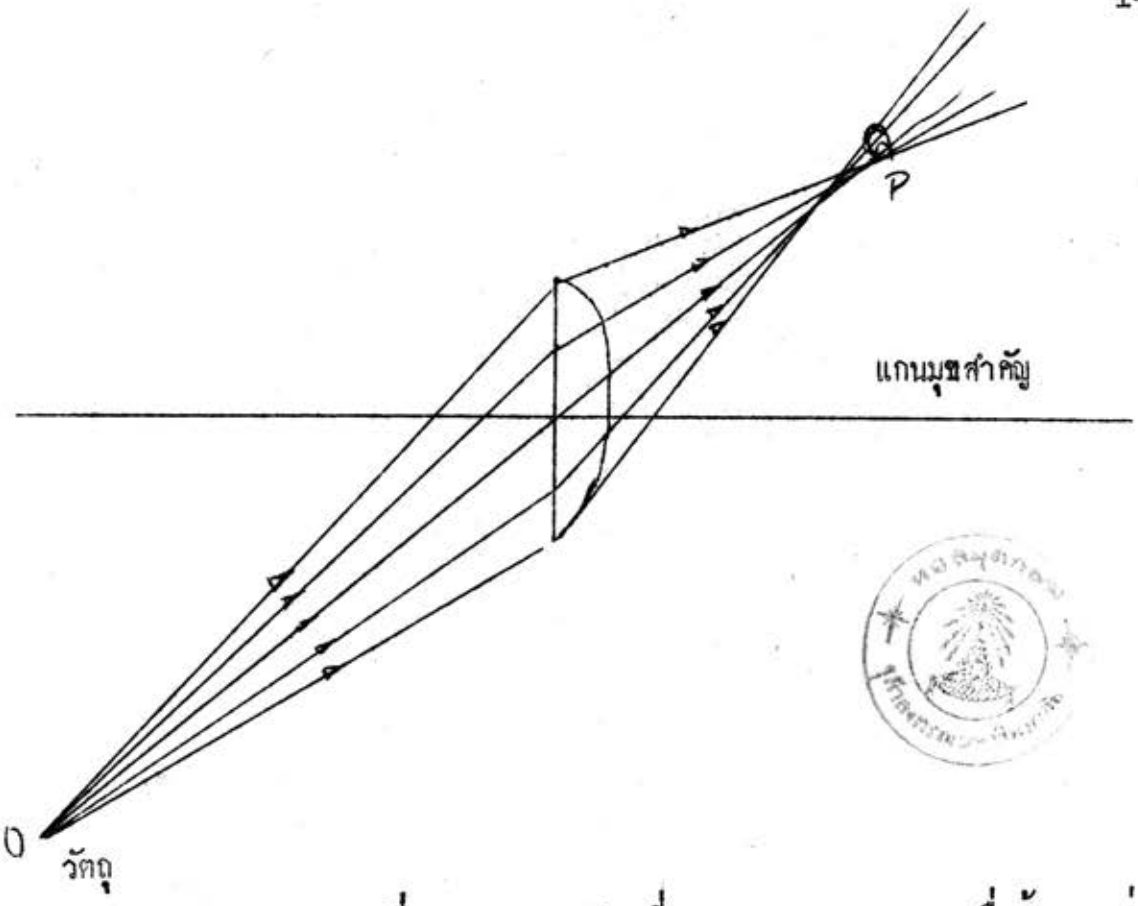
ความคลาดทรงกลม



การแก้ไขโดยให้แสงตกกลางเลนซ์อย่างเดียว



รูปที่ 1.7 ภาพการเกิดความคลาดทรงกลมและการแก้ไข



รูปที่ 1.8 การหักเหที่ขาด Symmetry เมื่อต้นแสงอยู่นอกแกน ได้ภาพคล้ายรูปดาวหาง

รูป 1.9 ภาพเมื่อวัตถุอยู่นอกแกนเกิดความคลาดเป็นรูปรีของดาว เป็นภาพถ่ายจากหนังสือ Light Principle and Experimental by George S. Monk

ในกล้องราคาถูกที่ใช้เลนซ์เดียว (single lens) มักใช้ช่องปรับแสง ให้แสงผ่านแต่ตรงกลางเลนซ์ กำจัดภาพไม่ชัด (out of focus) เมื่อแสงตกตรงขอบเลนซ์ออก แต่การทำเช่นนี้ ไม่สดวกสำหรับ กล้องที่ใช้ความเร็วสูง (High speed lens) ซึ่งต้องเปิดหน้ากล้องกว้าง ในกรณีเช่นนี้ ต้องเลือกรัศมีความโค้งของเลนซ์ให้เหมาะ ก็อาจจะช่วยได้บ้าง หรืออาจใช้เลนซ์เว้าและเลนซ์นูนประกอบกัน เพื่อหักล้างการหักเหของแสงที่ไปโฟคัสต่างจุดกัน

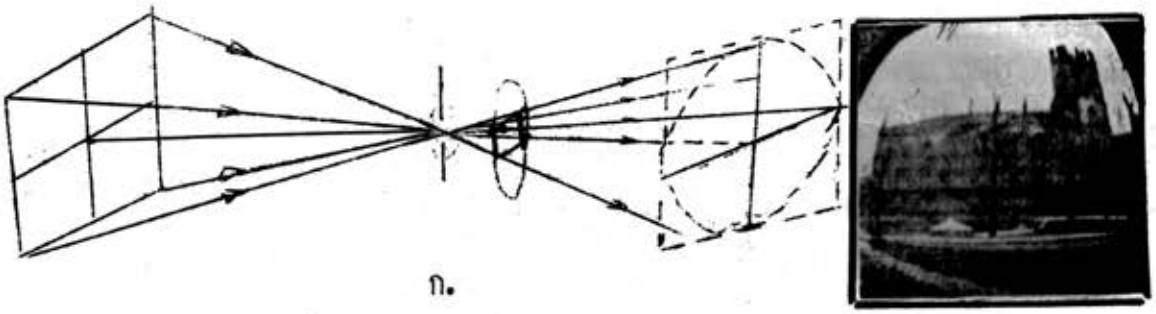
<u>ความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน</u> (Coma)

เกิดเมื่อวัตถุหรือต้นแสงอยู่นอกแกน (Optical axis) รูปที่ (1.8) แสงจากวัตถุที่อยู่นอกแกนจะหักเหผ่านเลนซ์ด้วยมุมต่าง ๆ กันในแถบ (zone) หรือส่วนหนึ่ง ๆ (section) ของเลนซ์ ภาพจะขาด สะสี (Symmetry) ในการหักเหและจะเกิดจุดพร่าขึ้น ในภาพดังรูป 1.9 รูปร่างของภาพที่พร่าจะมองดูคล้ายดาวหาง และเปลี่ยนรูปร่างที่ส่วนต่าง ๆ ของฉาก ซึ่งความบกพร่องนี้แลเห็นคอนข้างยาก นอกจากบางกรณี การแก้ไขโดยการใช้ช่องปรับแสงวางหน้าเลนซ์ แต่วิธีที่ดีกว่าก็คือเลือกเลนซ์ที่มีรูปร่างเหมาะ

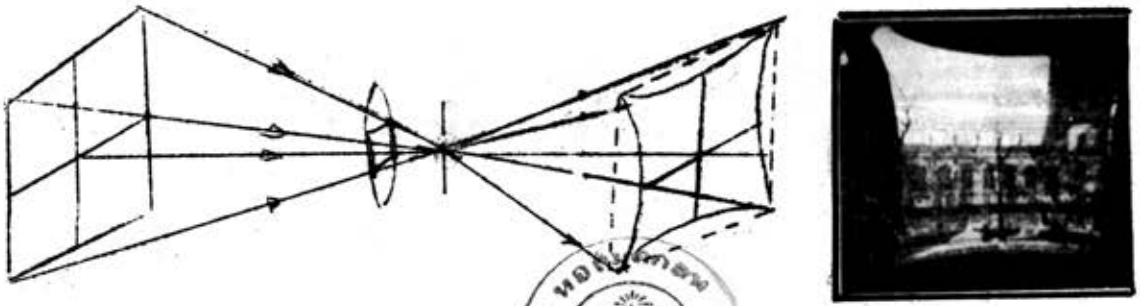
002080

<u>ความบิดเบี้ยว</u> (Distortion)

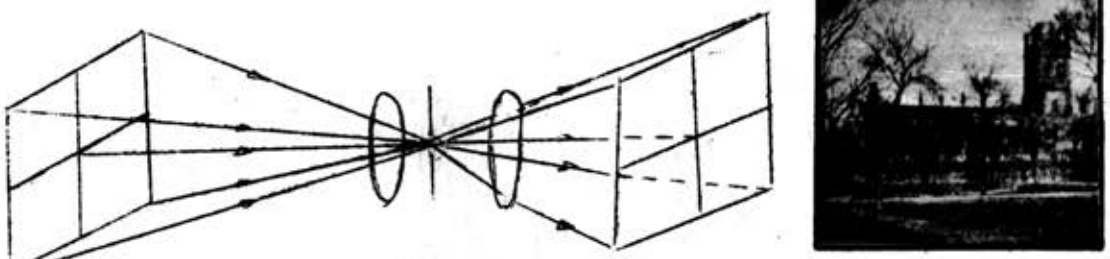
ความต้องการอีกอย่างหนึ่งของระบบทัศนะก็คือให้กำลังขยายคงที่ ถ้าไม่เป็นไปดังนี้จะเกิดความบิดเบี้ยวขึ้น การตรวจภาพของวัตถุที่ประกอบด้วยเส้นตรงเช่นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่จะต้องแลเห็นเหลี่ยมมุมอย่างชัดเจน จะเห็นภาพโค้งน้อย ๆ เนื่องจากกำลังขยายด้านความยาวไม่เท่ากัน ไม่เป็นสัดส่วนที่เหมาะ เมื่อวางช่องปรับแสงที่ข้างหน้าเลนซ์ แสงจากวัตถุที่อยู่ห่างไปจากแกนมากก็จะยิ่งโค้งมาก ฉะนั้นการออกแบบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่เป็นตัวทดสอบ (Test object) จะปรากฏบนฉากเป็นรูปถังเบียร์ (Barrel - shape) ดังรูป 1.10 ก. ถ้าเลื่อนช่องปรับแสงไปวางไว้ข้างหลังเลนซ์ แสงจากต้นแสงที่อยู่ห่างไปจากแกนมากกว่า จะเป็นสัดส่วนโค้งน้อยกว่าเมื่อวางไว้ใกล้แกน จุดที่ห่างจากแนวแกนจะมีกำลังขยายน้อยกว่า ฉะนั้นภาพสี่เหลี่ยมที่มีช่องปรับแสงอยู่ข้างหลังเลนซ์ จะเป็นแบบหมอน



ก.



ข.



ค.

รูปที่ 1.10 ก. stop วางข้างหน้าเลนซ์ทำให้เกิด barrel distortion

ข. stop วางข้างหลังเลนซ์ทำให้เกิด pincushion distortion

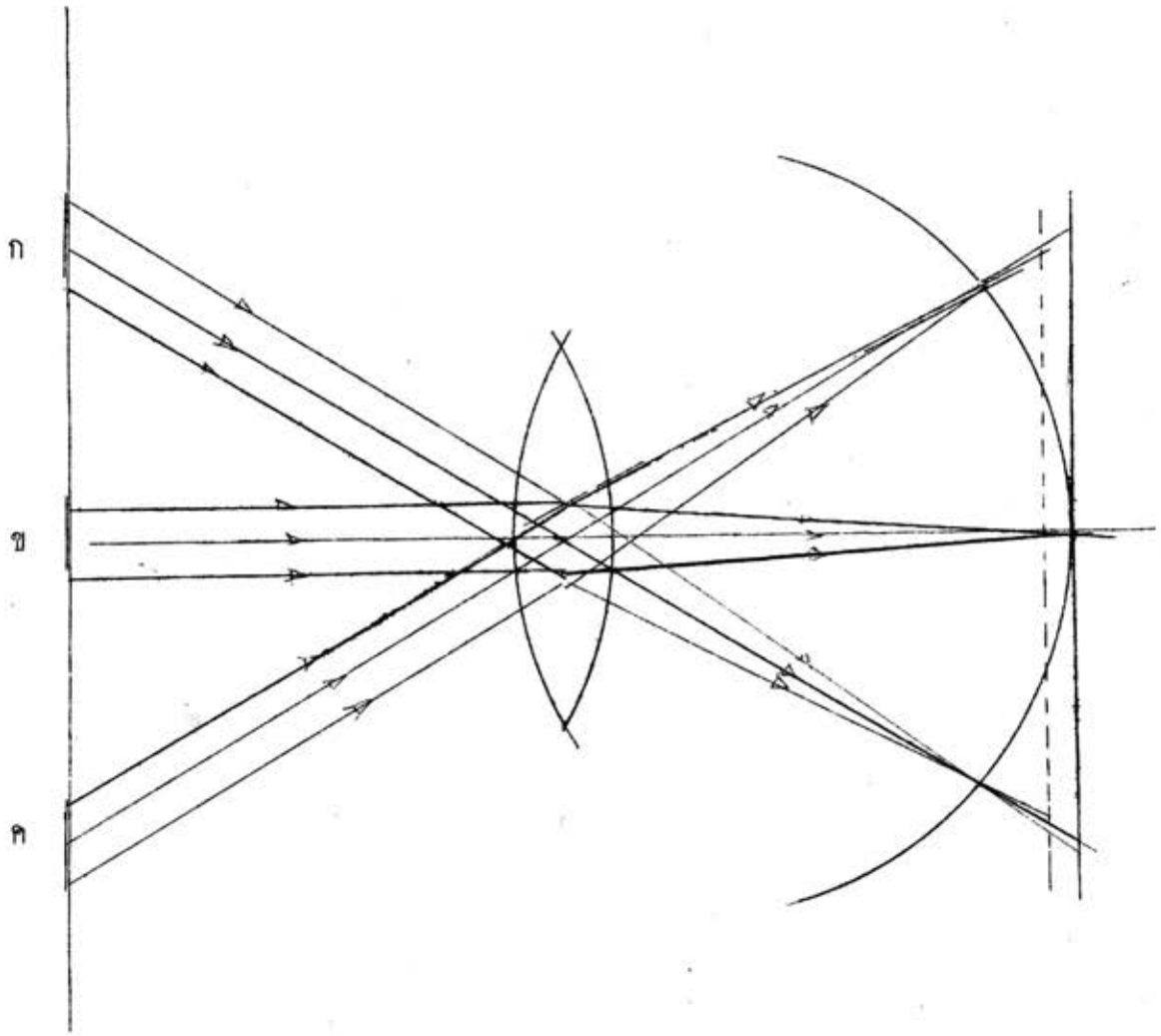
ค. ความคลาดแก้ไขแล้ว

เป็นภาพถ่ายจากหนังสือ Light Principle and Experimental by George S. Monk

ปักเข็ม (Pin-cushion distortion) ดังรูป 1.10ข ซึ่งทั้งสองอย่างนี้เนื่องจากตำแหน่งของช่องปรับแสง การแก้โดยการใช้ช่องปรับแสงวางระหว่างเลนซ์สองอันที่เหมือนกัน เพื่อให้ความคลาดเคลื่อนทางลบและทางบวกหักล้างกัน ฉะนั้นเลนซ์ชนิดนี้ (ทั้งคู่เหมือนกันวางห่างกันมีช่องปรับแสงคั่น) เรียก Rectilinear lens การวางเลนซ์หันหน้าไปทางใด ก็มีผลเช่นเดียวกับช่องปรับแสง ถ้าวางเลนซ์ราบ - นูน (Plano - Convex lens) ในทางด้านโค้งเข้าหาวัตถุ ภาพที่ได้จะมีความคลาดรูปหมอนปักเข็ม (Pin-cushion distortion) ถ้าวางด้านราบเข้าหาวัตถุก็จะมีความคลาดรูปถังเบียร์ (Barrel distortion) แต่ในการถ่ายภาพที่มีความคลาดรูปถังเบียร์ มักจะเห็นไม่ค่อยชัดเท่ามีความคลาดรูปหมอนปักเข็ม ฉะนั้นกล้องที่เป็นเลนซ์ราคาถูกจึงมักตั้งด้านโค้งน้อยเข้าหาวัตถุ

<u>ความคลาดโค้ง</u> (Curvature of image field)

เป็นความคลาดของเลนซ์อีกอย่างหนึ่งที่ตรวจพบโดยง่าย เมื่อแสงเบี่ยงเบนไปจากระนาบที่ควรจะเป็น การพิจารณาภาพที่มีวัตถุอยู่ในระยะไกลและไม่ได้อยู่ในแนวแกน รวมทั้งไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกันระยะภาพจากเลนซ์ สำหรับวัตถุที่ระยะใดนั้นจะเกือบเท่ากับระยะของทางยาวโฟคัส (ในกล้องถ่ายรูป) และขนาดของภาพที่ชัดเจนจะแทนโดยส่วนโค้งของวงกลมซึ่งจุดศูนย์กลาง คือจุดศูนย์กลางของเลนซ์ ดังรูป 1.11 จะเห็นโดยง่ายว่า พื้นผิวของภาพทั้ง 3 มิติ เป็นรูปกะทะความโค้งถือเป็นบวก (Positive curvature) ถ้าด้านที่เว้าของกะทะ อยู่ทางด้านเลนซ์ซึ่งเป็นกรณีของเลนซ์นูน เมื่อเป็นเลนซ์เว้าด้านที่นูนของภาพจะอยู่ใกล้เลนซ์ ในกรณีนี้เรียกว่าความโค้งเป็นลบ (Negative curvature) ตัวอย่างของความคลาดโค้งของภาพ อาจจะสังเกตเห็นได้โดยง่าย โดยการฉายภาพนิ่ง (Projecting slide image) ลงบนฉาก แม้ว่าจะเป็นเครื่องฉายชั้นดีก็อาจจะสังเกตุเห็นรอยขอบของภาพไม่ชัดไปบ้าง ถึงตรงจุดโฟคัสจะชัดเจนก็ตาม และจุดโฟคัสของแสงที่ตกตรงขอบเลนซ์ จะอยู่คนละระนาบจากจุดโฟคัสของแสงตกกลางเลนซ์ ซึ่งภาพจะชัดพอสมควร เมื่อเอาฉากรับระหว่างกลางของจุดโฟคัสทั้งสอง ถ้าเป็นเลนซ์อย่างชนิดราคาถูกก็จะมีขอบกพร่องข้อนี้มากขึ้น ข้อแก้ไข



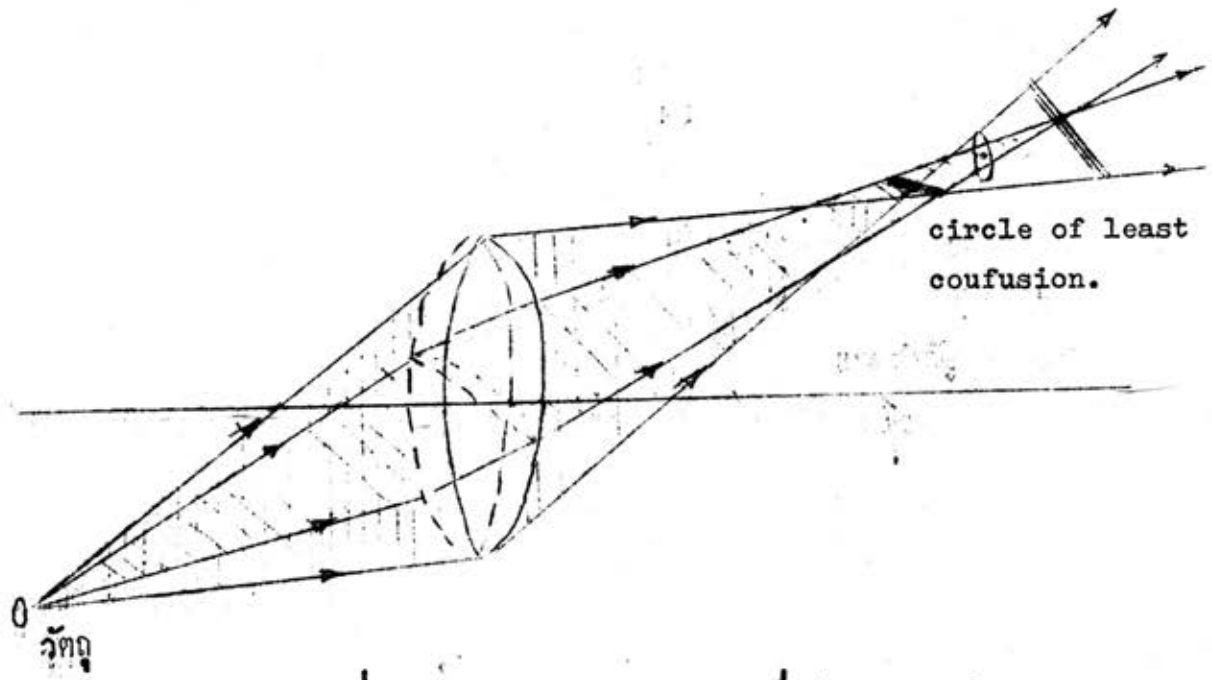
รูปที่ ๑.๑๑ ความโค้งของภาพ เมื่อวัตถุ ก, ข, ค อยู่ห่างไกลออกไประยะภาพจะเท่ากับทางยาวโฟกัสของเลนส์ ฟิล์มที่รับภาพควรโค้งเช่นประ

ทำโดยวางฉากไว้ระหว่างกลางของจุดโฟคัส ส่วนเลนซ์ชั้นดีมักจะแก้ไขแล้วโดยการใช้เลนซ์เว้าที่เหมาะประกอบกับเลนซ์นูน

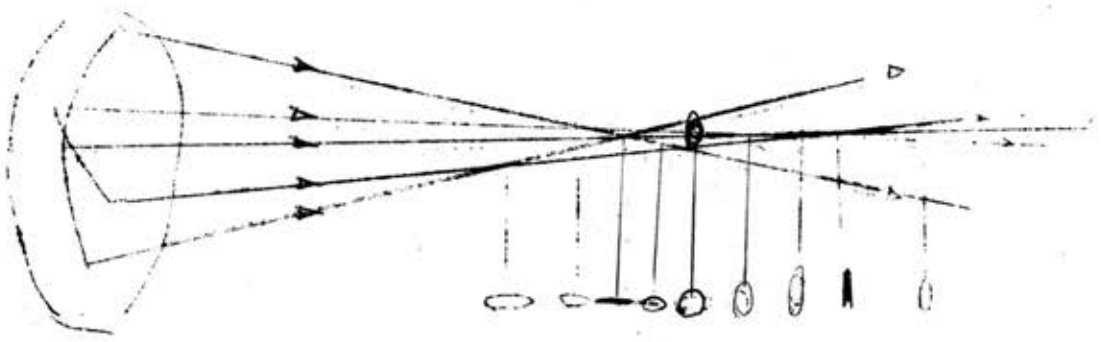
<u>แอสติคมาติซึม</u> (Astigmatism)

เมื่อวัตถุอยู่นอกแกนหรือในแกนก็ตาม ภาพที่เกิดจากวัตถุนี้ อาจโฟคัสเป็นสองระนาบตั้งได้ฉากซึ่งกัน ซึ่งเกิดดังนี้เพราะอำนาจการรวมแสงของแต่ละระนาบของเลนซ์ไม่เท่ากัน เห็นว่าแสงที่อยู่ในระนาบหน้ากระดาษ (เรียก Meridian plane หรือ tangential plane) และตั้งได้ฉากกับระนาบศูนย์สูตร (Equatorial plane หรือ sagitial plane) ผิวคลื่นที่เป็นรูปทรงกลมออกจากวัตถุนอกแกนจะขาดสมตรี (Symmetry) ผลก็คือแสงที่มาในระนาบศูนย์สูตร จะลู่ไปโฟคัสที่ I_1 ซึ่งอยู่ในระนาบหน้ากระดาษ ส่วนอีกระนาบจะไปโฟคัสที่ I_2 ระยะระหว่างภาพทั้งสองนี้เป็นค่าความต่างของจุดโฟคัสของทั้งสองแกน (Stigmatic difference) ซึ่งแปรตามวัตถุที่อยู่นอกแกนและจะกลายเป็นศูนย์เมื่อจุดอยู่บนแนวแกน ซึ่งภาพทั้งสองจะมาโฟคัสที่จุดเดียวกัน ถ้าหากวัตถุไม่เป็นจุดภาพที่ได้จะมีรูปร่างไปคนละแนว แต่มีจุดร่วมกันที่บนแกน และภาพที่อยู่ตรงกลางของระนาบทั้งสองเรียกวงกลมที่สับสนน้อยที่สุด (Circle of Least confusion)

แอสติคมาติซึม มักจะมีความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน (Coma) และความคลาดโค้ง (Curvature) ร่วมกันเป็นการยากที่จะกำจัด นอกจากจะใช้แก้วหลายชนิดที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ กัน อีกวิธีคือ ในกล้องบอกซ์วางช่องปรับแสงไว้หน้าเลนซ์รูปเดียว (Meniscus lens) ให้พื้นเว้าของเลนซ์หันไปทางวัตถุและวางฟิล์มไว้ระหว่างที่ภาพทั้งสองจะเกิดขึ้น ซึ่งการทำดังนี้ผลของมันทำให้บริเวณที่เกิดภาพเป็นพื้นราบ (Flat field) ทั้งความเอียงและความคลาดโค้ง อาจจะลดลงไปได้โดยใช้เลนซ์สองอันประกอบกัน มีทางยาวโฟคัสเท่ากันเป็นเลนซ์นูนและเลนซ์เว้า ถ้าวางติดกันก็จะไม่มีภาพ แต่ถ้าวางห่างกันเป็นระยะน้อยกว่าทางยาวโฟคัส จะได้ภาพจริง ไม่มีความคลาดและเป็นภาพราบ (Flat field) เลนซ์ชนิดใหม่ประกอบด้วยเลนซ์ 3 - 6 อัน วางห่างกัน คำว่า "Anastigmat" บนเลนซ์ถ่ายรูปแสดงว่าได้



รูปที่ 1.12 แสดงทางเดินของแสงเมื่อมีแอสติคมาติซึม



รูปที่ 1.13 แสงไปโฟคัสที่วงกลมที่สับสนน้อยที่สุด

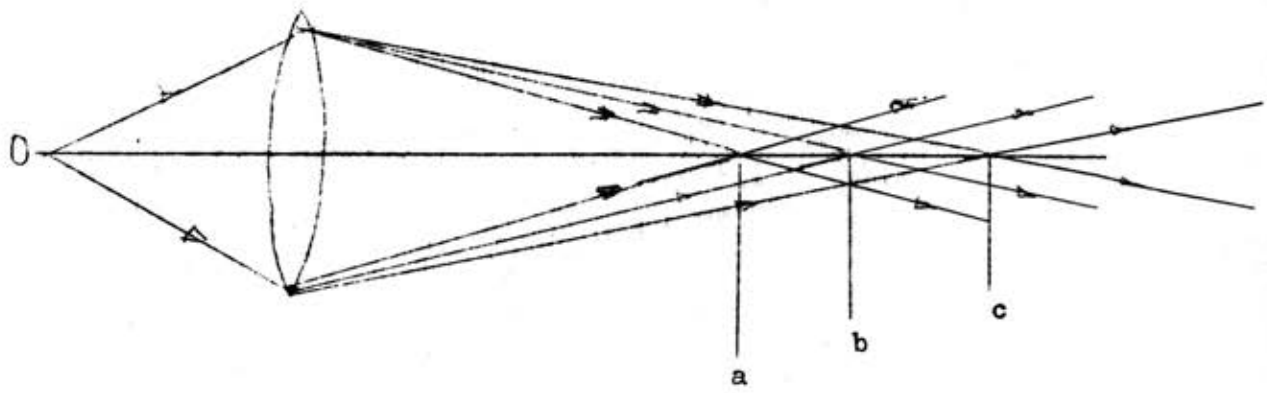
แก้ไขแอสติมาทิซึม ความคลาดโค้ง ความคลาดทรงกลม ความบิดเบี้ยว รวมทั้งความคลาดสี แล้ว

<u>ความคลาดสี</u> (Chromatic aberration)

คลื่นแสงที่ใช้ในระบบทัศนะมักคิดว่าเป็นแสงสีเดียว แต่ถ้าหากแสงมีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน เข้ามาก็จะมีความคลาดสี แต่ความคลาดสีมักจะแก้เพียงระยะช่วงคลื่นหนึ่ง ๆ

จากสมการ $$\frac{1}{f_1} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$$

แสดงว่าทางยาวโฟคัสของเลนซ์ใด ๆ มีค่าขึ้นกับดัชนีหักเหของแก้ว และดัชนีหักเหของแก้วก็ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น ทางยาวโฟคัสก็ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น เช่น แสงขาวจากจุดต้นแสง ดังรูป (1.13) จะหักเหออกไป โฟคัสตามความยาวคลื่น แสงสีน้ำเงินโฟคัสที่ a แสงเหลืองเขียวที่ b สีแดงที่ c ถ้าหากวางฉากที่ภาพจะเป็นวงล้อมรอบด้วยวงม่วง เนื่องจากเป็นวงของคลื่นผสมของแสงสีแดงและสีน้ำเงิน ความคลาดสีนี้ โดยปกติวัดด้วยความต่างของจุดโฟคัสของแสงสีแดง และแสงสีน้ำเงิน หรือที่ C line และF line ของไฮโดรเจน (Hydrogen) เพราะว่าเส้นเหล่านี้อยู่เกือบปลายสุดของแสงที่เรามองเห็น (visible spectrum) ค่าความคลาดเป็นบวกเมื่อ C line มาโฟคัสอยู่ทางขวาของสีน้ำเงินหรือ F - line คือโฟคัสของแสงสีน้ำเงินอยู่ใกล้เลนซ์มากกว่า อันนี้เป็นชนิดของความคลาดที่เกิดกับเลนซ์เดี่ยว เลนซ์ที่มีความคลาดดังนี้เรียกว่า ความคลาดสีเป็นข้อเสียอย่างหนึ่งของเลนซ์ ซึ่งอาจจะแก้ไขโดยใช้เลนซ์ประกบกันเช่นในเลนซ์ใกล้วัตถุของกล้องโทรทัศน์ (Telescope objective) เมื่อเลนซ์ใด ๆ ที่แก้ความคลาดสีแล้ว แสงทั้งสองช่วงคลื่นจะตัดแกนที่จุดเดียวกันทั้งเส้น C และเส้น F ของไฮโดรเจน (Hydrogen) ในกรณีนี้ช่วงคลื่นอื่นยังคงโฟคัสที่ระนาบอื่น ทำให้เกิดความคลาดขึ้นที่เรียกว่าสีหรือสเปคตรัมทุติยภูมิ (Secondary color หรือ Secondary spectrum) อย่างไรก็ตามในการแก้ความคลาดสีนี้ จำเป็นต้องคำนวณทางยาวโฟคัสของเลนซ์ที่จะประกอบให้



รูปที่ 1.13 แสดงความคลาดสี

แน่นอน ว่าควรจะใช้เท่าใด ถึงจะไม่เกิดความคลาดขึ้น ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{1}{f} = (\mu - 1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) \qquad \text{.....(1)}$$

diff ① $\delta\left(\frac{1}{f}\right) = \delta\mu \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$

จาก (1) $\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{1}{f(\mu - 1)}$

$$\delta\left(\frac{1}{f}\right) = \frac{\delta\mu}{f(\mu - 1)} = \frac{1}{f} \times \frac{(\delta\mu)}{(\mu - 1)}$$

เมื่อ $\frac{\delta\mu}{\mu - 1}$ คือ Dispersive power $= \nu$

$$\nu = \frac{\delta\mu}{\mu - 1}$$

เมื่อ $\delta\mu = \mu_B - \mu_R$

$$\mu = \frac{\mu_D + \mu_R}{2}$$

$$\therefore \delta\left(\frac{1}{f}\right) = \frac{\nu}{f}$$

เมื่อเป็นเลนซ์ผสมประกบกัน

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \qquad \text{.....(2)}$$

f_1 = ทางยาวโฟคัสของแก้วคราวน์

f_2 = ทางยาวโฟคัสของแก้วฟลินท์

diff (2) $\delta\left(\frac{1}{F}\right) = \delta\left(\frac{1}{f_1}\right) + \delta\left(\frac{1}{f_2}\right)$

$$\delta\left(\frac{1}{F}\right) = \frac{\nu_1}{f_1} + \frac{\nu_1}{f_2} \qquad \text{.....(3)}$$

การส่องสว่างที่ไม่สม่ำเสมอของภาพ (Unequal Illumination)

ภาพจะชัดเจนที่ตรงกลางและมัวลงที่ริมภาพ แม้ว่าแสงจะสท้อนจากทุกส่วนของวัตถุที่มีความเข้มอย่างสม่ำเสมอ การที่ความเข้มแสงไม่สม่ำเสมอ ในภาพถ่ายเนื่องมาจากเหตุ 3 ประการ คือ

1. ขนาดของรูรับแสงที่เปิด แสงที่มาจากด้านข้าง ๆ จะไม่ตกระทบเต็มที่ นอกจากแสงที่ขนานกับแกน
2. ทางยาวโฟคัสของแสงตกขอบเลนซ์ ยาวกว่าแสงที่ตกที่ตรงกลางผลอันนี้ จะทำให้ความเข้มแสงจากตรงกลางไปถึงขอบภาพลดลง เพราะว่าความเข้มแสงที่ได้รับแปรกลับกับระยะทางกำลังสอง
3. แสงตกที่ขอบเลนซ์ที่ไปถึงภาพ ทำมุมกว้างมากเกินไป ทำให้ลดความเข้มแสงที่ตกลงต่อหน่วยพื้นที่

สำหรับการถ่ายภาพที่มีมุมถึง 50° ความเข้มแสงบนขอบของภาพจะมีเพียง 70 เปอร์เซนต์ ของความเข้มแสงที่ตรงกลางภาพ เพราะว่าความเข้มแสงที่ไปถึงขอบภาพน้อยกว่าตรงกลางภาพ ภาพเมื่อเวลาอัดออกมาจะมีขอบดำไปเล็กน้อย เนื่องจากความเข้มแสงไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามเป็นความจริงที่สไลด์สีธรรมชาติ เมื่อนำไปฉายในกล้องฉายภาพขนาดเล็กจะทำให้ภาพออกมามีขอบสีดำเล็กน้อย เนื่องจากความเข้มแสงที่ตกไปถึงภาพไม่เท่ากัน

ถ้าต้องการไม่ให้มีความคลาด $\delta\left(\frac{1}{F}\right) = 0$

$$\therefore \frac{y_1}{f_1} + \frac{y_2}{f_2} = 0$$

$\therefore$ ในการสร้างเลนซ์อรงค์ (Achromatic lens) ใช้สูตรดังนี้

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{F}$$

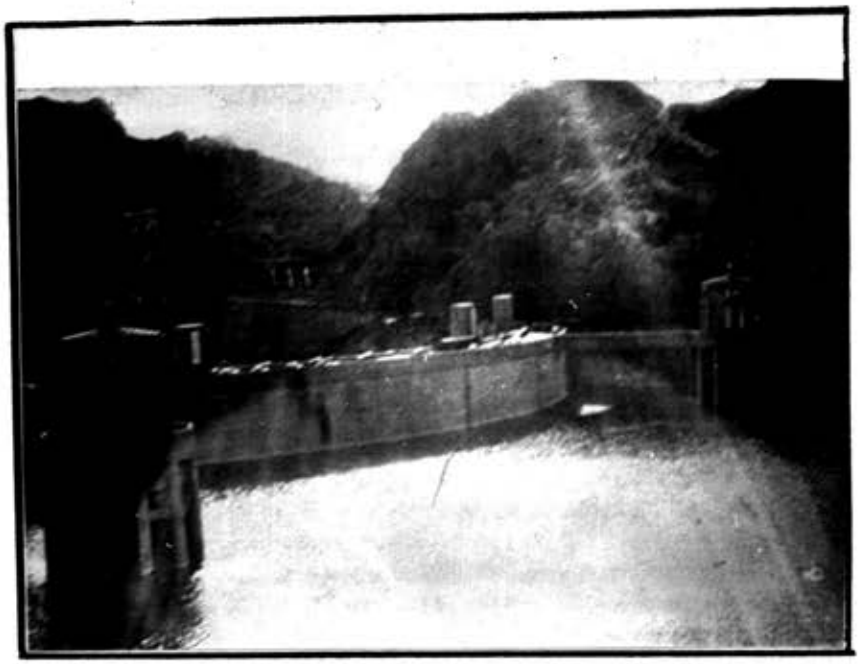
$$\frac{y_1}{f_1} + \frac{y_2}{f_2} = 0$$

$$\frac{1}{f} = (\mu - 1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$$

แสงพร่าและภาพซ้อนผิดปกติ (Flare and ghost image)

ลักษณะของแก้วพื้นเรียบมันโดยทั่วไป เมื่อแสงตกกระทบมันจะสท้อนไป 4 - 6 เปอร์เซนต์ และเปอร์เซนต์ของแสงสท้อน จะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมตกเพิ่มขึ้น หมายความว่า ผิวหน้าของเลนซ์นูนจะสท้อนประมาณ 5 % และไม่ไปถึงจุดภาพ ส่วนผิวหลัง 5 % ของ 95 % ที่ได้รับจะสท้อนสู่ผิวแรก ในการสท้อนกลับประมาณ $\frac{1}{20}$ ของ 1 % ของแสงตกเดิมในรูปของแสงพร่า (flare) ไปยังฟิล์ม ซึ่งแสงพร่า (flare) หรือแสงกระจัดกระจาย (Diffused light) นี้ไม่ทำให้ภาพดีขึ้นเลย ดังรูป 1.14 แต่จะทำให้ภาพได้รับแสงไม่สม่ำเสมอเกิดเป็นหมอกมัว (Fogging effect) จำนวนที่เพิ่มขึ้นของผิวอากาส อาจจะเกิดการสท้อนกลับไปมาหลายครั้ง ตามหลักของแสงโดยเฉพาะเมื่อต้นแสงอยู่ในแนวแกนจะสท้อนเป็นภาพของรูรับแสงที่เปิดไว้จุดพร่านี้มักจะรบกวนและทำให้ภาพเสียความงดงามไป ในการถ่ายภาพซึ่งบางทีอาจจะถ่ายตรงต้นแสง ต้องระวังอย่างมากไม่ให้เกิดจุดพร่าขึ้น

การสะท้อนกลับไปมาของแสงเมื่อผ่านผิวหน้าและผิวหลังของเลนซ์นูนนั้น ทำให้เกิดภาพซ้อนผิดปกติขึ้น



รูปที่ 1.14 แสดงถึงภาพที่เงา, แสงพร่า และได้รับแสงไม่สม่ำเสมอ
เป็นภาพถ่ายจากหนังสือ Fundamental of Photography by Paul E. Bouche