

**การศึกษาวิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน:  
ประเมินความแม่นยำของการวัดการเปลี่ยนรูป**

**Study of Digital Image Correlation:  
Accuracy Evaluation of Deformation Measurements**

ฤทธิพล จันทราชภูร์ และ ประพจน์ ขุนทอง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน 50 ถ.พหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ ๑๐๙๐๐

\*ผู้ติดต่อ: E-mail: [fengppk@ku.ac.th](mailto:fengppk@ku.ac.th), โทรศัพท์: (662) 942-8555 ต่อ 1802, 1830, โทรสาร: (662) 579-4576

**บทคัดย่อ**

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าการวัดแบบเต็มพื้นผิวของการเปลี่ยนรูปด้วยวิธีการดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน วิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชันไม่ต้องการอุปกรณ์ด้านแสงที่ซับซ้อนเหมือนกับวิธีการเก่า ๆ วิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชันนี้ จะให้การเปลี่ยนรูปของพื้นผิวโดยการเทียบสัมพันธ์รูปย่อยที่อยู่ในรูปดิจิทัลก่อนและหลังการใส่โหลด คู่ของรูปจุด แต่มสึเทาที่ได้จากการสร้างเส้นแบบสำหรับรูปร่างก่อนและหลังการเปลี่ยนรูปถูกนำมาใช้เพื่อการพิสูจน์ความ แม่นยำของการวัดการเปลี่ยนรูปด้วยวิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน ขั้นตอนวิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชันรวมถึงวิธีการ จุดภาพย่อยถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การขจัด การทดลองหาการเปลี่ยนรูปของคานยื่นถูกใช้ในการพิสูจน์ วิธีการวัดด้วยดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน

**คำหลัก:** การวัดแบบเต็มพื้นผิว, ดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน, การวัดการเปลี่ยนรูป, การวิเคราะห์ความเค้นด้วยการ ทดลอง, การประมวลผลภาพ

**Abstract**

Full-field measurement of deformations using digital image correlation, DIC, technique is investigated in this work. Unlike the conventional full-field measurement techniques, DIC does not need a complicated optical system. The technique yields the surface deformation by correlating subimages on a pair of digital images, one before loading, and the other after loading. Pairs of simulated grey speckle images, corresponding to undeformed and deformed configurations, were generated and used for demonstration of the accuracy of digital image correlation for measuring deformations. The DIC algorithms including sub-pixel methods were implemented for analyzing the displacement fields. The experiment on deformation of cantilever beam was also performed to demonstrate the DIC measurement.

**Keywords:** Full-Filed Measurement, Digital Image Correlation, Deformation Measurement, Experimental Stress Analysis, Image Processing

## 1. บทนำ

การวัดการขจัดและความเครียดของวัสดุได้ถูกพัฒนาเพื่อให้การวัดมีความแม่นยำและมีความง่ายในการวัดเพิ่มมากขึ้น สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศมีผลต่อความแม่นยำของการวัด ในบางครั้งการวัดทั่วทั้งพื้นผิวของวัสดุ (Full-Field measurements) มีความจำเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์การเสียรูป และภาวะที่กระทำกับวัสดุ การวัดทั่วทั้งพื้นผิวที่นิยมในปัจจุบัน เช่น โฟโตอัสติคซิตี (Photoelasticity) วิธีกริด (Grid methods) วิธีมอเร (Moire' methods) และ วิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์เรลชัน (Digital Image Correlation)

วิธีดิจิทัลอิมเมจคอร์เรลชัน (Digital Image Correlation) หรือ DIC เป็นวิธีการวัดการขจัดและความเครียดแบบทั่วทั้งพื้นผิวอีกวิธีหนึ่ง วิธีการวัดแบบ DIC ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับวัสดุในระหว่างการวัด การวัดเริ่มต้นจากการถ่ายภาพลายจุดแบบสุ่ม (random speckle image) บนวัสดุที่ยังไม่เปลี่ยนรูป (undeformed image) และวัสดุที่เปลี่ยนรูป (deform image) โดยกล้องดิจิทัล แล้วนำรูปทั้งสองมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าการขจัดโดยหลักการสหสัมพันธ์

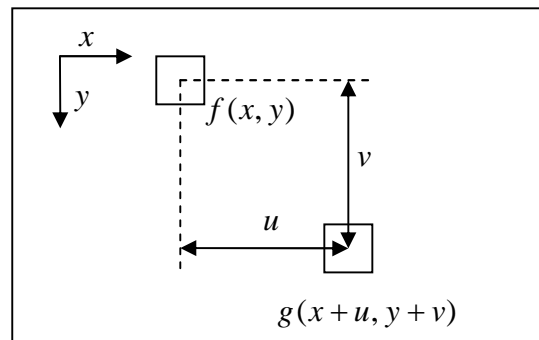
การเพิ่มความแม่นยำให้กับ DIC ถูกพัฒนาขึ้นในระหว่างปี ค.ศ.1980 โดยคณะวิจัยของมหาวิทยาลัยเซาท์แคโรไลนา (University of South Carolina) ซึ่งได้พัฒนาหลักการสหสัมพันธ์ร่วมกับวิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson iterations) เพื่อหาการขจัดที่มีความแม่นยำน้อยกว่าหนึ่งพิกเซล (Sub-pixel accuracy) [1] ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา นักวิจัยอีกหลายท่านได้เสนอวิธีการวัดการขจัดที่มีความแม่นยำน้อยกว่าหนึ่งพิกเซลอย่างอื่น ๆ เช่น วิธี correlation coefficient curve-fitting[2] และ วิธี Fourier transform[3]

ความผิดพลาดของการวัดโดยวิธีการ DIC จะประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ ความผิดพลาดจากกล้องดิจิทัล และความผิดพลาดจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผลภาพดิจิทัล ความ

ผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากโปรแกรมจะสามารถลดลงได้ โดยการประเมินความแม่นยำของโปรแกรม และเป็นส่วนที่สำคัญมากในการพัฒนาวิธีการ DIC

## 2. ทฤษฎีและการพัฒนาโปรแกรม DIC

หลักการพื้นฐานของ DIC เริ่มต้นจากการนำวัสดุที่ต้องการทดสอบไปพ่นสีให้เกิดลายจุดแบบสุ่ม พื้นที่แต่ละส่วนบนวัสดุจึงมีเอกลักษณ์เป็นของตัวเอง เมื่อเริ่มให้แรงกับวัสดุ ลายจุดที่อยู่บนวัสดุจะเกิดการเคลื่อนที่ตามระยะขจัดบนพื้นผิวของวัสดุ ดังนั้นก็จะสามารถที่จะถ่ายภาพพื้นผิวของวัสดุที่ยังไม่เกิดการเสียรูปและเสียรูปไว้ได้ จากนั้นจึงเลือกรอบหน้าต่างบนตำแหน่งพื้นที่ที่สนใจบนวัสดุที่ยังไม่เสียรูปแต่เคลื่อนไปบนวัสดุที่เสียรูปดังรูปที่ 1 โดยการเปรียบเทียบข้อมูลจุดพิกเซล (pixel) ของวัสดุที่ยังไม่เสียรูป  $f(x, y)$  และจุดพิกเซลของวัสดุที่เสียรูป  $g(x + u, y + v)$  ได้จากค่าสหสัมพันธ์ (Cross-Correlation Coefficient)



รูปที่ 1 การค้นหารอบหน้าต่างที่เกิดการขจัด

การหาค่าสหสัมพันธ์สามารถที่จะหาได้จากสมการที่(1) โดยการคำนวณกรอบหน้าต่างขนาด  $(2i + 1) \times (2j + 1)$  พิกเซล

$$C(u, v) = \frac{S_{fg}}{\sqrt{S_f \times S_g}} \quad (1)$$

เมื่อ

$$S_{fg} = \sum_{x=-i}^i \sum_{y=-j}^j [f(x, y) - f_m][g(x + u, y + v) - g_m]$$

$$S_f = \sum_{x=-i}^i \sum_{y=-j}^j [f(x, y) - f_m]^2$$

$$S_g = \sum_{x=-i}^i \sum_{y=-j}^j [g(x + u, y + v) - g_m]^2$$

$f(x, y)$  และ  $g(x+u, y+v)$  คือค่าความเข้มของแสง (grey values) แต่ละพิกเซลในหน้าต่างต้นแบบ (Template) บนวัสดุที่ยังไม่เสียรูป และ หน้าต่างแต่ละส่วนที่ถูกค้นหามวลวัสดุที่เสียรูป ส่วน ( $u$  และ  $v$ ) คือระยะขจัดบนแกน  $x$  และ  $y$  ของแต่ละหน้าต่าง ( $f_m$  และ  $g_m$ ) คือค่าเฉลี่ยของความเข้มแสง ค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 1 จะมีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ถ้า  $|C(u, v)|$  เข้าใกล้ 1 แสดงว่าข้อมูลทั้งสองชุดมีความสัมพันธ์กันอย่างสูง ถ้า  $|C(u, v)|$  เข้าใกล้ 0 แสดงว่าข้อมูลทั้งสองชุดไม่มีความสัมพันธ์กัน [4]

ระยะขจัดสามารถที่จะหาได้โดยการค้นหาค่าสหสัมพันธ์สูงสุดคือเข้าใกล้ 1 ระยะขจัดที่สามารถหาได้จะเป็นตำแหน่งที่เปลี่ยนไปของจุดตรงกลางของหน้าต่างต้นแบบ ซึ่งความแม่นยำจะอยู่ในรูปจำนวนเต็มที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งพิกเซล ในการเพิ่มความแม่นยำให้กับ DIC ในระดับน้อยกว่าหนึ่งพิกเซล หรือ sub-pixel accuracy ทำได้โดยใช้หลักการสหสัมพันธ์ร่วมกับวิธีนิวตันกราฟสัน

วิธีการสหสัมพันธ์ร่วมกับวิธีนิวตันกราฟสันถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้การทำไบคิวบิกสไปร์ (bicubic spline interpolation) ของความเข้มสี (grey value) ของภาพวัสดุที่ยังไม่เสียรูป  $f(x, y)$  และ วัสดุที่เสียรูป  $g(x', y')$  การหาระยะขจัดและความเครียดสามารถทำได้โดยตั้งสมมุติฐานให้ Shape function เป็นแบบเชิงเส้นซึ่งได้จากการกระจายอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series expansion) ดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} x' &= x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ y' &= y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{aligned} \quad (2)$$

โดย  $(x, y)$  คือตำแหน่งของพิกเซลในแต่ละจุดของภาพวัสดุที่ยังไม่เสียรูป  $(x', y')$  คือตำแหน่งของพิกเซลในแต่ละจุดของภาพวัสดุที่เสียรูป  $(u, v)$  คือระยะขจัด  $(u_x, v_y)$  คือความเครียดตั้งฉาก (normal strain)  $(v_x, u_y)$  คือความเครียดเฉือน (shear strain)  $(\Delta x, \Delta y)$  คือระยะตำแหน่งกึ่งกลางหน้าต่างถึงจุด  $(x, y)$  ค่าระยะขจัดและความเครียดทั้งหมดสามารถ

หาได้จากการเปรียบเทียบภาพของวัสดุที่เสียรูปและไม่เสียรูปโดยหาค่า  $u, v, u_x, v_y, u_y, v_x$  ที่เหมาะสมที่สุด (optimum matching) ในการใช้ประโยชน์จากค่าสหสัมพันธ์ จากนั้นใช้วิธีนิวตันกราฟสันแก้ระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการสหสัมพันธ์ใช้ร่วมกับวิธีนิวตันกราฟสันอยู่ในเอกสารอ้างอิงที่ [1]

### 3. การทดสอบและประเมินผล DIC

การทดสอบและประเมินผล DIC แบ่งขั้นตอนออกเป็นสองขั้นตอนคือ 1. การทดสอบโดยสร้างการจำลองรูปภาพ และ 2. การทดลองกับการขจัดของคาน

#### 3.1 การทดสอบโดยการจำลองรูปภาพ

การประเมินผลโปรแกรม DIC โดยใช้การจำลองรูปภาพดิจิทัลเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ต้องใช้อุปกรณ์มากมาย มีเพียงคอมพิวเตอร์ก็สามารถทดสอบความแม่นยำของโปรแกรม DIC ได้ แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบนี้ไม่ได้รวมข้อผิดพลาดที่เกิดจากกล้องดิจิทัล

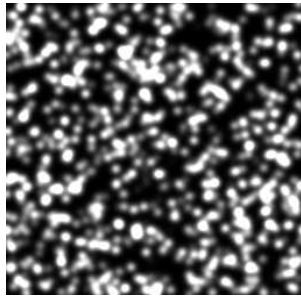
การจำลองรูปภาพที่เกิดการขจัดบนเนื้อวัสดุสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (3) [5]

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \sum_{k=1}^s I_k^0 \exp[-((x-x_k)^2 + (y-y_k)^2) / R^2] \\ g(x', y') &= \sum_{k=1}^s I_k^0 \exp[-((x-x_k - u_0 - u_x x - u_y y)^2 \\ &+ (y-y_k - v_0 - v_x x - v_y y)^2) / R^2] \end{aligned} \quad (3)$$

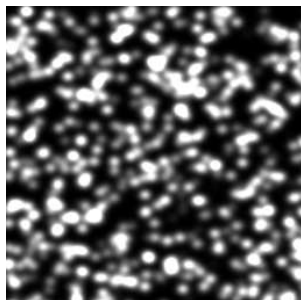
เมื่อ  $f(x, y)$  และ  $g(x', y')$  คือจุดความเข้มสีแต่ละพิกเซลในภาพของวัสดุที่ยังไม่เกิดการขจัดและเกิดการขจัด  $s$  คือจำนวนจุดภาพ (number of speckle granules) ที่เกิดขึ้น  $R$  คือขนาดของจุดภาพ  $(x_k, y_k)$  คือตำแหน่งของแต่ละจุดที่มีการกระจายแบบสุ่ม  $I_k^0$  คือ ความเข้มสีสูงสุดแบบสุ่มแต่ละจุดภาพ  $(u_0$  และ  $v_0)$  คือการกระจัดในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$   $(u_x$  และ  $v_y)$  คือความเครียดในแนวแกน  $x$  และ  $y$   $(u_y$  และ  $v_x)$  คือความเครียดเฉือน

จากสมการที่ (3) ให้จำนวนจุดภาพ  $s$  มีค่าเท่ากับ 500 ขนาดของจุดภาพ  $R$  เท่ากับ 4 ความเข้มสีสูงสุด

แบบสุ่ม  $I_k^0$  มีค่าระหว่าง 0 ถึง 255 ดังนั้นสามารถจำลองรูปภาพได้ดังรูปที่ 2 โดยรูป (ก) คือภาพวัสดุที่ยังไม่เสียรูป และ รูป (ข) ภาพคือภาพวัสดุที่เสียรูปจากภาพที่จำลองได้จะรู้ค่าการขจัดและความเครียดจากนั้นนำภาพที่จำลองได้มาใส่โปรแกรม DIC หาค่าการขจัดต่อไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ภาพที่เกิดจากการจำลองโดยสมการที่ 3 (ก)ภาพที่ยังไม่เกิดการเสียรูป (ข)ภาพที่เกิดการเสียรูปโดยมี  $u_x = 0.1, v_y = 0.2, u_0 = v_0 = v_x = u_y = 0$

ผลการทดสอบความแม่นยำของ DIC สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 โดยค่า d1, d2 และ d3 คือค่าการขจัดทั้งหมดซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (4)

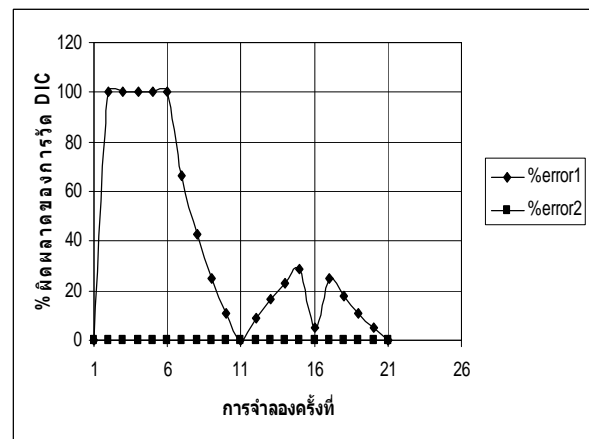
$$d = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

d1 คือค่าการขจัดทั้งหมดจากภาพดิจิทัลที่จำลองได้ d2 คือค่าที่วัดได้จาก DIC โดยไม่ใช้ความแม่นยำแบบ sub-pixel ค่าการขจัด d3 คือค่าที่วัดได้จาก DIC โดยใช้ความแม่นยำแบบ sub-pixel ภาพดิจิทัลที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 250x250 พิกเซล การคำนวณค่าสหสัมพันธ์สามารถทำได้โดยเลือกหน้าต่าง subsets ขนาด 41x41 พิกเซล มาใช้ในการคำนวณค่า  $u$  และ

$v$  การจำลองแต่ละครั้งจะเพิ่มค่า  $u$  และ  $v$  ขึ้นทีละ 0.1 พิกเซล จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ sub-pixel accuracy ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจะน้อยลง โดยค่า %error1 คือเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยังไม่ได้ใช้ sub-pixel และ ค่า %error2 คือ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ใช้ sub-pixel ในช่วงเริ่มต้นการจำลอง ค่าความผิดพลาดจะสูงมากถึง 100 เปอร์เซ็นต์สำหรับการวัดแบบไม่ใช้ sub-pixel accuracy

ตารางที่ 1 การขจัดที่จำลองได้จากภาพและการขจัดที่วัดได้จาก DIC

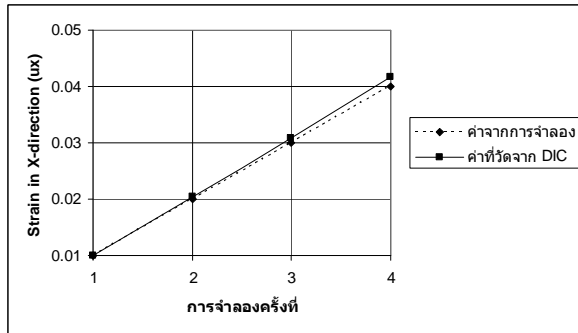
การจำลองครั้งที่	$u_0$ (pixel)	$v_0$ (pixel)	d1 (pixel)	d2 (pixel)	d3 (pixel)	%error1	%error2
1	0	0	0	0	0	0.00	0.00
2	0.1	0.1	0.141421	0	0.141428	100.00	0.01
3	0.2	0.2	0.282843	0	0.282899	100.00	0.02
4	0.3	0.3	0.424264	0	0.424335	100.00	0.02
5	0.4	0.4	0.565685	0	0.565728	100.00	0.01
6	0.5	0.5	0.707107	0	0.707135	100.00	0.00
7	0.6	0.6	0.848528	1.414214	0.848457	66.67	0.01
8	0.7	0.7	0.989949	1.414214	0.989872	42.86	0.01
9	0.8	0.8	1.131371	1.414214	1.131314	25.00	0.00
10	0.9	0.9	1.272792	1.414214	1.272743	11.11	0.00
11	1	1	1.414214	1.414214	1.414214	0.00	0.00
12	1.1	1.1	1.555635	1.414214	1.555776	9.09	0.01
13	1.2	1.2	1.697056	1.414214	1.697198	16.67	0.01
14	1.3	1.3	1.838478	1.414214	1.838548	23.08	0.00
15	1.4	1.4	1.979899	1.414214	1.98004	28.57	0.01
16	1.5	1.5	2.12132	2.236068	2.12132	5.41	0.00
17	1.6	1.6	2.262742	2.828427	2.262742	25.00	0.00
18	1.7	1.7	2.404163	2.828427	2.404092	17.65	0.00
19	1.8	1.8	2.545584	2.828427	2.545584	11.11	0.00
20	1.9	1.9	2.687006	2.828427	2.687006	5.26	0.00
21	2	2	2.828427	2.828427	2.828427	0.00	0.00



รูปที่ 3 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัดการขจัด

ค่าความเครียดสามารถหาได้จากการใช้ shape function ในสมการที่ (2) โดยรูปที่ 4 เปรียบเทียบค่าความเครียดในแนวแกน x ช่วงระหว่าง 0.01 ถึง 0.04

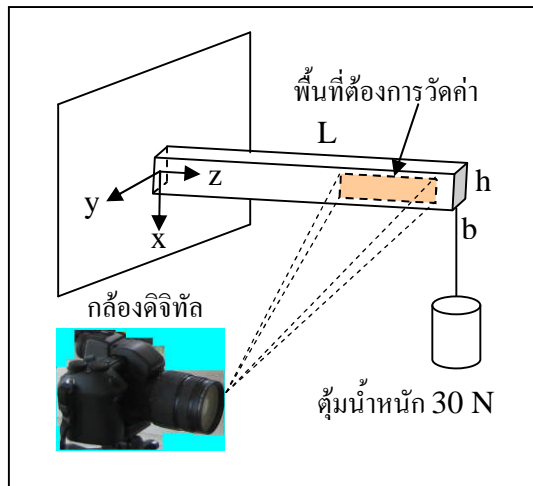
ค่าความเครียดที่วัดได้จาก DIC และค่าความเครียดที่ให้จากการจำลองภาพพบว่ามีความใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4 ค่าความเครียดที่วัดได้จาก sub-pixel DIC

### 3.1 การทดสอบกับการขจัดของคาน

การทดสอบโปรแกรม DIC กับการเปลี่ยนรูปของคานสามารถจัดตั้งอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 5 โดยมีกล้องดิจิทัล (Olympus Camedia E-10) คานเหล็ก และ ตั้มน้ำหนัก 30 นิวตัน เพื่อวัดการขจัดของคานในระนาบ x-z จากนั้นใช้สมการจากทฤษฎีอีลาสติคซิติ (Theory of Elasticity) วิเคราะห์เทียบกับ DIC



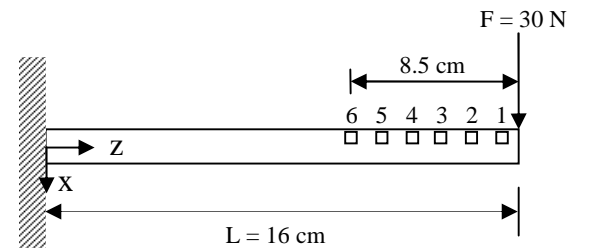
รูปที่ 5 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัดค่าการขจัด

คานทำเหล็กกล้ามีมิติความยาว (L) 160 มม. ความกว้าง (b) 12 มม. ความสูง (h) 4 มม. เกิดโมเมนต์ดัด (M) จากแรง 30 นิวตัน สามารถคำนวณการขจัดในแนวแกน x และ z ได้จากสมการที่ (5) [6]

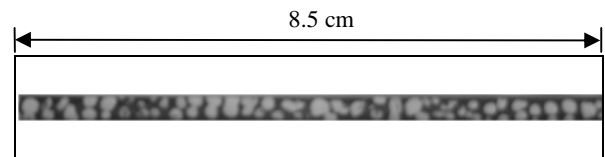
$$u = \frac{M}{2EI_y} [z^2 + \nu(x^2 - y^2)] \quad (5)$$

$$w = xz \frac{M}{EI_y}$$

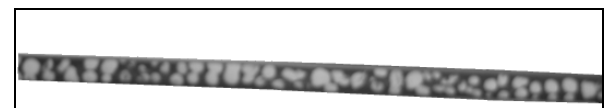
จากสมการ (5) เหล็กมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น  $E = 200 \text{ GPa}$  ค่าปัวซอง  $\nu = 0.3$  และ ตำแหน่ง  $(x, y, z)$  คือจุดที่ต้องการหาระยะขจัดโดยให้  $(y, x)$  มีค่าเท่ากับ  $(b/2, -h/2)$  ค่า  $(z)$  คือค่าตำแหน่งในแกน z ที่วัดค่าการขจัดโดย  $z = 16, 14.3, 12.6, 10.9, 9.2, 7.5$  เซนติเมตร ค่า  $I_y$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยความแม่นยำของกล้องดิจิทัลในการวัดการขจัดอยู่ที่ประมาณ 26.3 พิกเซลต่อมิลลิเมตรในแนวแกน z และ 22.5 พิกเซลต่อมิลลิเมตรในแนวแกน x



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 6 (ก)แสดงขนาดของคานและตำแหน่งที่ทำการวัด (ข) ภาพวัสดุก่อนให้แรง (ค) ภาพวัสดุหลังให้แรง

ผลเปรียบเทียบจากทฤษฎีอีลาสติคซิติวิเคราะห์ เทียบกับการวัดจาก DIC โดยไม่ใช้ sub-pixel ตำแหน่งการวัดแสดงในรูปที่ (6ก) แต่ละตำแหน่งมีหน้าตาต่างขนาด 21x21 พิกเซล นำมาใช้คำนวณค่าสหสัมพันธ์ระยะการขจัดที่ได้จากทฤษฎี และ DIC สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 และ 3 ส่วนรูปที่ (6ข) และ (6ค) คือภาพที่ถ่ายได้จากกล้องดิจิทัลที่มีค่าความเข้มแสงของวัสดุก่อนเสียรูปและหลังเสียรูป

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าการขจัดในแนวแกน x

ตำแหน่งที่	ระยะบนคาน z , (cm)	ทฤษฎี, u(mm)	DIC, u(mm)
1	16	4.8002	4.5770
2	14.3	3.8344	3.7778
3	12.6	2.9770	3.2444
4	10.9	2.2279	2.2667
5	9.2	1.5872	1.6000
6	7.5	1.0549	1.1111

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าการขจัดในแนวแกน z

ตำแหน่งที่	ระยะบนคาน z , (cm)	ทฤษฎี, w(mm)	DIC, w(mm)
1	16	0.1200	0.1141
2	14.3	0.1073	0.1521
3	12.6	0.0945	0.1141
4	10.9	0.0818	0.0380
5	9.2	0.0690	0.0760
6	7.5	0.0563	0.0760

#### 4. สรุปการทดสอบและประเมินผล DIC

จากการทดสอบพบว่าการใช้ภาพจำลองที่ได้จากการจำลองมีความสะดวกต่อการประเมินความแม่นยำของโปรแกรม DIC การใช้หลักการ DIC โดยไม่ใช้ sub-pixel accuracy จะทำให้ค่าที่ได้จากการวัดมีความคลาดเคลื่อนสูงเกือบ 100 % ในช่วงการขจัด 0 ถึง 1 พิกเซล การใช้ sub-pixel จะเพิ่มความแม่นยำในการวัด

ในการใช้การขจัดของคานประเมินผล DIC สามารถสรุปได้ว่า DIC มีความแม่นยำสูงในแนวแกน x ซึ่งมีการขจัดที่มีค่ามากถึงแม้ไม่ได้ใช้ sub-pixel accuracy แต่อย่างไรก็ตามความแม่นยำแนวแกน y มีค่าน้อยเนื่องจากการขจัดที่มีค่าน้อยๆ จะทำให้โปรแกรม DIC มีความแม่นยำต่ำ การเพิ่มความแม่นยำในการวัดอาจจะใช้วิธี sub-pixel หรือเพิ่มกำลังขยายของเลนส์ให้กับกล้องดิจิทัล การประเมินความแม่นยำจะไม่สามารถหาข้อผิดพลาดของโปรแกรม DIC ได้ตรงๆ ข้อผิดพลาดจะเป็นข้อผิดพลาดของระบบทั้งหมด

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lu H. and Cary P.D. (2000). Deformation measurements by digital image correlation: implementation of a second-order displacement, *Experimental Mechanics*, vol. 40, December 2000, pp.393-400.
- [2] Hung P.C. and Voloshin A.S.(2003). In-plane strain measurement by digital Image correlation, *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, vol. 25, July-September 2003, pp.215-221.
- [3] Amodio D., Broggiato G.B., Campana F. and Newaz G.M. (2003). Digital speckle correlation for strain measurement by image analysis, *Society of Experimental Mechanics*, vol. 43 (4), December 2003, pp.396-402.
- [4] Kume H.(1985). Statistical methods for quality improvement, *The Association for Overseas Technical Scholarship*, pp.68-89
- [5] Bing P., Hui-min X., Bo-qin X. and Fu-long D. (2006). Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation, *Measurement Science and Technology*, pp.1615-1621
- [6] Timoshenko S. P. and Goodier J. N.(1934). *Theory of Elasticity*, 3<sup>rd</sup> edition, pp.284-288