

## เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบเคลื่อนย้ายได้

### A Portable 3D Coordinate Measuring Machine

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ มนตรมโน นฤวิศิษฐ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889

E-Mail: Viboon.S@eng.chula.ac.th , reverserp@eng.chula.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม เพื่อให้สามารถใช้งานเครื่องได้สะดวกและมีฟังก์ชันการทำงานมากยิ่งขึ้น โดยจะมีการพัฒนาในหลายส่วนไม่ว่าจะเป็น การออกแบบหัวจับ ณ ตำแหน่งปลายของแขนกล , การเลือกตัวถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมเพื่อช่วยผ่อนแรง เนื่องจากแขนของเครื่อง, การตั้งค่าเริ่มต้น (Home position) และการสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม รวมทั้งส่วนของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่จะเพิ่มเติมในหลายๆฟังก์ชัน เพื่อที่จะสามารถใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น ซึ่งเครื่องวัดพิกัดนี้ได้พัฒนาเพื่อใช้สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมย้อนกลับ (Reverse Engineering) โดยมีเป้าหมายให้มีค่าความถูกต้องดีกว่า 100 ไมโครเมตรโดยประมาณ ซึ่งสำหรับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มนั้น ไม่สามารถหาได้โดยตรง จึงจะทำการหาด้วยระเบียบวิธีเชิงเลขโดยใช้การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) ด้วยการรู้ค่าตำแหน่งมุม ความยาวหัววัด โครงสร้างของสมการแบบเอกพันธ์ที่ใช้ในการหาค่าตำแหน่งพิกัด และตำแหน่งปลายหัววัดที่วัดเทียบกับเครื่องซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปก็จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ยังไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จะนำมาใช้ในการสร้างสมการแบบเอกพันธ์ของแขนกลที่ใช้ในการวัดพิกัดได้

**คำหลัก:** เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ / แบบข้อต่อ 6 แกน / วิศวกรรมย้อนกลับ

#### Abstract

This research work is to develop of an articulated type arm for using as coordinate measuring system called CU-CMM. The main objectives of the development are to improve the ergonomic and accuracy of the measurement as well as measurement functions. These are done through the new design of probe, design and select appropriate counterbalance, setting more particle home position, calibrating with development of a calibrating device, and software for measurement. CU-CMM is used mainly for reverse engineering applications with accuracy no exceed 100  $\mu$ mm within the arm working volume. Because the parameters which arm-physical related cannot be measured with high precision, so, the nonlinear regression method is required to obtain a calibration matrix by using calibrated parameters as: the angular position, the probe length, forward kinematic equation, and the tip position. The calibrating device, used in the calibrating procedure, is developed accurately based on the measurement data of commercial CMM, Brown & Sharp, to maintain the overall requirement of accuracy within 100  $\mu$ mm.

**Keywords:** 3D CMM / six joints / Reverse Engineering

## 1. บทนำ

ในการออกแบบผลิตภัณฑ์นั้น เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ นักออกแบบจะต้องทำการเขียนแบบเพื่อนำไปใช้ในการผลิต ซึ่งในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้สูงและใช้เวลานาน เนื่องจากจะต้องทำการวัดขนาดจากผลิตภัณฑ์ต้นแบบซึ่งก็อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดจากการวัดได้ จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้จากการวัดไปเขียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการออกแบบ หรือที่เรียกว่าโปรแกรมแคด (CAD) ซึ่งขั้นตอนในการเขียนก็มีความยุ่งยาก และต้องใช้ประสบการณ์ในการเขียนในระดับหนึ่ง ดังนั้นวิธีหนึ่งซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ก็คือ ทำการวัดพิกัดต่างๆ ของงานต้นแบบด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แล้วจึงนำข้อมูลที่วัดได้นี้ส่งไปยังโปรแกรมแคด ซึ่งสามารถลดขั้นตอน และความผิดพลาดต่างๆ ลงได้มาก ทำให้ผู้ผลิตสามารถผลิตสินค้าได้รวดเร็วขึ้น และในขั้นตอนตรวจเช็คคุณภาพ (Quality control) ก็สามารถทำได้รวดเร็วด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติอีกเช่นกัน

ตัวเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ โดยส่วนใหญ่่นั้นไม่สามารถเคลื่อนย้ายโดยสะดวก จึงทำให้ถูกจำกัดขอบเขตการใช้งาน ไม่สามารถใช้ในการวัดชิ้นงานที่เคลื่อนย้ายไม่ได้ หรือไม่สะดวกในการวัดที่หน้างานทำให้ถูกลดความเร็วในการทำงานลงไป ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาและออกแบบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ให้มีความสะดวกในการใช้งานมากยิ่งขึ้น รวมถึงสามารถเคลื่อนย้ายได้โดยสะดวกด้วย ซึ่งก็จะเป็นการทำให้อุตสาหกรรมพัฒนาก้าวหน้ามากยิ่งขึ้นด้วย

## 2. ผลการวิจัยก่อนหน้า

### 2.1 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

#### 2.1.1 ลักษณะของเครื่อง

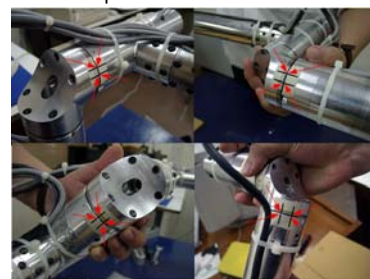


รูปที่ 1 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม

เครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มเป็นเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

แบบข้อต่อ 6 แกนที่มีค่าความถูกต้อง 100 ไมโครเมตร และมีขอบเขตการทำงาน 500x500x300 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เพื่อใช้ร่วมในกระบวนการวิศวกรรมย้อนกลับ (reverse engineering) โดยอาศัยหลักการทางจลนศาสตร์ ในการแปลงค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อของเครื่องวัดพิกัดไปเป็นค่าตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัดในระบบพิกัดจาก ค่าตำแหน่งพิกัดที่ได้จะถูกเก็บอยู่ในรูปแบบมาตรฐานดังเช่นรูปแบบซีจีไอแอสกี (CGO\_ASCII) ซึ่งเป็นรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ในโปรแกรมแคด (CAD) ทั่วๆ ไปได้

การตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโคเดอร์ จะทำการตั้งโดยกำหนดสัญลักษณ์ให้กับแต่ละข้อต่อดังรูปที่ 2 ซึ่งจะเป็นการตั้งค่าตำแหน่งเริ่มต้น (Home position) ให้กับพิกัดแกนหมุน (Joint coordinate)



รูปที่ 2 การตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโคเดอร์ข้อต่อที่ 2-5

ค่าความถูกต้องของเครื่องซึ่งทดสอบโดยการวัดตำแหน่งพิกัดระหว่างจุดศูนย์กลางทรงกลม 2 จุดเปรียบเทียบกับผลการวัดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็มบราวน์ แอนด์ชาร์ปซึ่งมีค่าความถูกต้องถึง  $\pm 3$  ไมโครเมตร พบว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีค่าสูงสุดไม่เกิน 100 ไมโครเมตร 2-5 อย่างไรก็ตามเครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้น ยังต้องการพัฒนาอีกมาก ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของน้ำหนักของตัวแขนกลซึ่งไม่สามารถยกได้ด้วยมือเดียว ทำให้เกิด

ความยากลำบากในการใช้งาน และการตั้งตำแหน่งเริ่มต้น (Home position) ก็มีความยุ่งยากเนื่องจากต้องทำการหาค่าความเหลื่อมทุกครั้ง อีกทั้งเรื่องของการปรับปรุงลักษณะของตัวเครื่องเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานกับมนุษย์ด้วย

ในเครื่องวัดพิทัก 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม ใช้ฮอปติคัลเอนโค้ดเดอร์ (optical encoder) ชนิดอินครีเมนทัล (incremental) ในการวัดค่าตำแหน่งมุม ณ ข้อต่อต่างๆ ซึ่งมีความละเอียดดังนี้

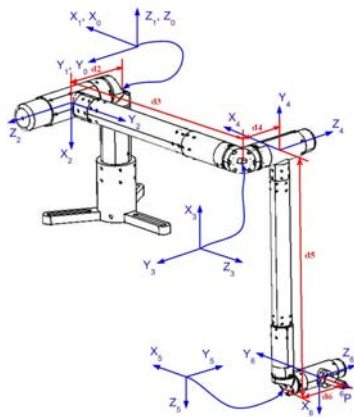
ข้อต่อที่ 1 – 4 มีความละเอียด 10,000 PPR  
ข้อต่อที่ 5 – 6 มีความละเอียด 1,024 PPR

### 2.1.2.2 ฮาร์ดโมนิคไดร์ว

เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดมีความละเอียดไม่เพียงพอจึงต้องใช้ฮาร์ดโมนิคไดร์ว มาช่วยเพิ่มค่าความละเอียดและช่วยป้องกันการเกิดแบกแลช ซึ่งในเครื่องวัดพิทัก 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม ได้เลือกใช้ฮาร์ดโมนิคไดร์ว ที่มีอัตราทด 1:50 ทำให้ได้ค่าความละเอียดที่สูงขึ้นมากจนเพียงพอกับความต้องการ

### 2.1.3 การตั้งแกนและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

เครื่องวัดพิทัก 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม มีการตั้งแกนดังรูปที่ 3 และมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางที่ 1



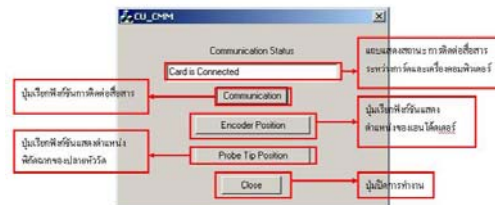
รูปที่ 3 การตั้งแกนเครื่องวัดพิทัก 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ตารางที่ 1 ค่า พารามิเตอร์ต่างๆของแต่ละข้อต่อของเครื่องวัดพิทัก 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

i	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	$\frac{3\pi}{2}$	0	$d_2$	$\theta_2$

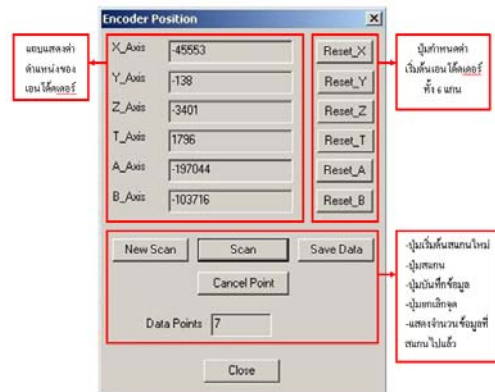
3	$\frac{3\pi}{2}$	0	$d_3$	$\theta_3$
4	$\frac{\pi}{2}$	0	$d_4$	$\theta_4$
5	$\frac{\pi}{2}$	0	$d_5$	$\theta_5$
6	$\frac{3\pi}{2}$	0	$d_6$	$\theta_6$

## 2.2 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิทัก 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มที่มีอยู่เดิม

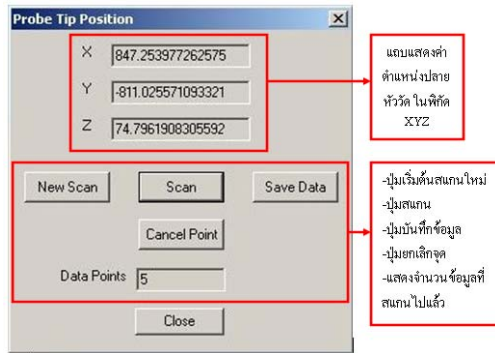
โปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิทัก 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็มนี้ มีชื่อว่า โปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม (CU\_CMM) ซึ่งได้รับการพัฒนาโดยมีพื้นฐานมาจากภาษาวิซวล ซีพลัส พลัส (Visual C++) ลักษณะรูปแบบของโปรแกรมจะเป็นแบบไดอะล็อก (Dialog Base) ซึ่งมีการทำงานดังนี้



รูปที่ 4 หน้าต่างหลักของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม



รูปที่ 5 หน้าต่าง Encoder position



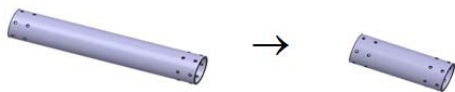
รูปที่ 6 หน้าต่างตำแหน่งปลายหัววัด

### 3. การพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

#### 3.1 การออกแบบ

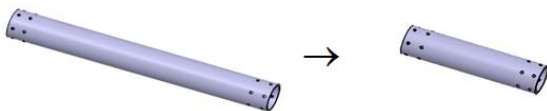
1) ลดความยาวของตัวแขนลง เพื่อให้เครื่องมีขนาดกะทัดรัดมากขึ้น ทำให้มีความสะดวกในการใช้งานมากยิ่งขึ้น ซึ่งตัวแขนที่จะลดความยาวนั้นจะมีอยู่ 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นตัวแขนที่เชื่อมต่อระหว่าง ข้อต่อที่ 2 กับ ข้อต่อที่ 3



รูปที่ 7 ตัวแขนที่เชื่อมต่อระหว่าง ข้อต่อที่ 2 กับข้อต่อที่ 3 ที่ถูกลดความยาวลงไป

ส่วนที่ 2 เป็นตัวแขนที่เชื่อมต่อระหว่าง ข้อต่อที่ 4 กับ ข้อต่อที่ 5

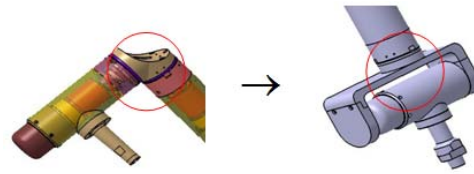


รูปที่ 8 ตัวแขนที่เชื่อมต่อระหว่าง ข้อต่อที่ 4 กับข้อต่อที่ 5 ที่ถูกลดความยาวลงไป

2) ปรับปรุงในส่วนของข้อต่อที่ 6 ให้สะดวกต่อการจับมากยิ่งขึ้น ในส่วนนี้มีการตัดแปลงหลายจุดด้วยกัน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ส่วนข้อต่อได้มีการตัดแปลงให้ต่อออกมาตรงๆ กล่าวคือ ไม่มีน้ำหนักถ่วงเนื่องจากการวางตัวของตัวแขนกับการวางตัวของมือจับอยู่คนละแนวกัน

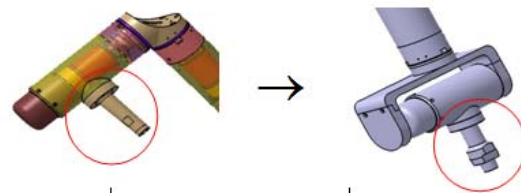
ทำให้สามารถยกตัวแขนได้ด้วยมือเดียว โดยส่วนที่ถูกตัดแปลงจะมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 9 ส่วนของข้อต่อที่ 6 ที่ได้มีการตัดแปลง

จากรูปจะเห็นได้ว่า ข้อต่อที่ 6 ได้ถูกตัดแปลงเพื่อให้ตัวแขนกับตัวมือจับมีการวางตัวในแนวเดียวกัน โดยการออกแบบให้มีลักษณะเป็นก้ามปู ทำให้เป็นไปตามที่ต้องการได้

ส่วนที่ 2 ส่วนของมือจับ ถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อความสะดวกในการจับถือ โดยในส่วนนี้จะมีปุ่มกดวางอยู่ด้วย ทำให้สามารถรับค่าตำแหน่งได้ในขณะที่ใช้งานอยู่ ซึ่งเครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม เดิมนั้นไม่มีในส่วนของปุ่มกดอยู่ที่ตัวมือจับ ทำให้เกิดความไม่สะดวกในการกรรับค่าตำแหน่ง เนื่องจากต้องไปกดรับค่าตำแหน่งที่คอมพิวเตอร์ ซึ่งส่วนมือจับมีการตัดแปลงดังรูป



รูปที่ 10 ส่วนของมือจับ ที่ได้มีการตัดแปลง

3) สวมสปริงดีด เพื่อช่วยในการรับน้ำหนักของแขนกล ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 สปริงดีดที่สวมในแขนกล

ดังนั้นเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่ได้ถูกตัดแปลงแล้ว จะมีลักษณะดังรูปที่ 12

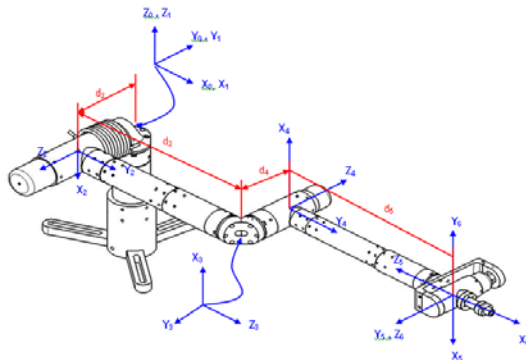


รูปที่ 12 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่ได้มีการดัดแปลงแล้ว

### 3.2 การตั้งแกนและจลศาสตร์ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

#### 3.2.1 การตั้งแกน

เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มมีข้อต่อทั้ง 6 ข้อต่อ เป็นข้อต่อแบบหมุน ซึ่งการตั้งแกนจะมีลักษณะดังรูปที่ 13 และมีค่าพารามิเตอร์ตามวิธีของ Denavit-Hatemberg แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 13 การตั้งแกนของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ตามวิธีของ Denavit-Hatemberg

i	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	$0^\circ$	0	0	$\theta_1$
2	$90^\circ$	0	$d_2$	$\theta_2$
3	$270^\circ$	0	$d_3$	$\theta_3$
4	$90^\circ$	0	$d_4$	$\theta_4$
5	$90^\circ$	0	$d_5$	$\theta_5$
6	$270^\circ$	0	0	$\theta_6$

#### 3.2.2 จลศาสตร์ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

เมตริกการแปลงของเฟรมที่ i กับ เฟรมที่ i-1 จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i.c\alpha_{i-1} & c\theta_i.c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}.d_i \\ s\theta_i.s\alpha_{i-1} & c\theta_i.s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}.d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ซึ่งในการหาเมตริกการแปลงของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม สามารถทำได้โดยการแทนค่า  $a, \alpha, d$  และ  $\theta$  จากตารางที่ 2 ลงในสมการดังกล่าว และเมตริกการแปลงของเฟรมที่ 6 เทียบกับเฟรมที่ 0 คือ

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \quad (2)$$

สามารถทำการหาตำแหน่งปลายหัววัดได้จาก

$${}^0P = {}^0T {}^6P \quad (3)$$

โดยที่

$${}^6P = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad \text{เป็นเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งปลาย}$$

หัววัดโดยเทียบกับเฟรมที่ 6

#### 3.3 การตั้งตำแหน่งอ้างอิง (Home position)

ตำแหน่งอ้างอิง หมายถึง ตำแหน่งที่อุปกรณ์วัดจะอ่านค่าตำแหน่งนั้นเป็นศูนย์เพื่อที่จะกำหนดเป็นค่าเริ่มต้นให้กับเครื่อง และตำแหน่งต่อไปก็จะเป็นตำแหน่งที่เทียบกับตำแหน่งอ้างอิงนี้ ซึ่งเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มนั้น จะมีแนวแกนหมุนทั้งหมด 6 แกน ซึ่งในแนวแกนหมุนแต่ละแกนได้ทำการติดตั้งเอนโค๊ดเตอร์ไว้ โดยที่เอนโค๊ดเตอร์ดังกล่าวสามารถที่จะทำการหาค่าอินเดค (Index) ได้ ดังนั้นในการตั้งตำแหน่งอ้างอิง จะต้องใช้ค่าอินเดคเดียวกันทุกครั้ง วิธีหนึ่งที่ทำได้อีกคือ การทำแท่นอ้างอิงขึ้นมา แล้วนำปลายหัววัดมาสวมเข้ากับแท่นดังกล่าว เพื่อกำหนดให้ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งเริ่มต้นก่อนการตั้งตำแหน่งอ้างอิง แท่นอ้างอิงดังกล่าวมีรูปร่างดังรูปที่ 14 และ 15



รูปที่ 14 แท่นอ้างอิง





รูปที่ 15 ปลายหัววัดสวมเข้ากับแท่นอ้างอิง

เมื่อได้ตำแหน่งเริ่มต้นแล้ว จากนั้นทำการตั้งตำแหน่งอ้างอิงโดยกำหนดขอบเขตของตำแหน่งอินเดคที่จะเกิดขึ้น โดยกำหนดให้กับทุกข้อต่อดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ตำแหน่งเริ่มต้นและขอบเขตของการหาอินเดคของทั้ง 6 ข้อต่อ

เนื่องจากตำแหน่งอินเดคในเอนโค๊ดเดอร์นั้นเป็นตำแหน่งเดิมที่ตายตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงสามารถใช้อินเดคในการตั้งตำแหน่งอ้างอิงได้อย่างแม่นยำ

### 3.4 การสอบเทียบ (Calibration) เครื่องวัดพิคต 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มเอ็ม

#### 3.4.1 แนวคิดในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง

การใช้ระเบียบวิธีการถดถอยแบบน้อยสุด (least square regression) โดยใช้แนวทางของวิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear Regression) มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะใช้นำมาหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งหาโดยละเอียดได้ยากได้

#### 3.4.2 การนำวิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นมาใช้หาพารามิเตอร์จริง

ในการทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น จำเป็นที่จะต้องรู้ข้อมูลของระบบจริงซึ่งในที่นี้ก็คือ ค่าตำแหน่งพิคตของปลายหัววัด ค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อที่สัมพันธ์กับค่าตำแหน่งพิคตที่วัดได้ และต้องรู้อีกด้วยว่าในระบบจริงนั้นมีค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าทั้งหมดกี่ตัว เพื่อที่จะทราบได้ว่าจะต้องใช้ตำแหน่งอย่างน้อยกี่ตำแหน่งในการสอบเทียบโดย

- ค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อ -> เอนโค๊ดเดอร์
- ตำแหน่งของปลายหัววัด -> ซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป

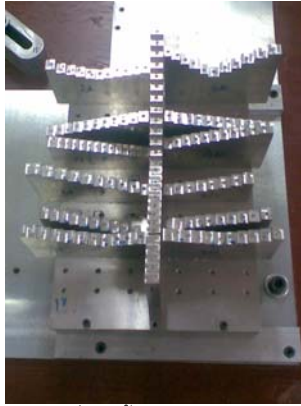


รูปที่ 17 ซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป

-ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า -> ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าทั้งหมด 28 ตัว โดยจะเป็นค่าพารามิเตอร์ของเมตริกซ์การแปลงของซียู-ซีเอ็มเอ็ม 22 ตัว ได้แก่  $a_1, a_2, a_3, a_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, d_2, d_3, d_4, d_5, x_p, y_p, z_p, \Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, \Delta\theta_5$  และ  $\Delta\theta_6$  ซึ่งพารามิเตอร์  $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, \Delta\theta_5$  และ  $\Delta\theta_6$  จะเป็นค่าความเหลื่อม (offset) ระหว่างตำแหน่งศูนย์จริงของข้อต่อของซียู-ซีเอ็มเอ็มกับตำแหน่งศูนย์ของเอนโค๊ดเดอร์ในแต่ละข้อต่อ ส่วนค่าพารามิเตอร์อีก 6 ตัวที่เหลือจะเป็นค่าพารามิเตอร์ของเมตริกซ์การแปลงที่ใช้ในการย้ายแกน 6 ตัว คือ  $\alpha, \beta, \gamma, x_{0Origin}, y_{0Origin}$  และ  $z_{0Origin}$  ดังนั้นขั้นตอนการสอบเทียบจะต้องมีตำแหน่ง

ที่จะทำการวัดอย่างน้อย 28 ตำแหน่ง

-ขั้นตอนการสอบเทียบ -> มีลักษณะดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 ชิ้นงานสอบเทียบ

ซึ่งชิ้นงานสอบเทียบนั้นจะมีลักษณะเป็นหลุม เนื่องจากเมื่อนำวัตถุที่มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดเดียวกันมาวางไว้บนหลุม จุดศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมทั้งสองจะอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน

#### 3.4.2.1 การสอบเทียบ

การสอบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์จริงนั้นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ 1. นำชิ้นงานสอบเทียบมาวัดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป แล้วทำการบันทึกข้อมูลตำแหน่งที่วัดได้ 2. นำชิ้นงานสอบเทียบมาวัดด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม แล้วทำการบันทึกข้อมูลตำแหน่งการหมุนที่วัดได้จากเอนโคดเดอร์ จากนั้นจะนำค่าที่บันทึกได้มาทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นต่อไป

#### 3.4.2.2 การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น

โปรแกรมแมทแลป (Matlab) มีฟังก์ชันที่สามารถทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ฟังก์ชันดังกล่าวคือ ฟังก์ชัน Isqcurvefit ฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันสำหรับแก้ปัญหาอนลิเนียร์เคิร์ฟฟิตติง (nonlinear curve-fitting) โดยทำการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดดังในสมการ

$$\min_x \frac{1}{2} \|F(x, xdata) - ydata\|_2^2 = \frac{1}{2} \sum_i (F(x, xdata_i) - ydata_i)^2 \quad (4)$$

เนื่องจากข้อมูลที่วัดได้จากหัวข้อ 3.4.2.1 นั้นจะมีอยู่ 2 ส่วนก็คือ (1) ตำแหน่งที่วัดได้จากเครื่องซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป ซึ่งก็คือ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางทรงกลมของปลายหัววัดทรงกลม (2) ตำแหน่งที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็ม

เอ็ม ซึ่งก็คือ ตำแหน่งการหมุนของแต่ละข้อต่อซึ่งวัดได้จากเอนโคดเดอร์ ดังนั้น อินพุต (input) ของระบบนี้มีตัวแปรต้น (xdata) ทั้งหมด 6 ตัว คือ ค่ามุมทั้ง 6 ข้อต่อที่หาได้จากการวัดในส่วนที่ (2) ,ตัวแปรตาม (ydata) ทั้งหมด 3 ตัว คือ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของหลุมที่หาได้จากการวัดในส่วนที่ (1),เอาต์พุต (output) คือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า (x) ทั้ง 28 ตัว, ค่าเริ่มต้น (x0) ที่ใช้ในการทำซ้ำ และฟังก์ชัน (fun) ที่ใช้ในการคำนวณ

#### 3.4.2.3 การหาฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณในการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณสามารถหาได้โดยการไล่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามซึ่งมีความสัมพันธ์ตามแผนภาพดังรูปที่ 18



รูปที่ 19 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรต้นและตัวแปรตาม

ดังนั้นฟังก์ชันที่ใช้คำนวณ คือ สมการของเมตริกการแปลง

เมื่อได้ฟังก์ชันที่ใช้ในการใช้คำนวณ, ค่าเริ่มต้น, อินพุต และเอาต์พุต ก็สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าได้ ผ่านทางฟังก์ชัน Isqcurvefit ของโปรแกรมแมทแลป ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4.2.2

#### 4.การพัฒนาโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม

จากหัวข้อที่ 2.2 จะเห็นว่าโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม เดิม นั้น ทำได้เพียงแครับค่าที่ได้จากเอนโคดเดอร์ทั้ง 6 แกน แล้วทำการแสดงค่าตำแหน่งปลายหัววัดในพิกัด XYZ และก็เก็บค่าได้เท่านั้น ยังไม่มีส่วนของฟังก์ชันการทำงาน เพื่อให้มีความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม ให้มีส่วนของฟังก์ชันการทำงานให้มีความหลากหลายในการใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยจะเพิ่มเติมฟังก์ชัน ดังนี้

1. Qualification ใช้ในการให้ข้อมูลเกี่ยวกับหัว probe

2. Alignments ใช้กำหนดตำแหน่งที่จะวาง coordinate system ให้กับ part

3. Measurement ใช้เป็นเครื่องมือวัดค่าต่างๆ โดยจะแบ่งเป็น 3.1 วัดจุด (Point) ว่า จุดที่ต้องการจะวัดนั้นมีค่าพิกัดเท่าไร 3.2 วัดเส้นในระนาบ 2 มิติ (2D-line) ว่า เส้นที่จะวัดนั้นมีความยาวเท่าไร 3.3 วัดวงกลม (Circle) ว่า วงกลมที่ต้องการจะวัดนั้นมีตำแหน่งและรัศมี เป็นเท่าไร 3.4 วัดทรงกระบอก (Cylinder) ว่า ทรงกระบอกที่ต้องการจะวัดนั้น มีรัศมีและความยาว เป็นเท่าไร 3.5 วัดทรงกลม (Sphere) ว่า ทรงกลมที่ต้องการจะวัดนั้น มีรัศมีเท่าไร 3.6 วัดเส้นใน 3 มิติ (3D-line) ว่า เส้นที่จะวัดนั้นมีความยาวเท่าไร

4. ระยะในระนาบ 2 มิติ (2D distances) ใช้เป็นเครื่องมือวัดระยะในระนาบ 2 มิติ

5. ระยะใน 3 มิติ (3D distances) ใช้เป็นเครื่องมือวัดระยะในระนาบ 3 มิติ

6. มุม (Angles) ใช้เป็นเครื่องมือวัดมุม

7. เส้นสมมาตร (Symmetries) ใช้เป็นเครื่องมือหาเส้นสมมาตร ที่อยู่ระหว่างจุดสองจุดหรือเส้นสองเส้นที่สมมาตรกัน

8. จัดรูปแบบให้ดูดีขึ้น (Form deviations) ใช้เป็นเครื่องมือจัดตำแหน่งจุดต่างๆ (cloud point) ให้มีความเป็นระเบียบมากขึ้น

9. มีฟังก์ชันที่ช่วยสนับสนุนการวัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ได้

## 5. การทดลอง

### 5.1 การทดลองทำการสอบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ในการสอบเทียบนั้น จะเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ไม่ทราบค่าที่แน่นอนของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม โดยจะมีชิ้นงานสอบเทียบซึ่งใช้สำหรับอ้างอิงตำแหน่งจุดต่างๆ ซึ่งจะทำการสอบเทียบด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปที่ทางห้องปฏิบัติการมีอยู่เพื่อหาค่าตำแหน่งที่แม่นยำ แล้วจึงนำไปสอบเทียบกับเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มต่อไป ซึ่งได้ผลการสอบเทียบดังนี้

ตารางที่ 3 ผลการสอบเทียบ

พารามิเตอร์	ค่าตามแบบ	ค่าที่ได้จากการคำนวณ
$a_1$	0	-0.2575
$a_2$	0	-1.6170
$a_3$	0	0.2347
$a_4$	0	2.6608
$d_2$	135.0000	136.9708
$d_3$	419.2720	421.4233
$d_4$	117.2500	115.4654
$d_5$	-433.6700	-433.5016
$\alpha_1$	1.5708	1.5700
$\alpha_2$	4.7124	4.7173
$\alpha_3$	1.5708	1.5753
$\alpha_4$	1.5708	1.5785
$\alpha_5$	4.7124	4.7299
$x_p$	145	146.2871
$y_p$	0	-0.0001
$z_p$	0	-1.1122
$\Delta\theta_1$	0	0.0218
$\Delta\theta_2$	4.7124	4.7037
$\Delta\theta_3$	3.1416	3.1396
$\Delta\theta_4$	0	-0.0079
$\Delta\theta_5$	3.1416	3.1447
$\Delta\theta_6$	1.5708	1.5924
$x_{origin}$	190	183.3281
$y_{origin}$	-180	-173.6793
$z_{origin}$	-253	-251.6244
$\alpha$	0	-0.0059
$\beta$	0	-0.0017
$\gamma$	0	-0.0037

### 5.2 การทดลองวัดตำแหน่งเพื่อหาค่าความถูกต้องของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ทำการทดลองโดยการวัดระยะระหว่างจุด 2 จุดบนชิ้นงานสอบเทียบ ซึ่งสามารถทำการวัดเทียบกับเครื่องซีเอ็มเอ็ม บราวน์แอนด์ชาร์ป โดยจะต้องมี



ค่าผิดพลาดไม่เกิน 100 ไมครอน ซึ่งทำการสุ่มวัด  
เทียบทั้งหมด 20 ตำแหน่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความผิดพลาด

ตำแหน่ง	CMM B&S (มม.)	CUCMM (มม.)	ค่าความ ผิดพลาด (มม.)
1 กับ 20	181.6019	181.6052	-0.0033
5 กับ 108	165.3095	165.2822	0.0273
6 กับ 114	166.7285	166.6405	0.088
9 กับ 112	163.3266	163.284	0.0426
14 กับ 122	166.017	165.9282	0.0888
15 กับ 123	166.314	166.3863	-0.0723
17 กับ 120	160.6284	160.7123	-0.0839
18 กับ 126	165.6627	165.6579	0.00482
19 กับ 122	161.3326	161.2993	0.0333
26 กับ 124	190.0722	190.1674	-0.0953
28 กับ 124	174.0472	173.9548	0.0925
30 กับ 126	177.3913	177.2975	0.0938
45 กับ 119	159.9516	159.984	-0.0324
51 กับ 101	125.2367	125.1572	0.07948
54 กับ 69	133.471	133.5101	-0.0391
56 กับ 106	124.1842	124.1939	-0.0097
57 กับ 108	114.0416	114.0899	-0.0483
67 กับ 72	162.0128	162.0118	0.001
101 กับ 132	123.312	123.3111	0.0009
103 กับ 130	144.2992	144.2111	0.0881

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดมีค่าไม่เกิน  
100 ไมครอน

#### 6. สรุปผลการทดลอง

เครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่ได้ถูกพัฒนาแล้วนั้นมีความ  
สะดวกในการใช้งานมากขึ้น เนื่องจากมีขนาด  
กะทัดรัดและมีตัวถ่วงน้ำหนัก ทำให้แขนกลมีน้ำหนัก  
เบา ในส่วนของการตั้งค่าเริ่มต้นนั้น มีความแม่นยำ  
มากยิ่งขึ้น เนื่องจากใช้ค่าอินเตคจากเอนโคเดอร์เป็น  
ตัวตรวจสอบ และชิ้นงานสอบเทียบมีความเหมาะสม  
เพียงพอที่จะนำมาใช้ในการสอบเทียบเพื่อให้เครื่องมี  
ค่าความผิดพลาดอยู่ในขอบเขตไม่เกิน 100 ไมครอน

ดังที่ได้กำหนดไว้ และได้พัฒนาโปรแกรมซียู-ซีเอ็ม  
เอ็มเพื่อให้มีฟังก์ชันที่ช่วยให้เกิดความสะดวกและ  
หลากหลายในการใช้งานได้

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] John J. Craig, *Introduction to Robotics, Mechanics and Control*, 2<sup>nd</sup> edition, Addison-Wesley Publishing Company, 1955.
- [2] นายกิตติศักดิ์ บุญยังคุณ, “เครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบข้อต่อ 6 แกน”, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2545
- [3] www.faro.com
- [4] Ogura Industrial Corp. <http://www.ogura-clutch.com/products.html?category=2&product=89>
- [5] Coleman, T.F. and Y. Li. An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds. *SIAM Journal on Optimization* 6(1996): 418-445.
- [6] Coleman, T.F. and Y. Li. On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds. *Mathematical Programming* 67, 2 (1994): 189-224.
- [7] Levenberg, K. A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares. *Quarterly Applied Math* 2 (1944): 164-168.
- [8] Marquardt, D. An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM Journal Applied Math* 11 (1963): 431-441.
- [9] More, J. J. The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory, Numerical Analysis, ed. G. A. Watson. *Lecture Notes in Mathematics* 630. Springer Verlag, 1977.
- [10] Dennis, J. E. Jr. Nonlinear Least Squares. *State of the Art in Numerical Analysis*. ed. D. Jacobs. Academic Press, 1977