

หลักการและเทคนิคการสร้างภาพโดยระบบชลีเรน

อนัญญา เสน่หา, สรศักดิ์ ด้านวรพงศ์ และพรรณศิริ คำโอ

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบการสร้างภาพถ่ายชลีเรน 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบทั่วไป แบบสร้างภาพเงา และแบบแทรกสอด โดยแต่ละระบบมีความแตกต่างกันในแง่ของประเภท จำนวน และการจัดอุปกรณ์เชิงแสง การเกิดภาพชลีเรนสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแสงเชิงเรขาคณิตที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของรังสีของแสงในตัวกลางหรือวัตถุทดสอบที่ค่าความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดเกรเดียนต์ของดัชนีหักเหในแนวใด ๆ ภาพชลีเรนที่บันทึกได้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ในด้านการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับการสร้างภาพชลีเรนทำให้ผู้เรียนเกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการและการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เชิงแสงมากขึ้น

คำสำคัญ: ชลีเรน (Schlieren), เทคนิคการถ่ายภาพพลวัต, เกรเดียนต์ของดัชนีหักเหของแสง

ระบบการถ่ายภาพชลีเรน (Schlieren) มีมาตั้งแต่ต้นคริสต์ศตวรรษที่ 18 ระบบชลีเรนนี้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างภาพแบบพลวัต (dynamic) เพื่อแสดงภาพกระแสน้ำไหลของอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น ภาพชลีเรนที่ได้สามารถนำมาแปลความหมายเชิงคุณภาพได้อย่างตรงไปตรงมาตามรูปที่ปรากฏ โดยไม่ถูกบิดเบือนไปจากลักษณะเดิมของวัตถุทดสอบ และหลังการถ่ายภาพวัตถุทดสอบนั้นจะยังอยู่ในสภาพเดิมไม่ถูกทำลาย วิธีการถ่ายภาพเช่นนี้มักใช้กับวัตถุทดสอบที่มีลักษณะโปร่งใส หรือเป็นตัวกลางที่แสงเดินทางผ่านได้ มีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาพลศาสตร์ของไหล เนื่องจากระบบชลีเรนมีคุณสมบัติที่สำคัญคือความไวต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะความหนาแน่นของตัวกลางและไม่รบกวนการไหลของของไหล จึงสามารถนำมาใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงดัชนีการหักเหของแสงภายในตัวกลางได้อีกด้วย ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ระบบการถ่ายภาพชลีเรน ได้แก่ การศึกษารายละเอียดของการขึ้นรูป (การเป่าแก้ว) การไหลเวียนอากาศขณะหายใจเข้าหรือออกของคนและสัตว์ คลื่นกระแทกที่เกิดจากเครื่องบินความเร็วเหนือเสียง และความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม

ความเป็นมาของระบบถ่ายภาพชลีเรน

คำว่า “Schlieren” อ่านว่าชลีเรน มาจากภาษาเยอรมันที่เขียนว่า “schliere” หรือ “striae” หมายถึงลักษณะที่ปรากฏเป็นเส้นคล้ายกับการไหลของของไหล ในยุคแรก ระบบชลีเรนถูกใช้ในการศึกษาส่วนประกอบทางแสงของกล้องโทรทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์ ต่อมาระบบนี้ได้รับการประยุกต์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือศึกษาพลศาสตร์ของไหล ถึงแม้ระบบชลีเรนจะถูกนำมาใช้และอ้างอิงถึงเป็นอย่างมาก ในศตวรรษที่ 19 แต่เมื่อสืบค้นจากหลักฐาน พบว่าระบบนี้ถูกกล่าวถึงเป็นครั้งแรกตั้งแต่ช่วงต้นศตวรรษที่ 17 โดย Robert Hooke เขาค้นพบเทคนิคการถ่ายภาพชลีเรน และได้เผยแพร่ในหนังสือชื่อ “Micrographia” ต่อมา Christian Huygens ได้พัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพชลีเรน จนกระทั่งสามารถมองเห็นภาพของเส้นเลือดดำได้

ในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 Leon Foucault ได้พัฒนาการทดสอบแบบขอบมีด (knife-edge test) สำหรับกระจกกล้องโทรทรรศน์ที่สามารถมองเห็นภาพการไหลของอากาศได้ โดยที่ลืออันไม่เคยทราบเลยว่า เทคนิคที่เขาพัฒนาขึ้นนั้น เป็นเรื่องแปลกใหม่และน่าตื่นตาตื่นใจสำหรับคนอื่น ๆ หลังจากนั้น August Toepler ได้ออกแบบอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพด้วยเทคนิคชลีเรน เขาได้นำเสนอวิธีการออกแบบระบบชลีเรนอย่างง่าย ทำให้ได้รับการยอมรับอย่างเป็นทางการว่าเป็นบุคคลแรกที่นำเสนอเทคนิคการถ่ายภาพแบบชลีเรน ถัดมาในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 Hubert Schardin ได้วิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระบบการถ่ายภาพชลีเรนและพัฒนาเทคนิคใหม่ ๆ เพิ่มเติม

ในปัจจุบันพบว่า นักฟิสิกส์และวิศวกรด้านพลศาสตร์ของไหลได้นำเทคนิคที่ August Toepler และ Hubert Schardin พัฒนาขึ้นไปใช้ศึกษาลักษณะกระแทกที่เกิดจากเครื่องบิน การผสมกันระหว่างของเหลวกับก๊าซ รวมทั้งยังได้นำฟิลเตอร์แบบสีมาช่วยในการถ่ายภาพชลีเรนอีกด้วย

ทฤษฎีแสงและการมองเห็นที่ทำให้สามารถสร้างภาพชลีเรนได้

การเกิดภาพชลีเรนเป็นไปตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) ที่กล่าวไว้ว่า แสงจะเคลื่อนที่ช้าลงเมื่อมีปฏิสัมพันธ์กับสสาร หากตัวกลางนั้นมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันอย่างเช่นสุญญากาศหรืออากาศ แสงจะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอด้วยอัตราเร็วคงที่ แต่เมื่อเผชิญหน้ากับตัวกลางที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันอย่างเช่น แสงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่เป็นของเหลวผ่านเข้าไปในอากาศ แสงจะหักเหไปจากเส้นทางเดิม ส่งผลให้เกิดภาพชลีเรนได้

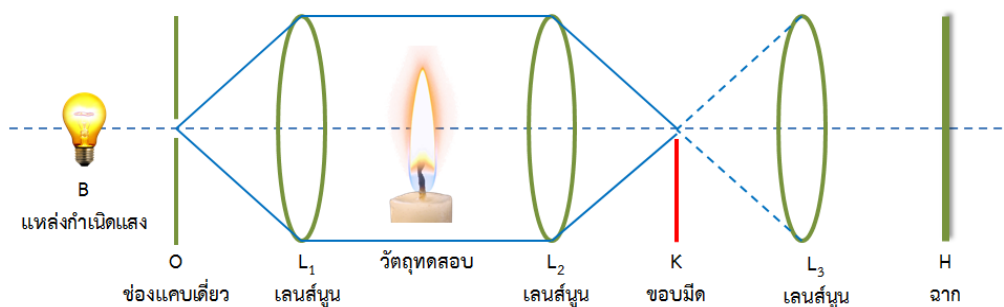
ในบทความนี้จะนำเสนอการจัดระบบเพื่อสร้างภาพชลีเรน 3 รูปแบบ ได้แก่

1) **แบบทั่วไป** เป็นการจัดระบบโดยมีอุปกรณ์ต่าง ๆ จำพวกเลนส์นูน ช่องแคบเดี่ยว ขอบมีด กระจกราบ กระจกโค้ง เป็นต้น โดยผู้ทดลองสามารถเลือกใช้และจัดอุปกรณ์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่น บางการทดลองใช้เพียงเลนส์นูนและกระจก แต่บางการทดลองอาจใช้เพียงแคเลนส์นูน ช่องแคบเดี่ยว และขอบมีด เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการศึกษา

2) **แบบสร้างภาพเงา** เป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุด ระบบอาจมีเพียงแค่แหล่งกำเนิดแสง วัตถุทดสอบ และฉากรับภาพเท่านั้น

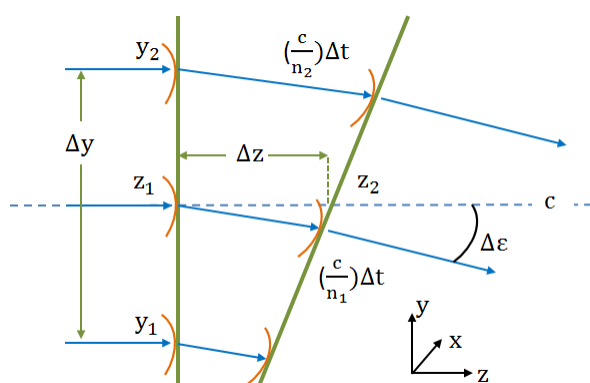
3) **แบบแทรกสอด** การจัดระบบเพื่อถ่ายภาพรูปแบบนี้มีความคล้ายคลึงกับแบบทั่วไป แต่มีความซับซ้อนกว่า เนื่องจากผู้ทดลองจะต้องแบ่งแสงเป็น 2 ขบวน และให้แต่ละขบวนเดินทางผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อมาแทรกสอดกัน ภาพที่ได้จากการจัดระบบแบบแทรกสอดเป็นภาพที่มีประสิทธิภาพสูงในแง่ของการให้ข้อมูลเชิงคุณภาพ

ในส่วนต่อไป เป็นตัวอย่างการจัดระบบการถ่ายภาพลิเรนทั้ง 3 รูปแบบ เริ่มจากการจัดระบบถ่ายภาพลิเรนแบบทั่วไป ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพลิเรนแบบทั่วไป

ระบบที่จัดขึ้นเพื่อการถ่ายภาพลิเรนในรูปที่ 1 เป็นการจัดวางเลนส์นูน 3 อัน ให้อยู่ในแนวเส้นตรง¹ เมื่อพิจารณาเริ่มต้นจากแหล่งกำเนิดแสง B แสงจะเคลื่อนที่ผ่านช่องแคบเดี่ยว (single slit) O ซึ่งวางห่างออกไปเท่ากับระยะโฟกัสของเลนส์นูน L_1 ส่งผลให้แสงเดินทางผ่านเลนส์ดังกล่าวเป็นแสงขนาน ซึ่งลำแสงขนานนี้จะเบนผ่านวัตถุที่ต้องการใช้ทดสอบ (เช่น ควันทันจากเปลวเทียน อากาศหรือแก๊สขณะมีคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่าน เป็นต้น) จากนั้นแสงจะผ่านเลนส์นูน L_2 ไปตัดผ่านขอบมืด K ที่วางห่างจากเลนส์นูน L_2 และ L_3 เท่ากับระยะโฟกัสของเลนส์ทั้งสอง จะเกิดภาพลิเรนปรากฏบนฉาก H สำหรับการเบนของรังสีของแสงผ่านวัตถุทดสอบ สามารถแสดงเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ไดอะแกรมแสดงการเบี่ยงเบนของรังสีของแสง เมื่อค่าเกรเดียนต์ (การเปลี่ยนแปลง) ของดัชนีหักเหแสงมีค่าเท่ากับ $\frac{dn}{dy}$ โดยเลข 1 และ 2 ที่เป็นตัวห้อยแสดงดัชนีหักเหที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

¹ จำนวนเลนส์นูนที่ใช้ในการศึกษาอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของงาน

จากรูปที่ 2 สมมติให้เกรเดียนต์ของดัชนีหักเหแสงในแนวตั้งหรือแกน y มีค่าเป็นลบ $\frac{\partial n}{\partial y} < 0$ ส่วนในแนวแกน x และแกน z นั้นค่าเกรเดียนต์ของดัชนีหักเหแสงมีค่าเป็นศูนย์ หน้คลื่นแสงในช่วงเริ่มต้นอยู่ในแนวตั้ง จากนั้นหน้คลื่นจะเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่หลังจากเดินทางผ่านวัตถุทดสอบ ถ้าหากหน้คลื่นของแสงเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งใดๆ บนแกน y ในช่วงเวลาสั้น ๆ หน้คลื่นมีความเร็ว $\frac{\Delta z}{\Delta t}$ และ หักเหเป็นมุม $\Delta \epsilon$ จากแนวเดิม โดยที่ดัชนีการหักเหของแสงมีค่าดังสมการที่ 1

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

เมื่อ n คือ ดัชนีหักเห, c คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ และ v คือ ความเร็วแสงในตัวกลางใด ๆ

จะได้ค่ามุม $\Delta \epsilon$ ดังนี้

$$\Delta \epsilon = \frac{c/n_2 - c/n_1}{\Delta y} \Delta t \quad (2)$$

หากรวมสมการที่ (2) เข้ากับการเปลี่ยนแปลงของเวลา $\Delta t = \Delta z \frac{n}{c}$ สามารถจัดให้อยู่ในรูปอย่างง่าย ตามสมการที่ (3)

$$\Delta \epsilon = \frac{n}{n_1 n_2} \frac{(n_1 - n_2)}{\Delta y} \Delta z \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาให้อนุพันธ์ของสมการที่ (3) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และจัดรูป $\frac{n}{n_1 n_2}$ เป็น $\frac{1}{n}$ จะได้ว่า

$$\frac{d\epsilon}{dz} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dy} \quad (4)$$

หากใช้การประมาณค่ามุมเล็ก ๆ $d\epsilon$ เท่ากับ $\frac{dy}{dz}$ จะได้

$$\frac{d\epsilon}{dz} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dy} \quad (5)$$

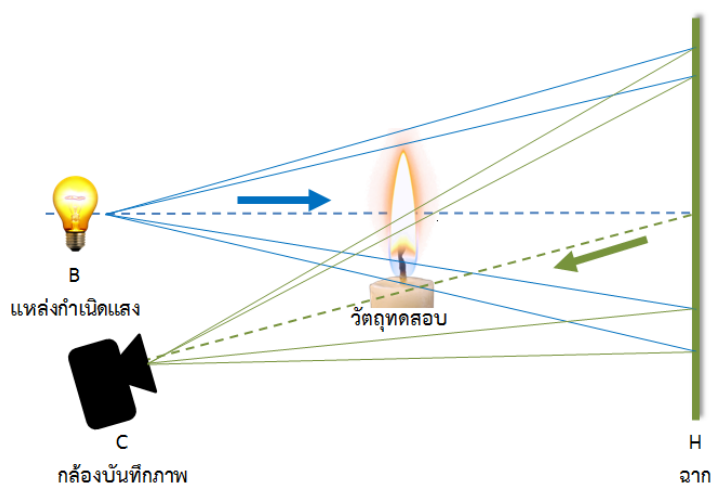
ความสัมพันธ์ในสมการที่ (5) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งของรังสีกับเกรเดียนต์ของดัชนีหักเหของแสง ภาพคลื่นสามารถสร้างได้จากการรวมหน้คลื่นที่เบนไปในตัวกลางเชิงแสงที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (optical inhomogeneities)

$$\epsilon_y = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (6)$$

สมการที่ (5) และ (6) สามารถใช้หาค่าประกอบของเกรเดียนต์ใน 2 มิติ ในทิศทาง x ได้ด้วยการแทนที่ y ด้วย x จะพบว่าการเบี่ยงเบนของรังสีไม่ได้เกิดจากดัชนีหักเห n ของวัตถุ แต่เกิดจากเกรเดียนต์ของดัชนีหักเหแสง $\frac{\partial n}{\partial y}$ นอกจากนี้ สมการดังกล่าว ยังสังเกตได้ว่าการหักเหแสงมีทิศเบนเข้าสู่บริเวณที่มีดัชนีหักเหของแสงสูง

นอกจากการจัดระบบอุปกรณ์ตามรูปที่ 1 จะทำให้ได้ภาพชลีเรนแล้ว การจัดระบบแบบอื่น ๆ ก็ยังทำให้ได้ภาพที่สามารถนำมาใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากดัชนีหักเหแสงของตัวกลางโปร่งใส หรือการศึกษาการถ่ายเทความหนาแน่นของของไหล เช่นเดียวกับคุณสมบัติของภาพชลีเรนเช่นกัน วิธีการดังกล่าวได้แก่ วิธีสร้างภาพเงา (shadowgraphy) และวิธีการแทรกสอด (interferometry) โดยทั้งสองวิธีนี้ได้รับการพัฒนาในช่วงเวลาเดียวกัน

การจัดระบบถ่ายภาพชลีเรนแบบสร้างภาพเงา เป็นเทคนิคเชิงแสงที่ฉายภาพเงาของวัตถุบนระนาบ วิธีนี้ใช้หลักการเดียวกับการมองเห็นการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอากาศด้วยตาเปล่าของมนุษย์ เช่น ไอร้อนบนผากระโปรงรถที่มีอุณหภูมิสูง แก๊สร้อนที่กำลังเคลื่อนขึ้นจากเตาข้างบาร์บีคิว เป็นต้น การจัดระบบในการสร้างภาพเงาของวัตถุทดสอบ ทำได้โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง (B) และฉากรับภาพ (H) ทั้งนี้ผู้ทดลองสามารถย่อหรือขยายภาพ ด้วยการปรับเปลี่ยนระยะของฉาก หากต้องการบันทึกภาพ ผู้ทดลองสามารถจัดวางกล้อง (C) ไว้ที่ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 3



(ก)

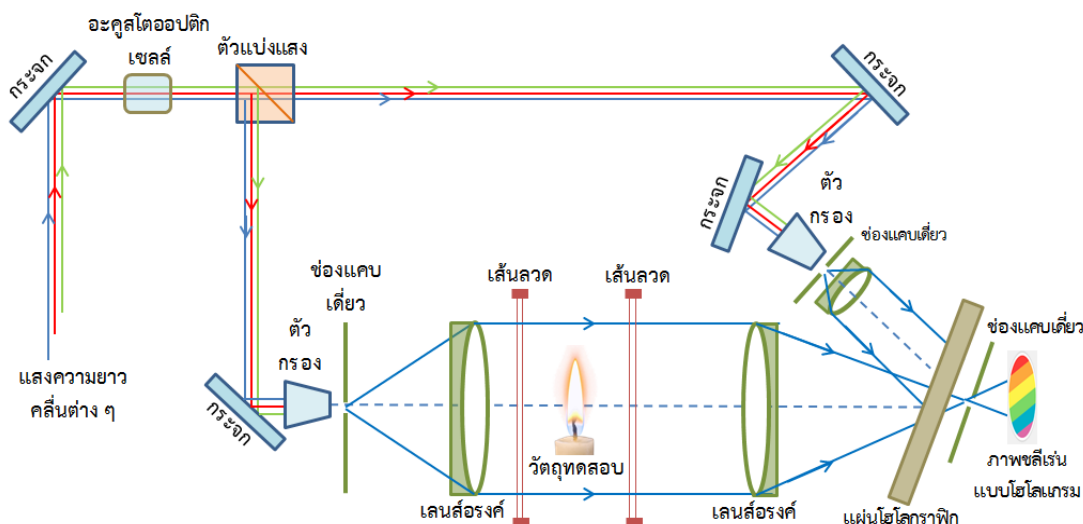


(ข)

รูปที่ 3 แสดง (ก) ระบบพื้นฐานในการสร้างภาพเงา และ (ข) ภาพเงาที่เกิดจากการทดลอง [1]

การจัดระบบแบบสร้างภาพเงาเป็นวิธีที่ง่ายต่อการทดลองและการบันทึกภาพ ระบบนี้มีความยืดหยุ่นสูงในแง่ของการปรับขนาดภาพและความไวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของวัตถุทดสอบ มักถูกนำไปใช้ในการสร้างภาพที่เกิดจากคลื่นกระแทก และภาพที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow)

การจัดระบบถ่ายภาพลิเอนแบบแทรกสอด เป็นเทคนิคการสร้างภาพแบบขลิเอนที่มีประสิทธิภาพในแง่ของการให้ข้อมูลที่ต้องการวัด ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นหรือการถ่ายเทความร้อนของวัตถุทดสอบ การจัดระบบเช่นนี้ทำได้โดยใช้เลนส์ 2 อัน คล้ายกับระบบขลิเอนแบบทั่วไป แต่เพิ่มปริซึมหรือลวดเส้นเล็ก ๆ ที่จะมาทำหน้าที่เป็นขอบมืด เพื่อให้แสงตัดผ่านแล้วเกิดการเลี้ยวเบนหรือแทรกสอด เกิดรูปเป็นภาพขลิเอนที่สามารถนำไปวิเคราะห์หสิ่งต้องการศึกษาได้



(ก)



(ข)

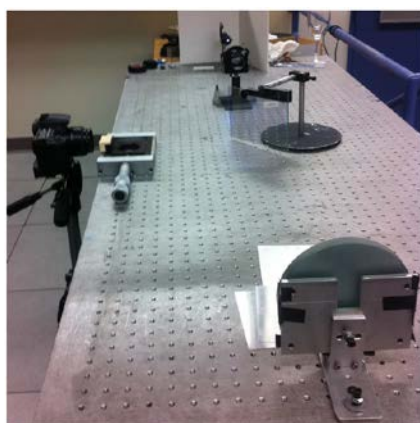
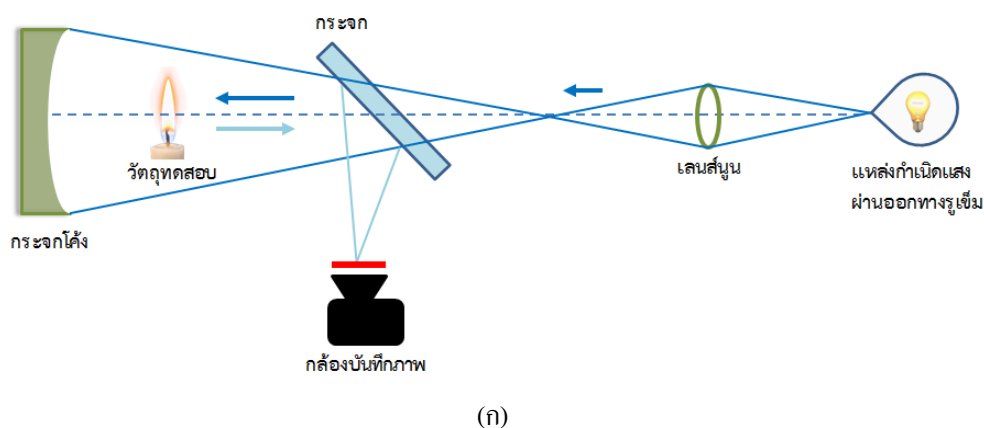
รูปที่ 4 ตัวอย่าง (ก) การจัดระบบการสร้างภาพขลิเอนแบบโฮโลแกรม (hologram) ด้วยการแทรกสอด และ (ข) ภาพที่ได้จากการแทรกสอด [2]

ระบบการสร้างภาพขลิเอนแบบโฮโลแกรมในรูปที่ 4 มีความซับซ้อนกว่าระบบอื่น ๆ เริ่มจากการใช้แสงจากแหล่งกำเนิด 3 แหล่งที่มีความยาวคลื่น (สี) ที่แตกต่างกัน ผ่านอะคูสโตออปติกเซลล์ (acousto optic cell) ซึ่งเป็นตัวควบคุมความถี่ของแสง ให้ผ่านตัวแบ่งแสง (beam splitter) ทำให้ลำแสงส่วนหนึ่งผ่านไปสะท้อนกระจกไปยังตัวกรองเชิงพื้นที่ (spatial filter) ที่ใช้หลักการแปลงแบบฟูริเยร์ (Fourier transform) มาช่วยในการปรับปรุงข้อมูลแสง (ภาพ) ให้มีความคมชัดมากขึ้น จากนั้นแสงดังกล่าวก็จะไปตกบนแผ่นโฮโลกราฟี (holographic plate) ลำแสงอีกส่วนก็ต้องผ่านตัวกรองเชิงพื้นที่อีกชุด แล้วผ่านไปยังวัตถุทดสอบ ที่อยู่ระหว่างชุดเลนส์ออร์ค (achromatic

lens) และเส้นลวด ก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปแทรกสอดกับลำแสงส่วนแรกบนแผ่นโฮโลกราฟิก แสงจากการแทรกสอดเบนผ่านช่องแคบเดี่ยว เกิดเป็นภาพขลิเร้นที่เป็นแบบโฮโลแกรม โดยภาพที่ได้ปรากฏเป็นสีส้มที่สวยงามกว่าภาพขลิเร้นที่สร้างจากระบบทั่วไปและระบบการสร้างภาพเงา

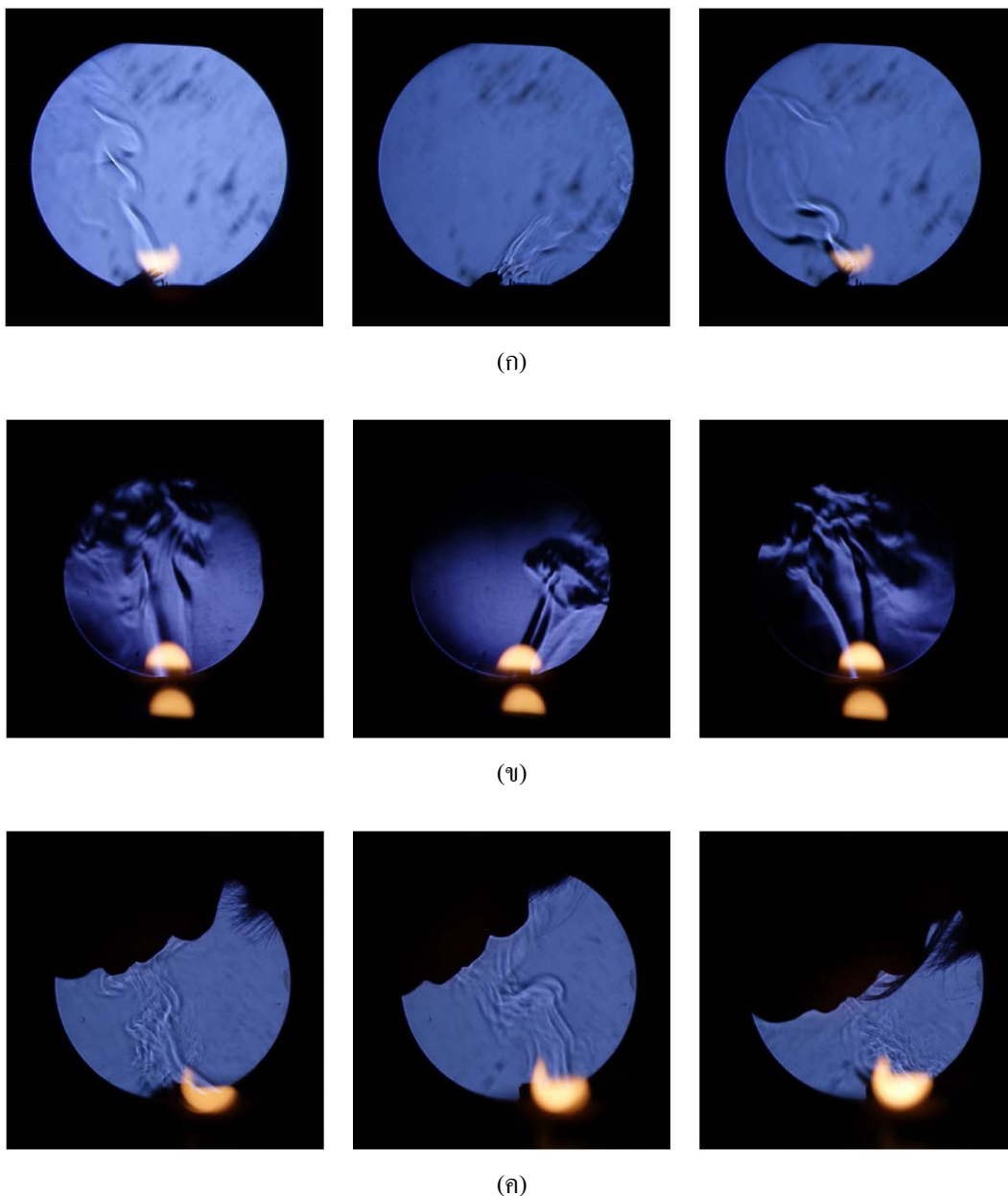
ตัวอย่างภาพขลิเร้นและข้อพิจารณาในการสร้างระบบขลิเร้น

บทความวิจัยของ Amrita Mazudhar (2013) [1] ได้นำเสนอเทคนิคการสร้างภาพขลิเร้น ด้วยการประยุกต์ตามระบบการถ่ายภาพขลิเร้นแบบทั่วไป โดยใช้กระจกโค้ง กระจกราบ และเลนส์นูน ดังรูปที่ 5 ระบบนี้ประกอบแสงจากหลอดแอลอีดี (LED) ที่เดินทางลอดผ่านรูเข็ม ทำให้ได้แสงที่เป็นจุด จากนั้นแสงดังกล่าวจะหักเหผ่านเลนส์นูน เคลื่อนที่ผ่านกระจกที่เป็นตัวแบ่งแสง ทำให้แสงครึ่งหนึ่งผ่านไปสะท้อนบนกระจกเว้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้วและมีอัตราส่วนของความยาวโฟกัสต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 8 (12 inch f/8 spherical mirror) และอีกครั้งหนึ่งของแสงตกบนกล้องถ่ายภาพ ถึงแม้ว่าแสงครึ่งหนึ่งจะสูญเสียไป แต่แสงที่เหลือก็ยังเพียงพอต่อการเกิดภาพซึ่งสามารถบันทึกได้ด้วยกล้องที่มีอัตราเร็วของชัตเตอร์ (shutter speed) 1/1000 โดยในการทดลองนี้ผู้ศึกษาใช้แผ่นโลหะและแท่งไม้เป็นขาตั้ง



รูปที่ 5 (ก) ไลอะแกรมการจัดวางอุปกรณ์เพื่อสร้างภาพขลิเร้น และ (ข) การจัดวางอุปกรณ์จริงในห้องปฏิบัติการ [1]

การจัดอุปกรณ์ในรูปที่ 5 ผู้ศึกษาจัดวางอุปกรณ์ทั้งหมดบนโต๊ะแสง การจัดวางจะต้องทำอย่างระมัดระวังเพื่อให้แสงเกิดการโฟกัสโดยปราศจากการแทรกสอดหรือการบิดเบี้ยว เมื่อจัดเตรียมอุปกรณ์เสร็จสิ้น ถัดไปจะเป็นขั้นตอนการนำวัตถุทดสอบเข้าสู่ระบบ และจัดวางกล้องบันทึกภาพให้มีระยะโฟกัสอยู่ที่วัตถุทดสอบพอดี หน้ากล้องบันทึกภาพตรงระยะโฟกัสของลำแสงหักเหได้ติดตั้งตัวกรองแสง (filter) ไว้เพื่อให้ได้ภาพที่มีพื้นหลังและการกระจายของแสงที่สม่ำเสมอ สำหรับวัตถุทดสอบในการทดลองนี้ ได้แก่ เปลวเทียน และลมหายใจเข้า-ออกของมนุษย์ ผู้ศึกษาได้บันทึกภาพไว้ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ภาพชลีเร้นที่ถูกบันทึกไว้ด้วยกล้อง Canon 50 mm f/1.8 ด้วยความเร็วชัตเตอร์ 1/125 และ ISO 100 (ก) ภาพเปลวเทียนจากการจัดวางขอบมิดแบบปกติ (ข) ภาพเปลวเทียนที่เกิดจากการปรับขอบมิดให้ภาพมีความคมชัดขึ้น และ (ค) ภาพลมหายใจของมนุษย์และเปลวเทียนขณะวางขอบมิดที่ปกติ [1]

ระบบการสร้างภาพชลีเร้นมีข้อจำกัดด้านขนาดและค่าใช้จ่าย เนื่องจากขนาดของระบบขึ้นอยู่กับระยะโฟกัสของเลนส์หรือกระจกที่เลือกใช้ นั่นคือหากใช้อุปกรณ์ที่มีความยาวโฟกัสน้อย จะทำให้ขนาดของชุดอุปกรณ์ทั้งหมดมีความกะทัดรัดลง แต่ขนาดภาพที่ได้ก็จะมีขนาดเล็กลง อาจส่งผลให้ผู้ศึกษามองไม่เห็นรายละเอียดของภาพนั้น ๆ ได้อย่างชัดเจน ถ้าอุปกรณ์ที่ใช้มีความยาวโฟกัสมาก ขนาดอุปกรณ์ก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ด้วยข้อจำกัดนี้ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนย้าย ส่วนข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่ายนั้น ผู้ทดลองอาจต้องรับภาระค่าใช้จ่ายที่สูงอันเกิดจากการเลือกใช้กระจกและเลนส์แบบชัดเจนที่ดี เพื่อลดความผิดเพี้ยนและการบิดเบือนของภาพ

สรุป

ระบบการสร้างภาพชลีเร้นช่วยให้มนุษย์สามารถมองเห็นภาพที่มองไม่เห็นหรือลักษณะภาพที่สังเกตได้ยาก ทำให้นักวิจัยเข้าใจปรากฏการณ์ในธรรมชาติได้ดียิ่งขึ้น เทคนิคการถ่ายภาพชลีเร้นมีอายุผ่านมามากหลายศตวรรษ ในบางยุคความนิยมอาจซบเซาลงไปบ้างอย่างในต้นคริสต์ศตวรรษที่ 19 อันเนื่องมาจากความยากในการจัดวางระบบที่ต้องอาศัยความแม่นยำ ผนวกกับค่าใช้จ่ายสูง แต่ในปัจจุบันกลับพบว่าเทคนิคการถ่ายภาพชลีเร้นกลับมาเป็นที่นิยมอีกครั้ง เพราะอุปกรณ์เชิงแสงต่าง ๆ มีราคาถูกลงและถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้ภาพถ่ายมีองค์ประกอบของข้อมูลเชิงคุณภาพมากขึ้น มีการนำระบบคอมพิวเตอร์และการสร้างกราฟิกที่ทันสมัยมาใช้ในการสร้างภาพและวิเคราะห์ผล ช่วยนักวิจัยที่สามารถตีความได้ง่ายขึ้นอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Mazumdar, "Principles and techniques of Schlieren imaging systems," Columbia University Computer Science Technical Report, (2013).
- [2] M. J. Hargather and G. S. Settles, "A comparison of three quantitative Schlieren techniques," Optics and Lasers in Engineering, 50(1), 8 (2012).
- [3] J. M. Dese, R. Deron, "Shadow, Schlieren and Color Interferometry," Journal Aerospace Lab, 1, 1 (2009).