

บทนำ

เลนส์เฟรส์เนลอันแรกสร้างขึ้นโดย Buffon ในปี ค.ศ. 1748 เป็นเลนส์ขนาดใหญ่ทำด้วยแก้ว เรียงออกมาจากจุดศูนย์กลางเดียวกัน (ขณะนั้นเรียกว่า echelon lens) ต่อมาระหว่างปี ค.ศ. 1819-1820 Agustin Fresnel ได้สร้าง echelon lens ขนาดใหญ่เพื่อใช้กับประภาคารขึ้นเป็นครั้งแรกซึ่งเลนส์อันแรกของเฟรส์เนลสำหรับประภาคารสร้างเสร็จในปี ค.ศ. 1822 และได้รับผลสำเร็จอย่างมากทำให้เกิดการสร้างและติดตั้งเลนส์แบบนี้กับประภาคารตลอดแนวฝั่งประเทศฝรั่งเศส ดังนั้นเลนส์แบบ echelon จึงได้รับการเรียกชื่อว่าเลนส์เฟรส์เนล ในปัจจุบันเราจะเห็นเลนส์แบบนี้ใช้อย่างแพร่หลายใน ไฟท้ายรถยนต์ ไฟสัญญาณจราจร โฟลปอร์ตไลต์ เครื่องฉายภาพข้ามศีรษะ (Overhead Projector) ฯลฯ สำหรับวัสดุที่ใช้ทำเลนส์เดิมทำด้วยแก้วแต่ในปี ค.ศ. 1946 บริษัท Eastman Kodak Company ประเทศสหรัฐอเมริกาได้สร้างแม่แบบสำหรับผลิตเลนส์เฟรส์เนลที่ทำด้วยพลาสติกขึ้นสำเร็จซึ่งถือว่าการเริ่มต้นของเลนส์เฟรส์เนลยุคใหม่ ข้อที่นำสงสัยคือรูปร่างของมันซึ่งแบนราบแต่ยังคงรักษาสภาพการหักเหแสงได้ดังเลนส์ทั่ว ๆ ไปซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ลักษณะโดยทั่วไปของเลนส์บางจะมีกำลังของเลนส์อยู่ในรูปความสัมพันธ์

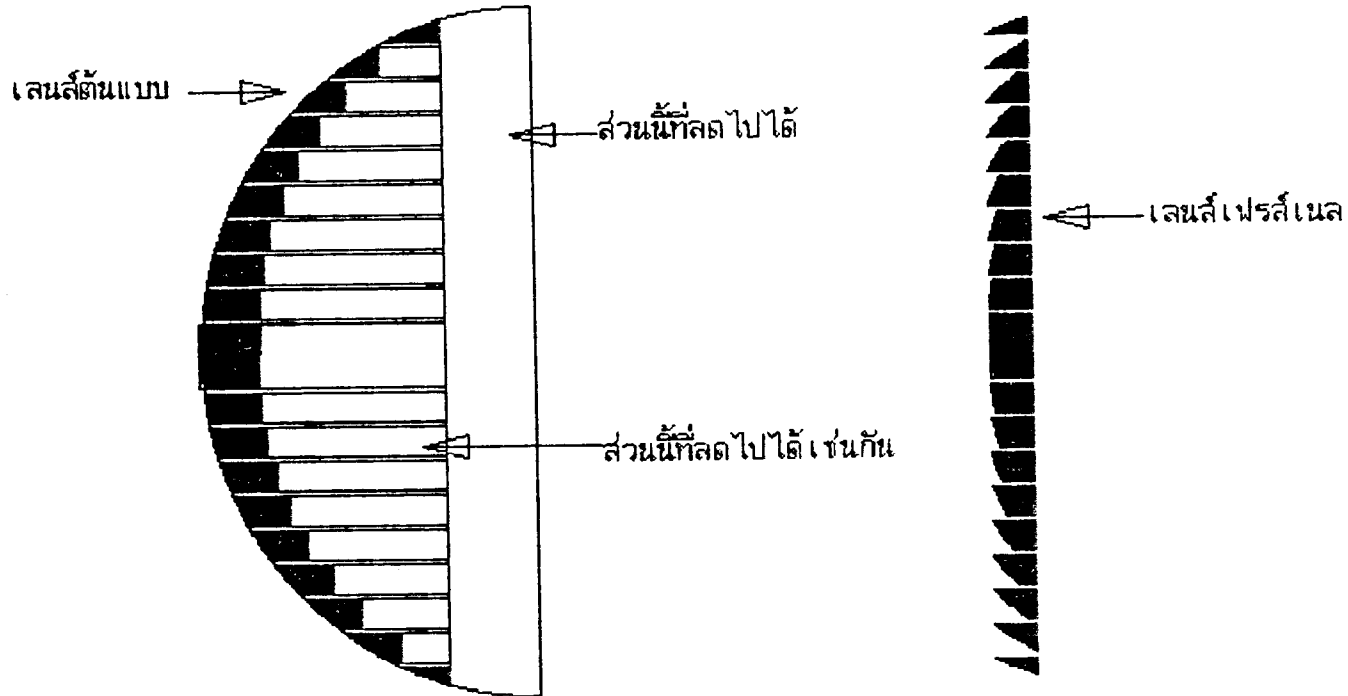
$$K = (n-1)(C_1 - C_2)$$

โดยที่ K คือ ค่ากำลังของเลนส์

n คือ ค่าดัชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ทำเลนส์

C_1, C_2 คือ ค่าความโค้งของผิวเลนส์

จากความสัมพันธ์นี้ เราจะได้ว่ากำลังของเลนส์นั้นขึ้นอยู่กับค่าความโค้งของเลนส์เพียงอย่างเดียวโดยไม่ขึ้นกับความหนาของเลนส์ เราจึงสามารถทำให้เลนส์บางลงได้โดยรักษาความโค้งเดิมของเลนส์เอาไว้



หลักการของเฟรสเนล เลนส์

กรณีที่เลนส์ต้นแบบเป็นเลนส์บางแล้ว ความยาวโฟกัสของเลนส์ขึ้นกับค่า
 ความโค้งของผิวเลนส์เท่านั้นไม่ขึ้นกับความหนา ดังนั้นจึงสามารถทำให้เลนส์
 บางลงอีกได้ ทรายเท่าที่ยังสามารถรักษาความโค้งของผิวเลนส์ให้คงเดิม

เลนส์เฟรส์เนลเป็นเลนส์ที่สร้างขึ้น เพื่อลดความหนาและน้ำหนักของเลนส์ธรรมดา โดยการแบ่งผิวโค้งของเลนส์เป็นส่วน ๆ มีลักษณะเป็นวงแหวนแล้วเลื่อนวงแหวนแต่ละวงมาให้ผิวโค้งของมันอยู่ในแนวเดียวกันก็จะได้เลนส์ใหม่ออกมาดังรูปที่ 1 เมื่อเรากำหนดว่าเลนส์เฟรส์เนลมีระยะห่างระหว่างช่องน้อยๆ จนกระทั่งเราสามารถประมาณได้ว่า ส่วนโค้งของวงกลมที่ผิวแรกนั้นเป็นเส้นตรงที่กระทำมุมกับผิวราบด้านหลัง ซึ่งเราจะใช้ค่ามุมนี้ในการกำหนดมุมกึ่งของเครื่องกลึงเพื่อที่จะสร้างแม่แบบ รวมทั้งค่าความลึกและความกว้างของร่องด้วย ค่าเหล่านี้เราสามารถเลือกได้ตามจุดประสงค์ของการใช้งาน

การประยุกต์ใช้งานของเลนส์เฟรส์เนลสามารถแบ่งได้เป็น 5 ด้านใหญ่ๆ คือ ใช้เป็น collimators, condensers, field lenses, magnifier และ imaging systems ตัวอย่างการใช้งานในแต่ละด้านมีดังนี้

Collimators การใช้เลนส์เฟรส์เนลเป็น collimator กล่าวได้ว่าเป็นจุดประสงค์แรกในการสร้างเลนส์เฟรส์เนล ซึ่งได้แก่การใช้กับประกาศคาริมฝั่งทะเลเพื่อให้แสงที่ออกสู่ท้องทะเลเป็นลำแสงขนานทำให้เรือเดินทะเลสังเกตชายฝั่งได้ง่ายขึ้นจากประกาศคาริม ไฟสัญญาณจราจรที่ใช้กันในปัจจุบันนี้ก็ใช้เลนส์เฟรส์เนลเพื่อรวมแสงเป็นลำแสงขนานให้ผู้ขับขีรถยนต์เห็นได้ชัดยิ่งขึ้น ทานองเดียวกันฝาปิดไฟแฟลชที่ใช้กับกล้องถ่ายรูปก็คือเลนส์เฟรส์เนลเช่นกัน

Condensers ในกรณีนี้มักจะใช้เลนส์เฟรส์เนลประกอบในอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดต่างๆ เช่น เครื่องกันขโมยแบบอินฟราเรด และในปัจจุบันยังใช้เป็นตัวรวมแสงดวงอาทิตย์ให้กับโซลาร์เซลล์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งแต่เดิมใช้กระจกพาราโบลอยด์เป็นตัวรวมแสงแต่เลนส์เฟรส์เนลมีข้อดีกว่ากระจกเพราะน้ำหนักเบากว่า และสามารถป้องกันโซลาร์เซลล์จากสิ่งแวดล้อมธรรมชาติ เช่น ฝุ่นและองไปในตัวด้วย

Field lenses ตัวอย่างของการใช้เลนส์เฟรส์เนลเป็น field lens ที่เราเห็นมากที่สุดได้แก่ ในเครื่องฉายภาพข้ามศีรษะ นอกจากนั้นยังใช้เป็นก่หาวิว (viewfinder) ของกล้องถ่ายรูปรีเฟล็กซ์แบบ เลนส์เดี่ยวโดยใช้ติดกับกระจกฝ้าที่เป็นตัวรับภาพเพื่อให้ภาพสว่างขึ้นทำให้ง่ายต่อการโฟกัส

Magnifiers ในที่นี้เลนส์เฟรส์เนลจะใช้กับอุปกรณ์ที่มี LED (Light Emitting Diode) และ LCD (Liquid Crystal Display) เป็นส่วนประกอบเช่นในเครื่องคำนวณไฟฟ้า หน้าปัดแสดงตัวเลขต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อให้ภาพของตัวเลขที่ต้องการแสดงมีขนาดโตขึ้น

Imaging Systems เช่นการใช้เป็นเลนส์ส่งภาพ (Projection Lens) ในระบบการฉายภาพของ เครื่องรับโทรทัศน์ (Projection television system) โดยเลนส์ที่ใช้ประกอบด้วยเลนส์เฟรส์เนล 2, 3 หรือ 4 อัน ราคาของระบบการฉายภาพแบบที่ใช้เลนส์เฟรส์เนลนี้จะถูกกว่าระบบเก่าที่ใช้เลนส์แก้ว 3 อันมากและคุณภาพทั้ง 2 ระบบ เกือบจะเหมือนกัน นอกเหนือจากการใช้งานในด้านใหญ่ ๆ ดังกล่าวแล้ว ยังมีการใช้เลนส์เฟรส์เนลในงานเฉพาะด้านอีกมากมาย เช่น เลนส์เฟรส์เนลที่ทำด้วย PVC บาง ๆ (membrane) สามารถใช้เป็นเลนส์สำหรับแว่นตาเพื่อช่วยแก้สายตา ตาเป็นต้อกระจก และ เด็กที่เป็นโรคตาอย่างร้ายแรง ยิ่งกว่านั้นบริษัท Optical Sciences Group ได้ผลิตเลนส์เฟรส์เนล ที่ใช้เป็นเลนส์มุกกว้างสำหรับผู้ขมถนตบรทุกที่เป็นโรคผู้เพ้อกำลังจุดบอดทางด้านหลังซึ่งผู้ขมมองไม่เห็น ทั้งนี้โดยการนำเลนส์แบบนี้ไปติดทางด้านในของกระจกหลังตรงตำแหน่งที่อยู่ในแนวเดียวกับผู้ขมก็จะทำ ให้ผู้ขมมองเห็นรถที่ตามมาในมุมต่าง ๆ กว้างขึ้น

*****@

การแกะรอยรังสีโดยวิธีเมทริกซ์

ในระบบทัศนศาสตร์เราสามารถติดตามทางเดินของรังสีของแสงที่ผ่านเข้าไปในระบบของเลนส์หรือกระจกได้โดยใช้กฎการสะท้อนและหักเห สำหรับรังสีใด ๆ ที่ไม่จำเป็นต้องเป็นรังสีใกล้เคียงกัน เราสามารถติดตามการเคลื่อนทาง(แกะรอย)ได้ดังนี้

ในขั้นตอนนี้เราจะหาเมทริกซ์ที่อธิบายรังสีของแสงเมื่อเคลื่อนที่และหักเหที่ผิวของเลนส์โดยจะเริ่มจากการหาเมทริกซ์ของการเคลื่อนที่(Translation Matrix)แล้วหาเมทริกซ์ของการหักเห(Refraction Matrix)

เมทริกซ์ของการเคลื่อนที่

กำหนดรังสีที่มีจุดเริ่มต้นที่จุด $P(x_0, y_0, z_0)$ และให้รังสีของแสงกระทบผิวที่ 1 ของเลนส์ที่จุด $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ซึ่งจะมี direction cosine เป็น U, V, W โดยอ้างอิงกับทิศทางตั้งฉาก
ในรูปที่ 2 เราสามารถหา direction cosine ได้จาก

$$\begin{aligned} U &= (x_1 - x_0)/T_1 \\ V &= (y_1 - y_0)/T_1 \\ W &= (z_1 - z_0)/T_1 \end{aligned} \quad \text{-----(1)}$$

โดย T_1 เป็นระยะห่างระหว่างจุด P และ P_1 สมการ 1 สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + T_1 U \\ y_1 &= y_0 + T_1 V \\ z_1 &= z_0 + T_1 W - L \end{aligned} \quad \text{-----(2)}$$

โดยค่า L คือระยะทางบนแกน Z จากจุดกำเนิดในทิศทางถึงผิวเลนส์ เราใส่ค่านี้เข้าไปในสมการเพื่อ

เป็นการย้ายพิกัดจาก 0 มายังจุด V_1 ทั้งนี้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในกรณีที่เลนส์อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดมาก ๆ หรือเลนส์บางมาก ๆ ในสมการที่ 2 นั้นจะเห็นว่าเราไม่จำเป็นต้องทราบค่าพิกัดทั้งสาม เพราะว่าเราสามารถหาพิกัดที่เหลือได้จากความสัมพันธ์ของผิวทรงกลม (โดยใช้นิพจน์ใหม่) คือ

$$x_1^2 + y_1^2 + (z_1 - r_1)^2 = r_1^2 \quad \text{----- (3)}$$

หรือ

$$x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - 2z_1 r_1 = 0 \quad \text{----- (4)}$$

โดยที่ r_1 เป็นรัศมีของผิวเลนส์เราจะหาค่า T_1 โดยแทนค่าสมการที่ 2 ลงในสมการที่ 4, จะได้เป็น

$$T_1^2 + 2T_1(x_0 U + y_0 V + z_0 W - WL - r_1 W) + x_0^2 + y_0^2 + (z_0 - L)^2 - 2r_1(z_0 - L) = 0 \quad \text{----- (5)}$$

กำหนดให้ $c_1 = 1/r_1$ เป็นความโค้งของผิวเลนส์เอา c_1 คูณสมการที่ 5 จะได้เป็น

$$c_1 T_1^2 + 2T_1[c_1(x_0 U + y_0 V + z_0 W - WL) - W] + [c_1(x_0^2 + y_0^2 + (z_0 - L)^2) - 2(z_0 - L)] = 0 \quad \text{----- (6)}$$

ซึ่งเป็นสมการ Quadratic ที่สามารถแก้สมการหาค่า T_1 ได้เป็น

$$T_1 = \frac{-B \pm (B^2 - c_1 C)^{1/2}}{c_1} \quad \text{----- (7)}$$

โดยที่ B เป็นสัมประสิทธิ์ของ $2T_1$, และ C เป็นเทอมค่าคงที่ในสมการที่ 6

จากสมการที่ 2 เนื่องจากรังสีเคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n เราจะได้ระยะทางต่าง ๆ

เป็นระยะทางแสง (Optical Path Length) เราจะเขียนสมการที่ 2 ใหม่ในรูปเมทริกซ์เป็น

$$\begin{bmatrix} n'U' \\ x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ T_1/n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nU \\ x_0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} n'V' \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ T_1/n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nV \\ y_0 \end{bmatrix}$$

----- (8)

$$\begin{bmatrix} n'W' \\ z_1+L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ T_1/n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nW \\ z_0 \end{bmatrix}$$

ในกรณีที่ตัวหลังเป็นฉนวนราบ $c_1 = 0$ เราจะได้สมการที่ 6 เป็น

$$T_1 = (L - z_0)/W \quad \text{----- (9)}$$

ในการคำนวณเราจะหาค่า T_1 แล้วนำไปกำหนดจุด P_1 เพื่อความสะดวกเราจะเขียนสมการที่ 8 ใหม่

โดยให้ $T = T_1/n$ เป็น

$$\begin{bmatrix} n'U' \\ n'V' \\ n'W' \\ x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T & 0 & 0 & 1 & -L \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nU \\ nV \\ nW \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{----- (10)}$$

ซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่แสดงการเลื่อนที่ของรังสีโดยที่ทิศทาง (direction cosine) ไม่เปลี่ยนแปลง

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T & 0 & 0 & 1 & -L \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ 10 เราจะเรียกเมทริกซ์ T ว่า เมทริกซ์ของการเลื่อนที่

เมทริกซ์ของการหักเห

ในที่นี้ เราจะหาเมทริกซ์ที่อธิบายการหักเหที่ผิวของเลนส์ โดยเริ่มจากการหาค่า direction cosine ของเวกเตอร์ปกติที่ตั้งฉากกับผิวของเลนส์ที่จุด P_1 ซึ่งกำหนดโดย

$$\begin{aligned} \alpha &= -x_1/r_1 = -c_1 x_1 \\ \beta &= -y_1/r_1 = -c_1 y_1 \\ \gamma &= (r_1 - z_1)/r_1 = 1 - c_1 z_1 \end{aligned} \quad \text{-----(11)}$$

เราจะหามุมตกกระทบที่ผิวเลนส์จากความสัมพันธ์

$$\cos\theta = \alpha U + \beta V + \gamma W \quad \text{-----(12)}$$

และหามุมหักเหจากกฎการหักเหของสเนล กำหนดโดย

$$\cos\theta' = (1 - (n/n')^2 (1 - \cos^2\theta))^{1/2} \quad \text{-----(13)}$$

โดย θ' เป็นมุมหักเห เราจะได้ความสัมพันธ์ของการหักเหโดยใช้กฎการหักเหของสเนลเป็น

$$\begin{aligned} n'U' &= nU - Kx_1 \\ n'V' &= nV - Ky_1 \\ n'W' &= nW - K(z_1 - r_1) \end{aligned} \quad \text{-----(14)}$$

โดยที่

$$K = (n'\cos\theta' - n\cos\theta)c_1 \quad \text{-----(15)}$$

สมการสุดท้ายในสมการที่ 14 จะเป็นฐานดั้งแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะได้ค่า $\cos\phi$ จาก

$$\cos\phi = (OC - z_1)/r_1 \quad \text{-----(16)}$$

เมื่อนักเคลื่อนไปยัง V_1 จะได้สมการที่ 16 เป็น

$$\cos\phi = (r_1 - z_1)/r_1 \quad \text{-----(17)}$$

จะได้สมการสำหรับแกน Z อยู่ในรูป

$$n'W' = nW - Kz + Kr_1 \quad \text{----- (18)}$$

ให้ $c_1 = 1/r_1$ เราจะได้

$$\begin{aligned} U' &= (n/n')U - c_1 Gx_1 \\ V' &= (n/n')V - c_1 Gy_1 \end{aligned} \quad \text{----- (19)}$$

$$W' = (n/n')W - c_1 Gz_1 + G$$

โดยที่ $G = (n' \cos \theta' - n \cos \theta) / n' = K / (n' c_1)$ ----- (20)

และสามารถตรวจสอบความถูกต้องได้จาก

$$U^2 + V^2 + W^2 = 1 \quad \text{----- (21)}$$

เราสามารถเขียนสมการที่ 14 ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} n'U' \\ x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -K \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nU \\ x_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} n'V' \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -K \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nV \\ y_1 \end{bmatrix} \quad \text{----- (22a)}$$

$$\begin{bmatrix} n'W' \\ \\ z_1 - Kr_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -K \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nW \\ z_1 \end{bmatrix}$$

และเมื่อนำมาเทียบรวมเป็นสมการเดียวจะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} n'U' \\ n'V' \\ n'W' \\ x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -K & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & Kr_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nU \\ nV \\ nW \\ x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{---- (22b)}$$

ซึ่งเป็นสมการแสดงการหักเหของรังสีของแสงที่ผิวเลนส์ เรียกเมทริกซ์ที่เป็นตัวดำเนินการว่า เมทริกซ์ของการหักเห (Refraction matrix)

สรุป

ในขั้นนี้เราได้หาสมการที่อธิบายการเคลื่อนที่ของรังสีของแสงที่ผ่านเข้าไปในเลนส์ที่มีดัชนีหักเหต่างจากตัวกลางแรก โดยเลนส์เป็นเลนส์ที่มีผิวเป็นผิวโค้งทรงกลม ซึ่งได้สมการที่ใช้ในการอธิบายออกมาสองสมการหลักคือสมการการเคลื่อนที่ และสมการการหักเห

1. Translation Equation

$$\begin{bmatrix} n'U' \\ n'V' \\ n'W' \\ x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T & 0 & 0 & 1 & -L \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nU \\ nV \\ nW \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

โดยที่ $T = (-B \pm (B^2 - c_1 C)^{1/2}) / (n \cdot c_1)$

$$B = [c_1(x_0 U + y_0 V + z_0 W - WL) - W]$$

$$C = [c_1(x_0^2 + y_0^2 + (z_0 - L)^2) - 2(z_0 - L)]$$

L : เป็นระยะทางจากจุดกำเนิดในพิกัดจากไปถึงตำแหน่งของผิวเลนส์บนแกน Z

เป็นค่าที่ใช้ในการเลื่อนพิกัดไปยังผิวเลนส์

$$c_1 = 1/r_1 \quad \text{เป็นค่าความโค้งของผิวเลนส์}$$

2. Refraction Equation

$$\begin{bmatrix} n'U' \\ n'V' \\ n'W' \\ x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -K & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & Kr_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} nU \\ nV \\ nW \\ x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

โดยที่ $K = (n' \cos \theta' - n \cos \theta) c_1$: กำลังของการหักเห

$$\cos \theta = \alpha U + \beta V + \gamma W$$

$$\cos \theta' = (1 - (n/n')^2 (1 - \cos^2 \theta))^{1/2}$$

$$\alpha = -c_1 x_1$$

$$\beta = -c_1 y_1$$

$$\gamma = 1 - c_1 z_1$$

เราจึงสามารถหาครั้งที่เข้าสู่ระบบเป็นเมทริกซ์ 7×1 แล้วผ่านการดำเนินการที่เป็น Translation matrix และ Refraction matrix ซึ่งจะคำนวณโดยที่ไม่ใช้คอมพิวเตอร์เพราะที่แต่ละผิวก็จะมี Refraction matrix และ Translation matrix แยกต่างกันไปแต่จะเป็นการทำซ้ำ ๆ กัน ซึ่งจะ
ได้ผลลัพธ์เป็นเมทริกซ์ 7×1 ของรังสีที่ผ่านระบบของเลนส์

ความคลาดทรงกลม

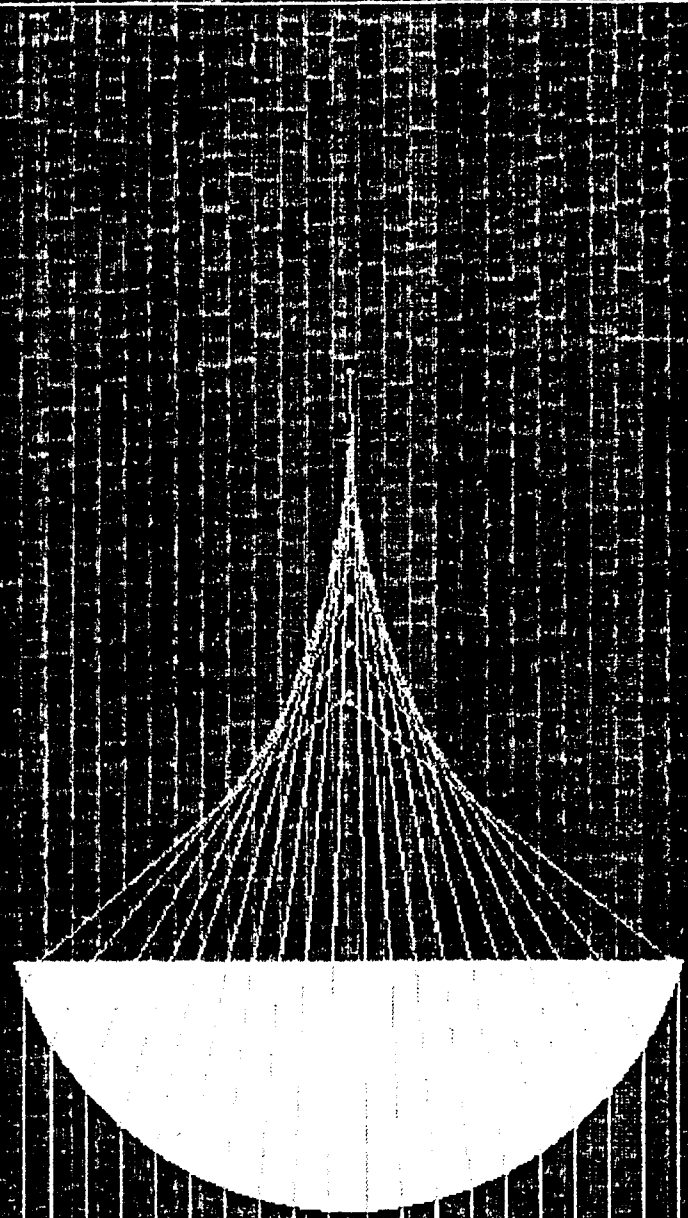
เมื่อรังสีของแสงเดินทางผ่านเข้ามาในเลนส์แล้วหักเหจากเลนส์ไปทำให้เกิดภาพยังจุดโฟกัสจะได้ว่าจากคุณสมบัติทางทฤษฎีของเลนส์จะทำให้ภาพและสีของภาพไม่เหมือนวัตถุ เรียกว่า ความคลาดในการออกแบบเลนส์เฟิร์สแนลนี้มีความคลาดที่สำคัญมากเกี่ยวข้องคือความคลาดทรงกลมซึ่งเกิดจากรูปร่างของเลนส์ที่มีผิวเลนส์เป็นส่วนโค้งของวงกลม

ความคลาดทรงกลม เกิดจากผิวของเลนส์ที่เป็นส่วนโค้งของวงกลมทำให้มีการหักเหของรังสีที่ตกกระทบใกล้แกนทัศนียภาพต่างกับการหักเหของรังสีที่ตกกระทบเลนส์ห่างแกนทัศนียภาพซึ่งในที่นี้จะหาค่าความคลาดทรงกลมตามยาว (Longitudinal Spherical Abberation, LSA) เปรียบเทียบกับค่าแฟลคเตอร์รูปร่างเพื่อให้ได้ค่าของแฟลคเตอร์รูปร่างที่มีค่าความคลาดทรงกลมตามยาวน้อยที่สุด โดยการหาจากค่าแนวจากระบบเมทริกซ์ของเลนส์ที่มีค่าแฟลคเตอร์รูปร่าง เมื่อเรากำหนดให้รังสีของแสงที่เข้าตกกระทบเลนส์ เป็นรังสีขนานที่อยู่ห่างจากแกนทัศนียภาพและขนานกับแกนทัศนียภาพเป็นระยะทางต่าง ๆ กัน จะได้ว่ารังสีที่ตกกระทบใกล้แกนทัศนียภาพ จะหักเหไปตัดแกนทัศนียภาพที่ระยะทางมากกว่ารังสีที่ตกกระทบที่ระยะห่างจากแกนทัศนียภาพแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเราสามารถหาค่าระยะทางจากผิวเลนส์ด้านหลังไปยังจุดที่รังสีของแสงตัดกับแกนทัศนียภาพ และสามารถหาค่าความคลาดทรงกลมตามยาวได้

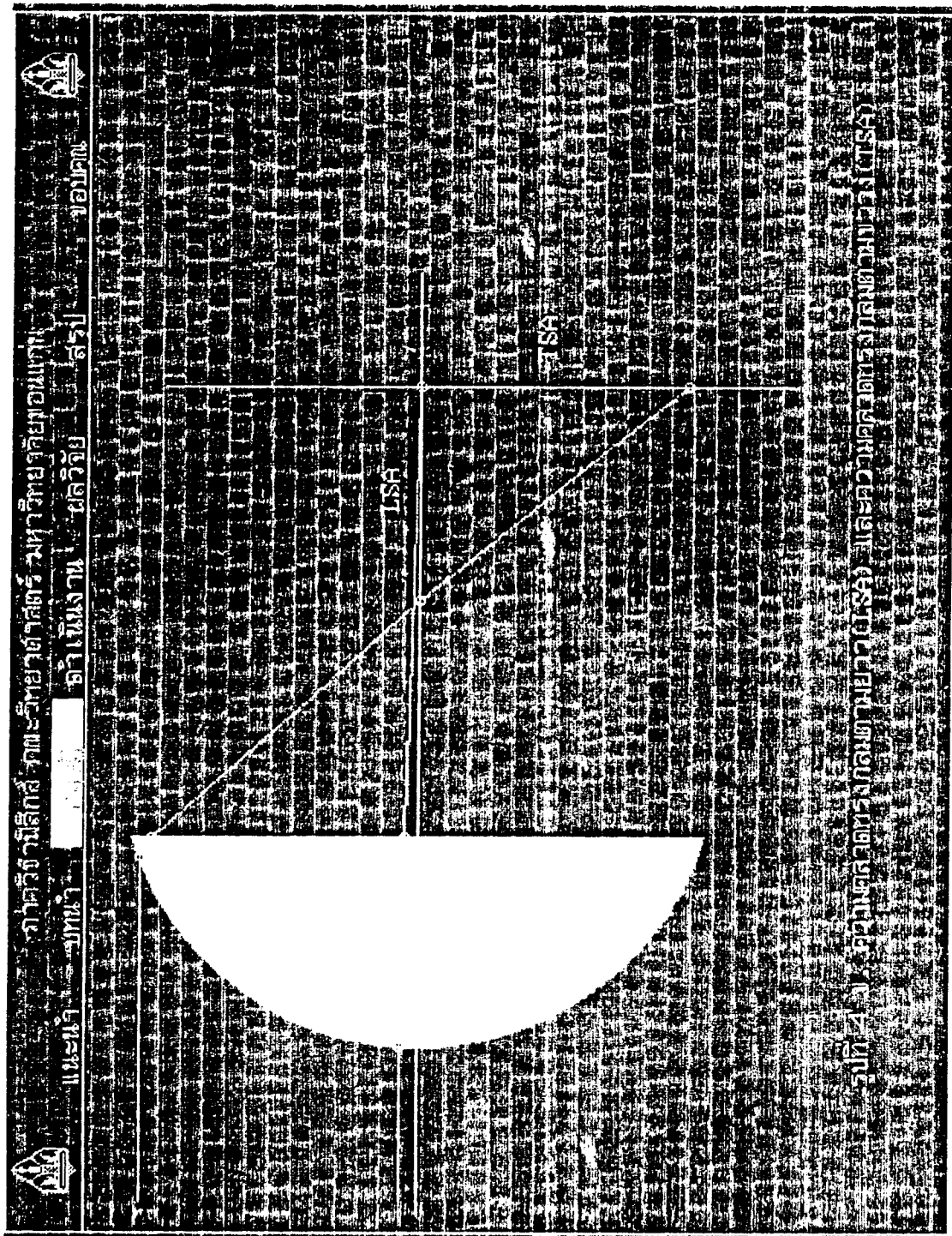
เนื่องจากเลนส์เฟิร์สแนลที่ออกแบบในโครงการงานนี้ ใช้สำหรับรวมแสงจากดวงอาทิตย์ ดังนั้นความคลาดที่จะมีผลกระทบมากที่สุดก็คือความคลาดทรงกลม ด้วยเหตุนี้การออกแบบจึงพิจารณาเพียงความคลาดทรงกลมเท่านั้น



ภาควิชาศึกษาศาสตร์ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 และนำ มานำ
 อาจารย์ ดร. ดำเนินงาน ชลวิทย์
 วิชาคณิตศาสตร์
 วิชาคณิตศาสตร์
 วิชาคณิตศาสตร์



รูปที่ 4. ก. แสดงรังสีผ่านจุดศูนย์กลางเกิดความคลาดทรงกลม



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 เลขที่ ชื่อ นามสกุล ชั้นปี สาขา
 วิชา เรื่อง



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 เลขที่ ชื่อ นามสกุล ชั้นปี สาขา
 วิชา เรื่อง

ในเรื่องความคลาดไม่มีค่าที่เกี่ยวข้องค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงรูปร่างของเลนส์ คือ ค่าแฟคเตอร์รูปร่าง ซึ่งกำหนดโดย

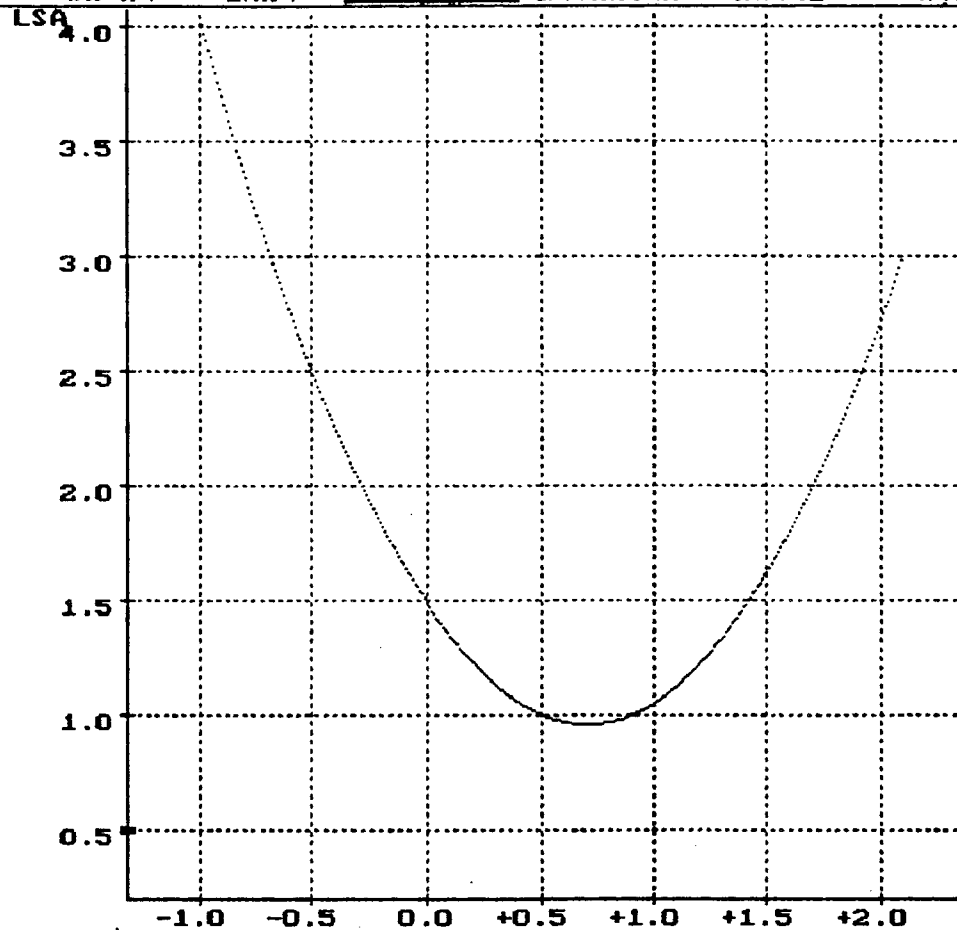
$$p = (R_2 + R_1) / (R_2 - R_1)$$

โดย p แทนค่าแฟคเตอร์รูปร่าง

ค่า R_1 และ R_2 แทนรัศมีความโค้งของผิวเลนส์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

การคิดเครื่องหมายของรัศมีความโค้งเราจะพิจารณาจากตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของรัศมีของผิวโค้งโดยถ้าจุดศูนย์กลางของผิวของเลนส์อยู่ทางด้านขวาของผิวเลนส์จะได้ว่า รัศมีของผิวนั้นจะมีเครื่องหมายเป็นบวก และถ้าจุดศูนย์กลางของผิวของเลนส์อยู่ทางด้านซ้ายของผิวเลนส์จะได้ว่ารัศมีของผิวนั้นมีเครื่องหมายเป็นลบ ซึ่งเมื่อเราเขียนกราฟ หาความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์รูปร่างกับค่าความคลาดทรงกลม จะได้ความสัมพันธ์ออกมา ดังรูปที่ 5 ทำให้สามารถหารูปร่างที่เหมาะสมของเลนส์ที่มีความคลาดน้อย ๆ ได้

เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดทรงกลมจะน้อยที่สุดเมื่อเลนส์ที่ใช้มีแฟคเตอร์รูปร่างเป็น 0.7 แต่สำหรับเลนส์ที่มีแฟคเตอร์รูปร่างเป็น 0.7 จัดทำได้ลำบากเพราะจะต้องกลึงแม่แบบสองหน้าซึ่งในทางปฏิบัติจะมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกเลนส์ที่เป็นเลนส์นูนแกมระนาบชนิดหันด้านนูนเข้ารับแสงซึ่งมีแฟคเตอร์รูปร่างเป็น +1 เพราะมีค่าความคลาดทรงกลมมากกว่าเลนส์ที่มีแฟคเตอร์รูปร่างเท่ากับ 0.7 เพียงเล็กน้อยแต่การสร้างจะง่ายขึ้นมากเพราะว่าจะสร้างแม่แบบที่มีรอยขีดเพียงข้างเดียว



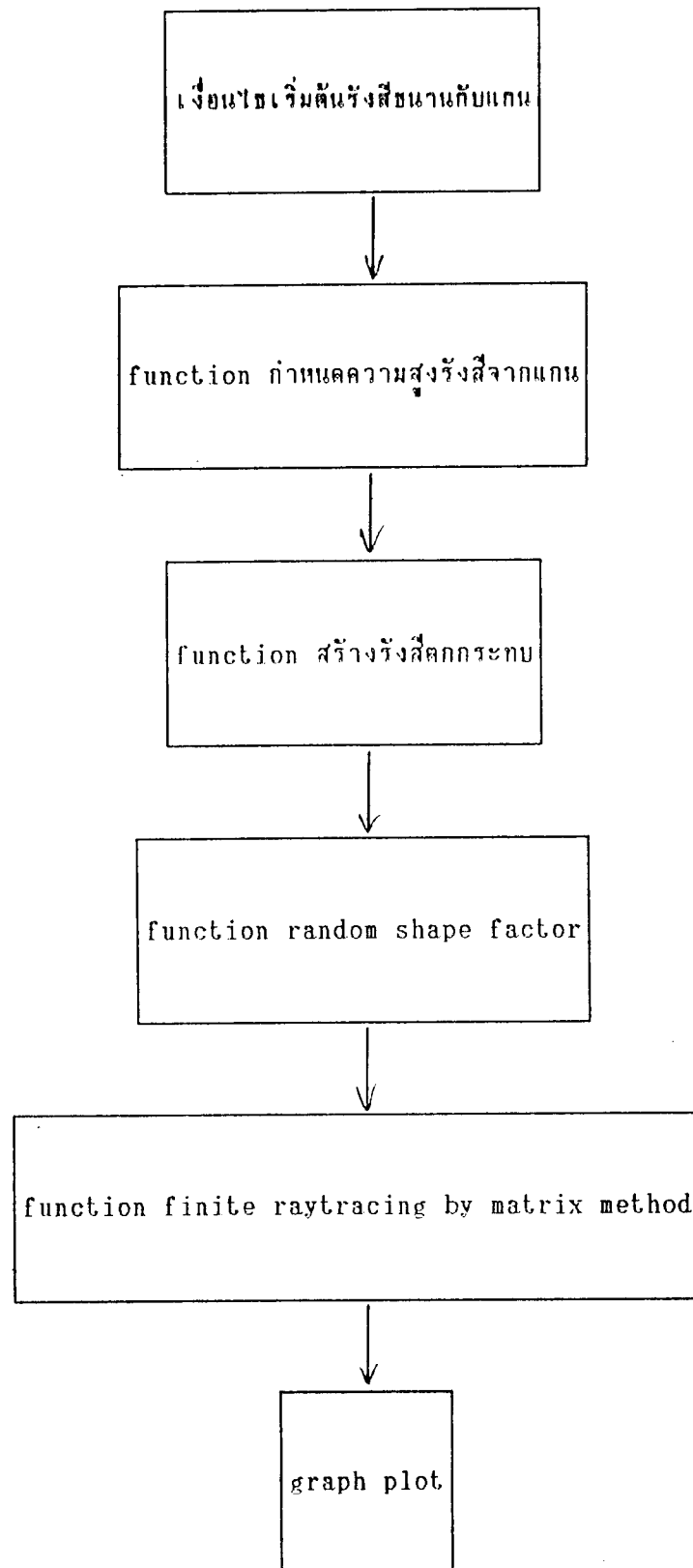
Shape Factor

รูปที่ 5. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดตรงกลมกับแฟกเตอร์รูปร่าง

โปรแกรมออกแบบเลนส์เฟรส์เนล

จากเลนส์ต้นแบบที่เรามาเปลี่ยนรูปร่างให้เป็นเลนส์เฟรส์เนล โดยการแบ่งย่อยส่วนโค้งออกเป็นวงแหวนโดยมีความกว้างเท่า ๆ กันนั้น โดยทั่วไปแล้วความกว้างของวงแหวนนั้นจะน้อยมาก เพื่อให้ส่วนโค้งที่หน้าผิวเลนส์เป็นเส้นตรง ซึ่งจะทำให้การสร้างแม่แบบมีความสะดวกมากขึ้น และความกว้างของวงแหวนจะต้องมีค่ามากเมื่อเทียบกับช่องเปิดทางแสง ทำให้เราสามารถละเว้นการคิดผลกระทบจากการเลี้ยวเบนได้ เพื่อให้ง่ายในการออกแบบ เราจะไม่คิดการสูญเสียความเข้มแสงตรงบริเวณรอยต่อระหว่างวงแหวนของผิวด้านหน้า โปรแกรมที่เขียนมีสองส่วน ส่วนแรกเป็นโปรแกรมสำหรับหาความคลาดทรงกลมของเลนส์ที่มีแฟลคเตอร์รูปร่างต่าง ๆ เพื่อหาแฟลคเตอร์รูปร่างที่เหมาะสมให้ค่าความคลาดทรงกลมมีค่าน้อยที่สุด มีผังการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งผลของโปรแกรม ได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 5

รูปที่ 6 ผังการทำงานโปรแกรมหาความคลาดทรงกลมของเลนส์ที่มีแฟลตเตอร์รูปร่างต่างกัน



ส่วนที่สอง เป็นโปรแกรมสำหรับหามุมเอียงของใบมีดที่ใช้กับแม่พิมพ์เลนส์เฟรส์เนลที่ตำแหน่งความสูง

ต่าง ๆ จากจุดกลางเลนส์

การคำนวณหามุมก้มของใบมีดจะเริ่มจากการให้ค่าข้อมูลเฉพาะของเลนส์คือ

1. ความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ (Lens_dia)
2. รัศมีความโค้งของผิวเลนส์ (R)
3. จำนวนวงแหวน (Zone) เริ่มต้น (Zone_no)

ซึ่งแสดงในรูปที่ 7 (a)

จากค่าข้อมูลที่ได้จะเริ่มการคำนวณจากการหาความหนาของวงแหวนจากความสัมพันธ์

$$\text{ความหนาของวงแหวน (Zone_L)} = \text{Lens_dia} / (2 \cdot \text{Zone_no}) \quad \text{---- (23)}$$

ความหนาของวงแหวนจะเป็นระยะทางตามแกน X ดังรูป

เราจะหาพิกัดของ Z ได้จากความสัมพันธ์ที่เป็นทรงกลมระหว่าง X กับ Z ซึ่งมีรัศมี R ตามที่กำหนดโดย

(เราให้จุดกำเนิดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมเพื่อความสะดวก)

$$z_j = \pm (R^2 - x_j^2)^{1/2} \quad \text{----- (24)}$$

โดยที่ j มีค่าเป็นจำนวนเต็มจาก 0 ถึง Zone_no

x_j มีค่าจาก 0 ถึง Lens_dia โดยเพิ่มขึ้นทีละ Zone_L

คำตอบของสมการที่ 24 จะมีทั้งค่าที่เป็นบวกและลบ เราเลือกค่า z_j ที่เป็นลบเพราะเรากำหนดให้ผิวโค้ง

อยู่ทางด้านซ้าย เพราะเลนส์ที่พิจารณาเป็นเลนส์ที่มีแฟกเตอร์รูปร่างเท่ากับ +1

ส่วนค่า X เราจะคิดค่า X ในทางที่เป็นบวกเท่านั้นเพราะเลนส์มีสมมาตรกับแกน Z จากสมการที่

24 เราจะทราบตำแหน่งบนผิวเลนส์ที่ความสูงต่างกันเท่ากับ Zone_L เราจะหาความหนาของเลนส์-
เฟรส์เนลโดยอาศัยความสัมพันธ์

$$L_Thick = z_{zone\ no} - z_{zone\ no - 1} \quad \text{-----}(25)$$

โดย L_Thick แทนความหนาของเลนส์เฟรส์เนล

เพื่อที่จะแบ่งเลนส์ออกเป็นส่วน ๆ ที่มีความหนาเท่ากันจึงกำหนดตำแหน่ง

$$Base_Pts_i = z_i + L_Thick \quad \text{-----}(26)$$

หรือ $Base_Pts - z_i = L_Thick \quad \text{-----}(27)$

โดยที่ i เป็นจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 0 ไปจนถึง Zone_no - 1 ซึ่งตำแหน่ง Base_Pts เป็นตำแหน่งใน
ทางแกน Z จากรูปที่ 7 (b) เราจะหาตำแหน่งของ Upper_Base_Pts ได้จาก

$$Upper_Base_Pts_i = z_i + |L_Thick - (z_{i-1} - z_i)| \quad \text{---}(28)$$

โดยที่ i เป็นจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 1 ไปจนถึง Zone_no

เราจะหาเวกเตอร์จาก (x_i, z_i) ไปยัง (x_{i-1}, z_{i-1}) ให้เป็นเวกเตอร์ $ArcV_i$ กำหนดโดย

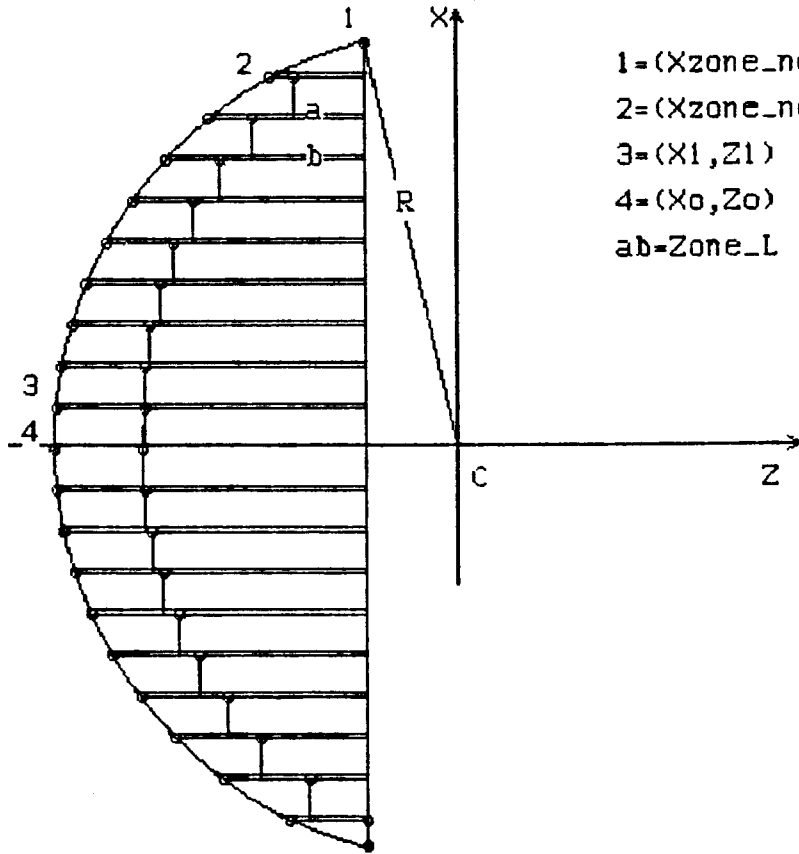
$$ArcV_i = (x_{i-1} - x_i)e_x + (z_{i-1} - z_i)e_z \quad \text{-----}(29)$$

โดย e_x, e_z เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวแกน X และ Z ตามลำดับ

โดยที่ i เป็นจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 1 ไปจนถึง Zone_no

และหาเวกเตอร์จาก $(x_i, Upper_Base_Pts_i)$ ไปยัง $(x_{i-1}, Upper_Base_Pts_{i-1})$

กำหนดเป็น $BaselineV_i$

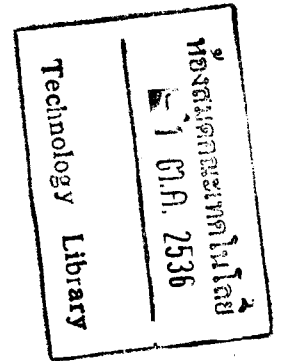


$1 = (X_{zone_no}, Z_{zone_no})$
 $2 = (X_{zone_no-1}, Z_{zone_no-1})$
 $3 = (X_1, Z_1)$
 $4 = (X_0, Z_0)$
 $ab = Zone_L$

รูปที่ 7 (a) การแบ่งเลนส์เป็นวงแหวน

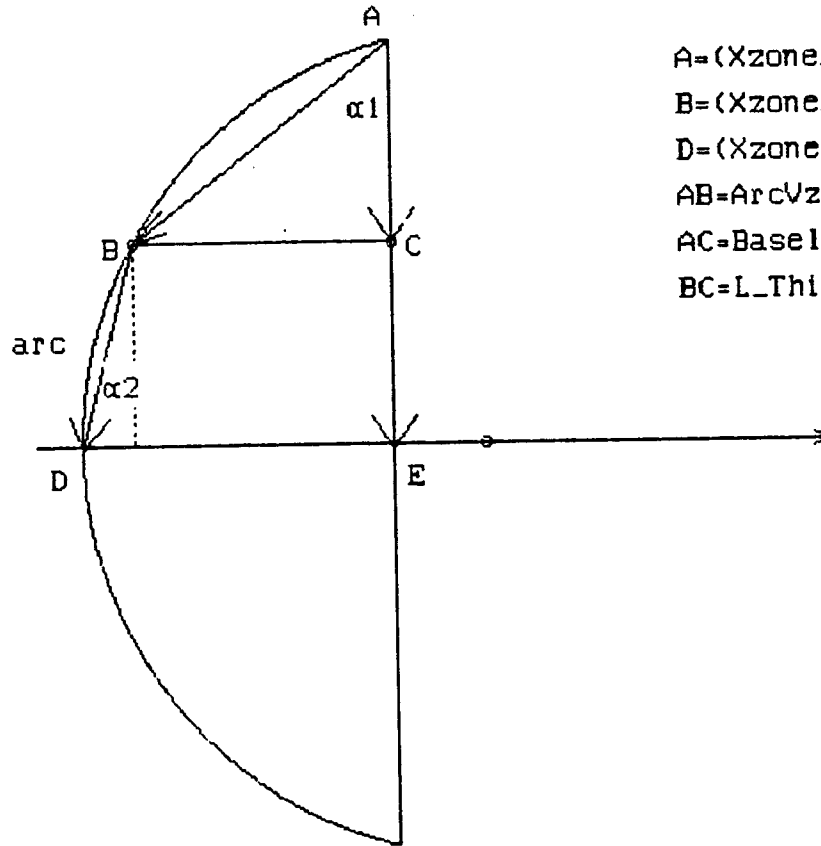


หอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น



385
D44
7451
L. 2

พ.ค. 02/015 ๓๐



$A=(Xzone_no,Zzone_no)$
 $B=(Xzone_no-1,Zzone_no-1)$
 $D=(Xzone_no-2,Zzone_no-2)$
 $AB=ArcVzone_no$
 $AC=BaselineVzone_no$
 $BC=L_Thick$

รูปที่ 7 (บ) แสดงรายละเอียดมุมของใบมีด

$$\text{BaselineV}_i = (x_{i-1} - x_i)e_x + (\text{Upper_Base_Pts}_{i-1} - \text{Upper_Base_Pts}_i)e_z \quad \text{-----}(30)$$

โดย e_x , e_z เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวแกน X และ Z ตามลำดับ

โดยที่ i เป็นจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 1 ไปจนถึง Zone_no

เวกเตอร์ในสมการที่ 29 และ 30 เมื่อนำมาคูณเชิงปริมาตร(dot product) เราจะได้

$$\text{ArcV}_i \cdot \text{BaselineV}_i = \|\text{ArcV}_i\| \|\text{BaselineV}_i\| \cos \alpha_i \quad \text{-----}(31)$$

หรือ

$$\cos \alpha_i = (\text{ArcV}_i \cdot \text{BaselineV}_i) / (\|\text{ArcV}_i\| \|\text{BaselineV}_i\|) \quad \text{---}(32)$$

โดยที่มุม α_i เป็นมุมที่เวกเตอร์ ArcV_i กระทำกับเวกเตอร์ BaselineV_i ซึ่งก็คือมุมที่ใช้ในการตั้งใบมีดนั่นเอง ซึ่งถ้าเครื่องกลึงมีความละเอียดมาก ๆ เช่นเครื่องกลึงที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ก็สามารถเพิ่มจำนวนวงแหวนได้อีก แต่มุมก้มของใบมีดนี้จะใช้ได้เมื่อจำนวนวงแหวนมากพอที่จะทำให้ผิวโค้งของเลนส์ในแต่ละวงแหวนประมาณได้ว่าเป็นเส้นตรง การคำนวณนี้ได้ผลลัพธ์เป็นมุมของใบมีดของเครื่องกลึงที่ระยะห่างต่าง ๆ จากจุดศูนย์กลางของเลนส์ และยังมีกรอบแบบเลนส์เฟรส์แนลที่ผิวไม่เป็นทรงกลม ซึ่งได้นำเสนอไว้ในภาคผนวก ก.

เลนส์เฟรส์เนลสำหรับรวมแสงอาทิตย์

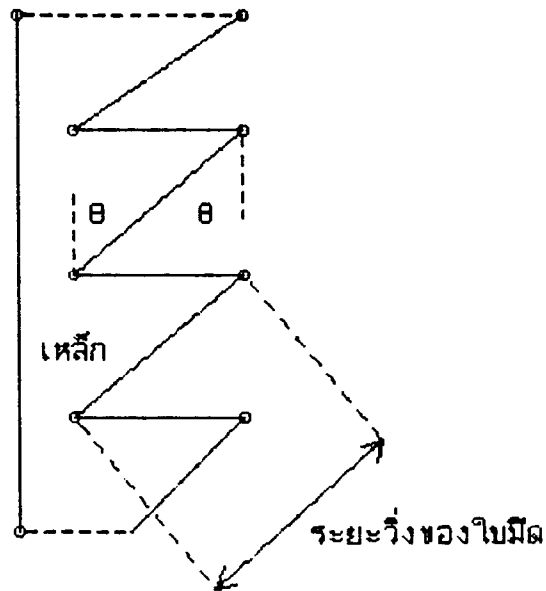
ในตอนนี้เป็นการใช้โปรแกรมที่ได้ ออกแบบเลนส์เฟรส์เนลสำหรับรวมแสงอาทิตย์ โดยกำหนดลักษณะทางกายภาพ ล้นได้แก่ ความยาวโฟกัส เส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ คัตซีนัทิกเห ของวัสดุที่ใช้ทำเลนส์ และจำนวนวงแหวน(zone) ผลที่ได้จากโปรแกรมจะได้มุมของใบมีดที่กระทำกับผิวหน้าชิ้นงาน และระยะวิ่งของใบมีดที่ใช้กลึงแม่แบบ(cutter distance) ตัวอย่างเช่น ต้องการออกแบบเลนส์ที่มีลักษณะทางกายภาพดังนี้ (ดูรูปที่ 8 ประกอบ)

ความยาวโฟกัส	25.0 เซนติเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์	10.0 เซนติเมตร
ค่าคัตซีนัทิกเหของอะคริลิค	1.48 (กรณีที่เลนส์ทำด้วยอะคริลิค)
แบ่งเป็นวงแหวนจำนวน	12 วง

ผลที่ได้จากโปรแกรมจะได้มุมของใบมีดที่กระทำกับผิวหน้าชิ้นงาน และระยะวิ่งของใบมีดที่ใช้กลึงแม่แบบมีค่ามุมต่าง ๆ ค้างหน้าถัดไป

ตารางที่ 1 แสดงค่ามุมและระยะวิ่งของใบมีดที่ชักลิ้งแม่แบบ

มุม	ระยะวิ่งของใบมีด
1.00 Deg.	4.16 mm
3.00 Deg.	4.17 mm
5.00 Deg.	4.18 mm
6.90 Deg.	4.19 mm
8.90 Deg.	4.21 mm
10.8 Deg.	4.24 mm
12.7 Deg.	4.27 mm
14.6 Deg.	4.30 mm
16.5 Deg.	4.34 mm
18.3 Deg.	4.38 mm
20.1 Deg.	4.43 mm
21.9 Deg.	4.49 mm



รูปที่ 8 มุมและระยะวิ่งของใบมีด ที่ใช้ในการกลึงแม่แบบ



ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



โปรแกรมที่ 1: ออกแบบและผลิตแผ่นฟิล์ม โดยวิธีเมทาทรอกซ์

ลักษณะการใช้งาน

ใช้สำหรับออกแบบเลนส์เฟรส์เนลสำหรับรวมแสงอาทิตย์

ผู้ใช้งานจะต้องใส่ข้อมูล

ความยาวโฟกัส(หน่วยมิลลิเมตร)

เส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์(หน่วยมิลลิเมตร)

ค่าดัชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ทำเลนส์

จำนวนวงแหวน(zone)

โปรแกรมจะแสดงผลดังตารางที่ 1 และยังสามารถเลือกการแสดงผลทางพรินเตอร์ หรือทางหน้าจอก็ได้



ลักษณะการใช้งาน

ใช้สำหรับออกแบบเลนส์เฟรส์เนลสำหรับรวมแสงอาทิตย์

ผู้ใช้จะต้องใส่ข้อมูล

ความยาวโฟกัส(หน่วยมิลลิเมตร)

...เต็ม...

เส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์(หน่วยมิลลิเมตร)

...เต็ม...

ค่าดัชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ทำเลนส์

...เต็ม...

จำนวนวงแหวน(zone)

...เต็ม...

โปรแกรมจะแสดงผลดังตารางที่ 1 และยังสามารถเลือกการแสดงผลทางนรีนเตอร์ หรือทางหน้าจอก็ได้



Program designed Fresnel lens
For solar (input in mm unit)
Input Focal length of lens : 250
Input diameter of lens : 100
input refractive index of lens : 1.48
Input number of zone : 12

ตัวอย่างผลการรันโปรแกรมแสดงผลออกทางจอภาพ



Data angle of fresnel lens

Focal length := 250.00 mm

Lens diameter := 100.00 mm

Refractive index := 1.480

number of zone := 12

Angle of cutter	cutter distance	
-----------------	-----------------	--

angle 1 := 1.0 Deg.	4.1673 mm
angle 2 := 3.0 Deg.	4.1723 mm
angle 3 := 5.0 Deg.	4.1823 mm
angle 4 := 6.9 Deg.	4.1974 mm
angle 5 := 8.9 Deg.	4.2173 mm
angle 6 := 10.8 Deg.	4.2422 mm
angle 7 := 12.7 Deg.	4.2720 mm
angle 8 := 14.6 Deg.	4.3065 mm
angle 9 := 16.5 Deg.	4.3458 mm
angle 10 := 18.3 Deg.	4.3897 mm
angle 11 := 20.1 Deg.	4.4382 mm
angle 12 := 21.9 Deg.	4.4911 mm

Do you want to continue ?(Y=YES,N=NO)



Data angle of fresnel lens

Focal length := 250.00 mm

Lens diameter := 100.00 mm

Refractive index := 1.480

number of zone := 20

Angle of cutter	cutter distance	Angle of cutter	cutter distance
angle 1 := 0.6 Deg.	2.5001 mm	angle 16 := 18.0 Deg.	2.6283 mm
angle 2 := 1.8 Deg.	2.5012 mm	angle 17 := 19.1 Deg.	2.6451 mm
angle 3 := 3.0 Deg.	2.5034 mm	angle 18 := 20.1 Deg.	2.6629 mm
angle 4 := 4.2 Deg.	2.5066 mm	angle 19 := 21.2 Deg.	2.6816 mm
angle 5 := 5.4 Deg.	2.5110 mm	angle 20 := 22.3 Deg.	2.7013 mm
angle 6 := 6.5 Deg.	2.5164 mm		
angle 7 := 7.7 Deg.	2.5229 mm		
angle 8 := 8.9 Deg.	2.5304 mm		
angle 9 := 10.1 Deg.	2.5390 mm		
angle 10 := 11.2 Deg.	2.5487 mm		
angle 11 := 12.4 Deg.	2.5594 mm		
angle 12 := 13.5 Deg.	2.5711 mm		
angle 13 := 14.6 Deg.	2.5839 mm		
angle 14 := 15.8 Deg.	2.5977 mm		
angle 15 := 16.9 Deg.	2.6125 mm		

Do you want to continue ?(Y=YES,N=NO)

ตัวอย่างผลการรันโปรแกรมแสดงผลลออกทางเครื่องพิมพ์

Data angle of fresnel lens
 Focal length := 250.00 mm
 Lens diameter := 100.00 mm
 Refractive index := 1.480
 number of zone := 12
 Zone length := 4.17 mm

Angle of cutter	cutter distance
angle 1 := 1.0 Deg.	4.1673 mm
angle 2 := 3.0 Deg.	4.1723 mm
angle 3 := 5.0 Deg.	4.1823 mm
angle 4 := 6.9 Deg.	4.1974 mm
angle 5 := 8.9 Deg.	4.2173 mm
angle 6 := 10.8 Deg.	4.2422 mm
angle 7 := 12.7 Deg.	4.2720 mm
angle 8 := 14.6 Deg.	4.3065 mm
angle 9 := 16.5 Deg.	4.3458 mm
angle 10 := 18.3 Deg.	4.3897 mm
angle 11 := 20.1 Deg.	4.4382 mm
angle 12 := 21.9 Deg.	4.4911 mm

Data angle of fresnel lens
 Focal length := 250.00 mm
 Lens diameter := 100.00 mm
 Refractive index := 1.480
 number of zone := 20
 Zone length := 2.50 mm

Angle of cutter	cutter distance
angle 1 := 0.6 Deg.	2.5001 mm
angle 2 := 1.8 Deg.	2.5012 mm
angle 3 := 3.0 Deg.	2.5034 mm
angle 4 := 4.2 Deg.	2.5066 mm
angle 5 := 5.4 Deg.	2.5110 mm
angle 6 := 6.5 Deg.	2.5164 mm
angle 7 := 7.7 Deg.	2.5229 mm
angle 8 := 8.9 Deg.	2.5304 mm
angle 9 := 10.1 Deg.	2.5390 mm
angle 10 := 11.2 Deg.	2.5487 mm
angle 11 := 12.4 Deg.	2.5594 mm
angle 12 := 13.5 Deg.	2.5711 mm
angle 13 := 14.6 Deg.	2.5839 mm
angle 14 := 15.8 Deg.	2.5977 mm
angle 15 := 16.9 Deg.	2.6125 mm
angle 16 := 18.0 Deg.	2.6283 mm
angle 17 := 19.1 Deg.	2.6451 mm
angle 18 := 20.1 Deg.	2.6629 mm
angle 19 := 21.2 Deg.	2.6816 mm
angle 20 := 22.3 Deg.	2.7013 mm

สรุป และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้โปรแกรมออกแบบเลนส์เฟรส์เนลที่มีเลนส์ต้นแบบเป็นเลนส์ผิวทรงกลมแกมระนาบ สำหรับใช้รวมแสงอาทิตย์ โปรแกรมที่ได้นี้จะให้มุมเอียงของใบมีด (ที่กระทำกับผิวหน้าของชิ้นงาน) ที่ใช้กัดแม่พิมพ์เลนส์เฟรส์เนลที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ จากจุดกลางเลนส์ ซึ่งจะ เป็นข้อมูลที่จะใช้ในการตั้งใบมีดกัดแม่แบบ และจะทำการทดสอบโปรแกรมโดยออกแบบสร้างเลนส์เฟรส์เนลจากแผ่นพลาสติกอะครีลิก สำหรับโครงการในปีต่อไป

โปรแกรมการออกแบบเลนส์เฟรส์เนลนี้มีลักษณะแบบเมนูที่แสดงผลเป็นภาษาไทย กล่าวคือ มีหัวข้อเมนูให้เลือกซึ่งหัวข้อดังกล่าวจะตรงกับรายงานฉบับนี้ ได้แก่ บทนำ ทฤษฎี การคำนวณงาน ผลการวิจัย สรุป ซึ่งมีรายละเอียดการใช้โปรแกรมมีอยู่ในภาคผนวก ข.

คงได้กล่าวแล้วว่าโปรแกรมการออกแบบเลนส์เฟรส์เนลนี้แสดงผลเป็นภาษาไทย โดยที่ใช้ฟอนท์ NORMAL.FON ของ CU.Writer Version 1.53 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ผลการวิจัยพบว่า แนวการออกแบบเลนส์เฟรส์เนล สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆตามลักษณะเลนส์ต้นแบบเป็นเช่นไร ได้แก่ การออกแบบเลนส์เฟรส์เนลที่มีเลนส์ต้นแบบเป็นเลนส์ผิวทรงกลม การออกแบบเลนส์เฟรส์เนลที่มีเลนส์ต้นแบบเป็นเลนส์ที่ไม่ใช่ผิวทรงกลม และการออกแบบเลนส์เฟรส์เนลที่มีต้นแบบเป็นปริซึม จึงน่าที่จะมีโครงการงานวิจัยศึกษาเปรียบเทียบ ผลการออกแบบเลนส์เฟรส์เนลที่มีพื้นฐานที่มากที่แตกต่างกันทั้ง 3 กลุ่มในโอกาสต่อไป