

การวัดสนามความเครียดในการดึงทดสอบวัสดุโดยใช้วิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน

ฤทธิพล จันทราษฏร์^{1*} และวิศิษฐ์ สีสมาติกุล¹
rittapol.cha@rmutr.ac.th^{1*}, wisit.lee@rmutr.ac.th¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (ศาลายา)

Received: June 25, 2024 Revised: October 20, 2024 Accepted: November 7, 2024

บทคัดย่อ

การพัฒนาวิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน (ดีไอซี) ในการวัดสนามความเครียดเป็นวิธีการที่มีประโยชน์มากสำหรับการดึงทดสอบวัสดุ เพราะเป็นวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานในระหว่างการวัด หลากหลายงานศึกษาได้ใช้ซัพพิกเซลอัลกอริทึมของวิธีดีไอซีในการเพิ่มความแม่นยำให้กับการวัด แต่ยังมีรายงานการศึกษาถึงความคลาดเคลื่อนจากการวัดโดยวิธีนี้น้อยมาก ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาซัพพิกเซลอัลกอริทึมที่สร้างบนพื้นฐานของวิธีการนิวตันราฟสัน ซึ่งจะถูกประเมินประสิทธิภาพโดยใช้ภาพลายจุดที่ถูกสร้างจากคอมพิวเตอร์ ขนาดของซัพเซตที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำประกอบด้วยขนาดเล็ก (21×21 พิกเซล) ขนาดกลาง (31×31 พิกเซล) และขนาดใหญ่ (41×41 พิกเซล) พบว่าซัพเซตขนาดเล็กจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการกระจัดสูงกว่าขนาดอื่น ไม่ได้มีเพียงแต่ขนาดของซัพเซตเท่านั้นแต่ขนาดของจุดมีบทบาทสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกัน จากนั้นทำการสาธิตดึงทดสอบวัสดุจริงเพื่อสังเกตผลจากการวัดด้วยวิธีดีไอซีเปรียบเทียบกับอุปกรณ์วัดระยะยัดแบบวีดีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์ เทคนิคการปรับให้เรียบถูกใช้ลดสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นก่อนนำเสนอสนามความเครียดมาสร้างกราฟความเค้นความเครียดในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น ในท้ายที่สุดผลจากการดึงทดสอบวัสดุจริงแสดงให้เห็นว่าวิธีดีไอซีมีศักยภาพเพียงพอที่จะใช้วัดสนามความเครียดและค่ายังมอดูลัส

คำสำคัญ: สนามความเครียด ดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน ซัพพิกเซลอัลกอริทึม การดึงทดสอบวัสดุ

Strain field measurements in the tensile tests using digital image correlation

Rittipol Chantarat^{1*} and Wisit Lelaphatikul¹
rittapol.cha@rmutr.ac.th^{1*}, wisit.lee@rmutr.ac.th¹

¹Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Received: June 25, 2024 Revised: October 20, 2024 Accepted: November 7, 2024

Abstract

Developments in digital image correlation (DIC) to measure strain fields are very useful for tensile tests because it is a non-contact metrology technique. Many studies use the sub-pixel registration algorithms of DIC to increase measurement accuracy but there are few studies reported on measurement errors. Then, the aim of this paper is to develop the sub-pixel registration algorithm based on Newton-Raphson iteration that is evaluated for its performances by using computer-generated speckle images. The subset sizes for evaluation are small (21×21 pixels), medium (31×31 pixels) and large (41×41 pixels). It is shown that the systematic errors and the random errors of small subsets are greater than other subset sizes. Not only subset sizes but also the speckle sizes play an important role for errors. Next, real tensile tests were performed to investigate the measurement results of DIC compared with a video extensometer. The smoothing technique is used for noise reduction in the strain fields before plotting stress-strain curves. Finally, the results of real tensile tests indicate that DIC can be capable to measure strain fields and Young's modulus.

Keywords: Strain field, Digital image correlation, Sub-pixel algorithm, Tensile tests

1. บทนำ

วิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์เรลชัน (Digital Image Correlation) หรือเรียกย่อว่า ดีไอซี (DIC) [1] ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในสาขาการทดลองทางกลศาสตร์ (Experimental Mechanics) และงานวิจัยด้านอื่นๆ เพราะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการวัดความเครียดบนพื้นผิวของชิ้นงานโดยไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานในระหว่างการวัด วิธีการนี้มีความง่ายและยืดหยุ่นในการทดลอง นอกจากนี้วิธีดีไอซียังสามารถที่จะวัดสนามการกระจัด (displacement field) และสนามความเครียด (strain field) ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานทดสอบและการดึงทดสอบวัสดุ [2-5]

หลักการพื้นฐานของวิธีดีไอซีจะใช้วิธีการเปรียบเทียบภาพลายจุด (speckle pattern) บนพื้นผิววัสดุทดสอบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวัดการกระจัดบนผิววัสดุ การเปรียบเทียบภาพลายจุดจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ซึ่งจะทำให้ความแม่นยำอยู่ที่หนึ่งพิกเซล เพื่อเพิ่มความแม่นยำที่น้อยกว่าหนึ่งพิกเซลจำเป็นต้องพัฒนาอัลกอริทึมของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมาใหม่ อัลกอริทึมนี้เรียกว่าซับพิกเซลอัลกอริทึม (sub-pixel algorithm) ตัวอย่างของซับพิกเซลอัลกอริทึม เช่น the coarse-fine search method [6], correlation coefficient interpolation [7], Newton-Raphson iteration [8] และ multiscale extended digital image correlation [9] ซึ่งถูกพัฒนาจากหลากหลายนักวิจัยมาเกือบสี่ทศวรรษ

การประเมินประสิทธิภาพของซับพิกเซลอัลกอริทึมโดยใช้การจำลองภาพลายจุดจากคอมพิวเตอร์ช่วยให้ทราบถึงความคลาดเคลื่อนของอัลกอริทึม จากงานวิจัย [10] ได้ใช้ภาพลายจุดที่จำลองจากคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของซับพิกเซลอัลกอริทึมโดยใช้วิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient interpolation) และ วิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson iteration) จากการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (systematic error) และความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม

(random error) ของการกระจุกตัวว่าวิธีนิวตันราฟสันมีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มน้อยกว่าวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบสนามความเครียดที่มีค่าการกระจายสม่ำเสมอ (uniform strained distribution) พบว่าวิธีนิวตันราฟสันมีการกระจายของสนามความเครียดที่สม่ำเสมอกว่าวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ในการดึงทดสอบวัสดุจริงเพื่อวัดค่าสนามความเครียดโดยวิธีดีไอซีให้ได้ความถูกต้องและแม่นยำจำเป็นที่จะต้องออกแบบการทดลองและเลือกอัลกอริทึมที่เหมาะสม [11-12] สำหรับการเลือกอัลกอริทึมจำเป็นที่จะต้องพิจารณาสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเช่น ชนิดของซับพิกเซลอัลกอริทึม การเลือกใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าการกระจัด [13] และการเลือกใช้ฟังก์ชันเพื่อประมาณค่าของแสง [14] วิธีนิวตันราฟสันจะใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าการกระจัดจากอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งที่เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบ homogeneous deformation ที่เกิดกับชิ้นงานขณะอยู่ใต้ภาระดึง ซึ่งอัลกอริทึมชนิดอื่นจะใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าการกระจัดกับการเสียรูปในรูปร่างอื่นหรือไม่ใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าการกระจัด

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าความถูกต้องแม่นยำของวิธีดีไอซีส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับเลือกใช้ซับพิกเซลอัลกอริทึม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ซับพิกเซลอัลกอริทึมที่สร้างบนพื้นฐานของวิธีนิวตันราฟสันเนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนที่น้อยและมีฟังก์ชันการประมาณค่าการกระจัดที่เหมาะสมกับการเสียรูปของชิ้นงานที่อยู่ภายใต้ภาระดึง ภาพลายจุดที่จำลองจากคอมพิวเตอร์จะถูกใช้เพื่อประเมินความคลาดเคลื่อนของโปรแกรม จากนั้นจะทำการสถิติดึงทดสอบวัสดุอูมิเนียมโดยใช้วิธีดีไอซีในการวัดสนามความเครียดบนชิ้นงานแล้วเปรียบเทียบความเครียดเฉลี่ยกับอุปกรณ์วัดระยะยืดแบบวีดีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์ กราฟความเค้นความเครียดในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นจะถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้เปรียบเทียบค่าความเครียดและค่า Young's Modulus ของทั้งสองวิธี

2. การวัดสนามความเครียดโดยใช้วิธีดีไอซี

2.1 หลักการของวิธีดีไอซี

เริ่มต้นจะนำเสนอการวิเคราะห์โดยใช้วิธีดีไอซีสำหรับการวิเคราะห์ในสองมิติ หลักการในการวิเคราะห์จะใช้อัลกอริทึมในการจับคู่ภาพดิจิทัลที่มีลักษณะเป็นลายจุดบนพื้นผิวของวัสดุทดสอบ ภาพพื้นผิวของวัสดุก่อนการให้โหลดและภาพพื้นผิวของวัสดุหลังการให้โหลดจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับกันโดยใช้วิธีการค้นหาภาพที่เหมือนกัน ภาพก่อนการให้โหลดจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ผิวของวัสดุหรือเรียกว่าภาพไม่เสียรูป (undeformed image) ส่วนภาพหลังจากการให้โหลดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ผิวของวัสดุหรือเรียกว่าภาพเสียรูป (deformed image) เกณฑ์ในการเปรียบเทียบจะใช้เกณฑ์สหสัมพันธ์ปกติ (normalized cross-correlation criterion) [11] จากการวิเคราะห์บนพื้นฐานของเกณฑ์สหสัมพันธ์ปกตินี้จะหาค่าสนามการกระจัดบนพื้นผิวของวัสดุที่สนใจซึ่งมีความแม่นยำของการกระจัดคือหนึ่งพิกเซล (pixel) แต่อย่างไรก็ตามในการเพิ่มความแม่นยำที่ดีกว่าคือความแม่นยำที่น้อยกว่าหนึ่งพิกเซล สามารถทำได้โดยใช้อัลกอริทึมที่เรียกว่าซับพิกเซลอัลกอริทึม

งานวิจัยนี้จะใช้ประโยชน์ของซับพิกเซลอัลกอริทึมที่สร้างบนพื้นฐานของวิธีการนิวตันราฟสัน [8] เพื่อเพิ่มความแม่นยำให้กับการวัดการกระจัดและความเครียด อัลกอริทึมนี้สร้างจากสมมติฐานที่ว่า การกระจัดจะประมาณค่าจากอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง (first-order Taylor series expansion) สำหรับการวิเคราะห์ในระนาบจุดซับเซต (subset points) ที่อยู่ตำแหน่ง (x, y) ของภาพไม่เสียรูปจะถูกเชื่อมโยงเข้ากับตำแหน่ง (\tilde{x}, \tilde{y}) ของภาพเสียรูปโดยใช้สมการดังนี้

$$\tilde{x} = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \quad (1)$$

$$\tilde{y} = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \quad (2)$$

เมื่อ u และ v คือการกระจัดของจุดศูนย์กลางซับเซตในแกน x และ y ตามลำดับ ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของ ซับเซตไปที่ตำแหน่ง (x, y)

คือ Δx และ Δy ซับเซตจตุรัสสามารถที่จะยืดออกหรือหดเข้าแสดงได้จากความเครียดตึงฉาก ($\partial u / \partial x$ และ $\partial v / \partial y$) และความเครียดเฉือน ($\partial u / \partial y$ และ $\partial v / \partial x$) จากสมการที่ (1) และ (2) จะได้ตัวแปรแมปปิง (mapping parameter) นั้นคือ $u \partial u / \partial x \partial u / \partial y v \partial v / \partial x$ และ $\partial v / \partial y$ ซึ่งมีทั้งหมด 6 ตัว

ภาพดิจิทัลที่ได้จากกล้องดิจิทัลจะถูกเก็บไว้โดยรูปแบบของภาพสีเทา (grayscale image) ภาพนี้จะมีค่าความเข้มของแสงที่จุดพิกเซล ซึ่งมีเขตสีอยู่ในช่วงสีดำ-สีเทา-สีขาว ค่าความเข้มของแสงของแต่ละพิกเซลถูกเก็บไว้ด้วยจำนวนขนาด 8 บิต ดังนั้นค่าความเข้มของแสงจะอยู่ระหว่าง 0 (สีดำ) ถึง 255 (สีขาว) ในซับพิกเซลอัลกอริทึมความเข้มของภาพสีเทาจะถูกสร้างขึ้นอีกครั้งโดยใช้ไบคิวบิกสไปน์ (bicubic spline) เพื่อประมาณค่าความเข้มของแสงที่จุดใดๆ ในภาพฟังก์ชันไบคิวบิกสไปน์ $g(x, y)$ แสดงถึงภาพไม่เสียรูป ส่วนฟังก์ชันไบคิวบิกสไปน์ $\tilde{h}(\tilde{x}, \tilde{y}, \mathbf{P})$ จะแสดงถึงภาพหลังการเสียรูป ดังนั้นสามารถเขียนฟังก์ชันไบคิวบิกสไปน์ของทั้งคู่ได้ดังนี้

$$g(x, y) = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 a_{mn} x^m y^n \quad (3)$$

$$\tilde{h}(\tilde{x}, \tilde{y}, \mathbf{P}) = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 b_{mn} \tilde{x}^m \tilde{y}^n \quad (4)$$

โดยค่า a_{mn} และ b_{mn} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสไปน์และ \mathbf{P} เป็นเวกเตอร์ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรแมปปิงในสมการที่ (1) และ (2)

ในการประเมินความเหมือนกันระหว่างซับเซตของเซตก่อนเสียรูปและเซตหลังเสียรูป ขนาดของซับเซต $(2M + 1) \times (2M + 1)$ พิกเซล จะถูกเลือกจากภาพที่ไม่เสียรูป เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรแมปปิงค่าสัมประสิทธิ์กำลังสองน้อยที่สุด (least square correlation coefficient) จะถูกนำมาใช้ในการประเมิน ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$C = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x, y) - \tilde{h}(\tilde{x}, \tilde{y}, \mathbf{P})]^2}{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x, y)]^2} \quad (5)$$

พิจารณาสมการที่ (5) การหาค่า C ที่น้อยที่สุด เกรเดียนต์ของค่า C ต้องลู่เข้าหาศูนย์ นั่นคือ

$$\nabla C = \left(\frac{\partial C}{\partial P_i} \right)_{i=1, \dots, 6} = 0 \quad (6)$$

วิธีนิวตันราฟสันถูกนำมาใช้ในการแก้สมการที่ (6) ซึ่งเป็นระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น หลักการของวิธีนิวตันราฟสันจะใช้อนุกรมเทย์เลอร์เพื่อประมาณหาค่าคำตอบ การประมาณหาค่าคำตอบถัดไปจะหาได้จากการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์รอบ \mathbf{P}_0 ดังนี้

$$[\nabla \nabla C(\mathbf{P}_0)(\mathbf{P} - \mathbf{P}_0)] = -[\nabla C(\mathbf{P}_0)] \quad (7)$$

การหาค่าคำตอบสามารถทำได้โดยการเดาเลือกค่าเวกเตอร์เริ่มต้น \mathbf{P}_0 ในสมการที่ (7) จากการแก้สมการที่ (7) ค่าเวกเตอร์คำตอบโดยประมาณ \mathbf{P} จะสามารถหาได้เพื่อใช้สำหรับการคำนวณซ้ำครั้งต่อไป ส่วนค่า $\nabla \nabla C(\mathbf{P}_0)$ คือค่าเกรเดียนต์อันดับสอง หรือเรียกว่า เฮสเซียนเมตริกซ์ (Hessian matrix) การวนซ้ำของวิธีนิวตันราฟสันสำหรับแก้ระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้ จะลู่เข้าหาคำตอบเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขสามข้อ ดังนี้ เงื่อนไขที่หนึ่งเกรเดียนต์ ∇C และ $\nabla \nabla C$ ต้องมีความต่อเนื่องและมีขอบเขตอยู่ใกล้คำตอบ เงื่อนไขที่สองค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเฮสเซียนเมตริกซ์ต้องเข้าใกล้ศูนย์ และเงื่อนไขที่สามการเดาเลือกค่าเวกเตอร์เริ่มต้นต้องใกล้กับคำตอบจริง

โดยทั่วไปแล้ววิธีนิวตันราฟสันจะนิยมใช้ในการแก้ปัญหาเพราะการคำนวณที่แม่นยำเมื่อเทียบกับเวลาคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณ วิธี Levenberg-Marquardt เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกใช้ ทั้งวิธีนิวตันราฟสันและวิธี Levenberg-Marquardt มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ทั้งสองวิธีขึ้นอยู่กับวิธีการเดาเลือกค่าเริ่มต้น

การคำนวณลู่เข้าใกล้คำตอบที่ถูกต้องอาจไม่เกิดขึ้นเพราะค่าความเข้มของแสงที่เปลี่ยนแปลงทำให้ยากต่อการเดาเลือกค่าเริ่มต้น แต่อย่างไรก็ตามถ้าต้องการความต่อเนื่องของคำตอบวิธีนิวตันราฟสันน่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า

2.2 การประมาณค่าสนามความเครียด

ถึงแม้ว่าจะสามารถคำนวณหาสนามการกระจัดและสนามความเครียดได้จากอัลกอริทึมในหัวข้อ 2.1 แต่อย่างไรก็ตามการกระจัดและความเครียดที่ได้จะมีสิ่งรบกวน (noise) เช่น สิ่งรบกวนจากการใช้อัลกอริทึมในการคำนวณ (numerical noise) และสิ่งรบกวนจากการทดลอง (experimental noise)

ในการทดสอบทางกลศาสตร์วัสดุ เช่น การทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และการวิเคราะห์ความเค้นในโครงสร้าง สนามความเครียดเป็นสิ่งที่ต้องการและสำคัญ เทคนิคการปรับให้เรียบ (smoothing technique) จะช่วยลดสิ่งรบกวนและช่วยเพิ่มความแม่นยำให้กับข้อมูลมากขึ้น มีการนำเสนอเทคนิคนี้จากหลายนักวิจัย แต่ที่นิยมใช้สำหรับดีไอซีคือเทคนิคการปรับให้เรียบโดยวิธีกำลังสองเฉพาะที่ (local least-squares fitting technique) [11] เพราะเป็นเทคนิคที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ เทคนิคนี้เริ่มจากการเลือกหน้าต่างที่มีข้อมูลขนาด $(2m + 1) \times (2m + 1)$ จุด เพื่อใช้คำนวณความเครียดที่จุดตรงกลางของหน้าต่าง สมมติให้หน้าต่างมีขนาดเล็กการกระจายตัวของการกระจัดสามารถประมาณได้ว่าเป็นระนาบเชิงเส้น ดังนั้นฟังก์ชันของการกระจัดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(i, j) = a_0 + a_1 x + a_2 y \quad (8)$$

$$v(i, j) = b_0 + b_1 x + b_2 y \quad (9)$$

เมื่อ $i = -m:m$ และ $j = -m:m$ คือพิกัดเฉพาะที่ (local coordinate) ของหน้าต่างที่จะคำนวณค่า $u(i, j)$ และ $v(i, j)$ คือค่าการกระจัดที่คำนวณได้จากอัลกอริทึมในหัวข้อ 2.1 ค่าคงที่ a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 และ b_2 คือค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามที่ต้องการหา จากนั้นใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-squares method) จะได้ว่า

$$\mathbf{A} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{U} \quad (10)$$

โดย เวกเตอร์ \mathbf{A} คือเวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์พหุนาม a_0 a_1 และ a_2 เมทริกซ์ \mathbf{M} คือเมทริกซ์ที่ประกอบไปด้วยพิกัดเฉพาะที่ และ เวกเตอร์ \mathbf{U} คือเวกเตอร์ค่าการกระจัดของ $u(i, j)$ ในสมการที่ (8) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์พหุนาม b_0 b_1 และ b_2 สามารถหาค่าโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดดังที่กล่าวมาข้างต้นได้เช่นกัน

ในการหาค่าความเครียดสามารถทำได้โดยการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันการกระจัดสมการที่ (8) และ (9) จะได้ว่า

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = a_1 \quad (11)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = b_2 \quad (12)$$

โดย ε_x และ ε_y คือค่าความเครียดตั้งฉากในแกน x และ y ตามลำดับ ข้อควรระวังในการใช้วิธีการนี้คือเมื่อให้ขนาดหน้าตาที่มีขนาดใหญ่ข้อมูลที่สำคัญในการวัดอาจถูกลบทิ้ง ถ้าหน้าตาที่มีขนาดเล็กสิ่งรบกวนจะคงอยู่ ดังนั้นขนาดหน้าตาควรที่จะถูกเลือกให้เหมาะสมด้วยความระมัดระวังเพื่อจะได้ค่าความเครียดที่ถูกต้อง

3. การตรวจสอบดีไอซีอัลกอริทึมโดยใช้วิธีการจำลองการทดลอง

3.1 การใช้คอมพิวเตอร์จำลองสร้างภาพลายจุด

คอมพิวเตอร์โปรแกรมได้ถูกสร้างจากอัลกอริทึมที่อยู่บนพื้นฐานของซัพพิกเซลอัลกอริทึมในการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ภาพดิจิทัลที่มีลักษณะเป็นลายจุดแบบสุ่มได้ถูกสร้างขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์หรือเรียกภาพนี้ว่าภาพเสมือน (virtual image) ภาพเสมือนนี้ถูกสร้างขึ้นสาเหตุเพราะการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ในการทดลองจริงทำได้ยากซึ่งภาพเสมือนนี้สามารถทำได้ง่ายกว่า ภาพเสมือนสามารถที่จะกำหนดแบบของลายจุดและขนาดของลายจุดรวมถึงสามารถกำหนดการกระจัดให้กับภาพได้โดยตรง สัญญาณรบกวนที่มาจากกล้องดิจิทัลและการเยื้องศูนย์ของอุปกรณ์จะไม่ถูกรวมในภาพเสมือนนี้ทำ

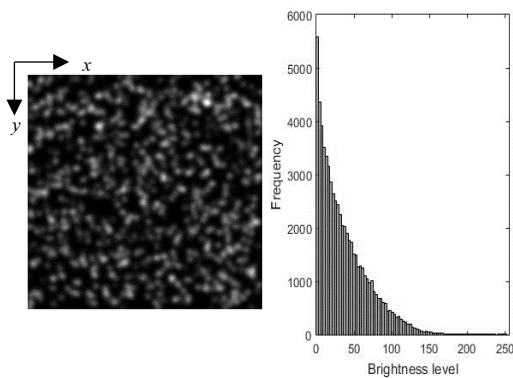
ให้การวัดประสิทธิภาพของดีไอซีอัลกอริทึมเช่น ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ และความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มสามารถทำได้ง่ายขึ้น ภาพเสมือนนี้จะประกอบไปด้วยภาพไม่เสีรูป $I_1(x, y)$ และภาพเสีรูป $I_2(x, y)$ สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังนี้

$$I_1(x, y) = \sum_{k=1}^s I_k^0 \exp [-(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 / R^2] \quad (13)$$

$$I_2(x, y) = \sum_{k=1}^s I_k^0 \exp [-(x - x_k - u_0 - \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x - \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y)^2 + (y - y_k - v_0 - \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x - \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y)^2 / R^2] \quad (14)$$

เมื่อ ค่า s คือจำนวนของจุดทั้งหมด ค่า R คือขนาดของจุด พิกัด (x_k, y_k) คือตำแหน่งพิกัดของแต่ละจุดที่มีการกระจายแบบสุ่ม ค่า I_k^0 คือความเข้มของแสงสูงสุดของแต่ละจุดที่มีการกระจายแบบสุ่ม ค่า u_0 และ v_0 คือค่าการกระจัดเชิงเกร็งที่กำหนดให้กับภาพ (imposed displacement) ในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ ค่า $\partial u / \partial x$ และ $\partial v / \partial y$ คือค่าความเครียดตั้งฉากที่กำหนดให้กับภาพ (imposed normal strain) และ ค่า $\partial u / \partial y$ และ $\partial v / \partial x$ คือความเครียดเฉือนที่กำหนดให้กับภาพ (imposed shear strain)

ภาพเสมือนสามารถสร้างได้โดยแทนพิกัดและค่าตัวแปรลงในฟังก์ชันของสมการที่ (13) และ (14) ซึ่งจะสัมพันธ์กับตารางกริดใน CCD เช่นเซอร์คอมพิวเตอร์โปรแกรมจะสร้างภาพเสมือนตามตัวแปรที่แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีค่าตัวแปร s เท่ากับ 1200 ค่า R เท่ากับ 4 และมีขนาดของภาพเท่ากับ 256×256 พิกเซล ภาพเสมือนสีเทานี้มีค่าความความเข้มของแสงอยู่ระหว่าง 0 ถึง 255 การสร้างภาพลายจุดที่เหมาะสมจะต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างสีดำและสีขาวบนกราฟฮิสโทแกรมและควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของจุดอยู่ระหว่าง 3 ถึง 10 พิกเซล [15]



รูปที่ 1 ภาพเสมือนและฮิสโทแกรมของภาพ

3.2 การวัดความคลาดเคลื่อนของอัลกอริทึม ซัพพิกเซล

ในการประเมินความแม่นยำของอัลกอริทึมซัพพิกเซล คอมพิวเตอร์จะทำการจำลองภาพเสมือนโดยกำหนดค่าการกระจัดเชิงเกร็งในแนวแกน x ให้กับภาพและค่าตัวแปรในการสร้างภาพเสมือนจะใช้เหมือนกับรูปที่ 1 ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (E) สามารถนิยามได้ดังนี้

$$E = u_{mean} - u_{imp} \quad (15)$$

เมื่อค่า u_{mean} และ u_{imp} แสดงถึงค่าเฉลี่ยของการกระจัดเชิงเกร็งและค่าการกระจัดเชิงเกร็งที่กำหนดให้กับภาพ ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ยของการกระจัดเชิงเกร็งสามารถนิยามได้ดังนี้

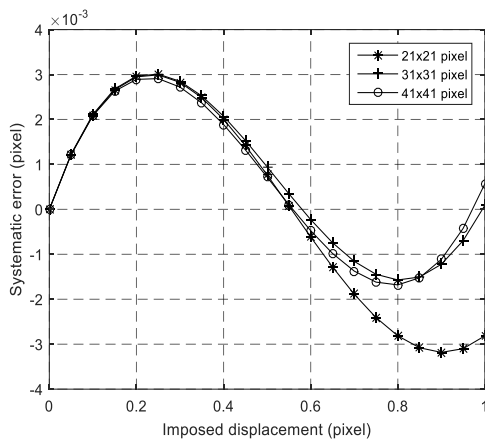
$$u_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (16)$$

เมื่อ u_i คือค่าการกระจัดที่วัดได้และ N คือจำนวนจุดข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมด สำหรับการวัดการกระจายของข้อมูลสามารถทำได้โดยใช้การวัดความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (SD) ซึ่งสามารถนิยามได้ดังนี้

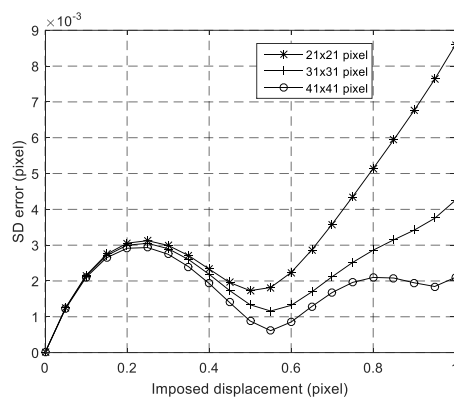
$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i - u_{imp})^2} \quad (17)$$

สำหรับการวัดความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มจะวัดการกระจายตัวของการกระจัด u_i เทียบกับค่าการกระจัดเชิงเกร็งที่กำหนดให้กับภาพ u_{imp}

ภาพเสมือนจำนวน 21 ภาพ ถูกสร้างขึ้นโดยคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินความคลาดเคลื่อนของอัลกอริทึมซัพพิกเซล ภาพที่ถูกสร้างขึ้นจะมีการกระจัดที่กำหนดให้ u_{imp} อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 พิกเซล โดยให้การกระจัดเพิ่มขึ้นทีละ 0.05 พิกเซล ในแต่ละภาพ จากนั้นจะใช้อัลกอริทึมซัพพิกเซลคำนวณสนามการกระจัดในแต่ละภาพโดยมีจำนวนจุดที่ถูกคำนวณเท่ากับ 441 จุด หรือ 21×21 จุด ในแต่ละภาพ ขนาดของซัพเซตที่ใช้คำนวณมี 3 ขนาดคือ 21×21 31×31 และ 41×41 พิกเซล จากรูปที่ 2 (ก) แสดงความคลาดเคลื่อนเชิงระบบของแต่ละซัพเซตที่ใช้ จะสังเกตได้ว่ากราฟมีลักษณะคล้ายกับกราฟไซน์ (sinusoidal curve) ในช่วงเริ่มต้นของค่าการกระจัดที่กำหนดให้คือตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 พิกเซล กราฟความคลาดเคลื่อนเชิงระบบของแต่ละซัพเซตมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงปลายของกราฟซัพเซตขนาด 21×21 พิกเซล มีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบมากกว่าซัพเซตอื่น ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบของอัลกอริทึมซัพพิกเซลเกิดจากการใช้ฟังก์ชันประมาณค่าการกระจัดและการใช้ไบคิวบิกสไปร์ประมาณค่าความเข้มของแสง เมื่อวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มในรูปที่ 2 (ข) ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มจะแสดงการกระจายของข้อมูลการกระจัดที่วัดได้ ช่วงเริ่มต้นของกราฟมีค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มในแต่ละซัพเซตที่ใกล้เคียงกัน เมื่อการกระจัดที่กำหนดให้มีค่ามากกว่า 0.5 พิกเซล ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกขนาดของซัพเซต โดยเฉพาะขนาดของซัพเซต 21×21 พิกเซล มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากที่สุด ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่าการใช้ขนาดของซัพเซตที่น้อยจนเกินไปจะทำให้ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มมีค่าเพิ่มขึ้น



(ก)

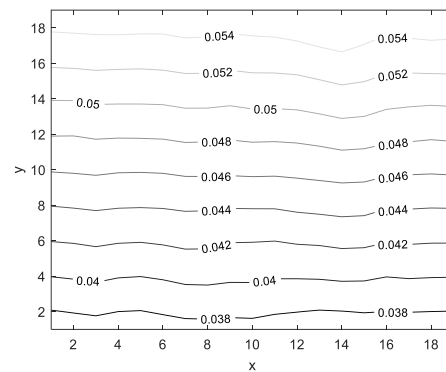


(ข)

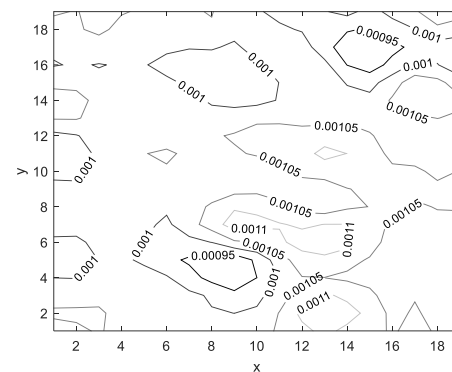
รูปที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนของซัพพิกเซลอัลกอริทึม
(ก) ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (ข) ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม

ในขั้นตอนต่อไปจะทำการใช้หัวข้อ 2.2 การประมาณค่าสนามความเครียดเพื่อลดสิ่งรบกวนที่ได้จากอัลกอริทึมซัพพิกเซล โดยกำหนดให้ค่าความเครียดตั้งฉากที่ให้กับภาพเป็นค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ (14) แทนความเครียดที่กำหนดให้ $\partial v / \partial y = 0.001$ เริ่มต้นจากการใช้อัลกอริทึมซัพพิกเซลโดยใช้ซัพเซตขนาด 31×31 พิกเซล คำนวณหาตัวแปรแมพปิงและมีจำนวนจุดที่ถูกคำนวณ 21×21 จุด จากนั้นจะใช้เทคนิคการปรับให้เรียบโดยมีหน้าต่างคำนวณขนาด 3×3 พิกเซล จะได้จำนวนจุดการกระจายและความเครียดมีจำนวนเท่ากันคือ 19×19 จุด จากรูปที่ 3 (ก) แสดงค่าสนามการกระจาย v ที่ได้จากการใช้เทคนิคการปรับค่าความเครียดให้เรียบ จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของ

การกระจายเพิ่มขึ้นตามแนวแกน y ขณะที่การกระจายจริงควรต้องเป็นเส้นตรงในแนวระดับและมีค่าคงที่ในแต่เส้น ส่วนรูปที่ 3 (ข) แสดงค่าสนามความเครียด $\partial v / \partial y$ ที่ได้จากอนุพันธ์ของฟังก์ชันการกระจายในรูปที่ 3 (ก) เนื่องจากการกระจายมีความชันที่ไม่คงที่จึงทำให้ความเครียดที่ได้มีค่าไม่คงที่ตามความชันของการกระจาย โดยความเครียดจะอยู่ระหว่าง 0.00095 ถึง 0.00105 แตกต่างจากค่าความเครียดที่กำหนดให้ $\pm 5\%$



(ก)



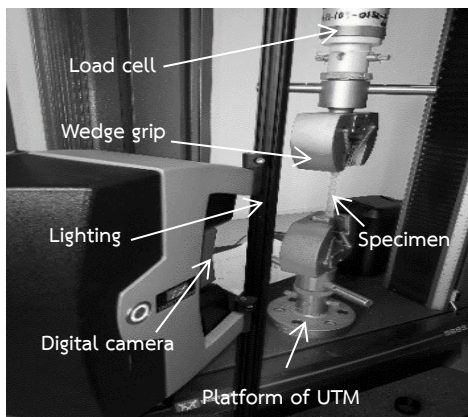
(ข)

รูปที่ 3 การประมาณค่า (ก) สนามการกระจาย v หน่วยเป็นพิกเซล (ข) สนามความเครียด $\partial v / \partial y$

4. การดัดทดสอบวัสดุ

ในหัวข้อนี้จะสังเกตผลการวัดความเครียดจากการดัดทดสอบวัสดุ ผลการวัดความเครียดที่ได้จากวิธีดิโอซีจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวัดของอุปกรณ์วัดระยะยืดแบบวิดีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์ (video extensometer) การจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 จะประกอบด้วยสองส่วนคือ เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing

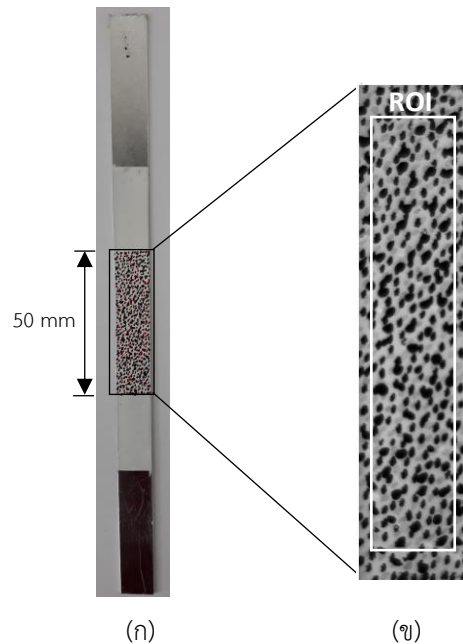
machine, UTM) ยี่ห้อ Instron 5969 และอุปกรณ์การถ่ายภาพ ในส่วนของเครื่องทดสอบเอนกประสงค์จะประกอบด้วยโหลดเซลล์ที่มีขนาด 5 kN และหัวจับแบบลิ้ม (wedge grip) ส่วนอุปกรณ์ถ่ายภาพจะประกอบด้วยกล้องดิจิทัลที่มีความละเอียด 2048 × 300 พิกเซล เลนส์มีระยะโฟกัส 35 mm เลนส์โพลาไรซ์เพื่อตัดแสงสะท้อน และอุปกรณ์ให้แสงสว่างสีแดง



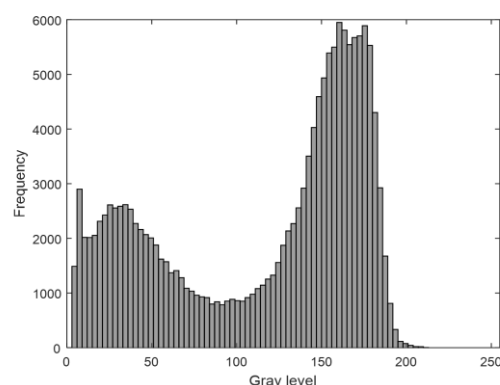
รูปที่ 4 อุปกรณ์การทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบทำจากแผ่นวัสดุอลูมิเนียมอัลลอยที่มีความหนา 0.5 mm ถูกตัดให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความกว้าง 12.5 mm และความยาว 200 mm การวัดโดยวิธีโอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์จะใช้เวลาความยาวเกจ (gauge length) เท่ากับ 50 mm หลังจากแผ่นอลูมิเนียมถูกตัดตามขนาดแล้วจะต้องนำไปพ่นสีขาวรองพื้นตรงตำแหน่งที่ต้องการวัดคือส่วนตรงกลางของชิ้นงานตามรูปที่ 5 (ก) การสร้างลายจุดแบบสุ่มสามารถทำได้โดยนำปากกา สีดำ สีแดง และสีน้ำเงินมาแต้มจุดบนชิ้นงานโดยการแต้มจะต้องทำอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน เมื่อถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลจะได้ภาพสีเทาตามรูปที่ 5 (ข) จากนั้นกำหนดหน้าต่างที่สนใจ (Region of Interest, ROI) จะได้ภาพขนาด 1050 × 231 พิกเซล นำภาพ ROI นั้นมาสร้างฮิสโตแกรมความเข้มของแสงตามรูปที่ 6 จะเห็นว่าฮิสโตแกรมจะบ่งบอกถึงความคมชัดของภาพสีเทาและไม่มีมีการสะท้อนของแสงเกิดขึ้น การสร้างภาพลาย

จุดจะต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างสีดำและสีขาวบนฮิสโตแกรม ซึ่งต้องมีการกระจายค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 255 การใช้สีอื่นนอกจากสีดำและสีขาวจะช่วยให้ภาพลายจุดมีการกระจายตัวของความเข้มแสงบนกราฟฮิสโตแกรมที่ดีขึ้นเมื่อถ่ายภาพด้วยกล้องขาวดำ

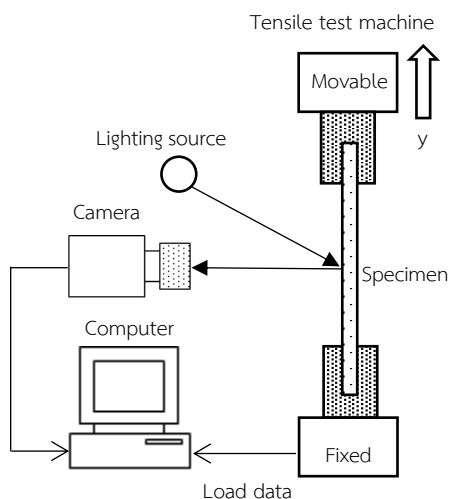


รูปที่ 5 (ก) ชิ้นงานอลูมิเนียม (ข) ภาพลายจุดบนชิ้นงาน



รูปที่ 6 ฮิสโตแกรมของภาพลายจุดบนชิ้นงาน

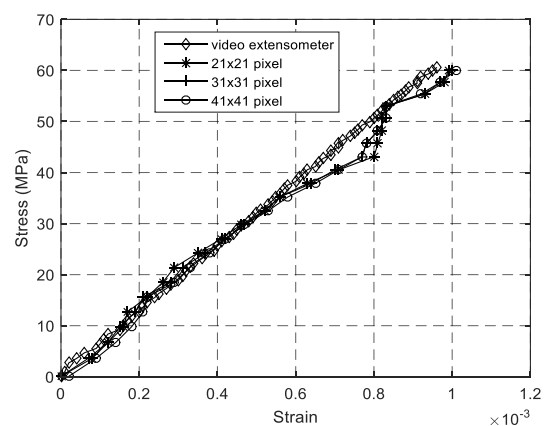
ระหว่างทดสอบดังรูปที่ 7 ชิ้นงานด้านหนึ่งจะถูกยึดไว้และอีกด้านจะเคลื่อนที่ตามหัวจับของเครื่อง เครื่องทดสอบเอนกประสงค์จะดึงชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็ว 1 mm/min กล้องจะถ่ายภาพต่อเนื่องด้วยอัตราเร็ว 10 ภาพ/วินาที ชิ้นงานทดสอบจะถูกวัดค่าความเครียดด้วยอุปกรณ์วัดระยะยืด ยี่ห้อ Instron AVE2 จากนั้นข้อมูลไหลดจากโหลดเซลล์และความเครียดจากอุปกรณ์วัดระยะยืดจะถูกเก็บเข้าสู่คอมพิวเตอร์ เช่นเดียวกันในการวัดความเครียดโดยวิธีดิไอซีภาพลายจุดจะถูกถ่ายจากกล้องและอุปกรณ์ให้แสงสว่างชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในอุปกรณ์วัดระยะยืด Instron AVE2 จากนั้นจะนำภาพลายจุดที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาสนามความเครียด ต่อไป



รูปที่ 7 การดึงทดสอบด้วยวิธีดิไอซีแบบสองมิติ

วิธีดิไอซีจะใช้ในการวัดสนามความเครียดโดยกำหนดขนาดของซับเซตที่ใช้คำนวณมี 3 ขนาดคือ 21×21 31×31 และ 41×41 พิกเซล ทำการคำนวณสนามการกระจัดในแต่ละภาพโดยมีจำนวนจุดที่ถูกคำนวณเท่ากับ 21×21 จุด จากนั้นจะใช้เทคนิคการปรับให้เรียบมีขนาดหน้าต่างคำนวณ 3×3 พิกเซล ทำการคำนวณความเครียดจะได้จำนวนจุดความเครียดทั้งหมด 19×19 จุดต่อหนึ่งภาพ จากนั้นนำค่าความเครียดที่ได้มาหาค่าความเครียดเฉลี่ยเพื่อสร้างกราฟความเค้นต่อไป เนื่องจากค่าสนามความเครียดจริง

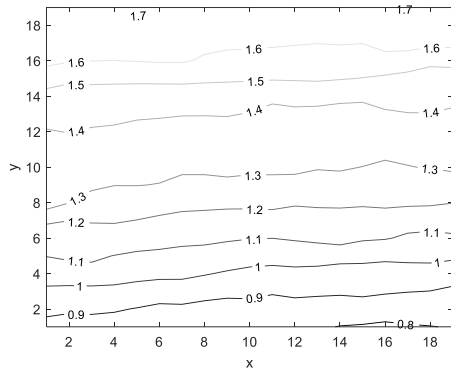
ไม่อาจทราบค่าได้จึงจำเป็นต้องใช้ค่าความเครียดจากวิธีดิไอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์มาเปรียบเทียบ พิจารณารูปที่ 8 เป็นกราฟความเค้นความเครียดในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นของวัสดุ จะสังเกตได้ว่ากราฟจากวิธีดิไอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์มีความเป็นเส้นตรงมากกว่าวิธีดิไอซี เมื่อความเครียดมีค่าสูงความแตกต่างของทั้งสองวิธีมีค่าเพิ่มขึ้นปัจจัยหนึ่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงและอีกปัจจัยหนึ่งเกิดจากการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับวิธีดิไอซี ดังนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่ายังมอดูลัสซึ่งคำนวณได้จากความชันของกราฟความเค้นความเครียด โดยค่ายังมอดูลัสที่ได้จากกราฟวิธีดิไอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์มีค่าเท่ากับ 63.72 GPa ค่ายังมอดูลัสที่ได้จากวิธีดิไอซีของซับเซตขนาด 21×21 31×31 และ 41×41 พิกเซล มีค่าเท่ากับ 60.26 60.43 และ 59.97 GPa ตามลำดับ ค่ายังมอดูลัสของซับเซตขนาด 31×31 มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากวิธีดิไอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์มากที่สุดนั่นคือมีความแตกต่างสมบูรณ์อยู่ที่ 5.16 %



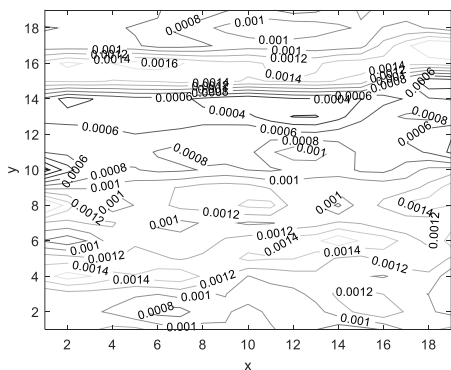
รูปที่ 8 กราฟความเค้นความเครียด

จากกราฟความเค้นความเครียดในรูปที่ 8 ตำแหน่งที่ความเค้นเท่ากับ 60.01 MPa ถูกพิจารณาอีกครั้ง โดยใช้ขนาดของซับเซต 31×31 พิกเซล ทำการคำนวณและใช้เทคนิคการปรับให้เรียบจะได้จำนวนจุดข้อมูล 19×19 จุด จากนั้นนำการกระจัดและความเครียดที่ได้นี้มาสร้างกราฟดังรูปที่ 9 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของสนามการกระจัด v รูปที่ 9 (ก)

จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของกระจัดที่ไม่คงที่ หรือมีลักษณะการกระจายตัวแบบ homogeneous deformation น้อยกว่ารูปที่ 3 (ก) ดังนั้นเมื่อความชันของการกระจัดที่ได้ไม่คงที่เป็นผลให้ความเครียดมีความไม่คงที่ตามมาดังรูปที่ 9 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 (ก) สนามการกระจัด v หน่วยเป็นพิกเซล

และ (ข) สนามความเครียด dv/dy

ที่ความเค้น 60.01 MPa

5. สรุป

ในหัวข้อที่ 3 การจำลองภาพลายจุดด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการประเมินความคลาดเคลื่อนจากการพัฒนาโปรแกรมอัลกอริทึมซัพพิกเซลที่สร้างบนพื้นฐานของวิธีนิวตันราฟสัน การประเมินทำให้ทราบว่า การใช้ซัพเซตที่เล็กเกินไปเช่น 21×21 พิกเซล เมื่อการกระจัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ทั้งความคลาดเคลื่อนเชิงระบบและความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มมีค่าสูงขึ้น สาเหตุของความคลาดเคลื่อนเกิดจากหลายปัจจัย ซึ่งปัจจัยหนึ่ง

เกิดจากฟังก์ชันประมาณค่าการกระจัดและความเข้มของแสง การหาฟังก์ชันที่เหมาะสมยังเป็นหัวข้องานวิจัยที่สามารถทำได้ในอนาคต

จากหัวข้อที่ 4 สรุปได้ว่าการสร้างภาพลายจุดด้วยปากกามีคุณภาพเพียงพอในการวัดสนามความเครียดด้วยวิธีดีไอซี แต่อย่างไรก็ตามการสร้างภาพลายจุดด้วยปากกาก็มีความแตกต่างจากการสร้างภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในหัวข้อที่ 3 การควบคุมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของจุดและการกระจายของความเข้มแสงในฮิสโตแกรมของภาพที่ถูกสร้างขึ้นมีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการวัด

การสาธิตตั้งขึ้นงานอูมิ เนียมโดยใช้ความเครียดจากวิธีไอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์เป็นเกณฑ์วัดเปรียบเทียบกับวิธีดีไอซี การใช้เทคนิคการปรับให้เรียบเพื่อช่วยลดสิ่งรบกวนซึ่งจะทำให้การกระจัดมีความชันคงที่เหมาะสมในการใช้หาความเครียดต่อไป จากการทดสอบตั้งอูมิ เนียมอัลลอยพบว่ากราฟความเค้นความเครียดที่ได้จากทั้งสองวิธีมีความใกล้เคียงกัน ยกเว้นเมื่อความเครียดมีค่าสูงทำให้วิธีไอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์ที่แตกต่างออกไป สุดท้ายการเปรียบเทียบค่ายังมอดูลัสของอูมิ เนียมอัลลอยที่วัดได้โดยใช้กราฟความเค้นความเครียดจากวิธีดีไอซีและวิธีไอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์พบว่าค่าที่ได้โดยวิธีดีไอซีแตกต่างเล็กน้อยกับวิธีไอเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์ จากผลการวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ที่สามารถนำวิธีดีไอซีไปศึกษาวิจัยคุณสมบัติทางกลของอูมิ เนียมอัลลอยและวัสดุชนิดอื่นในอนาคตต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ดำเนินการได้ด้วยการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] He X, Zhou R, Liu Z, Yang S, Chen K, Li L. Review of research progress and development trend of digital image correlation. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 2024; 20(1):81–114.
- [2] Pan B, Tian L. Advanced video extensometer for non-contact, real-time, high-accuracy strain measurement. *Optics Express*. 2016;24(17): 19082-93.
- [3] Sánchez-Arévalo FM, Pulos G. Use of digital image correlation to determine the mechanical behavior of materials. *Materials Characterization*. 2008;59(11):1572–9.
- [4] Cruz DJ, Shamchi SP, Santos AD, Amaral RL, Tavares PJ, Moreira P. Development of a mini-tensile approach for sheet metal testing using Digital Image Correlation. *Procedia Structural Integrity*. 2020;25:316-23.
- [5] Quanjin M, Rejab MRM, Halim Q, Merzuki MNM, Darus MAH. Experimental investigation of the tensile test using digital image correlation (DIC) method. *Materials Today: Proceedings*. 2020;27:757-63.
- [6] Zhang ZF, Kang YL, Wang HW, Qin QH, Qiu Y, Li XQ. A novel coarse-fine search scheme for digital image correlation method. *Journal of the International Measurement Confederation*. 2006;39(8):710–8.
- [7] Hung PC, Voloshin AS. In-plane strain measurement by digital image correlation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2003;25(3):215-21.
- [8] Vendroux G, Knauss WG. Submicron deformation field measurements: part 2. improved digital image correlation. *Experimental Mechanics*. 1998;38(2):86-92.
- [9] Réthoré J, Hild F, Roux S. Shear-band capturing using a multiscale extended digital image correlation technique. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2007;196(49-52):5016-30.
- [10] Bing P, Hui-Min X, Bo-Qin X, Fu-Long D. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation. *Measurement science and technology*. 2006;17(6):1615.
- [11] Pan B, Qian K, Xie H, Asundi A. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement science and technology*. 2009;20(6):062001.
- [12] Sutton MA, Orteu JJ, Schreier H. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*: Springer Science & Business Media; 2009.
- [13] Schreier HW, Sutton MA. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions. *Experimental mechanics*. 2002;42:303-10.
- [14] Schreier HW, Braasch JR, Sutton MA. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation. 2000;39(11): 2915-21
- [15] Lecompte D, Smits A, Bossuyt S, Sol H, Vantomme J, Van Hemelrijck D, et al. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. *Optics and lasers in Engineering*. 2006;44(11):1132-45.