

เทคนิคการประมาณกลุ่มจุดสำหรับเพิ่มศักยภาพในการวัดของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ

A Point Clouds Interpolation Technique for Enhancing Measurement of a 3-D Coordinate Measuring Machine

เอกภพ ศรีจันทร์*, วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330.

* ติดต่อ: โทรศัพท์ 0 2218 6585, โทรสาร 0 2218 6583

Email : Ekkaphob.S@student.chula.ac.th, Viboon.S@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคสำหรับเพิ่มจำนวนกลุ่มจุดแบบกลุ่มจุดที่วัดพิกัดตามแนวหน้าตัดที่กำหนดของชิ้นงานสำหรับเครื่องวัดพิกัดสามมิติ ด้วยเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด (Point Cloud Interpolation Technique: PCIT) จุดประสงค์เพื่อเพิ่มศักยภาพของการวัดพิกัดและการเพิ่มรายละเอียดข้อมูลพิกัดของชิ้นส่วนที่มีส่วนของการหักมุมเนื่องจากความละเอียดของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติกลุ่มจุดที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัดสามมิติอาจไม่เพียงพอสำหรับการแสดงรายละเอียดชิ้นงานที่มีการหักมุม จึงนำเสนอเทคนิคการประมาณกลุ่มจุดด้วยวิธีการประมาณรูปร่างชิ้นงานต้นแบบจากกลุ่มจุดด้วยเส้นโค้งที่ต่อเนื่องเป็นช่วง (Piecewise Smooth Curve) จากนั้นจึงนำเส้นโค้งจากการประมาณมาแบ่งจุดอีกครั้งเพื่อให้ได้กลุ่มจุดที่มีความหนาแน่นสามารถแสดงรายละเอียดชิ้นส่วนที่มีการหักมุม สำหรับกลุ่มจุดที่ได้สามารถนำไปใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD)

คำหลัก: เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด, การสร้างเส้นโค้งจากกลุ่มจุด, เครื่องวัดพิกัดจุดสามมิติ

Abstract

This paper presents a Point Clouds Interpolation Technique (PCIT) to increase number of point clouds measured at cross section profiles of an object. Point clouds are captured by using a Coordinate Measuring Machine (CMM). Our purposed technique can enhance the measurement by increasing point clouds of each section. This will increase detail or information of shape especially when high stiff occurred in the measured object. High stiff area is not easy to measure with typical low resolution CMM. Thus to overcome this problem, we introduce a PCIT, piecewise smooth curve with resampling points, to estimate profile with high stiff so that more point clouds can be obtained from an existing point clouds. The new point clouds can be imported to commercial CAD system.

Keywords: Point Cloud Interpolation Technique (PCIT), Curve Reconstruction, Coordinate Measuring Machines CMM

1. บทนำ

การวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบโดยใช้เครื่องวัดพิกัดสามมิติจะให้ข้อมูลเป็นกลุ่มจุด (Point clouds) ซึ่งกลุ่มจุดเหล่านี้คือพิกัดสามมิติจำนวนมากบนพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งแสดงข้อมูลของรูปร่างบางส่วนบนพื้นผิวชิ้นงานต้นแบบ

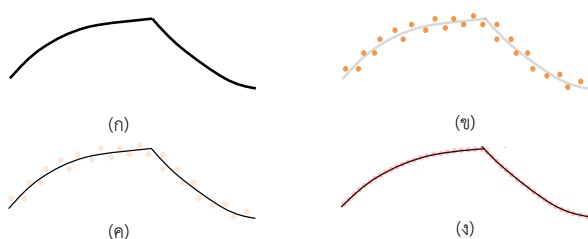
จากกลุ่มจุดเหล่านี้สามารถนำไปประมาณรูปร่างของชิ้นงานต้นแบบ ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า Point Clouds Reconstruction

กลุ่มจุดที่ได้สามารถนำไปใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) ซึ่งจะช่วยให้การ

สร้างต้นแบบบนคอมพิวเตอร์ทำได้สะดวกเร็วขึ้น ลดความผิดพลาด และสามารถสร้างแบบของชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ง่ายขึ้น

สำหรับเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบกลุ่มจุดที่วัดพิกัดตามแนวหน้าตัดที่กำหนดของชิ้นงาน อย่างเช่นเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบเลเซอร์สแกนจะใช้แถบเส้นเลเซอร์พาดพื้นผิวของวัตถุทำให้ได้กลุ่มจุดแสดงตำแหน่งของหน้าตัดเมื่อใช้แกนเลื่อนแถบเลเซอร์อย่างเป็นลำดับจนครอบคลุมพื้นผิวที่ต้องการวัด จะได้กลุ่มจุดที่มีหน้าตัดเรียงตัวกันซึ่งแสดงพื้นผิวทั้งหมดของชิ้นงาน

เนื่องจากความละเอียดของของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ กลุ่มจุดที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัดสามมิติอาจไม่เพียงพอสำหรับการแสดงรายละเอียดชิ้นงานที่มีการหักมุม รูปที่ 1 (ข) จึงใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด ด้วยวิธีการประมาณรูปร่างชิ้นงานต้นแบบจากกลุ่มจุดด้วยเส้นโค้งที่ต่อเนื่องเป็นช่วง (Piecewise Smooth Curve) รูปที่ 1 (ค) จากนั้นจึงนำเส้นโค้งจากการประมาณมาแบ่งจุดอีกครั้งเพื่อให้ได้กลุ่มจุดที่มีความหนาแน่นสามารถแสดงรายละเอียดชิ้นส่วนที่มีการหักมุมและสะดวกสำหรับการนำไปใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) รูปที่ 1 (ง)



รูปที่ 1 (ก) หน้าตัดชิ้นงานที่มีการหักมุม

(ข) กลุ่มจุดที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัดสามมิติ

(ค) เส้นโค้งที่ต่อเนื่องเป็นช่วงจากการประมาณรูปร่างชิ้นงานต้นแบบจากกลุ่มจุด

(ง) กลุ่มจุดหนาแน่น

2. วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least Square Fitting)

การหาข้อมูลที่เหมาะสมด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Fitting) ต้องการแบบจำลองอิงตัวแปรเสริม (Parametric model) ที่เหมาะสมกับข้อมูลค่าตอบสนอง (response data) และข้อมูลตัวทำนาย (predictor data) แบบจำลองประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ตัวหนึ่งหรือมากกว่า ผลลัพธ์ของกระบวนการหาข้อมูลที่เหมาะสมนั้นคือการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของ

แบบจำลองด้วยวิธีการทำให้ผลรวมกำลังสองของค่าตกค้าง (residual) มีค่าน้อยที่สุด ค่าตกค้างระบุด้วย r_i ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่าง ค่าตอบสนองที่ปรากฏจริง y_i กับ ค่าตอบสนองจากการหาข้อมูลที่เหมาะสม \hat{y}_i หรือกล่าวได้ว่าค่าตกค้างคือค่าความผิดพลาดของจุดข้อมูล

$$r_i = y_i - \hat{y}_i$$

$$\text{residual} = \text{data} - \text{fit}$$

ผลรวมกำลังสองของค่าตกค้าง กำหนดโดย

$$S = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

n คือ จำนวนข้อมูล และ S คือ ผลรวมกำลังสองของตัวประมาณค่าความผิดพลาด

2.1 การกระจายตัวของค่าความผิดพลาด (error distribution)

การหาข้อมูลที่เหมาะสมจากข้อมูลที่มีการแปรผันแบบสุ่ม มีสมมติฐานสองข้อซึ่งมักใช้ในการกำหนดค่าความผิดพลาด

- ค่าความผิดพลาดปรากฏเฉพาะในข้อมูลค่าตอบสนอง และไม่ปรากฏในข้อมูลตัวทำนาย
- ค่าความผิดพลาดมีลักษณะข้อมูลแบบสุ่มซึ่งมีการกระจายตัวแบบปกติ (Gaussian distribution) และมีค่าเฉลี่ย (mean) เท่ากับศูนย์และความแปรปรวน (σ^2 : variance) มีค่าคงที่

ซึ่งสมมติฐานทั้งสองอธิบายได้โดย

$$\text{error} \sim N(0, \sigma^2)$$

ค่าความผิดพลาดถูกสมมติให้มีการกระจายตัวแบบปกติ เนื่องจากเพียงพอสำหรับการประมาณค่าการกระจายตัวของปริมาณที่ได้จากการวัด เมื่อค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดเท่ากับศูนย์แล้วค่าความผิดพลาดจะเป็นแบบสุ่มทั้งหมด แต่ถ้าค่าเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์อาจเกิดจากการเลือกแบบจำลองไม่เหมาะสมกับข้อมูลหรือค่าความผิดพลาดไม่ได้เป็นแบบสุ่มทั้งหมดแต่ประกอบด้วยค่าความผิดพลาดแบบระบบด้วย ถ้าความแปรปรวนมีค่าคงที่แล้วการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดจะมีค่าคงที่ด้วย

2.2 Linear Least Squares

วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นใช้หาค่าที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองเชิงเส้นกับข้อมูล ซึ่งแบบจำลองเชิงเส้นถูกกำหนดในรูปของสมการที่มีสัมประสิทธิ์เชิงเส้นอย่างเช่น สมการพหุนามสมมติว่ามี n จุดข้อมูลซึ่งสามารถจำลองด้วยสมการพหุนามกำลังหนึ่ง

$$y = p_1x + p_2$$

จุดประสงค์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของ p_1 และ p_2 โดยให้ S เป็นระบบของ n สมการเชิงเส้นแบบต่อเนื่อง

$$s = \sum_{i=1}^n (y_i - (p_1x_i + p_2))^2$$

พยายามทำให้ผลรวมกำลังสองของค่าตกค้างมีค่าน้อยที่สุด

$$\frac{\partial S}{\partial p_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - (p_1x_i + p_2)) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial p_2} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - p_1x_i + p_2) = 0$$

การหาค่าพารามิเตอร์ที่แท้จริงมักจะแสดงด้วยตัวแปร b แทนค่า b_1 และ b_2 ลงใน p_1 และ p_2 ของสมการข้างต้นจะได้

$$\sum x_i (y_i - (b_1x_i + b_2)) = 0$$

$$\sum (y_i - (b_1x_i + b_2)) = 0$$

ซึ่งเป็นผลรวมตั้งแต่ $i = 1$ ถึง n โดยสมการปกติเป็น

$$b_1 \sum x_i^2 + b_2 \sum x_i = \sum x_i y_i$$

$$b_1 \sum x_i + nb_2 = \sum y_i$$

หาผลลัพธ์ b_1 และ b_2

$$b_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b_2 = \frac{1}{n} (\sum y_i - b_1 \sum x_i)$$

ในรูปแบบเมทริกซ์ แบบจำลองเชิงเส้นมีสูตรดังนี้

$$y = X\beta + \varepsilon$$

- y คือ เวกเตอร์ n -คูณ-1 ของค่าการตอบสนอง
- β คือ เวกเตอร์ m -คูณ-1 ของค่าสัมประสิทธิ์
- X คือ ดีไซน์เมทริกซ์ขนาด n -คูณ- m สำหรับแบบจำลอง
- ε คือ เวกเตอร์ขนาด n -คูณ- m ของค่าความผิดพลาด

สำหรับสมการพหุนามกำลังหนึ่ง ที่มี n สมการตัวแปรไม่ทราบค่าสองตัว แสดงอยู่ในเทอมของ y , X , and β ดังเช่น

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ x_3 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}$$

ผลเฉลยของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดคือเวกเตอร์ b ซึ่งคำนวณเวกเตอร์ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของค่าสัมประสิทธิ์สมการปกติดังต่อไปนี้

$$(X^T X)b = X^T y$$

X^T คือ ทรานสโพสของดีไซน์เมทริกซ์

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y$$

นำ b กลับไปแทนในสมการของแบบจำลองจะได้ค่าสำหรับการทำนายผลตอบสนอง \hat{y}

$$\hat{y} = Xb = Hy$$

$$H = X(X^T X)^{-1} X^T$$

เครื่องหมายรูปหมวกหมายถึงเป็นการประมาณของค่าพารามิเตอร์หรือการทำนายจากแบบจำลอง เมทริกซ์ผลการคาดคะเน (Projection matrix) หรือเรียกอีกอย่างว่าเฮทเมทริกซ์

ค่าคงค้างกำหนดโดย

$$r = y - \hat{y} = (I - H)y$$

2.3 สมการพหุนาม

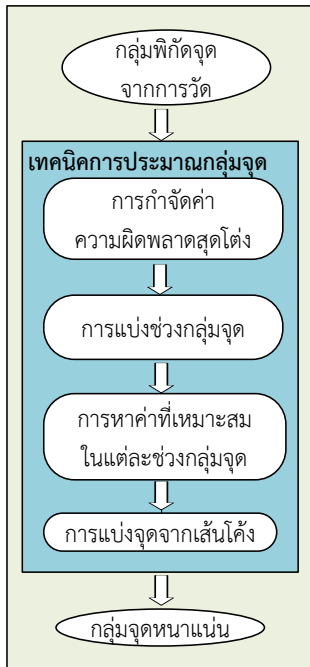
$$y = \sum_{i=1}^{n+1} p_i x^{n+1-i}$$

ซึ่ง $n+1$ เป็นอันดับสองพหุนาม และ n เป็นดีกรีของพหุนาม โดยลำดับเท่ากับจำนวนของสัมประสิทธิ์และดีกรีคือกำลังสูงสุดของตัวแปรการทำนาย

3. เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

ขั้นตอนการทำงานของเทคนิคการประมาณกลุ่มจุดอย่างที่แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

1. การกำจัดค่าความผิดพลาดสุดโต่ง
 2. การแบ่งช่วงกลุ่มจุด
 3. การหาค่าที่เหมาะสมในแต่ละช่วงกลุ่มจุด
 4. การแบ่งจุดจากเส้นโค้ง
- เพื่อให้ได้กลุ่มจุดที่หนาแน่นที่สามารถแสดงรายละเอียดของการหักมุมของชิ้นงานต้นแบบ



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของการประมาณกลุ่มจุด

3.1 การกำจัดค่าความผิดพลาดสุดโต่ง

เนื่องจากค่าความผิดพลาดสุดโต่งไม่สอดคล้องกับลักษณะทางสถิติของกลุ่มข้อมูลและส่งผลเสียในการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จึงต้องมีการกำจัดออกก่อน โดยวิเคราะห์ได้จากค่าตกค้างสมบูรณ์ในแต่ละจุดข้อมูล

3.2 การแบ่งช่วงกลุ่มจุด

การแบ่งช่วงกลุ่มจุดจะแบ่งบริเวณจุดที่เป็นส่วนหักมุมของชิ้นงานโดยวิเคราะห์จากค่าตกค้างสมบูรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าตกค้างสมบูรณ์มาก

3.3 การหาค่าที่เหมาะสมในแต่ละช่วงกลุ่มจุด

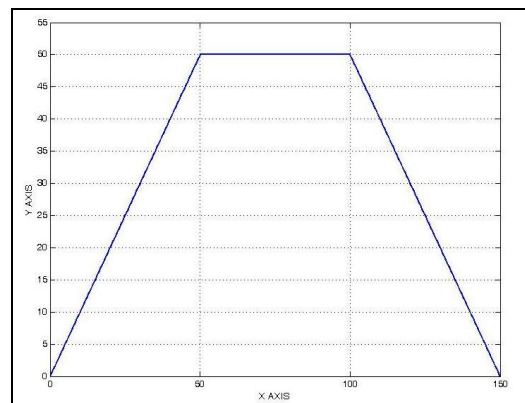
การหาข้อมูลที่เหมาะสมด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นในแต่ละช่วงกลุ่มจุดเพื่อให้ได้เส้นโค้งซึ่งแทนรูปร่างหน้าตัดของชิ้นงานในแต่ละช่วง โดยสมการแบบจำลองเป็นสมการพหุนามกำลังสี่ หลังจากหาครบทุกช่วงและหาจุดตัดระหว่างเส้นโค้งจะได้เส้นโค้งต่อเนื่องเป็นช่วง ซึ่งแทนรูปร่างของหน้าตัดชิ้นงาน

3.4 การแบ่งจุดจากเส้นโค้ง

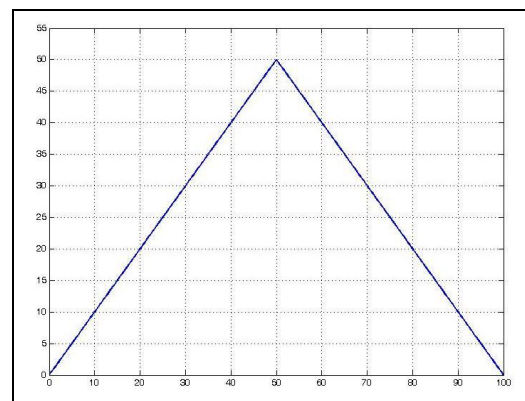
นำเส้นโค้งต่อเนื่องเป็นช่วงมาแบ่งจุดอีกครั้งเพื่อให้ได้กลุ่มจุดที่หนาแน่น สะดวกสำหรับการนำเข้าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

4. การทดลอง

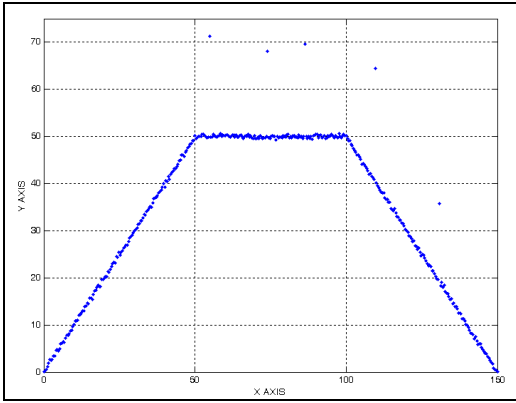
การทดลองนี้เป็นการจำลองเทคนิคการประมาณกลุ่มจุดจากพิกัดจุดที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบกลุ่มจุดที่วัดพิกัดตามแนวหน้าตัดที่กำหนด โดยหน้าตัดของชิ้นงานต้นแบบมีรูปร่างหักมุม ในการทดลองนี้ใช้หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและหน้าตัดรูปสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 3-4 ซึ่งมีผลการวัดพิกัดสามมิติของหน้าตัดที่ประกอบด้วยค่าความผิดพลาดของการวัดดังแสดงดังรูปที่ 5-6 แล้วใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุดเพื่อให้ได้เส้นโค้งต่อเนื่องเป็นช่วงของแต่ละหน้าตัด นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับหน้าตัดของชิ้นงานต้นแบบ



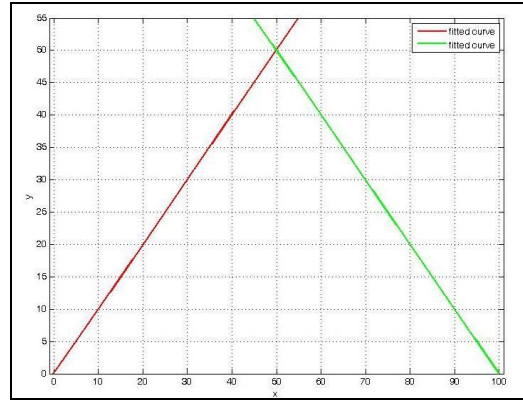
รูปที่ 3 หน้าตัดชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



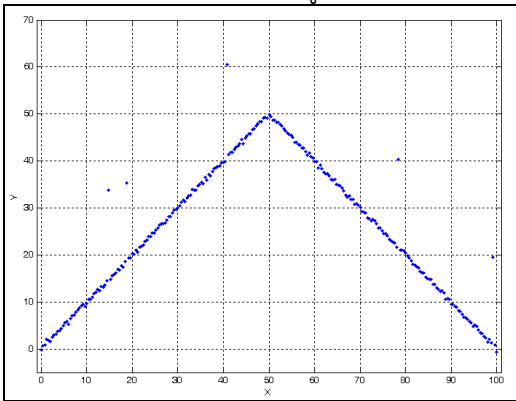
รูปที่ 4 หน้าชิ้นงานตัดรูปสามเหลี่ยม



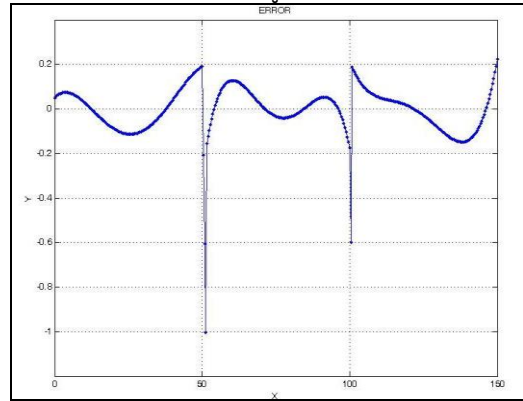
รูปที่ 5 กลุ่มพิกัดจุดจากการวัดของหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 8 เส้นโค้งที่ได้จากการหาข้อมูลที่เหมาะสมของหน้าตัดรูปสามเหลี่ยม



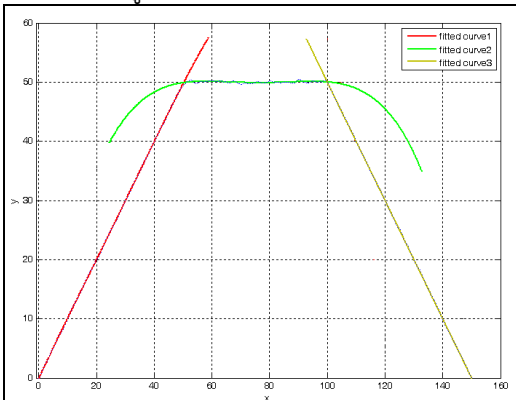
รูปที่ 6 กลุ่มพิกัดจุดจากการวัดของหน้าตัดรูปสามเหลี่ยม



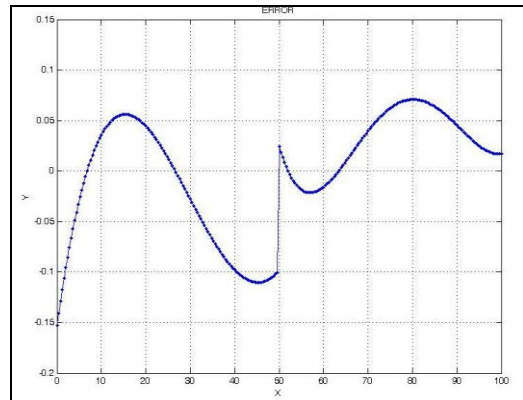
รูปที่ 9 ความผิดพลาดของการประมาณหน้าตัดชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

5. ผลการทดลอง

ผลของการใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุดกับหน้าตัดรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมูและสามเหลี่ยมได้ผล ดังแสดงในรูปที่ 7-8 ซึ่งจากจุดตัดของเส้นโค้งที่ได้สามารถแสดงชิ้นส่วนที่มีการหักมุมได้ ความผิดพลาดของการประมาณระหว่างเส้นโค้งที่ได้กับหน้าตัดชิ้นงานได้ผลดังแสดงในรูปที่ 9-10 จะเห็นว่า ณ ตำแหน่งที่เกิดมุมหรือเกิดความไม่ต่อเนื่องของผิวชิ้นงานที่วัดได้ ค่าความผิดพลาด (error) จะมีค่าค่อนข้างสูง



รูปที่ 7 เส้นโค้งที่ได้จากการหาข้อมูลที่เหมาะสมของหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 10 ความผิดพลาดของการประมาณหน้าตัดชิ้นงานรูปสามเหลี่ยม

5. สรุปการทดลอง

ค่าความผิดพลาดของการประมาณรูปร่างชิ้นงานจะเกิดขึ้นมากในจุดที่มีการหักมุมของชิ้นงานต้นแบบและค่าความผิดพลาดมีการกระจายตัวแบบมีแนวโน้ม ซึ่งอาจเกิดจากการเลือกสมการของแบบจำลองไม่เหมาะสมกับกลุ่มจุด



6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการศูนย์ระดับภูมิภาคเทคโนโลยีหุ่นยนต์ภายใต้โครงการเพิ่มศักยภาพด้านวิศวกรรมศาสตร์สาขา ในแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬาฯ 100 ปี)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] พงศกร เพชรพันธ์ศรี (2547). เครื่องวัดพิกัดสามมิติ โดยใช้ภาพสเตอริโอ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19 19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดสงขลา
- [2] D. Cohen-Or, Tel-Aviv university, S. Fleishman and C.T. Silva, University of Utah. Robust Moving Least-squares Fitting with Sharp Features.
- [3] Sung Jung Ahn (2004). Geometric Fitting of Parametric Curves and Surfaces, Journal of Information Processing System, vol. 4, No.4, December 2008, pp. 153 - 158.
- [4] Sung Joon Ahn (2004). Least Square Orthogonal Distance Fitting of Curve and Surfaces in Space, Springer.
- [5] T.Weyrich, M. Pauly, R Keiser, S. Heinzle, S. Scandella, M (2004). Gross. Post-processing of Scanned 3D Surface Data, Eurographic Symposium on Point-Based Graphics