

เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกน



นายกิตติศักดิ์ บุญยังคุณ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-9824-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A SIX-AXIS ARTICULATE MACHINE FOR THREE-DIMENSION COORDINATE MEASURING

Mr. Kittisak Boonyangkoon

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-9824-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบเชื่อมต่อ 6 แกน
โดย	นายกิตติศักดิ์ บุญยังคุณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษา (ร่วม)	อาจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา (ร่วม)  
(อาจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

กิตติศักดิ์ บุญยังคุณ : เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกน. (A SIX-AXIS ARTICULATE MACHINE FOR THREE-DIMENSION COORDINATE MEASURING) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อาจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ ,112 หน้า. ISBN 974-17-9824-5.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบข้อต่อ 6 แกน การศึกษาจะรวมถึงการออกแบบกลไกและจลนศาสตร์ของแขนกล รวมทั้งเทคนิคในการสอบเทียบ เครื่องวัดพิกัดนี้ได้พัฒนาเพื่อใช้สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมย้อนกลับ (Reverse Engineering) โดยมีเป้าหมายให้มีค่าความถูกต้องดีกว่า 100 ไมโครเมตรโดยประมาณ ภายในขอบเขตการทำงาน 500x500x300 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ออกพิตคอลลโรตารีเอนโค้ดเดอร์ (Optical Rotary Encoder) ความละเอียดสูงจะติดตั้งที่แต่ละข้อต่อของแขนกล เพื่อใช้ในการวัดค่าตำแหน่งมุมของข้อต่อทั้งหมด ด้วยการรู้ค่าตำแหน่งมุม ความยาวหัววัด และโครงสร้างของสมการแบบเอกพันธ์ที่ใช้ในการหาค่าตำแหน่งพิกัด ค่าพารามิเตอร์ที่ยังไม่รู้ค่า ของโครงสร้างแขนกล สามารถหาได้ด้วยระเบียบวิธีเชิงเลขโดยใช้การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จะนำมาใช้ในการสร้างสมการแบบเอกพันธ์ของแขนกล ที่ใช้ในการวัดพิกัด ข้อมูลตำแหน่งพิกัดที่วัดได้สามารถเชื่อมโยงเข้ากับโปรแกรมแคดที่ใช้โดยทั่วไปในภาคอุตสาหกรรม (ตัวอย่างเช่น CATIA) ได้ โดยการจัดเรียงข้อมูลที่วัดได้ไว้ในรูปแบบกลาง แบบ CGO\_ASCII

ความถูกต้องของเครื่อง ทดสอบด้วยการวัดระยะห่างระหว่างทรงกลมสอบเทียบ 2 ตำแหน่ง โดยใช้จุดศูนย์กลางของทรงกลมในการอ้างอิง ข้อมูลจำนวน 300 จุดจะใช้ในขั้นตอนการสอบเทียบและสำหรับ 50 จุดที่เหลือจะใช้ในการหาค่าความถูกต้อง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าความถูกต้อง 100 ไมโครเมตรสามารถทำได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา ..... 2545

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 4270224021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: CMM / COORDINATE MEASURING MACHINE / ARTICULATE ARM

KITTISAK BOONYANGKOON : A SIX-AXIS ARTICULATE MACHINE FOR THREE-DIMENSION COORDINATE MEASURING. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : LECT. WITAYA WANNASUPHOPRA SIT, Ph.D., 112 pp. ISBN 974-17-9824-5.

The design of a six-axis articulate machine for three-dimension coordinate measuring is studied in this research. The study includes mechanism design, kinematics design, and calibration technique. The coordinate measuring machine is developed for the reverse engineering application. The target accuracy is approximately better than 100 micrometers for 500x500x300 cubic-millimeter workspace. The very high resolution optical rotary encoder installed at each arm joint is used for measuring the joint angles. By knowing the joint angles, probe length, and the structure of the homogeneous transformation, the unknown parameters of the arm configuration can be solved numerically by using nonlinear regression. The unknown parameters are for obtaining the homogeneous transformation of the arm using in the measurement. The measured coordinate data can be interfaced with commercial CAD packages (such as CATIA) by using a neutral file format, CGO\_ASCII format.

The accuracy of the machine is tested by measuring the distance of the two calibrating sphere locations, using the center point of the sphere as the reference point. The 300 points are used in the calibration procedure, and the other 50 points for evaluating the accuracy. The result shown that accuracy of 100 micrometer is promising.

Department.....Mechanical Engineering..... Student's signature.....  
Field of study.....Mechanical Engineering..... Advisor's signature.....  
Academic year.....2002..... Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านทั้งสองได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าของท่านเพื่อให้คำแนะนำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งจัดหาทุน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ มาให้โดยตลอด ขอขอบคุณบริษัท NSS จำกัด และบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ อุตมั่ง ที่ให้คำแนะนำในการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ขอขอบคุณ คุณสมบูรณ อนันตชนะสาร ที่ให้คำแนะนำในการใช้งานโปรแกรมคาเทีย ขอขอบคุณ คุณพรชัย เพชรฤกษ์กุล ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการสร้างชิ้นงาน และขอขอบคุณ เพื่อนนักศึกษา รุ่นพี่ รุ่นน้อง ทั้งในระดับปริญญาเอก และปริญญาโท ที่ได้ร่วมกันให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่างๆ พร้อมทั้งยังได้ให้กำลังใจที่ดีๆ แก่กันเสมอมา

สุดท้ายนี้ วิทยานิพนธ์และงานวิจัยนี้คงจะไม่มีทางประสบผลสำเร็จลงได้ ถ้าหากขาดความช่วยเหลือจากบิดามารดาในทุกๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นทางด้านเงินทุน ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งกำลังใจและความห่วงใยที่อบอุ่นยิ่งที่มีให้แก่ผู้เขียนเสมอมา ในโอกาสนี้ผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่ได้อบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ สิ่งให้แก่ผู้เขียนจนสามารถสำเร็จการศึกษาลงได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
2. หลักการของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ.....	4
2.1 การจำแนกประเภทของ CMMs โดยระบบพิกัด.....	4
2.1.1 ซีเอ็มเอ็มในระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian CMMs).....	5
2.1.2 ซีเอ็มเอ็มที่ไม่ใช้ระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Non-Cartesian CMMs).....	10
3. โรตารีเอนโค้ดเดอร์และฮาร์โมนิคไดรฟ์.....	19
3.1 โรตารีเอนโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder).....	19
3.1.1 หลักการทำงานของโรตารีเอนโค้ดเดอร์.....	19
3.2 ฮาร์โมนิคไดรฟ์ (Harmonic Drive).....	22
3.2.1 หลักการของฮาร์โมนิคไดรฟ์.....	23
4. จลนศาสตร์ (Kinematics).....	25
5. การออกแบบและการสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (ซียู-ซีเอ็มเอ็ม).....	33
5.1 การออกแบบซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	33
5.1.1 การจัดวางตำแหน่งข้อต่อของซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	33
5.1.2 ค่าความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ต้องการ.....	35
5.1.3 อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor).....	39

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 การสอบเทียบซียู-ซีเอ็มเอ็ม	40
5.2.1 สมการสำหรับการหาตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็ม	41
5.2.2 หลักการและวิธีในการหาค่าพารามิเตอร์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม	46
6. โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ	66
6.1 การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์	66
6.1.1 เอนโค้ดเดอร์การ์ด เอสพีไอทู พีซีไอ คอนโทรลเลอร์ (SPii PCI Controller)	66
6.1.2 การใช้งานการ์ดเอสพีไอทู	67
6.2 โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ	69
6.2.1 ฟังก์ชันบนหน้าจอหลักของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม	70
7. วิธีและขั้นตอนการในใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (ซียู-ซีเอ็มเอ็ม)	82
7.1 แนวทางในการชดเชยความผิดพลาด	82
7.2 ขั้นตอนในการทำงานและการชดเชยความผิดพลาด	84
8. การทดลองและผลการทดลอง	87
8.1 การสอบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม	87
8.2 ค่าความถูกต้องของซียู-ซีเอ็มเอ็ม	97
8.2.1 ผลการทดลองที่ได้จากการสอบเทียบ	97
8.2.2 ผลการทดลองจากการวัดตำแหน่งทรงกลมเพิ่มอีก 5 ตำแหน่ง	99
8.3 ตัวอย่างการใช้งานซียู-ซีเอ็มเอ็มในการถอดแบบ	102
9. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	105
9.1 สรุปผลวิทยานิพนธ์	105
9.2 ข้อเสนอแนะ	106
รายการอ้างอิง	107
ภาคผนวก	108
ภาคผนวก ก	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	112



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ในระบบจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์พุ่มา .....	30
5.1 ตารางแสดงค่าความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ต้องใช้ในแต่ละข้อต่อ .....	38
5.2 ตารางแสดงค่าความละเอียดของเอนโค้ดเดอร์และอัตราทดของฮาร์โมนิคไดรฟ์ ที่ใช้ในการวัดตำแหน่งมุมของข้อต่อทั้ง 6.....	40
5.3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของเมตริกซ์การแปลงซึ่งนำมาจากแบบ (Drawing) .....	44
5.4 ตารางแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ของเมตริกซ์การแปลง .....	44
8.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากการทำการถดถอย.....	96
8.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการวัดของซียู-ซีเอ็มเอ็ม กับซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป.....	98
8.3 ตารางแสดงค่าความเหลี่ยมของตำแหน่งมุมทั้ง 6 ข้อต่อที่ได้จากการคำนวณ .....	99
8.4 ตารางแสดงตำแหน่งทรงกลมสอบเทียบที่วัดได้จากซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป .....	100
8.5 ตารางแสดงตำแหน่งทรงกลมสอบเทียบที่วัดได้จากซียู-ซีเอ็มเอ็ม (ค่าเฉลี่ย) .....	100
8.6 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการวัดความยาวระหว่างจุดศูนย์กลางทรงกลม ทั้ง 5 ตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็มกับซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป .....	101
ก.1 ตารางแสดงข้อมูลตำแหน่งทรงกลมสอบเทียบ ที่วัดได้จากซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป.....	109
ก.2 ตารางแสดงข้อมูลตำแหน่งทรงกลมสอบเทียบที่วัดได้จากซียู-ซีเอ็มเอ็ม (ค่าเฉลี่ย) .....	110

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงเครื่องวัดพิกัดแบบ 3 แกน.....	4
2.2 ซีเอ็มเอ็มแบบมูฟวี่ริงบริดจ์ (Moving ring bridge CMM).....	5
2.3 ซีเอ็มเอ็มแบบฟิกซ์บริดจ์ (Fixed Bridge CMM).....	6
2.4 ซีเอ็มเอ็มแบบแคนทิลีเวอร์ (Cantilever CMM).....	7
2.5 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มแบบฮอริซอนทอลอาร์มขณะวัดพิกัดชิ้นส่วนประตูลอยน็ด.....	8
2.6 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มแบบแกนทรีที่มีระบบการชดเชยแบบออนไลน์.....	9
2.7 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มแบบแกนทรีเมื่อเทียบกับขนาดของมนุษย์.....	9
2.8 หุ่นยนต์สำหรับงานวัดพิกัดในระบบควบคุมการผลิต.....	10
2.9 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดพิกัดระบบโทรเลขเทอร์ชั่น.....	11
2.10 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดพิกัดระบบทีโอโดไลต์.....	12
2.11 รูปแสดงหลักการของระบบสเตริโอวิชั่นเพื่อใช้ในการวัดขนาด.....	12
2.12 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดพิกัดระบบเลเซอร์แทรกคิงแบบ 3 แกน.....	13
2.13 รูปแสดงหลักการของระบบโมโนไซต์ตั้ง.....	14
2.14 รูปแสดงหลักการของระบบสตรัคเจอร์ไลท์แบบเลเซอร์สแกนนิ่ง.....	15
2.15 รูปแสดงระบบวิชั่นเช็คคิง.....	16
2.16 รูปแสดงเครื่องวัดพิกัดระบบออฟติคอลลโรโบติกเกจจิง.....	17
2.17 รูปแสดงเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบอาร์ติคิวเลตติ้งอาร์ม.....	18
3.1 รูปแสดงลักษณะสัญญาณของเอนโค้ดเดอร์ทั้ง 3 ชนิด.....	21
3.2 ค่าความละเอียดของตัววัดตำแหน่งแบบต่างๆ.....	22
3.3 รูปแสดงแบคแลชของเฟืองตรง (Spur Gear).....	22
3.4 แสดงชิ้นส่วนหลักทั้ง 3 ของฮาร์โมนิคไดรฟ์.....	23
3.5 แสดงการหลักการทำงานของฮาร์โมนิคไดรฟ์.....	24
4.1 แสดงการแปลงเวกเตอร์จากแกนพิกัด B ไปยังแกนพิกัด A.....	25
4.2 แสดงตัวอย่างการตั้งระบบแกนพิกัด.....	26
4.3 รูปแสดงหุ่นยนต์พุ่ม่าที่ใช้กันในภาคอุตสาหกรรมทั่วๆ ไป.....	28
4.4 รูปแสดงตำแหน่งการกำหนดระบบแกนพิกัด (แกนที่ 1-4) ของหุ่นยนต์พุ่ม่า.....	29
4.5 รูปแสดงตำแหน่งการกำหนดระบบแกนพิกัด (แกนที่ 5-6) ของหุ่นยนต์พุ่ม่า.....	29
5.1 รูปแสดงลักษณะข้อต่อที่ 1-4 ของแขนกลพุ่ม่า.....	33

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 รูปแสดงตำแหน่งข้อต่อที่ 4-6 ของแขนกลพุ่มา.....	34
5.3 รูปแสดงหัววัดและแกนหมุน (Z-Axis) ของข้อต่อสุดท้ายเมื่อกำหนดแบบแขนกลพุ่มา .....	34
5.4 รูปแสดงลักษณะโดยประมาณ ของตำแหน่งข้อต่อทั้ง 6 ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	35
5.5 รูปแสดงแบบจำลองของแขนกลซียู-ซีเอ็มเอ็ม .....	36
5.6 รูปแสดงโครงสร้างโดยประมาณของซียู-ซีเอ็มเอ็ม .....	37
5.7 รูปแสดงขอบเขตการทำงานโดยประมาณของซียู-ซีเอ็มเอ็ม .....	37
5.8 รูปแสดงเครื่องวัดพิคัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	42
5.9 รูปแสดงระบบแกนพิคัดของข้อต่อทั้ง 6 ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม .....	43
5.10 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์บนทรงกระบอกกับจุดศูนย์กลางทรงกลม .....	55
5.11 รูปแสดงทรงกลมสอบเทียบของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป.....	56
5.12 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป.....	56
5.13 รูปแสดงตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็มและซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปขณะทำการทดลอง.....	57
5.14 รูปแสดงตำแหน่งของการตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ของทุกข้อต่อ.....	63
5.15 รูปแสดงการวัดตำแหน่งโดยประมาณระหว่างทรงกลมกับซียู-ซีเอ็มเอ็มในแนวแกน Z.....	64
5.16 รูปแสดงการวัดตำแหน่งโดยประมาณระหว่างทรงกลมกับซียู-ซีเอ็มเอ็มในแนวแกน X-Y ....	64
5.17 รูปแสดงรูปแบบทิศทางในการวัดโดยเรียงลำดับตามตัวเลข .....	65
6.1 รูปแสดงเอนโค้ดเดอร์การ์ดเอสพีไอทู (SPii PCI Controller Card) .....	67
6.2 รูปแสดงโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มขณะเรียกใช้งาน .....	69
6.3 รูปแสดงรายละเอียดหน้าจอหลักของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม .....	70
6.4 รูปแสดงหน้าจอของฟังก์ชันการติดต่อสื่อสาร.....	71
6.5 รูปแสดงรายละเอียดบนหน้าจอของฟังก์ชันการติดต่อสื่อสาร.....	72
6.6 รูปแสดงข้อความเตือนและข้อผิดพลาด (Error Message Box) .....	72
6.7 รูปแสดงหน้าจอคำสั่งของฟังก์ชันแสดงตำแหน่งเอนโค้ดเดอร์ .....	73
6.8 รูปแสดงรายละเอียดของหน้าจอคำสั่งของฟังก์ชันแสดงตำแหน่งเอนโค้ดเดอร์ .....	74
6.9 รูปแสดงหน้าจอคำสั่งของฟังก์ชันแสดงตำแหน่งพิคัดจากของปลายหัววัด .....	76
6.10 รูปแสดงรายละเอียดของหน้าจอคำสั่งของฟังก์ชันแสดงตำแหน่งปลายหัววัด.....	77
6.11 รูปแสดงตำแหน่งจุดกำเนิดของระบบแกนนั่งของซียู-ซีเอ็มเอ็ม .....	78
6.12 รูปแสดงสวิตช์ปุ่มกดที่ใช้สั่งให้โปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มบันทึกข้อมูล .....	79

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.13 รูปแสดงโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มขณะแสดงตำแหน่งของทั้งเอนโค๊ดเดอร์ และปลายหัววัด ...	80
6.14 รูปแสดงรายละเอียดโปรแกรมขณะแสดงตำแหน่งของเอนโค๊ดเดอร์ และปลายหัววัด.....	81
7.1 รูปแสดงสัญลักษณ์ในการตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโค๊ดเดอร์ของข้อต่อที่ 2-5.....	85
8.1 รูปแสดงเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกน (ซียู-ซีเอ็มเอ็ม) ที่สร้างขึ้น .....	87
8.2 รูปแสดงการตั้งตำแหน่งศูนย์ให้กับเอนโค๊ดเดอร์ของข้อต่อที่ 2 .....	88
8.3 รูปแสดงการตั้งตำแหน่งศูนย์ให้กับเอนโค๊ดเดอร์ของข้อต่อที่ 3 .....	88
8.4 รูปแสดงทรงกลมสอบเทียบตำแหน่งแรกที่ใช้ในการทดลอง.....	89
8.5 รูปแสดงตำแหน่งแกนศูนย์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม .....	89
8.6 รูปแสดงตำแหน่งแกนศูนย์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม (ภาพขยาย) .....	90
8.7 รูปแสดงระยะห่างในแนวแกน $x$ และ $y$ ของทรงกลม เทียบกับจุดกำเนิดของซียู-ซีเอ็มเอ็ม ...	90
8.8 รูปแสดงระยะห่างในแนวแกน $z$ ของทรงกลม เทียบกับจุดกำเนิดของซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	91
8.9 รูปแสดงหัววัดของซียู-ซีเอ็มเอ็มที่มีลักษณะเป็นทรงกรวย .....	91
8.10 รูปแสดงการวัดตำแหน่งทรงกลมที่ตำแหน่งบนสุด (North pole) .....	92
8.11 รูปแสดงการวัดตำแหน่งทรงกลมในตำแหน่งที่ 1 (ด้านหน้า) .....	92
8.12 รูปแสดงการวัดตำแหน่งทรงกลมที่ตำแหน่งที่ 2 (ด้านซ้าย) .....	93
8.13 รูปแสดงการวัดตำแหน่งทรงกลมที่ตำแหน่งที่ 3 (ด้านหลัง) .....	93
8.14 รูปแสดงการวัดตำแหน่งทรงกลมที่ตำแหน่งที่ 4 (ด้านขวา).....	94
8.15 รูปแสดงความสัมพันธ์ของระบบแกนของซียู-ซีเอ็มเอ็มกับซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป .....	95
8.16 รูปแสดงแบบไม้รูปเมาส์ที่ใช้เป็นต้นแบบ .....	102
8.17 รูปแสดงการจับยึดชิ้นงาน .....	102
8.18 รูปแสดงหัววัดแบบปลายเข็ม.....	103
8.19 รูปแสดงการวัดพื้นผิวของชิ้นงานด้วยหัววัดแบบปลายเข็ม .....	103
8.20 รูปแสดงกลุ่มก้อนของจุดในโปรแกรมคาเพียที่ได้จากการวัดตำแหน่งพื้นผิวของชิ้นงาน....	104
8.21 รูปแสดงพื้นผิวและแบบที่ได้จากกลุ่มก้อนของจุด.....	104

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคที่ภาคอุตสาหกรรมมีการแข่งขันกันสูงดังเช่นในปัจจุบัน นอกจากการแข่งขันทางด้านคุณภาพ และด้านราคาแล้ว สิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งที่จะขาดไม่ได้ก็คือ ความรวดเร็วในการผลิตที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยความรวดเร็วตลอดเวลา โดยเฉพาะในงานออกแบบสินค้าใหม่ๆ ให้ตามยุคสมัยได้ทัน

โดยปกติ เมื่อนักออกแบบได้ทำการออกแบบผลิตภัณฑ์จนได้ผลิตภัณฑ์ต้นแบบตามต้องการแล้ว ผู้ออกแบบจะต้องทำการเขียนแบบตามต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำให้เสียเวลา และเกิดความผิดพลาดได้สูง เนื่องจากการเขียนแบบจากต้นแบบนั้น ผู้เขียนจะต้องวัดขนาดต่างๆ ของต้นแบบได้โดยไม่ผิดพลาด และไม่ตกหล่น จากนั้นจึงนำข้อมูลที่วัดได้ไปเขียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการออกแบบ หรือที่เรียกว่าโปรแกรมแคด (CAD) ซึ่งขั้นตอนในการเขียนก็มีความยุ่งยาก และต้องใช้ประสบการณ์ในการเขียนในระดับหนึ่ง ทำให้เสียเวลาและเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ง่าย วิธีการหนึ่งซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้ได้ก็คือ ทำการวัดพิกัดต่างๆ ของงานต้นแบบด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แล้วจึงนำข้อมูลที่วัดได้นี้ส่งไปยังโปรแกรมแคด เพื่อทำการสร้างแบบ 3 มิติ บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถลดขั้นตอน และความผิดพลาดต่างๆ ลงได้มาก ทำให้ผู้ผลิตสามารถผลิตสินค้าได้รวดเร็วขึ้น และนอกจากความรวดเร็วในการผลิตสินค้าแล้ว คุณภาพสินค้าก็เป็นสิ่งสำคัญ ทั้งนี้ในการผลิตสินค้าให้ได้มาซึ่งคุณภาพตามที่ต้องการนั้นขั้นตอนที่ขาดเสียไม่ได้เลยก็คือขั้นตอนตรวจเช็คคุณภาพ (Quality Control) ซึ่งสามารถทำได้รวดเร็วได้ด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติอีกเช่นกัน

ดังนั้นจะเห็นว่า เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ มีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบันมาก หากแต่เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ส่วนใหญ่ก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานตรงที่ ตัวเครื่องวัดไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปไหนได้โดยสะดวก ทำให้ในบางครั้งไม่สามารถวัดชิ้นงานที่เคลื่อนย้ายไปไหนไม่ได้ หรือในบางครั้งการวัดชิ้นงานมีความจำเป็นที่จะต้องไปทำการวัดที่หน้างานเพื่อความรวดเร็วในการทำงาน ก็ไม่สามารถทำได้เช่นกัน ดังนั้นหากสามารถพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ให้มีความสะดวกในการทำงาน มีความสามารถในการใช้งานมากยิ่งขึ้น และสามารถเคลื่อนย้ายไปยังที่ต่างๆ ได้โดยง่าย ก็จะเป็นการทำให้อุตสาหกรรมพัฒนาก้าวหน้ามากยิ่งขึ้นตามไปด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ 6 แกนให้มีความยืดหยุ่น และมีความสะดวกในการใช้งานมากขึ้นโดยมีความแม่นยำในการวัดประมาณ 100 ไมโครเมตร

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1 ศึกษา และออกแบบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ชนิด 6 ข้อต่อ ที่สามารถวัดชิ้นงานขนาด  $50 \times 50 \times 30$  เซนติเมตร ได้
- 2 ศึกษา ออกแบบ และสร้างซอฟต์แวร์ ที่ใช้ร่วมกับเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ที่สร้างขึ้น เพื่อใช้ในการวัด และเก็บข้อมูลที่ได้จากการวัดเพื่อนำไปใช้ในงานสร้างแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรมแคดแคม (CAD/CAM)
- 3 ศึกษาเพื่อหาขอบเขตของการใช้งานที่มีค่าความถูกต้องของการวัด (Accuracy) ประมาณ 100 ไมโครเมตร

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 สามารถพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ให้มีความยืดหยุ่น และมีความสะดวกในการใช้งานในอุตสาหกรรมมากขึ้น
- 2 เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือวัดที่มีขีดความสามารถในการวัดสูงยิ่งขึ้น ต่อไปในอนาคต

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1 ศึกษาหลักการการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ
- 2 ศึกษากลไกแบบต่างๆ ที่จะทำให้มีความแม่นยำ มีความยืดหยุ่น และสะดวกในการใช้งานการวัดพิกัดแบบ 3 มิติ
- 3 ศึกษาการแปลงจลนศาสตร์ (Kinematics Transformation) เพื่อใช้แปลงพิกัดจากระบบพิกัดแบบข้อต่อ (Joint Coordinate) ไปยังระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian Coordinate)

- 4 ศึกษาวิธีการเก็บ ข้อมูลพิกัดเพื่อที่จะสามารถเชื่อมต่อเข้ากับโปรแกรมแคดแคม เช่น โปรแกรมคาเทีย (CATIA) โปรแกรมยูนิกราฟฟิก (Unigraphics) และโปรแกรมโซลิดเอจ (Solid Edge)
- 5 ออกแบบ และสร้างเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ชนิด 6 แกน
- 6 ออกแบบ และสร้างโปรแกรมที่ใช้ร่วมกับเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ เพื่อใช้ในการวัด และเก็บข้อมูลพิกัด
- 7 ทำการทดลองเพื่อหาช่วงการทำงาน ที่มีความแม่นยำของการวัดประมาณ 100 ไมโครเมตร
- 8 สรุป และวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 9 เขียนวิทยานิพนธ์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### หลักการของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (Coordinate Measuring Machines, CMMs) มีลักษณะต่างๆกันมากมาย แต่ที่รู้จักกันโดยทั่วไปได้แก่ เครื่องวัดพิกัดที่เป็นระบบพิกัดฉาก (CMMs with Cartesian Coordinate Systems) กล่าวคือในการวัดพิกัดของเครื่องวัดพิกัดในระบบพิกัดฉากจะอาศัยการอ่านตำแหน่งของตัวเครื่องเอง ซึ่งอาจจะมีหลายแกน แต่ละแกนก็จะตั้งฉากซึ่งกันและกัน เช่น เครื่องวัดพิกัดแบบ 3 แกน ก็จะมีแกน X, Y, Z ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงเครื่องวัดพิกัดแบบ 3 แกน

ของบริษัท Brown&Sharpe

ซีเอ็มเอ็ม ประกอบด้วยส่วนที่เป็นโครงสร้าง (Hardware) และส่วนที่เป็นโปรแกรมทำงาน (Software) ส่วนที่เป็นโปรแกรมทำงานจะทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้ เช่น รับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ การตรวจสอบสถานะของโครงสร้าง ทำการคำนวณหาพิกัด เป็นต้น

#### 2.1 การจำแนกประเภทของ CMMs โดยระบบพิกัด [1]

ซีเอ็มเอ็ม นั้นหมายถึงเครื่องที่สามารถวัดและบอกพิกัดฉาก 3 มิติ ในระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian Coordinate System) ได้โดยการเคลื่อนที่ของแกนเครื่องมือซึ่งเคลื่อนที่ตั้งฉากกัน นอกจากนั้นยังมีซีเอ็มเอ็มบางประเภทที่สามารถวัดและบอกพิกัดฉาก 3 มิติได้เช่นเดียวกัน แต่แกนของเครื่องไม่ได้เคลื่อนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ในที่นี้จึงแบ่งประเภทของซีเอ็มเอ็มตามระบบพิกัดของตัวเครื่องออกเป็น 2 ประเภทดังนี้



### 2.1.1 ซีเอ็มเอ็มในระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian CMMs)

เป็นซีเอ็มเอ็มที่มีแกนของเครื่องเคลื่อนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน 3 แกน ทำให้สามารถวัดพิกัดจาก 3 มิติ ในระบบคาร์ทีเซียนได้โดยตรง ซึ่งก็ยังมีรูปแบบต่างๆกันอีกตามลักษณะโครงสร้าง และคุณลักษณะของเครื่องดังเช่น ค่าความถูกต้อง (Accuracy), ความยืดหยุ่นในการใช้งาน (Flexibility), เวลาที่ใช้ในการวัด และราคา โดยแบ่งได้ดังนี้

#### 2.1.1.1 มูฟวี่งบริดจ์ (Moving Bridge)

เป็นรูปแบบโครงสร้างของซีเอ็มเอ็มที่แพร่หลายที่สุด โดยตัวเครื่องจะมีแท่นรองรับชิ้นงานที่จะทำการวัดพิกัดยึดแน่นอยู่กับที่แล้วตัวแกนของเครื่องจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงาน โดยตัวแกนเครื่องจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ซีเอ็มเอ็มแบบมูฟวี่งบริดจ์ (Moving ring bridge CMM)

ของบริษัท Sheffield Measurement

จะเห็นว่าลักษณะแกนของเครื่องคล้ายกับสะพาน ซึ่งจะทำให้เกิดการบิดตัวของแกนได้หาก เสาทั้ง 2 เคลื่อนที่ไม่เท่ากันส่งผลให้ค่าความถูกต้องของเครื่องที่ตำแหน่งต่างๆ ของแท่นรองรับชิ้นงานไม่เท่ากัน แต่ลักษณะโครงสร้างแบบนี้มีประโยชน์ก็คือ ตัวโครงสร้างจะมีลักษณะแข็งแรง และทำให้มีค่าความถี่ธรรมชาติของเครื่องสูงกว่าโครงสร้างแบบแคนทิลีเวอร์ (Cantilever)

### 2.1.1.2 ฟิกซ์บริดจ์ (Fixed Bridge)

สำหรับโครงสร้างแบบนี้จะมีความแตกต่างกับแบบแรกคือตัวแกนของเครื่องที่มีลักษณะคล้ายสะพานจะยึดแน่นอยู่กับที่ ส่วนตัวแท่นรองรับชิ้นงานจะสามารถเคลื่อนที่ได้แทนดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบนี้มีข้อดีคือ โครงสร้างของเครื่องมีความแข็งแรง (Rigid) สูง และเนื่องจากตัวแกนถูกยึดอยู่กับที่ทำให้ไม่เกิดการบิดตัวของโครงสร้าง ส่งผลให้โครงสร้างแบบนี้จะมีค่าความถูกต้องในการวัดสูง แต่ก็มีข้อเสียคือความเร็วในการทำงานต่ำเนื่องจากจะต้องเคลื่อนตำแหน่งของแท่นรองรับชิ้นงานซึ่งมีน้ำหนักมาก และยังมีข้อจำกัดในเรื่องของน้ำหนักของชิ้นงานที่จะนำมาทำการวัด



รูปที่ 2.3 ซีเอ็มเอ็มแบบฟิกซ์บริดจ์ (Fixed Bridge CMM)

### 2.1.1.3 แคนทีลีเวอร์ (Cantilever)

โครงสร้างแบบนี้จะมีคานเคลื่อนที่ เพียงหนึ่งแนวแกน และจะทำหน้าที่รองรับอีกสองแกนที่เหลือดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยทั่วไปแล้วด้วยโครงสร้างลักษณะนี้จะทำให้โครงสร้างที่ต้องการมีการเคลื่อนที่มีน้ำหนักน้อยจึงทำให้สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นการวัดโดยผู้ปฏิบัติงาน หรือโดยการควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์

โดยตรง (Direct Computer Control) อีกทั้งยังสามารถเข้าถึงชิ้นงานได้ดี เนื่องจากโครงสร้างเป็นแบบเปิดสามด้าน (มีคานเป็นโครงสร้างเพียงด้านเดียว) แต่ก็มีข้อเสีย คือ การแอ่นเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นแบบคาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตำแหน่งที่แกนยึดออกสุด ซึ่งทำให้ความถี่ธรรมชาติของตัวเครื่องมีค่าต่ำ เป็นข้อจำกัดทำให้เครื่องต้องมีขนาดเล็ก ดังนั้นโดยทั่วไปโครงสร้างแบบนี้จะมีแท่นรองรับชิ้นงานที่ยาว แต่จะมีช่วงการใช้งานในอีกสองแกนที่เหลือต่ำกว่ามาก โครงสร้างแบบนี้จึงเหมาะกับชิ้นงานที่มีลักษณะบางแต่ยาว



รูปที่ 2.4 ซีเอ็มเอ็มแบบแคนทิลีเวอร์ (Cantilever CMM)

ของบริษัท Sheffield Measurement

#### 2.1.1.4 ฮอริซอนทอลอาร์ม (Horizontal Arm)

เป็นซีเอ็มเอ็มที่มีลักษณะโครงสร้างของเครื่อง เหมาะสำหรับใช้ในงานวัดพิภักชิ้นส่วนรถยนต์มากที่สุด โดยลักษณะโครงสร้างของเครื่องจะมีลักษณะคล้ายกับซีเอ็มเอ็มแบบแคนทิลีเวอร์ แต่แกนของหัววัดจะสามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวระดับแทนดังในรูปที่ 2.5 จึงทำให้ซีเอ็มเอ็มแบบนี้สามารถเกิดการแอ่นของโครงสร้างได้เช่นเดียวกับโครงสร้างแบบแคนทิลีเวอร์



รูปที่ 2.5 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มแบบฮอริซอนทอลอาร์มขณะวัดพิคัดขึ้นส่วนประตูดยยนต์  
ของบริษัท Carl Zeiss

ข้อดีของซีเอ็มเอ็มชนิดนี้ก็คือ ความสามารถในการเข้าถึงชิ้นงานมาก และโดยเฉพาะ ความรวดเร็วในการทำงานอันเป็นจุดเด่นของโครงสร้างแบบนี้ แต่มีข้อเสียอันเนื่องมา จากการแอ่นของตัวโครงสร้างจึงทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องของค่าความถูกต้อง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงแก้ไขจุดบกพร่องเหล่านี้ให้หมดไป ดังเช่นการถ่วง สมดุลย์ให้กับตัวโครงสร้างเพื่อลดการแอ่นของคาน และการนำโปรแกรม คอมพิวเตอร์มาใช้แก้ไขค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยการชดเชย (Compensate) ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแอ่นของคาน

#### 2.1.1.5 ซีเอ็มเอ็มแบบแกนนทรี (Gantry CMM)

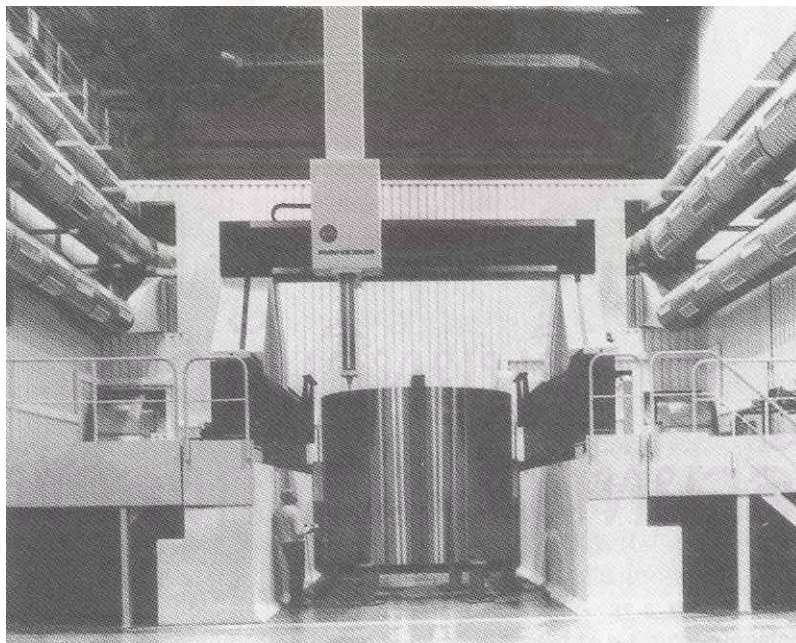
เป็นซีเอ็มเอ็มที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ที่สุด เหมาะสำหรับงานวัดชิ้นงานที่มี ขนาดตั้งแต่ 10 ลูกบาศก์เมตร ขึ้นไป ตัวโครงสร้างฐานของเครื่องจะได้รับการออกแบบให้มีขนาดใหญ่ และมีความแข็งแรงมากเพื่อลดการเกิดการบิดตัวของโครงสร้าง ในส่วนที่ใช้สำหรับการวัดตำแหน่ง นอกจากลดการบิดตัวแล้ว โครงสร้างฐานของ เครื่องยังจำเป็นที่จะต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะสามารถรองรับน้ำหนักของชิ้นงาน ขนาดใหญ่ได้โดยไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดขึ้น ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 ในการหลีกเลี่ยงการเกิดการบิดในแกนยอว์ (Yawing) ของคานเคลื่อนที่ ระบบขับ เคลื่อนร่วม (Dual Drive Systems-Master and Slave Configuration) มักจะเป็น ระบบที่ถูกนำมาใช้มากที่สุด อีกทั้งยังมีการนำโปรแกรมสำหรับแก้ไขความผิดพลาด



ของรูปทรงลักษณะโครงสร้าง อันเนื่องมาจากการติดตั้งโครงสร้างฐานของเครื่อง และผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 2.6 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มแบบแกนทรีที่มีระบบการชดเชยแบบออนไลน์  
ของบริษัท Sheffield Measurement



รูปที่ 2.7 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มแบบแกนทรีเมื่อเทียบกับขนาดของมนุษย์  
ของบริษัท Leitz

### 2.1.1.6 ซีเอ็มเอ็มระบบพิกัดฉากแบบอื่นๆ

โครงสร้างแบบคอลัมน์ (Column Configuration CMMs) การเคลื่อนที่ในแนวระดับจะเคลื่อนโดยตัวแทนรองรับชิ้นงาน ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวตั้งจะได้จากการเคลื่อนที่โดยใช้เสาที่ยึดแน่นอยู่กับที่ จึงมีความแข็งแกร่งในแนวตั้งสูง ทำให้โครงสร้างแบบนี้มีความแม่นยำในการวัดสูง แต่ด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นตัวซี (Open C Section) จึงทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดจากผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก ดังนั้นซีเอ็มเอ็มประเภทนี้จึงมักจะใช้งานอยู่ในห้องควบคุมอุณหภูมิมากกว่าที่จะนำไปใช้อยู่ร่วมกับสายการผลิต

โครงสร้างแบบตัวแอล (L-Shaped Bridge Configuration) เป็นโครงสร้างที่ดัดแปลงมาจากโครงสร้างแบบคาน โดยมีการเพิ่มขาสำหรับรองรับปลายแกนของเครื่องในฝั่งตรงข้าม แต่ถึงแม้จะมีการเพิ่มการรองรับมากขึ้น ซีเอ็มเอ็มแบบนี้ก็ยังคงมีความเร็วในการทำงาน และความถี่ธรรมชาติต่ำ

ยังมีซีเอ็มเอ็มอีกชนิดซึ่งมักถูกเรียกว่า หุ่นยนต์สำหรับงานวัดพิกัด (Measuring Robot) คุณลักษณะของเครื่องวัดแบบนี้คือมีความเร็วในการวัดสูง และมักจะใช้ร่วมอยู่ในสายการผลิต (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 หุ่นยนต์สำหรับงานวัดพิกัดในระบบควบคุมการผลิต

ของบริษัท Brown&Sharpe

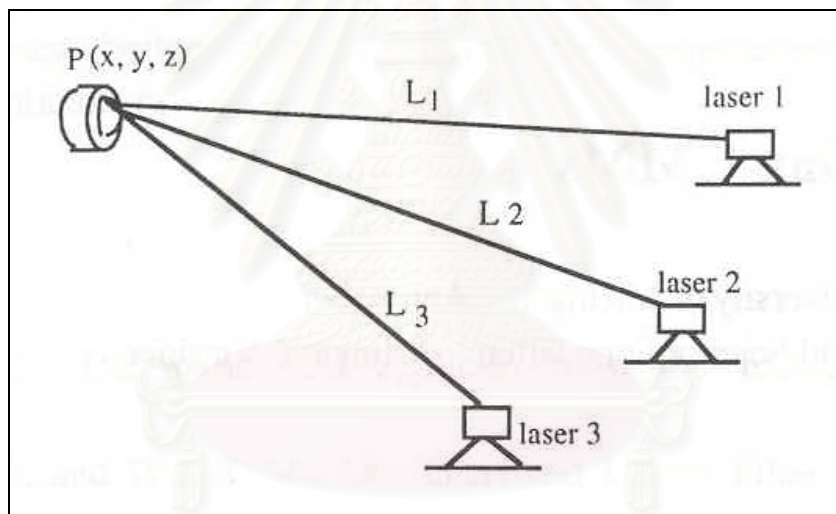
### 2.1.2 ซีเอ็มเอ็มที่ไม่ใช้ระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Non-Cartesian CMMs)

เครื่องวัดพิกัดประเภทนี้ให้ค่าพิกัดเป็นระบบพิกัดฉาก โดยไม่มีแกนเคลื่อนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ในที่นี้จะแบ่งซีเอ็มเอ็มประเภทนี้ออกเป็นแบบต่างๆ ดังนี้ ไทรเลทเทอเรชัน (Trilateration), ไทรแองกูเลชัน (Triangulation), โมโนไซต์ติ้ง (Mono-sighting), สตรัคเจอร์ไลท์ (Structured Light) และอาร์ติคิวเลตติ้งอาร์มแมชชีน (Articulating Arm Machines)

หากเปรียบกับซีเอ็มเอ็มในระบบพิกัดฉากแล้วซีเอ็มเอ็มประเภทนี้จะมีค่าความถูกต้องต่ำกว่า

### 2.1.2.1 ระบบโทรเลขเทอเรชั่น (Trilateration System)

โทรเลขเทอเรชั่นเป็นวิธีในการหาตำแหน่งโดยการวัดความยาวในแนวรัศมีด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ (Laser Interferometer) ในการวัดตำแหน่งจุดใน 3 มิติ จำเป็นจะต้องใช้เทรคกิ้งเลเซอร์อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ (Tracking Laser Interferometer) อย่างน้อยสามตัวเพื่อโฟกัสไปยังตัวไวต์แองเกิ้ลรีโทรฟิเรคเตอร์ (Wide-Angle Retroreflector) หรือที่เรียกอีกอย่างว่าแคทส์อาย (Catseye) ดังในรูปที่ 2.9 ซึ่งตัวแคทส์อายนี้จะถูกติดตั้งอยู่บนวัตถุที่ต้องการจะวัดขนาดพิกัด ซีเอ็มเอ็มชนิดนี้จะเหมาะสำหรับงานวัดพิกัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่หลายๆ เช่นลำตัว และปีกเครื่องบิน



รูปที่ 2.9 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดพิกัดระบบโทรเลขเทอเรชั่น [1]

### 2.1.2.2 ระบบโทรแองกูเลชั่น (Triangulation Systems)

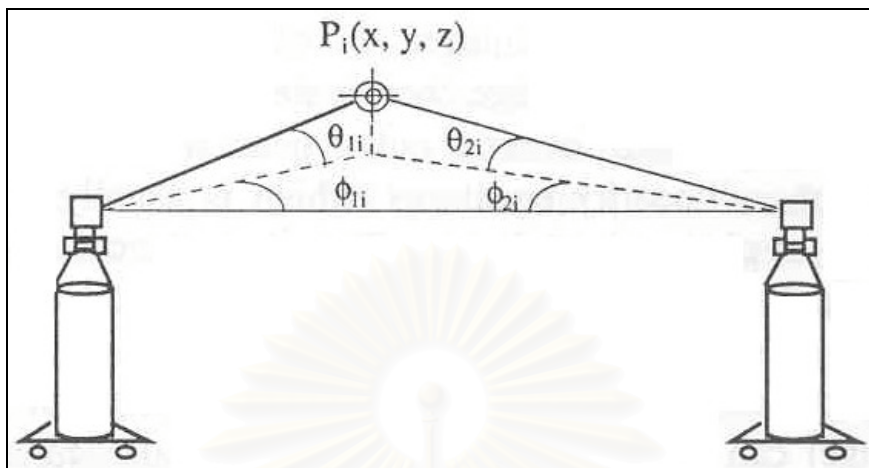
ในที่นี้จะแบ่งซีเอ็มเอ็มในระบบนี้ออกเป็นระบบแบบทีโอดอลิต (Theodolite Systems) และระบบแบบสเตอริโอวิชั่น (Stereo-Vision Systems) ดังนี้

#### 2.1.2.2.1 ระบบแบบทีโอดอลิต (Theodolite Systems)

ระบบนี้ได้รับริเริ่มมาจากอุปกรณ์ และงานทางด้านดาราศาสตร์ โดยมีหลักการพื้นฐานคือใช้กล้องสำรวจ 2 ตัวส่องไปยังจุดที่ต้องการหาพิกัด แล้วนำมุม 2 มุมที่เกิดจากกล้องสองแต่ละตัวมาคำนวณหาพิกัดของจุดที่ต้องการวัด ดังในรูปที่ 2.10 นอกจากการวัดตำแหน่งโดยระบบแมนนวล (Manual) แล้ว ยังมี



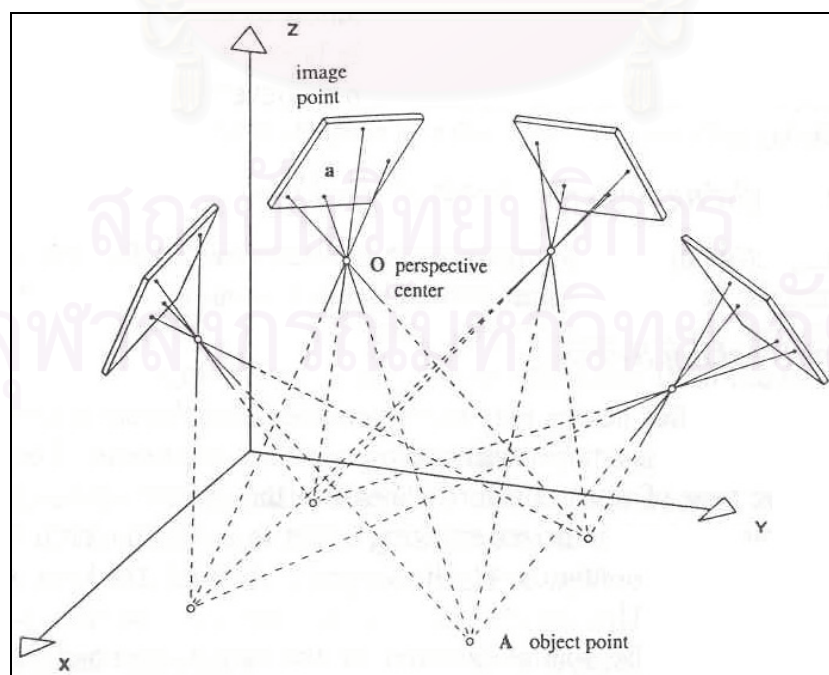
การติดตั้งอุปกรณ์รับเคลื่อนกล้อง พร้อมทั้งใช้กล้องซีซีดี (CCD) ในการวิเคราะห์ภาพพร้อมกัน เพื่อทำการวัดชิ้นงานโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 2.10 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดพิกัดระบบที่โอโดไลต์ [1]

#### 2.1.2.2.2 สเตอริโอวิชั่น หรือ โฟโตแกรมเมทรี (Stereo Vision or Photogrammetry)

สเตอริโอวิชั่น จะใช้กล้องถ่ายรูปอย่างน้อย 2 ตัว ถ่ายภาพเดียวกัน แต่ถ่ายจากคนละมุมมอง ภาพที่ได้จึงมีความเหลื่อม (Offsets) แบบสัมพันธ์กันไปในแต่ละภาพที่ถ่ายได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แล้วจึงนำค่าความเหลื่อมที่ได้มาคำนวณหาข้อมูลค่าความลึก หรือระยะของวัตถุที่ต้องการวัดชิ้นงาน





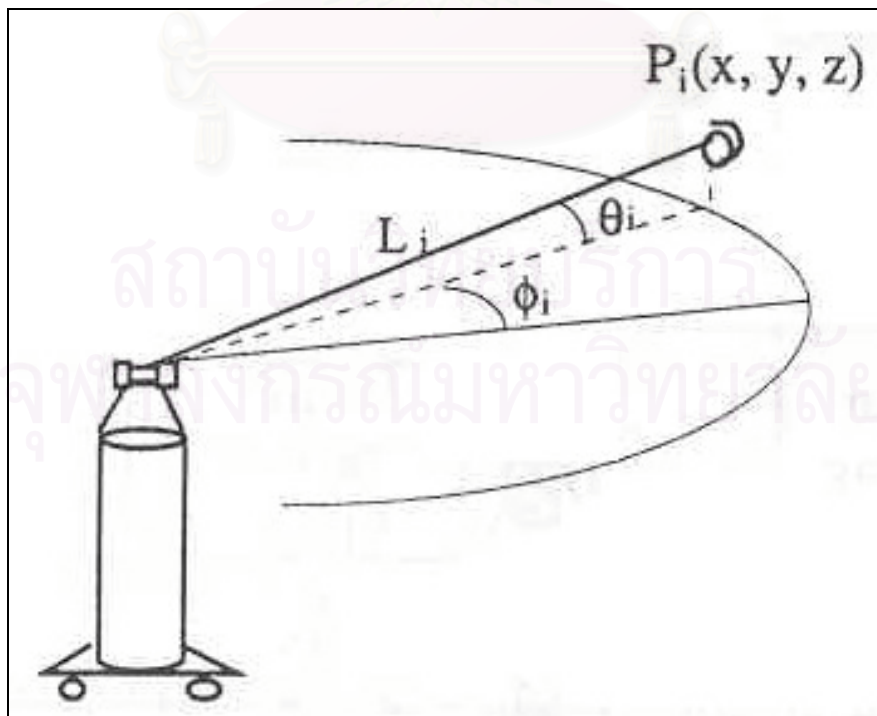
รูปที่ 2.11 รูปแสดงหลักการของระบบสเตรียโอวิชั่นเพื่อใช้ในการวัดขนาด [1]

### 2.1.2.3 ระบบโมโนไซต์ติ้ง (Mono-Sighting Systems)

ในส่วนนี้จะขอกล่าวถึงซีเอ็มเอ็มประเภทนี้เพียง 3 ชนิดเท่านั้น ได้แก่ เลเซอร์แทรกเกอร์ (Laser-Tracker), เลเซอร์เรดาร์ (Laser Radar) และระบบอินฟราเรดเรนจิง (Infrared Ranging Systems)

#### 2.1.2.3.1 ระบบเลเซอร์แทรคกิ้ง (Laser Tracking System)

ระบบเลเซอร์แทรคกิ้งนั้นจะมีระบบเซอร์โว (Servo System) ทำหน้าที่ในการติดตามตำแหน่งวัตถุโดยอัตโนมัติ ระบบนี้จะประกอบไปด้วยตัวติดตามตำแหน่งวัตถุ หรือแทรคกิ้งเฮด (Tracking Head) หนึ่ง หรือสองตัว และจะใช้ตัวรีโทรเฟลคเตอร์ แบบแคทส์อาย (Catseye Retroreflector) เพื่อบอกตำแหน่งของวัตถุ หรืออาจจะใช้ชุดมอเตอร์ไรซ์มินิเจอร์ไรซ์แทรคกิ้งทาร์เก็ต (Motorized Miniaturized Tracking Target) แทน ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งตัวบอกตำแหน่ง และตัวบอกโอเรียนเทชัน (Orientation) ของวัตถุ โดยระบบพิกัดที่วัดได้จากเครื่องชนิดนี้จะเป็นระบบพิกัดแบบทรงกลม (Spherical Coordinate System) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จากนั้นจึงทำการแปลงข้อมูลให้กลายเป็นตำแหน่งในระบบพิกัดฉาก



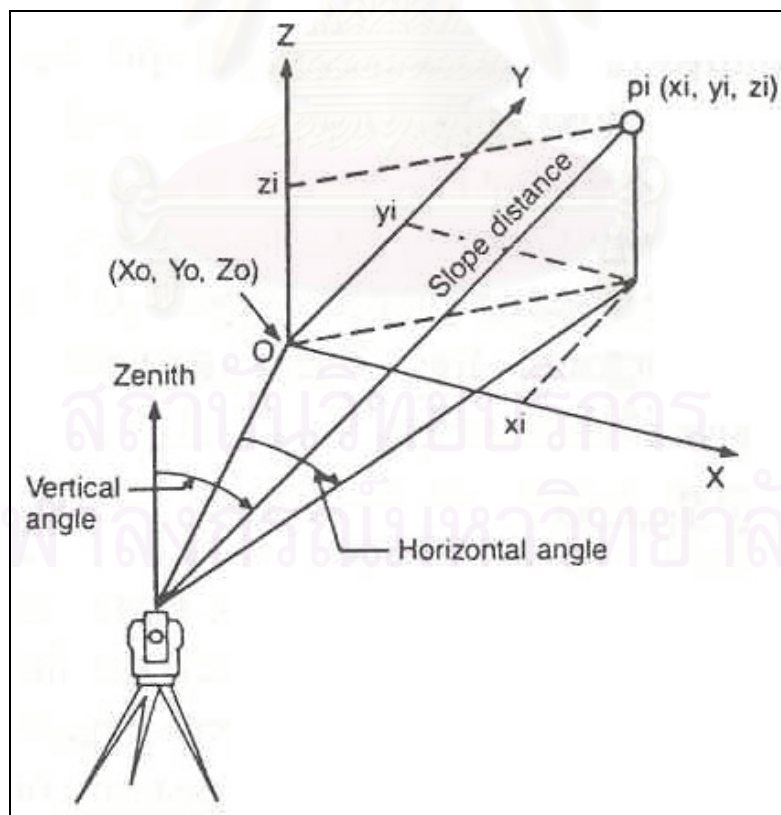
รูปที่ 2.12 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดพิกัดระบบเลเซอร์แทรคกิ้งแบบ 3 แกน [1]

### 2.1.2.3.2 ระบบเลเซอร์เรดาร์แบบไทม์ออฟไฟลท์ (Laser Radar, Time-of-Flight System)

ในการวัดพื้นผิวของวัตถุแบบ 3 มิติ ยังสามารถวัดได้โดยใช้เทคนิคเลเซอร์เรดาร์ซึ่งใช้หลักการไทม์ออฟไฟลท์ โดยมีวิธีการพื้นฐานในการวัดอยู่ 2 วิธีคือ หนึ่ง วัดระยะโดยการวัดระยะเวลาที่ลำแสงเดินทางจากแหล่งกำเนิดไปยังวัตถุทั้งขาไป และกลับแล้วนำมาคำนวณหาระยะทาง ส่วนวิธีที่สองคำนวณระยะทางจากความแตกต่างเฟสของลำแสงที่สะท้อนกลับมากับลำแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิด

### 2.1.2.3.3 ระบบอินฟราเรดเรนจิง (Infrared Ranging System)

เป็นระบบที่พัฒนามาจากระบบที่โอโดไลต์ โดยใช้ระบบการคำนวณหาพิกัดคล้ายกับระบบเลเซอร์เทรคกิงแบบ 3 แกน แต่จะไม่มีระบบเซอร์โวนในการจับตำแหน่งอัตโนมัติ ต้องให้ผู้ปฏิบัติงานเป็นผู้จับตำแหน่งวัตถุด้วยตนเอง ดังในรูปที่ 2.13



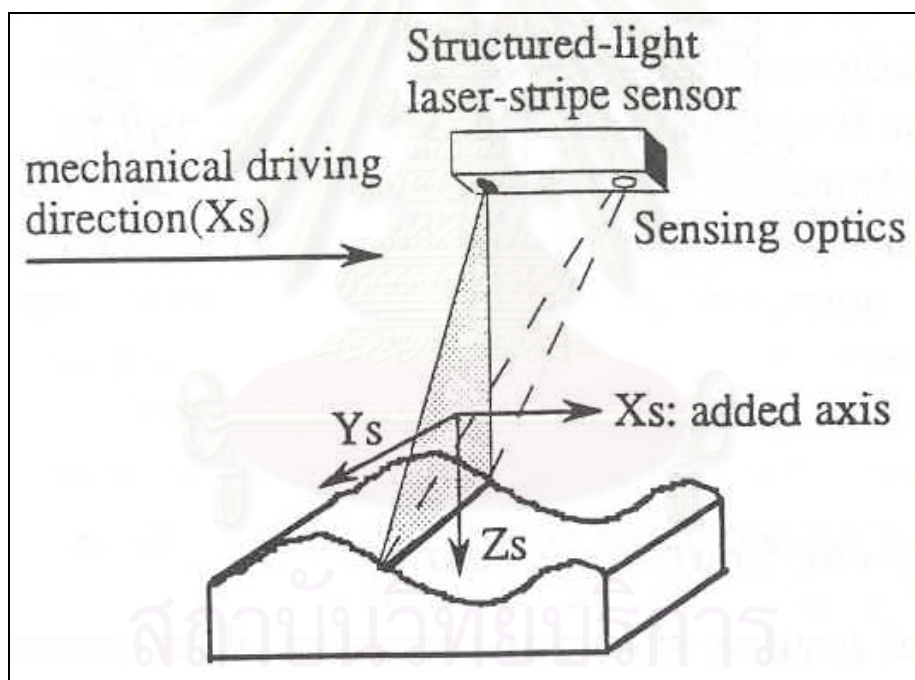
รูปที่ 2.13 รูปแสดงหลักการของระบบโมโนไซต์ตั้ง [1]

#### 2.1.2.4 ระบบสตรัคเจอร์ไลท์ (Structured-Light Systems)

ระบบที่จัดอยู่ในซีเอ็มเอ็มประเภทนี้ได้แก่ เลเซอร์สแกนนิ่ง (Laser-Scanning), วิชันเช็คกิ้ง (Vision Checking) และระบบออฟติคอลลโรโบติกเกจจิ้ง (Optical-Robotic Gauging Systems)

##### 2.1.2.4.1 ระบบเลเซอร์สแกนนิ่ง (Laser Scanning Systems)

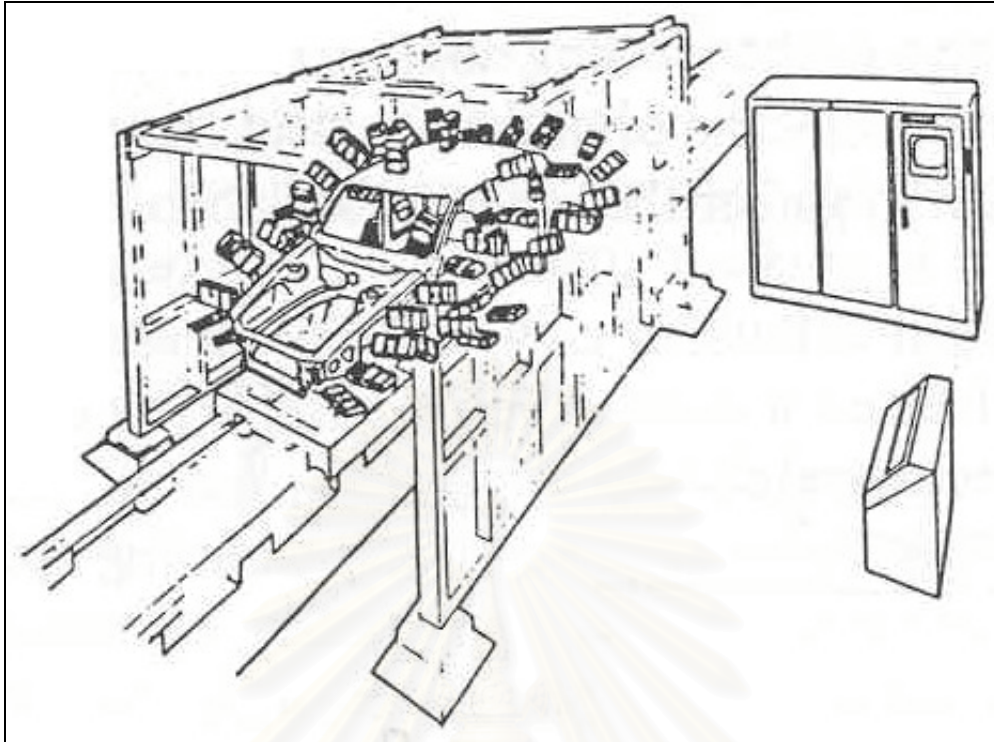
ระบบนี้จะทำการวัดหาพื้นผิวของวัตถุใน 3 มิติได้โดยใช้วิธีแอคทีฟไลท์ติ้ง (Active Lighting Method) เพื่อสร้างภาพจากแสงซึ่งรู้ค่าของมุมที่ฉายไปยังวัตถุ แล้วนำภาพที่ได้มาคำนวณเพื่อหาตำแหน่งพิกัดของวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รูปแสดงหลักการของระบบสตรัคเจอร์ไลท์แบบเลเซอร์สแกนนิ่ง [1]

##### 2.1.2.4.2 ระบบวิชันเช็คกิ้ง (Vision Checking System)

ระบบนี้เป็นระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตตัวถังรถยนต์ โดยไม่มีชิ้นส่วนใดๆ ของเครื่องเคลื่อนไหว แต่จะทำการวัดพิกัดด้วยการใช้ระบบเลเซอร์ไทรแองกูเลชัน (Laser Triangulation) ซึ่งถูกยึดติดอยู่กับที่หลายๆ ตัว เพื่อทำการวัดพิกัดชิ้นส่วนต่างๆ ของตัวถังรถยนต์ที่ตำแหน่งต่างๆ กัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.15



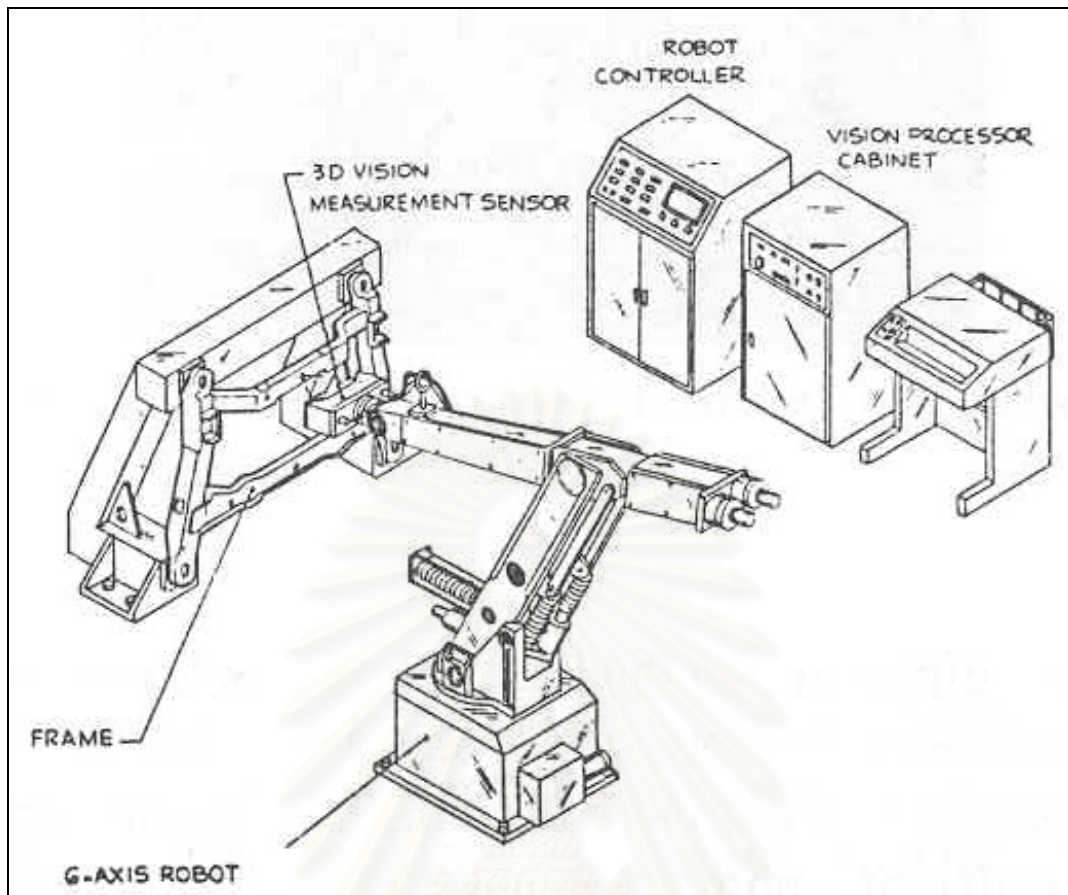
รูปที่ 2.15 รูปแสดงระบบวิชันเซ็นเซอร์

ของบริษัท Perceptron, Inc.

#### 2.1.2.4.3 ระบบออปติคัลโรโบติกเกจจิ้ง (Optical Robotic Gauging System)

ระบบนี้จะประกอบด้วยตัวหุ่นยนต์อุตสาหกรรม และตัวฟิกเจอร์ (Fixture) ที่ใช้สำหรับจับยึดชิ้นงานที่จะทำการตรวจวัด ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซีเอ็มเอ็มชนิดนี้จะเหมาะสำหรับงานตรวจวัดที่เป็นชิ้นส่วนโลหะแผ่น หลักการทำงานของเครื่องคือจะหาค่าพิกัดต่างๆ ของชิ้นส่วนด้วยตรีดีสตรัคเจอร์ไลทวิชันเซนเซอร์ (3D Structured Light Vision Sensor) ที่ติดตั้งอยู่ปลายแขนของตัวหุ่นยนต์ การทำงานจะเป็นไปโดยอัตโนมัติ ดังนั้นค่าความถูกต้องของเครื่องจึงขึ้นอยู่กับค่าความถูกต้องของตัวตรีดีสตรัคเจอร์ไลทวิชันเซนเซอร์ และตัวหุ่นยนต์ประกอบเข้าด้วยกัน



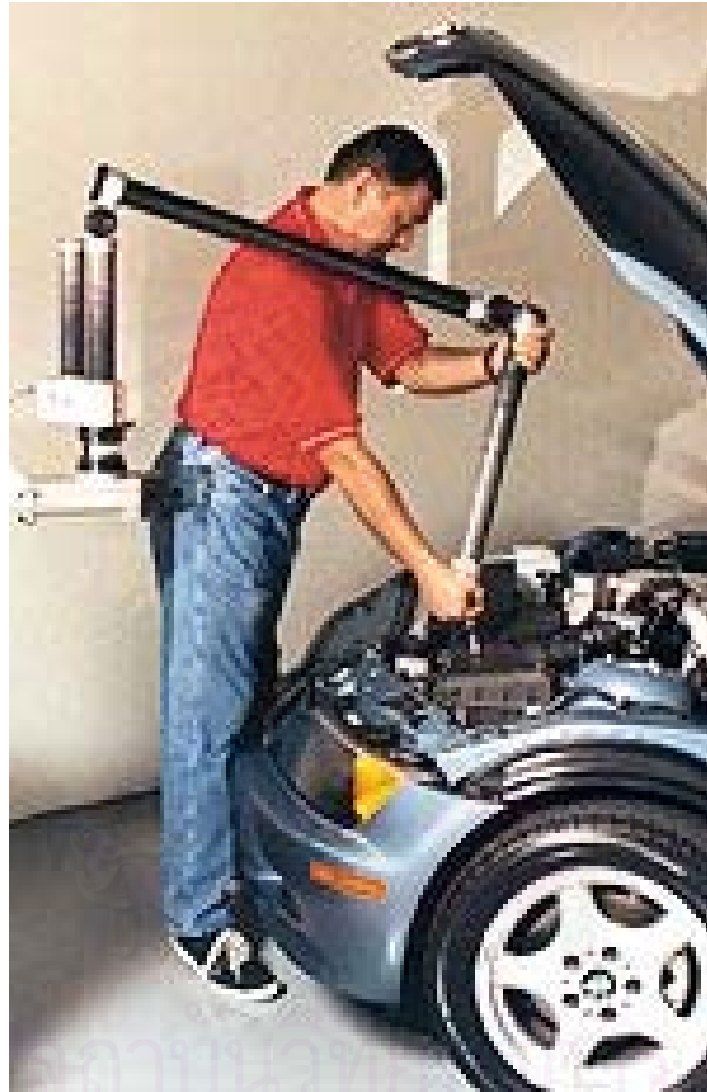


รูปที่ 2.16 รูปแสดงเครื่องวัดพิกัดระบบออฟติคอลลโรโบติกเกจจิ้ง [1]

#### 2.1.2.5 ระบบแบบอาร์ติคิวเลตติ้งอาร์ทิม (Articulating Arm Systems)

ระบบนี้จะใช้ชุดของแขนกลซึ่งมีค่าองศาความอิสระเท่ากับ 6 (Six-Degrees-of-Freedom Linkage Arm) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 วัดค่าพิกัดต่างๆ ได้จากพีรีซีชันโรตารีทรานส์ดิวเซอร์ (Precision Rotary Transducers) ที่ติดตั้งภายในทุกข้อต่อเพื่อใช้ในการวัดตำแหน่งของตัวแขนกล แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาตำแหน่งของหัววัด (Probe) โดยใช้หลักการทางจลนศาสตร์ (Kinematics) ของแขนกล โดยผู้ปฏิบัติงานจะเป็นผู้เคลื่อนย้ายหัววัดไปยังตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานด้วยตนเอง ปริมาตรการวัดของตัวเครื่องแบบนี้จะเป็นทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับความยาวของตัวแขนกล แต่ก็อาจจะมีบางข้อจำกัดในปริมาตรการวัดอันเนื่องมาจากทั้งคอนฟิกูเรชัน (Configuration) ของตัวแขนกล และลักษณะการติดตั้งขณะใช้งานของตัวแขน ค่าความถูกต้องของซีเอ็มเอ็มประเภทนี้จะไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับซีเอ็มเอ็มแบบพิกัดฉากได้เลย เนื่องจากค่าความถูกต้องของซีเอ็มเอ็มชนิดนี้จะค่อนข้างต่ำกว่ามาก แต่มีข้อดีที่เด่นชัดที่แตกต่างจากซีเอ็มเอ็มแบบพิกัดฉากอย่างมาก คือสามารถเคลื่อนย้ายได้โดยสะดวก จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ปฏิบัติงานนอกสถานที่ หรือ

นำไปใช้ร่วมอยู่ในระบบการผลิต อีกทั้งชิ้นงานที่จะทำการวัดก็ไม่จำเป็นต้องนำมาติดตั้งบนแท่นรองรับชิ้นงานของเครื่อง จึงมีประโยชน์มากสำหรับการวัดชิ้นงานที่มีความยากลำบากในการเคลื่อนย้าย หรือไม่สามารถนำมาติดตั้งบนแท่นรองรับชิ้นงานได้โดยสะดวก



รูปที่ 2.17 รูปแสดงเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบอาร์ตีกิวเลทตั้งอาร์ม

ของบริษัท Romer

## บทที่ 3

### โรตารีเอนโค้ดเดอร์และฮาร์โมนิคไดรฟ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่สำคัญที่จำเป็นจะต้องศึกษา และทำความเข้าใจในหลักการ ทำงานก็คือ ในส่วนของโรตารีเอนโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder) และฮาร์โมนิคไดรฟ์ (Harmonic Drive) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญในการวัดค่าพิกัดต่างๆ ของเครื่อง

#### 3.1 โรตารีเอนโค้ดเดอร์ (Rotary Encoder)

##### 3.1.1 หลักการทำงานของโรตารีเอนโค้ดเดอร์ [2]

โดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นทั้งทรานสเลชันแนล (Translational) หรือโรตารีเอนโค้ดเดอร์ จะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักได้ดังนี้ แทคโคมิเตอร์ (Tachometer), อินครีเมนทอล (Incremental) และแบบแอบโซลูท (Absolute) ในรูปที่ 3.1 จะแสดงถึงคุณลักษณะของสัญญาณที่ได้จาก Encoder ทั้ง 3 แบบ

##### 3.1.1.1 แทคโคมิเตอร์เอนโค้ดเดอร์

จากรูปที่แสดงจะเห็นว่า แทคโคมิเตอร์เอนโค้ดเดอร์ จะให้สัญญาณออกเพียงสัญญาณเดียวที่ประกอบด้วยลูกคลื่น (Pulse) ที่เกิดจากแต่ละขั้นการเคลื่อนที่ (Incremental Step of Displacement) โดยไม่สนใจทิศทางของการเคลื่อนที่ ดังนั้น หากเป็นการเคลื่อนที่ใน 2 ทิศทางจะทำให้ค่าที่ได้มีความผิดพลาดเกิดขึ้น เอนโค้ดเดอร์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับการตรวจวัดความเร็วมากกว่าการตรวจวัดตำแหน่ง นอกจากนี้เป็นการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวเท่านั้น

##### 3.1.1.2 อินครีเมนทอลเอนโค้ดเดอร์

จะให้สัญญาณขาออกอย่างน้อย 2 สัญญาณ เพื่อแก้ปัญหาการเคลื่อนที่ใน 2 ทิศทาง โดยสัญญาณขาออกแต่ละสัญญาณจะมีเฟสแตกต่างกันหนึ่งสี่ การหาทิศทางของการเคลื่อนที่ของเอนโค้ดเดอร์จะทำได้โดยการตรวจสัญญาณว่าสัญญาณใดจะเกิดขึ้นก่อน นอกจากนี้อินครีเมนทอลเอนโค้ดเดอร์ยังอาจจะมีสัญญาณขาออกอีก 1 สัญญาณซึ่งจะให้สัญญาณออกมาเพียง 1 สัญญาณต่อรอบการเคลื่อนที่ ที่ตำแหน่งคงที่ตำแหน่งหนึ่งซึ่งบางครั้งถูกเรียกว่า จุดศูนย์อ้างอิง (Zero Reference) อินครีเมนทอลเอนโค้ดเดอร์มีข้อดีคือสามารถหมุนรอบตัวเองเท่าใดก็ได้ตามลักษณะของงานที่นำไปใช้ แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (Electrical Noise)

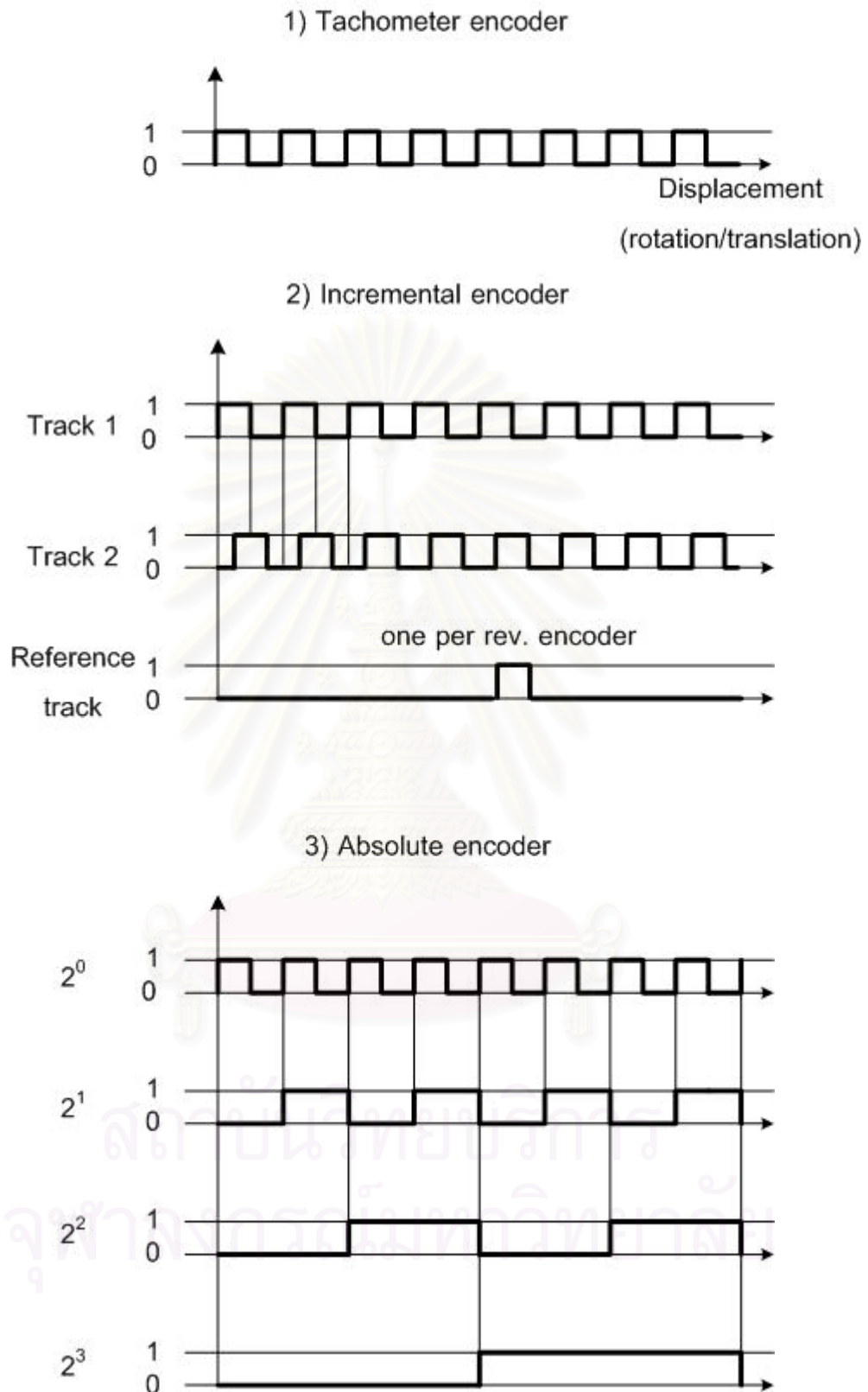
สามารถทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดขึ้นได้ โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้จะยังคงมีอยู่ตลอดการใช้งาน ถึงแม้ว่าสัญญาณรบกวนจะหมดไปแล้วก็ตาม อีกทั้งหากพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอินทรีย์เมนทอลเอนโค้ดเดอร์หมดไปข้อมูลตำแหน่งที่เก็บไว้ก็จะหายไปด้วยเช่นกันถึงแม้จะมีการป้อนพลังงานไฟฟ้ากลับเข้าสู่ตัวอินทรีย์เมนทอลเอนโค้ดเดอร์ใหม่แล้วก็ตาม

### 3.1.1.3 แอ็บบิโอทรูทเอนโค้ดเดอร์

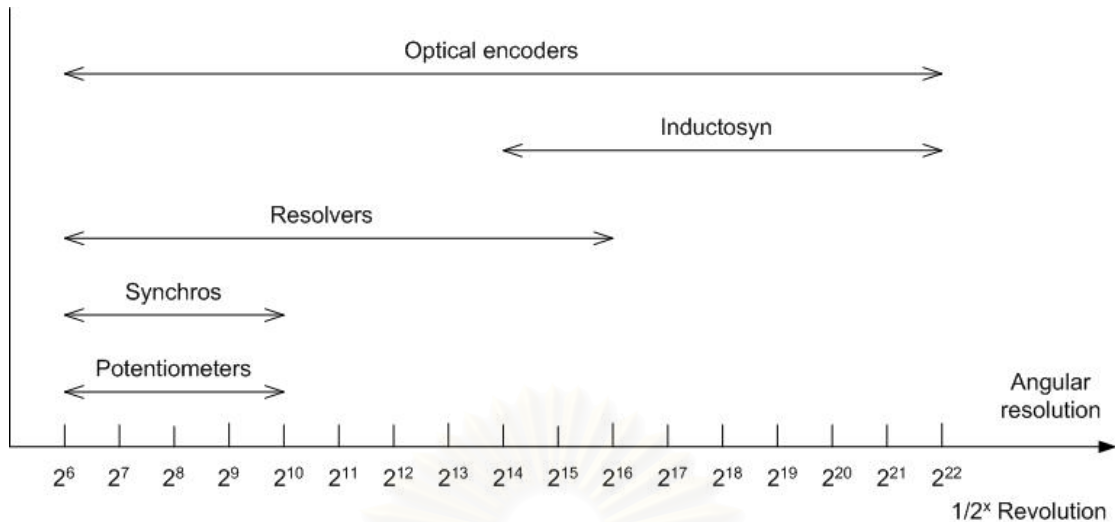
โดยทั่วไปแล้วจะถูกจำกัดให้ใช้งานได้เพียงการหมุนในหนึ่งรอบเท่านั้น และจะให้สัญญาณขาออกมากกว่าอินทรีย์เมนทอลเอนโค้ดเดอร์ มาก โดยจะให้สัญญาณขาออก มาเป็นแบบไบนารี (Binary) เพื่อแสดงตำแหน่งเชิงมุมของเพลลาของตัว แอ็บบิโอทรูทเอนโค้ดเดอร์ได้ทันที ดังนั้นแอ็บบิโอทรูทเอนโค้ดเดอร์จึงสามารถเก็บรักษาตำแหน่งข้อมูลเอาไว้ได้ถึงแม้จะไม่มีพลังงานไฟฟ้าป้อนอยู่ก็ตาม อีกทั้งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเพียงชั่วคราวก็จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดเพียงชั่วคราวเช่นกัน โดยเมื่อสัญญาณรบกวนหมดไปแอ็บบิโอทรูทเอนโค้ดเดอร์ก็สามารถที่จะให้ข้อมูลตำแหน่งได้ถูกต้องเช่นเดิมได้ แต่ข้อเสียคือหากเคลื่อนที่ในระยะทางไกลของสัญญาณต้องมีเป็นจำนวนมากและโดยทั่วไปแอ็บบิโอทรูทเอนโค้ดเดอร์จะมีราคาสูงกว่าอินทรีย์เมนทอลเอนโค้ดเดอร์มาก

นอกจากการแบ่งเอนโค้ดเดอร์ออกเป็น 3 แบบด้วยลักษณะสัญญาณดังแสดงข้างต้นแล้ว เอนโค้ดเดอร์ยังสามารถที่จะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือแบบสัมผัส (Contact Devices) และแบบไม่สัมผัส (Noncontacting Devices) ซึ่งใช้หลักการทางแม่เหล็ก หรือทางแสง (Magnetic or Optical Principles) ในการบอกตำแหน่ง โดยทั่วไปแล้วหากงานที่ต้องการวัดต้องการความละเอียดสูงจะต้องใช้ออปติคัลเอนโค้ดเดอร์ โดยรูปที่ 3.2 จะแสดงให้เห็นถึงค่าความละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้วัดตำแหน่งชนิดต่างๆ ที่มีขายอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งจะเห็นว่าเอนโค้ดเดอร์แบบออปติคัลจะมีค่าความละเอียดสูงกว่าแบบอื่นๆ อีกทั้งยังเป็นที่นิยม และสามารถหาซื้อตามท้องตลาดทั่วไปได้โดยไม่ยาก





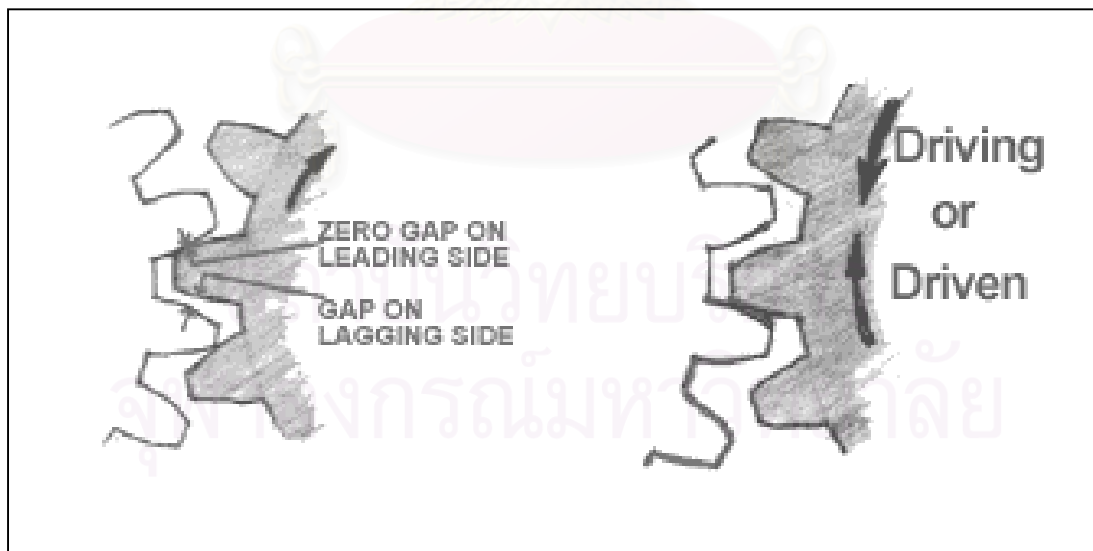
รูปที่ 3.1 รูปแสดงลักษณะสัญญาณของเอนโค้ดเดอร์ทั้ง 3 ชนิด [2]



รูปที่ 3.2 ค่าความละเอียดของตัววัดตำแหน่งแบบต่างๆ [2]

### 3.2 ฮาร์โมนิคไดรฟ์ (Harmonic Drive)

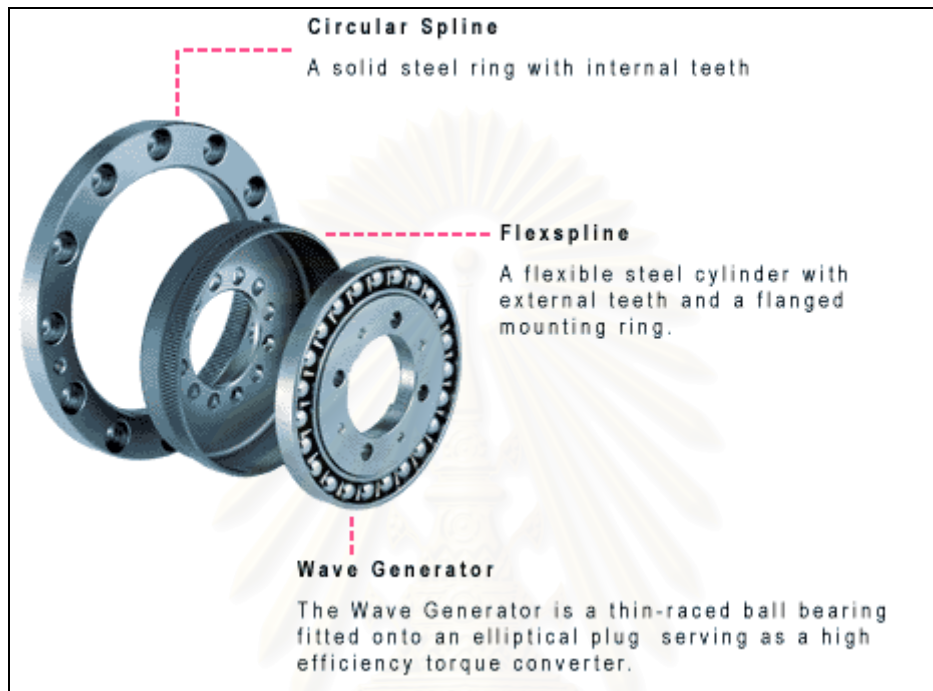
โดยทั่วไปแล้วชุดเฟืองทดที่ใช้ในระบบการส่งกำลังทั่วๆ ไปจะมีความผิดพลาดทางตำแหน่งอันเนื่องมาจากแบคแลช (Backlash) ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างฟันของเฟืองขับ และฟันของเฟืองตามดังในรูปที่ 3.3 โดยชุดเฟืองส่งกำลังชนิดต่างๆ ก็จะมีค่าแบคแลชต่างกันไปตามรูปแบบของชุดเฟืองนั้น แต่สำหรับชุดเฟืองทดแบบฮาร์โมนิคไดรฟ์ จะเป็นระบบเฟืองที่ไม่มีค่าแบคแลชเลย (Zero Backlash)



รูปที่ 3.3 รูปแสดงแบคแลชของเฟืองตรง (Spur Gear)

### 3.2.1 หลักการของฮาร์โมนิคไดรฟ์

ฮาร์โมนิคไดรฟ์จะประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักอยู่ 3 ส่วน (แสดงไว้ในรูปที่ 3.4) อันได้แก่ เซอร์คิวลาร์สไปลีน (Circular Spline), เฟล็กส์สไปลีน (Flexspline) และเวฟเจเนอเรเตอร์ (Wave Generator)



รูปที่ 3.4 แสดงชิ้นส่วนหลักทั้ง 3 ของฮาร์โมนิคไดรฟ์

เซอร์คิวลาร์สไปลีนจะมีลักษณะคล้ายวงแหวนเหล็ก แต่จะมีฟันเฟืองอยู่ด้านใน (Internal Teeth) โดยมากจะทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนที่ยึดแน่นอยู่กับที่ และจะประกอบยึดเข้ากับชุดเฮาส์ซิง (Housing) ของระบบเฟือง

เฟล็กส์สไปลีนจะเป็นท่อเหล็กผิวบางที่มีความยืดหยุ่น สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้เล็กน้อย และจะมีฟันเฟืองอยู่ภายนอก (External Teeth) รอบๆ ท่อเหล็ก โดยที่ปลายด้านหนึ่งจะมีหน้าแปลนเอาไว้สำหรับยึดเข้ากับเพลาส่งกำลังออก (Output Shaft) ขนาดของเฟล็กส์สไปลีนจะเล็กกว่าตัวเซอร์คิวลาร์สไปลีนเล็กน้อยเท่านั้น และจำนวนฟันของเฟล็กส์สไปลีนจะมีจำนวนน้อยกว่าของเซอร์คิวลาร์สไปลีนอยู่ 2 ฟัน

เวฟเจเนอเรเตอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวส่งกำลังเข้าสู่ชุดเฟือง มีลักษณะเป็นรูปวงรี โดยจะมีตัวแกนหลักที่ใช้ต่อเข้ากับเพลาส่งกำลังเข้าเป็นแกนเหล็กรูปวงรี แล้วจะมีลูกปืนอยู่รอบๆ แกนนี้ส่วนผิวด้านนอกก็จะเป็นวงแหวนเหล็กผิวบางยืดหยุ่นได้ ทำหน้าที่สัมผัสเข้ากับตัวเฟล็กส์สไปลีนและครอบลูกปืนเอาไว้

ในระบบการทำงานของฮาร์โมนิคไดรฟ์ ตัวเซอร์คูล่าสไปล์นซึ่งถูกยึดแน่นอยู่กับที่ จะขบเข้ากับตัวเฟล็กสไปล์นโดยจะมีตัวเวฟเจนเนอเรเตอร์ที่สวมเข้ากับตัวเฟล็กสไปล์นทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนให้ฟันเฟืองของ เฟล็กสไปล์นเข้าขบกับฟันเฟืองของเซอร์คูล่าสไปล์นต่อเนื่องไปตลอดการส่งกำลัง แต่เนื่องจากจำนวนฟันของเฟล็กสไปล์นมีน้อยกว่าเซอร์คูล่าสไปล์นอยู่ 2 ฟัน ดังนั้นเมื่อตัวเวฟเจนเนอเรเตอร์หมุนไปครบหนึ่งรอบเฟล็กสไปล์นก็จะหมุนไปในทิศทางตรงกันข้ามเพียง 2 ฟันเท่านั้น (ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.5) ดังนั้นจึงได้ว่า อัตราทดระหว่างเฟล็กสไปล์นกับ เวฟเจนเนอเรเตอร์เท่ากับ 1 ต่อ จำนวนฟันของเฟล็กสไปล์นหารสอง



รูปที่ 3.5 แสดงการหลักการทำงานของฮาร์โมนิคไดรฟ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### จลนศาสตร์ (Kinematics)

จลนศาสตร์ (Kinematics) เป็นศาสตร์ที่ว่าด้วยเรื่องของการเคลื่อนไหวนั้น โดยไม่สนใจเรื่องผลของแรงที่กระทำกับระบบจลนศาสตร์จะกล่าวถึงแต่เฉพาะเรื่องของตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง และอนุพันธ์อันดับที่สูงขึ้นไปของตัวแปรตำแหน่ง ซึ่งเราสามารถที่จะใช้หลักทางจลนศาสตร์ในการคำนวณหาตำแหน่งของจุดปลายของแขนกล (Manipulator) ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนซึ่งไม่สามารถหาได้จากการตรวจวัดโดยตรง แต่สามารถคำนวณได้จากตำแหน่งของแขนกลในระบบพิกัดแบบข้อต่อ (Joint Coordinate) โดยใช้เมตริกซ์การแปลง (Transformation Matrix)

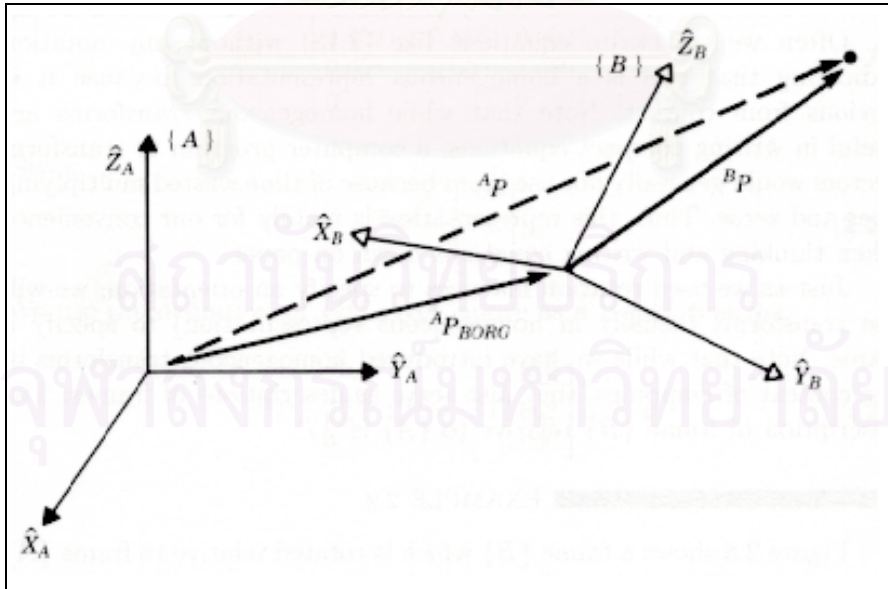
เมตริกซ์การแปลงคือเมตริกซ์ที่ใช้ในการแปลงเวกเตอร์ซึ่งอยู่ในแกนพิกัดหนึ่งไปยังอีกแกนพิกัดหนึ่ง (รูปที่ 4.1) ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ [3]

$${}^A P = {}^A T {}^B P \quad [4.1]$$

เมื่อ  ${}^A P$  คือเวกเตอร์ที่กำหนดในแกนพิกัด A

${}^B P$  คือเวกเตอร์ที่กำหนดในแกนพิกัด B

${}^A T$  คือเมตริกซ์การแปลงของแกนพิกัด B เทียบกับแกนพิกัด A



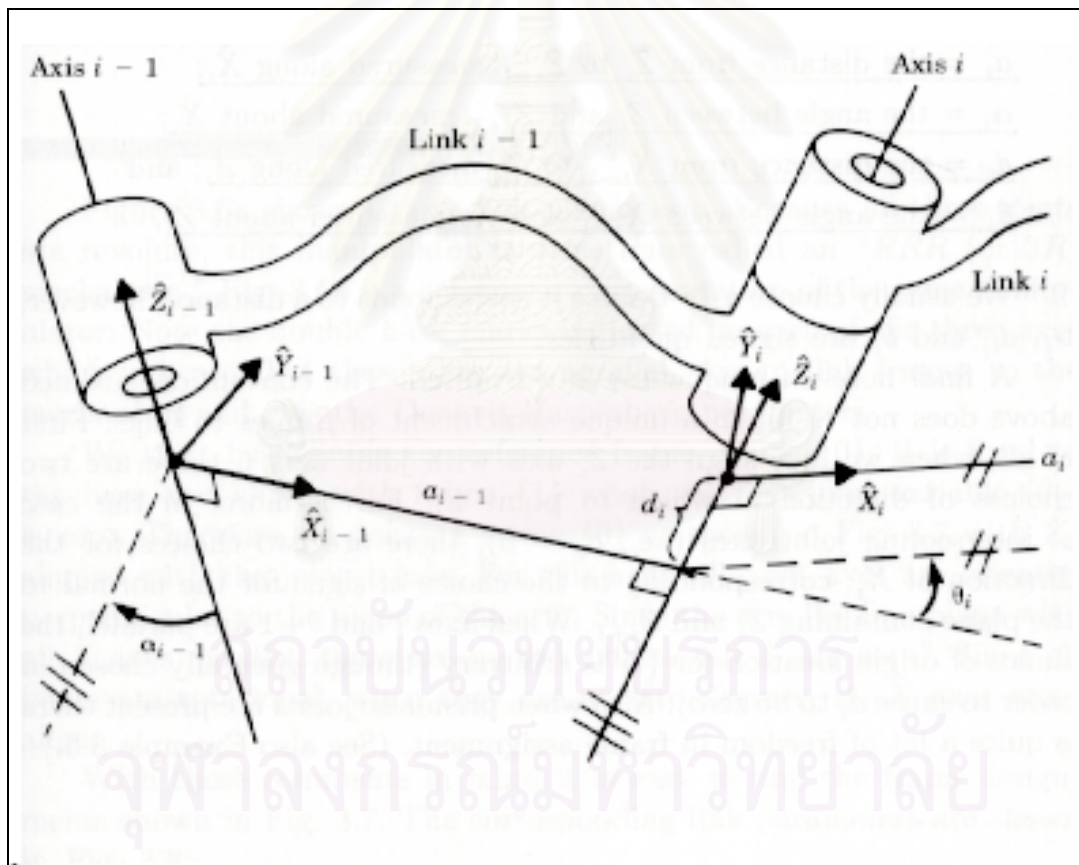
รูปที่ 4.1 แสดงการแปลงเวกเตอร์จากแกนพิกัด B ไปยังแกนพิกัด A [3]

เมตริกซ์การแปลงที่ใช้ในการแปลงระบบพิกัดของแขนกลแบบ  $N$  ข้อต่อสามารถหาได้โดยขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้

**ขั้นแรก** ต้องกำหนดแกนพิกัด (Frame) ของแต่ละข้อต่อตามหลักต่อไปนี้

1. กำหนดให้แกน  $\hat{Z}_i$  ชี้ไปตามแกนหมุนของข้อต่อที่  $i$  นั้นๆ
2. กำหนดให้แกน  $\hat{X}_i$  ชี้ไปในทิศทางตั้งฉากกับแกน  $\hat{Z}_i$  และแกน  $\hat{Z}_{i+1}$  หรือถ้าแกนทั้งคู่ตัดกัน ก็ให้แกน  $\hat{X}_i$  ชี้ไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบที่เกิดจากแกนทั้ง 2
3. กำหนดให้แกน  $\hat{Y}_i$  ชี้ไปในทิศทางตามกฎมือขวา

รูปต่อไปนี้จะแสดงตัวอย่างการตั้งแกนพิกัดตามหลักการข้างต้น



รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างการตั้งระบบแกนพิกัด [3]



**ขั้นที่สอง** กำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อต่อให้เป็นไปตามดังนี้

$$a_i = \text{ระยะทางจากแกน } \hat{Z}_i \text{ ไปยังแกน } \hat{Z}_{i+1} \text{ โดยวัดตามแกน } \hat{X}_i$$

$$\alpha_i = \text{มุมระหว่างแกน } \hat{Z}_i \text{ กับแกน } \hat{Z}_{i+1} \text{ โดยวัดรอบแกน } \hat{X}_i$$

$$d_i = \text{ระยะทางจากแกน } \hat{X}_{i-1} \text{ ไปยังแกน } \hat{X}_i \text{ โดยวัดตามแกน } \hat{Z}_i$$

$$\theta_i = \text{มุมระหว่างแกน } \hat{X}_{i-1} \text{ กับแกน } \hat{X}_i \text{ โดยวัดรอบแกน } \hat{Z}_i$$

**ขั้นที่สาม** สร้างเมตริกซ์การแปลงของแต่ละข้อต่อจากสมการดังต่อไปนี้

กำหนดให้  ${}^{i-1}T_i$  เป็นเมตริกซ์การแปลงของแกนที่  $i$  เทียบกับแกนที่  $i-1$

จะได้ว่า

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i \cdot c\alpha_{i-1} & c\theta_i \cdot c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} \cdot d_i \\ s\theta_i \cdot s\alpha_{i-1} & c\theta_i \cdot s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} \cdot d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [4.2]$$

โดย

$$c\theta_i = \cos \theta_i$$

$$s\theta_i = \sin \theta_i$$

$$c\alpha_i = \cos \alpha_i$$

$$s\alpha_i = \sin \alpha_i$$

**ขั้นที่สี่** สร้างเมตริกซ์การแปลงของแกนที่  $N$  เทียบกับแกนที่  $0$  (เมื่อระบบแขนกลมีทั้งหมด  $N$  แกน) ดังนี้

$${}^0T_N = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{N-1}T_N \quad [4.3]$$

จะเห็นว่าเมตริกซ์การแปลง  ${}^0T_N$  ที่คำนวณได้นี้จะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรของทั้ง  $N$  แกน และสามารถใส่เมตริกซ์การแปลง  ${}^0T_N$  ในการคำนวณหาตำแหน่ง และทิศทางของแกนสุดท้ายได้

ตัวอย่างต่อไปนี้จะแสดงการคำนวณหาเมตริกซ์การแปลง  ${}^0T$  ของแขนกลพุ่ม่า 560 (PUMA 560) ซึ่งมีรูปร่างดังแสดงในรูปต่อไปนี้



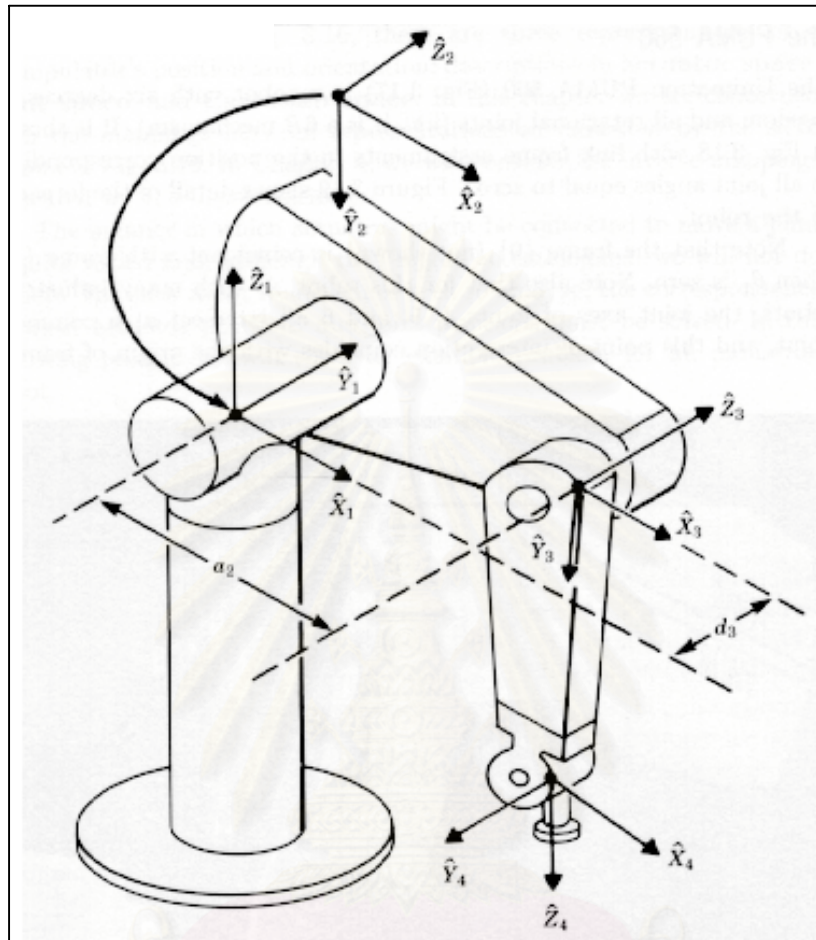
รูปที่ 4.3 รูปแสดงหุ่นยนต์พุ่ม่าที่ใช้กันในภาคอุตสาหกรรมทั่วไป

ของบริษัท Unimation Incorporated

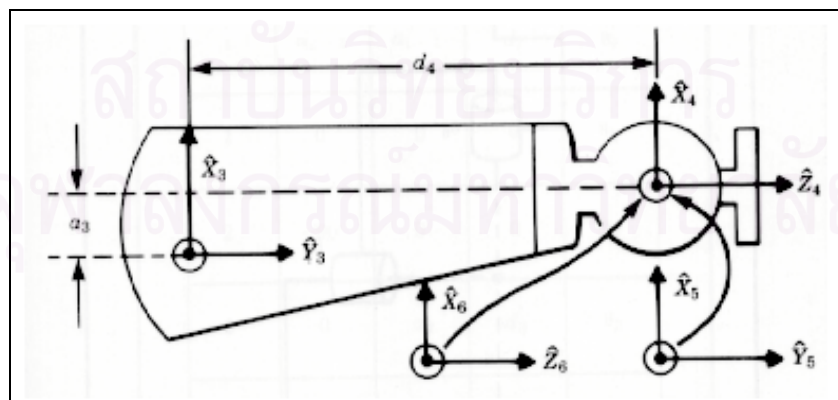
แขนกลพุ่ม่าเป็นแขนกลแบบอarticulate (Articulate Type) 6 ข้อต่อ ที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป เราสามารถที่จะทำการหาเมตริกซ์การแปลงของแขนกลพุ่ม่าตามหลักการข้างต้นได้ดังต่อไปนี้



ขั้นแรก ตั้งแกนพิกัดของแต่ละข้อต่อให้ครบทุกแกนดังรูป



รูปที่ 4.4 รูปแสดงตำแหน่งการกำหนดระบบแกนพิกัด (แกนที่ 1-4) ของหุ่นยนต์พุ่ม่า [3]



รูปที่ 4.5 รูปแสดงตำแหน่งการกำหนดระบบแกนพิกัด (แกนที่ 5-6) ของหุ่นยนต์พุ่ม่า [3]

ขั้นที่สอง สามารถหาค่าตัวแปรต่างๆ ของแขนกลได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ในระบบจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์พุ่ม่า

i	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	$\theta_2$
3	0	$a_2$	$d_3$	$\theta_3$
4	$-\frac{\pi}{2}$	$a_3$	$d_4$	$\theta_4$
5	$\frac{\pi}{2}$	0	0	$\theta_5$
6	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	$\theta_6$

ขั้นที่สาม เราสามารถหาเมตริกซ์การแปลงได้โดยสมการข้างต้นได้ดังนี้

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [4.4]$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [4.5]$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & a_2 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [4.6]$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -s\theta_4 & -c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [4.7]$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [4.8]$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_6 & -c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [4.9]$$

สามารถหาเมตริกซ์การแปลงของแกนที่ 6 เทียบกับแกนที่ 0 ได้ดังนี้  
จากสมการที่ 4.3 จะได้เมตริกซ์การแปลงของแกนที่ 6 เทียบกับแกนที่ 0 คือ

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \quad [4.10]$$

ซึ่งจะได้ว่า

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [4.11]$$

โดยที่

$$r_{11} = c_1 [c_{23} (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_{23} s_5 c_6] + s_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6) \quad [4.12]$$

$$r_{21} = s_1 [c_{23} (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_{23} s_5 c_6] - c_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6) \quad [4.13]$$

$$r_{31} = -s_{23} (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - c_{23} s_5 c_6 \quad [4.14]$$

$$r_{12} = c_1 [c_{23} (-c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6) + s_{23} s_5 s_6] + s_1 (c_4 c_6 - s_4 c_5 s_6) \quad [4.15]$$

$$r_{22} = s_1 [c_{23} (-c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6) + s_{23} s_5 s_6] - c_1 (c_4 c_6 - s_4 c_5 s_6) \quad [4.16]$$

$$r_{32} = -s_{23} (-c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6) - c_{23} s_5 s_6 \quad [4.17]$$

$$r_{13} = -c_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) - s_1s_4s_5 \quad [4.18]$$

$$r_{23} = -s_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) + c_1s_4s_5 \quad [4.19]$$

$$r_{33} = s_{23}c_4s_5 - c_{23}c_5 \quad [4.20]$$

$$p_x = c_1[a_2c_2 + a_3c_{23} - d_4s_{23}] - d_3s_1 \quad [4.21]$$

$$p_y = s_1[a_2c_2 + a_3c_{23} - d_4s_{23}] + d_3c_1 \quad [4.22]$$

$$p_z = -a_3s_{23} - a_2s_2 - d_4c_{23} \quad [4.23]$$

โดยที่

$$\begin{aligned} c_i &= \cos \theta_i, s_i = \sin \theta_i \\ c_{23} &= \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_3 \\ s_{23} &= \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \sin \theta_2 \cos \theta_3 \end{aligned}$$

หากพิจารณาจากสมการข้างต้นสมาชิกในแถวที่ 1-3 และคอลัมน์ที่ 1-3 ของเมตริกซ์การแปลง  ${}^0T$  จะเป็นเมตริกซ์ซึ่งแสดงตำแหน่งการหมุนของระบบแกนที่ 6 ส่วนสมาชิกในคอลัมน์สุดท้ายจะเป็นเมตริกซ์แสดงตำแหน่งพิกัดของจุดกำเนิดของระบบแกนที่ 6 เทียบกับระบบแกนที่ 0 ดังนั้นเมื่อรวมทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกันเป็นเมตริกซ์การแปลง  ${}^0T$  จึงทำให้สามารถหาได้ทั้งตำแหน่งพิกัด และตำแหน่งการหมุนของเวกเตอร์ที่อยู่บนระบบแกนที่ 6 หรือปลายแขนกลพุ่ม่า เทียบกับระบบแกนที่ 0 หรือระบบแกนของฐานแขนกลที่ตำแหน่งต่างๆ ของแขนกลได้

ดังนั้นจากหลักการทางจลนศาสตร์ข้างต้น เราสามารถนำมาสร้างเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบข้อต่อ 6 แกน ได้โดยการแปลงตำแหน่งของแต่ละข้อต่อที่วัดได้ไปเป็นตำแหน่งจุดปลายในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนของปลายแขนเครื่องวัดซึ่งจะมีตัวตรวจวัดแบบไกสึมผัสติดอยู่ ทำให้สามารถวัดตำแหน่งของชิ้นงานได้โดยการวัดตำแหน่งข้อต่อของแต่ละแกนของเครื่องวัดพิกัดเท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### การออกแบบและการสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (ซียู-ซีเอ็มเอ็ม)

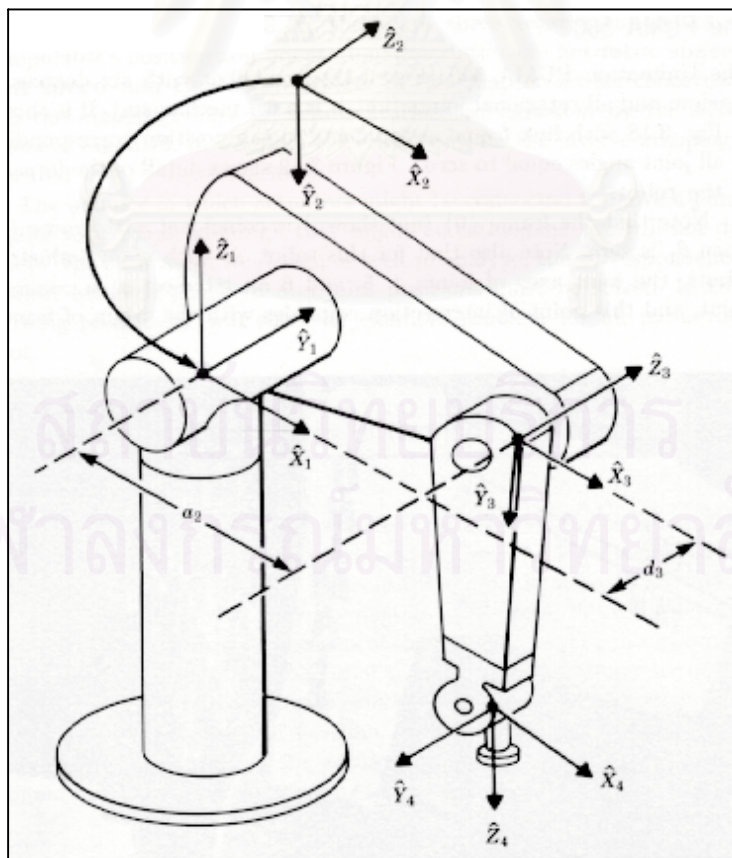
ในบทนี้จะขอล่าวถึงหลักการที่ใช้ในการออกแบบ รวมทั้งวิธีและทฤษฎีที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (CU-CMM) ดังนี้

#### 5.1 การออกแบบซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ในการออกแบบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบข้อต่อ 6 แกนสำหรับในงานวิจัยนี้ ซึ่งต่อจากนี้จะขอเรียกสั้นๆ ว่า ซียู-ซีเอ็มเอ็ม แทน นั้นเริ่มจากการออกแบบตำแหน่งการจัดวางข้อต่อของแขนกล, การหาค่าความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ต้องการ และสุดท้ายก็คืออุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้

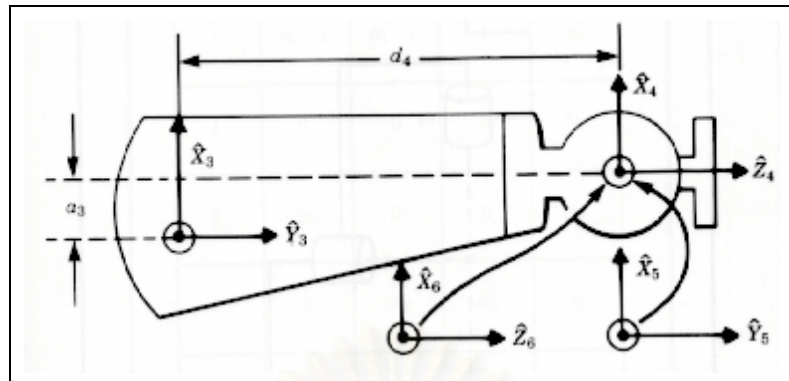
##### 5.1.1 การจัดวางตำแหน่งข้อต่อของซียู-ซีเอ็มเอ็ม

เริ่มจากการพิจารณาลักษณะของแขนกลแบบ 6 ข้อต่อที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป ตัวอย่างเช่น แขนกลพุ่มาที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งมีข้อต่อต่างๆ วางตัวอยู่ในลักษณะดังรูปที่ 5.1 และ 5.2



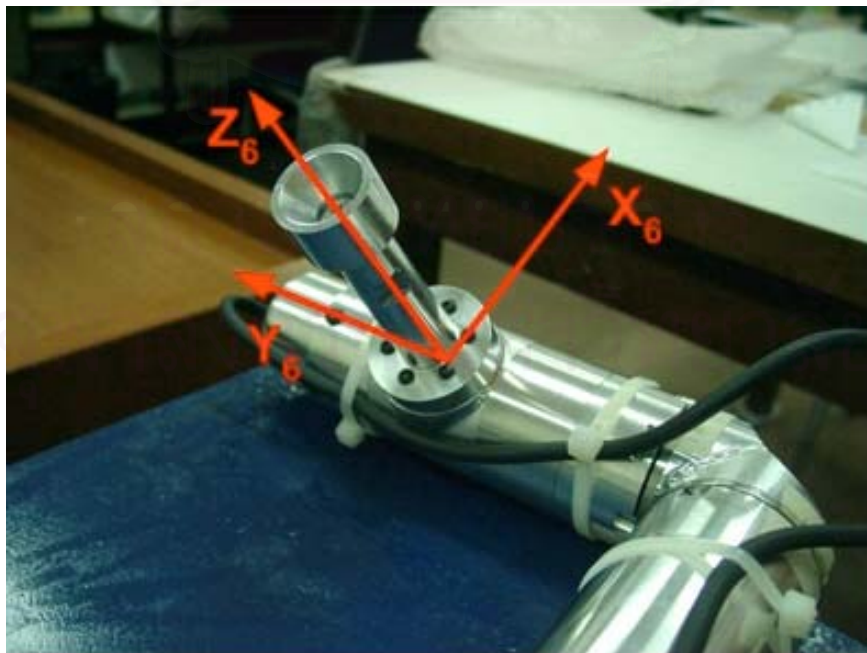
รูปที่ 5.1 รูปแสดงลักษณะข้อต่อที่ 1-4 ของแขนกลพุ่มา [3]





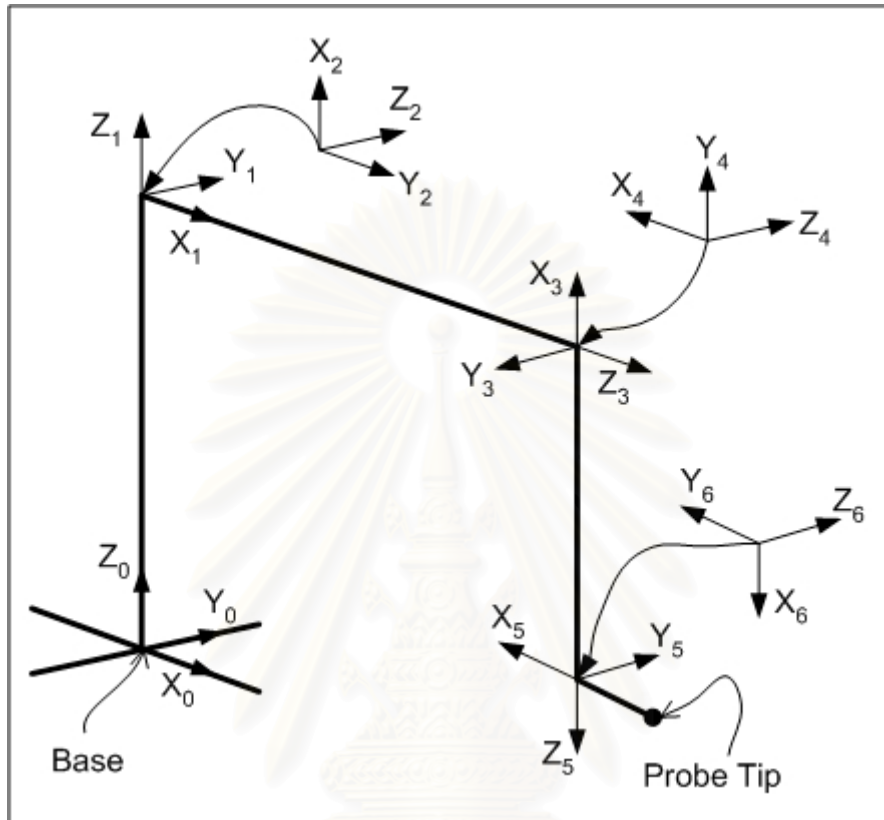
รูปที่ 5.2 รูปแสดงตำแหน่งข้อต่อที่ 4-6 ของแขนกลพู่มา [3]

แขนกลพู่มาในรูปจะมีข้อต่อที่ 1 กับ 2 ตัดกัน และจะมีข้อต่อที่ 4, 5 และ 6 ตัดกันที่ปลายแขนกลโดยที่ข้อต่อสุดท้ายจะมีแกนหมุน (แกน  $Z_6$ ) อยู่ในทิศทางเดียวกันกับปลายแขนกล ซึ่งตำแหน่งข้อต่อในลักษณะเช่นนี้จะเหมาะกับในงานอุตสาหกรรมทั่วไปที่มักจะมีพื้นที่ในการทำงานที่แขนกลสามารถเข้าถึงได้จากทางด้านบนเป็นส่วนใหญ่ แต่สำหรับในงานทางด้านเครื่องมือวัด ลักษณะโครงสร้างของซียู-ซีเอ็มเอ็มที่ใช้ควรที่จะมีความคล่องตัวในการที่จะเข้าถึงชิ้นงานได้จากหลายทิศทาง อีกทั้งถ้าหากข้อต่อสุดท้ายของซียู-ซีเอ็มเอ็มมีลักษณะเช่นเดียวกันกับแขนกลพู่มา แกนหมุนของข้อต่อสุดท้ายนี้ก็จะซ้อนทับกับแกนของหัววัด ทำให้แกนที่หมุนนี้ไม่มีประโยชน์กับการวัด (เพราะจะเป็นแกนที่ทำให้หัววัดหมุนรอบตัวเอง) ดังในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 รูปแสดงหัววัดและแกนหมุน (Z-Axis) ของข้อต่อสุดท้ายเมื่อกำหนดแบบแขนกลพู่มา

ด้วยเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงออกแบบซียู-ซีเอ็มเอ็มให้ยังคงเป็นแขนกลที่มี 6 ข้อต่อ แต่จะย้ายข้อต่อที่ 6 มาอยู่ในตำแหน่งที่ติดกับข้อต่อที่ 3 ทำให้แขนกลซียู-ซีเอ็มเอ็มมีลักษณะเป็นข้อต่อ 2 ข้อต่อที่ติดกัน ทั้งหมด 3 คู่ ดังในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 รูปแสดงลักษณะโดยประมาณ ของตำแหน่งข้อต่อทั้ง 6 ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ข้อต่อที่ย้ายมาติดกับข้อต่อที่ 3 นี้จะทำให้ซียู-ซีเอ็มเอ็มสามารถเข้าถึงชิ้นงานจากทางด้านข้างได้โดยสะดวกกว่าการตั้งแกนแบบแขนกลพุ่มามาก

### 5.1.2 ค่าความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ต้องการ

เนื่องจากแขนกลซียู-ซีเอ็มเอ็มต้องมีขอบเขตการทำงานโดยประมาณคือ สามารถวัดชิ้นงานขนาด 50x50x30 เซนติเมตร ได้ ผู้วิจัยจึงได้สร้างแบบจำลองของแขนกลซียู-ซีเอ็มเอ็มขึ้น ดังในรูปที่ 5.5 เพื่อหาขนาดความยาวโดยประมาณของลิงค์ (link) หลักทั้ง 2 ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม ซึ่งจากการทดลองสร้างแบบจำลองจะพบว่าขนาดความยาวของลิงค์หลักทั้ง 2 โดยประมาณที่เหมาะสมก็คือ 600 มิลลิเมตร

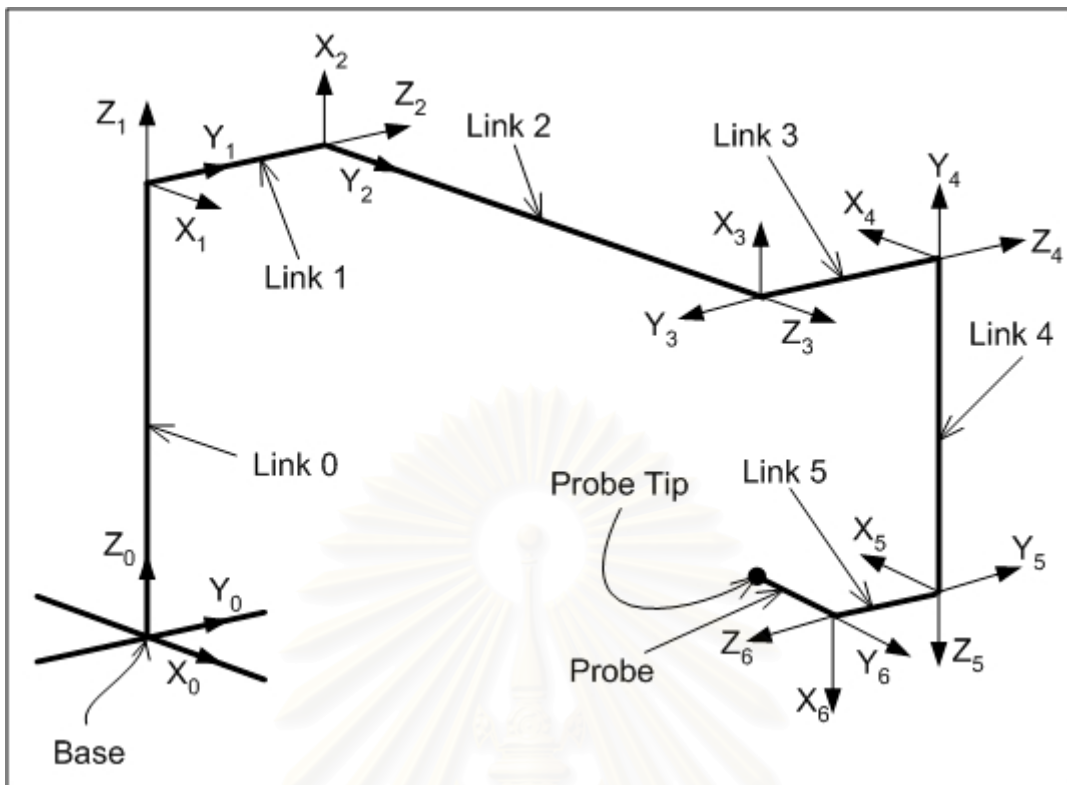


รูปที่ 5.5 รูปแสดงแบบจำลองของแขนกลซียู-ซีเอ็มเอ็ม

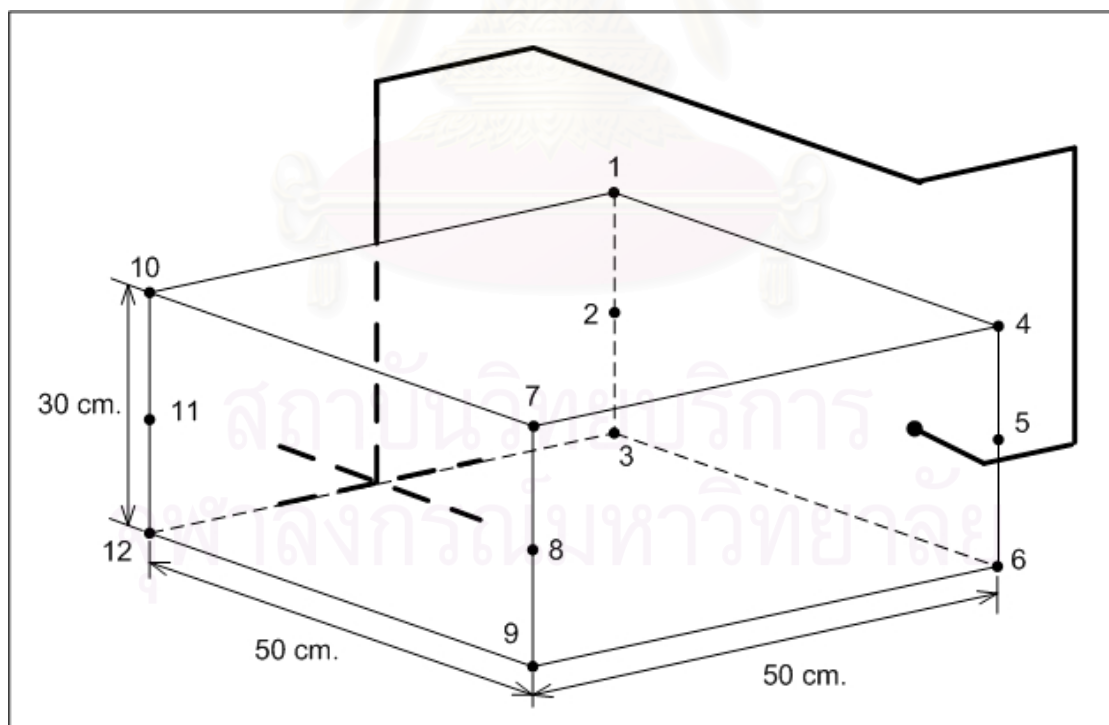
เนื่องจากแขนกลซียู-ซีเอ็มเอ็มจะวัดตำแหน่งของปลายหัววัดโดยใช้หลักการทาง จลนศาสตร์ ดังนั้นตำแหน่งของปลายหัววัดที่ต้องการก็จะวัดโดยผ่านการวัดตำแหน่งมุม ของข้อต่อทั้ง 6 ของซียู-ซีเอ็มเอ็มแทน ทำให้ค่าความละเอียด (resolution) ในการวัด ตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็ม หรือเครื่องวัดพิทัก 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกนทุกๆ ไป จึงขึ้นอยู่กับ ค่าความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ในการวัดตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อนั้นเอง

จากความยาวของแต่ละลิงค์ที่ได้จากแบบไม่นำมาออกแบบขนาดความยาวของ แขนกลซียู-ซีเอ็มเอ็มโดยประมาณได้ ดังในรูปที่ 5.6 โดยที่ Link 0 จะมีความยาว 300 มิลลิเมตร Link 1, Link3, Link 5 และProbe ยาว 100 มิลลิเมตร ส่วน Link 2 และLink 4 มีความยาวยาว 600 มิลลิเมตร และเนื่องจากขอบเขตการทำงานของซียู-ซีเอ็มเอ็มที่ต้องการ คือ 50x50x30 เซนติเมตร ดังนั้นในการคำนวณหาความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ ต้องใช้จะคำนวณโดยพิจารณาภายในขอบเขตการทำงานนี้เป็นหลัก ในรูปที่ 5.7 จะแสดง ขอบเขตการทำงานของซียู-ซีเอ็มเอ็มตามที่ได้ระบุไว้





รูปที่ 5.6 รูปแสดงโครงสร้างโดยประมาณของซียู-ซีเอ็มเอ็ม



รูปที่ 5.7 รูปแสดงขอบเขตการทำงานโดยประมาณของซียู-ซีเอ็มเอ็ม

เนื่องจากซียู-ซีเอ็มเอ็มเป็นแขนกลแบบข้อต่ออนุกรม ดังนั้นค่าความละเอียดของตำแหน่งพิกัดของจุดปลายของหัววัดจึงแตกต่างกันไปตามตำแหน่ง (configuration) ของแขนกล ซึ่งจากการพิจารณาจะพบว่ายิ่งตำแหน่งปลายหัววัดห่างออกไปจากฐานของแขนกลเท่าไร ค่าความละเอียดดังกล่าวก็จะยิ่งลดลง ดังนั้นในการคำนวณหาค่าความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ต้องใช้นั้น จะคำนวณจากเฉพาะตำแหน่งที่บริเวณสุดขอบเขตของการวัดดังแสดงตำแหน่งตัวเลขเอาไว้ในรูปที่ 5.7

ในการคำนวณหาค่าความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ต้องใช้นั้น จะเริ่มจากการหาตำแหน่งของหัววัดภายในขอบเขตการทำงานที่กำหนดไว้ทั้ง 12 จุด ว่าตำแหน่งใดที่มีค่าความละเอียดของจุดปลายแขนกลมากที่สุดก่อน จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่าความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ต้องใช้จากตำแหน่งแขนกลตำแหน่งนั้น โดยอาศัยการคำนวณแบบทดลองสุ่ม (trial and error) โดยสมมุติค่าความละเอียดของมุมในแต่ละข้อต่อขึ้นมาหนึ่งชุดแล้วจึงคำนวณหาระยะของจุดปลายของแขนกลที่ขยับไปจากตำแหน่งเดิม เมื่อข้อต่อแต่ละข้อต่อขยับไปเท่ากับ ค่าความละเอียดของมุมในแต่ละข้อต่อที่ได้สมมุติขึ้น แล้วจึงตรวจสอบผลที่ได้ว่าได้ตามที่ต้องการแล้วหรือยัง หากยังไม่ได้ก็ให้ทำการคำนวณโดยการสมมุติค่าความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ต้องใช้ขึ้นมาใหม่ โดยค่าความละเอียดของจุดปลายแขนที่ต้องการคือ 30 ไมโครเมตร (ไม่ใช่ 100 ไมโครเมตร เนื่องจากต้องเผื่อค่าความผิดพลาดจากสาเหตุอื่นๆ อีก) ทั้งนี้ในการสมมุติค่าความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ต้องใช้นั้นจะอาศัยข้อมูลค่าความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีขายในท้องตลาดเป็นแนวทาง

จากการคำนวณจะพบว่าค่าความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่จะต้องใช้ในแต่ละข้อต่อนั้นเป็นดังนี้

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงค่าความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ต้องใช้ในแต่ละข้อต่อ

ข้อต่อที่	ค่าความละเอียดของ อุปกรณ์ตรวจวัด (องศา)
1	0.00024
2	0.00024
3	0.00036
4	0.00036
5	0.0072
6	0.0072

### 5.1.3 อุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensor)

เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจรู้ที่ต้องใช้ในการวัดตำแหน่งมุมของข้อต่อทั้ง 6 จะต้องมีค่าความละเอียดที่ค่อนข้างสูงเช่นสำหรับข้อต่อที่หนึ่ง และสองจะต้องมีค่าความละเอียดในการวัดตำแหน่งมุมถึง 0.00024 องศา อีกทั้งจะต้องมีขนาดที่ไม่ใหญ่จนเกินไป และราคาไม่สูงนัก จากที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 อุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งมุมที่มีความเหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ก็คือ อุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่งมุมแบบออปติคัลเอนโค้ดเดอร์ (optical encoder) ชนิดอินครีเมนทัล (incremental) ซึ่งต่อจากนี้จะขอเรียกสั้นๆ ว่า เอนโค้ดเดอร์

จากการที่ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจเอนโค้ดเดอร์ที่มีขายในท้องตลาดทั้งภายในและนอกประเทศ พบว่าเอนโค้ดเดอร์ที่มีความละเอียดสูงก็จะมีขนาดใหญ่และราคาสูงตามไปด้วย และถ้าหากต้องการเอนโค้ดเดอร์ที่มีค่าความละเอียดสูงแต่มีขนาดเล็ก ราคา ก็จะยิ่งสูงขึ้นไปกว่าเดิมหลายเท่า ทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหานี้ก็คือนำมาใช้ชุดเฟืองทดเพื่อช่วยทดรอบการหมุนให้สูงขึ้น (back drive) ทำให้สามารถวัดตำแหน่งมุมได้ละเอียดขึ้น แต่ปัญหาสำคัญของการใช้ชุดเฟืองทก็คือ ในชุดเฟืองทดทั่วไปจะมีค่าแบกแลช (backlash) อันเกิดจากช่องว่างภายในระหว่างฟันเฟืองที่ขบกันทำให้ตำแหน่งมุมที่วัดมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ดังนั้นการจะใช้ชุดเฟืองทดช่วยจึงจำเป็นต้องใช้ชุดเฟืองทที่ไม่มีค่าแบกแลชเกิดขึ้น ซึ่งดังที่ได้กล่าวเอาไว้แล้วในบทที่ 3 ชุดเฟืองแบบฮาร์โมนิคไดรฟ์ เป็นชุดเฟืองทที่ไม่มีค่าแบกแลชเกิดขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะใช้เอนโค้ดเดอร์ร่วมกับฮาร์โมนิคไดรฟ์เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้สำหรับวัดตำแหน่งมุม

ในการพิจารณาเลือกฮาร์โมนิคไดรฟ์นั้น ถ้าหากยิ่งอัตราทดสูงเท่าไร ค่าความละเอียดในการวัดตำแหน่งมุมที่ได้ก็จะมีค่าความละเอียดสูงขึ้นไปด้วยทำให้ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ที่มีค่าความละเอียดสูง แต่เนื่องจากลักษณะการใช้งานจะเป็นการขับชุดเฟืองแบบย้อนกลับ (back drive) ดังนั้นหากฮาร์โมนิคไดรฟ์ที่ใช้มีอัตราทดที่สูง ก็จะทำให้ต้องใช้กำลังในการเคลื่อนที่ข้อต่อต่างๆ ของแขนกลมากทำให้ไม่มีความคล่องตัวในการใช้งาน และสำหรับในส่วนของการเลือกเอนโค้ดเดอร์นั้น เนื่องจากราคาของเอนโค้ดเดอร์ที่มีขายในท้องตลาดนั้นจะแปรผันตามค่าความละเอียดที่วัดได้ในลักษณะที่แบ่งเป็นช่วงอย่างเช่น ช่วงความละเอียดตั้งแต่ 100-1000 PPR จะมีราคาเท่ากันหมดเป็นราคาหนึ่ง แล้วช่วงตั้งแต่ 1024-2000 PPR ก็จะเป็นอีกราคาหนึ่ง ดังนั้นในการเลือกฮาร์โมนิคไดรฟ์และเอนโค้ดเดอร์ที่ใช้จึงต้องพิจารณาถึงค่าความละเอียดของเอนโค้ดเดอร์ที่มีอยู่ในช่วงราคาต่างๆ และอัตราทดที่เหมาะสมของฮาร์โมนิคไดรฟ์ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เกณฑ์ทางด้านราคาเป็นหลักในการตัดสินใจ โดยค่าความละเอียดของเอนโค้ดเดอร์ และอัตราทดของฮาร์โมนิคไดรฟ์ที่เลือกจะใช้จะแสดงอยู่ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าความละเอียดของเอนโค้ดเดอร์และอัตราทดของฮาร์โมนิคไดรฟ์ที่ใช้ในการวัดตำแหน่งมุมของข้อต่อทั้ง 6

ข้อต่อที่	ค่าความละเอียดของเอนโค้ดเดอร์ (PPR)	อัตราทดของฮาร์โมนิคไดรฟ์	ค่าความละเอียดที่วัดได้ (องศา)
1	40000	1:50	0.00018
2	40000	1:50	0.00018
3	40000	1:50	0.00018
4	40000	1:50	0.00018
5	4096	1:50	0.00176
6	4096	1:50	0.00176

จะเห็นว่าค่าความละเอียดที่ได้จากเอนโค้ดเดอร์และฮาร์โมนิคไดรฟ์มีความละเอียดสูงกว่าที่ต้องการมาก เนื่องจากโดยทั่วไปฮาร์โมนิคไดรฟ์จะเป็นชุดเฟืองที่มีอัตราทดสูงคือเริ่มที่อัตราทด 1:50 และก็มีที่อัตราทด 1:80 ซึ่งเป็นอัตราทดที่สูงมากดังนั้นเพื่อความคล่องตัวในการใช้งานผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ฮาร์โมนิคไดรฟ์ที่มีอัตราทด 1:50 ประกอบกับเอนโค้ดเดอร์ที่ทางผู้วิจัยได้เลือกสำหรับข้อต่อที่ 1-4 โดยใช้เกณฑ์ทางด้านราคา นั้นสามารถที่จะเลือกช่วงความละเอียดได้ตั้งแต่ 14400-40000 PPR ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ที่ค่าความละเอียดสูงสุดในช่วงซึ่งก็คือ 40000 PPR ดังนั้นอัตราทดที่ 1:50 จึงเพียงพอและเหมาะสมกับงานวิจัยนี้ที่สุด และสำหรับในส่วนข้อต่อที่ 5-6 ก็ใช้เกณฑ์ในการตัดสินใจเช่นเดียวกันกับข้อต่อที่ 1-4 ทำให้ค่าความละเอียดของมุมที่วัดได้ในแต่ละข้อต่อจึงสูงกว่าที่ต้องการมาก

## 5.2 การสอบเทียบซียู-ซีเอ็มเอ็ม

เนื่องจากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบข้อต่อ 6 แกน เป็นเครื่องวัดพิกัด 3 มิติชนิดที่ไม่ได้วัดตำแหน่งพิกัดเป็นระบบพิกัดฉากโดยตรง แต่จะตรวจวัดตำแหน่งจากตำแหน่งการหมุนของแต่ละข้อต่อ แล้วจึงนำมาคำนวณหาตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัดในระบบพิกัดฉากด้วยหลักการทางจลนศาสตร์แทน ดังนั้นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งนอกเหนือไปจากความแม่นยำของเอนโค้ดเดอร์ที่ใช้ที่就会有ผลต่อค่าตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัดและค่าความถูกต้องในการวัดก็คือ เมตริกซ์การแปลงที่ใช้ในสมการเพื่อการคำนวณหาตำแหน่งของปลายหัววัด โดยปกติแล้วค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ต่างๆ ในเมตริกซ์การแปลง จะได้มาจากแบบ (Drawing) ของแกนกล แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติและในทางวิศวกรรม การผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ไม่ว่าจะผลิตด้วยขั้นตอนกระบวนการใดก็ตาม ก็ไม่สามารถผลิตชิ้นส่วนให้ได้ขนาดตามที่กำหนดในแบบได้ถูกต้องแม่นยำได้เลย ดังนั้นในการผลิตชิ้น

ส่วนใดๆ ก็ตามย่อมต้องมีการกำหนดพิกัดความถี่เอาไว้ด้วยเสมอ โดยหากค่าพิกัดความถี่มีค่าที่ต่ำ ชิ้นงานที่ได้ก็จะถือว่ามีความแม่นยำสูง แต่ก็จำเป็นที่จะต้องใช้กระบวนการที่พิเศษยิ่งขึ้นในการผลิตทำให้ค่าการผลิตสูงตามไปด้วย ดังนั้นด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ขนาดของชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ จึงไม่ตรงตามที่ได้เขียนในแบบ และเมื่อนำชิ้นส่วนต่างๆ มาประกอบเข้าด้วยกัน พิกัดขนาดต่างๆ ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ จึงไม่ตรงตามแบบ อีกทั้งยังไม่สามารถหาค่าพิกัดที่แน่นอนได้โดยง่ายอีกด้วย ดังนั้นหากนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากแบบที่เขียนขึ้นไปสร้างเมตริกซ์การแปลง (Transformation matrix) ก็จะทำให้การคำนวณตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัดจากตำแหน่งการหมุนของแต่ละข้อต่อผิดพลาดไป ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงจะขอก้าวถึงสมการที่ใช้ในการหาตำแหน่งของเครื่องวัด, หลักการและวิธีในการหาพารามิเตอร์ต่างๆ ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม เพื่อนำไปสร้างสมการเพื่อหาตำแหน่งปลายหัววัดที่ถูกต้อง และหลักการที่ใช้ในการสอบเทียบเพื่อหาค่าความถูกต้องของเครื่องวัด

### 5.2.1 สมการสำหรับการหาตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็ม

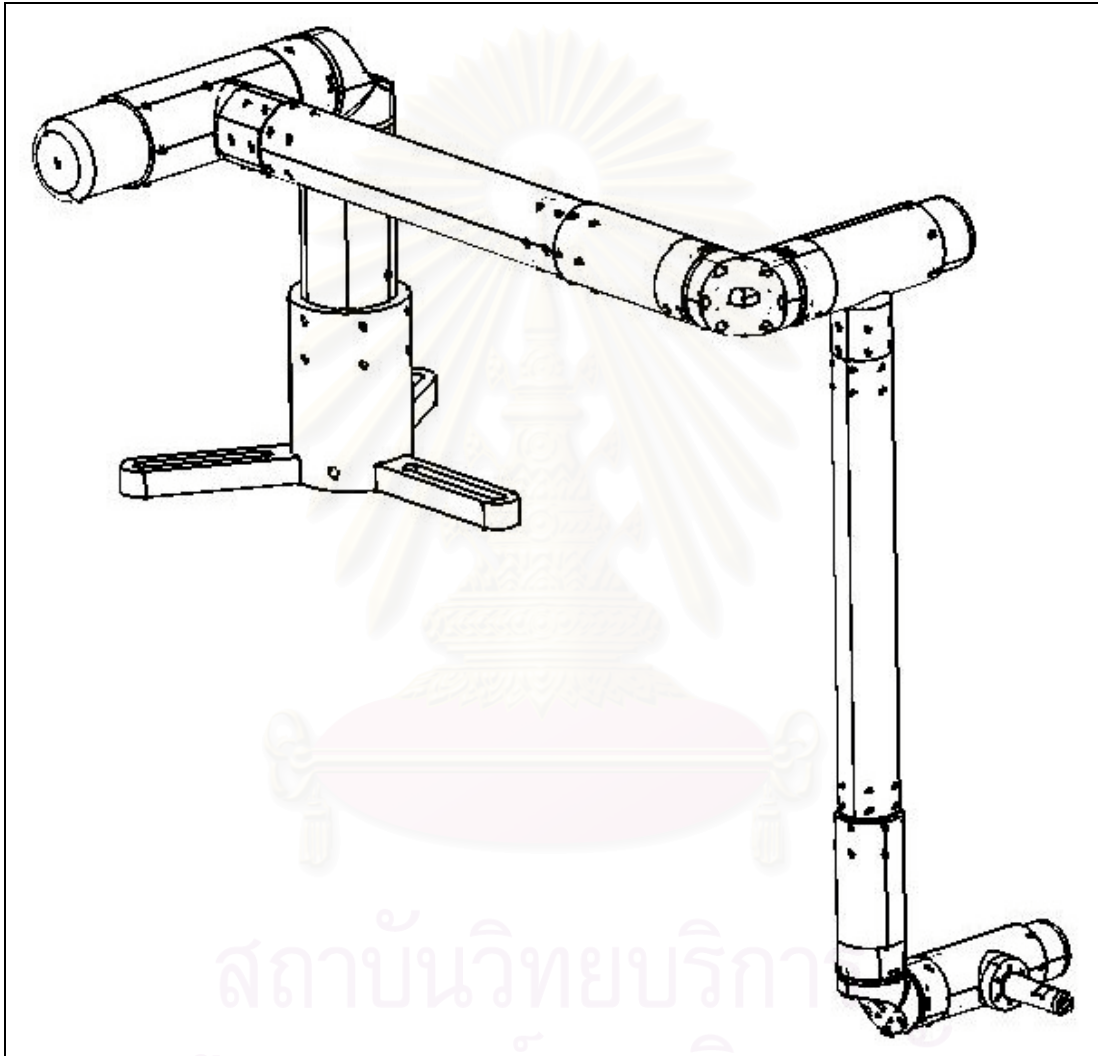
สมการที่ใช้สำหรับหาตำแหน่งของปลายหัววัดของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบข้อต่อ 6 แกน นี้จะเป็นระบบสมการที่ทำหน้าที่แปลงเวกเตอร์จากระบบแกนพิกัดหนึ่งไปยังระบบแกนพิกัดอื่นด้วยเมตริกซ์การแปลงดังได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 โดยในการหาตำแหน่งของหัววัดนี้ เวกเตอร์ที่จะทำการแปลงจะเป็นเวกเตอร์ในระบบแกนพิกัดของข้อต่อสุดท้ายซึ่งชี้ไปยังตำแหน่งของปลายหัววัด แล้วทำการแปลงเวกเตอร์นี้ให้ไปเป็นเวกเตอร์ซึ่งอยู่ในระบบแกนพิกัดที่ตั้งอยู่บนฐานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (ในการสร้างเมตริกซ์การแปลงโดยทั่วไปจะตั้งให้เป็นระบบแกนพิกัดที่ ศูนย์ โดยในการวัดตำแหน่งต่างๆ ตำแหน่งที่ได้ก็จะอ้างอิงมาจากระบบแกนนี้ ดังนั้นจะขอเรียกระบบแกนพิกัดนี้ว่า ระบบแกนพิกัดของเครื่อง) แต่เนื่องจากจากระบบแกนพิกัดของข้อต่อสุดท้ายตั้งอยู่บนข้อต่อซึ่งมีการติดตั้งหัววัดเอาไว้ ดังนั้นไม่ว่าเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ จะตั้งอยู่ในตำแหน่ง หรือลักษณะใดก็ตามเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังปลายหัววัดก็จะยังคงเป็นเวกเตอร์เดิมในระบบแกนพิกัดสุดท้าย ดังนั้นสมการในการหาตำแหน่งจุดปลายของซียู-ซีเอ็มเอ็ม นี้จะประกอบไปด้วยตัวเมตริกซ์การแปลง และเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งหัววัด ซึ่งจะต้องสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการหาตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็ม ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำหลักการในการสร้างเมตริกซ์การแปลงที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 มาสร้างเมตริกซ์การแปลง และกำหนดเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งหัววัด แต่เนื่องจากว่ายังไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ที่แน่นอนของทั้งเมตริกซ์การแปลง และตัวเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งหัววัด ในหัวข้อนี้จึงจะสร้างสมการที่ติดอยู่ในรูปของตัวแปรทั้งหมดก่อน แล้วจึงนำไปใช้ในการหาพารามิเตอร์ที่ถูกต้องทั้งหมดในหัวข้อต่อไป ได้ดังนี้



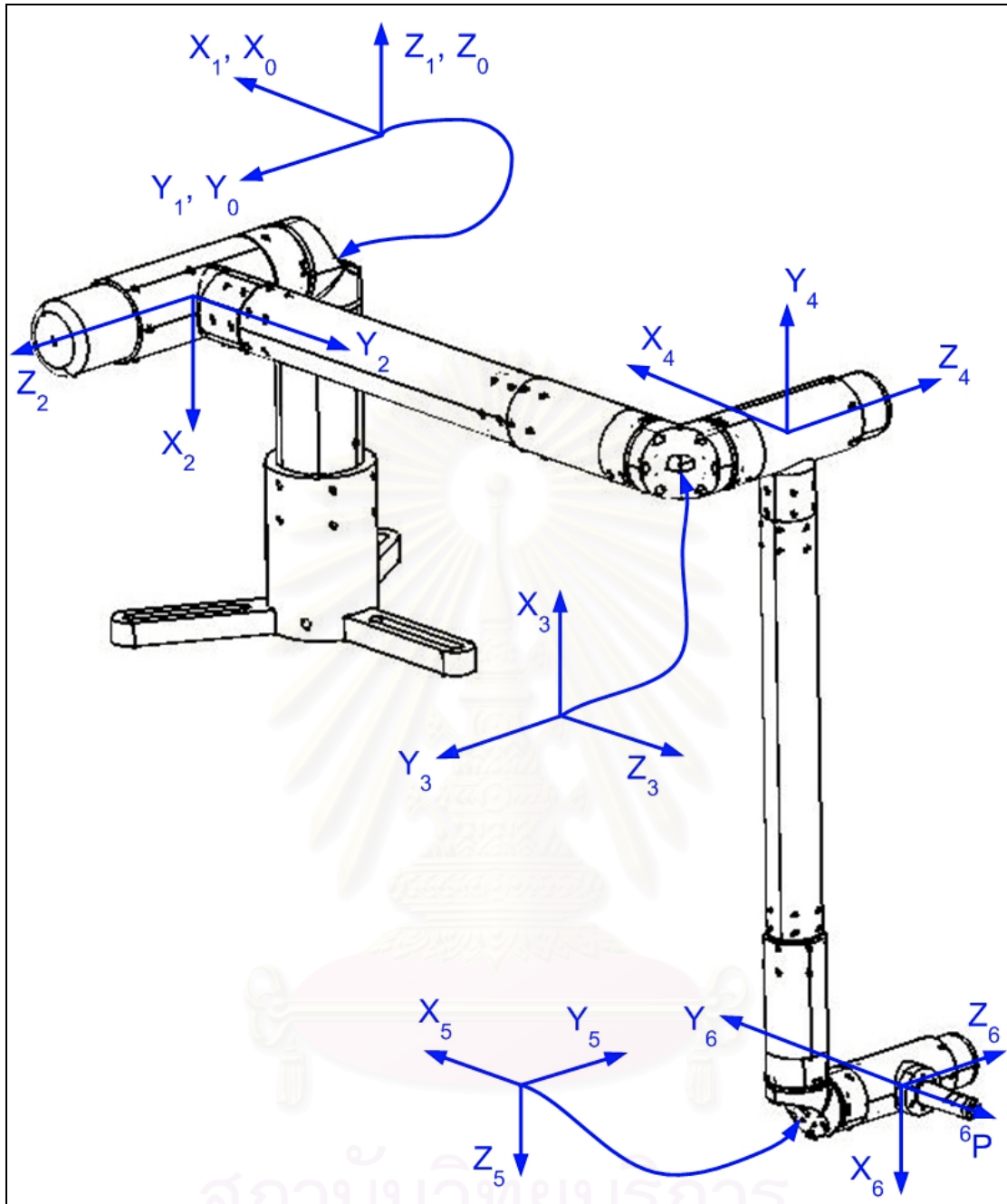
### 5.2.1.1 เมตริกซ์การแปลงของซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ในการสร้างเมตริกซ์การแปลงของซียู-ซีเอ็มเอ็มจะใช้หลักการที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 จากรูปสเก็ทซ์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม ในรูปที่ 5.8 กำหนดและตั้งระบบแกนพิกัดให้กับทุกข้อต่อ ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 รูปแสดงเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม



รูปที่ 5.9 รูปแสดงระบบแกนพิกัดของข้อต่อทั้ง 6 ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ขั้นที่ 2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ของแต่ละข้อต่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดดังในตารางที่ 5.3 และ 5.4 ทั้ง 2 ตาราง ที่แสดงนี้จะเป็นค่าพารามิเตอร์ของซียู-ซีเอ็มเอ็มทั้งคู่ โดยในตารางที่ 5.3 จะเป็นค่าพารามิเตอร์ซึ่งนำมาจากแบบ (Drawing) แต่จากที่ได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้นว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องวัดที่สร้างเสร็จแล้วได้มีค่าผิดเพี้ยนไปจากค่าที่ได้ออกแบบไว้บ้าง ดังนั้นในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่



แท้จริงของเครื่องวัด จึงจะต้องติดค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดอยู่ในรูปของตัวแปรเอาไว้ก่อน ดังในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของเมตริกซ์การแปลงซึ่งนำมาจากแบบ (Drawing)

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	$\frac{3\pi}{2}$	0	0	$\theta_1$
2	$\frac{3\pi}{2}$	0	135.000	$\theta_2$
3	$\frac{\pi}{2}$	0	579.272	$\theta_3$
4	$\frac{\pi}{2}$	0	117.250	$\theta_4$
5	$\frac{3\pi}{2}$	0	585.670	$\theta_5$
6	$\frac{\pi}{2}$	0	104.000	$\theta_6$

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงค่าตัวแปรต่างๆ ของเมตริกซ์การแปลง

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	$\alpha_0$	$a_0$	$d_1$	$\theta_1$
2	$\alpha_1$	$a_1$	$d_2$	$\theta_2$
3	$\alpha_2$	$a_2$	$d_3$	$\theta_3$
4	$\alpha_3$	$a_3$	$d_4$	$\theta_4$
5	$\alpha_4$	$a_4$	$d_5$	$\theta_5$
6	$\alpha_5$	$a_5$	$d_6$	$\theta_6$

ขั้นที่ 3 สร้างเมตริกซ์การแปลงของแต่ละข้อต่อจากตัวแปรในตารางที่ 5.2 ดัง

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & a_0 \\ s\theta_1.c\alpha_0 & c\theta_1.c\alpha_0 & -s\alpha_0 & -s\alpha_0.d_1 \\ s\theta_1.s\alpha_0 & c\theta_1.s\alpha_0 & c\alpha_0 & c\alpha_0.d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & a_1 \\ s\theta_2.c\alpha_1 & c\theta_2.c\alpha_1 & -s\alpha_1 & -s\alpha_1.d_2 \\ s\theta_2.s\alpha_1 & c\theta_2.s\alpha_1 & c\alpha_1 & c\alpha_1.d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & a_2 \\ s\theta_3.c\alpha_2 & c\theta_3.c\alpha_2 & -s\alpha_2 & -s\alpha_2.d_3 \\ s\theta_3.s\alpha_2 & c\theta_3.s\alpha_2 & c\alpha_2 & c\alpha_2.d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & a_3 \\ s\theta_4.c\alpha_3 & c\theta_4.c\alpha_3 & -s\alpha_3 & -s\alpha_3.d_4 \\ s\theta_4.s\alpha_3 & c\theta_4.s\alpha_3 & c\alpha_3 & c\alpha_3.d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & a_4 \\ s\theta_5.c\alpha_4 & c\theta_5.c\alpha_4 & -s\alpha_4 & -s\alpha_4.d_5 \\ s\theta_5.s\alpha_4 & c\theta_5.s\alpha_4 & c\alpha_4 & c\alpha_4.d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & a_5 \\ s\theta_6.c\alpha_5 & c\theta_6.c\alpha_5 & -s\alpha_5 & -s\alpha_5.d_6 \\ s\theta_6.s\alpha_5 & c\theta_6.s\alpha_5 & c\alpha_5 & c\alpha_5.d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ขั้นที่ 4 จากเมตริกซ์การแปลงของแต่ละข้อต่อที่ได้มาในขั้นต้น สามารถนำมาหาเมตริกซ์การแปลงของแกนที่ 6 เทียบกับแกนที่ 0 ได้จากสมการที่ 4.3 ดังนี้

$${}^0T = {}^0T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 \quad [5.1]$$

แต่เนื่องจากระบบสมการเป็นเมตริกซ์ขนาด 4 คูณ 4 คูณกันทั้งหมด 6 ตัว อีกทั้งสมาชิกส่วนใหญ่ภายในเมตริกซ์แต่ละตัวยังติดอยู่ในรูปของสมการตรีโกณมิติอีกด้วย ผลลัพธ์ที่ได้จึงไม่สามารถที่จะจัดให้อยู่ในรูปของสมการที่สั้นและกระชับได้ ดังนั้นในการคำนวณจึงต้องใช้ระบบสมการที่ยังอยู่ในรูปการคูณกันของเมตริกซ์ทั้ง 6 อยู่

### 5.2.1.2 เวกเตอร์ชี้ตำแหน่งปลายหัววัด

เนื่องจากเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งของปลายหัววัดนี้เป็นเวกเตอร์คงที่ซึ่งอ้างอิงจากระบบแกนพิกัดสุดท้าย (ระบบแกนพิกัดที่ 6) จึงกำหนดให้เวกเตอร์นี้มีชื่อว่าเวกเตอร์  ${}^6P$  ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.9 และกำหนดให้มีพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$${}^6P = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix}$$

โดย

$X_P$  คือ ระยะในแกน X ของปลายหัววัดที่ห่างจากจุดกำเนิดของระบบแกนที่ 6

$Y_P$  คือ ระยะในแกน Y ของปลายหัววัดที่ห่างจากจุดกำเนิดของระบบแกนที่ 6

$Z_P$  คือ ระยะในแกน Z ของปลายหัววัดที่ห่างจากจุดกำเนิดของระบบแกนที่ 6

### 5.2.1.3 สมการที่ใช้ในการหาตำแหน่งของปลายหัววัด

จากเมตริกซ์การแปลง และเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งที่สร้างขึ้นสามารถนำมาสร้างสมการที่ใช้ในการหาตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็ม ได้ดังนี้ จากสมการที่ 4.1 จะได้ว่า

$${}^0P = {}^0T \cdot {}^6P \quad [5.2]$$

โดย

${}^0P$  คือ เวกเตอร์ชี้ตำแหน่งปลายหัววัดซึ่งอ้างอิงจากระบบแกนพิกัดของเครื่อง

ในสมการที่ 5.2 จะประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระคือ ค่ามุมของข้อต่อในแต่ละข้อต่อทั้ง 6 ซึ่งได้รวมอยู่ในเมตริกซ์การแปลง และจะมีเวกเตอร์  ${}^0P$  เป็นตัวแปรตาม

### 5.2.2 หลักการและวิธีในการหาค่าพารามิเตอร์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นแล้วว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ที่จำเป็นต้องรู้เพื่อใช้ในการสร้างเมตริกซ์การแปลงของเครื่องที่สร้างขึ้นจริงกับที่ได้ออกแบบเอา

ไว้มักจะมีคลาดเคลื่อนจากกันอยู่เสมอ แต่การที่จะคำนวณตำแหน่งพิกัดของเครื่องวัดได้อย่างถูกต้องแม่นยำได้นั้น จำเป็นที่จะต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในเมตริกซ์การแปลงได้อย่างถูกต้องแม่นยำเช่นกัน ซึ่งวิธีหนึ่งที่สามารถกระทำได้ก็คือ การนำชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ที่สร้างและประกอบเข้าด้วยกันเสร็จแล้วมาทำการวัดเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นโดยตรง แต่เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นทั้งค่ามุม และค่าความยาวในแต่ละข้อต่อจะต้องมีความถูกต้องแม่นยำ อีกทั้งด้วยขนาดที่ใหญ่ของตัวเครื่องวัด เครื่องมือวัดที่ใช้จึงจำเป็นต้องเป็นเครื่องมือที่มีลักษณะพิเศษที่ต้องมีทั้งความแม่นยำสูง และมีขอบเขตการทำงานที่ใหญ่ เพียงพอที่จะใช้ในการวัดชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องวัดพิกัดนี้ได้ เครื่องมือหนึ่งที่เหมาะสมก็คือ เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบพิกัดฉาก ซึ่งทางห้องปฏิบัติการของผู้ทำการวิจัยก็มีเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบพิกัดฉาก อยู่เช่นกัน โดยเครื่องวัดพิกัดแบบที่มีอยู่นี้มีค่าความถูกต้องถึง 3 ไมโครเมตร แต่มีขอบเขตในการวัดเพียง 300x400x300 (X, Y และ Z) มิลลิเมตร ซึ่งไม่เพียงพอกับเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น ดังนั้นจึงไม่สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการได้ด้วยวิธีการวัดขนาดจากชิ้นส่วนต่างๆ โดยตรง จำเป็นต้องใช้แนวทางอื่นในการหาแทน โดยแนวทางหนึ่งที่น่าจะมีประสิทธิภาพที่ผู้วิจัยได้คิดขึ้นนั้นจะประกอบไปด้วยการทดลอง และการใช้หลักการทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการจากผลของการทดลองที่ได้ ในหัวข้อนี้จึงจะขออธิบายถึงแนวทางในการหาค่าพารามิเตอร์ของซียู-ซีเอ็มเอ็มที่ทางผู้วิจัยได้คิดขึ้นโดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็นหัวข้อย่อยต่างๆ อันได้แก่ ลักษณะของปัญหา, หลักการที่สามารถใช้แก้ปัญหาในลักษณะนี้ และสุดท้ายคือวิธีในการนำหลักการที่ได้มาหาค่าพารามิเตอร์โดยประมาณของซียู-ซีเอ็มเอ็ม โดยในส่วนของผลการทดลองจริงจะขอยกเอาไปไว้ในบทที่ 8 ซึ่งรวบรวมเนื้อหาในส่วนของผลการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ไว้

### 5.2.2.1 ลักษณะของปัญหา

จากสมการที่ 5.2 ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระคือ ค่ามุมทั้ง 6 ของแต่ละข้อต่อ และตัวแปรตามคือ ตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัด หรือเวกเตอร์  ${}^0P$  ดังนั้นสามารถที่จะเขียนสมการขึ้นใหม่ในรูปที่ง่ายขึ้นเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = F(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) \quad [5.3]$$

โดย  $X_0$  คือ ตำแหน่งปลายหัววัดในแนวแกน X อ้างอิงจากระบบแกนของเครื่อง

- $Y_0$  คือ ตำแหน่งปลายหัววัดในแนวแกน  $Y$  อ้างอิงจากระบบแกนของเครื่อง  
 $Z_0$  คือ ตำแหน่งปลายหัววัดในแนวแกน  $Z$  อ้างอิงจากระบบแกนของเครื่อง  
 $\theta_1$  คือ ค่ามุมของข้อต่อที่ 1  
 $\theta_2$  คือ ค่ามุมของข้อต่อที่ 2  
 $\theta_3$  คือ ค่ามุมของข้อต่อที่ 3  
 $\theta_4$  คือ ค่ามุมของข้อต่อที่ 4  
 $\theta_5$  คือ ค่ามุมของข้อต่อที่ 5  
 $\theta_6$  คือ ค่ามุมของข้อต่อที่ 6  
 $F$  เป็นฟังก์ชันซึ่งรวมเอาทั้งเมตริกซ์การแปลง และเวกเตอร์  ${}^6P$  เข้าด้วยกัน

แต่เนื่องจากฟังก์ชัน  $F$  เป็นการรวมเมตริกซ์การแปลง และเวกเตอร์  ${}^6P$  เข้าด้วยกัน ดังนั้นจึงสามารถหารูปแบบของตัวฟังก์ชันได้แต่ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของเครื่องวัดยังคงติดอยู่ในรูปของตัวแปรที่ต้องการทราบค่า แต่เพื่อให้เป็นการง่าย ลองมาพิจารณาถึงตัวฟังก์ชันต่างๆ ไปก่อน ดังตัวอย่างเช่น

$$y = f(x) \quad [5.4]$$

เมื่อสามารถทราบค่าของตัวแปร  $x$  และรู้ว่าฟังก์ชัน  $f$  เป็นฟังก์ชันแบบไหน สัมประสิทธิ์ต่างๆ ทั้งหมดภายในฟังก์ชันมีค่าเป็นเท่าไรบ้าง ก็จะสามารถหาค่าของตัวแปร  $y$  ได้ ดังนั้นในทางกลับกันหากทราบค่าของตัวแปร  $x$  และค่าของตัวแปร  $y$  ซึ่งต่อจากนี้ไปจะขอเรียกว่า ชุดข้อมูล ก็สามารถที่จะนำมาหาค่าของสัมประสิทธิ์ต่างๆ ภายในฟังก์ชัน  $f$  ได้เช่นกัน เพียงแต่จะต้องมีจำนวนชุดข้อมูลอย่างน้อยเท่ากับจำนวนสัมประสิทธิ์ที่ต้องการหาค่า ทั้งนี้หลักการที่ใช้ในการแก้ปัญหาประเภทนี้ก็มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน แตกต่างกันไปตามลักษณะของปัญหา ตัวอย่างเช่น หากลักษณะปัญหาเป็นแบบเชิงเส้นดังในสมการที่ 5.5

$$\begin{aligned}
 y &= ax + b \\
 \therefore f(x) &= ax + b
 \end{aligned} \quad [5.5]$$

จำนวนชุดข้อมูลที่ต้องมีสำหรับการหาค่าของ  $a$  และ  $b$  คือ 2 ชุดเท่านั้น อีกทั้งยังสามารถที่จะหาค่าของ  $a$  และ  $b$  ได้โดยตรงจากการแก้สมการด้วยวิธีต่างๆ ไปซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad [5.6]$$

$$b = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1} \quad [5.7]$$

แต่ถ้าลักษณะปัญหาเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น และจำนวนสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่ามีจำนวนมาก การแก้ปัญหด้วยวิธีการแก้สมการในเชิงวิเคราะห์ดังในตัวอย่างข้างต้น อาจจะไม่สามารถกระทำได้ ดังนั้นโดยทั่วไปการแก้ปัญหาลักษณะดังกล่าวจึงมักจะแก้ระบบสมการโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหา คราวนี้กลับมาพิจารณาถึงตัวฟังก์ชันที่ใช้ในการหาค่าตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็ม (สมการที่ 5.3)

ตัวแปรต้นหรือ ตัวแปรอิสระคือ ค่ามุมทั้ง 6 อันได้แก่  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$

ตัวแปรตามคือ ค่าพิกัดตำแหน่งของเครื่องวัดอันได้แก่  $X_0, Y_0$  และ  $Z_0$

จากสมการที่ 5.3 จะเห็นว่าตัวแปรตามมีถึง 3 ตัว อีกทั้งดังที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 4 ตัวเมตริกซ์การแปลงนอกจากจะให้ค่าตำแหน่งพิกัดทั้ง 3 แล้ว ตัวเมตริกซ์ยังสามารถให้ค่าตำแหน่งการหมุนของหัววัดได้อีกด้วย ดังนั้นในความเป็นจริงสมการที่ 5.3 นี้จึงมีตัวแปรตามถึง 6 ตัว คือค่าตำแหน่งพิกัดทั้ง 3 และค่าตำแหน่งการหมุนทั้ง 3 ตัวเช่นกัน แต่เนื่องจากฟังก์ชัน  $F$  เป็นสมการเมตริกซ์ดังนั้นสมการที่ 5.3 จึงเปรียบเสมือนระบบสมการที่มีสมการทั้งหมด 6 สมการเพียงแต่สัมประสิทธิ์ของทั้ง 6 สมการจะมีความสัมพันธ์กันอยู่ นอกจากนี้เนื่องจากซียู-ซีเอ็มเอ็ม มีค่าองศาความอิสระเท่ากับ 6 ดังนั้นที่ค่าตำแหน่งพิกัดเดียวกันก็อาจจะมีความแตกต่างกันได้มากมาย ทำให้เมื่อหากพิจารณาฟังก์ชัน  $F$  เฉพาะตัวแปรตามที่เป็นค่าตำแหน่งพิกัดทั้ง 3 และตัวแปรต้นที่เป็นค่ามุมทั้ง 6 แล้วฟังก์ชัน  $F$  ก็จะไม่เป็นฟังก์ชัน 1 ต่อ 1 ดังนั้นในกรณีที่สามารถรู้ได้แต่เพียงค่าของตำแหน่งพิกัด และค่ามุมทั้ง 6 แต่ไม่ทราบค่าตำแหน่งการหมุน จึงไม่สามารถที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของสมการได้ด้วยการแก้สมการทั้งในเชิงวิเคราะห์ หรือด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

#### 5.2.2.2 วิธีและหลักการแก้ปัญหา

เนื่องจากการวัดตำแหน่ง  $F$  การหมุนของหัววัด ไม่สามารถกระทำได้ง่าย ดังนั้นในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน  $F$  จึงสามารถที่จะหาชุดข้อมูลได้เพียงค่าตำแหน่งพิกัดทั้ง 3 และค่าตำแหน่งมุมของข้อต่อทั้ง 6 เท่านั้น อีกทั้งฟังก์ชัน  $F$  ยังเป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วย การจะหาค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันลักษณะเช่นนี้ และด้วยข้อมูลที่มีเพียงจำกัด วิธีการหนึ่งที่เหมาะสมก็คือ การใช้ระเบียบวิธีการถดถอยแบบน้อยสุด (least square regression) โดยใช้แนวทางของ



วิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear Regression) ด้วยเหตุผลต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1 ตัวฟังก์ชัน  $F$  เป็นฟังก์ชันซึ่งทราบโครงสร้าง มีเพียงแต่สัมประสิทธิ์ภายในเท่านั้นที่ยังไม่ทราบค่า
- 2 ตัวฟังก์ชัน  $F$  เป็นเหมือนระบบสมการที่มีสมการทั้งหมด 3 สมการ (สนใจเพียงสมการที่ให้ค่าตำแหน่งพิกัดทั้ง 3 เท่านั้น) โดยที่สัมประสิทธิ์ภายในของทั้ง 3 สมการมีความสัมพันธ์กันอยู่ การทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของทั้งระบบไปพร้อมๆ กันได้ ดังนั้นไม่ว่าสัมประสิทธิ์ของสมการทั้ง 3 จะมี หรือไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างไร ก็สามารถที่จะหาค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นได้
- 3 เนื่องจากในการทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น สามารถที่จะใช้ข้อมูลจำนวนที่มากเท่าไรก็ได้ (อย่างน้อยต้องมีมากกว่าจำนวนตัวไม่รู้ค่าที่ต้องการหา) ดังนั้นในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของฟังก์ชัน  $F$  ที่สามารถหาได้เพียงแต่ค่าตำแหน่งพิกัดเท่านั้น เราสามารถที่จะหาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ได้โดยใช้จำนวนข้อมูลที่ครอบคลุม และมากเพียงพอในการทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อชดเชยข้อมูลตำแหน่งการหมุนที่ไม่ทราบค่า เพื่อความเข้าใจจะขอยกตัวอย่างเช่น ในการทดลองจริง ที่ตำแหน่งพิกัดตำแหน่งหนึ่ง สามารถที่จะใช้แกนกลซียู-ซีเอ็มเอ็มวัดตำแหน่งนี้ได้ด้วยตำแหน่งการหมุนของปลายหัววัดที่ต่างๆ กันได้หลายค่า เมื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปคำนวณเพื่อหาเมตริกซ์การแปลง ข้อมูลเหล่านี้ก็จะชดเชยข้อมูลตำแหน่งการหมุนที่ไม่ทราบค่าได้ เนื่องจากที่ตำแหน่งพิกัดค่าหนึ่งไม่ว่าหัววัดจะมีตำแหน่งการหมุนอย่างไรก็จะมีเมตริกซ์การแปลงตัวเดียวเท่านั้น

ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงจะขออธิบายถึงหลักการของการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นอย่างโดยประมาณ ดังต่อไปนี้

หลักการสำคัญของทำการถดถอยไม่ว่าจะเป็นแบบเชิงเส้น หรือแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Linear or Nonlinear Regression) คือ การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในสมการที่ทำให้ผลรวมกำลังสองของเศษตกค้าง (The sum of the squares of the residuals) มีค่าน้อยที่สุดดังในสมการต่อไปนี้



$$\min_x \sum_{i=1}^n (F(x, xdata_i) - ydata_i)^2 \quad [5.8]$$

โดย  $x$  คือ ค่าพารามิเตอร์ หรือสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันที่ต้องการหาค่า

$xdata_i$  คือ ตัวแปรต้นของฟังก์ชันจากข้อมูลชุดที่  $i$

$ydata_i$  คือ ตัวแปรตามของฟังก์ชันที่ได้จากการวัดข้อมูลจริงชุดที่  $i$

เศษตกค้างในสมการที่ 5.8,  $F(x, xdata_i) - ydata_i$ , เกิดจากค่าผิดพลาดระหว่างค่าของตัวแปรตาม  $ydata_i$  ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการวัดจากระบบจริงกับค่าของตัวแปรตามซึ่งได้จากการคำนวณจากฟังก์ชัน  $F$  (ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ภายในเป็น  $x$ ) โดยใช้ค่าของตัวแปรต้น  $xdata_i$  เดียวกัน (จากนี้จะขอเรียกค่าตัวแปรตาม  $ydata_i$  ว่าเป็นค่าที่วัดได้ตัวที่  $i$ , เรียกตัวแปรต้น  $xdata_i$  ว่าเป็นตัวแปรต้นที่  $i$  และจะเรียก  $xdata_i$  กับ  $ydata_i$  ว่าเป็นข้อมูลชุดที่  $i$ )

ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่สามารถลดเศษตกค้างได้นั้นจำเป็นต้องอาศัยการคำนวณแบบทำซ้ำ (iteration) หลายๆ ครั้งโดยจะต้องมีการให้ค่าเริ่มต้นแก่พารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อเริ่มการคำนวณ ซึ่งมักจะพบว่าในการที่จะประสบผลสำเร็จในการหาค่าตอบนั้น สิ่งสำคัญอย่างมากก็คือการเดาค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์เหล่านั้นเอง

แนวทาง หรืออัลกอริทึม (algorithm) ในการที่จะลดผลรวมกำลังสองของเศษตกค้างลงได้นั้นมีมากมาย วิธีของเกาส์-นิวตัน (Gauss-Newton method) ก็เป็นวิธีการพื้นฐานวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการคำนวณได้ โดยกุญแจสำคัญของวิธีการนี้ก็คือ การใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) เพื่อหาค่าโดยประมาณของฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ต้องการ และเปลี่ยนฟังก์ชันไปให้อยู่ในรูปของสมการแบบเชิงเส้นแทน จากนั้นจึงใช้ทฤษฎีกำลังสองน้อยสุด (least square theory) เพื่อหาค่าโดยประมาณของค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการใหม่ที่เคลื่อนไปในทิศทางที่จะลดเศษตกค้างลง [4]

เพื่อที่จะอธิบายถึงวิธีการทำงานของอัลกอริทึมนี้ ขั้นแรกความสัมพันธ์ระหว่างสมการแบบไม่เชิงเส้นกับข้อมูลที่วัดได้ สามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$y_i = f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m) + e_i \quad [5.9]$$

โดย  $y_i$  คือ ค่าของตัวแปรตามที่วัดได้จากระบบจริง

$e_i$  คือ ค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม (random error)

$f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m)$  คือ ฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นของตัวแปรต้น  $x_i$  และมี  $a_0, a_1, \dots, a_m$  เป็นพารามิเตอร์ของฟังก์ชันเพื่อความสะดวก จะเขียนสมการที่ 5.9 ให้อยู่ในรูปแบบอย่างย่อโดยการละพารามิเตอร์ของฟังก์ชันทิ้งไปดังนี้

$$y_i = f(x_i) + e_i \quad [5.10]$$

ฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปการประมาณอันดับหนึ่งของอนุกรมเทย์เลอร์รอบๆ ค่าพารามิเตอร์ ดังตัวอย่างในกรณีของพารามิเตอร์ 2 ตัว ดังนี้

$$f(x_i)_{j+1} = f(x_i)_j + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 \quad [5.11]$$

โดย  $j$  คือ ค่าเริ่มต้น (initial guess)

$j+1$  คือ ค่าจากการทำนาย (prediction)

$$\Delta a_0 = a_{0,j+1} - a_{0,j}$$

$$\Delta a_1 = a_{1,j+1} - a_{1,j}$$

สมการที่ 5.11 สามารถที่จะแทนค่าลงในสมการที่ 5.10 ได้ดังนี้

$$y_i - f(x_i)_j = \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 + e_i \quad [5.12]$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์

$$\{D\} = [Z_j] \{\Delta A\} + \{E\} \quad [5.13]$$

โดยที่  $[Z_j]$  คือ เมตริกซ์ของอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชันที่คำนวณจากค่าเริ่มต้น,  $j$

$$[Z_j] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial a_0} & \frac{\partial f_1}{\partial a_1} \\ \frac{\partial f_2}{\partial a_0} & \frac{\partial f_2}{\partial a_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial a_0} & \frac{\partial f_n}{\partial a_1} \end{bmatrix}$$

$n$  เป็นจำนวนข้อมูล และ  $\frac{\partial f_i}{\partial a_k}$  คืออนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชันที่เทียบกับพารามิเตอร์ตัวที่  $k$  เมื่อคำนวณจากข้อมูลชุดที่  $i$  ส่วนเวกเตอร์  $\{D\}$  เป็นเวกเตอร์ของค่าความต่างระหว่างค่าจากการวัดกับค่าที่ได้จากฟังก์ชัน

$$\{D\} = \begin{Bmatrix} y_1 - f(x_1) \\ y_2 - f(x_2) \\ \vdots \\ y_n - f(x_n) \end{Bmatrix}$$

และเวกเตอร์  $\{\Delta A\}$  จะเป็นเวกเตอร์ที่เก็บค่าการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เอาไว้

$$\{\Delta A\} = \begin{Bmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta a_1 \end{Bmatrix}$$

โดยการประยุกต์ทฤษฎีกำลังสองน้อยสุดแบบเชิงเส้นเข้ากับสมการที่ 5.13 ทำให้ได้ว่า

$$[[Z_j]^T [Z_j]] \{\Delta A\} = [Z_j]^T \{D\} \quad [5.14]$$

ดังนั้นในการคำนวณจึงประกอบไปด้วยการแก้สมการที่ 5.14 เพื่อหาค่าของ  $\{\Delta A\}$  ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าของพารามิเตอร์ค่าใหม่ที่ใช้ในการคำนวณในครั้งต่อไปได้ดังใน

$$a_{0,j+1} = a_{0,j} + \Delta a_0 \quad [5.15]$$

และ

$$a_{1,j+1} = a_{1,j} + \Delta a_1 \quad [5.16]$$

จากนั้นขั้นตอนต่างๆ ที่ได้กล่าวมานี้ก็จะถูกนำมาคำนวณซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งผลลัพธ์เข้าสู่คำตอบที่ต้องการ โดยอาจจะพิจารณาจากค่าของ

$$|\varepsilon_a|_k = \left| \frac{a_{k,j+1} - a_{k,j}}{a_{k,j+1}} \right| 100\% \quad [5.17]$$

ว่าอยู่ในช่วงเกณฑ์ที่ต้องการแล้วหรือยัง เมื่อเข้าสู่เกณฑ์ที่ต้องการแล้วจึงหยุดการคำนวณ

ปัญหาใหญ่ในการทำซ้ำด้วยวิธีของเกาส์-นิวตัน ที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นก็คือ ความยากลำบากในการหาฟังก์ชันซึ่งเป็นอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชันที่ต้องการ

อย่างไรก็ตามในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ค่าอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชันที่ต้องการนั้นสามารถที่จะคำนวณได้โดยการประมาณค่าจากสมการ

$$\frac{\partial f_i}{\partial a_k} \approx \frac{f(x_i; a_0, \dots, a_k + h, \dots, a_m) - f(x_i; a_0, \dots, a_k, \dots, a_m)}{h} \quad [5.18]$$

โดยที่  $h$  คือ ช่วงของการดิฟเฟอเรนเชียลที่กำหนด

วิธีของเกาส์-นิวตันที่ใช้ในการทำการถดถอยนี้อาจจะมีข้อบกพร่องบางประการดังนี้

- 1 คำตอบอาจจะลู่อื่นซ้ำ
- 2 ทิศทางของการทำซ้ำมักจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา
- 3 ผลการคำนวณอาจจะไม่ลู่อื่นสู่คำตอบเสมอไป

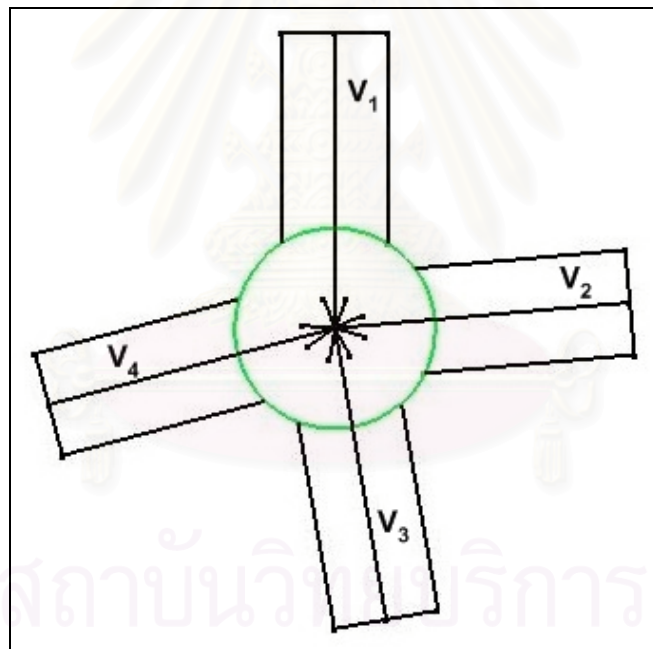
แต่ก็ได้มีการดัดแปลงวิธีการของเกาส์-นิวตัน เพื่อแก้ข้อบกพร่องต่างๆ ที่มี โดย , *Booth and Peterson, 1958; Hartley, 1961*, นอกจากนี้นอกเหนือจากวิธีการของเกาส์-นิวตันแล้ว ยังมีระเบียบวิธีอื่นๆ อย่างเช่น สเตียปเปลเดสเซนต์ (steepest descent) และ เลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ด (Levenberg-Marquardt) ที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น

### 5.2.2.3 วิธีนำหลักการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์จริง

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 5.2.2.2 ในการทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นจำเป็นที่จะต้องรู้ข้อมูลของระบบจริงซึ่งในที่นี้ก็คือ ค่าตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัด และค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อที่สัมพันธ์กับค่าตำแหน่งพิกัดที่ได้ นั้น สำหรับค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อนั้นสามารถหาได้จากเอนโค้ดเดอร์ที่ติดอยู่ในแต่ละข้อต่อได้ แต่ในส่วนของตำแหน่งของปลายหัววัดนั้นจำเป็นที่จะต้องอาศัยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบพิกัดฉากที่ทางห้องปฏิบัติการมีอยู่ช่วยในการหาค่าตำแหน่งดังนี้

เนื่องจากสิ่งที่ต้องการรู้คือ ตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัดในระบบพิกัดฉากที่อ้างอิงมาจากระบบแกนพิกัดที่ฐาน ดังนั้นในการสอบเทียบจึงไม่สามารถที่จะใช้อุปกรณ์ประเภทบล็อกเกจ (block gauge) หรือชิ้นงานมาตรฐานที่รู้ค่าพิกัดขนาดต่างๆ ที่แม่นยำแน่นอนได้ เพราะอุปกรณ์ที่กล่าวถึงเหล่านี้ใช้อ้างอิงได้เพียงค่าพิกัดทางขนาดต่างๆ เช่นความยาว, เส้นผ่าศูนย์กลางของรู และมุมระหว่างระนาบ ไม่สามารถที่จะใช้อ้างอิงค่าตำแหน่งที่เป็นจุดพิกัดได้

หากทำการพิจารณาจากเรขาคณิต (geometry) ของทรงกลม จะพบว่าเมื่อนำทรงกระบอกมาครอบบนทรงกลมไม่ว่าจะเป็นทิศทางใด ระยะทางจากทรงกระบอกไปยังจุดศูนย์กลางของทรงกลมจะยังคงเท่าเดิมเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 เวกเตอร์  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  และ  $V_4$  เป็นเวกเตอร์ที่ชี้จากจุดกึ่งกลางทรงกระบอกไปยังจุดศูนย์กลางของทรงกลม ซึ่งจะเห็นว่าเวกเตอร์ทั้ง 4 ตัวจะเป็นเวกเตอร์ที่มีทั้งขนาดและทิศทางเดียวกัน เมื่ออ้างอิงกับทรงกระบอก ดังนั้นหากนำหัววัดของซียู-ซีเอ็มเอ็มที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมาครอบบนทรงกลมที่มีความแม่นยำทางรูปทรง และขนาดสูง และรู้ค่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางได้อย่างแม่นยำ ไม่ว่าจะครอบปลายหัววัดลงบนทรงกลมนี้ในทิศทางใดก็ตาม ก็จะได้เวกเตอร์คงที่ตัวหนึ่งที่อ้างอิงจากหัววัดชี้ไปยังจุดศูนย์กลางของทรงกลมนี้เสมอ ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าตำแหน่งพิกัดของจุดศูนย์กลางของทรงกลมนี้ในการอ้างอิงเป็นค่าตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัดเพื่อใช้ในการสอบเทียบได้



รูปที่ 5.10 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์บนทรงกระบอกกับจุดศูนย์กลางทรงกลม

ด้วยเหตุผลต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วในขั้นต้น ดังนั้นในการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของซียู-ซีเอ็มเอ็มจึงจะใช้ทรงกลมสอบเทียบ (calibration sphere) ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบพิกัดฉากที่ทางห้องปฏิบัติการมีอยู่ ซึ่งต่อจากนี้จะขอเรียกว่า ซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป (Brown&Sharpe) ดังแสดงในรูปที่ 5.11 และ 5.12 ในการอ้างอิงค่าตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัด



รูปที่ 5.11 รูปแสดงทรงกลมสอบเทียบของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป



รูปที่ 5.12 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป

ในการทดลองจะใช้ซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปในการหาตำแหน่งพิกัดของจุดศูนย์กลางของทรงกลมสอบเทียบ จากนั้นจึงใช้ซีเอ็มเอ็มมาทำการวัดตำแหน่งของทรงกลมนี้โดยการครอบหัววัดซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกรวย (ใช้หัววัดที่เป็นทรงกรวยแทนเนื่องจากการนำทรงกรวยมาครอบลงบนทรงกลมจะมีความสนิท และแน่น



นอกจากการใช้ทรงกระบอกลบ) ลงบนทรงกลมสอบเทียบพร้อมทั้งจัดบันทึกค่าตำแหน่งพิกัดของจุดศูนย์กลางทรงกลมนั้น และค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อของซียู-ซีเอ็มเอ็มในขณะนั้น ซึ่งเป็นค่าของตัวแปรตาม และตัวแปรต้น ที่ได้จากการทดลองจริงสามารถนำไปใช้ในการทำการถดถอยเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากนั้นก็เปลี่ยนตำแหน่งของทรงกลมสอบเทียบไปยังตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ในช่วงที่ต้องการทำการสอบเทียบ แล้วทำการวัดค่าต่างๆ ที่ได้กล่าวมาในขั้นต้นในทุกตำแหน่งของทรงกลมสอบเทียบ ก็จะทำให้ได้ชุดข้อมูลของตัวแปรต้น และตัวแปรตามที่สามารถนำไปใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ แต่เนื่องจากค่าตำแหน่งพิกัดของจุดศูนย์กลางทรงกลมที่วัดด้วยซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปนั้นจะอ้างอิงจากระบบแกนพิกัดของตัวซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป ดังนั้นข้อมูลตำแหน่งจุดศูนย์กลางทรงกลมที่วัดได้ จะต้องทำการแปลงให้มาเป็นระบบแกนพิกัดของซียู-ซีเอ็มเอ็มก่อนนำไปคำนวณ แต่เนื่องจากฐานสำหรับวางชิ้นงานของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถที่จะวัดตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็ม เทียบกับตำแหน่งของทรงกลมสอบเทียบที่ใช้ในการทดลองได้อย่างแม่นยำ ดังแสดงในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 รูปแสดงตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็มและซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปขณะทำการทดลอง

จากรูปจะเห็นว่าซียู-ซีเอ็มเอ็มมีขนาดใหญ่ หากนำไปตั้งบนฐานจับยึดชิ้นงานของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป ก็จะทำให้เหลือเนื้อที่ไม่เพียงพอที่จะทำการสอบเทียบได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไม่สามารถที่จะทำการย้ายระบบแกนพิกัดของข้อมูลที่ได้จากการทดลองให้ไปอยู่ในระบบแกนพิกัดของซียู-ซีเอ็มเอ็มได้ ดังนั้นจึงต้องสร้างระบบแกนพิกัดใหม่ขึ้นมาอีกระบบหนึ่งที่ยังไม่รู้ตำแหน่งที่แน่นอน (ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการเทียบแกนจากแกนศูนย์ของซียู-ซีเอ็มเอ็มมายังระบบแกนนี้จะติดเป็นตัวไม่รู้ค่าทั้งหมด) เพื่อใช้ในการย้ายข้อมูลที่ได้ให้มาอยู่ในระบบแกนนี้แทนก่อน แล้วรวมระบบแกนนี้เข้าไปอยู่ในระบบสมการที่ใช้ในการหาค่าตำแหน่งพิกัดจุดปลายหัววัดของซียู-ซีเอ็มเอ็ม และใช้สมการใหม่นี้ในการทำการถดถอยแทน ดังนั้นเมื่อทำการสอบเทียบเสร็จแล้ว ค่าตำแหน่งพิกัดต่างๆ ที่ซียู-ซีเอ็มเอ็มวัดได้ก็จะอ้างอิงมาจากระบบแกนที่สร้างขึ้นใหม่นี้ แทนที่จะเป็นระบบแกนที่ศูนย์ ของซียู-ซีเอ็มเอ็มที่ได้กำหนดขึ้น

พิจารณาสมการที่ 5.2 อีกครั้ง

$${}^0P = {}^0T \cdot {}^6P \quad [5.2]$$

เวกเตอร์  ${}^0P$  เป็นเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งของปลายหัววัดซึ่งอ้างอิงจากระบบแกนที่ศูนย์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม หากต้องการย้ายระบบแกนจากระบบแกนของซียู-ซีเอ็มเอ็มนี้ไปยังระบบแกนที่สร้างขึ้นใหม่ จะต้องคูณเมตริกซ์การแปลงอีกหนึ่งเทอมดังนี้ [3]

$${}^B P = {}^B T \cdot {}^0 T \cdot {}^6 P \quad [5.19]$$

โดย  ${}^B T$  คือเมตริกซ์การแปลงที่ใช้ในการย้ายระบบแกนจากระบบแกนที่ศูนย์ของซียู-ซีเอ็มเอ็มไปเป็นระบบแกนที่สร้างขึ้นใหม่

เมตริกซ์การแปลง  ${}^B T$  จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

$${}^B T = \left[ \begin{array}{ccc|c} {}^B R & & & {}^B P_{0Origin} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad [5.20]$$

โดย

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

$$\text{และ } {}^B P_{0Origin} = \begin{bmatrix} x_{0Origin} \\ y_{0Origin} \\ z_{0Origin} \end{bmatrix}$$

เมตริกซ์  ${}^B R$  เป็นเมตริกซ์ที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งการหมุนของระบบแกนของซียู-ซีเอ็มเอ็มเทียบกับระบบแกนที่ตั้งขึ้นใหม่ โดยตั้งตามระบบมุมของออยเลอร์ (Euler angle) ซึ่งจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า 3 ตัวคือ  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  สำหรับเวกเตอร์  ${}^B P_{0Origin}$  คือ เวกเตอร์ที่ตั้งตำแหน่งจุดกำเนิดของระบบแกนของซียู-ซีเอ็มเอ็มอ้างอิงจากระบบแกนใหม่ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าอีก 3 ตัวคือ  $x_{0Origin}$ ,  $y_{0Origin}$  และ  $z_{0Origin}$  ซึ่งเป็นระยะห่างของจุดกำเนิดของระบบแกนซียู-ซีเอ็มเอ็มในแนวแกนต่างๆ อ้างอิงจากระบบแกนใหม่

จากการย้ายระบบแกนซียู-ซีเอ็มเอ็มไปยังระบบแกนใหม่นี้ทำให้ระบบสมการที่ใช้ในการหาตำแหน่งจุดปลายของหัววัดมีพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้นมาอีก 6 ตัวแต่ทำให้ไม่จำเป็นต้องรู้ตำแหน่งพิกัดของซียู-ซีเอ็มเอ็มเทียบกับระบบแกนพิกัดที่ตั้งขึ้นใหม่ถูกต้องแม่นยำนักเนื่องจากตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็มเมื่อเทียบกับตำแหน่งของระบบแกนใหม่ที่สร้างขึ้นแล้วนั้นได้ถูกแปลงให้เป็นเมตริกซ์การแปลง  ${}^B T$  ซึ่งสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้จากการทดลอง และทำการถอดถอดระบบสมการที่ใช้ในการหาตำแหน่งทั้งหมด

เนื่องจากระบบแกนใหม่ที่ตั้งขึ้นนี้จะกลายเป็นระบบแกนที่ใช้ในการอ้างอิงค่าตำแหน่งพิกัดที่เครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มวัดได้แทนระบบแกนที่ศูนย์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม ดังนั้นตำแหน่งที่ระบบแกนใหม่นี้ตั้งอยู่จึงควรที่จะอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งแกนที่ศูนย์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม และเพื่อให้การย้ายข้อมูลจากระบบแกนของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปมาอยู่ในระบบแกนใหม่นี้ทำได้โดยไม่ยากนักจึงจะตั้งให้ตำแหน่งหมุนของระบบแกนใหม่นี้ซ้อนทับกับระบบแกนของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป ดังนั้นในการทำการสอบเทียบจึงจะติดตั้งซียู-ซีเอ็มเอ็มให้ตำแหน่งแกนศูนย์ของซียู-ซีเอ็มเอ็มมีตำแหน่งการหมุนที่ใกล้เคียงกับของระบบแกนของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป เพื่อให้ระบบแกนที่ศูนย์ของซียู-ซีเอ็มเอ็มมีตำแหน่งการหมุนที่ใกล้เคียงกับของระบบแกนที่ตั้งขึ้นใหม่นี้

ด้วยเหตุนี้ในการย้ายข้อมูลที่อยู่ในระบบแกนของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปให้มาอยู่ในระบบแกนใหม่ที่ตั้งขึ้นนี้จึงสามารถทำได้โดยเพียงวัดระยะโดยประมาณในทั้ง 3 แนวแกน ( $x, y$  และ  $z$ ) ระหว่างจุดกำเนิดของระบบแกนที่ศูนย์ของซียู-ซีเอ็มเอ็มกับจุดศูนย์กลางของทรงกลมสอบเทียบที่ทำการทดลองเป็นตำแหน่งแรก แล้วจึงกำหนดให้ค่าระยะทางที่วัดได้ทั้ง 3 แนวแกนนี้เป็นค่าตำแหน่งพิกัดของทรงกลมตำแหน่งแรกนี้ ในระบบพิกัดของซียู-ซีเอ็มเอ็มที่ตั้งขึ้นใหม่ได้เลย จากนั้นจึงย้ายระบบพิกัดของตำแหน่งทรงกลมที่เหลือมายังระบบพิกัดใหม่ของซียู-ซีเอ็มเอ็มโดยอ้างอิงมาจากทรงกลมตำแหน่งแรก

ดังนั้นจากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด สมการที่ 5.19 จะเป็นสมการที่ผู้วิจัยใช้ในการทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง โดยข้อมูลที่ต้องการจากการทดลองจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ค่าตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัดซึ่งจะใช้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของทรงกลมสอบเทียบเป็นค่าอ้างอิงแทน และค่าตำแหน่งมุมของข้อต่อทั้ง 6 ของซียู-ซีเอ็มเอ็มที่คู่กับข้อมูลของค่าพิกัดของหัววัดนั้น ส่วนค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าซึ่งจะมีทั้งหมด 30 ตัวอันประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ของเมตริกซ์การแปลงของซียู-ซีเอ็มเอ็ม จำนวน 24 ตัวอันได้แก่  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, x_p, y_p, z_p, \Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, \Delta\theta_5$  และ  $\Delta\theta_6$  โดยพารามิเตอร์  $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, \Delta\theta_5$  และ  $\Delta\theta_6$  จะเป็นค่าความเหลื่อม (offset) ระหว่างตำแหน่งศูนย์จริงของข้อต่อของซียู-ซีเอ็มเอ็มกับตำแหน่งศูนย์ของเอนโค้ดเดอร์ในแต่ละข้อต่อ ส่วนพารามิเตอร์ที่เหลืออีก 6 ตัวจะเป็นของเมตริกซ์การแปลงที่ใช้ในการย้ายแกนดังที่ได้กล่าวไปแล้วซึ่งจะประกอบไปด้วย  $\alpha, \beta, \gamma, x_{0Origin}, y_{0Origin}$  และ  $z_{0Origin}$

อันที่จริงแล้วพารามิเตอร์ของเมตริกซ์การแปลงของซียู-ซีเอ็มเอ็มนั้น ยังจะต้องมี  $a_0, \alpha_0$  และ  $d_1$  แต่เนื่องจากค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นของระบบแกนที่ศูนย์ของซียู-ซีเอ็มเอ็มซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดให้ระบบแกนนี้ซ้อนทับกับระบบแกนที่หนึ่งดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.9 ทำให้ค่าของ  $a_0, \alpha_0$  และ  $d_1$  มีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมดและไม่จำเป็นต้องทำการถดถอยเพื่อหาค่าของพารามิเตอร์เหล่านี้

ในการทำการถดถอยนั้น เนื่องจากโปรแกรมแมทแลบ (Matlab) มีฟังก์ชันที่สามารถทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นผู้วิจัยจึงจะใช้ฟังก์ชันในโปรแกรมแมทแลบเป็นหลักในการทำการถดถอย ซึ่งในที่นี้ก็คือฟังก์ชัน lsqcurvefit ฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันสำหรับแก้ปัญหาอนลิเนียร์เคิร์ฟฟิตติ้ง (nonlinear curve-fitting) โดยใช้การถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดดังในสมการ

$$\min_x \frac{1}{2} \|F(x, xdata) - ydata\|_2^2 = \frac{1}{2} \sum_i (F(x, xdata_i) - ydata_i)^2 \quad [5.21]$$

ฟังก์ชัน lsqcurvefit จะรับค่าตัวแปรต้น,  $xdata$  และค่าตัวแปรตามที่ได้จากระบบจริง (observed output),  $ydata$  เป็นค่าอินพุต (input) ของฟังก์ชัน แล้วจึงจะหาค่าพารามิเตอร์  $x$  ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ภายในฟังก์ชัน  $F$  ที่ทำให้สมการที่ 5.21 เป็นจริง

ในการเรียกใช้งานฟังก์ชัน lsqcurvefit นั้นฟังก์ชันจะต้องการพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

```
x = lsqcurvefit(fun,x0,xdata,ydata,lb,ub,options)
```

```
[x,resnorm,residual,exitflag,output,lambda,jacobian] = lsqcurvefit(...)
```

จะเห็นว่าฟังก์ชัน lsqcurvefit นอกจากจะให้ค่าเอาต์พุต  $x$  แล้ว ฟังก์ชันนี้ยังสามารถที่จะให้ค่าเอาต์พุตอื่นๆ อันได้แก่ resnorm, residual, exitflag, output, lamda และ jacobian โดยในที่นี้จะขออธิบายแต่เพียงค่าเอาต์พุตที่สำคัญๆ เท่านั้นดังนี้

resnorm เป็นค่า

residual เป็นค่าความผิดพลาดระหว่างค่าของฟังก์ชันกับค่าที่ได้จากการวัดเมื่อฟังก์ชัน  $F$  มี  $x$  เป็นสัมประสิทธิ์

$$F(x, xdata) - ydata$$

exitflag จะเก็บค่าที่อธิบายสาเหตุของการสิ้นสุดของการทำการทดลอง

โดยถ้าหากค่าที่ได้มากกว่า 0 ก็แสดงว่าคำตอบที่ได้ลู่เข้า แต่ถ้า

หากค่าที่ได้น้อยกว่า 0 ก็แสดงว่าคำตอบของฟังก์ชันไม่ลู่เข้า

output จะเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำการทดลองเอาไว้

สำหรับค่าอินพุตที่ฟังก์ชัน lsqcurvefit ต้องการเป็นหลักก็คือ fun, x0, xdata และ ydata ส่วน lb, ub และ options จะเป็นพารามิเตอร์เสริมเพื่อใช้ในการคำนวณ โดยมีรายละเอียดดังนี้

fun คือฟังก์ชันที่ต้องการจะทำอนลิเนียร์เคิร์ฟฟิตติ้ง ฟังก์ชันนี้จะรับค่า  $x$

แล้วส่งเวกเตอร์  $F$  ซึ่งเป็นค่าของฟังก์ชันกลับมา

x0 เป็นค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์  $x$  ที่ใช้ในการเริ่มการทำซ้ำ

xdata เป็นเมตริกซ์ที่เก็บข้อมูลตัวแปรต้นเอาไว้

ydata เป็นเวกเตอร์ที่เก็บค่าตัวแปรตามที่ได้จากการทดลอง



lb และub เป็นขีดจำกัดล่าง และบนของสัมประสิทธิ์  $x$  ที่ต้องการหา  
options จะเป็นตัวกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และอัลกอริทึมที่ใช้ในการ  
ทำการทดลอง

อัลกอริทึมที่ฟังก์ชัน lsqcurvefit ใช้นั้น สามารถที่จะเลือกใช้ได้โดยการตั้งอัลกอริทึม  
ที่ต้องการเก็บไว้ในพารามิเตอร์ options ซึ่งจะมีอัลกอริทึมหลักๆ คือ

1 ลาร์จสเกลออพติไมซ์เซชัน (Large-Scale Optimization) เป็นอัลกอริทึม  
มาตรฐานของฟังก์ชันซึ่งจะใช้วิธีซัพสเปซทรัสต์รีเจียน (subspace trust  
region method) และตั้งอยู่บนพื้นฐานของวิธีอินทีเรียรีเฟลคทีฟนิวตัน  
(interior-reflective Newton) [5] และ[6]

2 มีเดียมสเกลออพติไมซ์เซชัน (Medium-Scale Optimization) เป็นอัลกอริ  
ทึมที่ใช้วิธีของเลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ดท์ (Levenberg-Marquardt method  
with line-search) [7], [8] และ[9] หรือสามารถเลือกให้ใช้วิธีของเกาส์-  
นิวตัน (Gauss-Newton method with line-search) [10] ก็ได้

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะขอจบลงเพียงแนวทางที่ใช้ในการทำการทดลอง  
และการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของสมการที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งของปลาย  
หัววัดในระบบพิกัดฉากเพียงเท่านั้น ส่วนผลการทดลองและการคำนวณจริงจะขอยก  
ไปกล่าวถึงในบทที่ 8 ทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตามเพื่อความเข้าใจยิ่งขึ้นจึงจะขอสรุปวิธี  
ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบสมการที่ใช้ในการหาค่าตำแหน่งปลายของ  
หัววัดไว้ดังนี้

ขั้นที่ 1 ทำการตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ในแต่ละข้อต่อ โดยตั้งให้ใกล้เคียงกับ  
ตำแหน่งศูนย์จริงของแต่ละข้อต่อของซียู-ซีเอ็มเอ็มเอ็ม ดังในรูปที่ 5.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



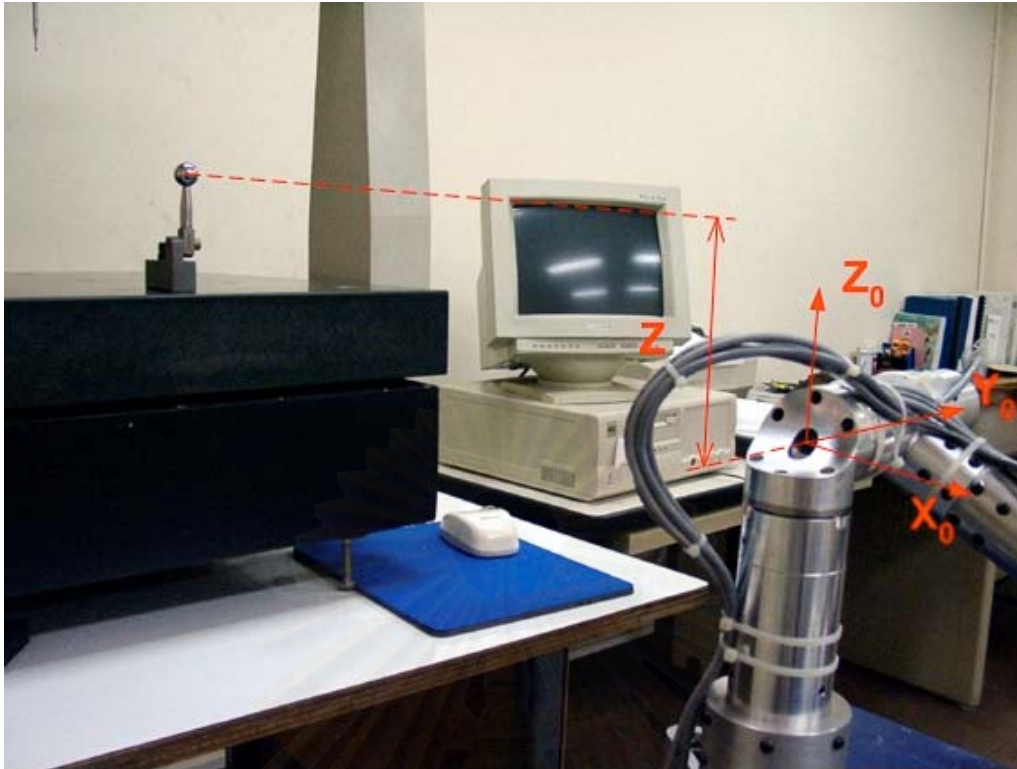


รูปที่ 5.14 รูปแสดงตำแหน่งของการตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโคเดอร์ของทุกข้อต่อ

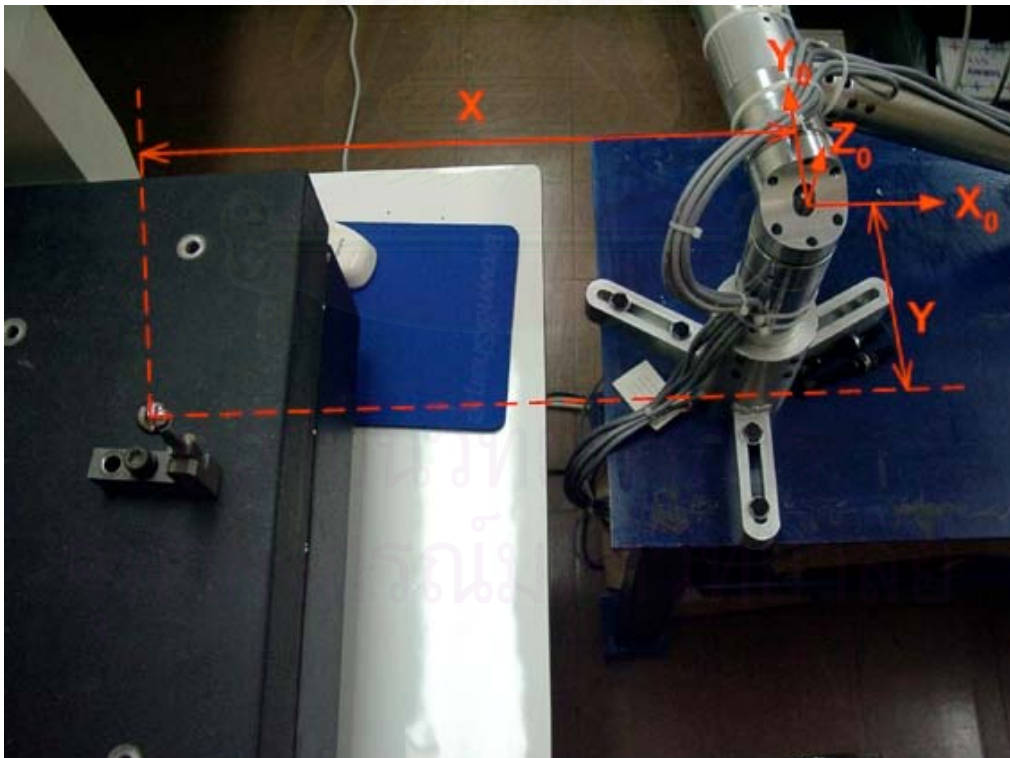
ขั้นที่ 2 วางตำแหน่งทรงกลมสอบเทียบบนโต๊ะของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปให้อยู่ในขอบเขตที่ต้องการสอบเทียบของซียู-ซีเอ็มเอ็ม จากนั้นจึงใช้ซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปทำการวัดตำแหน่งจุดศูนย์กลางของทรงกลมแล้วทำการบันทึกค่าตำแหน่งที่อ่านได้จากซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปเป็นข้อมูลชุดที่หนึ่ง

ขั้นที่ 3 วัดตำแหน่งโดยประมาณ ระหว่างจุดศูนย์กลางทรงกลมข้างต้นกับตำแหน่งของจุดกำเนิดของระบบแกนซียู-ซีเอ็มเอ็มในแนวแกนทั้ง 3 แนว ( $x$ ,  $y$  และ  $z$ ) แล้วบันทึกค่าไว้ ดังในรูปที่ 5.15 และ 5.16

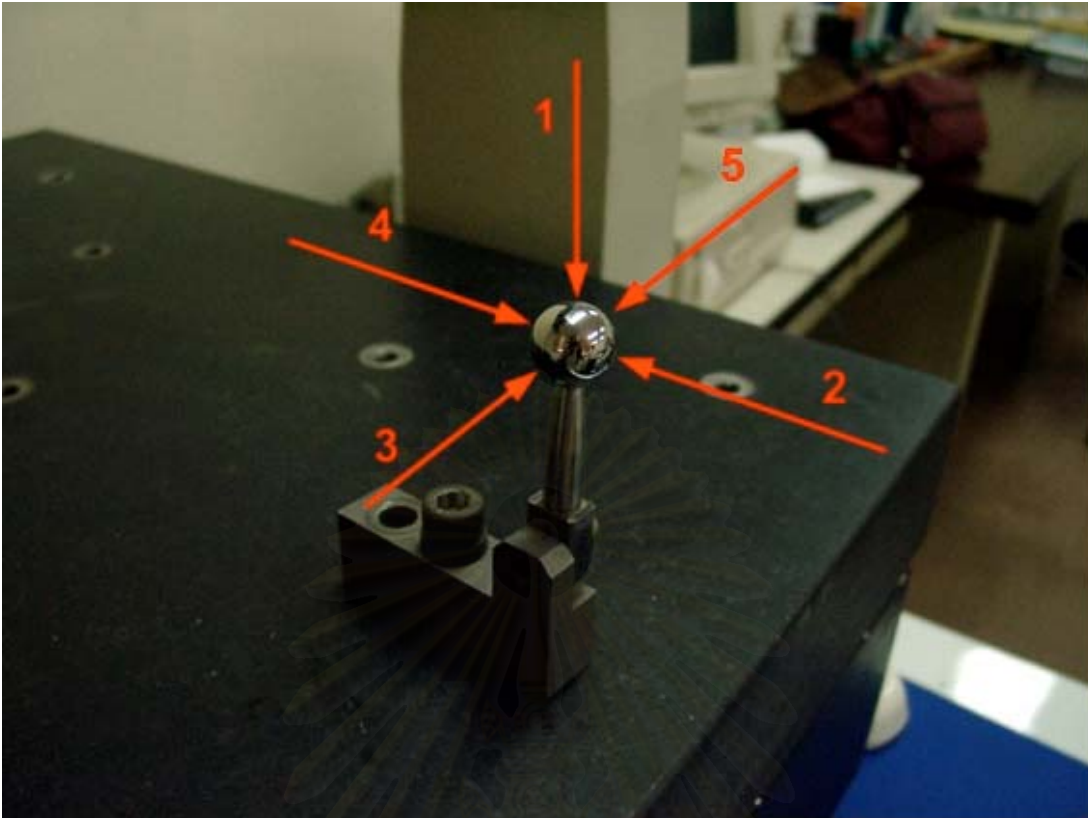
ขั้นที่ 4 นำปลายหัววัดที่มีลักษณะเป็นทรงกรวยของซียู-ซีเอ็มเอ็มมาวัดตำแหน่งของทรงกลมข้างต้น โดยการครอบหัววัดลงบนทรงกลมให้แนบสนิทแล้วจึงสั่งให้โปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มบันทึกข้อมูลของตำแหน่งข้อต่อทั้ง 6 เอาไว้เป็นข้อมูลชุดที่หนึ่ง ทั้งนี้ที่ตำแหน่งทรงกลมตำแหน่งหนึ่งจะทำการวัดด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม 5 ครั้ง โดยครั้งที่หนึ่งจะวัดที่ตำแหน่งบนสุดของทรงกลม (North pole) และอีก 4 ครั้งที่เหลือจะทำการวัดที่ตำแหน่งด้านข้างทั้ง 4 ของทรงกลม เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ของทรงกลมสอบเทียบทั้งหมด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.15 รูปแสดงการวัดตำแหน่งโดยประมาณระหว่างทรงกลมกับซียู-ซีเอ็มเอ็มในแนวแกน Z



รูปที่ 5.16 รูปแสดงการวัดตำแหน่งโดยประมาณระหว่างทรงกลมกับซียู-ซีเอ็มเอ็มในแนวแกน X-Y



รูปที่ 5.17 รูปแสดงรูปแบบทิศทางในการวัดโดยเรียงลำดับตามตัวเลข

ขั้นที่ 5 ย้ายตำแหน่งทรงกลมไปยังตำแหน่งอื่นๆ โดยให้ครอบคลุมขอบเขตที่ต้องการสอบเทียบทั้งหมด แล้วทำตามขั้นตอนที่ 2 และ 4 โดยจะต้องเปลี่ยนตำแหน่งทรงกลมอย่างน้อยทั้งหมด 30 ตำแหน่งเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหาไปถึง 30 ตัวด้วยกัน

ขั้นที่ 6 นำข้อมูลตำแหน่งของจุดศูนย์กลางทรงกลมทั้งหมดที่อ้างอิงจากซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปมาแปลงให้มาอยู่ในระบบแกนพิกัดใหม่ซึ่งมีตำแหน่งการหมุนซ้อนทับกับระบบแกนของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปแต่จะมีการเลื่อนตำแหน่งของจุดกำเนิด (translation) ไปตั้งอยู่ใกล้เคียงกับจุดกำเนิดของระบบแกนที่ศูนย์ของซีเอ็มเอ็มเอ็ม โดยการแปลงระบบแกนพิกัดนี้สามารถทำโดยการอ้างอิงตำแหน่งจากทรงกลมตำแหน่งแรกที่ทำกรทดลอง ซึ่งได้มีการวัดตำแหน่งโดยประมาณจากจุดศูนย์กลางไปยังจุดกำเนิดของระบบแกนซีเอ็มเอ็มเอ็มในขั้นตอนที่ 3 เอาไว้แล้วแต่เพื่อความเข้าใจยิ่งขึ้นให้ศึกษาได้จากผลการทดลองจริงในบทที่ 8

ขั้นที่ 7 นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการ



## บทที่ 6

### โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

จากเนื้อหาในบทต่างๆ ก่อนหน้านี้ที่ได้กล่าวถึงในส่วนของหลักการของเครื่องวัด, อุปกรณ์ตรวจรู้ และหลักการออกแบบไปแล้วนั้น สิ่งจำเป็นอีกสิ่งหนึ่งซึ่งไม่อาจขาดไปได้เลยก็คือ อุปกรณ์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด ดังนั้นในบทนี้จะขอกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับสัญญาณเพื่อนำมาประมวลผลจากเอนโค้ดเดอร์ และตัวโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัดที่ได้สร้างขึ้น

#### 6.1 การรับและประมวลผลสัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์

การรับและประมวลผลสัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์จะทำหน้าที่ในการติดต่อรับสัญญาณขาออกที่ได้มาจากเอนโค้ดเดอร์ แล้วนำมาประมวลผลเพื่อหาทิศทางการหมุน, ตำแหน่ง, ความเร็ว และเก็บข้อมูลของตัวเอนโค้ดเดอร์ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้การรับและประมวลผลสัญญาณ “เอสพีไอทู พีซีไอ คอนโทรลเลอร์ (SPII PCI Controller)” ของบริษัท ACS-Tech80 ซึ่งนอกจากจะเป็นการรับและประมวลผลสัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์แล้ว ยังสามารถใช้เป็นการควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) และสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor) ได้อีกด้วย แต่ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเพียงหน้าที่หลักในการรับและประมวลผลสัญญาณที่ได้จากเอนโค้ดเดอร์เท่านั้น

##### 6.1.1 เอนโค้ดเดอร์การ์ด เอสพีไอทู พีซีไอ คอนโทรลเลอร์ (SPII PCI Controller)

การ์ดเอสพีไอทู (ดังแสดงในรูปที่ 6.1) จะสามารถรับสัญญาณมาจากเอนโค้ดเดอร์ได้พร้อมกัน 8 แกน (เอนโค้ดเดอร์ 8 ตัว) และติดต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางพีซีไอบัส (PCI Bus) โดยมีคุณสมบัติอื่นๆ (Specification) ดังต่อไปนี้

สภาพแวดล้อมในการใช้งาน

ช่วงอุณหภูมิทำงาน : 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส

ช่วงอุณหภูมิในการเก็บรักษา : -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส

ความชื้น : 90 เปอร์เซ็นต์ (90%, non-condensing)

ปริมาณไฟที่ต้องการ

กำลังไฟหลัก : +3.3 VDC +/-0.3V@2.0A\*

: +5VDC +/-0.25V@125mA

: +/-12VDC +/-0.6V@200mA

\* การ์ดจะใช้ไฟ 3.3 โวลท์ จาก พีซีไอบัสเป็นกำลังไฟหลัก

การติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์

บัส (Bus) ที่ใช้ในการติดต่อ : PCI BUS

ความเร็วในการส่งข้อมูล : 32 บิต ที่ความเร็ว 33 เมกกะเฮิร์ต

: โลกคอลบัส (Local Bus) ทำงานที่ความเร็ว 33 เมกกะเฮิร์ต

การติดต่อกับเอนโค้ดเดอร์

ชนิดของเอนโค้ดเดอร์ : อินครีเมนทอลเอนโค้ดเดอร์แบบ 3 ช่องสัญญาณ

ชนิดของสัญญาณขาเข้า : Differential Line-Driver RS422

ความถี่สูงสุด : 20 เมกกะเฮิร์ต

จำนวนสัญญาณสูงสุดที่นับได้ : +/-140x10<sup>12</sup> เคานท์ (Counts)

ค่าความถูกต้อง : +/-1 เอนโค้ดเดอร์เคานท์ (Encoder Count)



รูปที่ 6.1 รูปแสดงเอนโค้ดเดอร์การ์ดเอสพีไอทู (SPii PCI Controller Card)

### 6.1.2 การใช้งานการ์ดเอสพีไอทู

ในการใช้งานการ์ดเอสพีไอทูนี้สามารถควบคุมการทำงานได้โดยการใช้ภาษาซี หรือ วิซวลซี (Visual C) เรียกฟังก์ชันที่ทางบริษัทได้พัฒนาขึ้น โดยในที่นี้จะแสดงตัวอย่างฟังก์ชันที่สามารถเรียกใช้งานได้เฉพาะที่ได้มีการนำมาใช้ในโปรแกรมที่ได้สร้างขึ้นเท่านั้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 6.1.2.1 ฟังก์ชัน spii\_Open

ฟังก์ชันนี้จะทำหน้าที่เชื่อมการติดต่อสื่อสารระหว่างการ์ดตัวที่กำหนดและเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางพีซีไอบัส โดยถ้าหากสามารถเชื่อมการติดต่อได้สำเร็จ ฟังก์ชันนี้จะให้พอยน์เตอร์ (Pointer) ที่ชี้ไปยังการ์ดที่สามารถเชื่อมการติดต่อด้วยคำสั่งนี้

#### 6.1.2.2 ฟังก์ชัน spii\_Close

ฟังก์ชันนี้จะทำหน้าที่ตัดการติดต่อสื่อสารระหว่างการ์ดตัวที่กำหนดและเครื่องคอมพิวเตอร์ หากตัดการติดต่อได้สำเร็จฟังก์ชันก็จะคืนลอจิคอลบอร์ดแอดเดรส (Logical Board Address, LBA) ให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์

#### 6.1.2.3 ฟังก์ชัน spii\_InitializeAxis

ฟังก์ชันนี้จะใช้ในการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับแกนที่จะทำการควบคุม โดยจะต้องระบุว่าจะกำหนดค่าให้กับแกนใดและเป็นของการ์ดตัวไหน

#### 6.1.2.4 ฟังก์ชัน spii\_SetScaleFactor

ฟังก์ชันนี้จะใช้ในการกำหนดอัตราส่วนระหว่างหน่วยนับที่กำหนดขึ้นเองต่อจำนวนสัญญาณของเอนโค้ดเดอร์ดังนี้

$$ScaleFactor = \frac{unit}{count} \quad [6.1]$$

#### 6.1.2.5 ฟังก์ชัน spii\_SetActualPos

ฟังก์ชันนี้จะใช้ในการกำหนดค่าตำแหน่งของระบบ (ตามหน่วยที่ได้กำหนดขึ้นมาเอง) โดยมากจะใช้ฟังก์ชันนี้ในระบบควบคุมที่ควบคุมการเคลื่อนที่ทั้งแบบควบคุมตำแหน่ง และควบคุมความเร็ว เพื่อกำหนดตำแหน่งเริ่มต้น (Home) ของระบบควบคุม

#### 6.1.2.6 ฟังก์ชัน spii\_GetActualPos

ฟังก์ชันนี้ใช้เพื่อดึงค่าตำแหน่งของระบบในขณะนั้นออกมาจากการ์ดเอสพีไอทู

#### 6.1.2.7 ฟังก์ชัน spii\_SetEncoderType

ฟังก์ชันนี้ใช้เพื่อกำหนดชนิดของเอนโค้ดเดอร์ที่ส่งสัญญาณเข้าการ์ด



### 6.1.2.8 ฟังก์ชัน spii\_SetEncoderFreq

ฟังก์ชันนี้จะทำหน้าที่ในการกำหนดความถี่สูงสุดในการนับสัญญาณที่ได้จากเอนโค้ดเดอร์โดยการ์ดนี้สามารถนับสัญญาณความถี่สูงสุดได้ถึง 60 เมกกะเฮิร์ต

### 6.1.2.9 ฟังก์ชัน spii\_SetEncoderValue

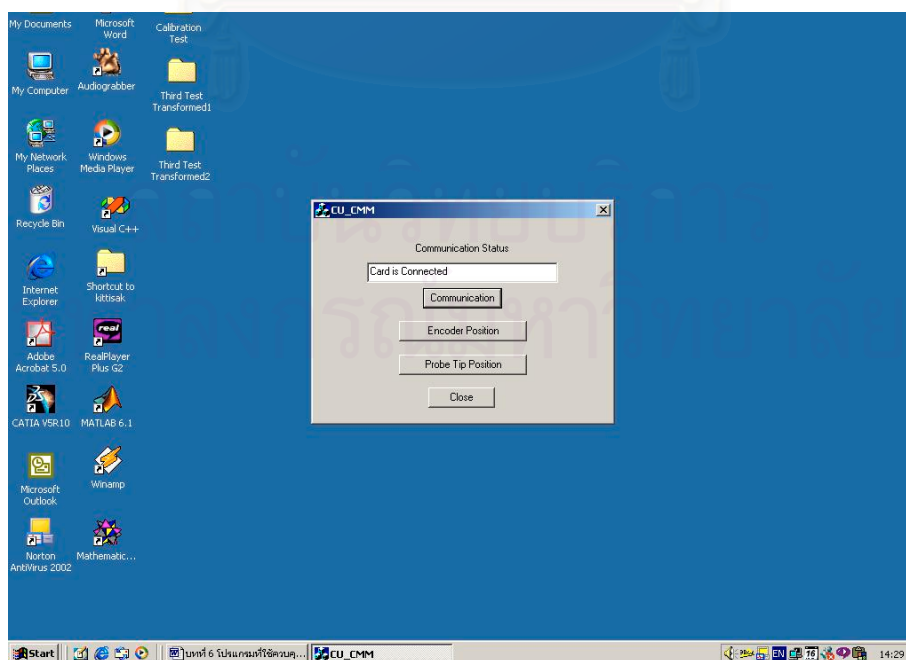
ฟังก์ชันนี้จะใช้ในการกำหนดตำแหน่งให้กับเอนโค้ดเดอร์ จึงมักจะถูกเรียกใช้เมื่อต้องการตั้งค่าเริ่มต้นให้กับเอนโค้ดเดอร์ (Reset Encoder) ค่าที่สามารถกำหนดให้กับเอนโค้ดเดอร์ได้จะเท่ากับจำนวนสัญญาณสูงสุดที่การ์ดสามารถนับได้คือ  $\pm 140 \times 10^{12}$

### 6.1.2.10 ฟังก์ชัน spii\_GetEncoderValue

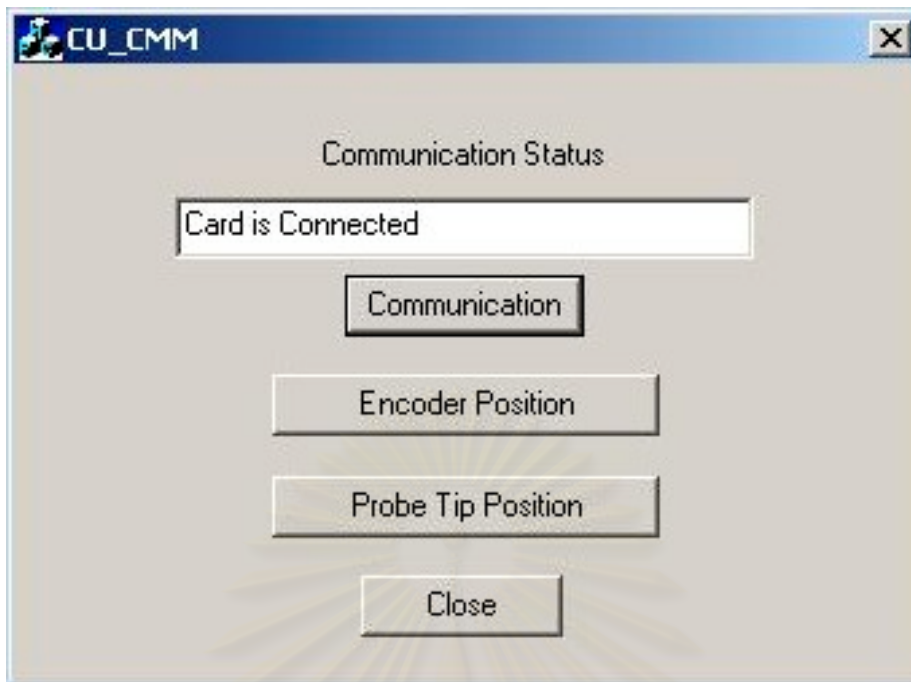
เมื่อเรียกฟังก์ชันนี้ การ์ดเอสพีไอทูจะส่งค่าตำแหน่งปัจจุบันของเอนโค้ดเดอร์ที่เก็บอยู่ภายในการ์ดออกมา

## 6.2 โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

โปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิตินี้มีชื่อว่า โปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม (CU\_CMM) ซึ่งได้รับการพัฒนาโดยมีพื้นฐานมาจากภาษาวิซวลซีพลัสพลัส (Visual C++) ลักษณะรูปแบบของโปรแกรมจะเป็นแบบไดอะล็อก (Dialog Base) เมื่อสั่งให้โปรแกรมทำงาน โปรแกรมจะสร้างไดอะล็อกหน้าต่างหลักขึ้นดังในรูปที่ 6.2 และ 6.3



รูปที่ 6.2 รูปแสดงโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มขณะเรียกใช้งาน



รูปที่ 6.3 รูปแสดงรายละเอียดหน้าจอหลักของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม

### 6.2.1 ฟังก์ชันบนหน้าจอหลักของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม

จากรูปที่ 6.3 หน้าจอหลักของโปรแกรมจะประกอบด้วย แถบแสดงสถานะการติดต่อสื่อสารระหว่างการ์ดและเครื่องคอมพิวเตอร์ (Status Bar), ปุ่มเรียกฟังก์ชันการติดต่อสื่อสาร (Communication Button), ปุ่มเรียกฟังก์ชันแสดงตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์ (Encoder Position Button), ปุ่มเรียกฟังก์ชันแสดงตำแหน่งพิกัดจากของปลายหัววัด (Probe Tip Position Button) และปุ่มยกเลิกโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม (Close Button) โดยเมื่อกดปุ่มของแต่ละฟังก์ชัน หน้าจอของฟังก์ชันนั้นก็จะปรากฏขึ้นเพื่อให้เรียกใช้ฟังก์ชันภายในหน้านั้นใช้งานต่อไป โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายเพียงหน้าที่การทำงานของฟังก์ชันต่างๆ บนหน้าจอนี้เท่านั้น ส่วนรายละเอียดในการใช้งานจริงของแต่ละฟังก์ชันจะขออธิบายเอาไว้ใน *บทที่ 7 วิธีและขั้นตอนการในใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (ซียู-ซีเอ็มเอ็ม)*

#### 6.2.1.1 แถบแสดงสถานะการสื่อสาร (Status Bar)

เป็นแถบเพื่อใช้แสดงสถานะการสื่อสารระหว่างการ์ดและเครื่องคอมพิวเตอร์ ในขณะนั้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.3 โดยจะแสดงผลทั้งหมด 3 สถานะคือ ไม่มีการเชื่อมต่อ (No Connection), การ์ดได้ถูกเชื่อมต่อ (Card is Connected) และการ์ดได้ถูกตัดการเชื่อมต่อ (Card is Disconnected) โดยมีรายละเอียดของแต่ละสถานะดังต่อไปนี้

### 6.2.1.1.1 ไม่มีการเชื่อมต่อ

สถานะจะเป็น *ไม่มีการเชื่อมต่อ* ก็ต่อเมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมาใหม่ และยังไม่มีการเรียกใช้ฟังก์ชันใดๆ ในฟังก์ชันติดต่อสื่อสาร

### 6.2.1.1.2 การ์ดได้ถูกเชื่อมต่อ

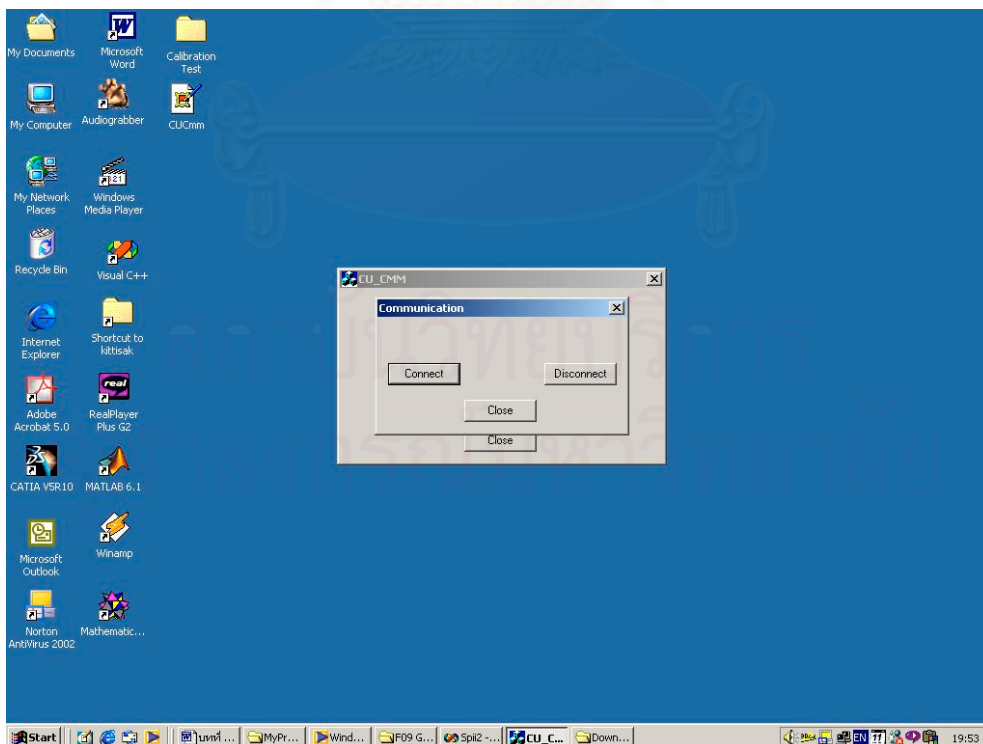
สถานะจะเป็น *การ์ดถูกเชื่อมต่อแล้ว* ก็ต่อเมื่อมีการเรียกใช้ฟังก์ชันเชื่อมการติดต่อที่อยู่ภายในหน้าจอของฟังก์ชันการติดต่อสื่อสาร ซึ่งจะอธิบายอยู่ในหัวข้อ 6.2.1.2.1 และสามารถเชื่อมต่อการ์ดเข้ากับคอมพิวเตอร์ได้สำเร็จ

### 6.2.1.1.3 การ์ดได้ถูกตัดการเชื่อมต่อ

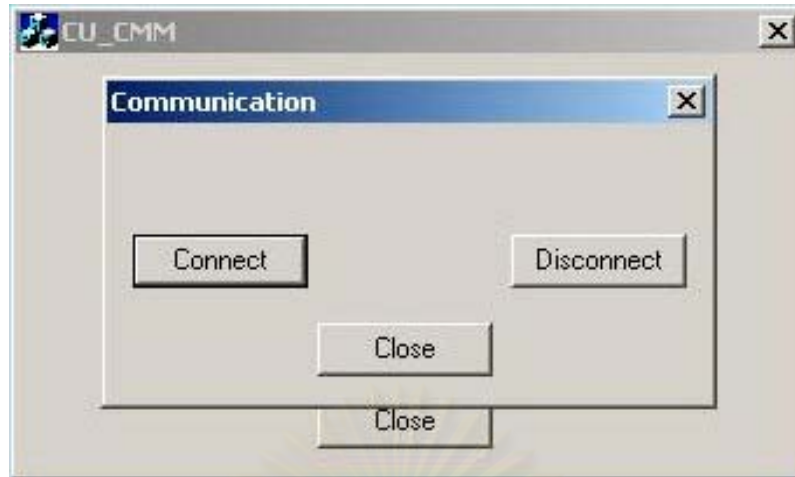
สถานะจะเป็น *การ์ดได้ถูกตัดการเชื่อมต่อ* ก็ต่อเมื่อมีการเรียกใช้ฟังก์ชันภายในของฟังก์ชันการติดต่อสื่อสารเพื่อตัดการสื่อสาร หรืออาจจะเป็นในกรณีที่ไม่สามารถติดต่อสื่อสารกับเครื่องคอมพิวเตอร์ได้สำเร็จ

### 6.2.1.2 ปุ่มเรียกฟังก์ชันการติดต่อสื่อสาร (Communication Button)

เป็นปุ่มกดเพื่อเรียกหน้าจอของฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับหน้าที่ในการติดต่อสื่อสารอันได้แก่ ฟังก์ชันเชื่อมต่อ (Connect), ฟังก์ชันตัดการเชื่อมต่อ (Disconnect), ฟังก์ชันปิด (Close) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 6.4 และ 6.5



รูปที่ 6.4 รูปแสดงหน้าจอของฟังก์ชันการติดต่อสื่อสาร



รูปที่ 6.5 รูปแสดงรายละเอียดบนหน้าจอของฟังก์ชันการติดต่อสื่อสาร

เนื่องจากหน้าจอของฟังก์ชันการติดต่อสื่อสารเป็นไดอะล็อกแบบมอดอล (Modal) ดังนั้นหากไม่ปิดหน้าจอนี้ก่อนจะไม่สามารถกลับไปเรียกใช้ฟังก์ชันใดๆ ในหน้าจอหลักได้ โดยมีรายละเอียดของฟังก์ชันต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 6.2.1.2.1 ฟังก์ชันเชื่อมต่อ

ทำหน้าที่เชื่อมการติดต่อสื่อสารระหว่างการ์ด และเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยหากทำการเชื่อมต่อได้สำเร็จหน้าจอนี้จะปิดและกลับไปยังหน้าจอหลัก พร้อมแสดงสถานะการเชื่อมต่อที่หน้าจอหลักเป็น *การ์ดได้ถูกเชื่อมต่อ* แต่ถ้าหากการเชื่อมต่อไม่สำเร็จหรือมีการเชื่อมต่อระหว่างการ์ดและคอมพิวเตอร์อยู่แล้ว โปรแกรมจะแสดงข้อความเตือนว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นพร้อมทั้งแสดงรายละเอียดของความผิดพลาดนั้น ดังแสดงในรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 รูปแสดงข้อความเตือนและข้อผิดพลาด (Error Message Box)

### 6.2.1.2.2 ฟังก์ชันตัดการเชื่อมต่อ

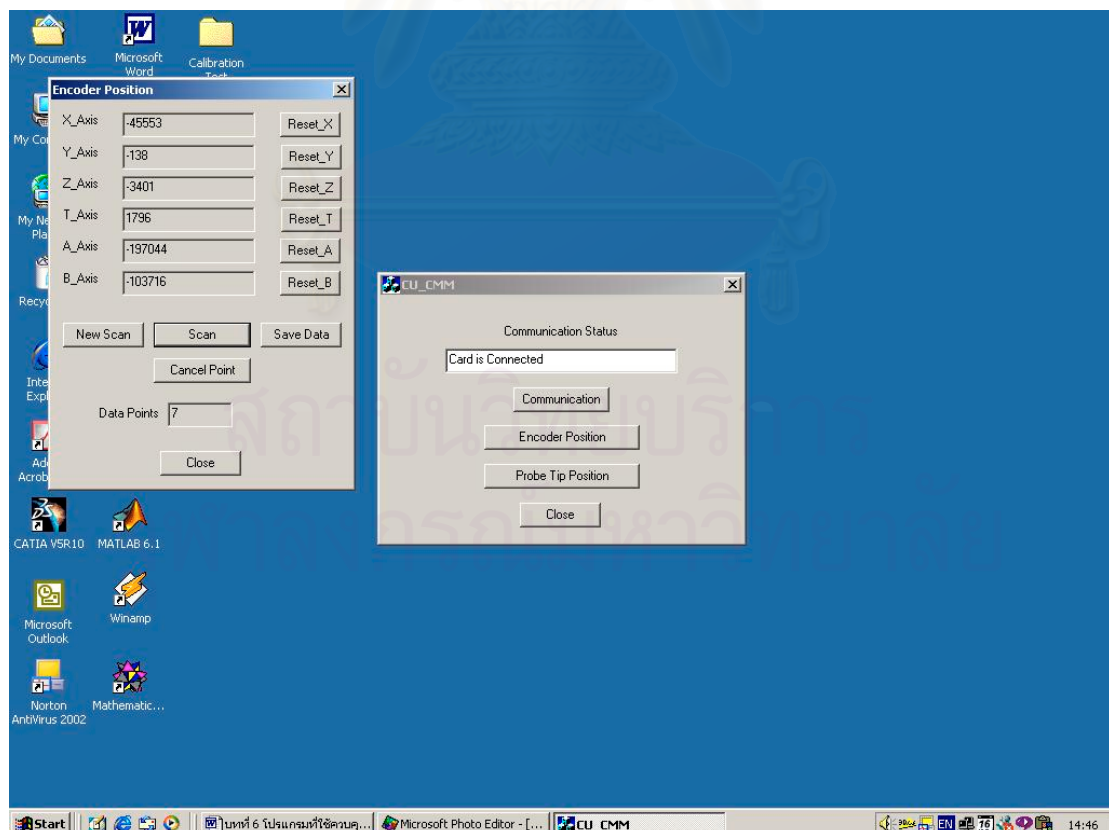
ทำหน้าที่ตัดการติดต่อสื่อสารระหว่างการ์ด และเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยหากสามารถตัดการเชื่อมต่อได้สำเร็จหน้าจอนี้จะปิดและกลับไปยังหน้าจอหลัก พร้อมแสดงสถานะการเชื่อมต่อที่หน้าจอหลักเป็น *การ์ดได้ถูกตัดเชื่อมต่อ* แต่ถ้าหากการตัดการเชื่อมต่อไม่สำเร็จหรือการ์ดไม่ได้มีการเชื่อมต่อระหว่างการ์ดและคอมพิวเตอร์อยู่แล้ว โปรแกรมจะแสดงข้อความเตือนว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับฟังก์ชันเชื่อมต่อ

### 6.2.1.2.3 ฟังก์ชันปิด

ทำหน้าที่ยกเลิกคำสั่งฟังก์ชันการติดต่อสื่อสารและปิดหน้าจอของฟังก์ชันนี้อีกด้วย

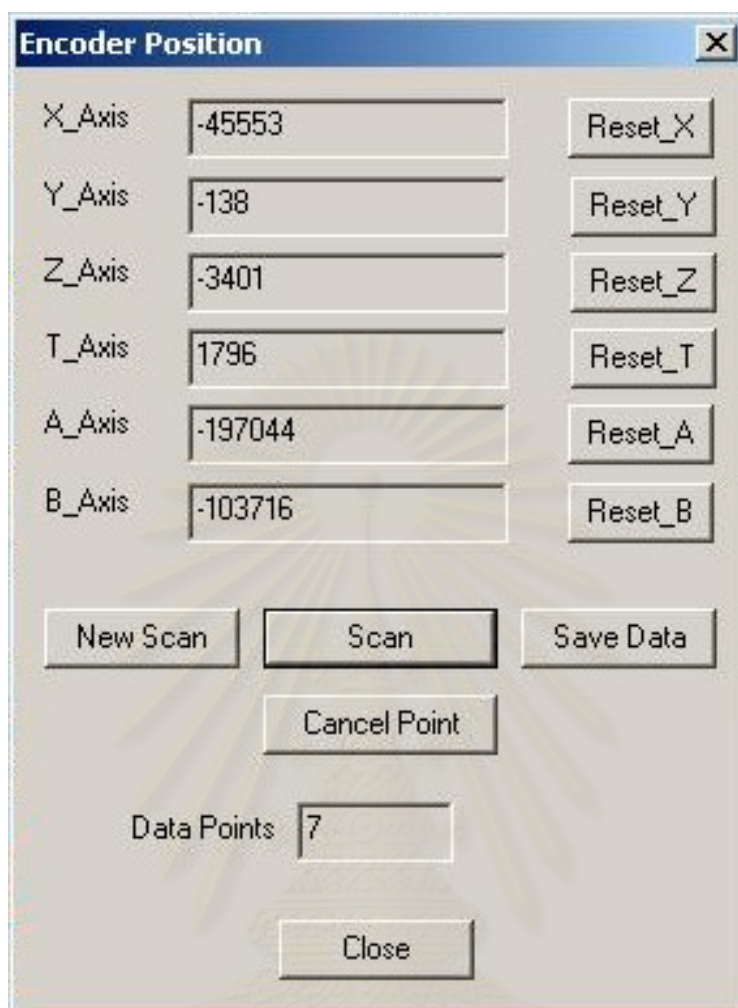
### 6.2.1.3 ปุ่มเรียกฟังก์ชันแสดงตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์ (Encoder Position Button)

เป็นปุ่มกดเพื่อเรียกหน้าจอซึ่งรวมคำสั่งที่เกี่ยวข้องกับค่าตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์ทั้งหมดเอาไว้ ดังในรูปที่ 6.7 และ 6.8



รูปที่ 6.7 รูปแสดงหน้าจอคำสั่งของฟังก์ชันแสดงตำแหน่งเอนโค้ดเดอร์





รูปที่ 6.8 รูปแสดงรายละเอียดของหน้าจอคำสั่งของฟังก์ชันแสดงตำแหน่งเอนโค้ดเดอร์

จากรูปที่ 6.8 จะเห็นว่า มีคำสั่งและแถบแสดงสถานะต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์อันได้แก่ แถบแสดงค่าตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์ (Encoder Position Bar) ทั้ง 6 แกน, ปุ่มกำหนดค่าเริ่มต้นเอนโค้ดเดอร์ (Reset Button) ทั้ง 6 แกน, ปุ่มเริ่มต้นสแกนใหม่ (New Scan Button), ปุ่มสแกน (Scan Button), ปุ่มบันทึกข้อมูล (Save Data Button), ปุ่มยกเลิกจุด (Cancel Point Button), แถบแสดงจำนวนข้อมูลที่สแกนไปแล้ว (Data Points Status Bar) และปุ่มปิด (Close Button) โดยมีรายละเอียดในแต่ละคำสั่งดังนี้

#### 6.2.1.3.1 แถบแสดงค่าตำแหน่งเอนโค้ดเดอร์

จะเป็นแถบที่แสดงตำแหน่งปัจจุบันของเอนโค้ดเดอร์ทั้ง 6 ตัวซึ่งในขณะนี้ จะตั้งชื่อแกนตามการ์ดเอสพีไอทู



#### 6.2.1.3.2 ปุ่มกำหนดค่าเริ่มต้นเอนโค้ดเดอร์

เป็นปุ่มกดเพื่อตั้งให้ค่าตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์ในขณะนั้นกลายเป็นศูนย์ โดยจะมีปุ่มกำหนดค่าเริ่มต้นนี้อยู่ครบทั้ง 6 แกน สามารถตั้งค่าเริ่มต้นได้อิสระจากกัน ซึ่งปกติแล้วปุ่มนี้จะใช้งานเฉพาะเมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมาครั้งแรกเท่านั้น

#### 6.2.1.3.3 ปุ่มเริ่มต้นสแกนใหม่

เป็นปุ่มกดเพื่อยกเลิกจุดที่ได้ทำการสแกนไปแล้วทั้งหมด และพร้อมที่จะทำการสแกนใหม่

#### 6.2.1.3.4 ปุ่มสแกน

ทำหน้าที่สั่งให้โปรแกรมเตรียมพร้อมที่จะสแกนตำแหน่ง โดยจะต้องกดปุ่มนี้ก่อนเริ่มทำการสแกนทุกครั้ง

#### 6.2.1.3.5 ปุ่มบันทึกข้อมูล

เมื่อกดปุ่มนี้โปรแกรมจะทำการบันทึกข้อมูลลงบนสื่อบันทึก โดยโปรแกรมจะถามชื่อ และที่อยู่ของข้อมูลที่ต้องการจะบันทึก หากไม่มีข้อมูลที่จะทำการบันทึก โปรแกรมจะแสดงข้อความเตือนว่ายังไม่มีข้อมูลให้บันทึกแล้วก็จะกลับมาทำงานตามปกติ

#### 6.2.1.3.6 ปุ่มยกเลิกจุด

เป็นปุ่มเพื่อใช้ในการแก้ไขตำแหน่งข้อมูลที่ได้ทำการสแกนไปแล้ว โดยโปรแกรมจะการยกเลิกจุดครั้งล่าสุดที่ได้สแกนไปแล้วหนึ่งจุด และสามารถทำการสแกนข้อมูลจุดต่อไปได้

#### 6.2.1.3.7 แถบแสดงจำนวนข้อมูลที่สแกนไปแล้ว

เป็นแถบแสดงจำนวนจุดหรือข้อมูลที่สแกนและบันทึกอยู่ในหน่วยความจำชั่วคราว

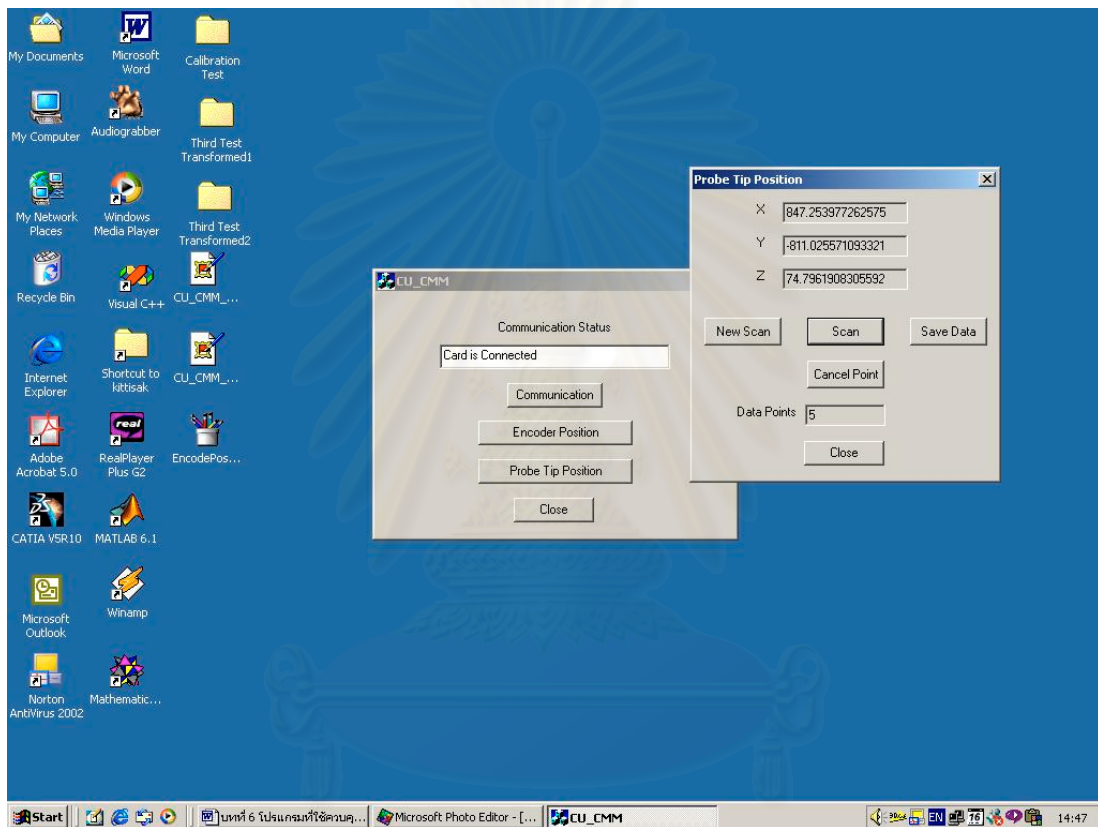
#### 6.2.1.3.8 ปุ่มปิด

จะทำหน้าที่ปิดหน้าจอแสดงตำแหน่งเอนโค้ดเดอร์ โดยที่ข้อมูลตำแหน่งที่สแกนไปแล้วจะยังคงอยู่สามารถย้อนกลับมาบันทึกข้อมูลในภายหลังได้หากยังไม่ได้ปิดหน้าจอหลักของโปรแกรม อีกทั้งโปรแกรมก็จะยังคงอ่านค่าตำแหน่งจากเอนโค้ดเดอร์อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเมื่อเปิดหน้าจอแสดง

ตำแหน่งเอนโค้ดเดอร์ขึ้นอีกครั้ง ก็สามารถทำงานต่อไปได้เช่นเดิมโดยไม่ต้องทำการตั้งค่าศูนย์ให้เอนโค้ดเดอร์ใหม่

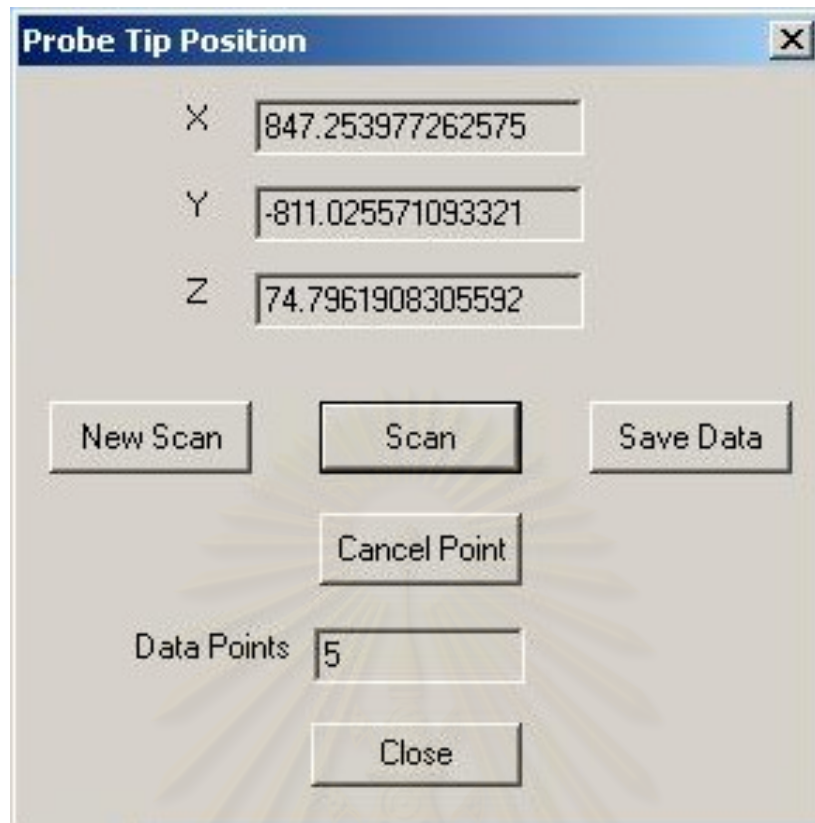
#### 6.2.1.4 ปุ่มเรียกฟังก์ชันแสดงตำแหน่งพิกัดจากของปลายหัววัด (XYZ-Cartesian Position Button)

เป็นปุ่มกดเพื่อเรียกหน้าจอซึ่งรวมคำสั่งที่เกี่ยวข้องกับค่าตำแหน่งของปลายหัววัดในระบบพิกัดจากทั้งหมดเอาไว้ ดังในรูปที่ 6.9 และ 6.10



รูปที่ 6.9 รูปแสดงหน้าจอคำสั่งของฟังก์ชันแสดงตำแหน่งพิกัดจากของปลายหัววัด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



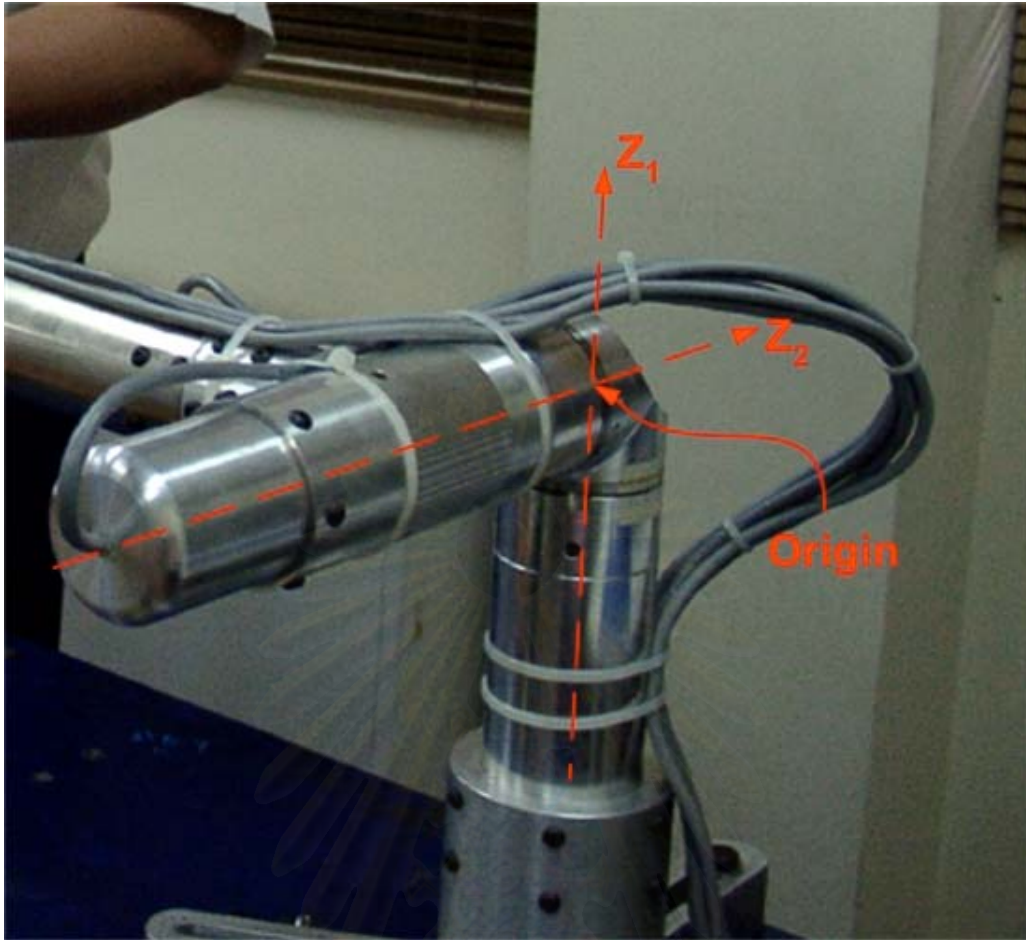
รูปที่ 6.10 รูปแสดงรายละเอียดของหน้าจอคำสั่งของฟังก์ชันแสดงตำแหน่งปลายหัววัด

จากรูปที่ 6.10 จะเห็นว่า มีคำสั่งและแถบแสดงสถานะต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าตำแหน่งของปลายหัววัดอันได้แก่ แถบแสดงค่าตำแหน่งของปลายหัววัด (Probe Tip Position Bar) ทั้ง 3 แกน, ปุ่มเริ่มต้นสแกนใหม่ (New Scan Button), ปุ่มสแกน (Scan Button), ปุ่มบันทึกข้อมูล (Save Data Button), ปุ่มยกเลิกจุด (Cancel Point Button), แถบแสดงจำนวนข้อมูลที่สแกนไปแล้ว (Data Points Status Bar) และปุ่มปิด (Close Button) โดยมีรายละเอียดในแต่ละคำสั่งดังนี้

#### 6.2.1.4.1 แถบแสดงค่าตำแหน่งของปลายหัววัด

เป็นแถบแสดงค่าตำแหน่งปัจจุบันทั้ง 3 แกนของปลายหัววัดอันได้แก่ แกนเอ็กซ์ (X-Axis), แกนวาย (Y-Axis) และแกนแซด (Z-Axis) ซึ่งมีระบบแกนพิกัด (Axis system) เป็นแบบพิกัดฉาก โดยจุดกำเนิดของแกนอ้างอิง (Axis origin) จะตั้งอยู่ที่จุดตัดระหว่างแกนที่ 1 และ 2 ของเครื่องวัดพิกัด ดังในรูปที่

6.11



รูปที่ 6.11 รูปแสดงตำแหน่งจุดกำเนิดของระบบแกนอ้างอิงของซียู-ซีเอ็มเอ็ม

#### 6.2.1.4.2 ปุ่มเริ่มต้นสแกนใหม่

เป็นปุ่มกดเพื่อยกเลิกจุดที่ได้ทำการสแกนไปแล้วทั้งหมด และพร้อมที่จะทำการสแกนใหม่

#### 6.2.1.4.3 ปุ่มสแกน

ทำหน้าที่สั่งให้โปรแกรมเตรียมพร้อมที่จะสแกนตำแหน่ง โดยจะต้องกดปุ่มนี้ก่อนเริ่มทำการสแกนทุกครั้ง

#### 6.2.1.4.4 ปุ่มบันทึกข้อมูล

เมื่อกดปุ่มนี้โปรแกรมจะทำการบันทึกข้อมูลลงบนสื่อบันทึก โดยโปรแกรมจะถามชื่อ และที่อยู่ของข้อมูลที่ต้องการจะบันทึก หากไม่มีข้อมูลที่จะทำการบันทึก โปรแกรมจะแสดงข้อความเตือนว่ายังไม่มีข้อมูลให้บันทึก แล้วก็จะกลับมาทำงานตามปกติ

#### 6.2.1.4.5 ปุ่มยกเลิกจุด

เป็นปุ่มเพื่อใช้ในการแก้ไขตำแหน่งข้อมูลที่ได้ทำการสแกนไปแล้ว โดยโปรแกรมจะการยกเลิกจุดครั้งล่าสุดที่ได้สแกนไปแล้วหนึ่งจุด และสามารถทำการสแกนข้อมูลจุดต่อไปได้

#### 6.2.1.4.6 แถบแสดงจำนวนข้อมูลที่สแกนไปแล้ว

เป็นแถบแสดงจำนวนจุดหรือข้อมูลที่สแกนและบันทึกอยู่ในหน่วยความจำชั่วคราว

#### 6.2.1.4.7 ปุ่มปิด

จะทำหน้าที่ปิดหน้าจอแสดงตำแหน่งปลายหัววัด โดยที่ข้อมูลตำแหน่งที่สแกนไปแล้วจะยังคงอยู่สามารถย้อนกลับมาบันทึกข้อมูลในภายหลังได้หากยังไม่ได้ปิดหน้าจอหลักของโปรแกรม อีกทั้งโปรแกรมก็ยังคงอ่านค่าตำแหน่งของปลายหัววัดอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเมื่อเปิดหน้าจอแสดงตำแหน่งปลายหัววัดขึ้นอีกครั้ง ก็สามารถทำงานต่อไปได้เช่นเดิม

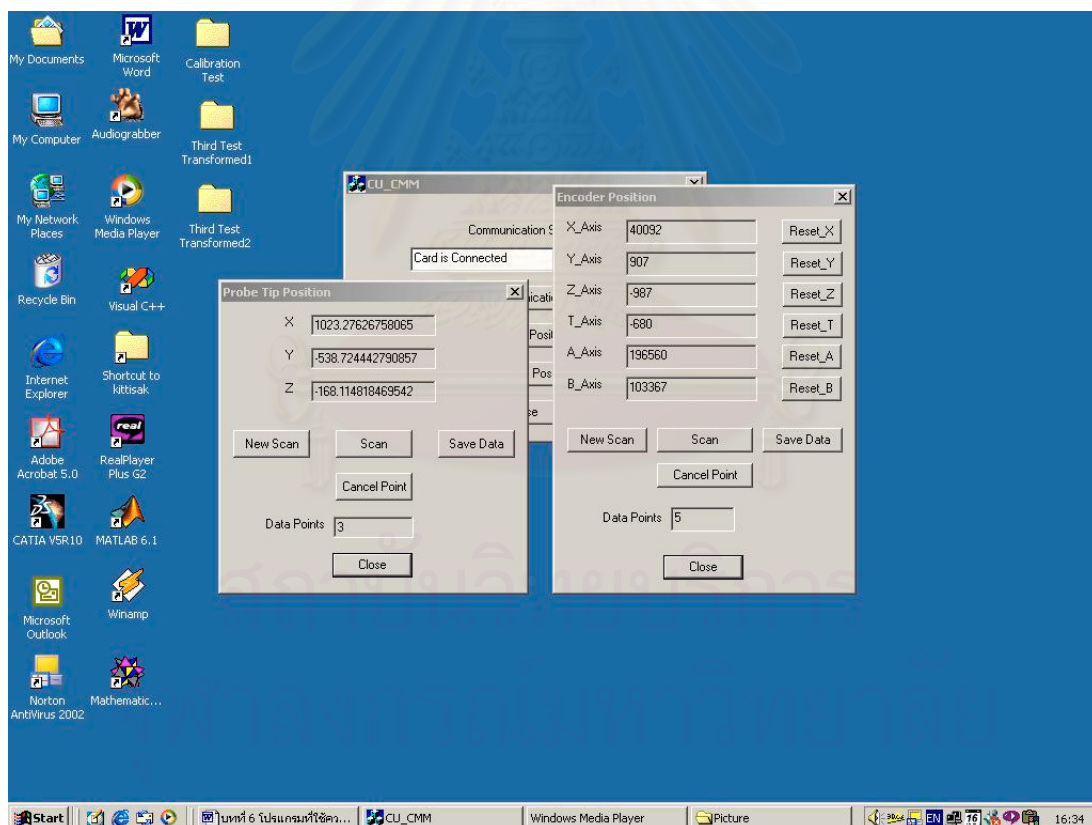
ในการสแกนตำแหน่งหรือเก็บค่าตำแหน่งพิกัดไม่ว่าจะอยู่บนหน้าจอแสดงตำแหน่งเอนโค้ดเดอร์หรือหน้าจอแสดงตำแหน่งพิกัดฉากของปลายหัววัดก็ตาม หากเครื่องอยู่ในสถานะที่พร้อมจะสแกนข้อมูลแล้ว ก็สามารถที่จะเก็บบันทึกข้อมูลตำแหน่งที่ต้องการได้โดยกดสวิทซ์ดังในรูปที่ 6.12 ซึ่งจะสั่งการให้โปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มเก็บบันทึกข้อมูลตำแหน่งเอาไว้ในหน่วยความจำชั่วคราวก่อนจากนั้นเมื่อกดปุ่มบันทึกข้อมูล โปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มจึงจะเก็บบันทึกข้อมูลที่ต้องการลงในสื่อบันทึก



รูปที่ 6.12 รูปแสดงสวิทซ์ปุ่มกดที่ใช้สั่งให้โปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มบันทึกข้อมูล

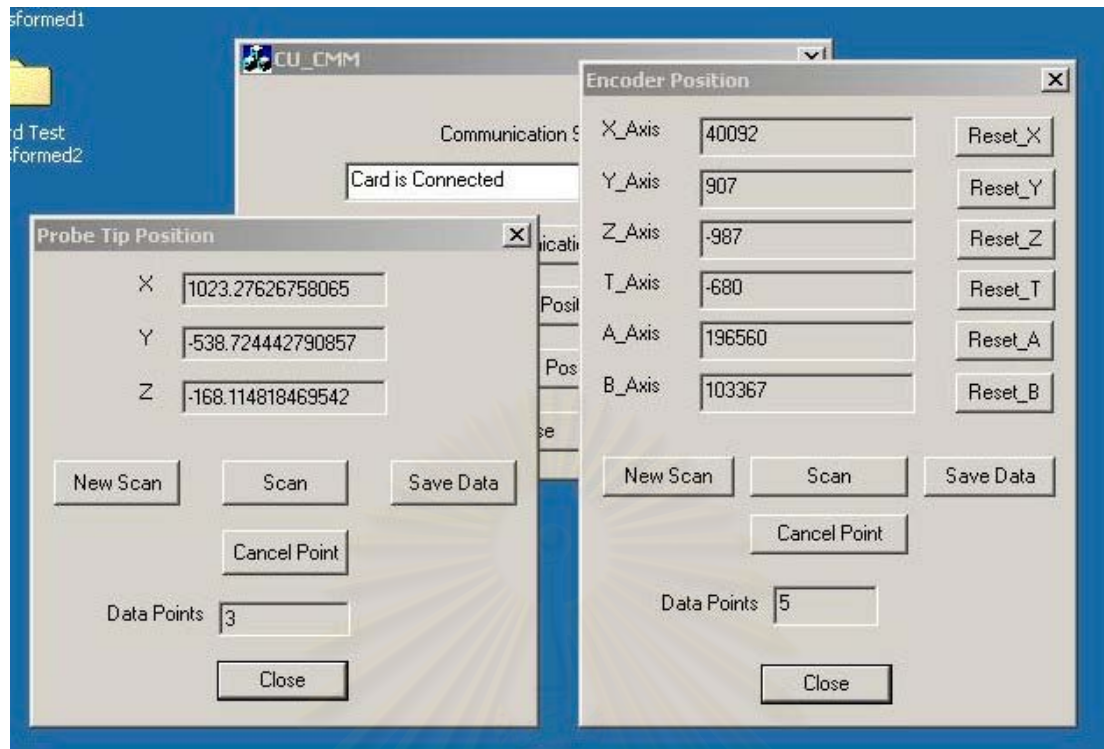


นอกจากการแสดงผลหน้าจอแสดงตำแหน่งพิกัดของหัววัด หรือหน้าจอแสดงตำแหน่งเอนโค้ดเดอร์แล้ว โปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม ยังสามารถที่จะแสดงผลหน้าจอแสดงตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์ และหน้าจอแสดงตำแหน่งพิกัดของหัววัดพร้อมกันได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6.13 และ 6.14 โดยยังสามารถที่จะเรียกใช้ฟังก์ชันต่างๆ ของแต่ละหน้าจอให้ทำงานเป็นปกติได้เช่นเดิม ยกเว้นฟังก์ชันสแกนข้อมูลเท่านั้นที่จะต้องสลับการทำงาน โดยหากกดปุ่มฟังก์ชันนี้บนหน้าจอโปรแกรมก็จะเก็บเฉพาะข้อมูลของหน้าจอเท่านั้น โดยสามารถที่จะสลับการเก็บข้อมูลไปมาได้โดยข้อมูลที่ได้ทำการสแกนไปแล้วจะยังคงอยู่เช่นเดิม เมื่อกลับมาสแกนอีกครั้งข้อมูลใหม่ก็จะถูกเก็บต่อจากข้อมูลเดิม สำหรับเนื้อหาในส่วนของการโปรแกรมการทำงานที่กล่าวไปแล้วในขั้นต้นนั้นก็ได้อธิบายคร่าวๆ หน้าที่การทำงานของฟังก์ชันต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัดทั้งหมดแล้ว ดังนั้นในบทนี้จึงจะขอจบลงแต่เพียงเท่านี้ โดยเนื้อหาในส่วนของการใช้งานจริงร่วมกันระหว่างโปรแกรมซียูซีเอ็มเอ็ม และเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ จะขอกกล่าวไว้ใน บทที่ 7 วิธีและขั้นตอนการในใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (ซียู-ซีเอ็มเอ็ม)



รูปที่ 6.13 รูปแสดงโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มขณะแสดงตำแหน่งของทั้งเอนโค้ดเดอร์ และปลายหัววัด





รูปที่ 6.14 รูปแสดงรายละเอียดโปรแกรมขณะแสดงตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์ และปลายหัววัด

## บทที่ 7

### วิธีและขั้นตอนการในใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (ซียู-ซีเอ็มเอ็ม)

เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจรู้ที่ใช้ในการวัดตำแหน่งมุมของซียู-ซีเอ็มเอ็มทั้งหมดนั้นเป็นเอนโค้ดเดอร์ชนิดอินครีเมนทัล (incremental encoder) ซึ่งจะให้สัญญาณขาออกเป็นจำนวนพัลส์ตามตำแหน่งของเพลลาที่เปลี่ยนแปลงไปเท่านั้นไม่ได้ให้เป็นตำแหน่งมุมของเพลลาแบบเอนโค้ดเดอร์ชนิดแอบโซลูท (absolute encoder) ดังนั้นเมื่อปิดเครื่องหรือหยุดจ่ายไฟที่ป้อนให้กับตัวอินครีเมนทัลเอนโค้ดเดอร์ ก็จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่าตำแหน่งมุมขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาแนวทางในการตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ หรือแนวทางในการชดเชยความผิดพลาดของตำแหน่งมุมที่เกิดขึ้นนี้ให้หมดไป ในบทนี้จึงจะขอกกล่าวถึงวิธีและขั้นตอนในการตั้งค่าศูนย์และชดเชยความผิดพลาดของตำแหน่งมุมของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มทุกครั้งหลังจากที่เปิดเครื่องก่อนที่จะนำไปใช้งาน

#### 7.1 แนวทางในการชดเชยความผิดพลาด

ในทางด้านหุ่นยนต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ไปนั้นก็ประสบปัญหาความผิดพลาดทางตำแหน่งมุมที่เกิดจากการใช้อินครีเมนทัลเอนโค้ดเดอร์นี้เช่นกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแนวทางที่นิยมใช้ในการป้องกันความผิดพลาดทางตำแหน่งมุมที่เกิดขึ้นนี้มีอยู่ 2 แนวทางด้วยกันอันได้แก่ หนึ่ง การใช้แหล่งจ่ายไฟสำรอง (battery backup) เพื่อจ่ายไฟให้กับเอนโค้ดเดอร์แทนเมื่อหยุดการจ่ายไฟหลักที่ป้อนให้กับทั้งระบบ และสองคือการใช้ลิ้มิตสวิทช์ (limit switch) เพื่อเป็นตัวบอกตำแหน่งศูนย์ของเอนโค้ดเดอร์

ในการใช้แหล่งจ่ายไฟสำรองนั้น มักจะเกิดปัญหาแหล่งจ่ายไฟสำรองหมดทำให้ต้องมีการปรับตั้งหุ่นยนต์ใหม่อยู่เสมอ แต่เนื่องจากงานทางด้านหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ใช้โดยทั่วไปนั้นจะเป็นงานในลักษณะที่ให้ผู้ควบคุมงาน ควบคุมหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งที่ต้องการแล้วจึงบันทึกค่าตำแหน่งที่ต้องการนั้นเอาไว้ ซึ่งตำแหน่งที่บันทึกไว้ก็จะเป็นเพียงค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อเท่านั้นไม่ใช่ตำแหน่งจุดปลายในระบบพิกัดฉาก และเมื่อบันทึกตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตลอดทั้งกระบวนการทำงานได้แล้ว จึงจะสั่งให้หุ่นยนต์ทำงานโดยอัตโนมัติไปตามตำแหน่งที่ได้บันทึกเอาไว้ก่อนหน้านี้ ดังนั้นหากแหล่งจ่ายไฟสำรองหมด การปรับตั้งก็จะกระทำเพียงการบันทึกค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในกระบวนการที่ต้องการใหม่ แต่สำหรับในแขนกลที่เป็นเครื่องมือวัดที่จำเป็นจะต้องรู้ค่าตำแหน่งจุดปลายของแขนกลในระบบพิกัดฉากได้อย่างแม่นยำดังเช่นซียู-ซีเอ็มเอ็มนี้ หากแหล่งจ่ายไฟสำรองหมดการปรับตั้งแขนกลนั้นจะต้องเป็นการทำการสอบเทียบใหม่ทั้งหมดซึ่งจะมีความยุ่งยากกว่าในหุ่นยนต์อุตสาหกรรมต่างๆ ไปมาก

สำหรับการใช้ลิมิตสวิทช์เพื่อกำหนดตำแหน่งศูนย์ของเอนโค้ดเดอร์นั้นจะมีความน่าเชื่อถือ (reliability) น้อยกว่าการใช้แหล่งจ่ายไฟสำรอง แต่สามารถที่จะลดปัญหาแหล่งจ่ายไฟสำรองหมดลงไปได้ โดยหลักการสำคัญที่ใช้ในการตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์นั้นคือ การติดตั้งลิมิตสวิทช์ให้อยู่ในตำแหน่งมุมที่เป็นศูนย์ของทุกข้อต่อ จากนั้นจึงสั่งให้แขนกลแต่ละข้อต่อให้เคลื่อนที่อย่างช้าๆ เข้าไปแตะลิมิตสวิทช์ เมื่อลิมิตสวิทช์ทำงานก็จะสั่งให้ตั้งค่าเอนโค้ดเดอร์ให้เป็นศูนย์ ณ ตำแหน่งนั้น แต่เนื่องจากแขนกลซียู-ซีเอ็มเอ็มจะขับเคลื่อนโดยผู้ปฏิบัติงานโดยไม่มีการใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนใดๆ ช่วยเลย การตั้งค่าศูนย์ให้เอนโค้ดเดอร์โดยใช้ลิมิตสวิทช์จึงไม่มีความสะดวก อีกทั้งยังมีโอกาสผิดพลาดได้สูง เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถที่จะควบคุมความเร็วของแขนกลที่จะเข้าไปแตะลิมิตสวิทช์ได้อย่างแม่นยำ

จากทั้งสองแนวทางที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นจะเห็นว่าไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม ผู้วิจัยจึงต้องคิดแนวทางใหม่ที่สามารถใช้ในการตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ได้อย่างแม่นยำและมีความสะดวกในการทำงาน โดยแนวทางหนึ่งที่มีความเป็นไปได้สูงซึ่งได้แนวคิดมาจากเครื่องซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปนั้นก็คือ การใช้ทรงกลมสอบเทียบเป็นตำแหน่งอ้างอิงให้กับซียู-ซีเอ็มเอ็ม โดยมีแนวทางและหลักการดังต่อไปนี้

ลองกลับไปพิจารณาการทำการถดถอยเพื่อสอบเทียบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ภายในสมการที่ใช้ในการหาค่าตำแหน่งจุดปลายของซียู-ซีเอ็มเอ็มในบทที่ 5 เราสามารถที่จะหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ภายในสมการ ได้จากข้อมูลต่างๆ จากการวัดอันได้แก่ ตำแหน่งจุดปลายของหัววัดในระบบพิกัดฉาก และค่าตำแหน่งมุมของทุกข้อต่อที่สัมพันธ์กับตำแหน่งจุดปลายนั้นซึ่งเป็นข้อมูลที่สามารถหาได้โดยสะดวก ดังนั้นหากใช้แนวทางเดียวกันนี้ในการหาค่าความผิดพลาดหรือค่าความเหลื่อมของตำแหน่งมุมที่เกิดขึ้น ก็จะทำให้มีความสะดวกและมีความแม่นยำในการทำงานซียู-ซีเอ็มเอ็มมากกว่าแนวทางอื่นๆ ที่ได้กล่าวไปแล้ว

พิจารณาสมการที่ 5.19 อีกครั้ง

$${}^B P = {}^B T \cdot {}^0 T \cdot {}^6 P \quad [5.19]$$

ในการทำการถดถอยเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ภายในสมการที่ 5.19 นั้นมีพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าทั้งหมด 30 ตัวซึ่งได้รวมถึงค่าความเหลื่อมของค่าตำแหน่งมุมของทั้ง 6 ข้อต่อที่เกิดจากการตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ขณะทำการสอบเทียบผิดพลาดไปจากความเป็นจริงเข้าไปด้วย ดังนั้นในการคำนวณหาค่าความเหลื่อมของตำแหน่งมุมของซียู-ซีเอ็มเอ็มก็จะใช้สมการที่ 5.19 นี้ในการทำการถดถอยเพียงแต่จะกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่เหลือภายในสมการที่ 5.19 นี้ให้เป็นค่าคงที่ตามที่คำนวณได้จากการสอบเทียบ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าที่ต้องการหา

จะเหลือ 6 ตัวอันได้แก่  $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, \Delta\theta_5$  และ  $\Delta\theta_6$  ซึ่งเป็นค่าความเหลื่อมตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 1 ถึง 6 ตามลำดับ

เนื่องจากจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการหา มีเพียง 6 ตัวเท่านั้น ในขณะที่ข้อมูลที่ได้จากการวัดหนึ่งครั้งจะเสมือนว่าได้ข้อมูล 3 ชุด อันได้แก่ข้อมูลตำแหน่ง  $x, y$  และ  $z$  อีกทั้งทรงกลมสอบเทียบที่จะใช้เป็นตัวอ้างอิงจะต้องยึดติดเข้ากับซียู-ซีเอ็มเอ็มไปตลอดเพื่อให้ตำแหน่งในระบบพิกัดฉากของจุดศูนย์กลางทรงที่อ้างอิงจากระบบพิกัดฉากของซียู-ซีเอ็มเอ็มคงที่ไปตลอด ดังนั้นในการทำการทดลองในครั้งนี้ก็จะใช้ทรงกลมสอบเทียบเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้นในการอ้างอิงตำแหน่งจุดปลายหัววัด ซึ่งก็เพียงพอต่อการคำนวณหาค่าความเหลื่อมตำแหน่งมุมของข้อต่อทั้ง 6 แล้ว อีกทั้งยังเพื่อความประหยัดและความสะดวกในการใช้งานอีกด้วย และเนื่องจากทรงกลมที่จะใช้เป็นตัวอ้างอิงในการทำการทดลองนั้นจำเป็นที่จะต้องรู้ค่าตำแหน่งพิกัดที่อ้างอิงจากระบบพิกัดของซียู-ซีเอ็มเอ็มได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะใช้ทรงกลมตำแหน่งสุดท้ายที่ใช้ในการสอบเทียบเป็นตัวอ้างอิง

## 7.2 ขั้นตอนในการทำงานและการชดเชยความผิดพลาด

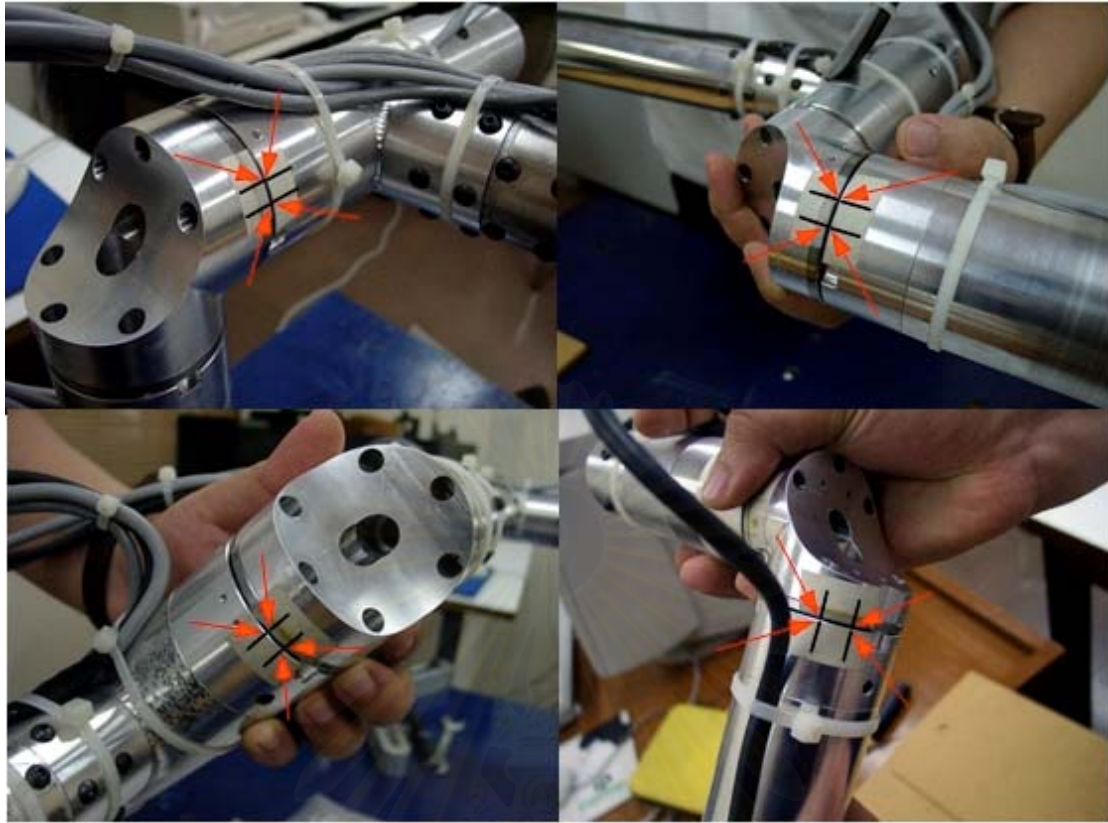
ในหัวข้อนี้จะขอกว่าถึงขั้นตอนต่างๆ ในการเตรียมเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มให้พร้อมทำงาน ตั้งแต่เริ่มเปิดเครื่องจนถึงขั้นตอนในการหาตำแหน่งศูนย์กลางของเอนโค้ดเดอร์ที่แม่นยำ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 เปิดโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มพร้อมทั้งจ่ายไฟให้กับเอนโค้ดเดอร์ทั้ง 6 ตัวของซียู-ซีเอ็มเอ็ม โดยจะต้องเป็นไฟกระแสตรง 5 โวลต์

ขั้นที่ 2 กดปุ่มเรียกฟังก์ชันการสื่อสาร (communication button) แล้วจึงใช้คำสั่งเชื่อมต่อ (connect) เพื่อเชื่อมการสื่อสารระหว่างการ์ดเอสพีไอทูกับคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกัน

ขั้นที่ 3 ตรวจสอบสถานะการสื่อสารจากแถบแสดงสถานะที่หน้าจอหลักของโปรแกรม หากการเชื่อมการสื่อสารสำเร็จ ให้กดปุ่มเรียกหน้าจอแสดงตำแหน่งเอนโค้ดเดอร์ เพื่อทำการตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ทั้ง 6 โดยทำไปทีละข้อต่อด้วยการหมุนให้สัญลักษณ์บนข้อต่อตรงกันดังในรูปที่ 7.1 เมื่อสัญลักษณ์ตรงกันแล้วจึงกดปุ่มกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับเอนโค้ดเดอร์ (reset button) ของข้อต่อที่ต้องการจะตั้งค่าศูนย์ และให้ทำเช่นนี้ไปจนครบทั้ง 6 ข้อต่อ





รูปที่ 7.1 รูปแสดงสัญลักษณ์ในการตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโคเดอร์ของข้อต่อที่ 2-5

ขั้นที่ 4 นำปลายหัววัดที่มีลักษณะเป็นทรงกรวยของซียู-ซีเอ็มเอ็ม มาวัดตำแหน่งของทรงกลมตำแหน่งอ้างอิง โดยการครอบหัววัดลงบนทรงกลมให้แนบสนิทแล้วจึงสั่งให้โปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มบันทึกข้อมูลของตำแหน่งข้อต่อทั้ง 6 เอาไว้ ให้ทำการวัดตามขั้นตอนนี้ด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม 10 ครั้ง โดยครั้งที่หนึ่งจะวัดที่ตำแหน่งบนสุดของทรงกลม (North pole) และอีก 4 ครั้งถัดมาจะทำการวัดที่ตำแหน่งด้านข้างทั้ง 4 ของทรงกลม ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการสอบเทียบในบทที่ 5 ส่วนการวัดอีก 5 ครั้งที่เหลือให้ทำการวัดที่ตำแหน่งเดิมเหมือนกับ 5 ตำแหน่งแรก เพื่อให้ครอบคลุมทรงกลมอ้างอิงและลดความผิดพลาดจากการวัด

ขั้นที่ 5 นำข้อมูลตำแหน่งข้อต่อที่วัดได้ทั้ง 10 ครั้งและข้อมูลตำแหน่งพิกัดของทรงกลมตำแหน่งอ้างอิงที่วัดได้ในขั้นตอนการสอบเทียบ มาทำการถอดถอยเพื่อหาค่าความเหลื่อมของตำแหน่งมุมของข้อต่อทั้ง 6 ในสมการที่ 5.19 ด้วยฟังก์ชัน lsqcurvefit ในโปรแกรมแมทแลบ (Matlab) โดยกำหนดให้พารามิเตอร์อื่นๆ ซึ่งเดิมเป็นตัวไม่ทราบค่ากลายเป็นค่าคงที่ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากการสอบเทียบ ซึ่งจะทำให้สมการที่ 5.19 เหลือพารามิเตอร์ที่ต้องการหาเพียง 6 ตัวเท่านั้น

ขั้นที่ 6 นำค่าความเหลื่อมที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 5 มาชดเชยค่าตำแหน่งมุมที่วัดได้ทั้ง 6 ข้อต่อ เมื่อทำการชดเชยแล้วก็สามารถที่จะใช้งานเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มในการวัดได้ตามปกติ โดยการใช้ซียู-ซีเอ็มเอ็มในงานวัดชิ้นงานจริงจะต้องเรียกหน้าจอแสดงคำสั่งของฟังก์ชันแสดงตำแหน่งพิกัดฉากของปลายหัววัดขึ้นมา เพื่อแสดงตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัดในระบบพิกัดฉากและสามารถที่จะบันทึกข้อมูลตำแหน่งของปลายหัววัดในระบบพิกัดฉากเอาไว้ได้

ขั้นตอนต่างๆ ทั้ง 6 ที่ได้อธิบายไปแล้วนั้นมีจุดประสงค์หลักก็คือการหาค่าความเหลื่อมที่เกิดจากการตั้งตำแหน่งศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์โดยผู้ปฏิบัติงานได้อย่างแม่นยำไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการตั้งตำแหน่งศูนย์โดยประมาณไปก่อนจากนั้นจึงทำการหาค่าความเหลื่อมระหว่างตำแหน่งศูนย์ที่ตั้งขึ้นกับตำแหน่งศูนย์จริงตามจลนศาสตร์ของแขนกล ด้วยการทำการถอดถอยโดยอาศัยทรวงกลมสอบเทียบเป็นตัวอ้างอิง ดังนั้นในการใช้งานเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มทุกครั้งที่เปิดเครื่องขึ้นมาใหม่จะต้องทำการหาค่าความเหลื่อมเพื่อนำไปชดเชยค่าตำแหน่งมุมที่วัดได้ทุกครั้ง ซึ่งอาจจะเรียกขั้นตอนต่างๆ ทั้งหมดนี้ได้ว่า การเข้าโฮม (*homing machine*)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 8

### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองของการสอบเทียบและการวัดตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็ม โดยในการสอบเทียบของซียู-ซีเอ็มเอ็มนี้จะเป็นการหาค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ยังไม่ทราบค่าที่แน่นอนภายในเมตริกซ์การแปลง โดยจะทำการสอบเทียบด้วยซีเอ็มเอ็มบราวน์ แอนด์ชาร์ปที่ทางห้องปฏิบัติการมีอยู่ จากนั้นก็จะใช้เครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มทำการวัดตำแหน่งของทรงกลมโดยอ้างอิงจากซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปเช่นกัน เพื่อหาค่าความถูกต้องของซียู-ซีเอ็มเอ็ม หลังจากทำการสอบเทียบแล้ว และสุดท้ายจะเป็นตัวอย่างการใช้งานซียู-ซีเอ็มเอ็มในการถอดแบบจากชิ้นงานต้นแบบแล้วนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างเป็นพื้นผิวในโปรแกรมคาเทีย (CATIA)

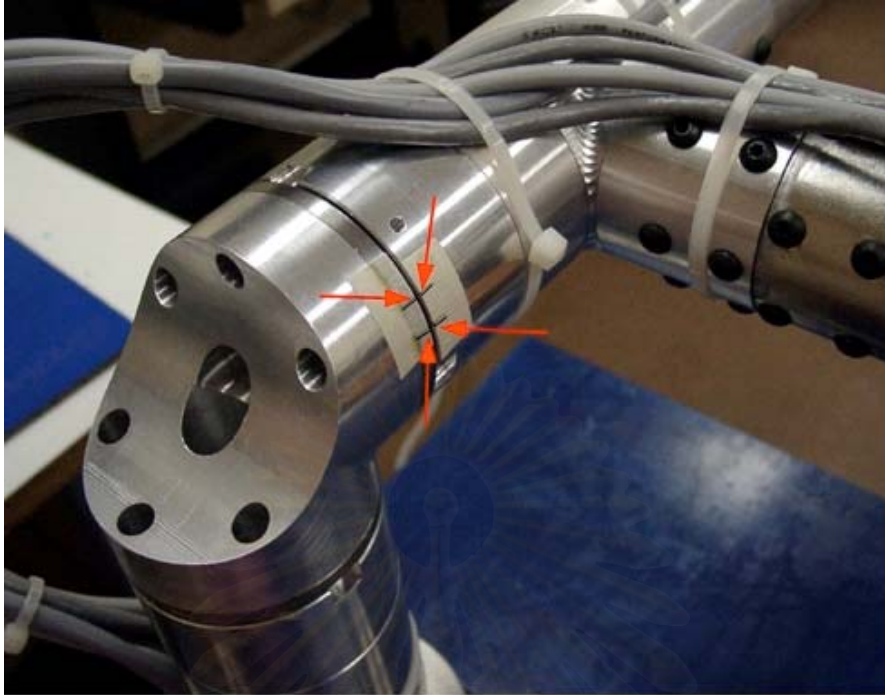


รูปที่ 8.1 รูปแสดงเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกน (ซียู-ซีเอ็มเอ็ม) ที่สร้างขึ้น

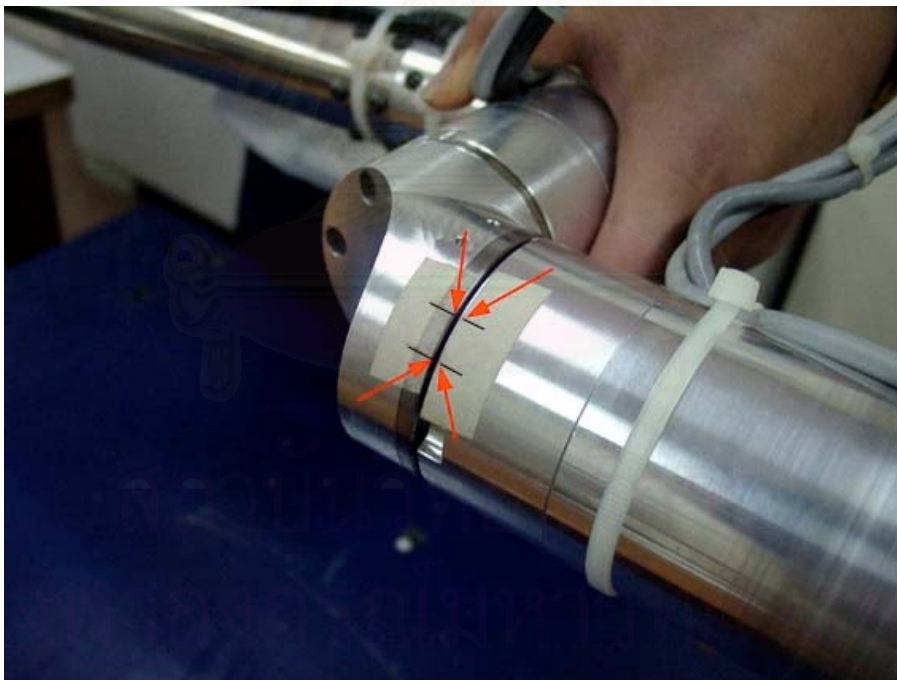
#### 8.1 การสอบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ในการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการของซียู-ซีเอ็มเอ็มนี้ จะทำตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในบทที่ 5 ดังนี้

ขั้นที่ 1 ทำการตั้งตำแหน่งศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ในแต่ละข้อต่อ โดยให้ทำการตั้งตำแหน่งศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ที่ละข้อต่อ ซึ่งที่แต่ละข้อต่อจะมีสัญลักษณ์แสดงตำแหน่งศูนย์ของแต่ละข้อต่อเอาไว้ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 8.2 และ 8.3



รูปที่ 8.2 รูปแสดงการตั้งตำแหน่งศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ของข้อต่อที่ 2



รูปที่ 8.3 รูปแสดงการตั้งตำแหน่งศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ของข้อต่อที่ 3

ขั้นที่ 2 ตั้งตำแหน่งทรงกลมสอบเทียบของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปให้อยู่ในขอบเขตที่ต้องการสอบเทียบ แล้วทำการวัดตำแหน่งจุดศูนย์กลางของทรงกลมสอบเทียบนี้ด้วยซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปพร้อมทั้งบันทึกข้อมูลไว้



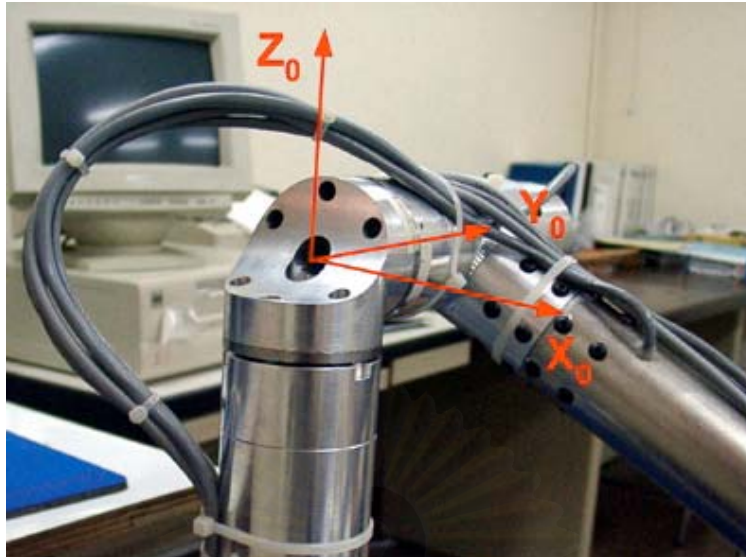
รูปที่ 8.4 รูปแสดงทรงกลมสอบเทียบตำแหน่งแรกที่ใช้ในการทดลอง

ขั้นที่ 3 วัดตำแหน่งโดยประมาณ ระหว่างจุดศูนย์กลางทรงกลมสอบเทียบตำแหน่งแรกกับตำแหน่งของจุดกำเนิดของระบบแกนซียู-ซีเอ็มเอ็มในแนวแกนทั้ง 3 แนว ( $x$ ,  $y$  และ  $z$ ) โดยในการทดลองนี้จะกำหนดตำแหน่งแกน 0 ไว้ดังในรูปที่ 8.5 และ 8.6



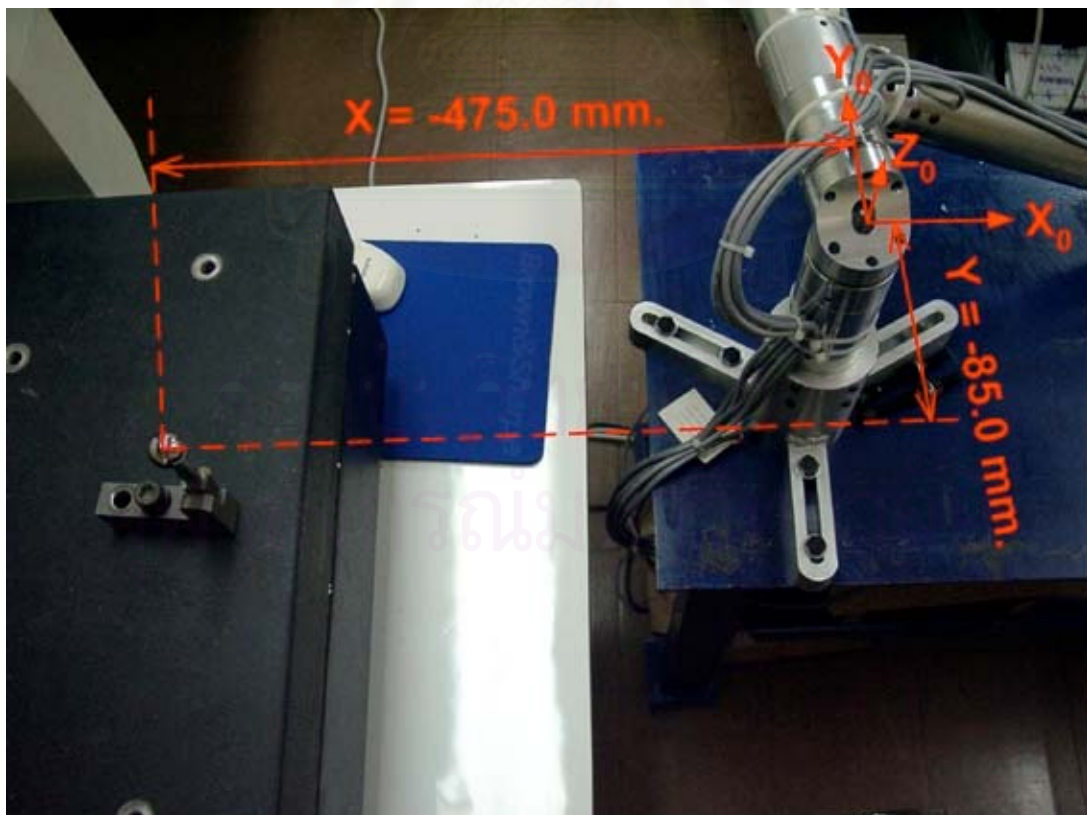
รูปที่ 8.5 รูปแสดงตำแหน่งแกนศูนย์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม



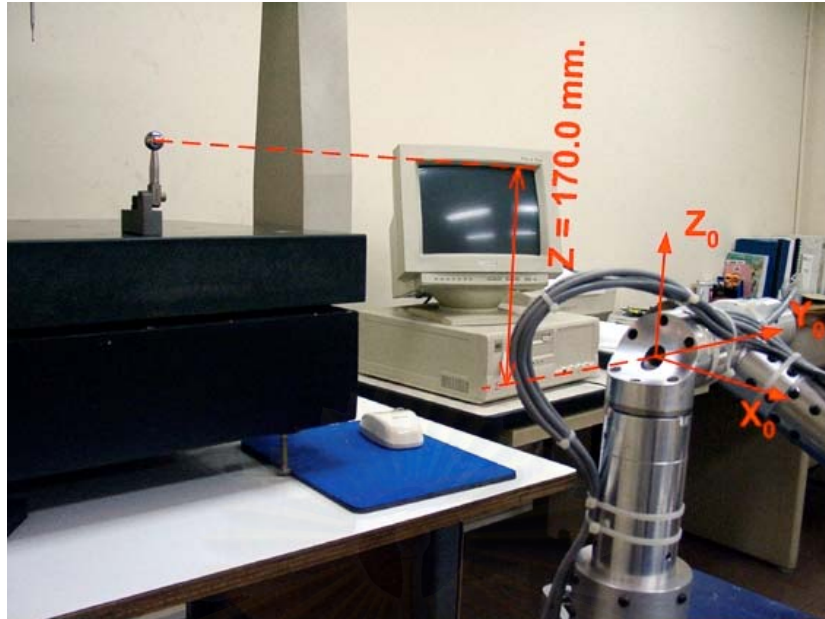


รูปที่ 8.6 รูปแสดงตำแหน่งแกนศูนย์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม (ภาพถ่าย)

จากการทดลอง ในการวัดตำแหน่งจะได้ผลดังนี้  
 ระยะในแนวแกน  $x$  เท่ากับ  $-475$  มิลลิเมตร  
 ระยะในแนวแกน  $y$  เท่ากับ  $-85$  มิลลิเมตร  
 ระยะในแนวแกน  $z$  เท่ากับ  $170$  มิลลิเมตร



รูปที่ 8.7 รูปแสดงระยะห่างในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ของทรงกลม เทียบกับจุดกำเนิดของซียู-ซีเอ็มเอ็ม



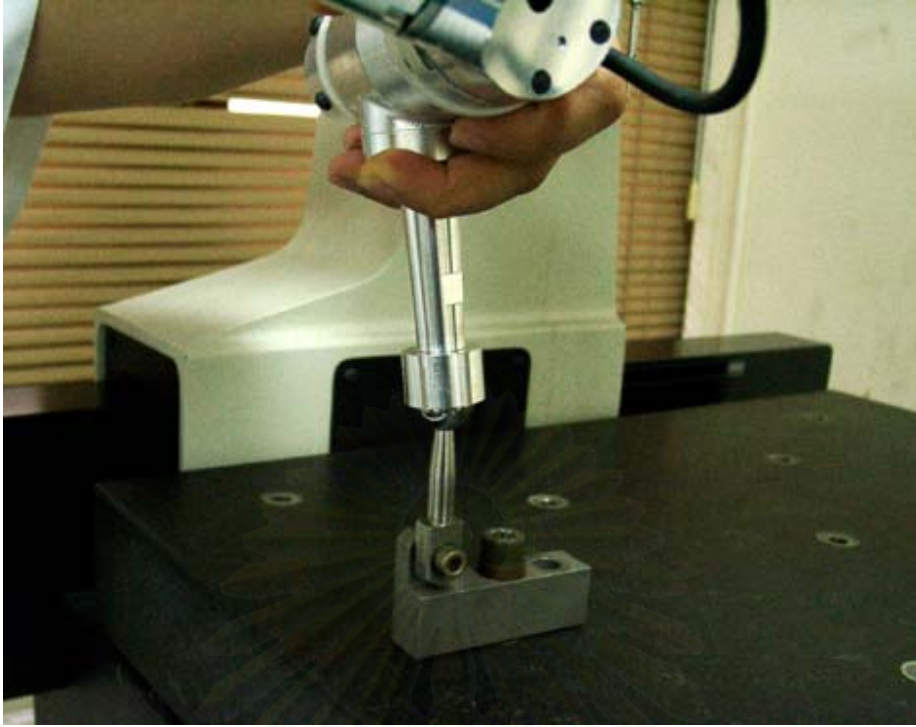
รูปที่ 8.8 รูปแสดงระยะห่างในแนวแกน  $z$  ของทรงกลม เทียบกับจุดกำเนิดของซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ขั้นที่ 4 นำปลายหัววัดที่มีลักษณะเป็นทรงกรวยของซียู-ซีเอ็มเอ็ม ดังในรูปที่ 8.9 มาวัดตำแหน่งของทรงกลมข้างต้น โดยการครอบหัววัดลงบนทรงกลมให้แนบสนิทแล้วจึงสั่งให้โปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มบันทึกข้อมูลของตำแหน่งข้อต่อทั้ง 6 เอาไว้ ทั้งนี้ที่ตำแหน่งทรงกลมตำแหน่งหนึ่งจะทำการวัดด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม 10 ครั้ง โดยครั้งที่หนึ่งจะวัดที่ตำแหน่งบนสุดของทรงกลม (North pole) และอีก 4 ครั้งถัดมาจะทำการวัดที่ตำแหน่งด้านข้างทั้ง 4 ของทรงกลม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.10, 8.11, 8.12, 8.13 และ 8.14 แล้วหลังจากนั้นจะทำการวัดอีก 5 ครั้ง โดยวัดเช่นเดียวกันกับ 5 ตำแหน่งแรก เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ของทรงกลมสอบเทียบทั้งหมด และลดความผิดพลาด

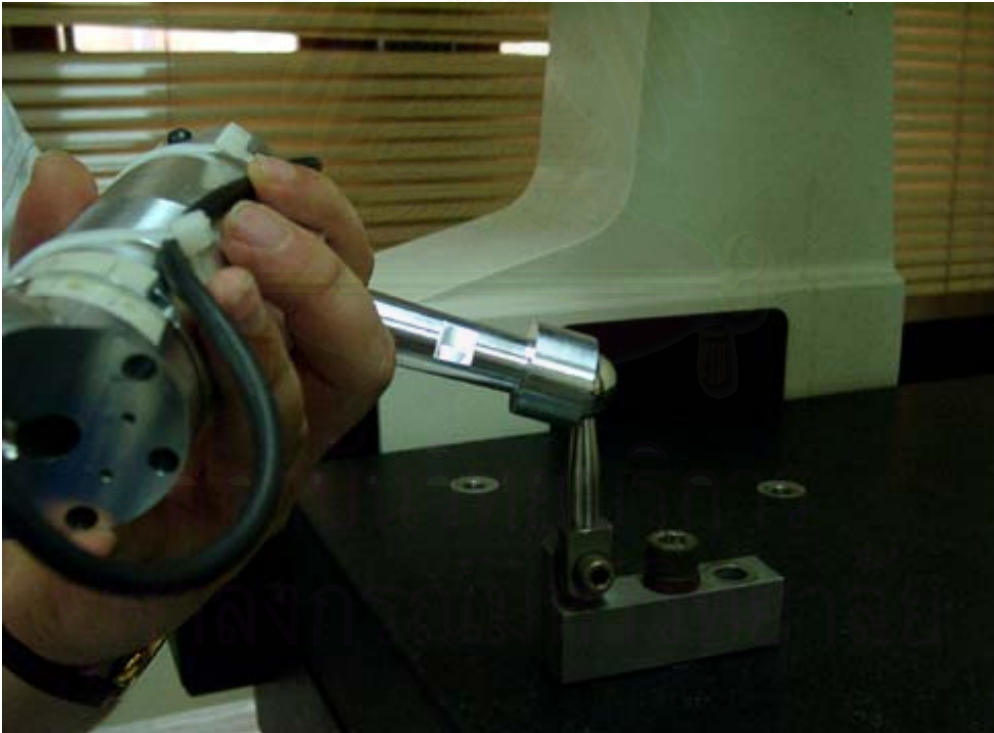


รูปที่ 8.9 รูปแสดงหัววัดของซียู-ซีเอ็มเอ็มที่มีลักษณะเป็นทรงกรวย





รูปที่ 8.10 รูปแสดงการวัดตำแหน่งทรงกลมที่ตำแหน่งบนสุด (North pole)



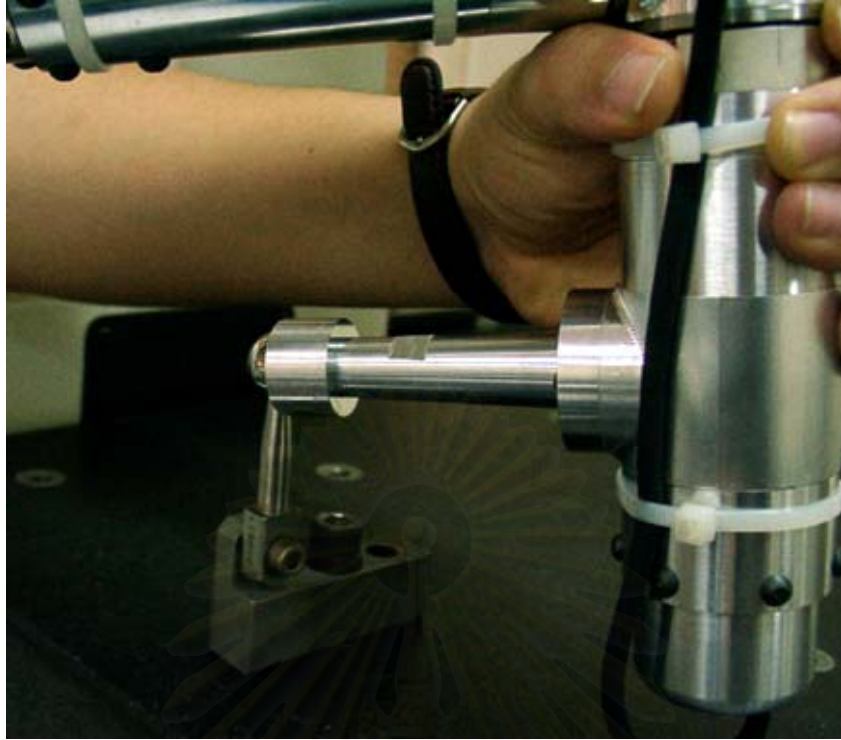
รูปที่ 8.11 รูปแสดงการวัดตำแหน่งทรงกลมในตำแหน่งที่ 1 (ด้านหน้า)



รูปที่ 8.12 รูปแสดงการวัดตำแหน่งทรงกลมที่ตำแหน่งที่ 2 (ด้านซ้าย)



รูปที่ 8.13 รูปแสดงการวัดตำแหน่งทรงกลมที่ตำแหน่งที่ 3 (ด้านหลัง)



รูปที่ 8.14 รูปแสดงการวัดตำแหน่งทรงกลมที่ตำแหน่งที่ 4 (ด้านขวา)

ขั้นที่ 5 ย้ายตำแหน่งทรงกลมไปยังตำแหน่งอื่นๆ โดยให้ครอบคลุมขอบเขตที่ต้องการสอบเทียบทั้งหมด แล้วทำตามขั้นตอนที่ 2 และ 4 โดยในการทดลองนี้จะทำการวัด โดยย้ายตำแหน่งทรงกลมทั้งหมด 30 ตำแหน่ง โดยข้อมูลที่วัดได้โดยเครื่องซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปจะแสดงไว้ในตารางที่ ก.1 ในภาคผนวก ก.

ขั้นที่ 6 จากข้อมูลที่วัดได้ในขั้นตอนที่ 3 สามารถทำการย้ายข้อมูลตำแหน่งจุดศูนย์กลางทรงกลมที่วัดได้จากการทดลองทั้ง 30 ตำแหน่งซึ่งอ้างอิงจากระบบแกนของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปไปยังระบบแกนของซียู-ซีเอ็มเอ็มได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$x_0 = -(475 + (y_n - y_1)) \quad [8.1]$$

$$y_0 = -(85 + (x_1 - x_n)) \quad [8.2]$$

$$z_0 = 170 + (z_n - z_1) \quad [8.3]$$

โดย  $x_n$  คือ ค่าตำแหน่งพิกัดในแกน  $x$  ของทรงกลมในระบบพิกัดของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป  
 $y_n$  คือ ค่าตำแหน่งพิกัดในแกน  $y$  ของทรงกลมในระบบพิกัดของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป  
 $z_n$  คือ ค่าตำแหน่งพิกัดในแกน  $z$  ของทรงกลมในระบบพิกัดของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป  
 $x_1$  คือ ค่าตำแหน่งพิกัดในแกน  $x$  ของทรงกลมตำแหน่งแรกในระบบพิกัดของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป

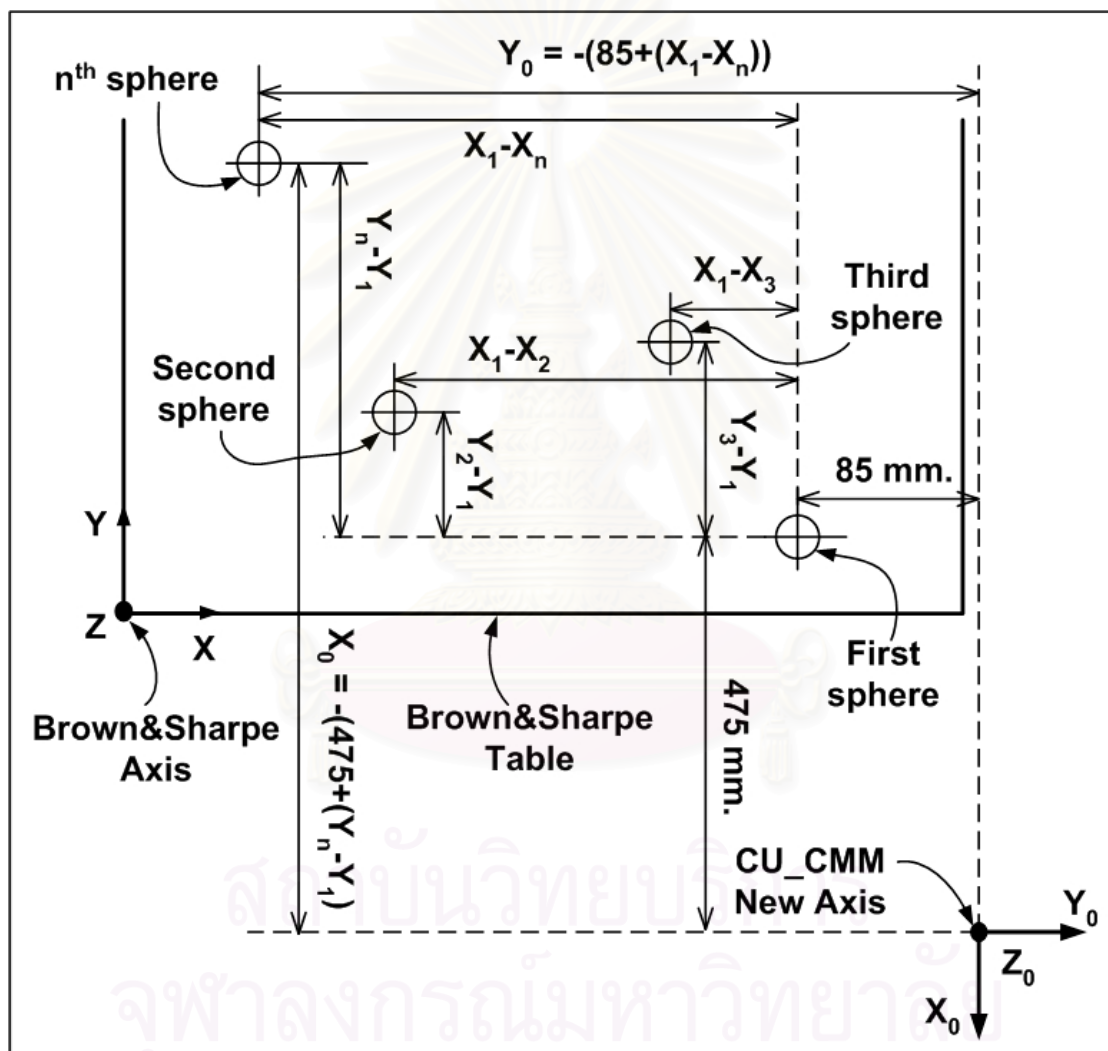
$y_I$  คือ ค่าตำแหน่งพิกัดในแกน  $y$  ของทรงกลมตำแหน่งแรกในระบบพิกัดของซีเอ็มเอ็มเอ็ม บราวน์แอนด์ชาร์ป

$z_I$  คือ ค่าตำแหน่งพิกัดในแกน  $z$  ของทรงกลมตำแหน่งแรกในระบบพิกัดของซีเอ็มเอ็มเอ็ม บราวน์แอนด์ชาร์ป

$x_0$  คือ ค่าตำแหน่งพิกัดในแกน  $x$  ของทรงกลมในระบบพิกัดใหม่ของซียู-ซีเอ็มเอ็มเอ็ม

$y_0$  คือ ค่าตำแหน่งพิกัดในแกน  $y$  ของทรงกลมในระบบพิกัดใหม่ของซียู-ซีเอ็มเอ็มเอ็ม

$z_0$  คือ ค่าตำแหน่งพิกัดในแกน  $z$  ของทรงกลมในระบบพิกัดใหม่ของซียู-ซีเอ็มเอ็มเอ็ม



รูปที่ 8.15 รูปแสดงความสัมพันธ์ของระบบแกนของซียู-ซีเอ็มเอ็มเอ็มกับซีเอ็มเอ็มเอ็ม บราวน์แอนด์ชาร์ป

ขั้นที่ 7 นำข้อมูลตำแหน่งพิกัดของทรงกลมสอบเทียบที่ย้ายแกนแล้วทั้ง 30 ตำแหน่งกับข้อมูลตำแหน่งมุมของทั้ง 6 ข้อต่อของซียู-ซีเอ็มเอ็มเอ็มที่วัดได้จากการทดลองทั้งหมด มาทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการด้วยฟังก์ชัน lsqcurvefit ในโปรแกรม



แมทแลบ โดยจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบเป็นค่าเริ่มต้นในการทำการถดถอย ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการทำการถดถอยจะเป็นไปดังตารางที่ 8.1 ดังนี้

ตารางที่ 8.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากการทำการถดถอย

พารามิเตอร์	ค่าตามแบบ (Drawing)	ค่าที่ได้จากการคำนวณ
$a_1$	0.0	-0.874770252556127
$a_2$	0.0	-1.68723239738407
$a_3$	0.0	0.105032812637346
$a_4$	0.0	0.0815077777913205
$a_5$	0.0	-0.421524677975757
$\alpha_1$	$3\pi/2$	4.7135267263665
$\alpha_2$	$3\pi/2$	4.71341475850807
$\alpha_3$	$\pi/2$	1.57166221537252
$\alpha_4$	$\pi/2$	1.57401380380973
$\alpha_5$	$3\pi/2$	4.71408244025327
$d_2$	135.0	135.252019492167
$d_3$	579.0	580.297062046014
$d_4$	117.25	118.13292899469
$d_5$	585.0	586.908687646274
$d_6$	104.0	104.389439152962
$x_p$	0.0	0.0321665049923916
$y_p$	-114.0	-114.473538350631
$z_p$	0.0	0.380640796327294
$\Delta\theta_1$	0.0	0.0628757467520299
$\Delta\theta_2$	0.0	-0.0204486909313669
$\Delta\theta_3$	0.0	0.0128507124898653
$\Delta\theta_4$	0.0	-0.10794224114477
$\Delta\theta_5$	0.0	0.0401855414591752
$\Delta\theta_6$	0.0	0.00997838580155113
$\alpha$	0.0	-0.0153220479897125



พารามิเตอร์	ค่าตามแบบ (Drawing)	ค่าที่ได้จากการคำนวณ
$\beta$	0.0	0.0110131853157142
$\gamma$	0.0	-0.108683419015928
$x_{0Origin}$	0.0	0.361277568526887
$y_{0Origin}$	0.0	0.461822429544153
$z_{0Origin}$	0.0	0.426340959389479

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ 8.1 นี้หากเป็นความยาวก็จะมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรแต่ถ้าหากเป็นค่ามุมก็จะมีหน่วยเป็นเรเดียน ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่คำนวณได้ในตารางข้างต้นจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบ โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งนั้นมาจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการผลิตชิ้นส่วนในแต่ละชิ้น อีกทั้งยังมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประกอบชิ้นงานรวมอยู่ด้วย

## 8.2 ค่าความถูกต้องของซียู-ซีเอ็มเอ็ม

เมื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของซียู-ซีเอ็มเอ็มได้แล้ว ในหัวข้อนี้จะทำการหาค่าความถูกต้องของซียู-ซีเอ็มเอ็มโดยจะตรวจสอบจากผลการทดลองวัดทรงกลมสอบเทียบที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของซียู-ซีเอ็มเอ็มในหัวข้อที่ 8.1 อีกทั้งจะทำการทดลองเพิ่ม โดยทำการวัดตำแหน่งทรงกลมเพิ่มอีก 5 ตำแหน่ง การหาค่าความถูกต้องในหัวข้อนี้จะใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของทรงกลมที่วัดตำแหน่งด้วยซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปเป็นตัวอ้างอิง จากนั้นก็นำมาเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของทรงกลมที่วัดด้วยซียู-ซีเอ็มเอ็มจากการทดลอง

### 8.2.1 ผลการทดลองที่ได้จากการสอบเทียบ

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของซียู-ซีเอ็มเอ็มที่หาได้แทนลงในสมการที่ใช้ในการหาตำแหน่งจุดปลายหัววัดของซียู-ซีเอ็มเอ็มในสมการที่ 5.19 แล้วจึงใช้สมการที่ 5.19 นี้ทำการแปลงค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อที่ใช้ในการทำการถอดถอยในหัวข้อที่แล้วไปเป็นค่าตำแหน่งพิกัดของจุดศูนย์กลางของทรงกลม จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลตำแหน่งของทรงกลมที่วัดได้จากซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป แต่เนื่องจากในการทดลองวัดตำแหน่งทรงกลมแต่ละตำแหน่งโดยซียู-ซีเอ็มเอ็มนั้นจะต้องทำการวัด 10 ครั้ง ดังนั้นค่าตำแหน่งพิกัดของจุดศูนย์กลางทรงกลมที่วัดด้วยซียู-ซีเอ็มเอ็มจึงจะใช้เป็นค่าเฉลี่ยแทน โดยจะแสดงไว้ในตารางที่ ก.2 ในภาคผนวก ก. สำหรับค่าความผิดพลาดระหว่างความยาวที่วัดได้จากซี

เอ็มเอ็มทั้งสองจะแสดงไว้ในตารางที่ 8.2 แต่เนื่องจากการจับคู่ตำแหน่งทรงกลมเพื่อเปรียบเทียบความยาวระหว่างทรงกลมแต่ละตำแหน่งทั้ง 30 ตำแหน่งนั้นสามารถที่จะจับคู่ได้ถึง 435 คู่ ดังนั้นในตารางที่ 8.2 จึงจะแสดงข้อมูลการเปรียบเทียบเพียงบางตำแหน่งเท่านั้น

ตารางที่ 8.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการวัดของซียู-ซีเอ็มเอ็ม  
กับซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป

ตำแหน่ง ทรงกลม	ความยาวที่วัดได้จากซีเอ็มเอ็ม บราวน์แอนด์ชาร์ป (มิลลิเมตร)	ความยาวที่วัดได้จากซียู-ซี เอ็มเอ็ม (มิลลิเมตร)	ค่าความผิดพลาด (มิลลิเมตร)
1 กับ 21	263.4378	263.4844	0.0466
2 กับ 17	258.6525	258.7026	0.0501
3 กับ 25	189.6516	189.5895	-0.0621
4 กับ 9	210.4361	210.4164	-0.0197
5 กับ 20	218.0888	218.1329	0.0441
6 กับ 15	220.2522	220.2034	-0.0488
7 กับ 14	173.4846	173.3873	-0.0973
8 กับ 24	208.9195	208.9360	0.0165
10 กับ 13	113.5635	113.5914	0.0279
11 กับ 27	181.0480	181.0720	0.0240
12 กับ 23	128.9286	128.8694	-0.0592
16 กับ 28	264.4264	264.4686	0.0422
18 กับ 19	27.3751	27.4010	0.0259
22 กับ 26	114.6263	114.6013	-0.0250
29 กับ 30	110.9317	110.8721	-0.0596

จากการเปรียบเทียบความยาวระหว่างจุดศูนย์กลางทรงกลมทั้ง 30 ตำแหน่ง จะพบว่าค่าความผิดพลาดของทุกตำแหน่งจะมีค่าน้อยกว่า +/-100 ไมโครเมตร โดยมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 99 ไมโครเมตร และค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดของทุกตำแหน่งจะมีค่าเท่ากับ 39 ไมโครเมตร

### 8.2.2 ผลการทดลองจากการวัดตำแหน่งทรงกลมเพิ่มอีก 5 ตำแหน่ง

การทดลองนี้จะเป็นการทดลองเพื่อจำลองการใช้งานจริงของซียู-ซีเอ็มเอ็ม ดังนั้นในการทดลองนี้จะทำการทดลองโดยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการเปิดเครื่องจนกระทั่งเครื่องอยู่ในสถานะที่พร้อมใช้งาน แล้วจึงทำการวัดตำแหน่งจุดศูนย์กลางทรงกลมสอบเทียบด้วยซียู-ซีเอ็มเอ็มและซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป จำนวน 5 ตำแหน่ง จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบค่าความผิดพลาดโดยจะใช้ค่าที่วัดได้จากซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปเป็นค่าในการอ้างอิง ซึ่งจะมีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 ตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ทั้ง 6 ข้อต่อตามสัญลักษณ์ที่ได้กำหนดไว้

ขั้นที่ 2 นำซียู-ซีเอ็มเอ็มไปยังตำแหน่งโฮมของเครื่องเพื่อหาค่าความเหลื่อมของตำแหน่งมุมของทั้ง 6 ข้อต่อ ตามวิธีที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 7 โดยในที่นี้จะใช้ทรงกลมตำแหน่งที่ 30 จากการทดลองในหัวข้อที่ 8.1 เป็นตำแหน่งโฮมเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่รู้ค่าพิกัดซึ่งอ้างอิงจากระบบพิกัดของซียู-ซีเอ็มเอ็มได้อย่างแม่นยำ และจะทำการวัดตำแหน่งโฮมนี้ 10 ครั้ง (เพื่อให้ครอบคลุมและลดความผิดพลาดในการวัด) ซึ่งจากการทดลองจะได้ผลเป็นค่าความเหลื่อมของตำแหน่งมุมของทั้ง 6 ข้อต่อ ดังในตารางที่ 8.3 ดังนี้

ตารางที่ 8.3 ตารางแสดงค่าความเหลื่อมของตำแหน่งมุมทั้ง 6 ข้อต่อที่ได้จากการคำนวณ

ข้อต่อที่	ค่าความเหลื่อม (เรเดียน)
1	0.0552479622730213
2	-0.0149716427633061
3	0.00933186181810061
4	-0.110264219506858
5	0.0328578741076362
6	0.0145543466737549

นำค่าความเหลื่อมที่คำนวณได้ใส่ลงในสมการที่ใช้คำนวณหาตำแหน่งพิกัดจุดปลายหัววัดในโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม เพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดของตำแหน่งมุมของทั้ง 6 ข้อต่อ ที่เกิดจากการตั้งค่าศูนย์ของเอนโค้ดเดอร์ผิดพลาด

ขั้นที่ 3 ตั้งทรงกลมสอบเทียบบนฐานของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปโดยให้อยู่ในขอบเขตการวัดของซียู-ซีเอ็มเอ็มที่ได้ทำการสอบเทียบไปแล้ว แล้วทำการวัดตำแหน่งทรงกลมนี้ด้วยซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปพร้อมทั้งจดบันทึกค่าเอาไว้

ขั้นที่ 4 วัดตำแหน่งทรงกลมดังกล่าวอีกครั้งด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม โดยทำการวัดทั้งหมด 10 ตำแหน่งเช่นเดียวกันกับการวัดในการทดลองที่ 8.1 พร้อมทั้งบันทึกค่าตำแหน่งที่วัดได้ด้วยโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม ซึ่งในการทดลองนี้สามารถใช้โปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มทำการบันทึกค่าที่เป็นตำแหน่งพิกัดในระบบพิกัดฉากได้ทันที

ขั้นที่ 5 ย้ายตำแหน่งทรงกลมไปยังตำแหน่งอื่นๆ อีก 4 ตำแหน่งแล้วทำตามขั้นตอนที่ 3 และ 4 โดยให้ครอบคลุมขอบเขตการวัดของซียู-ซีเอ็มเอ็มที่ได้ทำการสอบเทียบไปแล้ว

ค่าตำแหน่งพิกัดของจุดศูนย์กลางทรงกลมสอบเทียบที่วัดได้จากซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปจะแสดงไว้ในตารางที่ 8.4 ส่วนค่าตำแหน่งพิกัดที่วัดได้จากซียู-ซีเอ็มเอ็มจะแสดงไว้ในตารางที่ 8.5 โดยค่าตำแหน่งพิกัดในตารางนี้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดทั้งหมด 10 ครั้งเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 8.2.1

ตารางที่ 8.4 ตารางแสดงตำแหน่งทรงกลมสอบเทียบที่วัดได้จากซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป

ตำแหน่ง ทรงกลม	ตำแหน่งพิกัดทรงกลม (มิลลิเมตร)		
	$x$	$y$	$z$
1	301.9101	19.4681	-298.0206
2	174.5663	26.1750	-298.0213
3	34.1284	18.5003	-298.0143
4	104.4597	119.2738	-298.0207
5	181.4211	178.7700	-298.0253

ตารางที่ 8.5 ตารางแสดงตำแหน่งทรงกลมสอบเทียบที่วัดได้จากซียู-ซีเอ็มเอ็ม (ค่าเฉลี่ย)

ตำแหน่ง ทรงกลม	ตำแหน่งพิกัดทรงกลม (มิลลิเมตร)		
	$x$	$y$	$z$
1	-465.1777	-118.3412	170.6548
2	-471.7194	-245.6254	170.6112
3	-464.0215	-386.1395	170.6060

ตำแหน่ง ทรงกลม	ตำแหน่งพิกัดทรงกลม (มิลลิเมตร)		
	$x$	$y$	$z$
4	-564.7938	-315.8511	170.5882
5	-624.3017	-238.9468	170.5109

ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองในตารางที่ 8.4 และ 8.5 โดยใช้ความยาวระหว่างจุดศูนย์กลางทรงกลมที่วัดโดยซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปเป็นตัวอ้างอิง แล้วนำมาเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากซียู-ซีเอ็มเอ็ม ซึ่งจะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 8.6 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการวัดความยาวระหว่างจุดศูนย์กลางทรงกลมทั้ง 5 ตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็มกับซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป

ตำแหน่ง ทรงกลม	ความยาวที่วัดได้จากซีเอ็มเอ็ม บราวน์แอนด์ชาร์ป (มิลลิเมตร)	ความยาวที่วัดได้จากซียู-ซี เอ็มเอ็ม (มิลลิเมตร)	ค่าความผิดพลาด (มิลลิเมตร)
1 กับ 2	127.5203	127.4522	-0.0681
1 กับ 3	267.7834	267.8008	0.0174
1 กับ 4	221.2416	221.2092	-0.0324
1 กับ 5	199.7366	199.6652	-0.0714
2 กับ 3	140.6474	140.7248	0.0774
2 กับ 4	116.5432	116.5954	0.0522
2 กับ 5	152.7489	152.7285	-0.0204
3 กับ 4	122.8893	122.8638	-0.0255
3 กับ 5	217.6730	217.6130	-0.0600
4 กับ 5	97.2772	97.2392	-0.0380

จากตารางที่ 8.6 จะเห็นว่าการเปรียบเทียบความยาวระหว่างจุดศูนย์กลางทรงกลมทั้ง 5 ตำแหน่ง จะพบว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของทุกตำแหน่งจะมีค่าน้อยกว่า +/-100 ไมโครเมตร โดยมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 77 ไมโครเมตร และค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดของทุกตำแหน่งจะมีค่าเท่ากับ 46 ไมโครเมตร



### 8.3 ตัวอย่างการใช้งานชียู-ซีเอ็มเอ็มในการถอดแบบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นตัวอย่างการนำชียู-ซีเอ็มเอ็มมาใช้ในการวัดค่าตำแหน่งพิกต์ของพื้นผิวชิ้นงานต้นแบบ จากนั้นจะนำข้อมูลตำแหน่งพิกต์ที่ได้ไปสร้างเป็นแบบในโปรแกรมคาเทีย ซึ่งในที่นี้จะใช้แบบไม้รูปเมาส์ (Mouse) คอมพิวเตอร์ดังในรูปที่ 8.16 เป็นต้นแบบในการวัด แต่เพื่อให้จุดพิกต์ที่วัดได้มีความเป็นระเบียบและกระจายอย่างสม่ำเสมอ จึงจะต้องมีการตีตารางบนพื้นผิวที่จะทำการวัดดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.16 เช่นกัน



รูปที่ 8.16 รูปแสดงแบบไม้รูปเมาส์ที่ใช้เป็นต้นแบบ

เมื่อทำการตีตารางบนพื้นผิวชิ้นงานเสร็จแล้วก็จะต้องทำการยึดชิ้นงานต้นแบบเอาไว้กับโต๊ะของซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ซาร์ปดังในรูปที่ 8.17



รูปที่ 8.17 รูปแสดงการจับยึดชิ้นงาน

ทำการวัดตำแหน่งพิกัดพื้นผิวของชิ้นงานต้นแบบด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มโดยในครั้งนี้จะใช้หัววัดแบบปลายเข็ม (Point probe) ในการวัด ดังแสดงในรูปที่ 8.18 และ 8.19



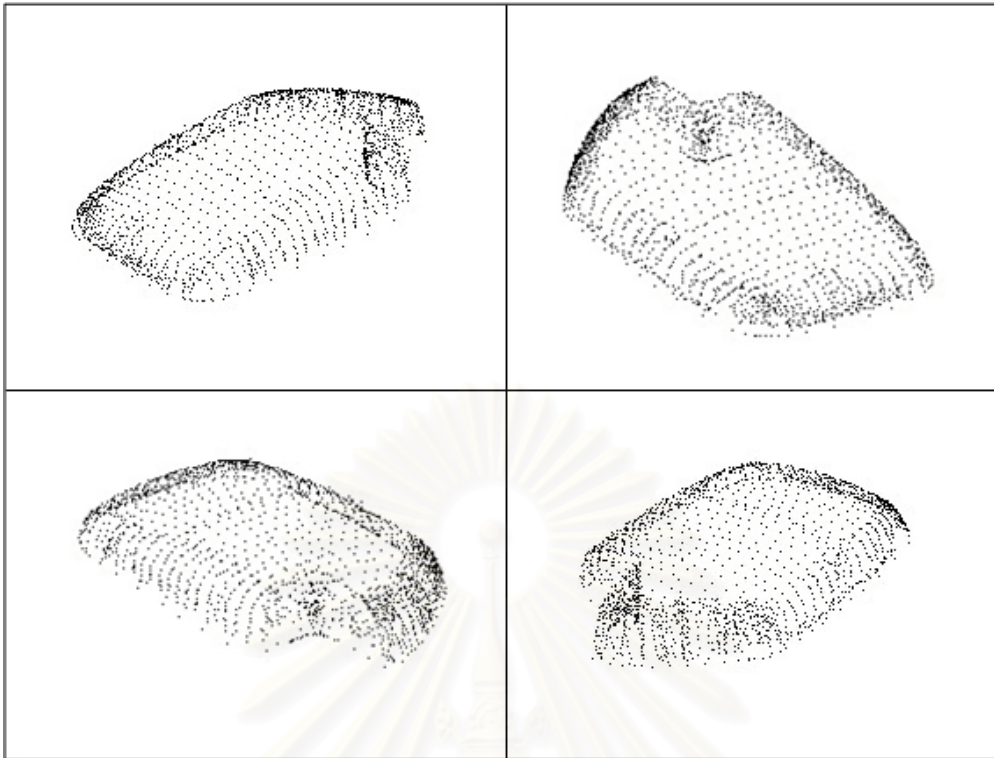
รูปที่ 8.18 รูปแสดงหัววัดแบบปลายเข็ม



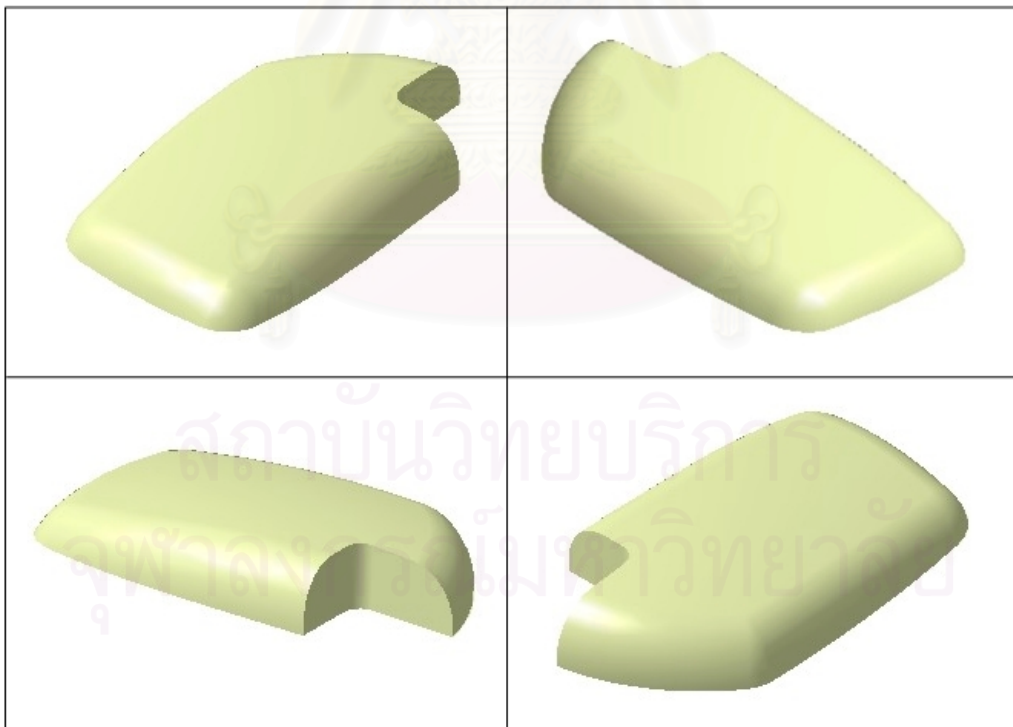
รูปที่ 8.19 รูปแสดงการวัดพื้นผิวของชิ้นงานด้วยหัววัดแบบปลายเข็ม

เมื่อทำการวัดตำแหน่งพื้นผิวของชิ้นงานต้นแบบอย่างทั่วถึงและเพียงพอต่อการนำไปใช้งานแล้ว ให้ทำการบันทึกข้อมูลที่ได้โดยโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม โดยข้อมูลที่ถูกเก็บบันทึกจะถูกเก็บบันทึกให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์นามสกุล .CGO\_ASCII ซึ่งเป็นรูปแบบไฟล์รูปแบบหนึ่งที่โปรแกรมคาเทียสามารถนำไปใช้ในการสร้างแบบต่อไปได้

หลังจากได้ไฟล์ข้อมูลที่เก็บค่าตำแหน่งพิกัดได้แล้ว จึงส่งข้อมูลนี้ไปยังโปรแกรมคาเทีย โดยข้อมูลที่ส่งเข้าไปในโปรแกรมคาเทียนี้จะแสดงผลออกเป็นกลุ่มก้อนของจุด (point cloud) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.20 และจากกลุ่มก้อนของจุดที่นำเข้ามา สามารถใช้โปรแกรมคาเทียสร้างพื้นผิวและแบบจากกลุ่มก้อนของจุดเหล่านี้ได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.21



รูปที่ 8.20 รูปแสดงกลุ่มก้อนของจุดในโปรแกรมคาเทียที่ได้จากการวัดตำแหน่งพื้นผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 8.21 รูปแสดงพื้นผิวและแบบที่ได้จากกลุ่มก้อนของจุด



## บทที่ 9

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการสร้างเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกน โดยจะเป็นการกล่าวรวบรวมสาระสำคัญตั้งแต่บทที่ 2 ถึงบทที่ 8 รวมทั้งข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

#### 9.1 สรุปผลวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพัฒนาและสร้างเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกนที่มีค่าความถูกต้อง 100 ไมโครเมตร และมีขอบเขตการทำงาน 500x500x300 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เพื่อใช้ร่วมในกระบวนการวิศวกรรมย้อนกลับ (reverse engineering) โดยอาศัยหลักการทางจลนศาสตร์ ในการแปลงค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อของเครื่องวัดพิกัดไปเป็นค่าตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัดในระบบพิกัดฉาก ค่าตำแหน่งพิกัดที่ได้จะถูกเก็บอยู่ในรูปแบบมาตรฐานดังเช่นรูปแบบซีจีไอแอสกี (CGO\_ASCII) ซึ่งเป็นรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ในโปรแกรมแคด (CAD) ทั่วๆไปได้

ค่าความถูกต้องของเครื่องซึ่งทดสอบโดยการวัดตำแหน่งพิกัดระหว่างจุดศูนย์กลางทรงกลม 2 จุด เปรียบเทียบกับผลการวัดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปซึ่งมีค่าความถูกต้องถึง  $\pm 0.3$  ไมโครเมตร โดยในการทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. ทำการวัดตำแหน่งทรงกลม 30 ตำแหน่งเพื่อใช้ในการสอบเทียบ แล้วจากนั้นจึงนำค่าตำแหน่งพิกัดของทรงกลมที่วัดได้ทั้ง 30 ตำแหน่งมาคำนวณหาระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางของทรงกลมทั้งหมดเป็นคู่ๆ ซึ่งจะได้ทั้งหมด 435 คู่ แล้วนำค่าระยะทางที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับผลการวัดที่ได้จากซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป
  2. ทำการทดลองโดยเริ่มตั้งแต่เปิดเครื่องวัดพิกัดขึ้นมาใหม่แล้วทดลองเข้าไฮมเครื่อง จากนั้นจึงทำการวัดตำแหน่งทรงกลม 5 ตำแหน่ง แล้วนำผลการวัดที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวัดที่ได้จากซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปเช่นเดียวกันกับการทดลองแบบแรก
- จากผลการทดลองทั้ง 2 แบบพบว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีค่าสูงสุดไม่เกิน 100 ไมโครเมตร

นอกจากการทดสอบเพื่อหาค่าความถูกต้องของเครื่องแล้วในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการทดลองวัดพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างพร้อมทั้งนำผลการวัดที่ได้ไปสร้างเป็นพื้นผิวในโปรแกรมคาเทีย พบว่าเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกนนี้สามารถวัดพื้นผิวที่มีความซับซ้อนได้ดีกว่าเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบอื่นๆ ตัวอย่างเช่นเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบที่ใช้แถบแสงเลเซอร์ในการวัด

เนื่องจากมีองศาอิสระที่มากกว่า อีกทั้งยังไม่มีปัญหาที่เกิดจากคุณสมบัติการสะท้อนแสงและความชันของพื้นผิวชิ้นงานอีกด้วย แต่เนื่องจากเครื่องวัดพิทัก 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกนนี้เป็นเครื่องวัดที่จะต้องทำการวัดทีละจุดจึงทำให้ต้องใช้เวลาในการวัดมากกว่าเครื่องวัดแบบใช้แถบแสงเลเซอร์มาก

## 9.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากตำแหน่งพิทักจุดปลายหัววัดคำนวณจากเมตริกซ์การแปลง ดังนั้นค่าความถูกต้องส่วนหนึ่งจึงขึ้นอยู่กับความแม่นยำของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของโครงสร้างของเครื่องที่อยู่ภายในเมตริกซ์การแปลง สำหรับในงานวิจัยนี้อาศัยการหาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ด้วยการทำการถดถอยซึ่งเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ทางอ้อมซึ่งอาจจะเกิดความผิดพลาดทั้งจากการคำนวณและการทดลองได้บ้าง ดังนั้นเพื่อการพัฒนาให้ค่าความถูกต้องในการวัดมากขึ้นจึงอาจจะกระทำดังต่อไปนี้

1. ทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องจากการวัดโดยตรงด้วยเครื่องมือที่แม่นยำ
2. เนื่องจากในการทำการถดถอยในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดตำแหน่งจุดปลายหัววัดของเครื่องโดยใช้หัววัดแบบทรงกรวยครอบลงบนทรงกลมสอบเทียบจึงอาจจะเกิดความผิดพลาดในการวัดขึ้นได้ง่าย ซึ่งจะทำให้ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ผิดพลาดไป ดังนั้นหากสามารถวัดตำแหน่งจุดปลายของหัววัดได้แม่นยำกว่านี้ก็จะทำให้ค่าความถูกต้องของเครื่องดีขึ้น
3. พัฒนาแนวทางการสอบเทียบหรือแนวทางในการหาค่าพารามิเตอร์ในแบบอื่นๆ ที่มีความแม่นยำมากขึ้น

และจากการทดสอบวัดพื้นผิวชิ้นงานต้นแบบพบว่า เนื่องจากหัววัดที่ใช้เป็นแบบปลายเข็มจึงทำให้การวัดพื้นผิวไม่สามารถวัดได้อย่างรวดเร็วเพราะต้องนำหัววัดให้ไปแตะที่ผิวชิ้นงานด้วยแรงที่พอดีหากมากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเสียหาย หากน้อยไปก็อาจจะสัมผัสไม่ถูกผิวของชิ้นงาน ดังนั้นหากมีการพัฒนาหัววัดแบบไม่มีการสัมผัส (non-contacting probe) เพื่อมาใช้ร่วมกันได้ก็จะสามารถทำให้การวัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น



## รายการอ้างอิง

1. John A. Bosch. Coordinate Measuring Machines and Systems. New York: Marcel Dekker, 1995.
2. Ernest O. Doebelin. Measurement Systems Application and Design. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
3. John J. Craig. Introduction to Robotics Mechanics and Control. 2<sup>nd</sup> ed. USA: Addison-Wesley, 1989.
4. Steven C. Chapra and Raymond P. Canale. Numerical Methods for Engineers. 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
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.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

ตารางที่ ก.1 และก.2 เป็นตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อสอบเทียบซียู-ซีเอ็มเอ็มตามขั้นตอนในบทที่ 8 โดยในตารางที่ ก.1 จะเป็นข้อมูลตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของทรงกลมสอบเทียบที่วัดโดยเครื่องซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ปที่ใช้ในการสอบเทียบทั้ง 30 ตำแหน่ง ส่วนในตารางที่ ก.2 จะเป็นข้อมูลของตำแหน่งพิกัดของจุดศูนย์กลางทรงกลมสอบเทียบที่วัดโดยซียู-ซีเอ็มเอ็มทั้ง 30 ตำแหน่งที่ได้จากการทดลองเช่นเดียวกันกับในตารางที่ ก.1 แต่ค่าตำแหน่งพิกัดในตารางนี้จะได้จากค่าเฉลี่ยจากการวัดทั้ง 10 ครั้ง

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงข้อมูลตำแหน่งทรงกลมสอบเทียบ  
ที่วัดได้จากซีเอ็มเอ็มบราวน์แอนด์ชาร์ป

ตำแหน่งทรงกลม	ตำแหน่งพิกัดทรงกลม (มิลลิเมตร)		
	$x$	$y$	$z$
1	335.2444	29.4281	-298.5631
2	325.2639	24.2293	-298.5664
3	307.1681	21.1081	-301.4955
4	283.4442	21.5396	-301.5398
5	301.4754	47.0423	-301.5393
6	24.0893	64.0812	-301.5311
7	41.5903	58.5404	-301.5301
8	50.8094	32.9464	-298.0313
9	73.1162	28.2762	-301.2030
10	62.0514	43.2648	-301.2153
11	116.2564	21.1998	-301.2169
12	131.1856	43.6542	-301.2240
13	173.6316	64.3961	-301.2267
14	215.0484	55.5246	-301.2260
15	241.4729	28.6509	-301.2240
16	71.6818	163.7574	-301.2247
17	101.2767	153.5498	-301.2259
18	120.9107	119.8271	-301.2264

ตำแหน่งทรงกลม	ตำแหน่งพิกัดทรงกลม (มิลลิเมตร)		
	$x$	$y$	$z$
19	116.0740	92.8827	-301.2248
20	84.4071	68.1126	-301.2218
21	133.3674	198.6559	-301.2310
22	154.3658	169.7606	-301.2462
23	182.0211	162.1377	-301.2474
24	208.2596	170.2287	-301.2510
25	225.7091	192.3743	-301.2494
26	268.4817	158.9555	-301.2498
27	261.4096	129.3606	-298.0265
28	319.6258	120.6302	-298.0259
29	232.3050	52.5708	-305.0149
30	335.4655	145.7278	-305.0225

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงข้อมูลตำแหน่งทรงกลมสอบเทียบที่วัดได้จากซียู-ซีเอ็มเอ็ม (ค่าเฉลี่ย)

ตำแหน่งทรงกลม	ตำแหน่งพิกัดทรงกลม (มิลลิเมตร)		
	$x$	$y$	$z$
1	-474.9240	-84.9733	169.9391
2	-469.7775	-94.9262	170.0048
3	-466.7751	-113.0498	166.9801
4	-467.0577	-136.7695	166.9560
5	-492.6639	-118.7162	166.9911
6	-509.6460	-396.1172	166.9498
7	-504.1048	-378.5789	166.9712
8	-478.5240	-369.4305	170.5485
9	-473.8760	-347.0751	167.3402
10	-488.8271	-358.2274	167.3730
11	-466.7623	-304.0151	167.3780
12	-489.2796	-289.0551	167.3747
13	-509.9480	-246.6169	167.3761

ตำแหน่งทรงกลม	ตำแหน่งพิกัดทรงกลม (มิลลิเมตร)		
	$x$	$y$	$z$
14	-501.0569	-205.2188	167.3417
15	-474.2347	-178.7803	167.4345
16	-609.2776	-348.6281	167.3003
17	-599.0920	-318.9744	167.3139
18	-565.3982	-299.3744	167.3153
19	-538.4169	-304.1518	167.3211
20	-513.6898	-335.8331	167.3578
21	-644.1869	-286.8826	167.3476
22	-615.3490	-265.8785	167.3083
23	-607.6868	-238.1921	167.3408
24	-615.8274	-211.9756	167.3898
25	-637.9634	-194.5274	167.3282
26	-604.5323	-151.7889	167.3352
27	-574.9408	-158.8446	170.5451
28	-566.2085	-100.6479	170.5810
29	-498.2088	-187.9358	163.5454
30	-591.3059	-84.7976	163.5410

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตติศักดิ์ บุญยังคุณ เกิดเมื่อวันที่ 3 ตุลาคม พ.ศ.2518 เป็นชาวกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนวัดพลับพลาชัย เมื่อสำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่หก ได้สอบเข้าศึกษาต่อในระดับมัธยมที่โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย หลังจากนั้น ได้เข้าศึกษาต่อในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2542



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย