

การคืนรูปตัวแปรไอโซคลินิกด้วยวิธีการปรับค่าสนามโคไซน์ทิศทาง

Isoclinic Unwrapping by Regularizing Direction Cosine Field

พิเชษฐ์ พินิจ

ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทร 0-2470-8522 โทรสาร 0-2470-8527 อีเมลล์ pichet.pin@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการคืนรูปตัวแปรไอโซคลินิกในโฟโตอีลาสติซิตีเชิงดิจิทัลด้วยวิธีการปรับค่าสนามโคไซน์ทิศทาง ในเบื้องต้นแผนภาพไอโซคลินิกในย่านสัมผัส ($-\pi/4$ ถึง $+\pi/4$) จะถูกกำหนดหาด้วยวิธีการเลื่อนเฟสขึ้น จากนั้นค่าโคไซน์แสดงทิศทางสามารถกำหนดได้จากค่าไอโซคลินิกในรูปของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ และด้วยวิธีการหาค่าต่ำสุดของตัวแปรที่แสดงค่าผิดพลาดซึ่งอยู่ในพจน์ของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ดังกล่าวนี้ก็สามารถกำหนดหาแผนภาพตัวแปรไอโซคลินิกในย่านจริง ($-\pi/2$ ถึง $+\pi/2$) ได้ จากผลการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพระหว่างแผนภาพไอโซคลินิกที่ได้จากการทดลองกับการจำลองพบมีความสอดคล้องกัน แต่ยังมีจุดภาพที่ผิดพลาดอันเนื่องมาจากอิทธิพลของตัวแปรไอโซโครมาติก

Abstract

This paper presents an isoclinics phase unwrapping in digital photoelasticity by regularizing the directional cosine field. The isoclinics map in the range of $-\pi/4$ to $+\pi/4$ is first determined using the four-step phase shifting method. The directional cosines of each point can be expressed from the isoclinics map in terms of sin and cosine functions. With finding the minimum value of the parameter expressed in terms of the sin and cosine functions, the isoclinic values in the range of $-\pi/2$ to $+\pi/2$ are determined. Comparing the results of applying the unwrapping method to both simulated and experimentally obtained fringes shows almost similar isoclinics maps with some defects in the experimental one due to the effect of the isochromatic parameter.

1. คำนำ

การคืนรูปตัวแปรไอโซคลินิก (Isoclinic Unwrapping) เป็นส่วนหรือขั้นตอนหลักที่สำคัญอันหนึ่งในโฟโตอีลาสติซิตี สาเหตุสำคัญที่ต้องมีขั้นตอนการคืนรูปนี้ก็เนื่องมาจากว่าตัวแปรไอโซคลินิกซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับทิศทางของความเค้นหลัก (σ_1 หรือ σ_2) นั้น

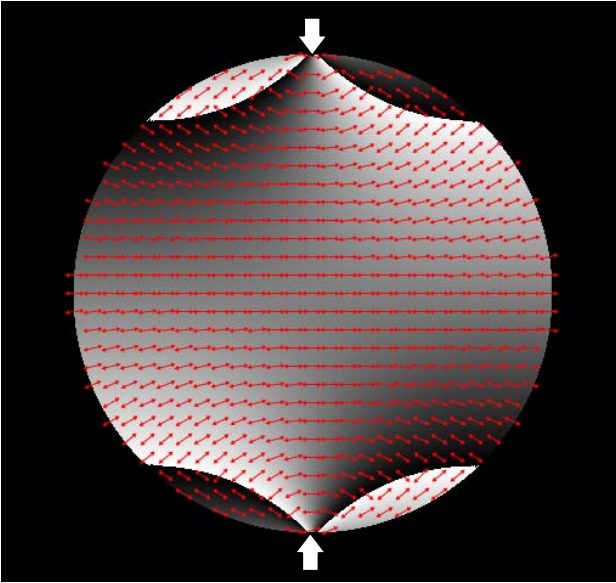
สามารถถูกกำหนดค่าได้ในช่วงหรือย่านที่จำกัดย่านหนึ่งเท่านั้น กล่าวคือย่านสูงสุดที่สามารถคำนวณมีค่าตั้งแต่ $-\pi/4$ ถึง $+\pi/4$ ในขณะที่ย่านทางกายภาพหรือย่านจริงนั้นมีความอยู่ในช่วง $-\pi/2$ ถึง $+\pi/2$ ปัญหานี้จะก่อให้เกิดความคลุมเครือ (Ambiguity) ที่ว่าค่าทิศทางของความเค้นหลักที่คำนวณได้นั้นเป็นของความเค้นหลักตัวใด

ในหลักทางทฤษฎีทางด้านกลศาสตร์วัสดุปัญหานี้จะจำกัดที่ก็เกิดขึ้น พิจารณาสมการที่ใช้กำหนดค่าทิศทางความเค้นหลักในพจน์ขององค์ประกอบความเค้นในระบบพิกัดฉาก

$$\tan 2\phi = \frac{2\tau_{xy}}{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})} \quad (1)$$

จะเห็นว่าค่าของมุม ϕ จะอยู่ในย่าน $-\pi/4$ ถึง $+\pi/4$ โดยที่ฟังก์ชันแทนเจนต์ผกผันเป็นฟังก์ชันที่ไม่ขึ้นอยู่กับการเครื่องหมาย กล่าวคือให้ผลลัพธ์ในจุดภาคที่หนึ่งและสี่เท่านั้น สังเกตได้ว่าหากใช้ฟังก์ชันแทนเจนต์ผกผันที่ขึ้นอยู่กับการเครื่องหมายแล้ว (ให้ผลลัพธ์ทั้งสี่จุดภาค) ค่าของ ϕ จะอยู่ในย่าน $-\pi/2$ ถึง $+\pi/2$ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเกิดส่วนที่เกิดความสับสนหรือข้อสงสัยเช่นกันซึ่งในเรื่องนี้อยู่นอกเหนือวัตถุประสงค์ของบทความนี้ สำหรับทางทฤษฎีนั้นปัญหานี้สามารถแก้ได้ด้วยวิธีใดก็ได้หรือการวาดวงกลมมอร์

เมื่อค่าของมุม ϕ มีค่าเข้าใกล้ $-\pi/4$ หรือเท่ากับ $+\pi/4$ แล้วก็จะเกิดแนวเส้นการกระโดดของไอโซคลินิก (Lines of Isoclinic Jumps) รูปที่ 1 แสดงแผนภาพไอโซคลินิกในย่าน $-\pi/4$ ถึง $+\pi/4$ ของตัวแบบแผ่นจานกลมรับแรงเข้กดตรงกันข้ามผ่านแนวเส้นผ่านศูนย์กลางโดยที่ค่าของไอโซคลินิกได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นรหัสสี กล่าวคือ $-\pi/4$ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีดำในขณะที่ $+\pi/4$ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีขาว หากกำหนดให้พื้นที่ที่ไอโซคลินิกมีความต่อเนื่องแสดงถึงทิศทางของ σ_1 แล้ว พื้นที่ส่วนที่เหลือก็จะแสดงทิศทางของ σ_2 (พิจารณาทิศทางของลูกศร) ปัญหานี้หากไม่มีการแก้ไขแล้ว ก็จะทำให้การกำหนดหาตัวแปรไอโซโครมาติกซึ่งสัมพันธ์กับขนาดหรือค่าความแตกต่างของความเค้นหลัก ($\sigma_1 - \sigma_2$) เป็นไปได้โดยยากมากและยังส่งผลถึงกระบวนการแยกหาองค์ประกอบความเค้น (Stress Separation) นอกจากนี้หากกำหนดหา



รูปที่ 1 แผนภาพไอโซคลินิกในย่าน $-\pi/4$ ถึง $+\pi/4$ พร้อมทั้งลูกศรแสดงทิศทาง (Vector Field) เทียบกับแนวนอน ของตัวแบบแผ่นจานกลมรับแรงเข้มกดตรงกันข้ามผ่านแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยที่สีขาวคือ $+\pi/4$ และสีดำคือ $-\pi/4$ และลูกศรสีขาวแสดงจุดที่แรงกระทำ

ตัวแปรไอโซคลินิกในย่านจริงได้แล้วก็สามารถกำหนดหาแผนภาพวิถีของความเค้น (Stress Trajectory) ได้ ซึ่งแผนภาพวิถีความเค้นนี้เป็นส่วนสำคัญอย่างมากในเรื่องที่เกี่ยวกับออกแบบทางด้านรูปร่างของชิ้นส่วนเพื่อความเหมาะสมสุด (Shape Optimum Design) ดังนั้นการค้นหาคำแปรไอโซคลินิกจึงเป็นเรื่องที่มีสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

หากสังเกตลูกศรที่แสดงทิศทางความเค้นหลักในรูปที่ 1 อีกครั้งก็จะพบว่าสามารถแตกออกได้ทั้งสองแนวแกน (แนวแกน x และแกน y) กล่าวคือ $\cos \phi$ และ $\sin \phi$ ตามลำดับและทั้งสององค์ประกอบนี้ต่างก็เป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector) ซึ่งเป็นไปตามเอกลักษณ์ $\sin^2 \phi + \cos^2 \phi = 1$ ด้วยเหตุนี้แล้ว องค์ประกอบทั้งสองก็คือโคซายน์ทิศทางของความเค้นหลัก

ดังนั้นหากใช้โคซายน์ทิศทางในการค้นหาคำแปรไอโซคลินิกโดยมีข้อกำหนดที่ว่าทิศทางของความเค้นหลักจะต้องมีความต่อเนื่องภายในย่านจริง กล่าวคือ $-\pi/2$ ถึง $+\pi/2$ แล้วก็สามารถที่จะกำหนดตัวแปรไอโซคลินิกในย่านจริงนั้นได้ ซึ่งบทความนี้จะนำเสนอวิธีการค้นหาคำแปรไอโซคลินิกด้วยมโนทัศน์ดังกล่าว

2. สมการความเข้มแสงจากอุปกรณ์เบี่ยงเบนแสงเชิงระนาบแบบฉากหลังมืด

สมการของความเข้มแสง I ที่ผ่านออกมาจากแผ่นวิเคราะห์ ณ จุดพิกัด (x, y) ใดๆ บนตัวแบบ เมื่อจัดตำแหน่งให้แกนแสงของแผ่นโพลาไรซ์และแผ่นวิเคราะห์ตั้งฉากกัน ซึ่งเรียกว่า การจัดอุปกรณ์แบบฉากหลังมืด (Dark-field Setup) สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ [1]

$$I = I_p \sin^2(\pi N) \sin^2 2(\phi - \beta) + I_b \quad (1)$$

โดยที่ I_p คือความเข้มแสงที่ออกมาจากแผ่นโพลาไรซ์, N คือ อันดับรั้วหรือตัวแปรไอโซโครมาติก, ϕ คือมุมระหว่างทิศทางของความเค้นหลัก σ_1 กับแกนนอนหรือตัวแปรไอโซคลินิก, β คือมุมระหว่างแกนแสงของแผ่นวิเคราะห์กับแกนนอนและ I_b คือความเข้มแสงฉากหลัง

3. การกำหนดหาตัวแปรไอโซคลินิก

โดยอาศัยหลักการเลื่อนเฟสสี่ชั้น กล่าวคือเปลี่ยนตำแหน่งเชิงมุมหรือเปลี่ยนค่ามุม β ไปซึ่งก็จะทำให้เกิดสมการความเข้มแสงสี่สมการ โดยเมื่อนำรวมกันทางคณิตศาสตร์แล้ว ก็จะได้สมการที่ใช้กำหนดหาตัวแปรไอโซคลินิกดังนี้ [2]

$$\phi = \frac{\pi}{8} - \frac{1}{4} \tan^{-1} \left(\frac{I_1^s - I_3^s}{I_2^s - I_4^s} \right) \quad \text{โดยที่ } \sin^2(\pi N) \neq 0 \quad (2)$$

โดยที่ I_m^s คือความเข้มแสงรวมของระบบสี R, G, และ B ที่ตำแหน่งเชิงมุม m ($m = 1, 2, 3, 4$)

พึงสังเกตว่าค่าตัวแปรไอโซคลินิกที่ได้รับจากสมการ (2) จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง $+\pi/4$ ซึ่งค่าของตัวแปรไอโซคลินิกในย่าน $-\pi/4$ ถึง $+\pi/4$ ที่จำเป็นสำหรับเริ่มต้นกระบวนการค้นหาคำแปรไอโซคลินิกที่กำหนดหาได้โดยอาศัยการเปรียบเทียบค่าความเข้มแสง [2] ซึ่งแผนภาพไอโซคลินิกที่แสดงในรูปที่ 1 นั้นก็กำหนดหาโดยใช้สมการ (2)

4. การค้นหาคำแปรไอโซคลินิก

ในรูปที่ 1 จะเห็นว่าทิศทางของลูกศรสีแดง จะมีความต่อเนื่องกันในอาณาบริเวณที่เป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ของแผนภาพ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาอาณาบริเวณเล็กๆ สี่ส่วนนั้นก็พบว่า ทิศทางของลูกศรจะเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ $-\pi/2$ หรือ $+\pi/2$ โดยที่เครื่องหมายลบและบวกนั้นบ่งบอกถึงทิศทางของการหมุนของลูกศร ดังนั้นหากพิจารณาระยะทางในการเปลี่ยนค่าของตัวแปรไอโซคลินิกแล้วก็จะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนขนาด (Modulo) ของการเปลี่ยนแปลงนี้ก็คือ $\pi/2$ ซึ่งค่านี้จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการค้นหาคำแปรไอโซคลินิก

4.1 หลักการ

ในเบื้องต้นหากกำหนดให้อาณาบริเวณที่เป็นพื้นที่ใหญ่แสดงถึงทิศทางความเค้นหลัก σ_1 แล้วอาณาบริเวณส่วนที่เหลือก็จะแสดงทิศทางความเค้นหลัก σ_2 ดังนั้นหากทำการหมุนเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่แสดงทิศทางความเค้นหลัก σ_2 ให้มีทิศทางที่สอดคล้องกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่แสดงทิศทางความเค้นหลัก σ_1 แล้วก็จะได้แผนภาพที่มีความต่อเนื่องทั่วทั้งสนาม จากค่ากล่าวนี้ความหมายที่แท้จริงก็คือ ค่าของมุมระหว่างแนวเส้นของเวกเตอร์หนึ่งทั้งสองจะต้องมีค่าน้อยที่สุดซึ่งสามารถกำหนดเป็นสมการได้ว่า

$$\varepsilon = \min_k \{ [\cos \phi_{\text{ref}} - \cos(\phi + k\pi/2)]^2 + [\sin \phi_{\text{ref}} - \sin(\phi + k\pi/2)]^2 \} \quad (3)$$

โดยที่ ε คือค่าความเบี่ยงเบนระหว่างเวกเตอร์หนึ่งหน่วยทั้งสอง, ϕ_{ref} และ ϕ คือค่ามุมของ σ_1 ของจุดที่อยู่ในพื้นที่ใหญ่และ σ_2 ของจุดที่อยู่ในพื้นที่เล็กเทียบกับแกนนอนตามลำดับ และ k คือค่าตัวแปรการหมุนซึ่งเป็นจำนวนเต็มมีค่าเท่ากับ -1, 0 และ 1

จากสมการ (3) จะเห็นได้ว่าที่ค่า k ค่าหนึ่งเท่านั้นที่ทำให้ ε มีค่าต่ำหรือน้อยที่สุด ดังนั้นทิศทางที่ถูกต้องของ σ_1 ณ จุดที่พิจารณาหรือจุดที่อยู่ในพื้นที่เล็ก (จุดที่แสดงทิศทาง σ_2) ก็คือ

$$\phi_{\sigma_1} = \phi + k\pi / 2 \quad (4)$$

โดยที่ k กำหนดหาได้จากสมการ (3)

4.2 ขั้นตอนการคืนรูป

ขั้นตอนการคืนรูปมีดังนี้

1. กำหนดหาแผนภาพไอโซคลินิกในย่าน $-\pi/4$ ถึง $+\pi/4$ โดยอาศัยสมการ (2) และการเปรียบเทียบความเข้มแสง

2. กำหนดขอบเขตของพื้นที่ใหญ่และพื้นที่เล็ก (ขอบเขตที่ติดต่อกันระหว่างสีขาวกับสีดำในรูปที่ 1) โดยอาศัยตัวคงที่ T ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่ตัวคงที่ T นี้จะมีลักษณะเหมือนตัวกรอง (Filter) กล่าวคือ หากกำหนดให้ตัวคงที่ $T = 0.5$ และที่จุดภาพใดๆ หากค่า $\phi \geq -\pi/4T$ และ $\phi \leq +\pi/4T$ แล้วจุดภาพนั้นจะถูกกำหนดให้อยู่ในขอบเขตดังกล่าว ซึ่งจะเห็นได้ว่าหากตัวคงที่ T มีค่ามากขึ้นและเข้าใกล้ 1 ขอบเขตของพื้นที่ที่ได้ก็จะเข้าใกล้ขอบเขตระหว่างสีขาวและดำในรูปที่ 1 หลังจากเสร็จสิ้นการกำหนดหาขอบเขตนี้แล้วก็จะได้อะเรย์สองมิติหรือไบนารีอะเรย์โดยที่จุดที่ผ่านเงื่อนไขก็จะมีค่าเท่า 1 ส่วนจุดที่ไม่ผ่านเงื่อนไขก็จะมีค่าเป็น 0

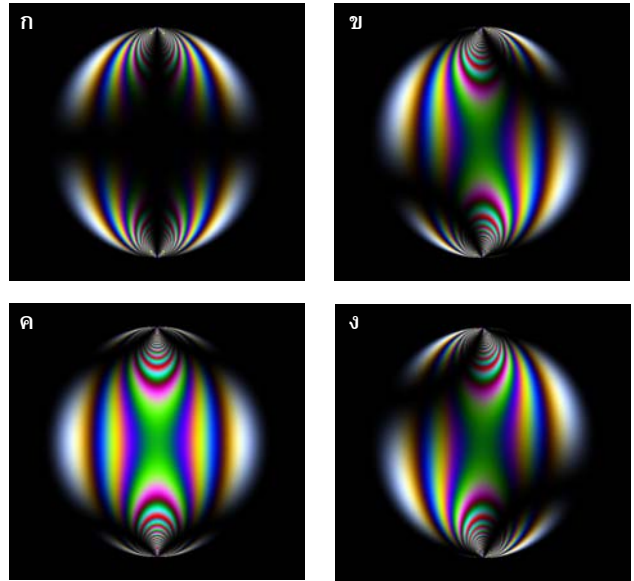
3. จากที่ได้กล่าวข้างต้น พื้นที่ใหญ่จะเป็นพื้นที่ที่แสดงทิศทางของความเค้นหลัก σ_1 ซึ่งจะถูกใช้เป็นพื้นที่เริ่มต้นการคืนรูป ดังนั้นพื้นที่เล็กอื่นๆ จะต้องถูกลบออกไปจากไบนารีอะเรย์ที่ได้ในขั้นที่ 2 การลบออกนี้สามารถกระทำได้โดยใช้เอกอริทึมกำหนดสัญลักษณ์กลุ่มย่อยต่อเนื่อง (Connected Component Labeling Algorithm) [3] กล่าวคือทำการอ่านข้อมูลในไบนารีอะเรย์และกำหนดสัญลักษณ์ประจำกลุ่มของจุดภาพที่ต่อเนื่องกัน จากนั้นเลือกสัญลักษณ์ของกลุ่มที่มีจำนวนจุดภาพมากที่สุดซึ่งก็คือพื้นที่ที่แสดงทิศทางของ σ_1 นั่นเอง ส่วนกลุ่มที่เหลือก็ทำการลบออกโดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 สำหรับกระบวนการที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นการเขียนทับลงไปบนไบนารีอะเรย์

4. ทำการอ่านไบนารีอะเรย์ที่ได้จากขั้นที่ 3 เพื่อกำหนดหาจุดภาพที่อยู่ในขอบของพื้นที่ จากนั้นนำพิกัดของจุดภาพเหล่านั้นมาใส่ในอะเรย์หนึ่งมิติหรืออะเรย์รายการ (List Array) ตามลำดับของค่าสัมบูรณ์ของค่าเบี่ยงเบนหรือผลต่างระหว่างค่า ϕ ของจุดภาพนั้นๆ กับค่าเฉลี่ย ϕ_{avg} ของจุดภาพทั้งหมดที่อยู่ในขอบ กล่าวคือค่าน้อยจะถูกบรรจุก่อนและเรียงลำดับไปเรื่อยๆ

5. ใช้จุดภาพในอะเรย์รายการเริ่มจากลำดับแรกเป็นจุดศูนย์กลางของหน้าต่างขนาด 3×3 จุดภาพ (ϕ_{ref} ในสมการ (3)) แล้วทำการกำหนดค่า ϕ_{σ_1} โดยสมการ (4) สำหรับจุดภาพรอบๆ จุดภาพศูนย์กลางนั้นจนครบ เมื่อเสร็จแล้วจุดภาพที่เป็นจุดศูนย์กลางดังกล่าวจะถูกลบออกจากอะเรย์รายการ

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 2 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

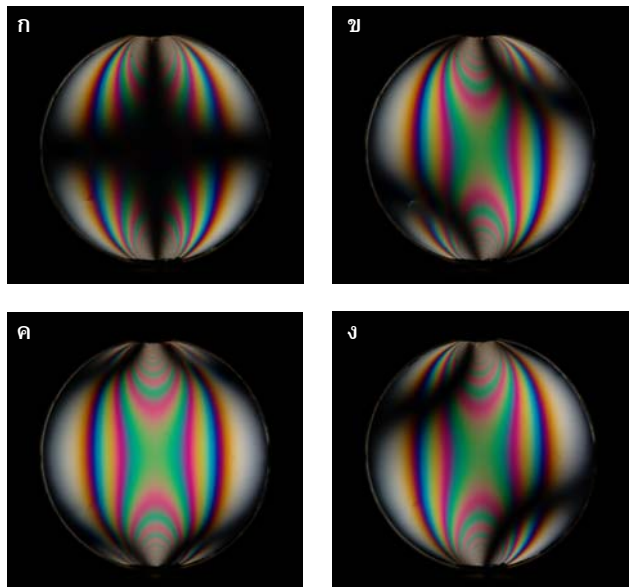
6. ทำซ้ำจนอะเรย์รายการมีขนาดเท่ากับศูนย์ และทำซ้ำโดยเริ่มตั้งแต่ขั้นที่ 4 ใหม่จนทุกจุดในแผนภาพแสดงทิศทางของ σ_1



รูปที่ 2 ภาพสี (RGB) 24 บิต ขนาด 512×480 พิกเซล ของแผนภาพกลรับแรงเค้นกดผ่านแนวเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการจำลองแบบ

ตามค่ามุมที่เปลี่ยนไปของแผ่นวิเคราะห์ (ก) $\beta = 0$, (ข) $\beta = \pi/8$,

(ค) $\beta = \pi/4$ และ (ง) $\beta = 3\pi/8$



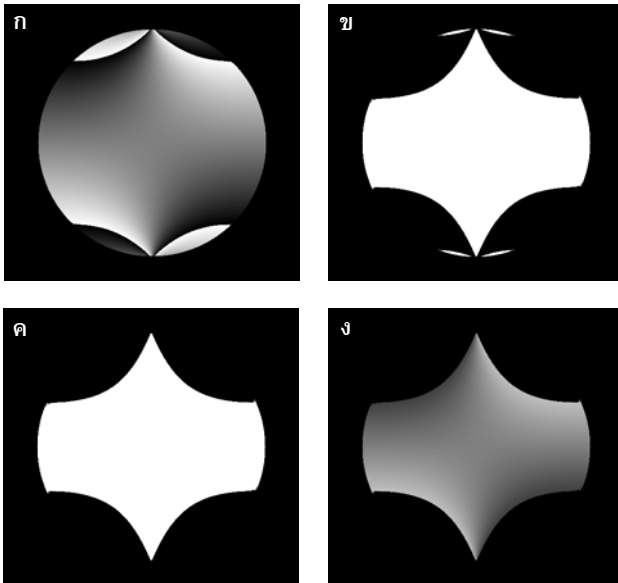
รูปที่ 3 ภาพสี (RGB) 24 บิต ขนาด 512×480 พิกเซล ของแผนภาพกลรับแรงเค้นกดผ่านแนวเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการทดลองตาม

ค่ามุมที่เปลี่ยนไปของแผ่นวิเคราะห์ (ก) $\beta = 0$, (ข) $\beta = \pi/8$,

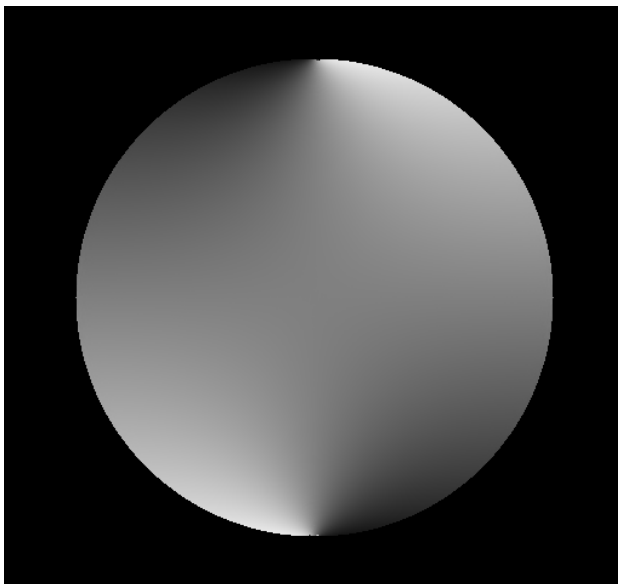
(ค) $\beta = \pi/4$ และ (ง) $\beta = 3\pi/8$

5. ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลลัพธ์และการอภิปรายผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้วิธีการคืนรูปกับภาพริ้วสนามความเค้นที่ได้จากการทดลองและการจำลองแบบ ซึ่งวิธีการและเงื่อนไขในการจำลองแบบนั้นสามารถ



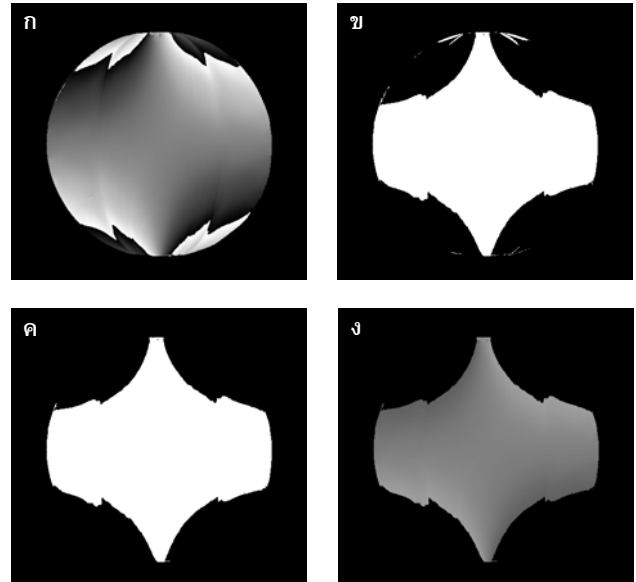
รูปที่ 4 แผนภาพต่างๆ ที่ได้จากขั้นที่ 1 ถึง 5 โดยใช้ภาพในรูปที่ 2 (ก) แผนภาพไอโซคลินิกจากขั้น 1, (ข) แผนภาพไนโบนารีอะเรียจจากขั้นที่ 2 โดย $T = 0.5$, (ค) แผนภาพไนโบนารีอะเรียจจากขั้นที่ 3 และ (ง) แผนภาพของไอโซคลินิกเพื่อใช้เป็น ϕ_{ref} จากขั้นที่ 4 และ 5



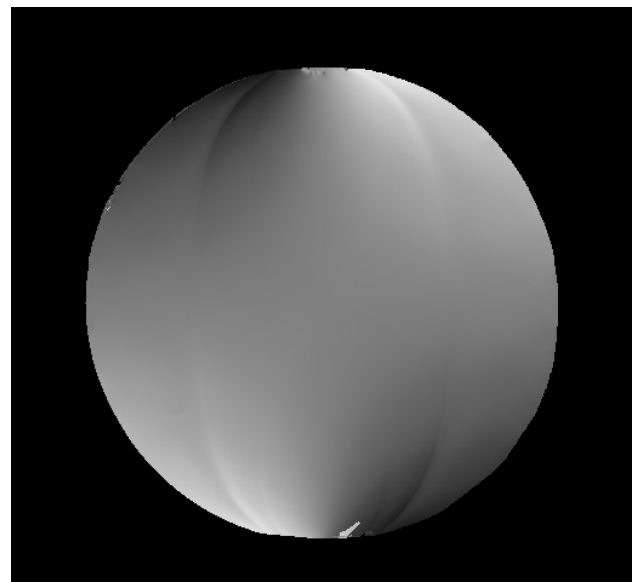
รูปที่ 5 แผนภาพไอโซคลินิกของความเค้นหลัก σ_1 ในย่าน $-\pi/2$ ถึง $+\pi/2$ ซึ่งได้จากรูปที่ 4 โดยที่สีขาวคือ $+\pi/2$ และสีดำคือ $-\pi/2$

ค้นหาเพิ่มเติมได้ในเอกสารอ้างอิงหมายเลข [4]

รูปที่ 2 แสดงภาพริ้วสนามความเค้นของแผ่นจานกลมรับแรงข้ม กดผ่านแนวเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการจำลองแบบ ส่วนรูปที่ 3 นั้นเป็นภาพริ้วสนามความเค้นของตัวแบบเดียวกันที่ได้จากการทดลอง [2] ซึ่งเงื่อนไขการทดลองกับเงื่อนไขการจำลองจะเหมือนกันทั้งหมดยกเว้นค่าความเข้มแสงจากหลัง ซึ่งในการจำลองแบบนั้นจะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ในขณะที่ยังไม่สามารถกำหนดได้ [4]



รูปที่ 6 แผนภาพต่างๆ ที่ได้จากขั้นที่ 1 ถึง 5 โดยใช้ภาพในรูปที่ 3 (ก) แผนภาพไอโซคลินิกจากขั้น 1, (ข) แผนภาพไนโบนารีอะเรียจจากขั้นที่ 2 โดย $T = 0.5$, (ค) แผนภาพไนโบนารีอะเรียจจากขั้นที่ 3 และ (ง) แผนภาพของไอโซคลินิกเพื่อใช้เป็น ϕ_{ref} จากขั้นที่ 4 และ 5



รูปที่ 7 แผนภาพไอโซคลินิกของความเค้นหลัก σ_1 ในย่าน $-\pi/2$ ถึง $+\pi/2$ ซึ่งได้จากรูปที่ 6 โดยที่สีขาวคือ $+\pi/2$ และสีดำคือ $-\pi/2$

5.1 ผลลัพธ์จากการประยุกต์ใช้กับภาพที่ได้จากการจำลอง

โดยอาศัยหลักการเลื่อนเฟสและการเปรียบเทียบค่าความเข้มแสง ก็จะได้แผนภาพสนามไอโซคลินิกในย่าน $-\pi/4$ ถึง $+\pi/4$ รูปที่ 4ก แสดงแผนภาพสนามไอโซคลินิกซึ่งได้จากขั้นที่ 1 ในหัวข้อ 4.2 สำหรับแผนภาพในไบนารีอะเรียโดยที่ $T = 0.5$ แสดงในรูปที่ 4ข ซึ่งในแผนภาพนี้จะเห็นพื้นที่ใหญ่และเล็กที่แสดงทิศทางความเค้นหลัก σ_1 และ σ_2 ตามลำดับ หลังจากประยุกต์ใช้อะกอร์ิทึมกำหนดสัญลักษณ์กลุ่มย่อยต่อเนื่อง พื้นที่ใหญ่ก็จะถูกเลือกไว้ในขณะที่พื้นที่เล็กจะถูกลบออกดังในรูปที่ 4ค ส่วนรูปที่ 4ง นั้นคือแผนภาพไอโซคลินิกที่สอดคล้องกับพื้นที่ใหญ่ในรูปที่ 4ค

สำหรับการกำหนดค่าที่แท้จริงของ σ_1 ในขั้นตอนที่ 4 และ 5 นั้นจะกระทำโดยการอ่านแผนภาพในรูปที่ 4ค โดยกำหนดหาจุดที่อยู่บนขอบพื้นที่ใหญ่ซึ่งจุดเหล่านี้จะถูกบันทึกเข้าไปในอะเรียรีการตามลำดับโดยใช้เงื่อนไขดังที่ได้กล่าวแล้ว หลังจากนั้นจุดแรกในอะเรียรีการจะถูกดึงออกมาเป็นจุดศูนย์กลางของหน้าต่างขนาด 3×3 จุดภาพและค่า ϕ_{ref} ในสมการ (3) ก็จะถูกดึงมาจากแผนภาพในรูปที่ 4ง ซึ่งเมื่อทำซ้ำจนครบทุกจุดภาพแล้วก็จะได้แผนภาพสนามไอโซคลินิกที่สอดคล้องกับทิศทางของ σ_1 ในย่าน $-\pi/2$ ถึง $+\pi/2$ ดังแสดงในรูปที่ 5

พิจารณารูปที่ 5 จะพบว่าค่าตัวแปรไอโซคลินิกจะแปรเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็วจาก $-\pi/2$ ถึง $+\pi/2$ รอบๆ จุดที่แรงกระทำ ในขณะที่บริเวณอื่นๆ จะเกิดการเปลี่ยนค่าในอัตราที่ช้าและในบริเวณตรงกลางของตัวแบบ ทิศทางของความเค้นหลักจะมีค่าค่อนข้างคงตัว

5.2 ผลลัพธ์จากการประยุกต์ใช้กับภาพที่ได้จากการทดลอง

อาศัยหลักการเช่นเดียวกันกับที่ได้อธิบายในหัวข้อ 5.1 ก็จะได้แผนภาพต่างๆ ที่จำเป็นต่อการคืนรูปดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งหากพิจารณาแล้วจะเห็นอิทธิพลของตัวแปรไอโซโครมาติกได้อย่างชัดเจน กล่าวคือบริเวณที่เกิดความไม่เรียบซึ่งเห็นเป็นลักษณะรูปร่างริ้นแนวตั้ง ตำแหน่งของรูปร่างที่เกิเกิดขึ้นนี้จะสอดคล้องกับค่าอันดับรีว N กล่าวคือเมื่อใดก็ตามที่ค่า N มีค่าเข้าใกล้หรือเท่ากับจำนวนเต็มบวก แล้วตัวแปรไอโซคลินิกจะไม่สามารถกำหนดค่าได้ (ดูเงื่อนไขในสมการ (2)) ความไม่เรียบที่เกิดเป็นรูปร่างริ้นนั้นหากเปรียบเทียบตำแหน่งกับภาพรีวสนามความเค้นในรูปที่ 4ค ก็จะได้เห็นได้อย่างชัดเจน ตำแหน่งนี้ N จะมีค่าเท่ากับ 1 หรือที่เรียกว่าอันดับรีวที่ 1 ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีแดงเข้มไปเป็นสีน้ำเงินเข้ม [1]

อย่างไรก็ตามลักษณะเช่นนี้จะไม่เกิดขึ้นแผนภาพที่ได้จากการจำลองทั้งนี้เนื่องจากกว่าค่าแอมพลิจูดของรูปคลื่นของรีวที่ได้จากการจำลองนั้นจะมีค่าคงตัวตามระยะทางที่เปลี่ยนไปในขณะที่ค่าแอมพลิจูดของรูปคลื่นของรีวที่ได้จากการทดลองจะมีค่าลดลงและอัตราการลดลงนี้จะมากขึ้นตรงบริเวณที่ความเค้นมีค่าสูงเช่นจุดที่แรงกระทำ (รูปที่ 4ค) และบริเวณนั้นอันดับรีวจะมีค่าสูงมากเช่นเดียวกัน หากสังเกตสีของรีว

บริเวณจุดที่แรงกระทำแล้วก็จะพบว่าสีจะจางลงและมีแนวโน้มจะกลายเป็นสีเทา ดังนั้นค่าความเข้มแสงที่เป็นพารามิเตอร์ในฟังก์ชันแทนเจนต์ผกผันก็จะมีค่าเข้าใกล้ซึ่งกันและกันซึ่งก็จะทำให้กำหนดหาค่าตัวแปรไอโซคลินิกได้ยากขึ้น ซึ่งผลอันนี้อาจทำให้เกิดจุดภาพที่มีค่าตัวแปรไอโซคลินิกที่คลาดเคลื่อนไปตั้งบริเวณจุดที่แรงกระทำด้านล่างของรูปที่ 7

6. สรุปผล

บทความฉบับนี้ได้รายงานวิธีการกำหนดหาตัวแปรไอโซคลินิกในย่าน $-\pi/2$ ถึง $+\pi/2$ โดยอาศัยการปรับค่าสนามโคไซน์ทิศทางของความเค้นหลัก ผลจากการประยุกต์ใช้วิธีการคืนรูปกับภาพรีวสนามความเค้นทั้งที่ได้จากการจำลองแบบกับที่ได้จากการทดลองพบว่ามีผลสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามลักษณะของแผนภาพไอโซคลินิกในย่าน $-\pi/2$ ถึง $+\pi/2$ นั้นยังมีค่าที่เบี่ยงเบนไปอันเนื่องมาจากอิทธิพลของตัวแปรไอโซโครมาติก สำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจริงๆ นั้นจะมีจุดไอโซโทรปิกในแผนภาพไอโซคลินิกเกิดขึ้นซึ่งการมีอยู่ของจุดไอโซโทรปิกในแผนภาพนั้นจะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้วิธีการคืนรูปไม่สามารถทำงานได้ซึ่งในส่วนนี้จะได้พัฒนาและนำเสนอต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Ramesh, K. 2000. Digital Photoelasticity: Advanced Technique and Applications. Springer, Berlin Germany.
2. Pinit, P. and Umezaki, E., 2007. Digitally Whole-field Analysis of Isoclinic Parameter in Photoelasticity by Four-step Color Phase-shifting Technique. Optics and Laser in Engineering, 45: 795-807.
3. Pitas, I., 2000. Digital Image Processing Algorithms and Applications. John Wiley & Sons, New Jersey U.S.A.
4. พิเชษฐ พินิจ, ณัฐวัฒน์ พลอยทับทิม และ ศรัณยู มั่นพิศุทธิ์, 2551. การจำลองแบบรีวสนามความเค้นเพื่อวิเคราะห์ความเค้นในช่วงยืดหยุ่นด้วยแสง, ในการสัมมนาวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6, หาดใหญ่, สงขลา, 8-9 พฤษภาคม 2551, บณชีติธรม บทความเลขที่ PEC6OR110, หน้า 659-664