

การศึกษาระบบเลเซอร์-การภาพสำหรับติดตามรอยเชื่อม Study of a Laser-Vision System for Tracking of a Weld Bead

จิราวดี ท้าวประยูร* และ วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330.

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

Email : Jirawut.Ta@Student.chula.ac.th, Viboon.S@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบเลเซอร์-การภาพโดยใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาได้สะดวกในท้องตลาดสำหรับติดตามรอยเชื่อม โดยระบบนี้ประกอบด้วยเลเซอร์แบบเส้นและกล้องเพื่อใช้ในการประมาณตำแหน่งและขนาดของรอยเชื่อม เนื่องด้วยสภาพแวดล้อมที่มีแสงรบกวนและแสงที่ตกกระทบต่อพื้นผิวของวัตถุทำให้ยากในการตรวจหารอยเชื่อมและเกิดความผิดพลาดในการประมาณค่าจากระบบการภาพได้ง่าย งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบระบบเลเซอร์-การภาพเพื่อใช้ในการติดตามรอยเชื่อม โดยระบบนี้สามารถนำไปติดตั้งบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่หรือบนแขนกลเพื่อหาพิกัดและความหนาของรอยเชื่อมเพื่อส่งคำสั่งไปยังตัวควบคุมของหุ่นยนต์

คำหลัก: ระบบเลเซอร์-การภาพ, รอยเชื่อม, การประมวลผลภาพ

Abstract

A laser-vision system based on common commercial products for tracking of weld beads is developed in this research. The system consists of a laser line and a camera so that position and width of a weld bead can be estimated. The vision environments, such as ambient light and reflecting light from object surfaces, make it difficult to detect weld bead and frequently cause errors on the estimation of the vision system. This research focuses on the design of the total system of a laser-vision for tracking of a weld bead. This laser-vision system can be used with a mobile robot or a manipulator arm to provide position and thickness of the weld bead that can be used as position command references for a servo controller of a robot.

Keywords: Laser-vision system, Weld bead, Image processing

1. บทนำ

เทคโนโลยีด้านการเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญของการพัฒนาอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เช่น งานโครงสร้างอาคาร โรงงาน สะพาน เครื่องบิน และเรือ และอุตสาหกรรมการผลิต เป็นต้น ดังนั้นการตรวจสอบและวิเคราะห์ความบกพร่องของรอยเชื่อมบน

โครงสร้างเหล่านี้ด้วยระบบอัตโนมัติจึงสามารถป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้

การตรวจสอบรอยเชื่อมแบบอัตโนมัติจะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Sensor) ติดตั้งบนหุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ได้หรือแขน

DRC-2014

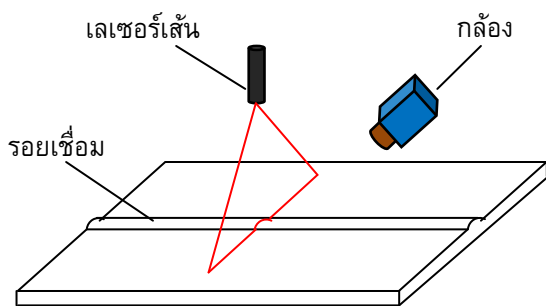
กลเพื่อตรวจสอบรอยเชื่อมตามตำแหน่งที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่

การควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะใช้ตำแหน่งของรอยเชื่อมเป็นค่าอ้างอิง โดยใช้กล้องเป็นอุปกรณ์ตรวจสอบ อย่างไรก็ตามการตรวจสอบหารอยเชื่อมด้วยการใช้กล้องถ่ายภาพรอยเชื่อมในสภาพแวดล้อมที่มีแสงรบกวนอาจทำให้ระบุตำแหน่งของรอยเชื่อมผิดพลาดได้ง่ายเพราะการกลืนกันของสีพื้นผิวโลหะและสีรอยเชื่อมทำให้การประมวลผลภาพไม่สามารถแยกลักษณะของรอยเชื่อมออกจากพื้นผิวโลหะได้ แต่การใช้ระบบเลเซอร์-การภาพซึ่งใช้กล้องในการถ่ายภาพแถบแสงเลเซอร์ที่ฉายบนรอยเชื่อมสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบระบบเลเซอร์-การภาพเพื่อใช้ในการหาดำแหน่งรอยเชื่อม และประมาณแนวของรอยเชื่อมด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด

2. ระบบเลเซอร์-การภาพ

ระบบเลเซอร์-การภาพดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยเลเซอร์แบบเส้น (Line laser) ที่ฉายแถบแสงลงบนรอยเชื่อม และใช้กล้องถ่ายภาพแถบการสะท้อนของแถบแสงนั้น เพื่อนำมาคำนวณตำแหน่งของรอยเชื่อม



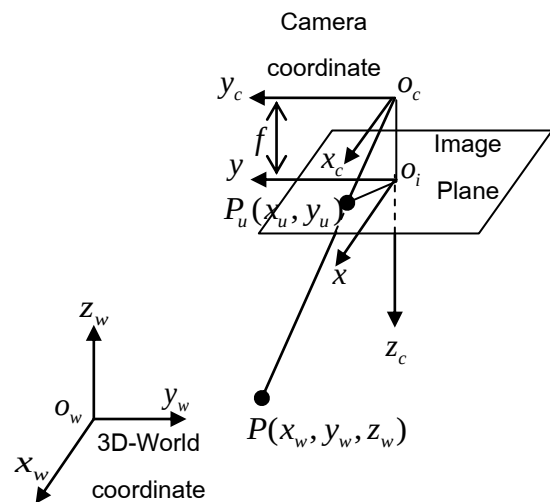
รูปที่ 1 ระบบเลเซอร์-การภาพ

2.1 แบบจำลองกล้อง

ระบบพิกัดในรูปที่ 2 ได้แก่

• (x_w, y_w, z_w) เป็นพิกัด 3 มิติของจุดบนวัตถุ P ในระบบพิกัดโลก 3 มิติ (3D world coordinate system)

- (x_c, y_c, z_c) เป็นพิกัด 3 มิติของจุดบนวัตถุ P ในระบบพิกัดกล้อง 3 มิติ (3D camera coordinate system) ซึ่งมีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดกึ่งกลางเลนส์ O_c และทิศทางของแกน z_c อยู่ในแนวเดียวกับแกนการมองของกล้อง
- (x, y) เป็นระบบพิกัดภาพ ซึ่งมีจุดกำเนิดที่ O_i และขนานกับแกน x_c และ y_c ของระบบพิกัดกล้อง โดยมี f เป็นระยะห่างระหว่างระนาบของภาพกับจุดกึ่งกลางเลนส์
- (x_u, y_u) คือค่าพิกัดในระบบพิกัดภาพ (Image plane coordinate system) ของจุด (x_c, y_c, z_c)



รูปที่ 2 การแปลงพิกัดในระบบพิกัดโลกไปสู่ระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์

แบบจำลองกล้องแสดงความเชื่อมโยงกันระหว่างการแปลงพิกัดในระบบพิกัดโลก 3 มิติ (3D world coordinate system) ไปยังระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์ (Computer image coordinate system or pixel coordinate) สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad (1)$$

DRC-2014

โดยที่เมทริกซ์การหมุน (Rotation matrix) คือ

$$R = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix}$$

เมื่อ $c = \cos$, $s = \sin$

และเวกเตอร์การเลื่อน (Translation vector) คือ

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

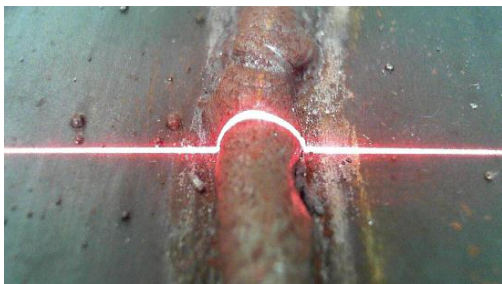
ดังนั้นแบบจำลองกล้องจะมีความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดกล้อง (Camera coordinate system) และระบบพิกัดภาพ (Image plane coordinate system) โดยพิจารณาว่าแบบจำลองเป็นแบบกล้องรูเข็ม (Pinhole camera model) คือ

$$x_u = f \frac{x_c}{z_c} \quad (2)$$

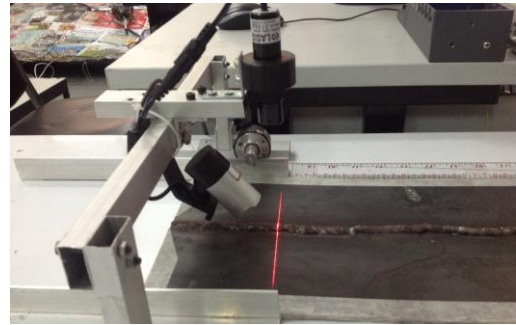
$$y_u = f \frac{y_c}{z_c}$$

2.2 การใช้แถบแสงเลเซอร์ในระบบการภาพ

ภาพถ่ายของแถบแสงเลเซอร์บนรอยเชื่อมดังรูปที่ 3 มีลักษณะโค้งนูนตามความสูงของรอยเชื่อม ความหนาของแถบแสงเลเซอร์อาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุ และคุณสมบัติการสะท้อนแสงของพื้นผิวที่ตรวจสอบ ดังนั้นการหาตำแหน่งของรอยเชื่อมจากจุดกึ่งกลางของแถบเส้นเลเซอร์จึงต้องติดตั้งกล้องห่างจากรอยเชื่อมในระนาบที่เหมาะสม เพื่อให้แถบแสงเลเซอร์ในภาพมีความหนาอย่างน้อย 1 พิกเซล (Pixel) จึงจะสามารถนำภาพไปประมวลผลในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3 แถบเส้นเลเซอร์บนรอยเชื่อม

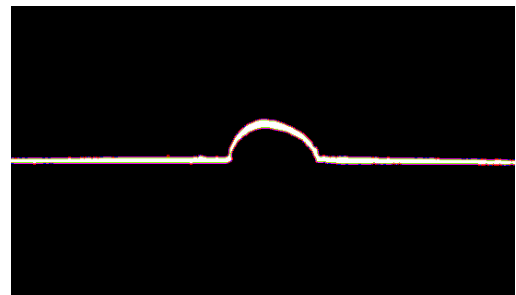


รูปที่ 4 โครงสร้างเครื่องวัดพิกัด

2.3 การประมวลผลจากภาพ

2.3.1 การกำหนดเทรชโฮลด์ (Threshold)

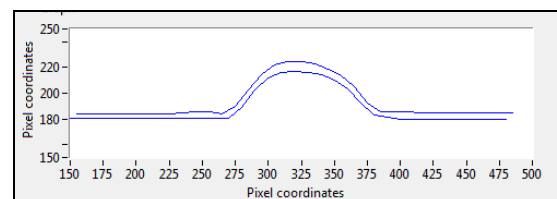
ขั้นตอนแรกของการประมวลผลภาพคือ การกำหนดเทรชโฮลด์ โดยใช้ค่าเทรชโฮลด์ค่าเดียวรวมกันทั้งภาพ (Global Threshold) เพื่อแบ่งแยกวัตถุที่มีความแตกต่างออกจากพื้นหลัง จะได้ผลลัพธ์เป็นภาพไบนารี (Binary image) ดังรูปที่ 5 ซึ่งมีระดับความเข้มเพียง 2 ระดับเท่านั้นคือ สีขาวและดำ



รูปที่ 5 การกำหนดเทรชโฮลด์ของภาพรอยเชื่อม

2.3.2 การตรวจหาขอบภาพ (Edge Detection)

ภาพที่ถูกกำหนดเทรชโฮลด์แล้ว จะถูกนำมาตรวจหาขอบภาพเพื่อแยกแยะออกจากพื้นหลังของภาพ ด้วยการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มสูงและต่ำแบบทันทีทันใดภายในภาพ ยกตัวอย่างเช่น การตรวจหาเส้นขอบแถบเส้นเลเซอร์ในรูปที่ 5 จะได้ผลลัพธ์คือ ตำแหน่งของแถบเส้นเลเซอร์ดังรูปที่ 6 ในหน่วยพิกเซล

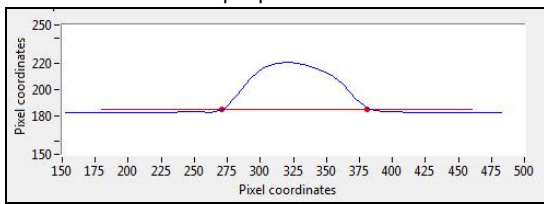


รูปที่ 6 เส้นขอบของแถบแสงเลเซอร์

DRC-2014

2.4 เทคนิคการหาขอบรอยเชื่อม

ตำแหน่งของขอบรอยเชื่อมด้านบนและด้านล่างของรูปที่ 6 สามารถใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของแถบเส้นเลเซอร์ได้ จากนั้นจึงนำข้อมูลตำแหน่งด้านซ้ายและด้านขวาของรอยเชื่อมมาสร้างเส้นตรงในแนวนอนให้ตัดผ่านเส้นโค้งดังรูปที่ 7 จุดตัดนี้จะกำหนดให้เป็นตำแหน่งของขอบรอยเชื่อมในหน่วยพิกเซลซึ่งจะต้องถูกแปลงพิกัดไปยังระบบพิกัดโลก 3 มิติก่อนการนำไปใช้ในระบบควบคุมหุ่นยนต์



รูปที่ 7 การหาขอบรอยเชื่อม

3. การประมาณตำแหน่งรอยเชื่อม

รอยเชื่อมโดยทั่วไปจะมีความกว้างไม่สม่ำเสมอตลอดเส้นทางแนวเชื่อม ส่งผลให้ข้อมูลตำแหน่งรอยเชื่อมที่วัดได้จากระบบเลเซอร์-การภาพมีค่าแกว่งและทำให้เป็นเชิงเส้นน้อยลง ถ้านำตำแหน่งเหล่านี้ไปใช้ในระบบควบคุมหุ่นยนต์โดยตรง อาจทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไม่ราบเรียบดังนั้นตำแหน่งรอยเชื่อมที่ได้จากระบบเลเซอร์-การภาพจะต้องนำมาประมาณด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด (least-squares regression) เพื่อให้ตำแหน่งที่จะใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์มีลักษณะราบเรียบมากขึ้น

ชุดข้อมูลที่ได้จากระบบเลเซอร์-การภาพประกอบด้วยตำแหน่งรอยเชื่อม (x_i) และระยะทางตามแนวเชื่อม (y_i) โดยที่ $i=1,2,...,n$ และ n คือจำนวนข้อมูล จะสามารถสร้างฟังก์ชันพหุนามอันดับ m ของค่าประมาณระยะทางตามแนวเชื่อม ($\hat{y}_i$) ได้คือ

$$\hat{y}(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (3)$$

โดย $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ เป็นค่าคงตัว ซึ่งจะหาได้จากเงื่อนไขที่ทำให้ฟังก์ชันพหุนามนี้มีการประมาณตำแหน่งผิดพลาดจากค่าจริงน้อยที่สุด

ค่าผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งรอยเชื่อมแสดงได้ด้วยผลบวกกำลังสองของค่าความผิดพลาด (Sum of squares of error, SSE)

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

เมื่อนำสมการ (3) มาแทนค่าในสมการ (4) จะได้ว่า

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m)^2 \quad (5)$$

เนื่องจากค่าคงที่ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ แต่ละตัวทำให้ความผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งรอยเชื่อมมีค่าน้อยที่สุด (Minimization) อนุพันธ์ของสมการ (5) โดยเปรียบเทียบกับค่าคงที่ดังกล่าวจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ ระบบสมการจึงประกอบด้วยสมการย่อยจำนวน $m+1$ สมการคือ

$$\frac{\partial SSE}{\partial a_0} = 2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_mx_i^m)](-1) = 0$$

$$\frac{\partial SSE}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_mx_i^m)](-x_i) = 0$$

⋮

$$\frac{\partial SSE}{\partial a_m} = 2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_mx_i^m)](-x_i^m) = 0$$

ระบบสมการสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^m \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m y_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

เมื่อกำหนดให้

$$v = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^m \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^m \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^m \\ 1 & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^m \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_4 \end{bmatrix}$$

DRC-2014

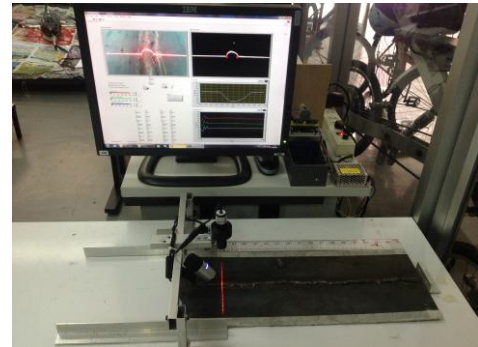
จะเขียนสมการ (6) ใหม่ได้ว่า

$$(M^T M)v = M^T y$$

ดังนั้น

$$v = (M^T M)^{-1} M^T y$$

ค่าคงที่ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ ของ v จะถูกนำไปใช้ในสมการ (3) เพื่อใช้สมการที่จะเป็นตัวแทนของตำแหน่งรอยเชื่อมจากระบบเลเซอร์-การภาพ



รูปที่ 8 ชุดการทดลองระบบเลเซอร์-การภาพ

4. การทดลอง

การทดลองนี้แสดงวิธีการหาตำแหน่งรอยเชื่อมด้วยระบบเลเซอร์-การภาพ และนำมาประมาณแนวรอยเชื่อมด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดเพื่อนำไปสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สำหรับการติดตามรอยเชื่อม

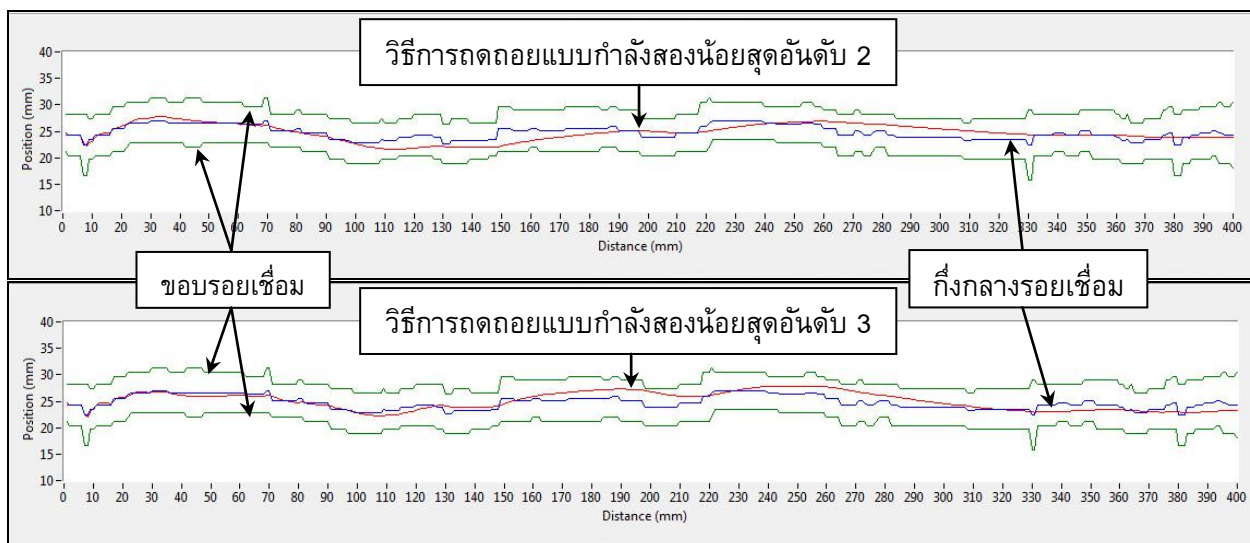
4.1 ชุดการทดลอง

ชุดการทดลองดังรูปที่ 8 ประกอบด้วยชุดฉายแสงเลเซอร์แบบเส้นและกล้องเว็บแคมรุ่น Microsoft LifeCam Studio ซึ่งติดตั้งไว้กับรางเลื่อนภายในรางเลื่อนจะวางแผ่นเหล็กที่มีรอยเชื่อมความยาว 50 เซนติเมตรในแนวขวางกับแถบแสงเลเซอร์ แผ่นเหล็กจะยึดจับสายสลึงโดยมีปลายอีกด้านหนึ่งคล้องกับเพลลาของเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) สำหรับการประมวลผลของระบบเลเซอร์-การภาพจะทำงานด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW บนคอมพิวเตอร์

4.2 วิธีการทดลอง

แม้ว่าในการตรวจสอบรอยเชื่อม จะให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนผนังเหล็ก ในการทดลองเบื้องต้นนี้จะเปลี่ยนเป็นการเคลื่อนแผ่นเหล็ก โดยให้ระบบเลเซอร์-การภาพอยู่กับที่ เมื่อเคลื่อนแผ่นเหล็กแล้ว สายสลึงจะดึงให้เพลลาของเอ็นโค้ดเดอร์หมุน จึงสามารถวัดระยะทางการเคลื่อนของแผ่นเหล็กได้

ระบบเลเซอร์-การภาพจะหาตำแหน่งรอยเชื่อมเมื่อแผ่นเหล็กเลื่อนทุก 1 มิลลิเมตร เป็นระยะทาง 40 เซนติเมตร พร้อมกับการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะประมวลผลภาพและคำนวณตำแหน่งของรอยเชื่อม จากนั้นจะประมาณตำแหน่งของแนวรอยเชื่อมด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดแบบอันดับ 2 และอันดับ 3 ในการทดลองนี้จะใช้ข้อมูลตำแหน่งของรอยเชื่อมจำนวน 10 ค่าก่อนนำมาคำนวณหาตำแหน่งถัดไปของรอยเชื่อม



รูปที่ 9 ผลการหาตำแหน่งเชื่อมและประมาณแนวรอยเชื่อมจากวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด

DRC-2014

4.3 ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในรูปที่ 9 จะเห็นว่า ตำแหน่ง ขอบรอยเชื่อมที่หาได้จากระบบเลเซอร์-การภาพมีความไม่ราบเรียบและมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1 มิลลิเมตรเมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมจริง นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าตำแหน่งรอยเชื่อมที่ได้จากการประมาณ ด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดอันดับ 2 และ อันดับ 3 มีความราบเรียบ ผลลัพธ์ของวิธีวิธีการ ถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดอันดับ 2 จะมีลักษณะ เป็นแนวเส้นตรงมากกว่าวิธีการถดถอยแบบกำลังสอง น้อยสุดอันดับ 3 เนื่องจากมีจำนวนการโค้งน้อยกว่า

5. สรุปผลการทดลอง

การนำระบบเลเซอร์-การภาพมาใช้เพื่อติดตาม รอยเชื่อม สามารถหาตำแหน่งรอยเชื่อมได้โดยมีความ คลาดเคลื่อนน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมจริง นอกจากนี้การประมาณแนวรอยเชื่อมโดยใช้วิธีการ ถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดด้วยอันดับของสมการที่ เหมาะสม ทำให้ได้แนวรอยเชื่อมที่มีความราบเรียบ และสามารถนำไปใช้ในระบบควบคุมหุ่นยนต์สำหรับ การตรวจสอบรอยเชื่อมได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] พงศกร เพชรพันธ์ศรี (2547). เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ โดยใช้ภาพสเตอริโอ,วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย,จังหวัดกรุงเทพมหานคร
- [2] เอกภพ ศรีจันทร์, วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2555). เทคนิคการประมาณกลุ่มจุดสำหรับเพิ่มศักยภาพในการวัดของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ, การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 26 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

- [3] Yuan Li, You Fu Li, Qing Lin Wang, De Xu, Min Tan (2010). Measurement and Defect Detection of the Weld Bead Based on Online Vision Inspection, IEEE Transactions on instrumentation and measurement, Vol.59, No.7, July 2010.
- [4] Min-Goo Kang, Joon-Hong Kim, Young-Jun Park, Gap-Joo Woo (2007). Laser Vision System for Automatic Seam Tracking of Stainless Steel Pipe Welding Machine (ICCAS 2007), International Conference on Control, Automation and Systems, Oct. 17-20, 2007 in COEX, Seoul, Korea.