บทที่ 2

ทฤษฎีของความคลาด

1. ความคลาดของระบบทัศนศาสตร์ (4)

เมื่อแสงสีเดียวจากแหล่งกำเนิดที่เป็นจุดผ่านระบบทัศนศาสตร์ไปตัดกัน ได้ภาพเป็นจุดแบบเดียวกับแหล่งกำเนิด ระบบทัศนศาสตร์นั้นเป็นระบบที่สมบูรณ์ที่สุด ระบบทัศนศาสตร์ชนิดนี้จะมีได้ในอุดมคติเท่านั้น ในทางปฏิบัติแล้ว จะไม่มีทัศนอุปกรณ์ใดที่จะให้ภาพที่สมบูรณ์เช่นนี้ได้ ส่วนมากภาพที่ได้จะพร่ามัวหรือเบี่ยงเบนไปบ้างเล็กน้อย เนื่องจากว่าแสงจากวัตถุที่เป็นจุดเมื่อผ่านระบบทัศนศาสตร์แล้วไม่สามารถไปรวมกันให้ภาพเป็นจุดเช่นเดียวกับวัตถุได้ หรืออีกนัยหนึ่งหน้าคลื่นของภาพที่เป็นจุดนั้นไม่เป็นทรงกลม ความไม่สมบูรณ์ของภาพเหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากระบบทัศนศาสตร์มีความบกพร่องอยู่ในตัวมันเอง เรียกความบกพร่องนี้ว่า ความคลาด (aberration) ของระบบทัศนศาสตร์

ความคลาดของระบบทัศนศาสตร์แบ่งได้ 2 แบบคือ

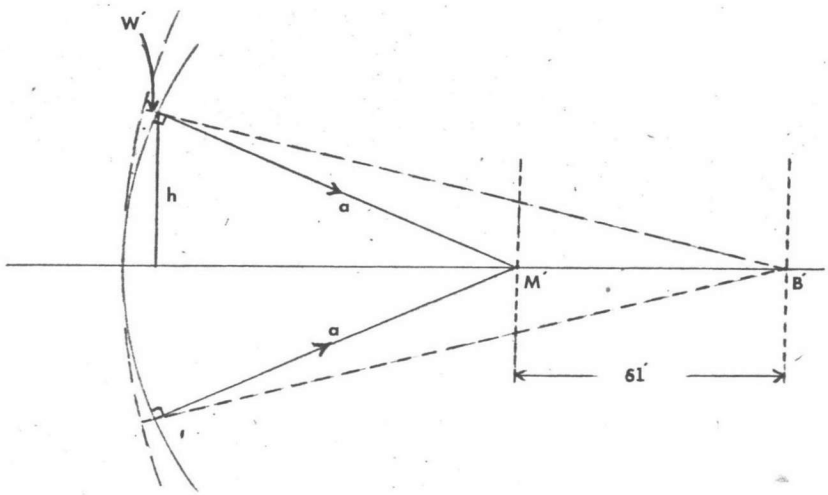
1. ความคลาดเชิงรังสี (ray aberration) เป็นการหาความคลาดของระบบทัศนศาสตร์โดยพิจารณาจากรังสี

2. ความคลาดเชิงหน้าคลื่น (wavefront aberration) เป็นการหาความคลาดของระบบทัศนศาสตร์โดยพิจารณาจากหน้าคลื่น

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในงานที่เกี่ยวกับการคำนวณออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของเลนส์หน้ากล้องของกล้องโทรทรรศน์แบบเลนส์เดี่ยว ใช้วิธีการพิจารณาหาความคลาดแบบความคลาดเชิงหน้าคลื่น โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะกำจัดความคลาดให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ความคลาดเชิงหน้าคลื่นนี้ เป็นการเบี่ยงเบนไปของหน้าคลื่นที่ให้ภาพเทียบกับหน้าคลื่นทรงกลมในอุดมคติ (ideal spherical wavefront) โดยวัดตามแนวที่ตั้งฉากกับหน้าคลื่น

ในอุดมคติ ถ้าหน้าคลื่นที่เบี่ยงเบนอยู่ข้างหน้าของหน้าคลื่นในอุดมคติในแนวของรังสี ค่าความคลาดหน้าคลื่นจะมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 2.1 ความคลาดเชิงรังสีและความคลาดเชิงหน้าคลื่น

ในรูปที่ 2.1 เส้นโค้งประ เป็น หน้าคลื่นของคลื่นทรงกลมในอุดมคติ

เส้นโค้งหนัก เป็น หน้าคลื่นของคลื่นที่เบี่ยงเบนไป เนื่องจากความคลาดของระบบ

M´ เป็น ตำแหน่งภาพที่เกิดจากการตัดกันของรังสี a เมื่อระบบทัศนศาสตร์มีความคลาด

B´ เป็น ตำแหน่งที่เกิดภาพเมื่อระบบทัศนศาสตร์ไม่มีความคลาด หรือคือจุดศูนย์กลางของเส้นโค้งประนั่นเอง

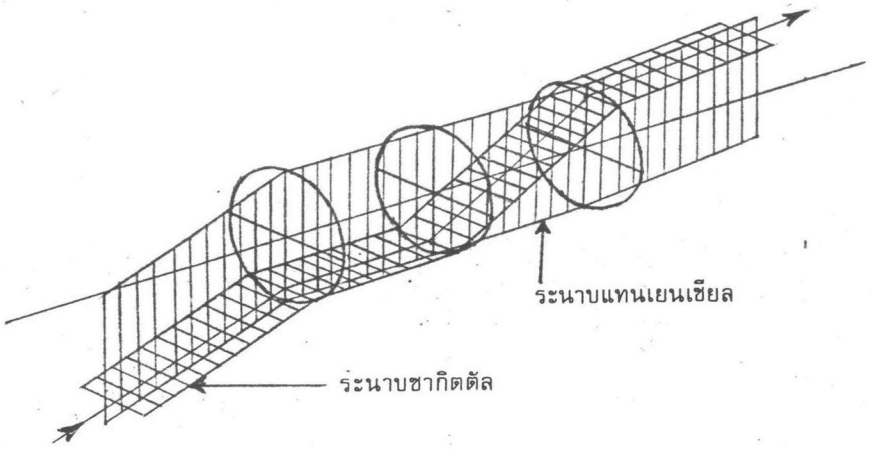
W´ เป็น ความคลาดหน้าคลื่นของระบบทัศนศาสตร์ เมื่อรังสีที่พิจารณาสูงจากแกน = h มีค่าเป็นบวก

δl´ เป็น ความคลาดรังสีของระบบทัศนศาสตร์ในขณะนี้ มีค่าเป็นบวก

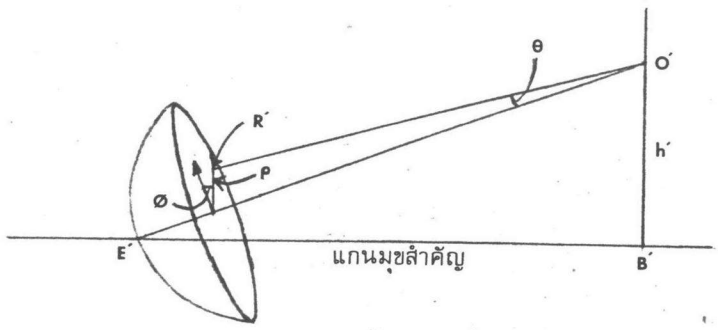
ถ้าวัตถุเป็นจุดอยู่บนแกนมุขสำคัญ ความคลาดเชิงหน้าคลื่นที่ตำแหน่งใด ๆ บนหน้าคลื่นจะขึ้นอยู่กับขนาดของช่องเปิดของระบบทัศนศาสตร์ แต่ถ้าวัตถุอยู่นอกแกนมุขสำคัญ ความคลาดจะขึ้นกับตำแหน่งของวัตถุ ขนาดของช่องเปิดของระบบทัศนศาสตร์และความไม่สมมาตรรอบรังสีมุขสำคัญ (principal ray) ซึ่งเป็นรังสีที่ผ่านจุดศูนย์กลางของช่องแสงเข้า (entrance pupil) เพื่อความสะดวกในการอธิบายเกี่ยวกับความคลาดของระบบทัศนศาสตร์ จำเป็นที่จะต้องกล่าวถึงระนาบ 2 ระนาบ ดังรูปที่ 2.2 คือ

1. ระนาบแทนเยนเชียล (tangential plane) เป็นระนาบที่ประกอบด้วยแกนมุขสำคัญ และรังสีมุขสำคัญจากวัตถุ

2. ระนาบซากิตตัล (sagittal plane) เป็นระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบแทนเยนเชียล โดยที่ระนาบนี้จะอยู่ในแนวรังสีมุขสำคัญที่ลากจากวัตถุไป



รูปที่ 2.2 ระนาบแทนเยนเชียลและระนาบซากิตตัล



รูปที่ 2.3 คลื่นในบริเวณด้านภาพ

ในรูปที่ 2.3 E´ เป็น จุดศูนย์กลางของช่องแสงออก (exit pupil)

Ó เป็น ตำแหน่งภาพ

h´ เป็น ระยะที่ภาพอยู่สูงจากแกนมุขสำคัญ

ρ เป็น รัศมีของช่องเปิด

E´BÓ เป็น ระนาบแทนเยนเซียล

R´ เป็น จุดที่อยู่นอกระนาบแทนเยนเซียล

ø เป็น มุมที่ R´ ทำกับระนาบแทนเยนเซียล

ความคลาดเชิงหน้าคลื่นของรังสีที่ผ่านจุด R´ จะขึ้นกับขนาดของช่องเปิดและมุม ø เพื่อความสะดวกในการคำนวณ จะแทนที่ตัวแปร ρ และ h´ ด้วยค่า r และ σ โดยนิยามให้ว่า

$$r = \frac{\rho}{\rho_{max}} , \qquad \sigma = \frac{h'}{h'_{max}} \qquad (2.1)$$

ρ_{max} เป็น รัศมีของช่องแสงออก ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดของ ρ

h'_{max} เป็น ความสูงของภาพที่ได้จากรังสีนอกแกน วัดจากแกนมุขสำคัญถึงขอบของภาพที่สูงสุด

สำหรับรังสีหนึ่ง ๆ ในลำแสงที่ผ่านระบบ r จะคงที่ตลอดเวลา แต่ ρ จะเปลี่ยนไป เนื่องจากขนาดของลำแสงอาจขยายหรือลดโดยระบบ ทำนองเดียวกับรังสีจากจุดวัตถุนอกแกนจุดหนึ่ง จะให้ค่า σ คงที่ตลอดระบบ ในขณะที่แต่ละระนาบทางด้านภาพนั้นจะมีค่า h' ต่างกัน ดังนั้น W' ขึ้นกับ σ, r และ ϕ $W'(\sigma, r, \phi)$ จึงเป็นฟังก์ชันของความคลาด (aberration function) ค่าสัมประสิทธิ์ของความคลาด (aberration coefficient) นิยมเขียนในรูป ${}_{\alpha}W_{\beta\gamma}$ ในเมื่อ

α เป็น ตัวเลขยกกำลังของ σ

β เป็น ตัวเลขยกกำลังของ r

γ เป็น ตัวเลขยกกำลังของ ϕ

ตัวอย่างเช่น ${}_{3}W_{11}\sigma^{3} r \cos\phi$ ตัวเลขยกกำลังของ σ คือ 3 α จึงมีค่าเป็น 3 ส่วนตัวเลขยกกำลังของ r และ $\cos\phi$ เป็น 1 ดังนั้น β และ γ จึงมีค่าเป็น 1 ตามลำดับ

การหา $W'(\sigma, r, \phi)$ สำหรับระบบที่ง่ายที่สุดจะหาได้โดยพิจารณาถึงความสมมาตรเพื่อนำไปสู่ฟอร์มทั่วไปของฟังก์ชันของความคลาด ในกรณีที่ฟังก์ชันไม่มีค่า ϕ จะมีความสมมาตรรอบรังสีมุขสำคัญและรอบแกนมุขสำคัญ ทำให้ W' เป็นฟังก์ชันคู่ของ σ และ r นั่นก็คือ ในฟอร์มทั่วไปของฟังก์ชันเทอมซึ่งไม่มี ϕ จะต้องเป็นฟังก์ชันของ σ^2 และ/หรือ r^2 นอกจากนี้ถ้ามีความสมมาตรรอบระนาบแทนเยนเชียล ค่า W' จะยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้จะแทนค่า ϕ ด้วย $-\phi$ หรือจะแทนเทอมที่มี ϕ เกี่ยวข้องด้วย ด้วยฟังก์ชันของ $\cos\phi$ ถ้าหาก ϕ อยู่ใต้แกนมุขสำคัญด้วยระยะทาง h' ค่า W' สำหรับจุดที่คลองจองกับ R' ก็จะเท่ากับค่า W' สำหรับจุด R' เอง นั่นคือ W' จะไม่เปลี่ยน ถ้า r คงที่ และ ϕ จะเปลี่ยนเป็น $\pi \pm \phi$ ในขณะที่เครื่องหมาย σ เปลี่ยน ในทางตรงข้าม

W' จะเปลี่ยน ถ้าเครื่องหมายของ r และ σ เปลี่ยน โดยให้ ϕ คงที่ หมายความว่าเทอมที่มี ϕ จะมี σ และ r ด้วย ซึ่งเงื่อนไขนี้จะใช้ได้ ถ้าเทอมเหล่านี้เป็นฟังก์ชันของ ($\sigma r \cos \phi$) ดังนั้น ฟังก์ชันของความคลาดจะมีตัวแปรในฟอร์ม σ^2, r^2, $\sigma r \cos \phi$ และสามารถเขียนในรูปของอนุกรมกำลังทั่วไป (general power series) ในเทอมของตัวแปรเหล่านี้ได้ว่า

$$W'(\sigma, r, \phi) = {}_0W_{00} + ({}_0W_{20}r^2 + {}_1W_{11}\sigma r \cos\phi + {}_2W_{00}\sigma^2) + ({}_0W_{40}r^4 + {}_1W_{31}\sigma r^3\cos\phi + {}_2W_{22}\sigma^2 r^2\cos^2\phi + {}_2W_{20}\sigma^2 r^2 + {}_3W_{11}\sigma^3 r\cos\phi + {}_4W_{00}\sigma^4) + \cdots\cdots \quad (2.2)$$

ซึ่งบางเทอมในสมการ (2.2) อาจตัดทิ้งได้ โดยพิจารณาดังต่อไปนี้

การเปลี่ยนค่าของรัศมีของคลื่นทรงกลมในอุดมคติ จะเป็นการเพิ่มความคลาดหน้าคลื่นที่คงที่ลงค่าหนึ่งบนแต่ละส่วนของคลื่น ถ้าหากเลือกเอาค่ารัศมีของทรงกลมที่จะให้ $W' = 0$ ในแนวทางรังสีมุขสำคัญ ซึ่งเป็นรังสีที่ผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด หรือนั่นก็คือขณะนี้ $r = 0$ ดังนั้น ทุกเทอมที่มีค่า r จะเป็นสูญหมด เหลือเพียงเทอม ${}_0W_{00}$, ${}_2W_{00}\sigma^2$, ${}_4W_{00}\sigma^4$, ... ซึ่ง W' จะเป็นสูญได้ต่อเมื่อ ${}_0W_{00} = {}_2W_{00}\sigma^2 = {}_4W_{00}\sigma^4 = \cdots = 0$ นั่นเอง

ดังนั้น สำหรับวัตถุที่อยู่บนแกนมุขสำคัญ ซึ่งจะให้ภาพบนแกนมุขสำคัญด้วย ซึ่งหมายถึง $h' = 0$ หรือ $\sigma = 0$ จะได้ว่า

$$W' = {}_0W_{20}r^2 + {}_0W_{40}r^4 + \cdots\cdots\cdots \quad (2.3)$$

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

เนื่องจากการเลื่อนไปของจุดโฟกัสในแนวนอน (longitudinal focal shift) จะทำให้เกิดความคลาดหน้าคลื่น ซึ่งเป็นปฏิภาคโดยตรงกับกำลังสองช่องเปิด ดังนั้น โดยการเลื่อนไปของจุดโฟกัสสามารถทำให้เทอม $_0W_{20}r^2$ หมดไปได้ การเลื่อนของจุดโฟกัสนี้จะทำให้ทุกจุดในสนามของการเห็นเลื่อนไป ดังนั้น เป็นแต่เพียงเลื่อนระนาบของภาพเท่านั้น โดยคุณภาพของภาพไม่เปลี่ยนไป ในทำนองเดียวกันเทอม $_0W_{11}\sigma r\cos\phi$ จะกำจัดได้โดยการเลื่อนโฟกัสในแนวดิ่ง (transverse focal shift) เพราะการเลื่อนจุดศูนย์กลางของทรงกลมอ้างอิงแบบนี้ จะทำให้เกิดความคลาดในเทอมที่เป็นปฏิภาคกับ ($r\cos\phi$) ซึ่งเทอมนี้จะกำจัดได้ทุก ๆ ความสูงของภาพ ในขณะที่เราเลื่อนจุดศูนย์กลางของทรงกลมอ้างอิงในแนวดิ่งในขนาดที่เป็นปฏิภาคกับ σ การเลื่อนจุดศูนย์กลางของทรงกลมอ้างอิงสำหรับวัตถุทุกจุดนั้น จะเป็นการเปลี่ยนขนาดของภาพ แต่จะไม่เปลี่ยนคุณภาพของภาพ ซึ่งจะเป็นเฉพาะการเปลี่ยนในค่าของกำลังขยายในบริเวณใกล้แกน ดังนั้น ขณะนี้เทอม $_0W_{20}r^2$ และ $_1W_{11}\sigma r\cos\phi$ จะไม่ใช่ความคลาด หรือความบกพร่องของภาพ แต่กำจัดออกไปได้โดยการเปลี่ยนค่าคงที่บางค่า ในบริเวณใกล้แกนของระบบ

ฟังก์ชั่นของความคลาดมีเทอมต่าง ๆ เหลืออยู่ ดังนี้

$$W'(\sigma,r,\phi) = {}_0W_{40}r^4 + {}_1W_{31}\sigma r^3\cos\phi + {}_2W_{22}\sigma^2r^2\cos^2\phi + {}_2W_{20}\sigma^2r^2 + {}_3W_{11}\sigma^3r\cos\phi + \cdots \quad (2.4)$$

เทอมต่าง ๆ ที่ให้นี้ จะมีผลรวมของกำลังของ σ และ r ไม่เกิน 4 เรียกว่าความคลาดปฐมภูมิ (primary aberration)

เทอม $_0W_{40}r^4$ แสดงถึงความคลาดทรงกลม (spherical aberration)

เทอม $_1W_{31}\sigma r^3\cos\phi$ แสดงถึงโคมา (coma)

เทอม $_2W_{22}\sigma^2r^2\cos^2\phi$ แสดงถึง แอสติกมาติซึม (astigmatism)

เทอม $_2W_{20}\sigma^2 r^2$ แสดงถึง ความคลาดโค้ง (field curvature)

เทอม $_3W_{11}\sigma^3 r\cos\phi$ แสดงถึง ความบิดเบี้ยว (distortion)

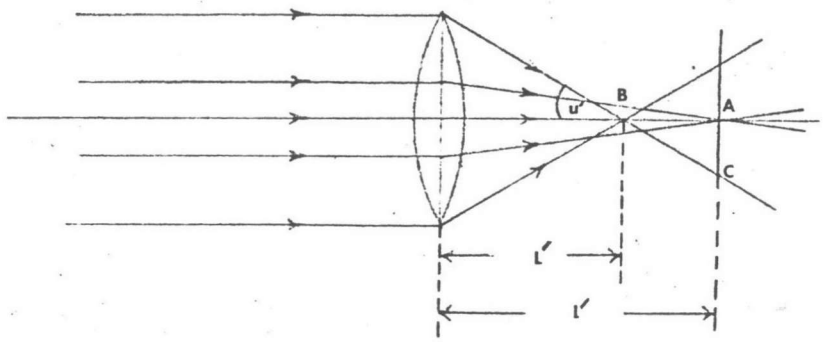
ความคลาดทั้ง 5 ชนิดนี้ เป็นความคลาดที่เกิดขึ้น เมื่อให้แสงสีเดียวผ่านเข้ามาในระบบทัศนศาสตร์ ดังนั้น จึงมักจะเรียกความคลาดทั้ง 5 ชนิดนั้นว่า ความคลาดเอกรงค์ (monochromatic aberration) แต่ถ้าให้แสงสีขาวผ่านเข้ามาในระบบ จะมีความคลาดเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งชนิดคือ ความคลาดรงค์(chromatic aberration)

ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการพิจารณาหาความคลาดของระบบทัศนศาสตร์แบบความคลาดเชิงหน้าคลื่น ซึ่งมีประโยชน์ในการนำผลไปใช้ในการคำนวณออกแบบรูปร่างเลนส์ แต่เพื่อความง่ายและสะดวกต่อการอธิบายถึงความคลาดแต่ละชนิด จะอธิบายในรูปของความคลาดรังสี ดังนั้น ต่อไปนี้จะเป็นการพิจารณาความคลาดแต่ละชนิดของระบบทัศนศาสตร์แบบความคลาดรังสี โดยถือว่า ความคลาดของระบบที่เกิดขึ้นแต่ละครั้ง จะเป็นความคลาดเพียงชนิดเดียวเท่านั้น

2. <u>ความคลาดทรงกลม</u>

พิจารณาเทอม $_0W_{40}r^4$ จะเห็นได้ว่า ไม่มีค่า σ อยู่ด้วย แสดงว่าความคลาดชนิดนี้เกิดเมื่อวัตถุอยู่บนแกนมุขสำคัญ และได้ภาพอยู่บนแกนมุขสำคัญเช่นกัน ดังนั้นเมื่อวางวัตถุที่เป็นจุดบนแกนมุขสำคัญ จะมีความคลาดทรงกลมเกิดขึ้นเพียงชนิดเดียวเท่านั้น ส่วนความคลาดอีก 4 ชนิด ที่เหลือนั้น จะเกิดเมื่อวัตถุอยู่นอกแกนมุขสำคัญ

เมื่อให้แสงขนานสีเดียวผ่านเลนส์บูนเดี่ยว ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความคลาดทรงกลม

จะเห็นว่า รังสีที่ตกตรงขอบเลนส์ กับรังสีที่ตกในบริเวณใกล้แกนไม่ไปรวมกันที่ตำแหน่งเดียวกัน แสงขนานที่ผ่านขอบเลนส์จะไปรวมกันที่จุด B ส่วนแสงขนานที่ผ่านบริเวณใกล้แกนจะไปรวมกันที่จุด A นั่นคือ จุดโฟกัสจะเปลี่ยนแปรไปตามขนาดของหน้ารับแสง กล่าวได้ว่าเลนส์มีความคลาดทรงกลม(2)

ระยะ AB เป็น ความคลาดทรงกลมตามแนวแกน = $(l' - L')$

ระยะ AC เป็น ความคลาดทรงกลมตามแนวดิ่ง = $(l' - L') \tan U'$

ในการคำนวณหาค่าความคลาดทรงกลมของระบบทัศนศาสตร์ ถ้าจุดตัดกันบนแกนมุขสำคัญของรังสีจากขอบเลนส์อยู่ทางซ้ายของจุดตัดกันบนแกนมุขสำคัญของรังสีใกล้แกน เรียกความคลาดทรงกลมแบบนี้ว่า ความคลาดแบบแก้ขาด (under-corrected) และถ้าจุดตัดกันของรังสีจากขอบเลนส์อยู่ทางขวาของจุดตัดกันของรังสีใกล้แกน เรียกความคลาดทรงกลมแบบนี้ว่า ความคลาดแบบแก้เกิน (over-corrected)

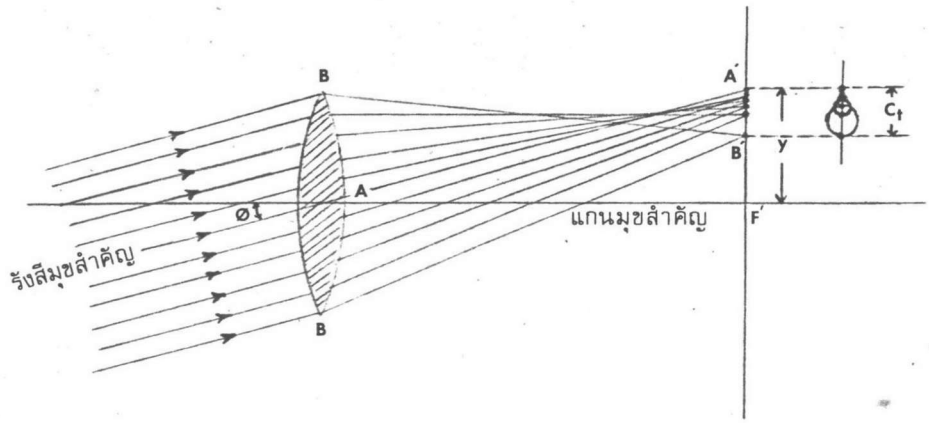
000659

ถ้าหน้ารับแสงและทางยาวโฟกัสของเลนส์เดี่ยวมีค่าคงที่ ค่าของความคลาดทรงกลมของเลนส์เดี่ยวนั้นจะขึ้นกับตำแหน่งของวัตถุ และรูปร่างของเลนส์ นั่นคือ เลนส์ที่มีทางยาวโฟกัสเท่ากัน แต่มีรูปร่างต่างกัน จะให้ค่าความคลาดทรงกลมที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการออกแบบรูปร่างของเลนส์ก็ใช้วิธีการเปลี่ยนแปรรูปร่างของเลนส์ (bending) เลือกเลนส์ที่มีรูปร่างที่ให้ความคลาดทรงกลมน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

3. โคมา

พิจารณาเทอม $W_{31}\sigma r^3\cos\phi$ จะเห็นว่า โคมาจะเกิดเมื่อวัตถุอยู่นอกแกนมุขสำคัญ แสงจากวัตถุที่อยู่นอกแกนจะหักเหผ่านเลนส์ในแต่ละแถบ (zone) กวยมุมต่างกัน ทำให้ได้ภาพที่ไม่สมมาตรกัน ถ้าวัตถุเป็นจุดอยู่นอกแกนมุขสำคัญ ภาพที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับดาวหาง ซึ่งชื่อโคมานี้ก็เป็นการตั้งจากที่ระบบทัศนศาสตร์ ให้ภาพออกมามีรูปร่างคล้ายกับดาวหาง ซึ่งเป็นรูปกรวย (conic shape)

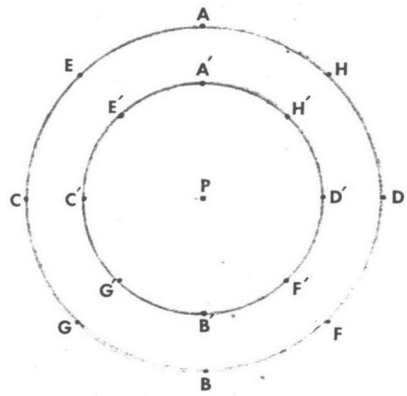
โคมา[2] เป็นความคลาดของระบบทัศนศาสตร์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากการแปรเปลี่ยนไปของกำลังขยายของระบบตามขนาดของช่องเปิดรับแสง นั่นคือ แต่ละรังสีเฉียง (oblique ray) ซึ่งเป็นรังสีที่เอียงทำมุมกับแกนมุขสำคัญ แต่ขนานกับรังสีมุขสำคัญ เมื่อผ่านเลนส์จะให้ภาพที่มีความสูงต่างกันกับภาพที่ได้จากรังสีที่ผ่านกลางเลนส์ ดังรูปที่ 2.5

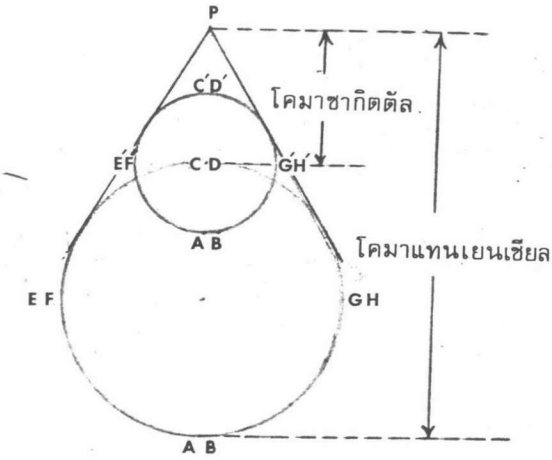


รูปที่ 2.5 การเกิดโคมาในระนาบแทนเยนเชียล

รังสีมุขสำคัญผ่านจุดกลางเลนส์ A ในระนาบแทนเยนเชียลไปเกิดภาพที่จุด A′ รังสีที่ผ่านขอบเลนส์ B จะไปรวมกันได้ภาพที่จุด B′ และรังสีที่ผ่านเลนส์ในช่วงระหว่างจุด A กับ B จะไปรวมกันในช่วง A′ B′ ภาพที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับรูปดาวหาง ซึ่งทั้งหมดนี้เกิดจากการที่แต่ละแถบของเลนส์มีกำลังขยายแตกต่างกัน โคมาจะมีเครื่องหมายเป็นบวก ถ้าบริเวณขอบเลนส์มีกำลังขยายสูงกว่าบริเวณกลางเลนส์ และจะมีเครื่องหมายเป็นลบเมื่อบริเวณขอบเลนส์มีกำลังขยายต่ำกว่าบริเวณกลางเลนส์

เมื่อให้ลำแสงจากวัตถุที่เป็นจุดอยู่นอกแกนมุขสำคัญตกลงบนเลนส์ที่มีโคมาเพียงอย่างเดียว จะเกิดภาพดังรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่แสงผ่านหน้ารับแสงของระบบทัศนศาสตร์กับตำแหน่งที่เกิดภาพคล้ายรูปดาวหาง โคมาที่แสดงในรูปที่ 2.6 (ข) จะมีค่าเป็นลบ (5)





รูปที่ 2.6 (ก)

รูปที่ 2.6 (ข)

รูปที่ 2.6 การเกิดโคมา

รูปที่ 2.6 (ก) แสดงถึงด้านหน้าของเลนส์ที่ทำหน้าที่เป็นหน้ารับแสง ให้ตัวอักษร A ถึง H เรียงเป็นวงกลมอยู่บนขอบเลนส์ และอักษร A´ ถึง H´ เรียงเป็นวงกลมวงในบนเลนส์ เมื่อให้ลำแสงจากวัตถุที่เป็นจุดผ่านเลนส์ จะได้ภาพคล้าย ๆ ดาวหาง ดังรูป 2.6 (ข) รังสีมุขสำคัญผ่านกลางเลนส์ที่จุด P จะไปเกิดภาพที่ตำแหน่ง P ตามรูปที่ 2.6 (ข) รังสีที่ผ่านจุด A และ B ซึ่งอยู่ในระนาบแทนเยนเชียล จะไปรวมกันที่จุด AB รังสีที่ผ่านจุด C และ D ซึ่งอยู่ในระนาบซากิตตัล จะไปรวมกันที่จุด CD รังสีที่ผ่านจุด E และ F จะไปรวมกันที่จุด EF รังสีที่ผ่านจุด G และ H จะไปรวมกันที่จุด GH และรังสีที่ผ่านวงกลมวงใน คือจุด A´ ถึง H´ ก็จะไปเกิดภาพเป็นวงกลมที่เล็กกว่าภาพวงกลมที่ได้จากแสงผ่านขอบเลนส์ จุด P จะอยู่ที่หัวของดาวหางพอดี

ระยะจากจุด P ถึง AB เรียกว่า โคมาแทนเยนเชียล (tangential coma)

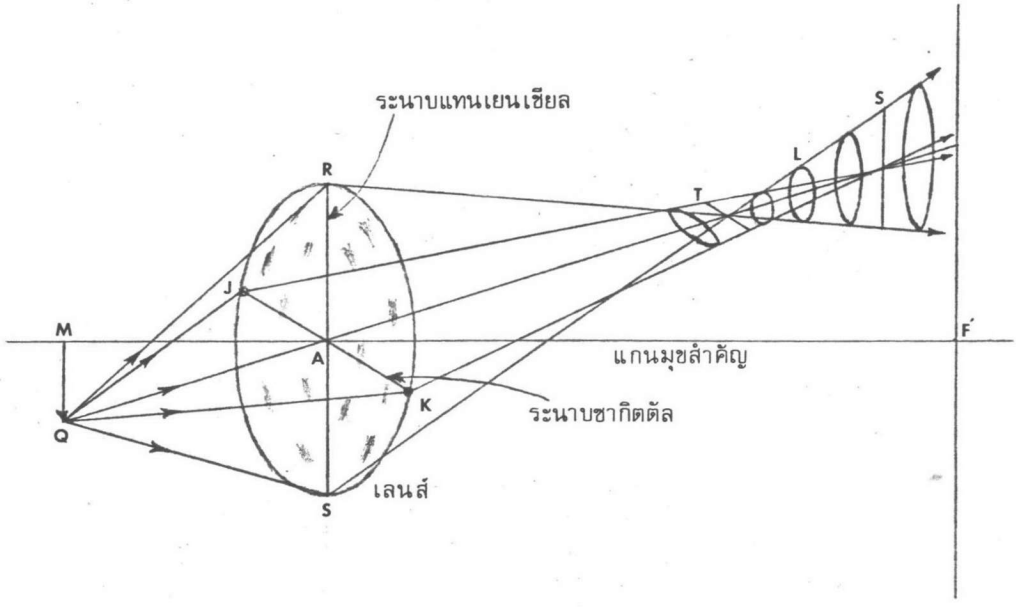
ระยะจากจุด P ถึง CD เรียกว่า โคมาซากิตตัล (sagittal coma)

โคมาซากิตตัล จะมีค่า = $\frac{1}{3}$ ของโคมาแทนเยนเชียลเสมอ และประมาณ 55% ของพลังงานทั้งหมดในโคมาจะรวมกันอยู่ในสามเหลี่ยมเล็ก ๆ ระหว่างจุด P และ CD คือ อยู่ในโคมาซากิตตัล ดังนั้น โคมาซากิตตัลจึงเป็นค่าที่บอกถึงขนาดยังผล (effective size) ของภาพมากกว่าค่าโคมาแทนเยนเชียล ค่าของโคมานี้จะแปรเปลี่ยนตามรูปร่างและตำแหน่งของเลนส์กับขนาดของหน้ารับแสง ซึ่งจะเป็นตัวจำกัดลำแสงที่จะผ่านเลนส์เข้ามา ในการแก้ความคลาดทรงกลมและโคมา ใช้วิธีการเลือกรูปร่างเลนส์ที่เหมาะสม

4. <u>แอสติกมาติซึม</u>

ความคลาด 2 ชนิดแรกที่กล่าวมาแล้ว เป็นความคลาดที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่บนแกนมุขสำคัญและอยู่ใกล้ ๆ แกนมุขสำคัญตามลำดับ ถ้าวัตถุอยู่ห่างออกมาจากแกนมุขสำคัญมาก ภาพที่ได้จะพร่ามัวอันเนื่องมาจากความคลาดของระบบทัศนศาสตร์อีก 2 ชนิด คือ แอสติกมาติซึมกับความคลาดโค้ง

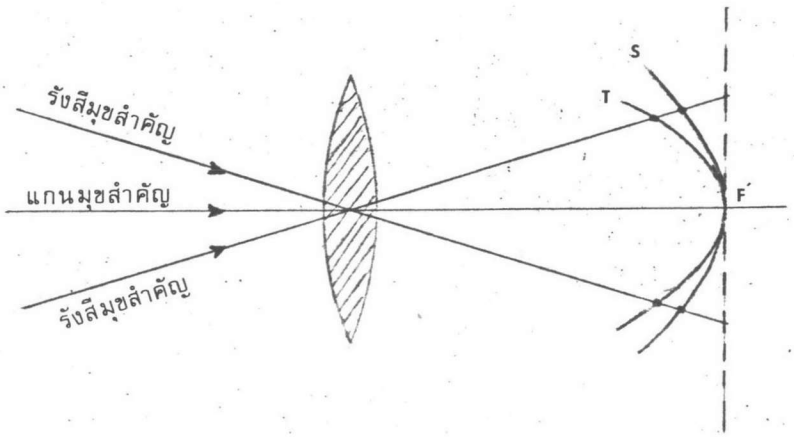
เลนส์ที่มีแอสติกมาติซึมจะให้ภาพที่ชัดในระนาบใดระนาบหนึ่งเท่านั้น และจะพร่ามัวในระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบที่ชัด กล่าวคือ ถ้าได้ภาพที่ชัดในระนาบแทนเยนเชียล ภาพจะพร่ามัวในระนาบซากิตตัล ทั้งนี้เนื่องมาจากกำลังของเลนส์ในแต่ละระนาบไม่เท่ากัน



รูปที่ 2.7 การเกิดแอสติกมาติซึม

ตามรูปที่ 2.7 (2) ระนาบ RS เป็นระนาบแทนเยนเชียล ระนาบ JK เป็นระนาบซากิตตัล จุด Q เป็นวัตถุที่อยู่นอกแกนมุขสำคัญ รังสีจากจุด Q ผ่านเลนส์ในระนาบแทนเยนเชียล RS จะไปทำให้เกิดภาพเป็นเส้นตรง T ตั้งฉากกับระนาบแทนเยนเชียล และรังสีจากจุด Q ผ่านเลนส์ในระนาบซากิตตัล JK จะไปให้ภาพเป็นเส้นตรง S ซึ่งตั้งฉากกับระนาบซากิตตัล จากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง L จะได้ภาพเป็นรูปวงกลมเล็ก ๆ เรียกวงกลมนี้ว่า วงกลมที่สับสนน้อยที่สุด (circle of least confusion)

ถ้าเลนส์ไม่เลวเกินไปนัก จะไม่มีแอสติกมาติซึมเกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่บนแกนมุขสำคัญ และค่าของแอสติกมาติซึมจะเพิ่มขึ้นช้า ๆ ตามระยะที่ไกลออกไปจากแกนมุขสำคัญ ทำให้ได้โลกัสของจุดภาพเป็นเส้นโค้งรูปพาราโบลาในกรณีที่วัตถุเป็นจุด แต่ถ้าเป็นวัตถุมีขนาดภาพที่ได้จะเป็นพื้นผิวโค้งแบบรูปกะทะ ดังรูปที่ 2.8 ระยะระหว่างผิวโค้งแทนเยนเชียล T กับผิวโค้ง



รูปที่ 2.8 เส้นแนวของภาพในระนาบแทนเยนเชียลและระนาบซากิตตัล

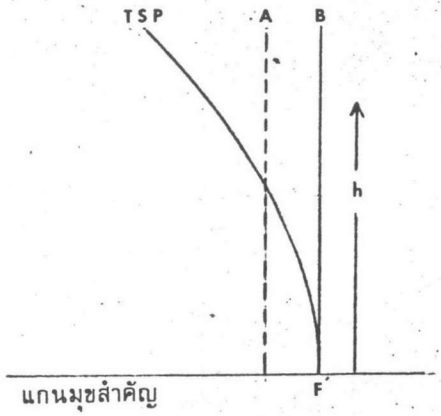
ซากิตตัล S วัดตามแนวรังสีมุขสำคัญเป็นค่าความแตกต่างของแอสติกมาติซึม (astigmatic difference) ถ้าวัตถุอยู่บนแกนมุขสำคัญ ค่าความแตกต่างของแอสติกมาติซึมเป็นศูนย์ คือ ผิวโค้ง T และผิวโค้ง S จะอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน ค่าความแตกต่างของแอสติกมาติซึมจะเพิ่มขึ้นตามระยะที่วัตถุอยู่ไกลออกจากแกนมุขสำคัญ ปริมาณความแตกต่างของแอสติกมาติซึมนี้มีค่าโดยประมาณเท่ากับกำลังสองของระยะทางจากแกนมุขสำคัญถึงจุดภาพ

แอสติกมาติซึมของเลนส์ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเลนส์และระยะที่วัตถุห่างจากหน้ารับแสง ทั้งนี้เพราะหน้ารับแสงทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดขนาดของลำแสงที่จะผ่านเลนส์เข้าไป ค่าแอสติกมาติซึมจะเป็นบวกเมื่อผิวโค้ง T อยู่ทางซ้ายของผิวโค้ง S เลนส์ที่ให้ค่าแอสติกมาติซึมเป็นบวก คือ เลนส์นูน และค่าแอสติกมาติซึมเป็นลบเมื่อผิวโค้ง T อยู่ทางขวาของผิวโค้ง S กรณีนี้จะเกิดกับเลนส์เว้า

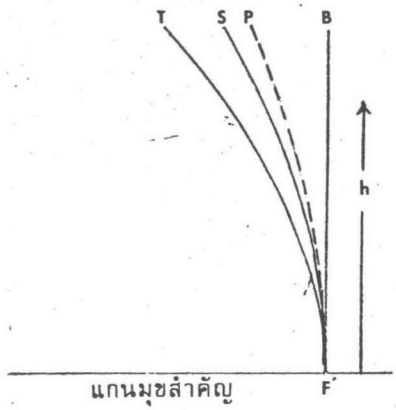
การแก้แอสติกมาติซึมโดยทั่ว ๆ ไปใช้วิธีการจัดวางเลนส์ให้ห่างกันในระยะที่พอเหมาะหรือวางตัวจำกัดแสง (stop) ในตำแหน่งที่เฉพาะ จะมีผลทำให้ได้ภาพที่มีแอสติกมาติซึมลดน้อยลง

5. <u>ความคลาดโค้ง</u>(2)

ความคลาดโค้งเป็นความคลาดอีกชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ห่างจากแกนมุขสำคัญออกไปมาก ทัศนอุปกรณ์ทุกชนิดจะมีค่าของความคลาดโค้งพื้นฐานอยู่ค่าหนึ่ง เรียกว่า ความโค้งเปทสวัล (Petzval curvature) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหของเลนส์และความโค้งของผิวเลนส์ ดังนั้นจึงไม่มีวิธีที่จะกำจัดความโค้งเปทสวัลนี้ให้หมดไปได้ ถ้าเลนส์ไม่มีความคลาดทรงกลม โคมา และแอสติกมาติซึม ภาพที่เกิดขึ้นในระนาบแทนเยนเชียลและระนาบซากิตตัลจะเกิดที่ตำแหน่งเดียวกันและอยู่บนผิวโค้งเปทสวัล ดังรูปที่ 2.9 (ก) ในเมื่อ T คือ ผิวโค้งแทนเยนเชียล S คือ ผิวโค้งซากิตตัล P คือผิวโค้งเปทสวัล ถ้าหากเลนส์มีแอสติกมาติซึม ผิวโค้งแทนเยนเชียลจะอยู่ห่างจากผิวโค้งเปทสวัลเป็น 3 เท่าของระยะที่ผิวโค้งซากิตตัลอยู่ห่างจากผิวโค้งเปทสวัล ทั้งผิวโค้งแทนเยนเชียลและผิวโค้งซากิตตัลจะอยู่ทางด้านเดียวกันของผิวโค้งเปทสวัล ดังรูปที่ 2.9 (ข)



รูปที่ 2.9 (ก) ความคลาดโค้ง

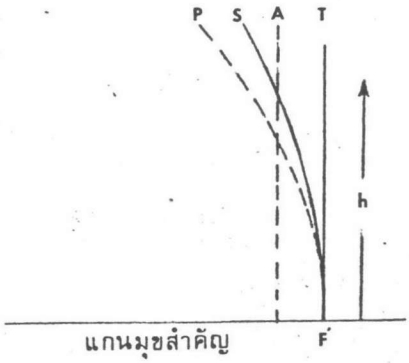


รูปที่ 2.9 (ข) แอสติกมาติซึม

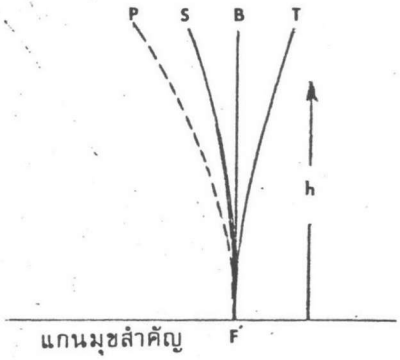
ถ้าเอาฉากรับมาวางรับภาพที่มีความคลาดโค้งที่ตำแหน่ง B ตามรูปที่ 2.9 (ก) จะได้ภาพชัดที่บริเวณตรงกลางภาพ ที่บริเวณริมฉากภาพจะพร่ามัวมาก เมื่อเอาฉากรับมาวางที่ตำแหน่ง A จะได้ภาพชัดที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างขอบกับศูนย์กลางของภาพ บริเวณ

ขอบภาพและศูนย์กลางฉากภาพจะพร่ามัว แต่ความพร่าจะน้อยลงกว่าครั้งแรก

รูปร่างของผิวโค้งเปทสวัลจะไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเลนส์หรือเปลี่ยนระยะระหว่างเลนส์โดยที่ค่าครรชนีหักเหและกำลังของเลนส์มีค่าคงที่เสมอ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือระยะระหว่างเลนส์นี้มีผลทำให้รูปร่างของผิวโค้งแทนเยนเชียลและผิวโค้งซากิตตัลเปลี่ยนแปลงไปได้ โดยที่อัตราส่วนของระยะจากผิวโค้งแทนเยนเชียลไปยังผิวโค้งเปทสวัลต่อระยะจากผิวโค้งซากิตตัลไปยังผิวโค้งเปทสวัล ต้องเป็น 3 ต่อ 1 เสมอ ดังรูป 2.10 (ก) และรูปที่ 2.10 (ข)



รูปที่ 2.10 (ก)



รูปที่ 2.10 (ข)

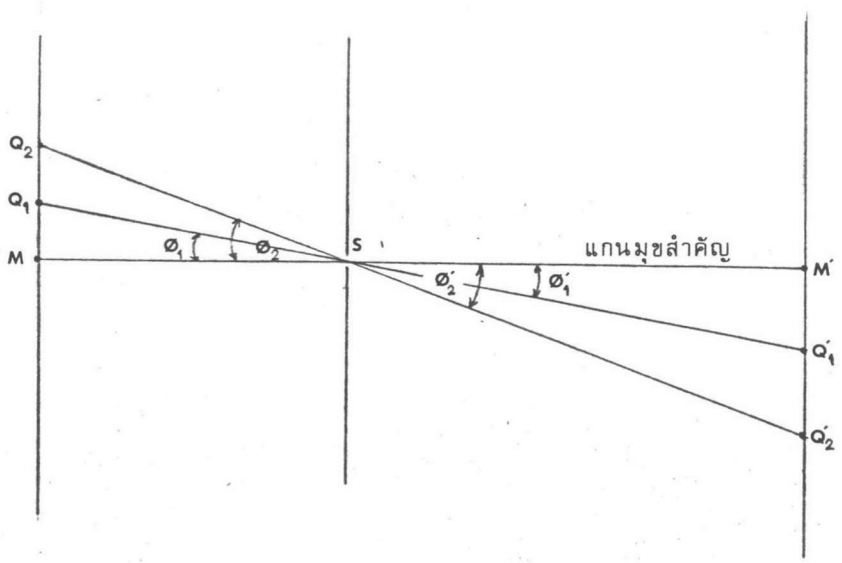
รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนของแอสติกมาติซึมเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างเลนส์

ถ้าออกแบบระบบทัศนศาสตร์ให้ได้ภาพในระนาบแทนเยนเชียลเป็นผิวเรียบตรง ภาพในระนาบซากิตตัลจะต้องเป็นผิวโค้งโดยสอดคล้องกับอัตราส่วน PT ต่อ PS เท่ากับ 3 ต่อ 1 ตามรูปที่ 2.10 (ก) เมื่อวางฉากรับภาพที่ตำแหน่ง A จะได้ภาพที่ชัดพอสมควร ถ้าระบบทัศนศาสตร์มีค่าแอสติกมาติซึมเป็นลบมากขึ้น ผิวโค้งแทนเยนเชียลจะโค้งไปทางขวาและผิวโค้งซากิตตัล ก็เป็นผิวโค้งเช่นเดียวกันโดยยังคงมีอัตราส่วน PT ต่อ PS เท่ากับ 3 ต่อ 1 เสมอ ดังรูปที่ 2.10 (ข) เมื่อวางฉากรับภาพที่ตำแหน่ง B จะได้ภาพชัดในบริเวณใกล้แกนมุขสำคัญ แต่บริเวณขอบภาพจะพร่ามัวมากกว่าที่ได้จากรูปที่ 2.10 (ก) การแก้ความคลาดโค้งของระบบ

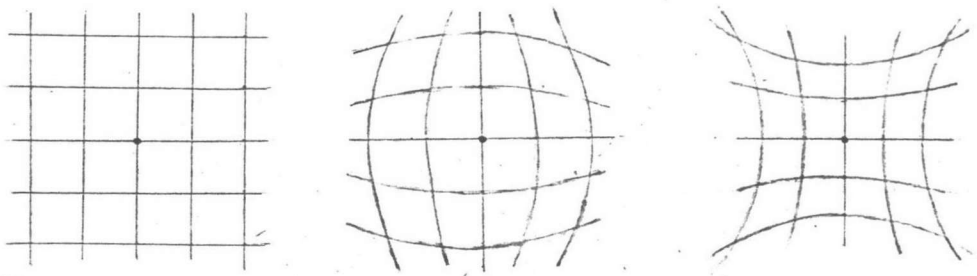
ทัศนศาสตร์นิยมใช้ตัวจำกัดแสงเข้าช่วย และใช้เลนส์เว้ามาประกบกับเลนส์นูน โดยการออกแบบรูปร่างของเลนส์ให้เหมาะสม

6. <u>ความบิดเบี้ยว</u>

ความบิดเบี้ยวเป็นความคลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากระบบทัศนศาสตร์มีกำลังขยายไม่คงที่ ทำให้ภาพที่ได้บิดเบี้ยวไป แต่ความบิดเบี้ยวนี้ไม่ได้ทำให้คุณภาพของภาพเสียไป ซึ่งต่างจากความคลาดชนิดอื่น ๆ ที่ทำให้คุณภาพของภาพเสียไป เมื่อวัตถุเป็นจุดอยู่นอกแกนมุขสำคัญ ภาพที่เกิดขึ้นอาจจะอยู่ใกล้หรือไกลจากแกนมุขสำคัญกว่าภาพที่ได้จากรังสีใกล้แกนมุขสำคัญ ดังนั้นปริมาณของความบิดเบี้ยว คือ ระยะทางขจัดของตำแหน่งภาพที่ได้จริง ๆ เทียบกับตำแหน่งภาพที่ได้จากรังสีใกล้แกนมุขสำคัญ และอาจบอกค่าของความบิดเบี้ยวนี้ได้โดยตรง หรือบอกเป็นร้อยละของความสูงของภาพที่ได้จากรังสีใกล้แกนมุขสำคัญ จำนวนความบิดเบี้ยวจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของภาพ ภาพยิ่งใหญ่ขึ้น จำนวนความบิดเบี้ยวก็ยิ่งเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.11 (ก) ระบบทัศนศาสตร์ที่ไม่มีความบิดเบี้ยว



รูปที่ 2.11 (ข) ภาพที่ไม่มีความบิดเบี้ยว รูปที่ 2.11 (ค) ความบิดเบี้ยวรูปถังเบียร์ รูปที่ 2.11 (ง) ความบิดเบี้ยวรูปหมอนปักเข็ม

ตามรูปที่ 2.11 (ก)(2) S เป็นทัศนอุปกรณ์ที่มีช่วงเปิดรับแสงขนาดรูเข็ม รังสีจากจุด M ซึ่งเป็นจุดอยู่บนแกนมุขสำคัญของระบบทัศนศาสตร์จะผ่านจุดศูนย์กลางของช่องเปิด แล้วไปให้ภาพที่จุด M' รังสีจากจุด Q_1 และ Q_2 ผ่านระบบทัศนศาสตร์นี้ไปให้ภาพที่จุด Q'_1 และ Q'_2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบทัศนศาสตร์ที่มีช่องเปิดรับแสงขนาดรูเข็มนี้ จะให้ภาพที่ไม่มีความบิดเบี้ยว ทั้งนี้เพราะมีกำลังขยายตามแนวดิ่งเท่ากันตลอด นั่นคือตามรูปที่ 2.11 (ก) จะได้ว่า

$$\frac{\tan \phi'}{\tan \phi} = \text{ค่าคงที่}$$

ดังนั้น ถ้าวัตถุเป็นรูปสี่เหลี่ยมวางอยู่ข้างหน้าเลนส์ที่ไม่มีความบิดเบี้ยว ภาพที่ได้จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมแบบเดียวกับวัตถุ ดังรูปที่ 2.11 (ข) แต่ถ้านำตัวจำกัดแสงมาวางไว้ข้างหน้าเลนส์อันนี้ จะทำให้อัตราส่วนของระยะภาพต่อระยะวัตถุที่วัดตามแนวรังสีมุขสำคัญลดลง นั่นก็คือทำให้กำลังขยายที่ขอบภาพลดลง ภาพที่ได้จะเกิดความบิดเบี้ยวมีลักษณะคล้ายกับรูปถังเบียร์ ดังรูปที่ 2.11 (ค) จึงเรียกว่า ความบิดเบี้ยวรูปถังเบียร์ (barrel distortion)

ความบิดเบี้ยวชนิดนี้จะมีค่าเป็นลบ และถ้าวางตัวจำกัดแสงไว้ข้างหลังเลนส์ จะทำให้อัตราส่วนของระยะภาพต่อระยะวัตถุที่วัดตามแนวรังสีมุขสำคัญมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะที่วัตถุอยู่ห่างจากแกนไปเรื่อย ๆ นั่นคือ กำลังขยายที่ขอบภาพจะเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ภาพที่บิดเบี้ยวมีลักษณะคล้ายกับรูปหมอนปักเข็ม เรียกความบิดเบี้ยวแบบนี้ว่า ความบิดเบี้ยวรูปหมอนปักเข็ม (pin-cushion distortion)) ดังรูปที่ 2.11 (ง) ความบิดเบี้ยวชนิดนี้มีค่าเป็นบวก

ในการหาค่าความบิดเบี้ยว มีวิธีการหาโดยการติดตามรังสีมุขสำคัญจากจุดนอกแกนมุขสำคัญผ่านจุดกลางเลนส์จนถึงตำแหน่งภาพ หาความสูงของภาพโดยวัดจากแกนมุขสำคัญให้เป็น H'_p และติดตามรังสีใกล้แกนมุขสำคัญจากจุดวัตถุเดียวกันนั้นจนถึงตำแหน่งภาพ หาความสูงของภาพโดยวัดจากแกนมุขสำคัญให้เป็น h'

จะได้ว่า ค่าของความบิดเบี้ยว $= H'_p - h'$

โดยทั่ว ๆ ไป นิยมคิดเป็นร้อยละของความบิดเบี้ยว $= \frac{H'_p - h'}{h'} \times 100\%$

ในการแก้ไขความบิดเบี้ยว ถ้าเป็นเลนส์เดี่ยวมักจะให้ตัวจำกัดแสงอยู่ที่เดียวกับเลนส์ นั่นคือ ให้เลนส์ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดแสงด้วย แต่ถ้าเป็นระบบของเลนส์หลาย ๆ อันวางแยกจากกัน เช่น เลนส์ 2 อันวางแยกจากกัน มักจะออกแบบให้วางตัวจำกัดแสงไว้ระหว่างเลนส์ทั้ง 2 อันนี้ ทำให้ภาพที่ได้ไม่มีความบิดเบี้ยว

สรุปโดยทั่ว ๆ ไป มีหลายวิธีในการแก้ไขความคลาดของระบบทัศนศาสตร์ คือ ในการแก้ความคลาดทรงกลม และโคมา ใช้วิธีการนำเลนส์อย่างน้อย 2 อันมาประกบกัน โดยเลนส์ทุกอันจะต้องมีการออกแบบ รูปร่างอย่างเฉพาะเจาะจง ในการแก้แอสติกมาติซึมและความคลาดโค้ง ใช้ระบบเลนส์หลายระบบวางแยกจากกัน และในการแก้ความบิดเบี้ยวก็ใช้วิธีการเลือกวางตัวจำกัดแสงไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสม

7. ความคลาดรงค์

ความคลาดทั้ง 5 ชนิด ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นความคลาดที่เกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบระบบทัศนศาสตร์เป็นแสงสีเดียว ถ้าให้แสงสีขาวผ่านเข้ามาในระบบทัศนศาสตร์จะมีความคลาดเกิดเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งชนิด คือ แสงทุกสีในสเปกตรัมที่รวมกันเป็นแสงสีขาว เมื่อออกจากระบบทัศนศาสตร์ แสงแต่ละสีจะไปรวมกันแต่ละจุด เรียกความคลาดชนิดนี้ว่าความคลาดรงค์ (chromatic aberration) ความคลาดรงค์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากดรรชนีหักเหของตัวกลางมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นของคลื่นแสงที่ผ่านเข้ามาดังนี้ (5)

$$n = n_o + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \cdots\cdots \qquad (2.5)$$

n เป็น ค่าดรรชนีหักเหของตัวกลาง

n_o , B, C, เป็น ค่าคงตัวขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางนั้น

λ เป็น ความยาวคลื่นของคลื่นแสง

จากสมการ (2.5) จะเห็นว่า สำหรับคลื่นแสงมีความยาวคลื่นสั้น ค่าดรรชนีหักเหของตัวกลางจะมีค่ามาก และสำหรับคลื่นแสงมีความยาวคลื่นยาว ค่าดรรชนีหักเหของตัวกลางนั้นจะมีค่าน้อย และจากสูตรของเลนส์บางในอากาศ

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \qquad (2.6)$$

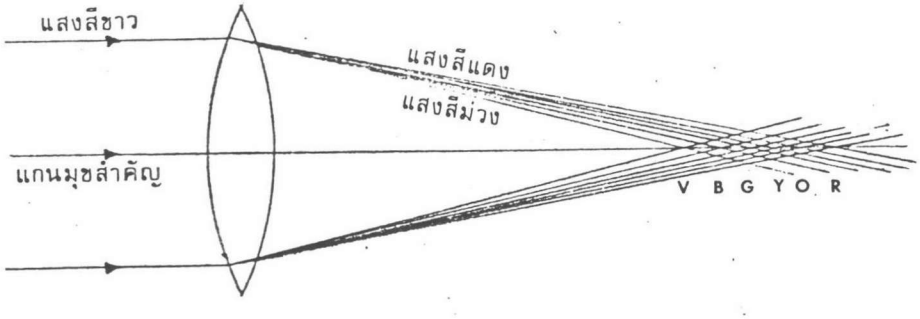
f เป็น ทางยาวโฟกัสของเลนส์

n เป็น ดรรชนีหักเหของเลนส์

r_1 เป็น รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์

r_2 เป็น รัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์

จากสมการ (2.6) ถ้า r_1 และ r_2 มีค่าเฉพาะให้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง จะเห็นว่าทางยาวโฟกัสของเลนส์นั้นขึ้นกับค่าดรรชนีหักเหของแก้ว ถ้าดรรชนีหักเหของแก้วมีค่ามาก ทางยาวโฟกัสของเลนส์จะน้อย แต่ถ้าดรรชนีหักเหของแก้วมีค่าน้อย ทางยาวโฟกัสของเลนส์จะมาก จากสมการ (2.5) ดรรชนีหักเหของแก้วมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นของคลื่นแสงที่ผ่านเลนส์ ดังนั้น ทางยาวโฟกัสของเลนส์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นของคลื่นแสงที่ผ่านเข้าเลนส์ด้วย นั่นคือ สำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นยาว เลนส์จะมีทางยาวโฟกัสมากกว่า สำหรับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น ดังรูปที่ 2.12

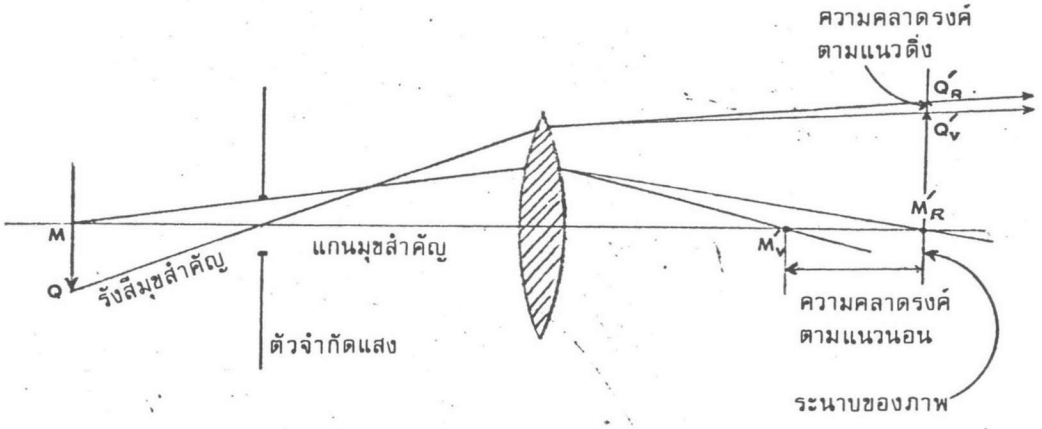


รูปที่ 2.12 ความคลาดรงค์

จากรูปที่ 2.12 ให้แสงขนานสีขาวผ่านเลนส์ จะเห็นว่าแสงแต่ละสีไม่ไปรวมที่จุดเดียวกัน แสงสีม่วงมีความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงสีแดง ดังนั้น ทางยาวโฟกัสของแสงสีม่วงจะสั้นกว่าทางยาวโฟกัสของแสงสีแดง เรียกระยะ VR นี้ว่า ความคลาดรงค์

ความคลาดรงค์แบ่งได้เป็น 2 ชนิด[2] คือ

1. ความคลาดรงค์ตามแนวนอน (longitudinal chromatic aberration)
2. ความคลาดรงค์ตามแนวดิ่ง (lateral chromatic aberration)

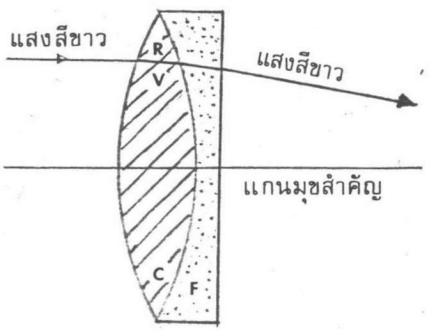


รูป 2.13 ความคลาดรงค์ตามแนวนอนและแนวดิ่ง

จากรูปที่ 2.13 MQ เป็นวัตถุมีขนาดวางอยู่ข้างหน้าเลนส์ โดย M เป็นจุดอยู่บนแกนมุขสำคัญ Q เป็นจุดอยู่นอกแกนมุขสำคัญและมีตัวจำกัดแสงวางอยู่ข้างหน้าเลนส์ ให้แสงสีขาวเข้ามาในระบบทัศนศาสตร์นี้จะเกิดความคลาดรงค์ขึ้น 2 ชนิด คือ ความคลาดรงค์ตามแนวนอนเป็นความแตกต่างของจุดภาพบนแกนมุขสำคัญ คือ ระยะ M'_V M'_R และความคลาดรงค์ตามแนวดิ่งเป็นความแตกต่างของจุดภาพวัดตามแนวดิ่ง คือระยะ Q'_V Q'_R

การแก้ความคลาดรงค์มีหลายวิธี ถ้าเป็นเลนส์เดี่ยวก็ใช้แผ่นกรองแสงที่ยอมให้แสงผ่านในช่วงแคบ ๆ เท่านั้น (narrow bandpass filter) วางไว้ข้างหน้าเลนส์ โดยแผ่นกรองแสงจะกั้นแสงสีต่าง ๆ ไว้เหลือผ่านมาที่เลนส์เพียงแสงสีเดียว และวิธีที่นิยมกันอย่างแพร่หลายมาก ก็คือ ใช้เลนส์บาง 2 อัน ประกบกัน โดยเลนส์บาง 2 อันนี้ทำจากแก้วที่มีค่าดรรชนีหักเหต่างกัน แก้วที่นิยมใช้คือ แก้วคราวน์ (crown glass) กับแก้วฟลินท์ (flint glass) โดยทำแก้วคราวน์เป็นเลนส์นูนมีกำลังเป็นบวก และทำ

แก้วฟลินท์เป็นเลนส์เว้ามีกำลังเป็นลบ เลนส์ทั้ง 2 อันนี้มีค่าการกระจายเท่ากัน กำลังรวมของเลนส์คู่นี้จะมีค่าเป็นบวก เรียกเลนส์ที่ประกบกันแบบนี้ว่าเลนส์**อรงค์**(achromatic lens) ดังรูปที่ 2.14 เมื่อให้แสงสีขาวผ่านเลนส์อรงค์ แสงที่ออกมาจะเป็นแสงสีขาวเช่นเดิม



รูปที่ 2.14 เลนส์อรงค์

โดยไม่มีการแยกออกเป็นแสงสีต่าง ๆ